

TARIM, ORMAN VE SU BİLİMLERİNDE MODERN VE ÇAĞDAŞ ARAŞTIRMALAR



All Sciences Academy

TARIM, ORMAN VE SU BİLİMLERİNDE MODERN VE ÇAĞDAŞ ARAŞTIRMALAR

Editör

Prof. Dr. NİGAR YARPUZ BOZDOĞAN





Tarım, Orman ve Su Bilimlerinde Modern ve Çağdaş Araştırmalar

Editör: Prof. Dr. NİGAR YARPUZ BOZDOĞAN

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Ağustos 2026

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-8839-73-9

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	5
Bağcılıkta Akıllı Tarım Uygulamaları	
<i>Bahattin AKDEMİR</i>	
2. Bölüm	26
Kesikli (Batch) Anaerobik Fermantasyon Sistemlerinin Temel Özellikleri ve Çalışma Prensipleri	
<i>Cevat FİLİKCİ, Tamer MARAKOĞLU</i>	
3. Bölüm	52
Dünyada Tarımsal Yayında Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin Kullanımı	
<i>Hacer ÇELİK ATEŞ</i>	
4. Bölüm	65
Su Ürünlerinde Raf Ömrü ve Kalite Korunumu: Esansiyel Yağ Katkılı Aktif Ambalaj Uygulamaları	
<i>Muhammed KARTAL, Pınar OĞUZHAN YILDIZ</i>	

Bağcılıkta Akıllı Tarım Uygulamaları

Bahattin AKDEMİR¹

1- Prof.Dr.; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü.
bakdemir@nku.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9872-1823

ÖZET

Hassas tarım; bilgi teknolojileri, uydu konumlama sistemleri, uzaktan algılama ve yaklaşım sensörleri aracılığı ile toplanan verilerin kullanılması ile gerçekleştirilen bütünleşik çiftlik yönetimidir. Bağlarda konuma bağlı yersel değişkenliğin dikkate alınarak tarımsal girdilerin uygulanması durumunda yüksek verim ve kalitede üzüm elde edilmesi olasıdır. Ayrıca tarla trafiği gübrelerin farklı zamanlarda uygulanmasından dolayı artmaktadır.

Bu çalışmada bağcılıkta hassas tarımın uygulanma olanakları daha önce yapılmış olan çalışmalar dikkat alınarak değerlendirilmiştir. Hassas tarımla ilgili değişken oranlı, gübreleme, değişken oranlı ilaçlama, cerim haritalama, uzaktan algılama sistemlerinin kullanımı ve coğrafi bilgi sistemleri ile ilgili konular açıklanmıştır.

Araştırma sonuçlarına göre; hassas tarımın bağcılıkta kullanılması ile ilgili teknolojileri incelemişler ve yersel değişkenliği esas alarak çalışan sistemlerin kullanılması ile hem kalitede hem de verimde aynı anda artış sağlandığını belirtmişleridir. Omcanın taç boyutunu elektronik olarak algılayarak değişken oranlı ilaçlama uygulayan makineleri test etmişlerdir ve %58 tasarruf sağlandığını belirtmişlerdir. Sensörler, üzümün hasat edilebilmesi için göreceli olarak daha erken geliştirilmişlerdir. Avustralya'da ve Amerika'da 1999'da verim ölçme sensörleri kullanılmıştır.

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerinde etkisini giderek arttırdığı bir gelecek bizi beklerken, çevreye duyarlı üretim yöntemlerini içeren akıllı tarım/hassas tarım yöntemlerinin üretimde kademeli olarak uygulanması gerekmektedir. Bunun için küçük çiftçilerin öncelikle yersel değişkenliğin saptanmasına yönelik hizmet veren şirketlerden abonelik yoluyla verimde, toprak ve yapraktaki bitki besin elementlerinin değişimini, ürün kalitesindeki değişimlerin saptanması ve değişken oranlı gübreleme ve ilaçlamaya yönelik hizmetleri kullanmaları ile başlamalarını önerilebilir. Orta ve büyük işletmeler için otomatik dümenleme, değişken oranlı ilaçlama, gübreleme, toprak ve bitki sensörlerinin satın alınarak kullanılmasını bu işletmeler için daha ekonomik olacağı önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler – Bağcılık, akıllı tarım, değişken oranlı uygulama, verim haritalama, sensörler

GİRİŞ

Hassas tarım; bilgi teknolojileri, uydu konumlama sistemleri, uzaktan algılama ve yaklaşım sensörleri aracılığı ile toplanan verilerin kullanılması ile gerçekleştirilen bütünsel çiftlik yönetimidir (Pablo vd., 2014). Hassas tarım; toprak ve bitkilerdeki konuma bağlı değişkenliği dikkate alarak tarımsal girdi kullanımı ve diğer tarımsal işlemlerin bu değişkenliği dikkate alarak uygulamaktır.

Bu çalışmada bağcılıkta hassas tarımın uygulanma olanakları daha önce yapılmış olan çalışmalar dikkat alınarak değerlendirilmiştir. Hassas tarımla ilgili değişken oranlı, gübreleme, değişken oranlı ilaçlama, cerim haritalama, uzaktan algılama sistemlerinin kullanımı ve coğrafi bilgi sistemleri ile ilgili konular açıklanmıştır.

BAĞCILIKTA HASSAS TARIM İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Hassas tarımın bağcılıkta uygulamalarını incelediğimizde; Llorens vd., (2010) sabit ilaçlama normunda ilaçlama yapan makine ile omcanın taç boyutunu elektronik olarak algılayarak değişken oranlı ilaçlama uygulayan makineleri test etmişlerdir ve %58 tasarruf sağlandığını belirtmişlerdir.

Zhang vd. (2002) değişken oranlı uygulamaların azot kullanımından kaynaklanan kirlenmeyi azalttığını belirtmektedirler. Matese ve Di Genarro (2015) hassas tarımın bağcılıkta kullanılması ile ilgili teknolojileri incelemişler ve yersel değişkenliği esas alarak çalışan sistemlerin kullanılması ile hem kalitede hem de verimde aynı anda artış sağlandığını belirtmişlerdir. Bağcılıkta kullanılan hassas tarım teknolojiler; değişken oranlı hasat, yaprak kesilmesi, ilaçlama ve gübreleme olarak belirtmişlerdir (Şekil 1). Normalize edilmiş fark bölüm indeksi (NDVI)'ın Greenseeker sensörü ile ölçümü Şekil 2'de verilmiştir.



A-Seçici üzüm hasat edicisi B-Değişken oranlı yaprak sıyrıcı
C-Değişken oralı atomizör D-Değişken oranlı gübreleme
Şekil 1. Bağcılık hassas tarım uygulamaları



A-Motorlu araç ile Greenseeker sensörünün kullanımı
B. Traktör ile Greenseeker sensörünün kullanımı
Şekil 2. Greenseeker sensörü ile NDVI ölçümü

Mevcut gübre dağıtma makineleri ile bağlarda birim alana aynı miktarda gübreleme yapılmaktadır. Bu durum gereksiz gübre kullanımına neden olduğu gibi ayrıca üzümelerde ve yapraklarda verim ve kaliteyi de olumsuz etkilemektedir. Bağlarda konuma bağlı yersel değişkenliğin dikkate alınarak tarımsal girdilerin uygulanması durumunda yüksek verim ve kalitede üzüm elde edilmesi olasıdır. Ayrıca tarla trafiği gübrelerin farklı zamanlarda uygulanmasından dolayı artmaktadır. Gübreleme işlemi asma bitkisi için tekrarlı bir işlemdir. Bu işlemde çeşitli dönemlerde sıvı ve granül şeklinde gübreler toprağın altına veya toprak yüzeyine uygulanmaktadır. Gübreleme sürecindeki sık tekrarlar sebebiyle bazı gübreler iklim koşulları, zaman kısıtı ve işgücü yetersizliği nedeniyle dönemlerinde uygulanamamaktadır. Bağlarda granüle, toz ve sıvı gübrelerin değişik zamanlarında uygulanması nedeniyle işçilik, zaman ve enerji gereksinimi artmakta bu da üretim maliyetini arttırmaktadır. Bu projede; kombine bir gübreleme makinesi tasarımı yapılacaktır. Tasarlanacak kombine gübre dağıtma makinesi ile aynı anda granüle, toz ve sıvı gübreler uygulanacaktır. Ayrıca geliştirilecek değişken oranlı gübre kontrol sistemi ile granüle gübreler (N, P, K), toz gübreler ya da katkı maddeleri (tarım kireci, S, FeSO_4 , ZnSO_4) ve sıvı gübreler (Borik asit, ZnSO_4 , FeSO_4) bağlara eşit miktarlarda ya da alana göre değişkenliği dikkate alarak ihtiyaç duyulan miktarlarda uygulanabilecektir.

Vieri vd. (2013) bağcılıkta hassas tarım ile ilgili teknolojik ilerlemeleri ve yaygınlaşmasını engelleyen olası problemleri özetlemiştir. Tarımda bilişim teknolojileri ile tarımsal işletmecilik açısından daha iyi seçenekler sunmasına rağmen bu konularda standartlardaki eksikliğin önemli sınırlayıcı

faktörlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmalar arasında olgunluk seviyelerine göre üzümlerin hasat edilmesi, değişken oranlı gübreleme, yaprakların uzaklaştırılması, sıvı gübreleme, ilaçlama ve malçlama çalışmaları öne çıkmaktadır.

Hassas tarımın meyveler, sebzeler ve bağcılıkta adaptasyonu son yıllarda görüntü işleme yöntemlerinin gelişmesi ile tarla tarımından daha hızlı olmuştur. Buna örnek olarak bağcılıkta uzaktan algılama sensörleri ile belirlenebilen ürün kalitesi ve verim haritaları, üzümlerin hasat sırasında karıştırılmasını önlemektedir (Pablo vd., 2014). Bağcılıkta değişken oranlı gübreleme uygulamaları meyve kalitesindeki değişkenliği azaltacaktır (Sethuramasamyraja vd., 2010). Davenport vd. (2002) 4 yıl boyunca bağda değişken oranlı gübreleme uygulayarak topraktaki bitki besin elementlerini analiz etmişler ve bu uygulamalar sonucunda N ve K'da değişkenliğin azaldığını ancak P için varyasyon katsayısının yüksek olduğunu saptamışlardır (Gemtos vd., 2011).

Mekanizasyon tarımsal üretimin sürdürülmesi için önemlidir. Mekanizasyon göstergesi $kWha^{-1}$, traktör/1000 ha, ha/traktör, ekipman/traktör idi (Ülger ve ark., 2002). Üzüm üretiminin mekanizasyonu Türkiye'nin Trakya Bölgesi'nde belirlenmiştir. Mekanizasyon seviyesinin göstergeleri $33,73 kWha^{-1}$, işletme başına 4,1 ekipman ve traktör başına 5,02 ekipman olarak belirlendi. Toprak işleme ve püskürtücüler dışında çoğu uygulama için mekanik enerji kullanımı, uygunsuz plantasyon nedeniyle yetersiz bulunmuştur (Durgut ve Arin 2005).

Hasat edilen ürünlerin soğuk depolamada sırasında korunması üretin verimliliği ve tüketici açısından önemlidir. Trakya Bölgesinde yetiştirilen üzümlerin soğuk depolama koşullarında özelliklerindeki değişimleri Arın ve Akdemir (2004) tarafından yapılan bir araştırma ile belirlenmiştir..

Mekanizasyon zinciri tamamlanmış ürünlerde verim haritalama kolaylıkla yapılabilmektedir. Sensörler, üzümlerin hasat edilebilmesi için göreceli olarak daha erken geliştirilmişlerdir. Avustralya'da ve Amerika'da 1999'da verim ölçme sensörleri kullanılmıştır (Arnó vd. 2009). Başka bir çalışmada; bir bant üzerinde geçen ürünlerin ağırlıklarını tartan sensörleri kullandıkları gibi üzümün boşaldığı noktaya hacmi ultrasonik sensörle tahmin ederek verimi ölçen sistemler kullanmışlardır (Bramley 2001). Best vd. (2005) bağlarda NDVI ile verim ve kalite arasında ($r^2>0.7$), Yaprak Alanı İndeksi (LAI) ile NDVI ($r^2>0.75$) arasında güçlü ilişkiler bulmuşlardır. Hall vd., (2010) üzümde spektral görüntü, verim ve ürün özellikleri üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar, tane boyutu ve üzüm verimi, tane antosiyanini ve fenolik asit içeriği ile ilişkili taç alanı ve taç yoğunluğunu tahmin etmişlerdir. Toplam suda çözülebilir kuru madde miktarı ile NDVI arasındaki ilişki düşük çıkmıştır. Fransa'da (Ojeda vd., 2005; Mazzetto vd., 2010) ve İspanya'da (Ferreiro-Arman vd., 2006) bağcılıkta yüksek katma değerli ürün elde edilmesi ve kalite ile ilgili bir çok proje sürdürülmektedir. Üzüm kalitesi ve verim haritalama farklı kalitedeki üzümlerin karıştırılmasını önleyerek kaliteli

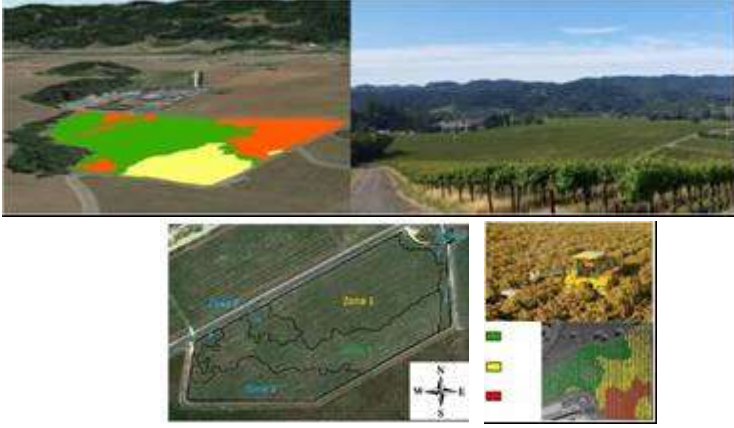
işlenmiş ürün elde etme açısından önemlidir. Bağın hassas tarım açısından potansiyeli var ise bunun anlamı değişken oranlı girdi uygulamak ve sonuçta daha fazla gelir ve çevre korunması elde etmektir. Tagarakis vd., (2011) toprak ve topografik özellikleri kullanıp bağda tarımsal işlemler açısından işletmecilik zonları oluşturmuşlardır. Yükselti haritası RTK GPS ile ve toprak elektriksel iletkenliği ise EM38 ile saptamışlardır. İşletmecilik zonlarını ise Management Zone Analysis (MZA) Programı ile oluşturmuşlardır.

Ülkemizde çiftçiler gübreyi elle, santrifüjlü gübre dağıtma makineleri ile toprak altı gübre uygulama makineleri, sırt pülverizatörleri, püskürtme tabancaları veya damla sulama sistemi var ise suyla karıştırarak uygulamaktadırlar (Şekil 3). Son yıllarda damla sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen bağların çok büyük bir kısmı halen damla sulama sisteminden yoksundur.



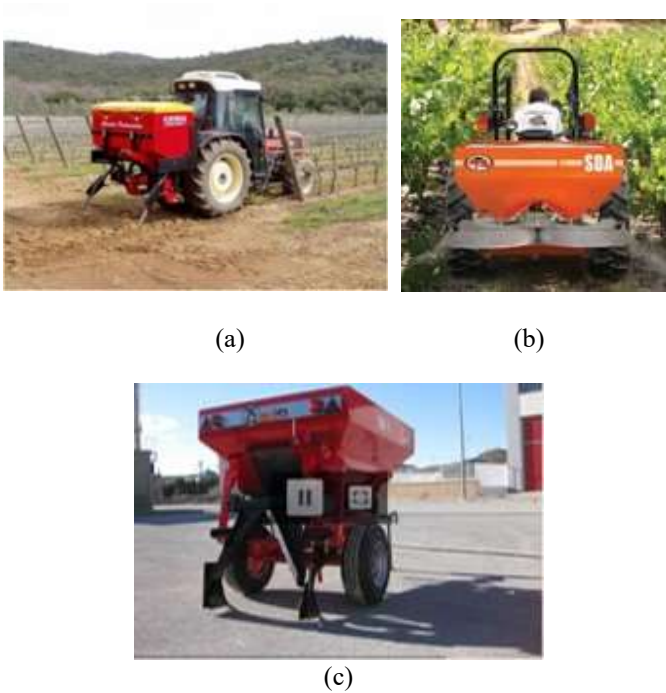
Şekil 3. Türkiye’de bağlarda gübrenin uygulanma biçimleri

Bağlarda yersel değişkenlik; verimde, toprak ve yapraktaki bitki besin elementlerinde, toprak tekstüründe ve üzümün kalitesinde etkili olabilir (Şekil 4) (Anonymous, 2016-c, Matese ve Di Generro, 2015)



Şekil 4. Bağda yersel değişkenlik ve işletmecilik zonları

Yurt dışında bağcılık için gübre dağıtma makinesi üreten firmalardan alınan örnekler Şekil 5’te verilmiştir. Tek çeşit gübreyi konuma bağlı olarak değişken miktarlarda uygulayan makineler mevcuttur (Şekil-5 c) (Anonymous, 2016-a, Anonymous, 2016-b).



Şekil 5. Bağlar için gübre dağıtma makinaları

Hassas bağcılık (PV) ve hassas tarım (PA), tipik olarak büyük ölçekli ve sensör ağlarından gelen geniş bir veri koleksiyonunun elde edilmesini ve işlenmesini gerektirir. Ne yazık ki, uyumsuz sensör ağ özelliklerinin ve

platformlarının sayısı nedeniyle sensör entegrasyonu basit değildir. Ortak, standart bir iletişim arayüzünün benimsenmesi, mühendisin sensör ve ağ arasındaki ilişkiyi soyutlamasına izin verecektir. Bu, geliştirme çabalarını azaltacak ve PA / PV sensör ağlarında "tak ve çalıştır" teknolojisinin benimsenmesine yönelik önemli bir adım olarak ortaya çıkacaktır. Bu makale, bu ihtiyacı araştırıyor ve dönüştürücüden ağa birlikte çalışabilirlik sorunlarını ele alan IEEE 1451 standart ailesine dayanan PA / PV'de akıllı veri toplama için bir çerçeve sunuyor. Çerçeve, bir IEEE 1451 WTIM (Kablosuz Dönüştürücü Arabirim Modülü) ve bir bilgi hizmeti sağlayıcısına ve WSN (Kablosuz Sensör Ağı) koordinatörüne ağ geçidi görevi gören bir IEEE 1451 NCAP (Ağ Özellikli Uygulama İşlemcisi) olarak bir ZigBee uç cihazı (sMPWiNodeZ) içerir. Makale, önerilen IEEE 1451 sistem mimarisini ve PA / PV'deki faydalarını tartışıyor ve daha akıllı WSN'ye yönelik saha içi denemelerden öğrenilen sonuçlar /derslerle kapanıyor (Fernandes vd. 2013:19). Bu makalenin amacı, bir çiftçinin (i) bir tarlanın mekansal varyasyonunun güvenilir bir değişken oranlı uygulama için uygun olup olmadığına karar vermek, (ii) tarla içi verilere dayalı belirli bir eşiğin (tarla segmentasyonu) uygulama ekipmanına göre teknik olarak mümkün olup olmadığını belirlemek ve (iii) uygun bir uygulama haritası oluşturmasını sağlayan bir yöntem sağlamaktır. Yöntemimiz bir Teknik Fırsat endeksi (TOi) sağlar. Bu yaklaşımın yeniliği, verim verilerini (veya diğer alan içi bilgi kaynaklarını) erozyonlara ve genişlemelere dayalı matematiksel morfolojik bir filtreyle işlemektir. Bu filtre, makinenin sahada nasıl çalıştığını ve özellikle güvenilir bir şekilde çalışabileceği minimum alanı (çekirdek) dikkate almamızı sağlar. Simüle edilmiş bir tavlama prosedürü ile elde edilen teorik alanlar ve gerçek bir bağ üzerinde yapılan testler, TOi'nin bir alandaki mekânsal varyasyonun teknik olarak yönetilebilir olup olmadığını değerlendirmek için uygun olduğunu göstermiştir (Tisseyre vd., 2008:101).

Tent yönetimi konusunu inceleyerek ilkeler geliştirmeye çalışmaktadır. Bu prensipler, örtü yüzey alanı miktarı için rehberlik sağlar; kanopiler arasındaki mesafe; özellikle meyve/yenileme bölgesi için gölge gölgesinde; meyve ve sürgün büyümesi arasındaki denge; ve meyve/yenilenme bölgelerinin, sürgün uçlarının ve kamış tabanlarının konumunun tekdüzeliği. Nokta kuadrat analizi ve kanopi puanlama teknikleri, problemleri kanopilerin tanımlanmasına yardımcı olarak tanıtılır. Bu teknikler ucuz, hızlı ve etkilidir. Şarap üzümünün örtüklerini değerlendirmek için yirmi bir sayısal indeks ve tanımlayıcıdan oluşan bir set, bir şarap üzümünün örtülü ideotipi olarak sunulur ve bu ideotip yönetim rehberi olarak kullanılabilir. Son yayınlar, kanopi yönetiminin çeşitli yönlerinden incelenmektedir. Bunlar arasında canlılık kontrolü, sürgün budama, meyve bölgesinde yaprak çıkarma ve eğitim sistemi tepkileri yer alır. Makale, yazarların örtülü mikroikliminin verim ve şarap kalitesi üzerindeki etkilerine dair yayımlanmamış verilerinin sunumuyla sona eriyor. Deneme, Cabernet franc çeşidiyle serin ve yüksek yağışlı bir bölgede derin, verimli bir toprakta gerçekleştirildi. Ruakura Twin Two Tier

kullanılarak kullanılan örtü bölümü, Yeni Zelanda'da yaygın olan yoğun, dikey sürgün konumlu kanopilere kıyasla verimi iki katına çıkarmıştır. Gölge, tüm verim bileşenlerinde azalmaya ve meyvelerin olgunlaşmasının gecikmesine ve şarap kalitesinin düşmesine neden oldu. Benzer sonuçlar, farklı yüksekliklerdeki meyve üretimini, alt katmanların dış örtü dış kısmında gölgelendiği Te Kauwhata Üç Katlı kafes sistemi ile karşılaştırarak elde edilmiştir. Sonuçlar, gölgeli bağların daha iyi örtülü yönetimi sayesinde üzüm verimi ve şarap kalitesinin aynı anda artırılabilceğini doğrulamaktadır (Smart vd., 1990).

Çiftçilerin (i) bir tarlanın mekansal varyasyonunun güvenilir bir değişken oranlı uygulamaya izin verip vermediğine karar vermelerine, (ii) tarla içi verilere dayalı belirli bir eşiğin (tarla segmentasyonu) uygulama makinesine göre teknik olarak mümkün olup olmadığını keşfetmelerine ve (iii) uygun bir uygulama haritası oluşturmalarına olanak tanıyan bir yöntem bir araştırmada açıklamıştır. Yöntem, bulanık bir teknik fırsat endeksi (FTOi) ile önceki bir teknik fırsat endeksini (Oi) iyileştirmeyi amaçlamaktadır. FTOI, (i) VRAC'ın güvenilir bir şekilde çalışabileceği alanı tanımlayan değişken oranlı bir uygulama denetleyicisinin (VRAC) bulanık bir ayak izi modelini, (ii) verilerin konum yanlışlığını ve (iii) VRAC'ın farklı seviyelerde tedavi gerçekleştirme yeteneğini (doğruluğunu) dikkate alır. Yaklaşımımızın özgünlüğü, VRAC'ın faaliyet gösterdiği her alan için bir tedavi seviyesinin güvenilir olup olmadığına karar vermek için bulanık bir tahmin sürecinin kullanılmasına dayanmaktadır. Yaklaşımın benzersiz bir özelliği, düzenli bir ızgarada veri gerektirmemesidir. Sadece makinenin özellikleri ve uygulanacak işlem gereklidir; Verilerin ve jeostatistik analizlerle yapılan enterpolasyon son kullanıcı için gerekli değildir. Simüle edilmiş bir tavlama prosedüründen elde edilen teorik alanlar üzerinde yapılan testler, FTOI'nin sahadaki varyasyonun teknik yönetilebilirliğini değerlendirebildiğini gösterdi. Testler ayrıca yaklaşımımızın düşük çözünürlüklü verilerle ilgili sorunları da hesaba katabileceğini gösterdi. Son olarak, yaklaşım bir bağ bloğundaki gerçek bir duruma uygulanmıştır. Bu, pratik uygulamayı ve alan içi varyasyonu yönetmek için yararlı bilgiler üretme yeteneğini vurgulamıştır (optimal eşikleme ve uygulama ve hata haritaları) (Pauli et al., 2010).

Hassas tarım için yeni teknolojiyi kullanarak bağlarda üretimi desteklemek için konuma bağlı mekânsal bilgi ve coğrafi veri erişilebilirliğine yönelik talepler dünya çapında artmaktadır. Bu makalede, Consorzio Toskana Projesi'nin Toskana'da hassas bağcılık üzerine devam eden araştırmalarını desteklemek için geliştirilen ve farklı bağ taç yönetim tekniklerinin üzüm kalitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini amaçlayan bir WebGIS uygulaması hakkında bilgi verilmiştir. Bu çerçevede; tarımsal uygulamalar ve üzüm hasadı tarım makinelerine de entegre edilebilecek mobil cihazlar için dijital görüntüler sağlamak için bir Web hizmeti oluşturmak da paralel bir hedef olmuştur. Mekânsal verileri ve hizmetleri düzenlemek için (i) Bir görüntüleyici, (ii) meta veri kayıtlarını içeren bir katalog ve (iii) Araştırma

Projesi'nin tüm verilerinin ve sonuçlarının depolandığı bir coğrafi veri tabanı aracılığıyla bir jeoportall geliştirilmiştir. Web servisleri sayesinde kullanıcılar, havadan uzaktan algılama yüksek çözünürlüklü ürünlerden elde edilen bitki örtüsü indekslerini, üzüm bağlarında bulunan bir kablosuz sensör ağı'nın agro-meteorolojik verilerini ve bağ hassas tarım uygulamalarını desteklemek için diğer referans verilerini görüntüleyebilir, analiz edebilir ve indirebilir. Web mimarisi ve kullanıcı arayüzü, web uygulamasının sürdürülebilirliğini ve proje paydaşlarının ihtiyaç duyduğu özelleştirilmiş konuma bağlı mekansal işlevlerin uygulanmasını garanti etmek için açık kaynak araçları kullanılarak uygulandı. PHP/Ajax teknolojileri ile Web haritalama uygulamasının tüm bileşenlerini geliştirmek için MapServer, coğrafi veri ve alfanümerik veri yönetimi için veri ambarı olarak PostgreSQL kullanılmıştır. Anında işleme ve harita görselleştirme, yetiştirme mevsimi boyunca üzüm bağlarının özelliklerini izlemek ve üzüm hasadı yönetimini iyileştirmek için İnternet'in güvenilir, erişilebilir ve kişiselleştirilmiş kullanımı ile ilgili yüksek potansiyelleri göstermiştir (De Filippis, et al., 2010)

Tarımsal ilaçlama teknikleri son yıllarda sürekli bir evrim geçirmektedir. Bu makale, bağ ilaçlamasını iyileştirmek ve daha sürdürülebilir hale getirmek için bağ kanopilerini karakterize etmek ve spreyl sürüklenmesini izlemek için sensörler alanında İspanya'da yürütülen araştırma çalışmalarının bir bölümünü sunmaktadır. Bağ parametrelerinin haritalanması için bazı yöntemler ve jeoistatistiksel prosedürler önerilmiş ve değişken oranlı bir püskürtücünün geliştirilmesi açıklanmıştır. Tüm bu teknolojiler, hedef kanopiye uygulanan pestisit miktarının ayarlanması açısından ilgi çekicidir (Gil vd., 2014).

Kablosuz sensör ağları, hassas bağcılıkta bir çok alanda kullanılmaktadır. Algılama cihazları ve kablosuz teknolojilerdeki istikrarlı ilerlemeye rağmen, ağ geçidi altyapıları ve saha içi işleme gibi ağların kullanılabilirliğini ve ölçeklenebilirliğini iyileştirmek için gereken bazı önemli öğeler nispeten ihmal edilmiştir. Bu makale, yerel olarak konuşlandırılmış sensör ağları ile tüm çiftlik konsepti içindeki uzak bir konum arasında gerekli ara yazılımı sağlamak için tasarlanmış akıllı bir otonom ağ geçidinin donanımını, iletişim yeteneklerini ve yazılım mimarisini açıklamaktadır. iPAGAT (Akıllı Hassas Tarım Ağ Geçidi) ile gösterilen bu güneş enerjili altyapı, yerel bir veritabanını yerel olarak konuşlandırılmış bir ZigBee kablosuz sensör ağı tarafından toplanan çevresel verilerle dolduran bir toplama motoru çalıştırır. Toplanan veriler daha sonra yerleşik veri tümleştirme sistemi üzerinden dış sorgular tarafından alınır. Ek olarak, Bluetooth, IEEE 802.11 ve GPRS dahil olmak üzere yerleşik iletişim özellikleri, yerel ve uzak kullanıcıların hem ağ geçidine hem de uzak verilere ve ayrıca İnternet'e erişmesine ve kimliği doğrulanmış akıllı telefonlar kullanarak siteye özgü yönetim araçlarını çalıştırmasına olanak tanır. Saha deneyleri, iPAGAT'ın hassas bağcılık uygulamaları için dağıtılmış hizmet

odaklı bilgi sistemlerinin geliştirilmesinde ileriye doğru atılmış önemli bir adımı temsil ettiğine dair ikna edici kanıtlar sunmaktadır (Peres v.d., 2011).

