T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

PARAMETRİK ALGILAMA İÇİN ESNEK OPTİK SENSÖR GELİŞTİRİLMESİ

Hazırlayan
Ekrem Kürşad DAL

Danışman
Prof. Dr. Recai KILIÇ

Doktora Tezi

Ağustos 2025
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

PARAMETRİK ALGILAMA İÇİN ESNEK OPTİK SENSÖR GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Ekrem Kürşad DAL

Danışman
Prof. Dr. Recai KILIÇ

Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından FDK-2020-9708 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ağustos 2025
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Ekrem Kürşad DAL

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Parametrik Algılama İçin Esnek Optik Sensör Geliştirilmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Ekrem Kürşad DAL	Prof. Dr. Recai KILIÇ
İmza	İmza

Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Enis GÜNAY

İmza

TEŞEKKÜR

"Parametrik Algılama İçin Esnek Optik Sensör Geliştirilmesi" konulu tez çalışmamda başta emeğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Recai KILIÇ'a, tezin her aşamasında katkılarından dolayı tez izleme komitesinde yer alan Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU ve Prof. Dr. Celal ÖZTÜRK'e desteklerinden dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tezi eğitim hayatım boyunca desteğini esirgemeyen aileme ithaf ediyorum. Özellikle annem Medine DAL'a, babam Adnan DAL'a ve kardeşim Murat Eren DAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasının farklı aşamalarında bana destek olan ve tezin disiplinler arası hüviyet kazanmasına katkı veren Erciyes Üniversitesi öğretim elemanları Prof. Dr. Adem Güneş, Arş. Gör. Ahmet Yasin BARAN, Arş. Gör. Uğur TÜRKDAMAR'a ve Abdullah Gül Üniversitesinden Prof. Dr. Evren MUTLUGÜN, Dr. Sinan GENÇ, ve Dr. Ahmet Faruk YAZICI'ya teşekkür ederim.

Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne FDK-2020-9708 kodlu proje desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ekrem Kürşad DAL

Ağustos 2025, KAYSERİ

PARAMETRİK ALGILAMA İÇİN ESNEK OPTİK SENSÖR GELİŞTİRİLMESİ

Ekrem Kürşad DAL

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Ağustos 2025
Danışman: Prof. Dr. Recai KILIÇ

ÖZET

Çevre kirliliği bütün canlıları etkileyen önemli sorunlardan birisi olup, denetim altında tutulması gereken bir unsurdur. Bu kirliliklerin başında da ağır metaller ve mikroplastikler gelmektedir. Doğada yok olmaları uzun zaman alan bu kirlilikler dünya üzerinde kimi bölgelerde toksik seviyelere ulaşabilmektedir. Bu nedenle su gibi hayati bir tüketim maddesindeki ağır metal ve mikroplastik tespiti önem arz etmektedir.

Tez kapsamında iki farklı sensör sistemi, tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sunulan görüntü temelli sensör sisteminde, mikroplastikleri boyutuna ve cinsine göre derin öğrenme algoritması ile otonom sınıflandırabilen, düşük maliyetli, yüksek doğruluğa sahip bir cihaz tasarımı yapılmıştır. Çeşitli dalgaboylarındaki lazer ışık kaynaklarının farklı girişim desenlerini meydana getirmesi sayesinde yüksek sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Bir diğer sunulan fotoreseptör temelli sensör sisteminde mikroplastiklerin konsantrasyonu, cinsi ve boyutu tespit edilmeye çalışılırken, ağır metallerin de hem cinsine hem de konsantrasyonuna göre sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Mikroplastik deneylerinde, çapı 10 µm ve 8 µm olan polistiren küreleri ile 8 µm çapındaki melamin küreleri çeşitli konsantrasyonlarda kullanılmıştır. Ağır metal olarak suda çözünmüş, çeşitli konsantrasyonlarda olan arsenik, kadmiyum, krom, bakır, cıva, nikel, kurşun ve çinko metalleri kullanılmıştır. Görüntü temelli sensör sisteminde farklı su ortamlarındaki mikroplastikler YOLO ve ResNet algoritmaları ile sınıflandırılırken, fotoreseptör temelli sensör sisteminde hem deiyonize sudaki mikroplastikler hem de sudaki ağır metaller MLP algoritması ile sınıflandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optik sensörler, Ağır metaller, Mikroplastikler, Opto elektronik, Gömülü sistemler, Derin öğrenme, Yapay zeka, Makine öğrenmesi, Zararlı maddeler, Su, YOLO, MLP

DEVELOPMENT OF FLEXIBLE OPTICAL SENSOR FOR PARAMETRIC DETECTION

Ekrem Kürşad DAL

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD. Thesis, August 2025
Supervisor: Prof. Dr. Recai KILIÇ

ABSTRACT

Environmental pollution is one of the major problems affecting all living things and must be kept under control. Heavy metals and microplastics are among the most common pollutants. These pollutants take a long time to decompose in nature and can reach toxic levels in some regions around the world. Therefore, the detection of heavy metals and microplastics in a vital consumer product like water is crucial.

Two different sensor systems were designed and implemented within the scope of this thesis. The presented image-based sensor system utilizes a deep learning algorithm to autonomously classify microplastics based on their size and type, providing a low-cost, high-accuracy device. The different interference patterns created by laser light sources at various wavelengths yielded high classification success. Another photoreceptor-based sensor system attempted to determine the concentration, type, and size of microplastics while also classifying heavy metals based on both type and concentration. In the microplastic experiments, polystyrene spheres with diameters of 10 μm and 8 μm and melamine spheres with diameters of 8 μm were used at various concentrations. Arsenic, cadmium, chromium, copper, mercury, nickel, lead, and zinc, dissolved in water at various concentrations, were used as heavy metals. In the image-based sensor system, microplastics in different aquatic environments were classified using the YOLO and ResNet algorithms, while in the photoreceptor-based sensor system, both microplastics in deionized water and heavy metals in water were classified using the MLP algorithm.

Keywords: Optical sensors, Heavy metals, Microplastics, Opto electronic, Embedded systems, Deep learning, Artificial intelligence, Machine learning, Hazardous materials, Water, YOLO, MLP

İÇİNDEKİLER

PARAMETRİK ALGILAMA İÇİN ESNEK OPTİK SENSÖR GELİŞTİRİLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR x
TABLOLAR LİSTESİ xi
ŞEKİLLER LİSTESİ xii
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
GENEL BİLGİLER

1.1. Literatür Taraması 6
1.2. Madde Algılamada Makine Öğrenmesi 18
1.3. Benzer İçerikli Sistemlerle Karşılaştırma 20

2. BÖLÜM
OPTİK MADDE ALGILAMA TEORİSİ

2.1. Maddelerde Gerçekleşen Optik Olaylar 23

3. BÖLÜM
GÖRÜNTÜ VE FOTORESEPTÖR ESASLI MADDE ALGILAMA SİSTEMLERİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ

3.1. Görüntü Temelli Sensör Sistem Tasarımı 41
3.1.1. Görüntü Temelli Sensör Sisteminin Donanım Bileşenleri 42
3.1.2. Görüntü Temelli Sensör Sisteminin Otonom Yazılımı 50
3.2. Fotoreseptör Temelli Sensör Sistem Tasarımı 53

3.2.1. Fotoreseptör Temelli Sensör Sisteminin Donanım Bileşenleri.....54
3.2.2. Fotoreseptör Temelli Sensör Sisteminin Otonom Yazılımı.....59

4. BÖLÜM
DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN BULGULAR
4.1. Görüntü Temelli Sensör Sisteminin Deneysel Çalışmaları.....62
4.1.1. Numunelerin Hazırlanması.....62
4.1.2. Ölçüm ve Değerlendirmeler.....64
4.2. Fotoreseptör Temelli Sensörün Sisteminin Deneysel Çalışmaları.....72
4.2.1. Numunelerin Hazırlanması.....72
4.2.2. Ölçüm ve Değerlendirmeler.....73

5. BÖLÜM
TARTIŞMA VE SONUÇLAR

KAYNAKLAR.....94
ÖZGEÇMİŞ.....108

KISALTMALAR

MP	:	Mikroplastik
HM	:	Ağır Metal
PS	:	Polistiren
ME	:	Melamin
MLP	:	Çok Katmanlı Algılayıcı
LED	:	Işık Yayan Diyot
ICP-OES	:	İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi
ICP-MS	:	Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi
PLA	:	Polilaktik Asit
UV	:	Ultraviyole
AAS	:	Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi
ppm	:	Milyondaki Partikül Miktarı
ADC	:	Analog-Dijital Dönüştürücü
MYTG	:	Maksimum Yarısı Tam Genişlik
ml	:	Mililitre
nm	:	Nanometre
µl	:	Mikrolitre
µm	:	Mikrometre

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Ağır metallerin ultraviyole ve görünür bölgedeki absorbsiyon dalgaboyları 18
Tablo 1.2. İlgili çalışmalar 21
Tablo 3.1 Görüntü temelli sensörde kullanılan kamera özellikleri 43
Tablo 3.2. Sparkfun AS7265x teknik özellikleri 58
Tablo 3.3. Çok katmanlı algılayıcı algoritmasının kullanılan parametreleri 61
Tablo 4.1. Kullanılan mikroplastiklerin teknik verileri 63
Tablo 4.2. 10µm çaplı polistirenin konsantrasyonuna göre halka değişimi 66
Tablo 4.3. 8 µm çaplı melaminin konsantrasyonuna göre halka değişimi 67
Tablo 4.4. 8 µm çaplı polistirenin konsantrasyonuna göre halka değişimi 67
Tablo 4.5. Derin öğrenme algoritmalarının karşılaştırmalı sonuçları 70
Tablo 4.6. YOLO v11'in farklı su ortamlarında mikroplastik tespit başarısı 71
Tablo 4.7. Özellik seçilimi uygulanmamış verilerde konsantrasyon bağımlı doğru sınıflandırma yüzdesi 73
Tablo 4.8. Özellik seçilimi uygulanmamış verilerde konsantrasyondan bağımsız doğru sınıflandırma yüzdesi 77
Tablo 4.9. En iyi 10 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyon bağımlı doğru sınıflandırma yüzdesi 79
Tablo 4.10. En iyi 10 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyondan bağımsız doğru sınıflandırma yüzdesi 82
Tablo 4.11. Konsantrasyonsuz mikroplastik numuneler için seçilen 10 özellik 85
Tablo 4.12. En iyi 20 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyon bağımlı doğru sınıflandırma yüzdesi 85
Tablo 4.13. En iyi 20 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyondan bağımsız doğru sınıflandırma yüzdesi 88

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Sudaki kirlilik analizi tekniklerinin evrimsel gelişimi 7
Şekil 1.2. Mikroplastiklerin potansiyel olarak temiz sulara karışma yolları 10
Şekil 1.3. Mikroplastik üzerine yapılan çalışmaların konu dağılımı 11
Şekil 1.4. Su şişelerinin içerdiği yabancı maddeler 12
Şekil 1.5. Grant Jacob ve ark. mikroplastik saçılım ölçüm sistemi 17
Şekil 2.1. Mie saçılımının partikül boyutuna göre değişimi 23
Şekil 2.2. Atmosferik halka oluşması olayı 24
Şekil 2.3. Mikropartiküllerde gerçekleşen optik olaylar 25
Şekil 2.4. Kırılma olayı 29
Şekil 2.5. Partiküle çarpan ışığın kırınımı 30
Şekil 2.6. Büyüme ve süblimleşmeye bağlı olarak Mie saçılımındaki değişim 31
Şekil 2.7. Partikülün biçimine bağlı olarak oluşturduğu girişim desenlerinin simülasyonu 31
Şekil 2.8. Henyey-Greenstein fonksiyonunun farklı izotropi değerleri için dağılımı. 38
Şekil 2.9. Henyey-Greenstein fonksiyonun Mie saçılımı ile karşılaştırılması 39
Şekil 2.10. Değiştirilmiş Henyey-Greenstein fonksiyonunun Mie saçılımı ve Henyey-Greenstein ile karşılaştırılması 39
Şekil 3.1. Görüntü temelli sensör sisteminin blok diyagramı 42
Şekil 3.2. Görüntü temelli sensör sisteminin kurulu düzeneği 42
Şekil 3.3. Görüntü temelli sensör sisteminin kapaklı hali 44
Şekil 3.4. İlk sürüm ışın birleştiricisi tasarımı 45
Şekil 3.5. İkinci sürüm ışın birleştiricisi tasarımı 46
Şekil 3.6. Mikroplastik içeren su içerisinde odaklanmış lazer ışınının çıkış deseni 47
Şekil 3.7. Mikroplastiklere çarpan paralel ışının halka şeklindeki saçılımı 47
Şekil 3.8. Kırmızı lazer'in spektrumunun ölçüm sonucu 48
Şekil 3.9. Yeşil lazer'in spektrumunun ölçüm sonucu 48
Şekil 3.10. Mor lazerin spektrumunun ölçüm sonucu 49
Şekil 3.11. YOLO algoritmasında ızgaralandırılma işleminin gerçekleştirilmesi 53
Şekil 3.12. Fotoreseptör temelli sensör sisteminin blok diyagramı 54

Şekil 3.13. Fotoreseptör temelli sensör sistemi 55
Şekil 3.14. Fotoreseptör temelli sensör sistemindeki LED'lerin spektrumu 56
Şekil 3.15. SparkFun üçlü spektroskopi algılayıcı modülü (AS7265x) 56
Şekil 3.16. Algılayıcı modülü AS7265x üzerindeki fotodiyotların spektral cevapları.....57
Şekil 3.17. AS7265x algılayıcı tümdevresinin ortalama görüş alanı 59
Şekil 3.18. Üçlü spektral algılayıcı modülünün dış kılıfı 59
Şekil 4.1. Deiyonize suyun lazer ışını karakteristiği (a) Kırmızı lazer için, (b) Yeşil lazer için, (c) Mor lazer için 64
Şekil 4.2. 1ml içerisinde 1µl, 10µm çapında PS olması sonucu lazer ışını karakteristiği (a) Kırmızı lazer için, (b) Yeşil lazer için), (c) Mor lazer için 64
Şekil 4.3. YOLO V11 kullanılarak deiyonize su içerisinde mikroplastik sınıflandırmasının karışıklık matrisi 69
Şekil 4.4. ResNet 18 kullanılarak deiyonize su içerisinde mikroplastik sınıflandırmasının karışıklık matrisi 69
Şekil 4.5. ResNet 50 kullanılarak deiyonize su içerisinde mikroplastik sınıflandırmasının karışıklık matrisi 70
Şekil 4.6. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi.....74
Şekil 4.7. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi.....74
Şekil 4.8. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi.....75
Şekil 4.9. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi.....75
Şekil 4.10. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi.....76
Şekil 4.11. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi.....76
Şekil 4.12. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 77

Şekil 4.13. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 77
Şekil 4.14. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 78
Şekil 4.15. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 78
Şekil 4.16. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 78
Şekil 4.17. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 78
Şekil 4.18. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 79
Şekil 4.19. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 80
Şekil 4.20. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 80
Şekil 4.21. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 81
Şekil 4.22. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 81
Şekil 4.23. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 82

Şekil 4.24. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 83
Şekil 4.25. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık Matrisi 83
Şekil 4.26. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 83
Şekil 4.27. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 83
Şekil 4.28. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karmaşıklık matrisi 84
Şekil 4.29. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 84
Şekil 4.30. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 85
Şekil 4.31. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 86
Şekil 4.32. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 86
Şekil 4.33. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 87
Şekil 4.34. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 87

Şekil 4.35. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 88
Şekil 4.36. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 88
Şekil 4.37. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 89
Şekil 4.38. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 89
Şekil 4.39. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 89
Şekil 4.40. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 89
Şekil 4.41. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi 90

GİRİŞ

Tehlikeli maddeler günümüzde hem çevre hem de gıda alanlarında önemli bir problemdir. Her madde belirli bir miktarı aştığında tehlikeli madde özelliği kazanabilmektedir. Özellikle bazı maddeler doğada yok olurken uzun yıllar süren çözünme ve parçalanma süreçlerinden geçebilmektedirler. Bu maddelerin başında da plastikler ve metaller gelmektedir. Cam ve kağıt gibi malzemeler geri dönüştürülmediğinde enerji ve ham madde kaybı gibi telafi edilebilir sorunlara sebep olmaktadır. Ancak plastik ve metaller doğaya ciddi zararlar verebilmektedir. Hem uzun süren yok olma süreleri, hem yok olurken vermiş olduğu zararlar fazladır. Bu maddelerin birikebilme özellikleri sebebi ile bir ortamda fazla miktarda olması tehlikeyi artıran etmenlerdedir.

Metal ve plastik ürünler tüketicilerin sıklıkla kullanmış olduğu malzemelerdir. Mutfak gereçleri, elektronik cihazlar, elektrikli ev aletleri, tekstil, mobilya, aksesuarlar, oyuncaklar, gıda ambalajları, kozmetik ürünleri, deterjanlar… gibi büyük bir yelpazede yer almaktadır. Bu ürünlerin ve ambalajlarının ömrünü tamamladıklarında geri dönüştürülmesi son derece önemlidir. Çünkü bu malzemeler geri dönüştürüldüğünde tekrar üretimde değerlendirilebilirken, doğaya bırakıldığında tehlikeli maddelere dönüşmektedir.

Ürünleri taşımak için kullanılan birçok çanta ve poşetler de yine çoğunlukla plastik ürünleridir. Son yıllarda doğal malzemelerin polimer hale getirilmesi ile elde edilen plastik türleri poşetlerde kullanılabilmektedir. Bunlardan en önemlisi laktik asitin polimer haline getirilmesi ile üretilen PLA yani polilaktik asittir. Laktik asit insan kaslarında oksijensiz solunum esnasında oluşan, hamlama ağrılarını veren, yoğurtta ekşi tadı veren malzemedir. Mısır nişastasına ekilen bakterilere laktik asit fermantasyonu yaptırılarak elde edilen laktik asit kimyasal süreçler sonrasında plastik haline

dönüştürülmektedir. Aynı şekilde bu malzeme doğal kaynaklı olduğu için doğada bakteriler vasıtası ile parçalanabilmektedir. Ancak bu malzemeleri uzun ömürlü olması gereken yerlerde kullanabilmek zordur. Lateks ağaçtan elde edilebilen, kauçuğun ham maddesi olarak doğal bir malzeme iken, üretiminin pahalı olması sentetik lateks üretimine ve kullanımına neden olmaktadır. Benzer şekilde sünger bir deniz canlısı ve aynı zamanda insanların farklı amaçlarla kullandığı bir malzeme olup, doğal hali kullanım açısından pahalı olduğu için sentetik süngerler günümüzde daha sık kullanılmaktadır.

Sentetik plastikler için temelde kullanılan ham madde petroldür. Temelde petrol de fosilleşmiş canlıların kalıntılarından elde edilen doğal bir maddedir. Ancak petrolden elde edilen plastikler çok daha uzun ömürlü olup, doğada yok olmaları uzun yıllar sürmektedir. Doğada yok olurken öncelikle küçük parçalar haline gelmektedir. Bu küçük parçalar hayvanlar tarafından yiyecek ile karıştırılarak tüketilebilmektedir. Plastikler hayvanlar tarafından sindirilemeyen maddeler olduğu için dışkı yoluyla atılabilmektedir. Fakat keskin uç veya kenara sahip olanlar, sindirim sisteminden geçemeyecek büyüklükte olanlar ve dokulara nüfus edebilecek küçüklükte olanlar sindirim sisteminden uzaklaşılmayabilmektedir. Bu durum sindirim sisteminde plastiklerin birikmesine ya da tıkanıklık oluşmasına neden olarak canlının hayatını tehdit etmektedir. Bu plastikler aşındıkça daha küçük hale gelmektedir. Beş milimetreden daha küçük olan plastiklere mikroplastikler adı verilmektedir. Mikroplastikler gözle görülemeyecek boyutlar olan mikron, hatta nano metre boyutlarına ulaşabilmektedir. Bu durumda temas edilen plastikler hücresel boşluklardan dahi doku içlerine ulaşabilmektedir. Solunum yolu ile ya da tüketim maddesine bulaşı yolu ile de canlı vücuduna girebilmektedir.

Bazı plastik çeşitlerinin gıda ile teması da uygun görülmemektedir. Dokunsal olarak problem oluşturmayan plastikler gıda maddelerine temasında toksik kalıntılar bırakabilmektedir. Bazı plastikler ise ısıya maruz kaldığında toksik gaz salınımına neden olabilmektedir. Yani yapılacak iş, kullanım yeri, hangi biyolojik, fiziksel ve kimyasal etkilere dayanacağı gibi parametreler doğada çözünebilir plastiklerin kullanımını sınırlandırmaktadır.

Bunların yanı sıra plastiklere uygulanan katkı maddeleri ve boya pigmentleri de zararlı etkiler oluşturabilmektedir. Katkı maddeleri plastiğin sertliğini artırmak ya da azaltmak, darbe absorbsiyon miktarını değiştirmek, aşınma miktarını değiştirmek, plastiğin dokusunu değiştirmek gibi amaçlar ile plastiğin içerisine katılan maddelerdir. Boya pigmentleri ise plastiğin rengini değiştirmek için kullanılan malzemeler olup, kimi zaman parlaklığını artırmak ya da metal görüntüsü vermek için alüminyum, kurşun, kadmiyum gibi ağır metaller de içerebilmektedir. Bu plastikler aşınarak küçük plastikler haline geldiğinde ve canlı vücuduna alındığında maalesef plastikten farklı olarak katkılanan maddeler ve pigmentler de bu zararı artırabilmektedir.

Ağır metaller toprağa ya da suya atılan metallerin suyun, su içerisindeki minerallerin veya topraktaki maddelerin vasıtasıyla aşınması, iyonizasyonu, oksidasyonu ya da farklı kimyasallar ile bileşik oluşturması ile meydana gelebilmektedir. Uygulama amacına bağlı olarak farklı şekillerde katkılanmış (örneğin boyalara ve yağlara), endüstriyel amaçlar için üretilmiş (örneğin temizlik maddeleri) maddelerde ağır metaller bulunmaktadır. Ağır metaller ucuz oyuncaklar ve tekstil ürünleri üretebilmek amacıyla boyaların daha kolay kapatıcılık sağlaması, metalik veya parlak canlı renkler verilmesi için kullanılabilmekte, bu durum farklı sağlık problemlerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Örneğin, alerjik reaksiyonlar, döküntüler, zehirlenmeler, vücutta ağır metal birikimi ve bunlara bağlı hastalıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bazı fabrika atıkları da ağır metaller taşıyabilmektedir. Bunların doğru filtrasyon teknikleri kullanarak atık yönetimi gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Ağır metallerin çeşidine göre farklı hastalıklar oluşabilmektedir. Bunlara Minamata ve Itai Itai sendromları örnek gösterilebilmektedir.

Ağır metallerin doğada yok olması için farklı maddeler ile bileşik oluşturarak zararsız ve kararlı hale gelmeleri, kemosentetik bakteriler tarafından parçalanmaları veya yoğun olduğu bölgeden dağılarak zararsız miktarlara ulaşması ile tehlikeleri azalabilmektedir. Bu durum uzun süren süreçler ile meydana gelmekte olup, tam tersi olacak şekilde temiz sulara ve topraklara ağır metallerin taşınmasına da sebep olabilmektedir. Bu nedenle kirleticilerin kaynağında doğru ve hızlı tespiti önem arz etmektedir.

Mikroplastikler ve ağır metaller çevreye ve canlılara zararı olan malzemelerdir. Hızlı şekilde tespiti ile kontrol altına alınabilmesi veya kaynağının bulunabilmesi

mümkündür. Spektrofotometreleri, mikroskopları veya laboratuvar ekipmanlarını kullanarak yapılan tespitler hem pahalı hem de uzman tarafından değerlendirilmesi gereklidir.

Bu tez çalışmasında bu dezavantajları ortadan kaldırabilecek iki farklı sistem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen sensör sistemleri maddelerin tespitini sağlarken aynı zamanda konsantrasyonları konusunda değerlendirmesini eğitilebilir makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları kullanarak yapabilmektedir. Yeni çevresel problemleri öğrenerek bu problemleri hızlı ve insansız olarak tespit edebilmektedir. Büyük cihazlar olmadıkları için taşınarak yerinde ölçüm gerçekleştirebilmektedir.

Görüntü temelli sensör sistemi mikroplastiklerin lazer ışınına maruz kaldığında oluşturduğu Mie saçlım deseninin YOLO algoritması ile değerlendirilmesini sağlayan bir yapıdadır. Dört farklı dalgaboyuna sahip üç lazer kullanılmıştır. Işık kaynağındaki dalgaboyu farklarının mikroplastik saçılımları üzerindeki etkileri ile madde sınıflandırma başarısının yükselmesi hedeflenmiştir. Çalışmada üç farklı mikroplastik çeşidinin su içerisinde 1µl ile 10µl arasındaki farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış numuneleri incelenmiştir. Sistem mikroplastiklerin çeşidinin algılanmasında yüksek başarı göstermiştir.

Geliştirilen fotoreseptör temelli sensör çok katmanlı algılayıcı (MLP-Multilayer Perceptron) algoritması ile gerçekleştiren bir sistemdir. Sistem 22 adet farklı ışık spektrumunda LED ve 18 adet dar bant genişlikli fotodiyotlardan meydana gelmektedir. Çok parametreli optik olay değerlendirmesi ile gelen ışığın absorbans ve spektrumda kaymış bant genişlikleri değerlendirilebilmektedir. Çalışmada görüntü temelli sensör sisteminde kullanılan numunelere ek olarak, 8 farklı ağır metalin su içerisinde farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış numuneleri incelenmiştir. Bunlara herhangi bir indikatör kimyasalı uygulanmadan ölçümler gerçekleştirilmiştir. Konsantrasyonsuz değerlendirmede yüksek başarı gösterirken, ağır metaller için kabul edilebilir oranda konsantrasyon doğruluğu göstermiştir.

Bu tez kapsamında, birinci bölümde mikroplastiklerin ve ağır metallerin oluşumu, geçmişten günümüze zararları ve tespit yöntemleri anlatılmıştır. Literatürde bu sorunların tespiti için geliştirilen probleme yönelik optik temelli çalışmalar

incelenmiştir. Yıllara göre değişen ölçüm tespit yöntemlerindeki gelişmelerden ve değişimlerden bahsedilmiştir. Makine öğrenmesi ve yapay zeka destekli sistemlerin madde tespiti konusundaki otonom yapısının sağladığı avantajlar anlatılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde mikroplastikler ve ağır metaller içeren sıvılarda gerçekleşen kırınım, kırılma, yansıma, absorbans ve Mie saçılımı optik olayları anlatılmış, dayandıkları yasalar ve teoriler sunulmuştur. Bu yasaların hesaplama yöntemleri ve hesaplamak için gerekli olan parametreler verilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen görüntü temelli sensör sisteminin ve fotoreseptör temelli sensör sisteminin dayandırıldığı optik temeller sunulmuştur.

Sensör sistemlerinin yapısı, bağlantıları, optik sistemleri, ölçüm sonuçlarının aktarılması üçüncü bölümde anlatılmıştır. Değerlendirmede kullanılan çok katmanlı algılayıcı ve YOLO algoritmalarına bu bölümde yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde numunelerin hazırlanışı ve iki farklı sensör sisteminin ölçüm sonuçları, başarı oranları değerlendirilmiştir. Mikroplastiklerin ve ağır metallerin sınıflandırılmasındaki aşamalar gösterilmiştir.

Beşinci bölümde ise sensör sistemlerinin başarı durumları yorumlanmıştır. Sistemlerin ölçüm sınırları, avantajlı ve dezavantajlı durumları tartışılmıştır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Literatür Taraması

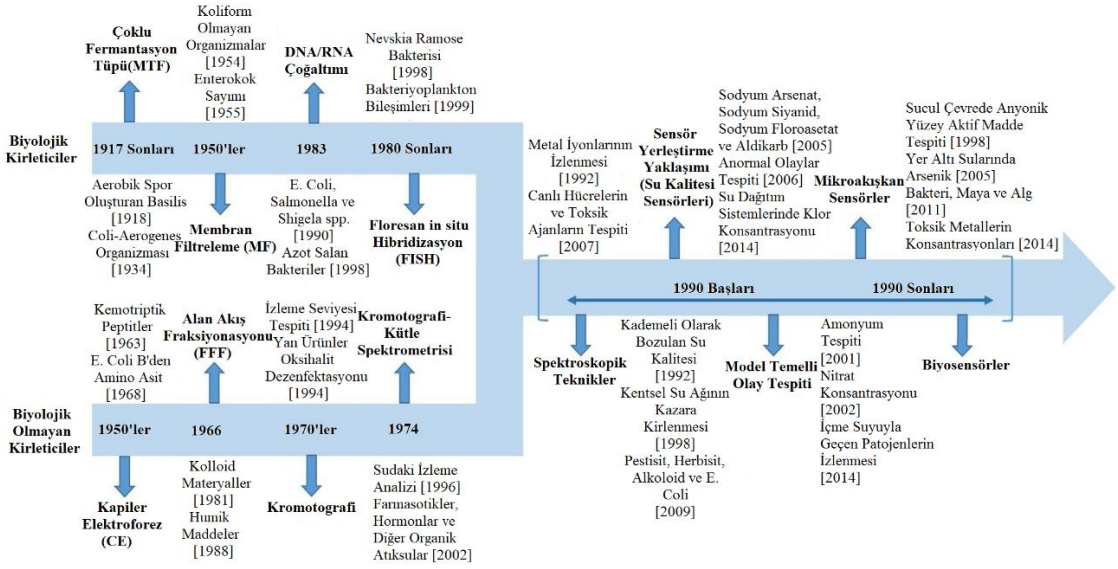
Madde tespiti çevrenin ve canlı hayatının sürdürülebilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Zararsız sayılan maddeler bile yüksek miktarda tüketildiğinde ya da maruz kalındığında, çeşitli sağlık problemlerine, hatta ölüme yol açabilmektedir. Zararlı maddelere ise çok düşük miktarlarda dahi maruz kalınmaması gerekmektedir.

Su, canlı hayatı için vazgeçilmez tüketim maddelerinden birisi olup, dünyada her geçen yıl temiz su kaynakları azalmaktadır. Temiz olarak kullandığımız su kaynakları dahi taşıma sırasında ya da kaynağında kirleticilerin etkisi ile tüketilemez duruma gelebilmektedir. Suyun, doğal ya da arıtılarak tüketime uygun olduğunun anlaşılabilmesi için sudan alınan ölçümlerdeki maddelerin sınır değerlerde olmasına bağlıdır. Bu maddeler içerisinde çözünmüş mineraller ve ağır metaller, suyun mikrobiyolojisi, sudaki yabancı partikül miktarı ve partikülün cinsi, toksinler gibi maddeler olup bu maddelerin miktarına göre doğrudan tüketime uygunluğuna, hangi bileşenlerin filtrelenerek kullanılması gerektiğine ya da kullanılamaz olduğuna karar verilmektedir.

Tüketime uygun, kaliteli bir suyun taşıması gereken sınır değerler, Dünya Sağlık Örgütünün (WHO-World Health Organisation) yayınladığı çalışmalarda belirtilmektedir [1–3]. Tüketilmeyen sular dahi, sınır değerleri aşacak seviyede kirlendiğinde canlı hayatına zarar vererek, habitatın bozulmasına neden olabilmektedir. Alglerin suda aşırı miktarda üremesi sonucunda, üretmiş oldukları toksinlere ve suda çözünen oksijen miktarına bağlı olarak toplu balık ölümünün olması bu duruma örnektir. Kimyasal ve radyoaktif atıkların sulara karışması sonucunda çevresel felaketler yaşanabilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü bazı kirlilik tipleri için filtrelemeyi, dezenfekte etmeyi tavsiye

ederken kirliliğin tipine göre değişen metotlar bulunmaktadır. Bazı su sağlayıcıları bu kurallara uyarken bazıları ise ihlal etmektedir. Örneğin klor kullanımı ile çoğu bakteri ve virüs türü dezenfekte edilebilirken, insanlarda hastalık yapan kriptosporidium adı verilen alveolat'a karşı efektif değildir [3]. Bu nedenle kolay kullanılabilen, hızlı ve doğru cevap verebilen sensörlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Zulkifli ve ark. sulardaki kirlilik durumlarını, kirlilik tespit yöntemlerini ve bu konuda yapılan çalışmaları kapsamlı olarak incelemiştir. Günümüze kadar geliştirilen ölçüm sistemleri ve algılama yöntemleri detaylı olarak irdelenmiştir. Yapılan çalışmada ağır metaller ve biyolojik kirlilikleri algılamak üzerine yoğunlaşılmıştır [4]. Şekil 1.1'de sudaki kirlilik analizinin evrimsel gelişim süreci gösterilmiştir. Günümüzde suyun kirliliğinin tespitinde spektroskopik yöntemlerin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 1.1. Sudaki kirlilik analizi tekniklerinin evrimsel gelişimi [4]

Evlerde kullanılan musluk suları ise su depoları, kanalizasyon ve tesisat sistemleri sebebiyle kirlenebilmektedir. Boruların yapıldığı materyaller, birleşim noktalarından yabancı madde karışması musluk sularının kirlenmesine neden olabilmektedir [5].

Dünya üzerinde plastik atıkların geri dönüşüm oranının düşük olması, endüstriyel atıklar ve bilinçsiz yok etme metotları gibi birçok durum çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır [6–8]. Atık yönetimi yaparak imhasını ya da geri dönüşümünü usule uygun

yapan az sayıda merkez ve ülke bulunmaktadır. Okyanuslara ve denizlere dökülen atıklar çözünerek parçalandığında buharlaşmanın etkisi ile havaya çıkabilmekte ve yağışlarla yer yüzüne inebilmektedir [9]. Bu sebeple verimli topraklar ve temiz doğal kaynak suları kirlenmektedir [10,11]. Bu kirliliklerin başında mikroplastikler ve ağır metaller gelmektedir. Sadece çözünme ile değil, endüstriyel üretimleri de bu kirliliğin artmasına neden olmuştur. Bazı durumlarda mikroplastikler ile ağır metaller birlikte de bulunabilmektedir[12,13]. Ağır metal katkılı boyalar ile boyanmış plastikler çözündüğünde ağır metal taşıyan mikroplastiklere dönüşebilmektedir. Endüstriyel olarak üretilen özellikle kozmetik ve deterjan ürünleri içerisinde, ürünün etkisini artırmak ya da doku oluşturabilmek için mikroplastikler kullanılabilmektedir [13,14]. Özellikle zararı bilinene kadar üretilen kurşun içerikli boyalar, kurşun oyuncaklar, su boruları, cıva içeren flüoresan lambalar günümüzde halen kullanılabilmektedir [13,15]. Biriken kirlilikler canlı hayatını olumsuz etkilemektedir [16,17]. Hayvanların ve insanların vücudunda biriktiği, yararlı mikroorganizmaların zarar gördüğü, zararlı organizmaların artmasına neden olduğu durumlar bulunmaktadır [18–23].

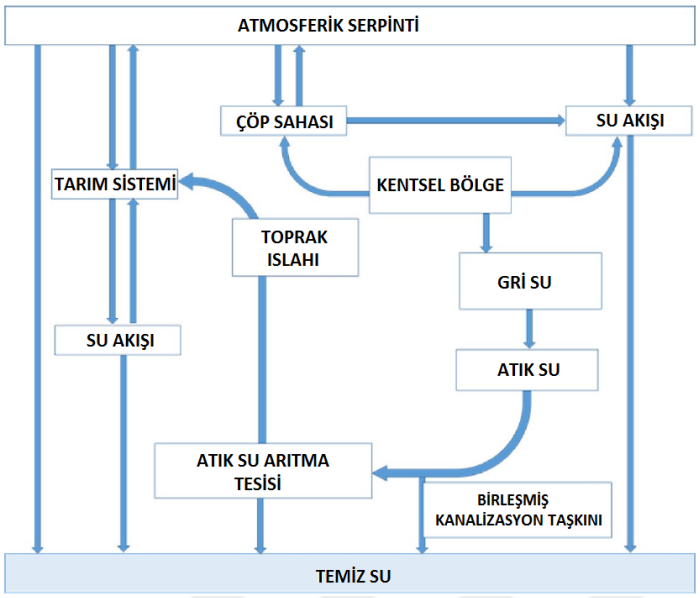
Mikropartiküller, doğada çözünmekte ya da aşınmakta olan maddelerden türediği gibi, endüstriyel olarak farklı işlerde kullanılması amacı ile de üretilmektedir. Bundan dolayı plastik, silisyum, metal gibi farklı yapıtaşlarından, değişken boyutlarda, çeşitli katkı maddelerinden ve renk pigmentlerinden oluşabilmektedir[24,25]. Mikropartiküllerin canlılara ve çevreye vermiş olduğu zararlar halen araştırılmakla birlikte zarar verdiğini gösteren çalışmalar bulunmaktadır[26]. Bu partiküller arasında özellikle mikroplastikler ciddi riskler taşımaktadır. Plastikler çoğunlukla biyolojik organizmalar tarafından doğada parçalanamayan maddelerdir[27]. Boyutu, malzeme cinsi, taşıdığı boya pigmentleri, absorbe ettiği maddeler ve plastiğe uygulanan katkı maddeleri mikroplastiklerin tehlikesini artırmaktadır[6,7,16,25,28]. Kanserojen etkiye sahip tipleri olduğu gibi, son zamanlarda bakterilere fermantasyon yoluyla sentezletilen laktik asitin, polimerizasyonu sonucu üretilen polilaktik asit (PLA) ve doğada organizmalar tarafından tüketilen plastik tipleri bulunur[29,30]. Bazı plastiklerin absorbe ettiği kurşun gibi ağır metaller ve biyolojik kirlilikler mikroplastikler tarafından taşınabilmektedir[12,28]. Sofrada kullanılan tuzlar, içme suları, kişisel bakım ve kozmetik ürünleri, sentetik tekstil ürünleri ve hava mikroplastik taşıyabilen bazı

vektörlerdir[14,27,31–35]. Bu nedenle mikroplastik tespiti son zamanlarda fenomen konulardan olup, tespiti insan ve canlı hayatı için önemlidir.

Mikroplastikler, plastiklerin aşınması, doğada çözünmesi ya da kullanım için üretilmesi ile meydana gelmektedir[13]. Mikroplastik kavramı beş mm boyutundan daha küçük olan plastik parçaları tanımlamaktadır[36]. Birkaç mm boyutunda olan mikroplastikler gözle görünebilir[13]. Böylece kaçınmak insanlar açısından problem teşkil etmez. Ancak hayvanlar bu boyuttaki parçaları da tüketebilirler. İnsanlar ve hayvanlar açısından sindirilebilmesi mümkün olmayan bu partiküller vücuttan atılamadığında birikmeye neden olmaktadır[20]. Sivri ve keskin yapıda olanlar sindirim sisteminde yaralanmalara ve enfeksiyona neden olabilmektedir[6]. Diğer taraftan mikron boyutunda çözünen mikroplastiklerin çıplak gözle görünmeleri zordur. Küçük boyutta olmaları sebebiyle doku içerisine nüfus edebilmektedir[20]. Bu da dokuların zarar görmesine neden olabilmektedir. Taşıdığı pigmentler ve katkılar, ağır metal ve zararlı kimyasallar barındırabilmektedir[25]. Mikrobiyolojik canlıları üzerinde taşıyan partiküller de hastalık taşıyabilmektedir[19].

