T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTODİYOT İLE TOPRAK YÜZEY NEMİ TESPİTİ

Ahmet Harun ATAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı

Haberleşme Yüksek Lisans Programı

Danışman

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Haziran, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTODİYOT İLE TOPRAK YÜZEY NEMİ TESPİTİ

Ahmet Harun ATAĞ tarafından hazırlanan tez çalışması 10.06.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı, Haberleşme Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Peyman MAHOUTİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ahmet Arif ULUSLU, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa _____

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet KIZILAY sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Fotodiyot ile Toprak Yüzey Nemi Tespiti" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim.

Bu tez çalışmasının kavramsallaştırılması, planlanması, yürütülmesi, değerlendirilmesi ve metnin yazım süreci dâhil olmak üzere hiçbir aşamasında Üretken Yapay Zekâ teknolojilerinden yararlanılmamış, çalışma tamamen kendi özgün çabamla gerçekleştirilmiştir.

Beyanımın aksinin tespiti hâlinde doğabilecek her türlü idari ve hukuki sorumluluğu kabul ederim.

Ahmet Harun ATAĞ

İmza

Bu çalışma, “Avrupa Metroloji Ortaklığı tarafından finanse edilmiştir ve Avrupa Birliği’nin Horizon Europe Araştırma ve Yenilik Programı ile Katılımcı Devletler tarafından ortaklaşa desteklenmiştir (Fon sağlayıcı adı: European Partnership on Metrology; Fon sağlayıcı ID: 10.13039/100019599; Hibe numarası: 21GRD08 SoMMet).

“To Allah and His Messenger”

TEŞEKKÜR

Bu tezin araştırma ve yazım süreçlerinde sağladığı yardım, teknik destek ve değerli katkılar için danışmanım Prof. Dr. Ahmet KIZILAY'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmalarım süresince bana ilham veren, motive eden; bilimsel öngörüsü, nezaketi ve sarsılmaz desteğiyle her zaman yanımda olan Termodinamik Metroloji Laboratuvarı Sorumlusu Dr. Humbet NASİBLİ'ye teşekkür ederim. Ayrıca, araştırma sürecim boyunca nazik destekleri için laboratuvar üyeleri Dilem Gökçe TÜCCAR, Eren DEMİREL ve Mehtap ERTÜRK'e, bunun yanı sıra TÜBİTAK UME'deki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tezin başarıyla tamamlanmasına büyük katkı sağlayan, Avrupa Metroloji Ortaklığı tarafından finanse edilen "21GRD08 SoMMet – Soil Moisture Metrology" adlı proje kapsamında sağlanan mali ve kurumsal destek için şükranlarımı sunarım.

Sonsuz sabrı, sevgisi ve fedakârlıkları için annem Zübeyde ATAĞ, babam Cengiz Hasan ATAĞ ve sevgili kardeşlerim Zeynep Afra, Sükeyne Azra, Muhammed Emin ile Ahsen Ebrar'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Harun ATAĞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xiv
ÖZET xv
ABSTRACT xvii
1 GİRİŞ 1
2 RUTUBET ÖLÇÜM SİSTEMLERİ 5
2.1 Geliştirilmiş Birincil Seviye Su Buharı Ölçüm Sistemi (SBÖS) 5
2.1.1 Sistem Tasarımı 7
2.1.2 Yöntemin Kuramsal Temeli 8
2.2 Akış Tabanlı KKK (aKKK) 9
2.3 Kurutma ile Kütle Kaybı (KKK) 10
2.4 Gravimetrik Laboratuvar Rutubet Analizörü 11
2.5 Noktasal Ölçekli Sensörler 12
2.5.1 İzlenebilirlik Zinciri 12
2.5.2 Kalibrasyon Prosedürleri 13
2.5.3 Sensörler Arası Varyasyon 13
2.5.4 Hacim Yoğunluğu Hesabı 15
2.5.5 Sensör Çeşidine Göre Farklılık 15
2.6 Görünür–Yakın Kızılötesi (Vis-NIR) aralığında fiber-kuplajlı spektrometrelere dayalı taşınabilir transfer standardı – Yakın Mesafe Toprak Rutubeti Sensörü (YMTRS) 16
3 LED TABANLI ÇOKLU-TAYFSAL AYRIK SPEKTROMETRE 23
3.1 Ön Çalışma Metodolojisi 23
3.1.1 Ön Çalışma Bulguları 26
3.2 Karakteristik Dalgaboyları 29

3.3 Toprak yüzeyine yakın mesafeden ölçüm yapan sensörlerin standardizasyonu 30
3.4 İlgili Çalışmalara Genel Bakış 31
3.5 Sistem Tasarımı 35
3.5.1 Mekanik Tasarım Düzeni 35
3.6 LED Setleri 38
3.7 Optik Tabanlı Toprak Rutubeti Ölçüm Sistemi için Voltaj Kontrollü Akım Kaynağı Tasarımı 40
3.7.1 Giriş Sinyali İşleme ve İzolasyon Arayüzü 40
3.7.2 Geri Besleme ve Kontrol Döngüsü 41
3.7.3 Çıkış Katı ve Stabilizasyon 41
3.8 Fotodiyot Tabanlı Algılama 44
3.9 Spektrometrenin Çalışma-Akış Şeması 46
4 MATERYALLER ve YÖNTEMLER 49
4.1 Toprak Numuneleri 49
4.1.1 İstenen Rutubet Miktarına Sahip Toprak Numunelerinin Hazırlanması 50
4.1.2 LED Tabanlı Spektrometre ile Alınan Ölçümlerin İzlenebilirliğinin Sağlanması 51
4.2 Makine Öğrenmesi Algoritmaları 51
4.2.1 Gaussian Süreç Regresyonu (GSR) 52
4.2.2 Destek Vektör Regresyonu 53
4.2.3 LSBoost Regresyonu 55
4.2.4 Rastgele Orman Regresyonu 55
4.2.5 Tek Katmanlı Sinir Ağı 56
4.3 Katmanlı K-Fold Bölümleme ve Özellik Kombinasyonları 57
4.3.1 Katmanlı K-Fold Bölümleme (Stratified K-Fold) 58
4.3.2 Özellik Kombinasyonları (Feature Subsets) 58
5 DENEYSEL SONUÇLAR 61
5.1 Rutubetlendirilmiş Toprak Numuneleri Kullanılarak LED Tabanlı Spektrometrenin Kalibrasyonu 61

5.2 Rutubet Tahmininde Fiziksel Model Yaklaşımı 62
SONUÇ **80**
KAYNAKÇA **81**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **88**

SİMGE LİSTESİ

B(λ)	beyaz referans kullanılarak alınan referans yansıma ölçümleri
D^*	dedektör performansı
$m_{ıslak}$	ıslak numunenin kütlesi
$M_{ıslak}$	başlangıçta ölçülen kütle
m_{kuru}	kuru numunenin kütlesi
M_{kuru}	ölçüm sonunda kaydedilen kütle
m_{pkb}	boş petri kabının kütlesi
T(λ)	toprak numunelerine ait yansıma ölçümleri

KISALTMA LİSTESİ

ADC	Analog Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
FDR	Frequency Domain Reflectometry (Frekans Alan Reflektometresi)
GLRA	Gravimetrik Laboratuvar Rutubet Analizörü
KKK	Kurutma ile Kütle Kaybı
KS	Karanlık Sinyal
LED	Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LoD	Loss-on Drying (Kurutma ile Kütle Kaybı)
NIR	Near Infrared (Yakın Kızılötesi)
RMSE	Root Mean Square Error (Kök Ortalama Kare Hata)
SBÖS	Su Buharı Ölçüm Sistemi
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
SNT	Sızdırmaz Numune Tutucu
SPI	Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arayüz)
SWIR	Short Wave Infrared (Kısa Dalga Kızılötesi)
TDR	Time-Domain Reflectometry (Zaman Alanlı Reflektometri)
TGA	Termogravimetrik analiz
TIA	Trans Impedance Amplifier (Gerilime Dönüştürücü Yükselteç)
TTK	Toprak Tayfsal Kütüphanesi
TRİ	Toprak Rutubet İçeriği
TSİ	Toprak Su İçeriği
vis	Visible (Görünür)
vKF	volumetric Karl Fischer

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Tez kapsamında toprak rutubeti ölçümlerinde kullanılan sistemler **5**

Şekil 2.2 Geliştirilen birincil seviye su buharı ölçüm sisteminin blok diyagramı ... **8**

Şekil 2.3 Geliştirilen birincil seviye su buharı ölçüm sistemi **8**

Şekil 2.4 Vakum Etüvü içerisinde kurutmaya bırakılan farklı tiplerde toprak numuneleri **11**

Şekil 2.5 Laboratuvar Rutubet analizörü kurutma başlangıcı **12**

Şekil 2.6 Kalibrasyon sırasında toprak rutubet sensörlerinin yerleşimi (a. Sadece sensör batırılmış, dikey; b. Sadece sensör batırılmış, yatay) **14**

Şekil 2.7 SMT100 ve CS655 Sensörler **14**

Şekil 2.8 Sensörler arası değişkenliği test etmek için kullanılan toprakların bulk yoğunluğunu belirlemek için halka ile toprak çıkarımı aşaması **15**

Şekil 2.9 Yansıma-tabanlı toprak rutubeti ölçüm sistemi **19**

Şekil 2.10 Sistemin çalışma prensibi **20**

Şekil 2.11 T0 toprak türüne ait 0,5 ile 2 mm parçacık boyutuna sahip 11 farklı rutubet değerindeki numunelerin YMTRS ile alınan tayfsal görüntüsü **21**

Şekil 2.12 T0 toprak türüne ait 2 ile 3,15 mm parçacık boyutuna sahip 15 farklı rutubet değerindeki numunelerin YMTRS ile alınan tayfsal görüntüsü **22**

Şekil 2.13 T3 toprak türüne ait 0,5 ile 2 mm parçacık boyutuna sahip 9 farklı rutubet değerindeki numunelerin YMTRS ile alınan tayfsal görüntüsü **22**

Şekil 3.1 Ölçüm sistemi şeması **24**

Şekil 3.2 Ölçüm sistemi **24**

Şekil 3.5 Topraktaki kütlece su miktarına göre 1450 nm'de elde edilen normalize edilmiş sinyalin 970 nm'de normalize edilmiş sinyale oranını gösteren grafik **27**

Şekil 3.6 a) ıslak kağıt numunesine ait 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan görsel histogramı, b) kuru kağıt numunesine ait 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan görsel histogramı **28**

Şekil 3.7 a) 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan ıslak (kütlece %10) toprak numunesine ait görsel histogramı, b) 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan kuru toprak numunesine ait görsel histogramı **28**

Şekil 3.8 Suyun karakteristik soğurma bantları ve kullanılan LED'lere ait dalga boyları **30**

Şekil 3.9 NIR Sensör şeması **32**

Şekil 3.10 Taşınabilir toprak TN sensörüne ait optik fiber yapısı **34**

Şekil 3.11 Taşınabilir toprak TN sensörüne ait prototip **34**

Şekil 3.12 LED Spektrometre sistemi mekanik tasarım düzeni **36**

Şekil 3.13 LED Spektrometre sistemi ve numune yerleşimi **37**

Şekil 3.14 7 farklı dalgaboyuna sahip LED'ler kullanılarak oluşturulan özdeş LED kümeleri **39**

Şekil 3.15 LED'lerin Normalize edilmiş Spektral Güç Dağılımları **40**

Şekil 3.16 LED Kontrol Devresi **42**

Şekil 3.17 Dijital veri toplama sistemine dönüşüm için kullanılan ADS1263 ve Arduino Uno **43**

Şekil 3.18 LED atımı sırasında ADC'de okunan yansıma sinyalinin osiloskop görüntüsü **45**

Şekil 3.19 LED Tabanlı spektrometrenin bilgisayar arayüzü **46**

Şekil 3.20 Sisteme ait çalışma akış şeması **48**

Şekil 4.1 Toprakların farklı boyutlardaki elekler ile ayrıştırılması **49**

Şekil 4.2 Ölçümleri alınan toprak numuneleri **50**

Şekil 4.3 Toprak Numunelerinin Rutubetlendirilmesi **51**

Şekil 4.4 Tek katmanlı sinir ağı modelinde giriş, gizli ve çıkış katmanlarının nöron sayıları ve bağlantı yapısı **57**

Şekil 5.1 Yedi farklı dalga boyuna sahip LED'lere ait beyaz stabilite verilerinin normalizasyonu **62**

Şekil 5.5 T0 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi **64**

Şekil 5.7 T2 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi **65**

Şekil 5.8 T3 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi **66**

Şekil 5.9 T4 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi **66**

Şekil 5.10 1900 nm / 1650 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği **67**

Şekil 5.11 1450 nm / 1650 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği **68**

Şekil 5.12 1450 nm / 1300 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği **68**

Şekil 5.13 970 nm / 1100 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği **69**

Şekil 5.14 1900 nm / 1100 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği **70**

Şekil 5.15 Farklı dalga boyları kombinasyonlarında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği **71**

Şekil 5.16 Farklı dalga boyları kombinasyonlarında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği **71**

Şekil 5.17 Tahmin edilen rutubet değerine göre gerçek rutubet değeri arasındaki fark **72**

Şekil 5.18 Yedi farklı LED kullanıldığında, farklı normalizasyon yöntemleriyle kullanılan farklı modeller için ortalama RMSE değerleri **73**

Şekil 5.20 Herhangi bir normalizasyon uygulanmadan (yani 'none' normalizasyon yöntemi kullanılarak) gprhypr modeli ile 5 LED için elde edilen ortalama RMSE değeri **75**

Şekil 5.22 Herhangi bir normalizasyon uygulanmadan (yani 'none' normalizasyon yöntemi kullanılarak) gprhypr modeli ile 3 LED için elde edilen ortalama RMSE değeri **76**

Şekil 5.23 Normalize edilmemiş verilerle eğitilmiş ve hiperparametreleri optimize edilmiş GPR modeli için, kullanılan LED dalgaboyu sayısına bağlı olarak elde edilen maksimum ve minimum RMSE değerleri **77**

Şekil 5.24 LED sayısı artışının ortalama RMSE değeri üzerindeki etkisi **78**

Şekil 5.25 LED sayısı artışının ve hypr model kullanıp kullanmamanın ortalama RMSE değeri üzerindeki etkisi **78**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Spektrometrenin Teknik Özellikleri **19**
Tablo 5.1 Toprak türlerine göre reflektans kombinasyon sonuçları **67**

ÖZET

FOTODİYOT İLE TOPRAK YÜZEY NEMİ TESPİTİ

Ahmet Harun ATAĞ

Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Toprak nemi, tarımsal üretkenlikten çevresel izleme çalışmalarına kadar birçok alanda kritik bir parametredir. Bu çalışmada, toprak yüzey nemi hızlı, tekrarlanabilir ve invaziv olmayan bir şekilde ölçebilen optoelektronik bir sistem geliştirilmiştir. Sistem; mikrodenetleyici tabanlı bir kontrol birimi, yakın kızılötesi bölgede su moleküllerinin karakteristik soğurma dalga boylarında çalışan ışık kaynakları, termal olarak soğutulmuş bir fotodetektör ve yüksek çözünürlüklü bir analog-dijital dönüştürücü içermektedir. Işık kaynaklarının frekansı, görev döngüsü ve akımı bağımsız olarak ayarlanabilmekte, böylece optik yoğunluk hassas biçimde kontrol edilebilmektedir. Yansıyan ışınlardan elde edilen veriler, yüzey rutubetini tahmin etmek amacıyla geliştirilen bir makine öğrenmesi algoritması ile analiz edilmiştir.

Sistem, hem laboratuvar hem de saha koşullarına uygun olacak şekilde tasarlanmış ve TÜBİTAK Gebze kampüsünden temin edilen beş farklı toprak türü üzerinde test edilmiştir. Numuneler, kuruma kaybı yöntemiyle kalibre edilerek SI izlenebilirliği sağlanmıştır. Yapılan analizlerde, geliştirilen modelin 0,193 RMSE ve 0,998 R^2 değerleriyle yüksek doğrulukta tahmin performansı sergilediği görülmüştür. LED modülasyon algoritması sayesinde sinyal kararlılığı ve ölçüm tekrarlanabilirliği artırılmış, optik bileşenlerin hassas kontrolüyle sistemin güvenilirliği sağlanmıştır.

Petri kabı tabanlı örnekleme yöntemi, taşınabilir ve standartlaştırılmış bir ölçüm platformu sunmuştur. Ayrıca, geliştirilen analiz algoritması sayesinde yansıma verilerinden toprak türü ve tanecik boyutu yüksek doğrulukla sınıflandırılabilmiştir.

Bu çalışma, optik temelli rutubet ölçüm sistemlerinin tarım, çevre bilimi ve malzeme bilimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecekte, sistemin daha geniş spektral aralıklar ve farklı malzeme türleriyle test edilmesi planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: fotodiyot, InGaAs, LED, toprak rutubeti,

ABSTRACT

Soil Surface Moisture Detection Using Photodiode

Ahmet Harun ATAĞ

Department of Electronics and Communications

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Soil moisture is a critical parameter in many areas, from agricultural productivity to environmental monitoring studies. In this study, an optoelectronic system capable of measuring soil surface moisture quickly, reproducibly, and non-invasively has been developed. The system includes a microcontroller-based control unit, light sources operating in the near-infrared region at the characteristic absorption wavelengths of water molecules, a thermally cooled photodetector, and a high-resolution analog-to-digital converter. The frequency, duty cycle, and current of the light sources can be adjusted independently, allowing for precise control of optical intensity. Data obtained from reflected light rays were analyzed using a machine learning algorithm developed to predict surface moisture. The system was designed to be suitable for both laboratory and field conditions and tested on five different soil types obtained from the TÜBİTAK Gebze campus. Samples were calibrated using the drying loss method to ensure SI traceability. The analyses showed that the developed model exhibited high-accuracy prediction performance with RMSE of 0.193 and R^2 of 0.998. Signal stability and measurement repeatability were improved thanks to the LED modulation algorithm, and the reliability of the system was ensured by precise control of the optical components. The Petri dish-based sampling method provided a portable and standardized measurement platform. In addition, soil type and particle size could

be classified with high accuracy from reflectance data thanks to the developed analysis algorithm. This study demonstrates that optical-based moisture measurement systems can be widely used in fields such as agriculture, environmental science, and materials science. In the future, it is planned to test the system with wider spectral ranges and different material types.

Keywords: InGaAs, LED, soil moisture, photodiode

1
GİRİŞ

Dünya çapında etkili olan küresel ısınmanın giderek artması ile birlikte tarımsal uygulamaların verimliliğinin artırılmasına yönelik ihtiyaç da artmaktadır. Toprak verimliliği ile sulama suyunun yönetimi tarımsal üretkenliği etkileyen çeşitli faktörler arasında kritik öneme sahiptir. Sulama suyu kullanımının yönetimi, akıllı tarım (Oğuztürk, 2025) uygulamalarının temel unsurlarından biri hâline gelmiştir. Çoğu su yönetimi politikası, ürün verimini korurken sulama kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasını hedeflemektedir.

Genel olarak sulama zamanlaması hasat edilecek ürüne, toprağın yapısına ve toprak su içeriğinin izlenmesine dayalı yöntemlerle yönetilir. Bu kapsamda özellikle toprağın üst tabakası (topsoil) içindeki toprak rutubetinin ölçülmesi ve korunması üretkenliğin sürdürülebilmesi açısından kritik bileşenler hâline gelmiş ve çözümü için düşük maliyetli, hızlı ve güvenilir toprak verisi elde etme teknikleri üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Bu kapsamda toprak su içeriğinin nicelendirilmesine yönelik çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Marković et al., 2024). Bu yöntemler, Karl Fischer titrasyonu (Zellis et al., 1998) gibi teknikler kullanılarak milligram seviyesindeki toprak numuneleri gibi küçük ölçekli analizlerinden, uydu tabanlı uzaktan algılama yoluyla kilometrekarelik alanları kapsayan geniş ölçekli değerlendirmelere (Ford & Quiring, 2019) kadar uzanmaktadır. Toprak rutubeti su içeriği doğrudan ölçülerek veya parametrelere dayalı olarak dolaylı şekilde ölçülebilir. Dolaylı yöntemlerde tansiyometreler ve alçı bloklarda olduğu gibi su potansiyeli, TDR ve FDR sensörlerde olduğu gibi (Joshi et al., 2024; Kaiser et al., 2025) dielektrik özellikler veya nötron (Cirillo et al., 2021) ve gama ışını (Gaspar et al., 2025) etkileşimleri gibi ilişkili parametreler ölçülebilir. Noktasal ölçekli uygulamada en yaygın kullanılan temaslı ölçüm cihazları farklı toprak derinliklerine yerleştirilen noktasal sensörler olup toprak bilimi ve hidroloji alanlarında (Gu et al., 2021; Mane et al., 2024) geniş ölçüde kullanılmaktadır.

Doğrudan yöntemler arasında kurutma ile kütle kaybı (KKK) (Loss-on-Drying, LoD) tekniği (P. Miao et al., 2014), özellikle laboratuvar ortamlarında en yaygın kullanılan yöntem olup, mevcut standartlar bu yönteme atıfta bulunmaktadır. Organik topraklar için 50 °C (ISO, 1993, 2022), inorganik topraklar için ise 105 °C kurutma sıcaklığı önerilmektedir (ASTM, 2019; ISO, 2001). Ancak KKK yöntemi; gravimetrik laboratuvar rutubet analizörü (GLRA), Karl Fischer titrasyonu, termogravimetrik analiz (TGA) ve geliştirilmiş birincil seviye su buharı ölçüm sistemi (SBÖS) (Atag et al., 2025) ısıtma, kurutma veya kimyasal işlem gerektirmektedir. Bu tür yaklaşımlar zaman alıcıdır ve aynı numune üzerinde tekrarlı ölçümler gerçekleştirilemez. Ayrıca, özellikle organik numunelerde olduğu gibi mikrobiyal aktivite (ISO, 2009), biyokütle ve çeşitliliğin muhafaza edilmesinin gerekli olduğu uygulamalarda kurutma önerilmemektedir. Bu tür amaçlar için, toprağın fizikokimyasal ve biyolojik bütünlüğünü koruyabilmek adına tahribatsız yöntemler tercih edilmektedir.

Tahribatsız teknikler arasında hem laboratuvar hem de arazi koşullarında uygulanabilen optik yöntemler özellikle öne çıkmaktadır. Toprak çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir elektromanyetik etkileşim tekniği olan difüz yansıma spektroskopisine dayalı yakın (proksimal) algılama yaklaşımları, son yıllarda önemli ölçüde ilgi görmüştür.

Görünür–yakın kızılötesi (Vis–NIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölgelerinde çalışan spektroskopik yöntemler; temassız ve hızlı ölçüm, tahribatsız analiz ve renk ile spektral bilgiyi birlikte içeren çok kriterli değerlendirmeler yapılabilmesi gibi çeşitli avantajlar sunarak toprağın kimyasal bileşimine ilişkin bilgiler sağlamakta ve toprak türlerinin sınıflandırılmasını desteklemektedir (Gruszczyński & Gruszczyński, 2022; Shin et al., 2025).

Toprak rutubetinin belirlenmesi için üç ana spektroskopik yaklaşım bulunmaktadır:

1) 350–2500 nm dalga boyu aralığını kapsayan spektrometreler, en yüksek spektral çözünürlüğü sunar; ancak tüm spektral aralığı kapsayabilmek için genellikle birden fazla dağıtıcı eleman ve dedektör dizisi gerektirirler. Bu durum, sistemlerin ağır, hacimli ve maliyetli olmasına yol açar(McGuirk & Cairns, 2024).

2) Hiperspektral görüntüleme sistemleri, yüzey rutubetine ilişkin uzaysal olarak çözümlenmiş bilgi sağlamakla birlikte; daha düşük spektral çözünürlük, büyük boyut ve ağırlık, SWIR bölgesinde düşük sinyal-gürültü oranı ve özel donanım ile gelişmiş çok değişkenli analizler gerektiren büyük veri hacimleri gibi dezavantajlara sahiptir.
3) Görünür–NIR–SWIR bölgesinde çalışan multispektral sensörler, spektrometreler ve hiperspektral cihazlara kıyasla daha düşük spektral çözünürlük sunsalar da çok daha ekonomik, kompakt, hafif ve enerji açısından verimli olmalarıyla öne çıkmakta ve çok daha az yoğun veri işleme gerektirmektedir. Bu avantajlar, multispektral sensörlerin hassas tarımda toprak rutubeti tahmini, atık ayrıştırma ve malzeme sınıflandırması gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır(Nocita et al., 2015).

Modern multispektral sistemlerde LED'ler, görünür bölgeden uzak NIR bölgesine kadar uzanan geniş bir dalga boyu aralığında bulunabilmeleri nedeniyle birincil aydınlatma kaynakları hâline gelmiştir. Bu durum, LED tabanlı sensörlerin uygulamaya özgü dalga boylarına göre uyarlanabilmesini mümkün kılmakta ve dar bantlı LED yayıcıları güvenilir ve maliyet etkin bir seçenek hâline getirmektedir. Ayrıca LED'ler ışımalarının modüle edilebilmesine olanak sağlamaları sayesinde ortamdan saçılan ışığın bastırılması ve sinyal-gürültü oranının iyileştirilmesi açısından oldukça uygundur(Nasibov et al., 2014). Bunun yanı sıra, uyumsuz (incoherent) aydınlatma sağlamaları sayesinde, lazerlerle ilişkili benek (speckle) artefaktlarını ortadan kaldırarak toprak gibi pürüzlü ve heterojen yüzeylerin ölçümünde önemli bir avantaj sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, sınırlı sayıda NIR LED ile tek bir fotodedektörün birlikte kullanıldığı, hem laboratuvar hem de arazi koşullarında kullanılabilecek pratik ve dayanıklı, kompakt ve maliyet etkin bir spektrometre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda mevcut NIR yansıma tabanlı sensörlerin kısıtları ve tasarım gereksinimleri dikkate alınmıştır. Sistemde, NIR bölgesindeki suya özgü soğurma ve yansıma özelliklerini yakalayacak şekilde seçilmiş yedi farklı dalga boyunda LED kullanılmıştır. Önceden belirlenmiş dalga boylarında yansıma ölçümleri yapılmasına olanak tanıyarak ayrık yansıtırlık spektrumları elde edilmesini sağlar;

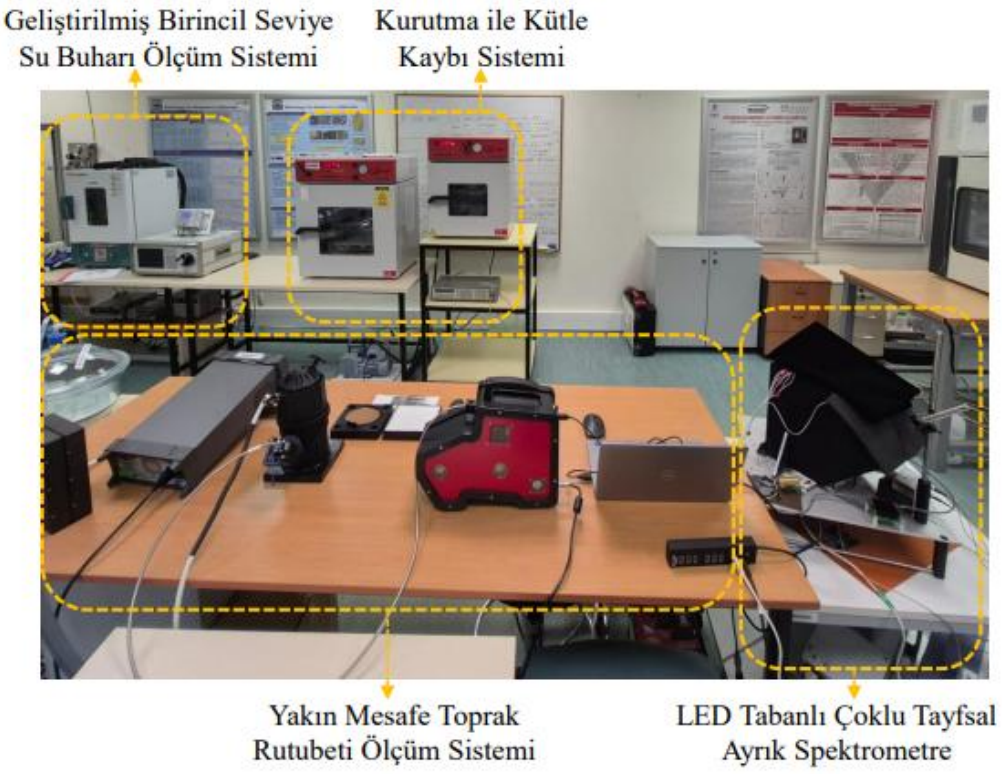
bu yaklaşım ayrık spektroskopi (discrete spectroscopy) olarak adlandırılmakta; geleneksel spektroskopik ve hiperspektral sistemlere kıyasla hızlı ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır.

Mevcut spektral bilginin sınırlı olması nedeniyle performansta bir miktar düşüş beklenmesine rağmen, kullanılan makine öğrenmesi tekniklerinin entegrasyonu ile güvenilir ve doğru toprak rutubeti tayinlerini mümkün kılmakta ve böylece karmaşık enstrümantasyonlarla rekabet edebilir bir çözüm hâline gelmektedir. Genel yapılandırma ayrıca, toprak yansıma ölçümlerine yönelik güncel standartlar ve protokollerle de uyumludur.

Tez kapsamında Bölüm 2'de toprak rutubeti ölçümleri kapsamında kullanılan mevcut sistemlerin genel tasarımları ve prensipleri özetlenmiştir. Bölüm 3'te ilgili ölçümler için önerilen LED-tabanlı çoklu tayfsal spektrometre tasarımı ve fotodiyot tabanlı algılama tanımlanmıştır. Bölüm 4'te toprak numunelerinin hazırlanması ve analiz için kullanılan makine öğrenmesi teknikleri açıklanmıştır. Bölüm 5'te ise elde edilen deneysel sonuçların analizi ve sistemin doğrulanması sunulmuştur.

2
RUTUBET ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Katı bir numune içerisindeki "su içeriği" ve malzemenin “rutubet” miktarı sıklıkla karıştırılan ancak metrolojik olarak ayırt edilmesi kritik olan iki ana parametredir. Su içeriği kütle veya hacim fraksiyonu cinsinden su moleküllerinin miktarını ifade ederken, rutubet genel olarak bir malzeme içinde bulunan su ve diğer uçucu maddelerin bileşimini ifade eder. Bu parametrelerin ayrımı, organik kökenli malzemeler için özellikle önemlidir. Şekil 2.1’de laboratuvarımız bünyesinde rutubet ve su içeriği ölçümleri kapsamında kullanılan cihaz ve sistemler gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Tez kapsamında toprak rutubeti ölçümlerinde kullanılan sistemler

2.1 Geliştirilmiş Birincil Seviye Su Buharı Ölçüm Sistemi (SBÖS)

Bu tez kapsamında LED-tabanlı çoklu tayfsal spektrometreye ek olarak farklı toprak türlerinden bağımsız olarak toprak su içeriğini (TSİ) doğru şekilde belirleyebilen birincil seviye su buharı ölçüm sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Geliştirilen sistem, ısıtma sırasında numuneden çıkan su buharının kontrollü bir kuru gaz akışı ile taşınması ve yüksek hassasiyetli bir higrometre ile izlenmesi prensibine dayanmaktadır.

Sistemde kullanılan ana bileşen, numuneyi dış ortamdan tamamen izole eden hermetik olarak kapatılmış sızdırmaz numune tutucudur (SNT). Toprak numunesi bu haznenin içine yerleştirildikten sonra, belirlenen debide kuru gaz (hava veya azot) SNT üzerinden geçirilir. Gaz, numunenin içindeki su molekülleri ve uçucuları taşıyarak çıkış hattına ulaştırır ve sisteme entegre edilmiş yüksek hassasiyetli bir higrometre tarafından sürekli izlenir. Bu sayede gaz nemi ve akış hızı bilgileri birleştirilerek numuneden uzaklaştırılan toplam su miktarı yüksek doğrulukla hesaplanabilmektedir.

Kurutma sürecini hızlandırmak ve tüm suyun numuneden uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla SNT, sıcaklığı hassas biçimde kontrol edilen bir ısıtma haznesine yerleştirilmiştir. Numune, belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu süreç boyunca numunedeki suyun tamamı buharlaşarak gaz akışıyla taşınır. SBÖS yöntemi yalnızca su moleküllerini ölçtüğünden, organik uçucu bileşiklerin varlığı TSİ hesaplamasını etkilememektedir. Şekil 2.2'de geliştirilen birincil seviye su buharı ölçüm sisteminin blok diyagramı gösterilmiştir.

Aynı numunenin toprak rutubet içeriği (TRİ) değeri ise karşılaştırma amacıyla kurutma ile kütle kaybı (KKK) (Loss-on-Drying) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, numunenin SBÖS ölçümünden önceki ve sonraki kütleleri karşılaştırılmış, böylece kurutma kaynaklı toplam kütle kaybı hesaplanmıştır. Böylece TSİ (yalnızca su molekülleri) ile TNİ'nin (su + uçucular) sayısal olarak ayırt edilmesi mümkün olmuştur.

Sistem performansı farklı toprak türlerinde test edilmiş ve geliştirilen SBÖS'ün özellikle organik madde içeriği yüksek üst topraklarda (3–30 cm) TSİ ile TRİ arasındaki farkları ortaya koyabildiği görülmüştür. Yapılan ayrıntılı belirsizlik

analizi, sistemin kuru numune kütlesine göre %0,2 düzeyinde bir ayırt etme hassasiyetine sahip olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen birincil seviye SBÖS sistemi, hem doğruluk hem de izlenebilirlik açısından mevcut termogravimetrik rutubet analizörleri ve KKK tabanlı yöntemlerle karşılaştırılmış ve üstün performans sergilemiştir.