Çakıllı topraklarda etütler genellikle zaman alıcı, emek yoğun ve maliyetlidir. Bu, tarla içi mekansal değişkenliği belirlemek için uygun bir örnekleme benimseme olasılığını sınırlar. Görünür elektriksel iletkenliği (EC) ölçmek ve seyrek örneklenen birincil değişkenlerin tahmin doğruluğunu iyileştirmek için elektromanyetik indüksiyon taramalarının (EMI) potansiyel kullanımı, kuzeydoğu İtalya'daki Valpolicella'da 5 hektarlık çakıllı bir toprğı olan üzüm bağında değerlendirildi. EC, hem yatay hem de dikey modda çalışan bir Geonics EM38DD kullanılarak ölçüldü. Zemin profilinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek için elektriksel direnç tomografisi (ERT) yöntemi ile 18 pozisyonunda jeo-elektriksel incelemeler de yapılmıştır. Toprak özelliklerinin mekansal değişkenliği ve bunların yatay ve dikey modda EC ile olan ilişkileri, çok değişkenli jeostatistiksel teknikler kullanılarak tahmin edilmiştir. EC ile fiziksel toprak özellikleri (parçacık-boyut dağılımı) arasındaki mekansal bağımlılık, bölgeselleştirilmiş faktörler olarak ifade edilen farklı mekansal ölçeklerde hareket eden varyasyon kaynaklarını izole edebilen ve gösterebilen faktöriyel Kriging analizi (FKA) ile araştırıldı ve ardından bağın yersel değişkenliğine göre zonlara ayrılması için “bulanık c-ortalama” sınıflandırması yapıldı. EC ile ölçülen fiziksel özellikler arasında genel olarak yakın bir ilişki vardı: EC, daha kaba doku bileşenleri (çakıl ve kum) ile negatif ve daha ince olanlar (kil ve silt) ile pozitif korelasyon gösterdi. EC ölçümleri ayrıca ERT profilleri ile tutarlıydı ve düşük elektrik iletkenliğine sahip, 3 boyutta değişken olarak dağılmış ve asma köklenme derinliğini etkileyen çakıllı ana materyalin varlığını kanıtladı. FKA, kabul edilebilir bir hatayla, seçilen farklı mekânsal ölçeklerde toprağın fiziksel değişkenliğinin kısa bir tanımını veren iki önemli bölgeselleştirilmiş faktörü izole etti. Bulanık C-ortalama sınıflandırmasında kullanılan bu faktörler, bölgelerin ayrı ayrı işletilmesi için tanımlanmasına izin verdi. Sonuçlar, EM38DD'nin, EC ölçümlerini anlamak ve yorumlamak için temel gerçek toprak örnekleri zorunlu olsa bile, çakıllı topraklarda toprak mekânsal değişkenliğini haritalamak için avantajlı bir şekilde kullanılabileceğini kanıtlamaktadır (Morari, vd. 2009).

Bir araştırmada ise Vitis vinifera'nın (L.) cv. geleneksel Galiçya bağlarında homojenize alanların ayrımını Albarino,~ vejetasyon indeksi ve toprak elektriksel iletkenliği ve bunların bitki ve toprak ölçümleri (gövde su potansiyeli ve toprak su içeriği) ve verimlilik ve kalite parametreleri ile ilişkileri kullanılarak test etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, Galiçya'da (İspanya) bulunan 4.8 hektarlık ticari bir bağda (Vitis vinifera L., cv. Albarino)~ gerçekleştirilmiştir. Kafes sistemi “emparrado”, bu bölgede tipik olarak 1,8 m yüksekliktedir; Asmalar, dal başına 6-8 tomurcuk bırakarak dörtgen kordonlara yönlendirilmiştir. 2015 sezonunda, çiçeklenmeden hasada kadar sulama ve tomurcuk patlamasından hasada kadar sulama olmak üzere çeşitli sulama işlemleri gerçekleştirildi ve burada kontrol olarak yağmur suyu

ile beslenen bir sistem kullanılmıştır. Görüntü toplama – R, G ve NIR bantları (ben düşme aşamasında) insansız bir hava aracı kullanılarak gerçekleştirildi. Ayrıca, görünür elektriksel iletkenlik ECa), kışın yatay bir dipolde bir toprak elektrik iletkenlik ölçer (EM38) kullanılarak ölçülmüştür. Toprak su içeriği ölçümleri, sulama uygulamaları arasında farklılıkların ben düşme sırasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gösterdiğini (p değeri=0.014), ancak kök su potansiyelinde istatistiksel açıdan öneli bir koyuluk olmadığı saptanmıştır (p -değeri = 0.19). Üretim parametreleri için anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Bununla birlikte, rastgele orman modelleri, topografik, toprak ve bitki değişkenlerini kullanarak, kök su potansiyelinin ve kalite parametrelerinin iyi bir şekilde tahmin etmiştir. Küresel bir tampon kullanılarak analiz edilen NDVI detayları, özellikle uygulamalar arasında minimum ve ortalama NDVI piksel değerleri için önemli farklılıklar göstermiştir. Uygulanan işlem, bir pergola kafes sistemli üzüm bağlarında farklı kalitedeki üzüm alanları arasında ayırt etme kapasitesini göstermiştir. Bu, şarap yetiştiricilerinin farklı şarap özellikleri için seçilmiş bir bağ bozumunun yanı sıra, sulama yönetimi için bir araca sahip olmalarını sağlamıştır (Cancella vd., 2017).

Üzüm bağlarında zirai ilaç ve gübre uygulamaları için ağaç boyutlarını tespit etmek için sensörler kullanılmaktadır. Değişken oranlı gübre uygulaması için ağaç taç hacminin boyutunu ve kalitesini ölçmek için sağlam ve güvenilir sensörler gereklidir. Biyolojik faktörler ve üretim uygulamaları nedeniyle ağacın boyutu zamanla değiştiği için gerçek zamanlı algılama önemlidir. Bu çalışmada; ultrasonik sensör, optik sensör ve bir lazer sensörü farklı koşullarda algılama özellikleri ve görüş alanları (FoV) açısından değerlendirilmiştir. Görüş alanları (FoV), hedeflerin her iki tarafta merkez hattına dik olarak hareket ettirilmesiyle sağlanmıştır. Sensörlerin maksimum algılama aralığı 6 ila 8 m arasında değişmekte olup, ultrasonik sensör en yüksek aralığa sahiptir. Ultrasonik sensörler için ışın genişlikleri geniş (maksimum 950 mm), optik sensör ise 70 mm'lik dar bir maksimum ışın genişliğine sahip olarak bulunmuştur. Lazer sensörünün keskin bir ışını vardır ve bitki materyalleriyle dış ortamda iyi çalışmamıştır. Sensörler için istatistiksel analiz de yapıldı ve P değerinin 0.001'den düşük ve R^2 değerinin 1.0'a yakın olduğu bulundu, bu da bağda algılama özellikleri için önemli ölçüde daha iyi bir sonuç olduğunu göstermiştir (Bora vd., 2015).

Hiperspektral görüntülerde asma çeşitlerinin ayrımı için Compact Airborne Spectral Analiz (CASI) verilerinin yeteneklerini analiz edilmiştir. CASI verilerinin ayırt edicilik yeteneklerini analiz etmek için temel bileşenler analizi ve doğrusal diskriminant analizi yöntemleri kullanılmaktadır. Çok katmanlı algılayıcılar, radyal tabanlı fonksiyon sinir ağları ve destek vektör makineleri gibi çeşitli sınıflandırma tekniklerinin performansını değerlendirilmiştir. Ayrıca, hassas bağcılık çerçevesinde yersel ve spektral çözünürlükler arasındaki denge de saptanmış CASI'nin sınırlamaları ortaya konmuştur (Ferreiro-Arm'an vd., 2006).

Hassas bağcılık, üzüm bağlarının önolojik potansiyelini en üst düzeye çıkarmayı amaçlar. Bu, durum şarap üretiminin yüksek kalite standartlarının hem kaliteyi hem de verimi aynı anda artırmak için sahaya özgü yönetim uygulamalarının benimsendiği bölgelerde geçerlidir. Bağ yönetimini desteklemek için yeni teknolojilerin tanıtılması, üretimin verimliliğinin ve kalitesinin iyileştirilmesine olanak tanır ve aynı zamanda çevresel etkiyi azaltır. Bilgi iletişim teknolojilerinin ve coğrafya biliminin hızlı evrimi, hassas bağcılık için dağıtılmış bilgi için optimize edilmiş çözümlerin geliştirilmesi için muazzam bir potansiyel sunmaktadır. Son teknolojik gelişmeler, asma büyümesinin birçok yönünün izlenmesine ve kontrolüne yardımcı olan faydalı araçların detaylandırılmasına izin vermiştir. Bu nedenle hassas bağcılık, bağın mekansal değişkenliğini yüksek çözünürlükle tanımlamak için mevcut en geniş gözlem yelpazesinden yararlanmayı ve kalite, üretim ve sürdürülebilirlik açısından yönetim verimliliğini artırmak için öneriler sunmayı amaçlamaktadır. Bu derleme, hassas bağcılıktaki en son teknolojilerin kısa bir özetini sunmaktadır. Birincisi coğrafi konum belirleme ve uzaktan ve yakın algılama gibi izleme teknolojilerine odaklanan iki bölüme ayrılmıştır; İkincisi, değişken oranlı teknolojilere ve yeni tarım robotlarına odaklanıyor (Matese ve Di Gennaro, 2015).

Uzaktan Algılama (RS), hassas bağcılık sistemlerinde mahsul izleme için en yaygın kullanılan tekniktir. Bu makale, kanopi sağlığı ve canlılık durumunun aynı anda değerlendirilmesini sağlamak için doğrudan üzüm bağlarında kullanılan çeşitli yakın algılama teknolojileri tarafından elde edilen RS bilgilerinin ikame edilme olasılığını değerlendirmektedir. Bu amaçla bir mobil laboratuvar geliştirilmiştir. Bu laboratuvar; (a) iki GreenSeeker RT100 sensörü (b) Kanopi kalınlığını tahmin etmek için üç çift ultrasonik sensör; ve (c) bir üzüm bağında hareket ederken toplanan coğrafi referans verileri için bir DGPS alıcısı. Bu sensörlerin 2007-2008 sezonu sırasında, asmaların normal büyüme sürecine bağlı olarak hastalık görünümü, yayılma ve vejetatif gelişme varyasyonları ile ilgili izleme sistemi performansını değerlendirmek için ticari bir bağda testler yapılmıştır. Mobil laboratuvar ile yapılan araştırmalar, zirai kimyasallarla muamele edilmiş ve muamele edilmemiş iki grup halinde gerçekleştirilmiş ve taç (kanopinin) bitki sağlığı durumunu karakterize eden manuel morfolojik ve fizyolojik gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Ölçüm tekrarlanabilirliği doğrulanmış; hem NDVI değerleri hem de ultrasonik veriler yüksek tekrarlanabilirlik göstermiştir (sırasıyla $r = 0.88$ ve $r = 0.85$ ile). Optik veriler ile manuel değerlendirme ile onaylandığı üzere, Plasmopara viticola ile enfekte olmuş alanlarda düşük vejetatif canlılığa sahip, incelenen iki grupta kanopi canlılığı gelişiminde açıkça farklılıklar gösteren NDVI haritalarını elde etmek oluşturulmuştur. Enfeksiyon indeksi yüzdesi (I%I) haritaları patolojik manuel anket sonuçlarına göre üretildi. I%I ve NDVI haritaları arasındaki karşılaştırma, gerçek asma bitki sağlığı durumunu niteliksel olarak doğrulamıştır (Mazzetto, 2010).

Hassas Bağcılık, düşük işletme maliyetleri, yüksek operasyonel esneklik ve görüntülerin yüksek mekânsal çözünürlüğü nedeniyle uydu ve uçak gibi geleneksel satın alma platformlarıyla rekabet ettiğini kanıtlayan İnsansız Hava Araçları (İHA) gibi veri toplama ve analizi için gelişmiş ve uygun maliyetli araçların ve metodolojilerin mevcudiyeti sayesinde önemli bir büyüme yaşıyor. Bu teknolojilerin hassas bağcılık için kullanımını optimize etmek için teknik, bilimsel ve ekonomik performanslarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, İHA, uçak ve uydu ile gerçekleştirilen NDVI araştırmalarını karşılaştırmak ve her bir platformun bağ içi bitki örtüsünün mekânsal değişkenliğini temsil etme kabiliyetini değerlendirmektir. İki İtalyan üzüm bağının NDVI görüntüleri, üç platformdaki farklı multispektral sensörlerden aynı anda elde edilmiş ve benzerlik derecelerini değerlendirmek için jeo-istatistik kullanılmıştır. Ayrıca, her bir tekniğin artıları ve eksileri, uygulama ölçeğinin bir fonksiyonu olarak bir maliyet analizi yapılarak da değerlendirilmiştir. Sonuçlar, farklı platformların kaba bitki örtüsü gradyanları ve büyük bitki örtüsü kümeleri ile karakterize edilen üzüm bağlarında karşılaştırılabilir sonuçlar sağladığını göstermektedir. Aksine, daha heterojen üzüm bağlarında, düşük çözünürlüklü görüntüler bağ içi değişkenliğin bir kısmını temsil etmede başarısız olur. Maliyet analizi, İHA platformunun benimsenmesinin küçük alanlar için avantajlı olduğunu ve beş hektarın üzerinde bir başa baş noktasının bulunduğunu göstermiştir; Bu eşğin üzerinde, havadan ve ardından uydudan elde edilen görüntülerin daha düşük görüntü maliyeti vardır (Mateese vd., 2015).

Hedefli ilaçlama uygulamaları sayesinde, hassas tarım yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda daha düşük üretim maliyetleri de sağlayarak çiftliğin rekabet gücünü artırır. Bununla birlikte, az sayıda çalışma, en yaygın özel ürünler arasında yer alan üzüm bağlarında hassas tarım püskürtücülerinin maliyet etkinliğine odaklanmıştır. Bu nedenle, bu çalışma, güney İtalya'nın varsayımsal ve temsili bir bağ bölgesinde geleneksel bir püskürtücüye kıyasla değişken oranlı teknoloji (VRT) ve insansız hava aracı (İHA) püskürtücülerinin maliyet etkinliğini değerlendirmeyi amaçlayan ilk çalışmadır. Literatürdeki teknolojik parametrelere dayalı ekonomik analiz, pestisit tedavilerinin yıllık maliyeti (ekipman ve pestisit maliyetleri) göz önünde bulundurularak, hassas tarım püskürtücülerinin (PAS) tanıtılması için minimum çiftlik büyüklüğünün (baş baş noktası) belirlenmesini sağlamıştır. Bulgularımız, İHA püskürtücünün - yasaların izin vermesi halinde - 2,27 hektardan büyük çiftlikler için en uygun seçenek olabileceğini, VRT püskürtücünün ise 17,02 hektarın üzerindeki çiftlikler tarafından seçilmesi gerektiğini ortaya koydu. Bununla birlikte, İtalya'nın Destekleme Planı tarafından sağlanan destekler vb. kamu sübvansiyonları, VRT püskürtücülerin benimsenmesini 3,03 hektar kadar küçük alanlar için de ekonomik olarak uygun hale getirmektedir. Son olarak, duyarlılık analizi, satın alma fiyatı ve pestisit maliyetinin başabaş noktalarını etkileyen en hassas parametreler olduğunu doğruladı. Bulgularımız, çiftçiler

tarafından benimsenmelerinde ve mevcut tarımsal krizle yüzleşmek için gelecekteki stratejilerin belirlenmesinde önemli bir itici güç olan bu yenilikçi püskürtücülerin ekonomik sürdürülebilirliğine ışık tutuyor (Testa vd., 2025).

Türkiye'nin Trakya bölgesinde şarap üretiminde enerji kullanım verimliliğini yapılan bir araştırma ile belirlenmiştir. Çiftçilere, gübre, pestisit, tarım makineleri gibi tarımsal üretim girdilerini, zaman ve yakıt tüketimini ve verimini belirlemek için anketler verildi. Üretim girdilerinin ve verimin enerji karşılığı, üzüm asması üretimi için enerji bütçesi oluşturmak amacıyla hesaplandı. Sonuçlara göre, enerji oranı 9,72 olarak hesaplandı. Net enerji 105.855.37MJha⁻¹ idi. Özgün enerji ve enerji verimliliği sırasıyla 0,10MJ kg⁻¹ ve 0,82kg MJ⁻¹ idi. Doğrudan enerji ve payı sırasıyla %3936,05MJha⁻¹ ve %32,41 olarak hesaplandı. Dolaylı enerji ve toplam enerji bütçesindeki payı 8208,58MJha⁻¹ ve %67,59 idi. Yenilenebilir enerji ise 743,27MJha⁻¹ olarak hesaplandı ve bu, şarap üzüm üretiminin %6,12'sini temsil ediyordu. Yenilenebilir enerji kullanımı düşüktü çünkü üretimin tüm aşamalarında kullanılan tarımsal girdiler neredeyse tamamen yenilenemeyen enerjiye dayanıyordu ve bu enerji 11.401,36MJha⁻¹ olarak %93,88'i temsil ediyordu. Kimyasal gübre payı toplam enerji bütçesinin %32,40'ını oluşturdu, onu dizel (%26,29) ve pestisitler (%24,44) takip etti. Mantar ilaçları esas olarak bağları korumak için kullanıldı. Tarım makineleri genellikle toprak işleme ve kimyasal gübre ile pestisit uygulamalarında kullanılmıştır. Toprak toprak işleme için yakıt tüketimi (%81,48) toplam yakıt tüketiminin büyük bir kısmını oluşturdu. İnsan emeği budama, yaprak ve dalların çıkarılması, hasat ve paketleme için kullanıldı. Gelecekteki çalışmalar, bağ mekanizasyonunu iyileştirmeye ve bağlarda aşırı gübreleme ile pestisit kullanımını önlemeye odaklanmalıdır (Akdemir, 2022).

Karbon ayak izinin tarımsal üretimde azaltılması amaçlanmaktadır. Karbon ayak izi açısından önemli olan enerji bütçesinin hesaplama yöntemleri üretim girdileri her bir üretim aşaması dikkate alınarak detaylı olarak açıklanmıştır (Akdemir 2025-a).

Trakya Bölgesi'nde şarap üretiminde enerji kullanım verimliliğini bir araştırma ile saptanmıştır. Gübre, pestisit, tarım makineleri, zaman ve yakıt tüketimi gibi tarımsal üretim girdilerini belirlemek için çiftçilerle birlikte anketler yapıldı. Üretim girdilerinin ve veriminin enerji eşdeğeri, üzüm ağacı üretimi için enerji bütçesi oluşturmak amacıyla hesaplandı. Sonuçlara göre, enerji oranı 15,45 olarak hesaplandı. Net enerji 187617,31 MJha⁻¹ idi. Sofra üzüm üretimi için özgül enerji ve enerji verimliliği sırasıyla 0,06 MJkg⁻¹ ve 1,31 kgMJ⁻¹ idi. Doğrudan enerji ve payı sırasıyla %474,11 MJha⁻¹ ve %36,77 olarak hesaplandı. Dolaylı enerji ve toplam enerjideki oranı 8208,58 MJha⁻¹ ve %63,23 idi. Yenilenebilir enerji 1649,95 MJha⁻¹ olarak küçüktü ve sofrta üzümünün üretimindeki payı %12,71'di; bu nedenle, üretimin tüm aşamalarında kullanılan tarımsal girdiler neredeyse tamamen yenilenemeyen enerji kullanımına dayanıyordu. Yenilenemeyen enerji 11332,75 MJha⁻¹ ve %87,29 idi. Gübre, şarap için üzüm üretiminin yetiştirilmesinde en önemli

girdi. Gübreyi pestisit ve dizel takip eder. Mantar ilaçları çoğunlukla bağları korumak için kullanıldı. Tarım makineleri genellikle toprak işleme, kimyasal gübre ve pestisit uygulamaları için kullanılmıştır. Toprak işleme yakıt tüketimi, toplam yakıt tüketiminin büyük bir kısmını aldı. Üzüm üretiminde budama, yaprak ve dalların sökülmesi, hasat ve paketleme için insan emeği kullanıldı. Gelecekteki çalışmalar, bağların mekanizasyonunu iyileştirmeye ve bağlarda aşırı gübreleme ile pestisit kullanımını korumaya odaklanabilir (Akdemir, 2025-b).

Nesne algılanmasında gerçek zamanlı işleme ile ilgili gelişmeler, algılama algoritmalarının doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu gelişme, hassas tarımın ilerlemesi için temel olan daha odaklı ve verimli yaklaşımları mümkün kılan hassas püskürtme teknolojileri için önemlidir. Bu çalışmada, sağlıklı yaprakları özel olarak tanımlamak, ilaç püskürtmek ve pestisit uygulama verimliliğini artırmak için gerçek zamanlı bir üzüm bağ yaprağı tespit sistemi açıklanmıştır. Sistem, asma yapraklarını sağlıklı yapraklar, sağlıklı yapraklar ve üzüm salkımları olmak üzere üç kategoriye ayırabilen gelişmiş bir YOLOv7 derin öğrenme algoritması kullanmaktadır. Daha iyi genelleştirme ve özellik çıkarma için algoritmanın omurgasına hafif bir evrişim katmanı entegre edilmiş ve modeli çeşitli veri türleri arasında daha uyumlu hale getirmiştir. Daha sonra, her bir kanalın önemini değerlendirmek için toplu normalleştirme bloğu ile birleştirilmiş bir sıkıştırma ve uyarma bloğu dahil edilmiştir. Bu ekleme, mekansal ve kanal bazında bilgileri her katmanın yerel alıcı alanı içinde birleştirmektedir. Gürültülü verilerin daha iyi genellemesi ve daha iyi işlenmesi için Lasso düzenleme ile uyumlu gradyan optimizasyonu uygulanmıştır. Modeli daha iyi yakınsamak ve düzenli hale getirmek için bir ELU aktivasyon fonksiyonu eklendi ve doğrusal olmayanları tanıtmak ve kaybolan gradyan noktalarını azaltmak için bir GELU aktivasyon fonksiyonu değiştirildi. Bağdan toplam 2300 adet üzüm yaprağı görüntüsü alındı ve LabelImg açıklama aracı ile etiketlendi. Geliştirilmiş YOLOv7 algoritmasının sonuçları, Hassasiyette %3,2, Geri Çağırma %6,2, mAP@0,5'te %1,6 ve mAP@0,5:0,95'te %7,1 iyileşme göstermiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için sonuçlar Faster RCNN, RetinaNet R50-FPN, Çift Kafa RCNN, YOLOv5, YOLOv7 ve YOLOv9 ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra kontrollü ilaçlama ile sağlıklı yapraklara pestisit püskürtmede %65,96 iyileşme gösteren bir dış mekan deneyi için iyileştirilmiş sonuçlar dosyası pestisit kapsama sonucunu değerlendirmek için kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üzüm bağı ortamında hassas ilaçlamada daha fazla ilerleme için önemli teknik destek sağlamayı amaçlayan geliştirilmiş algoritmanın performansının tatmin edici olduğunu doğrulamıştır (Khan vd, 2025).

Hassas tarımda, etiketlenmiş verilerin azlığı ve önemli ortak değişken kaymaları, makine öğrenimi modellerinin eğitimi için benzersiz zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu kıtlık, çevrenin dinamik doğası ve tarımsal konuların canlı olarak gelişen görünümü nedeniyle özellikle sorunludur. Bu zorlukların üstesinden gelmek için gerçekçi sentetik veriler üretmek için yeni bir sistem

önerilmektedir. Unity motoruna dayalı bir bağ simülatörü kullanan sistem, algılama algoritmalarını eğitmek için sentetik ortamlardan doğru foto-gerçekçi görüntüler ve etiketler üretmek için geometrik tutarlılık hususlarıyla bir kes ve yapıştır tekniği kullanmıştır. Bu yaklaşım, çeşitli görüş açıları ve aydınlatma koşullarında çeşitli veri örnekleri oluşturur. Geliştirilen yöntem sofralık üzüm yetiştiriciliğine uygulayarak son teknoloji bir dedektörün eğitiminde önemli performans iyileştirmeleri göstermiştir. Tarımsal uygulamalarda sistemin benimsenmesi için giderek artan bir önemi olan otomatikleşme tekniklerin kombinasyonu kolayca bu sistem ile sağlanmaktadır (Saraceni vd., 2024).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bağcılıkta hassas tarım ile ilgili çalışmalar incelendiğinde;

- Gereksiz girdi kullanımının önlendiği,
- Üzüm verimi ve kalitesinde iyileştirmeler sağlandığı,
- Toprak, yaprak ve verim ölçme sistemleri ile yersel değişkenliğin belirlendiği,
- Uzaktan algılama sistemleri ile verim tahminin yapıldığı,
- Üretim süreçlerinde en fazla enerji tüketiminin saptandığı işlemler sofralık ve şaraplık üzüm yetiştiriciliği için saptandığı görülmüştür.

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerinde etkisini giderek arttırdığı bir gelecek bizi beklerken, çevreye duyarlı üretim yöntemlerini içeren akıllı tarım/hassas tarım yöntemlerinin üretimde kademeli olarak uygulanması gerekmektedir. Bunun için küçük çiftçilerin öncelikle yersel değişkenliğin saptanmasına yönelik hizmet veren şirketlerden abonelik yoluyla verimde, toprak ve yapraktaki bitki besin elementlerinin değişimini, ürün kalitesindeki değişimlerin saptanması ve değişken oranlı gübreleme ve ilaçlamaya yönelik hizmetleri kullanmaları ile başlamalarını önerilebilir. Orta ve büyük işletmeler için otomatik dümenleme, değişken oranlı ilaçlama, gübreleme, toprak ve bitki sensörlerinin satın alınarak kullanılmasını bu işletmeler için daha ekonomik olacağı önerilmektedir.