Mikroplastiklerin kaynaklarının tespiti, taşıma vektörlerinin bulunması, zararlarının araştırılması, gıda maddelerinin tüketime elverişliliğinde, birikim durumlarının tespitinde hızlı, öğrenebilir ve taşınabilir sistemler önemlidir. Mevcut sistemler ile tespiti yapılabilse de alternatif sistemlerin düşük fiyat ve otomatik sınıflandırmada yüksek performans avantajlarına sahiptir.

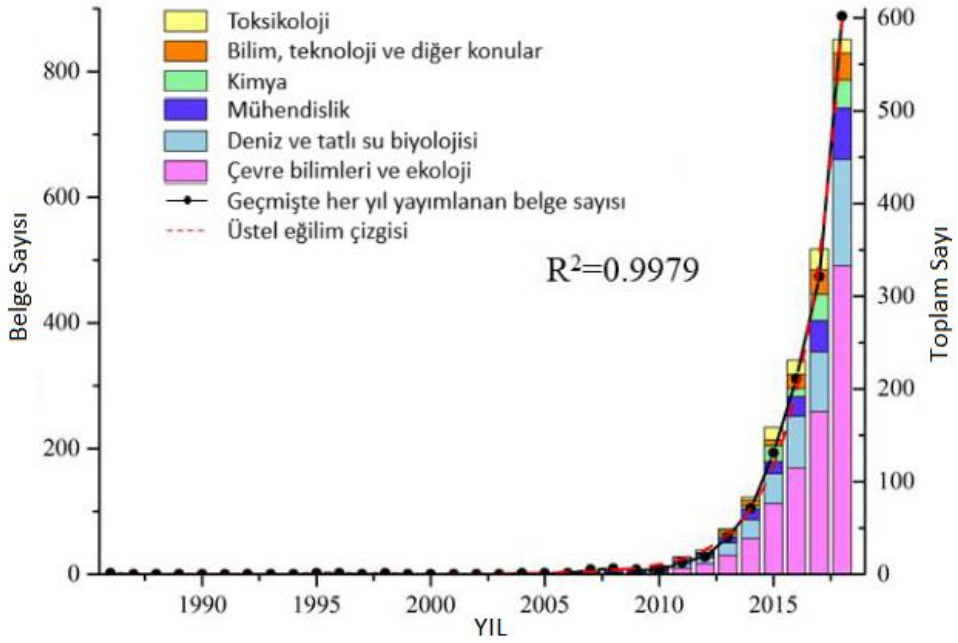
Son yıllarda yapılan çalışmalarda su şişelerinin neden oldukları partiküllerin; özellikle de mikroplastiklerin üzerindeki çalışmalar dikkat çekmektedir [25,37]. Mikropartiküllerin bazılarının zarar verdiği tespit edilirken [38–40] bazılarının insan ve hayvan sağlığı üzerindeki etkileri halen araştırma konusudur [25,41,42]. Deniz ve okyanus sularına genellikle atık sulardan, denize atılan çöplerden ve topraktan karışan mikroplastik kirliliği de mevcuttur. Parçalanan makroplastikler, zaman içerisinde mikroplastiklere dönüşerek sulardaki mikroplastik kirliliğinin artmasına neden olmaktadır. Diş macunlarında, deterjanlarda ve temizlik maddelerinde temizleme etkisini artırmak için mikroplastiğin bilinçli üretimi, kirliliği artıran faktörler arasında yer almaktadır. Mikroplastiklerin çevreden temiz suya karışımını gösteren diyagram Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Mikroplastiklerin potansiyel olarak temiz sulara karışma yolları [43]

Endüstriyel olarak üretilen (birincil mikroplastikler) ya da büyük boyutlu plastiklerin parçalanarak türediği mikroplastiklerin (ikincil mikroplastikler)[15] farklı vektörler ile suya karıştığı canlı hayatına etki ettiği yapılan çalışmalarda görülmektedir [44]. Gelişen görüntüleme ve sensör teknolojileriyle birlikte nano plastik kavramının da literatürde yer bulduğu görülmüştür [6]. Mikroplastikler konusunda yapılmış 2128 yayın bibliyometrik olarak Ying ve ark. tarafından incelenmiştir [24]. Ying ve ark. Şekil 1.3'te listelenen çalışmaların çoğunun çevre bilimi ve ekolojik açıdan konuya yaklaştığı, az sayıda makalenin bu problemi mühendislik açısından ele aldığını göstermiştir. 2010 yılından önce bu konuda yapılan çalışmalar yıllık 10 adetten az iken, 2011 yılından beri üstel olarak artan sayıda ($R^2 = 0{,}9979$) mikroplastik konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Mühendislik üzerine yapılan çalışmaların daha çok tespitine ve miktarına yönelik çalışmalar olduğu görülmüştür. Optik temelli algılama sistemlerinde, şeffaf mikroplastiklerde kırılma indisi farkından, flüoresans pigment içeren mikroplastiklerde ultraviyole ışık altındaki ışık yayılımından faydalanıldığı görülmüştür. Bu nedenle mikroplastik tespitine yönelik yapılacak çalışmalarda kırınım, saçılım ve flüoresans önemli bir rol oynayacaktır.

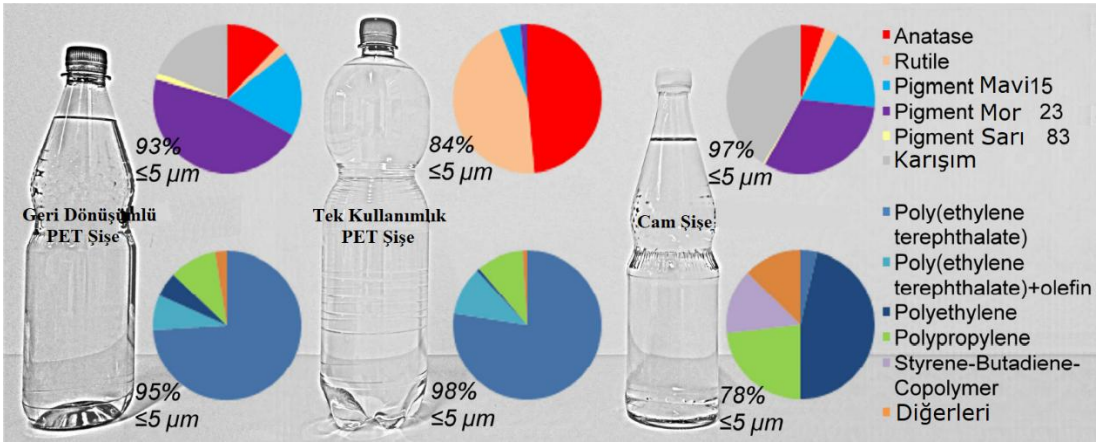


Şekil 1.3. Mikroplastik üzerine yapılan çalışmaların konu dağılımı [24]

Günümüzde şerit (strip) tarzı kimyasal belirteçli (indicator) sensörler olabildiği gibi [45–47]; elektronik olarak kullanılabilen, bir ya da birden fazla parametreyi detaylı olarak ölçerek çoklu madde tespiti gerçekleştiren sensörler ve cihazlar da mevcuttur [48,49].

Oßmann ve ark. su şişelerini geri dönüştürülebilir PET, tek kullanımlık PET ve cam olarak ayırıp, içerdiği yabancı madde, pigment ve mikroplastik türlerine göre incelemiştir. 32 numune 21 markadan alınan sular test edilmiştir. Polikarbonat membran ve μ-Raman spektroskopisi kullanılarak 1μm'lik partiküller tespit edilebilmiştir. μ-FTIR(Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi - Fourier-Transform Infrared Spectroscopy) spektroskopisinin 10μm'den büyük partikülleri, μ-Raman spektroskopisinin 1μm'den küçük partikülleri ayırmada başarılı olduğu vurgulanmıştır [25]. Şekil 1.4'te su şişesi tiplerine göre içerdiği yabancı maddelerin oranları görülmektedir.

Mikroplastiklerin tespiti konusunda yapılan çalışmalarda, şeffaf plastiklerin taşınabilir optik cihazla tespiti [36], yüzey zenginleştirilmiş raman spektroskopisi ile tespiti [50] ya da mevcut cihazlar ve metotlarla tespiti [51] konularını işlemektedir.



Şekil 1.4. Su şişelerinin içerdiği yabancı maddeler [25]

Mikroplastiklerin mevcut ölçüm yöntemlerine, tehlikesine ve tespitine dair yapılan çalışmalar da incelenmiştir. Güncel problemlerden olan Covid-19 salgınında kullanılan cerrahi maskelerin ve ıslak mendillerin yeni mikroplastik kaynağı olduğuna dair Hu ve Ark. çalışma yapmışlardır[52]. Kent şehir temiz sularında bulunan mikroplastiklerin tespiti konusunda Sun ve Ark. çalışma yürütmüştür[53]. Zobkov ve Ark. göl dibindeki tortudaki mikroplastiklerin incelenme adımlarını ve metodolojisi konusunda çalışmalar yapmıştır[54].

Mikroplastikler genellikle µ-FTIR ve µ-Raman cihazları ile ölçülerek tespit edilebilen partiküllerdir [55,56]. Görüntüleme temelli olarak makroskop, mikroskop, çok ışınlı optik mikroskopi ya da floresan mikroskobu ile görüntülenebilmektedir [13]. Ancak bunlar mikroplastiğin çeşidi konusunda bilgi verememektedir. Kütle spektroskopisi (MS-Mass Spectroscopy) kimyasal yapısı hakkında bilgi veren yöntemler arasında yer almaktadır [13]. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscopy) mikroplastiğin fiziksel yüzey morfolojisi hakkında detaylı bilgi verebilirken kimyasal bileşimi konusunda yeterli bilgi verememektedir [13]. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) ise yüzey kimyası hakkında bilgi verebilirken, iç yapısı hakkında yeterli bilgi verememektedir [57,58]. Cihaz ile yapılan ölçüm sonuçları teknik ve eğitim almış kişiler tarafından değerlendirilmelidir. Bu durum sistemlerin sınırlı süre çalışabilmesine, insan hatasına açık olmasına ve yavaşlamalara neden olmaktadır. Günümüzde el tipi, taşınabilir cihazlar bulunsa da pahalı cihazlardır [59]. Mikroplastiklerin yayılım kaynaklarının bulunabilmesi için numune hazırlık sürecinin kısa, ölçümün ve değerlendirmenin hızlı

olması gereklidir. Dahası ölçüm sistemlerinin sayısının artması, bunun için ise cihaz ücretinin ulaşılabilir fiyatlarda olması gereklidir. Mevcutta cihazlar olsa dahi yeterli personel olmadıkça değerlendirme mümkün olamayacaktır. Bu amaçlar doğrultusunda probleme yönelik çalışmalar mevcuttur.

Pillerin, metal eşyaların, flüoresan lambalar ve otomobillerin geri dönüştürülmemesi ağır metal kirliliklerine neden olabilmektedir [60]. Nikel-Metal Hibrit, nikel-kadmiyum, çinko karbon, cıva içeren genel amaçlı piller, kurşun asit aküler doğaya bırakıldığında ya da çöpe atıldığında doğaya ciddi zararlar verebilmektedir [60]. Bunların başında da barındırdıkları ağır metaller gelmektedir. Başlangıçta sadece toprak kirliliği gibi görünse de yağmur suları ile temiz sulara karışabilmektedir [61]. Ağır metal zehirlenmelerinin ciddi etkilerinin olduğu bilinmektedir. Örneğin; Japonya'da Minamata Koyunda cıva barındıran balık tüketiminin neden olduğu Minamata Sendromu, kadmiyum zehirlenmesine bağlı Itai-Itai hastalığı belirtilebilir [62]. Ağır metal zehirlenmeleri organ yetmezliklerine ve ölüme neden olabilmektedir. Çocuklarda ise gelişim eksikliklerine yol açabilmektedir.

Ağır metaller renk değiştiren kimyasallar veya stripler, alev spektrometresi (Flame AAS), Grafit Fırınlı Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy), Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES -Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) cihazları ile tespit edilebilmektedir [43,63–66]. Kullanılan stripler ve kimyasallar tek kullanımlık olup ağır metal konsantrasyonları düşük olduğunda verilen renk değiştirme tepkimesi düşük kalmaktadır [66]. Kimyasallardaki renk değişikliklerini algılamak için yapılan elektronik düzenekli çalışmalar bulunmaktadır [67]. Kullanılan kimyasalların tek kullanımlık olması ölçüm sürekliliğini düşürebilmektedir. Bu tür ölçümlerde başka malzemeye duyulan ihtiyacın en az seviyede tutulmasının sağladığı avantajlar bulunmaktadır. Uygun olmayan ortamda saklanan indikatör kimyasallar bozulabilmektedir. İndikatör kimyasalların kullanıldığı miktar doğru ayarlanmalıdır. Ölçüm cihazları kullanıldığında ise hassas ölçümler alınsa da teknik değerlendirme gerektirmektedir. Bazı laboratuvar cihazları yapay zekâ destekli hale getirilse de yerinde ölçüm alınmasının zor olması ve bu tip cihazların pahalı cihazlar olması onları erişebilmesi zor cihazlar haline getirmektedir. Üstelik pahalı kalibrasyon masrafları ve

sarf malzemeleri bulunmaktadır. Bazı cihazlarda ölçüm alabilmek için numunenin ön işlemlerden geçmesi gereklidir.

Geleneksel spektroskopik ve kromotografik metotlar deneyimli personel, numune için ön hazırlık gerektirmekte ve ölçüm zaman almaktadır [68]. Hızlı tepki süresi kirliliğin çok daha çabuk kontrol altına alınması açısından da önem arz etmektedir. Ayrıca Liu ve ark. geleneksel metotların kirliliği erken tespit etmede başarısız olduğunu vurgulamışlardır [69].

Suda çözünmüş ağır metaller konusu popülerliğini sürdüren konulardandır. Yeni nesil tespit yöntemlerinin neler olduğu Jain ve ark. tarafından irdelenmiştir [66]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde telefon kamerası kullanılarak ve indikatör vasıtasıyla madde tayini yapan sistemlerin yanı sıra indikatörlü sistemlerin optik sistemlerle birleştirilerek miktar tayini yapıldığı görülmüştür [66]. Yüzey plazmon rezonansı (SPR-Surface Plasmon Resonance) kullanılarak suda çözünmüş ağır metal tespiti yapabilen çalışmalar mevcuttur [17].

Aliberti ve ark. sudaki Hg^{2+}'nin dansyl-amino asit temelli sensör ile (kimyasal) tespiti ve spektral incelenmesini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada fiber tabanlı sensör ve ışık kaynağı ile flüoresans spektroskopisi incelemesi kullanmaktadır [70].

Li ve ark. gerçek zamanlı olarak deniz suyunun kalitesini ölçen sistem gerçekleştirmiştir. Sudaki kirlik göstergesinin kimyasal oksijen ihtiyacı (COD-Chemical Oxygen Demand), toplam fosfor, toplam nitrojen, pH, çözünmüş oksijen, BDO5, ağır metaller ve mikrobiyolojisi olduğu vurgulanmıştır. Deniz suyunun kalitesini belirleyen fiziksel ve kimyasal özellikler ortaya konmuştur ve bunların ölçümlerine dair analiz çeşitleri belirtilmiştir [71].

Bhuyan ve ark. Meghna Nehrinden alınan numunelerdeki ağır metalleri atomik absorbsiyon spektroskopisi ile incelemişlerdir [49].

Pandey ve ark. Kore Devleti tarafından yıllık olarak Nakdong, Yeongsan, Geum, ve Han Nehirlerinden indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (inductively coupled plasma-optical emission spectrophotometer (ICP-OES)) ile alınan ölçüm sonuçlarını işleyerek nehirlerdeki ağır metal kirliliğini inceleyen çalışmalar yapmıştır.

Nehirlerdeki ağır metal kirliliği problemlerini metallerin çeşitlerine göre önem sıralaması yapmıştır. Çalışmaya göre Kore'deki nehirlerdeki en önemli incelenmesi gereken ağır metal çinko olurken, önem sırası en az olan ağır metal cıvadır [65].

Yapılan çalışmalar spektral olarak ağırlıklı olarak flüoresans spektroskopisi, UV-Vis spektroskopisi, kızılötesi absorbsiyon spektroskopisi, FTIR Spektroskopisi, Raman Spektroskopisi metotlarını ve bu metotlardan türetilmiş olan sistemleri kullanmaktadır. Atomik absorbsiyon spektroskopisi ve indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi daha az sıklıkla kullanılmaktadır. Bu cihazların daha az kullanılmasında cihaz maliyetleri, bakım-kalibrasyon masrafları ve kullanım zorluğu önem arz etmektedir. Spektrofotometre cihazları teknik bilgi gerektirmekte, değerlendirme sonuçlarına göre maddenin ihtiva ettiği bileşenler incelenebilmektedir. Spektroskopik yöntemler sadece su kirliliği alanında değil, başta medikal olmak üzere gıda, biyoloji, çevre, kimya, fizik gibi branşların tamamında kullanılmaktadır. Probleme yönelik geliştirilen sensörler ekonomik, hızlı ve doğru sonuçlar üretebilmektedirler. Gerçek zamanlı olarak kullanılabilmesi, daha fazla sorun ölçütünü tek sistemde tespit edebilmesi ve uyarlanabilir yapılarda olması problemin çözümünde avantaj sağlamaktadır.

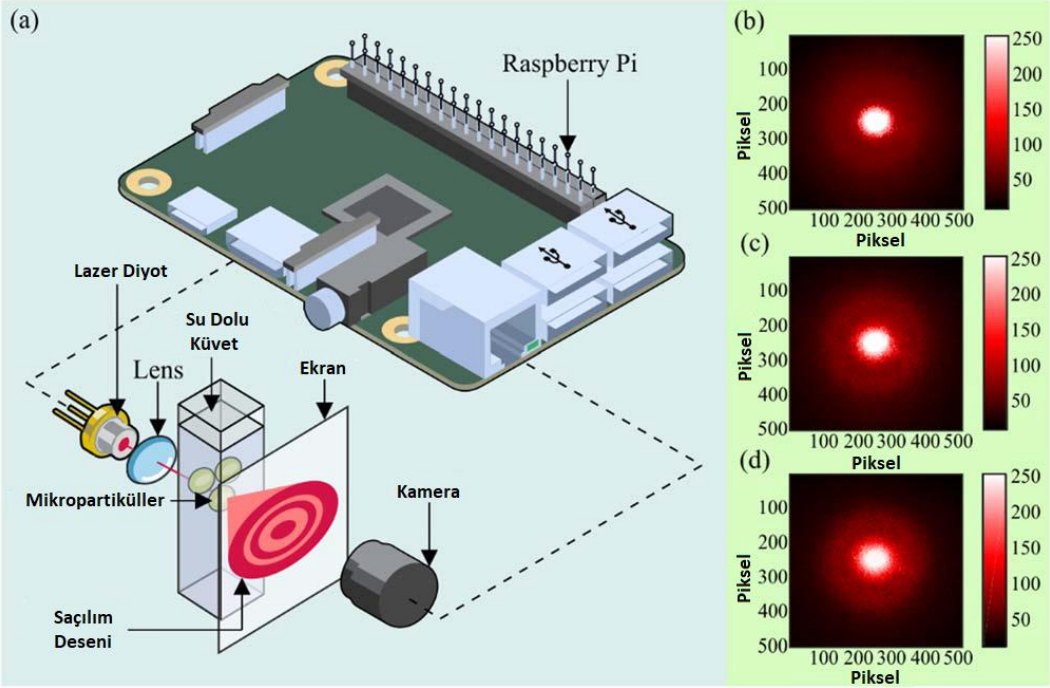
Son yıllarda gelişen yarı iletken teknolojisinin ışık yayan diyot (LED), uyarılmış radyasyon emisyonu tarafından ışık yükseltilmesi (LAZER) diyot gibi ışık kaynaklarının farklı dalgaboylarında, küçük ve düşük maliyetli olarak üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmelerden algılayıcı teknolojileri de etkilenmiştir ve farklı bant genişliklerine sahip, dahili analog dijital dönüştürücüsüne sahip, bit derinliği yükseltilmiş, filtreler ile hatalı ölçüm miktarı azaltılmış hassas tümleşik algılayıcılar geliştirilmiştir.

Persichetti ve ark. zararlı alg çoğalmaları ve siyanobakteri ilişkisi ile bunların üretmiş olduğu toksinlerin ultraviyole (UV) LED, spektrofotometre küveti ve fiber spektrofotometre kullanan bir sistem önerisi sunulmuştur. Yapılan çalışmada 270nm dalga boyuna sahip UV LED kullanılarak flüoresans spektroskopisi gerçekleştirilmiştir [72].

Guan ve ark. Yunniang Nehrinden alınan numuneleri ultraviyole-görünür (UV-Vis) absorbsiyon spektroskopisi ile inceleyerek suyun kalite ve kirlilik ön incelemesini araştırmışlardır [73].

Grant-Jacob ve Ark. yapmış oldukları çalışmada 8µm melamin ve 5µm silikon dioksit küre partiküller kullanmışlardır[74]. Sistemlerinde Şekil 1.5'te görüldüğü üzere raspberry pi, lazer diyot, lens, perde ve kamera bulunmaktadır. Şekil 1.5'te (b) 5µm silikon dioksit, (c) 8µm melamin, (d) 0.05ppt silikon dioksit ve 0.05ppt melamin karışımının saçılım görüntüsüdür. Farklı tuzluluk seviyelerindeki su içerisindeki mikropartiküllerin kırıcılık indis farklarının saçılım üzerindeki değişimleri incelenmiştir. Elde edilen bulgulardan farklı tuzluluk seviyesine sahip su kaynaklarındaki mikropartikül konsantrasyonu derin öğrenme algoritmaları sayesinde tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Tasarlanan görüntü temelli ölçüm sistemi, bu sistemden farklı olarak 3 farklı lazere ve 4 farklı dalgaboyunda ışık kaynağına sahiptir. Bu sayede farklı dalgaboyundaki kırıcılık indisindeki farklılıklar da incelenebilmektedir. Lazerlerin çıkış güçleri ısınma durumuna göre değişebilmektedir. Bu nedenle geliştirdiğimiz sistemde Lazer'den geri besleme bilgisi alınmaktadır. Diğer bir farklılık ise ölçümün perde arkasından değil önden alınmasıdır. Arkadan alınan ölçümlerde perde ışığın yayılmasına neden olarak ölçüm kalitesini düşürmektedir. Alınan ölçümler önden ve açılı olarak alındığı için görüntü işleme metotları ile görüntü sanal olarak lazer ile aynı doğrultuda görüntülenecek şekilde oluşturulmuştur. Partiküllerin değerlendirilmesinde Grant-Jacob ve Ark. 100x100 piksel boyutunda resmin çeyreğini kullanmışlardır. Bu durum 10.000 elemanlı bir matrisin işlenmesine denk gelmektedir. Geliştirdiğimiz sistem ışığın merkezinden itibaren yatay bir çizginin değerlendirmesini içermektedir. Bu da 2592 piksel'e karşılık gelmektedir. Bu sayede daha anlaşılır bir bilgi daha az sayıda eleman ile gerçekleştirilerek sistemin işlem maliyeti düşürülmüştür.



Şekil 1.5. Grant Jacob ve ark. mikroplastik saçılım ölçüm sistemi [74]

Burada yenilikçi özel numune hazırlığı gerektirmeyen, mikroplastik ve ağır metal çeşitlerini yerinde ölçüm alıp doğru sınıflandırabilen, öğrenebilir bir sıvı numune sensör sistemi sunulmuştur. Mor, görünür ve yakın kızılötesi spektrumda dar bantlarda tarama yapabilen bir sistem yapısındadır. Ölçüm yapılan numunelerin, doğru sınıflandırılabilmesi için ışık kaynaklarını ve dar bantları özellik seçilimi ile belirleyebilmektedir. Böylece probleme yönelik olarak ışık kaynağı, dar bantlı optik filtre veya fotoreseptör ihtiyacı belirleyebilmektedir. Sistemin testinde su içerisinde 1-10µl arasında farklı konsantrasyonlarda 8µm polistiren, 10µm polistiren ve 8µm melamin mikroplastikleri ve 25ppm, 50ppm ve 100ppm konsantrasyonlarda suda çözünmüş arsenik (Ar), kadmiyum (Cd), krom (Cr), bakır (Cu), cıva (Hg), nikel (Ni), kurşun(Pb) ve çinko (Zn) ağır metalleri kullanılmıştır. Bu ağır metallerin absorbsiyon dalgaboyları Tablo 1.1'de verilmiştir.

Absorbans, spectral shift ve saçılım durumları ayrıştırılmadan malzemenin tanınması üzerinde kullanılmıştır. Klasik spektrofotometre cihazlarında bu optik olaylar ayrıştırılarak ve filtrelenerek tek bir parametre olarak ölçülmektedir. Örneğin görünür spektrum spektrofotometresi; görünür bölgede ışık kaynağı bulunan bir cihaz olup gelen ve geçen ışığın spektrumdaki absorbsiyon durumunu Beer Lambert yasasına göre

veriler haline getirmektedir. Burada yaşanan saçılım durumları bir parametre olarak değerlendirilmemektedir.

Tablo 1.1. Ağır metallerin ultraviyole ve görünür bölgedeki absorbsiyon dalgaboyları

Element	Form	UV-Görünür Absorbans
As	As(V), As(III)	~193–210 nm
Cd	Cd^{2+}	<220 nm
Cr(VI)	CrO_4^{2-}	350–450 nm
Cr(III)	Cr^{3+}	400–600 nm
Cu^{2+}	Cu^{2+}	600–800 nm
Hg^{2+}	Hg^{2+}	<200 nm
Ni^{2+}	Ni^{2+}	380–740 nm
Pb^{2+}	Pb^{2+}	<200 nm
Zn^{2+}	Zn^{2+}	<200 nm

Bu cihazlardan saçılım durumlarının ölçüm sonuçlarını etkilememesi beklenmektedir. Sistemimizde ise saçılan ışıklar siyah yüzey absorbsiyonuna uğradığı için kabul edilen merkezdeki ışının zayıflamasına neden olmaktadır. Fosfor içeren numunelerde ise mor ışınlar farklı dalgaboyundaki saçılımlara neden olabilmektedir. Raman saçılımına bağlı kayma durumları da farklı dalgaboylarında ışımalara neden olabilmektedir. Bu durum dar bantlı fotodiyotlar sayesinde ilgili ışık kaynağına ait fotodiyotun algıladığı ışığın azalıp bir başka fotodiyotun daha yüksek ışık şiddetinde algılamasına neden olmaktadır. Buradaki malzemeye ait optik farklılıklar, numunenin optik karakteristiğini oluşturmaktadır.

1.2. Madde Algılamada Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi (machine learning), yazılımın belirli bir metodolojide girdiler ile çıktılar arasında ilişkiyi modelleyerek sonraki gelen verileri tahmin etmesi ve sınıflandırmasıdır. Önceleri çok da verimli çalışmayan makine öğrenmesi metotları, bilgisayarların işlem güçlerinin artması, büyük verilerin öğrenme verisi olarak kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bilgisayarların grafik kartlarında, merkezi işlemciye göre çok daha fazla sayıda işlemci bulunmaktadır. Örneğin; NVIDIA® GTX 1050 ekran kartının 640 adet, 1455MHz hızında işlemcisi bulunurken, Intel® Core™ i7-7700HQ merkezi işlemcisinde 4 adet 3.80GHz hızında işlemci bulunmaktadır. Tekil olarak merkezi işlemciye göre yavaş olan grafiksel işlemciler, büyük verilerde, verinin paralel olarak işlenmesi ile merkezi işlemciden çok daha kısa sürede işleyebilmektedir.

Bu da verinin işlenme maliyetini düşürerek, pratik kullanımına olanak sağlamaktadır. Bu tip paralel işlemler sayesinde daha büyük miktarda katman kullanılarak oluşturulan öğrenme şeklinde derin öğrenme adı verilmektedir. Bu ağlar sayesinde görüntü işleme, veri işleme işlemleri de daha yüksek doğrulukta yapılabilmektedir.

Makine öğrenme metotları madde tespitinde verimli sonuçlar üreterek, hızlı değerlendirme, insan hatasından kaynaklanabilecek değerlendirme hatalarının eliminasyonu konusunda avantaj sağlayacaktır. Elektronik sistemler ve makine öğrenme metotları ile gerçek zamanlı olarak kirliliğin incelenebilmesi, çoklu sensörler sayesinde farklı kirlilik tiplerinin tek bir sistemde tespiti yapıldığı takdirde çevresel problemlere hızlı müdahale edilebilmektedir.

Padarian ve ark. toprak özelliklerinin yakın kızılötesi reflektans spektroskopisi ile ölçüp ve 20000 numune verisini CNN (Convolutional Neural Network- Konvolüsyonel Sinir Ağı) kullanılarak işlemiştir. Çıkarılan 6 özelliğin (OC, CEC, kil, kum, pH, toplam N) değerlendirilmesi yapılmıştır. Toprak numuneleri görünür-yakın kızıl ötesi (VNIR-Visible Near Infrared (350-2500nm)) spektrumunda ölçülmüştür. Veriler, kısmi en küçük kareler regresyonu kullanılarak işlendikten sonra spektrogram için 1958'de geliştirilmiş olan Hann Penceresi (Hann Window) tekniği kullanılmıştır. CNN, toprak analizinde sıkça kullanılan kübist regresyon ağacından ve PLS regresyonundan daha iyi sonuç vermiştir. Ancak CNN veri kümesi (dataset) küçük olan durumlarda efektif çalışmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle CNN için veri kümesinin oldukça büyük olması gerekmektedir [75].

Mhaskar ve ark. devamlı kan şekeri ölçüm cihazı kullanılarak hastalardan toplanan 30 dakikalık ölçümleri derin öğrenme algoritması ile işleyerek hastaların diyabetik durumunu tahmin etmiştir. Yapılan çalışmada DCNN (Deep Convolutional Neural Network-Derin Konvolüsyonel Sinir Ağı) algoritması kullanılmıştır. Öğrenme tipi olarak yarı gözetimli öğrenme (semi-supervised learning) metodu kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda hipo glisemi %88,72 doğru, %4,49 belirsiz, %6,79 hatalı; normal kan şekeri %80,32 doğru, %17,36 belirsiz, %2,32 hatalı; hiperglisemi %64,88 doğru, %21,90 belirsiz, %13,22 hatalı değerlendirilmiştir. Hipoglisemi hastalığı shallow network ve Tikhonov reg.'una göre açık ara doğru tahmin edilirken, normal kan şekerinde Tikhonov reg.'u daha yüksek başarı göstermiştir. Hiperglisemi durumunda ise

%2,66 Tikhonov reg.'undan, %4,47 Shallow network'den daha iyi başarı göstermiştir [76]. Benzer bir çalışmada Kavakiotis ve ark. kan şekeri miktarlarından elde edilen hazır veri kümelerini derin öğrenme ile işleyerek tahminler elde etmiştir. Yapılan çalışmada özellik seçiliminin (feature selection) önemine vurgu yapılmıştır. Doğru sınıflandırma başarısı %80'in üzerinde olmuştur. SVM (support vector machines) algoritması; ANN (Yapay Sinir Ağı) ve DT (Decision Tree-Karar Ağacı)'den daha yüksek başarı göstermiştir. Çok iyi çalışmalarda bile %85 civarında başarı yakalanmıştır. Kalan yüzde 15'lik çalışmaların çoğunlukla biyobelirteç (biyomarker) kullanımı ile yapılan çalışmalar olduğu gözlemlenmiştir [77].

Bu veriyi işleyerek tahmin yapan derin öğrenme ise matematiksel temele dayanan nöral ağları kullanmaktadır. Derin öğrenmenin; girdi, gizli ve çıktı olmak üzere 3 katmanı bulunan makine öğrenmesinden farkı, gizli katman sayısının fazla sayıda olarak veriden daha fazla özellik çıkarabilmesidir. Makine öğrenmesi de desen çıkarımı yaparken özellikler el ile verilmelidir. Derin öğrenmenin ikinci bir farkı ve avantajı sayabileceğimiz özelliği de veriden anlam çıkarımını otomatikleştirmesidir. Wenjie ve Ark. topraktaki mikroplastiklerin tespitinde derin öğrenme algoritması kullanılarak mikroplastik tespiti gerçekleştirmişlerdir[78]. Shishkin ve Ark. denizde mikrobiyolojik ve mikplastik araştırmalarında, YOLO v5 derin öğrenme algoritması ile tespitlerini gerçekleştirmişlerdir[79]. Ancak bu tespit yöntemlerinde doğrudan kamera ve mikroskop kullanılması probleme yönelik bir çözüm olmadığı için ekonomik ve kullanışlı bir çözüm değildir. Büyük mikroplastikler basit filtrelemeler sonucunda elimine edilirken çok küçük partiküller özel filtrelemeler olmadan temizlenememektedir. Yürütülen çalışma ile hem yeni bir cihaz tasarımı gerçekleştirilirken hem de derin öğrenme algoritması kullanılarak otomatik sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Evrişimli sinir ağları, bilgisayarlı görü ve derin öğrenmenin kesişimden ortaya çıkmıştır. Bu derin ağlar ses ve görüntüyü işlemedeki başarısıyla ünlenmiştir [80,81]. Bu çalışmada da görüntü tanıma için evrişimli sinir ağları kullanılmıştır.

1.3. Benzer İçerikli Sistemlerle Karşılaştırma

Bu bölümde, mevcut literatürün zayıflıkları ve kapsamı analiz edilmiş ve Tablo 1.2'de sunulan araştırma çalışmalarının bir özeti sunulmuştur.

Tablo 1.2. İlgili çalışmalar

İlgili Çalışma	**Ayraç Gerekliliği**	**Ağır-metal Tespiti**	**Mikro-plastik Tespiti**	**Taşınabilirlik**	**Yapay Zeka / Makine Öğrenmesi Kullanımı**
[8]	Yok	❌	✅	❌	✅
[74]	Yok	❌	✅	❌	✅
[82]	Var	❌	✅	❌	❌
[83]	Yok	❌	✅	❌	❌
[67]	Var	✅	❌	✅	❌
[84]	Var	✅	❌	✅	❌
[85]	Var	✅	❌	✅	✅
Bu Tez Çalışması Kapsamında Tasarlanan Fotoreseptör Temelli Sistem	Yok	✅	✅	✅	✅
Bu Tez Çalışması Kapsamında Tasarlanan Görüntü Temelli Sistem	Yok	❌	✅	✅	✅

İlgili çalışmalar incelendiğinde hem mikroplastikleri hem de ağır metalleri aynı anda tespit edebilen laboratuvar cihazları dışında taşınabilir bir cihaz veya sistemlere rastlanılmamıştır. Laboratuvar cihazları problem odaklı olmayıp, genel amaçlı oldukları için sonuçların değerlendirilmesinde teknik bilgi gerektirmektedir. Ayrıca, büyük ebatları ve fiyatları gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması açısından sorun teşkil

etmektedir. Sensörlerin farklı noktalara kurularak uzaktan bilgi alınması gerektiğinde mevcut sistemler dezavantajlı durumdadır. Mevcut yerlerde sadece ölçüm almaları gereksiz veri trafiğine neden olabilme ihtimali bulunmaktadır. Ölçümün alındığı yerde değerlendirmenin olması hem bu trafiği azaltırken hem de teknik değerlendirme süreçlerini kısaltmaktadır. Bu nedenle, ölçüm almaya uygun, basit, problem odaklı, özelleştirilebilir, tahribatsız bir sensöre ihtiyaç bulunmaktadır. Yapılan çalışmalardaki önerilen mevcut cihazlar, laboratuvar tabanlı cihazlar veya laboratuvar uygulamaları için özel olarak tasarlanmış aparatlar ve problardan oluşmaktadır [55–58]. Bazı çalışmalarda, bu laboratuvar cihazlarından elde edilen verileri işlemek için yapay zekâ tekniklerinden yararlanılmıştır [86]. Mikroplastik teriminin 5 mm'den küçük parçacıkları ifade ettiği göz önüne alındığında, çıplak gözle görülemeyen mikron veya nano boyutlu parçacıklara odaklanan çalışmalar ayrı olarak ele alınmıştır. Görüntü işleme veya kamera tabanlı sistemlere dayalı tespit yöntemleri, büyük parçacıkları tespit etmek için ağırlıklı olarak kullanılmaktadır [78]. Daha küçük parçacıklar için, girişim desenleri veya saçılma olaylarını içeren analizler daha yaygın olarak kullanılmaktadır [83]. Ağır metal tespiti için kimyasal indikatörlerin kullanımı birçok çalışmada kapsamlı bir şekilde bildirilmiştir [67,84,87].

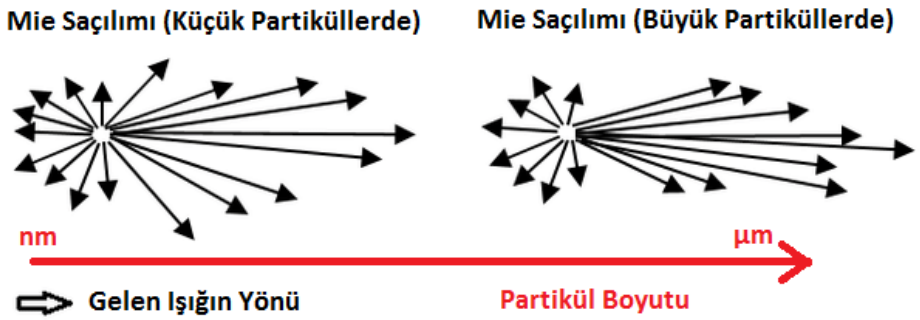
Bu çalışmanın temel amaçlarından biri, büyük parçacıkları filtrelemenin dışında ek işlemlere veya kimyasal reaktiflere ihtiyaç duymadan tespiti mümkün kılmaktır. Ayrıca, nicel ölçümlere göre konsantrasyon seviyelerini düşük, orta veya yüksek olarak sınıflandırmayı amaçlamaktadır.

2. BÖLÜM

OPTİK MADDE ALGILAMA TEORİSİ

2.1. Maddelerde Gerçekleşen Optik Olaylar

Mie saçılımı ışığın dalgaboyuna yakın ya da daha büyük partiküllere çarpması sonucu oluşan saçılım şeklidir [88]. Büyüklüğüne bağlı olarak Mie saçılımındaki değişim Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Buna göre partikül boyutu arttıkça saçılım daha az dağılmaktadır.



Şekil 2.1. Mie saçılımının partikül boyutuna göre değişimi [89]

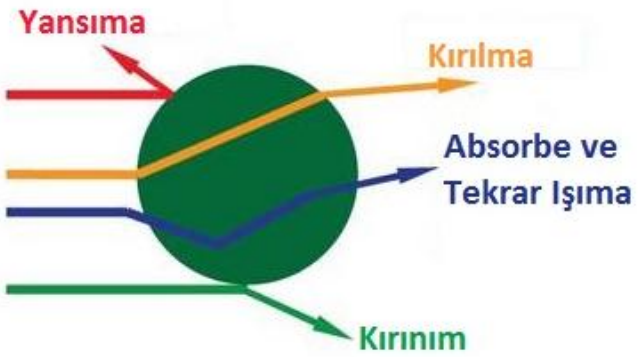
Mie saçılımı doğada bulutların beyaz renkli olarak görülmesine neden olur. Ancak bunun dışında Hale (Halo) optik olayı ile de ilgisi bulunmaktadır[90]. Bulutların beyaz görünmesine, havada asılı olarak bulunan su moleküllerine çarpan güneş ışınlarının yapmış olduğu saçılım neden olmaktadır. Şekil 2.2'de gösterilen optik halka olayı da havada asılı olarak bulunan buz kristallerine güneş ışınlarının çarpması sonucu meydana gelmektedir.

