

EDİTÖR PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

MÜHENDİSLİK

Alanında Uluslararası
Güncel Yaklaşımlar

Haziran 2026



TEKNOLOJİ VE
İNNOVASYON



SÜRDÜRÜLEBİLİR
YAPILAR



YENİLENEBİLİR
ENERJİ



ENDÜSTRİ 4.0
VE DİJİTALLEŞME



MÜHENDİSLİK
EĞİTİMİ



ULUSLARARASI
YAKLAŞIMLAR



TOPLUMA KATKI
VE ETİK



SERÜVEN
YAYINEVİ

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

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

Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2026

ISBN • 978-625-8810-54-7

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

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

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

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

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MÜHENDİSLİK ALANINDA ULUSLARARASI GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR **PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK**

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

MOBİL ORTAMDA ÇALIŞAN KONUMDAN BAĞIMSIZ KARAR ALGORİTMA TEMELLİ SU ANALİZ SİSTEM TASARIMI VE ÖRNEKLER ÜZERİNDE UYGULAMA	1
---	---

Sudenur Pehlivan

Muhammed Taha Topçu

Hüseyin Erdoğan

Ahmet Çelik

BÖLÜM 2

SÜRDÜRÜLEBİLİR GIDA SİSTEMLERİ İÇİN HASSAS FERMANTASYON UYGULAMALARI	21
---	----

Benan DİNÇ GİRGİN

BÖLÜM 3

TUNCELİ (DOĞU ANADOLU) BÖLGESİNİN JEOLojİK EVRİMİ, CEVHERLEŞME SİSTEMLERİ VE HİDROJEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ: TEKTONİK, MAGMATİK VE JEOTERMAL ETKİLEŞİMLERİN BÜTÜNLEŞİK DEĞERLENDİRİLMESİ	39
---	----

Güllü KIRAT

Özlem ERDEM

Bölüm 4

BOZCAADA'NIN JEOSİT ALANLARININ ÖN DEĞERLENDİRİLMESİ ..	53
---	----

Ozan İŞÇÖZÜCÜ

Mustafa AVCIOĞLU

Bölüm 5

GIDA GÜVENLİĞİ VE TAĞŞIŞ TESPİTİNDE MALDI-TOF MS VE MAKİNE
ÖĞRENMESİNİN ENTEGRASYONU..... 69

Nursel SÖYLEMEZ MİLLİ

Bölüm 6

YOLOV11S VE RASPBERRY PI TABANLI SINIF İÇİ ATIK TESPİT SİSTEMİ ... 87

Mehmet Umut Salur

Şeyma Çeçen



MOBİL ORTAMDA ÇALIŞAN KONUMDAN BAĞIMSIZ KARAR ALGORİTMA TEMELLİ SU ANALİZ SİSTEM TASARIMI VE ÖRNEKLER ÜZERİNDE UYGULAMA¹

Sudenur Pehlivan²

Muhammed Taha Topçu³

Hüseyin Erdoğan⁴

Ahmet Çelik⁵

1 Bilgi: Bu çalışma, Doç. Dr. Ahmet ÇELİK danışmanlığında yürütülen, Sudenur PEHLİVAN'ın "Yapay zeka destekli, içme suyu kalitesini asitik, bazik ve kirlilik oranlarını tespit eden mobil kullanıcı ara yüzü, çevrim içi veri ve konum bilgisi aktarımlı sistem tasarımı" adlı TÜBİTAK 2209/A proje sonuç raporu geliştirilerek, değiştirilerek ve düzenlenerek üretilmiştir.

2 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Kütahya, Türkiye, ORCID: 0009-0008-1842-9979

3 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Kütahya, Türkiye, ORCID: 0009-0003-6023-7448

4 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Kütahya, Türkiye, ORCID: 0009-0008-8978-8557

5 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Kütahya, Türkiye, ORCID: 0000-0002-6288-3182

Giriş

Su bütün dünyadaki canlıların en temel ihtiyacıdır bu yüzden su olmadan yaşam olmaz. İnsanlar ve birçok hayvan temiz su kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır ancak farklı su özelliklerine uyum sağlayan canlılarla da karşılaşmaktadır. Mevcut durumda, su kalitesi ve kirlilik oranlarının tespiti laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Bu durum zaman ve ekonomik kayıplara neden olabilmektedir. Bazı küçük ve sınırlı özellikli cihazlar yardımıyla da yerinde analizler yapılabilmektedir. Ancak bu cihazların özellikleri çok sınırlı ve veri kayıt ara yüzleri yoktur. Bu çalışmada kullanım kolaylığı olan mobil ara yüz, yapay zeka temelli karar verme algoritmaları kullanarak, test yapılan su örneğinin pH(oryantasyon) ve mineral (TDS:Total Dissolve Solids /Toplam Çözünmüş Katılar) oranlarının karar verme işlemini gerçekleştirilmiştir. Ayrıca anlık ölçülen analiz değerleri ve konum değerleri çevrim içi olarak kayıt merkezine gönderilmekte ve kayıt işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan sistemde yerinde, hızlı su analizinin gerçekleştirilmesi ve kayıt altına alınmasını sağlanmıştır.

Su tüm yaşamın temel öğelerinden birini oluşturmaktadır. Su, bir besin maddesi olmasıyla birlikte, içerisindeki mineral ve bileşiklerle canlı metabolizmasındaki her türlü biyokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesinde etkin rol teşkil etmektedir. Özellikle insan metabolizmasında pH dengesinin korunmasında, besinlerin ve artık maddelerin hedeflerine taşınmasında birçok görev almaktadır (Akın & Akın,2007).

Su, yaşamın devam etmesi için temel yapı taşıdır. Üretim ve canlı atıklarının artması sebebiyle su kirlilik oranları da artmakta temiz su yapısı giderek bozulmaktadır. Çevresel ve sanayi üretim faktörleri başta olmak üzere içilebilir su kalitesinin olumsuz etkilendiği bilinmektedir. Bundan dolayı, su kaynaklarının birçok parametre dikkate alınarak takip edilmesi, kontrol edilmesi ve buna bağlı olarak gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. (Karaköse & Işık, 2024).

Entegre Su Kaynakları Yönetimi (ESKY) sistemi, uluslararası anlaşmalara dayanarak dünyadaki birçok ülkede önemli girişimlerin başlamasını sağlamıştır. ESKY sistemi uluslararası kurumlar tarafından kabul görmektedir (Koç, 2024). Bu kapsamda, Türkiye'de Tarım ve Orman Bakanlığına bağlı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü birimi kurulmuştur. Bu birimde su yönetimi alanında, proje ve tanıtım çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2024)

Su yönetimi birimleri, mevcut su altyapısını korumak, su kıtlığıyla mücadele, su kalitesinin bozulmasını engelleme ve su kalitesini artırma görevlerini takibini ve kontrolünü yapmaktadır. Bundan dolayı, teknoloji destekli politikaların takip edilerek, yenilikçi çözümlerin desteklenmesi ve uygulaması, sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır (Koç,2024). Literatürde su kaynaklarında, barajlarda ve nehirlerde su kirliliğini ölçmek için birçok çalışma yapılmıştır.

Cebe & Gülçiçek Uysal (2024) yaptıkları çalışmada; Kesikköprü baraj gölü havzasındaki, kirlilik kaynaklarının belirlenmesi ve kirlilik miktarının tahminini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra elde ettikleri sonuçların, alansal dağılımlarını, ArcGIS 10.8 Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı üzerinde, sayısal harita bilgilerine dönüştürülmüştür.

Karaköse & Işık (2024) tarafından yapılan çalışmada; sabit bir bilgisayar sistemi kullanarak su kirlilik miktarının tespit edilmesi ve denetlenmesinde kullanılabilecek bir sistem geliştirilmiştir. Çalışmada, sudaki çözünmüş oksijen, sıcaklık ve basınç verilerini elde edilerek, su kalitesinin anlık analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan Arduino tabanlı sistemde suyun analizinin yapılmasını kullanan verileri sağlayan sensörler vardır. Bilgisayar sistem yazılımı kullanılarak, ilk aşamada sensörlerden alınıp veriler sistem arayüzüne aktarılmaktadır. Daha sonra yazılım sistemi tarafından sensörlerden alınan değerlerin normal sınır değer aralığında olup olmadığı kontrol edilmektedir.

Azgın & Göksu (2017), tarafından yapılan çalışmada; Adana il sınırları içerisinde bulunan Seyhan Baraj Gölü'nde, su seviyesinin

azaldığı yaz dönemlerdeki, su kalite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, su kalitesini belirlemek için, suyun ışık geçirgenliği, çözünmüş oksijen miktarı, pH, sıcaklık, tuzluluk, elektriksel iletkenlik değerleri, toplam çözünmüş katı madde oranını ölçülmüş ve analiz edilmiştir.

Gultekin vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada; Trabzon il sınırları içerisindeki akarsularının yağışlı dönemlerdeki su kalitesi incelenmiştir. Çalışmada, örnek ölçümleri yapılan akarsuların, pH değerlerinin 6,9-9,9 arasında, toplam çözünmüş madde miktarlarının (TDS) ise 21-319 mg/L arasında olduğunu tespit edilmiştir.

Bozan Kapdı & Aşık (2021), tarafından yapılan çalışmada; Uşak il sınırları içinde bulunan ve sulama amaçlı kullanılan Güllübağ baraj göletinin su kalitesini incelemişlerdir. Çalışmada, 3 aylık dönemlerde (Mart, Mayıs ve Temmuz) alınan su örnekleri analiz edilmiştir. Çalışmada, yüzeysel su kalitesi ve sulama suyu kalite parametrelerinin değerlendirmesi yapılmıştır. Ölçüm sonucunda TDS değerlerinin 782 ile 1038 mg/L arasında olduğu tespit edilmiştir.

Thurston et al. (1981), tarafından yapılan çalışmada, yumuşak su ortamında pH yükseldikçe NH_3 oranı arttığı ve balıkların hayatta kalma şansı azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle somon yetiştiriciliğinde pH kontrolü ve su sertliğinin düzenlenmesi hayati önem taşıdığı ortaya çıkarılmıştır.

Zhou et al. (2005), tarafından yapılan çalışmada Fosfor ve diğer besin elementlerinin sedimentlerden salınımında pH'nın rolünü incelemişlerdir. Çalışmada, pH artışının besin dengesizliklerine yol açabileceği ve su kalitesi sorunlarına yol açabileceği gösterilmiştir.

Zare Farjoudi & Alizadeh (2021), tarafından yapılan çalışmada, su ve atık sudaki TDS miktarının tarım sektörü üzerindeki etkisini tespit etmişlerdir. Çalışmada, TDS konsantrasyonunun, klorür, sülfat, sodyum, potasyum, nitrat, bikarbonat ve fosfat gibi anyon ve katyonlardan oluştuğu ortaya çıkarılmıştır. Böylece doğru su kalitesi

verilerinin elde edilmesi, su kaynaklı hastalıkların azaltılmasında ve tarımsal ürünlerin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynadığı gösterilmiştir

İnsan sağlığı açısından bir kişinin günlük su ihtiyacı 1,5-2 litre olarak kabul edilmektedir. Dünyanın farklı bölgelerinde yaşam şartlarına göre insanların su ihtiyaçlarını karşılamak için serbest akan kontrolsüz kaynak, kuyu, şebeke ve ambalajlı suları kullandıkları görülmektedir (Verap & Diloğlu, 2025).

Su örneklerinin hızlı olarak değerlendirilmesi, acil/olumsuz durumlarda, hızlı çözümlerin oluşturulmasını ve önlemlerin alınmasını sağlayacaktır. Günümüzdeki kullanılan yöntemler hala zaman alıcı çözümler sunmaktadır. Su kaynağından, su depolarından, barajlardan veya su kaynaklarını besleyen derelerden alınan su örneklerinin hızlı olarak ön değerlendirme yapılması, yetkili kurumlara bildirilmesi, insan ve hayvan sağlığı başta olmak üzere tüm canlılar için büyük önem taşımaktadır. Ani gelişen olumsuzluklar, ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Suyu kaynaklarını değişen iklim şartlarına bağlı olarak azalması, su kaynaklarını korunmasının çok önemli olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Küresel ısınma nedeniyle birlikte hızlı buharlaşma ve su kaynaklarındaki azalmaya bağlı olarak, temiz su kaynaklarının devamlı ve sürekli kontrol edilmesinin büyük önem taşımaktadır.

Yapılan literatür ve uygulama araştırmalarda, tasarlanan sistemin tüm yeteneklerini gerçekleştirebilen benzer bir cihazla karşılaşılmamıştır. Bu durum, çalışmada tasarlanan cihazın yenilikçi ve öncü olma özelliğini ortaya çıkarmaktadır. Çalışmada tasarlanan sistem ile Kütahya ili Tavşanlı ilçesi sınırları içindeki su kaynaklarından alınan su örneklerinin incelemesi yapılmıştır.

Bu çalışmada, yerleşim yeri sınırları içindeki içme suyu kaynaklarının (hayrat ve çeşmeler) pH ve TDS (Toplam Çözünmüş Katı Madde) değerleri ölçülmüştür. Ölçüm sahasından anlık olarak ölçen, taşınabilir bir cihaz geliştirilmiştir. Cihazın çalışma modelinde,

sensörlerden alınan veriler, bluetooth teknolojisi aracılığıyla bir mobil uygulamaya iletilmekte daha sonra karar destek algoritmalarıyla analiz edilerek ve sınıflandırma yapılmaktadır. Son aşamada ise çevrim içi iletişim yöntemi kullanılarak, veriler konum bilgisiyle (GPS konum) birlikte bulut tabanlı bir veri tabanına kayıt edilmektedir. Tavşanlı ilçe sınırları içinde yapılan saha çalışmalarıyla sistemin doğruluğu ve hızı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, cihazın geliştirilerek kamu ve özel kuruluşların su yöntem birimleri tarafından kullanıldığında faydalı sonuçlar oluşturabileceğini göstermiştir. Tasarlanan cihaz mevcut sistemlerden farklı olarak teknolojik gelişmiş ek yeteneklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde cihaz, gelecek çalışmalar için gelişmiş bir modelin ortaya konulan ilk adımı olacaktır.

Materyal ve Metot

Tasarlanan Cihazın Çalışma Sistemi

Bu çalışmada tasarlanan cihazın çalışması ve görevini tamamlaması 9 adımda gerçekleşmektedir. İlk aşamada enerji bağlantısı yapılmaktadır. Son aşamada ise elde edilen verilerin görselleştirilmesi ve raporlanması aşamasına kadar devam etmektedir. Cihazın çalışma adımları ve her adımları gerçekleştirilen görevler tablo 1 üzerinde gösterilmektedir.

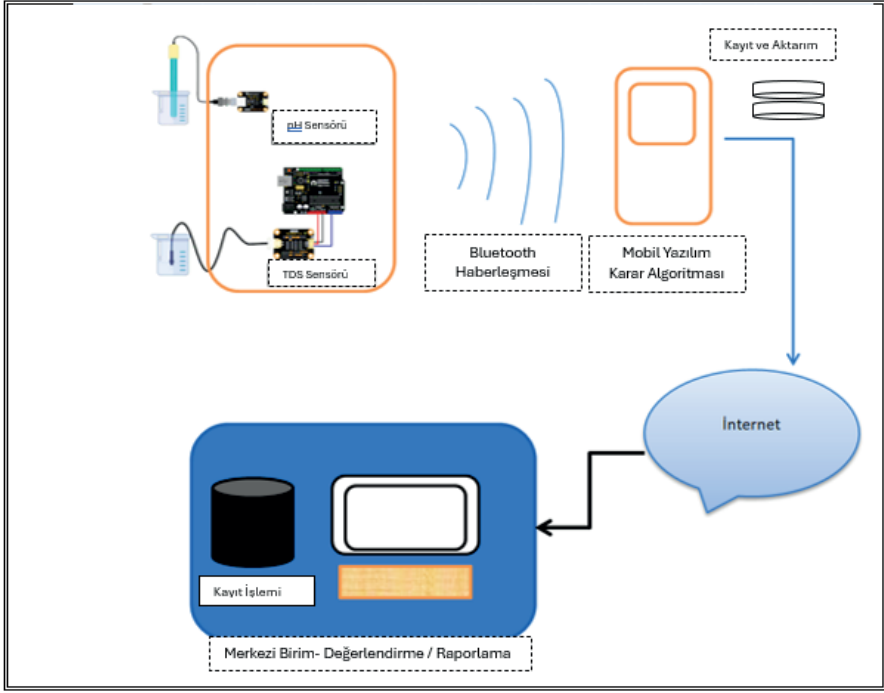
Tablo 1. Tasarlanan cihazın çalışma adımları ve görevleri

Adımlar	Görevler
1. Adım:	Cihazın enerji bağlantısı yapılmaktadır.
2. Adım:	Cihazın sensörleri tanınması, Bluetooth bağlantısı senkronizasyonu gerçekleştirilmektedir.
3. Adım:	Cihazın sensörlerinden veri girişi yapılmaktadır.
4. Adım:	Cihazın sensörlerinden alınan analog pH ve TDS verilerinin, sayısal biçime dönüştürülmektedir.

5. Adım:	Sensörlerden gelen verilerin Mobil yazılım arayüzüne aktarılması yapılmaktadır.
6. Adım:	Mobil arayüz karar verme algoritmasıyla sınıflandırılması yapılarak, konum bilgisi GPS üzerinden tespit edilmektedir. Bu bilgilere ek zaman bilgisi de eklenmektedir.
7. Adım:	Mobil yazılım tarafından, su kalitesi sınıflandırma bilgileri, GPS konum ve tarih zaman bilgileri okunabilir biçime dönüştürülmektedir.
8. Adım:	Eğer internet bağlantısı kontrol edilerek, eğer bağlantı yoksa yerel diske veriler kayıt edilmektedir. Bağlantı olduğu tespit edildiği anda, bulut veri tabanını kayıt edilmektedir.
9. Adım:	Merkezi birim bilgisayar sisteminde verilerin görselleştirilmesi ve raporlanması sağlanmaktadır.

Tablo elde gösterilen işlem adımlarının sadeleştirilmiş akış şeması şekil 1 üzerinde gösterilmektedir. Akış şemasında ilk aşamadan, Arduino kart yapısına bağlanacak sensörler yardımıyla suya ait istenen veriler toplanacaktır. Literatürde, Arduino sensörlerin kullanılarak su değerlerinin elde edildiği çalışmalar mevcuttur (Karaköse & Işık, 2024).

Bu çalışmanın ilk aşamasında sensör yardımıyla alınan veriler karar ağacı algoritması kullanılarak mobil arayüz programı yardımıyla analiz edilmiştir. Kayıt altına alınmış veriler ve GPS destekli konum bilgileriyle birlikte çevrim içi iletişim sağlandığı anda hızlı bir şekilde veri merkezine aktarım sağlayacaktır. Analiz işlemlerinde acil durum gerektiren sonuçların aktarımda merkezi birimlerine aktarım yaptığında, uyarı sistemi devreye girebilecektir. Bu şekilde gerekli durumlarda hızlı biçimde önlem alınması sağlanacaktır.



Şekil 1.Sistemin veri işleme ve kayıt algoritması.

pH su kalitesini kontrol etmek için önemli parametrelerden biridir. Su arıtma tesislerinde su arıtma, pH ölçümü ve anlaşılması su arıtma sürecinde gereklidir (Sinsinwar et al., 2023). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), içme suyu kalitesi için pH(Oryantasyon) aralığının 6.5 ile 9 arasında olmasını önerilmektedir (Kanbara et al., 2012). Literatürde, su içerisindeki pH değeri 5 ile 6,7 arasında ise “Asidik”, 6,7 ile 7,3 arasında ise “Nötr”, pH değeri 7,3 ile 7,8 arasında ise “Tatlı Su” ve 7,8 ile 10 arasında ise “Alkali (Bazik)” olarak sınıflandırılmaktadır. Bu pH değerleri ve sınıfları tablo 2 üzerinde verilmiştir (Verap & Diloğlu , 2025; Fine Waters Society, 2026).

Tablo 2. pH seviyeleri ve sınıflandırmaları

pH Seviyesi	Sınıflar
5-6,7	Asidik
6,7-7,3	Nötr
7,3-7,8	Tatlı Su (Asitsiz Hafif Alkali Su)
7,8-10	Alkali (Bazik)

TDS (Total Dissolve Solids: Toplam Çözünmüş Katılar), su kaynağı içindeki çözünmüş katı maddelerin toplam değerini göstermektedir. Bir litre su içerisindeki toplam çözünmüş katı maddenin miligram ölçü birimi cinsinden ifade edilmektedir. Birimi miligram/litre (mg/L) olarak gösterilmektedir. TDS değeri aynı zamanda suyun kalite değerini göstermektedir. TDS değerinin yüksek seviyede olması durumunda, suyun tadını ve sağlık üzerindeki etkisini olumsuz olarak etkilenmektedir. Bundan dolayı TDS değerinin dolayı yüksek olması istenmemektedir.

Literatürde, su içerisindeki TDS değeri, 0-50 mg/L aralığında ise “Çok Düşük”, 50-250 mg/L aralığında ise “Düşük”, 250-800 aralığında ise “Orta”, 800-1500 mg/L aralığında ise “Yüksek” ve 1500 mg/L değerinden büyükse “Çok Yüksek” olarak sınıflandırılmaktadır. Bu TDS değerleri ve sınıflar tablo 3 gösterilmiştir (Verap & Diloğlu , 2025; Fine Waters Society, 2026).

Tablo 3. TDS seviyeleri ve sınıflandırmaları

Mineral (TDS Seviyesi) mg/L	Sınıflar
0-50	Çok Düşük
50-250	Düşük
250-800	Orta
800-1500	Yüksek
>1500	Çok Yüksek

Elektronik Tasarım

Bu çalışmada; elektronik tasarım için düşük güç tüketimi ve yüksek işlem kapasitesi hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Sistemin elektronik parça yapılarının açık görüntüsü, şekil 2 üzerinde gösterilmiştir. Şekilde sensörler, devre kartı, güç kaynağı(pil) ve kablo bağlantıları net şekilde görülmektedir.

Cihazın elektronik donanım yapısı 3 bölümden oluşmaktadır.

• Kontrol Ünitesi:

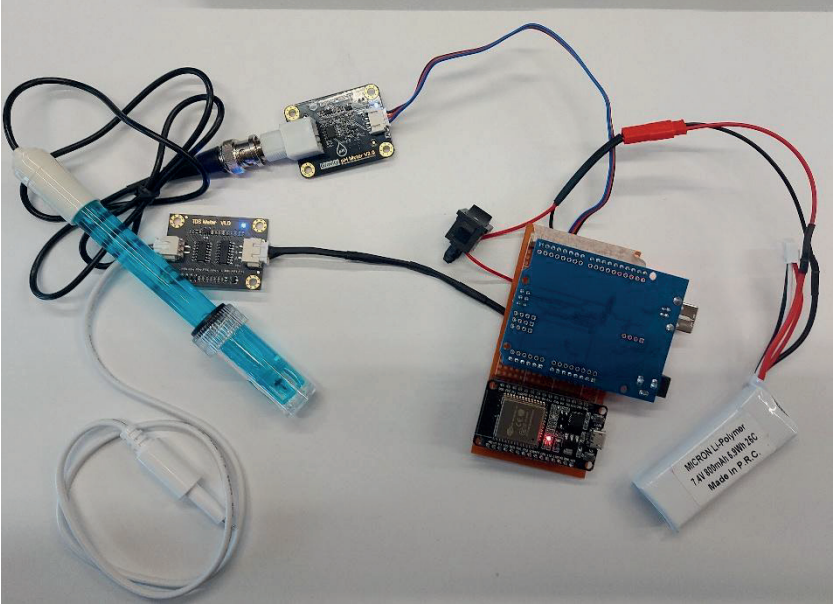
Ölçüm yapan sensör verilerinin işlendiği Arduino kart ve kablosuz aktarımı sağlayan ESP32 modülüdür.

• Sensörler:

Su kaynağının pH değerini ve mineral yoğunluğunu ölçen TDS sensörlerinden oluşmaktadır.

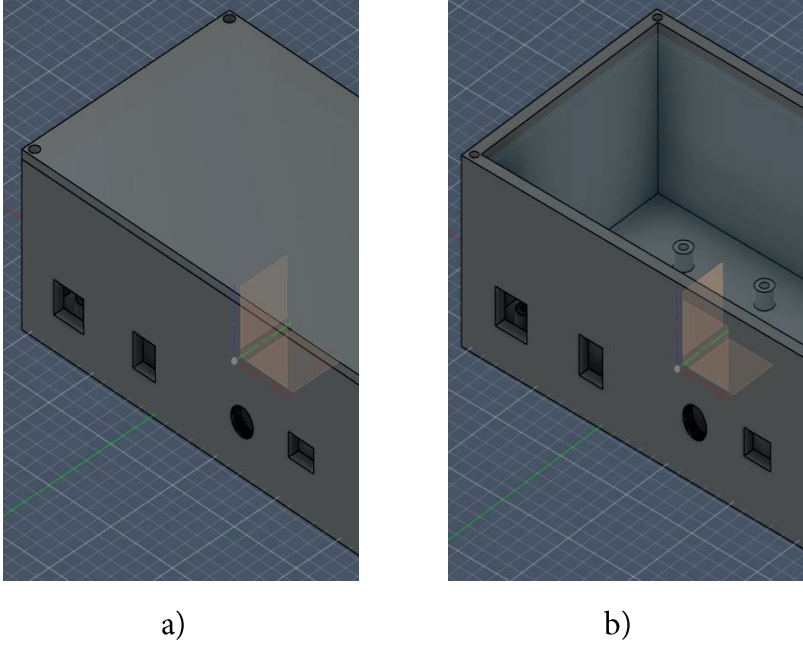
• Güç Kaynağı:

Cihazın konumdan bağımsız ölçüm noktalarında enerji ihtiyacını karşılayan Li-Po batarya parçasıdır.



Şekil 2. Sistemin elektronik donanımı ve sensör bağlantıları

Bu elektronik donanımların ve çıkış portlarının(yollarının) bulunduğu bir kasa montajı yapmak için önce üç boyutlu modeli çizilmiştir (Şekil 3). Bu çizim, model üzerinde elektronik parçaların boyutları dikkate alınarak elde edilmiştir.



Şekil 3: Sistemin elektronik 3 boyutlu kasası modeli çizimi

Çalışmada tasarlanan çalışan durumdaki cihazın kasası yapısı şekil 4 üzerinde gösterilmiştir. Cihaz tasarımında 3 boyutlu model temel alınmıştır. Kasanın içinde bulunan elektronik donanıma erişim kolayca gerçekleştirilecek durumdadır. Cihazın güç ve sensör veri giriş bağlantı yollarının kasa üzerinde görülmektedir. Ayrıca kasa taşınabilir boyutta ve ağırlıktadır, bu durum su ölçüm görevlileri için kullanım kolaylığı sağlayacaktır.



Şekil 4: Sistemin elektronik son tasarım kasası ve çıkış bağlantı yolları

Yazılım Tasarımı

Çalışmada donanım yapısını kontrol etmek için olarak geliştirilen mobil uygulama arayüzü şekil 5 de gösterilmektedir. Mobil arayüz kullanarak aşağıdaki görevler gerçekleştirilmektedir.

- Cihazın sensörlerinden gelen veriler anlık metin/grafik olarak izlenmektedir.
- Cihazın, ölçüm yapılan su kaynağı konumun GPS koordinatları, ölçüm verisiyle eşleştirme yapılmaktadır.
- Son aşamada ise düzenlenmiş ve sınıflandırması yapılmış kayıtların yerel depolama birimine kayıt edilmesidir.

Daha sonra internet bağlantı durumuna göre Firebase/Firestore bulut veri tabanına kayıt işlemi gerçekleştirilmektedir.



a)



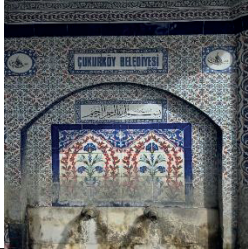
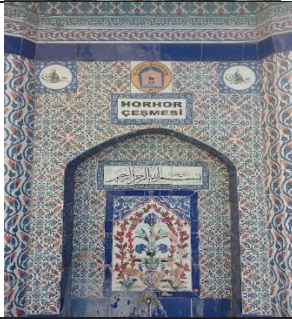
b)

Şekil 5. Cihazın mobil arayüzü a-) Mobil uygulama kullanıcı arayüzü paneli, b) Uygulama içerisinde oluşturulan analiz raporları

Deneyisel Uygulamalar

Yapılan çalışmada, su analizlerini gerçekleştirmek için Kütahya ili Tavşanlı ilçesi sınırları içerisindeki hayrat ve çeşmelerinden alınan örnekler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ölçümlerde, tasarlanan donanımının ve yazılım arayüz sisteminin, kararlı çalıştığı ve doğru ölçümler yaptığı tespit edilmiştir (Tablo 4). Çalışmada geliştirilen cihaz ile su kalitesi denetiminin düşük maliyetle ve sabit konumdan bağımsız yapılabileceği gösterilmiştir. Cihazın kolay kullanım yapısı sayesinde, ilgili kurumlara fayda sağlayacağı öngörülmektedir. Ayrıca cihaz üzerinde ek sensör donanımları de kullanılarak veri örneklerinin arttırılabileceği düşünülmektedir.

Tablo 4. Su ölçüm merkezleri ve elde edilen veriler

Ölçüm Noktası	Kaynak / Saha Görseli	Firestore Rapor Çıktısı
Çukurköy Belediye Çeşmesi		<pre>u14qFIPqRmjeifb5qnHJ + Start collection + Add field analysis: "✅ Kalite Uygun" date: "03.01.2026 14:41" location: "16 Kalemli Cd. Tavşanlı, Kütahya" ph: "7.74" tds: "208.30"</pre>
H. İsmail Efe Hayratı		<pre>NjJDsMyqwaAWy6fdtD4x + Start collection + Add field analysis: "✅ Kalite Uygun" date: "02.01.2026 15:47" location: "11 Uzun Çarşı Cd. Tavşanlı, Kütahya" ph: "7.49" tds: "140.30"</pre>
Horhor Çeşmesi		<pre>byFV3ZJmSb5eop3iJ1M7 + Start collection + Add field analysis: "✅ Kalite Uygun" date: "03.01.2026 15:17" location: "5 Güzelyurt Cd. Tavşanlı, Kütahya" ph: "7.33" tds: "206.66"</pre>
Yiğitler Çeşmesi		<pre>nHs4YB21T5ZORnfkekOz + Start collection + Add field analysis: "✅ Kalite Uygun" date: "03.01.2026 14:07" location: "43 Yaylacık Cd. Tavşanlı, Kütahya" ph: "7.27" tds: "239.46"</pre>

Meydan
Hayratı



AMSuJXpr9UlpHnjYWhAK
+ Start collection
+ Add field
analysis: "Kalite Uygun"
date: "02.01.2026 14:15"
location: "İlimyolu Sk, 43300 Tavşanlı/Kütahya"
ph: "7.78"
tds: "211.97"

Adalar
Hayratı



1RN2h53UB36OmCBq8BtY
+ Start collection
+ Add field
analysis: "Kalite Uygun"
date: "02.01.2026 13:56"
location: "Ada, 43300 Tavşanlı/Kütahya"
ph: "7.26"
tds: "140.48"

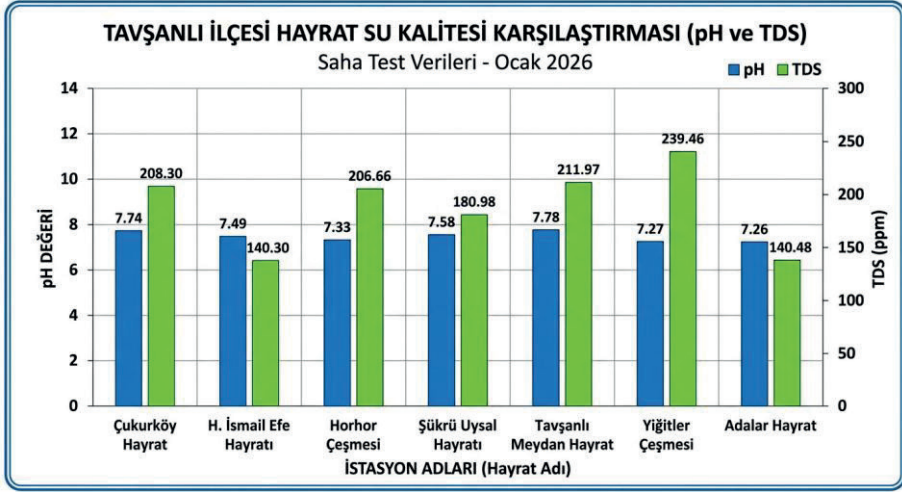
Şükrü
Uysal
Hayratı



OTRZGoE4UQJagniJoTy
+ Start collection
+ Add field
analysis: "Kalite Uygun"
date: "03.01.2026 14:25"
location: "6 Uzun Çarşı Cd. Tavşanlı, Kütahya"
ph: "7.58"
tds: "180.98"

Çalışmada, tüm su kaynaklarından alınan değerler pH 7,27- 7,78 aralığında elde edilmiştir., “Nötr” ve “Tatlı Su” sınıflandırmasında

olduğu görülmüştür. Ayrıca TDS 140,48-239,46 mg/L(ppm) değer aralığında olup, “Düşük” seviyede TDS sınıflandırmasında olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre elde edilmiş grafik Şekil 6 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 6. Saha ölçümlerinin kalite standartlarına göre dağılım grafiği (mg/L=ppm: ppb :parts per billion)

Sonuç

İçilebilir sağlıklı su kaynaklarını tespit etmek için belirlenmiş değerlendirme kriterleri kullanılmaktadır. Bu kriterlerden iki tanesi bu çalışmada kullanılmıştır. Bunlardan birisi pH diğeri ise TDS değeridir. Bu değerlerin belirlenen sınırlar içerisinde olması sağlık açısından çok önemlidir. Bu çalışmada geliştirilen model, su kaynaklarından elde edecek örnekleri hızlı biçimde analiz ederek, anında bağlantı durumuna (eş zamanlı/eş zamansız) göre ve konum bilgisini de ekleyerek merkezi birimlere sayısal (digital) olarak aktarılmasını sağlamaktadır. Çalışmada konumdan bağımsız, yapay öğrenme temelli karar ağaç algoritma temelli mobil arayüz yazılımlı bir cihaz tasarlanmıştır. Cihaz yardımıyla Tavşanlı ilçe sınırları içerisindeki 7 kaynaktan alınan veriler analiz edilerek, GPS konum bilgileriyle birlikte dahili bellek birimine kayıt edilmiştir. Daha sonra tekrar analiz ve

raporlama yapabilmek için online iletişim yolu kullanılarak, bulut veri tabanı aktarılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda, su kaynaklarının iki ölçüm kriterlerine göre, "içilebilir su, tatlı su özelliklerinin" olduğu görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen bilgi birikimi ve sonuçlar ilerideki çalışmalara temel oluşturabilecektir. Ayrıca gelecekte, tasarlanan cihazın geliştirilmesi ve gelişmiş başka değerlendirme sensörlerinin eklenmesi planlanmaktadır.