REFERANSLAR

- Akdemir, S., 2022, Determination of Energy Balance in Grape Production for Wine in Thrace Region, *Erwerbs-Obstbau* (2022) 64(Suppl 1) :S103–S111
- Akdemir, S. 2025-a. Energy Budget Calculation Methods in Crop Production (A literature review on energy balance), Editör: N R Bozdoğan, *Current concepts and Innovative Research in Agriculture, Forest and Water Issues* (pp:38-53), All Science Academy Design, ISBN: 978-625-8536-24-9,
- Akdemir, S. 2025-b. Determination of Energy Balance for Table Grape Production in Thrace Region of Turkey

- Anonymous, 2016-a, <http://en.tecnovict.com/variable-rate-spreader-mod-150-vrt-claudio-pontremolesi/>
- Anonymous, 2016-b, <http://www.vigerm.com/en/maquinaria-agricola/abonadoras/arboles-vina/sv-1>
- Anonymous, 2016-c. “Bağlarda yersel değişkenlik”, <https://www.efficientvineyard.com/variable-management/variable-rate-vineyard-management-set-tested-across-california-vineyards/>
- Arin S., Akdemir S., 2004. Quality properties changing of grape during storage period, *Journal of Biological Sciences*, 4(2), 253-257
- Arnó J., Martínez-Casasnovas J.A., Ribes Dasi M., Rosell J.R., 2009. Precision Viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7(4):779-790.
- Best, S. León, L. Claret, M. 2005. “Use of Precision Viticulture Tools to Optimize the Harvest of High Quality Grapes” FRUTIC 05 Precision Viticulture - Research Supporting the development of optimum resource management for grapes and wine production.
- Bora G. C., Mistry P., Lin D., 2015. Evaluation of sensors for sensing characteristics and field of view for variable rate technology in grape vineyards in North Dakota, *Journal of Applied Horticulture*, 17(2): 96-100,
- Bramley R.G.V. 2001. Progress in the development of precision viticulture-Variation in yield, quality and soil properties in contrasting Australian vineyards(No. 14, pp. 25-43). Occasional report.
- Cancela J.J., Fandiño M., Rey B.J., Dafonte J., GonzálezGI X.P.,2017. Discrimination of irrigation water management effects in pergolatrellis system vineyards using a vegetation and soil index, *Agricultural Water Management* Volume 183, 31 March 2017, Pages 70-77
- Davenport, J.R. Marden, J.M. Mills, L. 2002. “Variable Rate Fertilizers for Grape Nutrient, Management”, <http://www.grapesociety.org/Meeting%20Proceedings/> 2002/fertilizer. Pdf.
- De Filippis T. A, *, L. Rocchi A, E. Fiorillo B, L. Genesio A, 2010. A WEBGIS Application For Precision Viticulture: From Research To Operative Practices, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Archives. 38.
- Durgut, M. R. and Arin, S. (2005). Level and problems of Trakya region vineyard mechanization, *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*. 2(3), 287-297
- Gil E., Arnó J., Llorens J., Sanz R. , J. Llop I, Rosell-Polo J. R., M. Gallart and Escolà A., 2019. Advanced Technologies for the Improvement of Spray Application Techniques in Spanish Viticulture: An Overview, *Sensors* 2014, 14, 691-708; doi:10.3390/s140100691Google Earth (2019). Google maps. <http://earth.google.com> sayfasından alınmıştır. (Erişim tarihi: 01.06.2015).
- Fernandes, M.A., Matos, S. G., Peres E., Cunha C. R., López J. A., Ferreira P.J.S.G., Reis M.J.C.S., R. Morais,, 2013. A framework for wireless sensor networks management for precision viticulture and agriculture based on IEEE 1451 standard, *Computers and Electronics in Agriculture* 95, 19–30.
- Ferreiro-Armán M., Da Costa J.-P., Homayouni S., and Martín-Herrero J., Hyperspectral Image Analysis for Precision Viticulture, In: Campilho, A.,

- Kamel, M. (eds) Image Analysis and Recognition. ICIAR 2006. Lecture Notes in Computer Science, Vol: 4142. 730-741, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11867661_66
- Ferreiro-Arman, M., Da Costa, J. P., Homayouni, S., 2006, "Hyperspectral image analysis for precision viticulture", In Image Analysis and Recognition, pp. 730-741, Springer Berlin Heidelberg.
- Gemtos T. A., Fountas S., Aggelopoulou K., 2011. "Precision Agriculture Applications in Horticultural Crops in Greece and Worldwide", Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainable Agri-production and Environment (HAICTA 2011), Skiathos 8-11 September.
- Hall, A., Lamb, D. W., Holzapfel, B. P., & Louis, J. P., 2011. "Within-season temporal variation in correlations between vineyard canopy and winegrape composition and yield", *Precision Agriculture*, 12(1), 103-117.
- Khan Z., Liu H., Shen Y., Yang Z., Zhang L., F. Yang, 2025. Optimizing precision agriculture: A real-time detection approach for grape vineyard unhealthy leaves using deep learning improved YOLOv7 with feature extraction capabilities, *Computers and Electronics in Agriculture* 231 (2025) 109969
- Llorens J., Gil E., Llop J., Escola A., 2010. Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency, *Crop Protection* 29 (2010) 239–248
- Matese A., Toscano P., Di Gennaro F. S., Genesio L., Vaccari F. P., Primicerio J., Belli C., Zaldei A., Bianconi R., Gioli B., 2015. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture, *Remote Sens.* 2015, 7, 2971-2990; doi:10.3390/rs70302971
- Matese, A., Di Gennaro S. F., 2015. Technology in precision viticulture: a state of the art review, *International Journal of Wine Research*, 2015:7 69–81
- Mazzetto, F., Calcante, A., Mena, A., 2010. "Integration of optical and analogue sensors for monitoring canopy health and vigour in precision viticulture", *Precision Agriculture*, 11(6), pp. 636-649. DOI 10.1007/s11119-010-9186-1
- Morari F., Castrignanò A., Pagliarin C., 2009. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors, *Computers and Electronics in Agriculture* 68 (2009) 97–107
- Ojeda, H., Carrillo, N., Deis, L., 2005. "Precision viticulture and water status II: Quantitative and qualitative performance of different within field zones, defined from water potential mapping", in XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany, 23-27 August, 2005, pp. 741-748.
- Pablo, J., Zarco-Tejada, P., Hubbard, N., Loudjani, P. 2014. "Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers—Potential Support with the CAP 2014-2020", Joint Research Centre (JRC) of the European Commission.
- Paoli J. N., Tisseyre B., Strauss O., McBratney A. B., 2010. A technical opportunity index based on the fuzzy footprint of a machine for site-specific management: an application to viticulture, *Precision Agric.*, 11, 379–396, DOI 10.1007/s11119-010-9176-3
- Peres E., Fernandes M. A., Morais R., Cunha C. R., López J. A., Matos S. R., P.J.S.G. Ferreira e, M.J.C.S. Reis, An autonomous intelligent gateway infrastructure

- for in-field processing in precision viticulture, *Computers and Electronics in Agriculture* 78 (2011) 176–187
- Saraceni L., I. Motoi M., Nardi D. and Ciarfuglia T. A., 2024. "Self-Supervised Data Generation for Precision Agriculture: Blending Simulated Environments with Real Imagery," 2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Bari, Italy, 2024, pp. 71-77, doi: 10.1109/CASE59546.2024.10711594.
- Sethuramasamyraja B., Sachidhanantham, S., Wample, R. 2010. "Geospatial Modeling of Wine Grape Quality Indicators (Anthocyanin) for Development of Differential Wine Grape" *Harvesting Technology International Journal of Geomatics and Geosciences* 1(3).
- Smart, R.E., Dick, J.K., Gravett, I.M., Fisher. B.M., 1990. "Canopy management to improve grape yield and wine quality - principles and practices", *S Afr. JEnol. Vitic.* 11(1): 3-17.
- Tagarakis, A., Liakos V., Fountas S., Koundouras S., Gemtos, T. 2011. "Using Soil and Landscape Properties to Delineate Management Zones in Vines" *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science)*, 7 (1), 33-38.
- Testa R. · A. Galati · Schifani G. · G. Migliore, 2025. Cost-effectiveness of conventional and precision agriculture sprayers in Southern Italian vineyards: A break-even point analysis , *Precision Agriculture* (2025) 26:39 <https://doi.org/10.1007/s11119-025-10233-5>
- Tisseyre B., McBratney A. B., 2008. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an applications to viticulture, *Precision Agric* (2008) 9:101–113, DOI 10.1007/s11119-008-9053-5
- Ülger, P., Güzel, E., Kayışoğlu, B., Eker, B., Akdemir, B., Pınar, Y., Bayhan, Y., & Sağlam, C. (2002). *Tarım Makinaları İlkeleri*. T.Ü. Ziraat Fakültesi Ders Kitabı, No: 29. Fakülteler Matbaası, 2. Baskı İstanbul. 435 s.
- Vieri, M., Sarri, D., Rimediotti, M., Perria, R., & Storchi, P. 2013. "The new architecture in the vineyard system management for variable rate technologies and traceability", In *I International Workshop on Vineyard Mechanization and Grape and Wine Quality* 978 (pp. 47-53).
- Zhang, N., Wang, M., Wang, N., 2002. "Precision agriculture—a worldwide overview", *Computers and Electronics in Agriculture*, 36, pp. 113-132

Kesikli (Batch) Anaerobik Fermantasyon Sistemlerinin Temel Özellikleri ve Çalışma Prensipleri

Cevat FİLİKÇİ¹
Tamer MARAKOĞLU²

1- Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar, Gemi ve Uçak Bölümü, 40700, Kırşehir, Türkiye. E-mail.: cevat.filikci@ahievran.edu.tr.

2- Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü , 42130, Konya, Türkiye. E-mail: marakoglu@selcuk.edu.tr.

*Corresponding Author: Cevat FİLİKÇİ, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar, Gemi ve Uçak Bölümü, 40700, Kırşehir, Türkiye.

Telefon: +905557542873 E-posta: cevat.filikci@ahievran.edu.tr

Cevat FİLİKÇİ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4169-8412>

Tamer MARAKOĞLU ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2824-116X>

ÖZET

Kesikli (batch) anaerobik fermentasyon sistemleri, organik atıkların oksijensiz ortamda parçalanarak biyogaz ve biyometan üretiminin incelenmesinde kullanılan önemli sistemlerden biridir. Bu bölümde, kesikli anaerobik fermentasyon sistemlerinin temel özellikleri, çalışma prensipleri ve işletme koşulları ele alınmıştır. Kesikli sistemlerde substrat ve inokulumun reaktöre deney başlangıcında eklenmesi ve fermentasyonun belirli bir süre boyunca devam etmesi, farklı organik materyallerin kontrollü koşullarda değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bölüm kapsamında anaerobik fermentasyonun temel aşamaları olan hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez açıklanmıştır. Ayrıca sıcaklık, pH, substrat/inokulum oranı, katı madde içeriği, fermentasyon süresi ve karıştırma gibi önemli işletme parametrelerinin biyogaz ve metan üretimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Biyogaz ve metan üretiminin belirlenmesi, metan veriminin hesaplanması ve biyokimyasal metan potansiyeli (BMP) testlerinin kullanımı da ele alınmıştır. Kesikli sistemlerin basit reaktör yapısı, düşük işletme maliyeti ve farklı substratların kontrollü koşullarda karşılaştırılabilmesi önemli avantajlar olarak değerlendirilmiştir. Buna karşılık, sürekli besleme yapılmaması ve gerçek ölçekli biyogaz tesislerinin çalışma koşullarını tam olarak temsil edememesi bu sistemlerin başlıca sınırlılıklarıdır. Sonuç olarak, kesikli anaerobik fermentasyon sistemlerinin özellikle laboratuvar çalışmaları, farklı organik atıkların değerlendirilmesi ve metan üretim potansiyelinin belirlenmesi açısından önemli ve kullanışlı bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler – Kesikli sistem, anaerobik fermentasyon, biyogaz, biyometan, BMP, anaerobik çürütme, organik atık.

1. GİRİŞ

Artan enerji talebi, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve çevresel sorunların giderek önem kazanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını ve organik atıkların enerji potansiyelinin değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda anaerobik fermentasyon, organik kökenli atıkların biyolojik olarak parçalanması ve aynı zamanda enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilebilen biyogazın üretilmesi açısından önemli bir biyoteknolojik proses olarak öne çıkmaktadır. Anaerobik fermentasyon; hayvansal gübreler, tarımsal artıklar, gıda atıkları, enerji bitkileri, arıtma çamurları ve çeşitli endüstriyel organik atıkların değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Koch et al., 2020; Cabrita & Santos, 2023).

Anaerobik fermentasyon, oksijenin bulunmadığı koşullarda farklı mikroorganizma gruplarının birlikte gerçekleştirdiği çok aşamalı bir

biyolojik dönüşüm sürecidir. Organik maddeler doğrudan metana dönüştürülmemekte; öncelikle hidroliz, ardından asidojenez ve asetojenez aşamalarından geçmekte ve son aşamada metanojenik mikroorganizmaların faaliyetleri sonucunda metan ve karbondioksit oluşmaktadır. Bu süreç sonucunda temel olarak metan (CH_4) ve karbondioksitten (CO_2) oluşan biyogaz ile birlikte, geride organik ve mineral bileşenler içeren digestat meydana gelmektedir. Anaerobik çürütmenin başarısı; substratın bileşimi, biyobozunabilirliği, mikrobiyal topluluğun özellikleri ve proses koşulları arasındaki etkileşime bağlıdır (Cabrita & Santos, 2023).

Anaerobik fermantasyon sistemleri işletme biçimine göre genel olarak kesikli (batch), yarı sürekli ve sürekli sistemler şeklinde değerlendirilebilir. Sürekli sistemlerde substrat belirli bir hızda reaktöre beslenirken sistemden eşdeğer miktarda digestat uzaklaştırılmaktadır. Buna karşılık kesikli sistemlerde substrat ve inokulum başlangıçta reaktöre yüklenmekte ve belirlenen deney süresi boyunca yeni substrat beslemesi yapılmamaktadır. Bu nedenle kesikli sistemlerde proses, başlangıçta sisteme yüklenen substratın biyolojik olarak parçalanması ve oluşan gazın zaman içerisinde takip edilmesi esasına dayanmaktadır (Koch et al., 2020).

Kesikli anaerobik sistemler özellikle laboratuvar ölçekli araştırmalarda önemli bir yere sahiptir. Bunun temel nedenleri arasında deney düzeneğinin nispeten basit olması, çok sayıda numunenin aynı anda test edilebilmesi ve sıcaklık, pH, substrat/inokulum oranı ve inkübasyon süresi gibi değişkenlerin kontrollü olarak belirlenebilmesi bulunmaktadır. Koch ve ark. (2020), kesikli olarak gerçekleştirilen Biyokimyasal Metan Potansiyeli (Biochemical Methane Potential, BMP) testlerinin, organik substratların metan potansiyelinin belirlenmesinde güçlü ve kullanışlı bir deneysel araç olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, batch koşullarında elde edilen sonuçların sürekli işletilen gerçek anaerobik çürütme sistemlerine doğrudan aktarılmasının bazı sınırlılıkları bulunduğu da vurgulanmıştır.

Kesikli anaerobik sistemlerin en yaygın kullanım alanlarından biri Biyokimyasal Metan Potansiyeli (BMP) testleridir. BMP testi, belirli bir substratın kontrollü anaerobik koşullar altında parçalanması sonucunda teorik olarak elde edilebilecek biyometan miktarının deneysel olarak belirlenmesine yönelik bir yöntemdir. Bu testlerde substrat ve aktif anaerobik inokulum genellikle kapalı reaktörlerde bir araya getirilmekte ve deney süresince oluşan metan miktarı izlenmektedir. Elde edilen sonuçlar çoğunlukla substratın uçucu katı madde (VS) veya kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) miktarına göre normalize edilmektedir (Koch et al., 2020).

BMP testleri, farklı organik atıkların anaerobik çürütmeye uygunluğunun belirlenmesi, substratların metan üretim potansiyellerinin karşılaştırılması, ön işlem uygulamalarının etkinliğinin değerlendirilmesi ve farklı substratların ko-fermantasyon potansiyelinin araştırılması amacıyla kullanılmaktadır. Cabrita ve Santos (2023), 2008–2023 yılları arasındaki BMP çalışmalarını değerlendirdikleri kapsamlı derlemede hayvansal gübre,

arıtma çamuru, gıda atıkları, enerji bitkileri ve diğer organik atıkların başlıca BMP substratları olarak kullanıldığını bildirmiştir. Aynı çalışmada, BMP yöntemlerinde kullanılan deneysel koşulların araştırmadan araştırmaya önemli ölçüde değiştiği ve bu durumun farklı çalışmaların sonuçlarını doğrudan karşılaştırmayı güçleştirdiği belirtilmiştir.

Kesikli sistemlerde deneysel koşulların standardizasyonu, elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından önemli bir konudur. Özellikle inokulumun özellikleri, substrat/inokulum oranı, sıcaklık, pH, karıştırma, gaz boşluğu (headspace), inkübasyon süresi ve gaz ölçüm yöntemi gibi faktörler metan üretim sonuçlarını etkileyebilmektedir. Koch ve ark. (2020), uygun bir BMP deneyinde aktif bir inokulum kullanılmasını, uygun bir inokulum/substrat oranının seçilmesini, sıcaklığın sabit tutulmasını, yeterli ancak kontrollü karıştırma yapılmasını ve deney başlangıcında headspace içerisindeki oksijenin uzaklaştırılmasını önermektedir.

Bununla birlikte, kesikli sistemlerin sağladığı kontrollü deney koşulları, gerçek anaerobik çürütme tesislerinde meydana gelen tüm proses dinamiklerini temsil etmemektedir. Örneğin sürekli işletilen sistemlerde organik yükleme hızı (OLR), hidrolik bekletme süresi (HRT), mikrobiyal adaptasyon, uzun süreli inhibitör birikimi ve besin maddelerinin sürekliliği gibi faktörler proses performansını etkileyebilmektedir. Bu faktörlerin önemli bir bölümü tek seferlik substrat beslemesine dayanan batch BMP deneylerinde doğrudan değerlendirilememektedir. Bu nedenle BMP sonuçlarının, gerçek bir anaerobik çürütme tesisinin işletme performansından ziyade substratın biyometan potansiyelini ve biyobozunabilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılması daha uygundur (Koch et al., 2020).

Son yıllarda BMP çalışmalarının sayısındaki artış, farklı organik atıkların enerji potansiyelinin belirlenmesine yönelik ilgiyi de artırmıştır. Cabrita ve Santos (2023), BMP çalışmalarının özellikle 2021 yılına kadar önemli ölçüde arttığını, ancak metodolojik farklılıkların halen devam ettiğini bildirmiştir. Bu durum, yalnızca elde edilen metan miktarının değil, deneysel koşulların ve kullanılan metodolojinin de ayrıntılı biçimde raporlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Kesikli anaerobik fermantasyon sistemleri, farklı substratların karşılaştırılmasının yanı sıra ko-fermantasyon ve proses optimizasyonu çalışmalarında da önemli bir deneysel platform oluşturmaktadır. Özellikle hayvansal gübrelerin enerji bitkileri, gıda atıkları veya diğer organik materyallerle birlikte değerlendirilmesi, substratların besin bileşiminin ve biyobozunabilirliğinin iyileştirilmesi açısından araştırılmaktadır. Bununla birlikte, batch koşullarında gözlenen olası sinerjik veya antagonistik etkilerin sürekli sistemlerde aynı şekilde ortaya çıkmayabileceği belirtilmektedir (Koch et al., 2020). Kesikli sistemlerin bir diğer önemli kullanım alanı ise anaerobik fermantasyon kinetiğinin araştırılmasıdır. Deney boyunca belirli zaman aralıklarında ölçülen kümülatif metan üretimi, farklı matematiksel modeller kullanılarak

değerlendirilebilmektedir. Bu modeller aracılığıyla maksimum metan üretim potansiyeli, maksimum üretim hızı ve lag fazı gibi kinetik parametreler belirlenebilmektedir. Böylece yalnızca toplam metan üretimi değil, aynı zamanda metan oluşumunun zamana bağlı davranışı da ortaya konulabilmektedir (Cabrita & Santos, 2023). Bununla birlikte, kesikli anaerobik sistemlerin laboratuvar ölçeğinde sağladığı avantajların yanında bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Özellikle deney süresince yeni substrat beslemesinin yapılmaması, sürekli sistemlerdeki uzun dönemli proses kararlılığının değerlendirilmesini engellemektedir. Ayrıca gerçek tesislerde karşılaşılan sürekli organik yükleme, mikrobiyal adaptasyon, inhibitörlerin zaman içerisinde birikmesi ve digestatın sistemden uzaklaştırılması gibi olaylar standart batch deneylerinde tam olarak simüle edilememektedir. Bu nedenle kesikli sistemlerden elde edilen verilerin, sürekli işletilen anaerobik çürütme sistemlerine aktarılmasında dikkatli olunması gerekmektedir (Koch et al., 2020).

Sonuç olarak kesikli anaerobik fermantasyon sistemleri; organik substratların biyobozunabilirliğinin belirlenmesi, biyometan potansiyelinin değerlendirilmesi, farklı substratların karşılaştırılması, ko-fermantasyon uygulamalarının araştırılması ve anaerobik fermantasyon kinetiğinin incelenmesi açısından önemli bir araştırma aracıdır. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların doğru yorumlanabilmesi için deneysel koşulların açık biçimde tanımlanması ve batch sistemlerin sürekli anaerobik çürütme sistemlerinden farklı olduğunun dikkate alınması gerekmektedir (Koch et al., 2020; Cabrita & Santos, 2023). Bu bölümde, kesikli (batch) anaerobik fermantasyon sistemlerinin temel özellikleri ve çalışma prensipleri ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Bu kapsamda öncelikle kesikli sistemlerin tanımı ve temel bileşenleri açıklanacak, ardından anaerobik fermantasyonun temel aşamaları ve sistemin çalışmasını etkileyen başlıca işletme parametreleri değerlendirilecektir. Ayrıca kesikli sistemlerde biyogaz ve metan üretiminin belirlenmesi, BMP testlerinin temel özellikleri, kullanım alanları, avantajları ve sınırlılıkları güncel literatür doğrultusunda ortaya konulacaktır.

2. KESIKLI (BATCH) ANAEROBİK FERMANTASYON SİSTEMLERİNİN TANIMI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

Kesikli (batch) anaerobik fermantasyon sistemi, belirli miktarda substrat ve anaerobik mikroorganizma içeren inokulumun reaktöre başlangıçta yüklenmesi ve fermantasyon süresince sisteme yeni substrat beslemesi yapılmadan prosesin yürütülmesi esasına dayanan bir anaerobik biyolojik dönüşüm sistemidir. Bu sistemlerde substrat, mikroorganizmalar tarafından belirli bir süre içerisinde parçalanmakta ve süreç boyunca oluşan biyogaz veya metan miktarı izlenmektedir. Proses, başlangıçta sisteme yüklenen organik maddenin büyük ölçüde tüketilmesi veya gaz üretiminin önemli ölçüde azalması ile sonlandırılmaktadır. Bu nedenle batch sistemler, zamana

bağlı olarak gerçekleşen anaerobik biyolojik dönüşümün izlenmesine olanak sağlayan kapalı sistemler olarak değerlendirilebilir (Koch et al., 2020).

Kesikli sistemlerin temel özelliği, besleme ve çıkış işlemlerinin fermantasyon süresi boyunca gerçekleştirilmemesidir. Reaktör başlangıçta substrat, inokulum ve gerekli diğer bileşenlerle doldurulduktan sonra kapatılmakta ve anaerobik koşullar altında belirli bir süre inkübe edilmektedir. Buna karşılık sürekli anaerobik sistemlerde substrat belirli bir debi ile reaktöre sürekli veya periyodik olarak beslenmekte ve sistemden eş zamanlı olarak digestat uzaklaştırılmaktadır. Bu nedenle batch sistemlerde prosesin başlangıç koşulları önemli bir rol oynarken, sürekli sistemlerde kararlı durum koşullarının oluşturulması ve sürdürülmesi daha önemli hale gelmektedir (Koch et al., 2020). Kesikli anaerobik sistemlerin çalışma döngüsü genel olarak reaktörün hazırlanması, substrat ve inokulumun yüklenmesi, anaerobik koşulların oluşturulması, inkübasyon, biyogaz üretiminin izlenmesi ve deney sonunda sistemin boşaltılması aşamalarından oluşmaktadır. Deney başlangıcında substratın fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmekte ve uygun miktarda inokulum ile karıştırılmaktadır. Daha sonra reaktörde oksijen bulunmayan bir ortam oluşturularak sistem belirlenen sıcaklıkta inkübasyona bırakılmaktadır. Fermantasyon süresince oluşan biyogaz belirli aralıklarla ölçülmekte ve gerekiyorsa gazın metan içeriği analiz edilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle farklı substratların aynı deney koşulları altında karşılaştırılması açısından önemli avantaj sağlamaktadır (Cabrita & Santos, 2023). Kesikli sistemlerin en önemli uygulama alanlarından biri Biyokimyasal Metan Potansiyeli (Biochemical Methane Potential, BMP) testleridir. BMP testlerinde belirli miktardaki substrat, aktif anaerobik inokulum ile birlikte kapalı reaktörlerde inkübe edilmekte ve deney süresince oluşan metan miktarı belirlenmektedir. Elde edilen kümülatif metan üretimi, genellikle eklenen uçucu katı madde (VS) veya kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) miktarına göre normalize edilerek özgül metan üretimi hesaplanmaktadır (Cabrita & Santos, 2023). Bu nedenle BMP testleri, organik atıkların anaerobik biyobozunabilirliğinin ve biyometan üretim potansiyelinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cabrita ve Santos (2023), 2008–2023 yılları arasında gerçekleştirilen BMP çalışmalarını inceledikleri derlemede, hayvansal gübreler, arıtma çamurları, gıda atıkları, enerji bitkileri ve diğer organik atıkların başlıca substrat gruplarını oluşturduğunu bildirmiştir. Araştırmacılar ayrıca BMP deneylerinde kullanılan substrat özellikleri, inokulum, deney sıcaklığı, substrat/inokulum oranı, inkübasyon süresi ve gaz ölçüm yöntemleri arasında önemli farklılıklar bulunduğunu belirtmiştir. Bu farklılıklar, farklı araştırmalarda elde edilen metan verimlerinin doğrudan karşılaştırılmasını zorlaştırabilmektedir (Cabrita & Santos, 2023).

Kesikli sistemlerde substrat ve inokulum arasındaki oran, proses performansını belirleyen önemli işletme değişkenlerinden biridir. Substrat miktarının inokulum miktarına göre aşırı yüksek olması, hızlı organik madde

parçalanmasına ve uçucu yağ asitlerinin (VFA) birikmesine neden olarak metanojenik aktiviteyi olumsuz etkileyebilmektedir. Buna karşılık yeterli miktarda aktif inokulum kullanılması, oluşan ara ürünlerin daha hızlı tüketilmesine ve prosesin daha kararlı ilerlemesine yardımcı olabilmektedir. Zhang ve ark. (2022), gıda atığının batch anaerobik çürütülmesini inceledikleri çalışmalarında substrat/inokulum oranının yalnızca metan üretimini değil, aynı zamanda mikrobiyal topluluk yapısını ve metabolik yolları da etkilediğini göstermiştir. Çalışmada 1:3 substrat/inokulum oranında daha yüksek metan üretimi elde edilmiştir (Zhang et al., 2022). Benzer şekilde, batch gıda atığı anaerobik çürütme sistemlerinde inokulum/substrat oranının azaltılması belirli bir seviyenin altında prosesin asitleşmesine neden olabilmektedir. 2022 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, inokulum/substrat oranının 0,5 ve daha düşük değerlere düşürülmesi durumunda uçucu yağ asitlerinin biriktiği ve pH'ın önemli ölçüde değiştiği bildirilmiştir. Buna karşılık uygun inokulum miktarı, metanojenik mikroorganizmaların faaliyetlerini sürdürebilmesi açısından daha elverişli koşullar sağlamıştır (Kinetic investigations..., 2022). Kesikli sistemlerde kullanılan reaktörlerin hacmi ve yapısı da deneysel sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir. Laboratuvar ölçekli BMP çalışmalarında serum şişeleri ve benzeri kapalı reaktörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Homojen substratların değerlendirilmesinde daha küçük hacimli reaktörler kullanılabilirken, heterojen substratlarda daha büyük reaktör hacimleri daha temsil edici sonuçlar sağlayabilmektedir. Bunun temel nedeni, reaktör hacminin mikrobiyal topluluk büyüklüğü, gaz-sıvı etkileşimi ve uçucu yağ asidi konsantrasyonları gibi çeşitli proses özelliklerini etkileyebilmesidir (Filer et al., 2019).

Kesikli sistemlerin bir diğer önemli özelliği, deney koşullarının araştırmacı tarafından büyük ölçüde kontrol edilebilmesidir. Sıcaklık, pH, substrat/inokulum oranı, toplam katı madde (TS), uçucu katı madde (VS), karıştırma, inkübasyon süresi ve headspace hacmi gibi değişkenler deney tasarımının bir parçası olarak belirlenebilmektedir. Bu durum, belirli bir parametrenin anaerobik fermantasyon üzerindeki etkisinin kontrollü olarak araştırılmasına olanak sağlamaktadır (Filer et al., 2019; Cabrita & Santos, 2023). Özellikle sıcaklık, anaerobik mikroorganizmaların metabolik faaliyetlerini ve dolayısıyla metan üretim hızını etkileyen temel parametrelerden biridir. Laboratuvar ölçekli BMP testlerinde mezofilik koşullar, özellikle yaklaşık 35 °C civarındaki sıcaklıklar, yaygın olarak kullanılmaktadır. Termofilik koşullar ise yaklaşık 55 °C civarında gerçekleştirilebilmekte ve farklı mikrobiyal toplulukların faaliyet göstermesine olanak sağlamaktadır. Ancak sıcaklık koşullarının değiştirilmesi, yalnızca reaksiyon hızını değil, aynı zamanda mikrobiyal topluluğun yapısını ve prosesin kararlılığını da etkileyebilmektedir (Filer et al., 2019). Kesikli anaerobik sistemlerde pH da önemli bir proses göstergesidir. Anaerobik fermantasyonun farklı aşamalarında faaliyet

gösteren mikroorganizmaların çevresel koşullara duyarlılıkları birbirinden farklıdır. Özellikle asidojeniz sonucunda oluşan uçucu yağ asitlerinin aşırı birikmesi, pH'ın düşmesine ve metanojenik aktivitenin baskılanmasına neden olabilir. Bu nedenle batch sistemlerde başlangıç pH'ının uygun seviyede tutulması ve proses sırasında oluşabilecek aşırı asitleşmenin kontrol edilmesi önem taşımaktadır (Filer et al., 2019; Cabrita & Santos, 2023).