Mikroplastiklerin optik karakteristikleri incelendiğinde birden fazla optik olayın birlikte meydana geldiği görülmektedir. Sadece Mie saçılımı değil, taneciklerin absorbans, emitans, reflektans ve kırınım optik karakteristiğini beraber belirlemektedir.



Şekil 2.2. Atmosferik halka oluşması olayı [91]

Bu ilişkilerden emitans mikroplastiğin taşıyabildiği renk pigmentlerindeki fosforesans ile doğrudan ilişkilidir. Işıkla uyarılan fosfor içerikli renk pigmentleri tekrar ışıma yapmaktadırlar. Bu sayede madde içerisindeki pigmentler hakkında bilgi alınabilmektedir. Absorbans ise maddenin ışığı soğurma oranı olup, malzemenin cinsinin tayini açısından günümüzde UV/Vis spektrofotometrelerin kullandığı tekniklerdendir. Reflektans ise maddenin ışığı yansıtma oranı olarak tanımlanmakta olup madde yüzeyi ve kırılma oranı ile ilişkilendirilmektedir. Kırınım ışığın maddenin kenarına çarpması ya da daha küçük yarıklardan geçerken oluşturmuş olduğu dalgasal yayılım olarak ifade edilebilmektedir. Bu yöntemler ile farklı, fakat sabit bir geometrik forma sahip olan mikroplastikler ölçülebilmektedir. Küresel bir mikroplastikte meydana gelebilen olaylar Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Mikropartiküllerde gerçekleşen optik olaylar

Optik karakteristikler sadece madde türüne bağlı olmayıp aynı zamanda gelen ışığın dalgaboyu ile de ilişkilidir. Dalgaboyu düşük olan ışın daha fazla kırılmaya maruz kalırken, dalgaboyu büyük olan ışınlar daha az kırılmaya uğrar. Dalgaboyundaki farklılıklar aynı zamanda kabul açısı olarak bilinen ışının madde içerisine nüfus etmesi için gereken minimum açıyı da etkilemektedir. Bu farklılıklar oluşan girişim desenlerinin farklılaşmasına neden olmaktadır. Böylece farklı girişim desenleri oluşturulduğunda maddenin tanınması daha yüksek doğrulukla elde edilebilmektedir.

Sudaki mikroplastiklerin tespitinde µ-Raman ve µ-FTIR cihazları sıklıkla kullanılmakta olup ölçümlerin uzmanlar tarafından değerlendirmesini gerektiren pahalı cihazlardır. Baruah ve Ark. Mikroplastik tespitinde kullanılan geleneksel metotları incelemişlerdir [55]. Geleneksel metotların en büyük dezavantajı pahalı cihazlar kullanılıyor olması ve bunların değerlendirilmesinde uzman kişilere ihtiyaç olmasıdır. Bu nedenle Primpke ve Ark. µ-Raman ve µ-FTIR ve görüntü işleme kullanarak mikroplastiklerin cinsinin tayinini gerçekleştirmişlerdir [92]. Ancak görüntü işleme metotları partikülün şekline ve cinsine bağlı olarak bazı mikroplastikleri gözden kaçırabilmektedir.

Numunenin tespitinde gerçekleşen optik olaylar maddenin ayırt edici özelliklerindedir. Bu ayırt edici özellikler algılanacak madde cinsine göre farklılıklar gösterebilmektedir. Tanecik boyutu, sıvı içerisinde çözünmüş olup olmaması, morfolojisi, molekül veya element yapısı optik karakteristikleri etkilemektedir. Tanecikli, çözünmenin olmadığı durumlarda saçılım etkisinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu durumda bile esnek ve esnek olmayan saçılımlar gösterebilmektedir. Diğer taraftan çözünmüş maddelerde

absorbsiyon madde cinsi konusunda bilgi vermektedir. Yüksek enerjili fotonlar, ısı, manyetik alan, elektrik alan veya kimyasal reaksiyonlar ile uyartım gerçekleştirilerek, uyartımın optik karakteristik üzerindeki değişiminin incelenmesi ile madde tespitleri yapılabilmektedir.

Işık ışını madde içerisinden geçerken kayba uğramaktadır. Kayba uğrayan bu ışık, genellikle ısı gibi farklı bir enerji formuna dönüşmektedir. Gerçekleşen bu olaya absorbsiyon denir. Absorbsiyon maddenin yapısına göre belli dalgaboyundaki ışıkları daha fazla absorbe ederken, diğer dalgaboylarını daha iyi iletebilir. Bu durum malzemenin yapıtaşına, yüzey morfolojisine, katkı maddelerine ve pigmentlerine göre değişebilmektedir. Absorbe edilen ışık miktarı Beer Lambert yasası ile ortaya konulmuştur.

$$A = \varepsilon c l \tag{2.1}$$

Denklem 2.1'e göre A absorbansı, ε molar absorbsiyon katsayısı, c molar konstantrasyon, l ise santrimetre (cm) ölçü biriminde mesafeyi ifade etmektedir. Spektrofotometre küvetlerinde tipik olarak bir cm mesafe kullanılmaktadır. Absorbans'ın bir diğer ifadesi de Denklem 2.2'de ifade edilmiştir.

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} \tag{2.2}$$

Denklem 2.2'ye göre I_0 gelen tek renkli ışığı ve I ise maddeden geçen ışığı ifade etmektedir. LED ışık kaynakları ile filtre kullanmadan monokrom renk elde etmek mümkün değildir. Bir spektral aralıkta gelen ışınların malzeme cinsine bağlı absorbsiyonu, iletilen ışığın çoklu spektral bölgede izlenmesi ile mümkün olmaktadır. Spektrofotometre cihazlarında bu durum ışığın tayflarına ayrılıp çoğunlukla çizgi tipi CCD (Charge-Coupled Device – Yük Bağlaşımlı Aygıt) algılayıcılar ile izlenmesi ile yapılmaktadır. Gelen ışığın açısı değişse de aynı fotodiyota aynı dalgaboyunda ışığın gelmesi için optik düzenekler içermektedir. CCD algılayıcılar üzerinde oldukça fazla sayıda çizgi hattı üzerine sıralanmış fotoreseptörler bulunmaktadır. Isınmaları

durumlarında sızıntı akımları ölçüm sonuçlarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu fotoreseptörler ışığın her dalgaboyu için eşit spektral cevap oluşturamamaktadır.

Bu denklem takımlarında küvet mesafelerinin sabit ve 1 cm, gelen ışığın yoğunluğunun sabit olduğu kabul edildiğinde absorbe edilen ışığın, malzemenin molar absorbsiyon katsayısı ve konsantrasyonu ile orantılı olduğu görülmektedir. Molar absorbsiyon katsayısı gelen ışığın dalgaboyuna göre de değişmektedir.

Tanecikli ve çözünmemiş numunelerde, madde cinsi ve yoğunluğunu ölçerken yalnızca absorbans değil, aynı zamanda kırınım ve saçılma olayları da meydana gelmektedir. Kırınım, ışığın dalga boyundan daha küçük açıklıklardan geçtiğinde veya bir engele çarptığında yön değiştirip farklı yönlerde yayılma olayı olarak tanımlanmaktadır. Kırınım, ışığın engel boyutuna bağlı olarak Fraunhofer kırınımı veya Fresnel kırınımı ile açıklanabilmektedir. Bu olayın dalga boyu ve engel boyutuyla ilişkisini gösteren kırınım açısı Denklem 2.3'te ifade edilmiştir.

$$\theta = \frac{\lambda}{d} \tag{2.3}$$

Bu denklemde λ ışığın dalga boyunu, d ise engele çarpan veya aralıktan geçen ışığın geçtiği açıklığın boyutunu temsil etmektedir. Işığın dalga boyu küçüldükçe kırınım açısını ifade eden θ 'da küçülmektedir. Buna göre, küçük dalga boylarında ışık daha az kırınıma uğramaktadır.

Bununla birlikte, cismin yüzeyinde bulunan pürüzler, düzensizlikler, nano ve mikro yapılar veya çatlaklar da kırınıma neden olabilmektedir. Bu yapılar, yüzey morfolojisi olarak adlandırılmaktadır. Yüzey morfolojisi bir cismin yüzeyinin yapısal ve geometrik özelliklerini ifade etmektedir. Yüzey morfolojisi, ışığın saçılma ve kırınım karakteristiğini etkileyebilmektedir.

Gerçekleşen bir diğer optik olay da saçılmadır. Saçılma, genellikle gelen ışığın madde ile etkileşimi sonucunda oluşmakta ve yüzey morfolojisine bağlı olarak farklı yönlerde gerçekleşmektedir. Mikron boyutundaki parçacıklar için genellikle Mie ve Raman saçılımları gözlemlenmektedir. Mie saçılımı, ışığın dalga boyuna yakın veya daha

büyük parçacıklarla etkileşmesi sonucu meydana gelen esnek bir saçılım türü olarak bilinmektedir. Esnek saçılımda ışığın enerjisi ve dalga boyu değişmemekte, ancak ışık her yöne dağılabilmektedir. Mie saçılımı, küresel harmonik serilerle hesaplanmaktadır. Mie saçılımında kullanılan temel denklem, Maxwell denklemlerinin küresel koordinatlarda çözümleriyle ifade edilmektedir ve Denklem 2.4'te verilmiştir.

$$S(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)) \tag{2.4}$$

Bu denklemde, a_n ve b_n , Mie saçılım katsayılarını, $\pi_n(\cos\theta)$ ve $\tau_n(\cos\theta)$ ise küresel harmonik fonksiyonlarını ve n seri genişleme indeksini temsil etmektedir. Bu formül, Mie saçılımında ışığın parçacıklarla etkileşiminin açısal dağılımını ve yoğunluğunu hesaplamak için kullanılmaktadır. Monokromatik ışık, bu katsayıların etkisiyle düzgün bir halka deseni oluştururken, geniş spektrumlu ışık kaynakları (örneğin LED) kullanıldığında, bu halkalar tayfa ayrılarak spektral dağılım sonucu gökkuşağına benzer bir görünüm kazanmaktadır. Bu durum, ışığın farklı dalga boylarının farklı açılarda saçılmasıyla açıklanmaktadır.

Raman saçılımı, mikron boyutundaki parçacıklarla etkileşim sonucunda esnek olmayan bir saçılım türü olarak ortaya çıkmaktadır. Raman saçılımında gelen ışığın enerjisinin bir kısmı malzeme tarafından alınarak frekansı değişmiş fotonlar saçılmaktadır. Bu süreç, numunenin kimyasal ve moleküler yapısına dair bilgi sağlayan Raman kayması (Raman shift) ile açıklanmaktadır. Raman kayması, Denklem 2.5'te ifade edilmiştir.

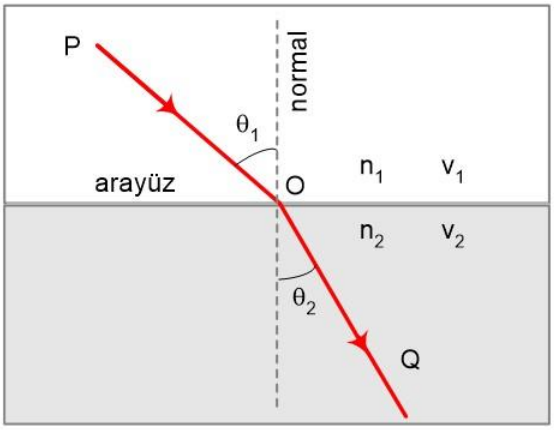
$$\Delta v = v_i - v_s \tag{2.5}$$

Denklemde Δv Raman kaymasını, v_i gelen fotonun frekansını ve v_s saçılan fotonun frekansını ifade etmektedir. Raman spektroskopisi mikroplastiklerin kimyasal yapılarını gerçekleşen frekans kaymaları üzerinden analiz etmektedir.

Gelen ışının cisme çarptıktan sonra yüzeyin düzgünlük durumuna göre normalle yaptığı açıda ya da farklı doğrultularda ortam değiştirmeden ilerlemesine yansıma denir.

Işığın farklı yoğunluktaki ortamlara geçişi sırasında hızını ve doğrultusunu değiştirmesi olayına kırılma denir. Kırılma ve yansıma olayları Snell Yasası ile açıklanmıştır. Şekil 2.4'te kırılma olayı gösterilmiştir.

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \tag{2.6}$$



Şekil 2.4. Kırılma olayı [93]

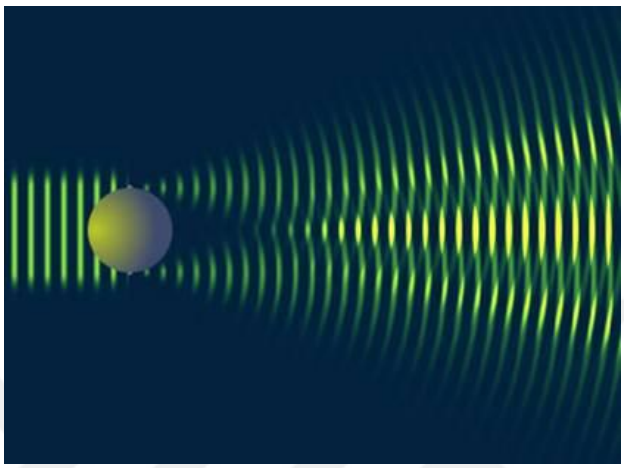
Denklem 2.6'da θ_1 gelen ışığın açısını, θ_2 kırılan ışığın açısı, n_1 birinci ortamın kırılma indisini, n_2 ikinci ortamın kırılma indisini, V_1 gelen ışığın hızını, V_2 ikinci ortamdaki ışığın hızını, λ_1 birinci ortamdaki ışığın dalgaboyunu, λ_2 ikinci ortamdaki ışığın dalgaboyunu ifade etmektedir.

Emilen ışık madde içerisinde ısıya dönüştürülebildiği gibi yüksek enerjili fotonlar tarafından uyarılan fosforesans ve flüoresans içerikli maddeler tarafından farklı dalga boylarında ışımalara da neden olabilmektedir. Isınan maddeler de Boltzmann Siyah Cisim ışıması ile kızılötesi bölgede ışıma gerçekleştirmektedir. Isınan bir cismin yapmış olduğu birim zamandaki toplam ışınım H ifadesi Denklem 2.7 ile hesaplanabilmektedir.

$$H = Ae\sigma T^4 \tag{2.7}$$

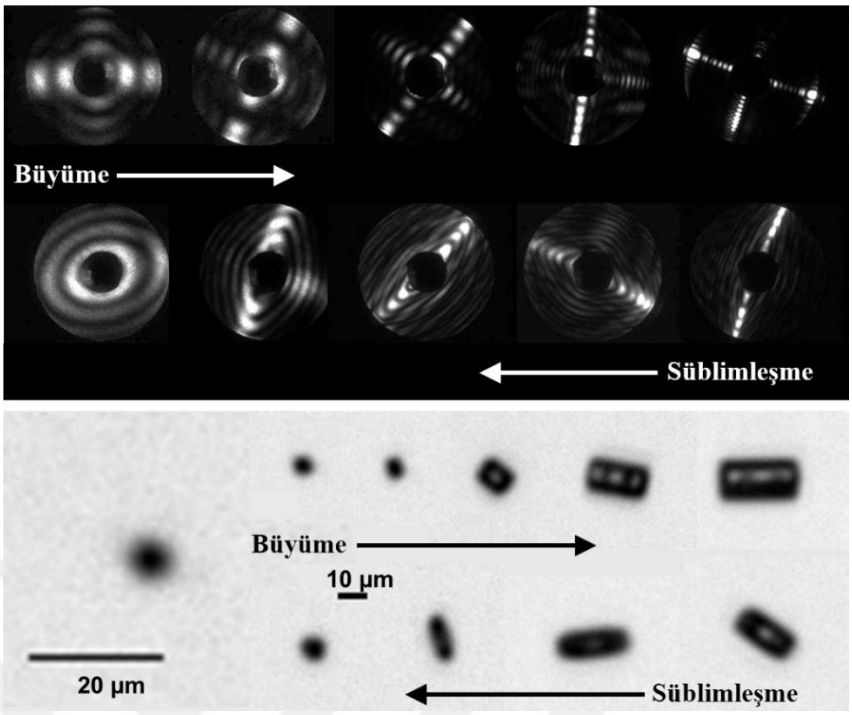
Burada, A nesnenin yüzey alanı, σ Stephan Boltzmann sabiti ($\sigma = 5.6704\text{x}10^{-8}$ W K^{-4} m^{-2}), T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir.

Kırınım, ışık, ses ve radyoelektrik dalgaların karşılaştığı bazı engelleri dolanarak geçmesi anlamında kullanılmaktadır. Dalgaların küçük aralıklardan (yarıklardan), engellerden veya keskin kenarlı yerlerden geçişi ile meydana gelmektedir. Küresel bir partiküle çarpan paralel ışınların kırınımı Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

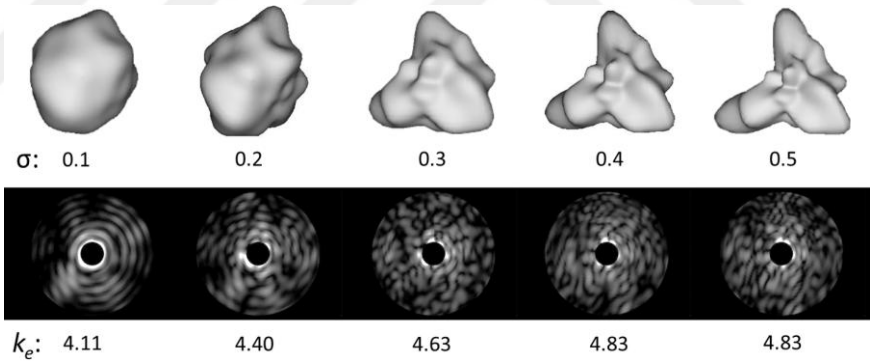


Şekil 2.5. Partiküle çarpan ışığın kırınımı [94]

Mie saçılımı bu dört optik durumun birleşmesi ile meydana gelmektedir. Cismin ışık kaynağına ya da perdeye olan uzaklığına göre girişim desenleri değişebilmektedir. Partiküllerin küresel ya da farklı biçimlere sahip olmasına göre dairesel ya da farklı tiplerde girişimler meydana getirebilmektedir. Örneğin; buz partiküllerinin büyümesine veya süblimleşerek küçülmesine bağlı olarak Mie saçılımında oluşan girişim desenlerindeki değişimi Schnaiter ve Ark. Şekil 2.6'daki gibi tespit etmişlerdir[95]. Yapılan bu çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda farklı şekiller için oluşabilecek girişim analizleri simüle edilmiş ve Şekil 2.7'deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2.6. Büyüme ve süblimleşmeye bağlı olarak Mie saçılımındaki değişim[95]



Şekil 2.7. Partikülün biçimine bağlı olarak oluşturduğu girişim desenlerinin simülasyonu [95]

Mie saçılımı sonucunda oluşabilecek girişim desenini tam olarak tahmin edebilecek denklemler, sonsuz seri açılımları gibi karmaşık hesaplamalar gerektirdiği için yaklaşımsal denklemler tercih edilebilmektedir. Bu yaklaşımsal metotlar sınırlamalara sahip olup, belirli koşullar sağlandığında kullanılabilmesi mümkün olmaktadır. Bunlardan Fraunhofer kırınım teorisi yalnızca büyük parçacıklar ve uzak alan için geçerli çözüm üretebilmektedir. Henyey-Greenstein fonksiyonu ise basitleştirilmiş bir faz fonksiyonu sunan ve genelde kırılma indisi yüksek ortamlar için tercih edilen denklemlerdir. Şekli küresel olmayan partiküllerin analizinde Debye serileri

kullanılırken, şekli küresel olan partiküllerde Maxwell-Lorentz Mie Yaklaşımı, Fraunhofer Kırınım Teorisi, Henyey-Greenstein saçılım fonksiyonu gibi yaklaşımsal denklemler kullanılmaktadır. Akademik olarak farklı yaklaşımsal denklem takımları elde edilmeye devam etmektedir. Bu yaklaşımsal denklemlerin birbirine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Maxwell-Mie yaklaşımının basitleştirilmiş anizotropik (yönsüz), homojen ve dielektrik küreler için hesaplaması Denklem 2.8 ve Denklem 2.9'da verilmiştir [96].

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)] \tag{2.8}$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \tau_n(\cos\theta) + a_n \pi_n(\cos\theta)] \tag{2.9}$$

Burada ışık bir elektromanyetik dalga olarak düşünülmüş olup $S_1(\theta)$ elektrik alanının saçılım düzlemine dik saçılım genliğini, $S_2(\theta)$ elektrik alanının saçılım düzlemine paralel saçılım genliğini ve θ saçılım açısını göstermektedir. Denklemdeki sonsuz seriler Hansen ve Travis tarafından fiziksel olarak saçılan ışığın çoklu genişlemesi olarak yorumlanmıştır [97]. Bundan dolayı a_1 elektrik dipol radyasyon miktarı katsayısıdır. Denklem 2.8'de kullanılan π_n ve τ_n fonksiyonları Denklem 2.10 ve Denklem 2.11'da verilmiştir.

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta} P_n^1(\cos\theta) \tag{2.10}$$

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos\theta) \tag{2.11}$$

Burada P_n^1 birinci mertebeden, n dereceli Legendre polinomları ile ilişkilidir. Denklem 2.12 ve Denklem 2.13'daki a_n ve b_n fonksiyonları;

$$a_n = \frac{\psi_n'(m\alpha)\psi_n(\alpha) - m\psi_n(m\alpha)\psi_n'(\alpha)}{\psi_n'(m\alpha)\xi_n(\alpha) - m\psi_n(m\alpha)\xi_n'(\alpha)} \tag{2.12}$$

$$b_n = \frac{m\psi_n'(m\alpha)\psi_n(\alpha) - \psi_n(m\alpha)\psi_n'(\alpha)}{m\psi_n'(m\alpha)\xi_n(\alpha) - \psi_n(m\alpha)\xi_n'(\alpha)} \tag{2.13}$$

olarak tanımlanmaktadır. Denklemde $\alpha = ka = 2\pi a/\lambda$ olup boyut parametresi, m kırılma indisi, a parçacığın yarıçapı, $\psi_n \; ve \; \xi_n$ küresel Bessel fonksiyonlarını ifade eder. Bunlar küresel geometrinin karakteristiği olup, dalga denklemini çözerken ortaya çıkmaktadır. Kesme işaretleri, yarıçapa göre birinci türevini göstermektedir. Maxwell-Mie hesaplamalarında işlemlerin çoğu, a_n ve b_n katsayılarının belirlenmesidir. Bu saçılma fonksiyonlarını kullanarak, elektrik alanının saçılan bileşenleri, gelen bileşenler cinsinden Denklem 2.14'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} E_l^S \\ E_r^S \end{bmatrix} = \frac{e^{-ikr+ikz}}{ikr} \begin{bmatrix} S_2(\theta) & 0 \\ 0 & S_1(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_l^i \\ E_r^i \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

Denklem 2.14, gelen ve saçılan ışık Stokes vektörü cinsinden ifade edilebilir. Mie saçılma matrisi (Denklem 2.15) ile ilişkilidir.

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\theta) & P_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\theta) & P_{11}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\theta) & P_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -P_{34}(\theta) & P_{33}(\theta) \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Denklem 2.15'te kullanılan $P_{11}(\theta), P_{12}(\theta), P_{33}(\theta)$ ve $P_{34}(\theta)$ dört bağımsız Mie saçılma matrisi elemanı Denklem 2.16, Denklem 2.17, Denklem 2.18 ve Denklem 2.19'da verilmiştir;

$$P_{11}(\theta) = \frac{2\pi}{k^2\sigma_s}[|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2] \tag{2.16}$$

$$P_{12}(\theta) = \frac{2\pi}{k^2\sigma_s}[|S_2(\theta)|^2 - |S_1(\theta)|^2] \tag{2.17}$$

$$P_{33}(\theta) = \frac{2\pi}{k^2\sigma_s}[S_2(\theta)S_1^*(\theta) + S_1(\theta)S_2^*(\theta)] \quad (2.18)$$

$$P_{34}(\theta) = \frac{2\pi}{k^2\sigma_s}[S_2(\theta)S_1^*(\theta) - S_1(\theta)S_2^*(\theta)] \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Mie saçılımı, absorbsiyon ve sönme kesitlerinin tümü a_n ve b_n katsayıları cinsinden ifade edilebilir. Yani ışığın zayıflama özelliği, zayıflama kesit alanı olarak Denklem 2.20'de, ışığın saçılma özelliği, saçılım kesit alanı olarak Denklem 2.21'de ve ışığın absorbsiyon özelliği, absorbsiyon kesit alanı olarak Denklem 2.22'de verilmiştir.

$$\sigma_e = \frac{2\pi}{k^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)Re(a_n + b_n) \quad (2.20)$$

$$\sigma_s = \frac{2\pi}{k^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2.21)$$

$$\sigma_a = \sigma_e - \sigma_s \quad (2.22)$$

Bir başka yararlı nicelik, aynı zamanda faz fonksiyonunun ilk momenti olan asimetri faktörü g 'dir. Denklem 2.23'te asimetri faktörüne ait verilmiştir.

$$g = \int_{4\pi} P_{11}(\theta)\cos\theta \, d\Omega \quad (2.23)$$

Asimetri faktörü, faz fonksiyonunun şeklini tanımlar; g>1 olduğunda ileri saçılımın tercih edildiğini gösterirken, g<1 olduğunda ise geri saçılımın oluştuğunu göstermektedir. Saçılma açısından bağımsız olarak faz fonksiyonunu karakterize etmek için kullanışlı bir parametredir. Mie asimetri faktörü Denklem 2.24'te verilmiştir.

$$g = 2\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{n(n+2)}{n+1}Re(a_n a_{n+1}^{*} + b_n b_{n+1}^{*}) + \frac{2n+1}{n(n+1)}Re(a_n + b_n^{*})\right] \tag{2.24}$$

Hansen ve Travis, bu toplamlarda gereken terim sayısı, boyut parametresi α'dan biraz daha fazla olduğunu ifade etmektedir [97]. Örneğin, 500 nm'de 1 μm yarıçaplı bir parçacık için yaklaşık 13 terim gereklidir. Başlangıçta polarize olmayan ışığın Denklem 2.25'deki gibi olduğu varsayılırsa,

$$I_0 = [I_0, 0,0,0]^T \tag{2.25}$$

bir saçılım olayından sonra Stokes vektörü şu Denklem 2.26'daki gibi olacaktır.

$$I = [P_{11}I_0, P_{12}I_0, 0,0]^T \tag{2.26}$$

Dolayısıyla, saçılma açısının bir fonksiyonu olarak lineer polarizasyon derecesi Denklem 2.27'deki gibi olur.

$$LP(\theta) = -\frac{Q}{I} = \frac{P_{21}(\theta)}{P_{11}(\theta)} \tag{2.27}$$

Şimdiye kadar ifade edilen tüm Mie saçılımı denklemleri, tek bir boyut parametresi, dolayısıyla belirli bir yarıçap için oluşturulmuştur. Tipik bir aerosol kütlesi çok çeşitli ebatları içermektedir. Bu nedenle, Mie kesitleri ve saçılma matrisi elemanlarının bir parçacık boyutu dağılımı, $n(r)$ üzerinden ortalaması alınmalıdır. Saçılma matrisi elemanları Denklem 2.28'deki forma dönüşmektedir.

$$P_{ij}(\theta) = \frac{\int_{r_1}^{r_2} P_{ij}(\theta, r)n(r)dr}{\int_{r_1}^{r_2} n(r)dr} \tag{2.28}$$

Burada $n(r)$ parçacık boyutu dağılımıdır ve $P_{ij}(\theta)$ parçacık yarıçap bağımlılığını açıkça gösteren, saçılma matrisinin ij öğesidir. İleri saçılma ve daha az ölçüde geri saçılma yönlerindeki tepe noktaları ile karakterize edilmektedir. Ek olarak, yapıcı ve yıkıcı girişim etkilerinin göstergesi olan baştan sona ince bir yapı vardır (geniş bir boyut dağılımı üzerinden ortalaması alındığında bu ayrıntılı yapının çoğu kaybolur). Büyük ileri saçılma tepe noktası niteliksel olarak aşağıdaki gibi anlaşılabilmektedir. En küçük saçıcılar tek bir dipol ile gösterilebilirken, daha büyük saçıcılar bir dipol topluluğu ile temsil edilebilmekte ve gerekli sayı daha büyük partikül boyutu ile artmaktadır. Benzer şekilde, kesitler Denklem 2.29'daki ve asimetri faktörü Denklem 2.30'daki şekilde dönüşür.

$$\sigma_k = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \sigma_k(r) n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} n(r) dr} \tag{2.29}$$

$$g = \frac{\int_{r_1}^{r_2} g(r) n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} n(r) dr} \tag{2.30}$$

Genellikle boyut dağılımı denklemlerde ortak paydada olacak şekilde Denklem 2.27, Denklem 2.28 ve Denklem 2.29'da ifade edilmiştir.

Mie saçılımı için kullanılan bir diğer yaklaşım ise Fraunhofer kırınım teorisidir. Dalga boyuna göre büyük parçacıklar için, tam Mie teorisine Fraunhofer kırınım teorisi işlevsel olarak eşdeğerdir. Bununla birlikte, parçacığın çapı dalga boyuna yaklaştıkça, kırılma ve soğurma etkileri saçılma modellerini giderek daha fazla etkiler. Fraunhofer kırınım denklemi, dairesel bir nesne tarafından kırınıma uğrayan ışığın göreceli yoğunluğunun, yalnızca dalga boyu, açı ve nesnenin kenarları arasındaki mesafe olan parçacık çapı cinsinden tanımlandığını ifade etmektedir. Bu yaklaşım ışığın polarizasyonunu ve parçacık boyunca iletilen ışığı hesaplamalara dahil etmemektedir. Fraunhofer kırınım teorisi Denklem 2.31'de verilmiştir.

$$I(\theta) = \frac{I_0}{2k^2a^2}\ \alpha^4 \left(\frac{J_1(\alpha \sin\theta)}{\alpha \sin\theta}\right) \tag{2.31}$$

Denklemde $I(\theta)$, θ açısında toplam saçılmış ışık yoğunluğunu, I_0 ışık kaynağının şiddetini, k dalga sayısını $(2\pi/\lambda)$, a detektörden olan uzaklığını, α boyutsuz partikül boyutu $(\alpha = \pi x/\lambda)$ parametresini ve J_1 birinci dereceden Bessel fonksiyonunu ifade etmektedir.

Henyey-Greenstein saçılım fonksiyonu 1941 yılında yıldızlararası toz bulutları tarafından ışığın saçılımını tanımlamak için gökbilimci Louis George Henyey ve Jesse Leonard Greenstein tarafından oluşturulmuştur. Toz bulutlarından ışığın saçılımını tanımlamak için kullandıkları küçük parçacıklardan ışık saçılımının açısal bağımlılığını taklit eden bir ifade elde etmişlerdir. Başka bir ifade ile anizotropik saçılma özelliklerini modellemişlerdir. Işığın saçılma yönünü belirleyen açısal dağılım fonksiyonu Denklem 2.32'de ifade edilmiştir.

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}} \tag{2.32}$$

Buna göre $p(\theta)$ açısal saçılma yoğunluğu fonksiyonu, yani belirli bir θ açısında ışığın saçılma olasılığı, g ise anizotropi parametresi olup $-1 \leq g \leq 1$ aralığında yer almaktadır. Buradaki g ile ifade edilen anizotropi parametresi, asimetri faktörü olan g ile aynı fiziksel ifade olup Henyey-Greenstein fonksiyonunda izotropi olarak ifadesi her yöne eşit dağılma durumunu ifade etmek için kullanılan boyutsuz bir kavramdır. $g = 1$ olduğu durumda tamamen ileri (ışığın geldiği yönde) saçılma, $g = 0$ olduğunda her yöne eşit saçılma, $g = -1$ olduğunda ise tamamen geri (ışığın geldiği yönün tersi istikametinde) saçılma olduğunu ifade etmektedir.

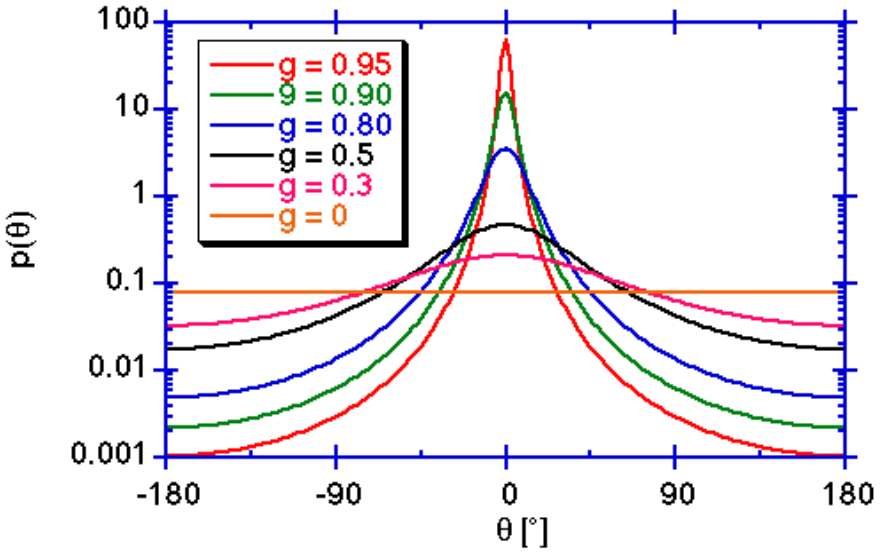
Henyey-Greenstein fonksiyonu bir olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Yani, fonksiyonun saçılma olasılıklarını tanımladığı kabul edilir ve tüm yönlere (katı açılara) göre hesaplandığında toplam olasılığın 1 olması gerekmektedir. Bu durum Denklem 2.33'te verilmiştir.

$$\int_0^{\pi} p(\theta) 2\pi \sin\theta \, d\theta = 1 \tag{2.33}$$

Küresel katı açı elemanı $d\Omega = \sin\theta\, d\theta\, d\emptyset$ ifadesine eşittir. Ancak burada simetri nedeniyle $\emptyset$'ye entegrasyon yapıldığında bu terim 2π'ye dönüşür. Küresel koordinatlarda diferansiyel katı açı bileşeni $\sin\theta\, d\theta$, daire çevresindeki tüm açılar için katkıyı belirten parametre $2\pi \sin\theta$ olarak ifade edilmektedir.

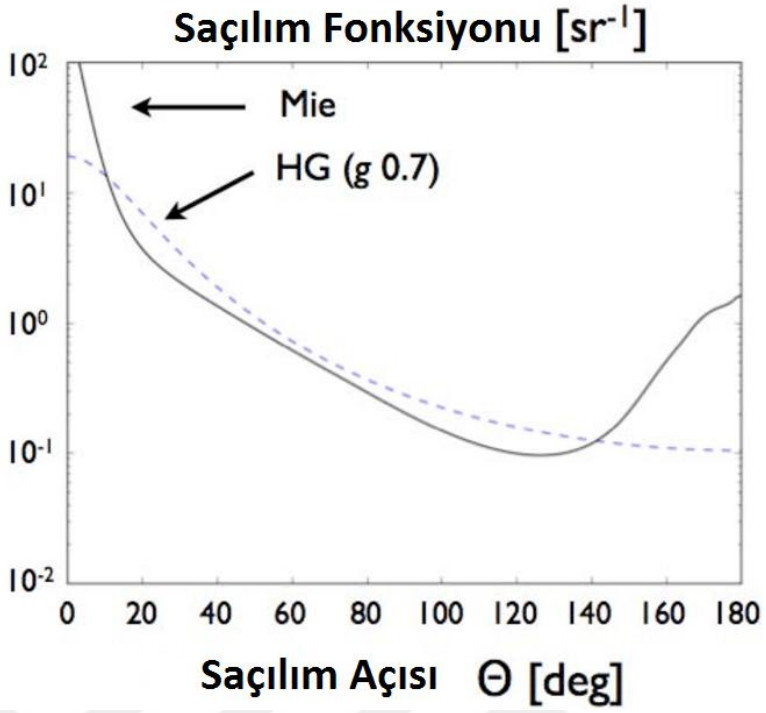
$$\int_0^{\pi} p(\theta)\cos(\theta) 2\pi \sin\theta\, d\theta = g \tag{2.34}$$

Henyey-Greenstein fonksiyonu, anizotropi faktörü olan g, $\cos\theta$ için beklenen değerin hesaplanması aynı g değerini döndürecek şekilde $p(\theta)$ belirtmektedir. Farklı g değerleri için Henyey-Greenstein değerleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



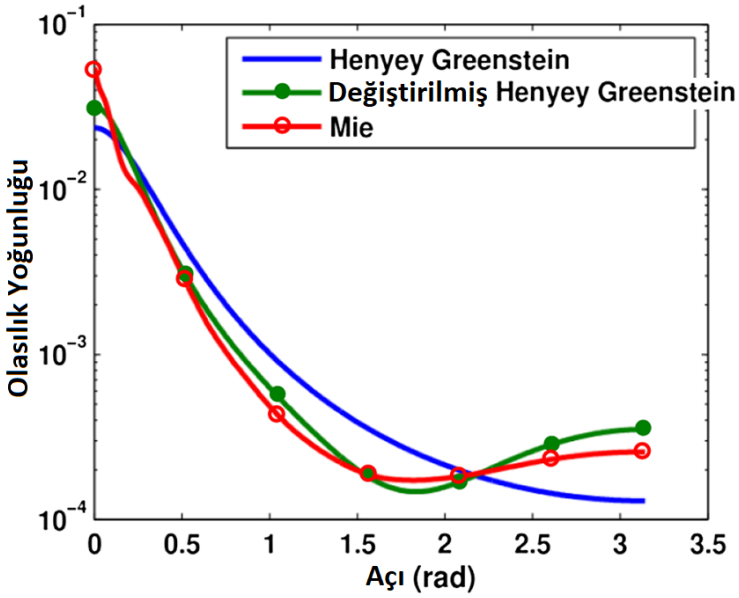
Şekil 2.8. Henyey-Greenstein fonksiyonunun farklı izotropi değerleri için dağılımı [98]

Henyey-Greenstein fonksiyonu ile gerçek Mie saçılımı ile karşılaştığında yakınsadığı saçılım açıları olmasına rağmen hatanın yükseldiği açıların da olduğu Şekil 2.9'da gösterilmiştir [99].



Şekil 2.9. Henyey-Greenstein fonksiyonun Mie saçılımı ile karşılaştırılması [99]

Literatürde hata miktarını azaltmak için mevcut algoritmaların değiştirilmiş versiyonlarının yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Bunlardan değiştirilmiş Henyey-Greenstein fonksiyonun gerçek Mie ve Henyey-Greenstein ile karşılaştırılması Şekil 2.10'da gösterilmektedir [100].