2.1.1 Sistem Tasarımı

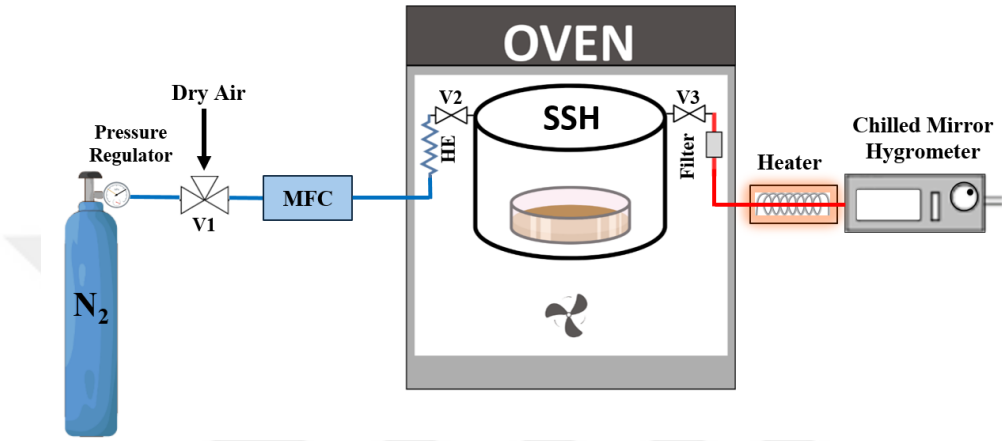
Geliştirilen sistem, temel olarak su buharı ölçüm alt sistemine dayanmaktadır. Bu yapı içinde kuru gaz (hava veya azot), bir Swagelok tipi vana (V1) aracılığıyla seçilmekte ve sırasıyla giriş ölçüm bloğuna, ardından sıcaklık kontrollü bir fırının (Thermomac FDO30) içine yerleştirilen SNT'ye yönlendirilmektedir. Numune sıcaklığı ortam sıcaklığından 300 °C'ye kadar ayarlanabilmekte olup, bu kontrol esnek silikon rezistans ısıtıcılar kullanılarak sağlanmaktadır. Gaz debisi ise yüksek hassasiyetli bir kütlesel akış kontrolörü (MFC2; Bronkhorst EL-Flow Select) ile tam olarak düzenlenmektedir.

SNT'den çıkan ve numuneden taşınan su buharını içeren gaz akışı, yoğuşmanın önlenmesi amacıyla 60 °C'de tutulan çıkış ölçüm bloğundan geçirilir. Bağıl nem ve çiğlenme/buzlanma noktası sıcaklığı, SI izlenebilir kalibrasyona sahip yüksek hassasiyetli bir soğutmalı ayna higrometresi (MBW 373-H, İsviçre) ile ölçülmektedir. Higrometre, −40 °C ile +60 °C arasında çalışmakta olup, kirlenmeyi önlemek amacıyla her 30 dakikada bir otomatik ayna ısıtma fonksiyonuna sahiptir. SNT ile higrometre arasındaki tüm bağlantı hatları, olası yoğuşmayı engellemek için 65 °C'de termal olarak kontrol edilmektedir.

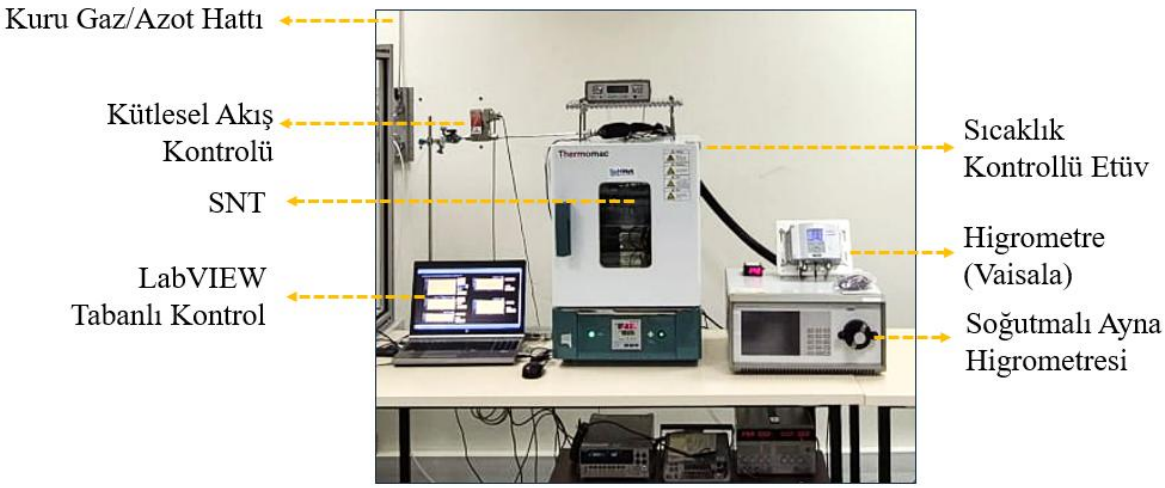
Sıcaklık izleme alt sistemi, altı adet PT100 direnç termometresi (Metronik, Türkiye) ile sağlanırken, gaz basıncı Sensotec basınç dönüştürücüleri ile ölçülmektedir. Sisteme giren kuru gazın nemi ve sıcaklığı ise Vaisala HMT315 higrometresi tarafından takip edilmektedir. Sistem kontrolü ve veri toplama işlemleri, LabVIEW ortamında geliştirilen özel bir yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmekte olup, Vaisala, MFC2 ve MBW cihazlarından alınan tüm sinyaller kaydedilmekte ve numuneden uzaklaştırılan toplam su kütlesi belirsizlik

analiziyle birlikte hesaplanmaktadır. Şekil 2.3'te geliştirilen birincil seviye su buharı ölçüm sistemi gösterilmiştir.

Bu yapılandırma sıcaklık, gaz akış hızı ve basınç gibi kontrol edilen koşullar altında doğru, tekrarlanabilir ve izlenebilir su içeriği ölçümleri yapılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 2.2 Geliştirilen birincil seviye su buharı ölçüm sisteminin blok diyagramı



Şekil 2.3 Geliştirilen birincil seviye su buharı ölçüm sistemi

2.1.2 Yöntemin Kuramsal Temeli

SBÖS ölçümleri sırasında numuneden uzaklaştırılan toplam su kütlesi, sistemden çıkan nemli gaz akışı üzerinden hesaplanmıştır. Toplam su kütlesinin belirlenmesi kavramsal olarak basit görünmesine rağmen, nemli bir gaz akışının mutlak neminin doğrudan ölçülmesi pratik olarak mümkün değildir. Bu nedenle literatürde yaygın

olarak kullanılan dolaylı yöntem tercih edilmiştir: gazın çiy-noktası sıcaklığı (veya bağıl nemi) ölçülmekte, bu ölçüm değerleri kullanılarak mutlak nem hesaplanmaktadır (Atag et al., 2025).

Bu yöntem, geliştirilen SBÖS sistemine eksiksiz şekilde entegre edilmiştir. Çalışma sırasında kuru taşıyıcı gaz önce O-ring ile sızdırmaz hâle getirilmiş SNT içerisine oda sıcaklığında giriş yapmaktadır. Gaz, SNT'nin ısıtılmış bölgesinden geçerken deney için gerekli işletme sıcaklığına ulaşır. Bu süreçte gaz, numuneden açığa çıkan su buharını bünyesine alır. Nem yüklenen gaz akışı daha sonra SNT'den çıkarak çiy-noktası ölçüm ünitesine yönlendirilir.

Gaz çıkışındaki çiy-noktası sıcaklığının sürekli olarak izlenmesi ve bu değerin mutlak neme dönüştürülmesi sayesinde, sistem hem anlık su salım hızını hem de ısıtma döngüsü boyunca numuneden uzaklaştırılan toplam su miktarını güvenilir biçimde hesaplayabilmektedir. Bu yaklaşım, yüksek sıcaklık koşullarında doğrudan nem ölçümünün mümkün olmadığı durumlarda, izlenebilir ve güvenilir bir nem tayini yöntemi sunmaktadır.

2.2 Akış Tabanlı KKK (aKKK)

SBÖS sisteminin çalışma prensibi, numunenin toplam su içeriğinin, yüksek sıcaklıklarda kuru gaz akışı altında kurutularak belirlenmesine dayanmaktadır. Kurutma işlemi tamamlandığında numunenin tamamen kuruduğu varsayılır ve kütledeki azalma, numunenin rutubeti içeriğine karşılık gelir. Bu yaklaşım, geleneksel KKK yönteminin temel prensibiyle büyük ölçüde örtüşmektedir. Ancak aradaki temel fark, SBÖS'ün kurutmayı tek bir döngüde gerçekleştirmesi, buna karşılık geleneksel KKK yönteminde kuru kütle sabitlenene kadar birden fazla kurutma–tartma döngüsünün gerekli olmasıdır. Ayrıca KKK yönteminde rutubet uzaklaştırma doğal hava konveksiyonu veya vakum ile sağlanırken, SBÖS sisteminde yönlendirilmiş bir gaz akışı kullanılmaktadır. Bu tezde bu yaklaşım, geleneksel KKK tekniğinden ayırt edilebilmesi adına "aKKK" olarak adlandırılmıştır.

SNT'nin boş kütlesi yaklaşık 2800 g olduğundan ve hassas analitik teraziler bu kadar yüksek kütle üzerine binen çok küçük kütle değişimlerini yeterli doğrulukta

tespit edemediğinden bu yapının doğrudan aKKK ölçümlerinde kullanılması pratik değildir. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, numuneyi tutmak için SNT içerisine daha küçük cam kaplar—Petri kapları veya laboratuvar vialleri—yerleştirilebilmektedir. Bu tezde ağırlıklı olarak önceden kurutulmuş Petri kapları kullanılmıştır. Petri kabının boş kütlesi m_{pkb} ile ıslak numunenin kütlesi $m_{ıslak}$ ve kurutulmuş numunenin kütlesi m_{kuru}, analitik terazi kullanılarak yüksek doğrulukla ölçülmüştür. Bu ölçümler, standart formüller kullanılarak rutubet oranının doğrudan hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

$$\Theta_{kuru} = \frac{M_{ıslak} - M_{kuru}}{M_{kuru} - m_{pkb}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Theta_{ıslak} = \frac{M_{ıslak} - M_{kuru}}{M_{ıslak} - m_{pkb}} \times 100\% \quad (2)$$

Burada, $M_{ıslak} = m_{ıslak} + m_{pkb}$ başlangıçta ölçülen kütleyi, $M_{kuru} = m_{kuru} + m_{pkb}$ ölçüm sonunda kaydedilen kütleyi temsil etmektedir.

2.3 Kurutma ile Kütle Kaybı (KKK)

KKK yöntemi, gravimetrik katı madde rutubet içeriğini ölçmek için kullanılan basit bir tekniktir ve birçok malzeme ve uygulama için kapsamlı şekilde belgelenmiştir. Süreç üç temel adımdan oluşur: İlk olarak ıslak toprak numunesinin kütlesi $m_{ıslak}$ tartılır; ikinci olarak numunedeki rutubeti gidermek için numune kurutulur; son olarak ise kurutulmuş toprağın kütlesi m_{kuru} tartılır. KKK yöntemiyle belirlenen gravimetrik toprak rutubet içeriği, kuru kütleye (dry basis) veya yaş kütleye (wet basis) göre bir yüzde olarak ifade edilebilir (O'Kelly, 2004, 2005).

$$\Theta_{kuru} = \frac{\Delta}{m_{kuru}} \text{x} 100\% = \frac{m_{ıslak} - m_{kuru}}{m_{kuru}} \text{x} 100\% \quad (3)$$

$$\Theta_{ıslak} = \frac{\Delta}{m_{ıslak}} \text{x} 100\% = \frac{\Delta}{\Delta + m_{kuru}} \text{x} 100\% \quad (4)$$

Burada $\Delta = m_{ıslak} - m_{kuru}$ su kütlesini göstermektedir. Bu projede yaş kütleye göre (wet-basis) tanım kullanılmıştır. Genellikle yerinde (*in situ)* toprak rutubeti ölçümlerinde kuru kütleye göre (dry-basis) yaklaşım daha yaygın olarak tercih edilir. Bunun nedeni, birçok *in situ* nem sensörünün—örneğin TDR ve kapasitif sensörler, nötron probları ve gama tabanlı cihazlar—toprak su

içeriğini (TSİ) hacimsel olarak ölçmesidir; yani su hacminin ıslak toprak hacmine oranı (cm^3/cm^3). Kütle bazlı TSİ hesaplaması ise hem suyun belirli sıcaklıktaki yoğunluğunu hem de toprağın yoğunluğunu bilmeyi gerektirir; burada toprak yoğunluğu, kuru kütlenin ıslak hacme oranı olarak tanımlanır.

Farklı kurutma teknikleri kullanılabilir. Bu çalışmada KKK ölçümleri vakum etüvü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığından 200 °C'ye kadar çalışan bilgisayar kontrollü bir vakum etüvü (BINDER VD 53) toprak numunelerini kurutmak için kullanılmıştır. Şekil 2.4'te KKK ölçümleri kapsamında kullanılan vakum etüvü ve içerisinde kurutmaya bırakılan toprak numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Vakum Etüvü içerisinde kurutmaya bırakılan farklı tiplerde toprak numuneleri

2.4 Gravimetrik Laboratuvar Rutubet Analizörü

7.21 μm dalga boyunda çalışan bir kızılötesi ısıtıcıyla donatılmış MA 60.3Y laboratuvar rutubet analizörü (RADWAG, Polonya) kullanılmıştır. Cihaz, 90 mm çapında ve 8 mm yüksekliğinde dairesel, alüminyum bir numune kabına sahip yüksek hassasiyetli bir terazi gibi çalışmakta olup, aynı zamanda numuneleri kızılötesi yayıcı ile kurutarak 60 g'a kadar olan numuneleri 0.1 mg hassasiyetle tartabilmektedir. Kurutma sıcaklığı 50 ile 180 °C arasında, 1 °C'lik adımlarla ayarlanabilmektedir (Arezou et al., 2020).

Analizör, ısıtma sırasında kütle değişimlerini sürekli izler ve rutubet içeriğini dahili algoritmasıyla hesaplar. Kurutma sürecinde, anlık kuruma hızı %0,01 dk^{-1} hassasiyetle görüntülenir. Tam kuruma, otomatik modda kütlenin en az 300 saniye boyunca 1 mg içinde sabit kalmasıyla doğrulanır. Bu yöntem, 10–50 g arasındaki numuneler için %0,1 hassasiyetle rutubet tayinine olanak sağlar ve özellikle toprak testleri için uygundur. Bu tezde, LED tabanlı spektroskopik ölçümler öncesi toprak numunesinin rutubet tahmininin ivedi şekilde belirlenmesi gerektiği durumlarda bu cihaz kullanılmıştır. Şekil 2.5'te laboratuvar bünyesinde kullanılan rutubet analizörü gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Laboratuvar Rutubet analizörü kurutma başlangıcı

2.5 Noktasal Ölçekli Sensörler

2.5.1 İzlenebilirlik Zinciri

Hacimsel su içeriğinin göstergesini gösterdiği varsayılan nokta ölçekli sensörler, karşılaştırma yoluyla kalibrasyon ile izlenebilir hale getirilmiştir. Böyle bir çalışmada hem su hacminin hem de toprak hacminin izlenebilir bir ölçümünün elde edilmesi gereklidir. Su hacmi, suyun yoğunluğu biliniyorsa su kütlesi ölçümlerinden elde edilebilir. Suyun yoğunluğu genellikle 1 g/cm3 olarak alınır (International Atomic Energy Agency, 2008). Bu, laboratuvar sıcaklıklarında serbest su yoğunluğuna (0,997 g/cm3) (H. Betting & F. Spieweck, 1990) yakındır. Ki bu değerin toprak gözeneklerinde bulunan su yoğunluğu aralığının alt ucunda

olabileceği gösterilmiştir (Zhang & Lu, 2018). Su kütlesi izlenebilirliği, geliştirilmiş SBÖS ve volumetrik Karl Fischer (vKF) cihazları ile alınan ölçümlere ve bu ölçümlere ait laboratuvarlar arası karşılaştırmasına ve 4. bölümde sunulan doğrulanmış KKK, aKKK ve yakın mesafe toprak rutubeti ölçüm sistemi kullanımına dayanmaktadır. Toprak hacmi, ISO 11272 (ISO, 2017) 'de standartlaştırılan toprak silindir halka (core ring) yöntemi ve negatif alan (negative space) yöntemlerinde kullanılan ekipman ve ölçüm cihazlarının SI izlenebilir kalibrasyonu yoluyla izlenebilir hale getirilebilir.

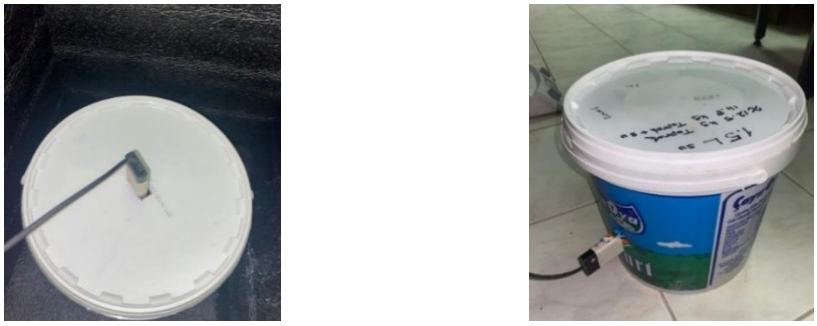
2.5.2 Kalibrasyon Prosedürleri

Kalibrasyon için toprak, araziden uygun koşullarda toplanır ve laboratuvar ortamında kurutulur. Kurutulmuş toprak, kalibrasyon için kullanılacağından çim, taş, kök ve diğer unsurları uzaklaştırmak için istenilen parçacık boyutuna göre uygun elekler kullanılarak elenir. Toprak topakları, elekten geçişi sağlamak için hafifçe ezilebilir.

2.5.3 Sensörler Arası Varyasyon

Rutubet değeri ve hacim yoğunluğu hassas şekilde tespit edilmiş istenilen toprak tipine sahip özel olarak hazırlanmış toprak örnekleri kullanılarak sensörler arası değişkenlik testleri yapılmıştır. Örnekler, homojenizasyon ve stabilizasyonu sağlamak için kontrollü bir ortamda bir hafta boyunca saklanmıştır. Toplamda %5 ila %40 arasında değiştiği gravimetrik olarak belirlenen çeşitli rutubet seviyelerinde yaklaşık on toprak örneği hazırlanmış ve şartlandırılmıştır.

Her bir toprak rutubet sensörü, bu örneklere en az bir tam gün boyunca daldırılmış ve ölçümler bir dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Sensörler Şekil 2.6'da gösterildiği gibi toprağa yerleştirilmiş ve veri toplama tüm testlerde aynı prosedürü izlemiştir. CS650 sensörleri için sonuçlar %2'lik farklarla iyi bir tutarlılık göstermiştir. Buna karşılık, SMT100 sensörleri yaklaşık %7'lik bir aralığı kapsayacak şekilde daha yüksek değişkenlik göstermiştir.



a b

Şekil 2.6 Kalibrasyon sırasında toprak rutubet sensörlerinin yerleşimi (a. Sadece sensör batırılmış, dikey; b. Sadece sensör batırılmış, yatay)

Aynı toprak örnekleri üzerinde aynı sensörler kullanılarak daha fazla deney yapılmıştır. Bu işlemde, bir sensör bir günlük veri alımının ardından topraktan çıkarılmış ve aynı koşullar altında tekrar suya batırılmıştır. CS650 sensörleri yine istikrarlı ve tekrarlanabilir sonuçlar gösterirken, SMT100 sensörleri tekrarlanan ölçümler arasında önemli değişiklikler göstermiştir. Bu değişkenlik, öncelikle toprak-sensör arayüzündeki, suya batırma derinliğindeki ve kullanım şeklindeki farklılıklara atfedilmiştir.

Ek olarak yalnızca algılama alanı toprağa daldırıldığında ve hem algılama alanı hem de elektronik blok tamamen daldırıldığında olmak üzere iki farklı konfigürasyon altında testler yapılmıştır. Her iki durumda, SMT100 sensörlerinin ölçümler arası değişkenliği %5'i aşmıştır. Şekil 2.7'de çalışma kapsamında kullanılan SMT100 ve CS655 sensörler gösterilmiştir.



Şekil 2.7 SMT100 ve CS655 Sensörler

2.5.4 Hacim Yoğunluğu Hesabı

Hacimsel yoğunluk belirlemesi için, uzunluğu 19,73 mm, çapı 15,98 mm ve hacmi 3,96 cm^3 olan bir halka (E16) kullanıldı. Sıkıştırma uygulanmadan halka ilgili toprağa çakılarak, halkanın içine toprak numunesinin dolması sağlanmış ve hacim bozulmadan her toprak türünden toplanmıştır. Şekil 2.8'de bulk yoğunluğu belirlenmesi kapsamında toprak toplama aşaması gösterilmiştir. Toplanan hacimsel toprak örnekleri daha sonra Radwag MA 60.3Y rutubet analizörü kullanılarak kurutulmuş ve hacimsel yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.8 Sensörler arası değişkenliği test etmek için kullanılan toprakların bulk yoğunluğunu belirlemek için halka ile toprak çıkarımı aşaması

2.5.5 Sensör Çeşidine Göre Farklılık

Farklı ölçüm prensiplerine sahip sensörlerin doğruluğunu değerlendirmek ve ölçümü bozabilecek faktörleri belirlemek için değişen su içeriği ve hacim yoğunluğuna sahip çeşitli toprak türleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

SMT100, yüksek frekanslarda dielektrik sabitini ölçen Frekans Alanı Yansıma Ölçümü (FDR) prensibiyle çalışır. Bu yöntem, geleneksel kapasitif sensörlere kıyasla tuzluluk ve sıcaklığın sonuçlar üzerindeki etkisini önemli ölçüde azaltır.

CS655 sensörleri Zaman Alanı Yansıma Ölçümü (TDR) kullanır ve hacimsel su içeriğine ek olarak toprak sıcaklığını ve elektriksel iletkenliği de ölçer. Bu ek parametreler çevresel etkiyi telafi etmeyi sağlayacak şekilde diğer sensörlerin aksine EC'yi ölçebilmeleri özellikle önemlidir. Bu çalışmada, bireysel sensörlerin çıktıları, referans yöntem olarak kullanılan gravimetrik rutubet belirleme yöntemiyle karşılaştırılmış, toprak dokusunun ve yoğunluğunun ölçüm doğruluğu üzerindeki etkisinin değerlendirilmiştir. Daha yüksek organik madde ve kil içeriğine sahip topraklarda sonuçların değişkenliğinin arttığı gözlenmiştir. Bu

çalışma ile ayrıca üretici fabrika kalibrasyonunun yeterliliği değerlendirilmiştir. Sonuç olarak sensörlerin sıcaklığa karşı bir miktar hassasiyet gösterdiği ve her ölçümden önce en az 10 dakikalık bir stabilizasyon süresi gerektirdiği görülmüştür. Bu aşamada gerekli süre sağlanmadan ölçüm alınması önemli sapmalara yol açmıştır. Ayrıca, sensörler ortamın tuzluluğundan farklı derecelerde etkilenmiştir. Yalnızca CS655 sensörler entegre EC ölçümü sayesinde daha iyi veri yorumlamasına olanak tanımıştır. Pratik saha kullanımında, TDR ve FDR teknolojilerine dayalı sensörlerin değişen koşullarla daha iyi başa çıktıkları ve güvenilir oldukları gözlenmiştir (Ahmet Harun ATAĞ et al., 2025).

2.6 Görünür–Yakın Kızılötesi (Vis-NIR) aralığında fiber-kuplajlı spektrometrelere dayalı taşınabilir transfer standardı – Yakın Mesafe Toprak Rutubeti Sensörü (YMTRS)

Görünür–Yakın Kızılötesi (VIS–NIR) ve Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR) aralıklarındaki spektroskopik teknikler, temassız, hızlı ve tahribatsız toprak analizine olanak tanıyarak hem renk hem de spektral veriler üzerinden karmaşık analizlerin gerçekleştirilebilmesinde kolaylık sağlamıştır. Bu yöntemler, toprağın kimyasal bileşimine ilişkin kritik bilgiler sunmakta, doğru sınıflandırmayı mümkün kılmakta, İHA, uydu gibi araçlardan uzaktan büyük ölçekli algılama ile küçük ölçekli yakından algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Küresel toprak tayfsal kütüphaneleri uzaktan algılama teknikleriyle birlikte günümüzde toprak yüzey haritalamasında yaygın olarak kullanılmakta; dinamik süreçlerin izlenmesini mümkün kılarak toprak bozunumu ve sağlığının büyük ölçekli izlenmesini desteklemektedir. Organik karbon kaybı, biyolojik çeşitlilik azalması, kirlenme ve asitleşme gibi birçok bozunma süreci, esas olarak yaklaşık 30 cm derinlikteki üst toprak horizonunu etkilemektedir. Bu değişimlerin yüzeyde gerçekleşmesi nedeniyle, yakın mesafe algılamanın önemli giderek artmakta ve zamanında değerlendirme ile yönetim için giderek daha değerli veriler sunmaktadır. Yerel ve küresel girişimler kapsamında dünya genelinde toprak tayfsal kütüphanelerinin oluşturulmasında 3 temel teknoloji aşağıda açıklanmaktadır:

1. VIS–NIR–SWIR spektrometreler, dağıtıcı optikler ve hassas dedektörler sayesinde 350–2500 nm dalga boyu aralığını tek bir taramada kapsayan yüksek çözünürlüklü, spektrometre tabanlı sistemlerdir. Bu sistemler, hem laboratuvar hem de arazi koşullarında toprağın hassas ve tahribatsız kimyasal karakterizasyonunu mümkün kılarak toprak analizinde köklü bir dönüşüm sağlamıştır. Bu tür cihazlardan elde edilen veriler, uzun bir süredir eşlenik spektral ve kimyasal profilleri içeren (bölgesel ve küresel) toprak spektral kütüphanelerinin (SSL) temelini oluşturmaktadır. Ancak sınırlı mekânsal kapsama sahip noktasal ölçümlerle kısıtlıdır.
2. Hiperspektral görüntüleme sistemleri, yüzey rutubeti desenleri dâhil olmak üzere hem mekânsal hem de spektral veri sağlar; buna karşın daha düşük mekânsal çözünürlük, SWIR bandında azalan sinyal-gürültü oranı ve yüksek veri işleme gereksinimleri gibi dezavantajlara sahiptir.
3. Multispektral sensörler, daha düşük spektral çözünürlük sunmalarına rağmen düşük maliyetli, kompakt, hafif, enerji açısından verimli ve veri işleme açısından daha basit olmalarıyla öne çıkar.

Son yıllarda, toprak spektroskopisi araştırma topluluğu tarafından hem laboratuvar hem de arazi koşullarında yerinde (in-situ) yüzey toprak yansıtırlığı ölçümlerinin standardizasyonuna yönelik önemli çabalar harcanmaktadır. Örneğin (Dor et al., 2024) standartlaştırılmış bir protokol önermiş, (E. Ben-Dor et al., 2024) ise toprak yüzeyini bozmadan arazide yansıtırlık verisi elde etmeye yönelik özel bir düzenek tanıtmıştır. Bu yöntemler, IEEE SA P4005 Çalışma Grubu "Standards and Protocols for Soil Spectroscopy" tarafından resmen benimsenmiş ve "The IEEE SA Standard and Protocol Scheme for Soil Spectral Measurement in Both Laboratory and Field Conditions" başlıklı dokümanda kayıt altına alınmıştır.

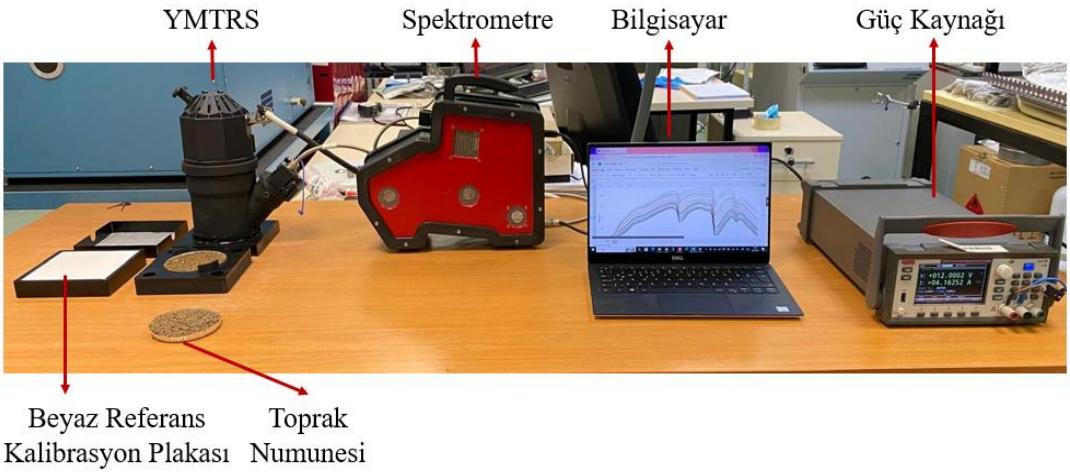
Arazi koşullarında yapılan toprak yansıtırlığı ölçümleri; atmosferik koşullar, güneş açısı, operatör becerileri, protokol ayarları, yüzey heterojenliği ve ölçüm geometrisi gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Bu değişkenliği azaltmak ve yerel ile araziye dayalı TTK'ların küresel bir TTK ile uyumlu şekilde bütünleştirilmesini sağlamak amacıyla, patentli bir toprak probu olan SoilPRO® (ABD Patent Ofisi Seri No. 15407295) bu alanda bir referans (benchmark) cihaz olarak kabul edilmektedir. Herhangi bir fiber-optik spektrometreye bağlanabilen bu taşınabilir cihaz, arazide güçlü bir performans sergilemiştir. Standartlaştırılmış prosedürlere

duyulan gereksinimin bir göstergesi olarak, IEEE Standards Association 2020 yılında VIS–NIR–SWIR spektral aralığının tamamında toprak spektral yansıtırlığı ölçümleri için küresel protokoller oluşturmak amacıyla P4005 Çalışma Grubu'nu kurmuştur.

Bu standartlarda tanımlanan gereklilikler esas alınarak, bu tez kapsamında toprak yansıtırlık verilerine dayalı toprak rutubeti ölçümleri için yeni sistemler başarıyla geliştirilmiş, test edilmiş ve SI izlenebilirliği sağlanarak kalibre edilmiştir. Sistem, IEEE P4005 protokolü ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır ve hem laboratuvar hem de arazi koşullarında doğrulanmıştır. Transfer Standard spektrometresi; görünür, NIR ve SWIR bölgelerinde toprak yansıtırlığına dayalı olarak yüzey toprak rutubetinin doğru biçimde değerlendirilecek, diğer uzaktan algılama ve yakın mesafe algılama sensörlerinin kalibrasyonu için bir transfer standardı olarak hizmet verecek, laboratuvar toprak rutubeti ölçüm rutinlerine entegre edilebilecek, arazi ölçümleri için taşınabilir olacak şekilde tasarlanmıştır.

Ayrıca toprak spektral verilerinin üzerindeki rutubet etkisinin giderilmesi veya düzeltilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, toprak özelliklerinin daha doğru tahmin edilmesini sağlamış ve toprak spektral kütüphanelerinin geliştirilmesini desteklemiştir. Bu hedef, Şekil 2.9'da gösterilen sistemde başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem; yüksek hassasiyetli bir spektrometreye dayanarak tek bir cihaz içerisinde 350 nm–2500 nm arasındaki tam spektral aralığı kapsamaktadır. IEEE Standards Association P4005 Çalışma Grubu gereklilikleriyle tamamen uyumludur.

Birincil seviye toprak su buharı ölçüm referans sistemine izlenebilir biçimde SI birimleriyle kalibre edilebilmektedir. Ayrıca sağlam ve taşınabilir bir yapıya sahip olup, tek bir kişi tarafından kolayca taşınabilmekte ve uzun süreli arazi ölçümlerine imkân tanımaktadır.



Şekil 2.9 Yansıma-tabanlı toprak rutubeti ölçüm sistemi

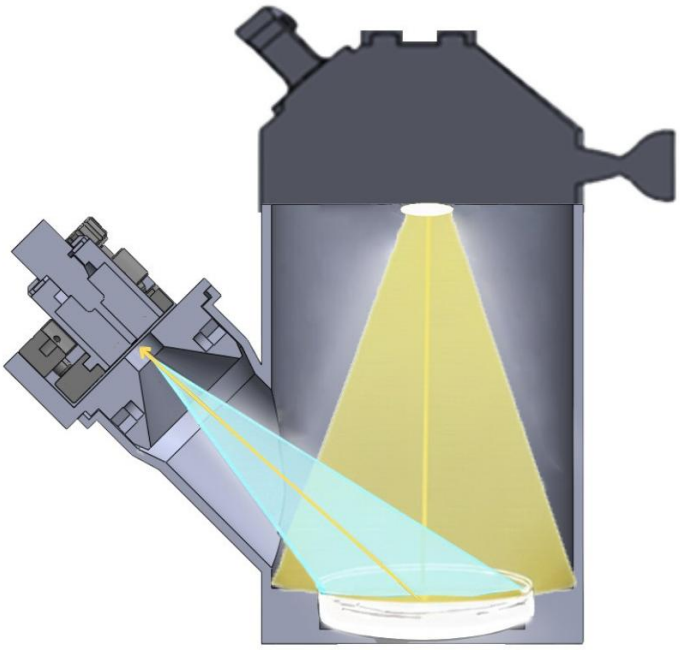
Sistemde yer alan ölçüm haznesi; kurum bünyesinde 3B yazıcı kullanılarak özel tasarım olarak üretilmiştir. Bir lamba tutucu, bir ölçüm tablası ve kendine ait tutucuya sahip referans beyaz plakasından oluşmaktadır.