Kesikli sistemlerde substratın fiziksel ve kimyasal özellikleri de proses performansını doğrudan etkilemektedir. Toplam katı madde (TS), uçucu katı madde (VS), kimyasal oksijen ihtiyacı (COD), pH, karbon/azot (C/N) oranı ve substratın biyobozunabilirliği, anaerobik fermantasyon deneylerinde sıklıkla kullanılan temel karakterizasyon parametreleridir. Cabrita ve Santos (2023), BMP çalışmalarında özellikle TS, VS ve COD değerlerinin substratların karakterizasyonunda yaygın olarak kullanıldığını ve farklı substrat gruplarının bu parametreler bakımından önemli farklılıklar gösterebildiğini bildirmiştir. Kesikli anaerobik sistemler yalnızca düşük katı maddeli laboratuvar uygulamalarıyla sınırlı değildir. Yüksek katı maddeli (high-solids veya dry) batch anaerobik çürütme sistemleri de özellikle organik katı atıkların değerlendirilmesinde araştırılmaktadır. Bu sistemlerde daha yüksek TS konsantrasyonları kullanılmakta ve proses daha az su gerektirdiği için bazı uygulamalarda daha küçük reaktör hacimleri ve daha düşük su tüketimi gibi avantajlar sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, yüksek katı madde konsantrasyonu karıştırma, kütle transferi, inhibitör birikimi ve prosesin homojenliği açısından ek sorunlar oluşturabilmektedir (Akinbomi et al., 2022). Özellikle katı organik atıkların batch anaerobik çürütülmesinde inokulum miktarı ve içeriği proses kararlılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Rocamora ve ark. (2022), organik belediye katı atıklarının kuru batch anaerobik çürütülmesini inceledikleri çalışmalarında farklı inokulum/substrat oranlarını değerlendirmiş ve inokulum miktarının yanı sıra su ve perkolat ilavesinin prosesin asitleşme eğilimi ve biyogaz üretimi üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, özellikle yüksek katı maddeli batch sistemlerde yalnızca substrat miktarının değil, mikrobiyal topluluğun ve sıvı faz koşullarının da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Kesikli sistemlerin önemli bir avantajı, farklı substratların veya farklı proses koşullarının paralel deneylerle karşılaştırılabilmesidir. Örneğin aynı inokulum kullanılarak farklı hayvansal gübrelerin, enerji bitkilerinin veya gıda atıklarının metan üretim potansiyelleri belirlenebilir. Benzer şekilde, tek bir substrat ile farklı substrat karışımlarının karşılaştırılması yoluyla ko-fermantasyonun olası etkileri araştırılabilir. Bu yönüyle batch sistemler, anaerobik fermantasyon prosesinin optimizasyonunda bir ön değerlendirme ve tarama aracı olarak önemli bir işlev görmektedir (Cabrita & Santos, 2023).

Bununla birlikte, kesikli sistemlerden elde edilen sonuçların yorumlanmasında bazı sınırlılıkların göz önünde bulundurulması

gerekmektedir. Batch sistemlerde substratın başlangıçta tek seferde yüklenmesi nedeniyle sürekli sistemlerde görülen organik yükleme hızının değişimi, hidrolik bekletme süresi ve uzun dönemli mikrobiyal adaptasyon gibi proses dinamikleri doğrudan incelenememektedir. Ayrıca laboratuvar ölçekli batch reaktörlerde elde edilen yüksek metan potansiyeli değerleri, gerçek bir anaerobik çürütme tesisinde aynı düzeyde metan üretileceği anlamına gelmemektedir. Bu nedenle batch deneyleri, çoğunlukla substratın potansiyel biyobozunabilirliği ve metan üretim kapasitesinin belirlenmesi amacıyla değerlendirilmelidir (Koch et al., 2020; Cabrita & Santos, 2023). Sonuç olarak kesikli anaerobik fermantasyon sistemleri; basit işletme yapısı, deneysel koşulların kontrol edilebilirliği ve farklı substratların karşılaştırılmasına olanak sağlaması nedeniyle anaerobik fermantasyon araştırmalarında önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte sistem performansı; substrat özellikleri, inokulumun niteliği ve miktarı, substrat/inokulum oranı, sıcaklık, pH, katı madde içeriği ve inkübasyon süresi gibi birçok faktörün birlikte etkisi altında şekillenmektedir. Bu nedenle güvenilir bir batch deneyinin tasarlanabilmesi için yalnızca reaktörün kapalı olması yeterli olmayıp, deneysel koşulların sistematik ve tekrarlanabilir biçimde belirlenmesi gerekmektedir (Cabrita & Santos, 2023).

3. KESIKLI (BATCH) ANAEROBİK FERMANTASYON SİSTEMLERİNİN ÇALIŞMA KESIKLI SİSTEMLERİN KULLANIM ALANLARI

Kesikli anaerobik fermantasyon sistemlerinin çalışma prensibi, organik substratların oksijensiz ortamda farklı mikroorganizma gruplarının ardışık ve eş zamanlı faaliyetleri sonucunda daha basit bileşiklere ve nihai olarak metana dönüştürülmesine dayanmaktadır. Batch sistemlerde substrat ve inokulum reaktöre başlangıçta yüklenmekte, gerekli anaerobik koşullar oluşturulduktan sonra sistem belirli bir süre boyunca inkübe edilmektedir. Bu süreçte substratın parçalanması sonucunda oluşan biyogaz belirli zaman aralıklarında ölçülerek anaerobik fermantasyonun zamana bağlı performansı değerlendirilmektedir (Koch et al., 2020).

Anaerobik fermantasyon tek bir biyokimyasal reaksiyondan oluşmamakta, birbirini takip eden ve birbirine bağlı dört temel aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar hidroliz, asidojeniz, asetojeniz ve metanojeniz aşamalarıdır. Her aşamada farklı fonksiyonel mikroorganizma grupları görev almakta ve bir aşamanın ürünleri bir sonraki aşamanın substratını oluşturmaktadır. Bu nedenle anaerobik fermantasyon, farklı mikroorganizma grupları arasındaki metabolik iş birliğine dayanan karmaşık bir mikrobiyal süreç olarak değerlendirilmektedir (Appels et al., 2011; Zhang et al., 2020).

3.1.Reaktörün Hazırlanması ve Substratın Yüklenmesi

Kesikli anaerobik fermentasyon süreci, reaktörün deney koşullarına uygun şekilde hazırlanması ile başlamaktadır. Reaktöre belirli miktarda substrat ve anaerobik inokulum eklenmektedir. Kullanılacak substratın miktarı ve özellikleri deneyin amacına göre belirlenirken, inokulumun yeterli miktarda aktif anaerobik mikroorganizma içermesi beklenmektedir. Özellikle BMP deneylerinde inokulum, substratın biyolojik olarak parçalanmasını sağlayan temel mikrobiyal kaynağı oluşturmaktadır (Koch et al., 2020). Substratın reaktöre yüklenmesinden önce toplam katı madde (TS), uçucu katı madde (VS), pH ve gerektiğinde kimyasal oksijen ihtiyacı (COD), toplam azot ve karbon/azot (C/N) oranı gibi temel özellikleri belirlenebilmektedir. Bu karakterizasyon, deney sonuçlarının yorumlanması ve farklı substratların karşılaştırılması açısından önem taşımaktadır (Cabrita & Santos, 2023).

Reaktör içerisinde substrat ile inokulumun homojen biçimde karıştırılması, mikroorganizmaların substrata erişimini kolaylaştırmaktadır. Özellikle yüksek katı maddeli sistemlerde substratın fiziksel yapısı ve reaktör içerisindeki dağılımı proses performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Akinbomi et al., 2022).

3.2.Anaerobik Koşulların Oluşturulması

Anaerobik mikroorganizmaların, özellikle metanojenlerin, oksijene karşı yüksek hassasiyet göstermesi nedeniyle reaktör içerisinde oksijensiz koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla reaktörün headspace bölgesindeki hava, azot (N_2), karbondioksit (CO_2) veya bunların karışımları kullanılarak uzaklaştırılabilmektedir. Bazı uygulamalarda inokulumun önceden anaerobik koşullarda tutulması da tercih edilmektedir (Koch et al., 2020). Anaerobik koşulların yeterince sağlanamaması, özellikle metanojenik mikroorganizmaların aktivitesini olumsuz etkileyebilmekte ve metan oluşumunun gecikmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle batch deneylerinde reaktörlerin kapatılması, gaz sızdırmazlığının sağlanması ve deney başlangıcında oksijenin mümkün olduğunca uzaklaştırılması önemli deneysel uygulamalar arasında yer almaktadır (Filer et al., 2019).

3.3.Hidroliz Aşaması

Anaerobik fermentasyonun ilk biyokimyasal aşaması hidrolizdir. Organik atıkların önemli bir bölümü protein, karbonhidrat, lipid ve lignoselülozik yapı gibi kompleks bileşiklerden oluşmaktadır. Bu büyük moleküller, mikroorganizmalar tarafından doğrudan hücre içerisine alınamadığından öncelikle daha küçük ve çözünür bileşiklere parçalanmaktadır. Hidroliz sırasında polisakkaritler daha basit şekerlere, proteinler amino asitlere ve lipidler yağ asitleri ile gliserole dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm, hücre dışı

enzimler tarafından gerçekleştirilmektedir. Hidroliz sonucunda oluşan çözünür bileşikler daha sonra asidojenik mikroorganizmalar tarafından kullanılmaktadır (Zhang et al., 2020). Hidroliz aşamasının hızı, özellikle lignoselülozik ve yüksek katı maddeli substratların anaerobik çürütülmesinde prosesin genel hızını belirleyen önemli faktörlerden biridir. Selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriği yüksek materyallerin biyolojik olarak parçalanabilirliğinin düşük olması, hidroliz aşamasını sınırlayabilmektedir. Bu nedenle lignoselülozik substratların kullanıldığı batch sistemlerde mekanik, termal, kimyasal veya biyolojik ön işlem uygulamaları araştırılmaktadır (Akinbomi et al., 2022).

Hidrolizin yavaş gerçekleşmesi durumunda sonraki aşamalara aktarılan çözünür substrat miktarı azalmakta ve dolayısıyla metan oluşumunun başlangıcı gecikebilmektedir. Bu durum batch sistemlerde gözlenen lag fazının nedenlerinden biri olarak değerlendirilebilir.

3.4.Asidojenez Aşaması

Hidroliz sonucunda oluşan çözünür organik bileşikler, asidojenik mikroorganizmalar tarafından daha küçük organik asitlere, alkollere, hidrojen ve karbondioksit dönüştürülmektedir. Bu aşama asidojenez olarak adlandırılmaktadır. Asidojenez sonucunda özellikle uçucu yağ asitleri (VFA) oluşmaktadır. Asetik, propiyonik ve bütirik asit gibi organik asitlerin yanı sıra etanol, H_2 ve CO_2 de oluşabilmektedir. Bu bileşikler anaerobik fermantasyonun sonraki aşamalarında diğer mikroorganizma grupları tarafından kullanılmaktadır (Zhang et al., 2020). Asidojenez hızlı gerçekleşen bir aşama olabilmektedir. Buna karşılık metanojenez daha yavaş gerçekleşebildiğinden, özellikle yüksek substrat yüklemelerinde asit oluşumu ile asit tüketimi arasında bir dengesizlik meydana gelebilmektedir. Bunun sonucunda VFA birikimi ve pH düşüşü meydana gelebilir. Bu durum metanojenik mikroorganizmaların faaliyetini baskılayarak metan üretiminin azalmasına neden olabilir (Koch et al., 2020). Bu nedenle batch sistemlerde substrat/inokulum oranının uygun şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Aşırı substrat yüklemesi, kısa süre içerisinde yüksek miktarda organik asit oluşmasına ve sistemin asitleşmesine neden olabilir. Buna karşılık yeterli miktarda aktif inokulum kullanılması, oluşan ara ürünlerin daha hızlı tüketilmesini sağlayarak prosesin kararlı biçimde ilerlemesine katkıda bulunabilir (Zhang et al., 2022).

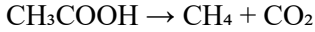
3.5.Asetojenez Aşaması

Asidojenez sonucunda oluşan propiyonat, bütirat, alkoller ve diğer ara ürünlerin önemli bir bölümü doğrudan metanojenik mikroorganizmalar tarafından kullanılamamaktadır. Bu bileşikler, asetojenik mikroorganizmalar tarafından asetat, hidrojen ve karbondioksit dönüştürülmektedir. Bu aşama

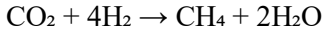
asetojenez olarak adlandırılmaktadır. Asetojenez, anaerobik fermentasyonun önemli ara aşamalarından biridir çünkü oluşan asetat, metan üretiminin başlıca öncüllerinden birini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, asetojenik reaksiyonların önemli bir bölümü düşük hidrojen kısmi basıncı koşullarında daha elverişli hale gelmektedir. Bu nedenle asetojenik ve metanojenik mikroorganizmalar arasında yakın bir metabolik ilişki bulunmaktadır (Zhang et al., 2020). Asetojenez sırasında oluşan hidrojenin metanojenik mikroorganizmalar tarafından hızlı bir şekilde tüketilmesi, asetojenik reaksiyonların devam edebilmesi açısından önemlidir. Bu ilişki literatürde sentrofik etkileşim olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla anaerobik fermentasyonun başarısı yalnızca tek bir mikroorganizma grubunun aktivitesine değil, farklı mikrobiyal gruplar arasındaki metabolik dengeye bağlıdır.

3.6. Metanojenez Aşaması

Anaerobik fermentasyonun son aşaması metanojenezdir. Bu aşamada metanojenik arkeler, önceki aşamalarda oluşan asetat, hidrojen ve karbondioksit gibi bileşikleri kullanarak metan üretmektedir. Metan oluşumu genel olarak iki temel metabolik yol üzerinden gerçekleşmektedir. İlk yol, asetatın parçalanmasına dayanan asetoklastik metanojenezdir. Bu yolda asetat, metan ve karbondioksite dönüştürülmektedir:



İkinci temel yol ise hidrojen ve karbondioksite kullanıldığı hidrojenotrofik metanojenezdir:



Bunun yanı sıra bazı metanojenik mikroorganizmalar metanol ve metilaminler gibi metillenmiş bileşiklerden de metan üretebilmektedir. Ancak anaerobik çürütme sistemlerinde asetoklastik ve hidrojenotrofik yollar metan oluşumunun temel yollarını oluşturmaktadır (Zhang et al., 2020). Metanojenez, anaerobik fermentasyonun proses açısından en hassas aşamalarından biridir. Metanojenik arkelerin büyüme hızlarının diğer bazı anaerobik mikroorganizmalara göre daha düşük olması ve çevresel değişimlere karşı hassasiyetleri, proses kararlılığının sağlanmasını önemli hale getirmektedir. Özellikle pH, sıcaklık, amonyak, VFA ve hidrojen kısmi basıncı gibi faktörlerdeki değişimler metan üretimini etkileyebilmektedir (Koch et al., 2020).

Batch sistemlerde metan üretiminin zaman içerisindeki değişimi, substratın biyolojik olarak parçalanabilirliği hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Deneyin başlangıcında mikroorganizmaların substrata adapte olması ve hidroliz aşamasının gerçekleşmesi nedeniyle gaz üretimi düşük olabilir. Daha sonra biyolojik aktivitenin artmasıyla metan üretim hızı yükselmekte ve belirli bir noktadan sonra substratın tükenmesine bağlı olarak yeniden

azalmaktadır. Bu davranış çoğunlukla sigmoidal bir metan üretim eğrisi şeklinde gözlenmektedir.

3.7. Biyogaz Oluşumu ve Gaz Üretiminin İzlenmesi

Anaerobik fermantasyon sonucunda oluşan biyogaz temel olarak metan ve karbondioksitten oluşmaktadır. Bunun yanında hidrojen sülfür (H_2S), hidrojen (H_2), su buharı ve diğer iz gazlar da biyogaz içerisinde bulunabilmektedir. Metan, biyogazın enerji açısından en önemli bileşendir ve biyogazın enerji değerinin temel belirleyicisidir. Batch sistemlerde biyogaz üretimi genellikle belirli zaman aralıklarında ölçülmekte ve kümülatif gaz üretim eğrileri oluşturulmaktadır. Gazın yalnızca toplam hacminin belirlenmesi yeterli olmayıp, metan konsantrasyonunun da belirlenmesi önemlidir. Çünkü yüksek biyogaz üretimi her zaman yüksek metan üretimi anlamına gelmemektedir. Bu nedenle batch çalışmalarında toplam biyogaz hacminin yanında metan yüzdesinin ve özgül metan veriminin raporlanması önerilmektedir (Koch et al., 2020).

Metan üretimi çoğunlukla substratın uçucu katı madde miktarına göre normalize edilmektedir. Böylece farklı miktarlarda veya farklı özelliklerde substrat kullanılan deneylerin karşılaştırılması mümkün olmaktadır. Örneğin metan verimi $mL\ CH_4/g\ VS$, $L\ CH_4/kg\ VS$ veya benzer birimlerle ifade edilebilmektedir.

3.8. Batch Sistemlerde Metan Üretim Eğrisinin Genel Özellikleri

Kesikli anaerobik fermantasyon sistemlerinde metan üretimi genellikle zaman içerisinde değişen bir profil göstermektedir. Bu profil genel olarak üç temel dönem üzerinden değerlendirilebilir:

Lag fazı: Mikroorganizmaların yeni substrata adaptasyonu ve biyolojik dönüşümün başlaması.

Aktif üretim fazı: Substratın hızlı şekilde parçalanması ve metan üretim hızının artması.

Durağan veya azalan üretim fazı: Kolay biyobozunabilir substratların azalması nedeniyle metan üretim hızının düşmesi. Bu davranış özellikle BMP deneylerinde kümülatif metan üretim eğrilerinin matematiksel modellerle açıklanmasına olanak sağlamaktadır. Modified Gompertz ve lojistik modeller, metan üretim potansiyelinin yanı sıra maksimum üretim hızı ve lag fazı gibi kinetik parametrelerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Koch et al., 2020; Cabrita & Santos, 2023).

Sonuç olarak kesikli anaerobik fermantasyon sistemlerinde biyogaz oluşumu, birbirinden bağımsız reaksiyonların toplamından ziyade birbirine bağlı mikrobiyal ve biyokimyasal süreçlerin sonucudur. Hidroliz aşamasında kompleks organik maddelerin parçalanmasıyla başlayan süreç, asidojeniz ve

asetojenez aracılığıyla metanojenlerin kullanabileceği substratların oluşması ve son olarak metanojeniz ile metan üretiminin gerçekleşmesi şeklinde devam etmektedir. Bu aşamalar arasındaki dengenin korunması, özellikle batch sistemlerde yüksek ve kararlı metan üretimi açısından temel öneme sahiptir.

4. KESIKLI SISTEMLERDE TEMEL İŞLETME PARAMETRELERİ

Kesikli anaerobik fermantasyon sistemlerinde biyogaz ve metan üretimi yalnızca substratın kimyasal bileşimine değil, aynı zamanda prosesin işletme koşullarına da bağlıdır. Sıcaklık, pH, substrat/inokulum oranı, toplam ve uçucu katı madde konsantrasyonu, karbon/azot (C/N) oranı, karıştırma ve inkübasyon süresi, anaerobik fermantasyonun performansını etkileyen başlıca parametrelerdir. Bu parametrelerde meydana gelen değişimler mikrobiyal aktiviteyi, organik maddelerin parçalanma hızını, ara ürünlerin oluşumunu ve sonuç olarak metan üretimini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebilmektedir (Bella & Rao, 2021; Gyadi et al., 2024). Özellikle kesikli sistemlerde işletme parametrelerinin kontrolü önemlidir. Çünkü batch reaktörlerde deney süresince yeni substrat beslemesi yapılmadığından, başlangıçta belirlenen substrat ve inokulum miktarı prosesin büyük bölümünü belirlemektedir. Bu nedenle deney başlangıcındaki koşulların uygun şekilde oluşturulması, elde edilen metan üretim sonuçlarının güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Güncel derlemelerde sıcaklık, pH, C/N oranı, substrat özellikleri, mikrobiyal aktivite, uçucu yağ asitleri ve amonyak konsantrasyonunun anaerobik fermantasyon performansını belirleyen temel faktörler olduğu bildirilmektedir (Gyadi et al., 2024).

4.1.Sıcaklık

Sıcaklık, anaerobik fermantasyon sistemlerinde mikrobiyal büyüme ve enzimatik faaliyetleri etkileyen en önemli çevresel parametrelerden biridir. Anaerobik mikroorganizmaların faaliyet gösterdiği sıcaklık koşullarına bağlı olarak prosesler genel olarak psikrofilik, mezofilik ve termofilik koşullar altında değerlendirilmektedir. Uygulamada anaerobik çürütme sistemlerinde özellikle mezofilik ve termofilik sıcaklık aralıkları yaygın olarak kullanılmaktadır. Mezofilik anaerobik çürütme genellikle yaklaşık 30–40 °C aralığında gerçekleştirilirken, termofilik sistemlerde sıcaklık yaklaşık 50–60 °C aralığına yükseltilmektedir. Organik katı atıkların anaerobik çürütülmesine ilişkin güncel bir derlemelerde mezofilik koşullar için yaklaşık 31–35 °C, termofilik koşullar için ise 55–60 °C aralıkları yaygın çalışma koşulları olarak belirtilmiştir (Abdelsalam et al., 2024).

Sıcaklığın anaerobik fermentasyon üzerindeki etkisi yalnızca reaksiyon hızındaki değişimle sınırlı değildir. Sıcaklık, aynı zamanda mikrobiyal topluluğun bileşimini, mikroorganizmaların büyüme hızını ve farklı metabolik yolların baskınlığını da değiştirebilmektedir. Zhou ve ark. (2021), sıcaklığın anaerobik çürütmede mikrobiyal ekosistemi düzenleyen temel faktörlerden biri olduğunu ve farklı sıcaklık koşullarının mikrobiyal kompozisyon ile proses kararlılığında değişikliklere yol açabildiğini bildirmiştir.

Mezofilik sistemler, sıcaklık kontrolünün görece kolay olması ve proses kararlılığının yüksek olması nedeniyle laboratuvar ölçekli batch ve BMP deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termofilik koşullar ise daha hızlı organik madde parçalanması ve daha yüksek reaksiyon hızları gibi avantajlar sağlayabilmektedir. Bununla birlikte yüksek sıcaklık, bazı durumlarda amonyak toksisitesinin artmasına ve mikrobiyal topluluğun çevresel değişimlere karşı daha hassas hale gelmesine neden olabilmektedir (Zhou et al., 2021). Dolayısıyla batch sistemlerde sıcaklığın belirlenmesi, yalnızca daha yüksek gaz üretimini hedeflemek yerine kullanılacak substratın özellikleri ve inokulumun adaptasyon koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır.

4.2.pH

pH, anaerobik fermentasyonun kararlılığını belirleyen temel parametrelerden biridir. Bunun temel nedeni, anaerobik fermentasyonun farklı aşamalarında görev alan mikroorganizmaların pH değişimlerine karşı farklı hassasiyet göstermesidir. Özellikle metanojenik mikroorganizmalar, asidojenik mikroorganizmalara kıyasla pH değişimlerine daha duyarlıdır. Anaerobik çürütme sistemlerinde nötre yakın pH değerleri genellikle metanojenik aktivite açısından uygun kabul edilmektedir. Güncel literatürde yaklaşık 6,8–7,2 aralığının birçok anaerobik sistem için uygun olduğu bildirilmektedir (Abdelsalam et al., 2024). Batch sistemlerde pH başlangıçta uygun bir seviyede olsa dahi fermentasyon süresince değişebilmektedir. Bunun temel nedeni hidroliz ve asidojenez sırasında organik asitlerin oluşmasıdır. Özellikle kolay biyobozunabilir substratların yüksek miktarlarda kullanılması durumunda kısa sürede yüksek miktarda uçucu yağ asidi (VFA) oluşabilmekte ve bu durum pH'ın düşmesine yol açabilmektedir.

VFA oluşumu ile metan üretimi arasındaki dengenin bozulması durumunda sistemde asitleşme meydana gelebilir. Bu durum metanojenik aktivitenin baskılanmasına ve dolayısıyla metan üretiminin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle batch sistemlerde başlangıç pH'ının yanı sıra fermentasyon sırasında oluşan pH değişiminin de izlenmesi önemlidir (Gyadi et al., 2024). Özellikle yüksek katı maddeli batch sistemlerde pH kontrolü daha karmaşık hale gelebilmektedir. Çünkü yüksek organik yük nedeniyle oluşan VFA

miktarı artabilmekte ve sistemin tamponlama kapasitesi yetersiz kaldığında pH hızla düşebilmektedir. Katı faz anaerobik çürütme üzerine yapılan bir derlemede, pH, VFA ve alkalinitenin proses stresinin ve sistem kararlılığının önemli göstergeleri olduğu vurgulanmıştır (Zhao et al., 2022).

4.3.Substrat/İnokulum Oranı

Kesikli anaerobik fermantasyon sistemlerinde en önemli işletme parametrelerinden biri substrat/inokulum oranıdır (S/I veya SIR). Bu oran, sisteme yüklenen substrat miktarı ile aktif anaerobik mikroorganizma miktarı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. S/I oranının çok yüksek olması, reaktöre başlangıçta fazla miktarda organik madde yüklenmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda hızlı hidroliz ve asidojeniz sonucunda VFA birikimi meydana gelebilir ve metanojenik mikroorganizmaların aktivitesi baskılanabilir. Buna karşılık çok düşük S/I oranlarında yüksek miktarda inokulum kullanılması, prosesin daha kararlı ilerlemesini sağlayabilmekle birlikte deneysel olarak daha düşük substrat yükü nedeniyle bazı durumlarda metan veriminin yorumlanmasını güçleştirebilir.

Zhang ve ark. (2022), gıda atığının anaerobik çürütülmesinde S/I oranının proses kararlılığı, kinetik parametreler, mikrobiyal topluluk yapısı ve metanojenik metabolik yollar üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar S/I oranının yalnızca elde edilen metan miktarını değil, anaerobik sistem içerisindeki mikrobiyal etkileşimleri de değiştirebildiğini ortaya koymuştur. Düşük C/N oranına sahip gıda atıklarının anaerobik çürütülmesine yönelik bir başka çalışmada da inokulum/substrat oranının değiştirilmesinin besin dengesizliğini azaltabildiği ve metanojenik yolları etkileyebildiği bildirilmiştir (Xie et al., 2021).

BMP çalışmalarında kullanılan S/I oranının deneyden deneye değişebilmesi, farklı araştırmaların metan verimlerinin karşılaştırılmasını zorlaştıran faktörlerden biridir. Filer ve ark. (2019), S/I oranının deney tasarımında dikkatle belirlenmesi gerektiğini ve yüksek substrat konsantrasyonlarının ara ürünlerin birikmesine bağlı inhibisyon oluşturabileceğini belirtmiştir.

Bu nedenle batch sistemlerde S/I oranı belirlenirken substratın biyobozunabilirliği, inokulumun aktivitesi, substratın VFA oluşturma potansiyeli ve hedeflenen deney amacı birlikte değerlendirilmelidir.

4.4.Toplam Katı Madde ve Uçucu Katı Madde

Organik substratların karakterizasyonunda toplam katı madde (TS) ve uçucu katı madde (VS) önemli parametrelerdir. TS, substrat içerisindeki su dışındaki toplam katı bileşenleri ifade ederken, VS genel olarak organik veya uçucu fraksiyonun göstergesi olarak kullanılmaktadır. Anaerobik

fermantasyon çalışmalarında VS özellikle önemlidir çünkü metan üretim potansiyelinin çoğunlukla organik madde miktarıyla ilişkili olarak değerlendirilmesini sağlar. Bu nedenle metan verimi genellikle $\text{mL CH}_4/\text{g VS}$ veya $\text{L CH}_4/\text{kg VS}$ şeklinde ifade edilmektedir. Substratın katı madde içeriğinin artması, birim reaktör hacmi başına daha fazla organik madde yüklenmesine olanak sağlayabilir. Ancak yüksek katı madde konsantrasyonları aynı zamanda karıştırma, kütle transferi, VFA birikimi ve inhibitörlerin uzaklaştırılması gibi sorunlara yol açabilmektedir. Akinbomi ve ark. (2022), yüksek katı maddeli anaerobik çürütmede kütle transferi ve proses homojenliği gibi faktörlerin önemli sınırlamalar oluşturabileceğini bildirmiştir.

Katı faz anaerobik çürütme sistemlerinde işletme parametrelerinin değerlendirilmesine yönelik Zhao ve ark. (2022) tarafından yapılan derlemede de yüksek katı maddeli sistemlerin sıvı faz sistemlerinden farklı proses dinamiklerine sahip olduğu ve pH, VFA, amonyak ve alkalinitenin birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

4.5.Karbon/Azot Oranı

Karbon/azot (C/N) oranı, anaerobik mikroorganizmaların besin ihtiyaçları açısından önemli bir parametredir. Karbon, mikroorganizmalar için temel enerji ve karbon kaynağı olurken azot, hücresel büyüme ve protein sentezi için gereklidir. Çok düşük C/N oranına sahip substratlarda fazla miktarda azot bulunması nedeniyle amonyak oluşumu ve amonyak inhibisyonu riski artabilmektedir. Buna karşılık çok yüksek C/N oranlarında azotun yetersiz kalması mikrobiyal büyümeyi sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle birçok anaerobik çürütme çalışmasında yaklaşık 20–30 aralığındaki C/N oranları uygun bir başlangıç aralığı olarak değerlendirilmektedir (Abdelsalam et al., 2024). Ancak optimum C/N oranı tüm substratlar için sabit değildir. Substratın protein, karbonhidrat ve lipid içeriği ile amonyak oluşum potansiyeli bu değeri etkileyebilmektedir. Örneğin hayvansal gübreler genellikle yüksek azot içeriğine sahipken, tarımsal lignoselülozik materyaller daha yüksek karbon içeriğine sahip olabilmektedir. Bu nedenle bu iki substratın birlikte kullanılması, besin dengesinin iyileştirilmesi açısından avantaj sağlayabilir. Bu durum, ko-fermantasyonun batch sistemlerde araştırılmasının temel nedenlerinden biridir. Farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla substratın birlikte kullanılmasıyla yalnızca C/N oranı değil, nem içeriği, tamponlama kapasitesi ve mikrobeyin dengesi de iyileştirilebilmektedir (Bella & Rao, 2021; Gyadi et al., 2024).