Şekil 2.10. Değiştirilmiş Henyey-Greenstein fonksiyonunun Mie saçılımı ve Henyey-Greenstein ile karşılaştırılması [100]

Bu optik olaylar değerlendirildiğinde tanecikli çözünmemiş maddelerde Mie saçılımının baskın olduğu görülmüştür. Mie saçılımının hesaplanmasının zorluğu, alternatif yöntemlerin oluşturulmasına sebep olmuştur. Derin öğrenme gibi görüntüleri tanıyabilen ve değerlendirebilen algoritmalar, Mie saçılımı verileri ile eğitildiğinde tanıma işlemini gerçekleştirebilecektir.

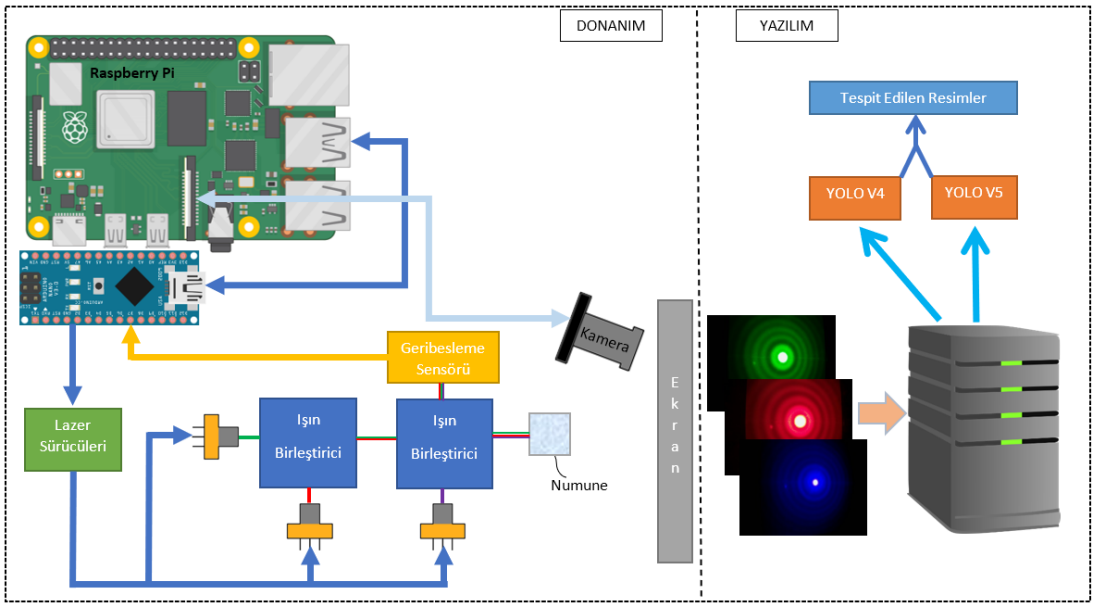
3. BÖLÜM

GÖRÜNTÜ VE FOTORESEPTÖR ESASLI MADDE ALGILAMA SİSTEMLERİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ

Ağır metaller ve mikroplastikler ekolojik problemlerdir. Bunlar sadece çevredeki canlılara değil insanlara da zararlı olan maddelerdir. Tez çalışması kapsamında bu problemlerin tespitine yönelik iki farklı sistem önerisinde bulunulmuştur. Bunlardan görüntü temelli sensör sistemi bir kamera vasıtası ile mikroplastiklerin Mie saçılımı sonucu oluşturmuş olduğu girişimsel desenleri tanıyarak materyaline ve boyutuna göre sınıflandıran bir yapıya sahiptir. Fotoreseptör temelli sistem ise üzerindeki dar bantlı algılayıcılar ve farklı spektrumlu LED ışık kaynakları kullanan bir sistem olup hem mikroplastikleri hem de ağır metalleri sınıflandırabilen bir sistemdir. Ağır metaller ve mikroplastikler doğal olabildiği gibi suni yollarla meydana gelebilen problemlerdir. Bu bölümde bu iki sistemin tasarımı, yapısı ve bileşenleri anlatılacaktır.

3.1. Görüntü Temelli Sensör Sistem Tasarımı

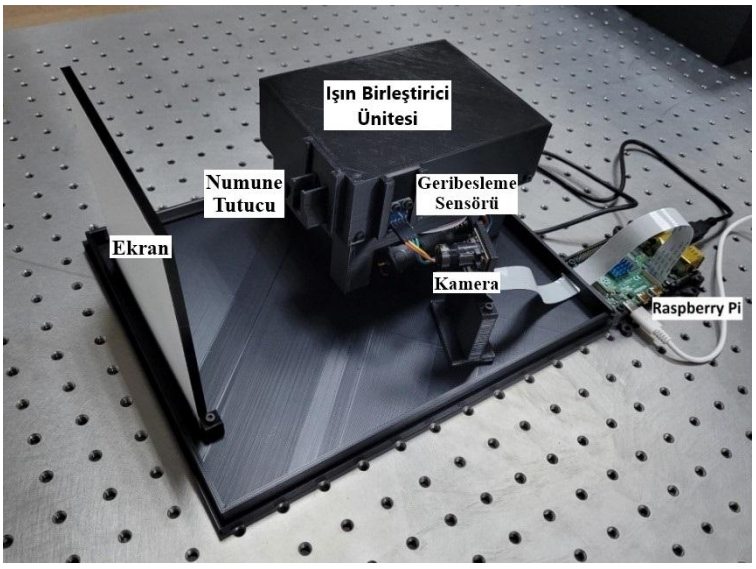
Görüntü temelli sensör sistemi, hızlı şekilde mikroplastiklerin lazer ışınına maruz kalması sonucunda meydana getirdiği Mie saçılım desenlerinin görüntülerini yüksek çözünürlükte elde eden bir sistemdir. Sensör sistemi elde ettiği verileri bir bilgisayara aktararak derin öğrenme algoritması olan YOLO ile ağını eğitmekte ve yeni gelen verileri bu eğitim verisine göre sınıflandırma işlemini gerçekleştirmektedir. Görüntü temelli sensör sistemi donanımsal ve yazılımsal olmak üzere iki ünite üzerine kurulmuştur. Mikroplastikleri, 3 farklı lazer ışık kaynağını kullanarak oluşturduğu desenleri kamera vasıtası kaydeden donanım ünitesi ve bu görüntüleri etiketleyerek kendi ağını eğitmek ve yeni numuneleri sınıflandırmak için kullanılan yazılım ünitesidir. Görüntü temelli sensör sisteminin blok diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir. Sisteme ait donanım ve yazılım bileşenleri ilerleyen bölümlerde anlatılacaktır.



Şekil 3.1. Görüntü temelli sensör sisteminin blok diyagramı

3.1.1. Görüntü Temelli Sensör Sisteminin Donanım Bileşenleri

Bu tez çalışmasında geliştirilen görüntü temelli sensör sisteminin kurulu düzeneği Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Görüntü temelli sensör sisteminin kurulu düzeneği

Sistemde lazer ışınının güç çıkışını sabitlemek için 1 adet geri besleme amaçlı ışık dijital dönüştürücüsü (TSL2561- Light to Digital Converter), dijital ışık verisini alabilmek ve lazer sürücülerini yönetebilmek için mikrokontrolör (Arduino Nano), 3

farklı lazerin tek çıkıştan paralel gönderilmesi için ışın ayırıcı, görüntülerin alınması ve ön işlemlerden geçirilebilmesi için tek kart bilgisayar (Raspberry Pi 4) ve bu tek kart bilgisayar ile uyumlu 5 megapixel ayarlanabilir odaklı kamera kullanılmıştır. Kameraya ait bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir. Sistemi bir arada tutan ve ışık geçirmeyen kısımlar 3D yazıcılardan ürettirilmiştir.

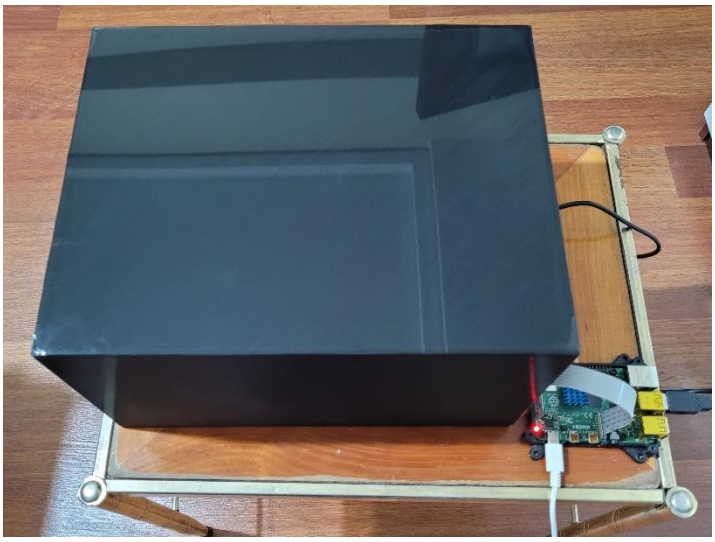
Tablo 3.1 Görüntü temelli sensörde kullanılan kamera özellikleri

Parametre	**Özellikler**
Görüntü Tümdevre Teknolojisi	CMOS
Üretici	Omnivision
Görüntü Tümdevre Modeli	OV5647
Maksimum Çözünürlük	2592 x 1944
Piksel Sayısı	5 Megapiksel
Piksel Boyutu	1,4µm x 1,4µm
Odak Noktası	Ayarlanabilir
Kızılötesi Filtre	Yok (Gece Görüş için Kullanılabilir)
Lens Açısı	70^{o}

Lazer ışınları ışın birleştirici vasıtasıyla birleştirilmiştir. Sistemde 1 adet geri besleme için ışık dijital dönüştürücüsü, dijital ışık verisini alabilmek ve lazer sürücülerini yönetebilmek için mikrokontrolör (Arduino Nano), görüntülerin alınması ve ön işlemlerden geçirilebilmesi için tek kart bilgisayar (Raspberry Pi 4) ve tek kart bilgisayar ile uyumlu 5 megapixel ayarlanabilir odaklı kamera kullanılmıştır. Sistemi bir arada tutan ve ışık geçirmeyen kısımlar 3D yazıcılardan ürettirilmiştir.

Numunelerin üzerine yerleştirildiği küvet haznesi, ışık perdesi, ışık birleştirme ünitesi, kamera, geri besleme algılayıcısı, anahtarlama ünitesi ve lazer sürücüleri donanım ünitesi üzerinde yer almaktadır.

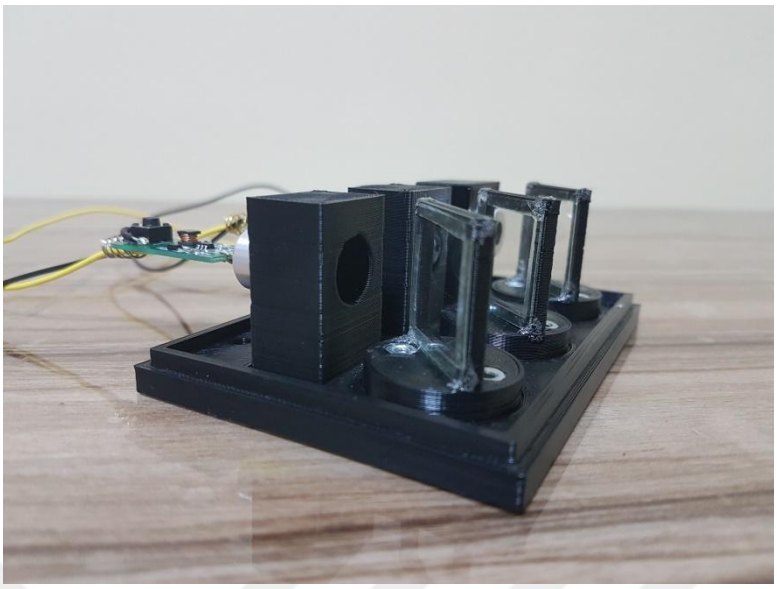
Sistemin çalışması için tam karanlık ortam gerektiğinden dolayı kapak tasarımı da yapılmıştır. Kapak ortamdaki partiküllerin ve ortamdaki istenmeyen ışık kaynaklarının ölçüm sonuçlarına etkisini en aza indirmektedir. Sistemin kapaklı hali Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Görüntü temelli sensör sisteminin kapaklı hali

Sistemde ışık kaynağı olarak farklı dalgaboylarındaki, uygun fiyatlı lazer işaretçilerin içerisindeki lazer modülleri kullanılmıştır. Bu lazer modülleri, lazer diyot, sürücü, kolimatör (collimator) lens ve muhafaza (housing) içermektedir. İncelenen lazer işaretçilerin üzerindeki modüller, odak ayarları değiştirilebilir olarak gelmiştir. Lazerlerin, istenildiğinde açılması veya kapatılması amacıyla BJT ve voltaj regülatöründen oluşan mikrokontrolör tarafından yönetilebilir sürücü kartı gerçekleştirilmiştir.

Mikroplastiklerin ölçümü lazer ışık kaynakları kullanmaktadır. Merkezden doğru ölçümlerin alınabilmesi, halkalar arasındaki açıların lazer dalgaboyu ile ilişkisini gösterebilmek için tek noktadan çıkışa sahip farklı dalgaboylu lazer ışınlarının birleştirilmesi gereklidir. Bu çalışmalar kapsamında lazer ışınlarının birleştirilmesi için Şekil 3.4'te görülen ışın birleştirici tasarımı yapılmıştır.



Şekil 3.4. İlk sürüm ışın birleştiricisi tasarımı

Geliştirilen ilk sürüm ışın birleştiricide, ışın ayırıcı olarak mikroskop lameli kullanılmıştır. Bunun sebebi materyalinin cam olması, ince yapıda olması ve parlak yüzeye sahip olması sebebiyle bu malzeme seçilmiştir. Sistemin en büyük problemi ışınların tek bir çıkıştan birleşerek çıkması için gerekli olan kalibrasyon zorluğudur. Plakalar merkez etrafında dönecek şekilde tasarlansa da plakaların çerçeveye tutturulması sırasında kullanılan yapıştırıcı sebebiyle plaka alt yüzeye tam dik olacak pozisyonu yakalayamamaktadır. Bu da bazı ışınların yukarı, bazı ışınların aşağı gitmesine neden olmaktadır. Sistemin bir diğer sıkıntısı ise aktarılan optik gücün zayıf olmasıdır. Lazer ışınlarının çoğu yüzeye çarptığında yüzeyden yansımak yerine plaka içerisinden geçerek karşıya ulaşmaktadır. Ancak zayıflamış düşük bir miktardaki ışın birleştirilebilmektedir.

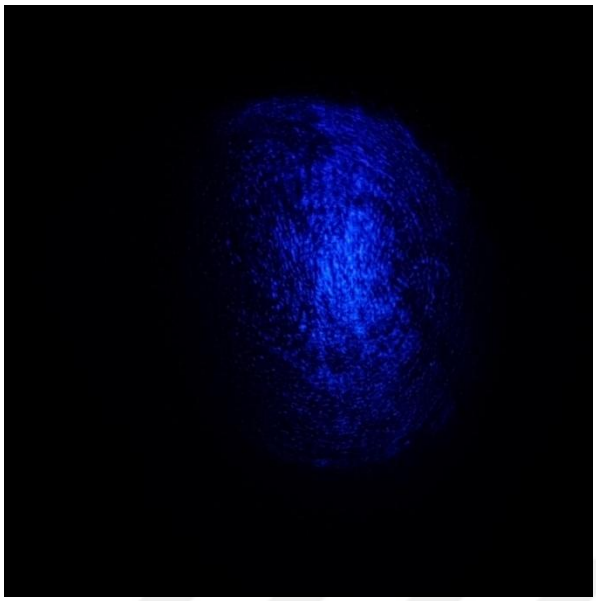
Lazer gücünün daha fazla korunabilmesi için ikinci bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarımda hazır ışın ayırıcılar kullanılmıştır ve Şekil 3.5'te görülmektedir. Hazır ışın ayırıcılar, daha fazla ışığın yansımasını sağladıkları gibi kalibrasyon edilebilirliği daha kolay olmaktadır.



Şekil 3.5. İkinci sürüm ışın birleştiricisi tasarımı

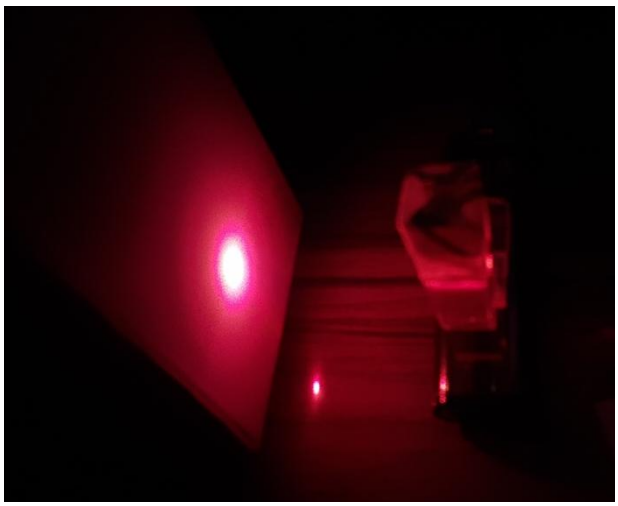
10 µm çapa sahip polistiren (PS) mikro partiküller ile hazırlanan numuneler, geliştirilen optik sistem ile ölçülmüştür. Alınan ölçümlerde 1ml PS mikro plastik çözeltisi 1,0342gr gelmiştir. Sertifikasında %10'luk katı olduğu belirtildiği için 1ml'de 0.10342gr PS olmaktadır. Mikroplastiğin sertifikasında yoğunluğunun 1,05gr/cm^3 olduğu belirtilmiştir. Küre yapısında ve çapı 10µm olduğu düşünüldüğünde bir adet PS mikro partikülün ağırlığı 5,497x10^{-10}gr olduğu hesaplanmıştır. O halde avogadro sayısı kadar mikro partikül, 1 mol mikro partikül olduğu için, 1mol 10µm çapa sahip PS mikro partikül 3,309x10^{14}gr olmaktadır. Bu durumda 1µl numunede, 1,0342x10^{-4} gr ya da 3,125x10^{-19} Mol PS vardır. Toplam birer mililitrelik hazırlanan numunelerde, 1µl'den 10µl'ye kadar PS mikroplastik çözeltileri hazırlanmıştır.

Hazırlanan numunelere su içerisinde odaklanacak şekilde lazer ışınları gönderilmiştir. Bu durumda mikroplastiklerin hareketleri gözlemlenebilse de tanecik sayısı ile ilgili bir hesaplama yapılamamıştır. Bu durum Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Mikroplastik içeren su içerisinde odaklanmış lazer ışınının çıkış deseni

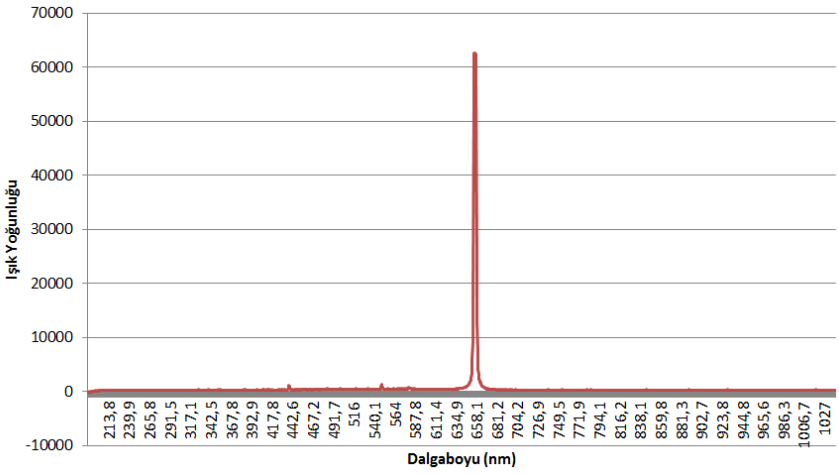
Mikroplastiklerin tespiti için saçılımdan faydalanılması düşünülmüştür. Bu durumda partiküllere çarpan ışınların oluşturduğu desenlerin paralel ışınlarda daha standart olabileceği, genel saçılım toplamından paralel ışığı çıkardığımızda elde edilen saçılımın partikül miktarı ile orantılı olacağı prensibi ile partiküllere paralel ışın demeti gönderilmiştir. Şekil 3.7'de görülen halkalar meydana gelmiştir.



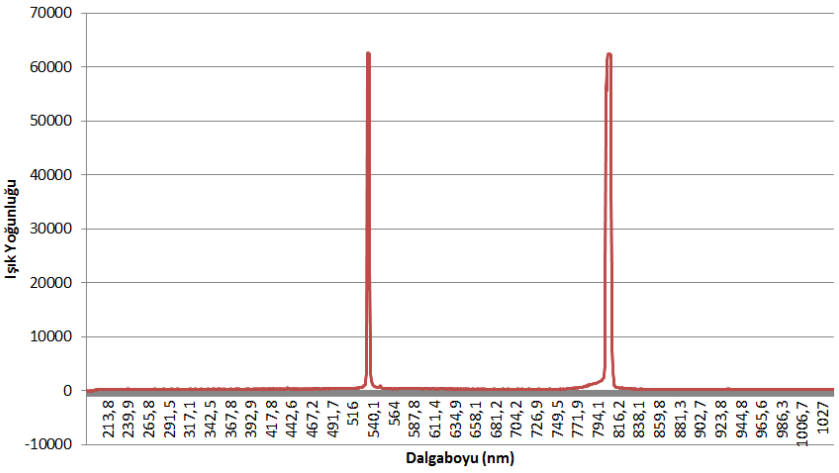
Şekil 3.7. Mikroplastiklere çarpan paralel ışının halka şeklindeki saçılımı

Sistemde 3 adet lazer bulunmaktadır. Bunlar 650nm dalga boyuna sahip kırmızı renk, 405nm dalgaboyuna sahip mor/menekşe renk, 535nm ve 806nm çift dalga boylu görünürde yeşil renk lazerlerdir. Şekil 3.8'de kırmızı lazerin, Şekil 3.9'da yeşil lazerin,

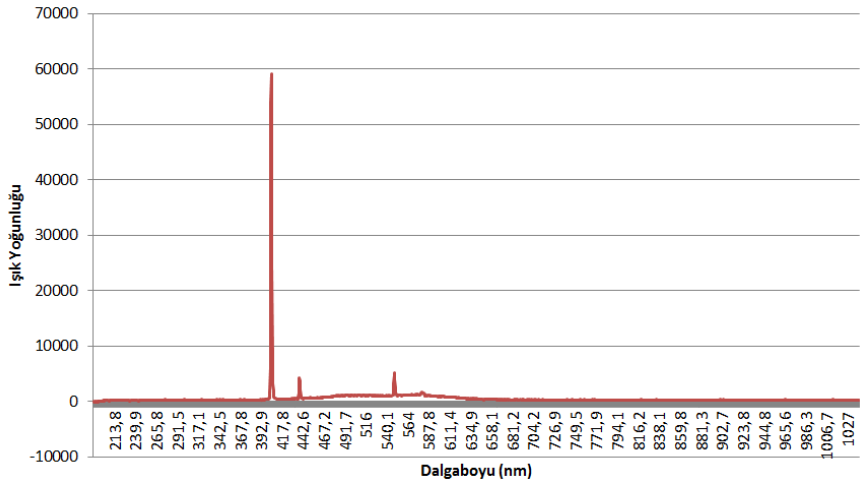
Şekil 3.10'da mor lazerin spektrumu verilmiştir. Bu lazerler, lazer işaretçilerinde bulunan lazerler olup ekonomik olarak temin edilebilmektedirler. Üreticiler ortalama çıkış gücünün 5mW olduğunu belirtmişlerdir. Kullanılan lazerler arasında yalnızca kırmızı lazer, modül halinde temin edilmiştir. Bunun nedeni, kırmızı lazer işaretçinin dahili bir muhafazaya sahip olmamasıdır. Bu muhafaza içerisindeki kolimatör lensi ve lazer diyotu, lensin odak noktası kadar mesafeye hizalayarak lazer ışınını paralel hale getirmektedir. Ayrıca muhafaza, lazer diyotun soğutulmasına da sağlamaktadır.



Şekil 3.8. Kırmızı lazer'in spektrumunun ölçüm sonucu



Şekil 3.9. Yeşil lazer'in spektrumunun ölçüm sonucu



Şekil 3.10. Mor lazerin spektrumunun ölçüm sonucu

Işın birleştirme ünitesi içerisinde lazer ışınları, ışın ayırıcı 2 adet prizma ile birleştirilmiştir. Çıkış kısmında bulunan prizmada oluşan ikinci ışın, zayıflatıldıktan sonra ışık-dijital dönüştürücüsü kullanılarak geri besleme amacı ile ölçülmüştür. Işın birleştirme sırasında meydana gelen yansıma ve saçılma temelli ışın gürültülerinin durdurulması için bu ünite dış ortamdan izoleli olarak gerçekleştirilmiştir.

Deney düzeneği hassaslaştırılarak görüntü işleme vasıtasıyla oluşan saçılımın işlenmesi planlanmıştır. Bunun için sistemde tek kart bilgisayar ve kamera kullanılmıştır. Tek kart bilgisayar içerisine "raspbian" işletim sistemi, güncel Python, "OpenCV" ve "NumPy" kurulumları gerçekleştirilmiştir. Tek kart bilgisayar üzerine erişim VNC Server ile gerçekleştirilmiş, sistem wifi üzerinden haberleştirilerek beslemesi hariç kablosuz olarak kullanıştır. Bu sayede deneyler karanlık ortamlarda daha rahat yürütülmüştür. Çünkü ortamda bulunabilecek bir başka ışık kaynağı, görüntülerde gürültüye neden olabilmektedir.

Geri besleme için kullanılan ışık dijital dönüştürücüsü verisinin toplanması, lazer sürücülerinin hassas kontrolü için mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikrodenetleyici USB bağlantısı ile tek kart bilgisayara verileri aktarırken aynı zamanda tek kart bilgisayardan gelen veriler ile sistemi yönetmektedir.

Tek kart bilgisayar, sistemin kontrolünü, görüntü verilerinin kategorize edilmesini, görüntülerin depolanmasını ve görüntülerin bilgisayara aktarılmasını sağlamaktadır. İlerleyen aşamalarda eğitilen ağ, tek kart bilgisayar üzerine yüklenerek numunenin

yerinde tanınması sağlayacaktır. Tek kart bilgisayar üzerindeki yönetim yazılımı "OpenCV" kütüphaneleri dahil edilmiş Python 3 ile gerçekleştirilmiştir.

Tek kart bilgisayar sistemi kontrol ederek kamera görüntülerini işlemektedir. Kameraların sahip olduğu fıçı (barrel) distorsiyonunu giderirken, kameranın sahip olduğu açının geometrik transformasyonu işlemlerini uygulayarak görüntülerin lazer ışınları ile aynı doğrultudan çekilmiş gibi düzeltilmesini sağlamaktadır. Bu sayede halka görüntülerinin açılarının bulunması, piksellere karşılık gelen uzaklıkların hesaplanması mümkün olmaktadır.

Çalışmamızda farklı dalgaboyuna sahip düşük fiyatlı lazerler kullanılarak, konsantrasyondan bağımsız olarak mikroplastiklerin boyut ve tür karşılaştırmasını yüksek doğrulukta yapabilecek kabiliyette bir donanım gerçekleştirilmiştir.

Lazer ışınları küvet içerisindeki mikroplastik içeren numunelere çarptığında kırılma, saçılma, kırınım, absorbsiyon olayları oluşmaktadır. Farklı dalgaboylarındaki ışınlarda kırınım açısı, saçılma miktarı, kırınım dalgaları ve absorbsiyon miktarları değişmekte bu da desenlerin farklı açılarda oluşmasına neden olmaktadır. Birden fazla, farklı dalgaboyundaki ışın kaynağına bağlı desenler incelendiğinde mikroplastiğin cinsi ve çapı tespit edilebilmektedir.

Sistemde kullanılan plastik parçalar 3D yazıcılardan alınan çıktılardan oluşmaktadır. Siyah renk ışığı en çok absorbe eden renk olduğu için istenmeyen kırılma ve saçılma olayları absorbe edilebilmektedir.

3.1.2. Görüntü Temelli Sensör Sisteminin Otonom Yazılımı

Makine öğrenmesi ve yapay zekâ bilimin birçok dalında kullanımı yaygınlaştığı gibi maddelerin cinsinin tayininde ve sınıflandırmada cihazlarla olan entegrasyonu da artmaktadır. Bu yöntemler eldeki verilerle eğitildiğinde yeni maddeleri tanıyabilir hale gelmektedir. Böylece otonom karar mekanizmalı sistemlerin ve ölçüm cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlar insan faktörünü tam olarak ortadan kaldırmasa dahi önerilerde bulunması, ani bir değişikliği gerçek zamanlı gözlemleyebiliyor ve bildirebiliyor olması sayesinde insanların hata yapma olasılıklarını azaltmış ve kesintisiz gözlem imkânı sunmuştur. Sistemimizde kullandığımız YOLO ve ResNet

algoritmaları da bir derin öğrenme algoritması olup yeni tür mikroplastiklerin ya da farklı parçacıkların öğrenilebilmesini sağlamaktadır. Teknik bilgi ya da istatistiki verilerle yapılabilecek değerlendirmeleri otomatikleştirerek sınıflandırmaktadır.

Sistem; lazerler ve TSL2561 geri besleme ölçümleri için gömülü yazılımı, kamera görüntü alımı ve yakalanan görüntülerin depolanması için tek kartlı bilgisayar üzerindeki yazılımı, ayrıca otomatik görüntü değerlendirmesi için derin öğrenme yazılımını içermektedir. Derin öğrenme algoritmaları olarak YOLO v11, ResNet-18 ve ResNet-50 kullanılmaktadır.

Derin öğrenme alanında önemli bir gelişme olarak kabul edilen ResNet, derin sinir ağlarının eğitimi sırasında karşılaşılan kaybolan gradyan (gradient vanishing) sorununa bir çözüm sunmaktadır. Bu mimari, ilk olarak He ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [101] ve derin katmanlara sahip ağların daha etkili bir şekilde eğitilmesini mümkün kılmaktadır. ResNet mimarisinde, doğrudan öğrenilmesi gereken dönüşüm yerine artık (residual) fonksiyon öğrenilmektedir. Bu sayede, özellikle çok katmanlı yapılarda modelin performansının korunması sağlanmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım sayesinde kimlik eşlemesi (identity mapping) yapılabilmekte ve ağın öğrenme kapasitesi derinlikten olumsuz etkilenmeden sürdürülebilmektedir. ResNet mimarisi, bağlantıyı atla (skip connection) olarak adlandırılan yapılar aracılığıyla çalışmaktadır. Bu bağlantılar sayesinde, belirli bir katmandaki çıktı doğrudan bir sonraki katmana aktarılabilmektedir. Böylece gradyan akışının zayıflaması önlenmekte ve öğrenme süreci kararlı hâle getirilmektedir. Bu yöntem, geleneksel derin ağ yapılarında sıkça karşılaşılan aşırı öğrenme (overfitting) ve eğitim zorlukları gibi problemlerin önüne geçilmesini sağlamaktadır.

ResNet, özellikle görüntü sınıflandırma gibi birçok bilgisayarla görü problemi için etkin biçimde kullanılmaktadır. Yüksek doğruluk oranları sayesinde, özellikle ImageNet gibi büyük ölçekli veri kümelerinde dikkat çekmektedir. 18, 34, 50, 101 ve 152 katman derinliğine sahip çeşitli varyantları geliştirilmiş olup, bu modeller birçok modern uygulamanın temelini oluşturmaktadır.

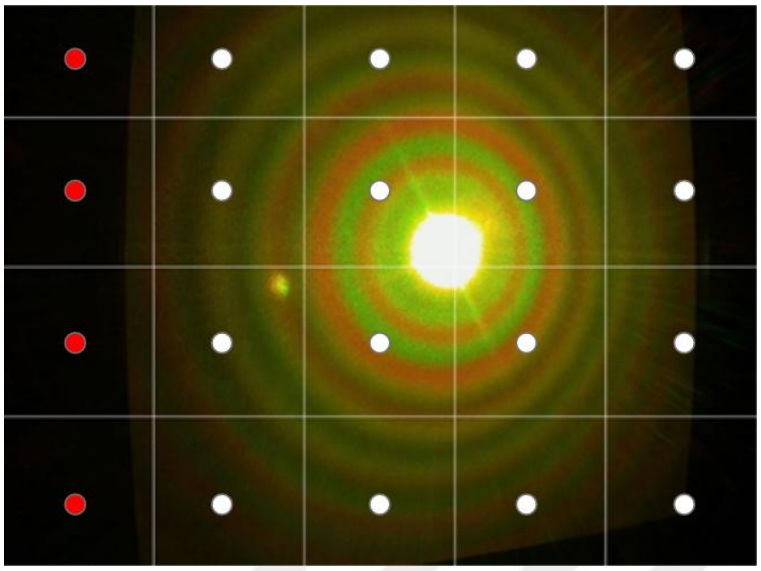
YOLO, “You Only Look Once” ifadesinin kısaltması olup, tespit problemini bir regresyon problemi olarak ele almakta ve yalnızca tek bir ağ geçişi gerektirmektedir.

Ayrıca, gerçek zamanlı performansı ve yüksek doğruluğu ile yaygın olarak benimsenmiş bir nesne tespit algoritması olarak öne çıkmaktadır. YOLO'nun geliştirilmesi, nesne tespit çerçevelerinin evrimini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu algoritma, önceki yöntemlerin çok aşamalı iş hatları ve bölge önerilerine dayalı yapılarının aksine, nesne yerelleştirme ve sınıflandırma işlemlerini doğrudan ham görüntü verileri üzerinden aynı anda gerçekleştiren birleşik bir model sunmaktadır. Böylelikle, düşük gecikme süresiyle hızlı tespit mümkün hâle getirilmekte ve gerçek zamanlı analiz gerektiren uygulamalar için büyük avantaj sağlanmaktadır.

YOLO mimarisi, başlangıçta küçük nesnelerin tespiti konusunda sınırlı başarı göstermekteyken, son sürümlerde bu zorluklar özel dikkat mekanizmaları (attention mechanisms) ve çok ölçekli özellik birleştirme yöntemleri (multi-scale feature fusion) ile giderilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, en güncel sürüm olan YOLO v11, özellik birleştirme yapılarında, mekânsal dikkat mekanizmalarında ve eğitim dinamiklerinde önemli iyileştirmeler içermektedir. Bu geliştirmeler, boyut, şekil değişkenliği ve doğal su ortamları gibi optik açıdan karmaşık ortamlarda bulunmaları nedeniyle tespiti zor olan mikroplastik gibi mikroskobik parçacıkların tanımlanmasında özellikle fayda sağlamaktadır.

YOLO algoritmasında görüntülerin sınıflandırılması işlemi "gözetimli makine öğrenmesi" olduğu için görüntülerin ağa tanıtılması için etiketlenmesi gerekmektedir. Burada görüntüde birden fazla desen olmaması, oluşturulan görüntülerin aynı açıda sabit şekilde gerçekleştirilmesi sebebi ile etiketleme işlemi görüntünün tamamının tanıtılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Oluşan etiketin içeriğinde, tespiti istenen nesnenin sınıfı ve ekrandaki konum bilgisi yer almaktadır. Bu sayede bilgisayar, gözetimsiz öğrenmeye göre daha doğru sonuçlar üretebilmektedir [102].

YOLO'nun temel çalışma mantığı Şekil 3.11'de gösterilmiştir. YOLO algoritması görüntüleri ızgaralara ayrılarak her ızgaranın ortasında kalan nesneyi tespit etmeye çalışmaktadır. Bu tespit işlemini vektör üreterek yapmaktadır. En başta etiketleme yolu ile belirlenen tespiti istenen nesnenin tamamı veya bir kısmı, geçerli ızgarada yoksa, vektör üretilememektedir. Şekil 3.11'de sunulan kırmızı orta noktalı ızgaralarda tespiti istenen nesne olmadığından vektör üretememekte, beyaz orta noktalı ızgaralar ise üretebilmektedir.

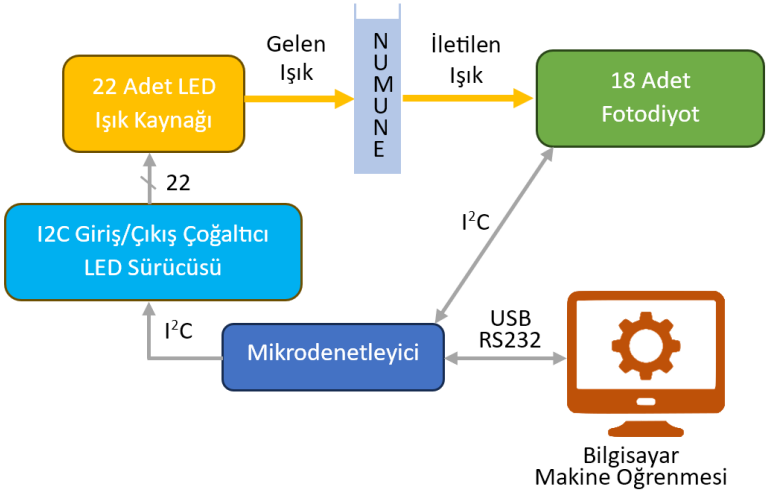


Şekil 3.11. YOLO algoritmasında ızgaralandırılma işleminin gerçekleştirilmesi

3.2. Fotoreseptör Temelli Sensör Sistem Tasarımı

Fotoreseptörler fotodiyot, fototransistör, ışık bağlımlı direnç (LDR – Light Dependent Resistor) ve son zamanlarda bu elemanların birleştirilerek tümdevre halini aldığı algılayıcılardır. Işığı algılayabildikleri spektrumları, kabul açıları algılayabildikleri ışık şiddetine göre farklı modelleri bulunabilmektedir. Fotoreseptörler, görüntü algılayan kameralardan farklı olarak sadece görünür bölge spektrumuna hitap etmezler ve insan gözünün göremediği kızılötesi ve morötesi ışınları algılayabilmektedir. Bu özellikleri fotoreseptörlerin optik temelli birçok cihazda algılayıcı olarak kullanılmasını sağlamıştır.

Tez kapsamında geliştirilen fotoreseptör temelli sensör sistemine ait blok diyagram Şekil 3.12'te gösterilmiştir. Sistemin yönetimi, ilgili LED'in açılması ölçüm alındıktan sonra kapatılması, verilerin doğru şekilde bilgisayara gönderilmesi mikrodenetleyici tarafından yapılmaktadır. İletilen ışık içerisinde sadece absorbans verisi değil, parametreler içerisinde elastik olmayan saçılmalardan olan Raman saçılımında kaymış (Raman shift) dalgaboyları dar bantlı fotodiyotlar vasıtasıyla değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte numune içerisinde fosforesans içeriğin olması durumunda farklı dalga boyunda yayılan ışınlar da yine dar bantlı fotodiyotlar ile anlaşılabilmektedir. LED sayılarının fazla ve farklı spektrumda olması sayesinde ışık dalgaboyunun kayması için gerekli minimum enerji seviyeleri ayırıcı özellik olarak kullanılmıştır.