Spectral Evolution (ABD) firmasından temin edilen NaturaSpec™ Spektroradyometre modeli spektrometresi, arazi ölçümleri için özel olarak tasarlanmış, ticari olarak temin edilebilen bir VIS–NIR–SWIR cihazıdır. Temel teknik özellikleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Spektrometrenin Teknik Özellikleri

Tayfsal aralık	350-2500 nm
Tayfsal çözünürlük	2,7 nm @ 700 nm 5,5 nm @ 1500 nm 5,8 nm @ 2100 nm
Tayfsal örnekleme bant aralığı (nm)	Veri çıkışı 1 nm aralıklarla alınmıştır 2151 kanal raporlanmıştır
Kalibrasyon	NIST izlenebilir kaynaklar kullanılarak radyans/irradyans ölçümleri için tayfsal ve radyometrik kalibrasyon
Gürültüye eşdeğer ışınım $W/cm^2/nm/sr$ (1,2 m fiber optik)	$0{,}3x10^{-9}$ @ 400 nm $0{,}1x10^{-9}$ @ 1500 nm $2{,}5x10^{-9}$ @ 2100 nm
Minimum tarama hızı	Tarama başına 100 ms
Dalgaboyu tekrar üretilebilirliği	0,1 nm
Dalgaboyu doğruluğu	±0,5 nm bant genişliği
Giriş	1,5 m fiber optik (25° görüş açısı). Opsiyonel ön optikler ve daha uzun fiber optik kablolar mevcuttur.

Lamba tutucu, toprak yüzeyinin homojen biçimde aydınlatılmasını sağlamak amacıyla özel olarak tasarlanmış ve ölçüm haznesine rijit şekilde sabitlenmiştir. Şekil 2.10'da gösterildiği üzere, lambanın önüne yerleştirilen bir difüzör; (i) yansımalı (speküler) yansımaları ortadan kaldırmak için difüz aydınlatma oluşturmak ve (ii) lamba radyasyonunun neden olabileceği doğrudan ısınmaya karşı toprak yüzeyini korumak amacıyla kullanılmaktadır. Sistem, parlak ve üniform bir aydınlatma sağlamak üzere alüminyum reflektör ve difüzör ile donatılmış 25 veya 50 W gücünde tungsten halojen bir lamba kullanmaktadır.



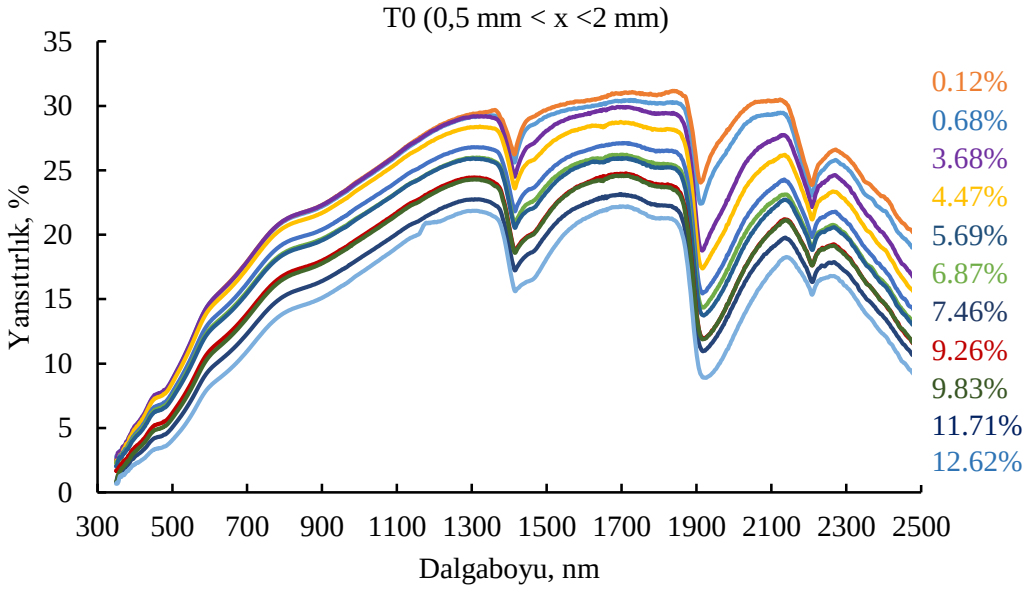
Şekil 2.10 Sistemin çalışma prensibi

Şekil 2.10'da gösterilen geliştirilen sistemin ayırt edici temel özelliği, dikey aydınlatma ile 45° algılama geometrisinin birlikte kullanılmasıdır. Geleneksel tasarımlardan farklı olarak, sistemde mercek veya ayna gibi herhangi bir ön optik eleman kullanılmamıştır. Bunun yerine, toprak yüzeyinden yansıyan ışık doğrudan çıplak bir optik fiber tarafından toplanmakta ve spektrometrenin ölçüm kanalına iletilmektedir.

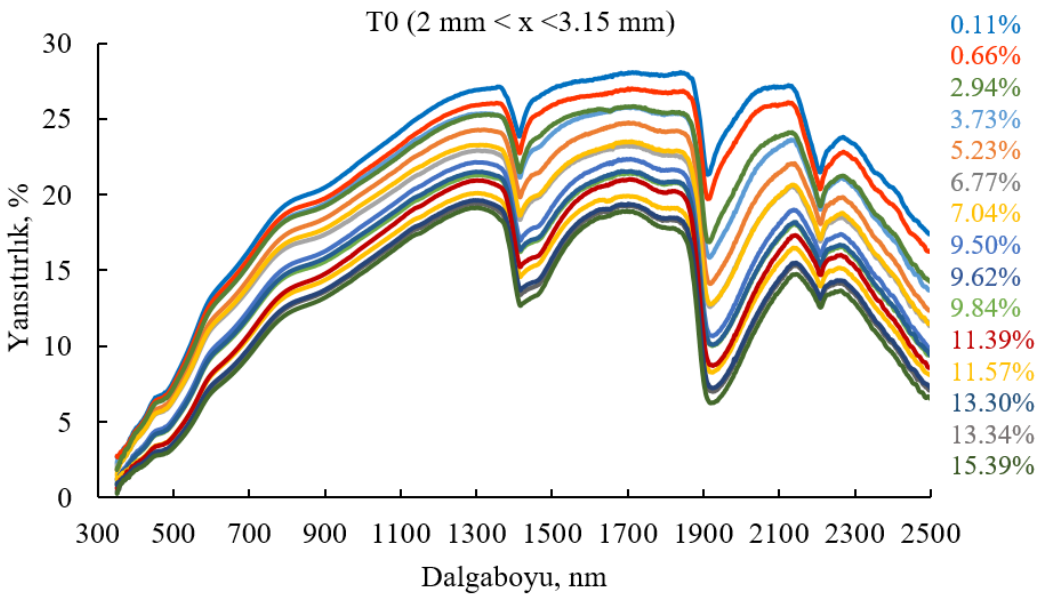
Algılama sisteminin görüş alanı, yalnızca 75 mm çapındaki dairesel bir alandan yansıyan ışığı toplayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapılandırma, standart cam Petri kabı tutucu içerisine yerleştirilen toprak numuneleri kullanılarak sistemin laboratuvar koşullarında kalibre edilmesine ve kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Bu tür Petri kapları, tüm kimya laboratuvarlarında yaygın olarak bulunan, kolaylıkla temin edilebilen ve LoD testleri ile laboratuvar rutubet analizörleri dâhil olmak üzere diğer toprak araştırma uygulamalarında sıklıkla kullanılan sarf malzemeleridir.

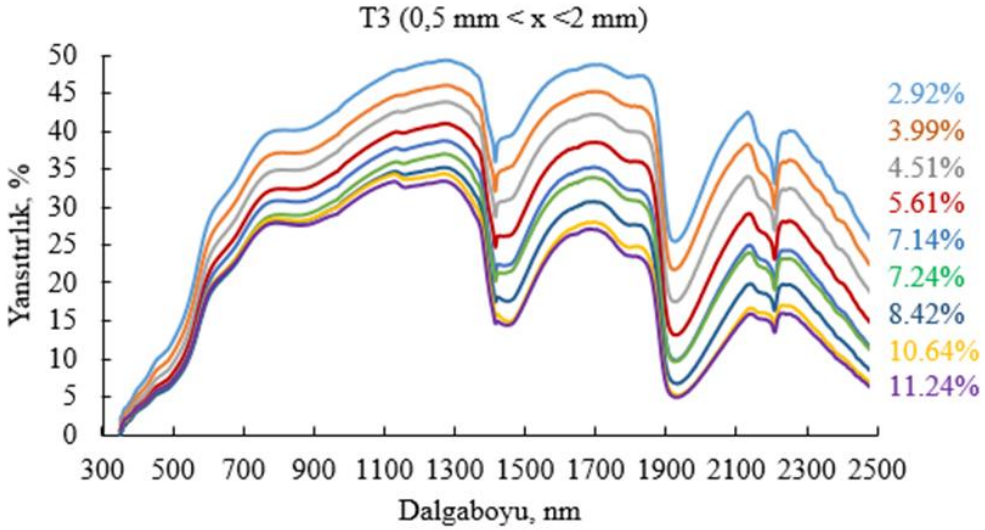
Şekil 2.11 - 2.13'te farklı tür ve parçacık boyutuna sahip farklı oranlarda homojen şekilde rutubetlendirilmiş toprak numunelerinin YMTRS ile alınan tayfsal görüntüleri gösterilmiştir. Bu çalışma rutubetlendirilmiş toprak numuneleri kullanılarak YMTRS kalibrasyonu kapsamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.11 T0 toprak türüne ait 0,5 ile 2 mm parçacık boyutuna sahip 11 farklı rutubet değerindeki numunelerin YMTRS ile alınan tayfsal görüntüsü



Şekil 2.12 T0 toprak türüne ait 2 ile 3,15 mm parçacık boyutuna sahip 15 farklı rutubet değerindeki numunelerin YMTRS ile alınan tayfsal görüntüsü



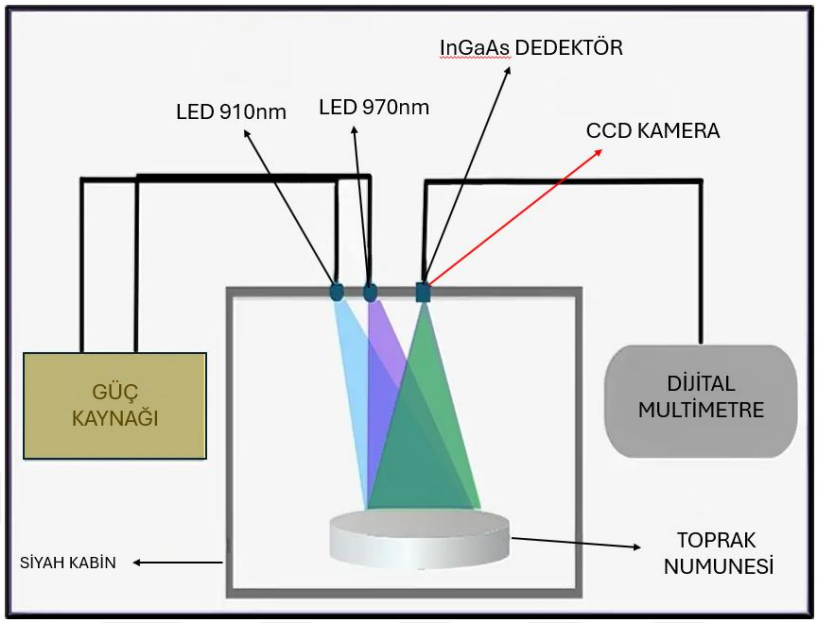
Şekil 2.13 T3 toprak türüne ait 0,5 ile 2 mm parçacık boyutuna sahip 9 farklı rutubet değerindeki numunelerin YMTRS ile alınan tayfsal görüntüsü

3
LED TABANLI ÇOKLU-TAYFSAL AYRIK SPEKTROMETRE

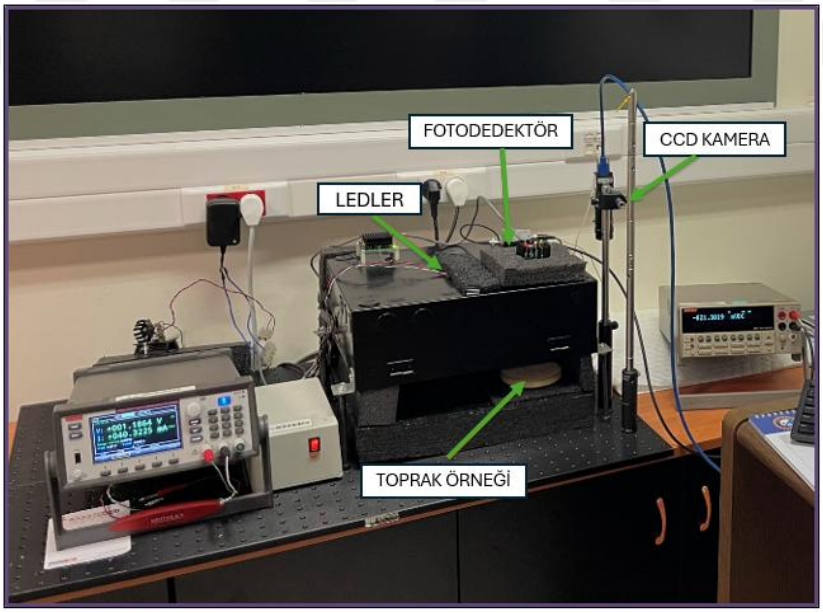
3.1 Ön Çalışma Metodolojisi

Genel olarak toprak ıslandığında suyun toprak parçacıkları arasındaki hava ile yer değiştirmesi (scattering modeli), ve/veya yüzeyde bir film oluşturabilmesi (reflection modeli), ile ilişkilendirebilecek şekilde kuru haline göre daha koyu bir görünüme sahip olur. Yansıtma modeline göre suyun toprak üzerinde bir film oluşturduğu, toprak üzerine gelen ışığın su tabakası içerisinde birçok kez yansıdığı ve bu yansımalar esnasında toprağın bir miktar ışığı emdiği ve böylece toprak yüzeyinden yansıyan ışığın yoğunluğunun azaldığı ve daha koyu bir görünüm oluştuğu söylenebilir. Toprak parçacıkları arasındaki hava ile yer değiştiren su partikülleri durumu için ise toprağa gelen ışığı soğurur ve yansıttığından toprak tarafından daha çok emilir ve daha derinlere ilerleyebilir böylece gelen ışığın optik yol uzunluğu kuru toprağa göre artmış olur (Maeda et al., 2022). Böylece topraktan yansıyan ışığın yoğunluğu azalır ve toprak daha koyu bir görünüme sahip olur. Bu iki yaklaşımın değerlendirilmesi için yapılan çalışmalarda Jensen ve arkadaşları koyu görünümün sebebinin scattering modeli olduğunu belirtmiştir (Jensen et al., 1999). Toprak rutubet miktarı, toprağın kuru durumdaki ağırlığının ıslak durumdaki ağırlığından çıkartılıp yine kendisine bölünmesi ve ortaya çıkan oran olarak ifade edilir. Bu tanıma göre toprak rutubeti toprağın içindeki su miktarı ile doğrudan bağıntılı olduğundan toprak içerisindeki su miktarını belirleyebilirsek toprak rutubetini de belirleyebiliriz. Bu tez çalışmasında toprağın içerisindeki su miktarını belirlemek için suyun ışık emilim miktarının ışığın dalga boyuna bağımlılığından yararlanılmıştır. 910 nm civarında suyun ışık emilim miktarı 970 nm ve 1450nm'lere kıyasla düşüktür (Segelstein, 1981). Bu dalga boylarındaki ışıklar LED'ler aracılığıyla kolaylıkla elde edilebilir. Ayrıca gözlem esnasında algılayıcı olarak kolaylıkla ve düşük maliyet ile bu özelliklere sahip algılayıcılar temin edilebileceğinden fotodiyot veya CCD kamera kullanımı için de seçilen bu dalga boyları uygundur. Bu durum göz önüne alındığında CCD kamera ile gerçekleştirilen ölçümlerde 910 nm ve 970 nm de ışıma yapan LED'ler

kullanılmıştır. Fotodiyot ile gerçekleştirilen ölçümlerde ise 910 nm, 970 nm ve 1450 nm dalga boylarında ışıma yapan LED'ler kullanılmıştır. Oluşturulan ölçüm sistemi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Ölçüm sistemi şeması



Şekil 3.2 Ölçüm sistemi

Yaklaşımın test edilmesi ve belirlenen dalga boylarının işlevselliğini test etmek adına ilk olarak beyaz kağıt üzerinde denemeler yapılmıştır. İlk olarak kuru kağıt 910 nm LED kullanılarak aydınlatılmış hemen ardından CCD kamera ile 5 adet resim alınmıştır. İkinci adımda ise kağıt 970 nm LED kullanılarak aydınlatılmış ve

CCD kamera ile 5 adet resim alınmıştır. Bu resimlerin ortalaması alındığında 1 adet 910 nm ışık altında kağıt resmi ve bir adet de 970 nm ışık altında kağıt resmi elde edilmiştir. Ardından bu resimler birbirine bölünerek oluşan bu resmin histogramı hesaplanmıştır. Bu işlemler kâğıt ıslatılarak tekrarlanmış ve elde edilen iki histogram birbiri ile kıyaslanarak çıkarımda bulunulmuştur.

CCD kamera kullanılarak yapılan toprak rutubeti ölçümlerinde ilk olarak kuru toprak 910 nm LED kullanılarak aydınlatılmış ve 5 adet resim alınmış, sonrasında 970 nm LED kullanılarak aydınlatılmış ve 5 adet resim alınmıştır. CCD kamera ile alınan bu resimlerin ortalaması alınmıştır. Böylece 1 adet 910 nm ışık altında toprak resmi ve bir adet 970 nm ışık altında toprak resmi elde edilmiştir. Ardından bu resimler birbirine bölünmüş ve oluşan bu resmin histogramı hesaplanmıştır. Sonrasında toprak belirli miktarlarda ıslatılarak aynı işlemler tekrar edilmiştir. Elde edilen iki histogram birbiri ile kıyaslanarak çıkarımda bulunulmuştur. Yapılan tüm bu işlemler esnasında aynı konumdaki pikseller değerleri birbiri ile karşılaştırılmıştır.

$$\ln\left[\frac{G_{\lambda_2}(x,y)}{G_{\lambda_1}(x,y)}\right] = r(x,y)\imath(x,y)\left(\omega_{\lambda_1} - \omega_{\lambda_2}\right) + r(x,y)(d_{\lambda_1} - d_{\lambda_2}) \quad (5)$$

Burada r: optik yol uzunluğu, ı: ıslaklık miktarı, ω: suyun ışık emme katsayısı ve d: nesnenin ışık emme katsayısını belirtmektedir.

$$\left[\frac{G_{\lambda_2}(x,y)}{G_{\lambda_1}(x,y)}\right]_{kuru} \geq \left[\frac{G_{\lambda_2}(x,y)}{G_{\lambda_1}(x,y)}\right]_{ıslak} \quad (6)$$

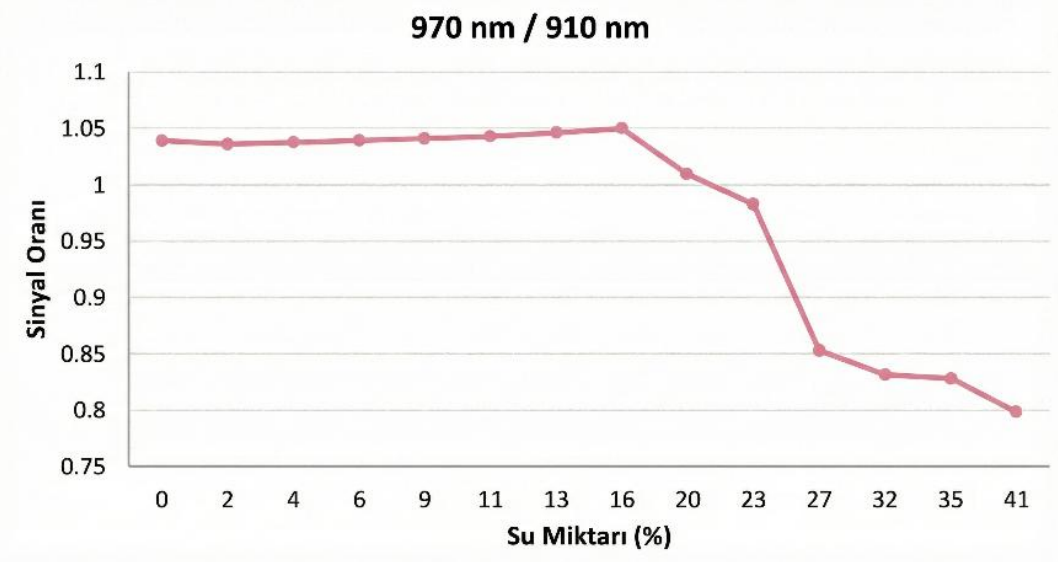
G_{λ_2}: Nesneye $\boldsymbol{\lambda_2}$ nm ışık uygulandığında oluşan görsel

G_{λ_1}: Nesneye $\boldsymbol{\lambda_1}$ nm ışık uygulandığında oluşan görsel olarak belirtilmiştir.

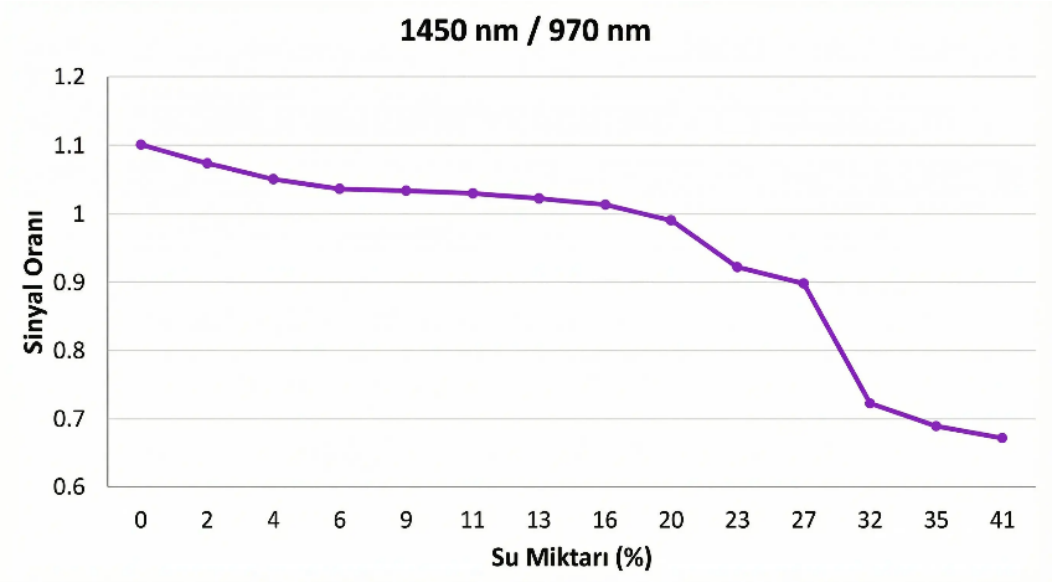
Fotodiyot ile yapılan ölçümlerde kuru toprağın üzerine sırasıyla 910 nm, 970 nm ve 1450 nm dalga boyunda ışıma yapan LED'ler ile ışık gönderilerek topraktan yansıyan ışık yoğunluğu ölçülmüştür. Ardından aynı işlemler çeşitli su miktarlarına sahip örnekler için tekrarlanmıştır. Son olarak elde edilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmıştır(Ahmet Harun ATAĞ et al., 2024).

3.1.1 Ön Çalışma Bulguları

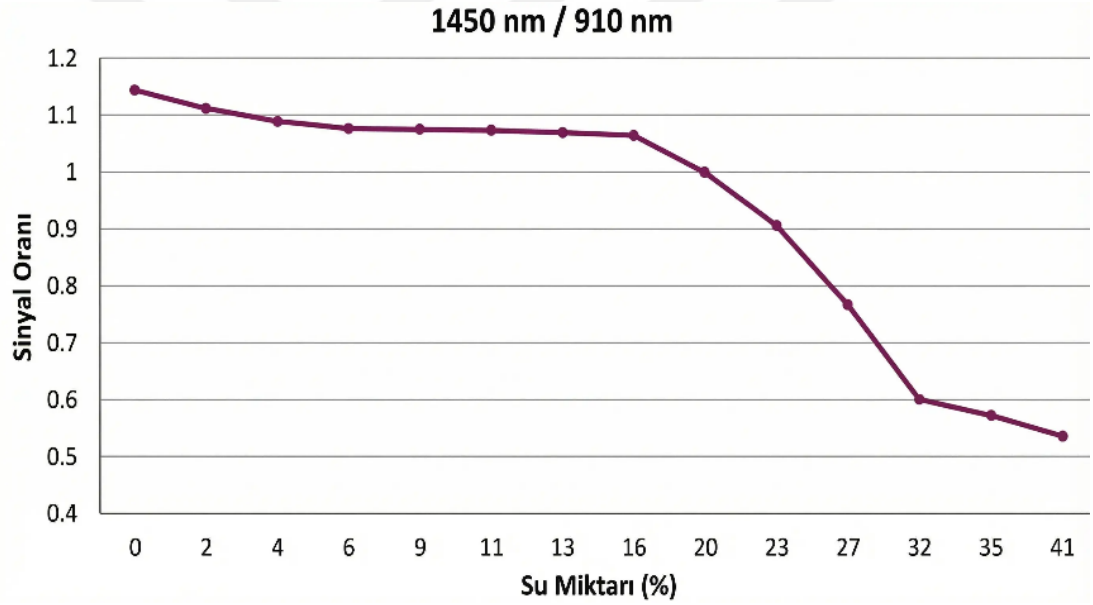
Fotodiyot ile yapılan ölçümlerde su miktarının kütlece artması ile düşük dalga boyundaki sinyalin yüksek dalga boyundaki sinyale oranında bir azalma gözlenmiştir. Şekil 3.3 - 3.5' te aynı toprak örneği için değişen su miktarlarındaki sinyal oranları verilmiştir. Çalışılan aralık kapsamında suyun ışık emilim katsayı farkının en küçük olduğu aralık olan 970 nm ile 910 nm karşılaştırmasından, suyun ışık emilim katsayı farkının en büyük olduğu aralık olan 1450 nm ile 910 nm karşılaştırmasına doğru gidildikçe topraktaki su miktarının değişimi ile sinyal oranındaki değişimin ilişkisi fark edilir şekilde gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümler sırasında her numune için tüm LED'ler mikroamper seviyesinde bir salınımda sabit akım ile sürülmüştür. Bu sayede LED'lerin akım değişikliğine bağlı ışıma dalga boyu kaymasının önüne geçilmiştir. LED'lere kısa süreli sabit akım uygulanması sayesinde ısınmaya bağlı ışıma dalga boyu kayması engellenmiştir.



Şekil 3.3 Topraktaki kütlece su miktarına göre 970 nm de elde edilen normalize edilmiş sinyalin 910 nm de normalize edilmiş sinyale oranını gösteren grafik

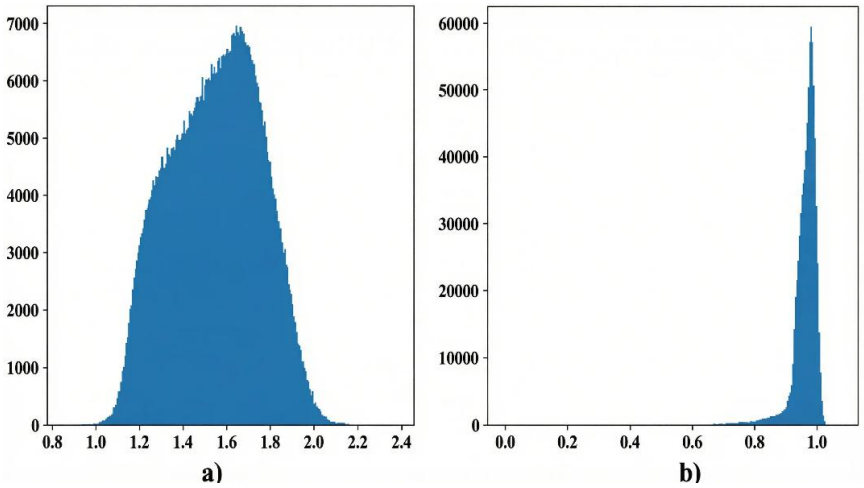


Şekil 3.4 Topraktaki kütlece su miktarına göre 1450 nm'de elde edilen normalize edilmiş sinyalin 970 nm'de normalize edilmiş sinyale oranını gösteren grafik

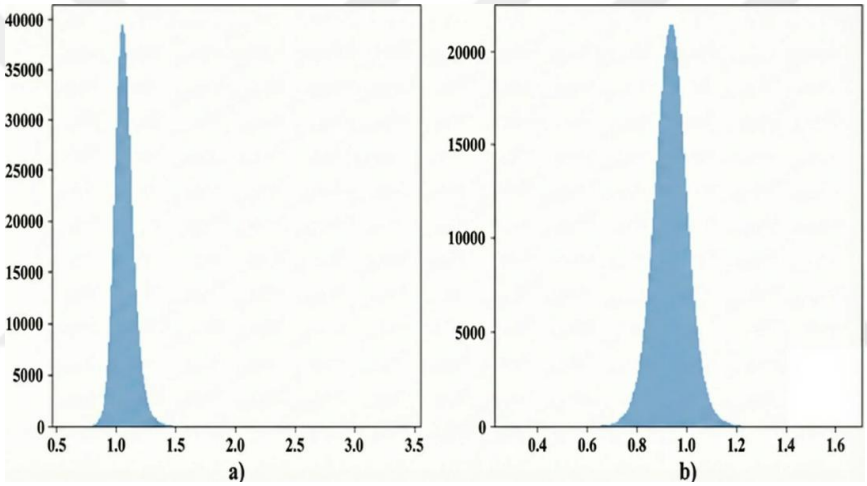


Şekil 3.5 Topraktaki kütlece su miktarına göre 1450 nm'de elde edilen normalize edilmiş sinyalin 970 nm'de normalize edilmiş sinyale oranını gösteren grafik

CCD kamera ile yapılacak ölçümlerde seçilen dalga boylarının işlevselliği ve yaklaşımın test edilmesi adına ilk olarak beyaz kağıt üzerinde denemeler sonucunda ıslak durumda 910 nm deki ışık yoğunluğunun 970 nm'deki ışık yoğunluğuna oranının kuru duruma göre daha fazla olduğu Şekil 3.6'da bulunan histogramlar üzerinden gösterilmiştir. Yine Şekil 3.7' de verilen histogramlarla CCD kamera kullanılarak toprak rutubetinin tespitinde ışığın dalga boyunun suyun ışık emilim katsayısına etkisi gözlemlenmiştir.



Şekil 3.6 a) ıslak kağıt numunesine ait 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan görsel histogramı, b) kuru kağıt numunesine ait 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan görsel histogramı



Şekil 3.7 a) 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan ıslak (kütlece %10) toprak numunesine ait görsel histogramı, b) 910 nm / 970 nm CCD Kamera ile alınan kuru toprak numunesine ait görsel histogramı

Kağıt ve toprak örneklerinden CCD kamera kullanılarak elde edilen sonuçlar (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7) karşılaştırıldığında toprak numunesinin kullanıldığı durumda ıslak ve kuru durum arasındaki farkın beyaz kağıt kullanıldığı duruma göre daha zor fark edilebilir olduğu, bu durumun toprağın içinde bulunan diğer partiküller veya hesaplamalar esnasında değerlendirilmeye alınmayan optik yol uzunluğu ve toprağın kullanılan ışık dalga boylarındaki ışık emilim katsayıları farkından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Bu problemin çözümü konusunda yüksek sinyal gürültü oranı elde etmek için daha güçlü LED aydınlatması kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, daha gelişmiş ve karmaşık algoritma içeren yeni bir metot geliştirilmiştir.

3.2 Karakteristik Dalgaboyları

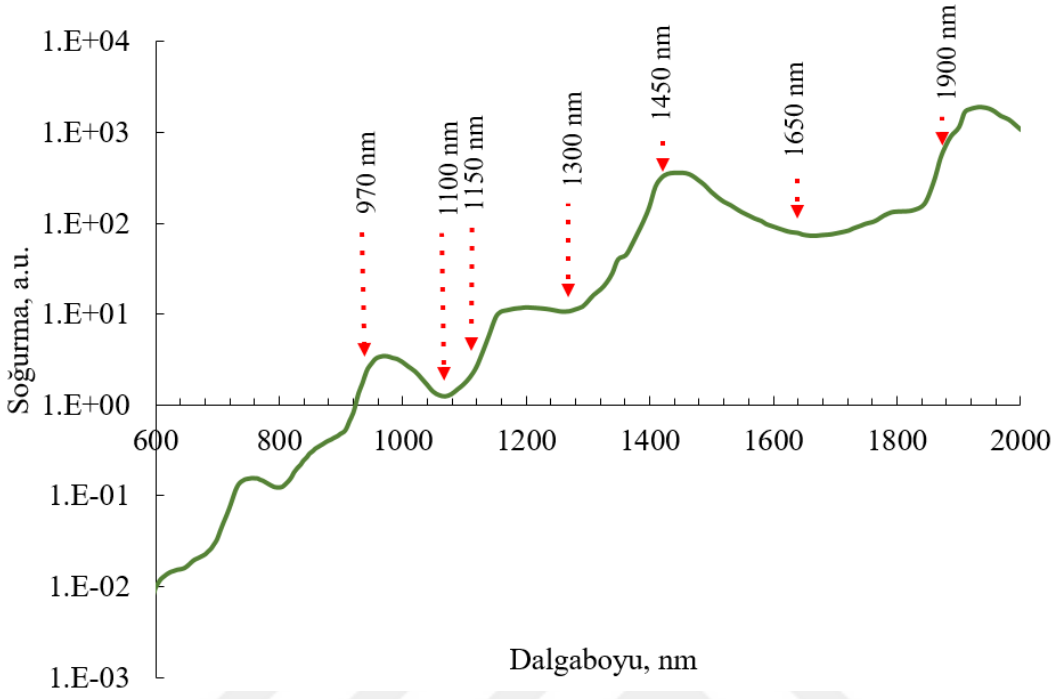
Topraklar dâhil olmak üzere katı maddelerde su içeriğinin**,** yakın kızılötesi (NIR) spektroskopisi kullanılarak belirlenmesi; yüzey rutubeti ile NIR spektrumunda suya özgü belirli soğurma bantlarındaki yansıyan ışık şiddeti arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Bu soğurma özellikleri, O–H gerilme ve eğilme titreşim modlarının üst harmonikleri (overtone) ve birleşim bantlarından kaynaklanmaktadır. Temel O–H gerilme titreşimi orta kızılötesi (MIR) bölgede yer alırken, daha zayıf olan üst harmonikleri ve birleşim bantları NIR bölgesinde ortaya çıkmaktadır.