4.6.Karıştırma

Karıştırmanın temel amacı, reaktör içerisinde substrat, inokulum ve sıvı fazın mümkün olduğunca homojen dağılımını sağlamaktır. Etkin karıştırma,

mikroorganizmaların substrata erişimini artırmakta, sıcaklık dağılımını iyileştirmekte ve oluşan biyogaz kabarcıklarının sıvı fazdan uzaklaşmasını kolaylaştırabilmektedir. Bununla birlikte karıştırma hızının gereğinden fazla artırılması her zaman olumlu sonuç vermemektedir. Aşırı mekanik karıştırma, bazı mikrobiyal toplulukların fiziksel yapısını bozabilir ve gereksiz enerji tüketimine neden olabilir. Bu nedenle özellikle büyük ölçekli sistemlerde karıştırma koşullarının substratın fiziksel özelliklerine göre belirlenmesi gerekir. Anaerobik çürütme proses parametrelerini değerlendiren güncel derlemelerde karıştırmanın; pH, sıcaklık, organik yük ve katı madde içeriği ile birlikte proses performansını etkileyen önemli işletme parametrelerinden biri olduğu bildirilmektedir (Bella & Rao, 2021). Laboratuvar ölçekli batch BMP deneylerinde ise sürekli mekanik karıştırma her zaman gerekli olmayabilir. Bazı deneylerde reaktörler belirli aralıklarla manuel olarak çalkalanmakta veya düşük hızda karıştırılmaktadır. Burada temel amaç, deney süresince substratın çökmesini veya aşırı tabakalaşmasını önlemektir.

4.7.İnkübasyon Süresi

Batch anaerobik sistemlerde inkübasyon süresi, deney başlangıcından gaz üretiminin büyük ölçüde sona ermesine kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Süre; substratın biyobozunabilirliği, partikül büyüklüğü, lignoselülozik yapı, inokulum aktivitesi, sıcaklık ve S/I oranı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir.

Kolay biyobozunabilir substratlar kısa sürede önemli miktarda metan üretebilirken, lignoselülozik ve kompleks organik materyallerde metan üretimi daha uzun süre devam edebilmektedir. Bu nedenle bütün substratlar için tek bir optimum inkübasyon süresi belirlemek mümkün değildir. BMP deneylerinde temel amaç, substratın ulaşabileceği metan potansiyelinin mümkün olduğunca büyük bölümünü yakalamaktır. Bununla birlikte deneyin gereğinden fazla uzun sürdürülmesi, son dönemlerde oluşan çok düşük gaz miktarlarının ölçülmesine ve deney süresinin gereksiz şekilde uzamasına neden olabilir. Bu nedenle metan üretim eğrisinin zamana bağlı değişiminin izlenmesi önemlidir (Koch et al., 2020).

4.8.Headspace Hacmi

Kesikli reaktörlerde sıvı fazın üzerinde kalan gaz hacmi headspace olarak tanımlanmaktadır. Headspace, özellikle kapalı batch sistemlerde gaz basıncının oluşması ve gaz-sıvı dengesinin kurulması açısından önemli bir tasarım parametresidir. Farklı headspace/sıvı hacmi oranları reaktör içerisindeki gaz basıncını ve CO₂ gibi gazların sıvı fazda çözünme derecesini etkileyebilir. Bu durum özellikle yüksek basınç oluşan kapalı batch

reaktörlerde metan üretiminin ölçülmesini ve yorumlanmasını etkileyebilmektedir. Bu nedenle BMP deneylerinde reaktör hacmi, sıvı hacmi ve headspace hacminin raporlanması deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği açısından önemlidir. Filer ve ark. (2019), BMP deney tasarımında tahmini gaz üretimi, S/I oranı, VFA/alkalinite ilişkisi ve headspace/sıvı hacmi oranının birlikte değerlendirilmesini önermektedir.

5. KESIKLI ANAEROBİK FERMANTASYON SİSTEMLERİNDE REAKTÖR TASARIMI

Kesikli anaerobik fermantasyon sistemlerinde reaktör tasarımı, prosesin güvenilir ve kontrollü bir şekilde yürütülmesi açısından önemlidir. Batch sistemlerde substrat ve inokulum deneyin başlangıcında reaktöre eklenmekte ve deney süresince yeni besleme yapılmamaktadır. Bu nedenle reaktörün hacmi, gaz sızdırmazlığı, sıcaklık kontrolü ve gaz ölçüm yöntemi deney sonuçlarını doğrudan etkileyebilmektedir (Filer et al., 2019; Koch et al., 2020).

5.1. Batch Reaktörlerin Genel Özellikleri

Kesikli anaerobik fermantasyon çalışmalarında farklı büyüklüklerde reaktörler kullanılabilir. Laboratuvar çalışmalarında küçük hacimli cam şişeler, serum şişeleri ve benzer gaz sızdırmaz kaplar yaygın olarak tercih edilmektedir. Daha büyük ölçekli çalışmalarda ise paslanmaz çelik veya dayanıklı polimerik malzemelerden yapılmış reaktörler kullanılabilir.

Laboratuvar ölçekli çalışmaların önemli bir bölümü BMP (Biochemical Methane Potential) testleri şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu testlerde belirli miktarda substrat ve anaerobik inokulum kapalı bir reaktöre eklenmekte ve belirli bir sıcaklıkta inkübe edilmektedir. Deney süresince oluşan biyogaz ve metan miktarı ölçülerek substratın biyometan potansiyeli belirlenmektedir (Koch et al., 2020).

5.2. Reaktör Hacmi ve Headspace

Batch reaktörlerde toplam hacmin bir bölümü sıvı faz, diğer bölümü ise headspace olarak adlandırılan gaz fazından oluşmaktadır. Headspace, fermantasyon sırasında oluşan biyogazın birikmesi için gereklidir. Reaktörün tamamen doldurulması yerine yeterli miktarda gaz boşluğu bırakılması gerekir. Bununla birlikte headspace hacminin çok büyük veya çok küçük olması gaz ölçümlerini etkileyebilir. Bu nedenle reaktör hacmi, sıvı hacmi ve headspace hacminin deney raporlarında belirtilmesi önemlidir (Filer et al., 2019).

5.3. Gaz Sızdırmazlığı

Kesikli anaerobik fermentasyon sistemlerinde reaktörün gaz sızdırmaz olması temel bir gerekliliktir. Gaz kaçağı meydana gelmesi durumunda ölçülen biyogaz miktarı gerçek üretimden daha düşük çıkabilir. Ayrıca dış ortamdan reaktöre oksijen girmesi anaerobik mikroorganizmaların faaliyetini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle reaktörlerin kapatılması sırasında uygun tıpa, kapak ve bağlantı elemanlarının kullanılması gerekir. Özellikle BMP çalışmalarında gaz sızdırmazlığının sağlanması, doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesi açısından önemli bir deneysel koşuldur (Koch et al., 2020).

5.4. Anaerobik Ortamın Oluşturulması

Anaerobik fermentasyonun gerçekleşebilmesi için reaktör içerisinde oksijensiz bir ortam oluşturulmalıdır. Bunun için deney başlangıcında reaktör içerisindeki hava uzaklaştırılabilir. Laboratuvar çalışmalarında bu amaçla genellikle azot (N_2) veya farklı anaerobik gaz karışımları kullanılmaktadır. Reaktörün uygun şekilde kapatılmasıyla deney süresince anaerobik ortam korunmaktadır (Koch et al., 2020). Anaerobik ortamın yeterli olmaması özellikle metanojenik mikroorganizmaların faaliyetini azaltarak metan üretiminin düşmesine neden olabilir.

5.5. Sıcaklık Kontrolü

Sıcaklık, anaerobik fermentasyonun en önemli işletme parametrelerinden biridir. Mikroorganizmaların gelişimi ve aktivitesi sıcaklıktan önemli ölçüde etkilenmektedir. Batch sistemlerde en yaygın olarak mezofilik ve termofilik koşullar kullanılmaktadır. Mezofilik sistemlerde sıcaklık genellikle yaklaşık 35 °C, termofilik sistemlerde ise yaklaşık 55 °C civarında tutulmaktadır.

Deney süresince sıcaklığın mümkün olduğunca sabit tutulması gerekir. Sıcaklık değişimleri mikroorganizma aktivitesini etkileyerek biyogaz ve metan üretiminde farklılıklara neden olabilir (Zhou et al., 2021).

5.6. Karıştırma

Karıştırmanın temel amacı, substrat ve inokulumun reaktör içerisinde mümkün olduğunca homojen dağılmasını sağlamaktır. Karıştırma aynı zamanda mikroorganizmaların substrata ulaşmasını kolaylaştırabilir. Laboratuvar ölçekli batch sistemlerde manyetik karıştırıcı, çalkalayıcı veya belirli aralıklarla manuel karıştırma kullanılabilir. Ancak her sistemde sürekli ve yüksek hızlı karıştırma gerekli değildir. Özellikle yüksek katı maddeli substratlarda çökme ve tabakalaşma meydana gelebileceğinden,

kariştırma yöntemi substratın özelliklerine göre belirlenmelidir (Akinbomi et al., 2022).

5.7. Biyogaz Ölçümü

Batch sistemlerde fermantasyon sırasında oluşan biyogazın miktarı belirli aralıklarla ölçülmektedir. Gaz ölçümü için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlar arasında gaz şırıngaları, su deplasmanı, basınç ölçümü ve otomatik gaz ölçüm sistemleri bulunmaktadır. Toplam biyogaz miktarının yanında metan oranının da belirlenmesi önemlidir. Çünkü biyogaz içerisinde metan dışında özellikle CO₂ ve daha düşük miktarlarda H₂S gibi gazlar bulunmaktadır. Örneğin bir reaktörden 500 mL biyogaz elde edilmiş ve biyogazın metan içeriği %60 olarak belirlenmiştir:

Metan miktarı = 500 × 0,60 = 300 mL CH₄

Bu nedenle yalnızca biyogaz miktarının değil, metan miktarının da değerlendirilmesi gerekmektedir.

6. KESIKLI SİSTEMLERDE BİYOGAZ VE METAN ÜRETİMİNİN BELİRLENMESİ

Kesikli anaerobik fermantasyon sistemlerinde proses başarısının belirlenmesinde en önemli göstergelerden biri üretilen biyogaz ve metan miktarıdır. Deney boyunca oluşan gazın miktarı ve bileşimi belirlenerek kullanılan substratın anaerobik olarak parçalanma özellikleri değerlendirilebilir. Özellikle laboratuvar çalışmalarında kullanılan BMP (Biyokimyasal Metan Potansiyeli) testleri, substratların metan üretim potansiyelinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Filer et al., 2019; Koch et al., 2020).

6.1. Biyogaz Üretimi

Batch sistemlerde oluşan biyogaz, deney süresince belirli aralıklarla ölçülür. Ölçülen değerler toplanarak kümülatif biyogaz üretimi belirlenir. Örneğin bir deney sonunda toplam 500 mL biyogaz elde edilmişse, bu değer kullanılan substratın toplam biyogaz üretimini göstermektedir. Ancak yalnızca toplam biyogaz miktarının belirlenmesi yeterli değildir. Çünkü biyogazın içerisinde metan dışında başta CO₂ olmak üzere farklı gazlar da bulunmaktadır. Bu nedenle metan oranının ayrıca belirlenmesi gerekir (Koch et al., 2020).

6.2. Metan Üretimi

Anaerobik fermantasyon sonucunda oluşan biyogazın enerji açısından en önemli bileşeni metandır. Bu nedenle batch sistemlerin değerlendirilmesinde toplam biyogaz miktarının yanında metan miktarı da belirlenmektedir.

Örneğin: Biyogaz miktarı: 500 mL

Metan oranı: %60 ise: Metan miktarı = $500 \times 0,60 = 300$ mL CH₄ olarak hesaplanır.

Metan oranı gaz kromatografisi veya farklı biyogaz analiz cihazları kullanılarak belirlenebilir.

6.3. Metan Verimi

Farklı miktarlarda substrat kullanılan deneyleri karşılaştırabilmek için metan miktarı genellikle substratın uçucu katı madde (VS) miktarına göre ifade edilir. En yaygın kullanılan birimlerden biri: mL CH₄/g VS şeklindedir.

Örneğin 1 g VS içeren bir substrattan 400 mL metan elde edilmişse, metan verimi: 400 mL CH₄/g VS olarak ifade edilir. Bu değer, farklı substratların metan üretim potansiyellerinin karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır (Filer et al., 2019).

6.4. Blank Düzeltmesi

Batch deneylerinde kullanılan inokulum da bir miktar biyogaz üretebilir. Bu nedenle substrattan kaynaklanan gerçek metan miktarını belirlemek için blank reaktör kullanılmaktadır. Blank reaktörde substrat bulunmaz; yalnızca inokulum bulunur. Örneğin:

Substratlı reaktör: 250 mL CH₄ Blank reaktör: 40 mL CH₄ ise: Net metan = $250 - 40 = 210$ mL CH₄ olur.

Bu düzeltme, metan üretiminin olduğundan yüksek hesaplanmasını önlemek açısından önemlidir (Koch et al., 2020).

6.5. Biyokimyasal Metan Potansiyeli (BMP)

BMP, bir substratın anaerobik koşullar altında üretebileceği metan miktarını belirlemek amacıyla yapılan bir laboratuvar testidir. BMP deneyinde belirli miktarda substrat ve inokulum bir reaktöre konulur. Reaktör uygun sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir ve oluşan metan düzenli olarak ölçülür.

Deney sonunda elde edilen metan miktarı genellikle: mL CH₄/g VS olarak ifade edilir.

BMP değeri yüksek olan substratlar, uygun koşullar altında daha yüksek miktarda metan üretme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte laboratuvar koşullarında elde edilen BMP değerleri gerçek biyogaz tesislerinde elde edilen değerlerle aynı olmayabilir. Çünkü gerçek tesislerde proses koşulları daha karmaşıktır (Koch et al., 2020).

7. KESIKLI ANAEROBİK FERMANTASYON SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI VE SINIRLILIKLARI

Kesikli anaerobik fermantasyon sistemleri, anaerobik fermantasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan basit sistemlerdir. Bu sistemlerde substrat ve inokulum deneyin başlangıcında reaktöre eklenir ve deney belirli bir süre boyunca devam eder. Sistemin basit olması, özellikle laboratuvar çalışmalarında farklı substratların kolayca karşılaştırılmasını sağlar (Filer et al., 2019; Koch et al., 2020).

7.1. Avantajları

Kesikli sistemlerin en önemli avantajı basit bir yapıya sahip olmalarıdır. Sürekli besleme ve çıkış sistemlerine ihtiyaç duyulmadığı için küçük ölçekli deneyler kolaylıkla yapılabilir. Bu sistemlerde farklı organik atıklar aynı koşullar altında test edilebilir. Böylece hangi substratın daha fazla biyogaz veya metan ürettiği belirlenebilir. Kesikli sistemler özellikle BMP deneyleri için uygundur. BMP testleri ile bir substratın metan üretme potansiyeli belirlenebilir (Koch et al., 2020). Ayrıca sıcaklık, pH, substrat/inokulum oranı ve fermantasyon süresi gibi koşullar kolayca değiştirilebilir. Böylece bu koşulların metan üretimi üzerindeki etkileri araştırılabilir. Batch deneylerinde gaz üretimi zaman içerisinde ölçüldüğü için metan üretim eğrileri oluşturulabilir. Bu veriler kullanılarak metan üretim potansiyeli ve üretim hızı gibi özellikler değerlendirilebilir.

7.2. Sınırlılıkları

Kesikli sistemlerin en önemli sınırlılığı, sürekli besleme yapılmamasıdır. Deney başlangıcında reaktöre eklenen substrat zamanla azalır. Bu nedenle reaktör içerisindeki koşullar deney boyunca değişir. Batch sistemler gerçek biyogaz tesislerini de tam olarak temsil etmeyebilir. Gerçek tesislerde sürekli veya yarı sürekli besleme, sürekli karıştırma ve farklı işletme koşulları bulunmaktadır. Bu nedenle laboratuvar ortamında elde edilen sonuçların doğrudan büyük ölçekli tesislere aktarılması uygun değildir (Koch et al., 2020). Ayrıca substratın homojen olmaması, gaz kaçağı ve gaz ölçümündeki hatalar deney sonuçlarını etkileyebilir. Bu nedenle deneylerde uygun reaktör, güvenilir gaz ölçüm yöntemi ve yeterli sayıda paralel çalışma kullanılmalıdır.

8. SONUÇ

Kesikli (batch) anaerobik fermantasyon sistemleri, organik atıkların anaerobik olarak parçalanması ve biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi amacıyla kullanılan basit ve etkili sistemlerdir. Özellikle laboratuvar ölçekli

çalışmalar ve BMP testleri, farklı substratların biyogaz ve metan üretim potansiyellerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır (Filer et al., 2019; Koch et al., 2020).

Kesikli sistemlerde substrat ve inokulum deneyin başlangıcında reaktöre eklenmekte ve fermentasyon belirli bir süre boyunca devam etmektedir. Bu sistemlerin basit reaktör yapısı, düşük işletme maliyeti ve farklı deney koşullarının kolaylıkla uygulanabilmesi önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, sürekli besleme yapılmaması ve reaktör koşullarının zaman içerisinde değişmesi, batch sistemlerin gerçek biyogaz tesislerini tam olarak temsil etmesini sınırlamaktadır. Kesikli anaerobik fermentasyonun başarısı; substrat özellikleri, inokulum, sıcaklık, pH, substrat/inokulum oranı, karıştırma ve fermentasyon süresi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle deneylerin kontrollü koşullarda yürütülmesi ve kullanılan yöntemlerin ayrıntılı olarak açıklanması önemlidir.

Batch sistemlerde elde edilen biyogaz miktarı, metan oranı ve metan verimi, proses performansının temel göstergeleridir. Ayrıca blank düzeltmesinin yapılması ve sonuçların genellikle VS miktarına göre ifade edilmesi, deney sonuçlarının daha doğru değerlendirilmesini sağlamaktadır. Kümülatif metan üretim verilerinin kinetik modellerle değerlendirilmesi ise metan üretim potansiyeli, üretim hızı ve lag fazı gibi önemli parametrelerin belirlenmesine olanak vermektedir. Sonuç olarak, kesikli anaerobik fermentasyon sistemleri substratların biyogaz ve metan üretim potansiyelinin belirlenmesi, farklı işletme koşullarının araştırılması ve anaerobik fermentasyonun temel özelliklerinin incelenmesi açısından önemli bir araştırma aracıdır. Ancak laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçların büyük ölçekli sistemlere aktarılmasında dikkatli olunmalıdır. Özellikle gerçek tesis uygulamalarına geçilmeden önce elde edilen sonuçların sürekli veya yarı sürekli reaktörlerde doğrulanması önem taşımaktadır. Bu nedenle kesikli sistemler, anaerobik fermentasyon araştırmalarında yalnızca bir deney yöntemi olarak değil, yeni substratların değerlendirilmesi ve uygun işletme koşullarının belirlenmesi için önemli bir ön araştırma aşaması olarak da değerlendirilebilir.

9. REFERANSLAR

- [1] Buswell, A. M., & Mueller, H. F. (1952). Mechanism of methane fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(3), 550–552. <https://doi.org/10.1021/ie50507a033>
- [2] Cabrita, T. M., & Santos, M. T. (2023). Biochemical methane potential assays for organic wastes as an anaerobic digestion feedstock. *Sustainability*, 15(15), 11573. <https://doi.org/10.3390/su151511573>
- [3] Filer, J., Ding, H. H., & Chang, S. (2019). Biochemical methane potential (BMP) assay method for anaerobic digestion research. *Water*, 11(5), 921. <https://doi.org/10.3390/w11050921>

- [4] Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Fruteau de Lacroix, H., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., Heerenklage, J., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- [5] Koch, K., Hafner, S. D., Weinrich, S., & Astals, S. (2019). Identification of critical problems in biochemical methane potential (BMP) tests from methane production curves. *Frontiers in Environmental Science*, 7, Article 178. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00178>
- [6] Koch, K., Hafner, S. D., Weinrich, S., Astals, S., & Holliger, C. (2020). Power and limitations of biochemical methane potential (BMP) tests. *Frontiers in Energy Research*, 8, Article 63. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00063>
- [7] Pererva, Y., Miller, C. D., & Sims, R. C. (2020). Existing empirical kinetic models in biochemical methane potential (BMP) testing, their selection and numerical solution. *Water*, 12(6), 1831. <https://doi.org/10.3390/w12061831>
- [8] Rocamora, I., Wagland, S. T., Rivas Casado, M., Hassard, F., Villa, R., Peces, M., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2022). Managing full-scale dry anaerobic digestion: Semi-continuous and batch operation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4), Article 108154. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108154>
- [9] Wang, R., Zhang, Y., Jia, S., Chen, J., Qi, C., Han, Y., Shan, M., Li, G., & Li, Y. (2021). Comparison of batch and fed-batch solid-state anaerobic digestion of on-farm organic residues: Reactor performance and economic evaluation. *Environmental Technology & Innovation*, 24, Article 101977. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101977>

Dünyada Tarımsal Yayında Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin Kullanımı

Hacer ÇELİK ATEŞ¹

1- Prof.Dr.Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Ekonomisi Bölümü.
hacerates@isparta.edu.tr ORCID No:0000-0002-9391-6450

ÖZET

Tarım giderek bilgi yoğun hale gelmekte ve dünya genelinde milyonlarca küçük ölçekli çiftçi, pazarlara ve finansal hizmetlere erişimin yetersizliği, düşük insan ve fiziki sermaye seviyeleri, eğitime erişimin yetersizliği ve zayıf bilgi akışı gibi kısıtlamalarla karşı karşıya kalmaktadır. Hem geliştirmekte olan hem de gelişmiş ülkelerdeki çiftçilerin bilgi ihtiyaçları, arazilerini nasıl kullanacakları, hangi ürünleri yetiştirecekleri ve nasıl yetiştirecekleri, girdileri hangi pazarlardan satın alacakları ve ürünlerini hangi pazarlardan satacakları konusunda giderek daha karmaşık kararlar almak zorunda kalacak bu durum gün geçtikçe de artacaktır. İşte tüm bu bilgi ve karar mekanizmalarının güçlendirilmesi, insan sermayesinin ve kapasite gelişimini sağlamak ve çiftçilere bu konularda destek olmak da tarımsal yayımın görev alanındadır. Bu çalışmanın amacı Dünya’da Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin (BİT) tarımsal yayımda kullanımına ilişkin örnekleri incelemektir. Ülkelerin kullandıkları BİT lerin yayım çalışmalarındaki karşılıkları benzer durumlardaki ülkeler için örnek kabul edilebilir. Bu çalışmada literatür taraması yoluyla elde edilen ikincil araştırma sonuçlarından yararlanılmıştır. İncelenen araştırmaların sonuçları göstermektedir ki, tarımsal yayımda bilgi teknolojilerinin kullanımı çok boyutlu bir olgu olarak karşımıza çıkmakta; teknolojik altyapıdan sosyal yapıya, eğitimden kurumsal kapasiteye kadar pek çok faktörün etkileşimiyle şekillenmektedir. Türkiye açısından ise kamu yayımında dijital altyapının güçlendirilmesi ve özellikle çiftçilerin en yaygın kullandığı cep telefonları aracılığıyla yayım hizmetlerinin etkinliğinin artırılmasına yönelik önlemler alınabilir. Özellikle yayım elemanlarına yönelik çeşitli bilgisayar program veya uygulamalarını daha etkin kullanabilecek hizmetiçi eğitimler verilebilir. Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından çiftçilere yönelik girdi kullanımı, verimlilik analizi gibi çiftçilerin karar almalarına yardımcı olacak bilgileri ve karar destek sistemlerini içeren çeşitli yayım uygulamalarının (program) geliştirilmesi de bu sürece katkı sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Bilgi, iletişim teknolojileri, yayım, benimseme, kırsal kalkınma

GİRİŞ

Dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 9 milyarı aşması beklenmektedir ve tarımın, artan talebi karşılamak ve herkes için gıda güvenliğini sağlamak

için gıda üretimini artırması gerekmektedir. Gıda üretiminin önemli bir bölümü dünyada hala yaygın olarak küçük tarım işletmeleri tarafından karşılanmaktadır. Bu durumda gıda üretimindeki artışın büyük bir kısmı gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşmek zorunda kalacaktır (FAO, 2017).

Günümüzde teknolojinin gelişim hızı gün geçtikçe artmakta, bilgi ve teknolojiler sürekli değişip dönüşmektedir. Tarım giderek bilgi yoğun hale gelmekte ve dünya genelinde milyonlarca küçük ölçekli çiftçi, pazarlara ve finansal hizmetlere erişimin yetersizliği, düşük insan ve fiziki sermaye seviyeleri, eğitime erişimin yetersizliği ve zayıf bilgi akışı gibi kısıtlamalarla karşı karşıya kalmaktadır. Pazar eksikliği, düşük beceri ve zayıf kapasite ile gelişmekte olan dünyadaki tarım, gelecekte bir dizi zorluğun üstesinden gelmek zorunda kalacaktır. Hem gelişmekte olan hem de gelişmiş ülkelerdeki çiftçilerin bilgi ihtiyaçları, arazilerini nasıl kullanacakları, hangi ürünleri yetiştirecekleri ve nasıl yetiştirecekleri, girdileri hangi pazarlardan satın alacakları ve ürünlerini hangi pazarlardan satacakları konusunda giderek daha karmaşık kararlar almak zorunda olacak bu durum gün geçtikçe de artacaktır. İşletmelerini nasıl finanse edecekleri ve karşılaştıkları riski nasıl azaltacakları konusundaki seçimleri de içeren kararları, ailelerinin ve toplumun geçim kaynaklarını etkilemektedir (FAO, 2017). İşte tüm bu bilgi ve karar mekanizmalarının güçlendirilmesi, insan sermayesinin ve kapasite gelişimini sağlamak ve çiftçilere bu konularda destek olmak da tarımsal yayımın görev alanındadır. Bu gelişmeler de kuşkusuz kırsalı kalkındıracak etkiler yaratacaktır. Ancak, kentsel ve kırsal ekonomi arasındaki hızla büyüyen bir uçurum bulunmakta, kentlerin tüm olanaklara kolay erişimi ve teknolojik gelişmelerin katkısı ile bu uçurum gitgide derinleşmektedir. Derinleşen kalkınmadaki bu farklılık kalkınmada eşit bir toplum yaratmada Bilgi ve İletişim Teknolojileri (BİT) 'nin kritik rolünü güçlendirmektedir.

Dünyada bazı örneklerle tarımsal yayımda BİT kullanımı

Bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT), iyi benimsedikleri ve entegre edildikleri iş sektörlerinde, ülkelerde ve bölgelerde, büyüme ve sosyo-ekonomik kalkınmaya önemli katkı sağlamıştır. BİT'lerin geniş çaplı benimsenmesi ve entegrasyonu, bilgi ve işlem maliyetlerini düşürmüş, hizmet sunumunu iyileştirmiş, yeni işler yaratmış, yeni gelir akışları oluşturmuş ve kaynak tasarrufu sağlamıştır. Dünya genelinde tarım ve gıda sektörlerinde, BİT şirketleri, çok uluslu tarım girdisi işletmeleri, büyük makine üreticileri ve ayrıca küçük ve orta ölçekli tarım girdisi tedarikçileri, çiftçilere BİT aracılığıyla bir dizi hizmet sunmaktadır; bunlar arasında yayım hizmetleri de yer almaktadır (FAO, 2017).

Tarımsal yayımın, bir yandan dünyada hızla ilerleyen yeni teknoloji ve uygulamaları takip ederek çiftçi koşullarına uyarlamak, diğer yandan değişen ve dönüşen teknolojileri ve yeni uygulama sonuçlarını ve bilgileri

çiftçilere iletmek ve bu konuda çiftçilerin uyum sağlamasına destek olmak gibi işlevleri bulunmaktadır. Tüm bu işlevler, tarımsal üretimin artırılması, gıda güvenliğinin sağlanması, bölgesel ve ulusal sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesi, yerel ve kırsal kalkınmanın desteklenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Türkiye’de küçük ölçekli tarım işletmelerinin çoğunlukta olduğu ve çiftçilerin sosyo ekonomik yapısının düşük oluşu, özellikle eğitim ve gelir düzeylerinin düşüklüğü gözönüne alındığında tarımsal yayımın önemli bir işlev üstlendiği ortaya çıkmaktadır. Tarımsal yayımın başarısında kuşkusuz birçok faktör etkilidir. Özellikle çiftçilere yeni teknoloji ve bilgilerin iletilmesi ve benimsetilmesinde kullanılan araçlar bu işlevin başarısında etkili olabilmektedir. Geleneksel olarak kullanılan bazı bilgi ve teknoloji araçlarının başarı düzeyi sınırlı kalmaktadır.

Özellikle dağlık ve geniş coğrafi alanlara yayılmış küçük ölçekli çiftçilere ulaşılmasında ve bu çiftçilerin bilgiye erişim ve yeni teknolojileri benimsenmesinde çeşitli kısıtlamalarla karşılaşabilmektedir. Bu kısıtlamalar arasında yayım elemanlarının sayısı ve niteliği, yayım hizmetlerinin maliyeti, çiftçilerin bilgiye ve teknolojiye karşı isteksizliği veya motivasyonu olmaması gibi birçok faktör sıralanabilir. Bu bağlamda, bilgi ve teknoloji alanında yenilikler ve bu alandaki sürekli değişim dönüşüm yayımın da bu teknolojilerden yararlanma düzeyini artırmasını gerektirmektedir. Yeni bilgi ve iletişim teknolojilerin tarımsal yayımda kullanımı, bilgi akışını hızlandırmak, yayım hizmetlerinin etkinliğini artırmak ve çiftçilerin ihtiyaçlarına daha uygun çözümler sunmak için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Bilgi teknolojileri gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde farklı kullanım alanları ve olanakları sağlayabilmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde BİT’leri verimlilik, dayanıklılık ve kapsayıcılık üzerinde daha fazla bir etkiye sahip olabilirken, gelişmiş ekonomilerde “Nesnelerin İnterneti”, “Bulut Bilişim” ve “Büyük Veri” gibi yenilikler tarımda devrim niteliğinde dönüşüm sağlamaktadır. Uzaktan sensörler aracılığıyla toprağın nemi, sıcaklığı, ürünlerin büyümesi ve hayvan yemi seviyeleri hakkında veri toplayabilmekte ve çiftçilerin ürünlerinin yönetimini optimize etmekte böylece gübre, böcek ilacı ve su kullanımını azaltarak daha iyi verim elde etmelerini sağlayabilmektedir. Uydu konumlandırma sistemleri kullanılarak makinelerin ve sulama sistemlerinin uzaktan yönetimi ve kontrolü de verimliliği artmakta; çiftlik faaliyetlerinden elde edilen veriler toplanıp analiz edilebilmekte ve genellikle hava durumu bilgileriyle birlikte tarımsal verimliliği artıran ve doğal kaynakları etkin bir şekilde yöneten yeni sağlıklı ve verimli karar almayı sağlamaktadır. Gelişmiş ülkelerde büyük tarım işletmeleri, dijital platformları aracılığıyla müşterilerine çiftlik teknolojileri hakkında zengin bir özel bilgi sunabilmektedir. Talep tarafında ise e-ticaret platformları çiftçiye doğrudan değer zincirinin gıda işleme ve perakende aşamalarına bağlamaktadır. Diğer taraftan gelişmekte olan ülkelere, BİT

uygulamaları bilgi ve koordinasyon maliyetlerini azaltmada çok daha fonksiyonel ve önemli olmaktadır. Kırsal alanlarda cep telefonlarının yaygınlaşması, tarım sektöründe önemli değişikliklere yol açmıştır. Gelişmekte olan ülkelerde altyapının yetersizliği bağlamında bu maliyetlerin azaltılması, pazara erişimi teşvik etmekte, finansal kapsayıcılığı ve risk yönetimini kolaylaştırmakta, erken uyarıya önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve tarımsal yayım faaliyetlerinde devrim yaratmada merkezi bir rol oynayabilmektedir. Bilgi ve iletişim teknolojileri aynı zamanda, hava durumu, girdiler, piyasalar ve fiyatlar hakkında hızlı ve güvenilir haberler toplamak ve paylaşmak, ayrıca modern tarım teknolojilerini benimsemek ve üretimi sürdürülebilir bir şekilde artırmak amacıyla araştırma ve geliştirme girişimlerine bilgi sağlamak için de etkili bir şekilde kullanılabilir (FAO, 2017).

Bilgi teknolojilerinin tarımsal yayımda kullanımıyla, özellikle mobil telefonlar, internet tabanlı platformlar ve diğer dijital araçlar aracılığıyla çiftçilere ulaşma yer ve zaman açısından önemli üstünlükler sağlayabilmektedir. Bu teknolojiler çiftçilerin hem güncel bilgilere erişimlerinde hem de tarımla ilgili konularda karar vermelerinde etkili olabilmektedir. Lindblom ve arkadaşlarının (2017) İsveç’de yaptıkları araştırmada, çiftçilerin tarımsal konularda karar vermelerine yardımcı olacak destek sistemlerinin geliştirilmesinin, teknolojinin benimsenmesini artırmada önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Çalışmada ayrıca bu sistemlerin sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkı sağlayabileceği belirtilmiştir (Lindblom et al., 2017). Bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımı çiftçilerin yeni bilgi ve teknolojileri benimsemelerinde özellikle ikna ve gözlenebilirlik açısından katkı sağlayabilmektedir. Bu teknolojilerin çiftçiye karar vermede destek olabilecek yeni bilgileri ve kanıtları anında ve gözle görülebilecek şekilde sunmaları çiftçi sorularını anında yanıtlayabilme çiftçilerin ikna olma ve karar vermesinde çiftçiye etkileyebilmektedir. Diğer yandan yine geliştirilen bilgi ve iletişim sistemleri aracılığıyla çiftçinin birçok konuda karar mekanizmalarına katılımını kolaylaştıracaktır. Gerek araştırma ve geliştirme çalışmalarında gerekse politika kararlarının alınmasında çiftçilerin katılımı ve katkısı önemlidir.

Gelişmekte olan ülkelerde tarımsal yayım hizmetlerinin dijitalleşmesi, COVID-19 pandemisi sonrası dönemde daha da önem kazanmıştır. Dünyada yaşanan pandemi ile uzaktan iletişimin önemi ve etkisiyle bu teknolojilerin, herkes tarafından kullanılabilir olmasına ve yaygınlaşmasına hız verilmiştir. Tarım alanındaki hizmetlerin uzaktan sağlanabileceği uygulama alanlarından biri de yayım faaliyetleridir. Ghana’da yapılan bir çalışmada (Ayisi-nyarko et al., 2024) pandemi sonrası dönemde dijital tarımsal yayım hizmetlerini (E-yayım) benimseme potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada, bu dönemde ülkedeki telekomünikasyon altyapısının hızla geliştiği ve mobil telefon kullanımının ortalamanın üzerine çıktığı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca kamu tarafından yürütülen e-yayım hizmetlerinin potansiyelinin arttığı ancak

geçiş döneminde marjinal üreticilere ulaşmada dijital stratejilerin mevcut geleneksel yöntemlere entegre edilmesinin gerekliliği vurgulanmaktadır. Bunun nedeni ise kırsal ve kentsel alanlarda internet erişim altyapısındaki farklılıktır. Kentsel alanlarda internet erişimi günlük veya haftada birkaç kez %52 iken, kırsal alanlarda bu oran %23'tür. Kentsel alanlardaki erişim, kırsal alanlara göre iki kat daha fazladır. Ghana'da kırsal ve kentsel alanlarda iletişim cihazlarına sahip olma oranlarına göre dağılım ise şöyledir. Cep telefonunda, kentsel nüfusun %97'si, kırsal kesimdeki nüfusun %90'ı; televizyonda kentsel kesimdeki insanların %90'ı, kırsal kesimde %62; radyoda kentsel kesimdeki insanların %88'i, kırsal kesimdeki %76'sı; bilgisayarda kentsel %40, kırsal kesimde ise %14 oranındadır (Ayisi-nyarko et al., 2024). Genel olarak, cep telefonu hem kırsal hem de kentsel alanlarda en çok sahip olunan cihazdır. Cep telefonu sahiplik oranının yüksekliği tarımsal yayım hizmetlerinde çiftçi ile iletişimde kullanılabilecek en uygun iletişim ve bilgi iletme aracı olduğunu göstermektedir. Türkiye için de bu durum benzerlik göstermektedir. Ancak bu çalışmadaki kırsal alandaki küçük üreticilere ulaşma ve e-yayım hizmetlerine bu üreticilerin ulaşması hala bilgisayar ve internet kullanım oranlarının yetersiz oluşu nedeniyle geleneksel yöntemlerden tamamıyla vazgeçilmiş değildir. Mevcut geleneksel yöntemlere dijital sistemlerin entegrasyonun sağlanmasıyla, özellikle marjinalleşmiş toplulukları kapsayıcı ve etkili bir şekilde hizmet verilmesi mümkün olabilecektir (Ayisi-nyarko et al., 2024). Yine Ghana'da yapılan başka bir çalışma ile bilgi ve iletişim teknolojileri kullanılarak yapılan yayım hizmetlerinin çiftçilerin yeni teknolojileri benimseme ve çiftçilerin refahı üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Mohammed & Abdulai, 2022). Bilgi ve iletişim teknolojileri kullanılarak yapılan yayım çalışmalarına katılan çiftçilerin bilgi düzeylerinde %205 artış, ürün verimlerinde %151 artış ve net gelirlerinde %88 artış olduğunu tespit etmiştir. Geleneksel yayım programına katılanların ise Bilgi düzeyleri %174, verim %148 ve net gelirde %86 artış elde ettiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, bilgi ve iletişim teknolojileri kullanılarak yapılan yayımın geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkili olduğunu göstermekte ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri kapsamında açlıkla mücadele ve eşit erişim hedeflerine katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır (Mohammed & Abdulai, 2022). Elde edilen sonuçlar benzer ülkeler için de geçerli olabilir ve bilgi teknolojilerinin tarımsal yayımda sadece bilgilerin aktarımı amaçlı değil, aynı zamanda yeni uygulama ve teknikler ile ekonomik fayda sağlama potansiyelini de ortaya koymaktadır.

Bilgi ve iletişim teknolojilerinin tarımsal yayımda kullanımı ve başarısı ülkeden ülkeye birçok faktöre bağlı olarak değişebilir. Çiftçilerin sosyo ekonomik düzeyleri (yaş, eğitim, gelir durumu vs) teknoloji seviyeleri ve altyapı düzeyleri gibi birçok faktör tarımsal yayımda bu teknolojilerin kullanım ve etkinlik düzeyini etkileyebilmektedir. Nijerya'da yapılan bir araştırmada elektrik kesintileri ve yetersiz eğitim gibi altyapısal sorunların

BİT araçlarının kullanımını sınırladığı ortaya çıkmıştır (Cynthia & Nwabugwu, 2016). Gelişmekte olan ülkelerdeki tarımsal yayımda BİT kullanımının etkileri veya sorunlarından biri de altyapıdaki sorunlardır. Bangladeş'te yapılan bir çalışmada gelişmekte olan bazı ülkelerde hükümetlerin bilgi ve iletişim teknolojilerinin tarım projelerine yaptığı yatırımlara rağmen başarı oranlarının düşük olduğunu belirtmiş ve bu projelerin başarısını artırmak için öncelikli alanların belirlenmesi gerektiğini vurgulamıştır (Alam & Shaba, 2023). Bu tür altyapısal eksikliklerin giderilmesi BİT tabanlı yayımın başarısı için kritik önemdedir.

Sosyo-ekonomik faktörlerin BİT teknolojilerini benimsemedeki rolü ile ilgili Hindistan'da yapılan bir araştırmada ortaya konulmuştur. Çalışmada, eğitim düzeyi ile yayım çalışmalarında BİT araçlarının kullanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu, eğitim düzeyi arttıkça benimsemenin de arttığı belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada tarım danışmanları veya yayımcılarla sık temasın da BİT teknolojilerinin benimsenmesinde etkili olduğu ortaya konulmuştur (Chandra et al., 2023). Benzer şekilde başka bir araştırma da Nijerya'da yapılmış ve çalışmada yaş, eğitim durumu gibi demografik faktörlerin BİT kullanım sıklığını belirlediği; eğitim farklılıklarının BİT benimsemesinde güçlü bir etken olduğu belirtilmiştir (Akintelu et al., 2021). Tüm bu bulgular, BİT tabanlı yayım stratejilerinin hedef kitle özelliklerine göre uyarlanmasının gerekliliğini göstermektedir.

Bilgi teknolojilerinin etkinliğinde bilginin içeriği oldukça önemli olmakla birlikte bilginin iletilme şekli veya yöntemi de etkinliğin önemli bir belirleyicisidir. BİT'ler, bilgisayarlar ve internetten radyo ve televizyona, cep telefonlarına kadar birçok farklı teknoloji türünü kapsar. Etkileri, kullanılan teknolojiye ve çiftçilerin okuryazarlık düzeyine bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Kısa mesaj servisleri (SMS), sesli mesajlar, kısa video eğitimleri, sosyal medya ve akran ağlarını geliştirebilen sanal yayım platformları (çevrimiçi platformlar/web siteleri aracılığıyla), çiftçiden çiftçiye ve çiftçiden uzmana bilgi paylaşımını etkili bir şekilde sağlayabilir. Ayrıca çiftçi ile uzman arasında canlı iletişim ile anlık geri bildirim sağlayabilir ve çiftçiye destekleyen ek bilgiler sunulabilir. Çiftçi sorunlarını iletmede ve çözüm önerilerine ulaşmada zamandan ve maliyetten tasarruf edilebilir. Bunlar dijital yayım servislerine sesli veya ses tabanlı soru-cevap servisleri gibi iletişim yöntemi eklenerek gerçekleştirilebilir.

Dijital yayım uygulamasının bir örneği Nijerya'da yapılan bir çalışma ile ortaya konulmuştur. Çalışmada mevcut sisteme ek olarak kullanılmak üzere tasarlanmış, önceki yaklaşımlarda var olan birçok sınırlamadan arındırılmış bir yayım hizmeti önerilmektedir. Çalışma ile BİT tabanlı bir yayım sistemi geliştirilmiş ve bu sistemle internet üzerinden çiftçilerle gerçek zamanlı iletişim olanağı sağlanabilmiştir. Çalışma ile geliştirilen bu sistem kırsal alanlardaki çiftçilerin uzaktan danışmanlık hizmeti almasını mümkün kılabilir. Önerilen sistemde, en ücra kırsal köylerdeki çiftçiler, birçok geleneksel yaklaşımın ayrılmaz bir parçası olan yüz yüze görüşmeye

gerek kalmadan yayım elemanlarıyla iletişim kurabilmektedir. İnternet tarafından sağlanan iletişim, gerçek zamanlı sesli iletişim, video konferans, sohbetler vb. veya metin (posta), ses veya görsel-işitsel biçimde önceden kaydedilmiş veriler olabilir ve bu veriler çiftçilere tarım faaliyetleri hakkında eğitim/talimat/rehberlik sağlamak için kullanılabilir. Bu çalışmada, önerilen sistemin mevcut geleneksel yayım yöntemlerinin sınırlamalarını aşarak daha kapsayıcı bir yapı oluşturacağı vurgulanmaktadır (Durojaiye et al., 2013). Böylece BİT'nin yayımda erişilebilirliği artırma potansiyeli somut bir örnekle desteklenmiş olmaktadır.

SMS mesajları basit fiyat araştırmaları veya hava durumu bilgileri için etkili olabilir, ancak öğrenmeyi kolaylaştırmak ve değişim-dönüşüm sağlamak ve özellikle tarımı iklim değişikliğine uyarlama bağlamında bilgiyi geniş çapta erişilebilir kılmak için başka yöntemler ve modlar gerekecektir (FAO, 2017). Bütün bunlarla birlikte BİT'ni kullanma ve benimsemeye çiftçinin içinde bulunduğu sosyal ağlar da etkili olabilmektedir. Nitekim, sosyal ağların BİT'lerin benimsemedeki rolü bir araştırmayla ortaya konulmuştur. Araştırmacılar, 12 gelişmekte olan ülkeden 12.456 küçük ölçekli çiftçi üzerinde yaptıkları panel veri analizinde zayıf sosyal bağların BİT benimsemesini ve tarımsal danışmanlık hizmetlerine erişimi azalttığını ortaya koymuştur. Bu durum bilgi eşitsizliğini artırmakta ve dezavantajlı küçük çiftçilerin daha da marjinalleşmesine yol açmaktadır. Ayrıca BİT benimseme davranışı, güçlü sosyal bağlar ve danışmanlık hizmetleri ile pozitif korelasyon göstermiş ve bu üç unsurun birlikte tarımsal verimliliği artırdığı belirtilmiştir. Ancak BİT'lerin dönüştürücü olmasına rağmen, zaten dezavantajlı küçük ölçekli çiftçileri marjinalleştirerek mevcut eşitsizlikleri güçlendirebileceği de unutulmamalıdır (Kleemann & Semrau, 2025). Tarımsal yayımda BİT'lerin kullanımına yönelik sosyal medya platformlarının akıllı tarım teknolojilerinin benimsenmesinde bilgi paylaşımı ve güven oluşturmadaki rolünün araştırıldığı İrlanda'da yapılan bir başka çalışmada, çiftçi ağlarının sosyal medya üzerinden bilgi paylaşımı yapmasının BİT benimsenmesini hızlandırdığı ancak sosyal medyanın bu amaçla yeterince kullanılmadığı belirtilmiştir. Ayrıca çiftçilerin teknoloji satıcılarından ziyade kendi çevrelerinden gelen bilgilere daha fazla güvendiği vurgulanmıştır (Dilleen et al., 2023). Bu durum BT tabanlı yayımda sosyal ağların etkin kullanımının önemini ortaya koymaktadır.

BİT'nin benimsenmesinde sosyal faktörlerin etkisi farklı coğrafyalarda da gözlemlenmektedir. Aleke ve arkadaşları (2011), Nijerya'da küçük ölçekli tarım işletmelerinde BİT'nin benimsenmesinde sosyal faktörlerin belirleyici olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar, dil ve geleneksel yaşam biçimlerinin dikkate alınmasının BİT'ni benimsemeyi sürdürülebilir kıldığını ifade etmiştir (Aleke et al., 2011). Benzer şekilde İran'da kırsal alanlarda BİT merkezlerinde yapılan bir çalışmada ise bireysel, sosyal ve yenilikle ilgili faktörlerin BİT benimsenmesini etkilediği ortaya konmuştur. Çalışmada, bilgi ve iletişim teknolojilerinin

benimsenmesinde, cinsiyet, yaş, eğitim düzeyi, bilgisayar ve internet becerileri gibi bazı bireysel özellikler etkili olmuştur. Ancak beklenin aksine çalışmada, ekonomik faktör genel olarak bilgi ve iletişim teknolojilerinin benimsenmesinde etkili olmamıştır Bunda finansman ve sübvansiyonların devlet tarafından sağlanması etkili olabilir. Yani, mali destek sağlandığı kamu merkezlerinde ekonomik faktörün etkisinin azalacağı beklenebilir. Bununla birlikte, bilgi ve iletişim teknolojilerinin tercih edilmesi büyük ölçüde kullanıcılar arasındaki önceden var olan bilgisayar becerilerine bağlıdır. (Moghaddam & Khatoon-abadi, 2013).

Kuşkusuz teknolojinin baş döndürücü gelişme hızı, genel olarak teknolojilerin kullanımının da daha hızlı yaygınlaşmasına neden olmaktadır. Bunun en tipik örneği cep telefonlarının fonksiyonlarının ve modellerinin sürekli gelişmesi ve değişiminde görülmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde BİT'nin tarımsal yayımda kullanımına ilişkin yapılan kapsamlı bir çalışmada, mobil telefonlar, web tabanlı araçlar ve interaktif sesli yanıt sistemleri gibi teknolojilerin kullanımının artmakta olduğunu ancak bu yaklaşımların etkinliği konusunda heterojen sonuçlar bulunduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada ayrıca BİT tabanlı yayımın kadınların güçlendirilmesi gibi toplumsal eşitlik odaklı konular ile öğrenme süreçlerine katkısı üzerine daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır (Spielman et al., 2021).

Gelişmekte olan ülkelerdeki tarımsal yayımda BİT kullanımının etkileri veya sorunları çiftçiler açısından eğitim düzeyinin ve gelirin düşüklüğü veya sosyal ilişkiler gibi nedenlere bağlı iken gelişmiş ülkelerde BİT kullanımı sorunları çok daha farklı olarak teknolojilere bağlı ve nitelikli teknik eleman gibi eksikliklerdir. Nitekim Amerika'da yapılmış bir araştırmada özellikle tarımsal hizmet sağlayıcılar ile yayım profesyonellerinin dijital teknoloji kullanımı ve karşılaştıkları engeller incelenmiş; veri güvenliği endişeleri, nitelikli BİT kullanan personeli bulma zorlukları ve yayım elemanlarının eğitim eksikliklerinin önemli bariyerler olduğu tespit edilmiştir (Drewry et al., 2022). Tarım giderek daha çok veri odaklı bir sektör haline gelirken, üreticilerle yakın çalışan hizmet sağlayıcıların teknoloji kullanımını ve sorunlarını anlamak önemli olmaktadır. Bu araştırmada, tarımsal hizmet sağlayıcılar tarafından dijital teknolojilerin benimsenmesiyle ilgili en sık belirtilen sorunlar, nitelikli bilgi teknolojileri konusunda çalışanlarını çekmek ve işe almak hem çalışanlar hem de çiftçiler için eğitim ve veri güvenliği ile ilgili konular olmuştur. Çalışmada, veri güvenliği yaygın olarak belirtilen bir sorun olsa da tarımsal hizmet sağlayıcılarının %16'sının veri gizliliği konusunda yazılı politikaları olmayan şirketlerle çalıştığı tespit edilmiştir. Tarımsal hizmet sağlayıcıları ve yayım profesyonelleri ile yapılan anket sonuçlarından, çiftçilerin kısa mesaj, resim, harita ve akıllı telefon kullanımında yeterli beceriye sahip olduğunu ancak dijital olarak erişilen ve kullanılan finansal tablolar, elektronik tablolar veya laboratuvar analiz raporlarının kullanımında gerekli

beceriye sahip olmadıklarını düşündükleri ortaya çıkmıştır. Bu sonuç, üreticilerin veri toplama konusunda yetkin hale geldiğini ancak toplanan verileri yorumlama ve bunlara göre hareket etme konusunda yetkinleşmediği yönündeki düşünceleri doğrulamaktadır. Çalışmada üreticilere en sık iletilen verilerin tarım verileri olduğu ve bunun %75'inin tarımsal hizmet sağlayıcılar, %77'si yayım profesyonelleri tarafından iletildiği ortaya çıkmıştır (Drewry et al., 2022).

Endonezya'da yapılan bir çalışma, BİT kullanımının koordinasyon, dijital öğrenme, sanal grup dinamikleri, tanıtım-mobilizasyon ile çevrimiçi danışmanlık-izleme alanlarında yayımcıların çalışma biçimlerini değiştirdiğini ortaya koymuştur. Ancak geleneksel yöntemlerin tamamen ortadan kalkmadığı; teknoloji yaklaşımının aksine uygulama adaptasyonunun karmaşık dinamikler içerdiği belirtilmiştir (Sugihono et al., 2025). Bu durum BİT'nin yayımda dönüşüm yaratırken insan faktörünün önemini koruduğunu göstermektedir.

SONUÇ

Tüm bu çalışma sonuçları göstermektedir ki, tarımsal yayımda bilgi teknolojilerinin kullanımı çok boyutlu bir olgu olarak karşımıza çıkmakta; teknolojik altyapıdan sosyal yapıya, eğitimden kurumsal kapasiteye kadar pek çok faktörün etkileşimiyle şekillenmektedir. Kullanıcı merkezli tasarım yaklaşımlarıyla geliştirilen karar destek sistemlerinden mobil tabanlı e-yayım hizmetlerine; sosyal bağların güçlendirilmesinden profesyonellere yönelik teknoloji eğitimi programlarına kadar geniş bir yelpazede çalışmalar yapılmakta; her biri BİT'nin tarımsal yayımdaki potansiyelini artırmaya yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Türkiye açısından ise kamu yayımında dijital altyapının güçlendirilmesi ve özellikle çiftçilerin en yaygın kullandığı cep telefonları aracılığıyla yayım hizmetlerinin etkinliğinin artırılmasına yönelik önlemler alınmalıdır. Özellikle tarımsal yayım çalışmalarında çeşitli bilgisayar program veya uygulamalarını etkin kullanabilecek beceri sahibi yayım elemanları için hizmetiçi eğitimler verilebilir. Kuşkusuz eğitilmiş ve donanımlı yayım elemanları da çiftçilere benzer şekilde dijital uygulamaları kullanma konusunda daha etkin eğitim verebileceklerdir. Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından çiftçilere yönelik girdi kullanımı, verimlilik analizi gibi çiftçilerin karar almalarına yardımcı olacak bilgileri ve karar destek sistemlerini içeren çeşitli yayım uygulamalarının (program) geliştirilmesi de bu sürece katkı sağlayabilir.

REFERANSLAR

Akintelu, S. O., Awojide, S., Amos, A. O., & Adegbite, W. M. (2021). Social Demographic Factors and Information and Communication Technology (ICT) Adoption Constrains Amongst Small and Medium Scale Farmers in Nigeria.

Alam, M & Shaba,S.A. (2023) ICT-enabled agricultural extension: How to promote and sustain? *Information Development* 2023, Vol. 39(3) 600–610

Aleke, B., Ojiako, U., & Wainwright, D. W. (2011). ICT adoption in developing countries: perspectives from small-scale agribusinesses. *Journal of Enterprise Information Management*, Vol. 24 No. 1, 2011 pp. 68-84

Ayisi-nyarko, D., Masambuka-kanchewa, F., & Yakubu, B. N. (2024). Post-Covid-19 pandemic extension delivery: A systematic review of E-extension services prospects in Ghana. *Heliyon* 10 (2024) e26058

Chandra, S., Singh, A. K., Ghadei, K., & Pradhan, S. (2023). Exploring the Relationship between Socio-economic Factors and ICT Adoption among Farmers. *Indian Journal of Extension Education*, Vol. 59, No. 3 (July–September), 2023, (54-57). <https://doi.org/10.48165/ijee.2023.59310>

Cynthia, E. N., & Nwabugwu, T. S. (2016). Challenges to Adoption of ICT Tools by Agricultural Extension Workers in Anambra State, Nigeria. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 10(4): 1-6, 2016; Article no. AJAEES.24550

Dilleen, G., Claffey, E., Foley, A., & Doolin, K. (2023). Investigating knowledge dissemination and social media use in the farming network to build trust in smart farming technology adoption. *Journal of Business & Industrial Marketing*, Volume 38 · Number8·2023·1754–1765

Drewry, J. L., Shutske, J., Trechter, D., & Luck, B. D. (2022). Assessment of Digital Technology Adoption and Access Barriers Among Agricultural Service Providers and Agricultural Extension Professionals. *Journal of the ASABE(American Society of Agricultural and Biological Engineers)*Vol. 65(5): 1049-1059

Durojaiye, L., Abubakar, S., Omeneza, Z., Muhammed, S., Wahab, A., Ismail, F., & Musa, R. (2013). An ICT-Based Agricultural Extension Service Delivery for Nigeria. *Journal of Agricultural Extension*, Vol.17 (2) December, 2013 ISSN 1119-944X . <https://doi.org/10.4314/jae.v17i2.3>

FAO (2017) Information and Communication Technology (ICT) in Agriculture A Report to the G20 Agricultural Deputies . ISBN 978-92-5-109979-7. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a57a5a65-3d7b-4113-8730-5e8adaddd83d/content> Erişim 09.08.2026

Lindblom, J., Lundström, C., Ljung, M., & Jonsson, A. (2017). Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. *Precision Agriculture, Precision Agric* (2017) 18:309–331. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9491-4>

Kleemann, L., & Semrau, F. O. (2025). Connecting the unconnected? Social ties and ICT adoption among smallholder farmers in developing countries. *Technological Forecasting and Social Change*, *Technological Forecasting & Social Change* 213 (2025) 123985

Moghaddam, B. K., & Khatoon-abadi, A. (2013). Factors affecting ICT adoption among rural users: A case study of ICT Center in Iran. *Telecommunications Policy* 37 (2013) 1083–1094

Mohammed, S., & Abdulai, A. (2022). Do ICT based extension services improve technology adoption and welfare? Empirical evidence from Ghana. *Applied Economics*, 2022, Vol. 54, No. 23, 2707–2726 <https://doi.org/10.1080/00036846.2021.1998334>

Spielman, D., Lecoutere, E., Makhija, S., & Campenhout, B. V. (2021). Information and Communications Technology (ICT) and Agricultural Extension in Developing Countries. International Food Policy Research Institute (2021), <https://www.jstor.org/stable/resrep46760>

Sugihono, C., Hariadi, S. S., & Wastutiningsih, S. P. (2025). Information and communication technology transform the agricultural extension practices in North Maluku, Indonesia. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS) Vol. 14, No. 1, March 2025, pp. 46~52 ISSN: 2252-8814, DOI: 10.11591/ijaas.

Su Ürünlerinde Raf Ömrü ve Kalite Korunumu: Esansiyel Yağ Katkılı Aktif Ambalaj Uygulamaları

**Muhammed KARTAL¹
Pınar OĞUZHAN YILDIZ²**

¹Atatürk Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Erzurum, Türkiye. 0009-0008-8597-8230

²Atatürk Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Erzurum, Türkiye. 0000-0002-9892-7925

ÖZET

Su ürünleri, yüksek besin değerine rağmen hızlı bozulabilen gıdalar arasında yer almaktadır. Yüksek su aktivitesi, protein bakımından zengin yapısı ve mikrobiyal bozulmaya yatkınlığı bu ürünlerin korunmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle su ürünlerinde raf ömrünü uzatmaya yönelik yeni koruma yöntemleri giderek önem kazanmıştır. Aktif ambalaj teknolojisi, ürün ile ambalaj materyali arasında işlevsel bir etkileşim oluşturarak kalite kayıplarını azaltmayı amaçlayan yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sistemlerde doğal bileşenlerin kullanımı dikkat çekmekte, özellikle esansiyel yağlar antimikrobiyal ve antioksidan özellikleriyle öne çıkmaktadır. Esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlar, su ürünlerinde mikrobiyal gelişmenin yavaşlatılması, lipid oksidasyonunun sınırlandırılması ve duyu özelliklerinin korunması açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu çalışmada su ürünleri işleme teknolojisinde esansiyel yağ katkılı aktif ambalaj uygulamaları ele alınarak ürün kalitesi, raf ömrü ve endüstriyel uygulanabilirlik yönünden değerlendirilmiş; sistemin avantajları, sınırlılıkları ve gelecekteki kullanım olanakları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Su ürünleri, aktif ambalaj, esansiyel yağ, raf ömrü

GİRİŞ

Su ürünleri, içerdiği yüksek kaliteli protein, omega-3 yağ asitleri, vitaminler ve mineraller nedeniyle insan beslenmesinde stratejik bir öneme sahiptir. (Turan vd 2006; Hosomi et al. 2012; Abera ve Adimas 2024; Hınıslioğlu vd. 2024; Karadaş 2024). Bu özellikleri sayesinde yalnızca dengeli beslenmeye katkı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda gıda güvenliği ve toplum sağlığı açısından kritik bir ürün grubu olarak değerlendirilmektedir. Dünya genelinde artan nüfus ve sürdürülebilir gıda kaynaklarına duyulan ihtiyaç, su ürünlerinin önemini daha da artırmaktadır.

Besinsel yönden bu denli değerli olan su ürünleri, yüksek su aktivitesi, nötre yakın pH, enzimatik faaliyetlerin hasat sonrasında devam etmesi ve mikrobiyal gelişime uygun yapıları nedeniyle ne yazık ki hızlı bozulabilen gıdalar arasında yer almaktadır. Özellikle mikrobiyolojik faaliyetler, lipid oksidasyonu ve otolitik değişimler ürün kalitesini kısa sürede düşürmekte; bu durum hem ekonomik kayıplara hem de tüketici açısından kalite ve güvenlik sorunlarına yol açmaktadır (Mei et al. 2019; Speranza et al. 2021; Nie et al. 2022; Watts 2024; Wang and Zhang 2025).

Ambalaj, gıdanın üretim hattından ayrıldığı andan itibaren tüketiciye ulaşıncaya kadar geçen süreçte ürünün korunmasını sağlayan en önemli uygulamalardan biridir. Ürünü fiziksel ve mekanik etkilere karşı korumanın yanı sıra, aroma kayıplarını önleme, ışık geçirgenliğini sınırlama ve mikrobiyal kontaminasyona karşı güvenlik sağlama gibi işlevleri de bulunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde ambalaj, gıdanın raf ömrünü uzatmakta ve tüketiciye daha güvenilir bir şekilde ulaşmasına katkıda bulunmaktadır (Takma ve Nadeem 2019).

Geleneksel muhafaza yöntemleri (soğutma, dondurma, tuzlama, kurutma) eski zamanlardan beri kullanılmaktadır (Sayiner ve Beyhan 2023; Gürsoy 2024). Ancak günümüzde tüketicilerin doğal, daha az sentetik katkı içeren ve güvenilir gıdalara yönelmesi, alternatif koruma tekniklerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu kapsamda aktif ambalaj sistemleri, yalnızca fiziksel koruma sağlayan klasik ambalaj anlayışından ayrılarak ürün kalitesinin korunmasına doğrudan katkı sağlayan yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Ahmed et al. 2017; Carpena et al. 2021; Firouz et al. 2021).

Son yıllarda aktif ambalaj sistemlerinin etkinliğini artırmak amacıyla doğal bileşenlerin kullanımı öne çıkmaktadır. Bu kapsamda özellikle uçucu yağların ambalaj materyaline entegre edilmesi, sistemin antimikrobiyal ve antibakteriyel özelliklerini güçlendirmekte ve koruyucu etkinin daha uzun süre devam etmesine katkı sağlamaktadır (Ekinci ve Çoban 2023).

Aromatik bitkilerden elde edilen uçucu bileşikler, hem antimikrobiyal hem de antioksidan özellikleri sayesinde gıda koruma uygulamalarında dikkat çekmektedir. Doğrudan ürüne uygulandıklarında duyuşal değışimlere yol açabilen esansiyel yağlar, aktif ambalaj materyaline entegre edildiğinde kontrollü salım ile daha dengeli bir koruma sağlamaktadır (Faydaoğlu ve Sürücüoğlu 2013; Atarés and Chiralt 2016; Hassoun and Çoban 2017).

Literatürde esansiyel yağ katkılı aktif ambalajların su ürünlerinde uygulanmasına yönelik çalışmaların sınırlı olması, bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ayrıca sürdürülebilir gıda üretimi ve tüketici beklentileri açısından doğal bileşenlerin ambalaj sistemlerine entegrasyonu, endüstriyel açıdan da önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu araştırma kapsamında, esansiyel yağ katkılı aktif ambalaj sistemlerinin su ürünlerinde raf ömrü ve kalite korunumu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada hem antimikrobiyal hem de antioksidan özelliklerin ürün kalitesine katkısı incelenmiştir; ayrıca sistemin avantajları, sınırlılıkları ve endüstriyel uygulanabilirliği tartışılmıştır. Böylece hem literatürdeki boşluğun doldurulması hem de su ürünleri endüstrisine yönelik pratik öneriler sunulması amaçlanmıştır.

Su ürünlerinde bozulma mekanizmaları

Su ürünlerinde bozulma, temel olarak mikrobiyolojik faaliyetler, oksidatif değışimler ve enzimatik süreçler sonucunda gelişmektedir. Bu mekanizmalar çoğu zaman birbirini destekleyerek ilerler ve ürünün raf ömrünü belirler. Yüksek nem içeriğı ve hassas doku yapısı, bu süreçlerin diğer gıdalara göre daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır (Hisar vd. 2004; Anagnostopoulos et al., 2022; Nie et al., 2022; Siddiqui et al. 2024).

1. Mikrobiyolojik Bozulma

Balık ve diğer deniz ürünlerinde kalite kaybının en önemli nedeni mikrobiyal gelişimdir. Özellikle psikrotrof bakteriler düşük sıcaklıkta çoğalabilmekte ve depolama süresince proteinleri parçalayarak trimetilamin,

amonyak gibi uçucu bileşiklerin oluşumuna yol açmaktadır. Bu durum hem duysal kaliteyi hem de gıda güvenliğini olumsuz etkiler.

2. Oksidatif Bozulma

Yağlı balıklarda bulunan çoklu doymamış yağ asitleri oksijenle reaksiyona girerek oksidatif bozulmaya neden olur. Bu süreçte oluşan ürünler acılaşma, renk değişimi ve istenmeyen aroma kusurlarına yol açar. Sonuç olarak ürünün hem duysal kalitesi hem de besin değeri azalır.

3. Enzimatik Değişimler

Balık dokusunda ölüm sonrası enzimatik faaliyetler bir süre devam eder. Bu enzimler kas yapısının zayıflamasına, dokusal parçalanmaya ve fiziksel özelliklerde bozulmaya neden olur. Ayrıca enzimatik değişimler mikrobiyal faaliyetlerin ilerlemesini kolaylaştırarak genel bozulma sürecini hızlandırır.

Aktif ambalaj teknolojisi

Son yıllarda tüketicilerin hem sağlık hem de estetik kaygılarla açıkta satılan ürünler yerine ambalajlı gıdalara yöneldiği görülmektedir. Ambalajlama sayesinde ürünler korunmakta, dayanıklılığı artmakta, sevkiyat ve depolama süreçleri kolaylaşmakta, ayrıca tüketicinin ürünü tercih etmesi teşvik edilmektedir. Gıda endüstrisinde ambalaj yalnızca ürünün raf ömrünü uzatmakla kalmaz; aynı zamanda tüketicie güvenilir bilgi sunar, ürünün tanıtımını yapar ve satın alma kararını etkiler. Günümüzde ambalajlar klasik koruma işlevlerinin ötesine geçerek muhafaza ettikleri ürünlere fonksiyonel özellikler de kazandırmaktadır (Yıldız ve Arslan 2022).

Ambalajlama, gıdaların üretimden tüketime kadar geçen süreçte fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik etkilere karşı korunmasında temel bir işlev üstlenmektedir. Bu durum özellikle su ürünleri için kritik öneme sahiptir; çünkü hassas doku yapıları ve yüksek bozulma eğilimleri nedeniyle depolama ve taşıma sırasında hızlı kalite kayıpları yaşanabilmektedir (Anonim 2026a; Alamri et al. 2021).

Uygun ambalajlama, ürünün dış ortamla temasını azaltarak hijyenin korunmasına, nem ve oksijen geçişinin sınırlandırılmasına ve tazeliğin daha uzun süre korunmasına katkı sağlar. Ancak klasik ambalaj materyalleri çoğu zaman yalnızca pasif koruma sunduğundan, raf ömrü kısa olan su ürünlerinde tek başına yeterli olmayabilmektedir (Gençer 2025).

Günümüzde gıda muhafazasında hem geleneksel hem de modern ambalajlama yöntemleri kullanılmaktadır. Vakum ambalajlama, modifiye atmosfer ambalajlama, sous-vide ambalajlama ve kontrollü atmosfer ambalajlama gibi klasik yöntemler uzun süredir yaygın olarak uygulanmaktadır. Bununla birlikte gelişen teknoloji ve değişen tüketici beklentileri, ambalajlamaya yalnızca koruma işlevi değil, aynı zamanda bilgilendirme ve fonksiyonel özellik kazandırma gibi yeni

boyutlar eklemiştir. Bu doğrultuda akıllı ambalajlama, aktif ambalajlama, antimikrobiyal ambalajlama ve nanoteknoloji tabanlı ambalajlama gibi güncel yöntemler öne çıkmaktadır. Bu sistemler, ürünün raf ömrünü uzatmanın yanı sıra tüketiciye güvenilir bilgi sunma ve çevresel etkileri azaltma açısından da önem taşımaktadır (Kutlu vd. 2021).

Aktif ambalaj uygulamalarında doğal kökenli bileşenlerin kullanımı son yıllarda daha fazla önem kazanmıştır. Bu bileşenler arasında yer alan esansiyel yağlar, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Ambalaj materyaline entegre edilen esansiyel yağlar sayesinde mikrobiyal gelişim sınırlandırılabilen, oksidatif değişimler yavaşlatılabilen ve duyu kalite daha uzun süre korunabilmektedir (Ertekin 2020; Aslan vd. 2021; Mohammed et al. 2025).

Aktif Ambalaj Kavramı

Aktif ambalaj, geleneksel ambalaj anlayışının ötesine geçen ve gıdanın korunmasına işlevsel katkılar sunan yenilikçi bir sistemdir. Bu teknoloji, ambalaj materyalini yalnızca koruyucu bir bariyer olmaktan çıkararak ürün çevresinde kontrollü bir ortam oluşturur ve bozulma süreçlerini yavaşlatır (Ahmed et al. 2017; Firouz et al. 2021).

Aktif ambalaj sistemleri; oksijenin azaltılması, nem dengesinin düzenlenmesi, etilenin absorblanması ve antimikrobiyal/antioksidan bileşenlerin kontrollü salınımı gibi mekanizmalar aracılığıyla gıda muhafazasını destekler. Özellikle su ürünlerinde bozulma çoğunlukla mikrobiyal faaliyetler ve lipid oksidasyonu ile hızlandığından, bu ürün grubunda aktif ambalaj uygulamaları kritik önem taşımaktadır (Kadirvel et al. 2024; Priyanka et al. 2024).

Çeşitli çalışmalar, aktif ambalajın et, süt, meyve-sebze ve fırıncılık ürünlerinde kullanılabildiğini; ancak bozulmanın hızlı ilerlediği balık, karides ve diğer deniz ürünlerinde raf ömrünü uzatmada daha belirgin avantajlar sağladığını ortaya koymuştur (Nunes et al. 2023; Zainal Arifin et al. 2023; Sattarov et al. 2025; Sranraj et al. 2025).

Bu sistemler, ambalaj materyaline entegre edilen işlevsel bileşenler aracılığıyla ürün kalitesini korumayı ve raf ömrünü uzatmayı hedefler. Genel olarak altı temel grupta sınıflandırılmaktadır (Karagöz ve Demiröven 2017; Ayhan 2020; Kontominas et al., 2021; Anonim 2026b):

- **Oksijen tutucular:** Lipid oksidasyonunu yavaşlatarak özellikle yağlı balıklarda kaliteyi korur.
- **Nem düzenleyiciler:** Su aktivitesini kontrol ederek mikrobiyal gelişimi sınırlar.
- **Etilen absorblayıcılar:** Bitkisel ürünlerde olgunlaşmayı yavaşlatır.
- **Antimikrobiyal ambalajlar:** Mikroorganizmaların gelişimini baskılar.
- **Antioksidan ambalajlar:** Serbest radikal oluşumunu sınırlandırarak duyu kaliteyi korur.

Esansiyel yağlar

Esansiyel yağlar, aktif ambalaj sistemlerinde kullanılan doğal koruyucu bileşenler arasında önemli bir yere sahiptir. Bu bileşiklerin tercih edilmesinin temel nedeni, hem antimikrobiyal hem de antioksidan özellik göstermeleridir (Carpena et al., 2021; Sharma et al., 2021).

Aromatik bitkilerin yaprak, çiçek, kabuk, tohum veya kök gibi farklı kısımlarından elde edilen uçucu bileşiklerdir. Kekik, karanfil, tarçın, biberiye, nane ve limon otu gibi bitkiler gıda koruma uygulamalarında sık kullanılan kaynaklar arasında yer almaktadır (Keskin ve Toroğlu 2011; Yüzereroğulları 2021).

Gıda koruma alanında önem kazanmalarının temel nedeni, birçok esansiyel yağın hem antimikrobiyal hem de antioksidan etki gösterebilmesidir. Bu özellikleri sayesinde bozulmaya neden olan mikroorganizmaların gelişimini baskılayabilmekte ve oksidatif reaksiyonların hızını azaltabilmektedirler (Bayaz 2014; Basavegowda and Baek 2021; Mohammed et al. 2025).

Su ürünleri gibi bozulmaya yatkın gıdalarda esansiyel yağların kullanımı dikkat çekmektedir. Ancak bu bileşiklerin güçlü aroma profili ve uçucu yapısı, doğrudan ürüne uygulandıklarında duyuşal özelliklerde istenmeyen değişimlere yol açabilmektedir. Bu nedenle, esansiyel yağların ambalaj materyaline entegre edilerek kontrollü salım yoluyla kullanılması, duyuşal değişim riskini azaltan ve koruyucu etkinliği artıran daha uygun bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Zubair et al. 2022; Olaniran et al. 2024; Öner ve Metli, 2026).

1. Antimikrobiyal Etkileri

Esansiyel yağlar mikroorganizmaların hücre zarında yapısal bozulmaya neden olarak geçirgenliği artırır ve hücresel işlevleri bozar. Bu nedenle birçok bakteri, maya ve küf türü üzerinde baskılayıcı etki gösterebilir (Nazzaro et al., 2013; Bayaz 2014; Yavuz 2015).

2. Antioksidan Etkileri

Bazı esansiyel yağlar serbest radikal oluşumunu sınırlandırarak lipid oksidasyonunu yavaşlatır. Bu özellik, özellikle yağlı balıklarda besinsel kalitenin korunması açısından kritik öneme sahiptir (Chen et al., 2023; Pierozan et al. 2024).

Esansiyel yağ katkılı aktif ambalaj materyalleri

Esansiyel yağlar, bitkilerin kök, kabuk, yaprak, çiçek, meyve, odun ve reçine gibi farklı kısımlarından elde edilen uçucu bileşiklerdir. Bu doğal bileşenler, gıda koruma uygulamalarında antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Aslan vd. 2021).

Esansiyel yağların aktif ambalaj sistemlerine entegre edilmesi, doğrudan ürüne uygulanmasına kıyasla daha kontrollü ve dengeli bir kullanım olanağı sağlar.

Bu yöntem sayesinde koruyucu etkinin depolama süresine yayılması ve duyuasal bozulmaların azaltılması hedeflenmektedir. Literatürde, esansiyel yağların biyobozunur film yapılarıyla birlikte kullanımı öne çıkmakta; özellikle polisakkarit, protein veya lipid esaslı yenilebilir filmlerle kombinasyon halinde uygulandığında daha etkili sonuçlar verdiği bildirilmektedir. Son yıllarda geliştirilen kompozit veya çok bileşenli film yaklaşımları, bu doğal bileşiklerin başlıca yararlı özelliklerinden daha etkin biçimde yararlanmayı amaçlamaktadır. Etkili bir aktif ambalajlama için esansiyel yağların kademeli ve sürdürülebilir biçimde salınması gerekmektedir; bu sayede ürünün raf ömrü boyunca antimikrobiyal ve antioksidan aktivite korunabilmektedir. Doğal antioksidanlar (polifenoller, esansiyel yağlar vb.) içeren aktif ambalaj sistemleri, gıda güvenliği risklerini azaltma potansiyeli taşıyan ve aynı zamanda maliyet açısından avantaj sağlayan yenilikçi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, doğal bileşenler aktif ambalajın antioksidan etkinliğinde önemli bir rol üstlenmektedir (Sharma et al. 2020; Carpena et al. 2021; Andrade et al. 2025).

Esansiyel yağlar gıdalarda çoğunlukla film ve kaplama sistemleri içinde kullanılmaktadır. Bu yapılar ürün yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak mikrobiyal gelişimin ve oksidatif değişimlerin yavaşlatılmasına katkı sağlar (Sharma et al. 2021; Zubair et al. 2022).

Kitosan, jelatin, nişasta ve selüloz türevleri gibi biyobozunur materyaller esansiyel yağlarla birlikte aktif ambalaj üretiminde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle kitosan; film oluşturma yeteneği, biyouyumluluğu ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle öne çıkmaktadır (Bhowmik et al., 2022; Flórez et al., 2022; Liu et al., 2024).

Esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlarda temel amaç, aktif bileşenin depolama sürecine yayılmış biçimde kontrollü olarak salınmasıdır. Bu yaklaşım, koruyucu etkinin daha uzun süre devam etmesini sağlarken aşırı aroma yüklenmesi riskini de azaltır (Ertekin 2020).

Esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlarının avantajları ve dezavantajları

Esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlarının avantajları ve dezavantajları Tablo 1'de verilmiştir (Ribeiro-Santos et al. 2017; Carpena et al., 2021; Bibow and Oleszek 2024).

Tablo 1. Esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlarının avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
• Esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlar, bakteri, maya ve küf gibi bozulmaya neden olan mikroorganizmaların gelişimini baskılayabilir. Bu durum, özellikle su ürünlerinde mikrobiyal bozulmanın geciktirilmesine yardımcı olur. • Esansiyel yağlar, lipid oksidasyonunu yavaşlatarak balık ve diğer su ürünlerinde tat, koku, renk ve besin değerinin korunmasına katkı sağlayabilir. • Bitkisel kaynaklı olmaları nedeniyle esansiyel yağlar, sentetik katkı maddelerine alternatif doğal koruyucular olarak değerlendirilmektedir. Bu özellik, tüketicilerin “temiz etiket” beklentileriyle uyumludur. • Esansiyel yağların ambalaj materyaline entegre edilmesi, aktif bileşenlerin depolama süresince kontrollü şekilde salınmasına olanak tanır. Böylece daha dengeli ve sürekli bir koruyucu etki elde edilebilir. • Mikrobiyal gelişmenin ve oksidatif bozulmanın yavaşlatılması sayesinde su ürünlerinin raf ömrü uzatılabilir ve kalite özellikleri daha uzun süre korunabilir.	• Esansiyel yağların yoğun ve karakteristik aromaları, su ürünlerinde istenmeyen tat ve koku değişimlerine neden olabilir. Bu durum tüketici kabulünü azaltabilir. • Esansiyel yağlar ısı, ışık ve oksijen gibi çevresel koşullardan etkilenebilir. Bu nedenle ambalaj içindeki etkinlikleri zamanla azalabilir. • Düşük konsantrasyonlarda yeterli koruma sağlanamayabilirken, yüksek konsantrasyonlarda duyuusal kalite olumsuz etkilenebilir. Bu nedenle ürün bazında uygun dozun belirlenmesi önemlidir • Laboratuvar ölçeğinde etkili olan bazı uygulamalar, endüstriyel ölçekte üretim maliyeti, teknik altyapı ve standardizasyon sorunları nedeniyle zor uygulanabilmektedir. • Gıda ile temas eden aktif ambalajlarda esansiyel yağ kullanımında migrasyon, toksisite, bileşen standardizasyonu ve yasal uygunluk gibi konular dikkate alınmalıdır.

Su ürünlerinde kullanımları

Esansiyel yağ katkılı aktif ambalaj uygulamaları, balık filetosu, karides ve diğer deniz ürünlerinde kalite kaybını yavaşlatmak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, uygun esansiyel yağ ve ambalaj materyali kombinasyonlarının mikrobiyolojik yükü azaltabildiğini, oksidatif değişimleri yavaşlatabildiğini ve bazı kalite parametrelerinde iyileşme sağlayabildiğini göstermektedir (Volpe et al. 2015; Heydari et al., 2019; Pirozan

et al., 2024; Eshaghi et al. 2024). Su ürünlerinde esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlama teknolojilerinin uygulamaları ve etkileri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Esansiyel yağ katkılı aktif ambalajlama teknolojilerinin su ürünlerinde uygulamaları ve etkileri

Su Ürünleri	EO	Ambalaj Materyali	Etkileri	Kaynak
Ot sazanı	Karanfil EO	Aktif ambalaj	%3 karanfil esansiyel yağı içeren aktif filmin dört gıda uyarıcısında farklı salınım parametrelerine sahip olduğu ve balığın tazeliğini etkili bir şekilde koruyabildiği ve raf ömrünü soğuk depolama sırasında kontrol grubuna kıyasla 7-8 güne kadar uzatabildiği belirlenmiştir.	Yang et al. (2016)
Balık filetosu	Kekik EO (<i>Origanum vulgare</i>)	Poli(bütilen adipat-kotereftalat) (PBAT) aktif film	Filmlerin termal özelliklerini etkilememiş, ancak çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastik modül gibi mekanik özellikleri bozulmuştur. Toplam koliform, <i>Staphylococcus aureus</i> ve psikrotrofik mikroorganizmaların azaltılmasında etkili olmuştur.	Cardoso et al. (2017)

Pasifik beyaz karides	Biberiye ve tarçın EO	Aktif ambalaj	Uçucu yağ içeren aktif filmlerle paketlenmiş karideslerde, 4°C'de 10 gün boyunca depolama sırasında kontrol filmleriyle paketlenmiş örneklerle kıyasla daha düşük mikrobiyal sayım, toplam uçucu bazik azot (TVB-N) içeriği ve tiyobarbitürik asit reaktif madde (TBARS) değerleri gözlemlenmiştir.	Dong et al. (2018)
Büyük sarıağız balığı (<i>Pseudoscience crocea</i>)	Sarımsak yağı (<i>Allium sativum</i>)	PP/LDPE kompozit film+attapulgit	Mikrobiyal gelişimi baskılayarak antimikrobiyal etki sağlamış, lipid oksidasyonunu geciktirerek oksidatif stabilitenin korunmasına katkıda bulunmuş ve raf ömrünü uzatmıştır.	Dong et al. (2019)
Sazan balığı	Adaçayı yağı (<i>Salvia officinalis</i>)	Biyobozunur aktif film	Mikrobiyal gelişimi baskılanmış, oksidatif stabilite korunmuş, duyu kalite iyileşmiş ve raf ömrünü uzatmıştır.	Ehsani et al. (2020)
Afrika yayın	Kekik	Aktif	Afrika yayın	Sungur ve

balığı (<i>Clarias gariepinus</i>)	(<i>Thymus</i> sp.), Nane (<i>Mentha piperita</i>) Rezene (<i>Foeniculum vulgare</i>) Defne (<i>Laurus nobilis</i>) Kimyon (<i>Fructus cumini</i>)	ambalaj	balığı filetolarında lipid oksidasyonunu geciktirerek oksidatif stabilitenin korunmasına katkıda bulunmuş, mikrobiyal gelişimi sınırlamış ve raf ömrünü uzatmıştır.	Atan (2020)
Pasifik beyaz karides (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	Karvakrol, sitral ve α -terpineol uçucu yağları	Biyobozunur aktif film	EO içeren filmler, mikrobiyal büyüme, lipid oksidasyonu ve dokusal değişim de dahil olmak üzere Pasifik beyaz karidesinde kalite bozulmasını engellemiştir.	Laorenza ve Harnkarnsujarit (2021)
Balon balığı (<i>Takifugu obscurus</i>)	Kekik esansiyel yağı	Polilaktik asit/ polihidroksialkanoat (PLA/PHA) aktif ambalaj	Mekanik özelliklerin iyileştirdiği (filmlerin kopma uzaması %23,36'dan %65,80'e yükseltmiş), antimikrobiyal ve antioksidan etki göstermiş, balık kokusunu maskeleyen ve raf ömrünü 2–3 gün kadar uzatılmıştır.	Zheng et al. (2022)
Yılanbaşı balık (<i>Channa argus</i>)	Tarçın ve kekik EO	Aktif film	<i>Staphylococcus aureus</i> 'a karşı sinerjik inhibisyon göstermiştir. %14 tarçın ve kekik esansiyel yağları aktif filmi, su	Deng et al. (2024)

			buharı geçirgenliğini ve suda çözünürlüğü azaltmış, toplam renk farkını artırmış, daha yoğun ağ yapısı, gelişmiş çekme mukavemeti ve termal kararlılık göstermiştir. pH, TVB-N, TBARS değerlerinde de azalmaya neden olmuştur.	
Karides (<i>Macrobrachium equidens</i>)	Tarçın yağı (<i>Cinnamomum verum</i>)	Chitosan	Mikrobiyal gelişimi baskılamış, lipid oksidasyonunu geciktirmiş ve raf ömrünü uzatmıştır.	Jitpasutham et al. (2024)
Gümüş sazan (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	<i>Zataria multiflora</i> Boiss EO	Kitosan Biyopolimer Kaplamaya Dayalı Aktif Ambalajlama	15. günde, kitosan kaplama + %0,6 ZMEO, diğer uygulamalara kıyasla toplam canlı bakteri sayısı, Enterobacteriaceae ve laktik asit bakterisi sayılarında önemli ölçüde azalmaya neden olmuş, tiyobarbitürik asit (TBA), toplam uçucu baz azotu (TVB-N), peroksit değeri (PV) ve pH artışını etkili bir şekilde baskılamıştır. Ayrıca duyu sal	Mohammadi an et al. (2024)

			açıdan herhangi bir olumsuz değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.	
Japon balığı (<i>Carassius auratus</i>)	Zencefil yağı (<i>Zingiber officinale</i> Roscoe)	Aktif ambalaj	Mikrobiyal bozulmayı önemli ölçüde geciktirdiği ve balığın raf ömrünü 9 günden (kontrol grubu) 21-24 güne kadar uzatmıştır.	Shi et al. (2025)
Basa balığı (<i>Pangasius bocourti</i>)	Dereotu yağı (<i>Anethum graveolens</i>)	Aktif ambalaj	Balık filetolarında mikrobiyal yükü azaltmış, duyuusal kaliteyi korumuştur.	Tayel et al. (2025)
Çipura (<i>Sparus aurata</i>)	Kekik EO	Aktif ambalaj	Kekik esansiyel yağı, mikrobiyal büyümeyi 0,5 ila 2 log CFU/g oranında azaltmış ve duyuusal değerlendirmeye göre filetoların raf ömrünü 48 saate kadar uzatarak korumayı olumlu yönde etkilemiştir.	Schoina et al. (2026)

SONUÇ

Bu çalışma, esansiyel yağ katkılı aktif ambalaj sistemlerinin su ürünlerinde mikrobiyal bozulmayı ve lipid oksidasyonunu yavaşlatmada etkili bir doğal koruma stratejisi sunduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, uygun formülasyon ve kontrollü salım mekanizmaları geliştirildiğinde bu sistemlerin yalnızca raf ömrünü uzatmakla kalmayıp aynı zamanda duyuusal kaliteyi de iyileştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, her tür su ürünü için en uygun esansiyel yağ türü ve kullanım düzeyinin belirlenmesi, aroma baskınlığının önlenmesi ve tüketici kabulünün artırılması gelecekteki araştırmalar açısından kritik öneme sahiptir.

Özellikle biyobozunur ambalaj materyalleri ile uyumlu, ekonomik ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir sistemlerin geliştirilmesi, bu teknolojinin gıda endüstrisinde yaygınlaşması için temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, esansiyel yağ katkılı aktif ambalaj sistemleri, su ürünleri işleme ve muhafaza teknolojilerinde yenilikçi, sürdürülebilir ve tüketici odaklı bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Acıbuca, V., Budak, D. B. 2018. Dünya’da ve Türkiye’de tıbbi ve aromatik bitkilerin yeri ve önemi. Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 33(1): 37-44.
- Aktop Y., Çağatay İ. T. 2022. Tıbbi ve aromatik bitkilerden Origanum türlerinin su ürünlerinde kullanım alanları. Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi, 8(2). 114-121
- Arslan, M., Kalaylıoğlu Akyıldız, Z. I., Ekren, E. 2018. Use of medicinal and aromatic plants in therapeutic gardens. Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research, 51(4S):S151-S154.
- Arslan, D., Arslan, H., Bayraktar, Ö. V. 2022. Bazı önemli tıbbi ve aromatik bitkilerin siirt ilinde tarımının yaygınlaştırılması. İksad Publishing House, Ankara.
- Balcı, B. A., Aktop, Y. 2019. Yeme Çakşır Otu (*Ferula elaeochytris* K. 1947) İlavesinin Japon Balığının (*Carassius auratus* L. 1758) Büyüme ve Gonad Gelişimi Üzerine Etkisi. Journal of the Institute of Science and Technology, 9(1): 347-359.
- Balıkçı, E. 2015. Kekik, Biberiye ve Fesleğenden Elde Edilen Ekstraktların, Dondurulmuş (-18°C) Ve Soğukta (4±2°C) Vakum Paketlenerek Depolanmış Uskumru (*Scomber scombrus*) Köftelerinin Kalite Parametreleri Üzerine Etkileri. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana.162 s
- Bayraktar, Ö. V., Öztürk, G., Arslan, D. 2017. Türkiye’de bazı tıbbi ve aromatik bitkilerin üretimi ve pazarlamasındaki gelişmelerin değerlendirilmesi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 26(2): 216-229.
- Bayram, E., Kırıcı, S., Tansı, S., Yılmaz, G., Kızıl, O. A. S., Telci, İ. 2010. Tıbbi ve aromatik bitkiler üretiminin arttırılması olanakları. TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası, Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi.
- Bilen, S., Altief, T. A. S., Özdemir, K. Y., Salem, M. O. A., Terzi, E., Güney, K. 2020. Effect of lemon balm (*Melissa officinalis*) extract on growth performance, digestive and antioxidant enzyme activities, and immune responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Fish Physiology and Biochemistry, 46: 471-481.
- Bodur, T., Afonso, J. M., Montero, D., Navarro, A. 2018. Assessment of effective dose of new herbal anesthetics in two marine aquaculture species: *Dicentrarchus labrax* and *Argyrosomus regius*. Aquaculture, 482: 78-82.
- Boztaş, G., Avcı, A. B., Arabacı, O., Bayram, E. 2021. Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Dünyadaki ve Türkiye’deki Ekonomik Durumu. Teorik ve Uygulamalı Ormancılık Dergisi, 1: 27-33.
- Bülbül, H. E., Yıldırım, Y. 2024. Seçilen Tıbbi ve Aromatik Bitkiler için Türkiye ve G-8 Ülkelerinin Ticaret Paterninin Değişimi. Parion Akademik Bakış Dergisi, 3(1): 71-93.
- Çelik, A.D. 2019. Hatay ilinde tıbbi ve aromatik bitkiler piyasası ve geliştirilmesi imkanları. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Çelik. Y. S., 2020. Tıbbi ve aromatik bitkilerin balık yetiştiriciliğinde kullanım potansiyelleri. Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi, 6(2): 86-94.
- Effendi, I., Yoswaty, D., Syawal, H., Austin, B., Lyndon, A. R., Kurniawan, R., Wahyuni, S., Al-Harbi, A. 2022. The use of medicinal herbs in aquaculture industry: a review. Current Aspects in Pharmaceutical Research and Development, 7: 7-20.
- Eti, S. 2012. Alabalık Yemlerine Aromatik Yağ İlavesinin Yemlerin Kimyasal, Mikrobiyolojik ve Mikroskopik Özellikleri Üzerine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- FAO 2020. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Faydaoğlu, E., Sürücüoğlu, M. S. (2011). Geçmişten günümüze tıbbi ve aromatik bitkilerin kullanılması ve ekonomik önemi. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 11(1): 52-67.
- Göktaş, Ö., Gıdık, B. 2019. Tıbbi ve aromatik bitkilerin kullanım alanları. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1): 145-151.
- Gül, V. 2018. Şifa bitkisi olan kişnişin (*Coriandrum sativum* L.) genel özelliklerinin belirlenmesi. İksad Publishing House, Ankara.
- Gandhi, S. G., Mahajan, V., Bedi, Y. S. 2015. Changing trends in biotechnology of secondary metabolism in medicinal and aromatic plants. Planta, 241: 303-317.
- Gülhan, M. F. 2018. Bazı sedatif ve anestezik aromatik bitki yağlarının gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*, L.) kan parametreleri üzerine etkileri. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(1), 471-482.
- Güneş, A. 2024. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/bahridagdas/Belgeler/SEMİNERLER/TIBBI%20BİTKİLER.pdf> (Erişim tarihi 02.05.2024).
- Handa, S. S. 2008. An overview of extraction techniques for medicinal and aromatic plants. Extraction technologies for medicinal and aromatic plants, 1(1): 21-40.
- Hu, Y., Zhang, X., Shan, L. P., Liu, L., Chen, J. 2024. The antiviral activity of currently used medicinal plants in aquaculture and structure-activity relationship of their active ingredients. Reviews in Aquaculture, 16(1): 154-173.
- ITC 2020. International Trade Center, TradeMap Veri tabanı, <http://www.intracen.org>
- Kate, G. U., Krishnani, K. K., Kumar, N., Sukhdhane, K., Verma, A. K., Brahmane, M. P., Chadha, N.K., Kumar, J. 2023. Abiotic and biotic stress alleviating effects of the medicinal and aromatic plant-derived product on striped catfish *Pangasianodon hypophthalmus*. Fish & Shellfish Immunology, 135, 108625.
- Keser, E., İzci, L. 2020. Gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*)'ndan elde edilen balık köftelerinde biberiye ve defne uçucu yağlarının mikrobiyolojik ve duyuşsal kaliteye etkisi. Acta Aquatica Turcica, 16(1): 13-21.
- Keykubat, B. 2016. Medicinal and aromatic plants and good life. Izmir Commodity Exchange R&D Department.
- Karaton Kuzgun, N. 2023. Defne Yaprağı Esansiyel Yağının + 4°C'de Muhafaza Edilen Gökkuşağı Alabalığı (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) Filetolarının Raf Ömrü Üzerine Koruyucu Etkisi. International Journal of Pure and Applied Sciences, 9(1): 107-114.
- Liao, W., Huang, L., Han, S., Hu, D., Xu, Y., Liu, M., Yu, Q., Huang, S., Wei, D., Li, P. 2022. Review of medicinal plants and active pharmaceutical ingredients against aquatic pathogenic viruses. Viruses, 14(6), 1281.

- Miriam, R., Nathalie, TP., Pierre, S., Denis, S. 2017. Use of Medicinal Plants in Aquaculture. In Diagnosis and Control of Diseases of Fish and Shellfish. 9: 223-261.
- Pakdemirli, B., Birişik, N., Akay, M. 2021. General overview of medicinal and aromatic plants in Turkey. Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi, 31(1): 126-135.
- Rashidian, G., Boldaji, J.T., Rainis, S., Proki'c, M.D. Faggio, C. 2021. Oregano (*Origanum vulgare*) Extract Enhances Zebrafish (*Danio rerio*) Growth Performance, Serum and Mucus Innate Immune Responses and Resistance against *Aeromonas hydrophila* Challenge. Animals, 11, 299
- Serencam, H., Gül, V., Gidik, B., Sefalı, A. 2018. Tıbbi ve aromatik bitkiler: uçucu yağlı bitkiler. İksad Publishing House. Ankara.
- Şimat, V., Skroza, D., Çağal, M., Soldo, B., Mekinić, I. G. 2023. Effect of plant extracts on quality characteristics and shelf-life of cold-marinated shrimp (*Parapenaeus longirostris*, Lucas, 1846) under refrigerated storage. Food Bioscience, 53, 102673.
- Stratev, D., Zhelyazkov, G., Noundou, X. S., Krause, R. W. 2018. Beneficial effects of medicinal plants in fish diseases. Aquaculture International, 26: 289-308.
- Tadese, D. A., Song, C., Sun, C., Liu, B., Liu, B., Zhou, Q., Xu, P., Ge, X., Liu, M., Xu, X., Tamiru, M., Zhou, Z., Lakew, A., Kevin, N. T. 2022. The role of currently used medicinal plants in aquaculture and their action mechanisms: A review. Reviews in Aquaculture, 14(2): 816-847.
- TAGEM 2021. Tıbbi ve aromatik bitkiler. Sektör Politika Belgesi 2020-2024, Ankara.
- Temel, M., Tınmaz A, B., Öztürk, M., Gündüz, O. 2018. Dünyada ve Türkiye’de tıbbi-aromatik bitkilerin üretimi ve ticareti. KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi 21(Özel Sayı): 198-214.
- Turgut, K. 2022. Tıbbi ve aromatik bitkilerin tarımının temel ilkeleri. Ders Notları, Antalya İl Tarım ve Orman Müdürlüğü.
- Uğur, D. 2019. Rezene (*Foeniculum vulgare* Miller) ve kimyon (*Cuminum cyminum*) uçucu yağlarının gökkuşakı alabalıklarında (*Oncorhynchus mykiss*) anestezik olarak etkinliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta.
- Varlı, M., Hancı, H., Kalafat, G. 2020. Tıbbi ve aromatik bitkilerin üretim potansiyeli ve biyoyararlılığı. Research Journal of Biomedical and Biotechnology, 1(1): 24-32.
- Yavuz, A., Erdoğan, Ü. 2019. Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Türkiye’de Üretim Miktarı ve Değerlendirilmesi. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1): 124-130.
- Yeşilsu, A. F., Erbay, E. A., Dağtekin, B. B. 2023. Bitki ekstraktlarının marine hamsinin depolama stabilitesi üzerine etkisi. Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi, (30): 32-44.
- Yıldıztekin, M., Ulusoy, H., Tuna, A. L. 2019. Türkiye’de tıbbi ve aromatik bitkilerin yetiştiriciliği ve sürdürülebilir gelişimi. In SETSCI-Conference Proceedings, 9: 481-484.
- Yousefi M., Ghafarifarsani H., Hoseinifar SH., Rashidian G. Van Doan H. 2021. Effects of dietary marjoram, *Origanum majorana* extract on growth performance, hematological, antioxidant, humoral and mucosal immune responses, and resistance of common carp, *Cyprinus carpio* against *Aeromonas hydrophila*. Fish and Shellfish Immunology 108: 127-133.

- Abera, BD., Adimas, M. A. 2024. Health benefits and health risks of contaminated fish consumption: Current research outputs, research approaches, and perspectives. *Heliyon*, 10(13): e33905.
- Ahmed, I., Lin, H., Zou, L., Li, Z., Brody, AL., Qazi, IM. 2017. A comprehensive review on the application of active packaging technologies to muscle foods. *Food Control*, 82: 163–178.
- Alamri, MS., Qasem, AA., Mohamed, AA., Hussain, S., Ibraheem, MA., Shamlan, G., Alqah, HA., Qasha, A.S. 2021. Food packaging's materials: A food safety perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8): 4490-4499.
- Anagnostopoulos, DA., Parlapani, FF., Boziaris, IS., Koutsoumanis, KP. 2022. The evolution of knowledge on seafood spoilage microbiota from conventional to molecular methods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 121: 180–191.
- Andrade, MA, Barbosa, CH, Ribeiro-Santos, R., Tomé, S., Fernando, AL., Silva, AS., Vilarinho, F. 2025. Emerging trends in active packaging for food: A six-year review. *Foods*, 14(15): 2713.
- Anonim 2026a. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/server/api/core/bitstreams/44fcb44-5781-4265-8c2b-1ab347a8155b/content> (Erişim tarihi 03.06.2026).
- Anonim 2026b. <https://www.diatek.com.tr/ArticleDetail.aspx?Article=3440> (Erişim tarihi 03.06.2026).
- Atarés, L., Chiralt, A. 2016. Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 48: 51–62.
- Aslan, R., Taşkın Kafa, AH., Hasbek, M., Çelik, C. 2021. Farklı esansiyel yağların in vitro antimikrobiyal etkinliğinin değerlendirilmesi. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 78(4): 525-534.
- Ayhan, Z. 2000. Yeni ambalaj teknolojileri. *Gıda Mühendisliğinde Isıl Olmayan Güncel Teknikler*, 43.
- Basavegowda, N., Baek, KH. 2021. Synergistic antioxidant and antibacterial advantages of essential oils for food packaging applications. *Biomolecules*, 11(9): 1267.
- Bayaz, M. 2014. Esansiyel yağlar: antimikrobiyal, antioksidan ve antimutajenik aktiviteleri. *Akademik Gıda*, 12(3): 45-53.
- Bhowmik, S., Agyei, D., Ali, A. 2022. Bioactive chitosan and essential oils in sustainable active food packaging: Recent trends, mechanisms, and applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 34: 100962.
- Bibow, A., Oleszek, W. (2024). Essential oils as potential natural antioxidants, antimicrobial, and antifungal agents in active food packaging. *Antibiotics*, 13(12): 1168.
- Cardoso, LG., Santos, JCP., Camilloto, GP., Miranda, AL., Druzian, JI., Guimarães, AG. 2017. Development of active films poly (butylene adipate co-terephthalate)–PBAT incorporated with oregano essential oil and application in fish fillet preservation. *Industrial Crops and Products*, 108: 388-397.
- Carpene, M., Nuñez-Estevéz, B., Soria-Lopez, A., Garcia-Oliveira, P., Prieto, MA. 2021. Essential oils and their application on active packaging systems: A review. *Resources*, 10(1): 7.
- Chen, X., Shang, S., Yan, F., Jiang, H., Zhao, G., Tian, S., Chen, R., Chen, D., Dang, Y. 2023. Antioxidant activities of essential oils and their major components in

- scavenging free radicals, inhibiting lipid oxidation and reducing cellular oxidative stress. *Molecules*, 28(11): 4559.
- Deng, N., Wang, S., Xiao, D., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Fang, F., Liu, M., Wang, J. 2024. Characterization, antibacterial and snakehead fish (*Channa argus*) preservation effects of active films infused with compounded cinnamon and thyme essential oils. *Food Packaging and Shelf Life*, 46: 101353.
- Dong, Z., Xu, F., Ahmed, I., Li, Z., Lin, H. 2018. Characterization and preservation performance of active polyethylene films containing rosemary and cinnamon essential oils for Pacific white shrimp packaging. *Food Control*, 92: 37-46.
- Dong, Z., Luo, C., Guo, Y., Ahmed, I., Pavase, T. R., Lv, L., Li, Z., Lin, H. 2019. Characterization of new active packaging based on PP/LDPE composite films containing attapulgite loaded with *Allium sativum* essence oil and its application for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, 20: 100320.
- Ertekin, B. 2020. Süt ve süt ürünlerinin ambalajlanmasında yenilikçi ve doğal yaklaşımlar; esansiyel yağların kullanıldığı polimerik aktif ambalaj çözümü. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17(1): 115-121.
- Faydaoğlu, E., Sürücüoğlu, M. 2013. Tıbbi ve aromatik bitkilerin antimikrobiyal, antioksidan aktiviteleri ve kullanım olanakları. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 6(2): 233-265.
- Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., Omid, M. 2021. A critical review on intelligent and active packaging in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 116: 293–306.
- Ehsani, A., Hashemi, M., Afshari, A., Aminzare, M., Raeisi, M., Zeinali, T. 2020. Effect of different types of active biodegradable films containing lactoperoxidase system or sage essential oil on the shelf life of fish burger during refrigerated storage. *LWT*, 117: 108633.
- Ekinci, L., Çoban, ÖE. 2023. Uçucu yağlar içeren kitosan film ve kaplamalar: Su ürünleri uygulamaları. *Journal of Biological Sciences and Health*, 1(1): 25-37.
- Eshaghi, R., Mohsenzadeh, M., Ayala-Zavala, JF. 2024. Bio-Nanocomposite Active Packaging Films Based on Carboxymethyl Cellulose, Myrrh Gum, TiO₂ Nanoparticles and Dill Essential Oil for Preserving Fresh-Fish (*Cyprinus carpio*) Meat Quality. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263: 129991.
- Gençer, GM. 2025. Gıda ambalaj teknolojileri, sürdürülebilirliği ve sağlık üzerine etkileri. In Ş. Çalık (Ed.), *Tıp ve Sağlık Bilimlerinde Yenilikçi Yaklaşımlar*, Lyon.
- Gürsoy, S. 2024. Geleneksel gıda işleme teknikleri ve bu amaçla kullanılan alet-ekipmanlar. *Geleneksel gıdalar ve sıfır atık mutfagımız* (ss. 28-56). Ankara.
- Flórez, M., Guerra-Rosas, MI., Torres-Giner, S., Lagaron, JM. 2022. Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, 124: 107328.
- Hassoun, A., Çoban, ÖE. 2017. Essential oils for antimicrobial and antioxidant applications in fish and other seafood products. *Trends in Food Science & Technology*, 68: 26-36.
- Heydari-Majd, M., Ghanbarzadeh, B., Shahidi-Noghabi, M., Najafi, M.A., Hosseini, M. 2019. A new active nanocomposite film based on PLA/ZnO nanoparticle/essential oils for the preservation of refrigerated *Otolithes ruber* fillets. *Food Packaging and Shelf Life*. 19: 94-103.

- Hinislioğlu, KN., Aslanyavrusu, G., Başkan, S., Kocatepe, D. 2024. Su Ürünleri Tüketimi, Diyet Listelerindeki Yeri ve Önemi. Doğu Karadeniz Sağlık Bilimleri Dergisi, 3(3): 106-118.
- Hisar, ŞA., Hisar, O., Yanık, T. 2004. Balıklarda mikrobiyolojik, enzimatik ve kimyasal bozulmalar. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 35(3-4): 261-265.
- Hosomi, R., Yoshida, M., Fukunaga, K. 2012. Seafood consumption and components for health. Global Journal of Health Science, 4(3): 72.
- Jitpasutham, S., Sinsomsak, W., Chuesiang, P., Ryu, V., Siripatrawan, U. 2024. Green active coating from chitosan incorporated with spontaneous cinnamon oil nanoemulsion: Effects on dried shrimp quality and shelf life. International Journal of Biological Macromolecules, 262: 129711.
- Kadirvel, V., Palanisamy, Y., Ganesan, ND. 2025. Active packaging system—An overview of recent advances for enhanced food quality and safety. Packaging Technology and Science, 38(2): 145-162.
- Karadaş, NF. 2024. Effects of fish on human health and nutrient content. Agro Science Journal of Iğdir University, 2(1): 32-38.
- Karagöz, Ş., Demirdöven, A. 2017. Gıda ambalajlamada güncel uygulamalar: modifiye atmosfer, aktif, akıllı ve nanoteknolojik ambalajlama uygulamaları. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6(1): 9-21.
- Keskin, D., Toroğlu, S. 2011. Gıda Kaynaklı Bazı Patojen Bakterilerin Gelişmesini Engelleyen Tıbbi Bitkiler ile Bunların Ekstraktları ve Uçucu Yağları. Academic Food Journal/Akademik GIDA.
- Kontominas, MG, Badeka, AV, Kosma, IS., Nathanailides, CI. 2021. Recent developments in seafood packaging technologies. Foods, 10(5): 940.
- Kutlu, N., Ceylan, Z., Ekin, MM., Meral, R. 2021. Geleneksel ve Yenilikçi Paketleme Teknolojileri: Balıketi Muhafazasında Potansiyel Kullanımı. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(1): 78-94
- Laorenza, Y., Harnkarnsujarit, N. 2021. Carvacrol, citral and α -terpineol essential oil incorporated biodegradable films for functional active packaging of Pacific white shrimp. Food Chemistry, 363: 130252.
- Liu, Z., Wang, S., Liang, H., Zhou, J., Zong, M., Cao, Y., Lou, W. 2024. A review of advancements in chitosan-essential oil composite films: Better and sustainable food preservation with biodegradable packaging. International Journal of Biological Macromolecules, 274: 133242.
- Mohammadian, M., Basti, AA., Khanjari, A., Misaghi, A., Kamkar, A., Moradi, F. 2024. Effects of Active Packaging Based on Chitosan Biopolymer Coating Enriched with *Zataria multiflora* Essential Oil on Shelf Life of Silver Carp during Chilled Storage. Journal of Nutrition, Fasting & Health, 12(4): 252.
- Mohammed, DM., Salem, MB., Elzallat, M., Alkafaas, SS., Salem, H.M., Alnadari, F., Ibrahim, EH., Elkelish, A., Negm, SH., Saad, AM., Abuqumar, SF., El-Tarabily, KA., El-Saadony, M.T. 2026. Essential oils: antimicrobial, antioxidant properties, and their applications in food preservation—a comprehensive review. Phytochemistry Reviews, 25(3): 2439-2487.
- Mei, J., Ma, X., Xie, J. 2019. Review on natural preservatives for extending fish shelf life. Foods, 8(10): 490.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., De Martino, L., Coppola, R., De Feo, V. 2013. Effect of essential oils on pathogenic bacteria. Pharmaceuticals, 6(12): 1451-1474.
- Nie, X., Lin, S., Zhang, Q. 2022. Mechanisms underlying the deterioration of fish quality and requirement for freshness evaluation: A review. Food Control, 140: 109133.

- Nunes, C., Silva, M., Farinha, D., Sales, H., Pontes, R., Nunes, J. 2023. Edible coatings and future trends in active food packaging—fruits' and traditional sausages' shelf life increasing. *Foods*, 12(17): 3308.
- Olaniran, AF., Adeyanju, AA., Olaniran, OD., Erinle, CO., Okonkwo, CE., Taiwo, AE. 2024. Improvement of food aroma and sensory attributes of processed food products using essential oils/boosting up the organoleptic properties and nutritive of different food products. In *Applications of essential oils in the food industry* (pp. 107-116). Academic Press.
- Öner S, Metli M 2026. The Effects of Different Essential Oil Treatments on the Microbiological Quality Changes of Cold Stored Green Tiger Shrimp (*Penaeus semisulcatus*, De Hann 1844). *Van Veterinary Journal*, 37(1): 11-17.
- Pierozan, MB., Oliveira Filho, JGD., Cappato, LP, Costa, AC, Egea, MB. 2024. Essential oils against spoilage in fish and seafood: Impact on product quality and future challenges. *Foods*, 13(23): 3903.
- Priyanka, P., Rani, R., Yadav, R., Bajal, N., Mandal, BS., Kumar, A. 2024. Role of active packaging for food freshness and quality maintenance. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 9(4): 023-030.
- Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., de Melo, NR., Sanches-Silva, A. 2017. Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 61: 132-140.
- Saranraj, P., Lokeshwari, B., Gayathri, K., Mohammad Al-Tawaha, AR., Zambare, V., Manigandan, M. 2025. Recent Trends in Edible and Active Packaging Strategies to Improve Bakery Products Shelf Life. In *Biological Outlook to Improve the Nutritive Quality of Bakery Products* (pp. 183-208). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Sattarov, K., Eshmurodov, D., Mamatkulova, M., Julbekov, I., Kharsika, I. 2025. The impact of active packaging and nanocoatings on the safety and shelf life of dairy products. *Animal Science and Food Technology*, 16(2): 110-128.
- Sayiner, G., Beyhan, Y. 2023. Geleneksel besin saklama yöntemleri ve yeni teknolojiler. *Toros University Journal of Food, Nutrition and Gastronomy*, 2(1): 79-92.
- Schoina, F., Xenou, S., Doukaki, A., Makris, S., Papadopoulou, OS., Tassou, C., Nychas, GJ., Chorianopoulos, N. 2026. Evaluation of the Antimicrobial Activity of Oregano Essential Oil on the Microbiological Quality of Sea Bream (*Sparus aurata*) Fillets Under Active Packaging Using Spectroscopic Sensors. *Chemosensors*, 14(1): 14.
- Sharma, S., Barkauskaite, S., Jaiswal, AK., Jaiswal, S. 2021. Essential oils as additives in active food packaging. *Food Chemistry*, 343: 128403.
- Shi, P., Mei, J., Xie, J. 2025. Impact of pretreatment sterilization techniques and ginger (*Zingiber officinale* roscoe) essential oil-based active packaging on the quality of crucian carp (*Carassius auratus*) during cold storage. *Journal of Stored Products Research*, 112: 102598.
- Siddiqui, SA., Singh, S., Bahmid, NA., Sasidharan, A. 2024. Applying innovative technological interventions in the preservation and packaging of fresh seafood products to minimize spoilage-A systematic review and meta-analysis. *Heliyon*, 10(8).
- Speranza, B., Racioppo, A., Bevilacqua, A., Buzzo, V., Marigliano, P., Mocerino, E., Scognamiglio, R., Corbo, MA., Scognamiglio, G., Sinigaglia, M. 2021. Innovative

- preservation methods improving the quality and safety of fish products: Beneficial effects and limits. *Foods*, 10(11): 2854.
- Sungur, Ş., Atan, MM. 2020. Effect of active packaging films containing natural antioxidant essential oils on the oxidative stability of the African catfish (*Clarias gariepinus*). *Natural and Engineering Sciences*, 5(3): 155-166.
- Takma, DK., Nadeem, HŞ. 2019. Gıdalarda akıllı ambalajlama teknolojisi ve güncel uygulamalar. *Gıda*, 44 (1): 131-142.
- Tayel, A., Hassanin, FS., Edris, SN., Hamad, A., Sabeq, II. 2025. Preservative Potential of Anethum graveolens Essential Oil on Fish Fillet Quality and Shelf Life During Refrigerated Storage. *Foods*, 14(9): 1591.
- Turan, H., Kaya, Y., Sönmez, G. 2006. Balık etinin besin değeri ve insan sağlığındaki yeri. *E.Ü. Su Ürünleri Dergisi*, 23 (1/3): 505-508.
- Volpe, MG., Siano, F., Paolucci, M., Sacco, A., Sorrentino, A., Malinconico, M., Varriecchio, E. 2015. Active edible coating effectiveness in shelf-life enhancement of trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets. *LWT-Food Science and Technology*, 60(1): 615-622.
- Wang, X., Zheng, Z. 2025. Mechanistic insights into fish spoilage and integrated preservation technologies. *Applied Sciences*, 15(14): 7639.
- Watts, E. 2024. Seafood handling, processing, and packaging. *Encyclopedia of Meat Sciences (Third Edition)*, 108-124.
- Yang, H., Wang, J., Yang, F., Chen, M., Zhou, D., Li, L. 2016. Active packaging films from ethylene vinyl alcohol copolymer and clove essential oil as shelf life extenders for grass carp slice. *Packaging Technology and Science*, 29(7): 383-396.
- Yavuz, NN. 2015. Kekik ve kakule esansiyel yağlarının antifungal etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yıldız, PO., Arslan, G. 2022. Su ürünleri muhafazasında geleneksel ve güncel ambalajlama teknikleri. In: Ersoy (Ed.), *Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Yeni Trendler*, (ss. 497-514). Duvar Yayınları.
- Yüzereroğulları, Ö. 2021. Defne (*Laurus nobilis* L.) ve karabaş otu (*Lavandula stoechas* L.) uçucu yağlarının rafine ayçiçek ve riviera zeytinyağlarının oksidatif stabilitelerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın.
- Zainal Arifin, MA., Mohd Adzahan, N., Zainal Abedin, NH., Lasik-Kurdyś, M. 2023. Utilization of food waste and by-products in the fabrication of active and intelligent packaging for seafood and meat products. *Foods*, 12(3): 456.
- Zheng, H., Tang, H., Yang, C., Chen, J., Wang, L., Dong, Q., Shi, W., Li, L., Liu, Y. 2022. Evaluation of the slow-release polylactic acid/polyhydroxyalkanoates active film containing oregano essential oil on the quality and flavor of chilled pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets. *Food Chemistry*, 385: 132693.
- Zubair, M., Shahzad, S., Hussain, A., Pradhan, RA., Arshad, M., Ullah, A. 2022) Current trends in the utilization of essential oils for polysaccharide-and protein-derived food packaging materials. *Polymers*, 14(6): 1146.