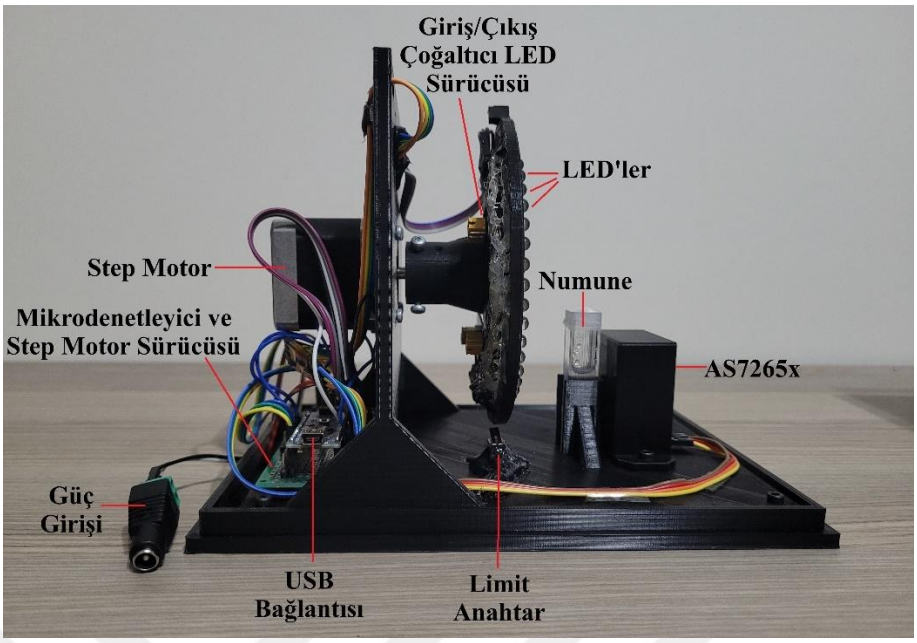
Şekil 3.12. Fotoreseptör temelli sensör sisteminin blok diyagramı

Sistem donanımsal bileşenler ve yazılım bileşenleri olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Donanım bileşeni verilen numunelerin ölçümü ve bilgisayara verilerin aktarılmasını, yazılım bileşeni ise çok katmanlı algılayıcı ile bu verilerin anlamlandırılarak sınıflandırma işlemlerinin gerçekleştirimi konularını işlemektedir. İlerleyen bölümlerde bu kısımlar detaylandırılacaktır.

3.2.1. Fotoreseptör Temelli Sensör Sisteminin Donanım Bileşenleri

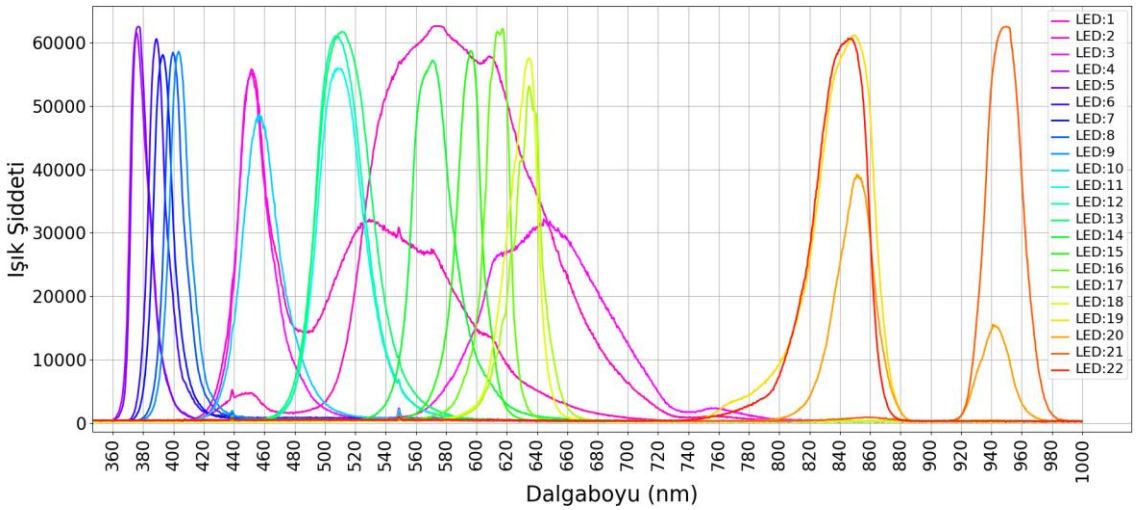
Fotoreseptör temelli sensör sistemi 19 adet dar, 3 adet geniş spektrum LED ve 18 farklı dar spektrum fotodiyot ile numunelerin spektral özelliklerinin tarandığı bir sistemdir. Sistemin temel amacı algılanmak istenen maddeye ait optik karakteristiği elde edip numunede bu maddenin tespitini gerçekleştirip, konsantrasyonunu tahmin etmektir.

Tez kapsamında tasarlanan ve gerçekleştirilen fotoreseptör temelli sensör Şekil 3.13'da gösterilmiştir. Sistemin gövdesi oda gürültüsünü en aza indirmek için siyah ABS malzemeden üç boyutlu yazıcı çıktısı olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Fotoreseptör temelli sensör sistemi

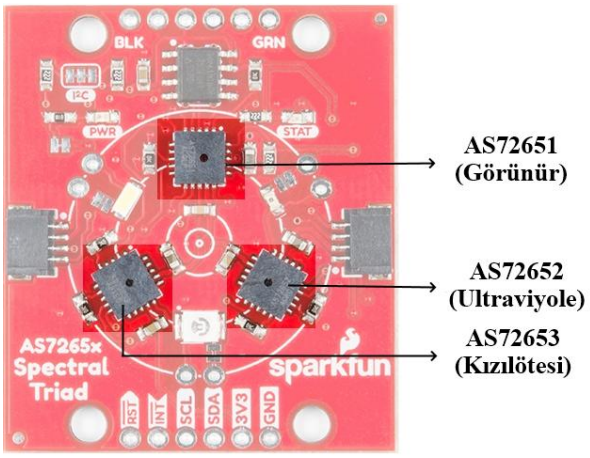
Işık kaynağını seçmek için step motorlu hareket mekanizmasına sahip disk üzerine yerleştirilmiş LED ışık kaynakları ve giriş/çıkış çoğaltıcı sürücüleri bulunmaktadır. LED'in uygun konumu step motor ile ayarlandıktan sonra ölçümü yapılacak ışık kaynağı açılmakta, ölçüm alındıktan sonra kapatılıp bir sonraki LED'in konumuna hareket ettirilmektedir. Maddelerin algılanmasında kullanılacak ışık kaynakları laboratuvar çalışmaları için özel üretilmiş LED'lerden değil, genel amaçlı olarak kullanılan LED'lerden seçilmiştir. Satıcıların sağladığı bilgilere göre toplamda 22 farklı ışık kaynağı kullanılmıştır ancak bu verilerin güvenli veriler olmadığı bilinmektedir. Bu sebeple bu 22 LED spektrometre ile ölçülerek spektrumları incelenmiştir. LED'lerin bu şekilde seçilmesinin temel amacı hem piyasada kullanılan LED'leri incelemek hem de bunların madde algılamasında kullanılabilirlik durumunu incelemektir. Işık kaynağı olarak kullanılan LED'lerin spektrumları Ocean Optics marka, Flame model spektrometre ile ölçülmüş ve Şekil 3.14'de LED'lerin ışık spektrumu verilmiştir. Bu LED'lerden 3'ü (soğuk beyaz, sıcak beyaz ve pembe) geniş, diğer 19'u ise dar bantlıdır. Geniş bantlı LED'ler dar bantlı LED'lerden kaynaklanabilecek spektrum boşluklarının kapatılması düşünülerek sisteme eklenmiştir.



Şekil 3.14. Fotoreseptör temelli sensör sistemindeki LED'lerin spektrumu

Işık kaynağı spektrumu incelendiğinde 880nm-920nm aralığında oluşan boşluk haricinde 365nm ile 980nm aralığının kapsandığı görülmüştür.

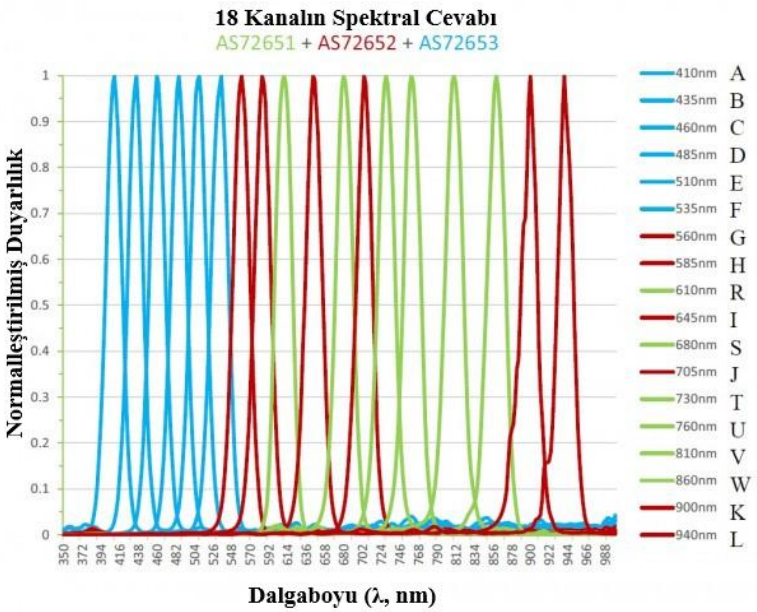
Fotoreseptör temelli algılayıcı modülünün yapısı ve algılayıcı elemanları Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Algılayıcı modülü üzerinde yer alan LED'ler ile reflektif ölçüm yapısı iletilen ışık ölçümü yapacak şekilde dönüştürülmüştür. Kırmızı PCB yapısı siyah bant ile maskelenmiştir. Böylece PCB yapısı sebebiyle oluşabilecek hatalar minimize edilmiştir.



Şekil 3.15. SparkFun üçlü spektroskopi algılayıcı modülü (AS7265x) [103]

Sistemde algılayıcı olarak, SparkFun üçlü spektroskopi algılayıcı (SparkFun Triad Spectroscopy) modülü seçilmiştir. Bunun nedeni AS72651, AS72652 ve AS72653

entegreleri içerisinde yer alan algılayıcı modülünde her birinde 6 adet dar spektrumlu fotodiyot bulunan, 3 adet algılayıcı tümdevre bulunmasıdır. Bu fotodiyotlar yakın ultraviyole bölge ile yakın kızılötesi bölgeyi kapsayan geniş bir aralığa dağıtılmıştır ve fotodiyotların spektral cevapları Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Algılayıcı modülü AS7265x üzerindeki fotodiyotların spektral cevapları [104]

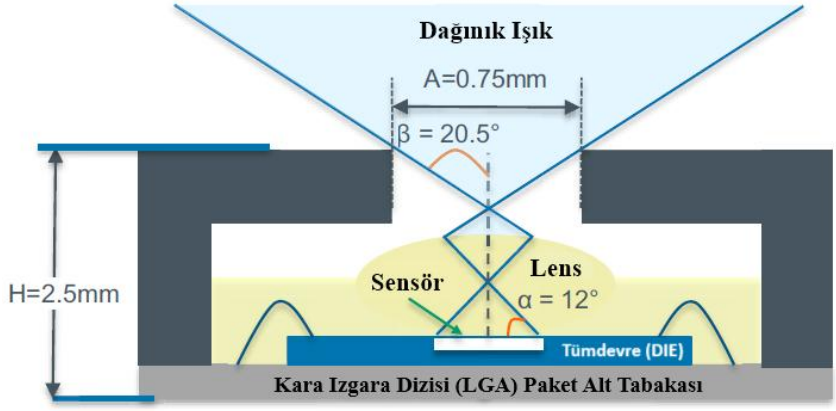
Bu algılayıcı modülü reflektif ölçümler için tasarlanmış bir modül olup modülün gelen ışığı ölçebilmesi için modifikasyonlar gerçekleştirilmiştir. Üzerlerinde 5700k beyaz, 875nm kızılötesi ve 405nm mor LED ışık kaynağı bulunmaktadır. Algılayıcı modülü kartı kırmızı renk olduğu için algılayıcı tümdevrelerin haricindeki kısımlar siyah PVC bant ile maskelenmiştir. Modül üzerindeki LED'ler devre dışı bırakılarak sadece gelen ışığın ölçülebilmesi sağlanmıştır. Bu üç algılayıcı kart üzerinde ayrık konumda yer aldığı ve algılayıcının ışık kabul açısının ölçüm için yetersiz olması sebebiyle 2 kez aralıklı difüzör (diffuser) film ile gelen ışık, algılayıcı modülü üzerine dağıtılmıştır. Dağıtılan ışıkların ortam gürültüsünü azaltmak için de bu işlemlerin bir muhafaza içerisinde gerçekleşmesi sağlanmıştır. Sparkfun AS7265x algılayıcı modülünün teknik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Sparkfun AS7265x teknik özellikleri

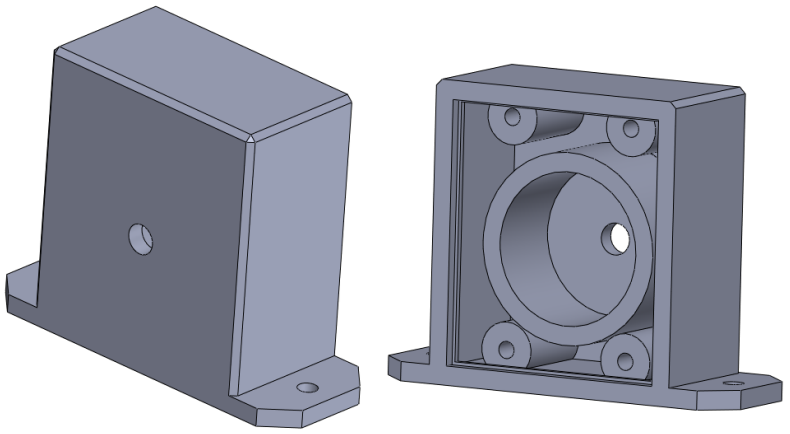
Özellik	Değer
Spektral Kanal Sayısı	18 (3 algılayıcı: AS72651, AS72652, AS72653)
Spektral Aralık	410 nm – 940 nm
MYTG (Bant Genişliği)	Yaklaşık 20 nm (her kanal için)
Ara yüz	I²C (Qwiic) veya UART (115200 bps)
Sayısal Çıkış	16-bit ADC
Hassaslık	28,6 nW/cm² başına 1 sayım
Doğruluk	±%12
Entegre LED'ler	405 nm UV, 5700 K beyaz, 875 nm IR LED
LED Sürücü Akımı	Programlanabilir (12,5–100 mA)
Besleme Gerilimi	2,7 V – 3,6 V (tipik 3,3 V)
Çalışma Akımı	Yaklaşık 25 mA
Çalışma Sıcaklığı	–40 °C – +85 °C
Görüş Açısı	±20,5° (~0,75 mm açıklık)
Takılı Paket Tipi	LGA (4,5 × 4,7 × 2,5 mm), 20 pin
Arayüz Protokol Hızı	I²C: 100/400 kHz, UART: 115200 bps
Entegrasyon Süresi Aralığı	~2.8 ms – 714 ms

Modül üzerinde üç adet algılayıcı tümdevresi kartın merkezinden uzakta yer almaktadır. AS7265x tümdevrelerinin görüş açısında ışınların gelmesi gerekmektedir. Bu tümdevrelerin ışığın kabul açısı Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Bu sebeple 15mm aralıklı 2 adet film tipi optik difüzör kullanılmıştır. Difüzör, ışığı dağıtan bir eleman olup, 2 adet aralıklı optik difüzör film kullanılması ile gelen ışığın algılayıcı tümdevresinin kabul açısına uygun olması sağlanmıştır. Böylece 5mm delikten geçen iletilen ışınlar difüzör film yüzeyine daha homojen biçimde yayılmıştır. Difüzörün diğer bir görevi ise algılayıcı entegrenin yoğun lazer ışını altında satürasyona ulaşmasını engellemektir. Dağıtılan ışık daha zayıf ışık şiddetinde olduğu için optik zayıflatıcı görevi bulunmaktadır.

Üçlü spektral algılayıcı için tasarlanan dış kılıf Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Kılıf algılayıcı modül yüzeyine içerisindeki filmler vasıtasıyla eşit dağılım gerçekleştirirken aynı zamanda gelen ışığın emilip ortama yayılmasını engelleme görevindedir. Vida delikleri ile stabil bir montaj imkânı sunmaktadır.



Şekil 3.17. AS7265x algılayıcı tümdevresinin ortalama görüş alanı [104]



Şekil 3.18. Üçlü spektral algılayıcı modülünün dış kılıfı

3.2.2. Fotoreseptör Temelli Sensör Sisteminin Otonom Yazılımı

Çok katmanlı algılayıcı algoritması çok katmanlı yapısı sayesinde veriler ve istenilen çıktılar arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenebilen yapay sinir ağı türü bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Özellikle sınıflandırma ve regresyon analizlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Üç ana katmandan meydana gelmektedir. Bunlar giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanıdır. Bu algoritmada ilk olarak giriş katmanındaki veriler alınmakta ve bu veriler gizli katmanlar aracılığıyla işlenmektedir. Her bir katmandaki nöronlar, kendilerine gelen girişleri belirli ağırlıklarla çarpmakta ve bunları toplamaktadır. Elde edilen bu toplam bir aktivasyon fonksiyonuna uygulanmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu, oluşturulan modelin doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilmesini sağlamaktadır. En yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyonları arasında sigmoid, ReLU (Rectified Linear Unit – Doğrultulmuş Doğrusal Ünite) ve

tanjant hiperbol bulunmaktadır. Modelin öğrenme süreci, hata geri yayılımı adı verilen bir yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte, modelin yaptığı tahmin ile gerçek değer arasındaki hata miktarı, modelin ağırlıklarını güncelleyerek en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Bu işlem, genellikle kademeli azalma algoritması ile yapılmaktadır. Model, eğitim verilerinden öğrenirken ağırlıklarını güncelleyerek hatayı azaltmakta ve daha doğru tahminler yapmayı hedeflemektedir.

Numunelerin, 22 farklı LED ışının küvet içerisinden geçtikten sonra 18 farklı dar bantlı fotodiyot ile ölçülmesi ile 396 ışık verisi elde edilmiştir. Bu veriler USB/RS232 dönüştürücü vasıtasıyla bilgisayara aktarılarak tablolara kaydedilmektedir. Kaydedilen verilere ön inceleme ve etiketleme işlemleri uygulanmaktadır. Veriler hatalı ölçümlerin gerçekleşmemesi için 10 kez tekrarlı ölçülmektedir. Elde edilen veriler başlık ile etiketlenerek bütün verilerin tutulduğu tabloya eklenmektedir. Bunlar konsantrasyonlu ağır metal, mikroplastik, birleştirilmiş veriler ve bunların konsantrasyondan bağımsız halidir. Konsantrasyon bağımlı sınıflandırmada temel amaç kirlilik seviyesine bağlı olarak sınıflandırma yapabiliyor olup-olmadığını gözlemektir. Böylece bir kirlilik ölçüm cihazı olarak işlevselliğini gözlemlemektir. Konsantrasyondan bağımsız durumda ise bu kirlilikleri tespit edebilme doğruluğunu tespit edebilmektir. Konsantrasyondan bağımsız sınıfların eğitiminde farklı konsantrasyonlarda numuneler eğitiminde ve testinde kullanılmıştır. İki farklı değerlendirmenin temel amacı ise sistemin kabiliyet sınırlarını belirlemektir.

Elde edilen veriler içerisinde sınıflandırmada olumsuzluklara neren olabilecek veriler bulunabilmektedir. Bunun nedeni sistemin spektral aralığının numuneye göre özelleştirilmemiş olmasıdır. Bu nedenle veriler üzerinde özellik seçilim algoritmaları da kullanılmıştır. Özellik seçilim algoritması olarak “InfoGain” algoritmasının “Ranker” metodu kullanılmıştır. En iyi 10 özellik ve en iyi 20 özellik için sınıflandırma sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

Veriler çok katmanlı algılayıcı algoritması ile değerlendirilmiştir. Bu algoritma çok katmanlı bir Yapay Sinir Ağı algoritmasıdır. Bu görüntü olmayan verilerin değerlendirilmesinde bir makine öğrenmesi algoritması olarak kullanılmaktadır. Gizli katmanlarının olması ve çoklu sayıda nöron içermesi sebebiyle derin öğrenme algoritmaları içerisinde değerlendirilmektedir. MLP algoritması ile veriler işlenirken iki

farklı test metodu birlikte kullanılmıştır. Bunlar 10-Katlı Çapraz Doğrulama (10-Fold Cross Validation) ve verilerin eğitim ve test verisi olarak ayrılarak işleme alınmasıdır.

10 katlı çapraz doğrulama, oluşturulan makine öğrenmesi modelinin performansını değerlendirmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Modelin eğitiminde ve testinde kullanılacak olan veriler 10 eşit parçaya bölünmektedir. Her tekrarda (iterasyonda) 9 kat modelin eğitimi için kullanılırken, 1 kat modelin doğrulaması, yani testi için ayrılmaktadır. Bu işlem 10 kez tekrarlanmakta ve her seferinde farklı bir kat doğrulama için kullanılmaktadır. Bu metotta 10 kat kullanmak zorunlu olmasa dahi yaygın olarak 10 katın tercih edilmesi metodun 10 sayısıyla anılmasına neden olmuştur. 10 katlı çapraz doğrulama, genellikle dengeyi sağlamak amacıyla tercih edilmektedir. Daha az kat (örneğin, 5 fold) kullanıldığında modelin performansında daha fazla değişkenlik görülebilmekte, daha fazla kat kullanıldığında ise işlem süresi önemli ölçüde artmaktadır. 10 fold, bu iki durum arasında iyi bir denge sunmakta ve geniş veri setlerinde yeterli eğitim verisi bırakırken, küçük veri setlerinde her örneğin hem eğitim hem de test aşamalarında kullanılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, performans ve işlem maliyeti açısından yaygın bir standart olarak kabul edilmektedir.

Kullanılan bir diğer doğrulama yöntemi de verilerin test ve eğitim verisi olarak ayrılmasıdır. Böylece sınıflandırma başarısı iki farklı metotla değerlendirilerek sistem başarısı doğrulanmıştır. Test verisi bütün veriler içerisinde rastgele olarak %33,33 verinin ayrılması ve bu verileri sistemin eğitimde kullanmaması ile sağlanmıştır. Bu verinin seçimi rastgele fonksiyonu kullanılarak bilgisayar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Ağın eğitilmesi ve verilerin analiz edilmesi için WEKA yazılımı kullanılmıştır [105]. Çok katmanlı algılayıcı (MLP) algoritmasının eğitilmesi için kullanılan parametreler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Çok katmanlı algılayıcı algoritmasının kullanılan parametreleri

Parametre	**Değeri**
Gizli Katman	Otomatik
Öğrenme Oranı	0,3
Momentum	0,2
Epok Sayısı	500
Ondalık Basamağı Sayısı	2
Doğrulama Eşiği	20

4. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN BULGULAR

Tez kapsamında gerçekleştirilen görüntü temelli sensör ve fotoreseptör temelli sensör sistemlerinin numuneleri ölçmesi ile veriler elde edilmiştir. Her iki sistemten elde edilen bu veriler otonom olarak sınıflandırma gerçekleştirebilen yazılımlar tarafından değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların detayları takip eden bölümlerde verilecektir.

4.1. Görüntü Temelli Sensör Sisteminin Deneysel Çalışmaları

Görüntü temelli sensörler bir kamera vasıtası ile aldığı görüntüyü görüntü işleme veya yapay zeka yardımı ile değerlendiren sistemlerdir. Değerlendirme sonucunda elde edilen ölçümleri veya tespiti web servisleri, USB veya genel amaçlı giriş çıkış (GPIO) üzerinden kullanıcılara bildirebilir. Bu bölümde görüntü temelli sensör sistemi üzerinde durulmuş olup mikroplastiklerin ağırlıklı olarak Mie saçılmasının meydana getirdiği girişim desenlerinin incelenmesi ve YOLO algoritması ile sınıflandırması sağlanmıştır.

Önceki bölümlerde anlatılan görüntü temelli sensör sisteminin numune hazırlık süreçleri ve ölçüm sonuçları ilerleyen alt bölümlerde verilecektir.

4.1.1. Numunelerin Hazırlanması

Görüntü temelli sensör sisteminde mikroplastikler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Mikroplastik olarak 8µm çapında melamin, 8µm çapında polistiren ve 10µm çapında polistiren kullanılmıştır. Her mikroplastik 1µl ile 10µl arasında değişen konsantrasyonlarda toplam 2,5ml olacak şekilde deiyonize su ile hazırlanmıştır. Hazırlanması sırasında hatayı azaltabilmek, küvet etkilerini azaltabilmek için her konsantrasyondan 3’er adet hazırlanmıştır. Böylece 90 adet numune elde edilmiştir. Numunelerin konsantrasyonları mikropipet vasıtası ile ayarlanmıştır.

Numunelerde kullanılan mikroplastikler Sigma Aldrich üzerinden elde edilmiş olup, %10 katı içeriği bulunan 10µm çapında küresel polistiren, %10 katı içeriği bulunan 8µm çapında küresel melamin ve %2 katı içeriği bulunan 8µm çapında küresel polistirendir. Bu sayede hem farklı boyuttaki maddeler hem de farklı malzeme türlerindeki karakteristikler incelenmiştir. Miktara bağlı karakteristik değişimlerinin derin öğrenme algoritması ile mikroplastik sınıflandırmasında olumsuz etkilere neden olmaması için farklı konsantrasyonlar derin öğrenme algoritmasına öğretilmiştir. Kullanılan mikroplastik kürelerinin teknik bilgisi Tablo 4.1'de verilmiştir.

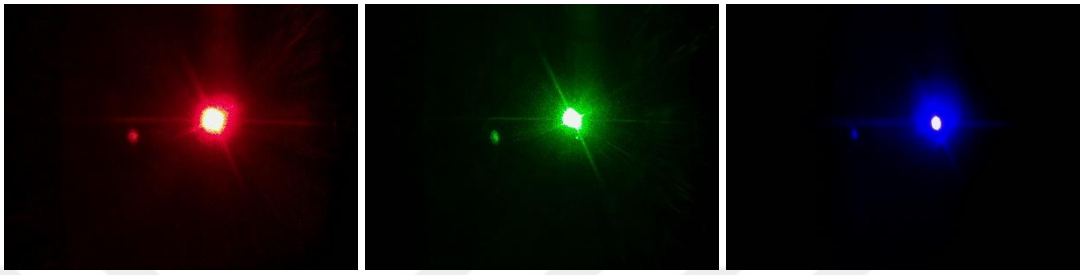
Tablo 4.1. Kullanılan mikroplastiklerin teknik verileri

Özellik	1. Mikroplastik	2. Mikroplastik	3. Mikroplastik
Ürün Adı	Polistiren esaslı mikropartiküller	Melamin reçinesi esaslı mikropartiküller	Polistiren esaslı mikropartiküller
Ürün Numarası	72986	95523	84192
Parti Numarası	BCCD5885	BCBT9598	BCCB9237
Nominal Parçacık Çapı	10,0 µm	8,0 µm	8,0 µm
Kalibreli Çap	9,93 µm	8,06 µm	7,989 µm
Standart Sapma	0,11 µm	0,10 µm	0,097 µm
Varyasyon Katsayısı (CV)	%1,1	%1,3	%1,2
Yoğunluk (D20/4)	1,05 g/cm³	1,51 g/cm³	1,05 g/cm³
Katı Madde İçeriği	%10 (ağırlıkça)	%10 (ağırlıkça)	%2 (ağırlıkça)
Parçacık Kompozisyonu	Polistiren	Melamin reçinesi	Polistiren
Parçacık Konsantrasyonu	Belirtilmemiştir	Belirtilmemiştir	$7{,}1\times10^{7}$ partikül/mL
Ölçüm Tekniği	Coulter Multisizer III	Coulter Multisizer II	Coulter Multisizer
Sertifika Tarihi	24 Ağustos 2020	15 Mart 2017	26 Eylül 2019

Uygulaması gerçekleştirilen sensör sistemi mikroplastiklerin farklı dalgaboyunda $1cm^2$ kesit içerisindeki saçılım ve girişim desenlerini elde eden ve derin öğrenme algoritması vasıtasıyla madde tipini tespit eden bir sistemdir.

4.1.2. Ölçüm ve Değerlendirmeler

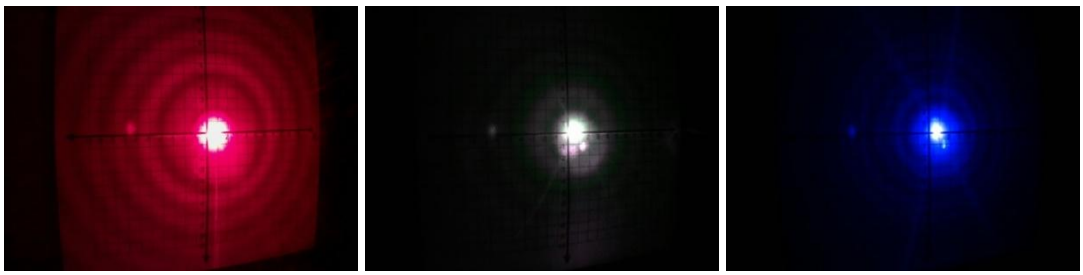
Lazer ışınına su içerisindeki partiküllerin verdiği cevabın analiz edilebilmesi için öncelikle lazer ışınları deiyonize su dolu spektrofotometre küvetine gönderilmiş ve Şekil 4.1'deki görüntü elde edilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 4.1. Deiyonize suyun lazer ışını karakteristiği (a) Kırmızı lazer için, (b) Yeşil lazer için, (c) Mor lazer için

Sonrasında, 999µl suya 1µl miktarında, 10µm çapında, kütlece %10'luk polistiren eklenmiştir. Bu durum lazer karakteristiğini değiştirmiş ve Şekil 4.2'deki halkalı görüntüler elde edilmiştir. Bu halkalar çoğunlukla Mie saçılımının baskın bir etkisi olsa da kırınım, kırılma, saçılım, absorbans optik olaylarından etkilenen bir durum olup, çok dereceli saçılım neticesinde oluşan bir girişim desenidir. Deiyonize suya 1µl partikül katıldığında sıvıda neredeyse herhangi bir değişiklik gözle görülemezken, lazer ışını vasıtasıyla ışığın saçılıma uğradığı görülmektedir.



(a) (b) (c)

Şekil 4.2. 1ml içerisinde 1µl, 10µm çapında PS olması sonucu lazer ışını karakteristiği (a) Kırmızı lazer için, (b) Yeşil lazer için), (c) Mor lazer için

Kamera ile herhangi bir ayar yapılmadan bu görüntülerin elde edilmesi genellikle kamera ayarlarının otomatik olması sebebiyle düzgün olarak elde edilememektedir.

Bunun en büyük sebebi kameralarda bulunan otomatik beyaz dengesi (Automatic White Balance) parametresi ile ilgilidir. Otomatik beyaz dengesi, görüntü içerisindeki piksellerin karanlıkta olması ya da aydınlıkta olmasına göre foto reseptör hücrelerinin kazanç miktarını değiştiren önemli bir parametredir. Böylece karanlık ortamda reseptörler yüksek kazanç ile daha iyi algılama sağlarken, aydınlık ortamda kazancı azaltarak reseptörlerin saturasyona ulaşma miktarını düşürmektedir. Kamera önünde kullanılacak bir ışık filtresi olsa dahi, otomatik beyaz dengesi sistemi kazanç miktarını artırarak dengelemektedir. Bu yapı, ışık miktarının doğru ölçümüne engel teşkil etmektedir. Otomatik beyaz dengesinin ölçümleri etkilemesindeki en büyük etken ise halka oluşumlarının görüntüde daha fazla pikselin lazer ışınına maruz kalmasına neden olmasıdır. Daha fazla piksel ışık algılandığında ise otomatik olarak kazanç düşürülmektedir.

Otomatik beyaz dengesi, kazancın sabit olarak ayarlamadan devre dışı bırakılması durumda lazer ışının sadece perdeye değdiği noktada yeşil renkte görünmesine, onun haricindeki saçılımı oluşturan piksellerin tam karanlık olmasına sebep olmaktadır. OV5647 resim algılayıcısının 2 adet kazanç parametresi bulunmaktadır. Bunlar kırmızı ve mavi kazançları olup, yeşil renk referans olarak alınmaktadır. Bunun sebebi insan gözünün yeşile daha duyarlı olmasıdır. Bu iki kazanç sabit olarak verildiğinde ışık yoğunluğu değiştiğinde görüntünün karartılması ya da aydınlatılması işlemleri otomatik olarak gerçekleştirilmez.

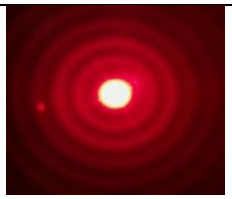
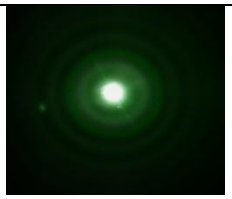
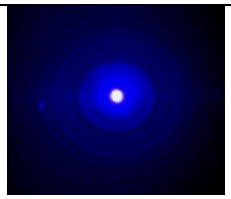
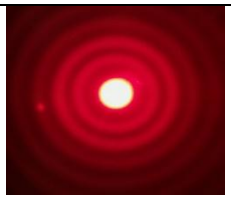
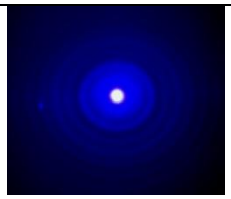
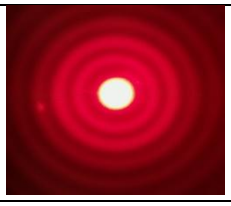
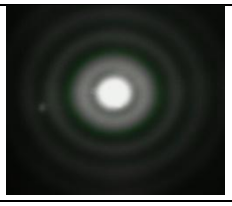
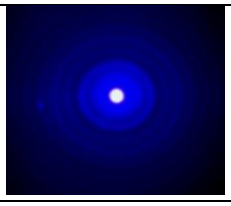
Görüntüleri etkileyene diğer parametreler ise pozlama süresi (exposure time), ışık hassasiyeti (iso) ve efektlerdir (aydınlık-brightness, karşıtlık-contrast, doyum-saturation) parametreleridir. Görüntüler elde edilirken otomatik olarak ayarlanabilecek tüm parametreler sabit parametre olarak ayarlanmıştır. Bu parametrelerin seçimi görüntüdeki halkaları en iyi şekilde karanlıkta görüntüleyecek şekilde seçilmiştir.

Bu problemin çözümünde uygulanması planlanan yöntem ise sınır değer (threshold) belirleyerek, sınır üzerinde kalan piksellerin ışık değerlerini lazer geri beslemesinden alınan parlaklık değerine göre görüntüyü yeniden oluşturmaktır. Sınır değer kullanılması gürültünün güçlendirilmesini önlemektedir. Bu yöntem temelde, lazer geri besleme ölçümünden elde edilen parlaklık verisinin, belirli bir sabit değerle çarpıldıktan sonra bütün piksellere, başlangıçta sahip olduğu parlaklık değeri ile orantılı olarak

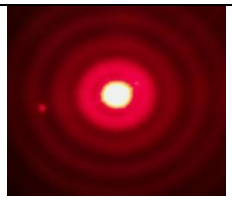
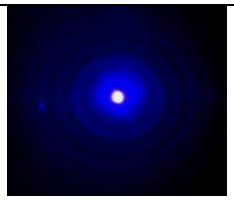
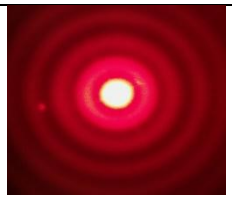
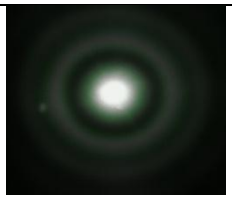
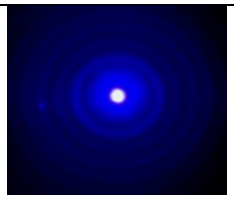
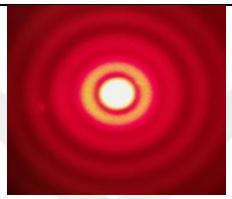
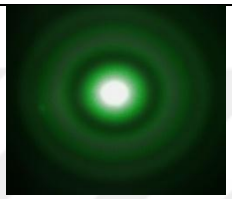
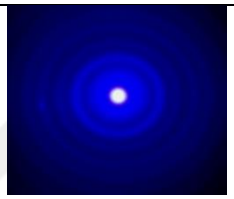
dağıtılmasıdır. Sabit değerle çarpılmasındaki amaç bütün piksellere dağılım yapıldığında parlaklığın görüntü açısından yeterli ölçüde kalmasıdır. Böylece otomatik beyaz dengeleyicinin etkisinin azaltılması düşünülmüştür.

Tablo 4.2'de 10 µm polistiren malzemeden, Tablo 4.3'te melamin 8µm malzemeden, Tablo 4.4'te 8 µm malzemeden elde edilen düşük orta ve yüksek konsantrasyon görüntüleri verilmiştir. Buna göre konsantrasyon arttıkça dış halkalarda gözle görülür belirginleşmeler ve görüntü genelinde ışının yayılması gerçekleşmektedir. Görüntüler alınırken tüm otomatik kamera ayarları sabit ayarlara ayarlanmıştır. Özellikle kamera ayarlarında ön tanımlı olarak açık olan otomatik beyaz dengesi (AWB) anlamlı verilerin kaybolmasına neden olmaktadır. Hata oranını düşürebilmek için 20 görüntü alınıp bu görüntülerin matrislerinin aritmetik ortalaması alınarak görüntüler yeniden oluşturulmuştur. Lens hatası olan fıçı distorsiyonu, perspektif ve ölçek düzenlemeleri opencv geometrik dönüşüm kütüphaneleri ile yeniden oluşturulmuştur. Böylece görüntüler daha kontrollü şekilde incelenebilmiştir.

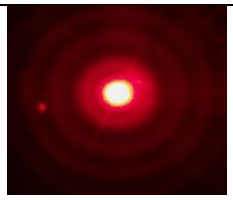
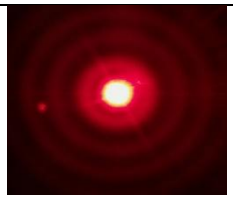
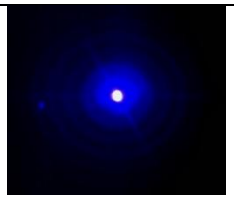
Tablo 4.2. 10µm çaplı polistirenin konsantrasyonuna göre halka değişimi

	Kırmızı	Yeşil	Mor (Violet)
1µl			
5µl			
10µl			

Tablo 4.3. 8 µm çaplı melaminin konsantrasyonuna göre halka değişimi

	Kırmızı	Yeşil	Mor (Violet)
1µl			
5µl			
10µl			

Tablo 4.4. 8 µm çaplı polistirenin konsantrasyonuna göre halka değişimi

	Kırmızı	Yeşil	Mor (Violet)
1µl			
5µl			
10µl			

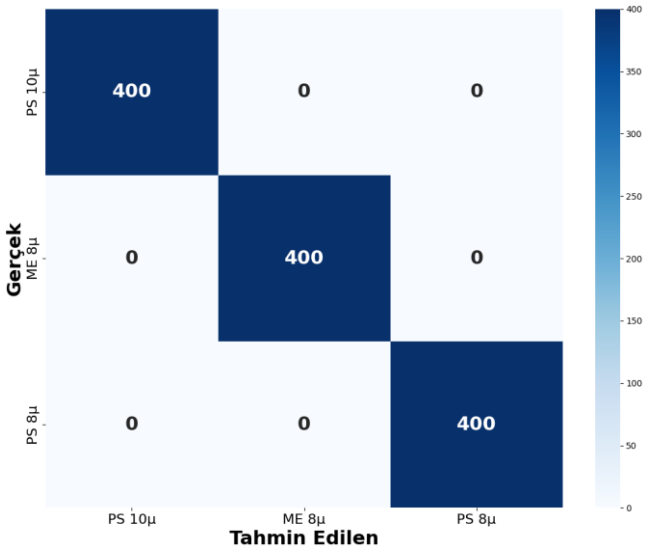
Önişleme adımlarının ardından, önerilen cihazdan elde edilen sonuçlar etiketlenmiş ve bu sayede derin öğrenme ağı için eğitim verisi hazır hale getirilmiştir. Sınıflandırma deneylerinde YOLO v11, ResNet 18 ve ResNet 50 algoritmaları kullanılmış; elde edilen sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır.