HITRAN veritabanına göre (HITRAN, 2026), suyun NIR bölgesinde yaklaşık 0,75 µm, 0,97 µm, 1,45 µm, 1,94 µm ve 2,95 µm civarında belirgin soğurma bantları bulunmaktadır. Bu bantlara ait normalize edilmiş bağıl soğurma değerleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere**,** 0,75 µm dalga boyundaki soğurma oldukça zayıftır ve bu nedenle algılama açısından kullanışlı değildir. 2,95 µm dalga boyunda ise çoğu NIR fotodedektörün duyarlılığı düşüktür; ayrıca bu bölgede çalışan LED'ler düşük güçlü ve yüksek maliyetli olduğundan, bu bant kompakt sensörler için pratik değildir.

Kalan karakteristik NIR soğurma bantları — 970 nm (O–H gerilmesinin ikinci üst harmonigi), 1190 nm (birleşim bandı), 1450 nm (O–H gerilmesinin birinci üst harmonigi) ve 1940 nm (O–H gerilme ve eğilme titreşimlerinin birleşimi) — orta düzeyde soğurma şiddeti sergilemekte ve ışınımın daha derinlere nüfuz etmesine olanak tanımaktadır. Bu özellikler, söz konusu bantları katı malzemelerde su içeriği ölçümleri için özellikle uygun hâle getirmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen sensör, bu temel soğurma dalga boylarında çalışan LED'leri içermektedir: 970 nm, 1150 nm, 1450 nm ve 1940 nm. Tipik NIR yansıtırlık tabanlı rutubet sensörlerinde, ölçümler genellikle iki dalga boyunda gerçekleştirilir: biri rutubete duyarlı bir soğurma bandı üzerinde, diğeri ise rutubetden minimum düzeyde etkilenen ve referans olarak kullanılan bir dalga boyunda. Bu doğrultuda, su soğurmasının zayıf olduğu dalga boylarında ek LED'ler de sisteme dâhil edilmiştir: 1100 nm, 1150 nm, 1300 nm ve 1650 nm. Bu dalga boylarındaki yansıtırlık, rutubet içeriğiyle çok az değişim gösterdiğinden, ayrık yansıtırlık spektrumundan su içeriğinin hesaplanması için kararlı bir referans

tabanı sağlamaktadır. Şekil 3.8'de suyun karakteristik soğurma bantları ve kullanılan LED'lere ait dalga boyları görselleştirilmiştir.



Şekil 3.8 Suyun karakteristik soğurma bantları ve kullanılan LED'lere ait dalga boyları

3.3 Toprak yüzeyine yakın mesafeden ölçüm yapan sensörlerin standardizasyonu

Küresel ve ulusal Vis–SWIR toprak spektral kütüphaneleri**,** kemometrik **ve** makine öğrenmesi yöntemleriyle birleştirildiğinde, toprak özelliklerinin karakterizasyonu için değerli kaynaklar sunmaktadır (Viscarra Rossel et al., 2016). Karşılaştırılabilirliğin sağlanması amacıyla, son yıllarda hem laboratuvar hem de arazi koşullarında toprak spektroskopisi ölçümlerinin standardizasyonuna yönelik önemli uluslararası çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda, toprak yüzeyini bozmadan yerinde (in-situ) yansıtırlık ölçümleri yapılabilmesi için protokoller (E. Ben-Dor et al., 2024)ve özel ölçüm düzenekleri geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, P4005 "Toprak Spektroskopisi için Standartlar ve Protokoller" girişimi altında birleştirilmiş ve IEEE SA Toprak Spektral Ölçümleri için Standart ve Protokol Şeması olarak resmiyet kazanmıştır (E. K. K. Ben-Dor et al., 2024).

Standartlaştırılmış yapılandırma, yansımalı (nadir/normal) aydınlatma için tungsten–halojen bir ışık kaynağını ve **y**ansımalı (parlama) yansımayı en aza indirmek amacıyla 45° algılama geometrisini öngörmektedir. Bu geometri, günümüzde toprak spektral kütüphanelerinin oluşturulmasında küresel bir referans hâline gelmiş olup, laboratuvar ve arazi ölçümlerinde tutarlı biçimde uygulanmaktadır.

Bu çerçeve üzerine inşa edilen mevcut çalışmada, yerinde toprak yüzeyi rutubeti ölçümleri için geliştirilen yakın (proksimal), temassız, yakın kızılötesi (NIR) aktarım standardı bir sensör tanıtılmaktadır. Sensör tasarımı, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, yerleşik nadir aydınlatma ve 45° algılama geometrisi ile uyumlu olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

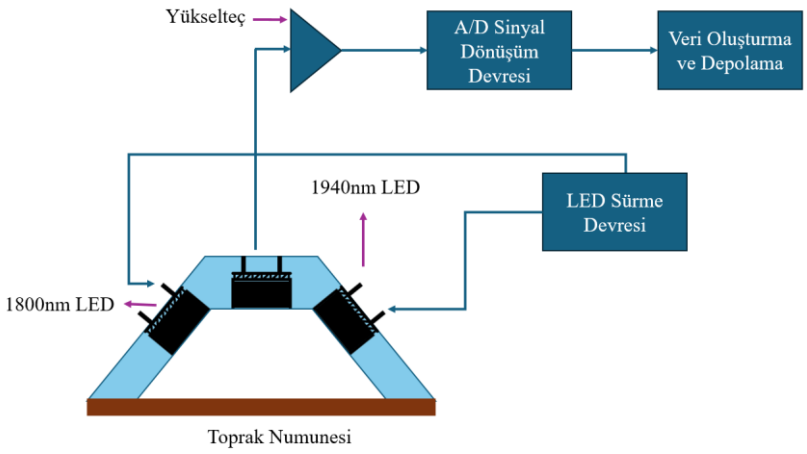
3.4 İlgili Çalışmalara Genel Bakış

Yin Z ve arkadaşları toprak yüzeyindeki rutubet miktarını hızlı ve etkili bir şekilde belirlemek amacıyla yakın kızılötesi (NIR) yansıma sensörünü geliştirmişlerdir (Yin et al., 2013). Araştırmacılar, suyun ışığı soğurma özelliklerinden yararlanarak zayıf emilen 1800 nm ve güçlü bir şekilde emilen 1940 nm dalga boylarında çalışan, düşük enerji tüketimli ve taşınabilir bir LED sensör düzeneği tasarlamışlardır. Dört farklı toprak türü üzerinde yapılan laboratuvar testleri, cihazın ölçtüğü bağıl emilim derinliği ile gerçek rutubet değerleri arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu kanıtlamıştır. Elde edilen bulgular, geliştirilen bu optik yöntemin geleneksel yöntemlere kıyasla daha pratik bir alternatif sunduğunu, ancak en doğru sonuçlar için toprak türüne özel kalibrasyon gerektiğini ortaya koymuştur. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi oluşturulan tasarımda sensör kasası siyah PVC malzemeden üretilmiştir; üst çapı 2 cm, alt çapı 5,5 cm ve yüksekliği 2,5 cm olan kompakt bir yapıya sahiptir. Işık dedektörü (fotodiyot) kasanın en üst orta kısmına yerleştirilmiştir. Bu dedektörün etrafına, dairesel bir düzende altı adet LED yerleştirilmiştir. Tüm LED'ler, normal düzleme göre 45 derecelik bir açıyla konumlandırılmıştır. Bu açı, ışığın toprak yüzeyinde yaklaşık 8 mm çapında merkezi bir alana odaklanmasını sağlar. Ölçüm sırasında LED'lerden çıkan ışınım, toprak yüzeyine 15 mm'lik sabit bir mesafeden gönderilir. Yansıyan ışığı toplamak için 900–2400 nm spektral tepki aralığına sahip bir InGaAsSb fotodiyot kullanılmıştır. Bu dedektör, gelen ışık enerjisiyle orantılı bir voltaj sinyali üretir.

Devre; sinyali güçlendiren bir amplifikatör devresi, gürültüleri süzmek için yüksek geçiren bir filtre ve veriyi dijitale çeviren bir A/D dönüştürücü içerir. Sensör, enerji tüketimini optimize etmek ve performansı artırmak için bir darbe sinyaliyle çalışır. LED'ler 700 mikrosaniye boyunca 600 mA akımla çalıştırılır. Operasyon sırasında önce 1800 nm'lik referans LED'i kısa süreliğine açılır ve yansıma verisi kaydedilir. Ardından referans LED'i kapatılıp 1940 nm'lik ölçüm LED'i açılır. Bu döngü saniyede bir kez tekrarlanır. Toprak yüzeyinden yansıyan ışığın bir kısmı dedektöre geri döner; dedektör ile LED'ler arasındaki yerleşim, ışığın dedektöre doğrudan ulaşmasını engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Yansıtırlık tabanlı bağıl soğurma derinliği şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Y = 1 - Y_c/Y_b \tag{7}$$

Burada Y_b ve Y_c, sırasıyla 1940 nm ve 1800 nm dalga boylarındaki yansıtırlığı temsil etmektedir. Bu çalışmada ve Yin ve ark (Zhe Yin et al., 2013)., yüzey toprak rutubetinin tahmini için doğrusal ve doğrusal olmayan tahmin modelleri karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan model, yüksek rutubet seviyelerinde başarısız olurken, doğrusal model daha iyi performans göstermiş ve toprak türüne bağlı olarak sırasıyla %2,88, %4,67, %5,27 ve %3,58 RMSE değerleri elde edilmiştir (Yin et al., 2015).



Şekil 3.9 NIR Sensör şeması

Xiaofei ve arkadaşları (An et al., 2015), yakın kızılötesi yansıma spektroskopisi (NIRS) teknolojisini kullanan taşınabilir bir cihaz aracılığıyla topraktaki toplam azot miktarının yerinde nasıl daha doğru ölçülebileceğini incelemişlerdir. Araştırmacılar, ölçüm hassasiyetini düşüren toprak rutubeti ve parçacık boyutu gibi

çevresel faktörlerin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için iki temel yöntem geliştirmiştir. Rutubet oranının etkisini düzeltmek amacıyla 1450 nm dalga boyundaki soğurma verilerine dayanan bir düzeltme indeksi (PMAI) kullanılırken, toprak yapısından kaynaklanan sapmaları gidermek için karışık kalibrasyon seti metodu uygulanmıştır. Geliştirilen bu yeni algoritmalar, yapay sinir ağları kullanılarak oluşturulan tahmin modellerinin tutarlılığını ve güvenilirliğini öli ölçüde artırmıştır.

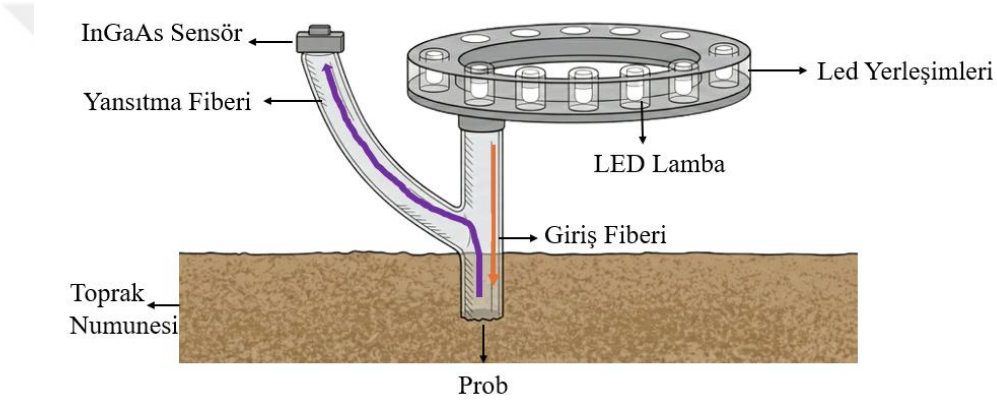
Dedektör, bir optik birim ve bir kontrol birimi olmak üzere iki ana kısımdan oluşmuştur. Işık kaynağı olarak yedi farklı dalga boyunda (940, 1050, 1100, 1200, 1300, 1450 ve 1550 nm) NIR LED lambalar, bir LED sürücü devresi, Y-tipi optik fiber, bir prob ve bir InGaAs fotoelektrik sensör içermiştir. Sinyalleri güçlendirmek için bir amplifikatör devresi, verileri dijitalleştirmek için bir A/D dönüştürücü, sonuçları anlık görmek için bir LCD ekran ve verileri kaydetmek için bir U-disk depolama bileşeni barındırır.

Ölçüm sırasında cihazın probu toprağın 300 mm derinliğine kadar itilir. LED'ler manuel olarak döndürülerek optik fiberle hizalanır ve her bir dalga boyundaki ışık toprak yüzeyine iletilmiştir. Topraktan yansıyan ışık sensör tarafından algılanıp elektrik sinyaline dönüştürülür ve her dalga boyu için absorbans (emilim) değerleri hesaplanmıştır. Ölçüm doğruluğu için polytetrafluoroethylene malzemeden yapılmış standart bir beyaz tahta referans olarak kullanılmıştır.

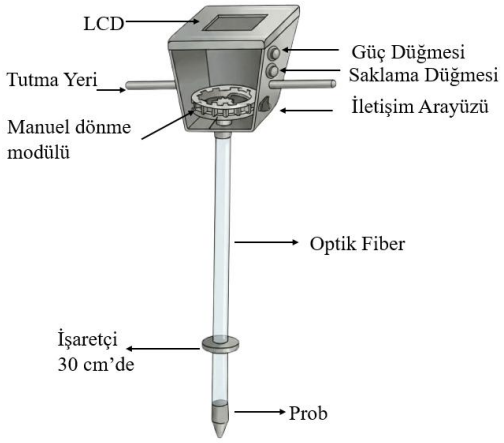
Cihaz, toprak azot içeriğini tahmin etmek için Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı (BP-NN) algoritmasını kullanmıştır. Toprak rutubeti ve partikül boyutunun spektral veriler üzerindeki bozucu etkilerini ortadan kaldırmak için cihazda özel düzeltme yöntemleri (PMAI yöntemi ve karma kalibrasyon seti) uygulanmıştır.

Yapılan testler, dedektörün stabil ve hassas olduğunu, çevresel müdahaleler elendiğinde laboratuvar analizlerine yakın doğrulukta sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Çalışmada cihazın doğruluğunu ve kesinliğini kanıtlamak için RMSE (Kök Ortalama Kare Hata), korelasyon katsayısı (R) ve RPD (Artık Tahmin Sapması) gibi istatistiksel değerler detaylı bir şekilde paylaşılmıştır. Toprak rutubeti ve parçacık boyutu etkileri özel algoritmalarla (PMAI ve karma kalibrasyon) giderildiğinde, modelin hata payı önemli ölçüde düşmüştür. RMSEC

(Kalibrasyon Hatası): 0,029 ve RMSEP (Tahmin Hatası): 0,030 olarak hesaplanmıştır. Karşılaştırma yapıldığında, hiçbir düzeltme yapılmayan orijinal verilerde RMSEP değeri 0,215 gibi çok daha yüksek bir seviyededir. Modelin gerçek değerlerle ne kadar uyumlu olduğunu gösteren R_c ve R_v değerleri, düzeltmelerden sonra oldukça yükselmiş ve sırasıyla 0,85 ve 0,76 olarak bulunmuştur. Düzeltme yapılmamış ham verilerde doğrulama korelasyonu (R_v) sadece 0,45'tir; bu da düzeltme algoritmalarının başarısını kanıtlamıştır. Modelin tahmin kapasitesini değerlendiren RPD değeri, en gelişmiş modelde 2,52 olarak bulunmuştur. 53.10 ve 3.11'de taşınabilir toprak TN sensörüne ait fiber yapısı ve prototip gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Taşınabilir toprak TN sensörüne ait optik fiber yapısı



Şekil 3.11 Taşınabilir toprak TN sensörüne ait prototip

NIR yansıtırlığı kullanılarak toprak rutubetinin ölçülmesine yönelik çeşitli girişimler incelendiğinde her birinin kayda değer sınırlamalara sahip olduğunu görülmüştür. Skidmore ve arkadaşları (1975)**,** 1300, 1450, 1650 ve 1950 nm dalga

boylarında çalışan dört bantlı bir reflektometre geliştirmiştir. Bu sistemde, dalga boylarını ayırmak için filtreler kullanılan akkor bir kızılötesi kaynak kullanılmıştır. Ancak sistem, manuel konumlandırma gerektirmesi ve entegrasyon küresi kullanmasına bağlı olarak işletim zorlukları ve yavaş ölçüm süreleri gibi dezavantajlar taşımaktadır.

Daha sonra Kano ve arkadaşları (Yoshio Kano et al., 1985), dar bant girişim filtreleri ile izole edilmiş, 1800 ve 1940 nm dalga boylarında çalışan tüp tabanlı, çift bantlı büyük bir ölçüm cihazı tanıtmıştır. Sistem, kil ve tınlı topraklar için yansıtırlık ile rutubet arasında %±1,9 doğrulukta doğrusal bir ilişki göstermiş olsa da toprağa özgü kalibrasyon gerektirmiştir.

Belisle ve arkadaşları ise (Belisle et al., n.d.), toprağa yerleştirilerek kullanılmak üzere tasarlanmış, bir lamba ve tek bir dar bant filtre kullanan kompakt (125 cm^3) ve düşük enerjili bir prob önermiştir. Düşük rutubet seviyeleri (kuru–%5) için yüksek doğrusalılık ($R^2 \approx 0,977$) elde edilmiş olsa da toprak dokusuna karşı aşırı duyarlılığı, sistemin genel arazi koşullarında uygulanabilirliğini sınırlandırmıştır.

Bu çalışmalar topluca değerlendirildiğinde, belirli dalga boylarındaki yansıtırlık ile toprak rutubetini ilişkilendiren geleneksel modelleme yaklaşımlarının, toprak türü ve dokusuna yüksek derecede bağımlı olduğu görülmektedir. Buna karşılık, bu çalışmada önerilen makine öğrenmesi tabanlı yaklaşım hem tahmin doğruluğu hem de toprak türüne bağımlılığın azaltılması açısından geleneksel modellere kıyasla üstün performans sergilemektedir.

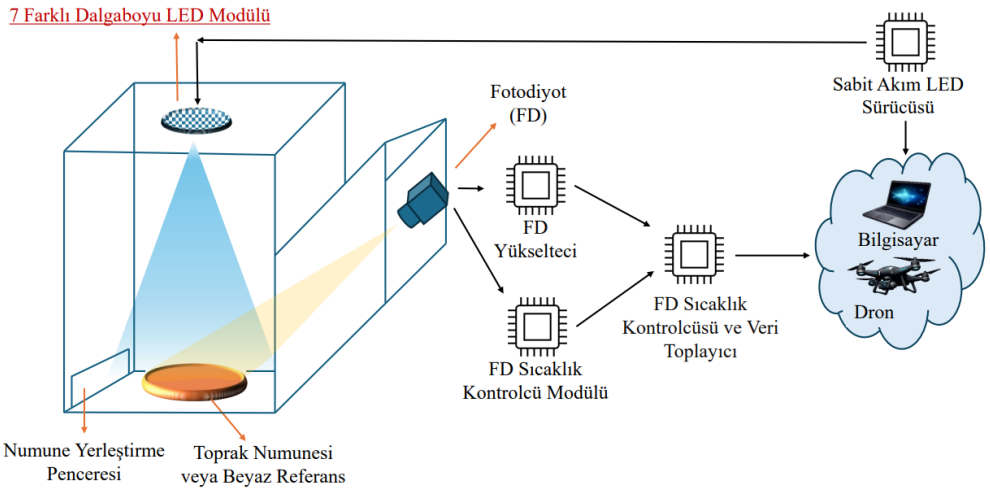
3.5 Sistem Tasarımı

3.5.1 Mekanik Tasarım Düzeni

Kalibrasyon, entegrasyon ve laboratuvar içi kullanımın kolaylaştırılması amacıyla, geliştirilen sensörün algılama alanı Şekil 3.12'de gösterildiği üzere standart bir laboratuvar Petri kabının (≈90 mm çap) boyutlarına uyacak şekilde tasarlanmıştır. Petri kabının güvenli bir biçimde konumlandırılmasını sağlamak için 3B yazıcı ile üretilmiş bir numune tutucu platform imal edilmiş; böylece numune alanının merkezinin hem LED aydınlatma alanı hem de fotodedektörün görüş alanı ile hassas biçimde çakışması temin edilmiştir.

80 mm çapındaki nesne düzleminden kaynaklanan yansıyan ışık konisini sınırlamak ve numune yüzeyinden gelen yalnızca istenen yansıyan ışınların fotodedektöre ulaşmasını sağlamak amacıyla bir diyafram (aperture stop) ve bir dizi optik perde (baffle) sisteme entegre edilmiştir. Sistem, görüntüleme optikleri kullanmamakta; bunun yerine fotodedektörün çıplak görüş alanından yararlanmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, olası optik hizalama hatalarını en aza indirirken, mekanik rijitliği ve sistemin genel kararlılığını artırmaktadır. Dedektörün hemen önünde konumlandırılan opsiyonel bir tutucu, daha dar bantlı sinyal algılamasının gerekli olduğu durumlarda girişim filtresinin sisteme entegre edilmesine imkân tanımaktadır.

Bu yapılandırma, sensörün kurutarak kütle kaybı (Loss-on-Drying, LOD) yöntemi ve ticari rutubet analizörleri gibi standart laboratuvar yöntemlerine karşı izlenebilir kalibrasyon, doğrulama ve karşılaştırmasının yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Sistem, Bölüm 2.1'de açıklandığı üzere UME birincil su içeriği ölçüm sistemine SI izlenebilirliği sağlanarak kalibre edilmiştir.



Şekil 3.12 LED Spektrometre sistemi mekanik tasarım düzeni



Şekil 3.13 LED Spektrometre sistemi ve numune yerleşimi

Sistem, ATMEGA328P yongasını kullanan ve çeşitli sensör uygulamalarında—toprak rutubeti algılama dâhil—yaygın olarak tercih edilen çift Arduino mikrodenetleyici mimarisi üzerine inşa edilmiştir (Pereira & Ramos, 2022; Yang et al., 2019). Bu tercih; Arduino'nun kompakt tek kartlı tasarımı**,** birden fazla giriş kanalına (analog ve dijital) sahip olması ve analog-sayısal dönüştürücülerle sorunsuz entegrasyonu sayesinde özellikle avantajlıdır. Arduino platformunun açık kaynaklı yapısı, diğer sistemler ve sensörlerle birlikte çalışabilirliğini kolaylaştırarak çok yönlülüğünü daha da artırmaktadır.

Buna ek olarak, düşük maliyet**,** düşük enerji tüketimi ve gerçek zamanlı işlemleme yoluyla veri toplama ve senkronizasyonda yüksek doğruluk sağlaması, Arduino tabanlı sistemleri birçok otonom ve şebekeden bağımsız (off-grid) uygulamada (Sharipov et al., 2025) yaygın hâle getirmiştir. Bu özellikler bir arada değerlendirildiğinde, Arduino mikrodenetleyicilerinin çevresel izleme (Ali et al., 2016) ve kontrol sistemlerinin geniş bir yelpazesinde güvenilir ve verimli bir seçenek olmaya devam ettiği görülmektedir.

Daha önce belirtildiği gibi sistem, toprak yüzeyi yansıtırlık ölçümlerine yönelik yerleşik standartlar ve protokollerle uyumluluğu sağlamak amacıyla, Şekil 3.12'de gösterilen yapılandırmalarla tutarlı olacak şekilde 0° (nadir) aydınlatma ve 45° algılama geometrisini kullanmaktadır.

Aynı zamanda sistem, bu çalışmanın temel amacını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır: hem laboratuvar ortamlarında hem de arazi uygulamalarında tutarlı biçimde kullanılabilecek, tamamen taşınabilir bir aktarım standardı toprak rutubeti ölçüm sistemi geliştirilmesi. Bu hedef doğrultusunda sensör sistemi 12 V DC bir güç kaynağı ile çalışmakta olup, piller veya araç aküleri ile kolay entegrasyon sağlayarak arazi koşullarında güvenilir çalışma imkânı sunmaktadır.

Bir diğer önemli tasarım hedefi, yaygın olarak temin edilebilen bileşenler kullanılarak düşük maliyetle yüksek performans elde edilmesidir. Bu yaklaşım, aynı zamanda birbiriyle bağlantılı fiziksel cihazlardan oluşan Nesnelerin İnterneti (IoT) ağlarına sorunsuz entegrasyonu da kolaylaştırmaktadır (Khanna & Kaur, 2019).

Sistem, zaman kontrollü sabit akımlı bir LED sürücüsü ve ışık kaynağını optoelektronik algılama modülü ve yüksek hızlı veri toplama birimi ile entegre ederek, yansıtırlık tabanlı toprak rutubeti ölçümlerinin hassas ve tekrarlanabilir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Temel çalışma prensibi, seçilmiş dalga boylarında LED'lerle aydınlatılan numuneden yansıyan ışık şiddetinin algılanmasına dayanmakta ve böylece ayrık spektrometrik bir yaklaşım kullanılarak dalga boyuna çözünmüş yansıtırlık ölçümleri yapılmasına olanak tanımaktadır.

3.6 LED Setleri

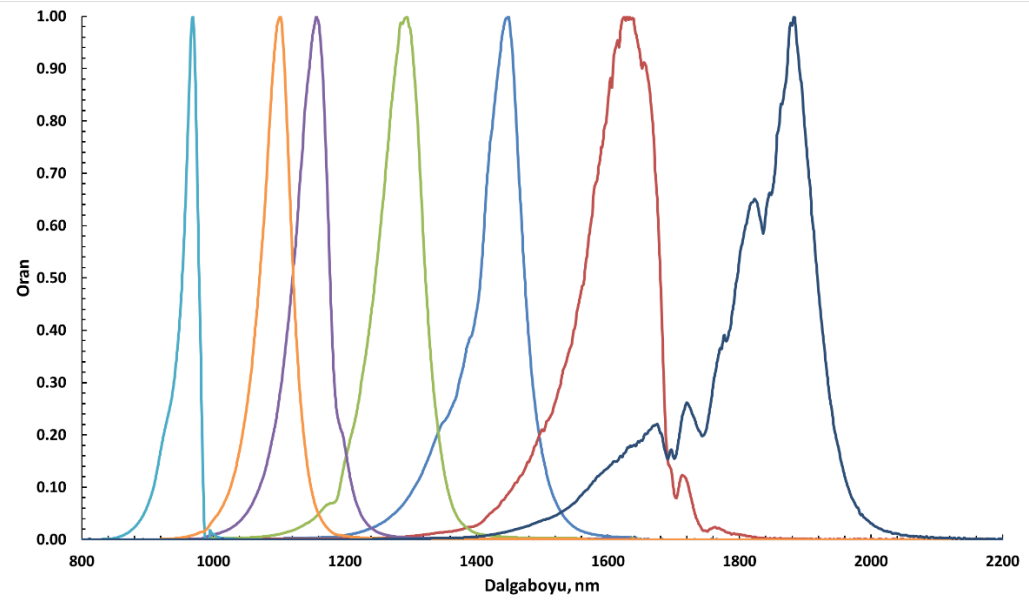
LED grupları, numune alanını homojen biçimde aydınlatacak şekilde tasarlanmış dairesel bir konfigürasyon üzerinde monte edilmiştir. Sistemde her bir dalga boyu için yedi farklı dalga boyunda özdeş LED kullanılmış ve bu yapı bir dalga boyu grubu olarak adlandırılmıştır; böylece sistemde toplam 49 LED yer almaktadır. Bu LED'ler, her bir kümede her dalga boyundan bir LED bulunacak şekilde Şekil 3.14'te gösterildiği gibi yedi LED kümesi hâlinde düzenlenmiştir.



Şekil 3.14 7 farklı dalgaboyuna sahip LED'ler kullanılarak oluşturulan özdeş LED kümeleri

Her bir küme içinde, farklı dalga boylarında ışık yayan yedi LED, biri merkezde ve altısı etrafına simetrik olarak yerleştirilmiş biçimde konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, dengeli ve uniform bir aydınlatma sağlamaktadır.

Her bir dalga boyu grubundaki LED, tüm elemanlardan aynı akımın geçmesini sağlamak ve böylece dizi genelinde tutarlı parlaklık ile uniform spektral çıkış elde etmek amacıyla seri bağlantı şeklinde bağlanmıştır. Tüm LED'ler Thorlabs (ABD) firmasından temin edilmiştir. Şekil 3.15, LED'lerin normalize edilmiş spektral güç dağılımlarını (SPD) sunmakta olup, tepe dalga boylarını ve yarı maksimumdaki tam genişliklerini (FWHM) yani tepe şiddetinin %50'sinde ölçülen spektral genişlikleri göstermektedir.



Şekil 3.15 LED'lerin Normalize edilmiş Spektral Güç Dağılımları

3.7 Optik Tabanlı Toprak Rutubeti Ölçüm Sistemi için Voltaj Kontrollü Akım Kaynağı Tasarımı

Toprak yüzey rutubetinin optik yöntemlerle karakterizasyonunda, yüzeye uygulanan ışık yoğunluğunun stabilitesi ve tekrarlanabilirliği, ölçüm hassasiyetini belirleyen en kritik parametrelerden biridir. Bu çalışmada, sistemin ihtiyaç duyduğu yeterli ışık yoğunluğunu sağlayabilen, gürültü kaynaklarını elimine eden ve deneysel gereksinimlere göre esneklik sunan bir voltaj kontrollü akım kaynağı (VCCS) devresi geliştirilmiştir. Aydınlatma ünitesi, her bir elemanın eş akım değerinde sürülmesini garanti altına almak amacıyla seri topolojide bağlanmış aynı dalga boyuna sahip 7 adet LED'den oluşmaktadır. Bu konfigürasyon ve uygulanan LED yerleşim geometrisi sayesinde, hedef yüzey üzerinde homojen, yüksek yoğunluklu ve tekrarlanabilir bir aydınlatma profili elde edilmiştir.

3.7.1 Giriş Sinyali İşleme ve İzolasyon Arayüzü

Kontrol sinyalleri, Arduino1 platformu üzerinden üretilmekte olup, sisteme bir optokuplör (U27) aracılığıyla aktarılmaktadır. Bu yapı, operasyonel kuvvetlendiricinin (U28) evirmeyen girişine (non-inverting input) uygulanacak kontrol voltaj aralığındaki esnekliği korurken, aynı zamanda dijital kontrol ünitesi ile güç katı arasında tam elektriksel izolasyon sağlamaktadır. Arduino çıkışı ile optokuplör arayüzünde konumlandırılan R1 direnci ve C1 kondansatörü, sinyal

bütünlüğü ve devre güvenliği açısından önemlidir. Seri bağlanan R1 direnci, optokuplör LED'inden geçen akımı güvenli sınırlar içerisinde tutarak hem komponent ömrünü uzatmakta hem de mikrodenetleyici çıkış portlarını aşırı yüklenmeye karşı korumaktadır. Ayrıca, R1 ve C1 bileşenleri sayesinde low-pass filtre davranışı sergileyerek, kontrol sinyalindeki yüksek frekanslı gürültüleri ve ani geçişleri (transient) sönümlemektedir. Bu filtreleme işlemi, optokuplörün kararlı çalışmasını sağlamakta ve parazitik etkilerin sisteme girişini minimize etmektedir.

3.7.2 Geri Besleme ve Kontrol Döngüsü

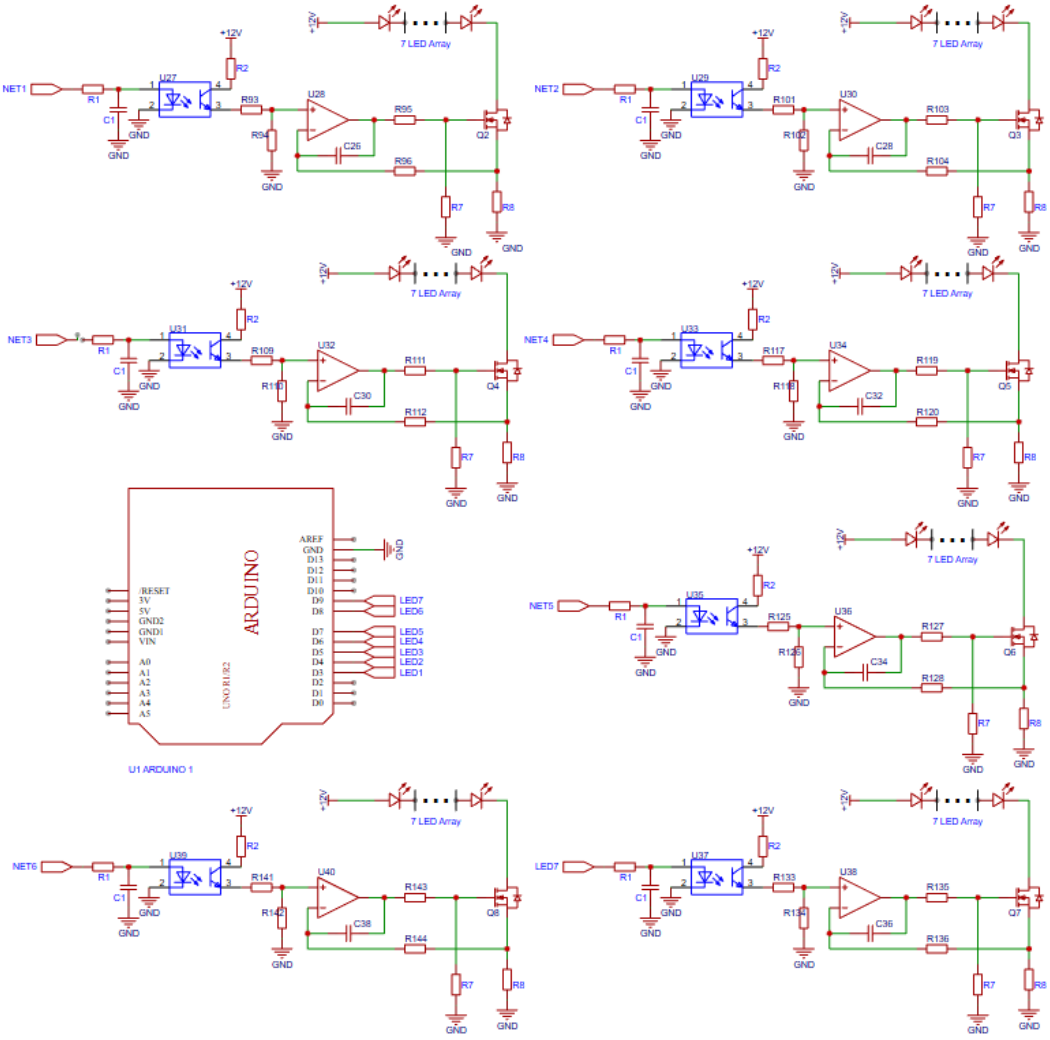
Devrenin temel çalışma prensibi, kontrol giriş geriliminin (12V) hedeflenen akım değerine dönüştürülmesine dayanmaktadır. R93 ve R94 dirençleri ile oluşturulan gerilim bölücü ağ, giriş sinyalini ölçeklendirerek op-amp'ın ortak mod giriş voltaj aralığına (common-mode input voltage range) uygun hale getirmektedir. Operasyonel kuvvetlendirici, ölçeklendirilmiş bu referans sinyalini, akım algılama direnci (R8) üzerinden alınan geri besleme sinyali ile karşılaştırarak hata sinyalini minimize edecek şekilde çıkışını regüle eder.

3.7.3 Çıkış Katı ve Stabilizasyon

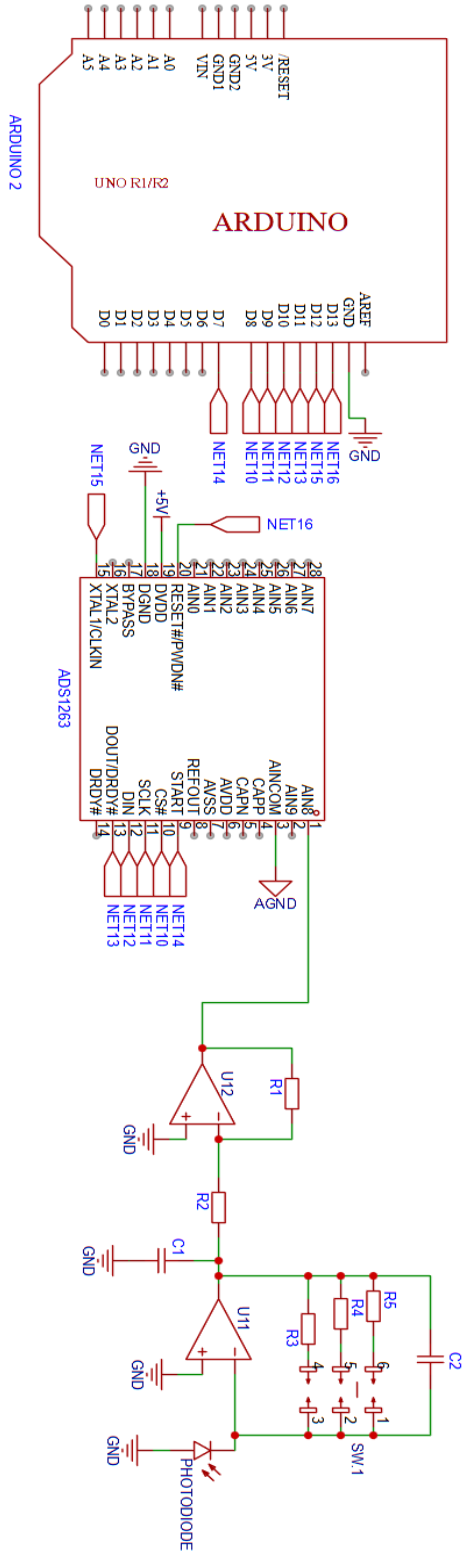
Sürücü katında kullanılan MOSFET (Q2), op-amp çıkışı için kapasitif bir yük (Gate kapasitansı) teşkil etmektedir; bu durum, şarj/deşarj döngülerinde ani akım darbelerine yol açabilmektedir. Bu etkiyi kontrol altına almak amacıyla kullanılan R95 (Gate direnci), akımı sınırlayarak op-amp çıkışını korumakta ve olası osilasyonları bastırarak kararlı bir akım akışı sağlamaktadır. Gate terminali ile toprak arasına yerleştirilen R7 direnci (pull-down), op-amp'ın reset durumunda veya yüksek empedans (High-Z) modunda olması halinde MOSFET'in kesimde (off) kalmasını garanti eder. Bu yapı, Gate terminalinin "yüzer" (floating) durumda kalmasını önleyerek, çevresel gürültü veya kaçak akımlar kaynaklı hatalı tetiklemelerin (false triggering) önüne geçer. Ayrıca, sistem kapatıldığında Gate kapasitansı için kontrollü bir deşarj yolu oluşturarak "fail-safe" kapama sağlar.

Sistemin dinamik stabilitesi, R95, C26 ve R96 bileşenlerinden oluşan frekans kompanzasyon ağı ile sağlanmaktadır. C26 kondansatörü, hızlı yük değişimlerinde MOSFET'i bypass ederek yüksek frekans kompanzasyonu sağlar ve faz marjını (phase margin) iyileştirerek döngü kararlılığını artırır. R95 direnci ise R8 üzerindeki gerilimi op-amp'ın eviren girişine taşıyarak negatif geri besleme

döngüsünü tamamlar. Akım algılama direnci (R8), kontrol edilmek istenen maksimum akım değeri ve hedeflenen geri besleme voltajı dikkate alınarak, uygun güç oranında (watt) seçilmelidir. R96 direncinin değeri, geri besleme döngüsünü sürdürecek kadar düşük, ancak ölçüm hattına yük bindirmeyecek kadar yüksek bir empedansta belirlenmelidir. Bu kompanzasyon ağı kullanılmadığı takdirde, VCCS devresi özellikle hızlı yük değişimlerine karşı kararsız bir dinamik tepki gösterebilmektedir.



Şekil 3.16 LED Kontrol Devresi



Şekil 3.17 Dijital veri toplama sistemine dönüşüm için kullanılan ADS1263 ve Arduino Uno

3.8 Fotodiyot Tabanlı Algılama

Bu ölçüm sistemi, 970–1900 nm Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR) bölgesinde yüksek hassasiyetli reflektans verisi toplamak amacıyla, Teledyne J23TE3-66C-R03M dedektörü ile PA-7-60 akımdan gerilime dönüştürücü yükseltecinin (TIA) birleşimi üzerine kurulmuştur.

Sistemde yer alan dedektör, 2,45 µm cutoff dalga boyu sayesinde hedeflenen SWIR bandını tam kapasiteyle kapsar. 3,00 mm çapındaki geniş aktif alanı, düşük ışık akılarında dahi maksimum foton toplama kapasitesi sunarken; -65 °C termoelektrik soğutma, karanlık akımı minimize ederek iyi bir sinyal-gürültü oranı (SNR) için önemlidir.

Sistemde kullanılan dedektörün yüksek algılama yeteneği ile PA-7-60'ın ultra düşük gürültü tabanı birbiri ile uyumludur. Dedektör performansı, 1,1 x 10^{12} cm$Hz^{1/2}$ /W değerindeki özgül algılama yeteneği (D*) ile çok küçük değişimlerin yakalanmasını sağlar. TIA katkısında ise PA-7-60 modeli, 0,13 pA $Hz^{1/2}$ gibi oldukça düşük bir akım gürültü yoğunluğuna sahiptir. Bu değer, dedektörün kendi gürültü eşiğinin (NEP (W/rt-Hz)) altında kalarak, yükseltme aşamasında sinyal kalitesinin korunmasını sağlar.

Kullanılan LED ışık kaynaklarının yaklaşık 1,85 kHz (Ton=270 us, %50 dt) hızında modüle edilmesi, sinyalin ortam ışığından ve düşük frekanslı gürültülerden arındırılmasını sağlar. PA-7-60, en yüksek kazanç kademesinde bile 60 kHz (düşük kazançta 200 kHz) bant genişliği sunarak, bu modülasyonlu sinyali ve harmoniklerini hiçbir faz kayması veya genlik kaybı yaşatmadan yüksek hassasiyetle takip eder.

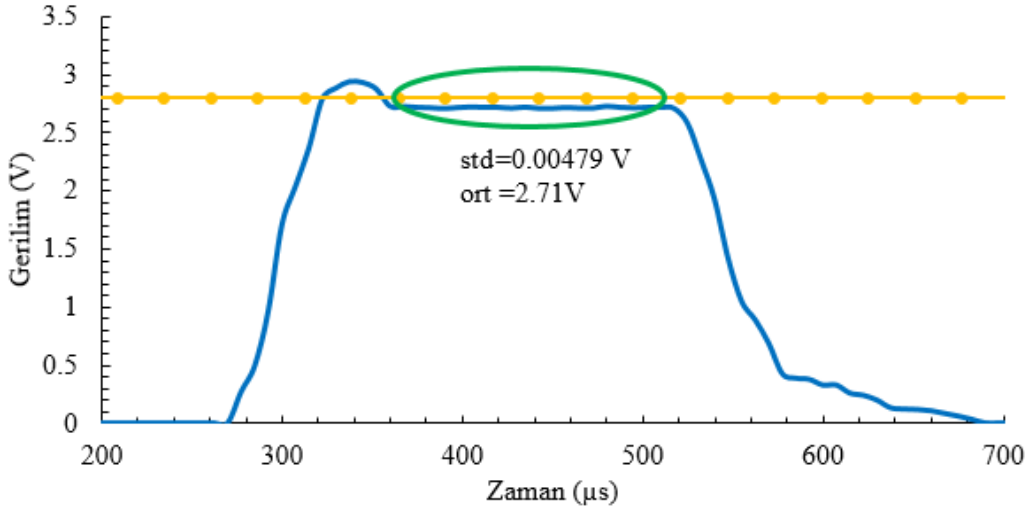
Ön yükseltici, dedektörden gelen zayıf akımı 10^6 V/A (High, 10^5 V/A (Med) veya 2,5 x 10^4 V/A (Low) seçenekleriyle gerilime dönüştürür. Dedektörün 1,4 x 10^5 ohm şönt empedansı, IA'nın ±0,001 nA mertebesindeki ultra düşük giriş akımı (input bias current) ile birleştiğinde, son derece kararlı bir sinyal elde edilir.

Sonuç olarak; bu konfigürasyon, SWIR bölgesindeki su karakteristiğinin hassas soğurma bölgelerini incelemek için gereken dinamik aralığı, düşük gürültü tabanını ve yüksek hız kabiliyetini bir arada sunan bir ölçüm zinciri oluşturur.

Yukarıda aktarılan dedektör ve TIA ile oluşturulan hassas analog ölçüm düzeneğindi tam teşekküllü bir dijital veri toplama (DAQ) sistemine dönüştürmek için ADS1263 ve bir adet Arduino uno kullanılmıştır.

ADS1263'ün 32-bit çözünürlüğü, analog ölçüm düzeneğinin sağladığı hassasiyetin, dijitalleştirme aşamasında "kuantalama gürültüsü" içinde kaybolmasını engeller.

Sistemin örnekleme hızı, ADS1263'ün sunduğu 38,4 kHz değerine set edilerek, sinyal zincirindeki zamansal çözünürlük en üst seviyeye çıkarılmıştır. 1,85 kHz hızında modüle edilen LED sinyali göz önüne alındığında, 38,4 kHz'lik hız, her bir modülasyon periyodundan yaklaşık 20 adet örnek alınmasına olanak tanır. Bu durum, sadece sinyalin genliğini ölçmekle kalmaz, aynı zamanda kare dalga formundaki yükselme ve alçalma kenarlarının dijital ortamda yüksek hassasiyetle yeniden oluşturulmasını sağlar. Bu durum LED'lerin ışıma esnasındaki kararlılığını tespit etme ve uygun bölümü tercih etme açısından önemlidir.

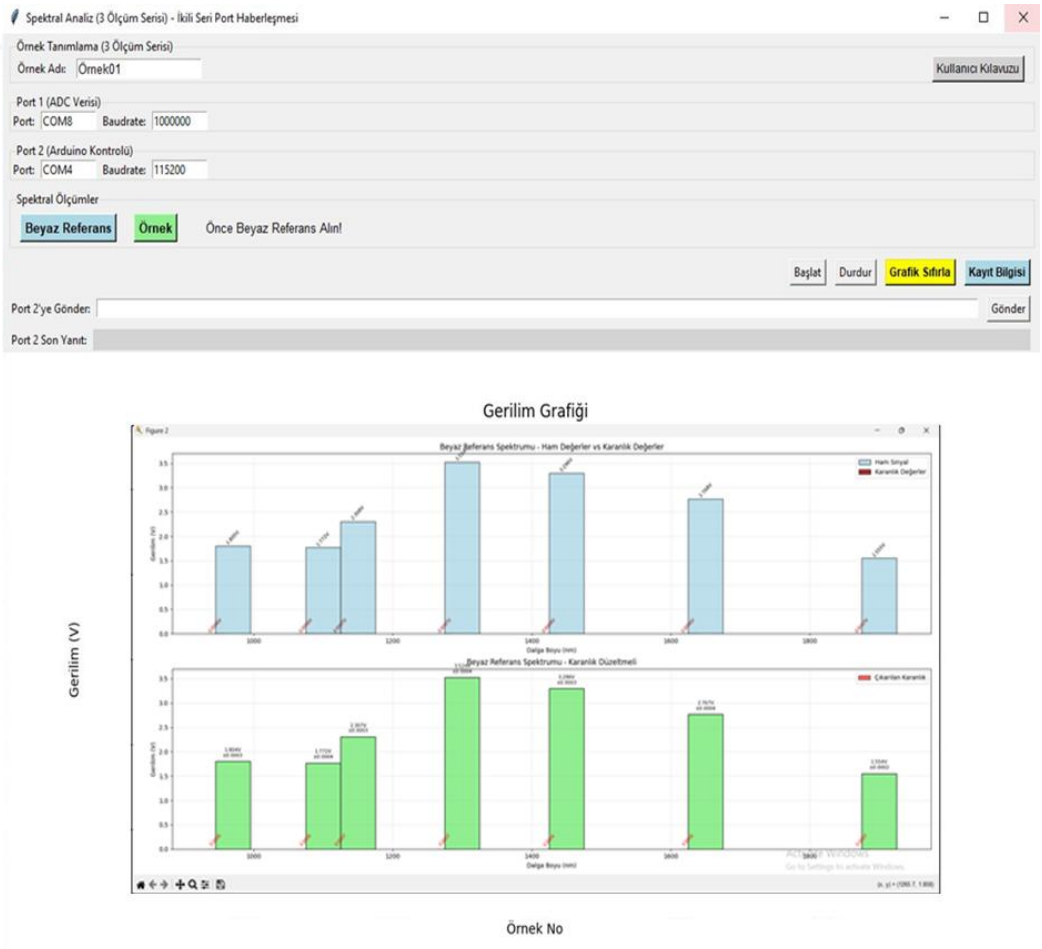


Şekil 3.18 LED atımı sırasında ADC'de okunan yansıma sinyalinin osiloskop görüntüsü

Arduino Uno, bu veri akışını yönetmek için SPI (Serial Peripheral Interface) protokolünü kullanır. SPI hattı üzerinden gerçekleştirilen haberleşme, 32-bitlik

hassas veri paketlerinin mikrodenetleyiciye kayıpsız ve eş zamanlı olarak aktarılmasını sağlar.

Son aşamada, Arduino Uno tarafından işlenen veriler USB-UART köprüsü üzerinden bilgisayar arayüzüne aktarılır. Yüksek hızlı seri haberleşme sayesinde, SWIR bölgesindeki anlık reflektans değişimleri bilgisayar ekranında gerçek zamanlı olarak görselleştirilir. Bu dijitalleştirme katmanı, laboratuvar tipi hassas bir analog düzeneği, verilerin geriye dönük analizine ve dijital filtreleme algoritmalarına imkan tanıyan gelişmiş bir veri toplama (DAQ) platformuna dönüştürmüştür.



Şekil 3.19 LED Tabanlı spektrometrenin bilgisayar arayüzü

3.9 Spektrometrenin Çalışma-Akış Şeması

Ölçümlere başlanmadan önce sensör, dedektörün yaklaşık -60 °C sıcaklığa kadar soğumasına olanak tanımak amacıyla 20 boyunca çalıştırılır. Her bir toprak

numunesi için, numune ölçümlerinden hemen önce karanlık sinyal ölçümü (KS) ve beyaz referans kalibrasyon plakası (BRKP) kullanılarak referans ölçümleri (B(λ)) gerçekleştirilir.

Her ölçüm dizisinin başlangıcında tüm LED'ler kapalı tutulur ve ortam koşulları altında fotodiyotun taban gürültü seviyesini belirlemek için bir karanlık sinyal KS kaydedilir. Bu taban seviye, kalibrasyon açısından ve özellikle (saha) ölçümleri sırasında radyometrik tutarlılığın sağlanması için kritik öneme sahiptir. Karanlık ölçümün hemen ardından BRKP ölçüm alanına yerleştirilir ve tüm dalga boyu grupları için yansıtırlığı kaydedilir.

Her bir ölçüm çevrimi sırasında, birinci mikrodenetleyici Arduino1, ADC örnekleme zamanlamasını yönetir ve her bir dalga boyu için ölçüm döngüsünü koordine eder. Spektrometrik yansıtırlık ölçümleri, özel olarak tanımlanmış bir algoritmaya göre LED gruplarının en kısa dalga boyundan en uzun dalga boyuna doğru ardışık olarak sürülmesiyle gerçekleştirilir. Sistem, ilk LED dalga boyu grubunu etkinleştirir, yansıyan sinyali kaydeder, ardından LED'leri devre dışı bırakır ve bir sonraki dalga boyuna geçer.

Arduino1 mikrodenetleyicisi, aynı zamanda fotodiyot tabanlı yansıyan ışık algılamasını eşzamanlı olarak kontrol eder. Arduino denetleyici, fotodiyottan gelen sinyalin ADC tarafından yakalanması ve bilgisayara iletilmesi için ADC'yi tetikler. Fotodiyottan elde edilen analog çıkış, ADS1263 ADC tarafından sayısallaştırılır ve bilgisayara aktarılır; böylece BRKP ölçümleri için B(λ) dizisi oluşturulur.

Bu işlem, yedi dalga boyu grubunun tamamı boyunca ardışık olarak sürdürülerek bir tam spektral ölçüm çevrimi tamamlanır. Veri güvenilirliğini ve istatistiksel tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla, bu ölçüm dizisi 10 kez tekrarlanmaktadır.

Daha sonra, toprak numunesi aynı veri alma prosedürü izlenerek ölçülür. Laboratuvar testlerinde numune, ölçüm tablası üzerine yerleştirilen ve aydınlatma alanı ile hizalanan bir Petri kabı içine konur. Saha ölçümlerinde ise sensör başlığı hazırlanmış toprak yüzeyi üzerine yerleştirilir ve düşey aydınlatma geometrisinin korunması amacıyla bir su terazisi kullanılarak dengelenir. Toprak numunesine ait yansıma ölçümleri T(λ) dizisi içinde saklanır. Veri güvenilirliği ve istatistiksel

tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla, ölçüm dizisi 10 kez tekrarlanır. Genel çalışma akışı Şekil 3.20'de gösterilmektedir.



Şekil 3.20 Sisteme ait çalışma akış şeması

4
MATERYALLER ve YÖNTEMLER

4.1 Toprak Numuneleri

Toprak örnekleri, Türkiye'de İzmit Körfezi'nde bulunan TÜBİTAK yerleşkesinden toplanmıştır. Örnekleme, laboratuvar kalibrasyonu için on noktayı ve arazi doğrulaması için ilave beş noktayı kapsamaktadır. Her bir noktada, yüzeydeki artıklar uzaklaştırıldıktan sonra 5, 15 ve 30 cm derinliklerden homojenleştirilmiş kompozit örnekler alınmıştır. Tekstürel sınıflandırma ve bileşimsel doğrulamanın ardından örnekler iki gruba ayrılarak işlenmiştir: taze ve etüvde kurutulmuş (105 °C). Her iki grup da Şekil 4.1'de gösterildiği gibi 0,5; 1; 2 ve 3 mm eleklerden geçirilerek sistem kalibrasyonu için toplam yirmi farklı toprak tipi elde edilmiştir (Şekil 4.2). Ayrıca, AB EMPIR "SoMMeT" projesi kapsamında doğrulama testleri için uluslararası karşılaştırmada kullanılmış dört farklı toprak tipi ile de ölçümler alınmıştır (SoMMet Project, 2026). Bunlardan ikisi (organik ve inorganik) DTI/Danimarka tarafından hazırlanıp temin edilmiş, diğer ikisi ise İtalya'nın Foggia kenti yakınlarında, Apulia bölgesindeki yüksek seviyeli test sahasından toplanmıştır.



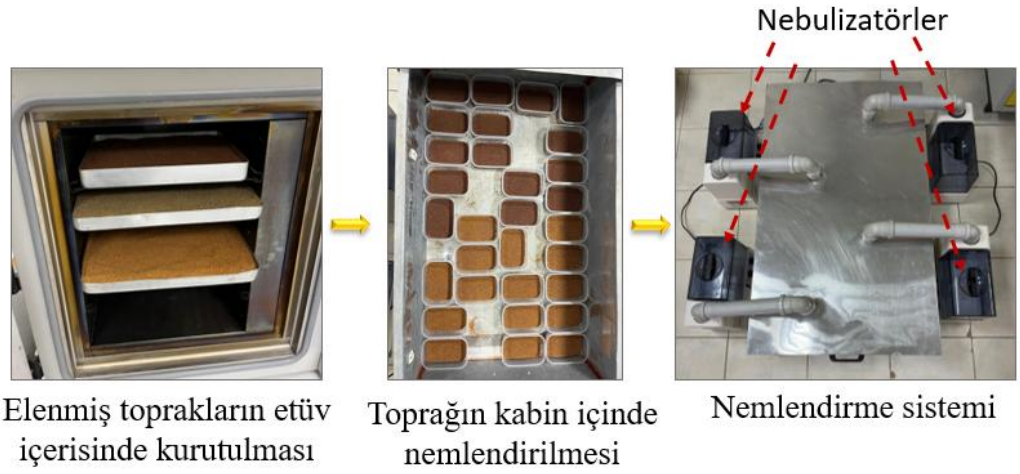
Şekil 4.1 Toprakların farklı boyutlardaki elekler ile ayrıştırılması



Şekil 4.2 Ölçümleri alınan toprak numuneleri

4.1.1 İstenen Rutubet Miktarına Sahip Toprak Numunelerinin Hazırlanması

Elenen ve kurutulan örnekler Şekil 4.3'te gösterildiği şekilde özel olarak tasarlanmış bir şartlandırma kabinine yerleştirilerek kademeli olarak rutubetlendirilmiştir (Tüccar et al., n.d.). Kısaca, sistem 1–6 μm boyutlarında damlacıklar üreten dört ultrasonik nebülizatörle donatılmış, hermetik bir metal kabinden oluşmaktadır. Toprak, geniş plakalar üzerine ince tabakalar (5–10 mm) hâlinde yayılmış ve oda sıcaklığında rutubetlendirilmiş havaya maruz bırakılarak kademeli ve homojen bir ıslanma sağlanmıştır. Nebülizatör çıkışı, üniform rutubet koşullarını koruyacak şekilde ayarlanmış; nihai rutubet seviyesi ise maruz kalma süresi ile kontrol edilmiştir. Şartlandırma sonrasında örnekler plastik hermetik kaplara alınarak homojenleşmenin sağlanması amacıyla 4 °C'de bir hafta süreyle depolanmıştır. Bu prosedür, tane boyutu ve dokuyu koruyarak homojen şekilde rutubetlendirilmiş topraklar elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 4.3 Toprak Numunelerinin Rutubetlendirilmesi

4.1.2 LED Tabanlı Spektrometre ile Alınan Ölçümlerin İzlenebilirliğinin Sağlanması

Toprak rutubet içeriği, UME birincil seviye sistemine izlenebilir iki referans yöntem kullanılarak belirlenmiştir (Atag et al., 2025): esas olarak kalibrasyon için kullanılan etüv esaslı kurutarak kütle kaybı (Loss-on-Drying, LoD) yöntemi ve doğrulama ile arazi ölçümleri için kullanılan termogravimetrik Laboratuvar Rutubet Analizörü. Her iki yöntem de doğrudan gravimetriye dayanmakta olup, kurutma sonrası kütle kaybının ölçülmesi esasına dayanmaktadır.

4.2 Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Yakın mesafe algılayıcılar (spektrometreler veya çoklu/hiperspektral kameralar) kullanılarak toprak rutubetinin belirlenmesi, suyun toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmesi ve buna bağlı olarak yansıtırlığını (reflektansını) modifiye etmesi ilkesine dayanmaktadır. Geleneksel olarak rutubet kestirimi, referans veriler ile ölçülen veriler arasında kurulan doğrusal bir ilişkiye dayalı laboratuvar kalibrasyonu ile gerçekleştirilmektedir (Zhe Yin et al., 2013); bunun yanı sıra ampirik yöntemler ve fiziksel model ters çözümlemeleri de mevcuttur (McGuirk & Cairns, 2024). Bu çalışmada, çoklu dalgaboyu reflektans kombinasyonları (LED dalga boyu kanalları) üzerinde farklı normalizasyon uygulamaları ve regresyon modelleri kullanarak çeşitli topraklarda karmaşık su emilim tayfı üzerinden toprak yüzey rutubeti tahmininin yüksek doğrulukta yapmak hedeflenmektedir.

Çalışmada, toprak emilim tayfındaki her bir tepe ve çukur (970 -1900 nm aralığındaki) bir özellik (feature) olarak ele alınmış ve bu özelliklerden 3–7 özellikli reflektans alt-kümeleri için model ve normalizasyon seçiminin etkisini karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu inceleme esnasında K-katlı (stratified) çapraz doğrulama ile genellenebilirliği ölçmek; hatayı ve değişkenliği raporlayarak hangi yapılandırmaların istikrarlı ve etkili olduğunu ortaya koymaktır. Böylece tüm toprak türleri için yüzey rutubeti tespitinde en iyi yaklaşım bulunaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada SVM, Random Forest, Linear Regression, Decision Tree, Boosting, kNN, Gaussian Process Regression, Neural Network modelleri denenmiş bununla beraber Her modelin ayrıca bir hyperparameter optimization (hypr) versiyonu da kullanılmıştır. Yani hem sabit parametrelerle hem de otomatik hiperparametre optimizasyonu ile çalıştırılarak değerlendirme yapılmıştır. Ancak sadece kayda değer sonuçlar alınan 5 modele değinilecektir. (SVM, Random Forest, Boosting, Gaussian Process Regression, Neural Network).

4.2.1 Gaussian Süreç Regresyonu (GSR)

Gaussian Process Regression (GPR) modeli, doğrusal olmayan (nonlineer) ilişkilerin modellenmesinde kullanılan olasılıksal bir regresyon yöntemidir (Wan et al., 2023). GPR, bir fonksiyonun parametrelerini doğrudan tahmin etmek yerine, tüm olası fonksiyonların dağılımını tanımlar. Modelin amacı, gözlemlenen ölçüm noktalarına en uygun şekilde uyan ve aynı zamanda bu noktalar arasındaki belirsizliği de ifade eden bir tahmin fonksiyonu elde etmektir.

Model, herhangi bir giriş noktası x için fonksiyon değerlerinin ortak bir çok değişkenli Gauss ağılımına sahip olduğunu varsayar (Denklem 8).

$$f(x) \sim \mathcal{GP}\big(m(x), K(x_i, x)\big) \tag{8}$$

$m(x)$: Ortalama fonksiyonu (genellikle 0 alınır),

$K(x_i, x)$: Kovaryans (kernel) fonksiyonu olup iki giriş noktası arasındaki benzerliği tanımlar.

Bu çalışmada, ölçüm verilerindeki doğrusal olmayan ilişkileri (örneğin toprak reflektansı ile rutubet arasındaki ilişki) modelleyebilmek amacıyla kovaryans

fonksiyonu olarak Denklem 9'da verilen Squared Exponential (RBF, Gaussian) kernel kullanılmıştır.

$$K(x_i, x) = \sigma_f^2 exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{2l^2}\right) \quad (9)$$

σ_f^2: Fonksiyonun çıktı varyansı,

l : Uzunluk ölçeği (length-scale) olup fonksiyonun değişim hızını belirler

Yeni bir x_* noktasındaki tahminin ortalaması μ_* ve varyansı σ_*^2 Denklem 10 ve 11 ile hesaplanır:

$$\mu_* = K(x_*, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} y \quad (10)$$

$$\sigma_*^2 = K(x_*, x_*) - K(x_*, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} K(X, x_*) \quad (11)$$

Burada

σ_n^2: ölçüm verilerinin varyansı

y:Ölçülen rutubet değerleridir.

Model, tahmin edilen ortalama değer μ_* ile birlikte her tahmin noktası için varyans σ_*^2 bilgisi de sağlayarak tahmin belirsizliğini nicel olarak ifade eder. Bu özelliği sayesinde GPR, hem tahmin hem de güven aralığı bilgisi üretir.

4.2.2 Destek Vektör Regresyonu

Support vector regression (SVR) modeli sınıflandırma için kullanılan support vector machine (SVM) modelinin süreki değer tahmini (regresyonu) için uyarlanmış halidir. Modelin amacı bir ε epsilon toleransı içersinde tahmin eğrisini (çok boyutlu bir bir uzay için bir yüzeyi) ölçüm noktolalarına olabildiğince yaklaştırmaktır. Model denklem 12'de verilen objective function (primal formula olarak da bilinir (Vapnik, 1995). Denklem 13'teki kısıtlamaları sağlaycak şekilde minimize ederken ε epsilon toleransından küçük hataları göz ardı eder ve sadece toleransdan büyük değerleri dahil ederek optimizasyon fonksiyonunu minimize etmeye çalışarak tahmin eğrisini bulmaya çalışır.

$$J(\omega) = \frac{1}{2}\|\omega\|^2 + C\sum_{n=1}^{N}(\xi_n + \xi_n^*) \tag{12}$$

$$\begin{cases} y_n - (\omega^T x_i + b) \leq \varepsilon + \xi_n \\ (\omega^T x_i + b) - y_n \leq \varepsilon + \xi_n^* \\ \xi_n, \xi_n^* \geq 0 \end{cases} \tag{13}$$

ω:modelin ağırlıkları

b:bias

ξ_n, ξ_n^*: ε epsilon toleransının dışına çıkan hatalar

C: overfitting'I engellemek için regularization parametresi. Cezalandırmanın nedekar büyük yada küçük olucağaını belirlemek için.

Bu çalışmada; Denklem 14'te verilen SVR modelinin tahmin fonksiyonunda toprak reflektansı ile rutubet arasındaki gibi doğrusal olmayan ilişkeride öğrenebilmesini sağlmak için kernel fonksiyonu için denklem 15'teki Gaussian kernel kernel kullanılmıştır. Model tanmin fonsiyonunu bulmak için Sequential Minimal Optimization (Fan et al., 2005) algoritmasını kullanmaktadır.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N}(\alpha_i - \alpha_i^*)K(x_i, x) + b \tag{14}$$

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{\gamma}\right) \tag{15}$$

x_i:

$K(x_i, x)$:kernel fonksiyonu

α_i, α_i^*: Lagrange katsayıları

b: bias

γ: karnel scale

Toprak reflektansları ve rutubet değerleri ile SVR modelimizi eğitirken optimum hiperparametleri bulmak için C regularization parametresi, ε epsilon hata toleransı

ve γ karnel scale parametrelerine hiperparametre optimizasyonu uygulanmıştır. Model 30 farklı hiper parametre kombinasyonu için ayrı ayrı eğitilir ve en başarılı model seçilerek kullanılır.

4.2.3 LSBoost Regresyonu

LSBoost (Least Squares Boosting) regresyonu, weak learners (decision tree) art arda eğitilerek birleşik bir güçlü model oluşturduğu bir topluluk (ensemble) yöntemidir (Friedman, 2001). Bu yaklaşım, boosting prensibine dayanır; her yeni model, bir önceki modellerin hatalarını (residual) azaltacak şekilde eğitilir. Böylece model, hata terimlerini aşamalı olarak minimize eder ve yüksek doğrulukta tahminler üretir.

Modelde temel öğrenici olarak karar ağaçları (decision trees) kullanılır. Başlangıçta, tüm örnekler eşit ağırlığa sahiptir ve ilk karar ağacı, hedef değişken Y'yi tahmin etmeye çalışır. Daha sonra her bir örnek için tahmin hatası (residual) hesaplanır ve bir sonraki ağaç, bu hataları tahmin etmeye yönelik olarak eğitilir. Bu işlem, toplam M iterasyon boyunca tekrarlanır. Her iterasyonda elde edilen model $T^{(m)}(x)$, öğrenme oranı (learning rate) ν ile ağırlıklandırılarak toplu modele eklenir:

$$f_M(x) = f_{M-1}(x) + \nu T^{(m)}(x) \tag{16}$$

$$f_M(x) = f_{M-1}(x) + \nu T^{(m)}(x)\text{Burada}$$

Sonuç olarak, LSBoost yöntemi, hataları sistematik biçimde azaltarak tahmin performansını iyileştirir. Random Forest yönteminden farklı olarak, ağaçlar birbirinden bağımsız değil, ardışık olarak eğitilir. Bu nedenle LSBoost, bias'ı azaltmada etkili olup özellikle yüksek doğruluk gerektiren regresyon problemlerinde güçlü bir alternatif sunar. Bu çalışmada 100 karar ağacı kullanılmıştır.

4.2.4 Rastgele Orman Regresyonu

Random Forest (Rastgele Orman) Regresyonu, birden fazla karar ağacının birleşik tahminlerinden yararlanarak regresyon problemlerini çözmek için kullanılan güçlü bir topluluk (ensemble) yöntemidir (Breiman, 2001). Topluluk yöntemi, birden fazla temel modelin tahminlerini birleştirerek daha kararlı ve genelleyici sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Model, temel olarak bootstrap aggregating (bagging) yöntemi

ile çalışır ve her ağacın eğitiminde rastgele bir feature altkümesi kullanılır. Bu yaklaşım, modelin varyansını azaltır ve aşırı öğrenmeyi (overfitting) önlemeyi sağlar.

Veri setinden rastgele oluşturulan B örneklem kümesinin her biri üzerinde bir karar ağacı $T^{(b)}$ eğitilir. Karar ağacının her düğümünde bölünme yapılırken, tüm öznitelikler yerine yalnızca rastgele seçilen n sayıda feature (mevcut özniteliklerin yaklaşık üçte biri) dikkate alınır ve en iyi bölünme bu altküme içerisinden seçilir. Bu mekanizma, her ağacın farklı yapılar öğrenmesini sağlar ve ağaçlar arasında çeşitlilik yaratır.

Yeni bir veri noktası x^* için modelin tahmini, tüm ağaçların çıktılarının ortalaması alınarak hesaplanır:

$$f(x^*) = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} T^{(b)}(x^*) \tag{17}$$

$$f(x^*) = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} T^{(b)}(x^*)\text{Bu}$$

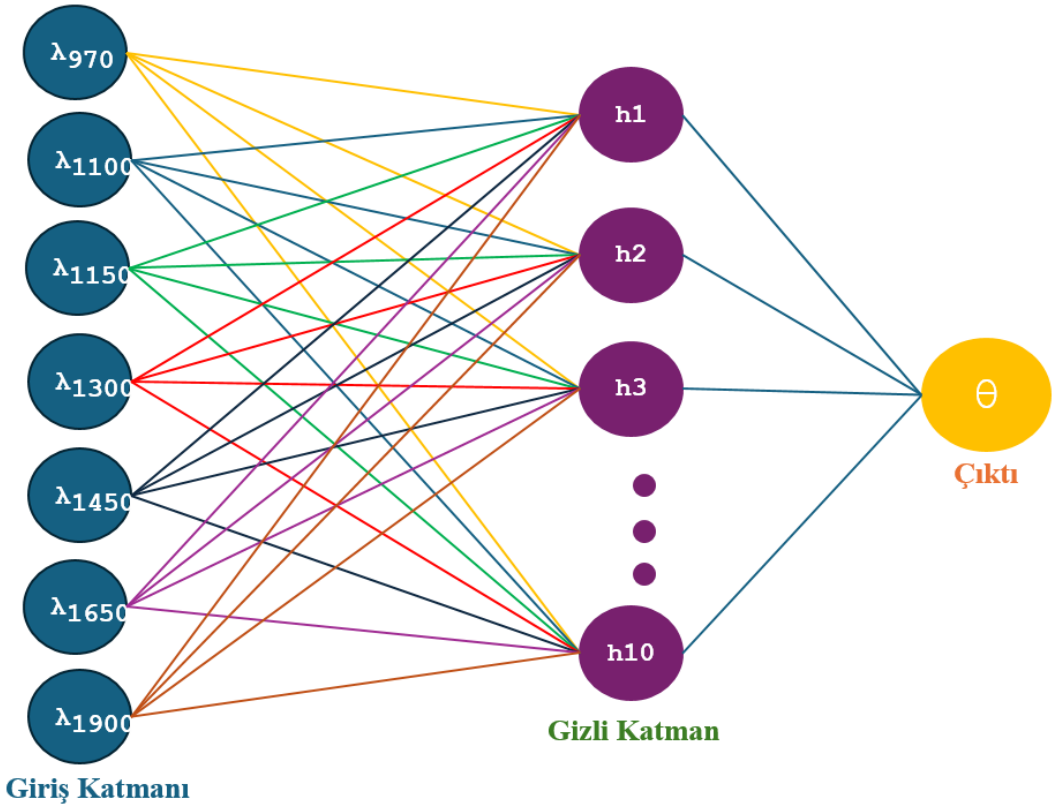
4.2.5 Tek Katmanlı Sinir Ağı

Tek katmanlı yapı, toprak rutubeti ile reflectance spektrumu gibi doğrusal olmayan ilişkileri öğrenme kapasitesine sahiptir ve hızlı eğitim imkânı sağlamaktadır. Sinir ağı, 350–2500 nm dalga boyu aralığındaki 2151 boyutlu spektral veriyi alır ve 10 nöronlu tek bir gizli katman aracılığıyla rutubet tahmini yapmayı amaçlar. Şekil 4.4'te, giriş, gizli ve çıkış katmanlarının nöron sayıları ve bağlantı yapısı gösterilmektedir. Bu ağda giriş, gizli ve çıkış katmanlarındaki nöronlar birbirleriyle tamamen bağlantılıdır (fully connected) ve gizli katmandaki nöronlar ReLU aktivasyon fonksiyonunu kullanmaktadır. Model, ağırlıklarını optimize etmek için limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno quasi-Newton algoritmasını kullanmakta ve kayıp fonksiyonu olarak Mean Squared Error (MSE) (denklem 18) değerini minimize etmektedir. LBFGS, standart bir line-search yöntemi ve Hessian matrisinin yaklaşık değerini kullanarak ağırlıkları günceller.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\tilde{y}_i - y_i)^2 \quad (18)$$

$\tilde{y}_i$: tahmin edilen değer

y_i : ölçülen değer



Şekil 4.4 Tek katmanlı sinir ağı modelinde giriş, gizli ve çıkış katmanlarının nöron sayıları ve bağlantı yapısı

4.3 Katmanlı K-Fold Bölümleme ve Özellik Kombinasyonl arı

İlk olarak, hedef değişken olan rutubet değerini ve 7 farklı dalgaboyu için oluşturulan reflektans değerlerini (0 ile 100 arasında) içeren veriler hazırlanır. Ardından Katmanlı K-fold (Stratify) yöntemi ile rutubet değerleri önce eşit aralıklı 22 sınıfa ayrılır ki bu çalışmada kullanılan torakların (%0-%21,5 mc) yaklaşık %1 mc değerle ayrılması demektir. Sonra bu sınıflar temelinde K = 5 katlı, sınıf oranlarını koruyan bir bölümleme yapılır. Bu yöntemle rutubet dağılımının fold'lara dengeli olarak paylaştırılması hedeflenir.

Eğitim ve test ayrımı için her iterasyonda 1 fold test, kalan 4 fold eğitim için kullanılır. 1'den 5'e kadar tüm test fold seçenekleri denenir ve her biri için eğitim ve test dizinleri oluşturulur.

Özellik kombinasyonları kapsamında 3 ile 7 arası özellik (feature) sayısı için tüm kombinasyonlar üretilir.

4.3.1 Katmanlı K-Fold Bölümleme (Stratified K-Fold)

Modellerin genelleme performansını değerlendirmek amacıyla, veri kümesi katmanlı K-katlı çapraz doğrulama (stratified K-fold cross-validation) yöntemiyle eğitim (%80) ve doğrulama (%20) alt kümelerine ayrılmıştır. Ancak hedef rutubet değerleri sürekli bir değişken olduğu için, sınıf etiketlerine dayalı katmanlı (stratified) çapraz doğrulama doğrudan kullanılamamaktadır; çünkü bu yöntem yalnızca kategorik veya ayrık hedef değişkenler için tanımlıdır. Bu nedenle, öncelikle rutubet değerleri belirli aralıklara (bins) ayrılarak yaklaşık kategorik bir biçime dönüştürülmüştür. Bu işlemde, rutubet değerleri minimum ve maksimum değerleri arasında eşit aralıklar tanımlanmış ve toplamda 22 adet aralık oluşturulmuştur.

Elde edilen bu kategorik etiketler kullanılarak katmanlı K-katlı çapraz doğrulama (stratified K-fold cross-validation) uygulanmıştır. Böylece her fold'un, hedef değişkenin tüm aralıklarını temsil eden örnekler içermesi sağlanmış ve veri dağılımındaki dengesizlikler önlenmiştir. Bu yaklaşım, özellikle regresyon problemlerinde modelin hem düşük hem yüksek değer aralıklarını yeterli şekilde öğrenebilmesini garanti ederek, tahmin performansının daha güvenilir biçimde değerlendirilmesini sağlar. Son olarak istatistiksel güvenilirlik ile model RMSE ve R^2 gibi metriklerin ortalama ve standart sapmalarının daha anlamlı hale geldiği görülür.

4.3.2 Özellik Kombinasyonları (Feature Subsets)

7 yansıma kanalından (970, 1100, 1150, 1300, 1450, 1650, 1900 nm) en az 3 adet olmak üzere 7'ye kadar kullanımda 98 adet kombinasyon oluşturulur. Her kombinasyon ayrı bir deney senaryosu olarak değerlendirilir. Böylece sensör optimizasyonu ve karşılaştırmalı analiz sağlanabilir. Sensör optimizasyonu ile

dalgaboylarının önemli tespit edilerek, maliyet ve hesaplama yükü açısından en verimli dalgaboyları seçilebilir. Karşılaştırmalı analiz ile hangi kanal kombinasyonunun hangi model ve normalizasyonla en iyi sonuç verdiği sistematik olarak gözlemlenir. Bu şekilde çeşitli modelleri eğitmeden ve test etmeden önce efektif, adil ve karşılaştıralabilir bir eğitim-test veri yapısı oluşturulmuştur. Ardından oluşturulan bu veri yapısı çeşitli normalizasyon türleri uygulanarak veya uygulanmadan modellere aktarılır.

Aşağıda kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir;

i) none (Ham veri): Ham değerler kullanılır. Modellerin birim/ölçek duyarlılığını olduğu gibi bırakılır.
ii) snv (Standard Normal Variate, örnek-bazlı): Her örnek kendi ortalama ve standart sapması ile normalize edilir:

Spektroskopik ölçüm verilerinde sıkça kullanılan SVN normalizasyon yönteminin temel amacı ölçümlerde saçılma (scattering) ve yol uzunluğu farkı gibi hataların etkisini azaltarak spektrumlar arasındaki farkları minimize etmektir. SNV normalizasyonu her bir reflektans spektrumuna aşağıdaki denkleme göre ayrı aygı uygulanmıştır:

$$x_i' = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \tag{19}$$

x_i' : SNV uygulanmış yeni değer

$\bar{x}$: Spektrumun ortalama değeri

σ: spectrum standart sapması

x_i: i'inci lede ait reflektans değeri.

iii) minmax (özellik-bazlı 0–1 ölçekleme): Her özellik kendi min ve max değerine göre ölçeklenir.

Min-max normalizasyonu (denklem 19), makine öğrenmesinde sık kullanılan bir yöntemdir ve verileri [0,1] aralığına ölçekleyerek veri setindeki çok küçük veya çok büyük değerlerin modelin performansını olumsuz etkilemesini önlemeyi amaçlar.

Özellikle sinir ağları ve regresyon modelleri gibi ölçek duyarlı algoritmalar için kritik bir ön işlem adımıdır.

$$x_i' = \frac{x_i - x_{min}}{x_{min} - x_{max}} \tag{20}$$

iv) zscore (özellik-bazlı standartlaştırma): Her özellik için ortalaması 0, std 1 olacak şekilde veriler normalize edilir.

Z-score normalizasyonu (denklem 20), SVN normalizasyonu oldukça benzerdin ancak en önemli farkı SVN normalizasyonu her spektruma ayrı ayrı uygulanırken z-core normalizasyonu bütün verine uygulanır. Yani $\bar{x}$ ortalama ve σ standart sapma değerleri SNV normalizasyonun aksine bütün verinin setinin ortalama ve standart sapmalarıdır. Bunun amacı makine öğrenmesi modelleri farklı LED reflektans değişkeleri arasındaki karşılaştırmayı kolaştırmaktır.

Aşırı düşük ve aşırı büyük değerleri etkisini azaltır ve ölçek duyarlı modellerin performansını iyileştirir. Yani bütün verinin ortalama ve standart sapmalarını kullanarak model başarımını arttırmayı hedefler.

5
DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Rutubetlendirilmiş Toprak Numuneleri Kullanılarak LED Tabanlı Spektrometrenin Kalibrasyonu

Bu çalışmada, spektral imzalar ile toprak rutubet içeriği (Soil Moisture Content, SMC) arasındaki ilişkinin farklı toprak türleri ve fiziksel bileşimler için analiz edilebilmesi amacıyla kapsamlı bir deneysel veri seti hazırlanmıştır. Sistem kalibrasyonu, ön koşullandırılmış (preconditioned) toprak numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

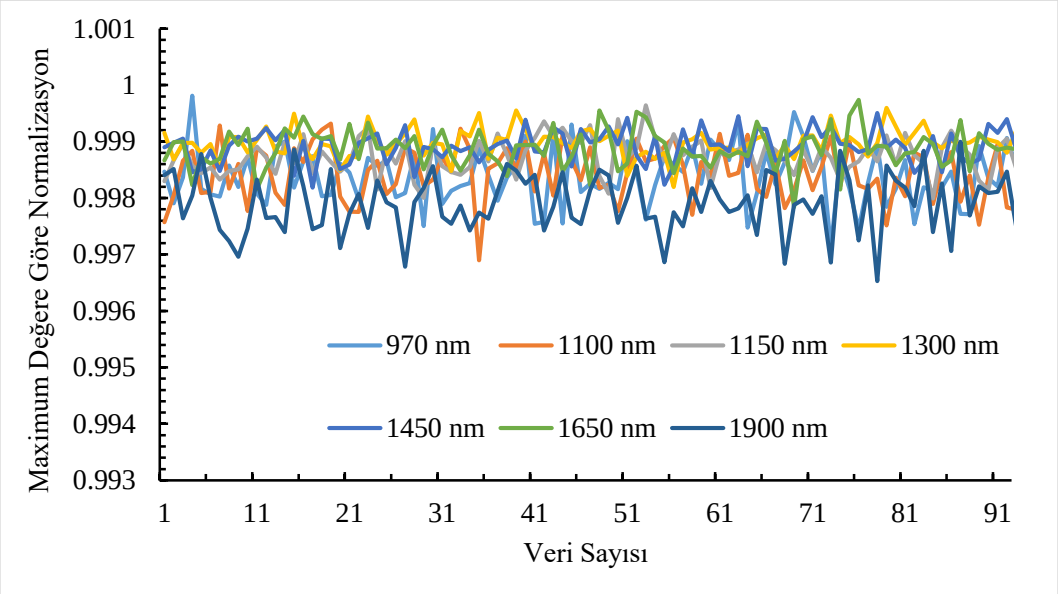
Toplamda, farklı toprak dokuları ve tane boyutu dağılımlarını temsil eden 20 ayrı kalibrasyon seti hazırlanmıştır. Bu setler 5 farklı toprak türünün 0,5 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm elekler kullanılarak hazırlanmıştır. Her bir set, tamamen kuru durumdan başlayarak %25 rutubet içeriğine kadar, kontrollü ve 15 farklı kademeli adımlarla rutubetlendirilmiştir. Ortalama olarak her bir kalibrasyon seti, 300 (5x4x15) farklı spektral veri oluşturmuştur.

Doğal değişkenliği hesaba katmak ve veri setinin sağlamlığını artırmak amacıyla, elenmemiş doğal toprak numuneleri üzerinde yaklaşık 100 ek tekrar ölçümü yapılmış ve toplam spektrum sayısı yaklaşık 400(100+300)'ye çıkarılmıştır. Her bir ölçümde üç ayrı numune hazırlanmış ve bu numunelerden üçer spektral okuma alınmış olup, sonuç olarak nihai düzenlenmiş veri seti yaklaşık 3600 (3x3x400) adet tekil spektrumdan oluşmuştur. Bu veri seti, model eğitimi ve doğrulaması için güçlü bir temel sağlamaktadır.

Her ölçüm sırasında, ön koşullandırılmış toprak numunesi bir Petri kabına yerleştirilmiş, tartılmış ve spektrometrenin ölçüm platformuna konumlandırılmıştır. Ölçüm öncesinde cihaz elektroniği 20–25 dakika çalıştırılarak termal kararlılık sağlanmıştır. Veri toplama süreci, karanlık sinyal (dark) kaydı ile başlatılmış, ardından Spectralon® yansıtma standardı kullanılarak beyaz referans ölçümü gerçekleştirilmiştir Şekil 5.1'de beyaz stabilite verilerinin normalizasyonları verilmiştir. Sistem, rastgele gürültüyü azaltmak amacıyla karanlık, beyaz ve toprak spektrumları için 10 ardışık taramanın ortalamasını alacak şekilde

yapılandırılmıştır. Beyaz referans ölçümünü takiben toprak yansıtma spektrumu kaydedilmiş ve her bir toprak rutubet seviyesi için üç tekrar ölçüm alınarak ölçüm tekrarlanabilirliği güvence altına alınmıştır.

Spektral ölçümlerin ardından, Petri kabı yeniden tartılmış ve numune, gerçek rutubet içeriğinin belirlenmesi amacıyla kayıpla kurutma (Loss-on-Drying, LoD) analizine alınmıştır. Numuneler, ISO 11461, ISO 17892-1 ve ISO 11465 standartlarına uygun olarak 105 °C'de kurutulmuştur. Bu standartlar rutubet tayini için 105 ±5 °C'yi önermektedir. ASTM D2974 ve ASTM D2216 standartları ise 110 ±5 °C'ye kadar izin vermektedir. ISO 11461 ayrıca fırın sıcaklık dalgalanmasını ±5 °C ile sınırlandırmaktadır. Yüksek organik madde içeriğine sahip topraklar için ise tüm standartlar, termal bozunmayı önlemek amacıyla kurutma sıcaklığının yaklaşık 50 °C'ye düşürülmesini tavsiye etmektedir.



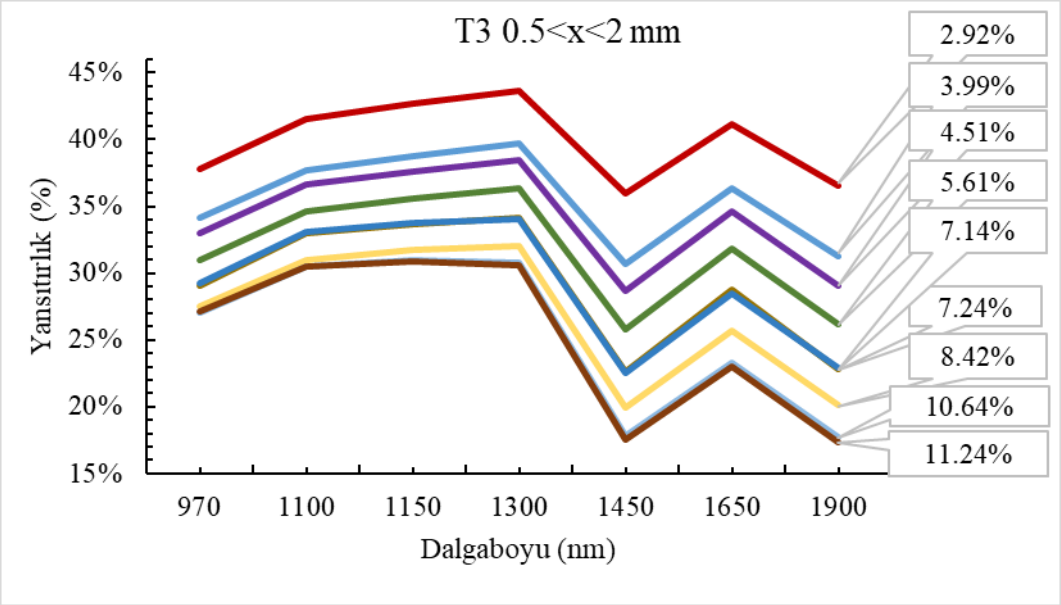
Şekil 5.1 Yedi farklı dalga boyuna sahip LED'lere ait beyaz stabilite verilerinin normalizasyonu

5.2 Rutubet Tahmininde Fiziksel Model Yaklaşımı

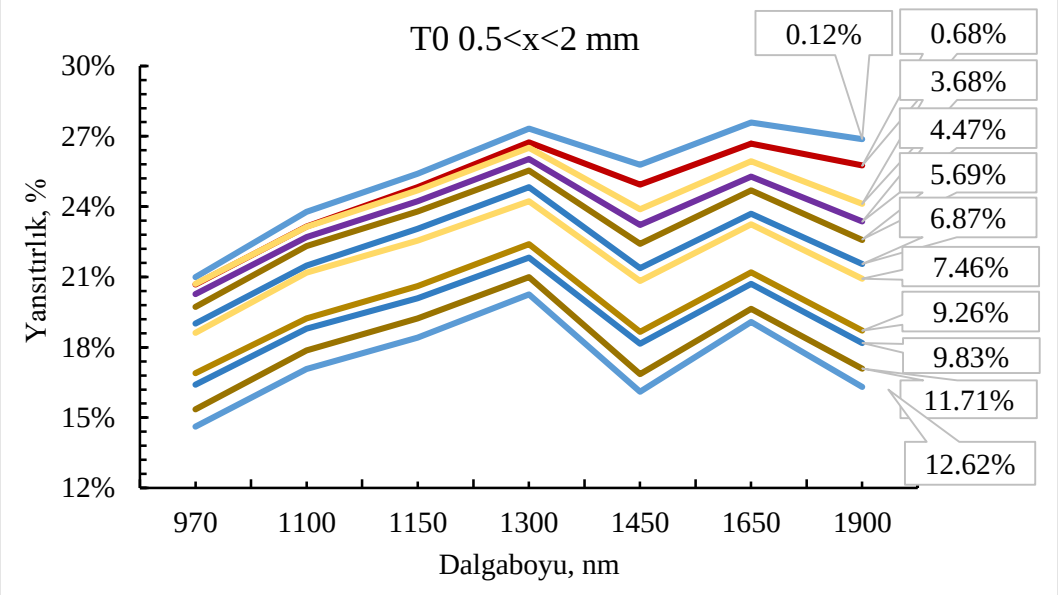
Toprak rutubet içeriği (TRİ) ile toprak yansıtırlığı (reflektans) arasındaki ilişki, elektromanyetik tayfın Görünür (Vis), Yakın Kızılötesi (NIR) ve Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR) bölgelerinde; doğrusal, doğrusal olmayan, üstel, ters-üstel ve logaritmik biçimler dâhil olmak üzere kapsamlı biçimde incelenmiştir (McGuirk & Cairns, 2024). Bu ilişki için tek ve kesin bir model bulunmamasının sebebi, seçilen

dalga boyu bantlarına, toprak türü, toprak dokusu, toprak parçacık boyutu ve TRİ miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

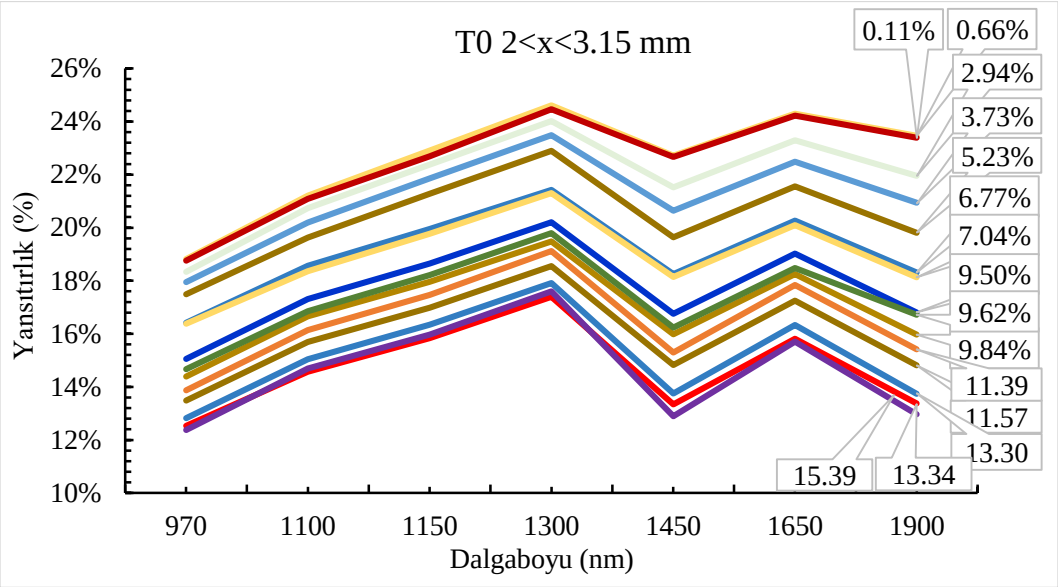
TRİ'nin kritik bir değerin (doygunluğa geçiş noktası) altında olduğu durumlarda, rutubet artışıyla birlikte yansıtırlık genellikle ölçülebilir biçimde azalmakta ve doğrusal yaklaşımlar çoğu zaman iyi sonuç vermektedir. Bu kritik değer aşıldığında, ilişkiyi tanımlamak için daha karmaşık doğrusal olmayan modellerin kullanılması daha yüksek başarım sağlamaktadır.



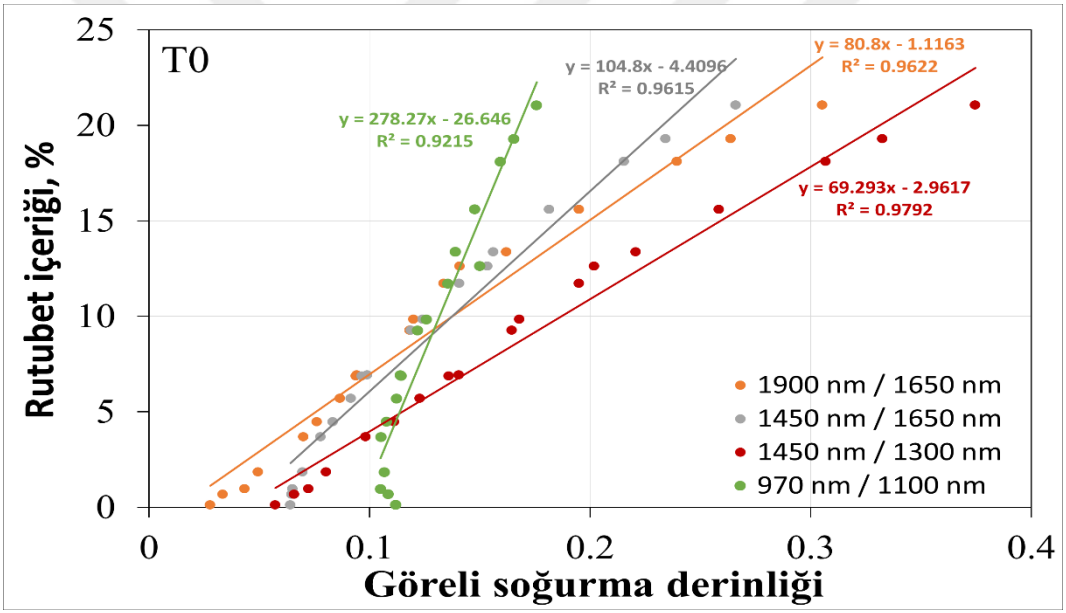
Şekil 5.2 T3 toprak türüne ait 0,5 ile 2 mm aralığa sahip eleklerden geçirilerek elde edilmiş 9 farklı rutubet değerindeki numunelerin tayfsal görüntüsü



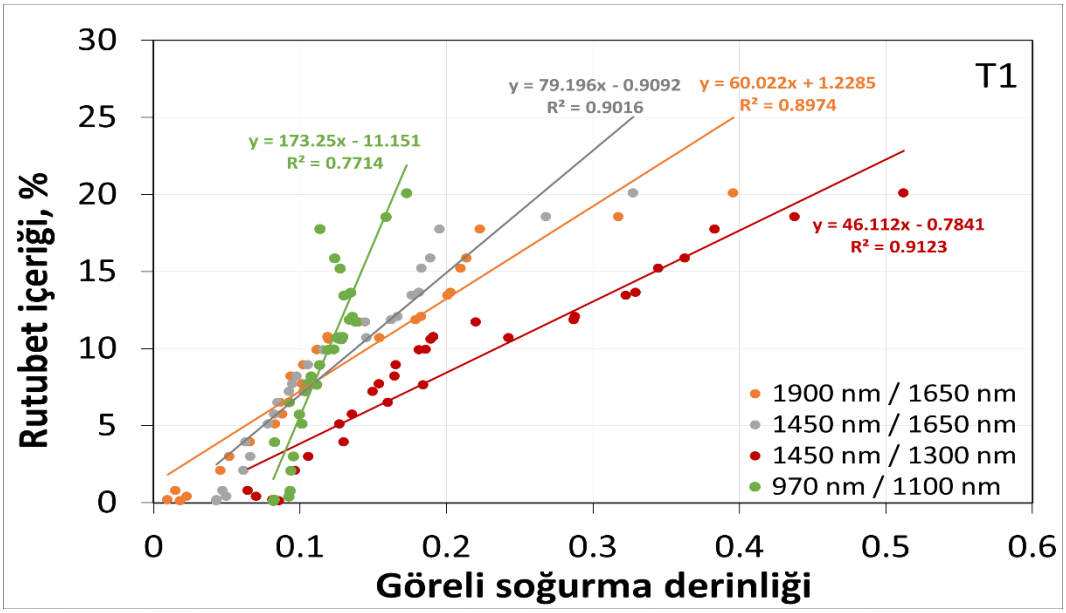
Şekil 5.3 T0 toprak türüne ait 0,5 ile 2 mm aralığa sahip eleklerden geçirilerek elde edilmiş 11 farklı rutubet değerindeki numunelerin tayfsal görüntüsü



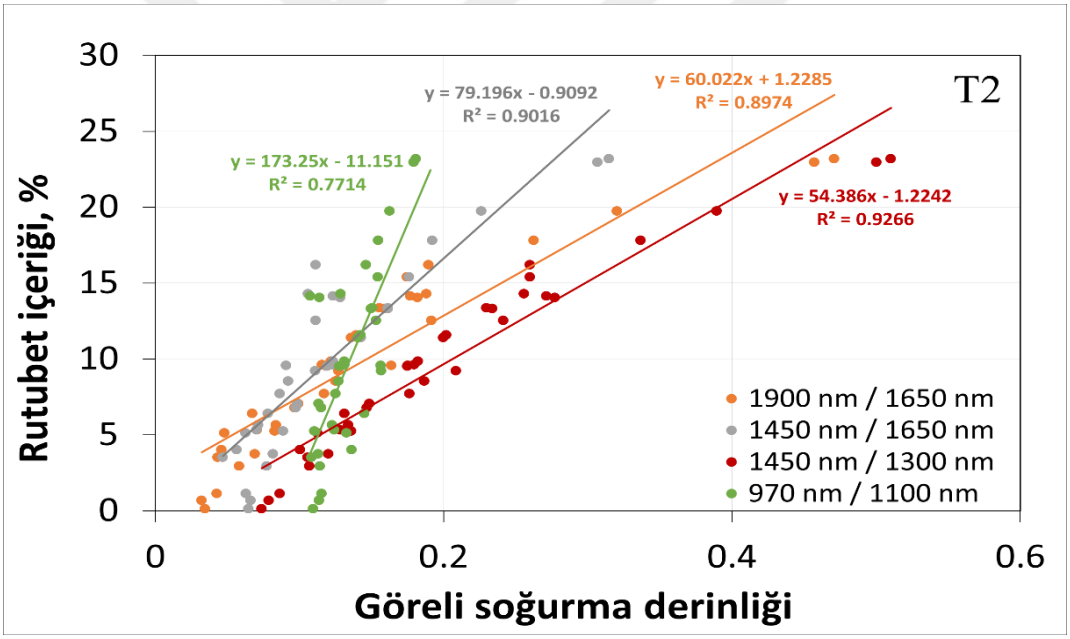
Şekil 5.4 T0 toprak türüne ait 2 ile 3 mm aralığa sahip eleklerden geçirilerek elde edilmiş 15 farklı rutubet değerindeki numunelerin tayfsal görüntüsü



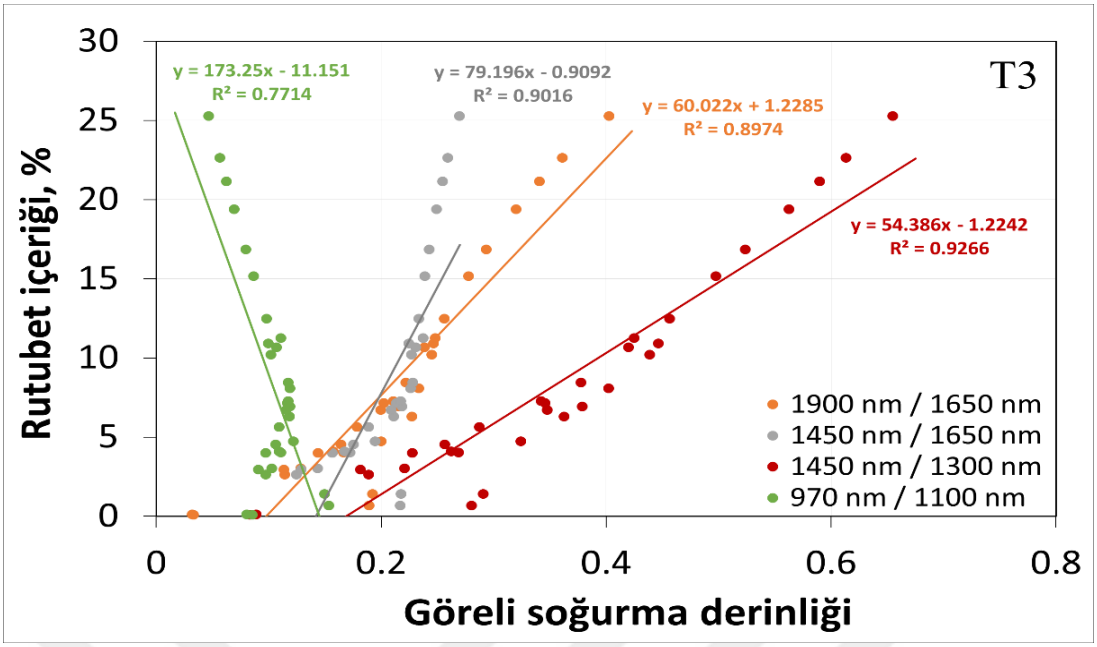
Şekil 5.5 T0 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi



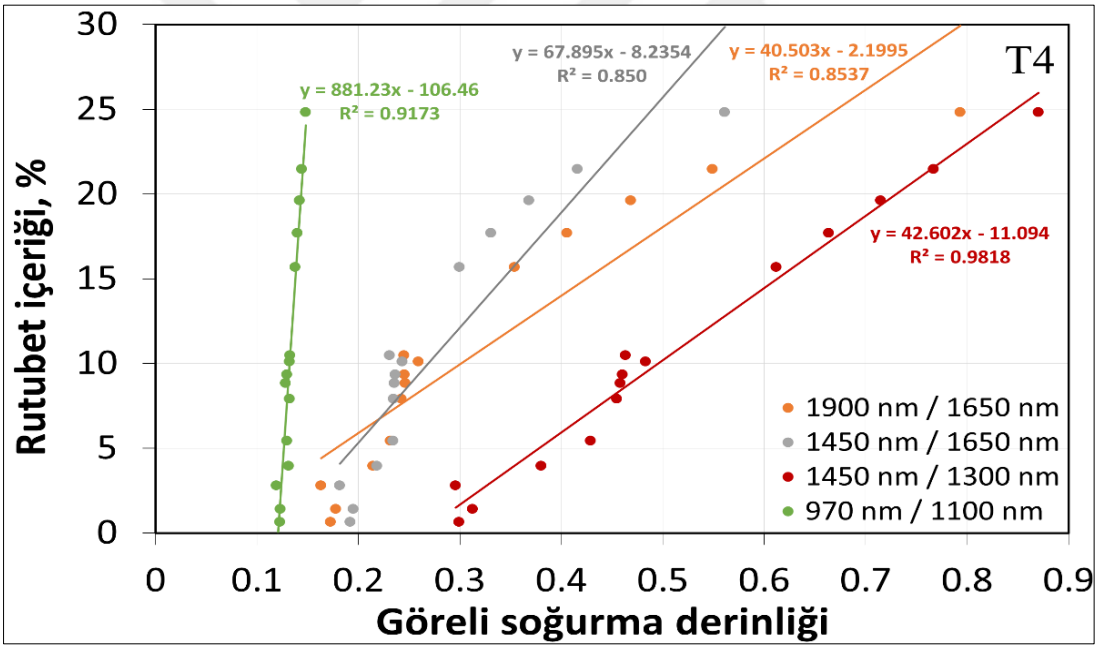
Şekil 5.6 T1 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi



Şekil 5.7 T2 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi



Şekil 5.8 T3 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi



Şekil 5.9 T4 toprağı için farklı dalgaboyu kombinasyonlarında farklı rutubet değerlerinde fiziksel model olarak yapılan göreli soğurma derinliğinin değişimi

Her bir toprak türü için 4 farklı reflektans kombinasyonu sonucu elde edilen Göreli soğurma derinliği değerleri karşılaştırıldığında karşımıza Tablo 5.1 çıkmaktadır:

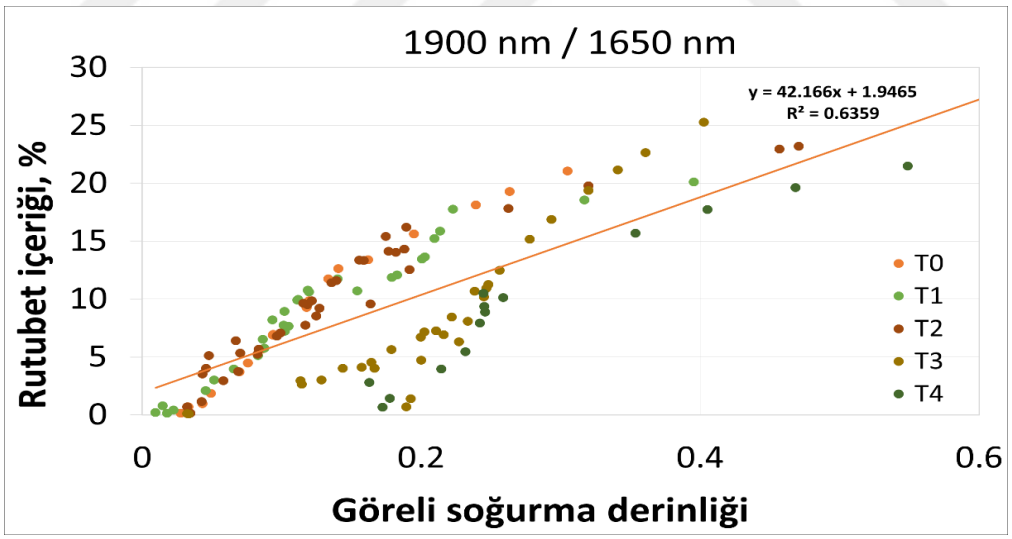
Tablo 5.1 Toprak türlerine göre reflektans kombinasyon sonuçları

Toprak Türü	1900 nm / 1650 nm	1450 nm / 1650 nm	1450 nm / 1300 nm	970 nm / 1100 nm
T0	y = 80,8x - 1,1163 R^2 = 0,9622	y = 104,8x – 4,4096 R^2 = 0,9615	y = 69,293x - 2,9617 R^2 = 0,9792	y = 278,27x - 26,646 R^2 = 0,9215
T1	y = 60,022x + 1,2285 R^2 = 0,8974	y = 79,196x - 0,9092 R^2 = 0,9016	y = 46,112x - 0,7841 R^2 = 0,9123	y = 273,71x - 16,765 R^2 = 0,7912
T2	y = 53,648x + 2,1314 R^2 = 0,8671	y = 84,994x - 0,3913 R^2 = 0,8023	y = 54,386x - 1,2242 R^2 = 0,9266	y = 224,09x - 20,322 R^2 = 0,5792
T3	y = 74,763x - 7,3134 R^2 = 0,8551	y = 133,97x - 19,023 R^2 = 0,6009	y = 44,651x - 7,5515 R^2 = 0,9001	y = -198,79x + 28,83 R^2 = 0,4846
T4	y = 40,503x - 2,1995 R^2 = 0,8537	y = 67,895x - 8,2354 R^2 = 0,85	y = 42,602x - 11,094 R^2 = 0,9818	y = 881,23x - 106,46 R^2 = 0,9173

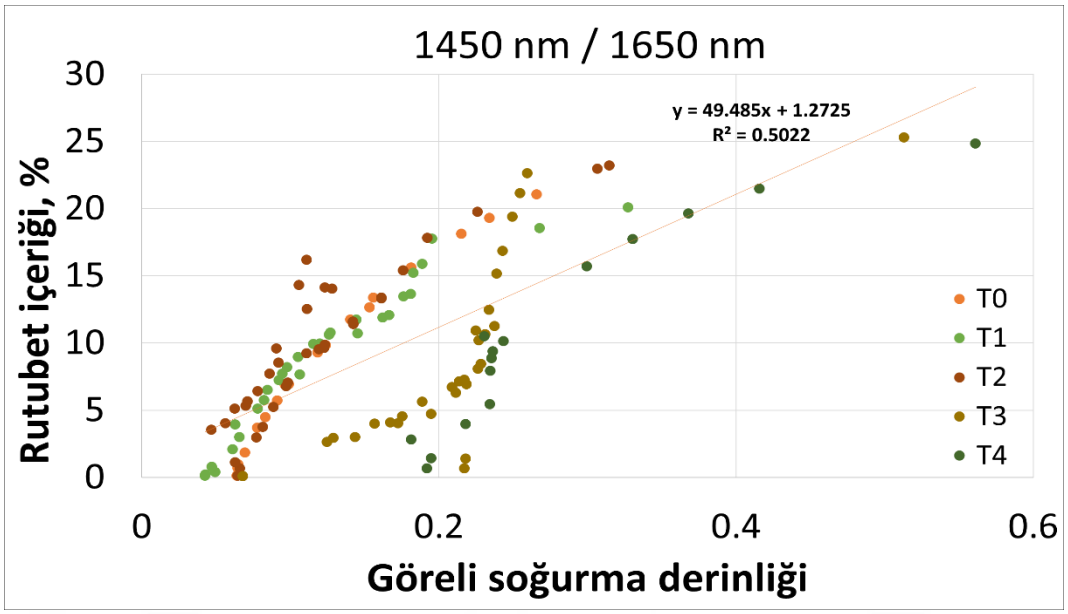
Yapılan ölçümlerde, beş farklı toprak tipi için rutubet içeriği (% moisture content) ile bağıl soğurma derinliği arasındaki ilişki doğrusal regresyon modelleriyle (y = mx + n) ifade edilmiştir.

1450 nm / 1300 nm oranı kullanıldığı durumda tüm toprak türleri için en yüksek korelasyon elde edilmiştir. Diğer dalga boylarının kullanımında ise toprak türüne göre fiziksel model başarımı değişmektedir.

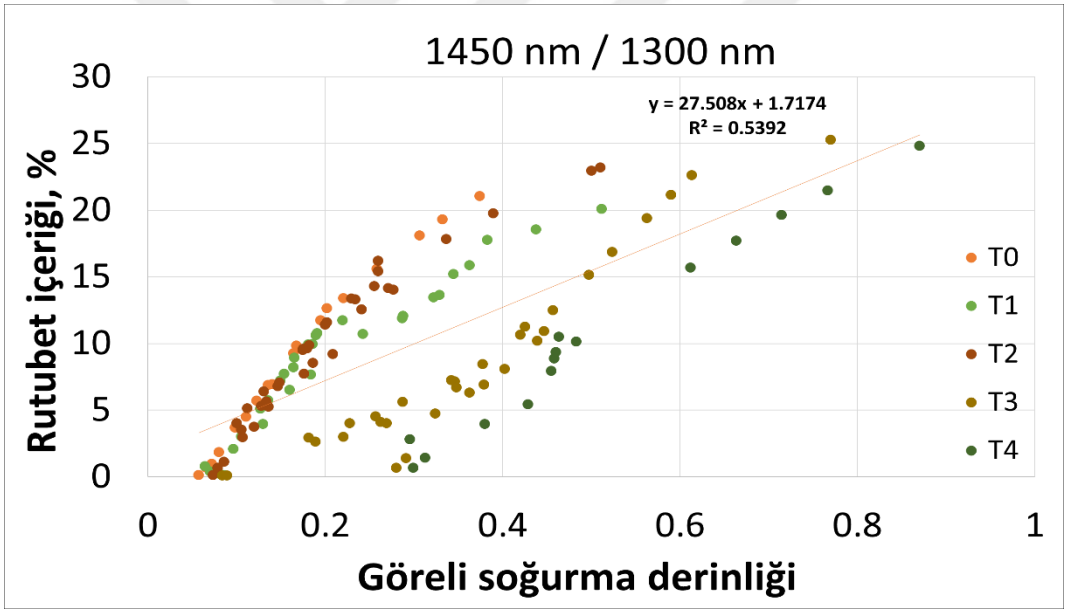
Toprak türlerinin ayrımı yapılmadığı takdirde ise sonuçlar Şekil 5.10-5.13'te gösterildiği şekildedir.



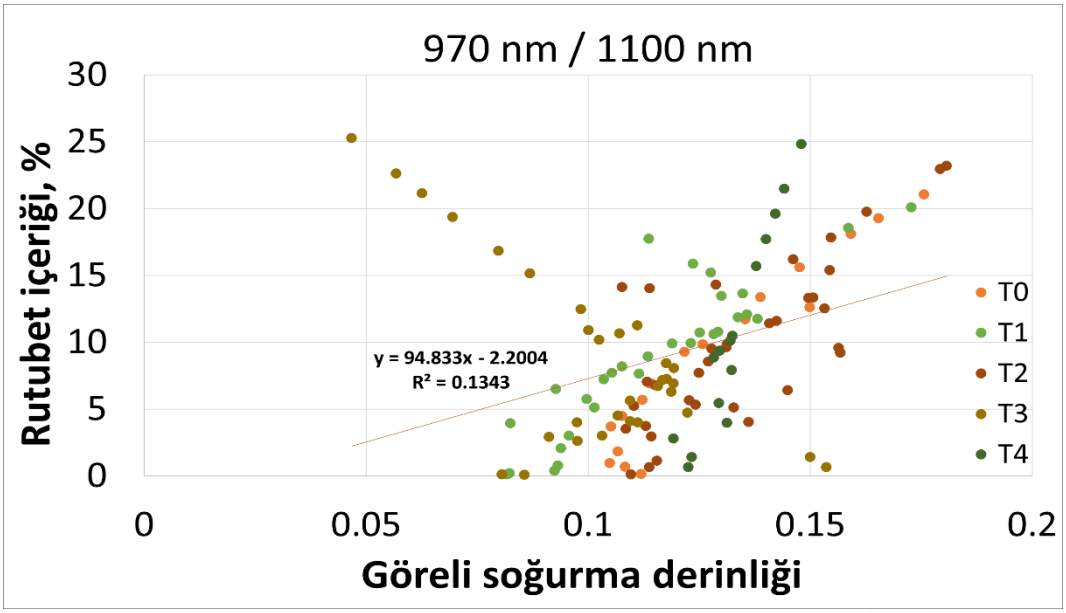
Şekil 5.10: 1900 nm / 1650 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği



Şekil 5.11 1450 nm / 1650 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği



Şekil 5.12 1450 nm / 1300 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği



Şekil 5.13 970 nm / 1100 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği

Tüm toprak örnekleri bir arada değerlendirildiğinde, modellerin rutubet tahmin uyumluluğu önemli ölçüde azalmaktadır:

I. 1900 nm / 1650 nm: y 42,166x + 1,.9465 (R2 = 0,6359)

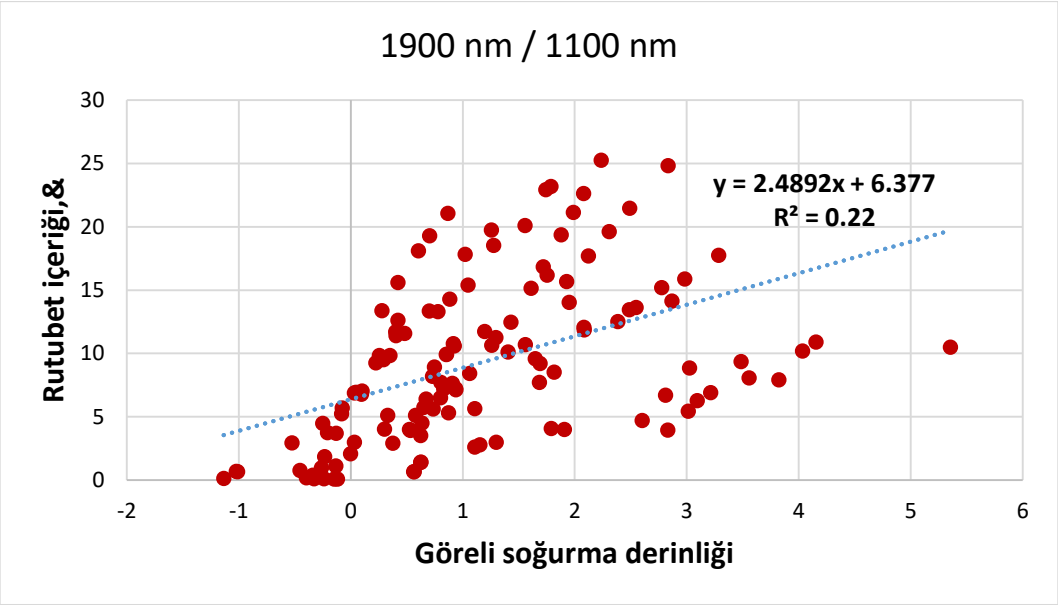
II. 1450 nm / 1650 nm: y = 49,485x + 1,2725 (R2 = 0,5022)

III. 1450 nm / 1300 nm: y = 27,508x + 1,7474 (R2 = 0,5392)

IV. 970 nm / 1100 nm: y = 94,833x - 2,2004 (R2 = 0,1343)

Yapılan çalışma, toprak türü bazlı yapılan analizlerin, tüm toprak türlerinin bir arada değerlendirildiği genel analizlere göre çok daha yüksek doğruluk sunduğunu kanıtlamaktadır. Toprak türü ayrımı yapılmadığında, verilerdeki saçılma artmakta ve belirlenme katsayıları ciddi oranda düşmektedir.

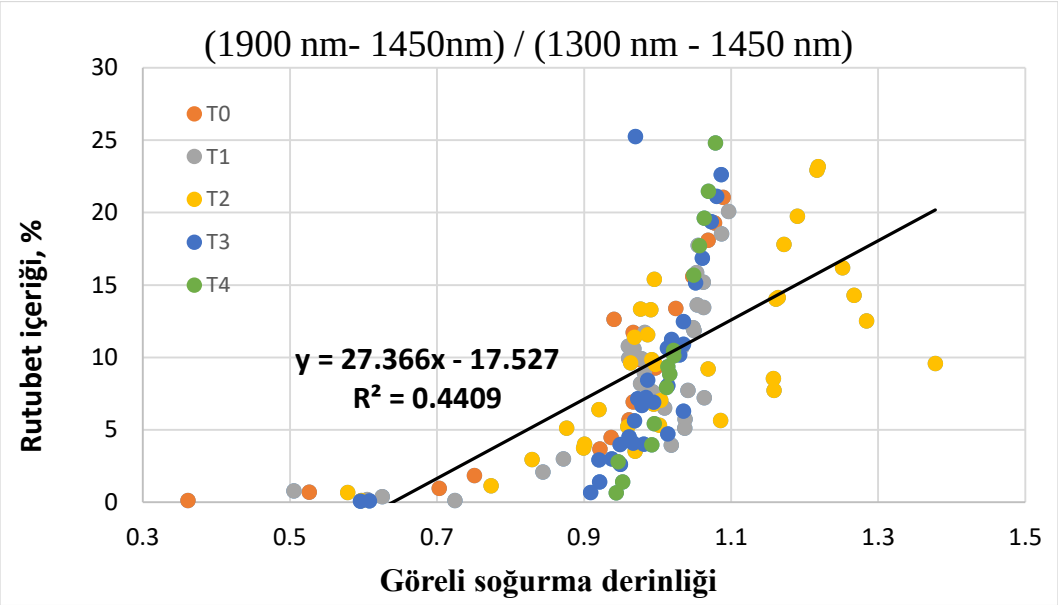
Kullanılan fiziksel modelde ilişki kurulan dalgaboyları arasındaki emilim katsayısı farkı arttırılsa dahi model başarımı değişmemektedir. Reflektans oranları oluşturulurken kullanılan dalga boylarından birbirine en yakın yüksek emilime ve düşük emilime sahip dalga boyları seçilerek reflektans değişiminin olabildiğince sadece su miktarına bağımlı kalması sağlanmak istenmiştir. (1900 nm / 1650 nm, 1450 nm / 1300 nm, 1450 nm / 1650 nm, 970 nm / 1100 nm). Nitekim en büyük emilim katsayına ve en küçük emilim katsayısına sahip dalga boyu ikilisi kullanıldığı takdirde dahi durumun değişmediği görülmüştür.



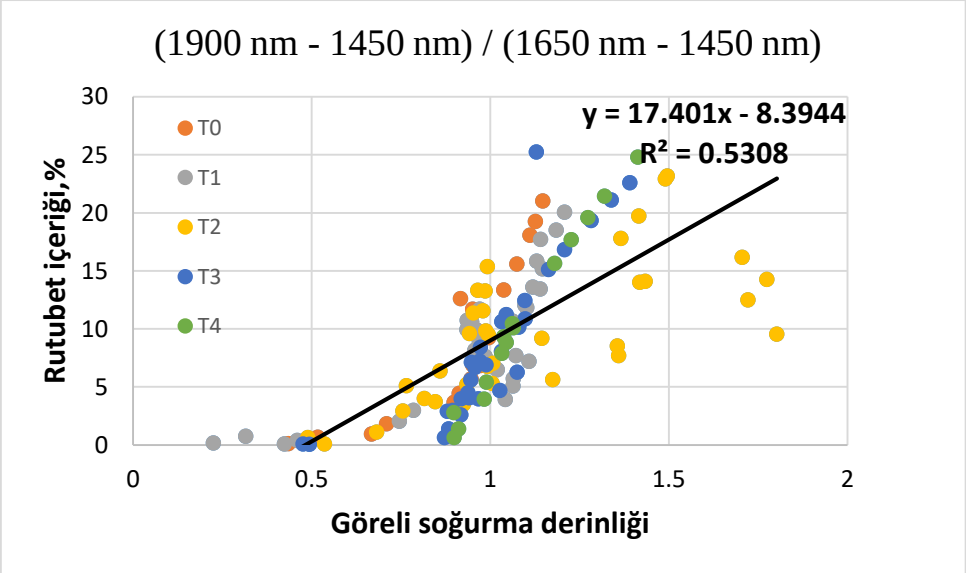
Şekil 5.14 1900 nm / 1100 nm dalga boyları oranında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği

Bu sonuçlar bize her ne kadar rel. Abs. Depth ile rutubet değeri arasında bulunan ilişkinin önemi olduğunu göstersede hala toprak özel (soil specifik) ölçüm yapılması gerektiğini vurgulamakta aynı zamanda parçacık boyutu, toprak rengi vb. dış etkenlere çok fazla duyarlı olması yaklaşımın geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Yine emilim katsayısı farkı çok büyük olsa dahi (yaklaşık 1000 kat) sadece 2 dalga boyu kullanımının yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda rel. Abs. Depth yaklaşımını oluştururken "daha fazla dalga boyu kullanarak ve bu dalgaboylarını değiştirerek elde edilen kombinasyonlar çerçevesinde incelemek bu sorunları ortadan kaldırabilir mi?" sorusuna cevap aranmıştır.

Bu kapsamda farklı dalga boylarının kombinasyonları sonucu spektral indeksler oluşturulmuş ve bu indeksler ile bağıl soğurma derinliği ilişkisi incelenmiştir. Spektral indeksler oluşturulurken (λ1-λ2/λ1) ve [(λ1-λ2) / (λ3-λ2)] formülleri ile 42 ikili kombinasyon ve 210 üçlü kombinasyon oluşturulmuştur. En iyi sonuç (1900 nm-1450nm) / (1650 nm-1450 nm) kombinasyonu ile elde edilmiştir. Bir sonraki en iyi sonuç ise (1900 nm-1450nm) / (1300 nm-1450 nm) kombinasyonudur.



Şekil 5.15 Farklı dalga boyları kombinasyonlarında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği



Şekil 5.16 Farklı dalga boyları kombinasyonlarında rutubet içeriği değişimine göre göreli soğurma derinliği

Bu sonuçlara bakıldığında bağıl soğurma derinliği yaklaşımı ile oluşturulan fiziksel model, toprak yüzey rutubeti tespiti için yeterli güvenilirliğe sahip değildir. Her ne kadar soil specific olarak kullanılan model başarılı sayılabilirsede tüm toprak türlerini kapsayacak bir model oluşturmak gereklidir ki bu da çok büyük bir işyükü gerektirir. Tüm toprak türleri için yaklaşımın başarısız olma sebebinin temelinde parçacık boyutu ve toprak içeriğindeki diğer bileşenlerin reflektans spektrumunu etkilemesi olduğu düşünülmektedir. (yukarıdaki çalışmalarda ters optik geometri (ışık kaynağı 90° algılayıcı 45° ile konumlandırılmış yapı) kullanılmıştır. 3 farklı

parçacık boyutununa sahip topraklar kullanıldığında dahi Soil specific sonuçlarımızın yüksek olması sebebiyle ters optik geometrinin parçacık boyutu etkisini giderdiğini/minimize ettiğini düşündürmektedir. Yine bölüm 5.2'de gösterildiği şekilde birbirine yakın rutubetlerde dahi bazı toprakların geniş bazı toprakların dar bir tayfa sahip olması en önemli problemin tayfsal farklılık olduğu kanatini uyandırmaktadır. Bu varsayımla tüm toraklar türleri için yüzey rutubeti tespitinde dalgaboyları arasında farkın rutubet ile ilişkisinin analiz edilmesindense su emilim katsayılarının tepe ve çukur ları ile oluşturulacak bir tayfın tamamının analiz edilmesi ve karmaşık ilişkinin çözülmesi gerektiği fikri oluşmuştur.) Bu problemi ortadan kaldırmak adına bu zamana kadar denen sadece reflektans oranlarının rutubet değri ile ilişkisine bakmak yerine birden fazla oranın birbiri ile ilişkisine bakılarak analiz yapılması gerektiği öne sürülmektedir. Zira toprak su emilim tayfında çukur tepe yaklaşımı ve çukur tepe çukur yaklaşımı yeterli başarımı sağlamamıştır. Bu yüzden yukarıda belirtilen su emilim tayfının karmaşık ilişkisinin ortaya çıkarabilecek çok daha karmaşık bir yaklaşım gerekmektedir. Ki bu da çeşitli makine öğrenmesi metodlarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu karmaşık ilişkinin çözülebilmesi adına çeşitli makine öğrenmesi metodları kullanılmaya karar verilmiştir.

Nicel performans karşılaştırmaları, tahmin edilen toprak rutubet içeriği ($\hat{\theta}$) ile gerçek (referans) toprak rutubet içeriği (θ) arasındaki farkı ifade eden kök ortalama kare hata (Root Mean Squared Error, RMSE) kullanılarak yapılmıştır. Burada N, test edilen spektrum sayısını temsil etmektedir.

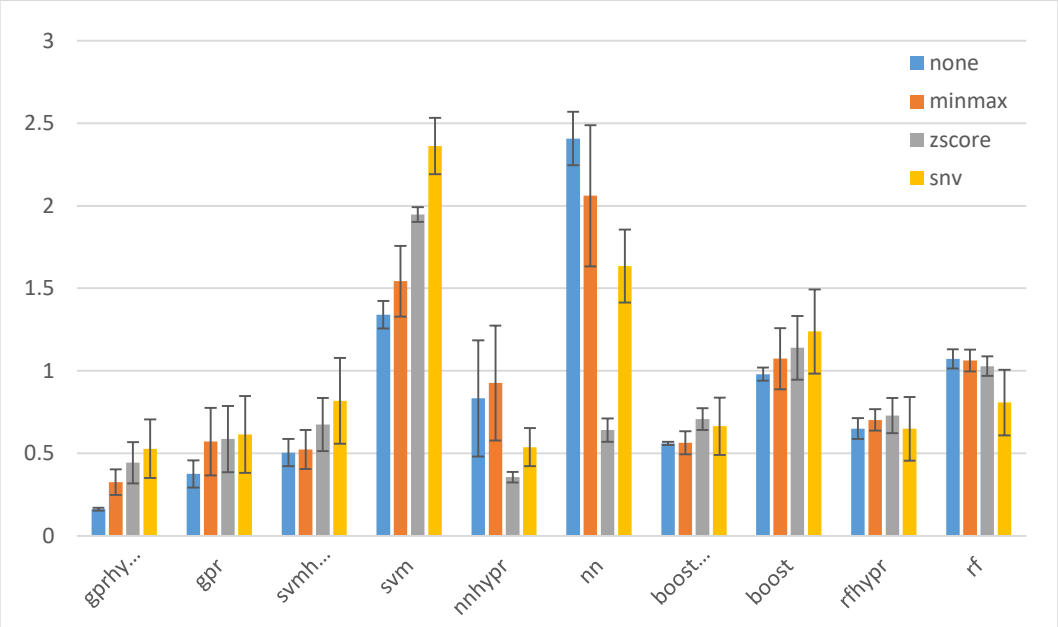
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\hat{\theta}_i - \theta_i)^2 * 100} \tag{21}$$

Şekil 5.17 Tahmin edilen rutubet değerine göre gerçek rutubet değeri arasındaki fark

Şekil 5.17'de 7 farklı dalgaboyuna sahip LED kullanıldığı durumda hyperparemetre optimisazyonlu normalize uygulanmamış gpr modeline ait tahmin gerçek grafiği görülmektedir. Kullanılan rutubet aralığının tamamında, toprağa özgü kalibrasyona gerek duymadan başarılı bir tahmin sağlanmıştır. Burada çoklu dalga boyu

kullanmak ve sadece reflektas oranına değil bu oranlar arasındaki ilişkiyide incelemek, bölüm 5.2'de gösterilen çeşitli toprak türlerinin reflektans tayflarının birbirinden çok farklı olmasının getirdiği fiziksel modellerin handikapını ortadan kaldırmaktadır.

Şekil 5.18'de yer alan sonuçlar çalışma boyunca irdelenen ML modelleri, normalisazyon çeşitleri, hyper parametre optimisazyonu, özellik olrak kullanılan dalga boyu sayısı ve kombinasyonları hakkında çeşitli bilgi ve çıkarımları içermektedir.



Şekil 5.18 Yedi farklı LED kullanıldığında, farklı normalizasyon yöntemleriyle kullanılan farklı modeller için ortalama RMSE değerleri

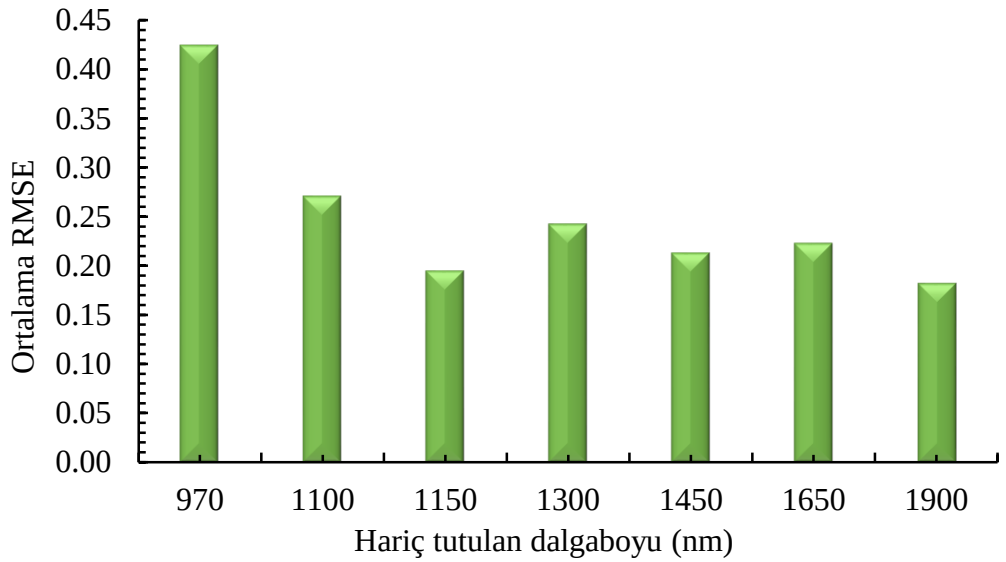
Şekil 5.18 incelendiğinde her model için normalizasyon türünün ortalama RMSE değeri görülebilir. Verilen değerler 100 tekrarın ortalamasıdır. Bununla beraber her tekrarda k-fold yapısının K=5 için uygulandığı unutulmamalıdır. Çalışmalar sonunda en iyi başarım normalize uygulanmayan durum için elde edilmiştir. Bununla beraber hyperparametre optimisazyonu uygulandığında ise ağırlıkça yine en iyi sonuçlar normalize uygulanmayan duruma aittir. Bunun sebebinin reflektans olgusu olduğu öngörülmektedir. Reflektans numune (toprak)den yansıyan ışık sinyalinin beyaz referans plakasından yansıyan ışık sinyaline bölünmesi ile ifadediliyor, her durumda aynı ışık şiddetinin korunması ile beraber doğal bir normalisazyon işlemi oluşturulmaktadır. Yine özellikle ölçek duyarlı modellerde

(gpr, svr) snv normalisazyonunun kötü sonuç vermesinin temel sebebinin optic yol uzunluğu farkını ortadan kaldırması/azaltması olduğu öngörülmektedir. zira rutubet arttıkça optik yol uzunluğuda artmakta olduğu tarafından belirtilmiştir(Maeda et al., 2022).

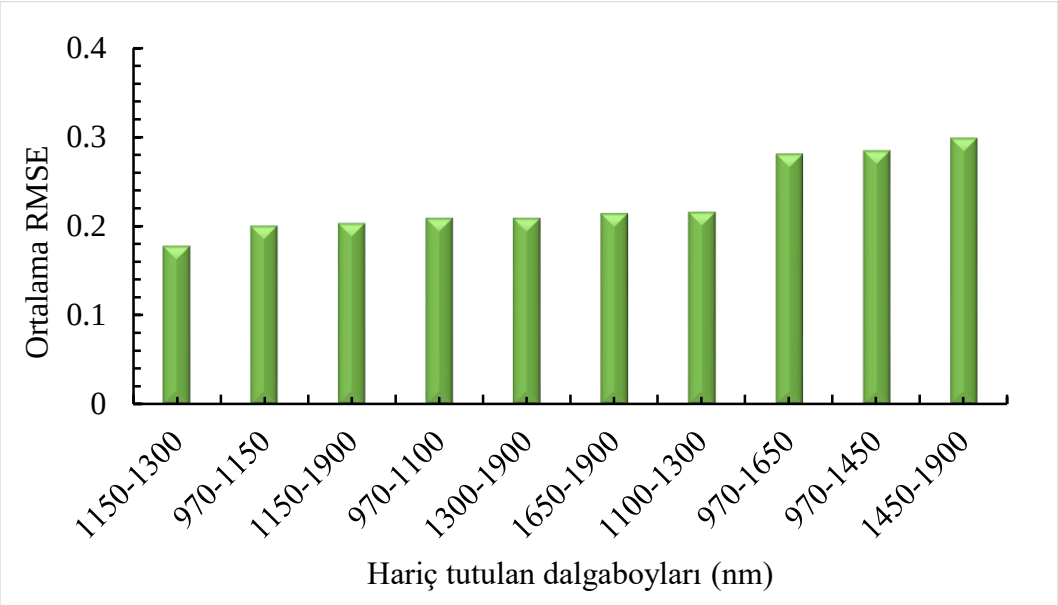
Yukarıdaki sonuçlardan görüldüğü üzere tüm durumlarda için en iyi rmse değeri GPR a aittin bunun sebebinin gpr modelinin fonksiyonlar dağılımı olarak çalışmasından kaynaklandığını düşünmekteyim. Zira fiziksel modelde gözlemlenen soil specifik uyum gpr modeli ile algılanmış hemde doğası gereği bu uyumun toprak türüne göre dağınıklık göstermesinden etkilenmemiştir. Aslında lineer ilişkili dağınık kümeler gibi olması gpr için bir sorun oluşturmamaktadır.