Kaynakça

- [1] Akın, M., & Akın, G. (2007) Suyun Önemi, Türkiye’de Su Potansiyeli, Su Havzaları ve Su Kirliliği. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 47(2), 105-118.
- [2] Karaköse, E., & Işık, M. A. (2024). Bölgesel Su Kalitesi Araştırmaları için Arduino Tabanlı Bir Su Analizi Sistemi Prototipinin Tasarımı. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 179-191. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1343618>
- [3] Koç, C. (2024). Su Kaynakları Yönetiminin Geleceği, Su Güvenliği ve Ortaya Çıkan Sorunlar. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(1), 211-223. <https://doi.org/10.21324/dacd.1359958>
- [4] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2026). Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM>
- [5] Cebe, K., & Gülçiçek Uysal, O. (2024). Kesikköprü baraj gölü havzası yayılı kirlilik kaynaklarının ve kirlilik yüklerinin tahmini. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 253-261. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1355285>
- [6] Azgın, C., & Göksu, M. Z. L. (2017). Seyhan Baraj Gölü Su Kalite Ölçüm Değerleri (Yaz Dönemi). *Ecological Life Sciences*, 12(4), 45-49.
- [7] Gultekin, F., Ersoy, A.F., Hatipoglu, E., Celep, S. (2012) Determination of Water Quality Parameters in Wet Season of Surface Water in Trabzon. *Ekoloji* 21 (82): 77-88
- [8] Bozan Kapdı, E., & Aşık, B. B. (2021). Sulama Göleti Suyunun Yüzeysel Su Kalitesi ve Sulama Suyu Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi; Usak İli Güllübağ Göleti Örneği. *Uluslararası Biyosistem Mühendisliği Dergisi*, 2(1), 52-69. <https://izlik.org/IA35GR34XM>
- [9] Thurston, R. V., Russo, R. C., & Vinogradov, G. A. (1981). The influence of pH on the toxicity of ammonia to juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in soft water. *Aquatic Toxicology*, 1(2), 93–107. [https://doi.org/10.1016/0166-445X\(81\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0166-445X(81)90010-0)
- [10] Zhou, A., Tang, H., & Wang, D. (2005). Influence of pH on nutrient release from sediments in a eutrophic reservoir. *Environment International*, 31(6), 841–847. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.05.042>

- [11] Zare Farjoudi, S., Alizadeh, Z. A comparative study of total dissolved solids in water estimation models using Gaussian process regression with different kernel functions. *Environ Earth Sci* 80, 557 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09798-x>
- [12] Verep, B., Diloğlu, O. (2025). Karadeniz Bölgesinde Kaynak Sularından Üretilen Ambalajlı İçme Sularının Su Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(3), 925-933. Doi: 10.53501/rteufemud.1828197
- [13] Sinsinwar, R. S., & Verma, M. (2023). Analysis of pH value of water for treatment plant of Kekri and Surajpura (Rajasthan) India. *Evergreen: Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 10(1), 324–328.
- [14] Kanbara, A., Miura, Y., Hyogo, H., Chayama, K., & Seyama, I. (2012). Effect of urine pH changed by dietary intervention on uric acid clearance mechanism of pH-dependent excretion of urinary uric acid. *Nutr J* 11, 39 (2012). <https://doi.org/10.1186/1475-2891-11-39>
- [15] Fine Waters Society. (2026). FineWaters Balance. Erişim adresi: http://www.finewaters.com/Bottled_Water_Etiquette/Flavor_of_Water/FineWaters_Balance



SÜRDÜRÜLEBİLİR GIDA SİSTEMLERİ İÇİN HASSAS FERMANTASYON UYGULAMALARI

Benan DİNÇ GİRGİN¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Pazarlar Meslek Yüksekokulu,
Kütahya, Türkiye. benan.dincgirgin@dpu.edu.tr; ORCID ID 0000-0001-6682-6567

1. GİRİŞ

Fermantasyon, ekmek, bira, yoğurt ve peynir gibi ürünlerde görüldüğü üzere, yüzyıllardır gıdaları korumak ve duyusal, besleyici, tıbbi ve ticari özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır. 1970'lerden bu yana, genetik mühendisliğindeki ilerlemeler ve sentetik biyolojideki son gelişmeler, fermantasyonu büyük ölçüde deneysel bir uygulamadan son derece kontrollü ve hassas bir teknolojik platforma dönüştürmüştür. Bu geçiş, gıda ve sağlık sektörlerinde geniş uygulamalara sahip spesifik proteinler, enzimler, polisakkaritler ve diğer fonksiyonel bileşenler de dahil olmak üzere yüksek değerli bileşiklerin hedeflenmiş biyosentezini mümkün kılmıştır (Obayomi et al., 2026).

Giderek artan nüfusu desteklemek ve gıda ve beslenme güvenliğini sağlamak için, dünyanın doğal kaynaklarını daha az tüketen, daha sürdürülebilir gıda üretim yöntemlerine ve gıda işleme süreçlerine ihtiyaç vardır (Béné et al., 2019; FAO, 2021; Knorr & Augustin, 2023). Küresel nüfusun 2100 yılına kadar on milyara ulaşma potansiyeliyle, endüstrinin mevcut seviyelere kıyasla küresel gıda talebinde %50-80'lik bir artışla karşı karşıya kalması beklenmektedir (Depenbusch & Klasen, 2019). Hassas fermantasyon, gıda endüstrisinin dördüncü sanayi devriminde ortaya çıkan bir gıda trendi olarak tanımlanmıştır (Hassoun et al., 2024). Hassas fermantasyon, mikroorganizmalardaki metabolik yolları yeniden düzenlemek için hassas genetik müdahaleler kullanarak bol ve ucuz substratlardan gıda bileşenleri üretmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel gıda fermantasyon mikroorganizmaları konakçı olarak kullanıldığında, hassas fermantasyon daha arzu edilen özelliklere sahip fermente gıdalar da üretebilmektedir (Hilgendorf, Wang, Miller, & Jin, 2024).

Beslenme açısından bakıldığında, hassas fermantasyon halk sağlığını iyileştirme konusunda önemli bir potansiyel taşımaktadır (Siddiqui et al., 2023). Alerjen içermeyen, kirletici madde içermeyen, yüksek oranda sindirilebilir ve besin açısından hedeflenmiş bileşenlerin kontrollü üretimini sağlayarak, hassas fermantasyon, belirli diyet ihtiyaçlarına, sağlık koşullarına veya demografik gruplara göre uyarlanmış gıdaların geliştirilmesini destekleyebilecektir (Charles, Dadmohammadi, & Abbaspourrad, 2022; Knychala, Boing, Ienczak, Trichez, & Stambuk, 2024). Fermantasyon yoluyla temel mikro besin maddelerinin, bitki bazlı proteinlerin ve fonksiyonel biyoaktiflerin üretimi, düşük kaynaklı bölgelerde yetersiz beslenmeyle mücadelede de merkezi bir rol oynayabilecektir (Tan, Ong, Yong, Fattori, & Mukherjee, 2024). Hassas fermantasyon, tutarlı kalite ve verim sağlayan ve tat, doku ve besin profili değişkenliğini azaltan son derece kontrollü koşullar altında gerçekleştirilir. Bu durum, özellikle tutarlı ürün kalitesinin tüketici güveni ve düzenleyici standartlar için hayati önem taşıdığı büyük ölçekli gıda üretiminde çok önemlidir (Siddique, Tayyaba, Imran, & Rahman, 2022; Terefe, 2022; Yap, Philip, Graveling, Abraham, & Downs, 2024).

Gıda sistemlerinin dönüşümü için cazip bir seçenek olarak, temel gıda bileşenlerinin (proteinler, lipitler ve karbonhidratlar) üretiminde hassas fermantasyonun kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bu eğilim, gıdaların daha sürdürülebilir bir şekilde üretilmesine yönelik küresel ihtiyaçlardan kaynaklanmaktadır (Augustin, Hartley, Maloney, & Tyndall, 2024). Sürdürülebilir şekilde üretilen hassas fermantasyondan elde edilen bileşenlerin üretimi ve pazara sunulması, çok paydaşlı katılımı içeren disiplinler arası bir yaklaşım gerektirmektedir. Fermantasyondan elde edilen bileşenlerdeki başarılı inovasyon, dünyayı daha sürdürülebilir bir şekilde beslemeye yardımcı olacaktır (Augustin et al., 2024).

2. HASSAS FERMANTASYONDA KULLANILAN MİKROORGANİZMALAR

Mikrobiyal suşlar, fermantasyon teknolojilerinin temel taşıdır ve gıda, yakıt, ilaç ve endüstriyel kimyasallar da dahil olmak üzere çeşitli bileşiklerin üretimini yönlendirir. Bakteriler, mayalar, ipliksi mantarlar, algler ve siyanobakteriler, fermantasyon teknolojilerinde kullanılan başlıca mikroorganizmalardır (Verma, Duhan, Pal, Verma, & Bansal, 2025).

2.1. Gıda Proteinleri Üretiminde Kullanılan Mikroorganizmalar

Hassas fermantasyon yoluyla proteinli gıda bileşenlerinin üretiminde bakteriler, mayalar ve filamentli mantarlar başlıca mikrobiyal üretim platformları olarak öne çıkmaktadır. Bakteriler; hızlı büyüme özellikleri, ölçeklenebilir üretime uygunlukları, genetik manipülasyona elverişli olmaları ve gelişmiş mühendislik araçlarının varlığı nedeniyle hassas fermantasyon uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Eastham & Leman, 2024).

Özellikle *Escherichia coli*, rekombinant kolajen ve kimozen-B gibi proteinlerin üretiminde kullanılmıştır. Bununla birlikte, gram-negatif bir bakteri olması nedeniyle endotoksin varlığı, gıda sınıfı üretim açısından önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır (Tagliavia & Nicosia, 2019; Eastham & Leman, 2024). Bu nedenle *Bacillus subtilis*, *Corynebacterium glutamicum* ve *Lactococcus lactis* gibi gram-pozitif bakteriler; endotoksin içermemeleri, protein salgılama yollarına sahip olmaları ve düşük endojen ekstraselüler protein düzeyleri nedeniyle daha avantajlı üretim platformları olarak değerlendirilmektedir (Tagliavia & Nicosia, 2019).

Mayalar ise özellikle daha karmaşık protein hedeflerinin üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır. Ölçeklenebilirlikleri, hızlı büyüme özellikleri, yüksek protein katlama doğrulukları ve hayvansal hücrelere daha yakın translasyon sonrası modifikasyon profilleri, mayaları hassas fermantasyon için uygun konaklar hâline getirmektedir (Zha, Liu, Ren, Liu, & Wu, 2023). *Kluyveromyces lactis* (Diaz-Bustamante, Keppler, Reyes, & Alvarez Solano, 2023; Dupuis, Cheung, Newman, Dee, & Yada, 2023) ve *Kluyveromyces marxianus*

türleri de yüksek protein salgılama kapasiteleri nedeniyle kimozi-B ve inülinaz gibi ticari enzimlerin üretiminde kullanılabilecek umut verici biyolojik platformlar olarak değerlendirilmektedir (Bilal et al., 2022; Dupuis et al., 2023).

Filamentli mantarlar da hassas fermentasyon temelli protein üretiminde önemli bir diğer mikroorganizma grubunu oluşturmaktadır. Özellikle *Aspergillus* türleri ve *Trichoderma reesei*, endüstriyel ölçekte amilaz ve selüloz gibi enzimlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Aro et al., 2023).

2.2. Gıda Lipitleri Üretiminde Kullanılan Mikroorganizmalar

Çok sayıda maya türünün kuru hücre ağırlığının %25'inden fazlasını lipid olarak biriktirebildiği bildirilmiştir. Yağ üretme kapasitesine sahip tür ve suşları içeren başlıca cinsler arasında *Yarrowia*, *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Cryptococcus*, *Lipomyces*, *Candida* ve *Trichosporon* yer almaktadır (Athenaki et al., 2018; Chattopadhyay & Maiti, 2021). Yağ üreten mayalar nispeten hızlı büyüme oranlarına sahiptir ve mono- ve polisakkaritlerin yanı sıra organik asitler gibi çok çeşitli karbon substratlarını kullanırlar; bu da onları büyük ölçekli üretim için popüler bir aday haline getirmektedir (Chattopadhyay & Maiti, 2021).

Bazı bakteri cinslerinin yüksek miktarda mikrobiyal yağ biriktirebildiği bulunmuştur. Önemli cinsler arasında *Rhodococcus*, *Mycobacterium*, *Streptomyces*, *Nocardia* ve *Acinetobacter* yer almaktadır (Koreti, Kosre, Jadhav, & Chandrawanshi, 2022).

Mortariella isabellina (Gardeli et al., 2017), *Cunninghamella echinulata* (Li, Yu, Liu, Zhang, & Ma, 2019), *Mucor moeller* (Carota, Crognale, D'Annibale, & Petruccioli, 2018), *Aspergillus tubingensis* (Carota et al., 2018) başlıca yağ üretebilen mantarlardır.

Mikroalgler çok yönlü organizmalardır ve lipid içerikleri %1-70 arasında değişebilir, ancak yaygın aralık %20-50'dir. Yüksek miktarda lipid biriktirebilen umut vadeden ve yaygın olarak incelenen türler arasında *Botryococcus*, *Chlorella*, *Scenedesmus* ve *Monoraphidium* yer almaktadır. Büyük depolama kapasitelerine rağmen, bakteri ve maya hücrelerinden daha büyük yüzeylere ve daha uzun büyüme süresine ihtiyaç duymaktadırlar (Caporusso, Capece, & De Bari, 2021).

2.3. Fonksiyonel ve Biyoaktif Bileşen Üretiminde Kullanılan Mikroorganizmalar

Heamatococcus pluvialis ve *Chlorella zofingiensis* alg türleri, astaksantin ticari üretimi için ideal türler olarak kabul edilmektedir (Patel et al., 2022). GRAS statüsüne sahip *Chlamydomonas reinhardtii* mikroalg türü, karotenoid pigmentleri ve yağ asitleri üretmek için kullanılabilmektedir. Son araştırmalar, gen düzenlenmiş bir suşun, kültür ortamı ve sürecin optimizasyonu ile birlikte

kullanılmasının, pigment ve yağın birlikte üretilmesini sağladığını göstermektedir (Song et al., 2022).

Bakteriler (*E. coli*, *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus spp.*), iyi tanımlanmış genomları, hızlı büyüme oranları ve genetik manipülasyon kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir. İnsülin ve aroma bileşikler gibi ürünlerin üretiminde kullanılmaktadırlar (Siddiqui et al., 2023; Mirzapour-Kouhdasht, Garcia-Vaqueiro, & Huang, 2024; Ayar-Sümer, Verheust, Özçelik, & Raes, 2024).

Filamentli Mantarlar (*Aspergillus spp.*, *Trichoderma reesei*), yüksek salgılama kapasiteleriyle bilinirler ve enzimler ve organik asitler üretmek için kullanılmaktadırlar (Siddiqui et al., 2023; Mirzapour-Kouhdasht et al., 2024; Ayar-Sümer et al., 2024).

3. HASSAS FERMANTASYON SÜRECİ

Hassas fermantasyon süreci, üretimi hedeflenen molekülün belirlenmesi ve bu molekülün üretimine uygun genetik olarak tasarlanabilir bir mikrobiyal konak organizmanın seçilmesiyle başlamaktadır (Siddiqui et al., 2023; Ayar-Sümer et al., 2024). Ardından, hedef ürünün sentezinden sorumlu gen dizisi CRISPR-Cas9, moleküler klonlama veya benzeri genetik mühendisliği teknikleri kullanılarak konakçının DNA'sına yerleştirilmektedir. Gen, yüksek ve verimli üretim sağlamak için optimize edilmektedir (Adeyeye, Babu, Subudhi, & Adeyeye, 2026).

Genetiği değiştirilmiş mikroorganizmalar, büyük, steril biyoreaktörlerde yetiştirilip, yüksek düzeyde kontrol edilen koşullar altında (sıcaklık, pH, oksijen seviyeleri ve karıştırma) ucuz, besin açısından zengin bir hammadde (şeker gibi) ile beslenmektedir. Bu ortam, mikroorganizmaların hızla çoğalmasına ve hammaddenin istenen ürüne dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Yeterli miktarda ürün oluşturulduktan sonra, hedef bileşik mikrobiyal biyokütleden ve kültür ortamından ayrılmaktadır (Siddiqui et al., 2023; Ayar-Sümer et al., 2024). Bu, yüksek saflık elde etmek için filtrasyon, santrifüj ve kromatografi gibi teknikleri içermektedir (Adeyeye et al., 2026). Saflaştırılmış bileşen daha sonra konsantre edilip formüle edilmekte ve nihai ürünlerde kullanılmadan önce belirli kalite, güvenlik ve besin standartlarını karşılayacak şekilde test edilmektedir (Siddiqui et al., 2023; Ayar-Sümer et al., 2024; Mirzapour-Kouhdasht et al., 2024).

4. GIDA ENDÜSTRİSİNDEKİ GÜNCEL UYGULAMALAR

Hassas fermantasyonda, sentetik biyoloji yöntemleri kullanılarak, gıda ve ilaç endüstrileri için bileşenler üretmek üzere hücre fabrikaları olarak kullanılan mikroorganizmalar programlanmaktadır (Pham, 2018). Doğal mikrobiyal biyoçeşitlilik içinde, yeni ve güvenli fermente gıdalar için verimli mikrobiyal hücre fabrikaları sağlamak üzere muazzam bir kullanılmamış potansiyel vardır ve “omik” araçlardaki ve sentetik biyolojideki son gelişmeler bunu orta-

ya çıkarmaktadır. Bu araçları kullanarak, istenen özelliklere tam olarak uyan ürünler geliştirilebilmekte ve fermantasyon sürecinin rastgele olmaktan ziyade hassas ve kontrollü olması sağlanabilmektedir (Teng et al., 2021).

Hassas fermantasyon, geleneksel tarımdan elde edilen benzerlerinin bi-leşimini taklit eden moleküller üretme yeteneği sayesinde, hedef proteinlerin, lipidlerin ve karbonhidratların üretimine kolaylıkla olanak sağlamaktadır (Augustin et al., 2024). Şekil 1’de, hassas fermantasyon uygulamalarında kullanılan bazı mikroorganizmalar ve bu mikroorganizmalar aracılığıyla üretilen bileşenlere ilişkin örnekler verilmiştir.

Kullanılan mikroorganizma / üretim platformu	Firma / örnek uygulama	Ürün / hedef bileşen	Kaynak
Genetik olarak tasarlanmış maya, özellikle <i>Pichia pastoris</i> (<i>Komagotoella phaffii</i>)	The Every Company	Hayvansız yumurta proteinleri	(Ivey et al., 2024)
Genetik olarak tasarlanmış maya sistemi	Impossible Foods	Rekombinant soya leghemoglobini	(Shankar & Hoyt, 2018)
Genetik olarak tasarlanmış iplikli mantarlar, örn. <i>Trichoderma reesei</i>	Perfect Day	Rekombinant süt proteinleri	(Pandya, Gandhi, Ji, Beauchamp, & Hom, 2016)
Genetik olarak tasarlanmış gram negatif bakteriler	Ticari/potansiyel biyoteknolojik üretim platformları	Rekombinant kolajen	(Ouzounov, 2021)
Genetik olarak tasarlanmış mikroorganizmalar	Rekombinant enzim üretimi	Kimozin	(Emtage et al., 1983)
Genetik olarak tasarlanmış mikroorganizmalar	Biyoteknolojik oligosakkarit üretimi	İnsan sütü oligosakkaritleri	(Jennewein & Wartenberg, 2021)
Yağ üreten mayalar	Atık bitkisel yağ veya hayvansal yağların biyodönüşümü	Katma değerli ürünler	(Liu et al., 2021)
<i>Escherichia coli</i>	Glikoz, yağ asidi veya atık yemeklik yağdan likopen üretimi	Likopen	(Zhang, Sun, & Ma, 2017)
Moleküler mühendislik uygulaması <i>Yarrowia lipolytica</i>	Bitkisel yağların yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesi	Karoten, likopen, mum esterleri ve omega-3 yağ asitleri	(Xie, Soong, Liu, Qin, & Chen, 2017)

Şekil 1. Hassas fermantasyonda kullanılan mikroorganizmalar ve üretilen bileşenler

4.1. Alternatif Protein Üretimi

Hassas fermantasyon, gıda uygulamaları için ilgi çekici hayvansal veya diğer proteinleri ekolojik olarak üretmek üzere tasarlanmış mikroorganizmalar kullanarak yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Mikroorganizmalar binlerce yıldır gıdaları değiştirmek ve oluşturmak için kullanılırken, mikrobiyal toplu protein üretimi nispeten yenidir. En ilgi çekici hassas fermantasyon ürünlerinden bazıları, daha önce yalnızca hayvansal kaynaklardan elde edilen ve artık mikroorganizmalarda ifade edilebilen gıda proteinleridir (Eastham & Leman, 2024).

Süt ürünlerinde lezzet, jelleşme ve dokuyu belirleyen başlıca süt proteinleri arasında kazein ve peynir altı suyu bulunur (Yiğit, Bielska, Cais-Sokolińska, & Samur, 2023). Kazeinler, hayvansız peynir üretimi için olmazsa olmaz olan emülsifikasyon ve jelleşme özellikleri nedeniyle oldukça arzu edilen protein-

lerdir (Antuma, Steiner, Garamus, Boom, & Keppler, 2023).

Peynir altı suyu proteinleri mükemmel çözünürlük, emülsifikasyon ve köpürme özelliklerine sahiptir ve hayvansız süt ürünleri, fırıncılık ve şekerleme formülasyonlarına olanak tanımaktadır (Keppler et al., 2021; Yiğit et al., 2023). Beta-laktoglobulin, sığır peynir altı suyu proteininin yerine geçmesi açısından ticari açıdan büyük ilgi görürken, alfa-laktalbumin insan sütündeki en bol peynir altı suyu proteini olması nedeniyle bebek maması uygulamalarında potansiyel taşımaktadır (Vestergaard, Chan, & Jensen, 2016; Deng et al., 2023).

Laktoferrin, bağışıklık koruması için değerli olan ve antimikrobiyal ve antiinflamatuvar özelliklere sahip, demir bağlayıcı bir peynir altı suyu glikoproteinidir. Laktoferrin üretimi, yüksek değeri ve sığır sütündeki düşük konsantrasyonu nedeniyle cazip bir hassas fermentasyon hedefidir; bu da mevcut hayvansal kaynaklı kaynağı değerli ve izole edilmesi maliyetli hale getirmektedir (Cui et al., 2022; Deng et al., 2023).

Yumurta akı proteinleri, eksiksiz amino asit profili ve fonksiyonel özellikleri nedeniyle fırınlanmış ürünlerden, dondurmalara ve besin takviyelerine kadar çeşitli gıda uygulamalarında kullanılmaktadır. Yumurta akı proteinleri, mikoprotein gibi et alternatiflerinin vejetaryen formülasyonlarında sıklıkla bağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır (Okeudo-Cogan et al., 2023).

Brazzein, monellin, thaumatin ve mycodulcein gibi bitki ve mantarlardan elde edilen tatlı proteinler, hassas fermentasyon kaynaklı bir diğer ilgi alanı olan bileşendir (Saraiva et al., 2023; Eastham & Leman, 2024). Bu hassas fermentasyon üretimi proteinler, şekerden önemli ölçüde daha tatlıdır ve gıda ve içeceklerde şeker azaltımını mümkün kılarken, daha sağlıklı, ekolojik olarak sürdürülebilir ve lezzetli gıdalara yönelik gelişen tercihlere de hitap etmektedir (Saraiva et al., 2023).

4.2. Fonksiyonel ve Biyoaktif Bileşen Üretimi

Bir çalışma, A vitamini türevlerinden biri olan retinalin, metabolik olarak tasarlanmış *Saccharomyces cerevisiae* kullanılarak hassas fermentasyon yoluyla sürdürülebilir biçimde üretilebileceğini göstermektedir. Bu çalışma, piruvat dekarboksilaz aktivitesinin ortadan kaldırılmasının karbon akışını retinal biyosentezine yönlendirdiğini ve rekombinant *S. cerevisiae*'nin hassas fermentasyon yoluyla retinal üretimi için umut verici bir mikrobiyal platform olduğunu ortaya koymaktadır (Hwang, Baek, & Seo, 2025).

Ahududunun karakteristik aromasından sorumlu doğal fenolik bir bileşik olup gıda, koku/aroma ve sağlık endüstrilerinde geniş kullanım alanına sahiptir. Ancak meyvelerden doğal ekstraksiyonunun düşük verimli olması ve kimyasal sentezin sürdürülebilirlik açısından bazı sınırlılıklar taşıması, mikrobiyal üretimi önemli bir alternatif hâline getirmektedir. Ahududu ketonu ile yapılan bir çalışmada ahududu ketonunun daha verimli ve sürdürülebilir mikrobiyal

hücre fabrikaları aracılığıyla üretilebileceğini ve bu yaklaşımın diğer yüksek değerli bileşiklerin hassas fermentasyonla üretimi için de yol gösterici olabileceğini ortaya koymaktadır (Gao, Sun, Ledesma-Amaro, Marcellin, & Peng, 2025).

4.3. Lipit Üretimi

Hassas fermentasyon, mikrobiyal metabolizmayı ayarlayarak belirli, yüksek değerli lipid fraksiyonlarını sentezlemek için uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır (Vangalis, Steensels, Dai, Wang, & Verstrepen, 2026). Literatürün çoğu, palmitoleik asidi uzaklaştırarak ve linoleik asit ve oleik asit seviyelerini düşürerek kakao yağı taklit etmek için kullanılan yağ üreten mayalar *Yarrowia lipolytica* ve *Rhodotorula toruloides*'e odaklanmaktadır (Smâros et al., 2025). Hassas fermentasyon kaynaklı lipitler ve özel yağlar, hayvansal yağların erime davranışını ve aromasını taklit ederek süt ürünleri, bitki bazlı etler, şekerlemeler ve sürülebilir ürünlerde çok önemli bir rol oynamaktadır (Augustin et al., 2024).

Yapılan bir çalışmada, *Apiotrichum brassicae* tarafından üretilen mikrobiyal lipitlerin yaygın olarak kullanılan gıda yağları ve sıvı yağlara alternatif olma potansiyeli değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, *A. brassicae* lipitlerinin kakao yağı, hurma yağı ve sığır yağı ile kimyasal ve fiziksel açıdan benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, suşun farklı besiyeri koşullarında yetiştirilmesiyle değişken yağ asidi profilleri oluşturabildiği belirlenmiştir. Bu durum, hedeflenen gıda lipit özelliklerinin elde edilmesi amacıyla yağ asidi profilinin yönlendirilebileceğini ve üretim sürecinin maliyet etkin hâle getirilmesi için optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Smâros et al., 2025).

Mikroalgler ve thraustochytridler, insan ve hayvan beslenmesinin yanı sıra biyoyakıt üretiminde de kullanılabilecek alternatif ve yenilenebilir mikrobiyal lipit kaynakları olarak öne çıkmaktadır. Bu mikroorganizmalar tarafından üretilen lipitler, yüksek değerli yağlara yönelik artan talebin karşılanması ve petrol bazlı yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Mikroalg ve thraustochytrid kaynaklı lipit üretiminde; yetiştirme koşulları, büyüme özellikleri, büyük ölçekli üretim olanakları, lipit biriktirme stratejileri, suş ıslahı ve lipit profilinin belirlenmesi temel araştırma alanları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu biyoproseslerin daha sürdürülebilir ve maliyet etkin hâle getirilebilmesi için üretim sürecinin tüm aşamalarında geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır (Colonia et al., 2022).

Bitkisel yağların ekonomik değerini artırmak ve kullanım alanlarını genişletmek amacıyla, metabolik olarak tasarlanmış *Yarrowia lipolytica* temelli yeni biyolojik üretim platformları geliştirilmektedir. Bu platformlar, bitkisel yağların doğrudan balmumu esterleri, uzun zincirli dikarboksilik asitler, karotenoidler ve omega-3 yağ asitleri gibi yüksek katma değerli ürünlere dönüştü-

rülmesine olanak sağlamaktadır (Xie et al., 2017)

(Shen et al., 2024) *Schizochytrium* sp'deki Dokosaheksaenoik asit (DHA) içeriğini ve pozisyonel dağılımını analiz etmiş ve alg lipidinin %45-%80 DHA'dan oluştuğunu bulmuştur. sn-2 DHA'nın toplam DHA'ya oranı %32 ile %48 arasında değişmekte olup, bu da *Schizochytrium* sp. lipidinde ω -3 yağ asitlerinin yüksek biyoyararlanımını açıklamaktadır.

5. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİNDEN HASSAS FERMANTASYON

Hassas fermantasyon, gıda üretimi için dönüştürücü bir potansiyel sunar ve endüstriyel üretim, insan beslenmesi ve çevresel sürdürülebilirlik alanlarında giderek artan bir öneme sahiptir (Knychala et al., 2024). Hassas fermantasyon, geleneksel üretim sistemlerine kıyasla sera gazı emisyonlarını azaltma, arazi ve su kullanımını sınırlandırma potansiyeliyle eşdeğer veya daha üstün gıda bileşenlerinin üretilmesine olanak tanımaktadır (Teng et al., 2021). Fermantasyona dayalı üretim, iklim değişkenliğine, toprak sınırlamalarına, hastalık salgınlarına veya mevsimsel kısıtlamalara tabi değildir; bu da onu özellikle iklim değişikliği karşısında daha istikrarlı ve dayanıklı bir sistem haline getirmektedir (Jafarzadeh et al., 2024).

Bitki ve hayvan kaynaklı gıda ürünleri, işleme için önemli miktarda arazi, su ve enerji gerektiren geleneksel tarım ve hayvancılığa bağlıdır; oysa hassas fermantasyondan elde edilen yeni ürünler, kendi kendini çoğaltan mikroplara bağlıdır (Shuaibu, 2024). Yaşam Döngüsü Analizleri fermantasyonun sürdürülebilirlik faydalarını doğrulamaktadır. Fermente yemler, geleneksel yemlere kıyasla karbon ayak izini yaklaşık %35-50 ve su kullanımını yaklaşık %50-90 oranında azaltabilmektedir (Siddiqui et al., 2023). Örneğin, fermente yan ürünler kullanan organik sistemler, soya yemlerine kıyasla yaklaşık %40 oranında sera gazı emisyonunda azalma göstermekte ve böcek bazlı yemlerin ayak izi balık ununa göre çok daha düşüktür (Zervas & Tsiplakou, 2016; Tretola, Lin, Eichinger, Manoni, & Pinotti, 2025). Benzer şekilde, saf proteinlerin hassas fermantasyonu, hayvancılığa kıyasla tarım arazisinin %1'inden daha azını (ve yaklaşık %90 daha az suyu) kullanmaktadır (Verma et al., 2025). Hassas fermantasyon, tarımda kullanılan sentetik gübrelerden kaynaklanan metan ve azot oksit emisyonlarını azaltmaktadır (Getahun & Yeman, 2025).

Teknolojik gelişmeler, sürdürülebilirlik zorunlulukları ve değişen tüketici tercihleri sayesinde hassas fermantasyon, hızla dönüştürücü bir sektör olarak ortaya çıkmaktadır. Tüketicilerin sürdürülebilir, etik ve yüksek kaliteli ürünlerle olan talebiyle desteklenen hassas fermantasyon pazarı, önemli bir büyüme potansiyeli taşımaktadır (Augustin et al., 2024; Marcellin et al., 2024).

6. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Geliştirilmiş verimlilik, kararlılık ve sağlamlığa sahip yeni nesil mikrobiyal suşların geliştirilmesi de dahil olmak üzere, gelişmiş suş mühendisliğine odaklanacak ve optimize edilmiş genetik modifikasyonlar için yapay zeka ve makine öğrenimi ile desteklenecektir (Yadav, Singh, & Sinha, 2024).

Gıda dışı biyokütle hammaddelerine dönüşüm, sürdürülebilirliği teşvik edecek ve maliyetleri düşürecektir. Biyoreaktör tasarımı ve fermentasyon sürecindeki yenilikler, karbon ayak izini en aza indirmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu yoluyla ölçeklenebilirliği ve enerji verimliliğini artıracaktır. Ürün çeşitliliği, gıda ve içeceklerin ötesine geçerek biyoplastikler, biyobazlı tekstiller ve gıda uygulamaları için yeni aroma bileşiklerini de içerecektir. Ek olarak, tek bir fermentasyon sürecinde karmaşık bileşikler üretebilen çok işlevli mikroorganizmalar geliştirilecek ve endüstriyel yan ürünleri ve atık akışlarını fermentasyon için girdi olarak değerlendiren döngüsel ekonomi modelleri oluşturulacaktır (Verma et al., 2025).

Suş mühendisliği, hammadde kullanımı ve süreç optimizasyonunda devam eden yenilikler, potansiyelini daha da artıracaktır. Şeffaf iletişim ve eğitim yoluyla düzenleyici ve kamuoyu algısı zorluklarının ele alınması, benimsenmenin yaygınlaştırılması ve bu dönüştürücü teknolojinin tüm potansiyelinin ortaya çıkarılması için kritik önem taşıyacaktır (Verma et al., 2025).

7. SONUÇ

Hassas fermentasyon, geleneksel fermentasyon uygulamalarının genetik mühendisliği, sentetik biyoloji, metabolik mühendislik ve biyoproses teknolojileriyle bütünleşmesi sonucunda ortaya çıkan yenilikçi bir üretim platformudur. Bu teknoloji, mikroorganizmaların belirli hedef molekülleri yüksek saflıkta ve kontrollü koşullar altında üretebilen biyolojik hücre fabrikaları olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle hassas fermentasyon, yalnızca alternatif protein üretiminde değil; aynı zamanda lipitler, enzimler, vitaminler, aroma bileşenleri, pigmentler, biyoaktif bileşikler ve fonksiyonel gıda bileşenlerinin sürdürülebilir üretiminde de önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Bu bölümde ele alınan çalışmalar, bakteriler, mayalar, filamentli mantarlar, mikroalgler ve thraustochytridlerin hassas fermentasyon uygulamalarında farklı üretim hedefleri için etkili mikrobiyal platformlar olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Özellikle rekombinant süt ve yumurta proteinleri, kimozin, laktoferrin, leghemoglobin, retinal, ahududu ketonu, omega-3 yağ asitleri, karotenoidler ve mikrobiyal lipitler gibi yüksek katma değerli bileşenlerin üretimi, hassas fermentasyonun gıda endüstrisindeki uygulama alanlarının giderek genişlediğini ortaya koymaktadır. Bu bileşenler, geleneksel hayvansal ve bitkisel kaynaklara bağımlılığı azaltma, besinsel ve fonksiyonel özellikleri iyileştirme ve daha kontrollü ürün kalitesi sağlama açısından dikkat çekici avantajlar sunmaktadır.

Sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, hassas fermantasyon arazi, su ve enerji kullanımının azaltılması; sera gazı emisyonlarının düşürülmesi; kaynak verimliliğinin artırılması ve üretimin iklim koşullarından daha bağımsız hâle getirilmesi bakımından geleneksel gıda üretim sistemlerine güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca tarımsal ve endüstriyel yan ürünlerin fermantasyon süreçlerinde hammadde olarak değerlendirilmesi, döngüsel biyoekonomi yaklaşımını desteklemekte ve gıda üretiminde atık azaltımı açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Bununla birlikte, hassas fermantasyonun yaygın ticari kullanımı için bazı teknik, ekonomik ve toplumsal zorlukların aşılması gerekmektedir. Yüksek üretim maliyetleri, ölçek büyütme problemleri, suş kararlılığı, ürün saflaştırma süreçleri, enerji gereksinimi, mevzuat düzenlemeleri ve tüketici kabulü bu teknolojinin gelecekteki başarısını belirleyecek temel faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle düşük maliyetli substratların kullanımı, yüksek verimli mikrobiyal suşların geliştirilmesi, biyoreaktör tasarımlarının iyileştirilmesi ve aşağı akış işlemlerinin optimize edilmesi, hassas fermantasyon ürünlerinin ekonomik açıdan rekabetçi hâle gelmesi için kritik öneme sahiptir.

Gelecek dönemde yapay zekâ, makine öğrenimi, omik teknolojiler, adaptif laboratuvar evrimi ve ileri metabolik mühendislik yaklaşımlarının hassas fermantasyon süreçlerine entegre edilmesiyle daha verimli, dayanıklı ve hedefe yönelik mikrobiyal üretim sistemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Bu gelişmeler, kişiselleştirilmiş beslenme, fonksiyonel gıda tasarımı, alternatif protein üretimi, özel lipidlerin eldesi ve biyoaktif bileşik üretimi gibi alanlarda yeni fırsatlar yaratacaktır. Sonuç olarak hassas fermantasyon, sürdürülebilir, güvenli, besleyici ve çevre dostu gıda sistemlerinin geliştirilmesinde stratejik bir teknoloji olarak öne çıkmakta; geleceğin gıda üretim modellerinin şekillenmesinde önemli bir rol üstlenme potansiyeli taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Adeyeye, S. A. O., Babu, A. S., Subudhi, A., & Adeyeye, B. R. (2026). Precision Fermentation Processes for Producing Novel Foods and Its Sustainable Applications. *Journal of Basic Microbiology*, 66(2), e70160. <https://doi.org/10.1002/jobm.70160>
- Antuma, L. J., Steiner, I., Garamus, V. M., Boom, R. M., & Keppler, J. K. (2023). Engineering artificial casein micelles for future food: Is casein phosphorylation necessary? *Food Research International*, 173, 113315. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113315>
- Aro, N., Ercili-Cura, D., Andberg, M., Silventoinen, P., Lille, M., Hosia, W., ... Landowski, C. P. (2023). Production of bovine beta-lactoglobulin and hen egg ovalbumin by *Trichoderma reesei* using precision fermentation technology and testing of their techno-functional properties. *Food Research International*, 163, 112131. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112131>
- Athenaki, M., Gardeli, C., Diamantopoulou, P., Tchakouteu, S. S., Sarris, D., Philippoussis, A., & Papanikolaou, S. (2018). Lipids from yeasts and fungi: Physiology, production and analytical considerations. *Journal of Applied Microbiology*, 124(2), 336–367. <https://doi.org/10.1111/jam.13633>
- Augustin, M. A., Hartley, C. J., Maloney, G., & Tyndall, S. (2024). Innovation in precision fermentation for food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(18), 6218–6238. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2166014>
- Ayar-Sümer, E. N., Verheust, Y., Özçelik, B., & Raes, K. (2024). Impact of Lactic Acid Bacteria Fermentation Based on Biotransformation of Phenolic Compounds and Antioxidant Capacity of Mushrooms. *Foods*, 13(11), 1616. <https://doi.org/10.3390/foods13111616>
- Béné, C., Prager, S. D., Achicanoy, H. A. E., Toro, P. A., Lamotte, L., Cedrez, C. B., & Mapes, B. R. (2019). Understanding food systems drivers: A critical review of the literature. *Global Food Security*, 23, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.04.009>
- Bilal, M., Ji, L., Xu, Y., Xu, S., Lin, Y., Iqbal, H. M. N., & Cheng, H. (2022). Bioprospecting *Kluyveromyces marxianus* as a Robust Host for Industrial Biotechnology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 851768. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.851768>
- Caporusso, A., Capece, A., & De Bari, I. (2021). Oleaginous Yeasts as Cell Factories for the Sustainable Production of Microbial Lipids by the Valorization of Agri-Food Wastes. *Fermentation*, 7(2), 50. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020050>
- Carota, E., Crognale, S., D'Annibale, A., & Petruccioli, M. (2018). Bioconversion of agro-industrial waste into microbial oils by filamentous fungi. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.022>
- Charles, A. C., Dadmohammadi, Y., & Abbaspourrad, A. (2022). Food and cosmetic

- applications of the avocado seed: A review. *Food & Function*, 13(13), 6894–6901. <https://doi.org/10.1039/D1FO02438H>
- Chattopadhyay, A., & Maiti, M. K. (2021). Lipid production by oleaginous yeasts. In *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 116, pp. 1–98). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2021.03.003>
- Colonia, B. S. O., De Melo Pereira, G. V., De Carvalho, J. C., Dos Santos Sousa, P. H., Fanka, L. S., Rodrigues, C., ... Soccol, C. R. (2022). Lipids produced by microalgae and thraustochytrids. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals* (pp. 191–217). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90631-9.00011-9>
- Cui, S., Lv, X., Sun, G., Wu, W., Xu, H., Li, Y., ... Liu, L. (2022). Recent advances and prospects in purification and heterologous expression of lactoferrin. *Food Bioengineering*, 1(1), 58–67. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12003>
- Deng, M., Lv, X., Liu, L., Li, J., Du, G., Chen, J., & Liu, Y. (2023). Cell factory-based milk protein biomanufacturing: Advances and perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 244, 125335. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125335>
- Depenbusch, L., & Klasen, S. (2019). The effect of bigger human bodies on the future global calorie requirements. *PLOS ONE*, 14(12), e0223188. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223188>
- Diaz-Bustamante, M. L., Keppler, J. K., Reyes, L. H., & Alvarez Solano, O. A. (2023). Trends and prospects in dairy protein replacement in yogurt and cheese. *Heliyon*, 9(6), e16974. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16974>
- Dupuis, J. H., Cheung, L. K. Y., Newman, L., Dee, D. R., & Yada, R. Y. (2023). Precision cellular agriculture: The future role of recombinantly expressed protein as food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(2), 882–912. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13094>
- Eastham, J. L., & Leman, A. R. (2024). Precision fermentation for food proteins: Ingredient innovations, bioprocess considerations, and outlook — a mini-review. *Current Opinion in Food Science*, 58, 101194. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101194>
- Emtage, J. S., Angal, S., Doel, M. T., Harris, T. J., Jenkins, B., Lilley, G., & Lowe, P. A. (1983). Synthesis of calf prochymosin (prorennin) in *Escherichia coli*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 80(12), 3671–3675. <https://doi.org/10.1073/pnas.80.12.3671>
- FAO. (2021). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021*. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. <https://doi.org/10.4060/cb4474en>
- Gao, P., Sun, H., Ledesma-Amaro, R., Marcellin, E., & Peng, H. (2025). Advancements and challenges in the bioproduction of raspberry ketone by precision fermentation. *Future Foods*, 11, 100606. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100606>
- Gardeli, C., Athenaki, M., Xenopoulos, E., Mallouchos, A., Koutinas, A. A., Aggelis, G., & Papanikolaou, S. (2017). Lipid production and characterization by *Mor-*

- tierella (Umbelopsis) isabellina* cultivated on lignocellulosic sugars. *Journal of Applied Microbiology*, 123(6), 1461–1477. <https://doi.org/10.1111/jam.13587>
- Getahun, A., & Yeman, N. (2025). Innovative mechanisms for reducing the ecological and socioeconomic footprint of livestock systems: A review. *S. Asian J. Life Sci*, 13, 72–83.
- Hassoun, A., Bekhit, A. E.-D., Jambrak, A. R., Regenstien, J. M., Chemat, F., Morton, J. D., ... Ueland, Ø. (2024). The fourth industrial revolution in the food industry—part II: Emerging food trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(2), 407–437. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2106472>
- Hilgendorf, K., Wang, Y., Miller, M. J., & Jin, Y.-S. (2024). Precision fermentation for improving the quality, flavor, safety, and sustainability of foods. *Current Opinion in Biotechnology*, 86, 103084. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103084>
- Hwang, H.-S., Baek, K.-R., & Seo, S.-O. (2025). Retinal Production by Precision Fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*. *Fermentation*, 11(4), 214. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040214>
- Ivey, F. D., DOUGHTY, T., SCHWARZ, Y., TRAN, M., KOLYER, L., Patnaik, R., ... Zhong, W. (2024). *Systems and methods for high yielding recombinant microorganisms and uses thereof*. Google Patents.
- Jafarzadeh, S., Qazanfarzadeh, Z., Majzoobi, M., Sheiband, S., Oladzadabbasabad, N., Esmaeili, Y., ... Timms, W. (2024). Alternative proteins; A path to sustainable diets and environment. *Current Research in Food Science*, 9, 100882. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100882>
- Jennewein, S., & WARTENBERG, D. (2021). *Production of human milk oligosaccharides in microbial hosts with engineered import/export*. Google Patents.
- Keppler, J. K., Heyse, A., Scheidler, E., Uttinger, M. J., Fitzner, L., Jandt, U., ... Biedendieck, R. (2021). Towards recombinantly produced milk proteins: Physicochemical and emulsifying properties of engineered whey protein beta-lactoglobulin variants. *Food Hydrocolloids*, 110, 106132. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106132>
- Knorr, D., & Augustin, M. A. (2023). Food systems at a watershed: Unlocking the benefits of technology and ecosystem symbioses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(22), 5680–5697. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2023092>
- Knychala, M. M., Boing, L. A., Ienczak, J. L., Trichez, D., & Stambuk, B. U. (2024). Precision Fermentation as an Alternative to Animal Protein, a Review. *Fermentation*, 10(6), 315. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060315>
- Koreti, D., Kosre, A., Jadhav, S. K., & Chandrawanshi, N. K. (2022). A comprehensive review on oleaginous bacteria: An alternative source for biodiesel production. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 47. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00527-1>

- Li, S., Yu, H., Liu, Y., Zhang, X., & Ma, F. (2019). The lipid strategies in *Cunninghamella echinulata* for an allostatic response to temperature changes. *Process Biochemistry*, 76, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.11.005>
- Liu, N., Soong, Y. V., Mirzaee, I., Olsen, A., Yu, P., Wong, H., & Xie, D. (2021). Biomannufacturing of value-added products from oils or fats: A case study on cellular and fermentation engineering of *Yarrowia lipolytica*. *Biotechnology and Bioengineering*, 118(4), 1658–1673. <https://doi.org/10.1002/bit.27685>
- Marcellin, E., Bansal, N., Ebert, B., Gumulya, Y., Johnson, H., Peng, H., ... van der Pols, J. (2024). *Precision fermentation: A future of food in Australia*.
- Mirzapour-Kouhdasht, A., Garcia-Vaquero, M., & Huang, J.-Y. (2024). Algae-derived compounds: Bioactivity, allergenicity and technologies enhancing their values. *Bioresource Technology*, 406, 130963. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130963>
- Obayomi, O. V., Malomo, A. A., Olaniran, A. F., Osemwegie, O. O., Olojede, A. O., Beyioku, O. E., & Adeyemi, O. S. (2026). Transition from fermentation to precision fermentation: Role in sustainable food system. *Biotechnology Reports*, 50, e00952. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2026.e00952>
- Okeudo-Cogan, M. C., Murray, B. S., Ettelaie, R., Connell, S. D., Radford, S. J., Micklethwaite, S., & Sarkar, A. (2023). Understanding the microstructure of a functional meat analogue: Demystifying interactions between fungal hyphae and egg white protein. *Food Hydrocolloids*, 140, 108606. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108606>
- Ouzounov, N. (2021). *Expression of proteins in gram-negative bacteria wherein the ratio of periplasmic volume to cytoplasmic volume is between 0.5: 1 and 10: 1*. Google Patents.
- PANDYA, R., GANDHI, P., Ji, S., Beauchamp, D., & Hom, L. (2016). *Compositions comprising a casein and methods of producing the same*. Google Patents.
- Patel, A. K., Albarico, F. P. J. B., Perumal, P. K., Vadrale, A. P., Nian, C. T., Chau, H. T. B., ... Singhania, R. R. (2022). Algae as an emerging source of bioactive pigments. *Bioresource Technology*, 351, 126910. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126910>
- Saraiva, A., Carrascosa, C., Ramos, F., Raheem, D., Pedreiro, S., Vega, A., & Raposo, A. (2023). Brazzein and Monellin: Chemical Analysis, Food Industry Applications, Safety and Quality Control, Nutritional Profile and Health Impacts. *Foods*, 12(10), 1943. <https://doi.org/10.3390/foods12101943>
- Shankar, S., & Hoyt, M. A. (2018). *Expression constructs and methods of genetically engineering methylotrophic yeast*. Google Patents.
- Shen, L., Li, F., Jiang, C., Cao, X., Jin, J., Wang, X., & Wei, W. (2024). Comparative analysis of DHA positional distribution and triacylglycerol molecular species in algal oil (*Schizochytrium* sp.) from different oil processing. *Food Bioscience*, 58, 103634. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103634>

- Shuaibu, A. (2024). Precision Fermentation: A Tool Revolutionizing the Food Industry. *RSIS*.
- Siddique, A., Tayyaba, T., Imran, M., & Rahman, A. (2022). Biotechnology applications in precision food. In *Biotechnology in Healthcare* (pp. 197–222). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90042-3.00013-X>
- Siddiqui, S. A., Erol, Z., Rugji, J., Taşçı, F., Kahraman, H. A., Toppi, V., ... Castro-Muñoz, R. (2023). An overview of fermentation in the food industry—Looking back from a new perspective. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 85. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00702-y>
- Smâros, F., Vidgren, V., Rondou, K., Riihinen, K., Mohammadi, P., Dewettinck, K., ... Sozer, N. (2025). Microbial production of food lipids using the oleaginous yeast *Apiotrichum brassicae*. *Food Research International*, 200, 115481. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115481>
- Song, I., Kim, S., Kim, J., Oh, H., Jang, J., Jeong, S. J., ... Jin, E. (2022). Macular pigment-enriched oil production from genome-edited microalgae. *Microbial Cell Factories*, 21(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01736-7>
- Tagliavia, M., & Nicosia, A. (2019). Advanced Strategies for Food-Grade Protein Production: A New *E. coli*/Lactic Acid Bacteria Shuttle Vector for Improved Cloning and Food-Grade Expression. *Microorganisms*, 7(5), 116. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7050116>
- Tan, Y. Q., Ong, H. C., Yong, A. M. H., Fattori, V., & Mukherjee, K. (2024). Addressing the safety of new food sources and production systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3), e13341. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13341>
- Teng, T. S., Chin, Y. L., Chai, K. F., & Chen, W. N. (2021). Fermentation for future food systems: Precision fermentation can complement the scope and applications of traditional fermentation. *The EMBO Reports*, 22(5), EMBR202152680. <https://doi.org/10.15252/embr.202152680>
- Terefe, N. S. (2022). Recent developments in fermentation technology: Toward the next revolution in food production. *Food Engineering Innovations across the Food Supply Chain*, 89–106.
- Tretola, M., Lin, P., Eichinger, J., Manoni, M., & Pinotti, L. (2025). Review: Nutritional, safety, and environmental aspects of former foodstuff products in ruminant feeding. *Animal*, 19, 101512. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101512>
- Vangalis, V., Steensels, J., Dai, Z., Wang, Q., & Verstrepen, K. J. (2026). Designing the future of food fats: Precision fermentation of *Yarrowia lipolytica* for tailored lipid production. *Current Opinion in Biotechnology*, 100, 103524. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2026.103524>
- Verma, K., Duhan, P., Pal, D., Verma, P., & Bansal, P. (2025). Precision fermentation for the next generation of food ingredients: Opportunities and challenges. *Future Foods*, 12, 100750. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100750>

- Vestergaard, M., Chan, S. H. J., & Jensen, P. R. (2016). Can microbes compete with cows for sustainable protein production—A feasibility study on high quality protein. *Scientific Reports*, 6(1), 36421. <https://doi.org/10.1038/srep36421>
- Xie, D., Soong, Y., Liu, N., Qin, J., & Chen, S. (2017). A new biomanufacturing platform for bioconversion of plant oils into high-value products. *Adv Biochem Biotechnol: ABIO-149*. DOI, 10, 2574–7258.
- Yadav, H., Singh, S., & Sinha, R. (2024). Fermentation Technology for Microbial Products and Their Process Optimization. In P. Verma (Ed.), *Industrial Microbiology and Biotechnology* (pp. 35–64). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6270-5_2
- Yap, S. H. A., Philip, S., Graveling, A. J., Abraham, P., & Downs, D. (2024). Creating a SNOMED CT reference set for common endocrine disorders based on routine clinic correspondence. *Clinical Endocrinology*, 100(4), 343–349. <https://doi.org/10.1111/cen.14951>
- Yiğit, A., Bielska, P., Cais-Sokolińska, D., & Samur, G. (2023). Whey proteins as a functional food: Health effects, functional properties, and applications in food. *Journal of the American Nutrition Association*, 42(8), 758–768. <https://doi.org/10.1080/27697061.2023.2169208>
- Zervas, G., & Tsiplakou, E. (2016). Life cycle assessment of animal origin products. *Advances in Animal Biosciences*, 7(2), 191–195. <https://doi.org/10.1017/S204047001600011X>
- Zha, J., Liu, D., Ren, J., Liu, Z., & Wu, X. (2023). Advances in Metabolic Engineering of *Pichia pastoris* Strains as Powerful Cell Factories. *Journal of Fungi*, 9(10), 1027. <https://doi.org/10.3390/jof9101027>
- Zhang, Y.-H. P., Sun, J., & Ma, Y. (2017). Biomanufacturing: History and perspective. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 44(4–5), 773–784. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1863-2>



TUNCELİ (DOĞU ANADOLU)
BÖLGESİNİN JEOLojİK EVRİMİ,
CEVHERLEŞME SİSTEMLERİ
VE HİDROJEOKİMYASAL
ÖZELLİKLERİ: TEKTONİK,
MAGMATİK VE JEOTERMAL
ETKİLEŞİMLERİN BÜTÜNLEŞİK
DEĞERLENDİRİLMESİ

Güllü KIRAT¹

Özlem ERDEM²

¹ Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli (gullukirat@munzur.edu.tr) ORCID: 0000-0002-1167-0574

² Dr. Öğr. Üyesi, Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli (osener-dem@munzur.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9324-3655

1. Giriş

Doğu Anadolu'nun önemli tektonik birimlerinden biri olan Tunceli ve çevresi, Toros orojenik kuşağı içerisinde yer almakta olup çok evreli jeolojik gelişimi, karmaşık yapısal özellikleri ve zengin litolojik çeşitliliği ile dikkat çekmektedir. Bölge, Paleozoik'ten Kuvaterner'e kadar uzanan geniş zaman aralığında gelişmiş metamorfik, magmatik, sedimanter ve volkanik birimlerin bir arada bulunduğu bir jeodinamik laboratuvar niteliğindedir. Çalışma alanının temelini oluşturan Keban Metamorfikleri, Munzur Kireçtaşı ve ofiyolitik karmaşıklar, bölgesel tektonik süreçlerin ürünüdür. Bu birimler, Neotetis Okyanusu'nun kapanmasına bağlı yitim ve çarpışma süreçleri ile şekillenmiş, bindirme, doğrultu atımlı faylanma ve normal fay sistemleri ile karmaşık bir yapısal geometri kazanmıştır. Bölge aynı zamanda metalik mineralizasyonlar açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Au, Cu, Mo, Pb ve Ag mineralizasyonları yer alırken, Pülümür havzasında alçıtaşı, tuz, kireçtaşı, bazalt ve kum-çakıl ocakları aktif ya da yarı aktif şekilde işletilmektedir. Bunun yanında Pertek ve çevresinde gelişen jeotermal sistemler, bölgenin aktif hidrojeolojik dinamiklerini ortaya koymaktadır. Bu literatür çalışması kapsamında, Tunceli bölgesinin jeotektonik evrimi, cevherleşme sistemleri, stratigrafik yapısı ve hidrojeokimyasal özellikleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

1.Tunceli ve Çevresinin Bölgesel Tektonik, Stratigrafik ve Litolojik Özellikleri

Munzur Dağları, Toros orojenik kuşağının karakteristik jeolojik özelliklerini yansıtan önemli bir dağlık sistemdir. Toros kuşağının batı ve orta kesimlerinde tektonik açıdan ilişkili biçimde uzanan kaya birliklerinin önemli bir bölümü Munzur Dağları'nda da geniş yayılım göstermektedir. Bu birlikler arasında en baskın litoloji, Üst Triyas-Üst Kretase aralığında gelişmiş kalın karbonat istifleriyle temsil edilen Munzur Kireçtaşı'dır. Çevredeki diğer birimlerle çoğunlukla tektonik dokanaklı olan bu karbonat istifi, kendine özgü litolojik özellikleri, stratigrafik konumu ve bölgesel sürekliliği nedeniyle bağımsız bir tektonostratigrafik birim olarak değerlendirilmektedir. Birimin ana bileşenini, sığ denizel platform koşullarında çökelmiş neritik kireçtaşları oluşturmakta, yer yer düşük dereceli metamorfizma izleri görülmeyle birlikte genel olarak masif ve kalın tabakalı karbonat kayaçlar litolojiyi temsil etmektedir (Özgül, 1981; Çilgin, 2013).

Çalışma sahasında Üst Senozoik öncesine ait kaya birimlerinin stratigrafik konumları, metamorfik dereceleri ve tektonik özellikleri, farklı paleocoğrafik ve tektonik ortamları yansıtan üç ana topluluk altında toplanmaktadır. Bu topluluklar Keban Birliği, Munzur Kireçtaşı ve Ovacık Birliği olarak adlandırılmakta olup, birimler arasında tektonik dokanakların hakim olduğu ve yapısal olarak üst üste bindirilmiş bir istiflenmenin geliştiği

anlaşılmaktadır. Söz konusu litostratigrafik çerçevede, Üst Paleozoik–Mesozoik yaş aralığına ait metamorfitle, Mesozoik’in büyük bölümünü temsil eden kalın neritik karbonat platform çökellerini, Senoniyen yaşlı olistostromal ve ofiyolitli karmaşık kaya birliklerini, Üst Senoniyen–Tersiyer transgresif çökel istiflerini ve Tersiyer volkanitlerini kapsamaktadır. Bölgenin tektonik evriminde Lütessen ve Alt Miyosen dönemlerinde etkili olan epirojenik yükselim ve alçalım hareketlerini, Üst Miyosen sonrasında belirginleşen genç düşey tektonik hareketler izlemiştir. Özellikle bu geç evre deformasyon süreci, Munzur Kireçtaşı biriminde yaygın olarak gözlenen gerilme rejimine bağlı normal fay sistemlerinin gelişiminde önemli rol oynamıştır (Özgül, 1981; Çılğın, 2006).

Granit ve Şener (1986), Tunceli Havzasının Jeolojisi ve Petrol olanakları ile ilgili yaptıkları çalışmada, Tunceli İl sınırları içerisinde yer alan çalışma alanında, Paleozoyik, Mesozoyik ve Senozoyik’e ait birimlerin olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Paleozoyik’in metamorfik şistler ve bunlar içinde yer alan kristalize kireçtaşı bloklarının oluşturduğu Karşılar Formasyonu ile temsil edildiğini, Mesozoyik’te ofiyolitik Pertek Karmaşığı’nın yerleşim yaşı Üst Kretase olarak kabul edildiğini, Senozoyik’te Tunceli Formasyonu (Eosen), Kocakoç Formasyonu (Oligo-Miyosen) ve Mazgirt Volkanikleri (Miyosen) ayırt etmişlerdir (Kaya, 2019).

Alt Kretase - Üst Kretase ve Üst Kretase - Eosen formasyonları arasında diskordans bulunmasına rağmen, öjeosenklinal koşullar uzun süre hakim olmuştur. Bölgede spilit akıntıları, ofiyolitler, andezitler, piroklastik yataklar ve fliş ile sığ deniz sedimanları birikmiş, bu da hem çukur tabanında hızlı çökme hem de kıyıda hızlı yükselme olduğunu göstermektedir. Kabuğun hareketli yapısı, lav fışkırmaları ve volkanik faaliyetlere yol açmış, tüf ve aglomera tipinde birçok piroklastik yatak oluşmuştur. Hem jeosenklinal dönemde hem de sonrasında ters faylanma bölgenin baskın tektonik hareketi olmuştur. Yükselen fay blokları, derinleşen çukurları fliş tipi klastiklerle doldurmuş, fay hatları boyunca volkanik akıntılar ve püskürmeler meydana gelmiştir (Afshar, 1965).

Paleozoik (Permiyen): Paleozoik yaşlı birimler, Keban Birliği içerisinde değerlendirilerek Paleozoik–Mesozoyik yaşlı şelf ortamına ait kırıntılı ve karbonat kökenli metamorfitle kapsayan, yeşilşist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş ve göreceli otokton konumda bulunan bir tektonostratigrafik topluluktur. Birlik içerisinde yer alan Balkırı Grubu’na ait Yoncayolu Formasyonu ile Çay Deresi Kireçtaşı, Permiyen ve daha yaşlı mermer arakatlı şistler ile yeniden kristalleşmiş Permiyen karbonatlarından oluşmakta ve çalışma alanının özellikle güneydoğu ve güneybatı kesimlerinde yüzeylenmektedir (Özgül, 1981; Çılğın, 2006).

Bu birim, belirgin şistozite gösteren, gri tonlarda ve parlak yüzeyli

kalkışist serileriyle temsil edilmektedir. Litolojik bileşim, kuvars-serisit-kalkışist, serisit-kalkışist ve muskovit-kuvars-kalkışist türlerini içermektedir. Kuvars-serisit kalkışistler; başlıca kalsit, kısmen kloritleşmiş serisit, kuvars ve az miktarda feldispat içeren mineralojik bir bileşime sahiptir. Söz konusu şistler, kalın ve koyu kahverengi renkli Üst Permien yaşlı subkristalin kireçtaşlarıyla ilişkili olarak bulunur. Birimin alt kesimlerinde ince şist ve ince tabakalı kireçtaşlarının ardalanması dikkat çekerken, üst kesimlerde *Neoschwagerina caniculifera* fosilini içeren Üst Permien subkristalin karbonatların yaygın olduğu gözlenir. Yoğun tektonik deformasyona maruz kalan kayaçlarda gelişmiş kırık sistemleri yaygındır ve bu kırıkların önemli bir bölümü kalsit damarları ile doldurulmuştur (Afshar, 1965; Karvar, 2019).

Mezozoik (Kretase): Bölgede Triyas ve Jura devirlerine ait yataklara rastlanmaz, bu dönemde bölgenin yükselme ve erozyon etkisinde olduğu düşünülmektedir. Alt ve Üst Kretase birimleri, Permien kalkerleri üzerine diskordan (uyumsuz) olarak gelmektedir. Bu dönem, fliş yatakları, kireçtaşları ve yoğun volkanik faaliyetlerin (bazaltik-andezitik akıntılar, tüfler, radyolarit-serpantin kompleksleri) ürünü olan bir öjeosenklineal istif ile temsil edilir (Afshar, 1965).

Mesozoyik istifin büyük bölümünü, Üst Triyas–Üst Kretase aralığında gelişmiş ve ağırlıklı olarak şelf ortamını temsil eden neritik karbonatlardan oluşan Munzur kireçtaşları meydana getirmektedir. Bu karbonat birimleri, çalışma alanının kuzeyinde uzanan Munzur Dağları boyunca geniş yayılım gösterir. Yer yer metamorfizma izleri bulunsun da genel olarak masif, iyi korunmuş kireçtaşları hakim litolojiyi oluşturur. Litolojik açıdan algi ve resifal kireçtaşları başlıca kaya türleri olup, istifin orta kesimlerinde oolitli kireçtaşları, üst kesimlerinde ise pelajik çakmaktaşı içeren kireçtaşları yer alır. Çevredeki diğer birliklerle çoğunlukla tektonik dokanaklı olan bu kalın karbonat istifi, özgün litolojik ve stratigrafik özellikleri nedeniyle bağımsız bir tektonostratigrafik birim olarak değerlendirilmektedir (Çılğın, 2006).

Senozoik (Tersiyer ve Kuvaterner)

-Eosen: Alt Eosen, andezitik akıntılar ve tüflerle iç içe geçmiş fliş ve kalkerlerle başlar. Orta Eosen’de ise bölgede “Pertek formasyonu” olarak adlandırılan, bol miktarda *Nummulites* içeren karakteristik devetüyü renkli kalkerler yaygındır (Afshar, 1965).

Eosen yaşlı birimler çalışma alanının doğu kesiminde Hopik, Merkai ve Çakberi (Güneykonak) çevresinde yüzeylenmektedir. Bu istif, nummulit, assilina ve büyük rotalialar içeren tabakalı kumlu kireçtaşları ile ince fliş düzeylerinden oluşmakta, yer yer kırmızı renkli bol fosilli kireçtaşlarıyla temsil edilmektedir. Fosilli Eosen tabakaları Çakberi’nin güneyinde Munzur Çayı’nın güneyine doğru uzanmakta ve Miyosen birimleri tarafından

örtülmektedir (Ketin, 1945). Litolojik olarak istif, taban çakıltaşlarıyla başlayan sarımsı milli-kumlu kireçtaşları ile üst seviyelerde kumtaşı, şeyl ve kireçtaşı aralanmasından oluşur. Kuzey sınırının faylı olması nedeniyle kalınlığı kesin olarak belirlenememekle birlikte görünür kalınlık yaklaşık 40–100 m arasında değişmektedir; hızlı yanal fasiyes değişimleri nedeniyle merceklenme ve kamalanmalar yaygındır (Özgül, 1981; Çılğın, 2006).