Sistem; 10 µm polistiren, 8 µm melamin ve 8 µm polistiren parçacıkları kullanılarak test edilmiştir. Her bir gruba ait örnekler, deiyonize su içerisinde hazırlanmış ve her birine 1–10 µl aralığında mikroplastik ilavesi yapılmıştır. Her grup için 30 örnek hazırlanmış ve bu sayede toplam örnek hacmi 2.5 ml olacak şekilde ayarlanmıştır. Küçük hacimlerle çalışılırken mikropipet kullanımına bağlı oluşabilecek hataları en aza indirmek amacıyla toplamda 90 örnekten görüntü alınmıştır.

Her bir örnek için, üç farklı lazer ışını kullanılarak 20'şer görüntü alınmıştır. Buna ek olarak, tüm lazer ışınları aynı anda aktif olacak şekilde de 20 görüntü elde edilmiştir. Böylece, her bir spektrometre küveti için toplam 80 görüntü elde edilmiş; her bir örnek setinden 800 görüntü olmak üzere aynı gruba ait örneklerden toplam 2400 görüntü üretilmiştir. Üç farklı mikroplastik türüne ait örneklerin tamamı dikkate alındığında, toplamda 7200 görüntü verisi işlenmiştir.

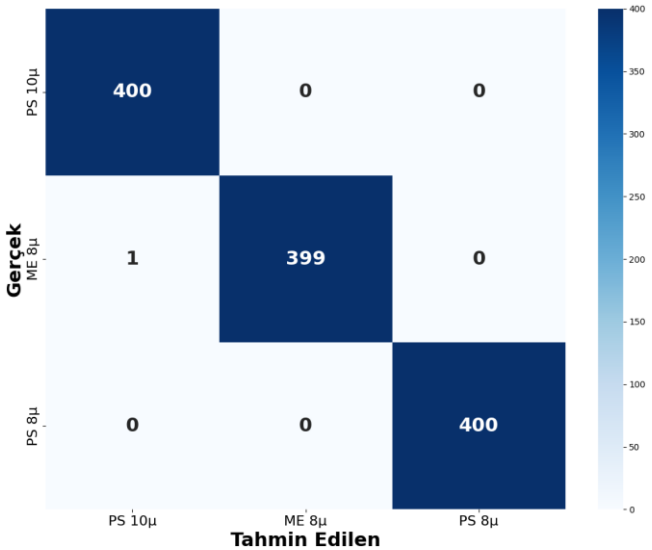
Eğitim süreci için 4800 görüntü, doğrulama süreci için 1200 görüntü ve test süreci için 1200 görüntü ayrılmıştır. Üç sınıflı bir tespit yapılması gerektiğinden bu durum çok sınıflı bir sınıflandırma problemi teşkil etmekte olup, kayıp fonksiyonu olarak kategorik çapraz entropi (categorical cross-entropy) tercih edilmiştir. YOLO v11 ağı için eğitim sırasında kullanılan varsayılan hiperparametreler; 0,937 momentum değeri, 0,0005 ağırlık zayıflama katsayısı (weight decay) ve 0,01 öğrenme oranı (learning rate) olarak belirlenmiştir. Gerçek değerlerle tahmin edilen değerler arasındaki farkın azaltılmasını amaçlayan geri yayılım (backpropagation) işlemi için kullanılan optimizasyon algoritması, Momentumlu Stokastik Gradyan İnişi (Stochastic Gradient Descent with Momentum, SGDM) olarak seçilmiştir. YOLO v11 algoritmasının eğitimi 100 epok boyunca sürdürülmüştür.

YOLO v11 için oluşturulan modellerin test süreci sonucunda elde edilen genel karışıklık matrisi (confusion matrix) Şekil 4.3'te sunulmuştur. Bu matris içerisinde Sınıf 1, 10 µm çapındaki polistiren küreleri; Sınıf 2, 8 µm çapındaki melamin küreleri; Sınıf 3 ise tekrar 10 µm çapındaki polistiren küreleri temsil etmektedir. İlgili karışıklık matrisine göre, YOLO v11 ağı, deiyonize su içerisinde kontrollü şekilde hazırlanmış mikroplastiklerin tamamını başarılı bir şekilde sınıflandırmıştır.

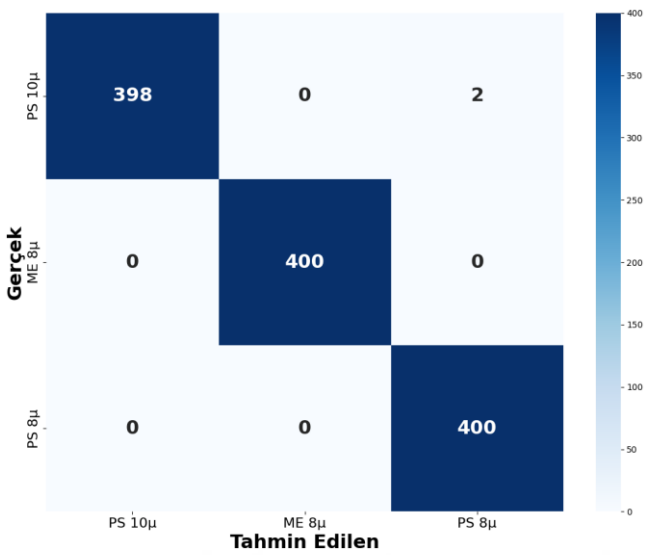


Şekil 4.3. YOLO V11 kullanılarak deiyonize su içerisinde mikroplastik sınıflandırmasının karışıklık matrisi

Aynı zamanda, ResNet 18 ve ResNet 50 algoritmaları üzerinde de test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. ResNet 18 sınıflandırmasına ilişkin karışıklık matrisi Şekil 4.4'te, ResNet 50'ye ilişkin karışıklık matrisi ise Şekil 4.5'da sunulmuştur. Bu sınıflandırmalarda sınıf numaraları ve karşılık gelen mikroplastik türleri değişmeden korunmuştur.



Şekil 4.4. ResNet 18 kullanılarak deiyonize su içerisinde mikroplastik sınıflandırmasının karışıklık matrisi



Şekil 4.5. ResNet 50 kullanılarak deiyonize su içerisinde mikroplastik sınıflandırmasının karışıklık matrisi

Toplam doğruluk oranı (overall accuracy) tüm değerleri aynı ağırlıkta değerlendirmesi nedeniyle yerine, daha tutarlı ve dengeli bir metrik olan F1 skoru tercih edilmiştir. F1 skoru, hassasiyet (precision) ve duyarlılık (recall) değerlerinin harmonik ortalamasını temsil etmekte olup, bazı derin öğrenme çalışmalarında doğruluk değerine kıyasla daha anlamlı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir [106]. Derin öğrenme algoritmalarının deiyonize su içerisindeki mikroplastikleri görüntü temelli sensör sistemi ile sınıflandırılma sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Derin öğrenme algoritmalarının karşılaştırmalı sonuçları

Model / Metrik	**Doğruluk**	**Hassasiyet**	**Hatırlama**	**F1 Skor**
YOLO v11	%100	%100	%100	%100
ResNet 18	%100	%100	%100	%100
ResNet 50	%100	%99	%100	%100

Gözlemlendiği üzere, deiyonize su içerisinde askıda bulunan parçacıklar üzerinde uygulanan üç farklı derin öğrenme yönteminin tamamında tespit oranları oldukça yüksek bulunmuştur. Yalnızca deiyonize su içerisinde hazırlanmış mikroplastik veri kümeleri ile eğitilen YOLO v11 modeli; Akdeniz'in Antalya kıyılarından alınan deniz suyu, şişelenmiş içme suyu, maden suyu, Kayseri ili sınırlarında asfalt yüzeylerde birikmiş yağmur suyu birikintileri ile toprak yüzeylerden toplanan su örnekleri olmak

üzere farklı kaynaklardan elde edilen örnekler üzerinde test edilmiştir. Test süreci kapsamında, bu örneklere mikroplastikler kontrollü olarak ilave edilmiştir. Böylece sistemin farklı çevresel koşullar altındaki tespit yeteneği değerlendirilmiştir. Deniz suyu ile asfalt ve toprak yüzeylerden toplanan su örneklerinin bulanıklık düzeyi ve büyük partiküller içermesi nedeniyle, test öncesinde tüm örnekler 22 µm gözenek çapına sahip membran filtrelerden geçirilmiştir.

Testlerde kullanılan mikroplastikler; 8 µm çapında polistiren (PS) küreler, 8 µm melamin küreler ve 10 µm PS kürelerden oluşmakta olup, her bir su örneğine her bir mikroplastik türünden 1 µl olacak şekilde, toplamda 2,5 ml hacmindeki örneklere ilave edilmiştir. Eğitilen derin öğrenme ağının yalnızca deiyonize su ortamında elde edilmiş mikroplastik görüntüleriyle eğitildiği ve farklı su ortamlarını temsil eden verilerle eğitilmediği vurgulanmalıdır. Bu yaklaşımın amacı, modelin farklı çevresel koşullarda gösterdiği davranışsal performansın ortaya konmasıdır. Bu örneklere ilişkin doğruluk oranları ve F1 skorları Tablo 4.6'da sunulmaktadır.

Tablo 4.6. YOLO v11'in farklı su ortamlarında mikroplastik tespit başarısı

Numuneler	**10µm PS**	**8µm Melamin**	**8µm PS**	**F1 Skoru**
Asfalt Su Birikintisi	%100	%88,75	%98,75	%95,83
Toprak Su Birikintisi	%91,25	%2,5	%100	%64,58
Deniz Suyu	%100	%100	%100	%100
Mineralli Su	%100	%7,5	%100	%69,17
Şişe Su	%100	%15	%100	%71,67

Çeşitli çevresel su örneklerinde modelin sınırlı başarı göstermesinin temel nedenlerinden biri, derin öğrenme ağının yalnızca deiyonize su ortamında hazırlanmış mikroplastik görüntüleri ile eğitilmiş olmasıdır. Eğitim sırasında karşılaşılmayan çevresel değişkenlikler; özellikle bulanıklık oluşturan askıda katı maddeler, çözünmüş organik bileşikler ve biyolojik partiküller gibi yabancı malzemeler, optik geçişkenliği doğrudan etkilemektedir. Bu tür maddeler, ışığın saçılmasına ve absorpsiyonuna neden olarak görüntü kalitesini azaltmakta ve mikroskobik nesnelerin kenar keskinliğini bulanıklaştırmaktadır. Bu durum, özellikle YOLO benzeri nesne tespiti algoritmalarının konumsal ve biçimsel ipuçlarını kullanma kabiliyetini sınırlamaktadır. Ayrıca, bu tür bulanık ortamlarda sinyal-gürültü oranının düşmesi hem düşük kontrast hem de yansıma/parlama etkilerinin artmasıyla sonuçlanmakta, bu da modelin genel doğruluk

ve F1 skoru üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Sonuç olarak, ağın yalnızca homojen ve optik olarak temiz bir ortamda eğitilmiş olması, gerçek dünya örneklerine genellenebilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, farklı çevresel koşulları temsil eden daha çeşitli ve heterojen veri kümeleriyle modelin yeniden eğitilmesi durumunda başarı artacaktır.

4.2. Fotoreseptör Temelli Sensörün Sisteminin Deneysel Çalışmaları

Fotoreseptör temelli sensör sisteminde hem ağır metaller hem de mikroplastikler üzerinde deneyler yapılmıştır. Konsantrasyon ölçebilme ve sınıflandırabilme kabiliyeti değerlendirilmiştir.

Sensör 365nm-880nm ve 920nm-980nm aralığında ışık kaynaklarına sahiptir. 360nm-1000nm aralığında ölçümler alabilen 16-bit analog dijital dönüştürücüsü olan 18 adet dar bantlı fotodiyot tipi algılayıcıyla transmitans ölçümleri yapmaktadır. Ölçüm süresi ortalama olarak 60 saniyedir. Değerlendirme süresi hazır modellerde yaklaşık 300 milisaniyedir. Süreler numunenin şeffaflığına ve bilgisayarın performansına ve ağın büyüklüğüne bağlı olarak değişebilmektedir.

İlerleyen alt başlıklarda numunelerin hazırlanması ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi verilecektir.

4.2.1. Numunelerin Hazırlanması

Görüntü temelli sensör sistemi için hazırlanan mikroplastik numunelerine ek olarak ağır metal numuneleri hazırlanmıştır. Ağır metal olarak arsenik, kadmiyum, krom, bakır, cıva, nikel, kurşun ve çinko metallerinin deiyonize suda çözünmüş halleri kullanılmıştır. Numuneler Agilent marka, 5110 model ICP-OES cihazı ile ölçülerek hazırlanmış olup her ağır metalden 25ppm, 50ppm ve 100ppm konsantrasyonlarda olacak şekilde hazırlanmıştır. Ağır metal olarak arsenik, kadmiyum, krom, bakır, cıva, nikel, kurşun ve çinko metallerinin suda çözünmüş halleri kullanılmıştır. Ağır metal numuneleri de her konsantrasyondan 3’er adet olacak şekilde, toplamda 72 adet numune hazırlanmıştır. Bütün numuneler 10’ar kez, farklı zaman dilimlerinde ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm verileri 1620 ölçüm satırından, 396 özellik sütunundan oluşmaktadır.

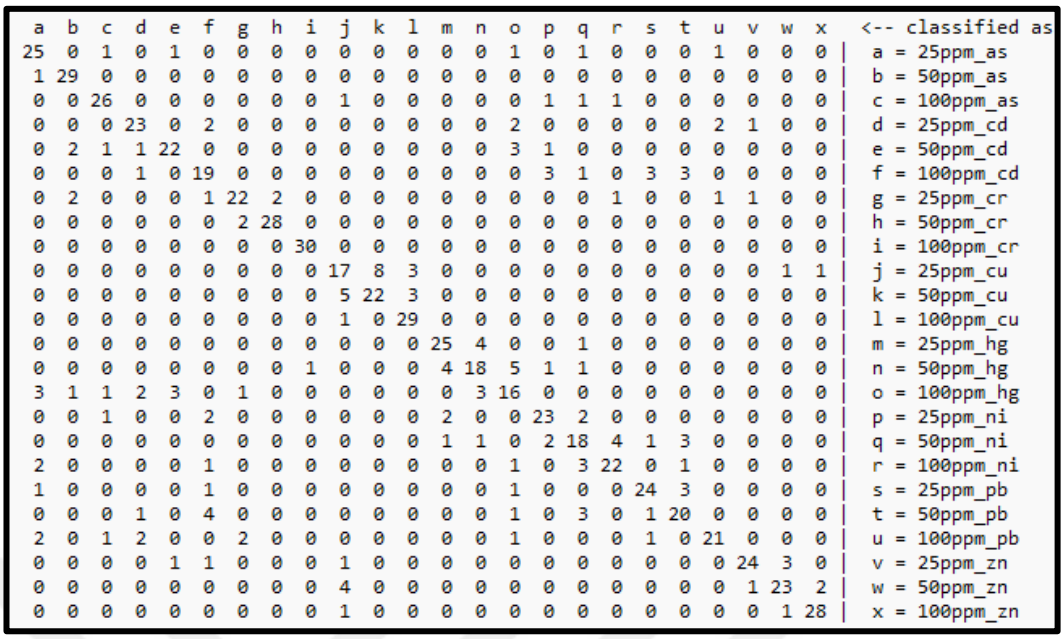
4.2.2. Ölçüm ve Değerlendirmeler

Tablo 4.7'de doğru sınıflandırılmış konsantrasyon tahminli çok katmanlı algılayıcı makine öğrenmesi sonuçları ve sonuçlara ait karışıklık matrisleri verilmiştir. Karışıklık matrisleri, sınıflandırma sonuçlarını gerçek (satırlar-dikey eksen) ve tahmin edilen (sütunlar-yatay eksen) olarak göstermektedir. Karışıklık matrisinde, periyodik tablodaki kısaltmaları ağır metaller için etiket olarak kullanılmıştır. Mikroplastikler için "ps" polistireni, "me" melamini ve "u" harfi mikronu temsil etmektedir. Örneğin, mikroplastik numunelerde "ps_10u_5ul" ifadesi, 2,5 ml'lik bir numunenin 5 mikrolitresinde çapı 10 mikrometre olan küresel polistiren mikroplastiklerinin varlığını göstermektedir. Benzer şekilde, ağır metal numunelerinde "50ppm_cd" ifadesi, milyonda 50 parça (ppm) konsantrasyonda kadmiyum varlığını göstermektedir.

Mikroplastiklerin doğru sınıflandırılma başarısı düşük kalırken ağır metallerin konsantrasyon tahminlerinin daha başarılı olduğu görülmüştür. Bütün sınıfların birlikte değerlendirdiği durumda ise başarının düşük kalmasının sebebi ise mikroplastiklerin daha çok ışığın saçılımı prensibi ile tespiti sağlanırken, ağır metallerin ise ağırlıklı olarak absorbans ile tespit edilebilmesidir.

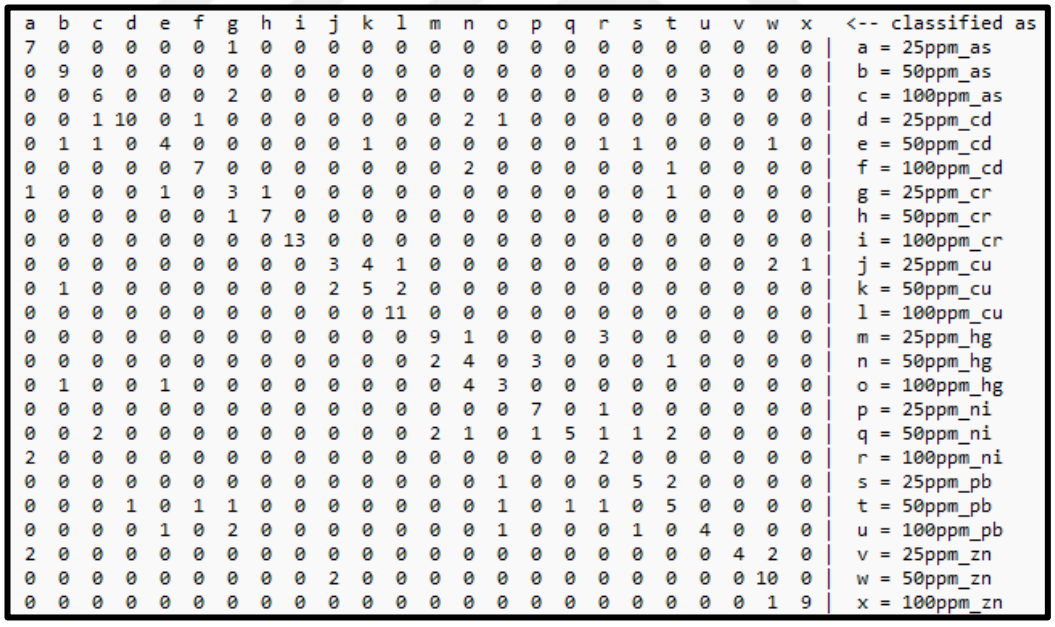
Tablo 4.7. Özellik seçilimi uygulanmamış verilerde konsantrasyon bağımlı doğru sınıflandırma yüzdesi

	Çapraz Doğrulama	**%66 Eğitim, %33 Test**
Ağır Metaller (24 sınıf)	%76,9444 (Şekil 4.6.)	%63,3333 (Şekil 4.7.)
Mikroplastikler (30 Sınıf)	%48,6667 (Şekil 4.8.)	%46,3333 (Şekil 4.9.)
Hepsi (54 Sınıf)	%47,5309 (Şekil 4.10.)	%43,5185 (Şekil 4.11.)



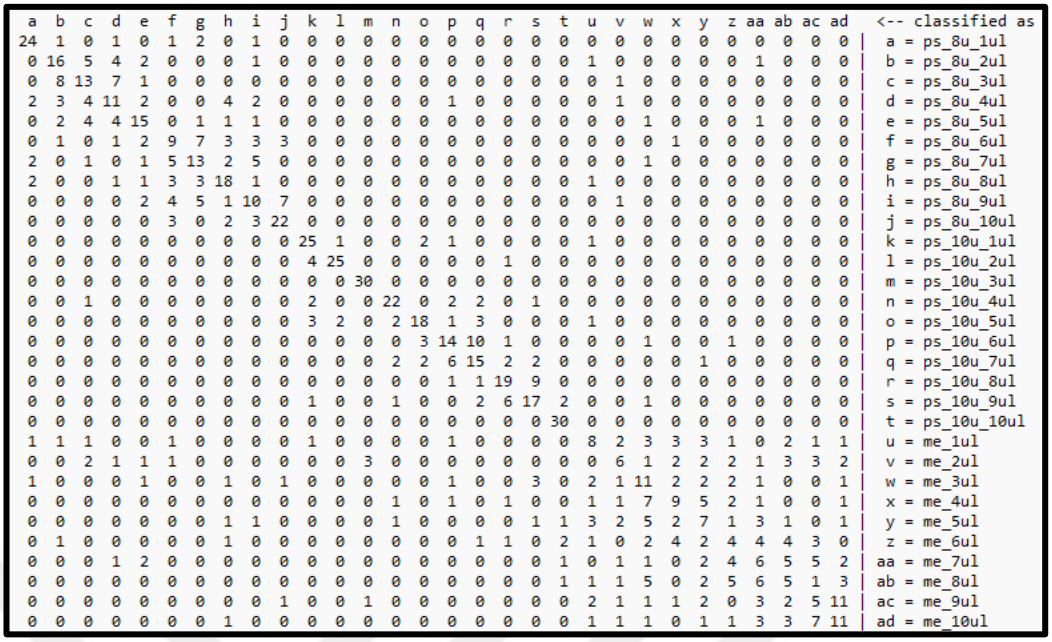
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	<-- classified as
25	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	a = 25ppm_as
1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = 50ppm_as
0	0	26	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	c = 100ppm_as
0	0	0	23	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	d = 25ppm_cd
0	2	1	1	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	e = 50ppm_cd
0	0	0	1	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	3	3	0	0	0	0	f = 100ppm_cd
0	2	0	0	0	1	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	g = 25ppm_cr
0	0	0	0	0	0	2	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 50ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = 100ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	j = 25ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	22	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = 50ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = 100ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	m = 25ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4	18	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	n = 50ppm_hg
3	1	1	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	3	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	o = 100ppm_hg
0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	23	2	0	0	0	0	0	0	0	p = 25ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	18	4	1	3	0	0	0	0	q = 50ppm_ni
2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	22	0	1	0	0	0	0	r = 100ppm_ni
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	24	3	0	0	0	0	s = 25ppm_pb
0	0	0	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	1	20	0	0	0	0	t = 50ppm_pb
2	0	1	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	21	0	0	0	u = 100ppm_pb
0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	3	0	v = 25ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	23	2	w = 50ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	28	x = 100ppm_zn

Şekil 4.6. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



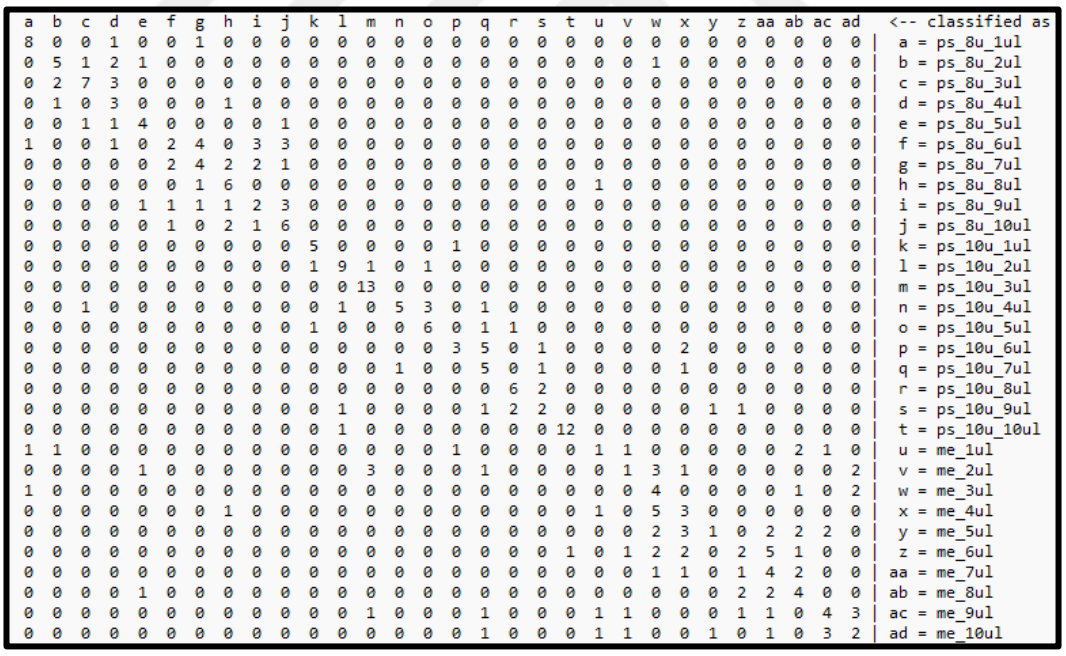
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	<-- classified as
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = 25ppm_as
0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = 50ppm_as
0	0	6	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	c = 100ppm_as
0	0	1	10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d = 25ppm_cd
0	1	1	0	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	e = 50ppm_cd
0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	f = 100ppm_cd
1	0	0	0	1	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	g = 25ppm_cr
0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 50ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = 100ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1		j = 25ppm_cu
0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		k = 50ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		l = 100ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0		m = 25ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	3	0	0	0	1	0	0	0		n = 50ppm_hg
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0		o = 100ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	1	0	0	0	0	0		p = 25ppm_ni
0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	5	1	1	2	0	0	0		q = 50ppm_ni
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0		r = 100ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	2	0	0	0		s = 25ppm_pb
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	5	0	0	0		t = 50ppm_pb
0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	4	0	0		u = 100ppm_pb
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2		v = 25ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10		w = 50ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	x = 100ppm_zn

Şekil 4.7. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



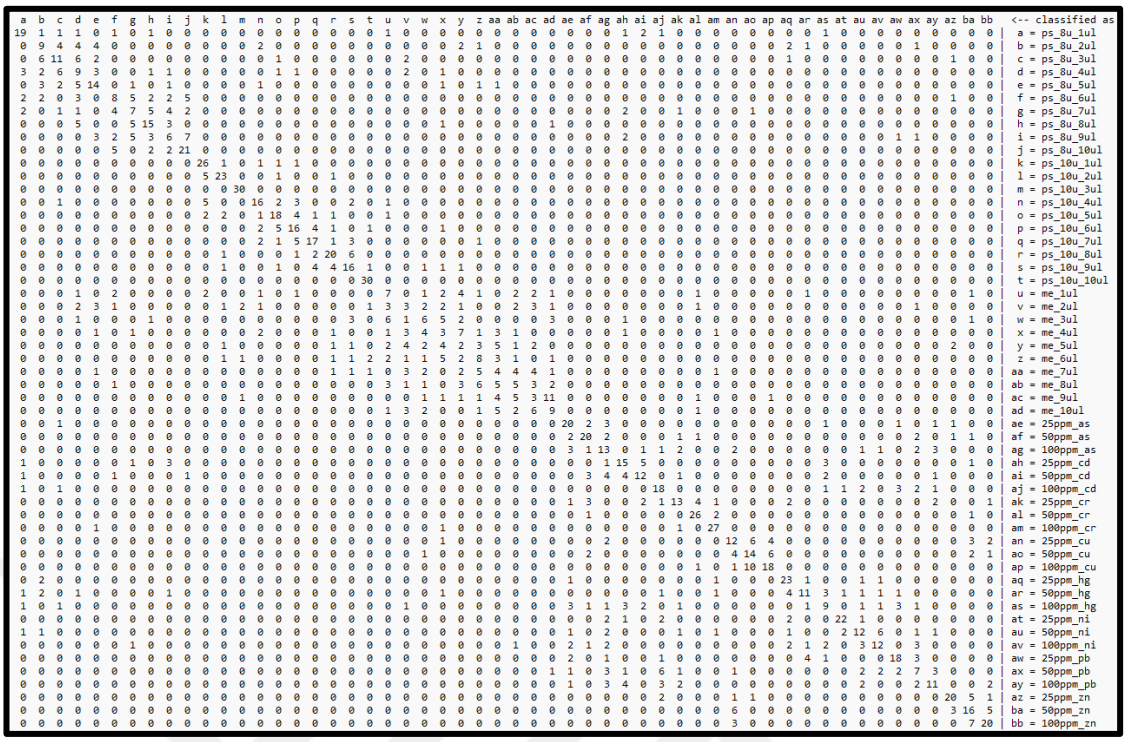
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	<-- classified as
24	1	0	1	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = ps_8u_1ul
0	16	5	4	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	b = ps_8u_2ul
0	8	13	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	c = ps_8u_3ul
2	3	4	11	2	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	d = ps_8u_4ul
0	2	4	4	15	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	e = ps_8u_5ul
0	1	0	1	2	9	7	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	f = ps_8u_6ul
2	0	1	0	1	5	13	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	g = ps_8u_7ul
2	0	0	1	1	3	3	18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = ps_8u_8ul
0	0	0	0	2	4	5	1	10	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = ps_8u_9ul
0	0	0	0	0	3	0	2	3	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = ps_8u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	1	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = ps_10u_1ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	25	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = ps_10u_2ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = ps_10u_3ul
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	22	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	n = ps_10u_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	2	18	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	o = ps_10u_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	14	10	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	p = ps_10u_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	15	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	q = ps_10u_7ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	19	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	r = ps_10u_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	6	17	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	s = ps_10u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	t = ps_10u_10ul
1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	8	2	3	3	3	1	0	2	1	1	u = me_1ul
0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	6	1	2	2	2	1	3	3	2		v = me_2ul
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	2	1	11	2	2	2	1	0	0	1	w = me_3ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	7	9	5	2	1	0	0	x = me_4ul
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	3	2	5	2	7	1	3	1	0	1	y = me_5ul
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	0	2	4	2	4	4	4	3	0	z = me_6ul
0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	2	4	6	5	5	2	aa = me_7ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	5	0	2	5	6	5	1	3	ab = me_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	2	0	3	2	5	11	ac = me_9ul
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	3	3	7	11	ad = me_10ul

Şekil 4.8. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

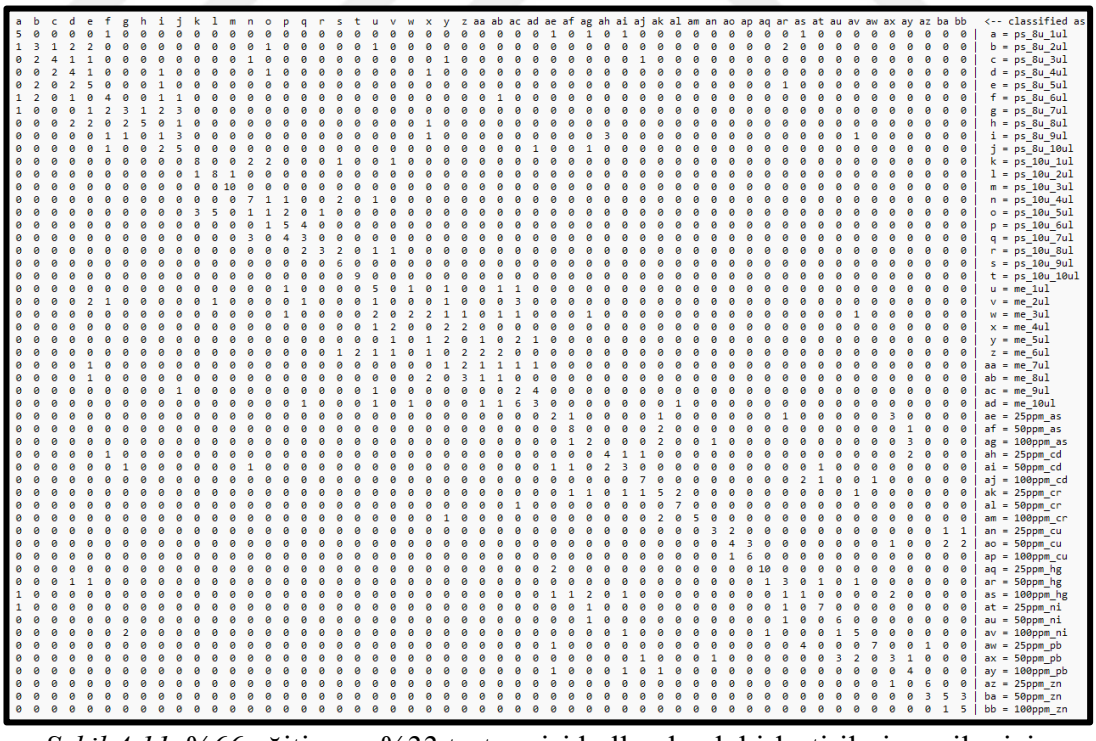


a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	<-- classified as
8	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = ps_8u_1ul
0	5	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	b = ps_8u_2ul
0	2	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c = ps_8u_3ul
0	1	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d = ps_8u_4ul
0	0	1	1	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = ps_8u_5ul
1	0	0	1	0	2	4	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = ps_8u_6ul
0	0	0	0	0	2	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	g = ps_8u_7ul
0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = ps_8u_8ul
0	0	0	0	1	1	1	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = ps_8u_9ul
0	0	0	0	0	1	0	2	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = ps_8u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = ps_10u_1ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = ps_10u_2ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = ps_10u_3ul
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	n = ps_10u_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	o = ps_10u_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	p = ps_10u_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	q = ps_10u_7ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	r = ps_10u_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	s = ps_10u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	t = ps_10u_10ul
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	1	0		u = me_1ul
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	2	v = me_2ul
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	0	2	w = me_3ul
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	3	0	0	0	0	0	0	x = me_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	1	0	2	2	2	0	y = me_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	2	0	2	5	1	0	0	z = me_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	4	2	0	0	aa = me_7ul
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	4	0	0	ab = me_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	4	3		ac = me_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	3	2		ad = me_10ul

Şekil 4.9. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



Şekil 4.10. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



Şekil 4.11. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

Tablo 4.8'de numunelerin konsantrasyonsuz olarak çok katmanlı algılayıcı algoritması ile sınıflandırılma başarısı ve karışıklık matrisleri verilmiştir. Konsantrasyonsuz değerlendirmede mikroplastikler için küvet içerisindeki numunelerin içerisinde melamin, polistiren 8µm ya da polistiren 10µm olması durumları değerlendirilmiştir. Ağır metaller için sıvı numune içerisinde arsenik, kadmiyum, krom, bakır, civa, nikel, kurşun ya da çinko olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Konsantrasyondan bağımsız olarak değerlendirme sonuçları konsantrasyon tahmini yapılmasına göre daha yüksek doğrulukta olduğu görülmüştür. Özellikle mikroplastiklerin daha yüksek doğrulukta sınıflandırıldığı görülmüştür.

Tablo 4.8. Özellik seçilimi uygulanmamış verilerde konsantrasyondan bağımsız doğru sınıflandırma yüzdesi

	Çapraz Doğrulama	**%66 Eğitim, %33 Test**
Ağır Metaller (8 Sınıf)	%86,25 (Şekil 4.12.)	%82,0833 (Şekil 4.13.)
Mikroplastikler (3 Sınıf)	%97 (Şekil 4.14.)	%97 (Şekil 4.15.)
Hepsi (11 Sınıf)	%72,0988 (Şekil 4.16.)	%87,5926 (Şekil 4.17.)

```
 a  b  c  d  e  f  g  h   <-- classified as
82  0  1  0  1  3  3  0 |  a = as
 3 67  1  0  5  2 12  0 |  b = cd
 2  1 87  0  0  0  0  0 |  c = cr
 0  0  0 84  0  0  0  6 |  d = cu
 4  4  1  0 77  3  1  0 |  e = hg
 1  2  0  0  5 77  5  0 |  f = ni
 8 13  0  0  1  5 63  0 |  g = pb
 1  1  0  4  0  0  0 84 |  h = zn
```

Şekil 4.12. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

```
 a  b  c  d  e  f  g  h   <-- classified as
26  1  0  0  0  0  1  0 |  a = as
 4 25  0  0  3  0  3  0 |  b = cd
 1  1 26  0  0  0  0  0 |  c = cr
 0  0  0 29  0  0  0  3 |  d = cu
 0  1  0  0 26  5  0  0 |  e = hg
 1  2  0  0  2 19  3  0 |  f = ni
 0  5  2  0  1  2 18  0 |  g = pb
 0  0  0  2  0  0  0 28 |  h = zn
```

Şekil 4.13. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

```
  a   b   c   <-- classified as
295   0   5 |   a = ps_8u
  0 292   8 |   b = ps_10u
  8   6 286 |   c = me_8u
```

Şekil 4.14. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

```
  a  b  c   <-- classified as
 96  0  0 |  a = ps_8u
  0 96  3 |  b = ps_10u
  4  2 99 |  c = me_8u
```

Şekil 4.15. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

```
  a   b   c   d   e   f   g   h   i   j   k   <-- classified as
255   1  27   0   2   1   0  13   0   0   1 |   a = ps_8u
  0 294   6   0   0   0   0   0   0   0   0 |   b = ps_10u
  9  10 273   0   0   6   0   2   0   0   0 |   c = me_8u
  3   2   3  14   2  13   6  13  15   8  11 |   d = as
 16   0   9   2  16   5   1  14   6  10  11 |   e = cd
  5   1  11   1   0  61   2   1   1   1   6 |   f = cr
  0   0   0   0   0   0  77   0   0   0  13 |   g = cu
 10   0   6   2   2   5   2  52   6   0   5 |   h = hg
  5   1   9   1   1   7   1  18  36   4   7 |   i = ni
  7   0   6   0   4  11   7   6   9  23  17 |   j = pb
  1   0   1   1   0   1  17   0   0   2  67 |   k = zn
```

Şekil 4.16. 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

```
  a   b   c   d   e   f   g   h   i   j   k   <-- classified as
111   0   1   0   0   0   0   1   0   0   0 |   a = ps_8u
  0  99   4   0   0   0   0   0   0   0   0 |   b = ps_10u
  3   5  91   0   0   0   0   0   0   0   0 |   c = me_8u
  0   0   0  20   0   3   0   2   0   3   0 |   d = as
  0   0   1   2  21   0   0   3   1   2   0 |   e = cd
  1   0   0   0   0  25   0   0   0   2   0 |   f = cr
  0   0   0   0   0   0  23   0   0   0   3 |   g = cu
  3   0   0   0   1   1   0  22   3   0   0 |   h = hg
  2   0   0   1   2   0   0   3  20   0   0 |   i = ni
  0   0   0   1   1   1   0   1   7  19   1 |   j = pb
  0   0   0   1   0   0   1   0   0   0  22 |   k = zn
```

Şekil 4.17. %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

Sınıflandırma başarısının yükseltilebilmesi, eğitim maliyetinin düşürülebilmesi ve sistemin daha az ışık kaynağı ve fotodiyot ile gerçekleştirilebilmesi için özellik seçilimi

uygulanmıştır. InfoGain algoritmasının Ranker metodu ile puanlama gerçekleştirilmiş ve en yüksek puanı alan 10 adet özellik sınıflandırma için seçilmiş ve kullanılmıştır. Tablo 4.9'da görüldüğü üzere, özellik seçilimi sonrasında mikroplastikler, ağır metaller ve tümünün birlikte değerlendirildiği durumlar için sınıflandırma başarısı yükselmiştir.