Bununla birlikte svm modelinin hypr parameter ile performansının büyük oranda iyileşmesi (özellikle snv normalisazyonu için) modelin oluşturduğu eğriye uymayan ama buna karşılık uygun tolerans (epsilon) değeri sayesinde doğru ilişkileri elemeyip göz ardı ederek koruması olduğu düşünülmektedir.

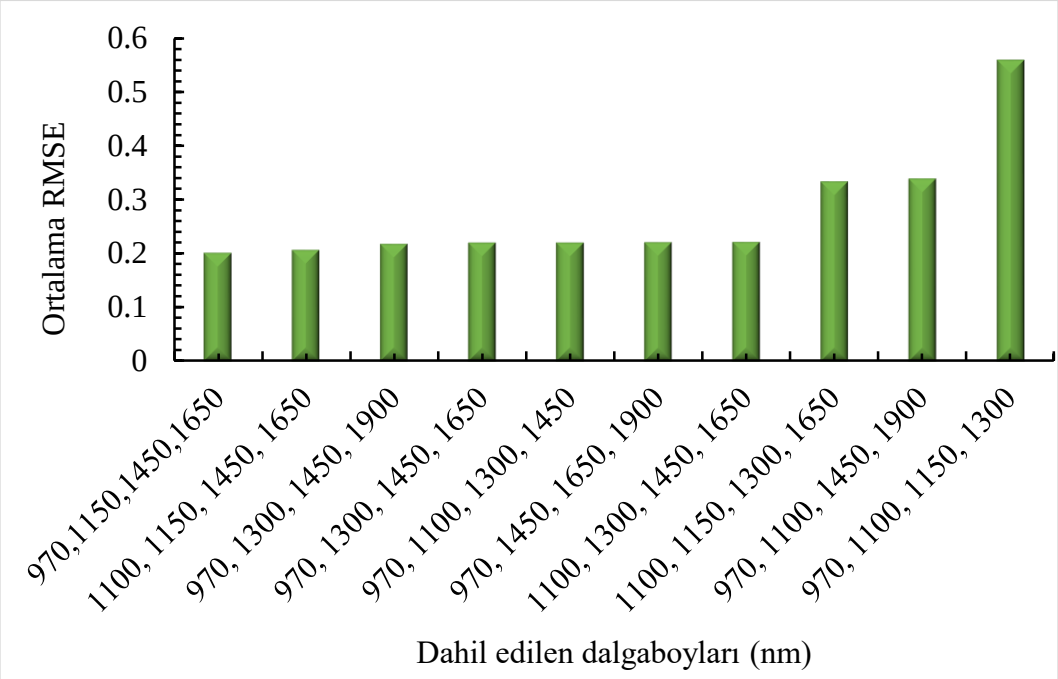
Tüm bunlara ek olarak her model için kullanılan LED sayısı ve kombinasyonu açısındanda bir inceleme yapılmıştır. Ancak çok yer kaplamaması adına sadece en iyi sonucu içeren none normalize gpr modeli için veriler aktarılacaktır.



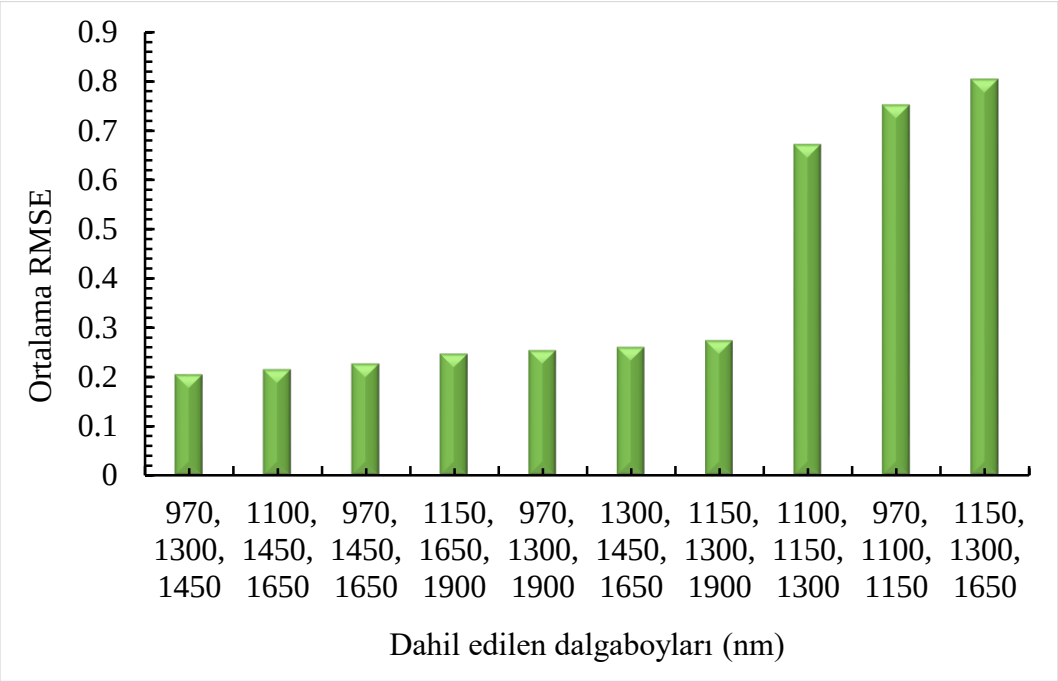
Şekil 5.19 Herhangi bir normalizasyon uygulanmadan (yani ‘none’ normalizasyon yöntemi kullanılarak) gprhypr modeli ile 6 LED için elde edilen ortalama RMSE değeri



Şekil 5.20 Herhangi bir normalizasyon uygulanmadan (yani 'none' normalizasyon yöntemi kullanılarak) gprhypr modeli ile 5 LED için elde edilen ortalama RMSE değeri



Şekil 5.21 Herhangi bir normalizasyon uygulanmadan (yani 'none' normalizasyon yöntemi kullanılarak) gprhypr modeli ile 4 LED için elde edilen ortalama RMSE değeri



Şekil 5.22 Herhangi bir normalizasyon uygulanmadan (yani 'none' normalizasyon yöntemi kullanılarak) gprhypr modeli ile 3 LED için elde edilen ortalama RMSE değeri

Şekil 5.19-5.22'de 6-5-4-3 LED kullanıldığı durum için none normalize gpr modellerinin ortalama RMSE değerlerinin görmektesiniz. 6 LED içeren modelde tüm kombinasyonlar belirtilirken 5-4-3 LED içeren grafiklerde en iyi 7 ortalama RMSE ve en kötü 3 ortalama RMSE değeri gösterilmiştir.

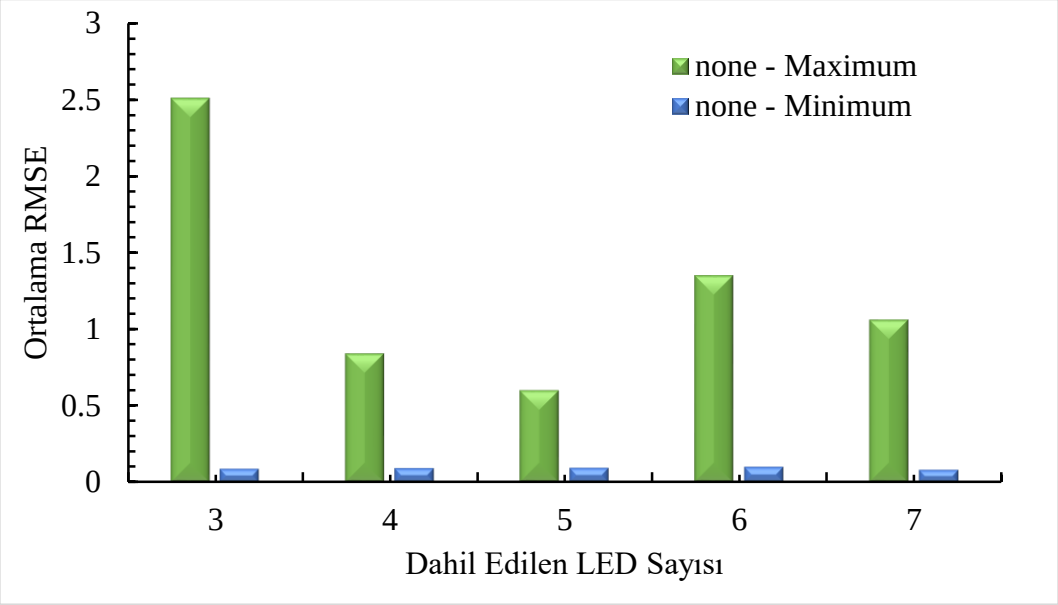
6 LED kullanıldığı durum için en iyi ortalama RMSE değeri 1900 nm LED kullanılmadığı durum için gözlemlenmiştir. 1900 nm su emilim katsayısı açısından kuvvetli bir bant olması açısından şaşırtıcı bir sonuç olmasına karşılık Şekil 3.15' teki LED spectrumundan görüleceği üzere LED ışıma dalga boyunun 1600nm ye kadar uzaması bu sonucun temel sebebi gibi gözükmektedir.

5 LED kullanıldığı senaryoda ise en iyi 3 sonucun alındığı durumda 1150nm LED'in olmaması bu LED'in önemin düşük olduğunu izlenimini oluşturmaktadır. Nitekim 6 LED kullanıldığı senaryodada en iyi 2. başarıma sahip kombinasyonda 1150 nm dalgaboyundaki LED'in çıkartılmış olduğu görülebilir. En kötü RMSE değerine sahip kombinasyonlarda 1450 ve 970 nm dalgaboylarına sahip LED'lerin olmaması bu LED'lerin önemli birer özellik olduğu izlenimini oluşturmaktadır. Yine 1900 ve 1650 nm LED'lerde 2. öneme sahip gibi görünmektedir. Ancak ortalama rmse değerlerinin birbirine yakın olduğuna dikkat edilmelidir.

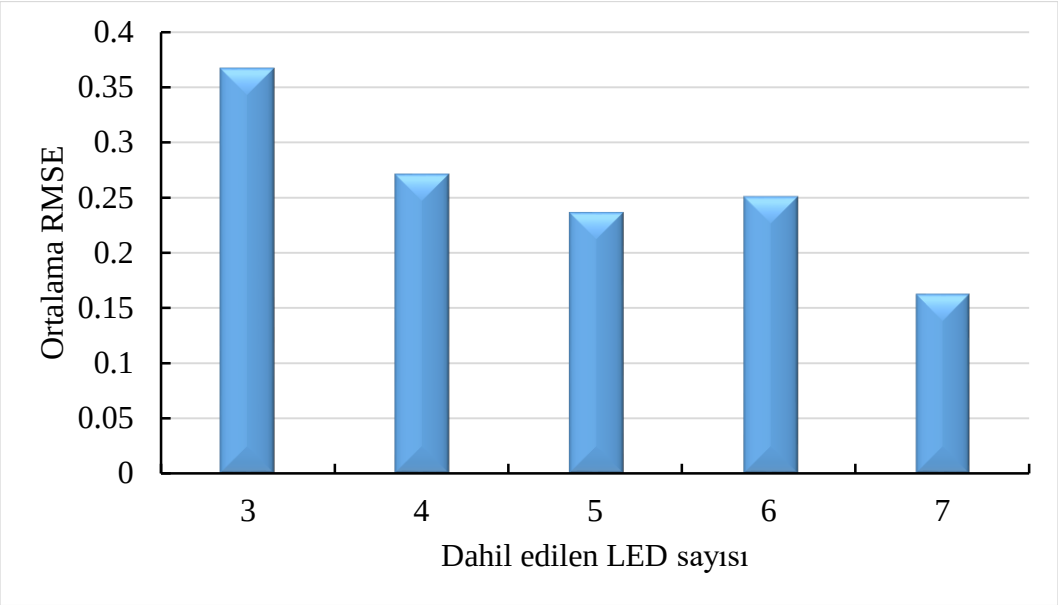
4 LED kullanıldığı senaryoda ise sadece su emilim katsayıaının düşük olduğu bantları kullanmak ya da bu bantları en düşük pik olan 970 nm ile kullanmak hatayı yaklaşık 2-3 kat arttırmaktadır. Buna karşılık piklerin olduğu 1900 1450 ve 970 dalga boyları ile birlikte bir tanede düşük emilim katsayısına sahip dalgaboyunda LED kullanmak iyi bir sonuç elde etmek için yeterli olmaktadır. Bununla birlikte 1450 nm dalgaboyuna sahip LED gerçekten önemli bir tutmaktadır. Ancak burdada başarımların birbirine çok yakın olduğu unutulmamalıdır.

3 LED kullanıldığı senaryoda ise bir kez daha 1450 nm dalgaboyundaki LEDin önemi görülmekte bununla birlikte 970 1300 1450 ve 1900 nm dalgaboyundaki LEDlerinde 2. sırada öneme haiz olduğu görülebilir. Ancak burada da başarımlar birbirine oldukça yakındır. Sadece düşük su emilim katsayısına asahip ve en düşük pik emilim katsayısına sahip LEDler kulanıldığında başarımın 3-4 kata kadar düştüğü görüle bilir.

Son olarak aşağıdaki grafikten LED sayısına göre başarımı en yüksek LED dalga boyu kombinasyonları görülebilir.



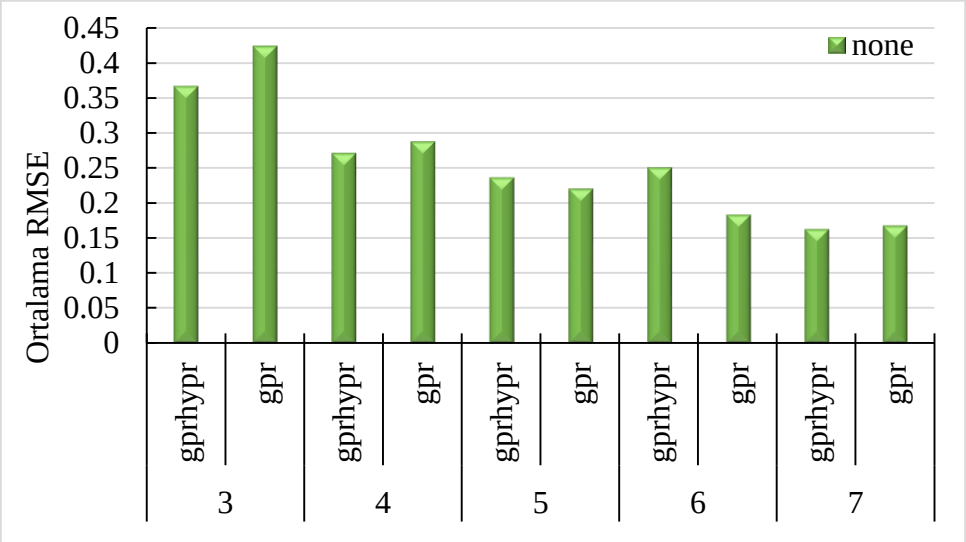
Şekil 5.23 Normalize edilmemiş verilerle eğitilmiş ve hiperparametreleri optimize edilmiş GPR modeli için, kullanılan LED dalgaboyu sayısına bağlı olarak elde edilen maksimum ve minimum RMSE değerleri



Şekil 5.24 LED sayısı artışının ortalama RMSE değeri üzerindeki etkisi

Yukarıdaki grafikten görüleceği üzere LED sayısını arttırmak yani toprak yüzey rutubeti tespitinde kullanılacak özellik sayısındaki artış olumlu bir etki göstermektedir.

Yalnızca 5 LED sayısı yerine 6 LED kullanıldığında hyper modelde problem oluşmuştur. Hyper olmayan modelde böyle bir etki görülmemiş olup aradaki fark Şekil 5.25'te görülebilir.



Şekil 5.25 LED sayısı artışının ve hypr model kullanıp kullanmamanın ortalama RMSE değeri üzerindeki etkisi

Yukarıdaki grafiktende anlaşılacağı üzere farklı dalga boylarına sahip LED sayısını arttırmak model başarımını artırmış ve hatasını azaltmıştır. Ayrıca hangi dalga

boylarındaki kombinasyonlar kullanılırsa daha iyi bir sonuç verecek bunu incelemek gerekmektedir.

Sonuç olarak toprak yüzey rutubeti tespitinde birçok model, normalisazyon türü, farklı dalgaboyu sayısı ve dalga boyu kombinasyonları denenmiştir. Eldeki veriler ışığında uygun model ve parametreler kullanıldığı takdirde toprak türü ve parçacık boyutu farketmeksizin doğru kombinasyonlu 3 LED le dahi k=2 için %2,07 mc hata ile toprak yüzey rutubeti tespit edilebilmektedir. Ancak farklı dalga boyundaki LED sayısını arttırmak ve 7 farklı dalga boyu kullanmak k=2 için hatayı %1,63 mc ye kadar düşüre bilmektedir. Binaenaleyh 1900nm dalga boyundaki LEDlerin spektrumu düzeltildiği takdirde daha verimli sonuçlar alınabileceği tahayyül edilmektedir.

6
SONUÇ

Fiziksel model temelli yaklaşımlar her ne kadar toprağa özgü başarımları yüksek olsa da genel toprak rutubetinin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bununla beraber bu tezde çalışılan ve sonuçları Bölüm 5'te verilen makine öğrenmesi yöntemlerine dayalı toprak rutubet tespit sistemleri 0,193 RMSE ve 0,998 R^2 değerleri göz önüne alındığında yüksek düzeyde başarılı olduğu görülmüştür. Bununla beraber çeşitli dalgaboyu kombinasyonları denenmiş ve yalnızca 3 farklı dalgaboyunda LED kullanımının dahi yüsek sayılabilecek başarım elde edildiği görülmüştür. Ancak farklı dalgaboylarındaki LED'lerin sayısını arttırmak model başarısını iyileştirmektedir.

Şekil 5.19'da verilen grafikten de görüleceği üzere 970 nm dalgaboyundaki LED model başarımı açısından büyük oranda önemlidir. Bunun sebebinin görünür bölgeye en yakın LED olmasıyla toprak karakteristiğini modele taşıyan dalgaboyundaki LED olduğu düşünülmüştür. Bu yaklaşım neticesinde görünür bölgedeki toprak özelliklerini modellere daha iyi taşımak amacıyla oluşturulan sisteme görünür dalgaboylarında LED(ler)'in eklenmesinin başarımı arttıracağı öngörülmektedir.

Ayrıca oluşturulan bu sistem maliyet etkin ve taşınabilir olması açısından; İHA ve uydu araçlarına entegre edilerek uzaktan algılama uygulamalarında kolaylıkla kullanılabilecektir.

Sistemin maliyet etkin ve taşınabilir yapısı, laboratuvar ortamındaki hassasiyeti in-situ (yerinde) ölçümlere taşıyarak gerçek zamanlı veri analizini mümkün kılmaktadır. Özellikle İHA (drone) sistemlerine entegrasyonu, geniş tarım arazilerinde yüksek çözünürlüklü su haritalama potansiyeli sunarken; uzay ve gezegen araştırmalarında (örneğin Ay veya Mars yüzeyindeki su izleri) kompakt bir spektral sensör olarak kullanılabilirliği, gelecekteki uzaktan algılama projeleri için stratejik bir temel oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, hem laboratuvar kontrollü deneylerde hem de zorlu saha koşullarında yüksek adaptasyon yeteneği sergilemektedir.

KAYNAKÇA

Ahmet Harun ATAĞ, Ahmet KIZILAY, Ömer Faruk KADI, Fikret YILDIZ, & Hümbet NASİBLİ. (2024). Taşınabilir ve Maliyet Etkin Multispektral Toprak Rutubeti Ölçüm Cihazı. 7th International Congress on Agriculture, Environment and Health, ICAEH.

Ahmet Harun ATAĞ, Ahmet KIZILAY, Ömer Faruk KADI, Mehtap ERTÜRK, Zuhal AKBULUT, Semih YURTSEVEN, & Humbet NASIBLI. (2025, October 20). Calibration and Characterization of Time-Domain Reflectometry Soil Moisture Sensors. TEMPMEKO ISHM 2025.

Ali, A. S., Zanzinger, Z., Debose, D., & Stephens, B. (2016). Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. Building and Environment, 100, 114–126. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010

An, X., Li, M., Zheng, L., & Sun, H. (2015). Eliminating the interference of soil moisture and particle size on predicting soil total nitrogen content using a NIRS-based portable detector. Computers and Electronics in Agriculture, 112, 47–53. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.11.003

Arezou, R., Maria, P., & Mehrdad, R. (2020). Assessment of Soil Moisture Content Measurement Methods: Conventional Laboratory Oven versus Halogen Moisture Analyzer. Journal of Soil and Water Science, 4(1). https://doi.org/10.36959/624/440

ASTM. (2019). ASTM D2216-19: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.

Atag, A. H., Faruk Kadı, Ö., Akbulut, Z., Ertürk, M., & Nasibli, H. (2025). A Primary-Level Evolved Water Vapor System for Simultaneous Measurement

of Soil Water and Moisture Content. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 74, 1–16. https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3637943

Belisle, W. R., Sharma, A., & Coleman, T. L. (n.d.). An optical reflectance technique for soil moisture measurement. I. Theory, description, and application. IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1315–1319. https://doi.org/10.1109/IGARSS.1996.516648

Ben-Dor, E., Efrati, B., Amir, O., Francos, N., Shepherd, J., Khosravi, V., Gholizadeh, A., Klement, A., & Borůvka, L. (2024). A standard and protocol for in-situ measurement of surface soil reflectance. Geoderma, 447, 116920. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116920

Ben-Dor, E. K. K., Chabrillat, S., & Schmid, T. (2024). Standardization and Protocol Development for Soil Spectral Reflectance in Laboratory and Field Settings: An Overview of IEEE SA P4005 Activity. IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 268–270. https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10641689

Breiman, L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Cirillo, A., Meucci, R., Caresana, Michele, & Caresana, Marco. (2021). An innovative neutron spectrometer for soil moisture measurements. The European Physical Journal Plus, 136(10), 985. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01976-x

Dor, E. Ben, Chabrillat, S., Karyotis, K., & Schmid, T. (2024). P4005 Standards and Protocols for Soil Spectroscopy in Laboratory and Field Conditions [Technical Committees]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 12(4), 358–363. https://doi.org/10.1109/MGRS.2024.3469069

Fan, R.-E., P.-H. Chen, & C.-J. Lin. (2005). Working set selection using second order information for training support vector machines. Journal of Machine Learning Research, 6(12), 1889–1918.

Ford, T. W., & Quiring, S. M. (2019). Comparison of Contemporary In Situ, Model, and Satellite Remote Sensing Soil Moisture With a Focus on Drought

Monitoring. Water Resources Research, 55(2), 1565–1582. https://doi.org/10.1029/2018WR024039

Friedman, J. H. (2001). Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. The Annals of Statistics, 29(5), 1189–1232. http://www.jstor.org/stable/2699986

Gaspar, L., Franz, T. E., & Navas, A. (2025). Integrating Proximal Gamma Ray and Cosmic Ray Neutron Sensors to Assess Soil Moisture Dynamics in an Agricultural Field in Spain. Agriculture, 15(10), 1074. https://doi.org/10.3390/agriculture15101074

Gruszczyński, S., & Gruszczyński, W. (2022). Supporting soil and land assessment with machine learning models using the Vis-NIR spectral response. Geoderma, 405, 115451. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115451

Gu, Z., Zhu, T., Jiao, X., Xu, J., & Qi, Z. (2021). Neural network soil moisture model for irrigation scheduling. Computers and Electronics in Agriculture, 180, 105801. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105801

H. Betting, & F. Spieweck. (1990). Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990. PTB-Mitteilungen, 100(3), 195–196.

HITRAN. (2026, January 12). HITRAN Database. HITRAN Online.

International Atomic Energy Agency. (2008). Field Estimation of Soil Water Content - A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology.

ISO. (1993). ISO 11465:1993: Soil quality — Determination of dry matter and water content on a mass basis — Gravimetric method.

ISO. (2001). ISO 11461:2001: Soil quality — Determination of soil water content as a volume fraction using coring sleeves — Gravimetric method.

ISO. (2009). ISO 10381-6:2009 Soil quality — Sampling — Part 6: Guidance on the collection, handling and storage of soil under aerobic conditions for the assessment of microbiological processes, biomass and diversity in the laboratory.

ISO. (2022). ISO 17892-1:2014/Amd 1:2022: Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 1: Determination of water content.

Jensen, H. W., Legakis, J., & Dorsey, J. (1999). Rendering of Wet Materials (pp. 273–281). https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6809-7_24

Joshi, A., Kanungo, D. P., & Panigrahi, R. K. (2024). Multi-Frame Fringing Field Capacitive Soil Moisture Sensor With Enhanced Sensitivity and Penetration Depth. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 73, 1–13. https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3390215

Kaiser, L., Hänel, T., Vogel, S., & Aschenbruck, N. (2025). A long-term evaluation of soil moisture sensing based on wireless communication. Computers and Electronics in Agriculture, 239, 111054. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111054

Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 157, 218–231. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039

Maeda, Y., Tsukimura, G., Sugimura, D., & Hamamoto, T. (2022). Multispectral near-infrared imaging for wetness estimation. Journal of the Optical Society of America A, 39(11), 1958. https://doi.org/10.1364/JOSAA.463072

Mane, S., Das, N., Singh, G., Cosh, M., & Dong, Y. (2024). Advancements in dielectric soil moisture sensor Calibration: A comprehensive review of methods and techniques. Computers and Electronics in Agriculture, 218, 108686. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108686

Marković, M., Matoša Kočar, M., Barač, Ž., Turalija, A., Atılgan, A., Jug, D., & Ravlić, M. (2024). Field Performance Evaluation of Low-Cost Soil Moisture Sensors in Irrigated Orchard. Agriculture, 14(8), 1239. https://doi.org/10.3390/agriculture14081239

McGuirk, S. L., & Cairns, I. H. (2024). Relationships between Soil Moisture and Visible–NIR Soil Reflectance: A Review Presenting New Analyses and Data to Fill the Gaps. Geotechnics, 4(1), 78–108. https://doi.org/10.3390/geotechnics4010005

Nasibov, H., Balaban, E., Kholmatov, A., & Nasibov, A. (2014). High-brightness, high-power LED-based strobe illumination for double-frame micro particle image velocimetry. Flow Measurement and Instrumentation, 37, 12–28. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.03.004

Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben-Dor, E., Brown, D. J., Clairotte, M., Csorba, A., Dardenne, P., Demattê, J. A. M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, L., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., … Wetterlind, J. (2015). Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. In Donald L. Sparks (Ed.), Advances in Agronomy (Vol. 132, pp. 139–159). Academic Press. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.02.002

Oğuztürk, G. E. (2025). AI-driven irrigation systems for sustainable water management: A systematic review and meta-analytical insights. Smart Agricultural Technology, 11, 100982. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100982

O'Kelly, B. C. (2004). Accurate Determination of Moisture Content of Organic Soils Using the Oven Drying Method. Drying Technology, 22(7), 1767–1776. https://doi.org/10.1081/DRT-200025642

O'Kelly, B. C. (2005). Method to compare water content values determined on the basis of different oven-drying temperatures. Géotechnique, 55(4), 329–332. https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.4.329

P. Miao, S. A. Bell, M. Rujan, G. Mugurel, & C. McIlroy. (2014). Report on literature review of recent development in loss on drying method for moisture determination.

Pereira, P. F., & Ramos, N. M. M. (2022). Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO2 sensors - An assessment of their suitability for indoor built environments. Journal of Building Engineering, 60, 105151. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105151

Segelstein, D. J. (1981). The complex refractive index of water . University of Missouri.

Sharipov, M., Uzokboev, S., Nghia, N. N., Azizov, S., Ryu, W., Tawfik, S. M., & Lee, Y.-I. (2025). Recent progress in Arduino- and smartphone-based sensors for biochemical and environmental analysis. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 183, 118103. https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.118103

Shin, S. K., Lee, S. J., & Park, J. H. (2025). Prediction of Soil Properties Using Vis-NIR Spectroscopy Combined with Machine Learning: A Review. Sensors, 25(16), 5045. https://doi.org/10.3390/s25165045

SoMMet Project. (2026, January 12). SoMMet – Metrology for multi-scale monitoring of soil moisture. Https://Www.Sommet-Project.Eu/. https://www.sommet-project.eu/

Tüccar, D. G., Demirel, E., Atag, A. H., Kadı, O. F., & Nasibli, H. (n.d.). A transfer standard vis–NIR–SWIR spectrometer with machine learning for proximal soil moisture sensing. In Submitted for publication. Elsevier, Measurement.

Vapnik, V. Naumovich. (1995). The Nature of Statistical Learning Theory. Springer.

Viscarra Rossel, R. A., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D. J., Demattê, J. A. M., Shepherd, K. D., Shi, Z., Stenberg, B., Stevens, A., Adamchuk, V., Aïchi, H., Barthès, B. G., Bartholomeus, H. M., Bayer, A. D., Bernoux, M., Böttcher, K., Brodský, L., Du, C. W., Chappell, A., … Ji, W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. Earth-Science Reviews, 155, 198–230. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012

Wan, L., Liu, Y., He, Y., & Cen, H. (2023). Prior knowledge and active learning enable hybrid method for estimating leaf chlorophyll content from multi-scale canopy reflectance. Computers and Electronics in Agriculture, 214, 108308. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108308

Yang, S., Liu, Y., Wu, N., Zhang, Y., Svoronos, S., & Pullammanappallil, P. (2019). Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. Renewable Energy, 138, 224–229. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.083

Yin, Z., Lei, T., Yan, Q., Chen, Z., & Dong, Y. (2013). A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement. Computers and Electronics in Agriculture, 99, 101–107. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.029

Yin, Z., Qin, W., Zuo, C., Yan, N., Li, B., Guo, Q., Shan, Z., & Wang, Z. (2015). Reflection Model for Soil Moisture Measurement Using Near-infrared Reflection Sensor. Proceedings of the 2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials. https://doi.org/10.2991/ifeesm-15.2015.158

Yoshio Kano, W. F. McClure, & R. W. Skaggs. (1985). A Near Infrared Reflectance Soil Moisture Meter. Transactions of the ASAE, 28(6), 1852–1855. https://doi.org/10.13031/2013.32530

Zellis, M. K., Bell, J. S., & Prunty, L. (1998). Soil Water Content Determination by Karl Fischer Titration. Soil Science Society of America Journal, 62(1), 257–262. https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200010033x

Zhang, C., & Lu, N. (2018). What Is the Range of Soil Water Density? Critical Reviews With a Unified Model. Reviews of Geophysics, 56(3), 532–562. https://doi.org/10.1029/2018RG000597

Zhe Yin, Tingwu Lei, Zhanpeng Chen, Qinghong Yan, & Yuequn Dong. (2013). Comparison of Two Prediction Models for Surface Soil Moisture Measurement Using Near-infrared Sensor. 2013 Kansas City, Missouri, July 21 - July 24, 2013. https://doi.org/10.13031/aim.20131596930

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. A. H. Atag et al. An LED-based cost-effective multispectral device for soil moisture assesments, poster at the National Workshop on Optics, Electro-Optics, and Photonics: Fotonik 2024, Ankara, Türkiye, 13 September 2024

2. A. H. Atag et al. Portable and cost-effective LED-based soil moisture measurement system, poster at the National Workshop on Optics, Electro-Optics, and Photonics: Fotonik 2025, Istanbul, Türkiye, 12 September 2025

3. A. H. Atag et al. Calibration and Characterization of Time-Domain Reflectometry Soil Moisture Sensors, TEMPMEKO ISHM 2025, Reims, France, 20-24 October 2025

4. Ahmet Harun ATAĞ, Ahmet KIZILAY, Ömer Faruk KADI, Fikret YILDIZ, & Hümbet NASİBLİ. (2024). Taşınabilir ve Maliyet Etkin Multispektral Toprak Rutubeti Ölçüm Cihazı. *7th International Congress on Agriculture, Environment and Health, ICAEH.*

Makaleler

1. ATAĞ, A. H., Kizilay, A., KADI, Ö. F., Erturk, M., & Nasibli, H. (2026). An LED-based multispectral discrete spectrometer for in-situ soil moisture sensing using machine learning algorithms. Computers and Electronics in Agriculture, 250, 111948.

2. A. H. Atag et al. A transfer standard vis-NIR-SWIR spectrometer with machine learning for proximal soil moisture sensing, Elsevier-Measurement, (insubmission)

Kitaplar

1. A. H. Atag et al. An LED-based cost-effective multispectral device for soil moisture assesments, proceeding at the National Workshop on Optics, Electro-Optics, and Photonics: Fotonik 2024, Ankara, Türkiye, 13 September 2024.

2. Ahmet Harun ATAĞ, Ahmet KIZILAY, Ömer Faruk KADI, Fikret YILDIZ, & Hümbet NASİBLİ. (2024). Taşınabilir ve Maliyet Etkin Multispektral Toprak Rutubeti Ölçüm Cihazı. Bildiri tam metni, 7th International Congress on Agriculture, Environment and Health, ICAEH.

Projeler

1. 21GRD08- SoMMet - Metrology for multi-scale monitoring of soil Moisture - Metrolojik Açıdan Toprak Rutubetinin Çok Ölçekli Görüntülenmesi