-Oligosen: Sınırlı bir yayılıma sahip olup kaba klastik yataklar ve yer yer jipsli seviyeler içerir (Afshar, 1965).

-Miyosen: Eosen birimleri üzerine diskordan olarak gelen Miyosen istifi, Alt Miyosen denizel kalkerleri ile başlar; Orta ve Üst Miyosen’de ise marnlar, linyitli seviyeler ve İran’daki benzerlerine benzeyen karasal kırmızı yataklar ile devam eder (Afshar, 1965).

Hopik–Solhasan köyleri arasındaki kesim ile Munzur Çayı’nın güneyinde Mustuşağı çevresinde yüzeyleyen birimler; fosilli Eosen tabakaları üzerine diskordant olarak gelen gri-beyaz renkli, tabakalı ve yer yer kumlu-killi kireçtaşlarıyla temsil edilmektedir. Bu istifin tabanında ince bir gre düzeyi bulunur. Munzur Çayı’nın güney kesiminde ise gri-esmer renkli kil, marn ve yer yer grelerden oluşan detritik bir seri gelişmiş olup marnlar içerisinde pecten, lucina, potamides ve çeşitli gastropod fosilleri yaygındır. Bu fosil topluluğu birimin Orta–Üst Miyosen yaşlı olduğunu göstermektedir (Ketin, 1945; Çılğın, 2006).

Çalışma alanının güney kesimleri, hornblend içeren koyu renkli andezitik lavlarla kaplı olup bölgedeki en genç volkanik ürünleri temsil etmektedir. Bu volkanitler Miyosen yaşlı gre ve marnları kesmekte ve yer yer üzerlemektedir; bu durum volkanik etkinliğin Üst Miyosen–Pliyosen aralığında gerçekleştiğine işaret eder. Kırıntılı kayalar, kavkılı kireçtaşları ve volkanitlerden oluşan istifin alt kesimlerinde şeyl, kumtaşı, killi kireçtaşı ile tuf ve bazalt bileşimli volkanit arakatkıları, üst kesimlerinde ise kavkılı kireçtaşları yer almakta; özellikle güney kesimlerde kaba kırıntılı litolojiler tuf ve aglomera katkılarıyla belirginleşmektedir (Özgül, 1981; Çılğın, 2006).

-Pliyosen ve Kuvaterner:

Çalışma alanında gelişmiş akarsu ağı, kuzeydeki yüksek topoğrafyadan güneye doğru hızla akararak güçlü bir aşındırma etkisi göstermektedir. Bu süreçte taşınan malzeme, özellikle vadi yamaçlarında birikerek flüvyal taraça seviyelerinin oluşumuna katkı sağlamaktadır. Söz konusu taraça çökelleri, daha yaşlı birimlere ait çakılları içeren çakıltaşı düzeyleri ile temsil edilmektedir. (Granit ve Şener, 1986; Karvar, 2019).

Pliyosen, bölgenin yükseldiği ve çok geniş alanları kaplayan andezit ve bazalt akıntılarının (özellikle Bingöl bölgesinde 900 metre kalınlığa ulaşan) olduğu bir volkanizma dönemidir. Kuvaterner’de ise Pülümür civarında

Pleistosen konglomeraları, Munzur ve Harçık nehirleri boyunca ise geniş traverten yatakları ve alüvyon teraslar gelişmiştir (Afshar, 1965).

Çalışma alanının güney kesimleri hornblend içeren koyu renkli andezitik lav akıntılarıyla kaplıdır ve bu kayaçlar bölgedeki en genç volkanik ürünleri temsil eder. Söz konusu volkanitler Miyosen yaşlı gre ve marn birimlerini kesmekte ve yer yer üzerlemektedir; bu durum volkanik etkinliğin Üst Miyosen–Pliyosen aralığında gerçekleştiğini göstermektedir (Ketin, 1945). Litolojik olarak kırıntılı kayaçlar, kavkılı kireçtaşları ve volkanitlerden oluşan istifin alt kesimlerinde şeyl, kumtaşı, killi kireçtaşı ile tuf ve bazalt bileşimli volkanik arakatkılar, üst kesimlerinde ise kavkılı kireçtaşları yer alır. Özellikle güney kesimlerde kaba taneli kırıntılı litolojiler tuf ve aglomera katkılarıyla belirginleşmektedir (Özgül, 1981; Çılğın, 2006).

2.Tunceli Bölgesindeki Cevherleşmeler ve Jeolojik Çalışmalar

Tunceli ili, metalik madenler ile endüstriyel hammadde yatakları açısından dikkate değer bir potansiyel barındırmaktadır. Bölgedeki mineralizasyon alanları ve madencilik etkinlikleri ağırlıklı olarak Munzur ve Pülümür çaylarının oluşturduğu başlıca drenaj havzaları içerisinde yoğunlaşmaktadır. Munzur Çayı havzasında henüz işletmeye alınmamış Au, Cu, Mo, Pb ve Ag mineralizasyonları yer alırken, Pülümür Çayı havzasında Cu oluşumları bilinmektedir. Ayrıca Munzur havzasında geçmişte işletilmiş kömür sahaları bulunmakta; Pülümür havzasında ise alçıtaşı, tuz, kireçtaşı, bazalt ve kum-çakıl ocakları aktif ya da yarı aktif şekilde işletilmektedir.

Bölgenin kuzey kesimlerinde, özellikle söz konusu akarsu havzalarının drenaj alanlarında yer alan Cr yatakları dönemsel olarak açık işletme yöntemiyle değerlendirilmekte, ancak zaman zaman üretim faaliyetleri durdurulmaktadır. Bu alanlardan taşınan sediman ve yüzey sularında Cr, Ni, Pb ve Zn gibi bazı elementlerde yer yer zenginleşmeler belirlenmiş, ayrıca sediman örneklerinde asbest grubu minerallerin varlığı da rapor edilmiştir. Kirletici elementlerin önemli bir kısmının, aktif ve terk edilmiş maden sahalarından yüzey akışı ve drenaj süreçleri aracılığıyla akarsulara taşındığı değerlendirilmektedir. Mevcut veriler, bazı noktalarda sediman ve su kalitesinin çevresel eşik değerler açısından olumsuz etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu kirleticilerin ana akarsulara karışmasıyla birlikte belirli düzeyde seyrelme gerçekleşmektedir. Elde edilen bulgular, bölgenin büyük ölçüde doğal karakterini koruyan ekosistem yapısı açısından güncel bir referans niteliği taşımaktadır (Öztüfekçi Önal vd., 2013)

2.1. Eskigedik-Kızılçayır (Ovacık-Tunceli) Kromit Oluşumlarının Jeolojik Özellikleri ve Jeokimyası

Sanayi açısından ekonomik değere sahip başlıca krom minerali kromit (FeCr_2O_4) olup, Türkiye'deki kromit yatakları çoğunlukla ofiyolitik

topluluklara ait ultrabazik kayalar (peridotitler) içerisinde yer alan Alpin tip oluşumlar şeklinde gelişmiştir. Bu yataklar genellikle karmaşık yapı ve dokular sergileyen, mercek, bant ya da düzensiz kütleler halinde ve çoğunlukla sınırlı rezervlere sahip cevherleşmeler olarak tanımlanmaktadır. Büyük rezervli sahaların sayısı az olmakla birlikte Elazığ, Muğla, Bursa, Mersin, Erzincan ve Hatay çevreleri önemli üretim merkezleri arasında yer almaktadır. Türkiye genelinde çok sayıda kromit yatağı ve cevherleşmesi bilinmekte olup üretilen cevherler hem yurt içinde refrakter ve döküm sanayinde kullanılmakta hem de ferrokrom, krom bileşikleri ve ham cevher olarak ihraç edilmektedir. Yüksek tenörlü masif cevher rezervlerinin azalması ve yeni yatakların bulunmadaki güçlükler nedeniyle, günümüzde düşük tenörlü ancak işletilebilir kromit oluşumlarının değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Kromit yataklarının konumu ve rezervleri, jeolojik çalışmalar, jeofizik yöntemler (rezistivite, mikrogravite, manyetik ve doğal elektrik yöntemleri) ile sondaj verilerinin birlikte değerlendirilmesi ve cevher örneklerinin kimyasal analizleriyle belirlenmektedir (Öztüfekçi Önal ve Şeren, 2018).

Eskigedik-Kızılçayır kromit cevherleşmesinin mineralojik, petrografik ve jeokimyasal özellikleri, derinde yer alan cevher kütlelerinin konumları yer radarı (GPR) yöntemi kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Kromit işletmesinin bulunduğu sahada Üst Kretase yaşlı ofiyolitik kayalar yaygındır ve cevherleşme çok fazla alterasyona uğramış harzburgit ve dünitlerle ilişkili olarak gelişmiştir. Kromit kütleleri tamamen serpantinleşmiş dünitler içinde küçük mercekler ve düzensiz yığınlar halinde bulunur. Cevher dokusu başlıca masif ve saçınımlı olup yer yer nodüler özellik göstermektedir. Gang minerali ise çoğunlukla çubuksu serpantinlerden oluşmuştur. Kromit taneleri 2–30 mm arasında değişen boyutlara sahip, yoğun kırıklı ve milonitleşmiş olup, çatlaklar serpantin dolguları ile karakterizedir (Öztüfekçi Önal ve Şeren, 2018).

2.2. Pertek–Demürek Jeolojisi ve Cevherleşmeleri

Yazgan (1984), Yüksekova plütoniklerinin volkaniklerinden daha yaşlı olduğunu ve Keban Metamorfitlerinin Yüksekova birimlerini üzerlediğini ileri sürerken; Asutay (1985) bazı plütoniklerin Keban Metamorfitlerini kestiğini belirtmiştir. Sağiroğlu (1986) ve Şaşmaz (1987) ise plütoniklerin Yüksekova Karmaşığının en genç birimleri olduğunu ifade etmiştir. Pertek–Demürek sahasında gözlenen kuvarslı diyorit sokulumunun, Keban Metamorfitlerinin Yüksekova Karmaşığı üzerine bindirmesinden sonra gelişmiş olması, söz konusu tartışmalı stratigrafik ve tektonik ilişkilere önemli açıklık getirmektedir. Çalışma alanında öne çıkan başlıca yapısal unsurlar Keban mermerleri, Yüksekova bindirme hattı, Gülbahçe Deresi boyunca izlenen fay zonu ve güney kesimde birbirine yaklaşık paralel uzanan K–G doğrultulu cevherleşmiş çatlak sistemleridir. Keban mermerlerinin Yüksekova Karmaşığı'na ait mikrodioritler üzerine bindirmesiyle gelişen

bindirme hattı, sahayı genel olarak güneybatı–kuzeydoğu doğrultusunda kesmektedir. Kırkgeçit Formasyonu'nun bu hat üzerinde yer alması, bindirme hareketinin Eosen öncesinde gerçekleştiğine işaret etmektedir. Gülbahçe Deresi çevresindeki faylanma ise tabaka eğimlerinde belirgin yön değişimlerine neden olmuş; fayın batısında güney–güneydoğuya, doğusunda ise kuzeye yönelimli eğimler gözlenmiştir (Sağıroğlu, 1992).

Demürek mezrası çevresinde iki temel cevherleşme tipi ayırt edilmektedir: (i) kuvarslı diyorit–mermer kontağı boyunca gelişen skarn ilişkili demir (Fe) cevherleşmeleri ve (ii) mikrodioritler içindeki kırık zonlarında gelişmiş bakır (Cu) cevherleşmeleridir. Fe cevherleşmeleri çoğunlukla skarnlaşma ile ilişkili olup yer yer skarn zonlarından uzak kesimlerde izlenmektedir. Kuvarslı diyorit–mermer kontağında epidot skarn–granat skarn–manyetit–pirit ve piritli granat skarn–manyetit–mermer şeklinde belirgin bir zonlanma gözlenmektedir. Mermerlere doğru ilerledikçe manyetit ve pirit oranı artmakta, yüzeyde ayrışma sonucu hematitleşme ve limonitleşme gelişmektedir. Derine doğru ayrışma azaldıkça, pirit oranı artmakta ve yer yer kalkopirit eşlik etmektedir. Skarnlaşmanın gelişmediği bazı kesimlerde ise kaolenleşmiş kuvarslı diyorit kontağı boyunca daha sınırlı demir cevheri kütleleri yer almaktadır (Sağıroğlu, 1992).

Cu cevherleşmeleri Yüksekova Karmaşığı'na ait mikrodioritler içinde, silisleşmiş çatlak dolguları şeklinde gelişmiştir. Bu zonlar genellikle demir şapkalarla örtülü olup malahit ve azurit oluşumları sayesinde arazide kolaylıkla tanınmaktadır. K–G doğrultulu ve metre ölçeğinde kalınlığa sahip damar sistemlerinde sülfür mineralleri çatlakları ince dolgular halinde doldurmuş, yüzeyde ise büyük ölçüde oksitlenerek limonit, malahit ve azurite dönüşmüştür. Mineralojik incelemeler cevherin başlıca kalkopirit, pirit, kalkosin, kovellin, bornit, kuprit, idait ve nabit bakırdan oluştuğunu göstermektedir. İkincil zenginleşme süreçleri sonucunda kalkopiritin kovellin ve kalkosine dönüşümü yaygın olup, nabit bakırın kuprit ve kalkosin ile ilişkisi karmaşık bir oluşum sürecine işaret etmektedir (Sağıroğlu, 1992).

2.3. Jeotermal Alanındaki (Tunceli-Pertek) Sıcak ve Soğuk Suların Hidrojeolojisi

Pertek jeotermal alanı, Tunceli'nin güneybatısında Singeç Vadisi yakınında yer almaktadır. Bölgenin temel litolojisini Paleozoyik yaşlı Keban Metamorfikleri (kireçtaşı ve mermer) oluştururken, bunları Üst Kretase Pertek Magmatikleri ile Maastrihtiyen Harami, Orta Eosen–Üst Oligosen Kırkgeçit ve Üst Miyosen–Pliosen Karabakır formasyonları ile Kuvaterner alüvyonlar izlemektedir. Keban Metamorfikleri magmatik sokulumlar tarafından kesilmiş ve yer yer genç birimlerce örtülmüştür. Aktif tektonik yapı, özellikle Pertek Fayı ve ilişkili normal faylar ile makaslama kırıkları, karbonatlı birimlerin porozite ve permeabilitesini artırarak bu birimleri jeotermal

sistemin ana rezervuar kayası haline getirmiştir. Sistem açık karakterli olup, beslenme alanı Singeç Vadisi'nin kuzeyi, boşalım alanı ise güney kesimlerdir. Hidrojeokimyasal açıdan hem sıcak hem soğuk sular Ca-Mg-HCO_3 tipindedir. Keban Barajı göl suları ise $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ karakteri gösterir. Soğuk kaynaklar içilebilir nitelikte olsa da sıcak ve mineralli sularda bazı element derişimleri içme suyu standartlarının üzerindedir. Jeotermometre hesaplamaları rezervuar sıcaklığının yaklaşık $74\text{--}105^\circ\text{C}$ olduğunu, karışım modelleri ise $80\text{--}225^\circ\text{C}$ aralığında daha yüksek rezervuar sıcaklıklarına ve %60–88 oranında soğuk su karışımına işaret etmektedir. İzotop verileri, soğuk suların sığ dolaşımli, sıcak suların ise derin dolaşımli ve meteorik kökenli olduğunu göstermektedir (Öztüfekçi Önal ve Akkuş, 2019).

2.4. Munzur ve Pülümür Nehri Sıcak-Mineralli Kaynakların Hidrojeokimyası

Munzur ve Pülümür Nehri havzaları, Tunceli ilinin en geniş drenaj alanlarını oluşturmakta ve kent merkezinde birleşerek güneye doğru tek akarsu sistemi halinde devam etmektedir. Bu çalışmada söz konusu havzalardaki sıcak ve mineralli kaynakların hidrojeokimyasal özelliklerini ve akışkanların yüzeye çıkışını denetleyen yapısal unsurları incelenmiştir. Kaynakların yüzeye ulaşmasında başlıca kontrol mekanizmasının sağ yanal doğrultu atımlı Nazımiye Fay Zonu olduğu belirlenmiştir. Hidrojeolojik açıdan geçirimsiz Permo-Karbonifer şistler temel kaya birimini oluştururken, sıcak ve mineralli suların hazne kayası Permien yaşlı mermer ve kristalize kireçtaşlarıdır. Beslenme alanında Eosen–Miyosen yaşlı yarı geçirgen flišler ve geçirgen kireçtaşlarının bulunması sistemin açık karakterde olduğunu göstermektedir. Sıcak ve mineralli suların pH değerleri $5.96\text{--}6.80$, elektriksel iletkenlikleri $2231\text{--}2930\text{ }\mu\text{S/cm}$ ve toplam çözünmüş madde içerikleri $1300\text{--}1600\text{ mg/L}$ aralığındadır; baskın iyonlar Ca^{2+} ve HCO_3^- olup sular Ca-Mg-HCO_3 tipindedir. Na-K-Mg jeotermometresi sonuçları, su-kayaç dengesinin tam gelişmediğine işaret etmektedir. Soğuk sular ise daha düşük iletkenlik ($471\text{--}891\text{ }\mu\text{S/cm}$) ve nötre yakın pH ($6.66\text{--}7.28$) değerleriyle benzer hidrojeokimyasal fasiyes sergilemektedir (Öztüfekçi Önal ve Sançar, 2021).

2.5. Jeotermal Alanının (Tunceli - Pertek) Antropojenik Kirliliği

Çalışma alanı, Tunceli ili Pertek ilçesi sınırları içerisinde yer almakta olup, jeolojik olarak Doğu Toroslar'ın evrimi açısından önemli bir konuma sahiptir. Bölgenin stratigrafisi yaşlıdan gence doğru Keban Metamorfite (Paleozoik), Harami Formasyonu (Üst Kretase), Kırkgeçit Formasyonu (Orta–Üst Eosen), Karabakır Formasyonu (Üst Miyosen) ve Kuvaterner alüvyonlardan oluşmaktadır. Litolojik ve hidrojeolojik özelliklerine göre birimler; rezervuar, örtü ve akifer niteliklerine sahip üç ana grupta değerlendirilmektedir. Keban Metamorfite içerisindeki kırıklı ve karstik kireçtaşı, mermer ve dolomitik mermer seviyeleri termal sular için önemli

rezervuar kayaçlarını oluştururken, Kırkgeçit ve Karabakır formasyonları geçirimsiz yapılarıyla örtü birimi niteliğindedir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ise özellikle soğuk yeraltı suları açısından önemli akifer alanlarını temsil etmektedir. Bölgedeki su kaynakları, jeotermal akışkanların yüzey ve yeraltı sistemlerine karışması nedeniyle jeokimyasal açıdan farklılaşabilmekte ve sedimanlarda çeşitli kirlетici elementlerin birikimine neden olabilmektedir. Bu kapsamda su ve sediman örneklerinde bor, arsenik ile birlikte Pb, Fe, Sb, Sn ve Hg gibi elementlerin dağılımı incelenmiştir. Bazı su örneklerinde B, As ve Pb değerlerinin içme suyu standartlarını aştığını göstermektedir. Sediman örneklerinde ise düşük düzeyde Fe, Hg ve Sb içerikleri belirlenmiştir. Genel olarak bulgular, Pertek jeotermal sistemi ve çevresinde jeotermal kökenli akışkanların su ve sediman kimyası üzerinde etkili olduğunu ve yer yer çevresel kaliteyi değiştirdiğini ortaya koymaktadır (Özen Balaban vd., 2020)

2.6. Tunceli - Geçityaka Köyü Çevresindeki Kayaçların Petrografisi ve Jeokimyası

Tunceli ili Geçityaka köyü ve çevresinde yüzeyleyen Elazığ Magmatik Kompleksi'ne ait kayaçların petrografik ve jeokimyasal özellikleri değerlendirilmiştir. İncelenen birimler granit, granodiyorit, kuvars monzonit ve monzodiyorit litolojileri ile temsil edilmektedir. Petrografik analizler, kayaçlarda tanesел, porfirik, porfirik holokristalin ve poikilitik dokuların yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. Jeokimyasal veriler, söz konusu magmatik kayaçların I-tipi granit karakterde ve toleyitikten şoşonitik bileşimlere kadar değişen bir kimyasal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. İlkseл manto ve kondrite göre normalize edilmiş dağılımlar, büyük iyon yarıçaplı elementler ile hafif nadir toprak elementlerinin (HNTE) ağır nadir toprak elementlerine (ANTE) göre daha belirgin şekilde zenginleştğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgularla, incelenen magmatik kayaçların Neotetis Okyanusu'nun güney kolunun kuzeye doğru dalımıyla ilişkili okyanus içi yitim süreçleri ve bunu izleyen çarpışma sonrası tektonik evreler sırasında gelişmiş magmatik faaliyetlerin ürünü olduğunu göstermektedir (Sar vd., 2022).

3.Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Tunceli ve çevresine ait jeolojik, cevherleşme ve hidrojeokimyasal, tektonik, magmatik ve jeotermal verilerin bütüncül değerlendirilmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Bölge, Paleozoik'ten Kuvaterner'e uzanan çok evreli ve karmaşık bir stratigrafik yapıya sahiptir. Keban Metamorfitleri, Munzur Kireçtaşı ve ofiyolitik birimler tektonik olarak bindirme ve faylanma süreçleriyle üst üste konumlanmıştır.

2. Tektonik evrimde özellikle doğrultu atımlı fay sistemleri ve bindirme

yapıları belirleyici olmuş, bu yapılar hem magmatik sokulumların yerleşimini hem de hidrotermal dolaşımı kontrol etmiştir.

3. Metalik mineralizasyonlar ağırlıklı olarak ofiyolitik ve magmatik kayalarla ilişkili olup, kromit yatakları ultrabazik kayalar içinde, bakır damarları kırık zonlarında, demir cevherleşmeleri ise skarn zonlarında gelişmiştir. Skarn tipi Fe cevherleşmeleri sınırlı mineral çeşitliliğine sahip olmakla birlikte yer yer ekonomik potansiyel gösterebilecek zonlar sunmaktadır. Cu mineralizasyonları ise hidrotermal kökenli olup sekonder zenginleşme süreçlerinden etkilenmiştir.

4. Pertek jeotermal sistemi açık bir hidrojeolojik sistem olup, rezervuar kayalar kırıklı ve karstik karbonatlardan oluşmaktadır. Sıcak ve mineralli sular Ca-Mg-HCO_3 bileşimindedir ve karışım süreçleri ile kimyasal bileşimleri değişmektedir.

5. Munzur ve Pülümür havzalarında gözlenen hidrojeokimyasal anomaliler, büyük ölçüde tektonik kontrollü fay zonları ve hidrotermal akışkan dolaşımı ile ilişkilidir.

6. Bölgedeki bazı su ve sediman örneklerinde ağır metal ve iz element birikimleri tespit edilmiş olup, bu durum doğal jeolojik süreçler ile geçmiş ve güncel madencilik faaliyetlerinin birlikte etkili olduğunu göstermektedir.

7. Genel olarak Tunceli bölgesi, aktif tektonizma, magmatik sokulumlar, hidrotermal sistemler ve zengin litolojik çeşitlilik nedeniyle hem bilimsel araştırmalar hem de maden kaynakları açısından yüksek potansiyele sahip bir jeodinamik alan niteliğindedir.

KAYNAKLAR

- Afshar, F. A. (1965). Tunceli-Bingöl bölgesi jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 65, 31–41.
- Asutay, H. J. (1985). Baskil (Elazığ) çevresinin jeolojik ve petrografik incelenmesi [Yayımlanmamış doktora tezi]. Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Ankara.
- Çılğın, Z. (2006). Ovacık Ovası (Tunceli) ve çevresinin jeomorfolojisi [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Çılğın, Z. (2013). Ovacık Ovası (Tunceli) ve Munzur Dağları'nın güneybatı yamaçlarının jeomorfolojisinde buzullaşmaların etkisi. Kilis 7 Aralık Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 3(6), 103–121.
- Granit, S., & Şener, M. (1986). Tunceli Havzası'nın jeolojisi ve petrol olanakları (MTA Rapor No. 8116) [Yayımlanmamış rapor]. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Karvar, G. (2019). Tunceli (Merkez) karbonatlı kaynak çökellerinde (tufa/traverten) sedimantolojik ve jeokimyasal incelemeler [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Kaya, B. (2019). Aktuluk (Tunceli) çevresi tufa çökellerinin sedimantolojik ve jeokimyasal özellikleri [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ketin, İ. (1945). 64/3 paftası ile 63/1 paftası üzerinde Ovacık bölgesine ait jeolojik rapor (MTA Rapor No. 1628) [Basılmamış rapor]. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Önal, A. Ö., & Sançar, T. (2021). Munzur ve Pülümür vadilerinde (Tunceli) bulunan sıcak ve mineralli kaynakların bölgenin yapısal unsurları ile ilişkisi ve hidrojeokimyasal özellikleri. International Journal of Pure and Applied Sciences, 7(1), 113–131.
- Önal, A. Ö., & Şeren, A. (2018). Eskigedik-Kızılçayır (Ovacık-Tunceli) kromit oluşumlarının jeolojik özellikleri ve yer radarı yöntemiyle cevherli alanların belirlenmesi. International Journal of Pure and Applied Sciences, 4(1), 84–94.
- Özen Balaban, T., Öztekin Okan, Ö., Öztüfekçi Önal, A., & Sançar, T. (2020). Pertek (Tunceli) jeotermal alanının antropojenik kirliliğinin değerlendirmesi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 63(1), 83–96. <https://doi.org/10.25288/tjb.594151>
- Özgül, N. (1981). Munzur Dağları'nın jeolojisi (MTA Rapor No. 6995). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Öztüfekçi Önal, A., & Akkuş, A. (2019). Tunceli-Pertek jeotermal alanındaki sıcak ve soğuk suların hidrojeokimyasal özellikleri. International Journal of Pure and Applied Sciences, 5(1), 53–71.
- Öztüfekçi Önal, A., Örgün Tutay, Y., Önal, A., Aktağ, A., & Çimen, O. (2013). Tunceli'deki cevherleşmeler ve madencilik faaliyetlerinin su sistemine etkileri. 2. Tıbbi Jeoloji Çalıştayı, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.

- Sağıroğlu, A. (1986). Kızıldağ-Elazığ cevherleşmelerinin özellikleri ve kökeni. *Jeoloji Mühendisliği*, 29, 13–21.
- Sağıroğlu, A. (1992). Pertek-Demürek (Tunceli) skarn tipi manyetit ve ilişkili bakır cevherleşmeleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 35, 63–70.
- Sar, A., Rizeli, M. E., & Ertürk, M. A. (2022). Geçityaka Köyü (Tunceli) çevresindeki Elazığ Magmatik Kompleksi'ne ait kayaçların petrografik ve jeokimyasal özellikleri. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 9(2), 680–694.
- Şaşmaz, A. (1987). Billurik Dere (Elazığ) cevherleşmelerinin özellikleri ve kökeni [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yazgan, E. (1984). Geodynamic evolution of the Eastern Taurus region. In O. Tekeli & M. C. Göncüoğlu (Eds.), *Geology of the Taurus Belt* (pp. 199–208). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.



BOZCAADA’NIN JEOSİT ALANLARININ ÖN DEĞERLENDİRİLMESİ*

Ozan İŞÇÖZÜCÜ¹
Mustafa AVCIOĞLU²

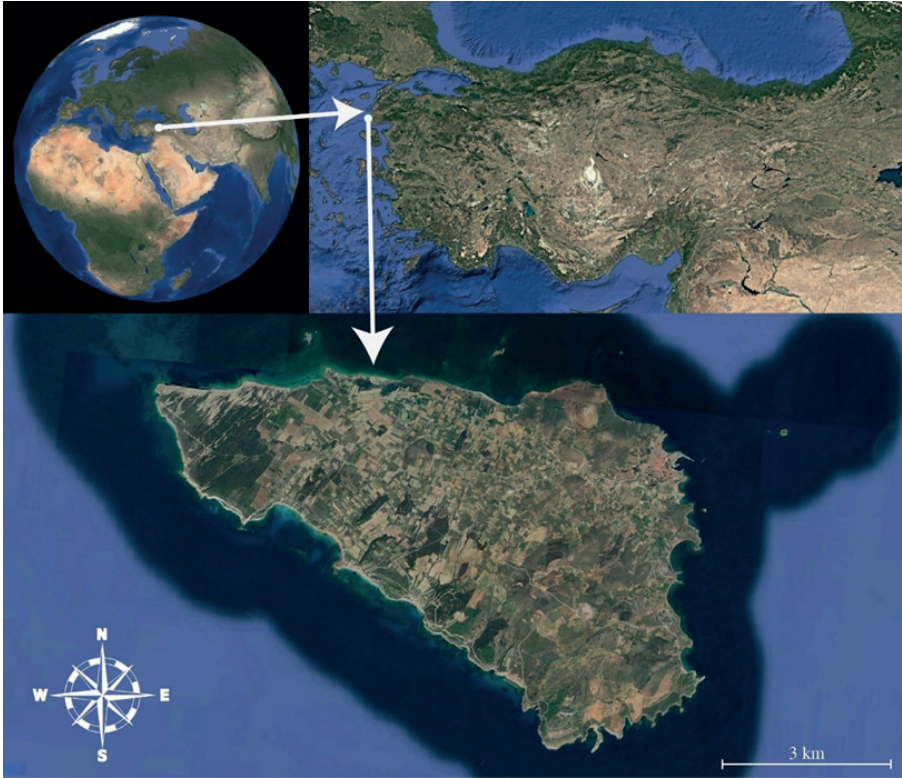
1 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, Çanakkale. <https://orcid.org/0009-0002-2710-1373>

2 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi Coğrafya Bölümü, Çanakkale. <https://orcid.org/0000-0002-1590-0832>

* Çalışma, ilk yazarın “Bozcaada’nın Jeolojik - Jeomorfolojik Unsurlarının Jeosit ve Jeomiras Olarak Değerlendirilmesi” başlıklı Yüksek Lisans tez çalışmasının bir bölümünden oluşmaktadır (Danışman 2. Yazardır).

1. GİRİŞ

Ege Denizi'nde bulunan Bozcaada (Şekil 1), Anadolu Yarımadasının yaklaşık 5,5 km batısında bulunmaktadır. Yaklaşık 37 km²'lik bir yüzölçümüne sahip olan ada Türkiye'nin büyük ikinci adasıdır ve yerbilimleri (jeomorfoloji/jeoloji) açısından önemli bir alandır. Adada jeolojik çok farklı türde ve yaşta kayalar yüzlek vermekte ve bu jeolojik zenginliğin yanında jeomorfolojik zenginlik de aynı derecededir. Çünkü adanın farklı lokasyonlarında volkanik yapılar, kıyı şekilleri, aşındırma ürünleri gözlemlenebilir. Bozcaada'da yapılan yerbilimleri çalışmalarında genellikle jeolojik ve jeomorfolojik özelliklerin ortaya konulması amaçlanmıştır (Hocaoğlu, 1985; Temel ve Çiftçi, 2002; Kesgin ve Varol, 2003; Kiyak ve Erginal, 2010; Erginal vd., 2010; Ekinci vd., 2010; Erginal vd. 2013; Avcioğlu vd. 2012; Öztürk vd., 2014; Avcioğlu, 2015; Avcioğlu, 2016). Bununla birlikte bu unsurların jeosit/jeomiras olduğuna dair başlangıç çalışması olabilecek bir çalışma Erginal (2008) tarafından yayınlanmıştır. Kitabın bu bölümünde ise tüm bu unsurlar; ayrıntılı açıklanacak, yerbilimleri açısından önemi vurgulanacaktır.



Şekil 1. Bozcaada'nın konumu (15.06.2026 tarihli GoogleEarth görüntüsü kullanarak hazırlanmıştır).

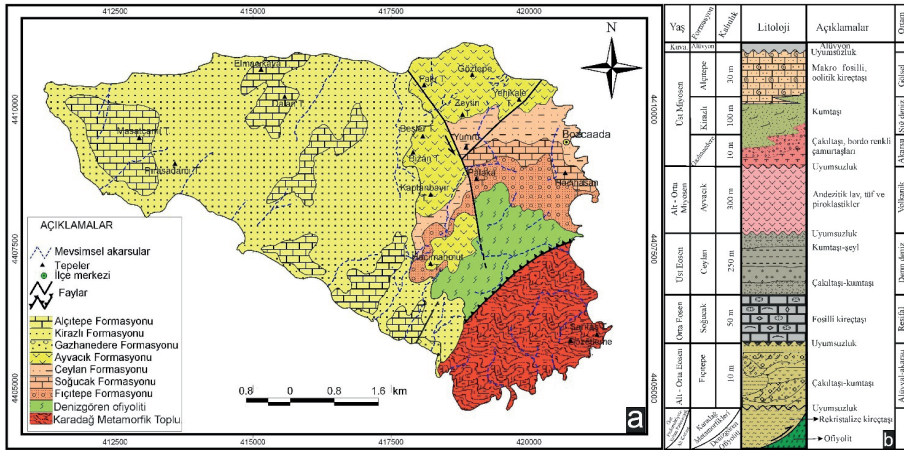
Konu kapsamında öncelikle jeosit kavramının da açıklanması önemlidir: Jeolojik bir birimin/yapının oluşum sürecini açıklayabilecek mineral-kayaç-fosilleşme, istif, yer şekli, fay-kıvrım gibi yapılar, kayaların kökenini açıklayabilecek doku türleri; bilimsel bir belge olarak kabul edilmektedir ve bunlara dayalı yapılan açıklamalar da o birim veya unsurun bir jeosit olduğunu göstermektedir (Wimbledon, 1996; ProGEO Group, 1998; Kazancı, 2006). Bu terim 1990'lı yıllarından itibaren Uluslararası Jeolojik Bilimler Birliği (International Union of Geological Sciences) tarafınca dünyanın 1. Sınıf jeolojik formasyonlarını, yeryuvarın geçirdiği evrimleri, yeryuvarın şekillenmesinde önemli olan süreçleri ya da olağan dışı jeomorfolojik yapıları açıklayabilmek ve tanıtabilmek için de kullanılmıştır (Gray, 1994). Bu kavram Reynard'ın 2004 yılında yapmış olduğu çalışmaya göre, kendini etrafında bulunan diğer unsurlardan bilim perspektifinde doğrudan ayırıştırabilen ve yeryuvarın jeolojik ve jeomorfolojik geçmişini taşıyan yapılardır. Bu yapılar, bulundukları konuma, belirli bir gruba veya süreçlerinin devamlılığına göre (pasif ve aktif) türlü sınıflandırmalara tabii tutulmuştur. Reynard (2004), jeositlerin her türlü doğal ve beşeri etmenlerden olumsuz etkilenebileceğini göz önünde bulundurarak, Dünya'da varlığını sürdürebilmeleri için gerekli koruma metotları ile muhafaza altında tutulmaları gerektiğini vurgulamıştır.

Jeosit kavramı ile birlikte kullanılan jeomiras kavramı ise Brilha (2016)'ya göre jeomiras kavramı, doğal oluşum yerinde ve bu yerden taşınmış olabilecek her türlü bilimsel değere sahip jeolojik unsurları ifade etmektedir. Dünya'nın geçmişten günümüze gelişimini ve değişimini bizlere en iyi aktaran; nesnel, metodolojik ve objektif bir değerlendirme ile bilimselliği sağlama alınmış alanlar için kullanılmaktadır. Özet olarak bu iki kavramı kısaca karşılaştıracak olursak; her jeomiras unsuru ayrıca bir jeosittir ama her jeosit bir jeomiras olarak kabul edilmemelidir.

Jeosit olarak değerlendirilen alanları ekonomiye ve yer bilimlerini envanterine dahil edildiği varsayıldığında elde edilen sonuçlara göre jeoturizm kavramı da ortaya çıkmaktadır. Bu kavram ise Robinson (2023)'e göre; turistlerin iç ve dış etmenler tarafından doğal olarak meydana gelen jeomorfolojik güzellikleri inceleyip görsel bir deneyim yaşamak maksadıyla gerçekleştirdikleri alternatif bir turizm çeşididir. Jeoturizm için yer şekillerinin hiçbir antropojenik etkiye maruz kalmamış olması önemli bir koşuldur. Turistler, turlar ile jeomiras ve jeosit alanlarını gezerek bu alanlar ve bu alanlardaki doğal jeomorfolojik unsurların hangi doğal olay ve süreçler neticesinde meydana gelerek nasıl günümüze ulaştığı ve nasıl kendilerinden sonraki nesillere aktarılacağı hakkında bilgi edinirler şeklinde aktarılmıştır.

2.1. Bozcaada'nın Jeolojisinin Jeosit Olarak Değerlendirilmesi

Bozcaada fiziki coğrafya açısından zengin olmakla birlikte jeolojik anlamda da tam anlamıyla tektonik, stratigrafik, litolojik ve kronostratigrafik bir zenginlik sunmaktadır (Şekil 3). Adada kaya birimlerinin temelini Geç-Prekambriyen – Erken Paleozoyik yaşlı Karadağ Metamorfikleri oluşturmaktadır. Bu birimin üzerine tektonik bir dokanakla (bindirme) Alt Kretase yaşlı Denizgören ofiyolitine ait birimler gelmektedir (Temel ve Çiftçi, 2002). Bu iki birim ile dokanağı olan tüm sedimanter birimler heterolitik uyumsuzluk ile bu birimleri üzerlemektedir. Alt-Orta Eosen yaşlı çakıltı kumtaşı kırıntılarında oluşan Fıçıtepe Formasyonu, adanın doğu kıyılarında başlayarak Hacımahmut Tepesi'ne kadar D-B yönünde mostra vermektedir ve buradaki yüzlek alanı GB'ya doğru dönmektedir (Temel ve Çiftçi, 2002). Bu formasyonu ortam değişikliğini de gösteren resifal alanlara özgü yapıdaki olan fosillerin bulunduğu Soğucak Formasyonu'na ait kireçtaşları üzerlemektedir ve bu birimi Ceylan Formasyonu örtmektedir (Temel ve Çiftçi, 2002). Alt-orta Miyosen döneminde ise kendinden daha yaşlı birimleri keserek gelen Ayvacık volkanitleri gözlenmektedir. Üst Miyosen döneminde ise sırasıyla Gazhanedere, Kirazlı ve Alçıtepe formasyonları kendilerinden daha yaşlı birimler ile uyumsuz bir dokanak göstermekte ve kendi içlerinde ise yanal ve düşey yönlerde geçişler göstermektedir (Temel ve Çiftçi, 2002). Adada özellikle kıyı bölgelerinde ve dere yataklarında gözlenen Holosen yaşlı alüvyon birimleri uyumsuz dokanaklarla tüm yaşlı birimleri örtmektedir.



Adanın jeolojisi yukarıda özetlenmiştir. Bu yüzleklere göre adada jeolojik olarak 3 farklı sınıfa ayrılan kaya türlerinden sedimanter (bu sınıfın hem kimyasal hem de kırıntılı türleri gözlenmektedir), hem magmatik (bu sınıfın volkanik türü adada gözlenebilir) hem de metamorfik kayalar yüzlek vermektedir (Şekil 3). Ayrıca jeolojik zaman olarak da (Geç Prekambriyen - Holosen) bir jeolojik tarih sunmaktadır. Dolayısıyla yerbilimleri açısından jeolojik anlamda Bozcaada önemli bir jeosit topluluğunu sunduğu belirtilebilir.

2.2. Jeomorfolojik Unsurların Jeosit Olarak Değerlendirilmesi

Önceki bölümde ele alınan jeolojik zenginlik, jeomorfolojik özelliklere de yansımış ve adada çok farklı jeomiras olarak da ele alınabilecek unsurlar gözlenmektedir. Çalışmamızın temeli de bu iki alanın özelliklerini ortaya konulmasını, değerlendirilmesini ve korunma açısından ele alınmasını kapsamaktadır.

2.2.1. Doğal köprü (Kemer) ve Doğal Alanlarının Korunmasının Yerbilimleri Açısından Önemi

Bozcaada Batı Burnu kıyılarında gözlenen (Şekil 2'de çok köşeli yıldız ile gösterilmiştir), kireçtaşı-kumtaşı dokanağında oluşmuş olan köprü (Şekil 4) muhtemelen litolojik farklılıktan dolayı bu şeklini almıştır.

Jeomorfolojik anlamda köprüler; doğal süreçler sonucunda genellikle yatay konumda üst üste gelmiş tabakalanmaların farklı litolojik özelliklerinden kaynaklı olarak daha alt seviyelerinin aşınması ve üst kesimdekilerin bütün halde kalması şeklindedir. Ya da doğal oluşmuş bir köprü masif haldeki bir kütlenin yeraltı kaynaklı veya yüzey suların yüzeydeki aşındırması sonucunda ortaya çıkan yapı olarak tanımlanabilir (Polat ve Ege, 2024; Mesci, 2026).

Bozcaada Batı Burnu'nda gözlenen köprünün oluşumu için; yaş olarak son buzul maksimumun sonlanması ile Holosen başlangıcı olarak açıklanabilir. Bu oluşum mekanizması ise deniz aşındırmasına bağlı olduğu belirtilebilir. Oluşumunun başlangıcı olarak Holosen başlangıcından sonrası belirtmemizin sebebi ise bu zamandan itibaren bu kıyılarda deniz sularının artık gözlenmeye başlanması olarak açıklanabilir. Anakara ile arasındaki bölgede derinliğin ortalama 25 metre olması ve bu oluşuğun bulunduğu alanda su derinliğinin de fazla olmaması, Küresel deniz seviyesini gösterir grafiklere bakılarak (Bebek ve Avcioğlu, 2022) bu alanda yaklaşık 9 bin yıl önce deniz sularının bulunmadığı göstermektedir. Dolayısıyla doğal köprü yapısının oluşum yaşı olarak maksimum 9 bin yıl verilebilir. Jeomorfolojik bir jeosit olarak önem arz eden bu yapı artık gözlenmemektedir ve yok olmasının sebebi de muhtemelen yine deniz kaynaklı aşındırmalardır. Bu şekildeki yapıların korunması yeryuvarı mirası için önemli olduğu adadaki bu lokasyona örnek vererek açıklanabilir. Çünkü binlerce yıl içerisinde oluşan bu yapının artık geri gelmesi mümkün

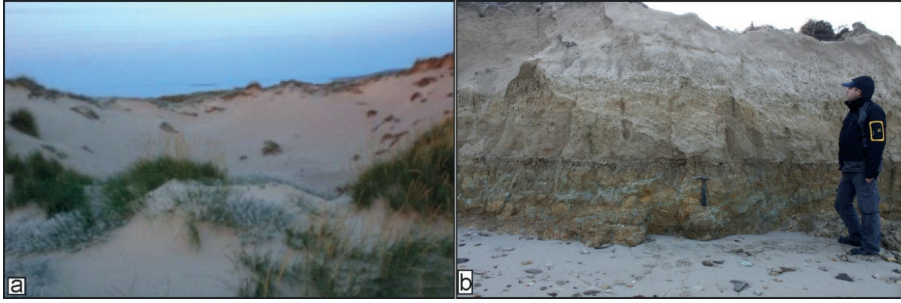
değildir. Buna benzer bir yapının tekrardan gözlenebilmesi için yine onlarca yüzyılın geçmesi gerekmektedir.



Şekil 4. Bozcaada batı Burnu'nda gözlenen doğal köprü (kemer) (Fotograf M. Avcıoğlu arşivinden alınmıştır).

2.2.2. Kumul Alanının Jeosit Olarak Değerlendirilmesi

Bozcaada'nın batındaki burunda kireçtaşı birimleri üzerinde (Şekil 2'de kesik çizgiler ile gösterilmiş alan) gözlenen kumullar bulunmaktadır. Genellikle rüzgar aşındırması sonucunda oluşan kumullar incelendiğinde Kirazlı Formasyonu'nu oluşturan kırıntılar ile benzerlik göstermektedir ki bu da bu birimin bu bölgede ayrıştığını açıklayabilir. Kumul alanının morfolojisi incelendiğinde farklı yapıdaki deflasyon çukurları (tabak veya elipsoidal şekilli kumul depresyonları ya da fincan şekilli deflasyonlar) (Şekil 5a), ön kumul taraçaları ile sırt ve hendek gibi değişik şekiller gözlenmektedir (Avcıoğlu vd., 2015). Bu birim temel kayaları üzerlemektedir ve bazı alanlarda kalınlığı 11-13 metreye kadar ulaşmaktadır (Avcıoğlu vd, 2015), (Şekil 5b). Adadaki kumul morfolojik açıdan incelendiğinde, farklı yapıların dar bir alanda gözlendiğini görülmektedir ve bu da kumul alanının bir jeosit olarak değerlendirilmesi için yeterlidir.

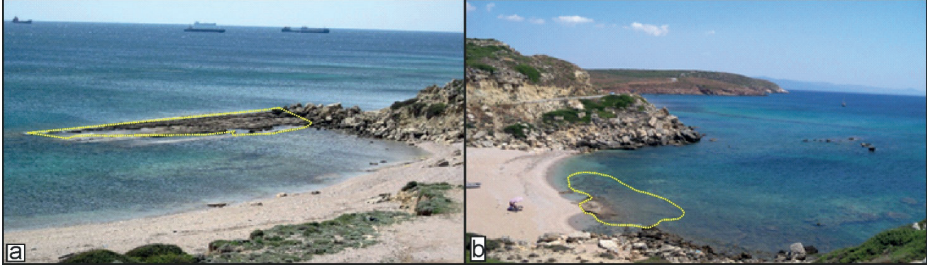


Şekil 5. Batı Burnu kumullarına örnek alanlar. **a)** Deflasyon çukuru, **b)** Temel birimler üzerleyen yaklaşık 1 metre kalınlığa sahip kumul istif.

2.2.3. Yalıtışlarının Jeosit Olarak Değerlendirilmesi

Tane boyutları kırıntılardan bloklara kadar değişiklik gösterebilen, kıyılarda deniz suyunun gelgit aralığı içerisinde meydana gelen, iri malzemenin temel iskeleti oluşturup ufak malzemelerin ise aralarda kum ve su ile ıslanması sonucu bütün hale gelen sedimanter tortul tabakasına verilen isimdir (Avşarcan, 2012). Ayrıca yalıtışları gelgit zonu içindeki kıyı bölgesindeki kırıntı birimlerinin genellikle CaCO_3 özellikli çimento ile tutturulması sonucunda oluşan spesifik kırıntılı sedimanter kayalara verilen bir isimdir (Russel ve McIntyre, 1965; Scoffin ve Stoddart, 1987; Pirazzoli, 2007; McLean, 2011).

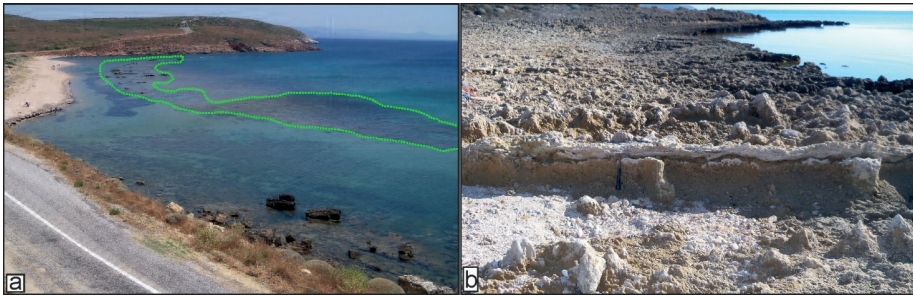
Bozcaada'nın güney kıyılarında iki farklı bölgede yalıtış yüzleği gözlenmektedir (Şekil 2'de dört köşeli yıldız ile gösterilmiş alanlar). Bu iki yalıtış istifinin batıda yüzlek vereni Hacımahmutdere Yalıtış'dır (Şekil 6a). Bu yalıtış örneklerinden Erginal vd. (2010) tarafından yapılan analitik analizler sonucunda oluşum yaşları OSL tarihlendirme yöntemine göre $5,41 \pm 0,58$ ile $0,33 \pm 0,05$ arasıdır ve SEM-EDX analizlerine dayalı olarak da birimi oluşturan tanelerin mikritik, menisküs ve biyolojik kökenli çimento ile birbirine bağlandığı ortaya konulmuştur. Bu verilerin elde edilmesi ayrıca adada yapılan yer bilimleri çalışmalarında analitik analizlerin de başlangıcı olarak görülebilir. Bu lokasyonun hemen doğusunda kalan istif İçmecedere Yalıtış'dır (Şekil 6b). Bu yalıtış üzerinden elde edilen C-14 yaşlandırma sonuçlarına göre çimentolanmanın yaklaşık günümüzden 3860 yıl önce başladığı ve günümüzden 950-750 yıl öncesine kadar devam ettiği Avcioğlu (2016) tarafından belirtilmiştir. Adada gözlenen bu istifler Holosen zamanı kıyı dinamikleri açısından önem arz etmektedir. Bu sebepten dolayı da bu lokasyonlar jeosit alanı olarak kabul edilmektedir.



Şekil 6. Bozcaada kıyılarında yüzlek veren yalıtışları. a) Hacımahmutdere Yalıtışı, b) İçmecedere Yalıtışı. Sarı kesikli çizgilerle gösterilmiş alanlar yalıtışı birimlerini göstermektedir.

2.2.4. Eolinitlerin Jeosit Olarak Değerlendirilmesi

Sediman tanelerinin rüzgar ile taşınması ve bir bölgede yığılmasını takiben oluşan kumulların bir jeolojik zaman içerisinde meteorik suların içerisindeki kimyasal maddeler yardımı ile birbirine genellikle CaCO_3 çimento malzemesi ile bağlanması sonucunda oluşan birimlere eolinit (fosil kumul) adı verilmektedir. Bozcaada'nın güney kıyılarında iki farklı alanda bu oluşuklar yüzlek vermektedir (Şekil 2). Doğudaki Yaylıca Eolinitleri (Şekil 7a) deniz içerisinde bulunmaktadır ve bazı parçaları su yüzeyinde gözlenmektedir. Buradaki birimden yapılan analizler sonucunda tanelerin menisküs, köprü ve mikritik zarf çimento ile birbirine bağlandığı görülmektedir (Avcıoğlu, 2016) Batıdaki kalan Zunguma Burnu Eolinitleri (Şekil 7b) üzerinden OSL yöntemi ile yapılan tarihlendirmelere göre buradaki eolinitlerin $16,18 \pm 1,70$ bin yıl ile $24,21 \pm 1,53$ bin yıl arasında oluştuğu belirtilmiştir (Kıyak ve Erginal, 2010). Bunun yanı sıra Zunguma Burnu Eolinitleri içerisinde ayrıca rizolit olarak tanımlanan fosil bitki kökleri de gözlenmektedir (Şekil 7b). Bu rizolitlerin gözlenmesi buradaki eolinitlerin yerbilimleri açısından önemini de artırmakta ve sadece jeosit değil bu bölgenin bir jeomiras olarak ele alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Bozcaada kıyılarında yüzlek veren yalıtışları eolinitler. a) Yaylıca Eolinitleri, sarı çizgiler ile gösterilmiştir alan eolinit yüzleşine karşılık gelmektedir, şeklin üst kesimlerinde kalan eolinitlerin bir bölümü deniz seviyesinin üzerindedir, geneli su altında kalmıştır. b) Zunguma Eolinitleri ve şeklin orta kesiminde sağ-sol yönlü olarak uzanmış rizolit.

2.2.5. Volkanizma ürünü Tepelerin Jeosit Olarak Değerlendirilmesi

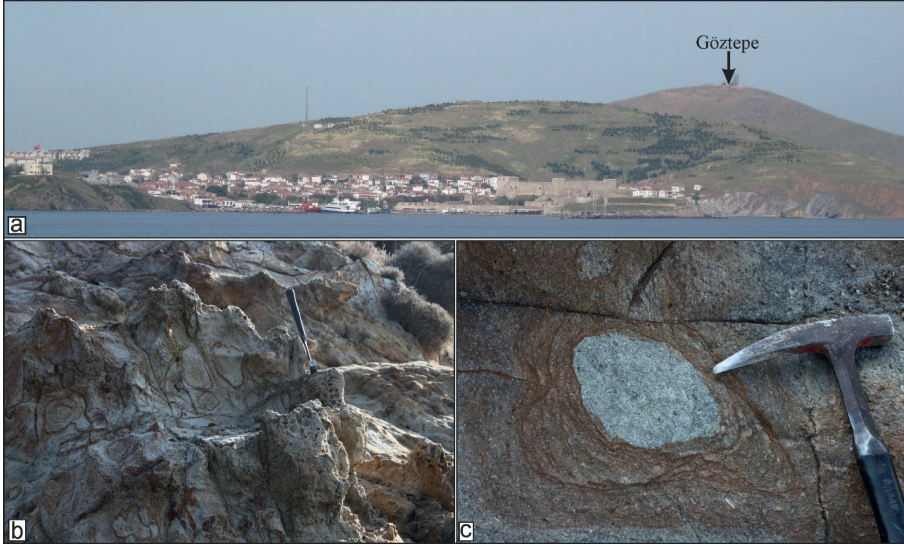
Adanın kuzeydoğu kesimlerinde bulunan Göztepe (Şekil 2'de beş köşeli yıldız ile gösterilmiştir; Şekil 8), adanın en yüksek noktasını da oluşturmuştur. Bu tepe ve çevre alanı jeolojik olarak incelendiğinde (Şekil 3) Alt - Orta Miyosen yaşlı volkanizma sonucu bölgeye yerleşmiştir ve andezitik lav, tuf ve piroklastiklerden oluşmaktadır (Temel ve Çiftçi, 2002). Ayvacık volkanitleri kendisinden yaşlı tüm birimleri keser ve kendisinden genç olan birimler tarafından uyumsuz bir dokanakla örtülür. Bu birimin jeosit olarak değerlendirilmesinin sebebi litolojik olarak aşınmaya karşı dirençlilik göstermesi ve bir volkan konisi olmadığı halde volkanizma ürünü olarak yine de bir tepe alanı oluşturmasıdır (Şekil 8a). Ayrıca bu birim üzerinde volkanik yapıların anlatılabileceği farklı oluşumlar bulunmaktadır:

- Kayanın sol ve orta-alt kesimlerinde belirgin şekilde görülen demir oksit renkli, iç içe geçmiş halkamsı halkalar Liesegang halkaları (Şekil 8b; çekicin sol tarafı),

- Jeolog çekicinin hemen sağ alt kısmında ve ön plandaki blokların yüzeyinde yoğun süngerimsi, gözenekli bir doku bulunmaktadır. Bunlarda veziküler (gözenekli) doku / alveolar ayrışmayı göstermektedir (Şekil 8b)

- Şekil 8c'ye bakıldığında ise magmatizma olaylarının evrelerini gösterir bir anklav benzeri yapı gözlenmektedir. Yalnız bu yapı Şekil 8b'deki yapılar ile birlikte ele alındığında burada gözlenen ana kayanın alterasyon basamaklarıdır, dolayısıyla bu yapı anklav değildir. Burada merkezdeki açık gri oval alan halen altere olmamış kayanın kökenini gösterir parçadır. Dışarıdan içeriye doğru ise kimyasal bir çözünme ve oksitlenme gözlenmektedir.

Bu alandaki volkanizma ürünü unsurlar sadece bu özellikleri ile jeosit olarak kendilerini göstermektedir.



Şekil 8. a) Volkanizma sonucu oluşmuş Göztepe'nin uzaktan görünümü. **b)** Volkanizma ürünleri ve üzerlerinde gözlenen alterasyonlar, **c)** Orijinal kaya örneği ve dışarıdan içeri doğru ayrışma örneği.

2.3. İnsan Etkileşimli Jeosit: Tuz Havuzu

Zunguma Burnu'nda yüzlek veren eolinitler sedimentolojik olarak incelendiğinde genellikle kum boyutundaki tanelerden oluşmaktadır ve bu tanelerin birbirine bağlanması da CaCO_3 'ün çimento görevi görmesi ile sağlanmaktadır. Birim incelendiğinde kırılmaya karşı direnç göstermektedir. Ama kazılması için gerekli ekipman sağlandığında düzgün hatlar boyunca şekil verilebilmektedir. Bu durum muhtemelen eski zamanlarda değerlendirilmiş Şekil 9'da olduğu gibi suyun toplanması için havuzlar oluşturulmuştur. Bu da buradaki birimin ayrıca antropojenik olarak değerlendirildiğini ve bir jeosit unsuru olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. *Zunguma Eolintieri’ni kazarak oluşturulmuş tuz ocağı (siyah ok ile gösterilmiştir).*

3. SONUÇ

Bu bölümde bahsedilen jeosit alanlarının uluslararası olarak da tanıtılması hem ülkenin ekonomik bir değer kazancına hem de jeoturizm alanlarının artmasına olanak sağlayacaktır. Dolayısıyla bu ön değerlendirmeleri yapılan jeositlerin değerlendirilebilmesi ve uluslararası tanınırlığının artırılabilmesi için güncel olan farklı jeosit-jeomiras değerlendirme modelleri üzerinden ayrıntılı ele alınması önem arz etmektedir. Bozcaada’nın bu değerlerinin ortaya konulması için Brilha (2016) ve Vujičić vd. (2011) gibi değerlendirme modelleri uygunluk bakımından değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmeler sonucunda bu alanların yerbilimleri açısından Brilha (2016)’ya göre temsil ediciliği; bütünlüğü; nadirliği; ve bilimsel bilgi verebilmesi gibi unsurlar kantitatif olarak değerlendirilmiş olacaktır. Bunun yanı sıra Vujičić vd. (2011)’e göre jeositlerin değerlendirilmesi sonucunda da elde edilecek sayısal değerlere göre hazırlanacak matrise dayalı alanın geleceğe dönük koruma ve uygun jeoturizm politikaları ortaya konulabilir. Bu değerlendirmeler sonucunda korunması gereken alanların belirlenerek yerel yönetimlerin ve ilgili kurumların dikkatine sunulması da önem arz etmektedir. Çünkü bu alanların turistler veya burada yaşayan halkın antropojenik bir etkiye maruz bırakmamaları konusunda bilinçlendirilmeleri gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Avcıoğlu M. (2016). *Gökçeada, Bozcaada ve Çanakkale Boğazı Kıyılarının Kuvaterner Jeolojisi ve Jeomorfolojisi* (Doktora Tezi). Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye.
- Avcıoğlu M., Erginal A. E., Yiğitbaş E. (2012). Bozcaada Eolinitlerinin Petrografik ve Jeokimyasal İncelemesi: Çökel Kayıtlarının Geç Pleistosen Kıyı Dinamikleri Açısından Göstergeleri. 3. *Ulusal Jeomorfoloji Sempozyumu (UJES 2012)*, Hatay, Türkiye, 4 - 06 Ekim 2012, ss.18-19.
- Avcıoğlu M., Erginal A. E., Öztürk M. Z., Demirci A., Ekinci Y. L., Türkeş M., Karabacak E., Sungur A., Özcan H., Rezzan E., Erginal G. (2015). Physico Chemical Features and Subsurface Nature of Coastal Dunes on Bozcaada Island NW Turkey. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 2(1), 1-15. <http://doi.org/10.30897/ijegeo.303171>
- Avşarcan, B. (2012). Yalıtaşı Oluşumuyla İlgili Kuramlar ve Türkiye Kıyılarındaki Yalıtaşlarının Bazı Özellikleri. *Journal of Geography*, <https://izlik.org/JA48KK96LM>
- Bebek, M. ve Avcıoğlu M. (2022). Son Buzul Maksimum'dan Günümüze Kıyı Çizgisi Değişimlerine Örnek: Çanakkale Boğazı. *Acta Natura et Scientia*, 3(2), 85-92. <https://doi.org/10.29329/actanatsci.2022.352.01>
- Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage*, 8, 119–134 <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
- Ekinci Y. L., Demirci A., Erginal A. E., Avcıoğlu M. & Ergen T. Ö. (2010). Depositional Characteristics And Subsurface Geometry of the Bozcaada Coastal Eolianite Using Eri and Geomorphological Data. *The 2nd International Geography Symposium, Mediterranean Environment*, Antalya, Türkiye, 2 - 05 Haziran 2010, ss.89.
- Erginal, A.E. (2008). Coğrafya ve Jeoloji Laboratuvarı Bozcaada: Keşfedilmemiş Yerbilimsel Değerler. *Bozcaada Değerleri Sempozyumu Bildirileri*, s, 173-181.
- Erginal A.E., Kiyak N.G. ve Öztürk B. (2010). Investigation Of Beachrock Using Microanalyses And OSL Dating: A Case Study from Bozcaada Island, Turkey. *Journal Of Coastal Research*, 26(2), 350-358.
- Erginal A.E., Ekinci Y.L., Demirci A., Avcıoğlu M., Ozturk M.Z., Turkes M. ve Yiğitbaş E. (2013). *Journal of Coastal Research*, 29 (1), 78-85. <http://doi.org/10.2112/jcoastres-d-11-00100.1>
- Erginal, A.E., Kiyak, N.G. ve Öztürk B. (2010). Investigation of beachrock using microanalyses and OSL dating: A case study from Bozcaada Island, Turkey. *Journal of Coastal Research*, 26 (2): 350-358.
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons.

- Hocaoglu, Ş. (1985). Bozcaada'nın Fiziki Coğrafyası. *Ege Coğrafya Dergisi*, 3(1). <https://izlik.org/JA36HA68MP>
- İlgar, A., Sezen, Demirci E., Duru, M., Pehlivan, Ş., Dönmez, M. ve Akçay, A.E. (2008). *1:100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları No:100, Çanakkale H15 – H16 Paftaları*. MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi Yayınları, Ankara. 24 s.
- Kazancı, N. (2006). Jeoparklar ve nitelikleri. *Geçmişten Geleceğe Köprü Yanık Ülke Kula Sempozyumu, Bildiriler*, 1 – 3 Eylül 2006, 73 – 81, Kula.
- Kesgin, Y. ve Varol, B. (2003). Gökçeada ve Bozcaada'nın Tersiyer Jeolojisi (Çanakkale), Türkiye. *MTA Dergisi*, 126(49-67). https://dergi.mta.gov.tr/files/articles/299/tr/20150512164458_299_227f5ed2.pdf
- Kiyak, N.G. ve Erginal, A.E. (2010). Optical Stimulated Luminescence Dating Study of Eolianite on the Island of Bozcaada, Turkey: Preliminary Results. *Journal of Coastal Research*, 26(4): 673-680.
- McLean, R.F. (2011). Eolianite. In: Hopley D. (Ed.), *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process*, David Hopley, Springer, Dordrecht-London, United Kingdom. 107-111.
- Mesci, B.L. (2026). Delikkaya (Bakırcıoğlu, Yıldızeli, Sivas) Doğal Traverten Köprüsü: Korunması Gereken Bir Jeolojik Miras. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 69(4), 119-130. <https://doi.org/10.25288/tjb.1790603>
- Öztürk, M., Erginal, A. ve Öztürk, B. (2014). Batı Burnu kumul sahasında (Bozcaada) rüzgâr etkinliği ve kum taşınım ilişkileri. *Türk Coğrafya Dergisi*, 56, 55-64. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tcd/article/227790>
- Pirazzoli, P.A. (2007). Geomorphological Indicators. In: Scott Elias (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science Volume I*, Elsevier Academic Press, Oxford. 2974-2983.
- Polat, S. ve Ege, İ. (2024). Diyardin (Ağrı) Doğal Traverten Köprülerinin Jeomorfolojisi ve Oluşumları, Doğu Anadolu, Türkiye. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 67(2), 231-252. <https://doi.org/10.25288/tjb.1390845>
- ProGeo Group, (1998). A first attempt at a geosites framework for Europe -an IUGS initiative to support recognition of World heritage and European geodiversity. *Geologica Balcanica*, 28, 5-32.
- Robinson, A.M. (2023). Jeoturizm: Kime Jeoturist Denir? (Y. Çiftçi, çev.). *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 66(1), 149-158. <https://izlik.org/JA58CX43UT>
- Reynard, E., (2004). Geosite. In Goudie, A., S., (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*, vol. 1, Routledge, London, p. 440.
- Russel, R.G. ve McIntire, W.G. (1965). Southern hemisphere beach rock. *Geographical Review*, 55, 17-45.
- Scoffin, T.P. ve Stoddart, D.R. (1987). Beachrock and intertidal cements. In: Scoffin, T.P. (Ed.), *An Introduction to Carbonate Sediments and Rocks*. Blackie Publishing Company, Glasgow, UK. 401-425.

- Temel R. Ö. ve Çiftçi N. B. (2002). Gelibolu Yarımadası, Gökçeada ve Bozcaada Tersiyer Çökellerinin Stratigrafisi ve Ortamsal Özellikleri. *TPJD Bülteni*. 14(2), 17-40.
- Tunç, İ.O., Yiğitbaş, E., Şengün, F., Wazeck, J., Hofmann, M. & Linnemann U. (2012). U-Pb zircon geochronology of northern metamorphic massifs in the Biga Peninsula (NW Anatolia-Turkey): new data and a new approach to understand the tectonostratigraphy of the region, *Geodinamica Acta*, 25(3-4): 202-225.
- Vujić, M.D., Vasiljević, D.A., Marković, S.B., Hose, T.A., Lukić, T., Hadžić, O. ve Janićević, S. (2011). Preliminary Geosite Assessment Model (GAM) and Its Application on Fruška Gora Mountain, Potential Geotourism Destination of Serbia. *Acta Geographica Slovenica*, 51(2), 361-376.
- Wimbledon, W. (1996). Notional site selection, a stop on the road to a European Geosite List. *Geologico Balcanica*, 26, 15-27.
- Yiğitbaş, E., Şengün, F. ve Tunç İ. O. (2014). *Biga Yarımadası (KB Anadolu)'nda Neojen Öncesi Tektonik Birlikler ve Bölgenin Jeodinamik Evrimine Yeni Bir Bakış*. TÜBİTAK Raporu, Proje No: 110Y281 (Basılmamış).



GIDA GÜVENLİĞİ VE TAĞŞIŞ TESPİTİNDE MALDI-TOF MS VE MAKİNE ÖĞRENMESİNİN ENTEGRASYONU

Nursel SÖYLEMEZ MİLLİ¹

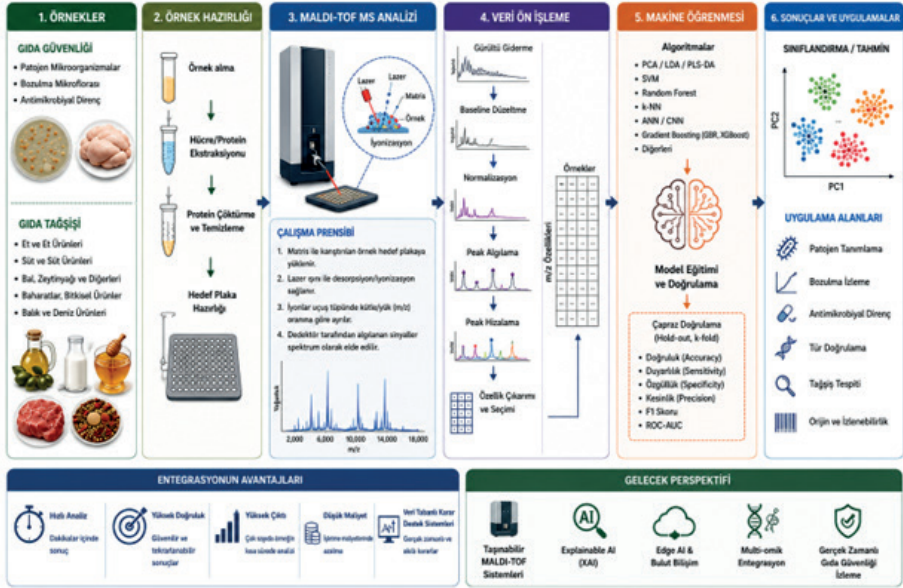
¹ Öğr. Gör. Dr. Nursel SÖYLEMEZ MİLLİ, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi,
Bilimsel, Endüstriyel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi (BETUM).
ORCID: 0000-0003-3610-2706

1. Giriş

Gıda güvenliği ve gıda otantikliği, günümüzde hem düzenleyici otoritelerin hem de tüketicilerin öncelikli gündem maddeleri arasında yer almaktadır. Gıda güvenliği, gıdaların üretimden tüketime kadar tüm aşamalarda insan sağlığına zarar vermeyecek biçimde hazırlanmasını ifade ederken, gıda tağşişi, bir gıdaya ekonomik çıkar amacıyla düşük değerli bileşenlerin katılması, değerli bileşenlerin uzaklaştırılması ya da ürünün gerçek kimliğinin gizlenmesi anlamına gelir. Tür ikamesi, seyreltme ve beyan dışı katkı gibi uygulamalar, ekonomik kaybın yanı sıra dinî/helal duyarlılıklar, alerjenler ve mikrobiyolojik riskler bakımından da önemli sonuçlar doğurabilmektedir (Song vd., 2024).

Gıda otantikasyonunda geleneksel olarak kültür temelli mikrobiyolojik yöntemler, polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) temelli teknikler ve kromatografik/spektroskopik yöntemler kullanılmıştır (Söylemez Milli vd., 2023). Bu yöntemler yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, uzun analiz süresi, uzman personel ve maliyetli altyapı gereksinimi gibi kısıtlar taşımaktadır. Küresel gıda tedarik zincirlerinin uzaması ve tağşiş vakalarının çeşitlenmesi, sahada uygulanabilir, hızlı ve düşük maliyetli analiz teknolojilerine olan gereksinimi artırmıştır. Bu bağlamda kütle spektrometrisi temelli yaklaşımlar, özellikle matris destekli lazer desorpsiyon/ionizasyon uçuş zamanlı kütle spektrometrisi (MALDI-TOF MS), hızlı ve güvenilir tanımlama olanağı sunmuştur (Song vd., 2024).

MALDI-TOF MS örneğe özgü spektral parmak izleri üretirken, makine öğrenmesi bu karmaşık ve yüksek boyutlu verilerin yüksek doğrulukla sınıflandırılmasına imkân tanır. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerin gıda bilimindeki uygulamaları hızla genişlemekte olup (Miyazawa vd., 2022; Zhu vd., 2021), spektrometrik verilerle bütünleştirilmeleri gıda güvenliği ve tağşiş tespitinde yeni bir aşamayı temsil etmektedir. Bu bölümün amacı, MALDI-TOF MS ve makine öğrenmesinin bu alandaki uygulamalarını, iki teknolojinin entegrasyonunu ve bu bütünleşik yaklaşımın sunduğu olanaklar ile karşılaşılan zorlukları güncel literatür ışığında derlemektir. Bu bütünleşik yaklaşımın genel iş akışı Şekil 1’de özetlenmektedir.



Şekil 1. Gıda güvenliği ve taşıyış tespitinde MALDI-TOF MS ve makine öğrenmesinin entegrasyonuna dayalı genel iş akışı: örnekler, örnek hazırlığı, MALDI-TOF MS analizi, veri ön işleme, makine öğrenmesi ile sonuçlar ve uygulamalar.

2. MALDI-TOF MS Teknolojisinin Temelleri

MALDI-TOF MS, büyük biyomoleküllerin yumuşak iyonizasyonuna olanak tanıyan matris destekli lazer desorpsiyon/iyonizasyon tekniğinin geliştirilmesiyle biyoanalitik alanında önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur. Başlangıçta mikrobiyoloji ve klinik tanıda yaygınlaşan yöntem, zamanla gıda bilimi ve otantikasyon çalışmalarında da güçlü bir araç hâline gelmiştir. Yöntemin çalışma prensibi birbirini izleyen birkaç aşamadan oluşur: analit, lazer enerjisini verimli biçimde soğuran uygun bir matris ile karıştırılır. Lazer atışıyla matris molekülleri enerjiyi soğurarak desorpsiyona uğrar ve analit moleküllerine yük aktararak yumuşak bir iyonizasyon sağlar. Oluşan iyonlar bir elektrik alanında hızlandırılarak kütle/yük oranlarına bağlı olarak farklı uçuş sürelerinde dedektöre ulaşır. Son olarak bu sinyaller, m/z değerlerine karşı yoğunlukları gösteren ve örneğe özgü bir parmak izi niteliği taşıyan bir kütle spektrumuna dönüştürülür. Matris türü, örnek/matris oranı ve numune hazırlama protokolü, elde edilecek spektrumun kalitesini doğrudan belirleyen etkenlerdir (Bruker Daltonik, 2012).

MALDI-TOF MS ile tanımlama, elde edilen spektrumun referans spektral kütüphanelerle karşılaştırılması ilkesine dayanır. Ticari sistemlerde geniş referans veri tabanları kullanılırken, gıda mikrobiyotası ve tür temelli otantikasyon gibi özel uygulamalarda çoğu zaman amaca yönelik,

özgün spektral kütüphanelerin oluşturulması gerekmektedir. Referans veri tabanlarının kapsamı ve güncelliği, tanımlama doğruluğunu belirleyen en önemli etkenlerden biridir (Song vd., 2024).

Kısa analiz süresi, örnek başına düşük maliyet, minimal numune hazırlığı, yüksek çıktı kapasitesi ve tekrarlanabilirlik, MALDI-TOF MS'yi rutin izleme ve tarama için elverişli kılan başlıca avantajlardır. Nitekim yöntem, gıda kaynaklı patojenlerin tespit süresini belirgin biçimde kısaltabilmektedir (Karasu Yalçın vd., 2021). Öte yandan yöntemin performansı, referans veri tabanlarının kapsamına, spektral verinin cihazlar ve laboratuvarlar arası tekrarlanabilirliğine ve karmaşık gıda matrislerinde karşılaşılan girişimlere bağlıdır. Isıl işlem görmüş örneklerde protein bozunması ve düşük oranlı taşıyışta sinyal zayıflaması, doğruluğu sınırlayabilen başlıca etkenlerdir.

3. Gıda Güvenliğinde MALDI-TOF MS Uygulamaları

MALDI-TOF MS, gıda kaynaklı patojen bakterilerin tür ve alt tür düzeyinde hızlı biçimde tanımlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Protein parmak izlerine dayalı bu yaklaşım, geleneksel kültür temelli yöntemlere kıyasla tanımlama süresini belirgin biçimde kısaltır ve *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Campylobacter* spp. ile *Staphylococcus aureus* gibi öncelikli patojenlerin tanımlanmasında güvenilir sonuçlar verir. Özellikle soğukta muhafaza edilen gıdalarda önemli bir patojen olan *Listeria monocytogenes* için, MALDI-TOF kütle spektrometrisinin tespit süresini kısaltabildiği gösterilmiştir (Karasu Yalçın vd., 2021). Makine öğrenmesinin mikrobiyolojik tanımlamaya entegrasyonu ise bu analizlerin doğruluğunu ve otomasyonunu daha da artırmaktadır (Asnicar vd., 2024).

Yöntem, gıdalarda bozulmaya yol açan mikrobiyotanın belirlenmesinde de etkilidir. Bozulma etkeni bakterilerin (örneğin *Pseudomonas* türleri, laktik asit bakterileri ve *Enterobacteriaceae* üyeleri) protein parmak izlerine dayalı olarak tür düzeyinde tanımlanmasına olanak tanır. Vakumla paketlenmiş tavuk göğsü etinin soğukta muhafazası sırasında bozulmanın MALDI-TOF MS ile mikrobiyolojik, fizikokimyasal ve duyuşal değerlendirmelerle bütünleşik biçimde izlenebildiği (Söylemez Milli, 2026a) ve 4 °C'de depolanan tavuk göğsünde bozulma mikrobiyota profillerinin MALDI-TOF MS ile karakterize edilebildiği (Söylemez Milli, 2026b) gösterilmiştir. Yöntem yalnızca et ürünlerinde değil, süt ürünlerinde de kullanılmaktadır. Van otlu peynirinin mikrobiyotasının belirlenerek seçilen laktik asit bakterilerinin starter kültür potansiyelinin değerlendirilebildiği rapor edilmiştir (Söylemez Milli vd., 2025a).

Depolama süresince mikrobiyal yükteki değişimin ve baskın bozulma etkenlerinin izlenmesi, ürünlerin raf ömrünün belirlenmesine doğrudan katkı sağlar. MALDI-TOF MS temelli mikrobiyota takibi, pH, toplam uçucu

bazık azot ve lipit oksidasyonu gibi fizikokimyasal göstergeler ve duyuusal verilerle birlikte değerlendirildiğinde depolama sürecine ilişkin bütünleşik ve dinamik bir tablo sunar (Söylemez Milli, 2026a, 2026b). Ayrıca nesnelerin interneti (IoT) ve makine öğrenmesi temelli sistemlerin gıda tazeliğinin gerçek zamanlı izlenmesinde kullanılabildiği bildirilmekte olup (Hebbar, 2020), bu yaklaşımların MALDI-TOF MS temelli mikrobiyota verisiyle birleştirilmesi raf ömrü yönetiminde tamamlayıcı bir çerçeve oluşturabilir.

4. Gıda Tağışının Tespitinde MALDI-TOF MS

Gıda tağışının tespitinde MALDI-TOF MS, protein ve peptit temelli parmak izleri aracılığıyla tür doğrulama ve otantikasyon olanağı sunar (Song vd., 2024). Et ve et ürünlerinde tür doğrulama, hem ekonomik hem de dinî/helal açıdan büyük önem taşır. Nitekim et ve jelatinin hayvansal kaynağının MALDI-TOF MS ile belirlenebildiği (Flaudrops vd., 2015), protein profillemesiyle sığır, domuz, tavuk ve balık etlerinin (hatta sığır ırklarının) ayırt edilerek olası biyobelirteçlerin ortaya konabildiği (Verbisck vd., 2026), protein kütle profillerine dayalı kapsamlı bir referans veri tabanı ile türlerinin güvenilir biçimde tanımlanabildiği (Rau vd., 2021), elektronik burun ile gaz sensörü temelli makine öğrenmesi yaklaşımlarında sığır, tavuk ve domuz ürünlerinin yüksek doğrulukla ayırt edilebildiği (Putri vd., 2023; Söylemez Milli vd., 2025b) ve taşınabilir hiperspektral görüntüleme ile makine öğrenmesinin birleştirilmesiyle et türü otantikasyonunun başarıyla gerçekleştirilebildiği (Yu vd., 2025) gösterilmiştir.

Süt ve süt ürünleri, tür ikamesi ve seyreltme gibi tağış biçimlerine açıktır. MALDI-TOF MS'nin eşek sütünün kontaminasyon ve tağışının izlenmesinde (Cunsolo vd., 2013), bozulmamış fosfolipitlerin yasa dışı inek sütü tağışının belirteci olarak kullanılmasında (Calvano vd., 2013), manda mozzarellasında inek sütü ve coğrafi kökenin kazein imza peptitleri üzerinden izlenmesinde (Caira vd., 2016) ve feta ile mozzarella peynirinde hayvan türünün hızlı tanımlanmasında (Rau vd., 2020) başarıyla uygulandığı gösterilmiştir. Ayrıca tam spektral verinin çoklu regresyon analiziyle birleştirilmesiyle inek, keçi ve koyun sütlerinin karışık örneklerde ayırt edilebildiği (Liland vd., 2009) ve memeli, insan ile formül sütlerinin peptit haritaları üzerinden profillenebildiği (Di Francesco vd., 2018) rapor edilmiştir. Orta kızılötesi spektroskopi ile makine öğrenmesinin birlikte kullanıldığı çalışmalarda manda, keçi ve deve sütünde tağışın tanımlanıp nicelenebildiği de rapor edilmiştir (Chu vd., 2023). Benzer biçimde bal, şeker şuruplarıyla tağış sıklıkla maruz kalan bir üründür. Gaz sensörü verileri üzerinde makine öğrenmesinin uygulanmasıyla balda tağışın hızlı biçimde tespit edilebildiği (Milli vd., 2025) ve MALDI-TOF MS'nin protein parmak izlerine dayalı olarak balın coğrafi kökeninin belirlenmesinde kullanılabildiği (Wang vd., 2009) gösterilmiştir.

Zeytinyağı, yüksek ekonomik değeri nedeniyle taşıdığı açık ürünlerin başında gelir. BME688 gaz sensörü matrisi ve makine öğrenmesinin birlikte kullanıldığı bir çalışmada zeytinyağı taşımasının başarıyla saptandığı (Parlak vd., 2025), MALDI-TOF MS özelinde ise sızma zeytinyağında fındık yağı katkısının polar bileşenlerin ve gizli fındık proteinlerinin analiziyle belirlenebildiği (Calvano vd., 2010; De Ceglie vd., 2014) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisinin çok değişkenli/makine öğrenmesi yöntemleriyle birleştirilmesinin sızma zeytinyağı taşımasının belirlenmesinde etkili olduğu (Xu vd., 2018; Scatigno & Festa, 2022) gösterilmiştir. Farklı kategorilerdeki bitkisel yağların trigliserit (TAG) parmak izi veri tabanının MALDI-TOF MS ile oluşturulabildiği de bildirilmiştir (Saraiva vd., 2009). Balık ve deniz ürünlerinde tür doğrulama da etiket uyumsuzluklarının ortaya çıkarılması bakımından önemlidir. MALDI-TOF MS'nin balık derisi analizi yoluyla tür ayrımında (Bi vd., 2019), karides türlerinin referans veri tabanı üzerinden yüksek doğrulukla tanımlanmasında (Salla & Murray, 2013) ve balık kasının depolama durumunun eksuda analiziyle izlenmesinde (Wang vd., 2022) kullanılabildiği, titreşimsel spektroskopi ve makine öğrenmesinin ise deniz kaynaklı yağların bileşim analizinde ve niteliklendirilmesinde başarılı sonuçlar verdiği (Karunathilaka vd., 2020) bildirilmiştir. Benzer biçimde, şarap gibi yüksek değerli ürünlerin otantikliği de spektral verilerin makine öğrenmesiyle değerlendirilmesiyle doğrulanabilmektedir (da Costa vd., 2021).

Tür doğrulamanın ötesinde, MALDI-TOF MS gıdaların coğrafi kökeninin ve otantikliğinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Kemometri ile birleştirildiğinde elde edilen spektrumlar sayısal biçime dönüştürülerek köken veri tabanları oluşturulabilir. Bu kapsamda farklı kökenli bademlerin fosfolipit profilleri üzerinden (Shen vd., 2013), üzüm çeşitlerinin protein ve metabolit değişimleri üzerinden (Fraige vd., 2015) ve Hırvatistan zeytinyağlarının trigliserit profilleri üzerinden (Peršurić vd., 2017) coğrafi köken ve çeşit ayrımının yapılabildiği gösterilmiştir. Bu tür otantiklik çalışmalarının güvenilirliği, toplanan referans örneklerin temsil gücüne ve oluşturulan veri tabanlarının kapsamına bağlıdır.

Tablo 1. MALDI-TOF MS'nin gıda taşıyıcı ve otantikasyon alanındaki başlıca uygulamaları

Ürün Grubu	Uygulama ve Öne Çıkan Bulgu	Kaynak
Süt ve süt ürünleri	Farklı türlere ait süt ve peynirlerin ayrımı; kazein ve fosfolipit belirteçleriyle tür temelli süt taşıyıcısının belirlenmesi	Liland vd. (2009); Calvano vd. (2013); Caira vd. (2016); Di Francesco vd. (2018); Rau vd. (2020); Cunsolo vd. (2013)
Yenilebilir yağlar	Sızma zeytinyağında fındık yağı katkısının ve trigliserit (TAG) parmak izinin belirlenmesi	Calvano vd. (2010); De Ceglie vd. (2014); Saraiva vd. (2009)
Et ve et ürünleri	Hayvansal kaynağın jelatin belirteci üzerinden belirlenmesi; protein profillemesiyle tür ve ırk ayrımı	Flaudrops vd. (2015); Rau vd. (2021); Verbisck vd. (2026)
Balık ve deniz ürünleri	Balık derisi ve karides türlerinin tür düzeyinde ayrımı ile balık kasının depolama durumunun izlenmesi	Bi vd. (2019); Salla & Murray (2013); Wang vd. (2022)
Bal	Protein parmak izine dayalı coğrafi köken belirleme	Wang vd. (2009)
Coğrafi köken ve otantiklik	Badem, üzüm ve zeytinyağında köken ve çeşit ayrımı	Shen vd. (2013); Fraige vd. (2015); Peršurić vd. (2017)

Helal otantikasyon, özellikle domuz kaynaklı bileşenlerin güvenilir biçimde tespitini gerektirir ve tür doğrulama yöntemlerinin en hassas uygulama alanlarından biridir. Zayıflatılmış toplam yansıma-FTIR (ATR-FTIR) spektroskopisi ile kemometrik yaklaşımların birlikte kullanıldığı çalışmalarda ton balığı yağında taşıyıcının helal doğrulama amacıyla hızlı biçimde saptanabildiği (İrnawati vd., 2023) ve makine öğrenmesi destekli FTIR spektroskopisinin ton balığı yağındaki domuz yağı taşıyıcısını belirleyebildiği (Windarsih vd., 2024) gösterilmiştir. DNA temelli yöntemler de bu alanda yüksek özgüllüklü, tamamlayıcı çözümler sunar. Nitekim sığır eti karışımlarında domuz eti kalıntısının dijital PCR ile nicel olarak belirlenmesi (Söylemez Milli vd., 2023) ve tür özgüllüğüne yönelik biyoinformatik primer tasarımı (Söylemez Milli vd., 2021) helal otantikasyonuna doğrudan katkı sağlamaktadır. MALDI-TOF MS'nin çeşitli gıda gruplarındaki başlıca taşıyıcı ve otantikasyon uygulamaları Tablo 1'de özetlenmektedir.

5. Gıda Güvenliği ve Taşıyıcı Tespitinde Makine Öğrenmesi Yaklaşımları

Makine öğrenmesi, açık kurallar tanımlamak yerine verideki istatistiksel örüntüleri öğrenerek sınıflandırma ve tahmin görevlerini yerine getiren algoritmalar bütünü olarak tanımlanır. Öğrenme biçimine göre, etiketli veriyle model kuran denetimli öğrenme, verinin doğal yapısını etiket olmaksızın keşfeden denetimsiz öğrenme ve ödül temelli geri bildirimle karar politikası öğrenen pekiştirmeli öğrenme olmak üzere üç temel yaklaşıma ayrılır (Ongsulee, 2017; Osisanwo vd., 2017). Gıda bilimi alanında bu

yöntemler, kalite kontrolü, bozulma tespiti, raf ömrü tahmini ve otantikasyon başta olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesinde giderek artan biçimde kullanılmaktadır (Esmaily vd., 2024).

Denetimli öğrenme algoritmaları, gıda güvenliği ve taşıma çalışmalarında en sık başvurulan yöntem grubunu oluşturur. Destek vektör makineleri (Support Vector Machine, SVM), sınıfları en geniş marjla ayıran optimum hiper düzlemi belirleyerek özellikle yüksek boyutlu ve doğrusal olarak ayrılabilen verilerde yüksek başarımlar sağlar (Cervantes vd., 2020; Abdullah & Abdulazeez, 2021). Karar ağaçları (Decision Tree, DT), veriyi ardışık kurallarla bölerek yüksek yorumlanabilirlik sunar ve topluluk (ensemble) yöntemlerinin yapı taşıdır (Shetty vd., 2022). Bu ağaçların çok sayıda örnekleminin birleştirilmesiyle kurulan rastgele orman (Random Forest, RF) ise aşırı öğrenmeye karşı dayanıklılığı ve genelleme başarısıyla öne çıkar (Breiman, 2001). k-en yakın komşu (k-Nearest Neighbors, k-NN) algoritması, örnekleri öznitelik uzayındaki komşuluk ilişkisine göre etiketleyen görece basit ancak etkili bir yöntem olup karşılaştırmalı değerlendirmelerde çoğunlukla referans model olarak kullanılır (Bansal vd., 2022). Yapay sinir ağları (Artificial Neural Network, ANN), karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri katmanlı yapılar aracılığıyla modelleyerek derin öğrenmenin kavramsal temelini oluşturur (Montesinos López vd., 2022). Gradyan artırma (Gradient Boosting) yöntemleri ise zayıf öğrencilerin ardışık ve hata odaklı biçimde birleştirilmesiyle özellikle yapılandırılmış (tablolastırılmış) verilerde üstün doğruluk elde eder (Kumar & Bhatnagar, 2022).

Derin öğrenme, çok katmanlı yapay sinir ağları aracılığıyla ham veriden hiyerarşik ve soyut temsilleri elde etmeye yönelik çıkarımına gerek kalmadan öğrenerek yeterli büyüklükteki veri kümelerinde geleneksel yöntemlere kıyasla üstün başarımlar sergiler (LeCun vd., 2015; Chollet, 2017; Nafea vd., 2024). Bu mimariler içinde evrimsel sinir ağları (Convolutional Neural Network, CNN), uzamsal ve yerel örüntüleri etkin biçimde yakalayıp görüntü ve spektral veri analizinde kullanılırken (Zhu vd., 2021), yinelemeli sinir ağları (Recurrent Neural Network, RNN) ve uzun-kısa süreli bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) yapıları ardışık ve zaman bağımlı verilerin, örneğin depolama ve süreç izleme verilerinin modellenmesinde tercih edilir (Lindemann vd., 2021). Spektral verilerin yüksek boyutluluğu nedeniyle, modelleme öncesinde boyut indirgeme ve öznitelik seçimi kritik önem taşır. Bu adımlar hesaplama maliyetini azaltır, aşırı öğrenme riskini sınırlar ve modelin genelleme başarısını artırır. Temel bileşen analizi (Principal Component Analysis, PCA) bu amaçla en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.

Tablo 2. *Sensör ve spektroskopi temelli makine öğrenmesi ile yürütülen taşıyış ve otantikasyon çalışmaları*

Ürün / Amaç	Yöntem	Kaynak
Distile alkollü içecek / metanol taraması	BME688 gaz sensörü matrisi + makine öğrenmesi	Parlak vd. (2026)
Bal / taşıyış tespiti	Gaz sensörü ve elektronik dil + makine öğrenmesi	Milli vd. (2025); Bougrini vd. (2016)
Zeytinyağı / taşıyış tespiti	Gaz sensörü ve FTIR spektroskopisi + makine öğrenmesi	Parlak vd. (2025); Xu vd. (2018); Scatigno & Festa (2022)
Et / tür tanıma	Elektronik burun, gaz sensörü ve hiperspektral görüntüleme + makine öğrenmesi	Putri vd. (2023); Yu vd. (2025); Söylemez Milli vd. (2025b)
Süt (manda/keçi/deve) / taşıyış	Orta kızılötesi / ATR-FTIR spektroskopisi + makine öğrenmesi	Chu vd. (2023); Balan vd. (2020)
Balık yağı / domuz yağı taşıyışı (helal)	FTIR spektroskopisi + makine öğrenmesi	Irnowati vd. (2023); Windarsih vd. (2024)

Uygulama düzeyinde makine öğrenmesi, gıda güvenliği izlemesinde patojen ve bozulma etkenlerinin belirlenmesi ile güvenlik açısından kritik bileşenlerin taranmasında etkin biçimde kullanılmaktadır. Örneğin, BME688 gaz sensörü matrisi ile makine öğrenmesinin birlikte uygulandığı bir çalışmada distile alkollü içeceklerde metanolün sahada hızlı biçimde taranabildiği gösterilmiştir (Parlak vd., 2026). Taşıyış özelinde ise bal (Milli vd., 2025), zeytinyağı (Parlak vd., 2025) ve et (Söylemez Milli vd., 2025b) gibi taşıyışe açık ürünlerde yüksek doğrulukla taşıyış tespiti ve tür ayrımı gerçekleştirilmiştir. Bu bulgular, sensör ve spektroskopik verilerin makine öğrenmesiyle değerlendirilmesinin gıda güvenliği ve otantikasyonundaki potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Sensör ve spektroskopi temelli makine öğrenmesi ile yürütülen çalışmalardan bazıları Tablo 2’de derlenmiştir.

6. MALDI-TOF MS ve Makine Öğrenmesinin Entegrasyonu

MALDI-TOF MS ile elde edilen spektrumlar, yüksek boyutlu ve bilgi açısından zengin yapıları nedeniyle makine öğrenmesi yöntemleri için uygun bir veri kaynağı oluşturur. Ancak bu verilerin güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi, bir dizi ön işleme adımının titizlikle uygulanmasını gerektirir: gürültü giderme ile gerçek sinyaller belirginleştirilir, temel çizgi düzeltme ile matris ve arka plan kaymaları giderilir, normalizasyon ile spektrumlar arası yoğunluk farkları ortadan kaldırılır, ardından anlamlı m/z tepeleri belirlenir, örnekler arası kaymalar için tepe hizalama uygulanır ve son olarak ayırt edici özelliklerin çıkarılıp seçilmesiyle model için uygun veri elde edilir.

Ön işlenmiş spektral özellikler, denetimli öğrenme algoritmalarıyla (ör. SVM, RF, ANN) sınıflandırılarak tür ayrımı, tağşiş tespiti ve mikrobiyal tiplendirme gibi görevler gerçekleştirilir, model başarımı doğruluk, duyarlılık, özgüllük ve F1 skoru gibi ölçütlerle değerlendirilir ve çapraz doğrulama ile sınanır. Makine öğrenmesinin mikrobiyolojik tanımlamaya entegrasyonu, eşik temelli geleneksel yorumlamaya kıyasla daha esnek ve genellenebilir modeller sunmaktadır (Asnicar vd., 2024). Tağşiş özelinde, sensör ve spektroskopik verilerde geliştirilen model kurma ve doğrulama yaklaşımları (Parlak vd., 2026; Milli vd., 2025) MALDI-TOF spektral verilerinin değerlendirilmesine kavramsal çerçeve sunar. MALDI-TOF temelli proteomik verilerin diğer omik ve spektroskopik veri katmanlarıyla birleştirilmesi ise otantikasyon kararlarının daha kapsamlı biçimde alınmasına olanak tanır.

MALDI-TOF MS ve makine öğrenmesi yaklaşımı, FTIR, yakın kızılötesi (NIR), Raman ve orta kızılötesi spektroskopi gibi yöntemlerin makine öğrenmesiyle birleştirildiği uygulamalarla birlikte değerlendirildiğinde, gıda otantikasyonu için tamamlayıcı bir yöntem manzarası oluşturur (Chu vd., 2023; Windarsih vd., 2024). Elektronik burun ve gaz sensörü temelli yaklaşımlar da hız ve saha uygulanabilirliği açısından bu manzaranın önemli bileşenleridir (Söylemez Milli vd., 2025b). Bununla birlikte, bütünleşik yaklaşımın önündeki başlıca kısıtlılıklar, standartlaştırılmış ve yeterince geniş referans veri tabanlarının eksikliği, spektral verinin cihazlar arası değişkenliği, sınırlı örneklem büyüklüğü ve modellerin farklı koşullara genellenmesindeki güçlüklerdir. Ortak veri tabanlarının oluşturulması, veri paylaşım protokollerinin standartlaştırılması ve derin öğrenme yöntemlerinin yaygınlaştırılması bu kısıtlılıkların aşılmasında belirleyici olacaktır.

7. Gelecek Perspektifi

Gıda güvenliği ve tağşiş tespitinde yapay zekâ temelli yaklaşımların geleceği, hem model hem de altyapı tarafındaki gelişmelerle şekillenmektedir. Model tarafında, açıklanabilir yapay zekâ (Explainable AI, XAI), model kararlarının şeffaf ve yorumlanabilir hâle getirilmesini sağlayarak gıda güvenliği ve düzenleyici izleme gibi kritik alanlarda güven ve hesap verebilirliği güçlendirmektedir. Büyük ölçekli önceden eğitilmiş temel modeller (foundation models) sınırlı etiketli veriyle dahi güçlü temsil öğrenimi sunarak spektral ve çok kaynaklı gıda verilerinin analizinde yeni olanaklar açarken, federatif öğrenme (federated learning) verinin merkezileştirilmeden farklı laboratuvarlar arasında ortak model eğitimine imkân tanıyarak, veri gizliliğini koruyup referans veri tabanlarının genişletilmesine katkı sağlayabilir.

Altyapı tarafında ise uç (edge) yapay zekâ ve taşınabilir MALDI-TOF sistemleri, analiz kapasitesinin sahaya taşınmasını sağlayarak gerçek zamanlı

tarama ve izlemeyi mümkün kılmaktadır. Nesnelerin interneti ve makine öğrenmesinin birlikte kullanıldığı sistemler, gıda güvenliği ve tazelik izlemesinde gerçek zamanlı ve otomatik çözümler sunmaktadır (Alfian vd., 2020). Tüm bu bileşenlerin (spektrometrik yöntemler, sensörler, referans veri tabanları ve yapay zekâ modelleri) bütünleştiği dijital bir ekosistem, uçtan uca izlenebilir, şeffaf ve sürdürülebilir bir gıda güvenliği altyapısının temelini oluşturabilir.

8. Sonuç

MALDI-TOF MS ve makine öğrenmesinin bütünleşik kullanımı, gıda güvenliği ve taşıyıcı tespitinde hız, doğruluk ve otomasyonu bir araya getiren güçlü bir yaklaşımdır. Mevcut çalışmalar, MALDI-TOF MS'nin mikrobiyal tanımlama ve otantikasyonda, makine öğrenmesinin ise taşıyıcı tespiti ve tür ayrımında etkin sonuçlar verdiğini, iki teknolojinin bütünleştirilmesinin ise bu alanlarda doğruluğu ve otomasyonu daha da artırdığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, standartlaştırılmış ve yeterince geniş referans veri tabanlarının eksikliği ile yöntemsel standardizasyon ihtiyacı, yaygın uygulamanın önündeki başlıca engeller olmayı sürdürmektedir. Referans veri tabanlarının geliştirilmesi ve standardizasyonun sağlanmasıyla birlikte, bu entegrasyonun düzenleyici izleme ve rutin kalite kontrol uygulamalarında yaygınlaşması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdullah, D. M., & Abdulazeez, A. M. (2021). Machine learning applications based on SVM classification: A review. *Qubahan Academic Journal*, 1(2), 81-90.
- Alfian, G., Syafrudin, M., Farooq, U., Ma'arif, M. R., Syaekhoni, M. A., Fitriyani, N. L., Lee, J., & Rhee, J. (2020). Improving efficiency of RFID-based traceability system for perishable food by utilizing IoT sensors and machine learning model. *Food Control*, 110, 107016.
- Asnicar, F., Thomas, A. M., Passerini, A., Waldron, L., & Segata, N. (2024). Machine learning for microbiologists. *Nature Reviews Microbiology*, 22(4), 191-205.
- Balan, B., Dhaulaniya, A. S., Jamwal, R., Yadav, A., Kelly, S., Cannavan, A., & Singh, D. K. (2020). Rapid detection and quantification of sucrose adulteration in cow milk using attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy coupled with multivariate analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 240, 118628.
- Bansal, M., Goyal, A., & Choudhary, A. (2022). A comparative analysis of K-nearest neighbor, genetic, support vector machine, decision tree, and long short term memory algorithms in machine learning. *Decision Analytics Journal*, 3, 100071.
- Bi, H., Zhong, C., Shao, M., Wang, C., Yi, J., Qiao, L., & Zhang, J. (2019). Differentiation and authentication of fishes at the species level through analysis of fish skin by matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 33(16), 1336-1343.
- Bougrini, M., Tahri, K., Saidi, T., El Alami El Hassani, N., Bouchikhi, B., & El Bari, N. (2016). Classification of honey according to geographical and botanical origins and detection of its adulteration using voltammetric electronic tongue. *Food Analytical Methods*, 9(8), 2161-2173.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Bruker Daltonik GmbH. (2012). Bruker guide to MALDI sample preparation: MALDI preparation protocols (Revision 2). Bruker Daltonik GmbH. <https://www.care-bdal.com>
- Caira, S., Pinto, G., Nicolai, M. A., Chianese, L., & Addeo, F. (2016). Simultaneously tracing the geographical origin and presence of bovine milk in Italian water buffalo mozzarella cheese using MALDI-TOF data of casein signature peptides. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(20), 5609-5621.
- Calvano, C. D., Aresta, A., & Zambonin, C. G. (2010). Detection of hazelnut oil in extra-virgin olive oil by analysis of polar components by micro-solid phase extraction based on hydrophilic liquid chromatography and MALDI-TOF mass spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry*, 45(9), 981-988.
- Calvano, C. D., De Ceglie, C., Aresta, A., Facchini, L. A., & Zambonin, C. G. (2013). MALDI-TOF mass spectrometric determination of intact phospholipids as

- markers of illegal bovine milk adulteration of high-quality milk. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 405(5), 1641-1649.
- Cervantes, J., Garcia-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L., & Lopez, A. (2020). A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. *Neurocomputing*, 408, 189-215.
- Chollet, F. (2017). *Deep Learning with Python*. Manning Publications.
- Chu, C., Wang, H., Luo, X., Wen, P., Nan, L., Du, C., Fan, Y., Gao, D., Wang, D., & Yang, Z. (2023). Possible alternatives: Identifying and quantifying adulteration in buffalo, goat, and camel milk using mid-infrared spectroscopy combined with modern statistical machine learning methods. *Foods*, 12(20), 3856.
- Cunsolo, V., Muccilli, V., Saletti, R., & Foti, S. (2013). MALDI-TOF mass spectrometry for the monitoring of she-donkey's milk contamination or adulteration. *Journal of Mass Spectrometry*, 48(2). <https://doi.org/10.1002/jms.3138>
- da Costa, N. L., Valentin, L. A., Castro, I. A., & Barbosa, R. M. (2021). Predictive modeling for wine authenticity using a machine learning approach. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 157-162.
- De Ceglie, C., Calvano, C. D., & Zambonin, C. G. (2014). Determination of hidden hazelnut oil proteins in extra virgin olive oil by cold acetone precipitation followed by in-solution tryptic digestion and MALDI-TOF-MS analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(39), 9401-9409.
- Di Francesco, L., Di Girolamo, F., Mennini, M., Masotti, A., Salvatori, G., Rigon, G., ... Putignani, L. (2018). A MALDI-TOF MS approach for mammalian, human, and formula milks' profiling. *Nutrients*, 10(9).
- Esmaily, R., Razavi, M. A., & Razavi, S. H. (2024). A step forward in food science, technology and industry using artificial intelligence. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104286.
- Flaudrops, C., Armstrong, N., Raoult, D., & Chabrière, E. (2015). Determination of the animal origin of meat and gelatin by MALDI-TOF-MS. *Journal of Food Composition and Analysis*, 41, 104-112.
- Fraige, K., Gonzalez-Fernandez, R., Carrilho, E., & Jorin-Novo, J. V. (2015). Metabolite and proteome changes during the ripening of Syrah and Cabernet Sauvignon grape varieties cultured in a nontraditional wine region in Brazil. *Journal of Proteomics*, 113, 206-225.
- Hebbbar, N. (2020). Freshness of food detection using IoT and machine learning. 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE), 1-3.
- Irnawati, I., Windarsih, A., Indrianingsih, A. W., Apriyana, W., Ratnawati, Y. A., & Rohman, A. (2023). Rapid detection of tuna fish oil adulteration using FTIR-ATR spectroscopy and chemometrics for halal authentication. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 13(4), 231-239.
- Karasu Yalçın, S., Söylemez Milli, N., Eren, Ö., & Eryaşar Örer, K. (2021). Reducing

- time in detection of *Listeria monocytogenes* from food by MALDI-TOF mass spectrometry. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04869-6>
- Karunathilaka, S. R., Yakes, B. J., Choi, S. H., Brückner, L. E. A., & Mossoba, M. M. (2020). Comparison of the performance of partial least squares and support vector regressions for predicting fatty acids and fatty acid classes in marine oil dietary supplements by using vibrational spectroscopic data. *Journal of Food Protection*, 83(5), 881-889.
- Kumar, S., & Bhatnagar, V. (2022). A review of regression models in machine learning. *Journal of Intelligent Systems and Computing*, 3(1), 40-47.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- Liland, K. H., Mevik, B.-H., Rukke, E.-O., Almøy, T., Skaugen, M., & Isaksson, T. (2009). Quantitative whole spectrum analysis with MALDI-TOF MS, part I: Measurement optimisation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 96(2), 210-218.
- Lindemann, B., Müller, T., Vietz, H., Jazdi, N., & Weyrich, M. (2021). A survey on long short-term memory networks for time series prediction. *Procedia CIRP*, 99, 650-655.
- Milli, M., Söylemez Milli, N., & Parlak, İ. H. (2025). Rapid detection of honey adulteration using machine learning on gas sensor data. *npj Science of Food*. <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00440-9>
- Miyazawa, T., Hiratsuka, Y., Toda, M., Hatakeyama, N., Ozawa, H., Abe, C., ... Ashida, K. (2022). Artificial intelligence in food science and nutrition: A narrative review. *Nutrition Reviews*, 80(12), 2288-2300.
- Montesinos López, O. A., Montesinos López, A., & Crossa, J. (2022). Fundamentals of artificial neural networks and deep learning. In *Multivariate statistical machine learning methods for genomic prediction* (pp. 379-425). Springer.
- Nafea, A. A., Alameri, S. A., Majeed, R. R., Khalaf, M. A., & AL-Ani, M. M. (2024). A short review on supervised machine learning and deep learning techniques in computer vision. *Babylonian Journal of Machine Learning*, 2024, 48-55.
- Ongsulee, P. (2017). Artificial intelligence, machine learning and deep learning. 2017 15th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE), 1-6.
- Osisanwo, F. Y., Akinsola, J. E. T., Awodele, O., Hinmikaiye, J. O., Olakanmi, O., & Akinjobi, J. (2017). Supervised machine learning algorithms: Classification and comparison. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 48(3), 128-138.
- Parlak, İ. H., Milli, M., & Söylemez Milli, N. (2025). Machine learning-based detection of olive oil adulteration using BME688 gas sensor matrix. *Food Analytical Methods*. <https://doi.org/10.1007/s12161-025-02803-0>

- Parlak, İ. H., Milli, M., Söylemez Milli, N., Demiray, F., & Turan, S. (2026). Rapid on-site methanol screening in distilled spirits via BME688 MOX sensor array and machine learning. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-49507-x>
- Peršurić, Ž., Osuga, J., Galinac Grbac, T., Peter-Katalinić, J., & Kraljević Pavelić, S. (2017). MALDI-SpiralTOF technology for assessment of triacylglycerols in Croatian olive oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(2).
- Putri, L. A., Rahman, I., Puspita, M., Hidayat, S. N., Dharmawan, A. B., Rianjanu, A., Wibirama, S., Roto, R., Triyana, K., & Wasisto, H. S. (2023). Rapid analysis of meat floss origin using a supervised machine learning-based electronic nose towards food authentication. *npj Science of Food*, 7, 31. <https://doi.org/10.1038/s41538-023-00205-2>
- Rau, J., Korte, N., Dyk, M., Wenninger, O., Schreiter, P., & Hiller, E. (2020). Rapid animal species identification of feta and mozzarella cheese using MALDI-TOF mass spectrometry. *Food Control*, 117, 107349.
- Rau, J., Hiller, E., Männig, A., Dyk, M., Wenninger, O., Stoll, P., Wibbelt, G., & Schreiter, P. (2021). Animal species identification of meat using MALDI-TOF mass spectrometry. *Aspects of Food Control and Animal Health*, 14. <https://doi.org/10.48414/aspects2021/14>
- Salla, V., & Murray, K. K. (2013). Matrix-assisted laser desorption ionization mass spectrometry for identification of shrimp. *Analytica Chimica Acta*, 794, 55-59.
- Saraiva, S. A., Cabral, E. C., Eberlin, M. N., & Catharino, R. R. (2009). Amazonian vegetable oils and fats: Fast typification and quality control via triacylglycerol (TAG) profiles from dry MALDI-TOF mass spectrometry fingerprinting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4030-4034.
- Scatigno, C., & Festa, G. (2022). FTIR coupled with machine learning to unveil spectroscopic benchmarks in the Italian EVOO. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(7), 4156-4162.
- Shen, Q., Dong, W., Yang, M., Li, L., Cheung, H. Y., & Zhang, Z. (2013). Lipidomic fingerprint of almonds (*Prunus dulcis* L. cv Nonpareil) using TiO₂ nanoparticle based matrix solid-phase dispersion and MALDI-TOF/MS and its potential in geographical origin verification. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(32), 7739-7748.
- Shetty, S. H., Shetty, S., Singh, C., & Rao, A. (2022). Supervised machine learning: Algorithms and applications. In *Fundamentals and methods of machine and deep learning* (pp. 1-16).
- Song, D., Dong, K., Liu, S., Fu, S., Zhao, F., Man, C., Jiang, Y., Zhao, K., Qu, B., & Yang, X. (2024). Research advances in detection of food adulteration and application of MALDI-TOF MS: A review. *Food Chemistry*, 456, 140070. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140070>
- Söylemez Milli, N., Parlak, İ. H., Ünlü, E. S., Milli, M., & Eren, Ö. (2021). A bioinformatics-based approach for designing primer sets in determination of meat speci-

- ficity. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. <https://doi.org/10.29130/dubited.898519>
- Söylemez Milli, N., Eren, Ö., Bıçakcı, G., & Erge, A. (2023). Quantitative determination of pork meat residue in cattle meat mixtures using droplet digital PCR. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 15(4). <https://doi.org/10.34302/crpjfst/2023.15.4.9>
- Söylemez Milli, N., Öndül Koç, E., Encu, Ş. B., & Çakır, İ. (2025a). Microbial characterization of Van herby cheese using MALDI-TOF MS and evaluation of starter culture potential of selected lactic acid bacteria. *The Journal of Food*. <https://doi.org/10.15237/gida.GD25067>
- Söylemez Milli, N., Parlak, İ. H., & Milli, M. (2025b). A new approach for machine learning-based recognition of meat species using a BME688 gas sensors matrix. *Chiang Mai Journal of Science*. <https://doi.org/10.12982/cmjs.2025.031>
- Söylemez Milli, N. (2026a). Integrated MALDI-TOF MS, microbiological, physicochemical and sensory assessment of spoilage in vacuum-packaged chicken breast during refrigerated storage. *Foods*, 15(12), 2162. <https://doi.org/10.3390/foods15122162>
- Söylemez Milli, N. (2026b). Microbial spoilage profiles of chicken breast stored at 4 °C assessed by MALDI-TOF MS. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v14i1.290-298.8397>
- Verbisck, N. V., Bortoli de Souza, L., Vedovelli Cardozo, M., Paiva Guimarães, N. G., & Dias Feijó, G. L. (2026). Meat species identification and classification by MALDI-TOF mass spectrometry. *Biology and Life Sciences Forum*, 56, 30. <https://doi.org/10.3390/blsf2026056030>
- Wang, J., Kliks, M. M., Qu, W., Jun, S., Shi, G., & Li, Q. X. (2009). Rapid determination of the geographical origin of honey based on protein fingerprinting and barcoding using MALDI-TOF MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), 10081-10088.
- Wang, C., Li, X., Zhao, X., Bi, H., & Xie, J. (2022). The investigation of storage situation of fish muscle via the analysis of its exudate by MALDI-TOF MS. *Food Chemistry*, 373, 131450.
- Windarsih, A., Jatmiko, T. H., Anggraeni, A. S., & Rahmawati, L. (2024). Machine learning-assisted FT-IR spectroscopy for identification of pork oil adulteration in tuna fish oil. *Vibrational Spectroscopy*, 134, 103715.
- Xu, Y., Hassan, M. M., Kutsanedzie, F. Y. H., Li, H. H., & Chen, Q. S. (2018). Evaluation of extra-virgin olive oil adulteration using FTIR spectroscopy combined with multivariate algorithms. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 10(4), 411-421.
- Yu, Y., Chen, W., Zhao, D., Zhang, H., Chen, W., Liu, R., & Li, C. (2025). Meat species authentication using portable hyperspectral imaging. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1577642. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1577642>

- Zatsu, V., Shine, A. E., Tharakan, J. M., Peter, D., Ranganathan, T. V., ... Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial intelligence — A review. *Food Chemistry: X*, 101867.
- Zhu, L., Spachos, P., Pensini, E., & Plataniotis, K. N. (2021). Deep learning and machine vision for food processing: A survey. *Current Research in Food Science*, 4, 233-249.



YOLOV11S VE RASPBERRY PI TABANLI SINIF İÇİ ATIK TESPİT SİSTEMİ

Mehmet Umut Salur¹

Şeyma Çeçen²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-0296-6266

² Öğr. Gör., İnönü Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-1244-5827

1. GİRİŞ

Nüfus artışı, kentleşme, tüketim alışkanlıklarının değişmesi ve günlük yaşamda tek kullanımlık ürünlerin yaygınlaşması, farklı kullanım alanlarında oluşan çevresel atık miktarını artırmaktadır. Atıkların kaynağında tanınması, türlerine göre ayrıştırılması ve uygun zamanda toplanması, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve işletme maliyetlerinin azaltılması açısından önem taşımaktadır. Ayrıca geleneksel atık yönetim uygulamalarında kontrol ve toplama işlemleri çoğunlukla sabit zaman çizelgelerine ya da görevli personelin görsel değerlendirmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, kullanım yoğunluğunun gün ve saatlere göre değiştiği üniversite derslikleri gibi ortamlarda henüz ihtiyaç oluşmadan temizlik yapılmasına veya yoğun dönemlerde müdahalenin gecikmesine neden olabilmektedir. IoT ve derin öğrenmenin birlikte kullanıldığı akıllı atık yönetim yaklaşımları, sabit toplama planlarından gerçek zamanlı veriye dayalı ve ihtiyaca duyarlı yönetim modellerine geçiş için önemli bir teknolojik zemin sunmaktadır (Wang et al., 2021).

Son yıllarda bilgisayarlı görü tabanlı atık yönetiminde yalnızca görüntünün tamamına tek bir sınıf etiketi atayan sınıflandırma modellerinden, aynı görüntüde birden fazla atığın konumunu ve türünü eş zamanlı olarak belirleyebilen nesne tespit yaklaşımlarına doğru belirgin bir yönelim bulunmaktadır. Gerçek kullanım ortamlarında atık nesneleri farklı ölçeklerde görülebilmekte, birbirini örttebilmekte ve zemin, mobilya ya da diğer nesnelerle benzer renk ve doku özellikleri gösterebilmektedir. Bu nedenle karmaşık arka plan, kısmi örtüşme, küçük nesne boyutu ve çoklu hedef varlığı, gerçek zamanlı atık tespit sistemlerinin temel güçlükleri arasında yer almaktadır. Ma et al. (2024), çok etiketli karma atık görüntülerinde dikkat mekanizması ve nesne takibini birleştiren DSYOLO-trash yaklaşımıyla gerçek zamanlı tespit ve ayırma sistemlerinin uygulanabilirliğini göstermiştir. Benzer biçimde benzer renkli arka planlar, birbirine yakın atıklar ve karşılıklı örtüşme gibi karmaşık koşulları içeren özgün bir veri kümesinde geliştirilmiş YOLOX-S mimarisiyle çoklu atık bileşenlerinin tespitini ele almıştır (Zhan ve Chen, 2024).

Atık tespit modellerinin gerçek dünyada kullanılabilmesi için yüksek doğruluk kadar model boyutu, hesaplama maliyeti ve çıkarım gecikmesi de belirleyicidir. Özellikle Raspberry Pi gibi kaynakları sınırlı gömülü platformlarda çalışacak sistemlerde hafif mimariler ve verimli özellik birleştirme yapıları önem kazanmaktadır. Sun ve Zhang, DRSE-YOLO modelinde çok ölçekli özellik temsili ile hafif ağ tasarımını birlikte ele alarak YOLOv8n'e göre parametre sayısını 3,2 milyondan 2,43 milyona ve hesaplama yükünü 8,2 GFLOPs'tan 5,8 GFLOPs'a düşürürken tespit performansında artış bildirmiştir (Sun ve Zhang, 2025). Daha doğrudan gömülü sistem bağlamında dokuz atık sınıfı için geliştirdikleri hafif YOLO-WasNet modelini Raspberry Pi 4B üzerinde çalıştırmış ve çıkarım süresini 350 ms düzeyine indirerek dü-

şük maliyetli uç cihazlarda gerçek zamanlı atık tespitinin uygulanabilirliğini ortaya koymuştur (Wang et al., 2025).

YOLO ailesinin güncel sürümleri de atık yönetiminde IoT bileşenleriyle birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Permana vd., YOLOv11'i RFID, ESP32, kamera ve ultrasonik sensörlerle bütünleştirerek organik, inorganik ve tehlikeli atıkların otomatik tanınmasını ve sistem durumunun mobil/web ortamında izlenmesini sağlayan bir çözüm geliştirmiştir (Permana et al., 2025). Çalışmada elde edilen sonuçlar YOLOv11'in akıllı atık yönetimindeki potansiyelini desteklemekle birlikte, arka plan girişiminin nesne tespit hatalarının önemli nedenlerinden biri olmaya devam ettiğini göstermektedir. Bu kontrollü veri kümeleri yerine hedef kullanım ortamından toplanan görüntülerle alan-özgü veri kümeleri oluşturulmasının ve modelin gerçek sahne koşullarında değerlendirilmesinin önemini artırmaktadır.

Bu çalışmada üniversite sınıflarında farklı noktalara dağılmış kâğıt, plastik, metal ve cam atıkları tek bir görüntü içinde eş zamanlı olarak tespit edebilen ve toplam atık sayısını temizlik kararına dönüştürebilen uçtan uca bir sistem oluşturmaktır. Bu kapsamda çalışmanın başlıca katkıları; gerçek sınıf ortamlarından özgün bir veri kümesi oluşturulması, dört atık sınıfının sınırlayıcı kutularla etiketlenmesi, YOLOv11s modelinin veri kümesine uyarlanması, eğitilen modelin Raspberry Pi üzerinde çalıştırılabilecek biçime dönüştürülmesi ve tespit sayısına bağlı otomatik bildirim mekanizmasının geliştirilmesi olarak özetlenebilir.

2. AKILLI ATIK YÖNETİMİNDE GÖMÜLÜ SİSTEMLER VE NESNE TESPİTİ

Atıkların görüntü tabanlı tanınmasına ilişkin çalışmalar, sınıflandırma ve nesne tespiti olmak üzere iki ana yaklaşım etrafında gelişmektedir. Sınıflandırma modelleri çoğunlukla görüntünün tamamına tek bir sınıf etiketi atarken, nesne tespit modelleri aynı görüntüde bulunan birden fazla nesnenin hem sınıfını hem de konumunu belirleyebilmektedir. Sınıf ortamında aynı anda çok sayıda ve farklı türde atığın bulunabilmesi nedeniyle bu çalışmada nesne tespiti yaklaşımı benimsenmiştir.

Raspberry Pi tabanlı atık tanıma sistemlerinin erken örneklerinden birinde, kâğıt, cam ve plastik materyallerinden oluşan 845 görüntü kullanılarak Raspberry Pi üzerinde OpenCV destekli gerçek zamanlı bir prototip geliştirilmiş; 662 görüntü eğitim, 183 görüntü test için ayrılmış ve %75,4 başarı bildirilmiştir (Sağlam et al., 2020). Başka bir çalışmada Raspberry Pi 3 ve Pi kamera ile 2000 görüntü toplanmış olup plastik, kâğıt ve metal atıkların ayırımında CNN tabanlı AlexNet ile özellik tabanlı SVM yaklaşımı karşılaştırılmış ve SVM ile %94,8 doğruluk elde edilmiştir (Sakr et al., 2016). Bu çalışmalar, gömülü donanımların atık tanıma süreçlerinde kullanılabilirliği-

ni göstermekle birlikte, çoğunlukla tek nesnenin kontrollü bir görüntüleme alanına bırakıldığı senaryolara odaklanmaktadır.

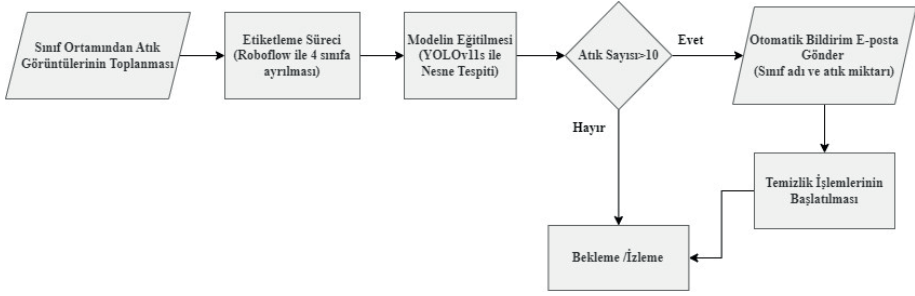
Nesne tespiti yaklaşımında, insansız hava aracı görüntülerindeki PET ve cam şişeler YOLOv3 ile tespit edilmiş ve 2250 görüntüden oluşturulan veri kümesinde 0,84816 mAP değeri raporlanmıştır (Çelik & Altınörs, 2023). Derin öğrenme, IoT ve bulut bilişimi birleştiren akıllı belediye atık yönetim sisteminde atıkların sınıflandırılması, izlenmesi ve toplama maliyetlerinin azaltılması bütüncül bir yapı içinde değerlendirilmiştir (Wang et al., 2021). Raspberry Pi 3, kamera ve çeşitli sensörleri kullanan otomatik bir atık ayrıştırma makinesinde ise beş sınıfta %94 doğruluk bildirilmiştir (Tiyajamorn et al., 2019). Bu örnekler, görüntü tabanlı tespitin sensör, ağ ve mekanik bileşenlerle birleştirildiğinde daha geniş bir karar ve eylem zincirinin parçası hâline gelebildiğini göstermektedir.

Raspberry Pi tabanlı akıllı çöp konteyneri çalışmasında atığın sensörle algılanması, görüntüsünün alınması, derin öğrenme modeliyle sınıflandırılması ve step motor aracılığıyla ilgili bölmeye yönlendirilmesi sağlanmış olup DenseNet169 ile %95,22 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir (Salur, Elmas, Koçak, & Kaymaz, 2024). Bu bölümde sunulan çalışma ise sınıfın genel görüntüsündeki çok sayıdaki atığı konumlarıyla birlikte tespit etmeyi ve tespit sayısını temizlik ihtiyacını belirleyen bir göstergeye dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Böylece literatürdeki sınıflandırma ve ayrıştırma odaklı sistemlerden farklı olarak ortam düzeyinde izleme ve bildirim işlevi öne çıkarılmaktadır.

3. GELİŞTİRİLEN SİSTEMİN TASARIMI

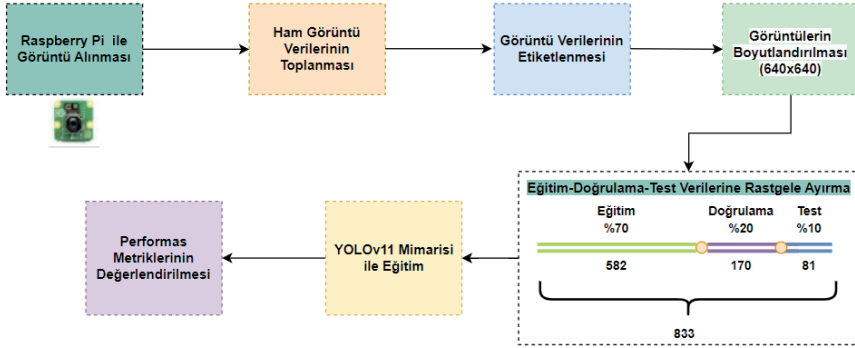
3.1. Sistem Mimarisi ve İş Akışı

Geliştirilen sistemin iş akışı, sınıf ortamından görüntü alınmasıyla başlamakta ve temizlik faaliyetlerinin başlatılmasına kadar uzanan beş temel aşamadan oluşmaktadır. Genel sistem mimarisi Şekil 1'de verilmiştir. İlk aşamada Raspberry Pi kamera modülüyle sınıfın farklı zamanlardaki görüntüleri elde edilmektedir. İkinci aşamada görüntülerde bulunan atık nesneleri Roboflow platformu üzerinden kağıt, cam, metal ve plastik sınıfları için etiketlenmektedir. Üçüncü aşamada etiketli veri kümesi YOLOv11s modelinin eğitiminde kullanılmaktadır. Dördüncü aşamada modelin anlık görüntüde belirlediği sınırlayıcı kutular sayılarak toplam atık miktarı hesaplanmaktadır. Son aşamada ise toplam nesne sayısı belirlenen eşik değeriyle karşılaştırılmakta; eşik aşıldığında sınıf adı ve atık miktarı e-posta ile yöneticilere iletilmektedir.



Şekil 1. Geliştirilen sınıf içi atık izleme sisteminin karar ve bildirim akışı.

Sistemin karar mantığında N, bir görüntüde YOLOv11s tarafından tespit edilen toplam atık sayısını temsil etmektedir. Proje uygulamasında $N > 10$ koşulu “yoğunluk” olarak tanımlanmıştır. Eşik değerinin sınıf büyüklüğü ve kullanım yoğunluğuna göre değiştirilebilir olması, sistemi farklı dersliklere uyarlama imkânı sağlamaktadır. N değeri eşik altında kaldığında sistem izleme sürecine devam etmekte; eşik aşıldığında ise bildirim gönderilerek temizlik süreci başlatılmaktadır. Böylece kontrol işlemi sabit zamanlı temizlik yaklaşımından, görüntüye dayalı ihtiyaç odaklı bir yaklaşıma dönüştürülmektedir. Veri toplama, veri bölme, model eğitimi ve performans değerlendirme aşamaları Şekil 2’de şema olarak sunulmuştur.



Şekil 2. Veri toplama, veri bölme, model eğitimi ve performans değerlendirme aşamaları.

3.2. Raspberry Pi Donanım ve Yazılım Kurulumu

Sistemin merkezi kontrol birimi Raspberry Pi 4 Model B üzerinde oluşturulmuştur. Görüntülerin alınması için Raspberry Pi Kamera Modülü 3 kullanılmıştır. Raspberry Pi işletim sistemi 16 GB kapasiteli bir SD karta kurulmuş olup kamera ve gerekli devre bağlantıları breadboard aracılığıyla

lehimsiz biçimde gerçekleştirilmiştir. Bu kurulum, görüntü toplama ve modelin sahada çalıştırılması için taşınabilir bir donanım altyapısı sağlamıştır.

Derin öğrenme modelinin gömülü cihazda çalıştırılabilmesi amacıyla Raspberry Pi üzerine TensorFlow Lite ve Keras yazılımları kurulmuştur. Eğitim sonrasında elde edilen model TensorFlow Lite biçimine dönüştürülerek Raspberry Pi 4 Model B cihazına aktarılmış ve kamera modülünden alınan görüntüler üzerinde tespit yapacak şekilde yapılandırılmıştır. Sistemde kullanılan kamera ve merkezi kontrol donanımı Şekil 3'te verilmiştir. TensorFlow Lite biçimi, modelin gömülü donanım üzerinde uygulanmasını mümkün kılan dağıtım aşamasını temsil etmektedir. Ayrıca modelin yüksek hesaplama gerektiren eğitim işlemi ise Google Colab ortamında gerçekleştirilmiştir.



(a) Raspberry Pi Kamera Modülü 3



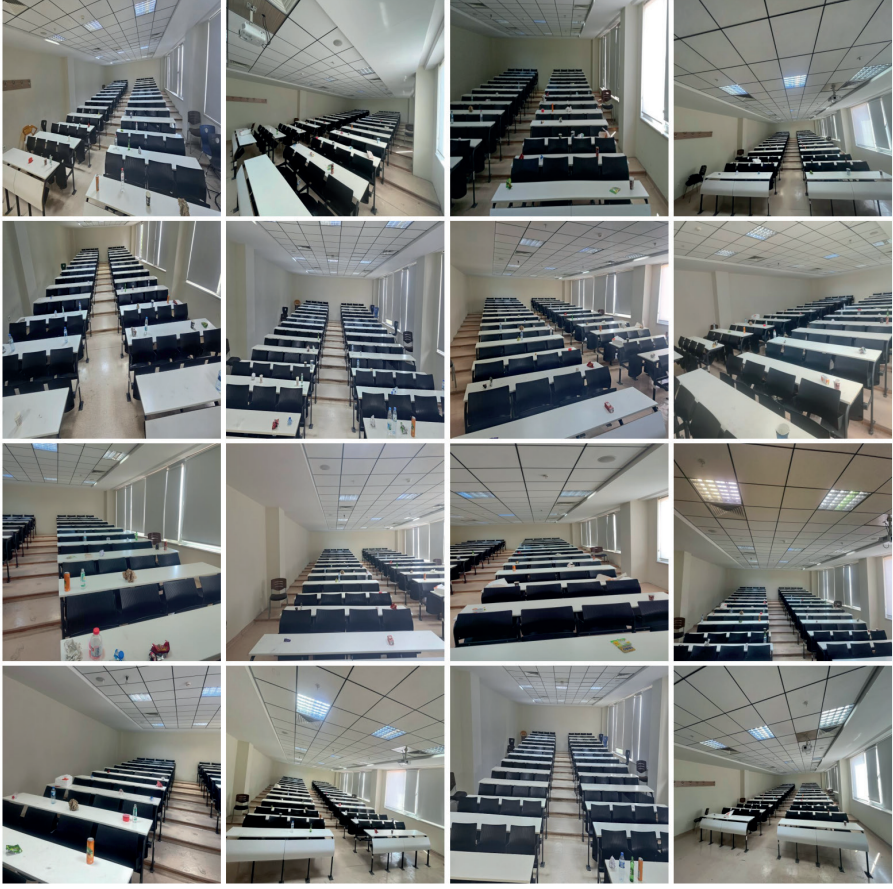
(b) Raspberry Pi 4 Model B

Şekil 3. Sistemde kullanılan kamera ve merkezi kontrol donanımı.

3.3. Sınıf İçi Atık Veri Kümesinin Oluşturulması

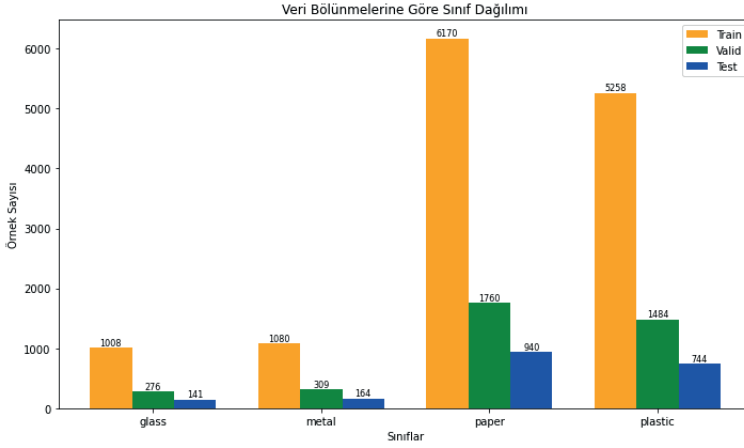
Çalışma kapsamında Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesindeki sınıf ortamlarından farklı zamanlarda ve farklı kamera açılarında toplam 833 görüntü elde edilmiştir. Görüntüler, kontrollü stüdyo koşullarından ziyade sınıfın gerçek fiziksel düzeyini, sıraları, duvarları, zemini, pencereleri ve değişken ışık koşullarını içermektedir. Bu özellik, veri kümesini nesnelerin arka planla benzeşebildiği ve farklı ölçeklerde görünebildiği gerçek dünya koşullarına yaklaştırmaktadır.

Görüntülerde yer alan atıklar dört sınıf altında tanımlanmıştır: kağıt (paper), plastik (plastic), metal (metal) ve cam (glass). Etiketleme işlemi Roboflow platformunda sınırlayıcı kutular kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir görüntüde birden fazla atık bulunduğu için görüntü sayısı ile etiketli nesne sayısı birbirinden farklıdır. Model girdilerinde boyut birliği sağlamak amacıyla tüm görüntüler 640×640 piksele yeniden ölçeklendirilmiştir. Sınıf ortamından toplanan ve veri kümesinde kullanılan örnek görüntülerden bazıları Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Sınıf ortamından toplanan ve veri kümesinde kullanılan örnek görüntüler.

Veri kümesindeki 833 görüntünün %70'i eğitim, %20'si doğrulama ve %10'u test alt kümelerine ayrılmıştır. Buna göre 582 görüntü eğitim, 170 görüntü doğrulama ve 81 görüntü test için kullanılmıştır. Etiketli nesne dağılımı, kâğıt ve plastik atıkların sınıf ortamında cam ve metal atıklara göre daha sık görüldüğünü göstermektedir. Eğitim alt kümesinde 6170 kâğıt ve 5258 plastik etiketi bulunurken cam ve metal etiketlerinin sayısı sırasıyla 1008 ve 1080'dir. Doğrulama kümesindeki toplam 3829 etiket, modelin sınıf bazlı performansının hesaplanmasında kullanılmıştır. Veri kümesinde eğitim, doğrulama ve test alt kümelerinde sınıf bazlı etiket dağılımı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Eğitim, doğrulama ve test alt kümelerinde sınıf bazlı etiket dağılımı.

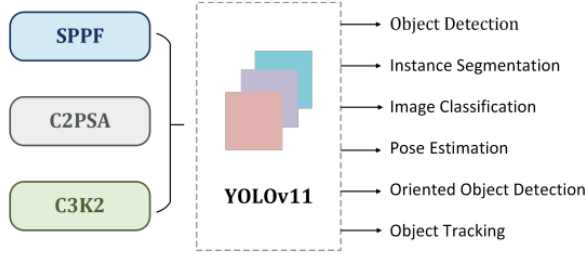
Etiket dağılımındaki dengesizlik, özellikle kâğıt ve plastik sınıflarının veri kümesinde baskın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, doğrulama sonuçlarında cam sınıfının en yüksek kesinlik ve mAP50 değerine ulaşması, örnek sayısının tek başına performansı belirlemediğini göstermektedir. Nesnenin görsel ayırt ediciliği, arka planla kontrastı, ölçeği ve kısmi örtülme durumu da tespit başarısını etkilemektedir.

3.4. YOLOv11s ile Nesne Tespiti

YOLO (You Only Look Once) modelleri, sınırlayıcı kutu tahmini ile sınıf olasılıklarını tek bir uçtan uca ağ içinde üretmesi sayesinde gerçek zamanlı nesne tespiti uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Alif, 2024; Khanam & Hussain, 2024). Bu çalışmada hız ve doğruluk dengesini koruyarak gömülü sisteme aktarılacak bir model elde etmek amacıyla YOLOv11s varyantı tercih edilmiştir. Raporda YOLOv11 mimarisi backbone, neck ve head olmak üzere üç temel bileşen üzerinden açıklanmaktadır (Khanam & Hussain, 2024).

Backbone bölümü giriş görüntüsünden farklı ölçeklerde özellik çıkarımını gerçekleştirmektedir. YOLOv11'de C3k2 blokları hesaplama verimliliği ile özellik çıkarımını dengelemektedir. Ayrıca SPPF bloğu farklı ölçeklerde bağlam bilgisinin toplanmasına yardımcı olmaktadır. C2PSA bileşeni ise uzamsal dikkat mekanizmasıyla modelin önemli görüntü bölgelerine odaklanmasını desteklemektedir. Neck bölümü backbone'dan gelen farklı çözünürlüklerdeki özellik haritalarını birleştirerek özellikle küçük ve kısmen örtülü nesnelerin tespitini güçlendirmektedir. Head bölümü ise sınırlayıcı kutu koordinatlarını, nesnellik puanlarını ve sınıf olasılıklarını üretmektedir. YOLOv11'in atık sınıflandırma ve tespit uygulamalarında kullanılabilirliği gün-

cel çalışmalarda da ele alınmıştır (Nasien et al., 2025). Şekil 6’da kullanılan bu modüller sunulmuştur (Khanam ve Hussain, 2024).



Şekil 6. YOLOv11 mimarisinde kullanılan temel modüller.

Sınıf ortamındaki atıkların görüntünün farklı bölgelerinde ve farklı büyüklüklerde bulunması, çok ölçekli özelliklerin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Sıra üzerindeki küçük bir kağıt parçası ile kameraya daha yakın konumdaki plastik bir şişenin aynı karede tespit edilebilmesi hem yerel ayrıntıların hem de geniş bağlamın korunmasına bağlıdır. YOLOv11s’in tercih edilmesinde, modelin bu tür çoklu ve değişken ölçekli nesne senaryolarına uygun olması ile gömülü sisteme aktarılabilir bir boyut-hız dengesi sunması etkili olmuştur.

3.5. Model Eğitim Ayarları

YOLOv11s modeli Google Colab ortamında 1,59 GHz saat hızına sahip Tesla T4 GPU üzerinde eğitilmiştir. Eğitim işlemi 100 epoch sürdürülmüş, batch büyüklüğü 8 olarak belirlenmiş ve tüm giriş görüntüleri 640×640 piksel çözünürlükte kullanılmıştır. Optimizasyon algoritması olarak AdamW, öğrenme oranı olarak 0,001429 seçilmiştir. Toplam 833 görüntüden oluşan veri kümesiyle gerçekleştirilen eğitim yaklaşık 27 dakikada tamamlanmıştır. YOLOv11s modeli eğitim parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. YOLOv11s modeli eğitim parametreleri.

Parametre	Değer
Model	YOLOv11s
Öğrenme oranı	0,001429
Epoch sayısı	100
Batch büyüklüğü	8
Görüntü boyutu	640×640 piksel
Optimizasyon algoritması	AdamW
Eğitim ortamı	Google Colab - Tesla T4 GPU
Yaklaşık eğitim süresi	27 dakika

3.6. Yoğunluk Analizi ve Otomatik Bildirim

Modelin çıktısı, her tespit için sınıf etiketi, sınırlayıcı kutu ve güven skordan oluşmaktadır. Yoğunluk analizi aşamasında sınıf ayrımı yapılmaksızın görüntüdeki tüm geçerli tespitlerin sayısı hesaplanmıştır. Toplam tespit sayısının 10'dan büyük olması durumunda ortamda atık yoğunluğu bulunduğu kabul edilmiştir. Bu eşik, proje uygulamasındaki sınıf boyutu ve gözlenen kullanım koşulları dikkate alınarak belirlenmiş olup farklı sınıflarda yeniden ayarlanabilir.

Eşik aşıldığında sistem, ilgili sınıfın adını ve tespit edilen atık miktarını e-posta bildirimleriyle yöneticilere göndermektedir. Böylece görüntü analizi yalnızca bir tespit çıktısı üretmekle kalmamakta, temizlik faaliyetini başlatan operasyonel bir karara dönüşmektedir. Sistemin uçtan uca işlevi; görüntü alma, model çıkarımı, nesne sayma, eşik karşılaştırması ve bildirim gönderme adımlarının ardışık biçimde yürütülmesine dayanmaktadır.

3.7. Performans Değerlendirme Ölçütleri

Model performansı karmaşıklık matrisi temelli kesinlik (precision), geri çağırma (recall), F1 skoru ve ortalama hassasiyet (mAP) ölçütleriyle değerlendirilmiş olup sırasıyla Denklem 1-4'te verilmiştir. Doğru pozitif (TP), modelin gerçek bir atık nesnesini doğru sınıfta tespit etmesini; yanlış pozitif (FP), gerçekte karşılığı olmayan veya yanlış sınıfa atanan bir tespiti; yanlış negatif (FN) ise mevcut bir atık nesnesinin model tarafından tespit edilememesini ifade etmektedir. Nesne tespitinde tahmin kutusu ile gerçek etiket kutusunun eşleşmesi, kesişim-birleşim oranı (IoU) eşığı dikkate alınarak belirlenmektedir.

$$\text{Kesinlik} = TP / (TP + FP) \quad (1)$$

$$\text{Geri Çağırma} = TP / (TP + FN) \quad (2)$$

$$F1 = 2 \times (\text{Kesinlik} \times \text{Geri Çağırma}) / (\text{Kesinlik} + \text{Geri Çağırma}) \quad (3)$$

$$mAP = AP \text{ değerlerinin sınıflar üzerindeki ortalaması} \quad (4)$$

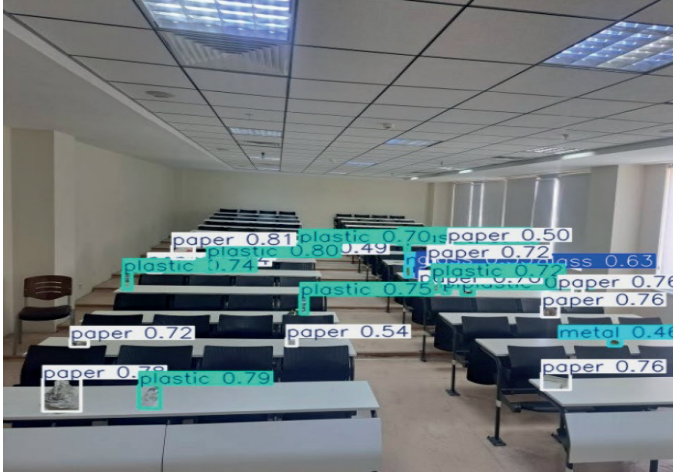
mAP50, IoU eşığının 0,50 olduğu durumda sınıflar üzerindeki ortalama hassasiyeti göstermektedir. Bu ölçüt, modelin nesneleri hem doğru sınıfta hem de yeterli konumsal örtüşmeyle tespit etme başarısını özetlemektedir. Kesinlik yanlış pozitifleri, geri çağırma ise kaçırılan nesneleri değerlendirdiği için sınıf ortamındaki uygulamada her iki ölçütün birlikte incelenmesi önem taşımaktadır.

4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Genel Tespit Performansı

YOLOv11s modeli doğrulama kümesindeki 170 görüntü ve 3829 etiketli nesne üzerinde değerlendirilmiştir. Tüm sınıflar birlikte ele alındığında model 0,876 kesinlik, 0,806 geri çağırma ve 0,862 mAP50 değerine ulaşmıştır. Bu

sonuçlar modelin ürettiği tespitlerin büyük bölümünün doğru olduğunu ve gerçek nesnelerin önemli bir kısmını yakalayabildiğini göstermektedir. Kesinlik değerinin geri çağırmadan daha yüksek olması, modelin yanlış tespit üretme konusunda görece kontrollü davrandığını ve buna karşılık bazı atık nesnelerini kaçırabildiğini göstermektedir. Sınıf görüntüsü üzerinde YOLOv11s tarafından üretilen örnek atık tespitleri Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Sınıf görüntüsü üzerinde YOLOv11s tarafından üretilen örnek atık tespitleri.

YOLOv11s modelinin doğrulama kümesindeki sınıf bazlı sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Cam sınıfı 0,922 kesinlik ve 0,882 mAP50 ile en yüksek performansı göstermiştir. Bu sonuç, cam örneklerinin veri kümesinde daha az sayıda bulunmasına rağmen model tarafından ayırt edilebilir görsel özelliklerle temsil edildiğini göstermektedir. Plastik sınıfı 0,844 geri çağırma ile gerçek nesneleri yakalama açısından en başarılı sınıf olmuştur; 0,876 mAP50 ile cam sınıfına yakın bir sonuç elde etmiştir. Plastik atıkların veri kümesindeki yüksek örnek sayısı, farklı görünüm ve konumların model tarafından öğrenilmesine katkı sağlamış olabilir.

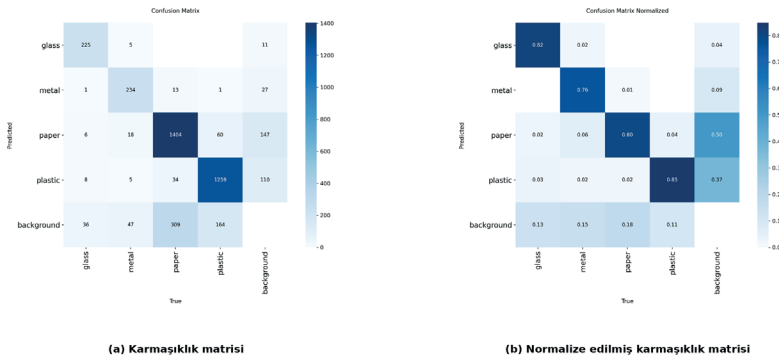
Tablo 2. YOLOv11s modelinin doğrulama kümesindeki sınıf bazlı sonuçları.

Sınıf	Görüntü sayısı	Etiket sayısı	Kesinlik	Geri çağırma	mAP50
Tümü	170	3829	0,876	0,806	0,862
Cam	164	276	0,922	0,812	0,882
Metal	167	309	0,864	0,783	0,855
Kâğıt	169	1760	0,842	0,787	0,834
Plastik	168	1484	0,875	0,844	0,876

Metal sınıfında 0,864 kesinlik ve 0,855 mAP50 elde edilmiş; geri çağırma 0,783 ile sınıflar arasındaki en düşük değerde kalmıştır. Bu durum bazı metal nesnelerin kaçırıldığını göstermektedir. Kâğıt sınıfı ise 0,842 kesinlik, 0,787 geri çağırma ve 0,834 mAP50 ile genel olarak en düşük mAP50 değerini vermiştir. Kâğıtların sınıf ortamındaki masa yüzeyleri, duvarlar veya açık renkli arka planlarla benzer doku ve renklere sahip olabilmesi, bu sınıftaki tespitleri zorlaştırmıştır.

4.2. Karmaşıklık Matrisi ve Hata Analizi

Nesne tespiti karmaşıklık matrisinde gerçek veri kümesinde ayrı bir “background” sınıfı bulunmamasına rağmen değerlendirme çıktısında arka plan satırı ve sütunu yer almaktadır. Bunun nedeni, IoU eşliğini karşılamayan tahmin kutularının herhangi bir gerçek etiketle eşleşmemesi veya gerçek bir nesnenin uygun bir tahmin kutusuyla eşleştirilememesidir. Bu eşleşmeyen örnekler değerlendirme sırasında arka planla ilişkili yanlış pozitif ya da yanlış negatif olarak gösterilmektedir. YOLOv11s modelinin karmaşıklık matrisi ve normalize edilmiş karmaşıklık matrisleri Şekil 8’de sunulmuştur.



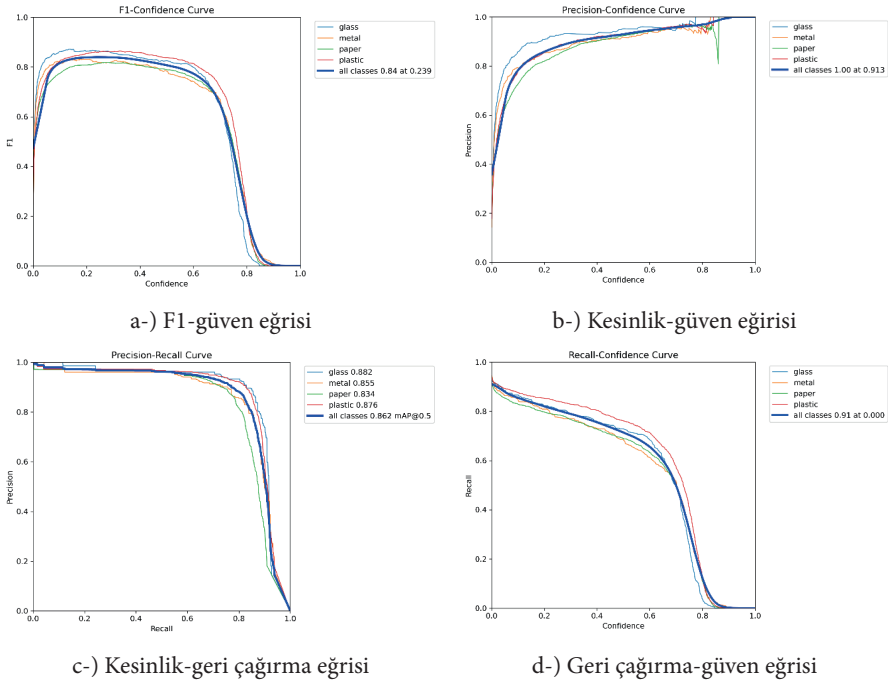
Şekil 8. YOLOv11s modelinin karmaşıklık matrisi ve normalize edilmiş karmaşıklık matrisi.

Normalize edilmiş matris incelendiğinde, arka planla ilişkili hataların özellikle kâğıt ve plastik sınıflarında yoğunlaştığı görülmektedir. Proje raporunda kâğıt örneklerinin %50’sinin ve plastik örneklerinin %37’sinin background ile ilişkili hatalara konu olduğu belirtilmiştir. Buna karşılık nesne sınıflarının birbirleriyle doğrudan karıştırılma oranı daha düşüktür. Başlıca hata kaynağı; küçük nesneler, kısmi örtülme, düşük çözünürlük, yetersiz ışıklandırma ve nesne ile arka plan arasındaki görsel benzerliktir.

4.3. Güven Eşiği, Kesinlik ve Geri Çağırma

F1-güven, kesinlik-güven, kesinlik-geri çağırma ve geri çağırma-güven eğrileri modelin farklı güven eşiklerinde nasıl davrandığını göstermektedir. YOLOv11s modelinin güven eşiğine bağlı performans eğrileri Şekil 9'da verilmiştir. Kesinlik-güven eğrilerinde güven eşiği 0,90'ın üzerine çıktığında sınıfların kesinlik değerleri %100'e yaklaşmaktadır. Bununla birlikte, eşik yükseldikçe daha az sayıda tahmin kabul edildiği için geri çağırma azalmaktadır. Bu sonuç, uygulamada güven eşiğinin yalnızca yüksek doğruluk hedefiyle değil, sınıfta bulunan atıkların kaçırılmaması gereksinimiyle birlikte belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

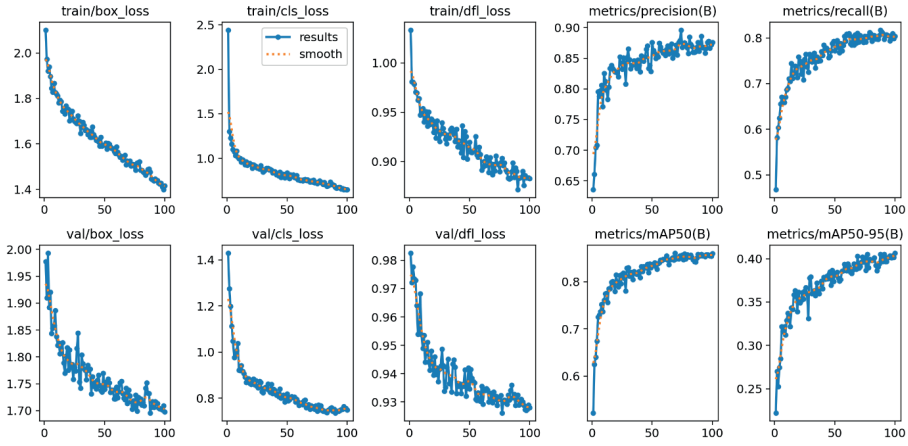
Geri çağırma değerleri düşük güven eşiklerinde tüm sınıflarda yüksek başlamakta, güven eşiği arttıkça kademeli biçimde düşmektedir. Plastik ve cam sınıfları yüksek geri çağırma değerini diğer sınıflara göre daha uzun süre korumaktadır. Yoğunluk sayımında kaçırılan her nesne toplam N değerini azaltacağından, çok yüksek bir güven eşiği gerçek yoğunluğun olduğundan düşük hesaplanmasına neden olabilir. Buna karşılık çok düşük bir eşik, yanlış pozitifleri artırarak gereksiz bildirim oluşturabilir. Bu nedenle eşik seçimi, tespit doğruluğu ile operasyonel bildirim duyarlılığı arasındaki dengeyi temsil etmektedir.



Şekil 9. YOLOv11s modelinin güven eşiğine bağlı performans eğrileri.

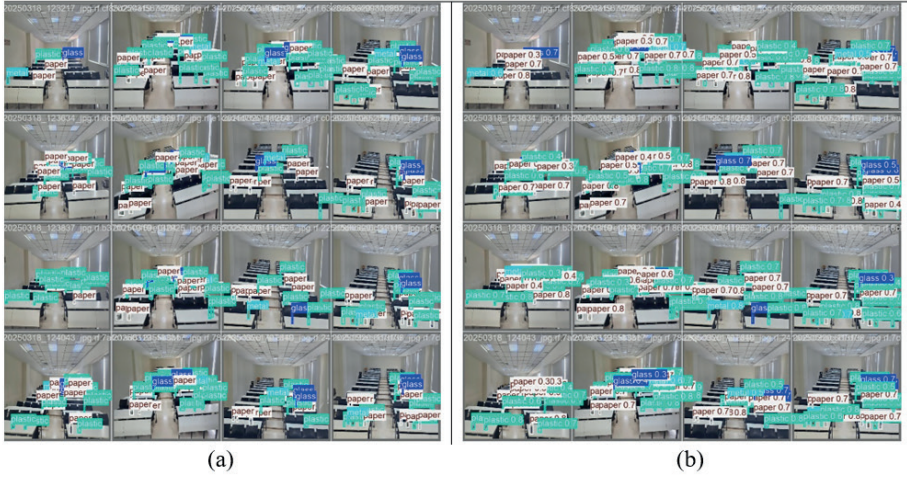
4.4. Eğitim Süreci ve Doğrulama Tahminleri

YOLOv11s modelinin 100 epoch boyunca eğitim ve doğrulama kayıpları ile performans ölçütleri Şekil 10'da sunulmuştur. Yüz epoch süren eğitim boyunca sınırlayıcı kutu, sınıflandırma ve dağılım odaklı kayıp değerlerinin hem eğitim hem doğrulama verisinde azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Aynı dönemde kesinlik, geri çağırma, mAP50 ve mAP50-95 ölçütleri yükselmiştir. Eğitim ve doğrulama kayıplarının birlikte azalması, modelin veri kümesindeki nesne-konum ilişkilerini aşamalı olarak öğrendiğini göstermektedir. mAP50 değerinin 0,862 seviyesine ulaşması, 0,50 IoU eşliğinde sınıf içi atık tespiti için kullanılabilir bir performans elde edildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 10. YOLOv11s modelinin 100 epoch boyunca eğitim ve doğrulama kayıpları ile performans ölçütleri.

Şekil 11'de doğrulama görüntülerinde model tahminleri ve gerçek etiketlerin karşılaştırılması verilmiştir. Doğrulama görüntülerinde model tahminleri ile manuel gerçek etiketler yan yana incelendiğinde plastik ve cam sınıflarında yüksek uyum görülmektedir. Tahmin görüntülerinde her sınırlayıcı kutu üzerinde sınıf adı ve 0 ile 1 arasında güven skoru yer almaktadır. Gerçek etiket görüntülerinde güven skoru bulunmamakta, yalnızca manuel olarak belirlenen sınıf ve konum bilgileri gösterilmektedir. Karşılaştırmalar, modelin aynı görüntüdeki çok sayıdaki nesneyi genel olarak doğru biçimde konumlandığını göstermektedir. Ancak özellikle kağıt sınıfında bazı yanlış pozitif ve eksik tespitlerin oluşabildiğini göstermektedir.



Şekil 11. Doğrulama görüntülerinde model tahminleri (a) ve gerçek etiketlerin (b) karşılaştırılması.

5. TARTIŞMA VE GELİŞTİRME ÖNERİLERİ

Sonuçlar sınıf ortamında farklı konumlara dağılmış çevresel atıkların YOLOv11s ile aynı görüntü içinde tespit edilebildiğini ve bu tespitlerin temizlik ihtiyacını belirleyen sayısal bir göstergeye dönüştürülebildiğini göstermektedir. Çalışmanın temel ayrımı, tek bir atık nesnesinin kontrollü bir kutu veya platform üzerinde sınıflandırılmasından ziyade, geniş bir sınıf görüntüsünde çok sayıda nesnenin birlikte ele alınmasıdır. Bu senaryoda modelin görevi yalnızca atığın türünü belirlemek değil, her nesnenin konumunu bularak toplam nesne sayısını güvenilir biçimde hesaplamaktır.

Genel mAP50 değerinin 0,862 olması, oluşturulan veri kümesinin gerçek ortam koşullarına rağmen model tarafından öğrenilebildiğini göstermektedir. En yüksek sınıf başarısının cam ve plastikte elde edilmesi, bu nesnelerin biçim, parlaklık ve renk gibi ayırt edici özelliklerinin model tarafından daha tutarlı öğrenildiğine işaret etmektedir. Kâğıt sınıfındaki daha düşük mAP50 ve background kaynaklı hatalar ise arka plan benzerliğinin nesne tespitinde belirleyici bir güçlük olduğunu ortaya koymaktadır. Sınıf ortamlarında masa, sıra, duvar ve kâğıt yüzeylerinin benzer açık tonlara sahip olması; kâğıt nesnelerinin sınırlarını belirsizleştirebilmektedir.

Sistemde $N > 10$ eşik değerinin kullanılması, model çıktısını doğrudan operasyonel bir karara bağlamaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca doğruluk ölçütleriyle değerlendirilen bir görüntü işleme uygulamasından farklı olarak, son kullanıcının gerçekleştireceği eylemi de sistem tasarımına dâhil etmektedir. E-posta bildiriminde sınıf adı ve atık miktarının yer alması, temizlik personelinin hangi ortama müdahale etmesi gerektiğini ve yoğunluğun yaklaşık

düzeyini önceden görmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte eşik değerinin her sınıf için sabit tutulması yerine sınıfın fiziksel büyüklüğü, öğrenci kapasitesi ve günlük kullanım sıklığına göre uyarlanması sistemin farklı mekânlara aktarılabilirliğini artıracaktır.

Raspberry Pi entegrasyonu, eğitim ve çıkarım süreçlerinin farklı donanım ihtiyaçlarına göre ayrılmasını sağlamaktadır. Modelin eğitimi GPU destekli Google Colab ortamında yürütülürken, eğitilen model TensorFlow Lite biçiminde Raspberry Pi'ye aktarılmıştır. Böylece yüksek hesaplama gerektiren eğitim işlemi merkezi bir ortamda tamamlanmış, sahadaki cihaz ise görüntü alma ve model çıkarımı görevlerine odaklanmıştır. Bu yapı, farklı sınıflara yerleştirilecek birden fazla uç cihazın aynı eğitimli modeli kullanabileceği ölçeklenebilir bir yaklaşım için temel oluşturmaktadır.

Çalışmanın ilk sınırlılığı, veri kümesinin dört ana atık sınıfıyla sınırlandırılmış olmasıdır. Sınıf ortamlarında karton, organik atık, tekstil, elektronik atık veya genel çöp gibi farklı kategoriler de bulunabilmektedir. Veri kümesine yeni sınıfların eklenmesi, sistemin daha kapsamlı bir atık yönetimi çözümüne dönüşmesini sağlayabilir. Ancak yeni sınıfların birbirine görsel olarak benzer olabileceği dikkate alınarak etiketleme standardının korunması ve her sınıf için yeterli çeşitlilikte örnek toplanması gerekmektedir. İkinci sınırlılık, görüntülerin belirli sınıf ortamlarından elde edilmiş olmasıdır. Farklı binalar, mobilya düzenleri, zemin renkleri, kamera yükseklikleri ve ışık koşulları modelin genelleme başarısını etkileyebilir. Özellikle kâğıt ve plastik sınıflarındaki background hatalarının azaltılması için farklı arka planlar, düşük ve yüksek ışık düzeyleri, kısmi örtülmeler ve çeşitli kamera açıları içeren yeni görüntülerin veri kümesine eklenmesi önerilmektedir. Proje raporunda da arka plan çeşitliliğinin artırılması, görüntü kalitesinin iyileştirilmesi ve arka plan-nesne ayrımını güçlendiren veri artırma tekniklerinin kullanılması temel geliştirme alanları olarak belirtilmiştir. Sistem, sensör tabanlı doluluk ölçümü, IoT tabanlı merkezi takip paneli ve robotik ayırma mekanizmalarıyla bütünleştirilebilir. Proje sonuç raporunda bulut tabanlı yönetim panelleri, daha geniş veri kümeleri ve gelişmiş nesne tanıma algoritmaları ölçeklenebilir geliştirme alanları olarak belirtilmiştir. Birden fazla sınıftan gelen bildirimlerin merkezi bir panelde toplanması, temizlik rotalarının ve personel görevlendirmelerinin yoğunluğa göre planlanmasına imkân sağlayabilir.

6. SONUÇ

Bu bölümde, üniversite sınıflarında çevresel atıkların görüntü tabanlı olarak tespit edilmesi ve temizlik ihtiyacının otomatik bildirimle iletilmesi amacıyla geliştirilen YOLOv11s ve Raspberry Pi tabanlı sistem sunulmuştur. Çalışma için farklı sınıf ortamlarından 833 görüntü toplanmış; kâğıt, plastik, metal ve cam atıkları sınırlayıcı kutularla etiketlenerek özgün bir veri kümesi

oluşturulmuştur. Görüntüler 640×640 piksele ölçeklendirilmiş ve 582 eğitim, 170 doğrulama ve 81 test görüntüsü olarak bölünmüştür.

YOLOv11s modeli 100 epoch sonunda yaklaşık 27 dakikada eğitimini tamamlamış ve doğrulama kümesinde 0,876 kesinlik, 0,806 geri çağırma ve 0,862 mAP50 değerine ulaşmıştır. Cam sınıfı 0,882 mAP50 ile en yüksek sınıf başarımını, plastik sınıfı ise 0,844 ile en yüksek geri çağırma değerini göstermiştir. Temel hata kaynağının, özellikle kâğıt ve plastik nesnelerin arka planla görsel benzerliği nedeniyle oluşan background ilişkili yanlış pozitif ve yanlış negatifler olduğu belirlenmiştir.

Eğitilen model TensorFlow Lite biçimine dönüştürülerek Raspberry Pi 4 Model B üzerine aktarılmış; kamera görüntülerinde tespit edilen toplam atık sayısının 10'u aşması durumunda sınıf bilgisi ve atık miktarını içeren e-posta bildirimi üretilmiştir. Böylece veri toplama, etiketleme, model eğitimi, nesne tespiti, yoğunluk analizi ve otomatik bildirim aşamalarını birleştiren uçtan uca bir atık izleme sistemi elde edilmiştir. Geliştirilen yaklaşım, eğitim kurumlarında sabit zamanlı temizlik yerine gerçek ihtiyaca dayalı müdahale planlamasını destekleyen uygulanabilir bir prototip sunmaktadır.

TEŞEKKÜR VE YAYIN NOTU

Bu çalışma, Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen “Çevresel Atıkların Yönetimi için Nesnelerin İnterneti ve Derin Öğrenme Tabanlı Sistemlerin Geliştirilmesi” başlıklı 2024-GAP-Mühe-0008 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alif, M. A. R. (2024). YOLOv11 for vehicle detection: Advancements, performance, and applications in intelligent transportation systems. arXiv. <http://arxiv.org/abs/2410.22898>
- Çelik, S., & Altınörs, A. (2023). YOLOv3 derin öğrenme algoritması ile İHA görüntülerinden çevresel atık tespiti. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 7(1), 76–85. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1195428>
- Khanam, R., & Hussain, M. (2024). YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements. arXiv, 1–9. <http://arxiv.org/abs/2410.17725>
- Ma, W., Chen, H., Zhang, W., Huang, H., Wu, J., Peng, X., & Sun, Q. (2024). DSYOLO-trash: An attention mechanism-integrated and object tracking algorithm for solid waste detection. *Waste Management*, 178, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.014>
- Nasien, D., Adiya, M. H., Farkhan, M., Rahmadhani, U. S., & Samah, A. A. (2025). Automated waste classification using YOLOv11: A deep learning approach for sustainable recycling. *Journal of Applied Business and Technology*, 6(1), 68–74. <https://doi.org/10.35145/jabt.v6i1.205>
- Permana, M. F. J., Gani, J. C. R. B., Fauzan, N. A., & Adiwilaga, A. (2025). YOLOv11 model as a smart solution for waste identification and classification in automated waste management system. *Jurnal Ilmu Komputer dan Informasi*, 18(2), 207–216. <https://doi.org/10.21609/jiki.v18i2.1490>
- Sağlam, A., Taş, M., & Baykan, N. A. (2020). Geri dönüştürülebilir atıkların materyallerine göre sınıflandırılması için Raspberry Pi tabanlı donanım geliştirilmesi [Development of Raspberry Pi based hardware for classification of recyclable wastes according to their materials]. 30–38. <https://doi.org/10.31590/ejosat>
- Sakr, G. E., Mokbel, M., Darwich, A., Khneisser, M. N., & Hadi, A. (2016). Comparing deep learning and support vector machines for autonomous waste sorting. 2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET), 207–212. <https://doi.org/10.1109/IMCET.2016.7777453>
- Salur, M. U., & Elmas, N. (2025). Innovative approach to environmental waste classification with ensemble learning models. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 933–956. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1642586>
- Salur, M. U., Elmas, N., Koçak, A. N., & Kaymaz, M. (2024). Derin öğrenme ile çevresel atıkların sınıflandırılmasına dayalı akıllı çöp konteyneri tasarımı ve prototipinin geliştirilmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(24), 547–563. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1557588>
- Sun, G., & Zhang, F. (2025). DRSE-YOLO: Efficient and lightweight architecture for accurate waste detection. *IET Image Processing*, 19(1), e70022. <https://doi.org/10.1049/ipr2.70022>

- Tiyajamorn, P., Lorprasertkul, P., Assabumrungrat, R., Poomarin, W., & Chanchaen, R. (2019). Automatic trash classification using convolutional neural network machine learning. 2019 9th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Robotics, Automation and Mechatronics (CIS-RAM), 71–76. <https://doi.org/10.1109/CIS-RAM47153.2019.9095775>
- Wang, A., Jiao, H., Chen, Z., & Yang, J. (2025). An improved YOLO-based waste detection model and its integration to robotic gripping systems. *Computers, Materials & Continua*, 84(3), 5773–5790. <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.066852>
- Wang, C., Qin, J., Qu, C., Ran, X., Liu, C., & Chen, B. (2021). A smart municipal waste management system based on deep-learning and Internet of Things. *Waste Management*, 135, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.028>
- Zhao, R., Zeng, Q., Zhan, L., & Chen, D. (2024). Multi-target detection of waste composition in complex environments based on an improved YOLOX-S model. *Waste Management*, 190, 398–408. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.005>