Tablo 4.9. En iyi 10 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyon bağımlı doğru sınıflandırma yüzdesi

	Çapraz Doğrulama	**%66 Eğitim, %33 Test**
Ağır Metaller (24 Sınıf)	%82,0833 (Şekil 4.18.)	%78,75 (Şekil 4.19.)
Mikroplastikler (30 Sınıf)	%56,2222 (Şekil 4.20.)	%48,6667 (Şekil 4.21.)
Hepsi (54 Sınıf)	%54,9383 (Şekil 4.22.)	%45,7407 (Şekil 4.23.)

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	<-- classified as
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	a = 25ppm_as
0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = 50ppm_as
1	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	4	0	0	0	c = 100ppm_as
0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	d = 25ppm_cd
1	2	0	1	25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = 50ppm_cd
0	0	0	0	0	20	2	0	0	2	1	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	1	0	f = 100ppm_cd
2	1	3	0	0	0	20	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	g = 25ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 50ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = 100ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	j = 25ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	k = 50ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = 100ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	23	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = 25ppm_hg
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	25	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	n = 50ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	1	0	0	0	0	0	0	o = 100ppm_hg
0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	25	1	0	0	0	0	0	0	0	p = 25ppm_ni
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	22	0	1	2	0	0	0	0	q = 50ppm_ni
1	0	0	3	2	0	0	0	1	0	0	0	2	1	2	2	1	15	0	0	0	0	0	0	r = 100ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	s = 25ppm_pb
0	2	0	3	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	3	3	4	0	2	9	0	0	1	0	t = 50ppm_pb
0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	24	0	0	1	u = 100ppm_pb
0	3	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	16	2	0	v = 25ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	w = 50ppm_zn
0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	x = 100ppm_zn

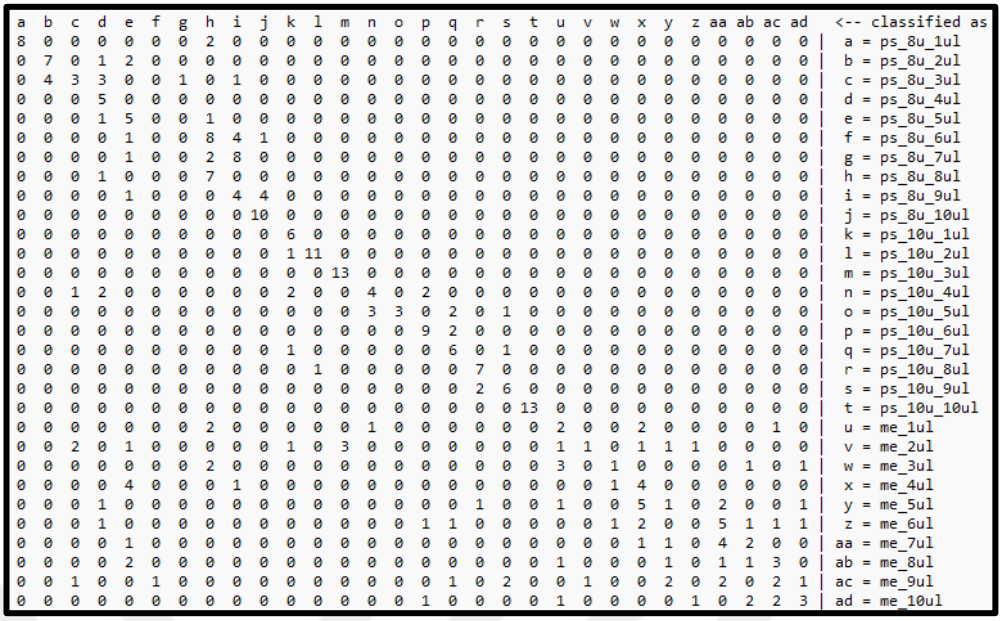
Şekil 4.18. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	<-- classified as
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = 25ppm_as
0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = 50ppm_as
0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	c = 100ppm_as
0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d = 25ppm_cd
0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = 50ppm_cd
0	0	0	0	0	8	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = 100ppm_cd
1	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	g = 25ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 50ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = 100ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = 25ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = 50ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = 100ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	m = 25ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	n = 50ppm_hg
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	o = 100ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	p = 25ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	7	0	0	1	0	0	0	0	q = 50ppm_ni
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	r = 100ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	s = 25ppm_pb
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4	3	0	0	0	0	t = 50ppm_pb
0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	u = 100ppm_pb
0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	v = 25ppm_zn
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6	0	w = 50ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	x = 100ppm_zn

Şekil 4.19. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

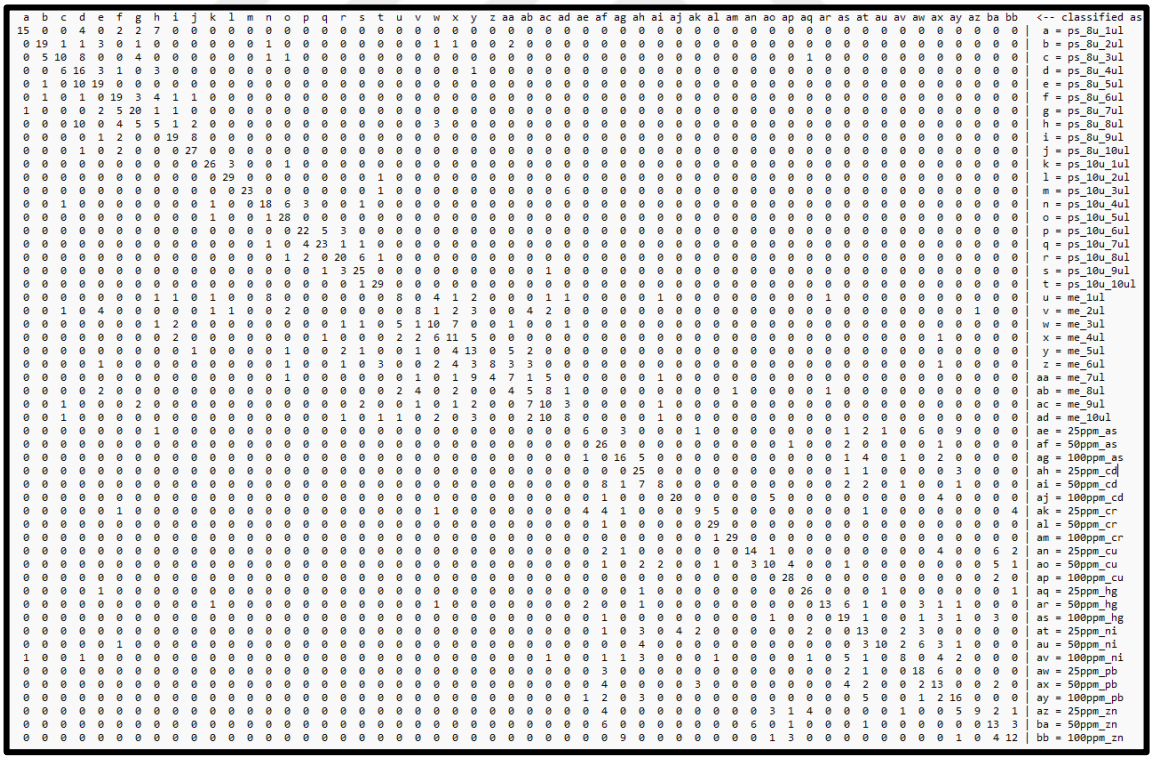
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	<-- classified as
27	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = ps_8u_1ul
0	19	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	1	0	0	0	0	b = ps_8u_2ul
1	5	20	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c = ps_8u_3ul
2	0	4	18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	d = ps_8u_4ul
2	0	1	6	18	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = ps_8u_5ul
0	0	0	0	0	17	3	3	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = ps_8u_6ul
0	0	0	0	0	8	10	2	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	g = ps_8u_7ul
4	0	0	8	0	1	0	11	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	h = ps_8u_8ul
0	0	0	0	1	1	3	1	14	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	i = ps_8u_9ul
0	0	0	0	0	1	0	0	1	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = ps_8u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	k = ps_10u_1ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = ps_10u_2ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	m = ps_10u_3ul
0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	1	1	0	0	0	0	2	0	4	0	0	0	0	0	0	n = ps_10u_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	12	1	6	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	o = ps_10u_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	p = ps_10u_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	24	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	q = ps_10u_7ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	23	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	r = ps_10u_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	s = ps_10u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	t = ps_10u_10ul
1	0	2	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	8	1	7	3	0	0	0	0	0	0	u = me_1ul
0	0	3	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	8	1	1	3	3	0	4	1	0	v = me_2ul
0	0	0	1	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	4	1	5	7	1	0	0	1	0	0	w = me_3ul
0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	1	3	14	3	0	0	1	0	0	x = me_4ul
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	1	0	5	9	0	6	2	0	1	y = me_5ul
0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	2	2	7	5	1	1	6		z = me_6ul
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	1	5	10	4	4	0	aa = me_7ul
0	0	0	0	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	1	1	6	0	8	2	ab = me_8ul
0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	2	1	0	7	5	6	3	ac = me_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	1	2	2	0	0	0	4	4	12		ad = me_10ul

Şekil 4.20. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

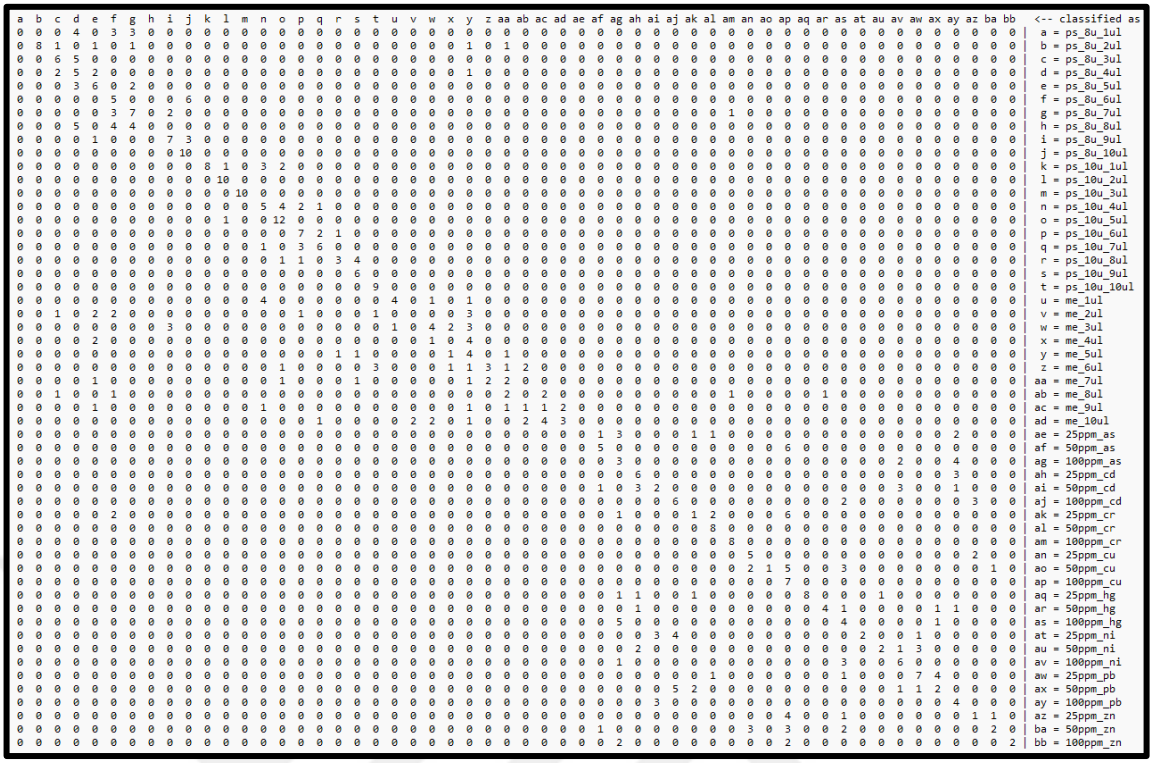


a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	<-- classified as
8	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = ps_8u_1ul
0	7	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = ps_8u_2ul
0	4	3	3	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c = ps_8u_3ul
0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d = ps_8u_4ul
0	0	0	1	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = ps_8u_5ul
0	0	0	0	1	0	0	8	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = ps_8u_6ul
0	0	0	0	1	0	0	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	g = ps_8u_7ul
0	0	0	1	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = ps_8u_8ul
0	0	0	0	1	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = ps_8u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = ps_8u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = ps_10u_1ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = ps_10u_2ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = ps_10u_3ul
0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	n = ps_10u_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	o = ps_10u_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	p = ps_10u_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	q = ps_10u_7ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	r = ps_10u_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	s = ps_10u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	t = ps_10u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	1	0	u = me_1ul
0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	v = me_2ul
0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	1	0	1	w = me_3ul
0	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	x = me_4ul
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	5	1	0	2	0	0	1	y = me_5ul
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0	5	1	1	1	z = me_6ul
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	4	2	0	aa = me_7ul
0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	3	ab = me_8ul
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	2	0	2	0	2	1	ac = me_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	2	3	ad = me_10ul

Şekil 4.21. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag	ah	ai	aj	ak	al	am	an	ao	ap	aq	ar	as	at	au	av	aw	ax	ay	az	ba	bb	<-- classified as
15	0	0	4	0	2	2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = ps_8u_1ul
0	19	1	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = ps_8u_2ul
0	5	10	8	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c = ps_8u_3ul
0	0	6	16	3	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d = ps_8u_4ul
0	1	0	10	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = ps_8u_5ul
0	1	0	1	0	19	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = ps_8u_6ul
1	0	0	0	2	5	20	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	g = ps_8u_7ul
0	0	0	10	0	4	5	5	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = ps_8u_8ul
0	0	0	0	1	2	0	0	19	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = ps_8u_9ul
0	0	0	1	0	2	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = ps_8u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = ps_10u_1ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = ps_10u_2ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = ps_10u_3ul
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	18	6	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	n = ps_10u_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	o = ps_10u_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	p = ps_10u_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	q = ps_10u_7ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	20	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	r = ps_10u_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	25	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	s = ps_10u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	t = ps_10u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	8	0	0	0	0	0	0	8	0	4	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	u = me_1ul
0	0	1	0	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	8	1	2	3	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	v = me_2ul
0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	5	1	10	7	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	w = me_3ul
0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2	6	11	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	x = me_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	1	0	4	13	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y = me_5ul
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	3	0	0	2	4	3	8	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	z = me_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	9	4	7	1	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	aa = me_7ul
0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	2	0	0	4	5	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ab = me_8ul
0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	2	0	0	7	10	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ac = me_9ul
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	2	0	3	0	0	2	10	8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ad = me_10ul
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	6	0	9	0	0	0	ae = 25ppm_as
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	af = 50ppm_as
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	16	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	ag = 100ppm_as
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	0	0	ah = 25ppm_cd
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	1	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	ai = 50ppm_cd
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	20	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	aj = 100ppm_cd
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	4	1	0	0	0	9	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	ak = 25ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	al = 50ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	am = 100ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	6	2	an = 25ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	0	0	1	0	3	10	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5	1			ao = 50ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0				ap = 100ppm_cu
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1				aq = 25ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	6	1	0	0	3	1	1	0	0	0			ar = 50ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	19	1	0	0	1	3	1	0	3	0		as = 100ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	4	2	0	0	0	0	0	2	0	0	13	0	2	3	0	0	0	0			at = 25ppm_ni
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	2	6	3	1	0	0	0			au = 50ppm_ni
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	5	1	0	8	0	4	2	0	0	0			av = 100ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	18	6	0	0	0	0			aw = 25ppm_pb
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	2	13	0	0	2	0			ax = 50ppm_pb
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

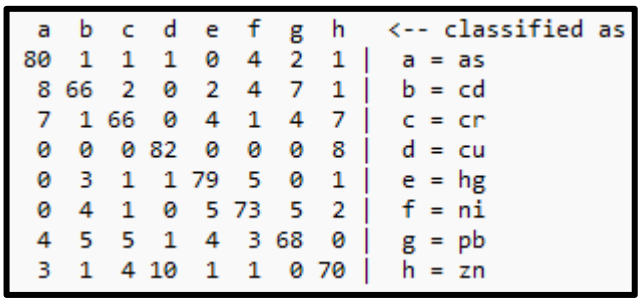


Şekil 4.23. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

Konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma için 10 adet özellik seçilimi sonrasında başarının bir miktar azaldığı ancak tüm sistemle kıyaslandığında hesaplama maliyetlerinin azaldığı, daha az sayıda ışık kaynağı ve sensör parametresi kullanarak bu tespitin yapılabileceği Tablo 4.10'da görülmektedir.

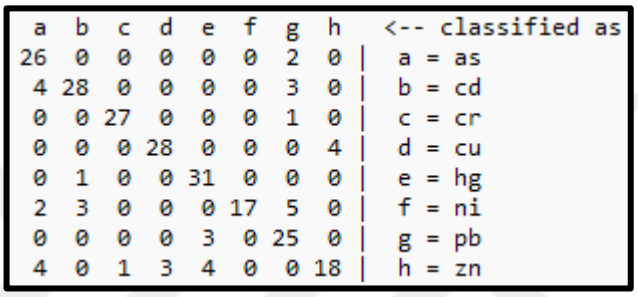
Tablo 4.10. En iyi 10 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyondan bağımsız doğru sınıflandırma yüzdesi

	Çapraz Doğrulama	**%66 Eğitim, %33 Test**
Ağır Metaller (8 Sınıf)	%81,1111 (Şekil 4.24)	%83,3333 (Şekil 4.25)
Mikroplastikler (3 Sınıf)	%95 (Şekil 4.26)	%95 (Şekil 4.27)
Hepsi (11 Sınıf)	%85,6173 (Şekil 4.28)	%85,3704 (Şekil 4.29)



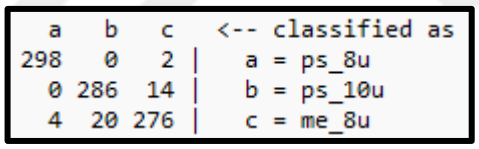
```
 a  b  c  d  e  f  g  h   <-- classified as
80  1  1  1  0  4  2  1 |  a = as
 8 66  2  0  2  4  7  1 |  b = cd
 7  1 66  0  4  1  4  7 |  c = cr
 0  0  0 82  0  0  0  8 |  d = cu
 0  3  1  1 79  5  0  1 |  e = hg
 0  4  1  0  5 73  5  2 |  f = ni
 4  5  5  1  4  3 68  0 |  g = pb
 3  1  4 10  1  1  0 70 |  h = zn
```

Şekil 4.24. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



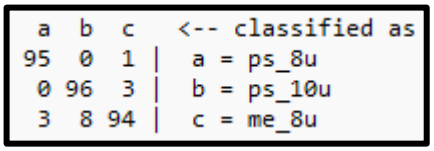
```
 a  b  c  d  e  f  g  h   <-- classified as
26  0  0  0  0  0  2  0 |  a = as
 4 28  0  0  0  0  3  0 |  b = cd
 0  0 27  0  0  0  1  0 |  c = cr
 0  0  0 28  0  0  0  4 |  d = cu
 0  1  0  0 31  0  0  0 |  e = hg
 2  3  0  0  0 17  5  0 |  f = ni
 0  0  0  0  3  0 25  0 |  g = pb
 4  0  1  3  4  0  0 18 |  h = zn
```

Şekil 4.25. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık Matrisi



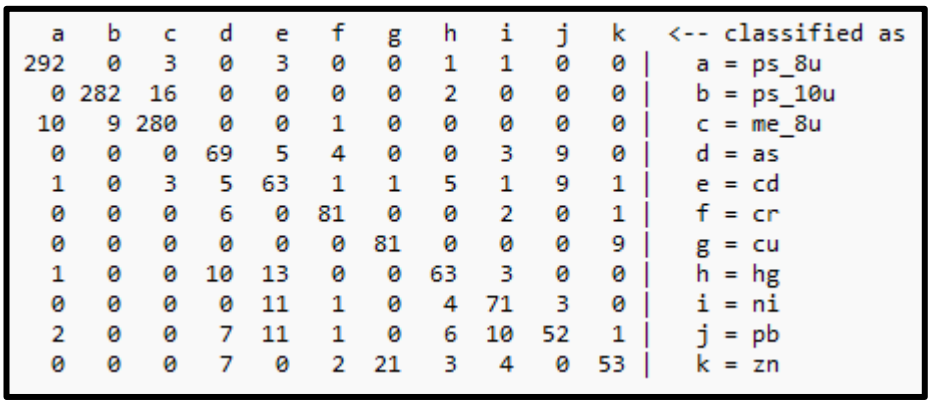
```
  a   b   c   <-- classified as
298   0   2 |   a = ps_8u
  0 286  14 |   b = ps_10u
  4  20 276 |   c = me_8u
```

Şekil 4.26. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



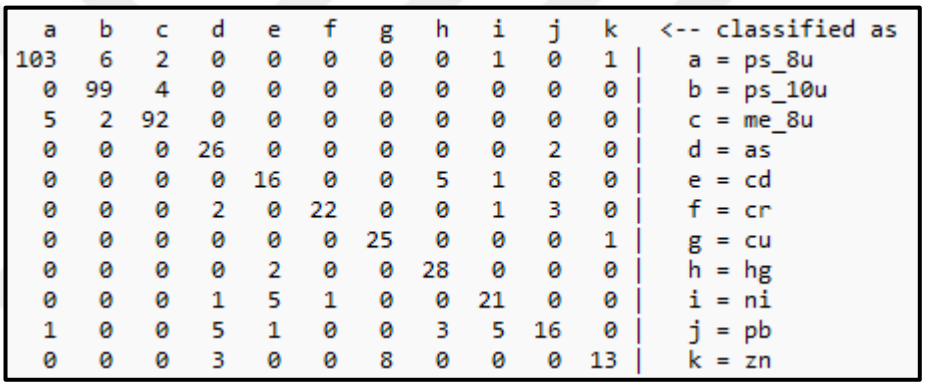
```
 a  b  c   <-- classified as
95  0  1 |  a = ps_8u
 0 96  3 |  b = ps_10u
 3  8 94 |  c = me_8u
```

Şekil 4.27. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	<-- classified as
292	0	3	0	3	0	0	1	1	0	0	a = ps_8u
0	282	16	0	0	0	0	2	0	0	0	b = ps_10u
10	9	280	0	0	1	0	0	0	0	0	c = me_8u
0	0	0	69	5	4	0	0	3	9	0	d = as
1	0	3	5	63	1	1	5	1	9	1	e = cd
0	0	0	6	0	81	0	0	2	0	1	f = cr
0	0	0	0	0	0	81	0	0	0	9	g = cu
1	0	0	10	13	0	0	63	3	0	0	h = hg
0	0	0	0	11	1	0	4	71	3	0	i = ni
2	0	0	7	11	1	0	6	10	52	1	j = pb
0	0	0	7	0	2	21	3	4	0	53	k = zn

Şekil 4.28. En iyi 10 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karmaşıklık matrisi



a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	<-- classified as
103	6	2	0	0	0	0	0	1	0	1	a = ps_8u
0	99	4	0	0	0	0	0	0	0	0	b = ps_10u
5	2	92	0	0	0	0	0	0	0	0	c = me_8u
0	0	0	26	0	0	0	0	0	2	0	d = as
0	0	0	0	16	0	0	5	1	8	0	e = cd
0	0	0	2	0	22	0	0	1	3	0	f = cr
0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	1	g = cu
0	0	0	0	2	0	0	28	0	0	0	h = hg
0	0	0	1	5	1	0	0	21	0	0	i = ni
1	0	0	5	1	0	0	3	5	16	0	j = pb
0	0	0	3	0	0	8	0	0	0	13	k = zn

Şekil 4.29. En iyi 10 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

Örneğin Tablo 4.11'de konsantrasyonsuz mikroplastik numuneleri için info gain algoritmasının ranker metodu sonuçlarının en iyi puanlanmış 10 özelliği verilmiştir. Buna göre 4 adet belirlenmiş ışık kaynağı ile 6 adet belirlenmiş dar bantlı fotodiyot kullanılarak sistem daha küçük ve hızlı cevap verebilen %95 doğrulukta çalışabilen bir sistem haline getirilebilir. Fotodiyotların tek entegre kılıfı altında toplanması durumunda çok daha küçük algılayıcılar gerçekleştirilebilir.

Seçilen özellik sayısı 20 olduğu durumda, konsantrasyonlu numune sınıflandırmasındaki doğru sınıflandırılan numunenin yüzdesi miktarı Tablo 4.12'de verilmiştir. Buna göre çok katmanlı algılayıcı algoritması seçilen 10 özelliğe göre,

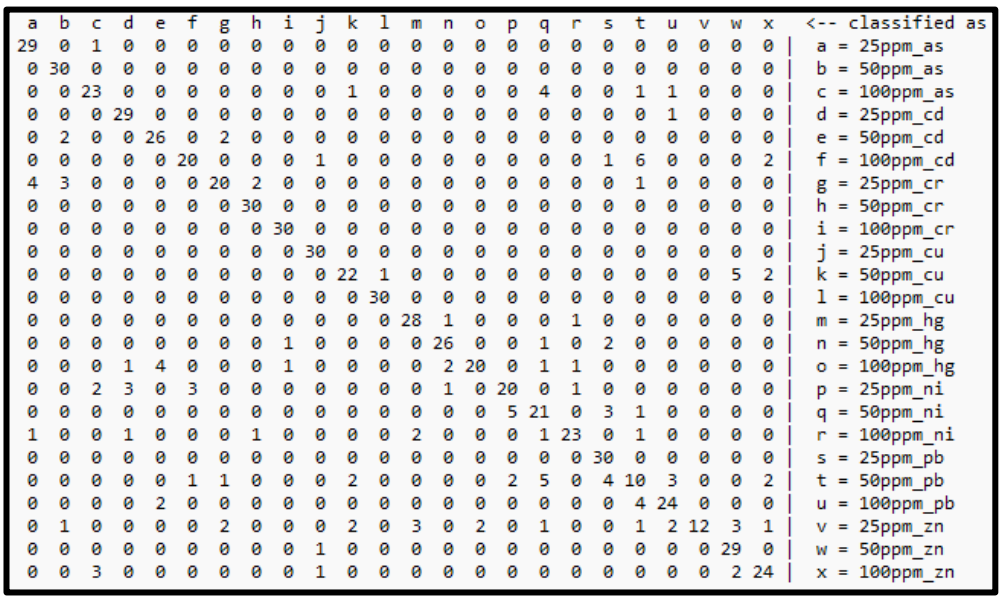
seçilen 20 özellik ile mikroplastikleri daha iyi oranda doğru, ağır metalleri ise daha kötü oranda doğru sınıflandırmıştır.

Tablo 4.11. Konsantrasyonsuz mikroplastik numuneler için seçilen 10 özellik

Puan	**Özellik Sırası**	**Özellik Adı**
1,01525	120	IsikKaynagi6_Fotodiyot11
1,01284	113	IsikKaynagi6_Fotodiyot4
0,98919	102	IsikKaynagi5_Fotodiyot11
0,96974	109	IsikKaynagi6_Fotodiyot0
0,96091	95	IsikKaynagi5_Fotodiyot4
0,95460	165	IsikKaynagi9_Fotodiyot2
0,93774	138	IsikKaynagi7_Fotodiyot11
0,93429	114	IsikKaynagi6_Fotodiyot5
0,93180	112	IsikKaynagi6_Fotodiyot3
0,92666	91	IsikKaynagi5_Fotodiyot0

Tablo 4.12. En iyi 20 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyon bağımlı doğru sınıflandırma yüzdesi

	Çapraz Doğrulama	**%66 Eğitim, %33 Test**
Ağır Metaller (24 sınıf)	%81,3889 (Şekil 4.30.)	%73,75 (Şekil 4.31.)
Mikroplastikler (30 Sınıf)	%66 (Şekil 4.32.)	%55,3333 (Şekil 4.33.)
Hepsi (54 Sınıf)	%64,5679 (Şekil 4.34.)	%55,5556 (Şekil 4.35.)



a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	<-- classified as
29	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = 25ppm_as
0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = 50ppm_as
0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0	0	1	1	0	0	0	c = 100ppm_as
0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	d = 25ppm_cd
0	2	0	0	26	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = 50ppm_cd
0	0	0	0	0	20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	2	f = 100ppm_cd
4	3	0	0	0	0	20	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	g = 25ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 50ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = 100ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = 25ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	k = 50ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = 100ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	m = 25ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	26	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	n = 50ppm_hg
0	0	0	1	4	0	0	0	1	0	0	0	0	2	20	0	1	1	0	0	0	0	0	0	o = 100ppm_hg
0	0	2	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	20	0	1	0	0	0	0	0	0	p = 25ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	21	0	3	1	0	0	0	0	q = 50ppm_ni
1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	23	0	1	0	0	0	0	r = 100ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	s = 25ppm_pb
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	2	5	0	4	10	3	0	0	2	t = 50ppm_pb
0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	24	0	0	0	u = 100ppm_pb
0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	3	0	2	0	1	0	0	1	2	12	3	1	v = 25ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	w = 50ppm_zn
0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	24	x = 100ppm_zn

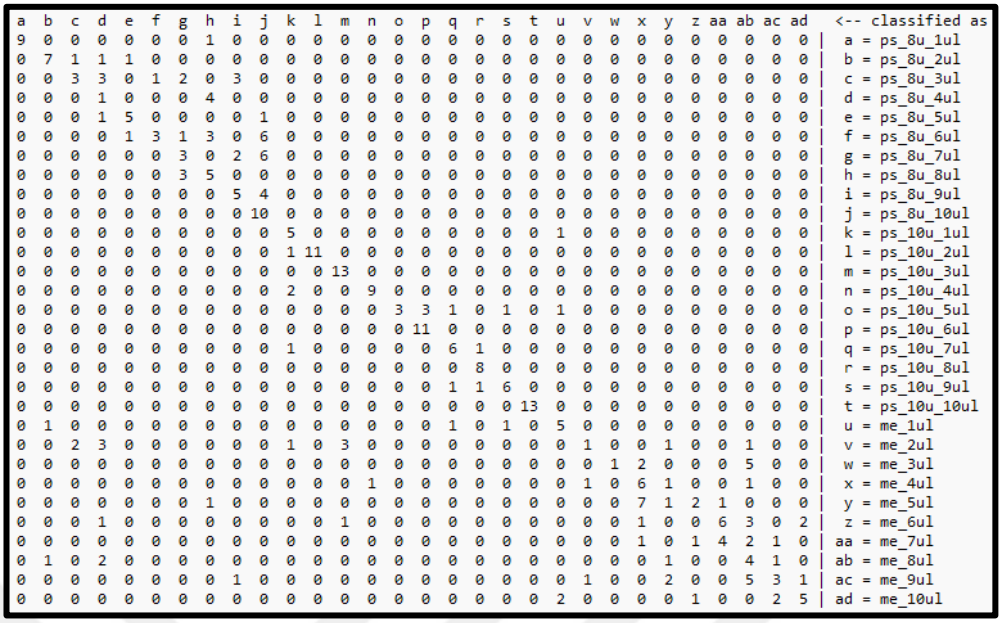
Şekil 4.30. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	<-- classified as
4	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	a = 25ppm_as
0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = 50ppm_as
0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c = 100ppm_as
0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d = 25ppm_cd
3	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	e = 50ppm_cd
0	0	0	0	0	8	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = 100ppm_cd
0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	g = 25ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 50ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = 100ppm_cr
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = 25ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = 50ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = 100ppm_cu
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = 25ppm_hg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	n = 50ppm_hg
0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	o = 100ppm_hg
0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	p = 25ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	9	1	2	1	0	0	0	0	q = 50ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	r = 100ppm_ni
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	s = 25ppm_pb
0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	t = 50ppm_pb
0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	u = 100ppm_pb
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	5	0	0	v = 25ppm_zn
0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1	w = 50ppm_zn
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	x = 100ppm_zn

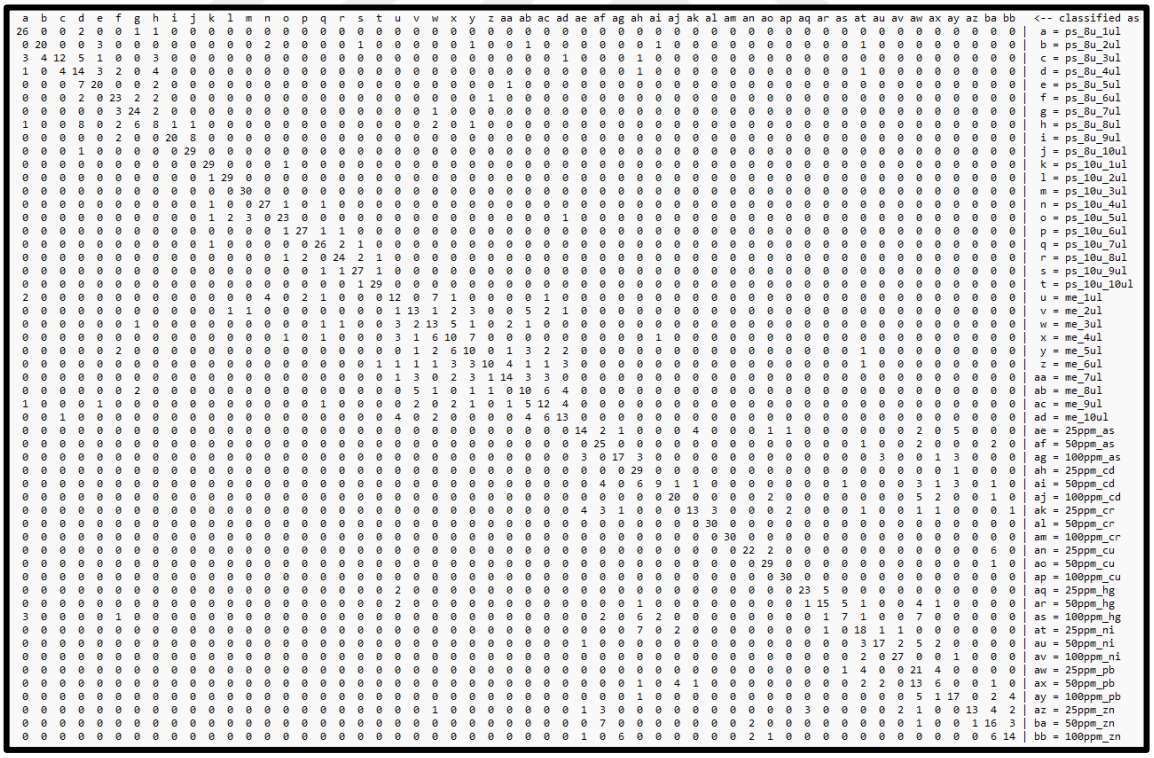
Şekil 4.31. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	<-- classified as
27	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = ps_8u_1ul
0	20	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	b = ps_8u_2ul
0	1	16	8	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	c = ps_8u_3ul
0	0	5	13	3	3	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	d = ps_8u_4ul
0	0	1	3	20	3	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = ps_8u_5ul
0	0	0	5	0	16	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	f = ps_8u_6ul
0	0	0	0	2	7	20	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	g = ps_8u_7ul
2	0	0	3	1	4	3	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	h = ps_8u_8ul
0	0	0	0	0	0	0	2	20	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i = ps_8u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j = ps_8u_10ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	k = ps_10u_1ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	l = ps_10u_2ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = ps_10u_3ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	n = ps_10u_4ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	18	8	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	o = ps_10u_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	28	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	p = ps_10u_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	0	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	q = ps_10u_7ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	r = ps_10u_8ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	s = ps_10u_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	t = ps_10u_10ul
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	11	0	1	6	0	1	1	4	0	0	u = me_1ul
0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	3	1	0	0	0	0	0	0	1	6	1	2	2	3	1	4	0	2	v = me_2ul
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	22	0	1	2	1	0	0	0	w = me_3ul
0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	2	7	9	5	0	0	1	0	0	0	0	x = me_4ul
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	4	2	14	1	2	2	0	0	y = me_5ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	3	1	11	3	6	0	2	z = me_6ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	1	1	14	6	3	1	aa = me_7ul
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	1	2	0	11	8	0	ab = me_8ul
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	2	2	5	10	5	ac = me_9ul
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1	2	0	0	1	1	5	16		ad = me_10ul

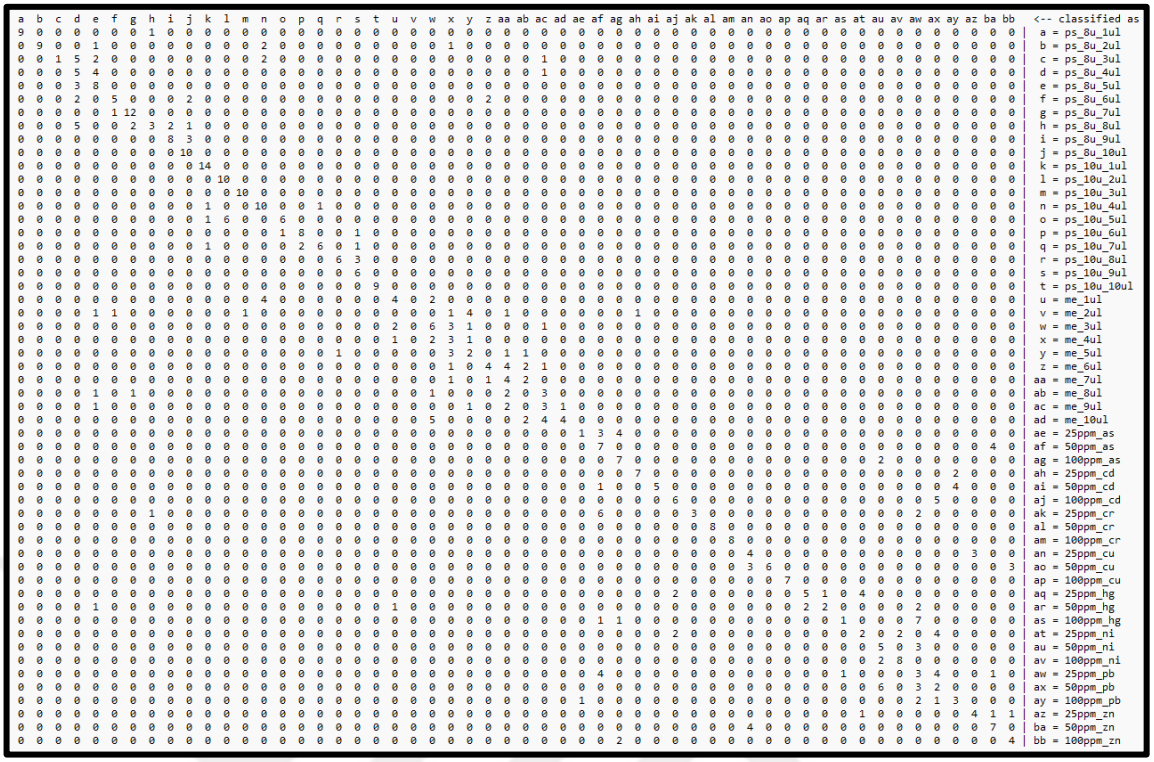
Şekil 4.32. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



Şekil 4.33. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



Şekil 4.34. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

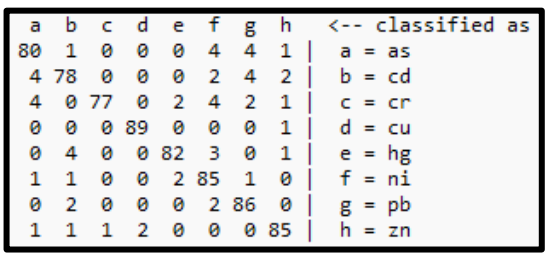


Şekil 4.35. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyon bağımlı sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

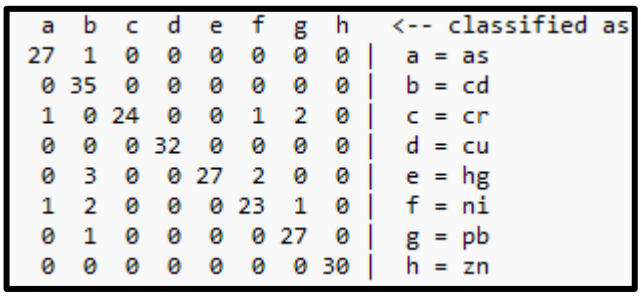
Konsantrasyonsuz sınıflandırmada seçilen özellik sayısı 20 olduğunda sınıflandırma başarısı tüm numuneler için yükselmiş olup Tablo 4.13'te gösterilmiştir.

Tablo 4.13. En iyi 20 özellik seçilmiş verilerde konsantrasyondan bağımsız doğru sınıflandırma yüzdesi

	Çapraz Doğrulama	**%66 Eğitim, %33 Test**
Ağır Metaller (8 Sınıf)	%91,9444 (Şekil 4.36.)	%93,75 (Şekil 4.37.)
Mikroplastikler (3 Sınıf)	%98 (Şekil 4.38.)	%97,3333 (Şekil 4.39.)
Hepsi (11 Sınıf)	%90,1235 (Şekil 4.40.)	%91,2963 (Şekil 4.41.)

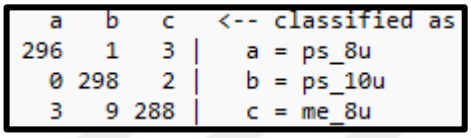


Şekil 4.36. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



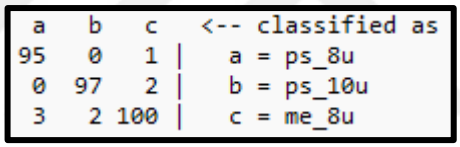
a	b	c	d	e	f	g	h	<-- classified as
27	1	0	0	0	0	0	0	a = as
0	35	0	0	0	0	0	0	b = cd
1	0	24	0	0	1	2	0	c = cr
0	0	0	32	0	0	0	0	d = cu
0	3	0	0	27	2	0	0	e = hg
1	2	0	0	0	23	1	0	f = ni
0	1	0	0	0	0	27	0	g = pb
0	0	0	0	0	0	0	30	h = zn

Şekil 4.37. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak ağır metaller için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



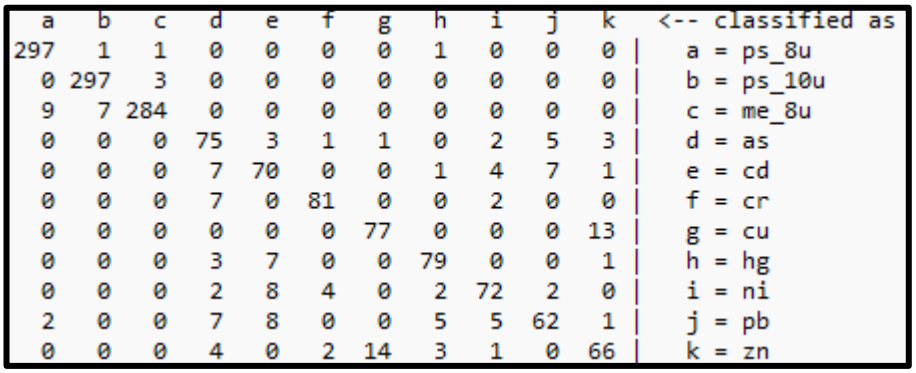
a	b	c	<-- classified as
296	1	3	a = ps_8u
0	298	2	b = ps_10u
3	9	288	c = me_8u

Şekil 4.38. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



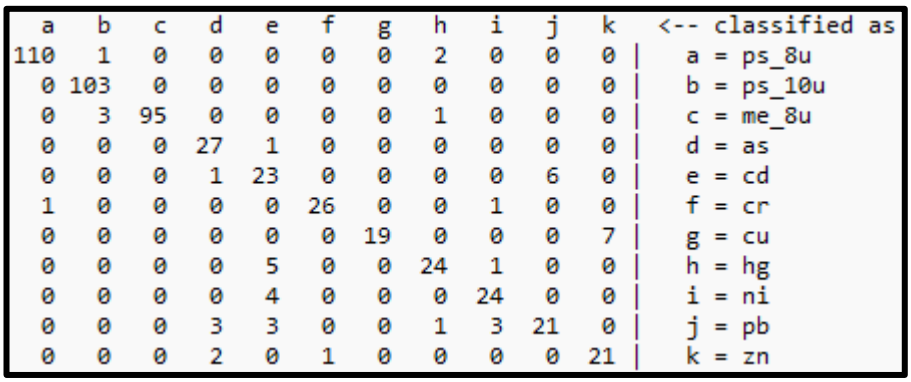
a	b	c	<-- classified as
95	0	1	a = ps_8u
0	97	2	b = ps_10u
3	2	100	c = me_8u

Şekil 4.39. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak mikroplastikler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	<-- classified as
297	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	a = ps_8u
0	297	3	0	0	0	0	0	0	0	0	b = ps_10u
9	7	284	0	0	0	0	0	0	0	0	c = me_8u
0	0	0	75	3	1	1	0	2	5	3	d = as
0	0	0	7	70	0	0	1	4	7	1	e = cd
0	0	0	7	0	81	0	0	2	0	0	f = cr
0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	13	g = cu
0	0	0	3	7	0	0	79	0	0	1	h = hg
0	0	0	2	8	4	0	2	72	2	0	i = ni
2	0	0	7	8	0	0	5	5	62	1	j = pb
0	0	0	4	0	2	14	3	1	0	66	k = zn

Şekil 4.40. En iyi 20 özelliğin seçildiği 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi



a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	<-- classified as
110	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	a = ps_8u
0	103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b = ps_10u
0	3	95	0	0	0	0	1	0	0	0	c = me_8u
0	0	0	27	1	0	0	0	0	0	0	d = as
0	0	0	1	23	0	0	0	0	6	0	e = cd
1	0	0	0	0	26	0	0	1	0	0	f = cr
0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	7	g = cu
0	0	0	0	5	0	0	24	1	0	0	h = hg
0	0	0	0	4	0	0	0	24	0	0	i = ni
0	0	0	3	3	0	0	1	3	21	0	j = pb
0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	21	k = zn

Şekil 4.41. En iyi 20 özelliğin seçildiği %66 eğitim ve %33 test verisi kullanılarak birleştirilmiş veriler için konsantrasyondan bağımsız sınıflandırma sonuçlarının karışıklık matrisi

Sonuç olarak homojen dağılım göstermeyen partikül içeren küvet içerisindeki numunelerde konsantrasyon tespitinin fotodiyot temelli sensörler ile tespitinin zor olduğu ancak tipini belirleme konusunda yüksek doğrulukta başarı gösterebildiği tespit edilmiştir. Homojen dağılım gösterebilen, su içerisinde çözünmüş ağır metallerde sınıflandırmanın daha iyi ve kabul edilebilir seviyelerde doğruluk göstermiştir. Ağır metaller ve mikroplastikler, gıda ve çevre gibi sahalarda sorun teşkil edebilen malzemeler olup tespitinin hızlı ve kolay şekilde gerçekleştirilmesi gereklidir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen bu sensör, makine öğrenmesi desteği ile otonom olarak tespitini gerçekleştirebilmektedir ve ağır metaller için konsantrasyon tespiti sağlanabilmektedir.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında iki farklı optik yöntem ile çalışan, ağır metal ve mikroplastik tespiti gerçekleştirebilen sensör sistemleri tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Görüntü temelli sensör sistemi mikroplastikleri Mie ve diğer optik olayların neden olduğu holografik girişim desenlerini derin öğrenme desteği ile öğrenebilen ve tespit eden bir sistemdir. Fotoreseptör tabanlı sistem ise hem mikroplastikleri hem de ağır metaller gibi suda tam çözünme gerçekleştirmiş numuneleri çok katmanlı algılayıcı (MLP) algoritması ile tespit etmiştir.

Görüntü temelli sensör sistemi lazer ışık kaynağından gelen ışınların partiküllere çarptıktan sonra oluşturduğu saçılımın meydana getirmiş olduğu desenlerin derin öğrenme ile değerlendirilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Sistemde kullanılan 3 farklı lazerin oluşturduğu ışınlar ayrı ayrı değerlendirilmekte, bu durum ölçüm kararlılığı kazandırmaktadır. Partikülün boyutu, yüzey morfolojisi, kırıcılık indisi, optik özellikleri (saydamlık, geçirdiği veya engellediği ışığın dalga boyu) partikülü meydana getiren maddenin türünün belirleyen parametrelerdir. Bu parametreler ışığın dalgaboyundan etkilendiği için mikroplastiklerin cinsinin tayinine farklı ışık kaynaklarının birlikte kullanılmasının doğruluğu artırması düşünülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda da derin öğrenme algoritmasının yüksek doğrulukta sınıflandırma gerçekleştirdiği görülmüştür.

Görüntü temelli sensör sisteminin farklı su ortamlarındaki başarısı, ortamın türüne ve kullanılan mikroplastik partikül tipine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Sistem, özellikle deiyonize su gibi kontrollü ortamlarda yüksek doğrulukla çalışmaktadır. Başarının düşük olduğu çevresel koşullara özgü veri kümeleri ile gerçekleştirilecek eğitim süreçlerinin, sistem performansını artıracağı öngörülmektedir. Ayrıca, sistemde

olası aşırı öğrenme (overfitting) probleminin araştırılması amacıyla ResNet mimarisi de değerlendirmeye alınmış; ancak bu durumda da yüksek başarı elde edilmiştir. Hesaplanması oldukça güç olan girişimsel desenler derin öğrenme algoritmasının kullanılması ile başarılı sonuç üretmiştir. 4 farklı dalgaboyuna sahip 3 farklı lazer ile numunenin taranması ile oluşan girişimsel desen farklılığı derin öğrenme sınıflandırılması açısından detaylı tarama etkisine neden olmuştur. Bunun sebebi ışığın dalgaboyunun; partikül cinsinin, şeklinin, yüzey yapısının, boyutunun ve numune ile perde arasındaki uzaklığın formül yapısında neden olduğu değişikliklerdir. Partiküllerin sahip olduğu bu tür parametrelerin tamamına göre hesaplama yapabilme zorluğu derin öğrenme ile aşılmıştır.

Fotoreseptör temelli sensör sisteminin başarısı değerlendirildiğinde konsantrasyon ölçümü açısından kirlilik tipine ciddi bir bağımlılığı bulunduğu izlenmiştir. Ancak tespiti konusunda yüksek başarı göstermiştir. Özellik seçilimi (Feature Extraction) bu sensör tipinde, tespitinde veya konsantrasyon ölçümünde belirleyici olmayan, daha az öneme sahip ışık kaynaklarını ve fotodiyotları sistemden çıkartılması konusunda önemli bilgiler sağlamaktadır. Sistemden çıkarılacak ışık kaynakları sistemin daha doğru, daha hızlı çalışmasını sağlarken, aynı zamanda daha küçük ve daha az güç tüketen cihaz tasarımlarının oluşturulmasında kullanılabilecektir. Özellik seçilimi sayesinde, probleme yönelik olarak seçilen özelliklere göre bir sistem tasarlanması gerekirse çok hızlı karar verebilen, kolay eğitilebilir, daha az maliyetli ve taşınabilirliği artırılmış bir sistem gerçekleştirilebilir. Ağır metaller ve mikroplastikler farklı özellikli malzemeler olup ölçüm sistemleri açısından zorlayıcı malzemelerdir. Kullandığımız mikroplastikler mikrometre boyutundaki malzemeler olmasına rağmen konsantrasyondan bağımsız tespitin yüksek doğrulukta olduğu görülmüştür. Ağır metaller için ise konsantrasyon ölçümü için ayrı çalıştırılması durumunda kabul edilebilir bir konsantrasyon tespiti yapabildiği, tespitini ise başarılı bir şekilde gerçekleştirebildiği izlenmiştir. Bu sistemlerin testi için kullanılan mikroplastikler yerine bir başka mikropartikül çeşidi ve boyutu kullanılabilir. Böylece uygulamaya özel parametreli sensör üretimi gerçekleştirilebilir.

Çok katmanlı algılayıcı algoritması kullanılarak sistemden elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Değerlendirmenin tarafsız olabilmesi için iki farklı değerlendirme uygulanmıştır. Bunlar 10-katlı çapraz doğrulama ve verilerin eğitim ve test verisi olarak

ayrılmasıdır. Veriler konsantrasyonuna ve kirlilik tipine göre incelendiği gibi, Konsantrasyondan Bağımsız olarak sadece kirlilik tipine göre sınıflandırılmıştır.

Sistemin sınırlayıcı özellikleri çözünmeyen maddelerdeki partiküllerin boyutu ve konsantrasyonları yönüyle incelenebilir. Sistemde kullanılan en küçük partikül boyutu 8µm'dir. Bu boyuttan çok daha küçük partiküllerde iki sensörün de davranışsal ya da doğruluk yönüyle başarısına olan etkileri bilinmemektedir. Benzer şekilde aşırı seyreltik çözeltilerde ya da aşırı yoğun çözeltilerdeki başarı oranları bilinmemektedir.

KAYNAKLAR

1. World Health Organization, 2016. Nitrate and Nitrite in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.

2. World Health Organization, 2011. Hardness in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.

3. World Health Organization, 2008. Guidelines for drinking-water quality [electronic resource]: incorporating 1st and 2nd addenda,Vol.1, Recommendations. – 3rd ed. vol. 1.

4. Zulkifli S.N., Rahim H.A., Lau W.J., 2018. Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications, **Sensors and Actuators, B: Chemical**, **255**: 2657–89. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.078.

5. Singh G., Kaushik S.K., Mukherji S., 2017. Revelations of an overt water contamination, **Medical Journal Armed Forces India**, **73**: 250–5. https://doi.org/10.1016/j.mjafi.2016.08.013.

6. Strungaru S.A., Jijie R., Nicoara M., Plavan G., Faggio C., 2019. Micro- (nano) plastics in freshwater ecosystems: Abundance, toxicological impact and quantification methodology, **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, **110**: 116–28. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.025.

7. Karbalaei S., Hanachi P., Walker T.R., Cole M., 2018. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution, **Environmental Science and Pollution Research**, **25**: 36046–63. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3508-7.

8. Zhu Y., Yeung C.H., Lam E.Y., 2021. Microplastic pollution monitoring with holographic classification and deep learning, **JPhys Photonics**, **3**. https://doi.org/10.1088/2515-7647/abf250.

9. Li W., Li X., Tong J., Xiong W., Zhu Z., Gao X., vd., 2023. Effects of

environmental and anthropogenic factors on the distribution and abundance of microplastics in freshwater ecosystems, **Science of the Total Environment**, **856**: 159030. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159030.

10. Chang N., Chen L., Wang N., Cui Q., Qiu T., Zhao S., vd., 2024. Unveiling the impacts of microplastic pollution on soil health: A comprehensive review, **Science of the Total Environment**, **951**: 175643. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175643.

11. Rios Mendoza L.M., Balcer M., 2019. Microplastics in freshwater environments: A review of quantification assessment, **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, **113**: 402–8. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.020.

12. Amelia T.S.M., Khalik W.M.A.W.M., Ong M.C., Shao Y.T., Pan H.J., Bhubalan K., 2021. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans, **Progress in Earth and Planetary Science**, **8**. https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4.

13. Crawford C.B., Quinn B., 2016. Microplastic Pollutants. https://doi.org/10.1016/c2015-0-04315-5.

14. Leslie H.A., 2014. Review of Microplastics in Cosmetics, **IVM Institute for Environmental Studies**, **476**: 33.

15. Auta H.S., Emenike C.U., Fauziah S.H., 2017. Distribution and importance of microplastics in the marine environmentA review of the sources, fate, effects, and potential solutions, **Environment International**, **102**: 165–76. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013.

16. Issac M.N., Kandasubramanian B., 2021. Effect of microplastics in water and aquatic systems, **Environmental Science and Pollution Research**, **28**: 19544–62. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2.

17. Zhang M., Zhu G., Li T., Lou X., Zhu L., 2020. A dual-channel optical fiber sensor based on surface plasmon resonance for heavy metal ions detection in contaminated water, **Optics Communications**, **462**. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124750.

18. Tassone S., Barbera S., Kaihara H., Glorio Patrucco S., Abid K., 2024. First Evidence of the Effects of Polyethylene Terephthalate Microplastics on Ruminal Degradability and Gastro-Intestinal Digestibility of Mixed Hay, **Animals**, **14**: 1–11. https://doi.org/10.3390/ani14152139.

19. Yurtsever M., 2019. Possible Effects of Nano-and Microplastics on Human Health and the Ecosystem, **Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi**, **5**: 17–24.

20. Dong X., Liu X., Hou Q., Wang Z., 2023. From natural environment to animal tissues: A review of microplastics(nanoplastics) translocation and hazards studies, **Science of the Total Environment**, **855**: 158686. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158686.

21. Monteiro S.S., Rocha-Santos T., Prata J.C., Duarte A.C., Girão A.V., Lopes P., vd., 2022. A straightforward method for microplastic extraction from organic-rich freshwater samples, **Science of the Total Environment**, **815**: 152941. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152941.

22. Kaur K., Reddy S., Barathe P., Oak U., Shriram V., Kharat S.S., vd., 2022. Microplastic-associated pathogens and antimicrobial resistance in environment, **Chemosphere**, **291**: 133005. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133005.

23. Pradit, S., Noppradit, P, Goh, B. P., Sornplang, K., Ong, M. C., Towatana P., 2021. Occurrence of microplastics and trace metals in fish and shrimp from Songkhla Lake, Thailand during the Covid-19 pandemic, **Applied Ecology and Environmental Research**, **19**: 1085–106. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1902_10851106.

24. Zhang Y., Pu S., Lv X., Gao Y., Ge L., 2020. Global trends and prospects in microplastics research: A bibliometric analysis, **Journal of Hazardous Materials**, **400**: 123110. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123110.

25. Oßmann B.E., Sarau G., Holtmannspötter H., Pischetsrieder M., Christiansen S.H., Dicke W., 2018. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water, **Water Research**, **141**: 307–16.

https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027.

26. Rochman C.M., Hoh E., Hentschel B.T., Kaye S., 2013. Classify plastic waste as hazardous (types of externalities caused by consumption of plastic bags), **Environmental Science and Technology**, **494**: 169–71.

27. Crawford C.B., Quinn B., 2023. The emergence of plastics. pp. 1–17. *Microplastic Pollutants*, Elsevier; . https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809406-8.00001-3.

28. Zou J., Liu X., Zhang D., Yuan X., 2020. Adsorption of three bivalent metals by four chemical distinct microplastics, **Chemosphere**, **248**: 126064. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126064.

29. Mehta R., Kumar V., Bhunia H., Upadhyay S.N., 2005. Synthesis of poly(lactic acid): A review, **Journal of Macromolecular Science - Polymer Reviews**, **45**: 325–49. https://doi.org/10.1080/15321790500304148.

30. Teixeira S., Eblagon K.M., Miranda F., R. Pereira M.F., Figueiredo J.L., 2021. Towards Controlled Degradation of Poly(lactic) Acid in Technical Applications, **C**, **7**: 42. https://doi.org/10.3390/c7020042.

31. Iñiguez M.E., Conesa J.A., Fullana A., 2017. Microplastics in Spanish Table Salt, **Scientific Reports**, **7**: 1–7. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09128-x.

32. Pivokonsky M., Cermakova L., Novotna K., Peer P., Cajthaml T., Janda V., 2018. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water, **Science of the Total Environment**, **643**: 1644–51. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102.

33. Ustabasi G.S., Baysal A., 2019. Occurrence and risk assessment of microplastics from various toothpastes, **Environmental Monitoring and Assessment**, **191**: 1–8. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7574-1.

34. Bayo J., Ramos B., López-Castellanos J., Rojo D., Olmos S., 2022. Lack of Evidence for Microplastic Contamination from Water-Soluble Detergent Capsules, **Microplastics**, **1**: 121–40. https://doi.org/10.3390/microplastics1010008.

35. Gasperi J., Wright S.L., Dris R., Collard F., Mandin C., Guerrouache M., vd., 2018. Microplastics in air: Are we breathing it in?, **Current Opinion in Environmental Science and Health**, **1**: 1–5. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002.

36. Asamoah B.O., Kanyathare B., Roussey M., Peiponen K.E., 2019. A prototype of a portable optical sensor for the detection of transparent and translucent microplastics in freshwater, **Chemosphere**, **231**: 161–7. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.114.

37. Dris R., Imhof H.K., Löder M.G.J., Gasperi J., Laforsch C., Tassin B., 2018. Microplastic contamination in freshwater systems: Methodological challenges, occurrence and sources. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00003-5.

38. Browne M.A., Niven S.J., Galloway T.S., Rowland S.J., Thompson R.C., 2013. Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity, **Current Biology**, **23**: 2388–92. https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.012.

39. Browne M.A., Dissanayake A., Galloway T.S., Lowe D.M., Thompson R.C., 2008. Ingested Microscopic Plastic Translocates to the Circulatory System of the Mussel, Mytilus edulis (L.), **Environmental Science & Technology**, **42**: 5026–31. https://doi.org/10.1021/es800249a.

40. Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S., 2013. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review., **Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)**, **178**: 483–92. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031.

41. Panel E., Chain F., 2016. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood, **EFSA Journal**, **14**. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501.

42. Yoo J.W., Doshi N., Mitragotri S., 2011. Adaptive micro and nanoparticles: Temporal control over carrier properties to facilitate drug delivery, **Advanced Drug Delivery Reviews**, **63**: 1247–56. https://doi.org/10.1016/j.addr.2011.05.004.

43. Sadani K., Nag P., Mukherji S., 2019. LSPR based optical fiber sensor with chitosan capped gold nanoparticles on BSA for trace detection of Hg (II) in water, soil and food samples, **Biosensors and Bioelectronics**, **134**: 90–6. https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.03.046.

44. Ziajahromi S., Drapper D., Hornbuckle A., Rintoul L., Leusch F.D.L., 2020. Microplastic pollution in a stormwater floating treatment wetland: Detection of tyre particles in sediment, **Science of the Total Environment**, **713**: 136356. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136356.

45. Bodini S.F., Malizia M., Tortelli A., Sanfilippo L., Zhou X., Arosio R., vd., 2018. Evaluation of a novel automated water analyzer for continuous monitoring of toxicity and chemical parameters in municipal water supply, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, **157**: 335–42. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.057.

46. Kamacı M., Kaya İ., 2019. Polymeric fluorescent film sensor based on poly(azomethine-urethane): Ion sensing and surface properties, **Reactive and Functional Polymers**, **136**: 1–8. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2018.12.021.

47. Ghosh P., Das J., Basak A., Mukhopadhyay S.K., Banerjee P., 2017. Nanomolar level detection of explosive and pollutant TNP by fluorescent aryl naphthalene sulfones: DFT study, in vitro detection and portable prototype fabrication, **Sensors and Actuators, B: Chemical**, **251**: 985–92. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.05.126.

48. Li H., Zang H., Xu H., Sun H.-B., Baltuška A., Polynkin P., 2019. Robust Remote Sensing of Trace-Level Heavy-Metal Contaminants in Water Using Laser Filaments, **Global Challenges**, **3**: 1800070. https://doi.org/10.1002/gch2.201800070.

49. Bhuyan M.S., Bakar M.A., Akhtar A., Hossain M.B., Ali M.M., Islam M.S., 2017. Heavy metal contamination in surface water and sediment of the Meghna River, Bangladesh, **Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management**, **8**: 273–9. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2017.10.003.

50. Shan J., Zhang Y., Wang J., Ren T., Jin M., Wang X., 2020. Microextraction based on microplastic followed by SERS for on-site detection of hydrophobic organic contaminants , an indicator of seawater pollution, **Journal of Hazardous Materials**, **400**: 123202. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123202.

51. Prata J.C., da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T., 2019. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review, **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, **110**: 150–9. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029.

52. Hu T., Shen M., Tang W., 2022. Wet wipes and disposable surgical masks are becoming new sources of fiber microplastic pollution during global COVID-19, **Environmental Science and Pollution Research**, **29**: 284–92. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17408-3.

53. Sun J., Peng Z., Zhu Z.R., Fu W., Dai X., Ni B.J., 2022. The atmospheric microplastics deposition contributes to microplastic pollution in urban waters, **Water Research**, **225**: 119116. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119116.

54. Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T., 2020. Method for microplastics extraction from Lake sediments, **MethodsX**, **7**: 101140. https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101140.

55. Baruah A., Sharma A., Sharma S., Nagraik R., 2022. An insight into different microplastic detection methods, **International Journal of Environmental Science and Technology**, **19**: 5721–30. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03384-1.

56. Meyers N., Catarino A.I., Declercq A.M., Brenan A., Devriese L., Vandegehuchte M., vd., 2022. Microplastic detection and identification by Nile red staining: Towards a semi-automated, cost- and time-effective technique, **Science of the Total Environment**, **823**: 153441. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153441.

57. Ompala C., Renault J.P., Taché O., Cournède É., Devineau S., Chivas-Joly C., 2024. Stability and dispersibility of microplastics in experimental exposure medium and their dimensional characterization by SMLS, SAXS, Raman

microscopy, and SEM, **Journal of Hazardous Materials**, **469**. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134083.

58. Newrick B.A., Valdés D., Laca A., Laca A., Díaz M., 2025. Enhanced biodegradation of high-density polyethylene microplastics: Study of bacterial efficiency and process parameters, **Journal of Hazardous Materials**, **485**: 136822. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136822.

59. Rodriguez-Saona L., Aykas D.P., Borba K.R., Urbina A.U., 2020. Miniaturization of Optical Sensors and their Potential for High-Throughput Screening of Foods, **Current Opinion in Food Science**,. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.04.008.

60. Sharma A.K., Sharma M., Sharma S., Malik D.S., Sharma M., Sharma A.K., 2024. A systematic review on assessment of heavy metals toxicity in freshwater fish species: Current scenario and remedial approaches, **Journal of Geochemical Exploration**, **262**: 107472. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107472.

61. Karnchanawong S., Limpiteeprakan P., 2009. Evaluation of heavy metal leaching from spent household batteries disposed in municipal solid waste, **Waste Management**, **29**: 550–8. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.018.

62. Li X., 2024. A comparative study on the efficacy of conventional and green chelating agents for soil heavy metal remediation, **Theoretical and Natural Science**, **37**: 206–15. https://doi.org/10.54254/2753-8818/37/20240193.

63. Gumpu M.B., Sethuraman S., Krishnan U.M., Rayappan J.B.B., 2015. A review on detection of heavy metal ions in water - An electrochemical approach, **Sensors and Actuators, B: Chemical**, **213**: 515–33. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.02.122.

64. Kabenge I., Ssewankambo G., Nakawuka P., Wanyama J., Zziwa A., Bamutaze Y., vd., 2024. Modelling storm event-based sediment yield and assessing its heavy metal loading: case of Lake Victoria's Inner Murchison Bay catchment in Uganda, **Modeling Earth Systems and Environment**, **10**: 1973–91. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01876-2.

65. Pandey L.K., Park J., Son D.H., Kim W., Islam M.S., Choi S., vd., 2019. Assessment of metal contamination in water and sediments from major rivers in South Korea from 2008 to 2015, **Science of the Total Environment**, **651**: 323–33. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.057.

66. Jain R., Thakur A., Kaur P., Kim K.H., Devi P., 2020. Advances in imaging-assisted sensing techniques for heavy metals in water: Trends, challenges, and opportunities, **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, **123**: 115758. https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115758.

67. Sajed S., Arefi F., Kolahdouz M., Sadeghi M.A., 2019. Improving sensitivity of mercury detection using learning based smartphone colorimetry, **Sensors and Actuators, B: Chemical**, **298**: 126942. https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126942.

68. Teodoro K.B.R., Shimizu F.M., Scagion V.P., Correa D.S., 2019. Ternary nanocomposites based on cellulose nanowhiskers, silver nanoparticles and electrospun nanofibers: Use in an electronic tongue for heavy metal detection, **Sensors and Actuators, B: Chemical**, **290**: 387–95. https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.03.125.

69. Liu S., Li R., Smith K., Che H., 2016. Why conventional detection methods fail in identifying the existence of contamination events, **Water Research**, **93**: 222–9. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.027.

70. Aliberti A., Vaiano P., Caporale A., Consales M., Ruvo M., Cusano A., 2017. Sensors and Actuators B : Chemical Fluorescent chemosensors for Hg 2 + detection in aqueous environment, **Sensors & Actuators: B Chemical**, **247**: 727–35. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.03.026.

71. Li D., Liu S., 2019. Seawater Quality Detection, **Water Quality Monitoring and Management**,: 233–49. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811330-1.00009-0.

72. Persichetti G., Viaggiu E., Testa G., Congestri R., Bernini R., 2019. Spectral discrimination of planktonic cyanobacteria and microalgae based on deep UV fluorescence, **Sensors and Actuators, B: Chemical**, **284**: 228–35.

https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.12.111.

73. Guan L., Tong Y., Li J., Li D., Wu S., 2018. Research on ultraviolet-visible absorption spectrum preprocessing for water quality contamination detection, **Optik**, **164**: 277–88. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.034.

74. Grant-Jacob J.A., Xie Y., Mackay B.S., Praeger M., McDonnell M.D.T., Heath D.J., vd., 2019. Particle and salinity sensing for the marine environment via deep learning using a raspberry pi, **Environmental Research Communications**, **1**: 35001. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab14c9.

75. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B., 2019. Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data, **Geoderma Regional**, **16**: e00198. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00198.

76. Mhaskar H.N., Pereverzyev S. V., van der Walt M.D., 2017. A Deep Learning Approach to Diabetic Blood Glucose Prediction, **Frontiers in Applied Mathematics and Statistics**, **3**: 1–11. https://doi.org/10.3389/fams.2017.00014.

77. Kavakiotis I., Tsave O., Salifoglou A., Maglaveras N., Vlahavas I., Chouvarda I., 2017. Machine Learning and Data Mining Methods in Diabetes Research, **Computational and Structural Biotechnology Journal**, **15**: 104–16. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2016.12.005.

78. Ai W., Chen G., Yue X., Wang J., 2023. Application of hyperspectral and deep learning in farmland soil microplastic detection, **Journal of Hazardous Materials**, **445**: 130568. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130568.

79. Shishkin I.E., Grekov A.N., 2023. Implementation of YOLOv5 for Detection and Classification of Microplastics and Microorganisms in Marine Environment. pp. 230–235. *Proceedings - 2023 International Russian Smart Industry Conference, March 27-31, 2023 Sochi, Russia*, IEEE; . https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110736.

80. Gu J., Wang Z., Kuen J., Ma L., Shahroudy A., Shuai B., vd., 2018. Recent advances in convolutional neural networks, **Pattern Recognition**,. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.10.013.

81. Albawi S., Mohammed T.A., Al-Zawi S., 2018. Understanding of a convolutional neural network. *Proceedings of 2017 International Conference on Engineering and Technology, ICET 2017*. https://doi.org/10.1109/ICEngTechnol.2017.8308186.

82. Nicolai E., Pizzoferrato R., Li Y., Frattegiani S., Nucara A., Costa G., 2022. A New Optical Method for Quantitative Detection of Microplastics in Water Based on Real-Time Fluorescence Analysis, **Water (Switzerland)**, **14**. https://doi.org/10.3390/w14203235.

83. Genc S., Icoz K., Erdem T., 2023. Numerical analysis and experimental verification of optical scattering from microplastics, **Royal Society Open Science**, **10**. https://doi.org/10.1098/rsos.230586.

84. Singh A., Shah S.S., Sharma C., Gupta V., Sundramoorthy A.K., Kumar P., vd., 2024. An approach towards different techniques for detection of heavy metal ions and their removal from waste water, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, **12**: 113032. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113032.

85. Dhal S.B., Mahanta S., Gumero J., O'Sullivan N., Soetan M., Louis J., vd., 2023. An IoT-Based Data-Driven Real-Time Monitoring System for Control of Heavy Metals to Ensure Optimal Lettuce Growth in Hydroponic Set-Ups, **Sensors**, **23**: 451. https://doi.org/10.3390/s23010451.

86. Běhal J., Valentino M., Miccio L., Bianco V., Itri S., Mossotti R., vd., 2022. Toward an All-Optical Fingerprint of Synthetic and Natural Microplastic Fibers by Polarization-Sensitive Holographic Microscopy, **ACS Photonics**, **9**: 694–705. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.1c01781.

87. Lin B., Xu Z., Wang J., Lu M., 2017. A low-cost water quality monitoring prototype device with embedded chromogenic reagent capsules and dynamic colorimetric detection, **Sensors and Actuators, B: Chemical**, **252**: 24–9. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.05.056.

88. Asamoah B.O., Uurasjärvi E., Räty J., Koistinen A., Roussey M., Peiponen K.E., 2021. Towards the development of portable and in situ optical devices for detection of micro and nanoplastics in water: A review on the current status,

Polymers, **13**: 1–30. https://doi.org/10.3390/polym13050730.

89. Mie scattering is caused by large particles while Rayleigh scattering... | Download Scientific Diagram y.y. (Web sayfası: **https://www.researchgate.net/figure/Mie-scattering-is-caused-by-large-particles-while-Rayleigh-scattering-is-mainly-caused-by_fig5_343770420**), (Erişim Tarihi: Ocak 2025).

90. Saito M., Yang P., 2019. Oriented ice crystals: A single-scattering property database for applications to LiDAR and optical phenomenon simulations, **Journal of the Atmospheric Sciences**, **76**: 2635–52. https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0031.1.

91. '22 degree Sun Halo' seen in the sky - The Hindu y.y. (Web sayfası: **https://www.thehindu.com/news/national/karnataka/22-degree-sun-halo-seen-in-the-sky/article25028196.ece**), (Erişim Tarihi: Ocak 2025).

92. Primpke S., Lorenz C., Rascher-Friesenhausen R., Gerdts G., 2017. An automated approach for microplastics analysis using focal plane array (FPA) FTIR microscopy and image analysis, **Analytical Methods**, **9**: 1499–511. https://doi.org/10.1039/c6ay02476a.

93. Prof. Dr. Bilsen Beşergil: Refraksiyon Yasası (Snell's law) y.y. (Web sayfası: **https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/refraksiyon-krnmyasas-snell-yasas-snell.html**), (Erişim Tarihi: Ocak 2025).

94. Principles and Applications of Laser Diffraction Technology y.y. (Web sayfası: **https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16153**), (Erişim Tarihi: Ocak 2025).

95. Schnaiter M., Järvinen E., Vochezer P., Abdelmonem A., Wagner R., Jourdan O., vd., 2015. Cloud chamber experiments on the origin of ice crystal complexity in cirrus clouds, **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, **15**: 30511–61. https://doi.org/10.5194/acpd-15-30511-2015.

96. Schepers L.P.T., Beckers J., IJzerman W.L., 2018. Determination of microparticle characteristics in an etching plasma, **Contributions to Plasma**

Physics, **58**: 985–94. https://doi.org/10.1002/ctpp.201700217.

97. Hansen J.E., Travis L.D., 1974. Light scattering in planetary atmospheres, **Space Science Reviews**, **16**: 527–610. https://doi.org/10.1007/BF00168069.

98. Jacques, Steven L., Prahl S.A., ECE532 Biomedical Optics: Henyey-Greenstein scattering function, **1998**, y.y. (Web sayfası: **https://omlc.org/classroom/ece532/class3/hg.html**), (Erişim Tarihi: Ocak 2025).

99. Sanders A.F.J., de Haan J.F., Veefkind J.P., 2012. Retrieval of aerosol height from the oxygen A band with TROPOMI, **Ninth International Symposium on Tropospheric Profiling**,.

100. Calabro K.W., Bigio I.J., 2014. Influence of the phase function in generalized diffuse reflectance models: review of current formalisms and novel observations, **Journal of Biomedical Optics**, **19**: 075005. https://doi.org/10.1117/1.jbo.19.7.075005.

101. He K., Zhang X., Ren S., Sun J., 2016. Deep residual learning for image recognition, **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, **2016-Decem**: 770–8. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90.

102. Lim T.S., Loh W.Y., Shih Y.S., 2000. Comparison of prediction accuracy, complexity, and training time of thirty-three old and new classification algorithms, **Machine Learning**,. https://doi.org/10.1023/A:1007608224229.

103. Spectral Triad (AS7265x) Hookup Guide - SparkFun Learn y.y. (Web sayfası: **https://learn.sparkfun.com/tutorials/spectral-triad-as7265x-hookup-guide**), (Erişim Tarihi: Ocak 2025).

104. ams OSRAM Group, 2018. AS7265x Datasheet. (Web sayfası: **https://look.ams-osram.com/m/76ce4c0d80cd1565/original/AS7265x-DS000612.pdf**), (Erişim Tarihi: Ocak 2025).

105. Frank E., Hall M.A., Witten I.H., 2017. The WEKA workbench. pp. 553–71. *Data Mining*, Elsevier; . https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804291-5.00024-6.

106. Yacouby R., Axman D., 2020. Probabilistic Extension of Precision, Recall, and F1 Score for More Thorough Evaluation of Classification Models. https://doi.org/10.18653/v1/2020.eval4nlp-1.9.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Ekrem Kürşad DAL

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durumu:

E Posta:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	**Kurum**	**Mezuniyet Tarihi**
Yüksek Lisans	EÜ Elektrik Elektronik Müh.	2017
Lisans	EÜ Elektrik Elektronik Müh.	2012
Lisans	Anadolu Üniversitesi İşletme	2013
Lise	Sami Yangın Anadolu Lisesi, Kayseri	2006

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görev**
2013	Erciyes Teknoloji Transfer Ofisi	Envanter Sorumlusu
2014	Ekrem Kürşad DAL-ELA Mühendislik	İşletme Sahibi
2017	Oğuzhan AYYILDIZ-BİYONOG	Ar-Ge Personeli
2022-Halen	Kapadokya Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce