

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HİDROPONİK TARIMDA BESİN SOLÜSYONUNDAKİ BAZI
ELEMENTLERİN MİKTAR DEĞİŞİMİNİ MAKİNE
ÖĞRENİMİYLE GERÇEK ZAMANLI TAKİP EDEN UZAKTAN
VERİ TOPLAMA SİSTEMİNİN VE BİTKİ GELİŞİMİNİ
ETKİLEYEN IŞIĞIN YOĞUNLUĞUNU ÖLÇEBİLEN YB/CİGS
FOTOSENSÖRÜN GELİŞTİRİLMESİ**

Celal Alp YAVRU

Danışman
Prof. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ

ISPARTA- 2024



© 2024 [Celal Alp YAVRU]

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezime ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

18/10/2024

Celal Alp YAVRU

.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	8
2.1. Uzaktan Eğitim.....	8
2.2. Topraksız Tarım ve Türleri	10
2.2.1. Aeroponik sistemler	11
2.2.2. Akuaponik sistemler	12
2.2.3. Hidroponik sistemler.....	13
2.3. İnce Film Fotosensörler ve Fotodiyotlar.....	14
2.3.1. Fotosensör üretiminde kullanılan katman malzemeler (Mo, Yb, CIGS)	15
2.4. İnce Film Üretim Teknikleri	18
2.4.1. Fiziksel buhar biriktirme	18
2.4.2. Kimyasal buhar biriktirme	20
2.4.3. Fizikokimyasal yöntem (ultrasonik sprey piroliz yöntemi)	20
2.5. İnce Film Karakterizasyon Teknikleri	21
2.5.1. X-Işını kırınımı (XRD)	21
2.5.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	22
2.5.3. Elektriksel Karakterizasyon	24
2.6. Endüktif Eşleştirilmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometrisi (ICP-OES).....	24
2.7. Sıvılarda Elektriksel İletkenlik (EC) Ölçümü	26
2.7.1. Konduktif iletkenlik	27
2.7.2. İndüktif iletkenlik.....	28
2.7.3. Sıcaklığın iletkenliğe etkisi	29
2.8. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi	30
2.8.1. Denetimli, denetimsiz öğrenme ve regresyon.....	31
2.8.2. Yapay sinir ağları (YSA)	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM	37
3.1. İnce Film Yb/CIGS/Mo Fotosensörlerin Üretilmesi.....	37
3.2. Veri Seti İçin Solüsyonların Hazırlanması.....	40
3.3. Hazırlanan Solüsyonların ICP-OES ve EC Ölçümlerinin Alınması	51
3.4. Veri Setinin Genişletilmesi	52
3.5. EC Ölçer Elektronik Aygıtın (Uzaktan Eğitim Veri Toplama Cihazı) Üretimi..	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	81
4.1. Yb/CIGS/Mo Fotosensörün Yapısal ve Elektriksel Karakterizasyonu.....	81
4.2. Solüsyonların ICP-OES Ölçüm Sonuçları ve Veri Seti	91
4.3. Ham Veri Setinin YSA Kullanılarak İncelenmesi	100
4.4. Genişletilmiş Veri Setlerinin İncelenmesi ve EC Ölçer ile Test Edilmesi	102
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	119

ÖZET

Doktora Tezi

HİDROPONİK TARIMDA BESİN SOLÜSYONUNDAKİ BAZI ELEMENTLERİN MİKTAR DEĞİŞİMİNİ MAKİNE ÖĞRENİMİYLE GERÇEK ZAMANLI TAKİP EDEN UZAKTAN VERİ TOPLAMA SİSTEMİNİN VE BİTKİ GELİŞİMİNİ ETKİLEYEN IŞIĞIN YOĞUNLUĞUNU ÖLÇEBİLEN YB/CIGS FOTOLENSÖRÜN GELİŞTİRİLMESİ

Celal Alp YAVRU

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ

Bu doktora tez çalışmasında, üniversitelerde hidroponik tarım üzerine çalışmalar gerçekleştiren öğrenciler ile akademisyenlerin kullanabileceği aynı zamanda ticari uygulamalarda da kullanılacak şekilde tasarlanmış Mg, P, K elementlerinin değişikliklerini gerçek zamanlı belirlemek için bir uzaktan veri toplama sistemi geliştirilmiştir. Ayrıca bitki gelişiminde büyük öneme sahip olan ışık yoğunluğunu ölçebilecek bir Yb/CIGS ince film fotosensör üretilmiştir.

Element değişikliğini uzaktan okuyabilen sistemin geliştirme aşamasında toplam 300 örnek besin çözeltisi hazırlanmış ve bunların ICP-OES ve EC ölçümleri bir veri seti oluşturmak için kullanılmıştır. Bu veri seti Python arayüzünde yapay sinir ağıları kullanılarak genişletilmiş ve buluta yüklenmiş, bulutla iletişim kurmak ve rastgele hazırlanan çözeltilerin iletkenlik değerlerini karşılaştırmak için uzaktan veri okuyabilen bir EC ölçer geliştirilmiştir. Sistemin 10 farklı numune üzerinden elde edilen deneysel başarı oranı %81.68 olarak bulunmuştur.

Fotosensör üretiminde alt kontak olarak Mo, foto aktif katman olarak CIGS ve üst kontak olarak Yb kullanılmıştır. CIGS tabanlı fotodiyotun yapısal, elektriksel ve yüzey özellikleri incelenmiş, detektör performansı güneş ışığı ve kızılötesi ışık altında test edilmiştir. Ölçümler, Yb/CIGS fotosensörün hem görünür hem de yakın kızılötesi bölgedeki ışık yoğunluğunu belirlemek için uygun olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidroponik tarım, Uzaktan eğitim, İnce film, ICP-OES, Fotosensör, Makine öğrenimi

2024, 120 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Dissertation

DEVELOPMENT OF A REMOTE DATA ACQUISITION SYSTEM FOR REAL-TIME MONITORING OF SOME ELEMENTAL VARIATIONS IN NUTRIENT SOLUTIONS IN HYDROPONIC FARMING USING MACHINE LEARNING, AND A Yb/CIGS PHOTODETECTOR FOR MEASURING LIGHT INTENSITY AFFECTING PLANT GROWTH

Celal Alp YAVRU

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Electric-Electronic Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ

In this Ph.D. dissertation, a remote data acquisition system was developed to detect real-time changes in Mg, P, and K elements, designed for use by students and academics conducting studies in hydroponic agriculture at universities, as well as for potential commercial applications. Additionally, a Yb/CIGS thin-film photosensor was produced to measure light intensity, which plays a crucial role in plant development.

During the development phase of the system that can remotely read element changes, a total of 300 nutrient solution samples were prepared, and their ICP-OES and EC measurements were used to create a dataset. This dataset was expanded using artificial neural networks in a Python interface and uploaded to the cloud. A remote EC meter capable of communicating with the cloud and comparing the conductivity values of randomly prepared solutions was developed. The experimental success rate of the system, based on 10 different samples, was found to be 81.68%.

In the production of the photosensor, Mo was used as the bottom contact, CIGS as the photoactive layer, and Yb as the top contact. The structural, electrical, and surface properties of the CIGS-based photodiode were examined, and the detector performance was tested under sunlight and infrared light. The measurements showed that the Yb/CIGS photosensor is suitable for detecting light intensity in both the visible and near-infrared regions.

Key Words: Hydroponic farming, Distance education, Thin film, ICP-OES, Photosensor, Machine learning

2024, 120 pages

TEŞEKKÜR

Tezimin yürütülmesinde desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ'ye, sayın hocam Doç. Dr. Murat KALELİ'ye, çalışma süresince bana desteklerinden dolayı sayın hocam Doç. Dr. Durmuş Ali ALDEMİR'e, sayın hocam Doç. Dr. Kubilay TAŐDELEN'e, sayın Dr. Salih AKYÜREKLİ'ye, sayın Dr. Murat KOÇ'a ve sayın Mustafa Őenol COŐAR'a teŐekkürlerimi sunarım.

2023-D3-0218 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

100/2000 Öncelikli Alanlar Doktora Bursu Programı kapsamında destek veren Yükseköğretim Kurulu (YÖK)'na teşekkür ederim.

Tezimin ve hayatımın her aşamasında varlıklarımı yanımda hissettiğim her sevincimde ve üzücümde varlıklarımı yanıma hissettiğim ve bu hissimin gerçek olmasından dolayı ayrıca sevindiğim, beni hiç yalnız bırakmayan anneme ve babama sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Celal Alp YAVRU
ISPARTA, 2024

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dünya nüfusunun yıllara göre artış grafiği	2
Şekil 1.2. Tarım arazilerinin yıllara göre durumunu gösteren grafik.....	2
Şekil 1.3. Hidroponik tarım örnek şeması.....	3
Şekil 1.4. Tez çalışması diyagramı	7
Şekil 2.1. CIGS bileşeninin kristal yapısı	17
Şekil 2.2. Termal buharlaştırma sistemi örnek şeması.....	19
Şekil 2.3. Saçtırma sistemi örnek şeması	19
Şekil 2.4. Kimyasal buhar biriktirme örnek şeması	20
Şekil 2.5. Ultrasonik sprey piroliz sistemi örnek şeması	21
Şekil 2.6. XRD sistemi çalışma prensibi.....	22
Şekil 2.7. SEM çalışma prensibi	23
Şekil 2.8. ICP-OES sistemi çalışma prensibi	26
Şekil 2.9. Makine öğrenimi sınıflandırması	31
Şekil 2.10. Örnek bir YSA nöron modeli.....	34
Şekil 3.1. Vaksis Midas 4T1M sistemi iç tasarımı	38
Şekil 3.2. Efüzyon hücrelerinin zamana bağlı sıcaklıkları.....	39
Şekil 3.3. Elementlerin buharlaşma seviyeleri.....	39
Şekil 3.4. Üretilen Yb/CIGS/Mo fotosensörün katmanları	40
Şekil 3.5. Gübre karışılabilme durumu.....	42
Şekil 3.6. Elmer Optima 5300DV ICP-OES sistemi	51
Şekil 3.7. Keysight 4285A Empedans Analizatörü.....	52
Şekil 3.8. Üretilen EC ölçerin Fritzing üzerinde çizimi.....	67
Şekil 3.9. EC sonuçlarını buluta gönderen elektronik sistem	75
Şekil 3.10. Android arayüzü ekran görüntüsü.....	79
Şekil 4.1. Farklı geliş açılarındaki GIXRD grafikleri	81
Şekil 4.2. CIGS ince filmlerin yüzeyinden alınmış FE-SEM görüntüsü	83
Şekil 4.3. Üretilen fotodedektörün kesitten alınmış FE-SEM görüntüsü ve katman kalınlıkları.....	84
Şekil 4.4. a) 2D AFM görüntüsü, b) 3D AFM görüntüsü	84
Şekil 4.5. a) 2 boyutlu AFM görüntüsünün histogram eğrisi, b) 2 boyutlu AFM görüntüsünde çizgi topoğrafyası grafiği.....	85
Şekil 4.6. Yb/CIGS/Mo fotosensörün elektriksel ölçümlerinin alınma şekli.....	86
Şekil 4.7. Mo/CIGS/Yb fotosensörün I-V karakteristikleri a) güneş ışığı için farklı yoğunluklar, b) kızılötesi ışık	87
Şekil 4.8. Zaman bağımlı fotoakım çizimleri ($I-t$), a) güneş ışığı için farklı yoğunluklar, b) kızılötesi ışık	88
Şekil 4.9. Zaman bağımlı kapasitans çizimleri, a) güneş ışığı için farklı yoğunluklar, b) kızılötesi ışık için	90
Şekil 4.10. Frekansa bağlı a) C-V çizimleri, b) G-V çizimleri	90
Şekil 4.11. Ham veri setinin YSA kullanılarak elde edilen eğitim, doğrulama, test ve regresyon sonuçları	100
Şekil 4.12. TensorFlow ile eğitilmiş modelin YSA kullanılarak elde edilen eğitim, doğrulama, test ve regresyon sonuçları.....	102
Şekil 4.13. PyTorch ile eğitilmiş modelin YSA kullanılarak elde edilen eğitim, doğrulama, test ve regresyon sonuçları	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Mo katmanı üretim parametreleri	37
Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları.....	43
Çizelge 4.1. Yb/CIGS fotosensörün karanlık ve farklı ışıklar altında hesaplanan bazı diyot özellikleri.....	87
Çizelge 4.2. ICP-OES ölçüm parametreleri	91
Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti.....	92
Çizelge 4.4. TensorFlow ve PyTorch için 3 farklı iletkenlik seviyesinde Mg, K ve P sonuçları.....	105
Çizelge 4.5. 10 farklı numune için üretilen sistem ile elde edilen sonuçları ve deneysel sonuçlar	105



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif akım
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
Ar-Ge	Araştırma geliştirme
C	Kapasitans
CIGS	CuInGaSe ₂
CIS	CuInSe ₂
cm	Santimetre
Cu	Bakır
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
CZTS	CuZnTeS
DC	Doğru akım
EC	Elektriksel iletkenlik
EDS	Enerji dağılım spektrometrisi
E _f	Fermi enerji seviyesi
FEG	Alan emisyonlu elektron tabancası
Ga	Galyum
I	Akım
ICP-MS	Endüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi
ICP-OES	İndüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektroskopisi
In	İndiyum
K	Potasyum
led	Işık yayan diyot
Mg	Magnezyum
ml	Mililitre
Mo	Molibden
mS	Milisiemens
NIR	Yakın kızılötesi
nm	Nanometre
P	Fosfor
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
R	Direnç
S	Sülfür
S	Siemens iletkenlik birimi
Se	Selenyum
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Sn	Kalay
t	Zaman
Te	Tellür
USP	Ultrasonik spreysel piroliz
UV	Ultraviyole
V	Gerilim
Vis	Görünür
XRD	X-ışını kırınımı
Yb	İterbiyum
YÖK	Yükseköğretim Kurumu
YSA	Yapay sinir ağları
θ	Elektrot sabiti

σ	Elektriksel iletkenlik
Ω	Ohm direnç birimi
μl	Mikrolitre
μm	Mikrometre
μS	Mikrosiemens

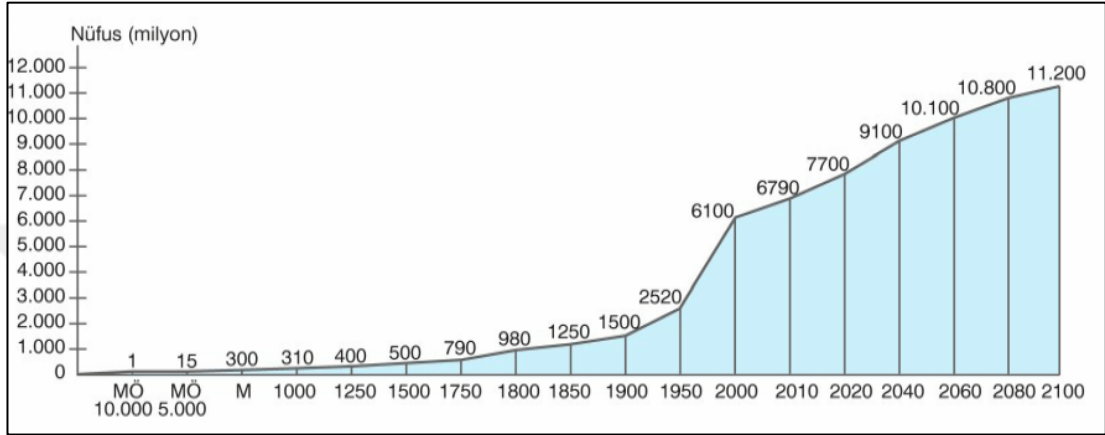


1. GİRİŞ

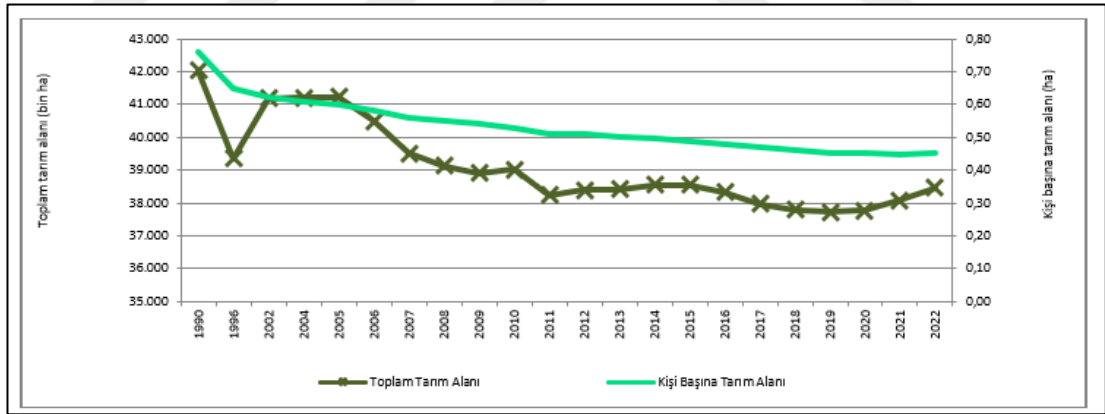
Yakın zamanda ortaya çıkan Covid-19 salgını sebebiyle mesleki hayatımız ve sosyal hayatımız olumsuz şekilde etkilenmiştir. Özellikle üniversitelerde ön lisans, lisans, yüksek lisans ve doktora seviyelerinde eğitim alan öğrencilerin eğitim hayatı sekteye uğramıştır. Özellikle lisansüstü eğitimlerde laboratuvar çalışmalarında deneysel olarak bilim üretmek isteyen akademisyen ve öğrencilerin çalışma alanlarına ulaşamaması, birçok tezin geç bitmesine hatta bitirilememesine sebep olmuştur. Bu ve benzeri sebeplerden dolayı yüz yüze eğitimin olumsuz etkilenmesi ve gerçekleştirilememesiyle beraber uzaktan eğitim, sanal laboratuvar uygulamaları ve eğitimde dijitalleşme gibi konularda donanımsal ve yazılımsal olarak geliştirilmesi gereken çok fazla olgunun olduğu görülmüştür. Böylece uzaktan eğitim bütün eğitim-öğretim seviyeleri ve konuları için üzerinde sıkça durulan, geliştirilmesi ve uygulaması yapılması gereken bir duruma evrilmiştir [1]. Ülkemizde de bu konu üzerine çalışmaların üretilmesi ve geliştirilmesi gerektiğinin görülmesi üzerine Yükseköğretim Kurumu (YÖK) 100/2000 Öncelikli Alanlar Doktora Programı kapsamına “Uzaktan Eğitim” başlığını eklemiş böylece üniversitelerin farklı anabilim dallarında konu ile ilgili araştırma geliştirme (Ar-Ge) ve bilimsel çalışmaların yapılmasını ülkemiz için öncelikli konulardan biri haline getirmiştir [2].

Ülkemizin bulunduğu coğrafi ve sosyolojik şartlar göz önünde bulunursa, ülkemiz için en önemli Ar-Ge konularının ilk sıralarında tarım, tarımsal üretim ve tarımsal inovasyon ve bun konuların bilimsel olarak ele alınması olduğu görülmektedir. Özellikle Avrupa ülkeleri arasında imzalanan The European Green Deal (Avrupa Yeşil Mütabakatı) kapsamında elektrik üretimi, tüketimi ve karbon ayak izi üzerinde sürdürülebilir bir plan yürütülmesi gerektiği belirtilmektedir [3]. Bu sebeple tarımda kullanılan ham maddelerin de verimli şekilde kullanılması elzemdir. Bu ve benzeri uluslararası anlaşmalar ve kongreler, tarım sektörünün insanlık için ne kadar önemli olduğunu açıkça göstermektedir. Dünyada ve ülkemizde verimli tarım arazilerinin azalması ve hızla artan insan nüfusu sebebiyle tarım üreticileri için minimum alandan maksimum verim almak bir zorunluluk haline gelmektedir. Tarım alanlarından maksimum verim elde edilmesi için tarımsal üretim sırasında bütün değişkenlerin tespit ve kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Tarımsal araştırma-geliştirme genel

olarak; nüfusun sağlıklı beslenmesi, temel ihtiyaç olan gıdanın güvenilirliğinin sağlanması, çevre dostu olan sürdürülebilir tarım faaliyetlerinin geliştirilmesi ve ihracatın artırılması için yapılmaktadır. Bu çalışmalar; azalmasıyla beraber günümüzde daha da önem kazanmaktadır. Dünya nüfusunun yıllara göre artış hızı ve ekilebilir tarım arazilerindeki durumu gösteren grafikler sırasıyla Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de verilmiştir.



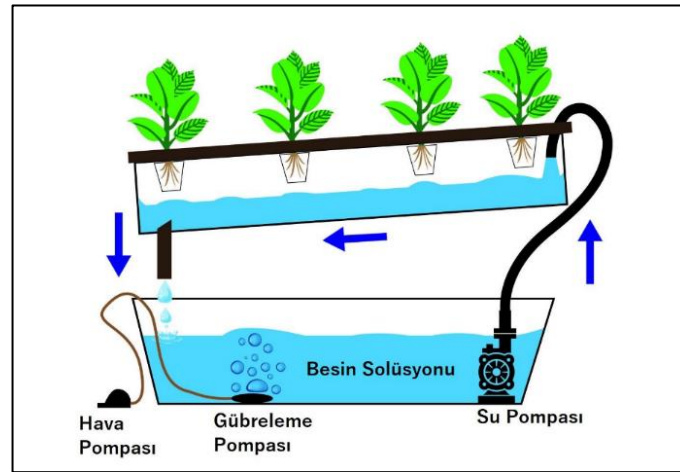
Şekil 1.1. Dünya nüfusunun yıllara göre artış grafiği [4]



Şekil 1.2. Tarım arazilerinin yıllara göre durumunu gösteren grafik [5]

Gelişen teknolojiyle beraber üretimde artış, ekonomide büyüme ve sosyal yapıda değişimler olması kaçınılmazdır. Böylece toplumun yeni ihtiyaçları ortaya çıkmaktadır. Bu döngünün tarih boyunca devam etmesi, bütün alanlarda Ar-Ge çalışmalarının kesintisiz yapılması gerektiğini göstermektedir. Tarımda Ar-Ge çalışmaları kapsamında özellikle disiplinler arası çalışmalar göz önüne alındığı takdirde, tarımda inovasyon konusu ziraat, yazılım ve elektronik donanım üzerine

çalışan birçok kişinin ortak paydada bulunduğu bir olgudur. Böylece tarımda kullanılan elektrik-elektronik donanımların, yazılımların artmasıyla beraber tarımsal inovasyon konusu ortaya çıkmıştır. Tarımsal inovasyon konusuyla beraber bütün tarım faaliyetleri ve çalışmaları uzaktan erişilebilir, kontrol edilebilir hale getirilmeye çalışılmaktadır. Tarım uygulamaları içerisinde son dönemlerde topraksız tarım konusu Ar-Ge çalışmaları kapsamında özel şirketler ve üniversite laboratuvarlarında sık çalışılan konulardan biri haline gelmiştir. Topraksız tarım 4 mevsim ekilebilir olması, az alandan çok verim alınabilir olması, verimli toprak alanına ihtiyaç duymaması ve dış etkenlerin kontrol edilebilir olması gibi özellikleriyle günümüzde klasik tarım uygulamalarının yerini almaya başlamıştır. Ayrıca topraksız tarım ve çevre, topraksız tarımda gübre uygulamaları ve bu konuların bitki fizyolojisi gelişimi üzerine etkileri gibi konular lisansüstü eğitim ile bilimsel çerçevede incelenmeye başlanmış ve tarımsal üretim için minimum maliyet ile maksimum verim elde etme çalışmaları hız kazanmıştır. Bu tür sebeplerle klasik tarım faaliyetleri yerlerini daha az alan kaplayan ve daha kontrol edilebilir dikey tarım, topraksız tarım gibi potansiyel olarak verimi çok daha yüksek modern tarım uygulamalarına bırakmaktadır. Özellikle hidroponik (topraksız) tarım uygulamaları hem tarım üreticileri hem de bu konuda bilimsel çalışmalar gerçekleştiren kişiler için oldukça önemli hale gelmiştir. Örnek bir topraksız tarım şeması Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Hidroponik tarım örnek şeması [6]

Hidroponik tarım, besin çözeltisi içerisinde desteksiz olarak besin yetiştiriciliği anlamındadır. Bununla birlikte besin çözeltisi kullanarak katı ortamda bitki yetiştirme de bu sistem içerisinde yer almaktadır. Hidroponik tarımda, farklı kimyasal

bileşenlerin saf su içerisinde çözünmesiyle beraber bir besin çözeltisi oluşturulur. Bu solüsyon bir depo içerisine eklenir ve solüsyonun sistem içerisinde çevrilerek bitkilere ulaşmasını sağlayan bir sistem tasarlanır. Hidroponik tarımda, bitkinin yetiştirilme aşamasında kimyasal bileşenlerin solüsyon içerisindeki oranı her bir bitki türü için zamanla değişmektedir. Azalan kimyasal bileşenin çözelti içerisine eklenmesi gerekmektedir. Bu gübre ekleme işlemi sırasında çalışmayı yürüten yetiştirici veya akademik çalışan, üretim sisteminin yanında olmalı ve solüsyonun asidik veya bazik olma seviyesi (pH seviyesi) ile iletkenlik seviyesini (EC) belirlemelidir. Fakat bu elde edilen pH ve EC verileri, solüsyon içeriğinde bulunan çeşitli kimyasal bileşenlerden hangisinde ne kadarlık bir değişim olduğuna dair kesin sonuçlar vermemektedir. Bu sebeple çalışmayı yürüten kişi veya akademik çalışan çözelti içeriğinde belirli oranlarda ve en optimize şekilde olması gereken bileşenlerden fazla veya az ekleme yapabilmektedir. Bu da hem pahalı olan kimyasal bileşenlerin boşa harcanmasına böylece maliyetin artmasına sebep olmakta hem de çalışmanın başarılı olma ihtimalini düşürmektedir. Ayrıca konuyla ilgili çalışan kişinin sürekli olarak sistemin yakınında olması ve sistemdeki değişimi takip etmesi mümkün değildir. Bu da zaman içerisinde değişen kimyasal bileşenin anlık olarak tespit edilip takviye edilmesine ve verimin maksimum seviyede olmasına engel olmaktadır. Hidroponik tarımda besleyici solüsyonun pH ve EC seviyeleri günümüzde anlık olarak uzaktan öğrenilebilmektedir. Fakat bu yöntemler yukarıda da belirtildiği gibi kimyasal bileşenlerin oranları hakkında kesin sonuç veremezler.

Kimyasal bileşen oranının kesin olarak tespit edilebilmesi için sistemin deposundan periyodik aralıklar ile alınan örnek solüsyonlar laboratuvarlarda iyon kromatografisi sisteminde incelenmesi gerekmektedir. Bu yöntemle solüsyonun kimyasal bileşen oranı kesin olarak elde edilmektedir. Ancak iyon kromatografi yöntemi ile anlık ve hızlı sonuçlar elde edilemez. Çünkü numune periyodik aralıklarla depodan alınmakta ayrıca iyon kromatografi sisteminde incelenmesi için kimya laboratuvarlarına gönderilmesi gerekmektedir. Ayrıca laboratuvarın yoğunluğuna bağlı olarak sonucun elde edilmesi için belirli bir zaman geçmektedir. Ayrıca laboratuvarın yoğunluğuna bağlı olarak numunelerin ölçüm sırası beklenebilmektedir. Literatürde hazırda var olan bu yöntemler ancak beraber değerlendirilirse kesin ve hızlı sonuçlar elde edilebilecektir [7-13]. Bu yöntemlerden elde edilen verilerin sezgisel algoritmalarla

beraber değerlendirilmesi ile besleyici solüsyon içeriğindeki kimyasal bileşenler anlık, hızlı ve kesin olarak tespit edilebilir. Böylece hem kimyasal bileşenlerden hem de zamandan tasarruf sağlanabilir.

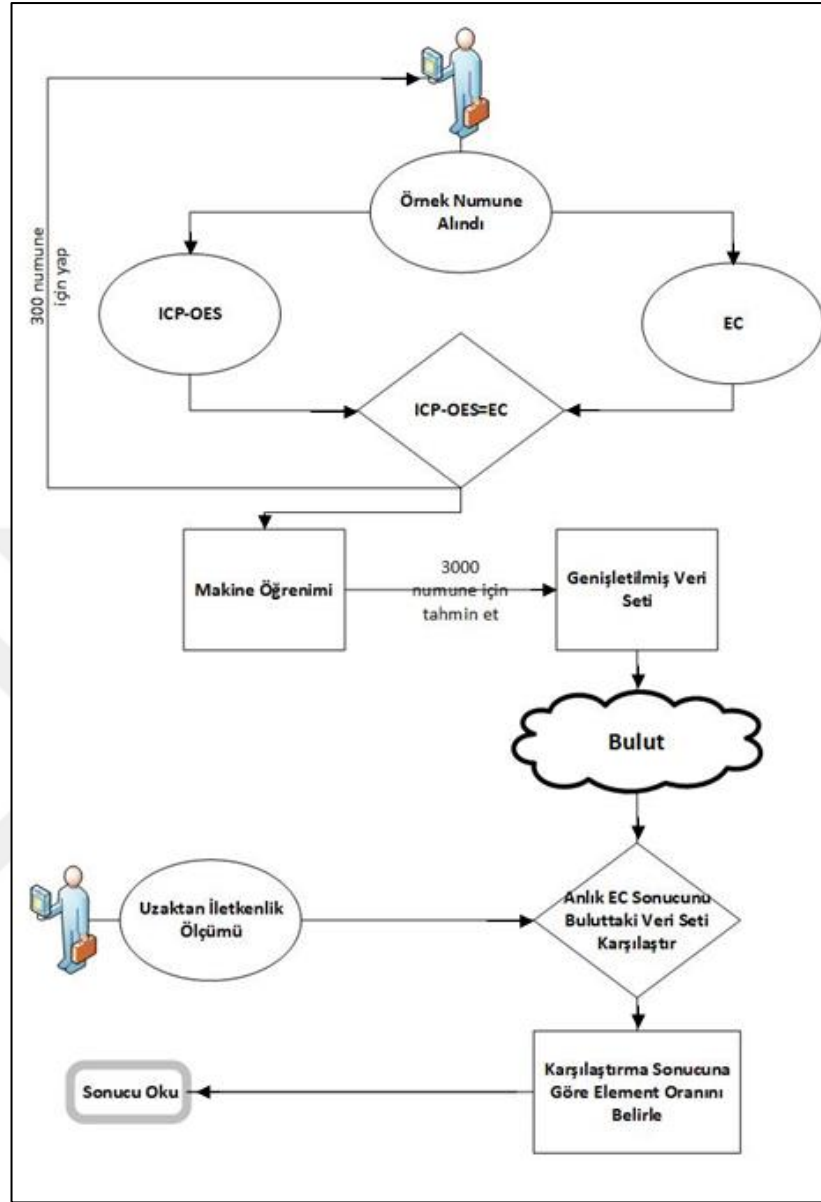
Elektronik uygulamalar günümüzde savaş gemilerinden denizaltılara, tarımsal inovasyondan nanoteknoloji çalışmalarına kadar her yerde karşımıza çıkmaktadır [14-18]. Bu uygulamalar uygun yazılımlarla beraber insan hayatını oldukça kolaylaştırmaktadır. Özellikle yapay zekâ uygulamalarının artmasıyla beraber klasik algoritmaların yerine makine öğrenimi metotları kullanılmaya başlanmıştır. Yapay zekâ günümüzde her alanda kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir [19]. Gelişen makine öğrenimi teknolojisi herhangi bir verinin işlenmesi ve başka verilerle korelasyon kurularak yeni tahminler elde edilmesini mümkün kılmıştır. Yüksek başarı oranına sahip yapay zekâ tahmin oranları, insanlığın birçok sorununa çözüm üretebilecek şekilde gelişmekte ve her geçen gün farklı uygulama alanları bulmaktadır. Hidroponik tarım uygulamalarında elde edilen verilerinde yapay zekâ kullanılarak genişletilmesi ve işlenmesi daha hızlı ve doğru çözümler için bir yöntem olarak kullanılabilir.

Hidroponik tarımda bir diğer önemli unsur aydınlatmadır [20]. Doğal ve yapay aydınlatma ile yetiştirilen bitkinin yaprak ve/veya meyve büyüklükleri arasında bir korelasyon kurulabilir. Bitkinin aydınlatma seviyesinin ölçülmesi için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu konuda kullanılan klasik yöntemler görece büyük hacme sahip cihazlardır ve bu sebeple bitkinin yaprakları üzerinde gölgelenmeye sebep olabilmektedir. Ayrıca bitkinin tam anlamıyla aydınlatma seviyesi sadece yapay aydınlatma kaynağı ile veya ölçüm yapabilen tek bir sensör ile kesin olarak bilinmemektedir. Aydınlatma değerinin mümkün olduğunca kesin değere yakın olması bitkinin gelişiminin daha net takip edilmesi ve anlaşılması açısından çok önemlidir [21]. Aydınlatma seviyesinin takibi için gerekli olan sensörler günümüzde en çok kullanılan nanoteknolojik aygıt üretim yöntemlerinden biri olan ince film aygıt üretimi metotlarıyla üretilebilir. Normal ışık sensörlerine göre daha küçük boyutlarda olan bu sensörler bitkinin farklı bölgelerine aynı anda ve bitkinin diğer kısımlarına gölgeleme etkisi yapmayacak şekilde yerleştirilirse takip sonuçları daha kesin değerler ile ifade edilebilir. İnce film teknolojisi en basit şekliyle bir altlık üzerine birkaç

nanometre (nm) ile birkaç mikrometre (μm) arasında kalınlığa sahip bir malzemenin kaplanması şeklinde tanımlanabilir. Temelde fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal olmak üzere sınıflandırılabilir. Bir ince film fotosensör en az 3 katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır [22]. Toplam kalınlığının μm seviyesinde olması ve görece küçük alana sahip altlıklar üzerine üretilebilmesi sebebiyle bu tez kapsamında kullanım alanı için oldukça uygundur.

Bu tez çalışmasında, 300 farklı besin solüsyonunun indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) sonuçları elde edilmiş ve her bir solüsyonun EC sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen verilen veri seti yapay sinir ağları (YSA) algoritmalarının başarılı tahmin yeteneği sonucunda genişletilmiştir. Genişletilmiş olan bu veri seti bulut sistemi içerisine yüklenmiştir. EC ölçümü yapabilen ve bulut sistemi ile haberleşerek cep telefonları için tasarlanmış basit bir Android arayüzü aracılığı ile kontrol edilebilen bir elektronik sistem tasarlanmıştır. Böylece sadece EC ölçüm sonuçlarından besin sıvısının anlık olarak kimyasal bileşen değişimi takip edilmiştir. Ayrıca üretilen ince film Yb/CIGS fotosensörün ışık yoğunluğunu ölçebilme seviyesi araştırılmıştır. Böylece Işık yoğunluğunun bitki gelişimi üzerine etkisi üzerinde çalışma yapmak isteyen çalışanlar için alternatif bir ince film fotosensör geliştirilmiştir.

İlgili literatür taramasında ve konu ile ilgili özel şirketlerle (Dr. Tarsa, İGSAŞ, GrowLight) yapılan görüşmeler sonucunda üretilecek olan sistemin ülkemizde ve dünyada bir örneğinin olmadığı belirlenmiştir. Bu sebeple üretilecek sistemin iç ve dış piyasada satışı yapılabildiği takdirde ülkemiz ekonomisine katkı sağlaması beklenmektedir. Geliştirilen sistemi lisansüstü öğrenciler ve akademisyenler de kendi deney düzenekleri içerisine entegre ederek uzaktan veri toplama sistemi olarak kullanılabilecektir. Ayrıca bu tez çalışmasının, geliştirilen sisteme farklı sensörler ve daha fazla veri setinin entegre edilebilmesi ile gelecekte üretilebilecek bir robotik bitki takibi (roboplant) uygulamasının ön çalışması olma özelliği taşıdığı söylenebilir. Tez çalışması gerçekleştirilirken kullanılan çalışma diyagramı Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Tez çalışması diyagramı

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Uzaktan Eğitim

Bulaşıcı bir hastalık olan Covid-19, 2020 senesinde bütün dünyada pandemiye sebep olmuş ve yaşam biçimimizi her açıdan değiştirmiştir. Çoğu üniversite, yayılmayı azaltmak için evde kalma emrine uygun olarak güvenlik önlemleri almak zorunda kalmıştır. Sonuç olarak, devam eden pandemi sırasında tüm dersler çok kısa bir süre içinde yüz yüze eğitimden uzaktan eğitim formatına dönüşmüştür [23]. Çevrimiçi platformların kullanılmasının, genellikle yüz yüze iletişime kıyasla çok daha az etkileşimli bir ortama yol açtığı ve bu durumun öğrenci katılım düzeyini azaltabileceği açıktır. Mevcut durumda, öğrencilerin bakış açılarını geliştiren ve akademik güven oluşturmak için akranlarından destek sağlayan grup öğrenimi ve ilgili etkinlikler öğrenciler için yürütülmesi daha zor hale gelmektedir. Birçok üniversitede uzaktan eğitim bazı programlara zaten uygulanmış olsa bile genellikle dinamik bir öğrenme ortamı ve uygulamalı laboratuvar aktiviteleri gerektiren bölümler ile ilgili müfredat için nadiren kullanılmıştır. Yine de eğitmenler, ders ve ofis saatleri için çeşitli sanal platformlar kullanarak yüksek öğretim kalitesini korumaya çalışmışlardır. Çevrimiçi öğretimin kabul edilen temel faydaları arasında, öğrencilerin kavramları daha verimli bir şekilde kavramak için önceden kaydedilmiş derslere ve notlara istedikleri zaman erişebilmeleri ve farklı kurumlar arasında ders içeriğine açık erişim sağlama potansiyeli yer almaktadır. Bu arada, olası kaynak kısıtlı durumlara ek olarak dersleri uzaktan vermenin birçok zorluğu vardır. Bu dönemde özellikle öğrencilerinin temel bilgileri pratik becerilere dönüştürmeleri için önemli platformlar olan araştırma ve laboratuvar dersleri, artık ders tabanlı derslere kıyasla kampüs kapanışları nedeniyle daha fazla kısıtlanmıştır.

Ancak, araştırma ve laboratuvar faaliyetlerinin önemli ölçüde yavaşlaması, lisans ve lisansüstü eğitiminin nihai öğrenme çıktısı üzerinde muazzam bir olumsuz etkiye yol açmaktadır. Bir öğrencinin bakış açısından, bu laboratuvar etkinlikleri mesleki becerileri geliştirmek ve eğitimlerini ilerletmeleri için onlara ilham vermek için eğlenceli deneyimlerdir. Bundan da fazlası olarak lisansüstü ve akademik çalışmalarda laboratuvar deneyleri araştırmacıların uzmanlaşmak istedikleri alanla ilgili tecrübe

edinmelerini kısıtlamış, birçok proje, araştırma bilimsel yayın ve tezin geç bitmesine hatta bitmemesine sebep olmuştur. Bununla beraber eğitim ve öğretimin en verimli şekilde devam etmesi eğitmen ve öğrencilerin mesleki motivasyonu açısından oldukça önemlidir [23].

Teknolojik hizmetler özellikle sanayi alanıyla birlikte etkinliğini arttırarak günümüzde pek çok alanın ihtiyacını karşıladığı bir duruma gelmiştir. Bu gelişim, yeryüzündeki tüm toplumlarda etkisini göstermiş ve toplumlar giderek artan bir şekilde teknolojik imkanlardan faydalanmaya başlamışlardır. Covid-19 pandemisinin hayatımızda ortaya koyduğu uzaktan eğitim süreciyle beraber önümüzdeki dönemlerde dijital teknolojilerle öğrenme; gelişimi devam eden teknoloji sayesinde uzaktan eğitim sisteminin yaygınlaşacağı ve öğrenme yapısının merkezinde yer alacağı öngörülmektedir [24].

Günümüzde uygulamalı bilimler üzerinde çalışmalar yapan bütün öğrencilerin gelişimine katkı sağlamak için dinamik değişimlerin izlenebildiği, kontrol edilebildiği, kaydedilebildiği sanal laboratuvar yazılımları ve uzaktan eğitim donanımları birer ihtiyaç haline gelmiştir [25].

Bu ihtiyacı gidermek üzere fizik, kimya, tıp, mühendislik gibi eğitim alanlarında medikal görüntü analizi, robotik öğrenme, basit fizik ve kimya deneyleri için örnek çalışmalar günümüzde yapılmaktadır [26-30].

Uzaktan eğitim teknolojisinin özellikleri ve ortaya çıkardığı avantajlar ile hassas tarım teknolojisi müfredatının mevcut durumu da göz önüne alındığında, uzaktan eğitim alanındaki teknolojik gelişimlerin ziraat fakültelerinde yüksek öğretim alanında ve endüstriyel uygulamalarında da kullanılabilmesi görülmektedir. Özellikle hızla artan insan nüfusu ve verimli toprakların azalmasıyla beraber zirai uygulamalarda maksimum verime ulaşabilmek için gelişen teknolojiye faydalanmak kaçınılmaz olmuştur [31]. Böylece tarımda inovasyon konusu ortaya çıkmış ve günümüzde bilimsel ve endüstriyel anlamda en çok çalışılan konulardan biri haline gelmiştir [32].

Evde deney yapmak ideal bir durum olmasa bile bazı güvenli projeler öğrencilere ders kitabı bilgisini günlük yaşam ile ilişkilendirmeleri için ilham vermek için yararlı olacaktır. Ayrıca uzaktan eğitim deney setlerinin ve bu deney setlerine entegre edilebilecek olan veri toplama ve veri okuma aygıtlarının geliştirilmesiyle beraber akademisyen ve öğrenciler bir kere kurmuş oldukları bir düzenek üzerinden elde etmek istedikleri verilere dijital yolla ulaşabileceklerdir.

Uzaktan eğitim konusuyla beraber tarımsal faaliyetlerin insanlık için önemi de göz önünde bulundurulduğu takdirde üniversitelerde veya farklı eğitim kurumlarında tarım uygulamalarında verileri uzaktan okuyabilme fikri oldukça önemlidir. Özellikle dijital verilerin toplanabilmesi için hem doğası gereği buna uygun olan hem de geleceğin tarım faaliyeti olarak görülen topraksız tarım üzerine bir uzaktan veri okuma sisteminin üretilmesi, sistemin uygulama alanı olarak hidroponik tarımın seçilmesinin ne kadar doğru olduğunu göstermektedir.

2.2. Topraksız Tarım ve Türleri

Günümüzde dünya nüfusu 8 milyara yakın iken 30 yıl içerisinde dünya nüfusunun 10 milyara yakın olacağı öngörülmektedir [33]. Nüfusun hızla artması ve bunun yanında doğal kaynakların giderek azalması günümüzdeki tarımsal faaliyetlerin ilerleyen yıllarda insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılayamayacağını işaret etmektedir. Tarım arazilerinde görülen hatalı arazi kullanımı, insan faaliyetlerinin olumsuz etkileri ve çölleşme, bu arazilerin verimliliğinin azalmasına ve miktarlarının düşmesine neden olmaktadır. Klasik tarım yöntemleri bu sorunlara cevap verememektedir. Bundan dolayı yenilikçi tarım uygulamalarından biri olan topraksız tarım bu sorunların çözüm yöntemlerinden biri olarak günümüzde kendisini göstermektedir. Klasik tarım uygulamalarının geniş alanlara olan gereksinimi, aşırı gübre ve su kullanımı, toprak yapısındaki bozulmalar, üretim sürecinde karşılaşılan başlıca problemlerdir. Bu sorunlar, mevcut tarım arazilerinin etkin kullanılmasını ve alternatif tarım tekniklerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir [34]. Tarım arazilerindeki kayıpları en aza indirmek, ürün verimliliğini artırmak, kırsal-kentsel alanlar arasındaki nakliye sorunlarını çözmek, mevsimsel risklerden kaçınmak, zirai kalıntı problemlerini azaltmak ve su kullanımını optimize etmek, alternatif tarım

yöntemlerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir [34]. Bu alternatif tarım yöntemleri, verimli toprak ihtiyacını ortadan kaldırarak, daha iyi arazi kullanımı sağlayan ve ölçeklenebilir sistemler oluşturan modern tarım yaklaşımlarını temsil etmektedir.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, alternatif tarım yöntemlerinin çeşitlenmesi ve gelişmesi hız kazanmış; hidroponik, aeroponik ve akuaponik tarım sistemleri önem kazanmıştır. Bu sistemler, farklı tarımsal sorunlara yenilikçi çözümler sunarak, verimsiz veya sorunlu bölgelerde bile tarım yapılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu teknolojiler dikey tarım gibi birim alan başına verimi artıran üretim modellerinin uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yanında, bu modern sistemler, yıl boyunca sürekli üretimi destekleyecek şekilde tasarlanabilmektedir. Dünyada olduğu gibi, ülkemizde de kullanılmaya başlanılan bu yöntemlerin en büyük avantajı, çiftçilerin üretim süreçleri üzerinde daha fazla kontrol sağlamaları, emek ve zaman tasarrufu yapmaları ve işletmelerini daha kârlı hale getirmeleridir [35].

2.2.1. Aeroponik sistemler

“Aeroponik” terimi, Latince hava anlamına gelen “aer” ve çalışma anlamına gelen “ponos” kelimelerinden türetilmiştir. Aeroponik sistemler, temel olarak çıplak köklerin periyodik veya sürekli olarak sis halindeki besin eriyikleriyle beslendiği bir hava-su kültürü prensibine dayanır. Bu sistemlerde, yetiştirilecek bitki türüne göre önceden belirlenen su ve besin maddeleri, su haznesinden bir pompa aracılığıyla zamanlayıcıya bağlı modüler sistemler kullanılarak bitkinin köklerine püskürtülür. Askıda duran bitkinin kök sistemi, kapalı veya yarı kapalı bir ortamda atomize edilmiş su ve besin maddelerini kolaylıkla emer. Havada mevcut olan oksijen, kök gelişimini teşvik eder ve bitkinin kök sistemine tam erişim sağlar [35].

Bazı aeroponik sistemler geleneksel bir ekim yatağı gibi yatay olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Ancak bitkilerin asılı durması ve köklerinin genişlemesi gerektiğinden, dikey tarım kuleleri gibi yerden tasarruf sağlayan sistemler giderek daha popüler hale gelmiştir.

Aeroponik sistemlerin en önemli avantajı, su ve besin çözeltisi kullanımında sağladığı ekonomik faydadır. Bu sistemlerde, düşük kaliteli suların da rahatlıkla kullanılabilmesi, su kalitesinin düşük ve miktarının az olduğu bölgelerde aeroponik tarımın başarılı bir şekilde uygulanmasını mümkün kılmaktadır [35].

2.2.2. Akuaponik sistemler

Akuaponik terimi, Latince “aqua” (su kültürü) ve “ponos” (çalışma) kelimelerinden türetilmiştir. Akuaponik, balık yetiştiriciliği (akuakültür) ile topraksız tarımın (hidroponik) teknolojik olarak birleştirilmesiyle oluşturulan entegre bir sistemdir. Bu sistemde, akuakültürden elde edilen su, hidroponik sistemlerde kullanılarak çift yönlü bir fayda sağlanır. Temel amaç, akuakültürde kullanılan suyun kirlilik yükünü azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmaktır. Balık yetiştiriciliğinden elde edilen su, bitkiler için zengin besleyici elementler içerir. Bu su, bitkilere yönlendirildiğinde, bitkiler bu besleyici elementlerden faydalanarak büyürken aynı zamanda suyu filtreleyerek arıtma görevini üstlenir. Arıtılan su, kirlilik yükü azalmış olarak yeniden balık yetiştiriciliği sistemine döner. Bu süreç, suyun borular aracılığıyla bitkilerin yetiştirildiği tanklara taşınması veya bitkilerin yerleştirildiği delikli borularla sağlanır [35].

Akuaponik sistemler, azot döngüsü üzerine kurulu dengeli bir sistem oluşturur. Balıklar, besinlerini tükettikten sonra atık olarak amonyak üretir. Amonyak, balıklar için toksiktir ancak nitrosomonas bakterileri tarafından nitrite ve nitrospira bakterileri tarafından nitrate dönüştürülerek bitkiler için kullanılabilir hale gelir. Bitkiler, büyümek için ihtiyaç duydukları azotu bu nitritten sağlar. Bu şekilde arıtılmış su, balıklar için uygun hale geldiğinde tekrar balık tanklarına geri döner. Ayrıca göl, gölet veya benzer su birikintilerinde de uygulanabilir [36].

Akuaponik sistemlerin en büyük avantajlarından biri, balık yetiştiriciliğinde atıkların doğal ortama karışmasını önlemek veya azaltmaktır [37]. Ayrıca bu sistemlerde, bitkilerin besin ihtiyacı için özel çözeltiler gerektirmemesi bir diğer avantajdır. Ancak, kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve sürekli gözlem ve kontrol gerektirmesi, sistemin dezavantajları arasında sayılabilir [37]. Akuaponik sistemlerde günlük

kontroller önemlidir; balıkların beslenmesi, su parametrelerinin izlenmesi ve filtre sistemlerinin temizliği düzenli olarak yapılmalıdır. Su kalitesinin optimize edilmesi, sistemin verimliliği açısından kritik bir faktördür. Su kalitesini belirleyen parametreler arasında çözülmüş oksijen, karbondioksit, amonyak, nitrit, nitrat, pH ve klor yer alır. Ayrıca, balık türü, büyüme hızı ve çevresel etmenler su kalitesini etkileyebilir [36].

2.2.3. Hidroponik sistemler

Hidroponik sistemler, topraksız tarımda kullanılan ilk yöntemler arasında yer almaktadır. Latince kökenli “hydro” (su) ve “ponos” (çalışma) terimlerinden türetilmiş olan bu yöntem, bitkilerin besin çözeltisi içinde, desteksiz bir şekilde yetiştirilmesini ifade eder. Aynı zamanda, katı bir ortamda bitki yetiştirme teknikleri de bu sistemin bir parçası olarak kabul edilir [35]. Hidroponik sistemler, yapıları gereği sıvı (agregat olmayan) ve agregat şeklinde iki ana kategoriye ayrılır.

Sıvı (Agregat Olmayan) Hidroponik Sistemlerde, bitki köklerini destekleyen katı bir ortam bulunmaz. Bitkiler, kökleri boyunca ince bir besin çözeltisi filmine yerleştirilir. Ticari kullanımı oldukça yaygın olan Nutrient Film Technique (NFT) bu sistemin önemli bir örneğidir. Bu yöntemde bitki kökleri, birkaç milimetre derinliğinde dolaşan bir besin çözeltisinin içinde bulunur.

Agregat Hidroponik Sistemlerde bitkiler, torba, saksı veya kaplar içine yerleştirilen organik ya da inorganik maddelerden oluşan bir ortamda yetiştirilir. Seçilen materyallerin esnek, su ve hava tutma kapasitesinin yüksek, drenajının ise kolay olması gerekir. Ayrıca toksin içermemesi, hastalıklardan arındırılmış olması önemli kriterlerdir [35]. Ortam kültüründe torf, çeltik kavuzu, talaş gibi organik; kum, perlit, vermikülit gibi inorganik maddeler kullanılabilir. Besin çözeltisi, damlama veya yağmurlama sulama sistemiyle düzenli olarak verilir ve bitkiler bu çözülden ihtiyaç duydukları besinleri alır.

Bu sistemlerde sıklıkla kullanılan bitkiler arasında marul, nane, ıspanak, salatalık ve domates gibi türler yer alır. Hidroponik tarım, konvansiyonel tarımın mümkün olmadığı bölgelerde bile etkin bir çözüm sunar. Toprak yorgunluğu, tuzluluk ve

toprakta biriken hastalıklar gibi sorunlar, bu sistemde ortadan kalkar. Ayrıca gübre ve su kullanımında önemli tasarruf sağlanır, bitkilerin büyümesi hızlanır ve mahsul verimliliği artar [38].

Hidroponik sistemlerin avantajları,

- Konvansiyonel tarımın yapamadığı yerlerde uygulanabilir.
- Toprak yorgunluğu, tuzluluk ve zararlıların kontrolünde etkili bir yöntemdir.
- Gübre ve su kullanımında önemli tasarruf sağlar.
- Bitkilerde hızlı büyüme ve daha yüksek verim elde edilir.

Dezavantajları:

Kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve teknik bilgi gerektirmesi, bu sistemin yaygınlaşmasını engelleyebilir. Ayrıca, sistemin sürekli izlenmesi ve doğru materyallerin seçilmesi büyük önem taşır. Sulama aralıkları iyi ayarlanmalı ve pH, EC gibi parametreler sürekli kontrol edilmelidir [38]. Hidroponik sistemlerde kullanılan besin çözeltileri %100 suda çözünebilir olmalı ve klor içermemelidir.

Sonuç olarak, hidroponik sistemler, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu ya da arazi yapısının tarıma uygun olmadığı yerlerde sürdürülebilir tarımın geleceği açısından büyük bir potansiyel taşır. Hızlı büyüme, daha yüksek verim ve çevresel faktörlerden bağımsız üretim imkânı sunan bu sistemler, küresel ölçekte giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle konvansiyonel tarımın getirdiği ürün kayıplarını, su ve atık sorunlarını azaltmada etkili bir çözüm olarak kabul edilmektedir.

2.3. İnce Film Fotosensörler ve Fotodiyotlar

Optik sinyalleri elektrik sinyallerine çeviren fotodedektörler, günümüz teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Fotodedektörler özellikle gece görüşlü görüntüleme, biyomedikal termal görüntüleme, çevresel izleme, savunma dahil olmak üzere yüksek hassasiyetli, ultra hızlı ve geniş bantlı fotodedektörlere artan ihtiyaç nedeniyle ince film yarıiletken aygıt teknolojisi konusunda en çok araştırılan konulardan biridir [39]. Görünür ve yakın kızılötesi (NIR) dalga boylarında çalışan fotodedektörler, artan yapay zekâ talepleri nedeniyle yoğun ilgi görmektedir [40]. Ayrıca optik bilgi aktarımı

konusunda yeni teknolojilerden biri olan ışıkla veri bilgi transferi (Li-Fi) teknolojisinde de fotodedektörlerin ışık kaynağındaki anahtarlama frekansına uygun çalışabilmesi ile zaman içerisinde günümüzden çok daha hızlı veri aktarımı yapılabilmesi hedeflenmektedir [41-44]. Literatürde farklı yöntemler kullanılarak üretilen yarıiletken malzemelerin kullanılması ile üretilen veya aygıt mimarisinde değişiklikler yapılarak elde edilen fotodedektör araştırmaları mevcuttur [45-51]. Bu çalışmalar incelendiği zaman, fotodedektörlerin, fotovoltaik aygıtlar ile aynı modda çalıştıkları görülmektedir [52]. Bu sebeple fotovoltaik uygulamalarda kullanılan iletken ve yarıiletken malzemelerden oluşan fotodedektörler üretmek mümkündür. $CuInSe_2$ (CIS) üçlü bileşiğine Ga eklenerek oluşturulan $Cu(In_xGa_{1-x})Se_2$ (CIGS) yapısı çevre dostu bir malzemedir [53-55]. Yapılan çalışmalarda CIGS yapısının CIS üçlü bileşiğinden yüksek sıcaklık ile ilgili çalışmalarda daha stabil sonuçlar verdiği rapor edilmiştir [56]. Cam, silikon, çelik ve esnek alttaş türleri üzerine uygulanabilir olması ve yasak bant aralığının değiştirilebilir olması gibi sebeplerle en çok araştırılan ve geliştirilmeye açık yarı iletken malzemelerden olan CIGS, aynı zamanda yüksek verime sahip (laboratuvar ortamında %23.35) güneş hücresi uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır [57]. CIGS yapısı 10^5 cm^{-1} ile büyük optik soğurma katsayısına ve direk yasak bant aralığına sahiptir. İçeriğindeki $Ga/(Ga+In)$ oranının değiştirilmesi ile yasak bant aralığı 1.02 ile 1.68 eV değerleri arasında değiştirilebilmektedir [58]. Böylece elektro manyetik spektrumdan farklı dalga boyuna sahip ışıkları soğurma özelliği kazanmaktadır. Bu üstün özellikleri CIGS'i optoelektronik uygulamalar için en uygun yarıiletken malzemelerden biri haline getirmekte ve güneş hücresi çalışmaları dışındaki fotodedektör uygulamaları için de araştırmaya açık malzemelerden biri olmasını sağlamaktadır [52].

2.3.1. Fotosensör üretiminde kullanılan katman malzemeler (Mo, Yb, CIGS)

Molibden (Mo) metali, yüksek erime noktasına sahiptir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı, yüksek sıcaklık iletkenliği ve yüksek elektriksel iletkenliği ile dikkat çeken özelliklere sahip bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde molibden, levha, şerit veya ince film formunda üretilebilmektedir ve teknolojik uygulamalarda kullanım alanına sahiptir [59].

Molibden, foto aygıt uygulamalarda özellikle güneş hücresi çalışmalarında arka kontak malzemesi olarak tercih edilmektedir [60]. Literatürde, Mo dışında farklı iletken arka kontaklar kullanılarak üretilmiş güneş hücresi çalışmaları da bulunmaktadır. Ancak, CIS ve CIGS aktif katmanları büyütülürken uygulanan yüksek sıcaklıklara karşı yüksek kararlılığı, Cu ve In ile bağ yapmaya karşı direnci ve aktif katmana karşı düşük temas direnci nedeniyle Mo, diğer malzemelere kıyasla daha yaygın olarak tercih edilmektedir [61]. Mo, farklı ince film üretim teknikleri ile çeşitli altlıklar üzerine kaplanabilmekte olup, en yaygın kullanılan biriktirme yöntemleri RF ve DC ile saçtırma yöntemleridir [62].

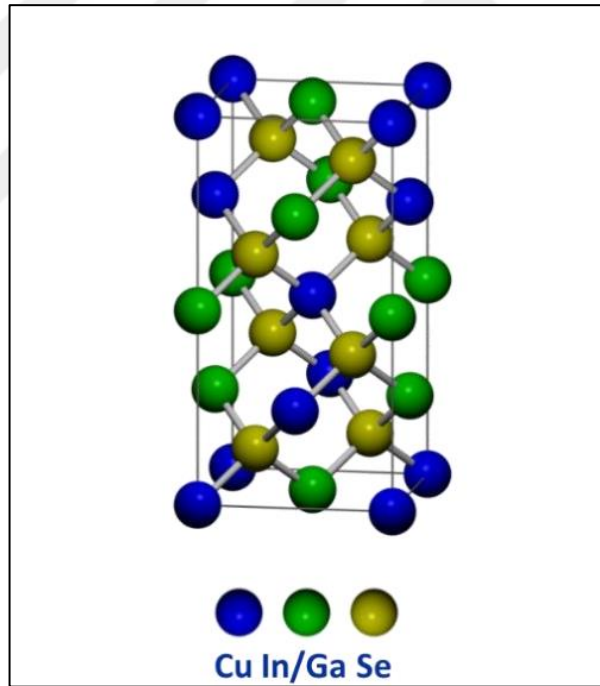
Mo ince film üretiminde, Mo malzemesinin altlık olarak kullanılan yüzeye iyi şekilde tutunması gerekir. Mo arka kontakın yüzeye homojen şekilde tutunmadığı durumlarda yüzeyden ayrıldığı ve çeşitli yapı kusurlarına neden olduğu bilinmektedir [63]. Bu durum, üretilen aygıtın kısa devre yapmasına ve gerilim oluşturamamasına sebep olmaktadır. Mo'nun altlık yüzeyine tutunmasını artırmak amacıyla yapılan çalışmalarda, Mo ince filmlerin yüzeye tutunma (adhezyon) özelliği artırtıkça elektriksel iletkenliklerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu da aygıt performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için CIGS çalışmalarında Mo arka kontakının çift katman (bi-layer) şeklinde büyütüldüğü yeni üretim stratejileri geliştirilmiştir. İlk Mo katmanı, yüzeye tutunmanın yüksek olması için, ikinci katman ise elektriksel iletkenliğin yüksek olması için farklı üretim parametrelerinde kaplanmaktadır. Böylece hem yüzey tutunması hem de elektriksel iletkenliği yüksek Mo arka kontaklar elde edilmektedir [64].

Yb, lantanit ve nadir toprak metali olarak sınıflandırılır. 2.60 eV'luk iş fonksiyonuna sahip olması sebebiyle özellikle aktif katman olarak p tipi yarı iletken malzemelerin kullanıldığı Schottky fotodedektör üretimlerinde doğrultucu kontak olarak kullanılması için oldukça uygundur.

CIGS dörtlü birleşimi, yasak bant aralığının değiştirilebilmesi, farklı özellikte altlıklar üzerine kaplanabiliyor olması ve yüksek ışık hassasiyeti sebebiyle dolayı foto aygıt çalışmalarında çokça araştırılan ve geliştirilmeye yariletken malzemelerdendir [39]. CIS yapısına Ga eklenerek CIGS malzemesi oluşturulabildiği gibi CIGS yapısında Ga-

In yerine çinko (Zn) ve tellür (Te) kullanılarak CuZnTeS_2 (CZTS) gibi farklı yarı iletken malzemeler de üretilebilmektedir [65]. Bakır, çinko, kalay, selenyumun bir araya getirilmesiyle $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ gibi farklı yarıiletken malzemelerle de çalışılabilmektedir [66]. CIGS için Ga/Ga+In oranında değişikliklerle değiştirilebilen yasak bant aralığı değiştirilebilir. Böylece üretilen foto aygıtın çalışabileceği dalga boyu ayarlanabilmektedir. Yapı içerisinde atomik oranlar en basit şekilde Cu:1, In+Ga:1 ve Se:2 olacak şekilde üretilir[67]. Bu farklı bileşik kompozisyonları ile farklı yasak bant aralığı elde edilebilmektedir. Direk yasak bant aralığına sahip olması sebebiyle CIGS malzemesi foto aygıt çalışmaları için oldukça uygundur.

CIGS malzemesi tetragonal kalkopirit kristal yapısındadır [68]. CIGS malzemesinin kristal yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Tek kristal olarak üretiminin pahalı olması sebebiyle ince film formunda üretilerek çalışmalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. CIGS bileşeninin kristal yapısı [58]

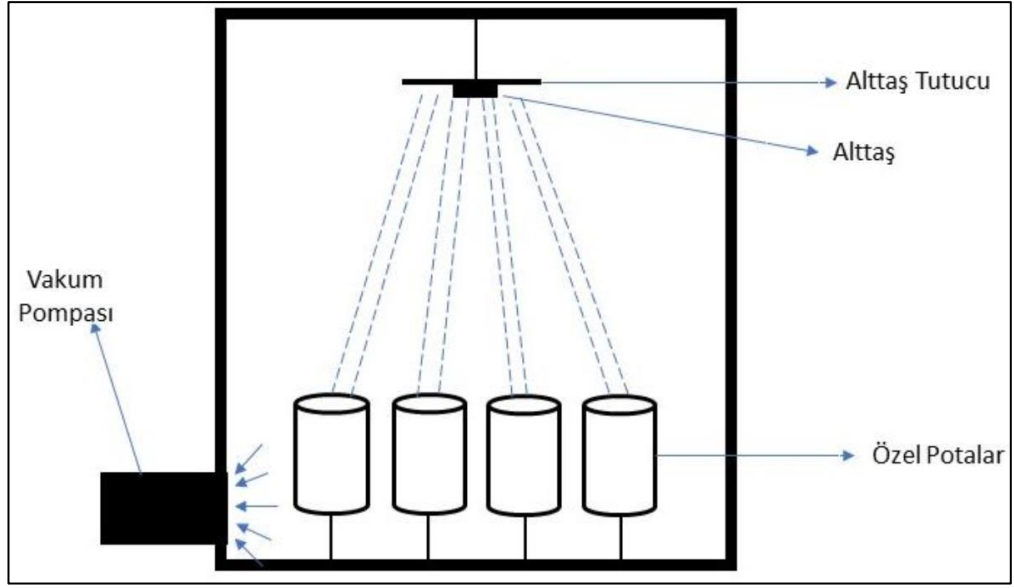
2.4. İnce Film Üretim Teknikleri

2.4.1. Fiziksel buhar biriktirme

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), vakum altında ince film üretmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, kaplanmak istenilen malzeme buharlaştırılır. Böylece kaplanmak istenen yüzeyde ince bir film tabakası oluşturulur. PVD sistemleri, kaplama sırasında kullanılan fiziksel olaylara göre sınıflandırılır. Örneğin, termal buharlaştırma yönteminde hedef malzeme ısıtılarak buharlaştırılır ve buharlaşan atomlar kaplanacak yüzeyde birikir. Buharlaştırma işlemi için farklı yöntemler mevcuttur; bunlar arasında indüksiyon ocağı, ark, elektron demeti ve lazerle buharlaştırma gibi teknikler bulunur [69]. Her ne kadar bu yöntemler malzemeyi buharlaştırma teknikleri açısından farklılık gösterse de hepsinin ortak amacı malzemeyi buharlaştırarak yüzeyde biriktirmektir.

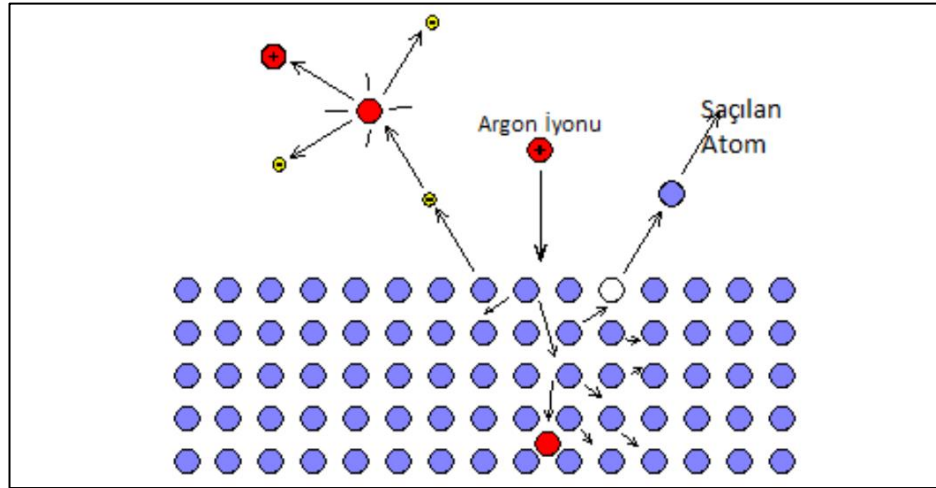
Termal buharlaştırma sisteminin örnek şeması Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Termal buharlaştırmada malzemenin koyulduğu kap ve malzemenin kendisi ısıtılarak malzeme buharlaştırılır. İndüksiyon ocağı ile buharlaştırma sisteminde malzemenin bulunduğu kap direnci yüksek teller ile sarılır. Tellerin üzerinden akım geçirildiğinde teller ısınır. Böylece kap ısıtılmış olur.

Malzemelerin bulunduğu kaplar yeterli sıcaklık derecesine ulaştığında malzeme buharlaşmaya başlar ve buharlaşan malzeme atomları halinde kaplanmak istenen altlık üzerinde katman oluşturur.



Şekil 2.2. Termal buharlaştırma sistemi örnek şeması [58]

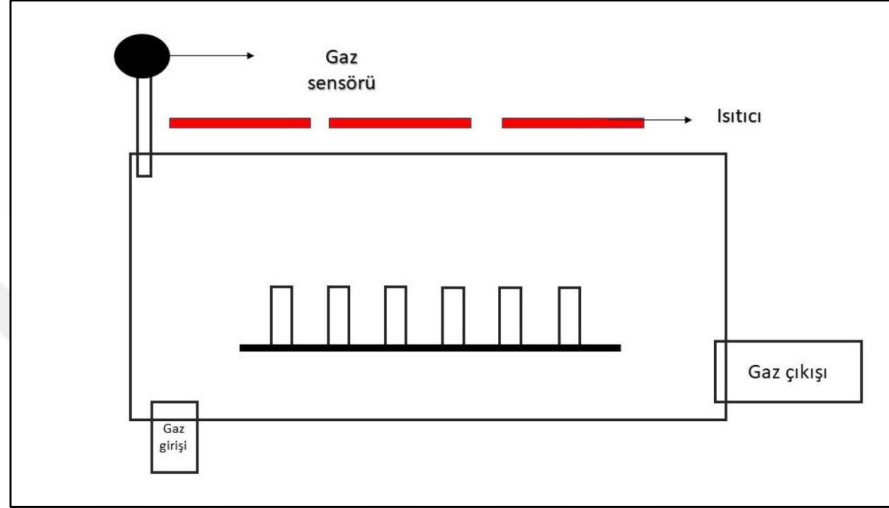
Saçtırma tekniğinde, kaplanmak istenen malzeme üzerine iyonize olmuş gazlar yönlendirilir. Böylece malzemenin yüzeyine çarpan iyonlar malzemedan atom koparır. Kopan atomlar altlık üzerinde katmanlar halinde birikir. Saçtırmada genellikle argon gazı kullanılır. Argon gazı seçilmesinin sebebi malzeme ile etkileşime girmemesi yani argon gazının soy gaz olmasıdır. Şekil 2.3'te saçtırma sisteminin örnek çalışma şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Saçtırma sistemi örnek şeması [58]

2.4.2. Kimyasal buhar biriktirme

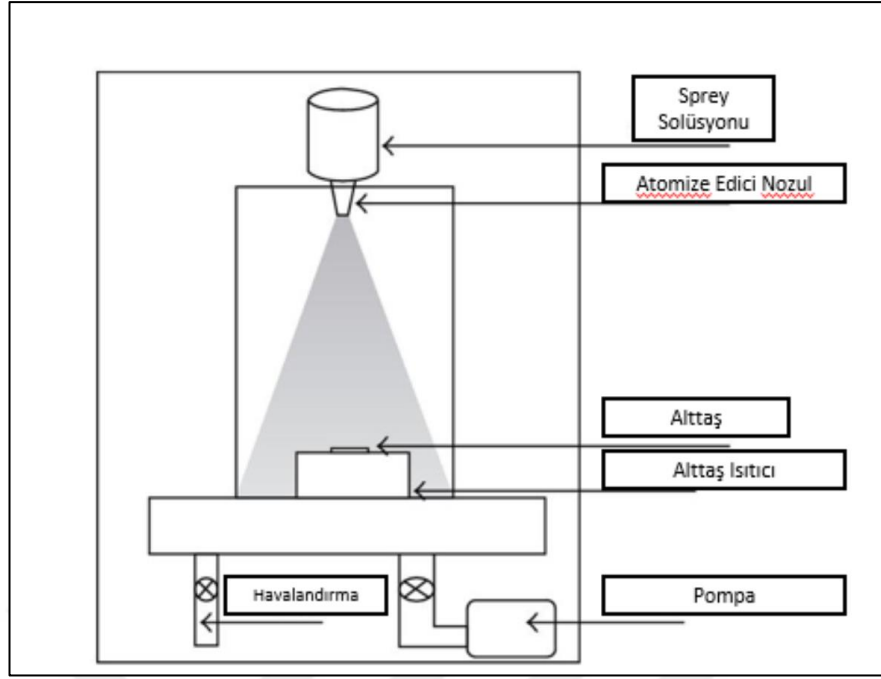
Kimyasal buhar biriktirme (CVD) teknolojisi kullanılan bir diğer ince film kaplama yöntemidir. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi, bir hazne içerisine kimyasal gazlar salınır ve kaplanmak istenen altlık üzerinde meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucu bir ince film oluşur. CVD yöntemi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Kimyasal buhar biriktirme örnek şeması [58]

2.4.3. Fizikokimyasal yöntem (ultrasonik sprey piroliz yöntemi)

Şekil 2.5'te gösterilen sprey piroliz (USP) yönteminde hazırlanan solüsyonun ince bir boru hattı içerisinden nozul ucuna taşınır. Nozul kHz mertebesinde ultrasonik titreşim oluşturur [70]. Böylece solüsyon nozulun ucundan altlık yüzeyine gönderilmeden önce solüsyon içindeki yapı daha küçük parçacıklar haline gelir. Bu parçacıklar altlık yüzeyine düştüklerinde altlık ısıtıcı araçlığı ile ısıtılmış olan yüzey üzerinde solüsyonun çözgeni buharlaştırılır. Çözücünün buharlaşması neticesinde yüzeyde sadece kaplanmak istenen malzeme kalmaktadır. Bu şekilde katman film tabakası altlık üzerinde biriktirilir.



Şekil 2. 5. Ultrasonik sprej piroliz sistemi örnek şeması [58]

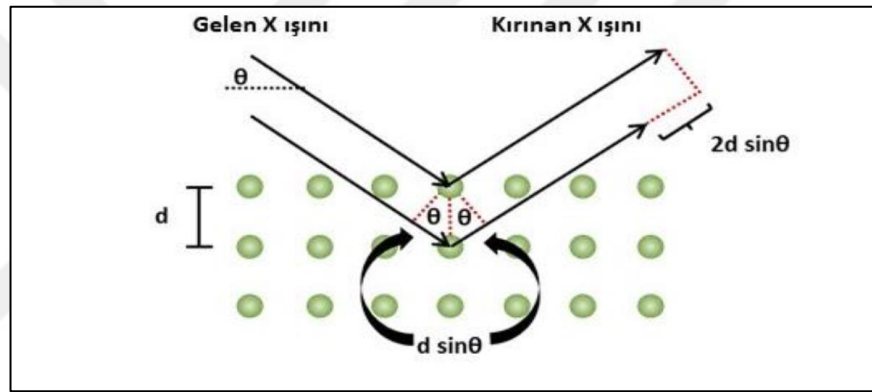
2.5. İnce Film Karakterizasyon Teknikleri

Üretilen bir ince film malzeme veya aygıtın başarılı şekilde üretilip üretilmediğini anlamak için uygulanan yöntemlere ince film karakterizasyon teknikleri denir. Üretilen her malzeme veya aygıt kullanımdan önce karakterize edilmek zorundadır. Materyalin öğrenmek istediğimiz özelliklerine ve materyalin kendi fiziksel özelliklerine göre kullanılacak karakterizasyon yöntemi değişir. Malzemelerin ve aygıtların farklı özelliklerini öğrenebilmek için farklı karakterizasyon sistemleri kullanılmaktadır.

2.5.1. X-Işını kırınımı (XRD)

X-ışını kırınım tekniği, Bragg Kanunu ve X-ışınları üzerine temellendirilen bir karakterizasyon yöntemidir. X-ışınları, dalga boyları nedeniyle maddeler içerisindeki atomik düzenle etkileşime girerek kırınım ve girişim yapar [71]. X-ışını difraksiyonu (XRD), kristallerin atomik ve moleküler yapısını anlamaya yönelik bir tekniktir ve kristallere özgü kırınım ve girişim olayına dayanır. X-ışınlarının kırınım açıları ve genlikleri incelenerek, kristal içerisindeki elektron yoğunluklarının üç boyutlu bir

görüntüsü elde edilebilir. Ancak, kristal boyutu çok küçükse veya içyapı yeterince düzenli değilse görüntünün çözünürlüğü düşebilir. Tuzlar, metaller, mineraller ve yarı iletkenler gibi çeşitli inorganik maddelerin yanı sıra, organik ve biyolojik moleküller de kristal yapılar oluşturabilir. Bu nedenle X-ışını kristalografisi, birçok bilimsel alanda önemli bir temel oluşturmuştur. Bu yöntemle vitaminler, proteinler, ilaçlar ve DNA gibi nükleik asitler de dahil olmak üzere pek çok biyolojik molekülün yapısı belirlenmiştir. XRD, günümüzde de yeni malzemelerin atomik yapısını incelemek için kullanılan en önemli tekniklerden biri olmaya devam etmektedir. Bu yöntemin öne çıkan avantajlarından biri, spektrumlarının basit olması ve spektral hattın engellenmemesidir. Ayrıca, X-ışını yöntemlerinde genellikle örnek bozulmadan korunur. Şekil 2.6'da X-ışını kırınım yönteminin şeması sunulmuştur.



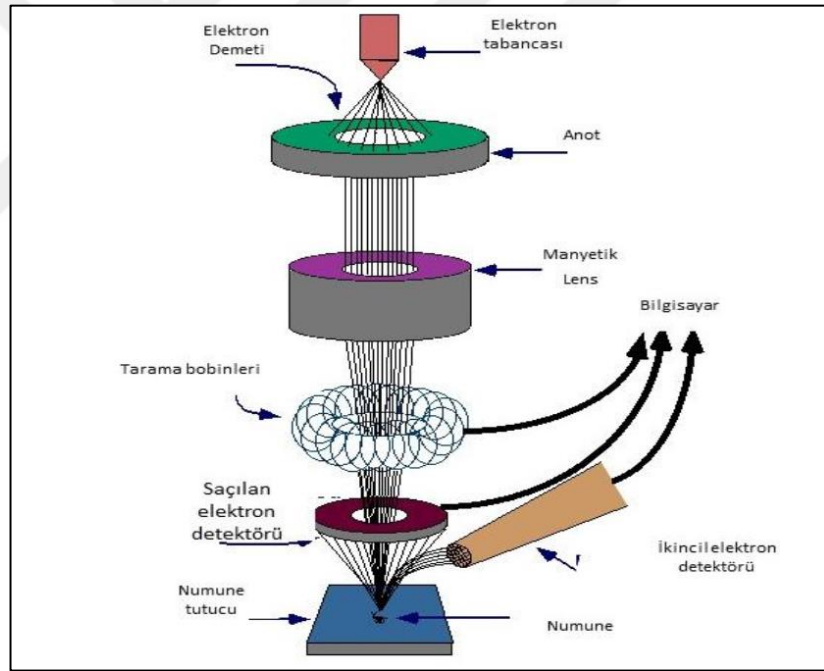
Şekil 2.6. XRD sistemi çalışma prensibi [58]

2.5.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), 1930'lu yıllarda Manfred von Ardenne tarafından geliştirilmiştir. SEM, neredeyse her türlü numune üzerinde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek ve belirli bölgelerden elementel bilgi sağlamak amacıyla kullanılan bir tekniktir. SEM ölçümleri genellikle yüksek vakum ve kuru bir ortam gerektirir [72]. Temel prensip, yüksek enerjili elektronların küçük bir alana odaklanarak yüzeyin taranması esasına dayanır.

SEM'in çalışma prensibi, tungsten veya alan emisyonlu (FEG) elektron tabancasından yayılan elektronların incelenen malzeme yüzeyine yönlendirilmesi ve bu süreçte gerçekleşen etkileşimlerden yararlanılmasına dayanır. SEM cihazlarında elektronların enerjisi belirli aralıklarda ayarlanabilir. Bu amaçla, yoğunlaştırıcı elektromanyetik merceklerle toplanan ve objektif mercek ile odaklanan elektron demeti, elektromanyetik saptırıcı bobinler aracılığıyla örnek yüzeyinde tarama işlemini gerçekleştirir.

Görüntü oluşumu, elektron demetinin incelenen yüzeyle fiziksel etkileşimleri sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve analiz edilmesi prensibine dayanır. Taramalı elektron mikroskobu sisteminin çalışma şeması Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. SEM çalışma prensibi [58]

SEM, yüksek çözünürlük, büyük derinlik alanı ve geniş bir görüntü büyütme aralığı gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, bazı dezavantajlar da barındırır. Bu dezavantajlar arasında cihazın ve bakımının yüksek maliyetli olması, ölçümlerin vakum ortamında gerçekleştirilme zorunluluğu ve genel olarak incelenecek numunenin iletken olması gerekliliği yer alır. Ancak, iletken olmayan numunelerin

incelenmesi sorunu, Çevresel Taramalı Elektron Mikroskobu (ESEM) teknolojisi ile aşılmıştır. ESEM teknolojisinde hazneye su buharı gönderilir ve bu buhar, malzemenin yüzeyine çökelerek numunenin SEM görüntüsü elde edilmesine yetecek düzeyde iletkenlik sağlar. Bu yöntemde, en kritik husus, hazne içindeki su buharının elektronların geçtiği kolon içerisine kaçmasını önlemektir.

2.5.3. Elektriksel Karakterizasyon

Üretilen bir ince film aygıtın elektriksel karakterizasyonu ise akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri alınarak yapılır. Elde edilen I-V ve C-V grafikleri aygıtın çalışma yeteneği ve ışığı algılama kapasitesi hakkında bilgi verebilir. Burada aygıtın alt ve üst kontaklarına pozitif ve negatif proplar temas ettirilir ve karanlık ortamda aygıt üzerine bir gerilim uygulanır. Bu işlem aygıt diyot ise diyot karakteristiği hakkında bilgi verir. Fotodedektör veya fotodiyot özelliği için ise karanlık ölçümün yanında ışık altında da aynı işlem yapılır. İki grafik arasındaki fark bize aygıtın çalışma durumu hakkında bilgi verir. Akım ve kapasitans değerleri zaman bağılı olarak alınır ise üretilen fotodedektörün tepki süresi ve çalışma hızı gibi özellikleri hakkında bilgi edinilir. Bu değerler özellikle sensör, detektör gibi uygulamalar için büyük önem arz etmektedir.

2.6. Endüktif Eşleştirilmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometrisi (ICP-OES)

Bir sıvı içerisindeki var olan elementlerin oran tayini kimyasal karakterizasyon teknikleri içerisinde önemli bir yere sahiptir [73]. Element konsantrasyonlarını belirlemek için kullanılan geleneksel yöntemler arasında kolorimetrik, gravimetrik, hacimsel ve spektroskopik yöntemler sayılabilir. Bunlar içinde indüktif olarak eşlenmiş plazma-kütle spektrometrisi (ICP-MS) ve indüktif olarak eşlenmiş plazma-optik emisyon spektroskopisi (ICP-OES) gibi indüktif olarak eşlenmiş plazma (ICP) yöntemleri, olağanüstü doğrulukları, hassasiyetleri ve düşük tespit limitleriyle bilinir.

ICP-OES birden fazla elementi aynı anda belirleme kabiliyeti nedeniyle element analizi için tercih edilen yöntem olarak ortaya çıkmıştır [74]. Bu teknik, karakteristik elektromanyetik radyasyon yayan uyarılmış atomlar ve iyonlar üretmek için indüktif

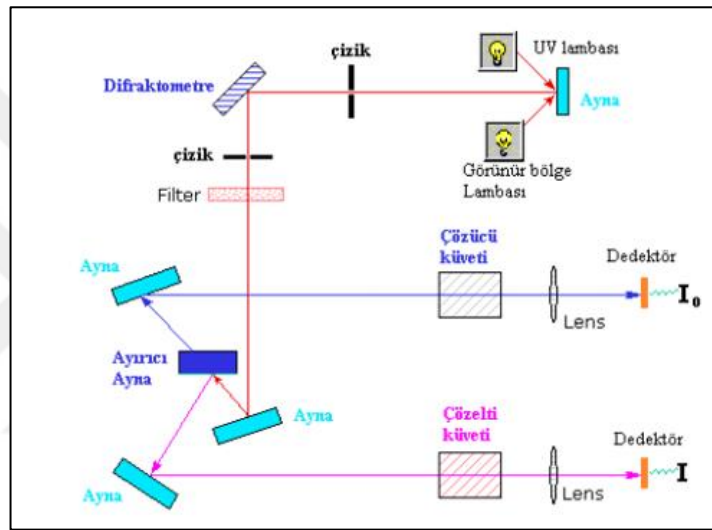
olarak eşlenmiş plazmayı kullanır. Herhangi bir ICP cihazının temel bileşeni olan plazma, düşük basınçlarda ve yüksek sıcaklıklarda serbest elektronlar ve katyonlar içeren iyonize bir gazdır. Çoğunlukla bir radyo frekansı (RF) jeneratörü tarafından çalıştırılır. İndüksiyon plazması veya "endüktif olarak eşleşmiş plazma", belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında akan bir gazın plazma kaynağı olarak kullanılması anlamına gelir.

İndüksiyon plazmasının spektral uyarılma özellikleri, spektroskopistler ve analitik kimyagerler arasında önemli ilgi görmüş ve numune analizinde kullanılmasına yol açmıştır. ICP-OES'nin faydaları, onu hem akademik hem de endüstriyel laboratuvarlarda çeşitli uygulamalar için yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır.

1950'leri takiben, indüksiyon meşaleleri ve diğer endüktif olarak eşleştirilmiş plazma formları dahil olmak üzere plazma uyarım kaynaklarının geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu teknolojik atılımlar, ICP-OES'nin eser metal analizi için pratik bir yöntem olarak kurulmasında önemli bir rol oynamıştır. Daha gelişmiş meşale tasarımlarının kullanılması, ICP-OES'nin daha düşük tespit limitlerine, azaltılmış girişimlere ve genişletilmiş doğrusal çalışma aralıklarına ulaşmasını sağlamıştır. Bu gelişmeler, ICP-OES'nin önceki emisyon kaynaklarına göre üstünlüğünü gösterdi. ICP tabanlı metodolojilerdeki son gelişmeler ağırlıklı olarak ICP-MS'ye odaklanmış olsa da numune tanıtımı ve plazma üretimiyle ilgili temel prensiplerin çoğunun, aynı teknikler olmasa da, ICP-OES ile dikkate değer benzerlikler gösterdiğini belirtmek gerekir. Hem ICP-MS hem de ICP-OES, numune girişi ve plazma üretimi için benzer ilkelere dayanır. Numuneyi plazmaya iletmenin önemli yönleri, örneğin nebülizatörler ve sprej odaları, iki teknik arasında tutarlı kalır. Ek olarak, radyo frekansı indüksiyonu ile elde edilen plazmanın kendisinin üretimi ve stabilizasyonu paylaşılan bileşenlerdir.

ICP metodolojilerindeki son gelişmeler, üstün hassasiyeti ve kütle tabanlı algılama yetenekleri nedeniyle ağırlıklı olarak ICP-MS'yi desteklemiş olsa da örnek tanıtımı ve plazma üretiminde yer alan temel prensiplerin ve tekniklerin ICP-MS ile ICP-OES arasında önemli benzerlikler gösterdiğini kabul etmek önemlidir.

Bir ICP içinde, her element belirli elementlere atfedilebilen farklı dalga boylarına sahip fotonlar yayar. Yayılan ışığın yoğunluğu doğrudan elementin konsantrasyonu ile ilişkilidir. Temel durumunda, bir elektron mevcut en düşük enerjili yörüngeyi işgal eder. Ancak, genellikle bir plazma gibi bir uyarma kaynağından yeterli enerji sağlandığında, bir elektron, uyarılmış durum olarak adlandırılan daha yüksek bir enerji seviyesine geçiş yapabilir. Daha sonra, elektron daha yüksek enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine döndüğünde, iki seviye arasındaki enerji farkına karşılık gelen bir dalga boyuna sahip fotonlar yayar. ICP-OES sisteminin tipik çalışma şeması Şekil 2.8’de gösterilmiştir [75].



Şekil 2.8. ICP-OES sistemi çalışma prensibi

2.7. Sıvılarda Elektriksel İletkenlik (EC) Ölçümü

Elektriksel iletkenlik (σ), bir maddenin elektrik akımını iletebilme yeteneğini ifade eder. Metallerde bu iletkenlik, serbest elektronlar tarafından sağlanırken, sıvılarda ise bu görev iyonlar tarafından yerine getirilir. Bir sıvı içerisinde çözünen iyonların miktarı arttıkça, genel olarak sıvının iletkenliği de artar. Ancak, bu durum çözeltinin sıcaklığına ve içerisindeki iyonların türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin, bazı çözeltilerde (NaOH, HCl gibi), belirli konsantrasyonlarda iletkenlik azalabilir. Sıvıların iletkenliği "Elektrolitik İletkenlik" olarak adlandırılır ve birimi S/m (Siemens/metre) şeklindedir. Ancak bu birim, özellikle sıvılar için oldukça büyük olduğundan, pratikte daha küçük birimler olan mS/cm veya μ S/cm kullanılır. İngilizce

konusulan ülkelerde, Siemens birimi yerine "mho" kullanılmaktadır. Bu terim, iletkenliğin direncin tersi olduğu gerçeğine dayanarak, ohm (Ω) biriminin tersten okunmuş halidir.

2.7.1. Konduktif iletkenlik

Konduktif iletkenlik, iki karşılıklı konumlandırılmış iletken plaka arasındaki çözeltinin, sabit bir gerilim altında geçen akım yardımıyla direncinin ve dolayısıyla iletkenliğinin ölçülmesi prensibine dayanır. Bu ölçüm, Ohm Kanunu ile formüle edilir. Ohm Kanunu şu şekilde ifade edilir (Denklem (3.1)). Bu denklemde, R (Ω) direnç değerini, V (V) uygulanan gerilimi ve I (A) akım değerini temsil eder. Bu ilişki yardımıyla, çözeltinin direnci ölçülerek iletkenliği hesaplanabilir [76]. Denklem (3.2)'de iletkenlik ölçümünün formülü verilmiştir.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{\partial}{R} \quad (3.2)$$

Bu formülde σ , iletkenliği temsil eder ve birimi $\mu\text{S/cm}$ 'dir. Ölçüm elektrotunun sabiti ∂ , karşılıklı konumlandırılmış iletken plakaların aralarındaki uzaklığın yüzey alanlarına oranıdır. Bu oran, iletkenlik problemleri için sabit bir değerdir ve ∂ değeri büyüdükçe ölçüm aralığı da genişler. ∂ değeri, ölçüm hassasiyetini doğrudan etkiler ve ölçüm aralığına göre ideal ∂ değerine sahip problemler kullanılmalıdır. ∂ 'nin birimi m^{-1} 'dir.

Konduktif iletkenlik ölçümünde, elektrotlara alternatif gerilim (AC) uygulanmalıdır; doğru gerilim (DC) kesinlikle kullanılmamalıdır. DC gerilimi uygulanırsa, çözelti içerisindeki pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) negatif gerilim uygulanan plakaya, negatif yüklü iyonlar (anyonlar) ise pozitif gerilim uygulanan plakaya toplanır. Bu duruma polarizasyon denir ve belli bir noktadan sonra akımı engelleyerek istenmeyen bir durum yaratır. Polarizasyon, çözelti içindeki iyonların yüklerinin sıfırlanıp kararlı moleküller haline gelmesine yol açar. Bu moleküller kristalleşip probun iletken plakalarına yapışarak cihazın bozulmasına neden olabilir veya gaz haline geçip

çözeltinin konsantrasyonunu değiştirebilir. En azından, suyun elektrolizi gerçekleşerek oksijen ve hidrojen moleküllerine ayrışmasına yol açar [77]. Konduktif iletkenlik problemleri yalnızca sıvının direnç değerini "ohm" cinsinden transmittere iletir.

Avantajları; Basit yapısı sayesinde nispeten düşük maliyetli olup, her türlü ortama uygulanabilen iletkenlik problemlerinin üretimini sağlar, çok düşük iletkenlik değerleri ölçülebilir, göreceli olarak ucuz transmitterlerle birlikte kullanılabilir.

Dezavantajları; probun kirlenmesi, ölçüm hassasiyetini olumsuz etkiler, çözelti ile doğrudan temas halinde olduğundan, agresif çözeltilerle çalışıldığında zamanla plakalarda korozyon oluşur ve θ değerinde sapma meydana gelebilir, yüksek iletkenlik değerlerinde ($>200 \mu\text{S}$) polarizasyon etkisi görülebilir, bu da ölçümün geçersiz olmasına yol açar, yüksek iletkenliklerde, prob ile transmitter arasındaki kablonun direnci ölçüm hatalarına neden olabilir, galvanik ayrışma meydana gelebilir.

2.7.2. İndüktif iletkenlik

İndüktif iletkenlik, indüktif prensibe dayalı olarak çalışan iletkenlik problemleriyle gerçekleştirilir ve bu prensip transformatörlerin çalışma prensibine benzer. Probonun içinde iki ayrı iletken tel sarımı bulunur: biri birincil, diğeri ikincil sarımdır. Birincil sarıma uygulanan alternatif gerilim, bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, çözelti içindeki iyonlara etki ederek bir akımın indüklenmesine yol açar. Bu akım ikincil sarım etrafında dolaşırken, ikinci sarım içinde de alternatif akım indüklenir. Bu akımın büyüklüğü, çözeltinin elektrolitik iletkenliğine bağlıdır ve bu akımın oluşturduğu alternatif gerilimin ölçülmesi ile iletkenlik hesaplanır.

Sarımlar, çözeltiyle doğrudan temas etmez çünkü manyetik alan plastik türevli polimerlerden geçebilir. İndüktif iletkenlik problemleri genellikle prob ve transmitter özellikli cihazlar olarak piyasada bulunur. Bu cihazların çıkışları, analog proses değeri (4-20 mA veya 0-10 V) ve röle kontak olarak yapılandırılmıştır. Bu çıkışlar, prosesin kontrolünü sağlar. İndüktif iletkenlik problemleri ayrıca yedek parça olarak pazarlanır ve özellikle CIP (Clean In Process) yöntemi kullanan işletmeler için uygundur. CIP süreçlerinde kullanılan temizlik kimyasallarının iletkenlikleri, konduktif iletkenlik

problarının sınırlarını aşabilir. Ancak indüktif problemler, 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'den düşük iletkenlik değerlerinin önemli olduğu deiyonize su üretim tesislerinde kullanıma uygun değildir.

Avantajları, çözeltiyle direkt temas olmadığı için agresif çözeltilerin iletkenliğini ölçmekte idealdir, konduktif metoda göre çok daha yüksek iletkenlik değerlerini (>200 mS) ölçülebilir, polarizasyon riski bulunmaz, prob yüzeyinde oluşan tortular ölçüm hatasına yol açmaz, galvanik ayrışma gerçekleşmez.

Dezavantajları, 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'den düşük iletkenlik değerlerini ölçemez, probun büyük boyutu nedeniyle montaj yeri uygun büyüklükte olmalıdır, konduktif ölçüme kıyasla kullanılan donanım daha pahalıdır.

2.7.3. Sıcaklığın iletkenliğe etkisi

Sıcaklığın iletkenlik üzerinde belirgin bir etkisi vardır çünkü sıcaklık değişimi maddelerin yoğunluk, viskozite ve iyon konsantrasyonu gibi fiziksel özelliklerini etkiler. Katıların aksine çözeltilerde iletkenlik genellikle sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar. Ölçülen iletkenlik değeri, uluslararası olarak kabul edilen referans sıcaklık olan 25 °C'deki iletkenlik değeri ile karşılaştırılarak bulunur [76]. Ancak her maddenin sıcaklıkla verdiği tepki farklıdır, bu nedenle bir düzeltme faktörüne ihtiyaç duyulur. Bu düzeltme faktörü "sıcaklık katsayısı" olarak adlandırılır.

İletkenlik ölçümü yapan transmitter/kontrolör cihazların sıcaklık kompanzasyonu yapabilme özelliğine sahip olması gerekir. Proba entegre bir sıcaklık sensörünün kullanılması, doğru ölçüm için en uygun yöntemdir, çünkü böylece sıcaklık ve iletkenlik değerleri aynı ölçüm noktasından alınır. Ayrıca cihazın, işletme şartlarına uygun aralıklarla kalibre edilmesi zorunludur. Yüksek iletkenlik değerlerine sahip endüstriyel ortamlarda küçük ölçüm sapmaları pek önemli olmayabilir. Ancak ilaç endüstrisinde kullanılan proses suyunda meydana gelebilecek iletkenlik sapmaları ciddi sorunlara yol açabilir. Çünkü proses suyunun özellikleri ürün kalitesini doğrudan etkiler.

İletkenlik probu ile transmitter/kontrolör arasında kullanılan kablonun özellikleri de ölçüm doğruluğu açısından önemlidir. İletkenlik ölçümü dolaylı olarak direnç ölçümüne dayandığı için, kablonun direnci hatalara neden olabilir. Bu nedenle, kablonun mümkün olduğunca kısa tutulması tavsiye edilir. Ayrıca, kablonun sıcaklık değişikliklerine karşı kararlı bir yapıya sahip olması, dış parazitlerden korunması için metal örgülü olması ve yüksek akım taşıyan diğer kablolarla yan yana yerleştirilmemesi idealdir.

2.8. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi

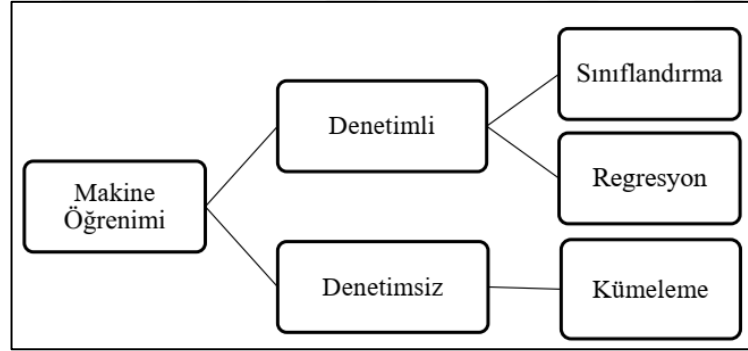
Yapay zekâ, insana özgü olan çözüm bulma, anlama, bir anlam çıkarma, genelleme ve geçmişteki verilerden yeni sonuçlar elde etme becerilerinin bir bilgisayarın ya da bilgisayar destekli bir makine tarafından yapılabilir hale gelmesi olarak tanımlanabilir [78]. Bunun dışında yapay zekânın sezgisel programlama temelinde olan bir yaklaşım ya da insanların yaptıklarını bilgisayarlara yaptırabilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır [79]. Yapay zekâ akıllı yazılımları hedefleyen bir bilimdir.

Eski verilerden öğrenme ve bunun sonucunda yeni verileri tahmin etme makine öğrenimi ile klasik algoritmalar arasındaki en temel farktır. Klasik algoritmalar, karmaşık bir sistemde en iyi cevabın nasıl bulunacağını ifade eder ve algoritma daha sonra bu en iyi çözümleri arar, genellikle bir insandan daha hızlı ve daha etkili çalışırlar. Makine öğrenimi ise, bir korelasyonlar yani ilişkiler oyunudur. Mevcut olan çoğu makine öğrenimi algoritması, veri setleri arasındaki ilişkileri bulmak veya bulunan bu ilişkilerden yararlanmakla ilgilendir.

Makine öğrenimi algoritmaları belirli korelasyonları tespit edebildiğinde, model bu ilişkileri gelecekteki gözlemleri tahmin etmek için kullanabilir veya ilginç kalıpları ortaya çıkarmak için verileri genelleştirebilir. Makine öğrenimi algoritmaları, verileri analiz edebildikleri ve veri setleri içerisindeki örüntüleri tanıyabildikleri kadarıyla makineleri kendi kendine öğrenebilir hale getirmeyi amaçlarlar. Daha az varsayım ve insan çabası gerektirse de güçlü bir tahmin yeteneğine sahiptirler.

2.8.1. Denetimli, denetimsiz öğrenme ve regresyon

Şekil 2.9’da makine öğrenimi sınıflandırılmıştır ve bu şekilde görüldüğü gibi makine öğrenimi yöntemleri genel olarak denetimli ve denetimsiz öğrenme olarak sınıflandırılır. Denetimli makine öğrenimi algoritması, bir girdi değişken kümesini ve değişkenlere bilinen cevapları alır, arkasından yeni değişkenlere cevap için gerçeğe yakın tahminler elde etmek amacıyla modeli eğitir. Denetimli makine öğrenimi modelleri genellikle tahmine dayalı analitik modeller olarak adlandırılır ve bu modeller, geçmişe dayalı olarak geleceği tahmin eder. Bilinen bir eğitim veri setini araştırarak, geçmiş verilere dayalı olarak çıktı değerleri hakkında bir fikir sahibi olmak için Makine ortalama bir işlev üretir. Yanıt bazen çıktı, etiket, hedef ve bağımlı değişken olarak adlandırılır. Müşteri kaybının azaltılması, müşteri yaşam boyu değerinin belirlenmesi, ürün önerilerinin kişiselleştirilmesi, insan kaynaklarının dağıtılması, satışların öngörülmesi, arz ve talebin tahmin edilmesi, dolandırıcılığın belirlenmesi ve ekipman bakımlarının öngörülmesi denetimli öğrenmenin uygulama alanlarıdır [80].



Şekil 2.9. Makine öğrenimi sınıflandırması [81]

Denetimsiz öğrenme, denetimli öğrenmeye göre daha karmaşık algoritmalara sahiptir. Denetimsiz öğrenmenin büyük bir avantajı, etiketlenmiş veri gerektirmemesidir. Bu nedenle denetimsiz öğrenme modellerinde uygun verilerin elde edilmesi daha kolaydır. Denetimli öğrenme etiketli verilerle çalışırken denetimsiz öğrenme etiketlenmemiş verilerle çalışır.

Kümeleme algoritması, verileri anlamlı, faydalı veya her ikisi birden olan gruplara (kümelere) böler. Hedef anlamlı gruplar oluşturmaksa, kümeler verilerin doğal

yapısını yakalamalıdır. Ancak bazı durumlarda, verilerin boyutunu küçültmek için veriyi özetleme yoluyla kümeleme yöntemi kullanılır. Kümeleme yöntemi uzun zamandan beri birçok sektörde uygulama alanına sahiptir. Psikoloji ve diğer sosyal bilimler, biyoloji, istatistik, örüntü tanıma, makine öğrenimi gibi alanlarda sıkça tercih edilen yaklaşımlardan biridir. Kümeleme analizi, veri nesnelere, yalnızca nesnelere ve bunların ilişkilerini tanımlayan verilerde bulunan bilgilere dayalı olarak gruplandırır. Amaç, bir küme içerisindeki nesnelere birbirine benzer (veya ilişkili) ve diğer gruplardaki nesnelere farklı (veya ilgisiz) olmasıdır. Bir küme içerisindeki homojenlik ne kadar büyükse ve kümeler arasındaki farklılık ne kadar fazlaysa, kümeleme o kadar iyi ve belirgindir.

Sınıflandırma, etiketlenmemiş veri örneklerine etiket atama görevidir ve böyle bir görevi gerçekleştirmek için bir sınıflandırıcı kullanılır. Bir sınıflandırıcı tipik olarak önceki bölümde gösterildiği gibi bir model açısından tanımlanır. Model, her bir örnek için sınıf etiketlerinin yanı sıra ceza değerleri içeren eğitim kümesi olarak bilinen belirli bir örnek kümesi kullanılarak oluşturulur. Bir eğitim seti verilen bir sınıflandırma modelini öğrenmeye yönelik sistematik yaklaşım, öğrenme algoritması olarak bilinir. Eğitim verilerinden bir sınıflandırma modeli oluşturmak için bir öğrenme algoritması kullanma süreci, tümevarım olarak bilinir. Bu süreç genellikle “bir model öğrenmek” veya “bir model oluşturmak” olarak da tanımlanır. Sınıf etiketlerini tahmin etmek için görünmeyen test örneklerine bir sınıflandırma modeli uygulama süreci, tümdengelim olarak bilinir. Bu nedenle, sınıflandırma süreci iki adımı içerir. Birincisi, modeli öğrenmek için eğitim verilerine bir öğrenme algoritması uygulamak ikincisi ise ardından etiketlenmemiş örneklere etiket atamak için modeli uygulamak.

Regresyon analizleri genellikle, uygulamalarının makine öğrenimi alanıyla büyük örtüşmelere sahip olması nedeniyle tahmin için kullanılır. Ayrıca, bazı durumlarda bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri belirlemek için regresyon analizleri kullanılabilir. Bunlardan daha önemlisi, tek başına regresyonlar yalnızca bağımlı bir değişken ile farklı değişkenlerden oluşan sabit bir veri kümesi koleksiyonu arasındaki ilişkileri gösterir. Regresyon modellerine göre, bağımsız değişkenler bağımlı değişkenleri öngörmektedir. Regresyon analizi, pratikte en sık

kullanılan istatistiksel yöntemlerden biridir. Regresyon analizi uygulamaları tıp, biyoloji, tarım, ekonomi, mühendislik, sosyoloji, jeoloji vb. dahil olmak üzere birçok bilimsel alanda bulunabilir [81]. Regresyon analizinin amaçları aşağıda listelenmiştir.

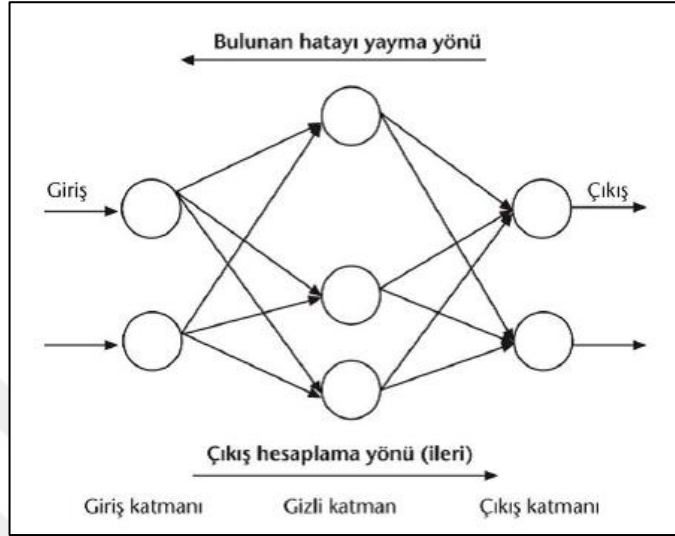
1. Hedef değişken y ile x_1, x_2, \dots, x_n arasında geçici bir ilişki kurmak,
2. x_1, x_2, \dots, x_n değerlerine dayalı olarak y 'yi tahmin etmek,
3. Nedensel ilişkinin daha verimli ve doğru bir şekilde belirlenebilmesi için y yanıt değişkenini açıklamak amacıyla hangi değişkenlerin diğerlerinden daha önemli olduğunu belirleyerek x_1, x_2, \dots, x_n değişkenlerini bulmaktır.

2.8.2. Yapay sinir ağları (YSA)

Yapay sinir ağları, veri işleme ve öğrenme yetenekleri sayesinde, modern yapay zekâ uygulamalarında güçlü bir araç olarak öne çıkar. Biyolojik sinir sistemlerinin işleyişine dayanan bu modeller, karmaşık problemlere yenilikçi çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir sistemlerinin işleyişinden ilham alınarak geliştirilmiş hesaplama modelleridir. Temelde, bilgi işleme ve öğrenme yeteneklerine sahip bir dizi yapay nörondan oluşurlar. Yapay sinir ağları, özellikle yapay zekâ ve makine öğrenmesi alanlarında önemli bir yere sahiptir ve çeşitli karmaşık problemlerin çözümünde kullanılır. Yapay sinir ağları, genellikle üç ana katmandan oluşur.

Giriş Katman, ağın aldığı ham verileri temsil eder. Her nöron, bir özellik veya veri boyutunu temsil eder. Gizli Katmanlar, giriş verilerini işleyen bir veya daha fazla katmandır. Gizli katmanlar, verilerin daha yüksek seviyeli özelliklerini öğrenir ve temsil eder. Her nöron, önceki katmandan gelen sinyalleri toplar, ağırlıklar ve beslemelerle işler ve bir aktivasyon fonksiyonu uygular. Çıkış Katmanı, ağın nihai çıktısını üreten katmandır. Bu katman, ağın eğitimi olduğu probleme göre sonuçları verir. Yapay sinir ağları, öğrenme süreçlerinde ağırlıklar ve beslemeler kullanarak verileri işler. Bu süreç, genellikle geri yayılım (back propagation) algoritması ile gerçekleştirilir. Eğitim sırasında, ağ, gerçek çıktılar ile tahmin edilen çıktılar arasındaki hatayı minimize etmeye çalışır. Bu hata, ağın ağırlıklarını ve beslemelerini ayarlamak için kullanılır. Yapay sinir ağları, çeşitli alanlarda uygulama bulur. YSA,

nesne tanıma ve görüntü sınıflandırma gibi görevlerde kullanılır. Metin analizi, dil modelleme ve çeviri gibi işlemleri gerçekleştirir. Finansal piyasa tahmini, sağlık verisi analizi ve müşteri davranışları gibi alanlarda tahmin ve sınıflama yapar [82]. Bir YSA nöron modeli şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2. 10. Örnek bir YSA nöron modeli [83]

YSA modellerinin etkin bir şekilde oluşturulması ve eğitilmesi, güçlü araç ve kütüphanelere ihtiyaç duyar. TensorFlow ve PyTorch kütüphaneleri akademik ve ticari çalışmalarda en sık kullanılan kütüphaneler olarak göze çarpmaktadır. Bu tez çalışmasında da TensorFlow ve PyTorch kütüphaneleri kullanılmıştır.

TensorFlow, Google tarafından geliştirilen açık kaynaklı bir makine öğrenimi kütüphanesi olup, özellikle derin öğrenme algoritmalarının uygulanması ve optimize edilmesi için geniş çapta kullanılmaktadır. TensorFlow'un esnek yapısı, büyük veri setlerinin işlenmesi ve çok katmanlı YSA eğitimi için ideal bir platform sunmaktadır. TensorFlow, grafik tabanlı hesaplama modeline dayanarak verilerin düğümler ve kenarlardan oluşan bir grafik üzerinde akışını sağlar. Bu yapı, büyük ölçekli verilerin paralel olarak işlenebilmesine ve farklı donanım platformlarında (CPU, GPU, TPU) çalıştırılabilmesine olanak tanır. TensorFlow'un çekirdeği, tensör adı verilen çok boyutlu veri dizilerini işleyebilmek üzere tasarlanmıştır. Bu tensörler, matris işlemlerine dayalı olarak derin öğrenme modellerinin eğitimini ve sonuçlarının hesaplanmasını sağlar. TensorFlow, diğer derin öğrenme kütüphaneleri ile

karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir ve farklı düzeyde kullanıcılar için uygundur. Yeni başlayanlar için kolay bir API sunarken, ileri düzey kullanıcılar için düşük seviye kodlama imkânı sağlar. Büyük modellerin ve veri setlerinin eğitimi dağıtık sistemlerde gerçekleştirilebilir. Bu, aynı anda birçok cihazda paralel eğitim imkânı sunarak büyük hız kazandırır. Mobil cihazlardan sunuculara kadar geniş bir platform yelpazesinde çalışabilir. TensorFlow Lite, mobil uygulamalarda model dağıtımını kolaylaştırırken, TensorFlow.js ise tarayıcı üzerinde çalışabilen yapılar sunar. TensorFlow'un geniş bir topluluk desteği vardır. Sürekli güncellenen literatür ve açık kaynak projeler, araştırmacılar ve geliştiriciler için kaynak sağlar [84].

İleri beslemeli yapay sinir ağları, sinyallerin yalnızca bir yönde, yani giriş katmanından çıkış katmanına doğru aktığı sinir ağlarıdır. Bu ağlar, verilerin işlenmesi sırasında geriye doğru bir bağlantı olmadığından, modelde zaman içinde hafıza tutma ya da geri bildirim yetisi bulunmaz.

Geri beslemeli yapay sinir ağları (RNN), sinyallerin hem ileri hem de geri yönde aktığı ağlardır. RNN'lerin en önemli özelliği, önceki adımlardan gelen bilgiyi hafızada tutabilmeleri ve bu bilgiyi kullanarak gelecekteki adımlarda tahminler yapabilmeleridir. Bu özelliği sayesinde RNN'ler özellikle sıralı verilerle (zaman serileri, metinler, ses verileri) çalışmak için idealdir. RNN'ler, ağın her bir adımında önceki zaman adımından gelen bilgiyi tekrar işler ve bir hafıza hücresinde saklar. Bu geri besleme mekanizması sayesinde RNN'ler zaman bağımlı bilgiyi öğrenebilir. Ancak, RNN'lerin eğitimi sırasında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, uzun dönemli bağımlılıklar ile başa çıkmaktır. Standart RNN'ler, uzun dizilerdeki önceki bilgileri öğrenmekte zorlanabilir ve bu da gradyan yok olması (vanishing gradient) veya gradyan patlaması (exploding gradient) sorunlarına yol açabilir.

PyTorch, Facebook AI Research tarafından geliştirilmiş, açık kaynaklı bir makine öğrenimi kütüphanesi olup, dinamik hesaplama grafikleri ve esnek yapısı sayesinde hızla popüler hale gelmiştir. Özellikle araştırmacılar ve geliştiriciler tarafından tercih edilen PyTorch, derin öğrenme modellerinin tasarımı ve eğitimi için ideal bir platform sunar. Ar-Ge süreçlerinde daha hızlı prototipleme ve test imkânı sunarak, model geliştirme sürecini hızlandırmaktadır. PyTorch, özellikle dinamik hesaplama grafiği

(dynamic computational graph) kullanımı ile diğer kütüphanelerden ayrılmaktadır. Bu grafikler, her ileri yayılımda (forward pass) yeniden oluşturulur ve bu sayede daha esnek ve etkileşimli bir çalışma ortamı sağlar. Bu özellik, özellikle değişken uzunluktaki veri dizileriyle veya karmaşık model yapılarıyla çalışan araştırmacılar için büyük avantaj sunar. PyTorch'un çekirdeğinde, Numpy benzeri çok boyutlu diziler olan tensörler yer alır. Bu tensörler, GPU'larda işlenebilir ve yüksek performanslı hesaplama sağlar. PyTorch, otomatik türev hesaplama yeteneğine sahiptir. Bu özellik, geriye yayılım sırasında türevlerin otomatik olarak hesaplanmasını sağlar ve kullanıcıların manuel türev işlemleri yapmasını gerektirmez. PyTorch, katmanlar ve fonksiyonlar arasında yüksek düzeyde modüler bir yapı sunar. Bu sayede, kullanıcılar özel katmanlar ve ağ yapıları oluşturarak kendi modellerini rahatlıkla tasarlayabilirler [85].

TensorFlow ve PyTorch, derin öğrenme alanında en yaygın kullanılan iki kütüphanedir. İki arasındaki temel farklar şunlardır.

- Grafik Yapısı: TensorFlow, statik grafiklerle çalışırken PyTorch dinamik grafiklerle çalışır. Bu durum, TensorFlow'un daha çok üretim ortamlarına, PyTorch'un ise araştırma ve prototiplemeye uygun olduğunu göstermektedir.
- Topluluk ve Ekosistem: TensorFlow, büyük bir ekosisteme ve birçok hazır modele sahipken, PyTorch araştırma topluluğunda daha yaygın kabul görmektedir.
- Dağıtık Eğitim: TensorFlow, büyük dağıtık sistemlerde daha güçlü bir altyapı sunarken, PyTorch bu alanda gelişmeler kaydetmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. İnce Film Yb/CIGS/Mo Fotosensörlerin Üretilmesi

İnce film aygıtların üretiminde ilk basamak aygıtların üzerine üretileceği altlıkların temizlenmesidir. Bu çalışmada cam altlıklar aygıt üretimi için tercih edilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan camlar (lam, lamel) $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ve $1 \times 1 \text{ cm}^2$ uzunluklarında kesilmiştir. Kesilen camlar alttaş üzerinde olabilecek ve üretilecek aygıt katmanlarının yapısını ve altlık üzerine tutunmasını değiştirecek kirliliklere karşı temizlenmiştir. Altlık temizleme aşamasında; öncelikle altlıklar saf su ve sabun karışımı kullanılarak sünger ile temizlendi ve saf su ile durulandı. Daha sonra ultrasonik temizleyici içerisinde $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika bekletildi. Aynı işlemler sırasıyla etanol, aseton ve tolüen çözeltileri için tekrarlandı. En son aşamada altlıklar azot gazı ile kurutuldu. Mo elementi cam altlıklar üzerine ilk katman ve alt kontak olarak üretilmiştir. Üretim DC saçırma yöntemi ile iki katmanlı olarak kaplanmıştır. İlk Mo tabakası düşük iletkenlik seviyesinde ancak iyi tutunma özelliğine sahip olabilecek parametrelerde kaplanmıştır. Böylece, Mo katmanında meydana gelebilecek yüzeye tutunmama ve pin delikleri gibi problemler önlenmiştir [86]. Mo'nun ikinci tabakası, daha iyi elektriksel iletkenlik için birinci katın üzerine kaplanmıştır. %99.95 saflıkta (Kurt J. Lesker Company, ABD) Mo hedef malzemesi, iki katmanlı Mo alt kontak için bir hedef olarak kullanılmıştır. Mo katmanlarının üretim parametreleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Filmler Vaksis Midas 4T1M sistemi kullanılarak üretilmiş ve sistemin iç dizaynı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

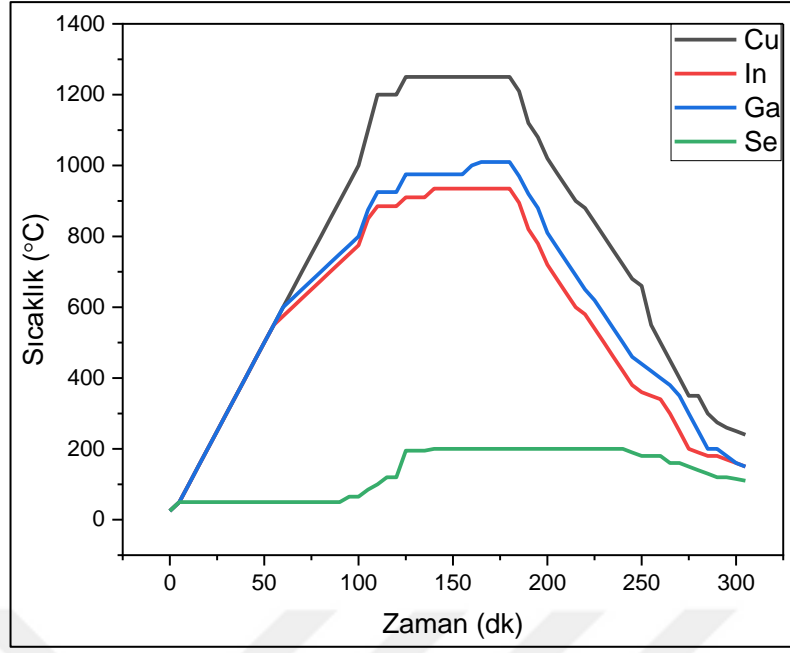
Çizelge 3.1. Mo katmanı üretim parametreleri

	İlk katman	İkinci katman
DC Güç	50 W	150 W
Vakum	1×10^{-2} Torr	4×10^{-3} Torr
Altlık Sıcaklığı	200 $^\circ\text{C}$	200 $^\circ\text{C}$
Dönüş Hızı	12 rpm	12 rpm
Gerçek Güç	48 W	148 W
Gerçek Gerilim	295 V	450 V
Gate Pozisyonu	%9	%22
Buharlaşma Seviyesi	0.4-0.5 Å/s	1.2-2.4 Å/s
Ar Gaz Akışı	20 sccm	20 sccm
Süre	40 dk	30 dk

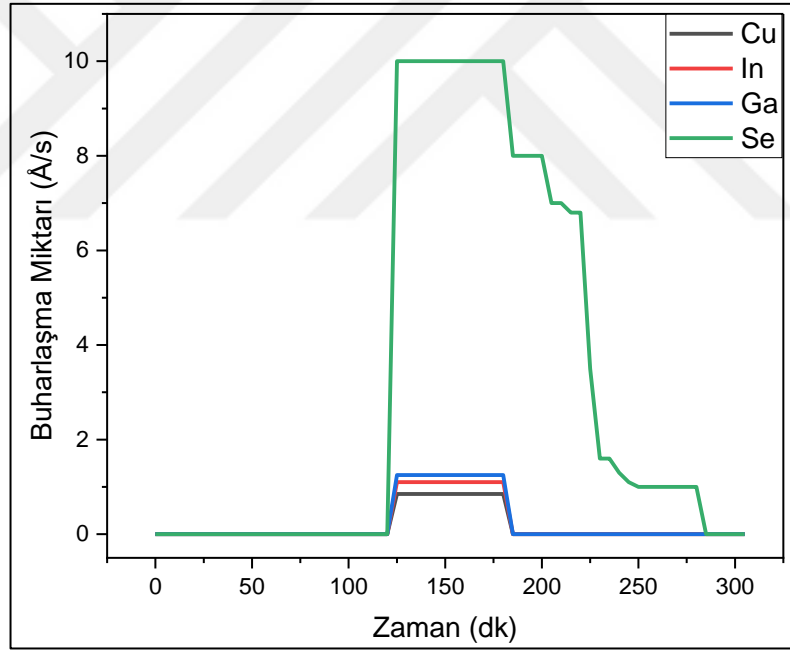


Şekil 3.1. Vaksis Midas 4T1M sistemi iç tasarımı

Fotoaktif katman olarak kullanılan CIGS yarıiletken malzemesi, Mo katmanı üzerine aynı anda buharlaştırma yöntemiyle kaplanmıştır. CIGS dörütlü bileşigi üretilirken Cu (99.999% Kurt J. Lesker Company, USA), In (99.99% Kurt J. Lesker Company, USA), Ga (99.99% Alpha Aesar), ve Se (99.999% Wolf J. Lesker Company, USA) peletler kaynak olarak kullanılmıştır. Üretim VAKSIS Midas 4T1M sisteminde vakum ortamında (1×10^{-5} Pa) üretilmiştir. Kaynak malzemelerin bulunduğu efüzyon hücrelerinin zamana bağlı sıcaklıkları ve her bir malzemenin zamana bağlı buharlaşma miktarları sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3'te verilmiştir. Bu üretim parametreleri daha önce yapmış olduğumuz çalışmalardaki üretim parametreleri ile benzerdir [87-91].



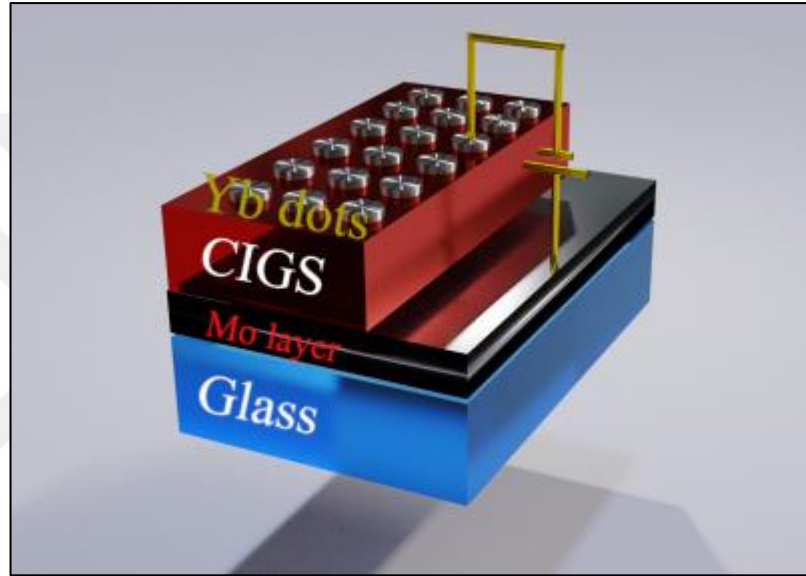
Şekil 3.2. Efüzyon hücrelerinin zamana bağlı sıcaklıkları



Şekil 3.3. Elementlerin buharlaşma seviyeleri

Üretim sırasında önce efüzyon hücreleri ısıtılmıştır. Kalınlık monitörlerinden daha önceki istenilen buharlaşma seviyeleri görüldüğü 110. dakikada efüzyon hücrelerinin üzerindeki kapaklar aynı anda açılmış ve CIGS üretimine başlanmıştır. Aynı anda buharlaştırmaya 55 dakika devam edilmiştir. Bu sürede altta sıcaklığı 220 °C’de sabit tutulmuştur. Üretimin 55. Dakikasında Cu, In ve Ga malzemelerinin bulunduğu

efüzyon hücrelerinin kapakları kapatılmış fakat Se'nin yapıya karışması için Se'nin kaplanmasına (selenizasyon) devam edilmiştir. Selenizasyon sırasında alttaş sıcaklığı 10 dakika içerisinde 450 °C'ye yükseltilmiştir. Selenizasyon işlemine yaklaşım olarak 100 dakika devam edilmiştir. Selenizasyon işleminin bitmesiyle beraber alttaş sıcaklığı oda sıcaklığına set edilmiş ve alttaşlar soğumaya bırakılmıştır. Üretilen CIGS katmanı üzerine Yb elementi $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ alanda nokta kontak olarak termal buharlaştırma yöntemiyle kaplanmıştır. Üretilen aygıtın katmanları ve aygıt mimarisi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Üretilen Yb/CIGS/Mo fotosensörün katmanları

3.2. Veri Seti İçin Solüsyonların Hazırlanması

Veri setinin elde edilebilmesi için 300 adet farklı numune hazırlanmıştır. Makine öğrenimi çalışmalarında veri setindeki veri sayısının fazla olması hatayı azaltmaktadır. Bununla beraber bu çalışma özelinde 300 adet numunenin incelenmesiyle veri yoğunluğuna ulaşılmıştır. Sadece 3 elemente bağlı olan veri seti hazırlanmasında daha fazla numunenin incelenmesi başarı oranında büyük değişiklikler yaratmayacağı için incelenen numune sayısı 300 adette bırakılmıştır. Numuneler hazırlanırken Mg kaynağı olarak MgSO_4 (Merck, %98), K kaynağı olarak KSO_4 (Merck, %99), P kaynağı olarak fosforik asit (Merck, %98) kullanılmıştır. Tez çalışmasında Mg, P ve K elementlerinin seçilmesi sebebi ise Mg (Magnezyum), K (Potasyum) ve P (Fosfor),

bitkilerin sağlıklı büyümesi ve gelişmesi için kritik öneme sahip temel makro elementlerden olmalarıdır. Her birinin bitki üzerinde önemli fonksiyonları ve spesifik etkileri vardır.

Magnezyum, bitkilerin büyümesi için hayati öneme sahip bir elementtir ve klorofilin (yani bitkinin yeşil rengini veren pigmentin) merkez atomudur. Klorofil, fotosentez sürecinde güneş ışığını emme işlevi görür, bu da bitkinin enerji üretmesi için gereklidir. Magnezyum, klorofilin yapısında yer alarak fotosentez sürecinin gerçekleşmesini sağlar, birçok enzimin aktivasyonunda görev alır ve bitki metabolizması için gereklidir bunların yanında adenzin trifosfat (ATP) adlı enerji molekülünün etkin kullanılmasını sağlar ve enerji metabolizmasında kritik rol oynar. Mg'nin eksikliği durumlarında yapraklarda sararma (kloroz), özellikle yaşlı yapraklarda ortaya çıkar ve fotosentez kapasitesinin azalmasıyla bitki gelişimi yavaşlar.

Potasyum, bitkilerin hücre metabolizması ve su dengesini düzenlemede önemli bir rol oynayan temel bir makro besindir. Özellikle bitkilerin su tutma kapasitesini artırır ve hücreler arası iyon dengesini sağlar. Hücre zarları boyunca iyon taşınmasında kritik rol oynar, bu da hücrelerin su alımını düzenler ve bitkilerdeki birçok enzimin işlevsel hale gelmesi için potasyum gereklidir. Potasyum, fotosentez ve solunum gibi temel metabolik süreçlerde yer alır, protein sentezi sürecinde de önemli rol oynar ve bitki dokularının gelişimine katkı sağlar. Eksik olduğu durumlarda; yaprak kenarlarında yanık benzeri kahverengi lekeler görülmeye başlar. Bitki gelişimi yavaşlar ve bitki kökünün gelişmesi zayıflar. Bitkinin hastalıklara karşı savunma direnci düşer.

Fosfor, bitki hücrelerinin enerji üretimi ve hücre bölünmesi süreçlerinde kritik öneme sahip bir elementtir. Fosfor, nükleik asitlerin (DNA ve RNA) ve enerji taşıyıcı molekül ATP'nin bir parçasıdır. Fosfor, fotosentez ve solunum gibi metabolik süreçlerde enerji transferi için gerekli olan ATP'nin bir parçasıdır. Hücre bölünmesi ve büyüme için gerekli DNA ve RNA yapısında fosfor bulunur. Bu da bitkinin büyüme hızını ve kök gelişimini destekler. Kök gelişimini teşvik eder ve özellikle köklerin derinlere uzanmasına yardımcı olur. Eksikliği durumunda ise bitkide morumsu renk

değişiklikleri görülür, gelişim yavaşlar, kökler zayıflar, çiçeklenme ve meyve oluşumu azalır.

Mg, P ve K'nın bitki üzerindeki bu etkileri göz önüne alınarak bu lementlerin öncelikle incelenmesinin gerekliliği görülmüştür. Bununla beraber elementlerin bileşen formunda solüsyon içerisinde çözünmesi gerekmektedir. Fakat her kimyasal saf su içerisinde beraber çözünmemektedir. Gübre karışabilme durumu Şekil 3.5'de verilmiştir.

GÜBRELER	AMONYUM NİTRAT	AMONYUM SÜLFAT	CALMAG	FOSFORİK ASİT	KALSİYUM NİTRAT	MAGNEZYUM NİTRAT	MAGNEZYUM SÜLFAT	MAP	MKP	POTASYUM NİTRAT	POTASYUM SÜLFAT	ÜRE	ÜRE FOSFAT
AMONYUM NİTRAT	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
AMONYUM SÜLFAT	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Sınırlı Karışabilirlik	Karışamaz	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
CALMAG	Karışabilir	Karışamaz	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz
FOSFORİK ASİT	Karışabilir	Sınırlı Karışabilirlik	Karışamaz	Karışabilir	Karışamaz	Sınırlı Karışabilirlik	Sınırlı Karışabilirlik	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
KALSİYUM NİTRAT	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz
MAGNEZYUM NİTRAT	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Sınırlı Karışabilirlik	Karışamaz	Karışabilir	Karışabilir	Sınırlı Karışabilirlik	Sınırlı Karışabilirlik	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
MAGNEZYUM SÜLFAT	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Sınırlı Karışabilirlik	Karışamaz	Karışabilir	Karışabilir	Sınırlı Karışabilirlik	Sınırlı Karışabilirlik	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Sınırlı Karışabilirlik
MAP	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Sınırlı Karışabilirlik	Sınırlı Karışabilirlik	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
MKP	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Sınırlı Karışabilirlik	Sınırlı Karışabilirlik	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
POTASYUM NİTRAT	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
POTASYUM SÜLFAT	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir
ÜRE	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Sınırlı Karışabilirlik	Sınırlı Karışabilirlik
ÜRE FOSFAT	Karışabilir	Karışabilir	Karışamaz	Karışamaz	Karışamaz	Karışabilir	Sınırlı Karışabilirlik	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Karışabilir	Sınırlı Karışabilirlik

Karışabilir
 Karışamaz
 Sınırlı Karışabilirlik

Şekil 3.5. Gübre karışabilme durumu

Şekil 3.5 gösterilen tabloya uygun şekilde seçilen her bir kaynak öncelikle tek başlarına daha sonra ikili ve üçlü olacak şekilde 100 ml ultra saf su içerisinde 30'ar dakika karıştırılmış daha sonra ICP-OES sisteminde ölçüm alınabilmesi için her bir numuneden 100'er µl 10 ml'ye tamamlanacak şekilde seyreltilmiştir. Bu seyreltmenin yapılmasının sebebi ICP-OES ölçümü sırasında ICP-OES cihazında oluşabilecek tıkanmaların önüne geçmektir. Çözücü olarak ultra saf su kullanılmasının sebebi, çözücü içerisindeki olası kirliliklerin veri setinin doğruluğunu azaltmasına engel olmaktır. Solüsyon karışım oranları 10 ml ultra saf su için Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A1	0.00	0.00	0.00
A2	0.67	0.00	0.00
A3	0.17	0.00	0.00
A4	0.23	0.00	0.00
A5	0.27	0.00	0.00
A6	0.35	0.00	0.00
A7	0.40	0.00	0.00
A8	0.46	0.00	0.00
A9	0.57	0.00	0.00
A10	0.71	0.00	0.00
A11	0.00	0.24	0.00
A12	0.00	0.37	0.00
A13	0.00	0.58	0.00
A14	0.00	0.79	0.00
A15	0.00	0.11	0.00
A16	0.00	0.15	0.00
A17	0.00	0.31	0.00
A18	0.00	0.42	0.00
A19	0.00	0.27	0.00
A20	0.00	0.51	0.00
A21	0.00	0.00	100.00
A22	0.00	0.00	200.00
A23	0.00	0.00	300.00
A24	0.00	0.00	400.00
A25	0.00	0.00	500.00
A26	0.00	0.00	600.00
A27	0.00	0.00	700.00
A28	0.00	0.00	800.00
A29	0.00	0.00	900.00
A30	0.00	0.00	1000.00
A31	0.67	0.24	0.00
A32	0.17	0.37	0.00
A33	0.23	0.58	0.00
A34	0.27	0.79	0.00
A35	0.35	0.11	0.00
A36	0.41	0.15	0.00
A37	0.46	0.31	0.00
A38	0.57	0.42	0.00

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları (Devamı)

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A39	0.71	0.27	0.00
A40	0.97	0.00	100.00
A41	0.47	0.00	200.00
A42	0.53	0.00	300.00
A43	0.57	0.00	400.00
A44	0.65	0.00	500.00
A45	0.70	0.00	600.00
A46	0.76	0.00	700.00
A47	0.87	0.00	800.00
A48	1.01	0.00	900.00
A49	0.00	0.24	100.00
A50	0.00	0.37	200.00
A51	0.00	0.58	300.00
A52	0.00	0.79	400.00
A53	0.00	0.11	500.00
A54	0.00	0.15	600.00
A55	0.00	0.31	700.00
A56	0.00	0.42	800.00
A57	0.00	0.27	900.00
A58	1.02	0.44	100.00
A59	0.52	0.57	200.00
A60	0.58	0.78	300.00
A61	0.62	0.99	400.00
A62	0.70	0.31	500.00
A63	0.75	0.35	600.00
A64	0.81	0.51	700.00
A65	0.92	0.62	800.00
A66	1.06	0.47	900.00
A67	1.37	0.64	900.00
A68	1.74	0.83	901.00
A69	2.09	1.05	901.00
A70	2.43	1.27	902.00
A71	2.75	1.49	902.00
A72	3.12	1.61	903.00
A73	3.41	1.85	903.00
A74	3.82	2.03	903.00
A75	4.15	2.22	904.00
A76	4.50	2.44	904.00

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları (Devamı)

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A77	4.87	2.61	905.00
A78	5.24	2.86	905.00
A79	5.57	3.02	905.00
A80	5.97	3.24	906.00
A81	6.29	3.45	906.00
A82	6.61	3.62	907.00
A83	6.93	3.83	907.00
A84	7.38	4.07	907.00
A85	7.66	4.28	908.00
A86	8.07	4.47	908.00
A87	8.33	4.64	909.00
A88	8.74	4.86	909.00
A89	9.01	5.08	910.00
A90	9.43	5.26	910.00
A91	9.77	5.46	910.00
A92	10.17	5.68	911.00
A93	10.40	5.87	911.00
A94	10.83	6.08	912.00
A95	11.11	6.28	912.00
A96	11.57	6.41	913.00
A97	11.82	6.63	913.00
A98	12.23	6.89	913.00
A99	12.57	7.11	914.00
A100	12.92	7.26	914.00
A101	13.21	7.44	915.00
A102	13.68	7.17	915.00
A103	13.96	7.85	915.00
A104	14.37	8.13	916.00
A105	14.65	8.26	916.00
A106	15.03	8.47	917.00
A107	15.34	8.68	917.00
A108	15.76	8.82	918.00
A109	16.09	9.05	918.00
A110	16.36	9.26	918.00
A111	16.71	9.71	919.00
A112	17.77	9.69	919.00
A113	17.35	9.87	920.00
A114	17.71	10.05	920.00

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları (Devamı)

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A115	18.17	10.13	921.00
A116	18.52	10.12	921.00
A117	18.87	10.68	921.00
A118	19.22	10.87	922.00
A119	19.50	11.01	922.00
A120	19.98	11.17	923.00
A121	20.27	11.15	923.00
A122	20.64	11.66	923.00
A123	20.96	11.89	924.00
A124	21.37	12.08	924.00
A125	21.67	12.14	925.00
A126	22.05	12.76	925.00
A127	22.34	12.67	926.00
A128	22.79	12.13	926.00
A129	23.06	13.05	926.00
A130	23.44	13.28	927.00
A131	23.77	13.26	927.00
A132	24.11	13.64	928.00
A133	24.43	13.81	928.00
A134	24.81	14.50	928.00
A135	25.10	14.22	929.00
A136	25.51	14.44	929.00
A137	25.84	14.61	930.00
A138	26.26	14.85	930.00
A139	26.53	15.03	931.00
A140	26.98	15.25	931.00
A141	27.24	15.47	931.00
A142	27.61	15.69	932.00
A143	27.96	15.86	932.00
A144	28.31	16.08	933.00
A145	28.65	16.27	933.00
A146	29.05	16.48	934.00
A147	29.34	16.62	934.00
A148	29.76	16.82	934.00
A149	30.02	17.04	935.00
A150	30.43	17.25	935.00
A151	30.73	17.46	936.00
A152	31.11	17.64	936.00

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları (Devamı)

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A152	31.11	17.64	936.00
A153	31.44	17.83	936.00
A154	31.82	18.02	937.00
A155	32.10	18.22	937.00
A156	32.58	18.48	938.00
A157	32.89	18.67	938.00
A158	33.21	18.87	939.00
A159	33.55	19.04	939.00
A160	33.94	19.27	939.00
A161	34.26	19.40	940.00
A162	34.63	19.05	940.00
A163	34.95	19.85	941.00
A164	35.35	20.07	941.00
A165	35.65	20.22	942.00
A166	36.02	20.41	942.00
A167	36.33	20.63	942.00
A168	36.73	20.82	943.00
A169	37.03	21.07	943.00
A170	37.43	21.24	944.00
A171	37.75	21.43	944.00
A172	38.14	21.67	944.00
A173	38.48	21.82	945.00
A174	38.82	22.09	945.00
A175	39.14	22.28	946.00
A176	39.55	22.44	946.00
A177	39.81	22.67	947.00
A178	40.26	22.89	947.00
A179	40.59	23.06	947.00
A180	40.36	23.15	948.00
A181	41.95	23.47	948.00
A182	41.62	23.62	949.00
A183	41.43	23.83	949.00
A184	42.63	24.05	949.00
A185	42.72	24.24	950.00
A186	43.81	24.16	950.00
A187	43.32	24.67	951.00
A188	43.47	24.80	951.00
A189	44.51	25.04	952.00

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları (Devamı)

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A190	44.86	25.15	952.00
A191	44.91	25.46	952.00
A192	45.90	25.69	953.00
A193	45.30	25.78	953.00
A194	45.43	26.84	954.00
A195	46.40	26.25	954.00
A196	46.28	26.43	955.00
A197	46.82	26.42	955.00
A198	47.24	26.75	955.00
A199	47.56	27.92	956.00
A200	47.91	27.78	956.00
A201	48.24	27.87	957.00
A202	48.61	27.98	957.00
A203	48.99	27.34	957.00
A204	49.37	28.63	958.00
A205	49.63	28.42	958.00
A206	50.00	28.41	959.00
A207	50.34	28.67	959.00
A208	50.75	28.83	960.00
A209	51.06	29.12	960.00
A210	51.43	29.35	960.00
A211	51.71	29.74	961.00
A212	52.14	29.86	961.00
A213	52.41	29.71	962.00
A214	52.88	30.11	962.00
A215	53.13	30.28	963.00
A216	53.54	30.46	963.00
A217	53.82	30.63	963.00
A218	54.21	30.81	964.00
A219	54.56	31.18	964.00
A220	54.93	31.42	965.00
A221	55.27	31.55	965.00
A222	55.69	31.63	965.00
A223	55.93	31.89	966.00
A224	56.32	32.14	966.00
A225	56.61	32.16	967.00
A226	57.05	32.41	967.00
A227	57.32	32.61	968.00

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları (Devamı)

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A228	57.73	32.18	968.00
A229	58.06	33.07	968.00
A230	58.44	33.26	969.00
A231	58.79	33.56	969.00
A232	59.11	33.30	970.00
A233	59.48	33.15	970.00
A234	59.87	34.28	970.00
A235	60.11	34.18	971.00
A236	60.51	34.41	971.00
A237	60.80	34.67	972.00
A238	61.23	34.88	972.00
A239	61.56	35.27	973.00
A240	61.94	35.18	973.00
A241	62.27	35.41	973.00
A242	62.66	35.46	974.00
A243	62.98	35.35	974.00
A244	63.32	36.86	975.00
A245	63.64	36.99	975.00
A246	64.02	36.09	976.00
A247	64.36	36.21	976.00
A248	64.74	36.18	976.00
A249	65.03	37.56	977.00
A250	65.45	37.59	977.00
A251	65.75	37.62	978.00
A252	66.14	37.12	978.00
A253	66.46	37.36	978.00
A254	66.86	38.63	979.00
A255	67.11	38.42	979.00
A256	67.53	38.23	980.00
A257	67.83	38.85	980.00
A258	68.22	38.88	981.00
A259	68.50	39.53	981.00
A260	68.94	39.51	981.00
A261	69.29	39.59	982.00
A262	69.64	39.41	982.00
A263	69.93	39.62	983.00
A264	70.37	40.95	983.00
A265	70.62	40.58	984.00

Çizelge 3.2. Kaynak malzemelerin karışım miktarları (Devamı)

Numune Adı	MgSO ₄ (mg/10ml)	K ₂ SO ₄ (mg/10ml)	Fosforik Asit (µl/10ml)
A266	71.06	40.65	984.00
A267	71.31	40.72	984.00
A268	71.77	40.10	985.00
A269	72.02	41.22	985.00
A270	72.46	41.46	986.00
A271	72.77	41.75	986.00
A272	73.11	41.28	986.00
A273	73.49	41.56	987.00
A274	73.85	42.14	987.00
A275	74.13	42.43	988.00
A276	74.53	42.76	988.00
A277	74.88	42.20	989.00
A278	75.28	42.38	989.00
A279	75.56	43.11	989.00
A280	75.94	43.56	990.00
A281	76.27	43.37	990.00
A282	76.63	43.91	991.00
A283	76.91	43.39	991.00
A284	77.34	44.16	991.00
A285	77.75	44.37	992.00
A286	78.06	44.24	992.00
A287	78.31	44.27	993.00
A288	78.71	44.53	993.00
A289	79.01	45.45	994.00
A290	79.43	45.88	994.00
A291	79.78	45.91	994.00
A292	80.14	45.68	995.00
A293	80.32	45.18	995.00
A294	80.98	46.01	996.00
A295	81.34	46.26	996.00
A296	81.12	46.47	997.00
A297	81.42	46.17	997.00
A298	82.12	46.80	997.00
A299	82.65	47.09	998.00
A300	83.12	48.45	989.00

3.3. Hazırlanan Solüsyonların ICP-OES ve EC Ölçümlerinin Alınması

Hazırlanan solüsyonların elementel analizi Şekil 3.6’da gösterilmiş olan Elmer Optima 5300DV ICP-OES sisteminde yapılmıştır. Bu ICP-OES cihazı 70 civarında elementin eser, minör ve majör konsantrasyon düzeylerinde ve aynı anda analizine olanak tanıyan hızlı bir tekniktir. Her element kendine özgü enerji düzeylerine, dolayısıyla bu enerji düzeylerinde emisyon yapabilecekleri dalga boylarına sahip bulunmaktadır. Dalga boyu ve emisyon şiddeti ölçülerek bir örnekte bulunan elementler ve miktarları saptanabilmektedir. Numunelerde elementlerin miktarının tayininin yanı sıra elementel tarama yapmakta mümkün olmaktadır.



Şekil 3.6. Elmer Optima 5300DV ICP-OES sistemi

Veri setinin tamamlanması için gerekli olan EC ölçümleri alınmıştır. Sıvılarda iletkenlik ölçümü konduktif iletkenlik ve indüktif iletkenlik olmak üzere iki farklı yöntemle yapılmaktadır. Bu projede görece olarak basit yapısı sebebiyle; düşük maliyetli, her yere uygulanabilir boyutlarda problemlerle çalışabilen bir iletkenlik ölçüm metodu olan konduktif iletkenlik yöntemi uygulanacaktır. Bu yöntemde elektrotlar üzerine alternatif gerilim (AC) uygulanır. Böylece iyonların elektrotlar üzerinde polarize olarak akım geçirmesini engelleme sorununun önüne geçilmiş olur. Sıvılarda doğru gerilim (DC) uygulanarak iletkenlik ölçümü almak doğru sonuçlar vermemektedir. Çünkü DC gerilim uygulandığı takdirde sıvı içerisinde gaz haline geçen oksijen ve hidrojen molekülleri elektrolize sebep olmaktadır. Bununla beraber buharlaşmadan kaynaklı konsantrasyon değişiklikleri görülmektedir. Numunelerin EC ölçümleri bilimsel çalışmalarda iletkenlik ölçümde kullanılan Keysight 4285A Impedans

Analizatörü ile elde edilmiştir. İletkenlik ölçümü alınan sistem Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Keysight 4285A Empedans Analizatörü

3.4. Veri Setinin Genişletilmesi

Veri seti genişletilirken birbirleri ile kıyaslanabilmesi ve hangi yöntemin daha doğru tahmin yeteneği olduğunun bu çalışma için test edilebilmesi için Phyton arayüzünde TensorFlow ve Pytorch kütüphaneleri ayrı ayrı değerlendirilmiş ve kıyaslanmıştır.

İlk genişletme yönteminde TensorFlow yöntemi kullanılmıştır. Veri setindeki Mg, K ve P giriş, EC çıkış olarak tanımlanmış ve buna göre rastgele değerler verilerek bir veri seti genişletilmesi (data augmentation) yapılmıştır. Bu işlemi yapan Phyton kodu şu şekildedir.

```
import numpy as np
import pandas as pd
# Excel dosyasını oku
excel_file = 'veri.xlsx' # Excel dosya adı ve yolunu belirtin
data = pd.read_excel(excel_file)
# Data augmentation fonksiyonu
def augment_data(df, noise_level=0.1, num_augmented=3000):
    augmented_data = pd.DataFrame(columns=df.columns)
    for i in range(num_augmented):
        # Rastgele bir veri satırı seç
```

```

row = df.sample(n=1).copy()
# Gürültü ekle
row["A"] += np.random.normal(0, noise_level)
row["B"] += np.random.normal(0, noise_level)
row["C"] += np.random.normal(0, noise_level)
row["X"] += np.random.normal(0, noise_level)
# Oluşturulan satırı augmented_data'ya ekle
augmented_data = augmented_data._append(row, ignore_index=True)

return augmented_data

# Augmentation uygulama
augmented_data = augment_data(data)

# Orijinal veri seti ile augmented veri setini birleştirme
final_data = pd.concat([data, augmented_data], ignore_index=True)
print(final_data.head())
print(f"Toplam veri sayısı: {len(final_data)}")
print(final_data)
final_data.to_excel("augmented_veri.xlsx")

```

İkinci genişletme şeklinde ise yine TensorFlow kullanılmış farkat ilkinden farklı olarak veri seti öncelikle eğitilmiş, eğitilen model üzerinden Mg, K, P giriş değerlerinin rastgele değişimine bağlı olarak çıkış EC değerlerinin belirlenmesi şeklinde bir kodlama yapılmıştır. Bu kod ise şu şekildedir.

```

import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense
# Excel dosyasını oku
excel_file = 'veri.xlsx' # Excel dosya adı ve yolunu belirtin
data = pd.read_excel(excel_file)
# Data augmentation fonksiyonu

```

```

def augment_data(df, model, noise_level=0.1, num_augmented=100):
    augmented_data = pd.DataFrame(columns=df.columns)
    for i in range(num_augmented):
        # Rastgele bir veri satırı seç
        row = df.sample(n=1).copy()
        # Gürültü ekle
        row["A"] += np.random.normal(0, noise_level)
        row["B"] += np.random.normal(0, noise_level)
        row["C"] += np.random.normal(0, noise_level)
        if row["A"].item() < 0:
            row["A"] = 0
        if row["B"].item() < 0:
            row["B"] = 0
        if row["C"].item() < 0:
            row["C"] = 0
        row["X"] = model.predict(row[["A", "B", "C"]])
        # Oluşturulan satırı augmented_data'ya ekle
        augmented_data = augmented_data._append(row, ignore_index=True)
    return augmented_data

# Verileri giriş ve çıkış olarak ayır
X = data.iloc[:, :3] # İlk üç sütun giriş olarak kullanılacak
y = data.iloc[:, -1] # Son sütun çıkış olarak kullanılacak
# Verileri ölçeklendir (scaling)
# scaler = StandardScaler()
# X_scaled = scaler.fit_transform(X)
# Verileri eğitim ve test setlerine ayır
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,
random_state=42)
# Yapay sinir ağı modelini oluştur
model = Sequential()
model.add(Dense(64, input_dim=3, activation='relu')) # Giriş katmanı
model.add(Dense(32, activation='relu')) # Gizli katman

```

```

model.add(Dense(1, activation='linear')) # Çıkış katmanı, çıkış sütunu 1 boyutunda
olduğu için 1 nöron
# Modeli derle
model.compile(loss='mean_squared_error', optimizer='adam', metrics=['mse'])
# Modeli eğit
model.fit(X_train, y_train, epochs=3000, batch_size=32, verbose=1,
validation_split=0.2)
# Modelin performansını değerlendir
mse = model.evaluate(X_test, y_test)
print(f'Test MSE: {mse}')
# Augmentation uygulama
augmented_data = augment_data(data, model, num_augmented=3000)
# Orijinal veri seti ile augmented veri setini birleştirme
final_data = pd.concat([data, augmented_data], ignore_index=True)
print(final_data.head())
print(f'Toplam veri sayısı: {len(final_data)}")
print(final_data)
final_data.to_excel("model_augmented_veri.xlsx")

```

Bu kod, denetimli öğrenmeye dayalı bir yapay sinir ağı (YSA) modelini içermektedir. Keras ve TensorFlow kütüphaneleri kullanılarak birçok katmanlı yapay sinir ağı (MLA) oluşturulmuştur. Bu model, giriş verilerini (A, B, C sütunları) işleyerek, bir sürekli değer (X sütunu) tahmini yapmaktadır. Dolayısıyla, bu bir regresyon problemine yönelik bir sinir ağı modelidir. Modelin yapısı ve veri işleme şekline bakıldığı takdirde, bu modelin denetimli öğrenme yöntemiyle oluşturulduğu görülmektedir. Veriler, etiketli bir formatta (X ve y olarak ayrılmış) eğitim sürecine tabi tutulmaktadır ve model, tahminler yapmak üzere eğitilmektedir. Çıkış katmanı tek bir nörona sahiptir ve aktivasyon fonksiyonu olarak lineer kullanılmıştır. Bu da modelin sürekli bir değer tahmin etmeye çalıştığını göstermektedir. Yani, model bir regresyon problemine yönelik eğitilmektedir. Kod, model eğitimi için kullanılan veri setini artırmak amacıyla bir veri artırma fonksiyonu içermektedir. Bu fonksiyon, gürültü ekleyerek yeni veri noktaları oluşturmakta ve modelin bu verilerle daha iyi genelleme yapabilmesini sağlamaktadır. Özetle bu kod, denetimli öğrenme yöntemine

dayalı, yapay sinir ağı tabanlı bir regresyon modeli oluşturmaktadır. Model, sürekli değer tahmini yapmayı amaçlamakta ve veri artırma teknikleriyle veri setini genişletmektedir.

Yazılan kod oldukça kapsamlı ve birkaç önemli aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamaları ve içerdiği detayları detayla incelendiği takdirde farklı bölümler şu şekilde açıklanabilir.

a) Kütüphanelerin Import Edilmesi

Kodun başında, çeşitli kütüphaneler import edilmiştir.

numpy: Sayısal hesaplamalar için kullanılmaktadır.

pandas: Veri okuma ve işleme işlemleri için kullanılmaktadır (Excel dosyasından veri çekilmektedir).

sklearn.model_selection.train_test_split: Veriyi eğitim ve test setlerine ayırmak için kullanılmaktadır.

sklearn.preprocessing.StandardScaler: Veri ölçeklendirmek için (scaling), normalizasyon işlemlerinde kullanılmaktadır.

tensorflow.keras: Yapay sinir ağı modeli oluşturmak için kullanılan TensorFlow'un Keras API'sidir.

b) Veri Okuma (Data Reading)

```
excel_file = 'veri.xlsx'
```

```
data = pd.read_excel(excel_file)
```

Bu bölümde, bir Excel dosyası olan 'veri.xlsx' dosyasından veri çekilmekte ve data adlı bir pandas DataFrame'ine kaydedilmektedir. Bu veri seti daha sonra modelin eğitiminde kullanılacaktır.

c) Veri Artırma (Data Augmentation)

```
def augment_data(df, model, noise_level=0.1, num_augmented=100):
```

```
    augmented_data = pd.DataFrame(columns=df.columns)
```

```
    ...
```

```
    return augmented_data
```

Bu fonksiyon, mevcut veri setine gürültü ekleyerek (noise) yeni veriler oluşturmaktadır. Veri artırma, genellikle sinir ağlarının daha fazla veri ile eğitilerek genelleme yeteneğinin artırılması amacıyla kullanılır. Kodun içeriğinde bir satır rastgele seçilmektedir. Bu satıra A, B ve C sütunlarına bir miktar rastgele normal dağılımlı gürültü eklenmektedir. Gürültü ekleme, modelin daha iyi genelleme yapmasını sağlamak için sık kullanılan bir tekniktir. Negatif değerler sıfırlanmaktadır. Oluşturulan yeni veri, modelin tahminiyle birlikte genişletilmiş veri setine eklenmektedir. Bu fonksiyon, veri setini genişletmek ve modeli daha fazla veri ile eğitmek için tasarlanmıştır.

d) Verilerin Giriş ve Çıkış Olarak Ayırılması

```
X = data.iloc[:, :3]
```

```
y = data.iloc[:, -1]
```

Veri setindeki ilk 3 sütun (A, B, C) giriş verisi (X) olarak kullanılmaktadır. Son sütun (X) ise tahmin edilecek hedef veri (y) olarak ayarlanmıştır.

e) Veri Setinin Eğitim ve Test Olarak Bölünmesi

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
```

Veri seti, eğitim (%80) ve test (%20) setlerine ayrılmıştır. Bu, modelin eğitim sürecinde belirli bir kısmının model tarafından öğrenilmemesi ve sonrasında bu kısımda test edilmesi için kullanılır. Test seti, modelin genelleme yeteneğini değerlendirmede kritik rol oynamaktadır.

f) Yapay Sinir Ağı Modelinin Oluşturulması

```
model = Sequential()
```

```
model.add(Dense(64, input_dim=3, activation='relu'))
```

```
model.add(Dense(32, activation='relu'))
```

```
model.add(Dense(1, activation='linear'))
```

Burada, Sequential model kullanılarak bir yapay sinir ağı (MLP) oluşturulmuş.

Giriş Katmanı (input layer): İlk katman 3 boyutlu giriş verisi (A, B, C sütunları) almakta ve 64 nöron içermektedir. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU (Rectified Linear Unit) kullanılmaktadır. ReLU, negatif girişleri sıfıra eşitleyen ve pozitif girişleri olduğu gibi geçen bir aktivasyon fonksiyonudur.

Gizli Katman (hidden layer): İkinci katman 32 nöron içermekte ve yine ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Gizli katmanlar, modelin verilerdeki karmaşık ilişkileri öğrenmesini sağlar.

Çıkış Katmanı (output layer): Son katmanda 1 nöron var ve lineer aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu, modelin sürekli bir değer (regresyon) tahmin ettiğini göstermektedir.

g) Modelin Derlenmesi

```
model.compile(loss='mean_squared_error', optimizer='adam', metrics=['mse'])
```

Model, Adam optimizasyon algoritmasıyla ve Mean Squared Error (MSE) kaybı ile derlenmektedir. MSE, regresyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir hata fonksiyonudur. Modelin doğruluğunu ölçmek için de MSE metriği kullanılmaktadır.

Adam (Adaptive Moment Estimation): Momentum ve öğrenme oranını adaptif olarak ayarlayan gelişmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. Hem hızlı hem de genellikle iyi sonuçlar verir.

h) Modelin Eğitilmesi

```
model.fit(X_train, y_train, epochs=3000, batch_size=32, verbose=1, validation_split=0.2)
```

Model, eğitim seti üzerinde 3000 epoch boyunca eğitilmektedir. Yani model verileri 3000 kez dolaşmaktadır. Batch size 32 olarak ayarlanmış, bu da her adımda 32 veri noktası ile modelin güncelleneceği anlamına gelmektedir. Verinin %20'si ise validation seti olarak ayrılmıştır. Bu set eğitim sırasında modelin genel performansını izlemek için kullanılır.

i) Modelin Test Edilmesi

```
mse = model.evaluate(X_test, y_test)
print(f"Test MSE: {mse}")
```

Model test verileriyle test edilmektedir ve test hatası (MSE) yazdırılmaktadır. Bu, modelin eğitim dışı veriler üzerindeki performansını göstermektedir.

j) Veri Artırma (Data Augmentation) Uygulaması

```
augmented_data = augment_data(data, model, num_augmented=3000)
```

Yukarıda tanımlanan veri artırma fonksiyonu kullanılarak mevcut veri setine 3000 yeni veri noktası eklenmektedir.

k) Final Veri Seti ve Dosya Kaydetme

```
final_data = pd.concat([data, augmented_data], ignore_index=True)
```

```
final_data.to_excel("model_augmented_veri.xlsx")
```

Orijinal veri seti ile artırılan veri seti birleştirilip bir Excel dosyasına kaydedilmektedir. Bu, modelin eğitilmesi için daha geniş bir veri kümesi sağlamaktadır.

Bu kod, yapay sinir ağı tabanlı bir regresyon modeli oluşturmakta ve eğitmektedir. Ardından, veri artırma ile veri setini genişleterek modelin genelleme yeteneğini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Regresyon problemi çözmeye yönelik olan bu model, sürekli bir hedef değişken (X sütunu) tahmin etmeye çalışmaktadır. Modelin yapısında sezgisel yöntemler kullanılmaktadır, çünkü model verilerden öğrenme süreci sırasında örüntüleri ve ilişkileri doğrudan matematiksel formüllere dayanmadan, deneysel ve adaptif bir yaklaşımla bulmaktadır. Bu, sezgisel yöntemlerin tipik bir örneğidir çünkü model büyük miktarda veriden ilişkiler ve örüntüler öğrenmeye çalışırken bir insanın sezgilerini taklit eden bir süreç izler.

Veri setinin genişletilmesinde kullanılan üçüncü yöntem ise Pytorch'tur. Bu yöntemde de ikinci ile benzer şekilde öncelikle eğitilmiş bir model elde edilmiş ve bu model üzerinde veri seti genişletilmiştir. Üçüncü veri seti genişletme yönteminde kullanılan kod şu şekildedir.

```
import numpy as np
import pandas as pd
import torch
import torch.nn as nn
```

```

import torch.optim as optim
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
excel_file = 'veri.xlsx'
data = pd.read_excel(excel_file)
def augment_data(df, model, noise_level=0.1, num_augmented=100):
    augmented_data = pd.DataFrame(columns=df.columns)
    for i in range(num_augmented):
        row = df.sample(n=1).copy()
        row["A"] += np.random.normal(0, noise_level)
        row["B"] += np.random.normal(0, noise_level)
        row["C"] += np.random.normal(0, noise_level)
        if row["A"].item() < 0:
            row["A"] = 0
        if row["B"].item() < 0:
            row["B"] = 0
        if row["C"].item() < 0:
            row["C"] = 0
        input_tensor = torch.tensor(row[["A", "B", "C"]].values, dtype=torch.float32)
        with torch.no_grad():
            row["X"] = model(input_tensor).item()
        augmented_data = augmented_data._append(row, ignore_index=True)
    return augmented_data
X = data.iloc[:, :3]
y = data.iloc[:, -1]
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,
random_state=42)
X_train_tensor = torch.tensor(X_train.values, dtype=torch.float32)
y_train_tensor = torch.tensor(y_train.values, dtype=torch.float32).view(-1, 1)
X_test_tensor = torch.tensor(X_test.values, dtype=torch.float32)
y_test_tensor = torch.tensor(y_test.values, dtype=torch.float32).view(-1, 1)
class NeuralNet(nn.Module):
    def __init__(self):

```

```

    super(NeuralNet, self).__init__()
    self.fc1 = nn.Linear(3, 64)
    self.fc2 = nn.Linear(64, 32)
    self.fc3 = nn.Linear(32, 1)
    def forward(self, x):
        x = torch.relu(self.fc1(x))
        x = torch.relu(self.fc2(x))
        x = self.fc3(x)
        return x
model = NeuralNet()
criterion = nn.MSELoss()
optimizer = optim.Adam(model.parameters(), lr=0.001)
epochs = 3000
batch_size = 32
for epoch in range(epochs):
    model.train()
    optimizer.zero_grad()
    outputs = model(X_train_tensor)
    loss = criterion(outputs, y_train_tensor)
    loss.backward()
    optimizer.step()
    if (epoch + 1) % 100 == 0:
        print(f'Epoch [{epoch+1}/{epochs}], Loss: {loss.item():.4f}')
model.eval()
with torch.no_grad():
    test_outputs = model(X_test_tensor)
    test_loss = criterion(test_outputs, y_test_tensor)
    print(f'Test MSE: {test_loss.item():.4f}')
augmented_data = augment_data(data, model, num_augmented=3000)
final_data = pd.concat([data, augmented_data], ignore_index=True)
print(final_data.head())
print(f'Toplam veri sayısı: {len(final_data)}")
final_data.to_excel("model_augmented_veri_pytorch.xlsx")

```

Bu kod bölümlere ayrılarak detaylı incelenirse şu şekilde açıklanabilir.

a) Kütüphanelerin İçe Aktarılması

```
import numpy as np
import pandas as pd
import torch
import torch.nn as nn
import torch.optim as optim
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
```

- NumPy: Sayısal işlemler için kullanılan bir kütüphane.
- Pandas: Veri analizi ve manipülasyonu için kullanılır.
- Torch: PyTorch kütüphanesi, derin öğrenme için.
- torch.nn: Sinir ağı bileşenleri için.
- torch.optim: Optimizasyon algoritmaları için.
- sklearn.model_selection: Veri setini eğitim ve test setlerine ayırmak için.
- sklearn.preprocessing: Veri ön işleme, burada kullanılmıyor ama genellikle veri ölçeklendirmede kullanılır.

b) Verinin Yüklenmesi

```
excel_file = 'veri.xlsx'
data = pd.read_excel(excel_file)
```

Bu kısımda, veri.xlsx adlı Excel dosyası okunur ve veriler bir Pandas DataFrame olarak data değişkenine atanır.

c) Veri Artırma Fonksiyonu

```
def augment_data(df, model, noise_level=0.1, num_augmented=100):
    augmented_data = pd.DataFrame(columns=df.columns)
```

- augment_data: Veriyi artırmak için bir fonksiyon tanımlanıyor.
- df: Girdi olarak veri çerçevesi alır.
- model: Eğitilmiş model referansı.
- noise_level: Eklenen gürültünün standart sapması.
- num_augmented: Üretilen artırılmış veri sayısı.

```
    for i in range(num_augmented):
```

```
row = df.sample(n=1).copy()
```

Her döngüde, df veri çerçevesinden rastgele bir satır seçilir.

```
row["A"] += np.random.normal(0, noise_level)
```

```
row["B"] += np.random.normal(0, noise_level)
```

```
row["C"] += np.random.normal(0, noise_level)
```

Seçilen satıra, A, B, ve C sütunlarına belirli bir gürültü eklenir. Bu, veri çeşitliliğini artırır.

```
if row["A"].item() < 0:
```

```
    row["A"] = 0
```

Gürültü ekledikten sonra, negatif değerler sıfıra ayarlanır. Bu, fiziksel olarak geçerli veri sağlamak içindir.

```
input_tensor = torch.tensor(row[["A", "B", "C"]].values, dtype=torch.float32)
```

```
with torch.no_grad():
```

```
    row["X"] = model(input_tensor).item()
```

Seçilen ve gürültü eklenmiş satır, PyTorch tensorüne dönüştürülür.

Model ile tahmin yapılarak X sütununa atanır. torch.no_grad() ile gradyan hesaplaması yapılmaz, bu sayede daha hızlı çalışır.

```
augmented_data = augmented_data._append(row, ignore_index=True)
```

Oluşturulan artırılmış veri, yeni DataFrame'e eklenir.

d) Veri Setinin Hazırlanması

```
X = data.iloc[:, :3]
```

```
y = data.iloc[:, -1]
```

- X: Girdi değişkenlerini (ilk üç sütun) alır.
- y: Çıktı değişkenini (son sütun) alır.

e) Eğitim ve Test Setlerine Ayırma

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,  
random_state=42)
```

Veri, eğitim ve test setlerine %80-20 oranında bölünür.

f) Tensorlere Dönüştürme

```
X_train_tensor = torch.tensor(X_train.values, dtype=torch.float32)
```

```
y_train_tensor = torch.tensor(y_train.values, dtype=torch.float32).view(-1, 1)
```

```
X_test_tensor = torch.tensor(X_test.values, dtype=torch.float32)
```

```
y_test_tensor = torch.tensor(y_test.values, dtype=torch.float32).view(-1, 1)
```

- Veriler PyTorch tensorlerine dönüştürülür. `view(-1, 1)` ile boyutları ayarlanır.

g) Yapay Sinir Ağı Modeli

```
class NeuralNet(nn.Module):
```

```
    def __init__(self):
```

```
        super(NeuralNet, self).__init__()
```

```
        self.fc1 = nn.Linear(3, 64)
```

```
        self.fc2 = nn.Linear(64, 32)
```

```
        self.fc3 = nn.Linear(32, 1)
```

```
    def forward(self, x):
```

```
        x = torch.relu(self.fc1(x))
```

```
        x = torch.relu(self.fc2(x))
```

```
        x = self.fc3(x)
```

```
        return x
```

- NeuralNet: Sinir ağı modelini tanımlar.
- `init`: Katmanları tanımlar.
- `forward`: Veriyi ağdan geçirir. Her katmanda ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılır.

h) Modelin Oluşturulması

```
model = NeuralNet()
```

Model oluşturulur.

i) Kayıp Fonksiyonu ve Optimizasyon

```
criterion = nn.MSELoss()
```

```
optimizer = optim.Adam(model.parameters(), lr=0.001)
```

- `criterion`: Kayıp fonksiyonu olarak ortalama kare hata (MSE) seçilir.
- `optimizer`: Adam optimizasyon algoritması seçilir.

j) Modelin Eğitilmesi

```
epochs = 3000
```

```
batch_size = 32
```

```
for epoch in range(epochs):
```

```
    model.train()
```

```
    optimizer.zero_grad()
```

```
    outputs = model(X_train_tensor)
```

```
    loss = criterion(outputs, y_train_tensor)
```

```
    loss.backward()
```

```
    optimizer.step()
```

```
    if (epoch + 1) % 100 == 0:
```

```
        print(f'Epoch [{epoch+1}/{epochs}], Loss: {loss.item():.4f}')
```

Model belirtilen sayıda (3000) epoch boyunca eğitilir.

- Gradyanlar sıfırlanır.
- Model tahminleri yapılır.
- Kayıp hesaplanır ve geriye yayılım yapılır.
- Ağırlıklar güncellenir.

Her 100 epoch'ta bir kayıp değeri yazdırılır.

k) Model Performansını Değerlendirme

```
model.eval()
```

```
with torch.no_grad():
```

```
    test_outputs = model(X_test_tensor)
```

```
    test_loss = criterion(test_outputs, y_test_tensor)
```

```
    print(f'Test MSE: {test_loss.item():.4f}')
```

Model test moduna alınır.

Test seti üzerinde tahminler yapılır ve kayıp değeri hesaplanır.

l) Veri Artırma Uygulama

```
augmented_data = augment_data(data, model, num_augmented=3000)
```

Daha fazla veri üretmek için `augment_data` fonksiyonu çağrılır.

m) Orijinal ve Artırılmış Verileri Birleştirme

```
final_data = pd.concat([data, augmented_data], ignore_index=True)
```

```
print(final_data.head())
```

```
print(f"Toplam veri sayısı: {len(final_data)}")
```

```
final_data.to_excel("model_augmented_veri_pytorch.xlsx")
```

Orijinal ve artırılmış veri birleştirilir.

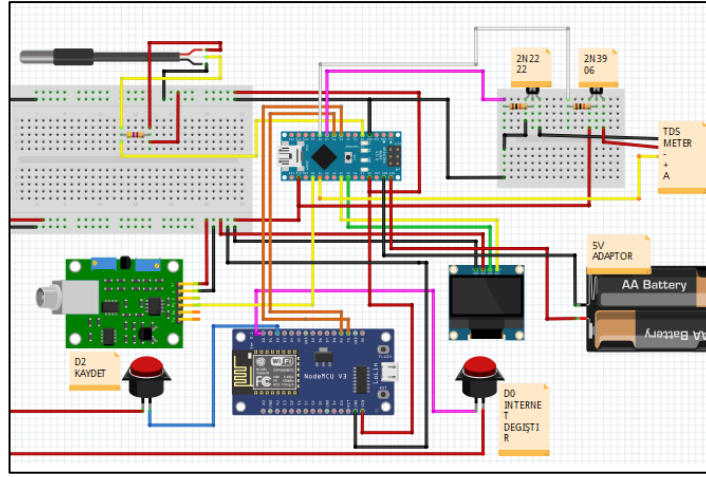
Sonuç yazdırılır ve yeni veri seti bir Excel dosyası olarak kaydedilir.

3.5. EC Ölçer Elektronik Aygıtın (Uzaktan Eğitim Veri Toplama Cihazı) Üretimi

Tez çalışması sonucunda ortaya konulacak olan elektronik sistem iletkenlik ölçümünü yapacak ve uzaktan veri okumaya olanak sağlayacaktır. Üretilen sistem aynı zamanda Firebase iletişim prosedürü kullanılarak internet üzerinde bulut ortamıyla haberleşebilmektedir. Sistem üretiminde kullanılan elektronik parçalar sırasıyla aşağıda belirtilmiştir.

- TDS Metre
- pH metre
- Nodemcu ESP8266 Wifi
- Arduino nano
- 2N2222 transistör
- DS18B20 Sıcaklık Sensörü
- SSD1306 Oled Ekran
- Bakır Plaket

Sistemin “Fritzing üzerinde çizilmiş örnek şeması Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Üretilen EC ölçerin Fritzing üzerinde çizimi

Cihazın üzerinde 3 adet prop bulunmaktadır. En küçük olan siyah kablo "SICAKLIK" için kullanılmaktadır. Beyaz olan kablo TDS Metredir. Sıvının pim değişimini ölçmek için kullanılmaktadır. Siyah kablosu olan ve en büyük prop "pH" ölçmek için kullanılmaktadır. Bu proplardan sıcaklık ve TDS sisteme iç kısımdan bağlıdır. PH ölçer ise sökölüp takılabilmektedir.

Üretilen sistemin haberleşmesi ESP8266 Wi-Fi modülü kullanılarak geliştirilmiştir. ESP8266, düşük maliyetiyle nesnelerin interneti (IoT) projelerinde yaygın olarak tercih edilen bir çözümdür. Maliyeti düşük olmasına rağmen, yüksek işlem gücü ve Wi-Fi bağlantısı gibi güçlü özellikler sunar. Bu, özellikle büyük ölçekli projelerde maliyet-etkin çözümler gerektiren uygulamalar için idealdir. Ayrıca, bu modül enerji verimliliği açısından da optimize edilmiştir, böylece düşük güç tüketimi ile uzun süreli operasyonlar sağlayabilir. ESP8266'nın en önemli avantajlarından biri, dahili Wi-Fi modülü sayesinde kablosuz internet erişimini kolayca sağlamasıdır. Bu özellik, cihazların herhangi bir ek donanıma gerek kalmadan internete bağlanmasını ve veri alışverişi yapmasını mümkün kılar. Wi-Fi desteği, IoT uygulamalarında cihazların bulut sistemleriyle haberleşmesini sağlayarak veri toplama, izleme ve kontrol süreçlerini kolaylaştırır. IEEE 802.11 b/g/n standartlarını destekleyen ESP8266, mevcut Wi-Fi ağlarına hızlı ve güvenli bir şekilde bağlanabilir. Kompakt boyutları ve modüler yapısı sayesinde, sınırlı fiziksel alanların bulunduğu projelere kolayca entegre edilebilmektedir. Küçük boyutu, taşınabilir cihazlardan endüstriyel sistemlere kadar geniş bir yelpazede kullanılmasına olanak tanır. Ayrıca, minimal devre tasarımı ve

entegre Wi-Fi anteni sayesinde, geliştiricilerin cihazı karmaşık donanım tasarımları yapmadan projelerine ekleyebilmeleri mümkündür. ESP8266, dünya genelinde geniş bir geliştirici topluluğuna sahiptir ve bu sayede zengin bir açık kaynak kütüphanesi sunar. Arduino IDE gibi yaygın olarak kullanılan platformlarla uyumlu olması, yazılım geliştirme sürecini hızlandırır ve kolaylaştırır. Geliştiriciler, mevcut kütüphanelerden faydalanarak cihazın programlanmasını ve çeşitli IoT protokolleri ile entegrasyonunu hızlı bir şekilde gerçekleştirebilirler. Bu geniş ekosistem, yazılım hatalarının çözümünü hızlandırır ve proje geliştirme sürecindeki teknik destek ihtiyacını minimize eder. ESP8266, yalnızca Wi-Fi ile sınırlı kalmayıp çeşitli IoT protokollerini de destekler. MQTT, HTTP ve WebSockets gibi popüler protokoller ile veri iletimini mümkün kılar. Bu sayede ESP8266, farklı uygulamalarda veri iletim süreçlerini optimize eder ve cihazlar arası haberleşmenin daha verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Ayrıca, TCP/IP yığınına destekleyerek geniş bir ağ bağlantı imkânı sunar. IoT projelerinde düşük enerji tüketimi, batarya ile çalışan cihazlar için kritik öneme ve uyku modları gibi enerji tasarrufu sağlayan özelliklere sahiptir. Bu modüller sayesinde, cihaz yalnızca gerekli olduğunda çalıştırılarak güç tüketimi minimum seviyede tutulabilir. Düşük güç tüketimi, enerji verimli sistemlerin tasarımında önemli bir avantaj sunar ve bu sayede uzun süreli çalışma gerektiren projelerde kullanılabilir. ESP8266'nın modüler yapısı ve geniş protokol desteği, projelerin kolayca ölçeklenebilmesini sağlar. Bu modül hem küçük ölçekli hobi projelerinde hem de büyük ölçekli endüstriyel IoT uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir. Yüksek ölçeklenebilirlik sayesinde, daha fazla sensör veya cihaz ekleyerek sistemin büyütülmesi mümkün olur. ESP8266, 32-bit Tensilica L106 işlemcisi ile çalışır ve 80 MHz saat hızına kadar ulaşabilir. Bu, yüksek işlem gücü gerektiren IoT uygulamalarında bile başarılı sonuçlar vermesini sağlar. Ayrıca, bu modül C, Lua ve Python gibi popüler programlama dilleriyle uyumlu olup, geliştiricilere geniş bir yazılım geliştirme seçenekleri sunmaktadır. Geliştirilen sistemin ESP8266 ile haberleşmesi için gerekli yazılım şu şekildedir.

```
#include "FirebaseESP8266.h"  
#include <ESP8266WiFi.h>  
#include <NTPClient.h>  
#include <WiFiUdp.h>
```

```

#include <WiFiManager.h>
WiFiManager wm;
bool res; //WiFiManager oto bağlantı durumu takibi için;
int internetLed = 5;
int internetDegistirButton = 16;
int tempInternet = 0;
int kaydetButton = 4;
int tempKaydet = 0;
#include <EasyButton.h> //NODEMCU üzerindeki Flash butonunu kullanmak için
#define BUTTON_PIN 0
EasyButton button(BUTTON_PIN);
void onPressed(){
  Serial.println("Butona basıldı");
  WiFi.disconnect(true);
  delay(2000);
  wm.resetSettings();//Hafızadaki ağı unuttuyor
  delay(3000);
  ESP.reset();//NODEMCU yeniden başlatılıyor
  delay(5000);
}
WiFiUDP ntpUDP;
NTPClient timeClient(ntpUDP, "pool.ntp.org"); //İnternette canlı saat ve tarih bilgisini alabilmek için
String weekDays[7] = {"Sunday", "Monday", "Tuesday", "Wednesday", "Thursday", "Friday", "Saturday"};
String months[12]={"January", "February", "March", "April", "May", "June", "July", "August", "September", "October", "November", "December"};
//Firebase veritabanı adresi, Token bilgisi
#define FIREBASE_HOST "elektroiletkenlik-cihazı-default-rtdb.firebaseio.com"
#define FIREBASE_AUTH "KrdVKwj2Y72AGszeiL30mcXM4dyfJSdO2YgdzbSS"
FirebaseData veritabanım;
String sensor_data;
boolean Sr;

```

```

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  pinMode(internetLed, OUTPUT);
  pinMode(internetDegistirButton, INPUT);
  pinMode(kaydetButton, INPUT);
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  res = wm.autoConnect("ElektroiletkenlikModulu", "1234567890"); //Burası
  NODEMCU bir modem olduğunda ona bağlanmak için
  if (!res){
    Serial.println("Bağlantı Sağlanmadı");
  }
  else{
    Serial.println("Bağlantı Kuruldu");
    Firebase.begin(FIREBASE_HOST, FIREBASE_AUTH); //Bağlantı kurulduğunda
    Server'a bağlanıyor
  }
  button.begin();
  button.onPressed(onPressed); //Eğer FLASH butonuna basılırsa ne olacağı
  fonksiyonunu çağırıyor (en yukarıdaki fonksiyon)
  timeClient.begin(); //Saat ve tarih bilgisini aldıktan sonra zamanlıyıcı otomatik saati
  hesaplıyor.
  timeClient.setTimeOffset(3600*3); //GMT+3 Istanbul Zaman dilimi ayarı
}
void loop()
{
  zamani_getir(); //Aşağıda bulunan zaman fonksiyonu ile anlık zaman ve tarih bilgisi
  getirme
  button.read(); //NODEMCU üzerinde bulunan FLASH düğmesini buradan okuyoruz
  tempInternet = digitalRead(internetDegistirButton);
  if(tempInternet == HIGH){
    digitalWrite(internetLed, LOW);
    WiFi.disconnect(true);

```

```

delay(2000);
wm.resetSettings();//Hafızadaki ağı unuttuyor
delay(3000);
ESP.reset();//NODEMCU yeniden başlatılıyor
delay(5000);
}
tempKaydet = digitalRead(kaydetButton);
if(tempKaydet == HIGH){
  if(Firebase.setBool(veritabanim, "/kayit", true)) //Kayıt Etme
  { //bağlantı başarılı ve veri geliyor ise
    delay(3000);
  }else{
    //hata varsa hata mesajı ve nedeni yazdırılıyor
    //Serial.print("Veri gönderilemedi, ");
    //Serial.println(veritabanim.errorReason());
  }
}
else{
  if(Firebase.setBool(veritabanim, "/kayit", false)) //Kayıt Etme
  { //bağlantı başarılı ve veri geliyor ise
    delay(1000);
  }else{
    //hata varsa hata mesajı ve nedeni yazdırılıyor
    //Serial.print("Veri gönderilemedi, ");
    //Serial.println(veritabanim.errorReason());
  }
}
bool Sr = false; //Arduino'dan gelen verilerin okunması için
String sensor_data, values; //Arduino'dan gelen veriler bunlara kaydedilir.
while(Serial.available()){ //TX-RX pinlerini kontrol eder.
  sensor_data = Serial.readString(); //TX-RX pinlerinden gelen verileri okur ve
  kaydeder.
  Sr=true; //Veri okuma tamamlandı.

```

```

}
if(Sr==true){
    values = sensor_data; //Gelen verinin hasar görmemesi için başka bir değişken ile
verileri ayırdım.
    //Serial.println(values);
    int index_1 = values.indexOf(','); //Gelen veride, sıcaklık verisinin son byte bilgisi
    int index_2 = values.indexOf(',', index_1+1); //Gelen veride, ph verisinin son byte
bilgisi
    int index_3 = values.indexOf(',', index_2+1); //Gelen veride, ec verisinin son byte
bilgisi
    String veri_sicaklik = values.substring(0, index_1); //Gelen veriden indexler
kullanarak sıcaklık verisini ayrıştırma
    String veri_ph = values.substring(index_1+1, index_2); //Gelen veriden indexler
kullanarak ph verisini ayrıştırma
    String veri_ec = values.substring(index_2+1); //Gelen veriden indexler kullanarak
ec verisini ayrıştırma
    Firebase.setString(veritabanim, "/data_sicaklik", veri_sicaklik); //Veritabanına
sıcaklık verisinin eklenmesi
    Firebase.setString(veritabanim, "/data_ph", veri_ph); //Veritabanına ph verisinin
eklenmesi
    Firebase.setString(veritabanim, "/data_ec", veri_ec); //Veritabanına ec verisinin
eklenmesi
}
}
void zamani_getir(){
    timeClient.update(); //En son kaydedilen zamanın güncellenmesi
    time_t epochTime = timeClient.getEpochTime();
    String formattedTime = timeClient.getFormattedTime();
    struct tm *ptm = gmtime ((time_t *)&epochTime);
    int monthDay = ptm->tm_mday;
    int currentMonth = ptm->tm_mon+1;
    int currentYear = ptm->tm_year+1900;
    //Print complete date:

```

```

String currentDate = String(currentYear) + "-" + String(currentMonth) + "-" +
String(monthDay);
if(Firebase.setString(veritabanim, "/tarih", currentDate)) //Tarih bilgisinin kayıt
edilmesi
{
//bağlantı başarılı ve veri geliyor ise
//Serial.println("Veri gönderimi başarılı");
}else{
//hata varsa hata mesajı ve nedeni yazdırılıyor
//Serial.print("Veri gönderilemedi, ");
//Serial.println(veritabanim.errorReason());
}
if(Firebase.setString(veritabanim, "/saat", formattedTime)) //Saat bilgisinin kayıt
edilmesi
{
//bağlantı başarılı ve veri geliyor ise
digitalWrite(internetLed, HIGH);
//Serial.println("Veri gönderimi başarılı");
}else{
digitalWrite(internetLed, LOW);
//hata varsa hata mesajı ve nedeni yazdırılıyor
//Serial.print("Veri gönderilemedi, ");
//Serial.println(veritabanim.errorReason());
}
}
// firebase veritabanına veri göndermek için Firebase.setInt komutu kullanılabilir.
//if(Firebase.setInt(veritabanim, "/led", a))
// {
// //bağlantı başarılı ve veri geliyor ise
// Serial.println("Int tipinde veri gönderimi başarılı");
// }else{
// //hata varsa hata mesajı ve nedeni yazdırılıyor
// Serial.print("Int tipindeki veri gönderilemedi, ");
// Serial.println(veritabanim.errorReason());
// }

```

```
//if(Firebase.getString(veritabanim, "/led"))//Alınacak veri tipine göre getInt, getBool,
getFloat, getDouble, getString olarak kullanılabilir.
// {
// //bağlantı başarılı ve veri geliyor ise
// //Serial.print("String tipinde veri alımı başarılı, veri = ");
// //Serial.println(veritabanim.stringData());
// if (veritabanim.stringData()=="1"){
//   digitalWrite(D2,HIGH);
// }
// else {
//   digitalWrite(D2,LOW);
// }
// }else{
// //hata varsa hata mesajı ve nedeni yazdırılıyor
// Serial.print("Str verisi çekilemedi, ");
// Serial.println(veritabanim.errorReason());
// }
```

Bu kodlama ile Wi-Fi üzerinden haberleşmesi sağlanan sistem uzaktan veri ölçme ve okuma sistemi özellikle üniversitelerde uzaktan eğitim süreçlerinde, uzaktan anlık veri toplayabilmek için tasarlanmıştır. Bu sebeple mümkün olduğunca taşınabilir, kolay yerleştirilebilir ve kolayca bağlantısı yapılabilir şekilde üretilmiştir. Örneğin; hidroponik tarım sisteminde lisans veya lisansüstü bir akademik çalışma gerçekleştirmek isteyen kişi uzaktan eğitim durumuma tekrar geçildiği takdirde laboratuvarına gitmeden kurmuş olduğu hidroponik tarım sistemi üzerine cihazı yerleştirerek aşağıda anlatıldığı şekilde kablosuz ağ bağlantısı üzerinden Android bir cihaz üzerinden verilerini okuyabilecek hatta kaydedebilecektir. Sistemi kullanmak isteyen bir öğrenci, akademisyen veya üretici için uygulaması gereken yöntemler oldukça basittir.

İlk olarak, internet bağlantısının sağlanması için cihaz üzerindeki "İNTERNET SIFIRLA" butonuna yaklaşık 5 saniye süreyle basılı tutulur. Bu işlem, cihazın fabrika ayarlarına dönmesini ve yeni bir bağlantı kurabilmesini sağlar. Daha sonra,

kullanıcının mobil cihazından Wi-Fi ayarlarına girilerek "ElektroİletkenlikModülü" adlı ağa bağlanılır. Bağlantı başarılı olduğunda, cihaz otomatik olarak bir yapılandırma sayfası açar. Eğer sayfa otomatik olarak açılmazsa, mobil cihazın Wi-Fi ayarlarından ilgili ağa bağlı olduğunuzu doğruladıktan sonra, ağın yanında bulunan ayarlar simgesine tıklanarak "Yönlendiriciyi Ayarla" seçeneği seçilir. Bu işlem sonucunda ekranda mevcut Wi-Fi ağlarının bir listesi görüntülenecektir. Bağlanmak istenilen ağ seçildikten sonra, ilgili ağın parolası girilerek bağlantı sağlanır. Bundan sonra herhangi bir ek işlem yapılmaksızın, cihaz üzerindeki "İNTERNET" LED'inin yeşil yanıp yanmadığı kontrol edilir. Eğer LED yanmıyorsa, yani bağlantı başarısız olmuşsa, yönlendirici ayarlarına dönülerek işlemler tekrarlanır.

Veri ölçüm süreci, cihazın ortam verilerini anlık olarak kaydetmesini içerir. Ölçülen veriler, cihaz üzerindeki ekranda 2 ila 4 saniyelik aralıklarla görüntülenir ve aynı zamanda veri tabanına aktarılır. İstendiğinde, belirli verilerin kaydedilmesi için cihaz üzerindeki "KAYDET" butonuna uzun süre basılabilir ya da mobil uygulama üzerinden aynı işlevi gören "KAYDET" butonu kullanılabilir. Cihazın tüm bu süreçte ürettiği veriler, sistemde saklanarak daha sonra analiz edilebilir hale gelir. Üretilen sistemin görsel örnekleri, Şekil 3.9'da gösterilmektedir ve bu şekiller, cihazın kullanım aşamalarını görsel olarak desteklemektedir.



Şekil 3. 9. EC sonuçlarını buluta gönderen elektronik sistem

Geliştirilen iletkenlik, sıcaklık ve pH ölçüm sistemi, bulut ile veri alışverişini "Firebase" protokolü aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Firebase, Google tarafından mobil ve web tabanlı uygulamalar geliştirmek amacıyla sunulan ücretsiz ve çok yönlü

bir platformdur. Özellikle birden fazla platformda kullanıcı girişlerinin olduğu ve verilerin depolandığı yazılım projeleri için oldukça faydalı bir çözüm sunmaktadır. 2022 yılı itibarıyla bulut bilişim teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte, büyük ölçekli verilerin internet üzerinde depolanması ve bu verilere erişim giderek daha kolay ve etkin hale gelmiştir. Günümüzde yazılım projeleri, kendilerine özgü programlama dilleri ve bağlantı protokolleri ile tasarlanmaktadır. Özellikle sunucu tarafı (server-side) uygulamalarda verilerin güvenli bir şekilde saklanması, gerektiğinde kullanıcıya sunulması ve veri işleme süreçlerinin verimli şekilde yönetilmesi, yazılım geliştiricilerin karşılaştığı temel zorluklar arasındadır. Bu noktada Firebase, bulut tabanlı depolama ve veri yönetimi süreçlerine yönelik bir çözüm yolu sunmaktadır.

Firestore, sunucu tarafı kod yazma ihtiyacını ortadan kaldırarak uygulama yönetimi, veri takibi, depolama ve bildirim gönderme gibi temel işlevleri sağlamakta, böylece geliştiricilere büyük kolaylık sağlamaktadır. Platformun sunduğu "Realtime Database", "Notification" ve "Remote Config" gibi özellikler, verilerin gerçek zamanlı olarak işlenmesini ve senkronize edilmesini mümkün kılmakta ve her bir uygulama için farklı erişim imkanları sunmaktadır. Bulut bilişim altyapısı, büyük verilerin (big data) işlenmesi ve depolanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle Endüstri 4.0 devrimiyle birlikte, bulut tabanlı sistemlerin önemi her geçen gün artmakta ve ileriye dönük olarak daha yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir. Firestore'in sunduğu bulut tabanlı özellikler, bu alanda yapılan geliştirmelerin ve veri yönetimi süreçlerinin daha verimli ve kullanıcı dostu olmasına katkı sağlamaktadır. Firestore'in avantajlarından biri, veri tabanı işlevlerinde gerçek zamanlı güncellemeler yapabilmesidir. Firestore kullanıldığında, klasik HTTP yerine WebSocket üzerinden bağlantı kurulmakta ve böylece veri tabanında yapılan güncellemeler anında diğer kullanıcılarla senkronize edilmektedir. Bu gerçek zamanlı senkronizasyon, özellikle çok kullanıcıli sistemlerde performans artışı sağlamak ve veri güncellemelerinin anında tüm kullanıcılar tarafından görülebilmesini mümkün kılmaktadır. Firestore, yazılım projelerinde sağladığı bu özelliklerle, büyük ölçekli verilerin yönetimi ve bulut tabanlı haberleşme ihtiyaçlarını karşılayan güçlü bir platform olarak öne çıkmaktadır. Bu tür teknolojiler, günümüzde ve gelecekte bulut bilişim geliştirme modelleri ve büyük veri yönetimi ile daha fazla entegre olarak geniş bir uygulama alanı bulacaktır.

Firestore Storage, uygulama geliştiricilere verilerini güvenli bir şekilde depolama ve yönetme imkânı sunan bir bulut tabanlı çözümler olarak öne çıkmaktadır.

Firestore Storage, sunucuya yüklenen dosyaların güvenliğini ve erişim izinlerini sağlamak amacıyla kendi geliştirilmiş güvenlik kurallarıyla birlikte gelir. Bu güvenlik kuralları, kullanıcıların veri paylaşım süreçlerini hassas bir şekilde kontrol etmelerine olanak tanıyarak, yetkisiz erişimlere karşı koruma sağlar. Ayrıca geliştiriciler, verilerin yüklenme ve depolanma süreçlerini optimize edebilir ve sistem üzerinde tam kontrol sağlayarak güvenliğini üst düzeyde tutabilirler. Bu, özellikle hassas veya büyük ölçekli verilerin bulut üzerinde saklanması gerektiğinde kritik bir avantajdır.

Firestore Authentication, kullanıcı doğrulama süreçlerini basitleştiren ve güvenli hale getiren bir araç olarak sunulmaktadır. Bu sistem, veri tabanına ve depolanan verilere erişim izinlerini kolayca kontrol etmenize olanak tanır. Firestore Authentication, gerçek zamanlı veri tabanı ve depolama servisleriyle entegre çalışarak, kullanıcıların kimlik doğrulama süreçlerinin sorunsuz bir şekilde yürütülmesini sağlar.

Kullanıcı verilerine güvenli erişim, modern uygulamaların en önemli gereksinimlerinden biridir ve Firestore bu ihtiyacı karşılayarak yetkisiz erişimi engellemeyi ve kullanıcı bilgilerini korumayı hedeflemektedir. Firestore Authentication; e-posta, şifre, telefon numarası, Google, Facebook gibi farklı kimlik doğrulama yöntemlerini destekleyerek esneklik sağlar.

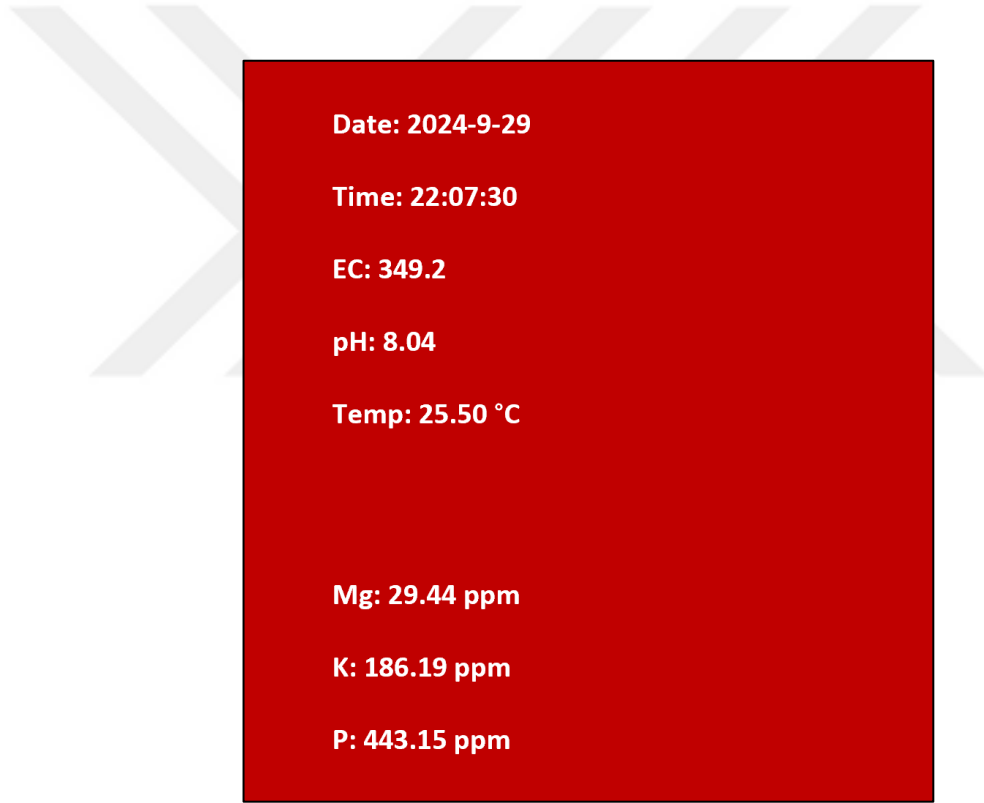
Firestore Functions, sunucusuz işlevlerin (serverless functions) yazılması ve dağıtılması sürecini kolaylaştıran güçlü bir araçtır. Sunucusuz mimariler, geliştiricilerin altyapı yönetimiyle uğraşmadan işlevsel kodlar yazıp çalıştırmalarına olanak tanır. Firestore Functions, belirli olaylar veya tetikleyiciler üzerine çalışan işlevleri destekleyerek, özellikle veri işleme, kullanıcı etkinliği izleme veya uygulama mantığını yürütme gibi görevlerin otomatikleştirilmesini sağlar. Bu işlevler, kullanıcıların sistem üzerindeki belirli etkinliklerine yanıt verebilir, arka plan görevlerini yürütebilir ve daha verimli uygulama süreçleri oluşturabilir. Geliştiriciler, sunucuların yönetimiyle ilgilenmeden işlevleri doğrudan Firestore üzerinde dağıtarak sistem performansını optimize edebilir.

Tez çalışmasında uzaktan okunan verilerin Android bir cihaz ile okunması için basit bir Android arayüzü tasarlanmıştır. Android arayüz tasarımında kullanılan en popüler araçlardan biri olan Unity'dir. Unity, kullanıcı dostu yapısı, geniş özellik yelpazesi ve çapraz platform desteği ile öne çıkmaktadır. Unity, Android uygulama geliştirme sürecinde önemli bir rol oynar ve geliştiricilere 2D/3D oyunlar, sanal gerçeklik uygulamaları ve çok daha fazlasını üretme imkânı sağlar. Unity, C# dili ile çalışan bir oyun motorudur. Geliştiricilere hem oyun hem de farklı uygulama türleri oluşturma imkânı sağlar. Android platformunda uygulama geliştirmek için bazı avantajlara sahiptir. Unity, Android'in yanı sıra iOS, Windows, Linux ve diğer platformlara destek verir. Geliştiriciler, bir kez yazılan kodu farklı platformlar için kolayca uyarlayabilir. Özellikle grafik performansında başarılıdır. Android cihazlar için optimize edilmiş 2D ve 3D grafikler sağlayarak kullanıcı deneyimini iyileştirir. Unity'nin Asset Store'unda bulunan geniş araç ve eklenti yelpazesi, geliştirme sürecini hızlandırır. Android programlama, Java/Kotlin gibi dillerle yapılabilsede bir Android projesi Unity ile başlatıldığında, arka planda çeşitli aşamalar işler. Android için temel yapılandırmaları otomatikleştirir ve cihazlarla uyumlu bir APK dosyası oluşturur. Android uygulamaları genellikle Java tabanlı olsa da Unity sayesinde C# ile programlama yapılır. Bu, özellikle nesne yönelimli programlama becerisi olan geliştiriciler için büyük bir avantajdır. Unity, Android cihazlar üzerinde doğrudan test etme ve hata ayıklama özellikleri sunar. Geliştiriciler, bir Android cihaza bağlanarak gerçek zamanlı testler gerçekleştirebilir. Mobil uygulama ve oyun geliştirme sürecini kolaylaştırdığı kadar bilimsel açıdan da çeşitli araştırmaların konusu olmuştur. Araştırmalar, Unity'nin özellikle bazı konularda avantaj sağladığını göstermektedir. Unity, Android cihazlar için optimize edilmiş grafik motorları sunarak performans sorunlarını en aza indirir. Bilimsel çalışmalar, Unity'nin Android cihazlar için uygun GPU ve CPU kullanımını sağladığını belirtmektedir. Unity'nin kullanım kolaylığı ve yaygın kaynak desteği, bilimsel eğitim süreçlerinde oyun tabanlı öğrenim materyalleri geliştirilmesine olanak tanır.

Bu alandaki çalışmalar, Unity'nin eğitim alanında etkileşimli ve eğlenceli içerikler sunma potansiyelini vurgulamaktadır. Unity, Android üzerinde yapay zekâ (AI) ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla simülasyonlar gerçekleştirme imkânı sunar.

Bilimsel araştırmalarda Unity kullanılarak sanal ortamlarda öğrenme algoritmalarının test edilmesi yaygındır.

Unity, Android uygulama geliştirme süreçlerinde bilimsel ve teknik olarak büyük avantajlar sunan bir platformdur. Platformlar arası destek, grafik motoru performansı ve geniş eklenti desteği, Android için uygulama geliştirenlere esneklik sağlar. Ayrıca, bilimsel çalışmalarında Unity'nin performans optimizasyonu ve eğitim alanında sunduğu fırsatlar önemli araştırma konularıdır ve Android programlama dünyasında sadece bir araç değil, aynı zamanda mobil cihazlarda gelişmiş uygulama geliştirme için geniş çapta kabul gören bir standarttır. Unity ile uzaktan haberleşme için üretilen Android arayüzüne ait ekran görüntüsü Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Android arayüzü ekran görüntüsü

Elektriksel iletkenlik ölçüm sisteminin kalibrasyonu Keysight 4285A Empedans Analizatörü sistemi kullanılarak yapılmıştır. Kalibrasyon için genel laboratuvar sistemlerinin iletkenlik kalibrasyonunda kullanılan KOH (potasyum hidroksit) çözeltisi üretilmiştir.

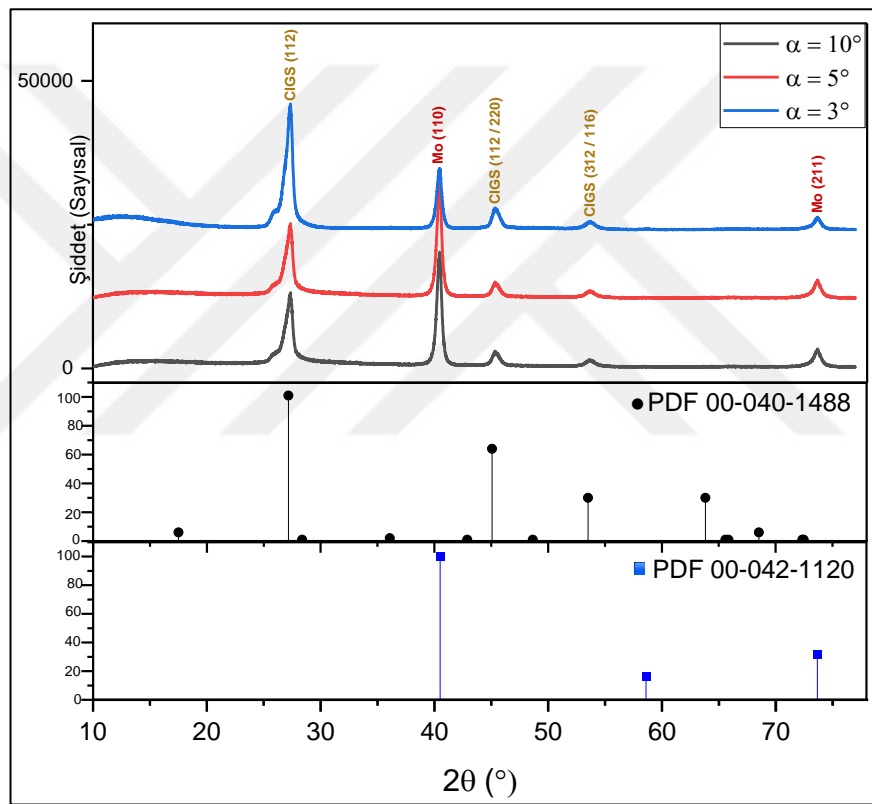
Çözelti için gerekli hesaplamalar ağırlık-hacimce olacak şekilde yapılmıştır. Kalibrasyon için %3'lük KOH çözeltisi hazırlanmıştır. 3g KOH, 100 ml ultra saf su içerisinde 1 saat karıştırılır. Çözelti saydam hale geldiğinde hazırdır. Bu çözelti laboratuvar çalışmalarında pH ve iletkenlik ölçüm cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan temel çözeltilerden biridir. Çözelti sonucunda Keysight 4285A Empedans Analizatörü sisteminde 16.258 mS iletkenlik elde edilmiştir. Üretilen sistemde ise aynı değer 32.874 mS olarak ölçülmüştür. Bu sebeple iki değer orantılanmış ve Keysight 4285A ölçümü ile üretilen EC ölçer ölçümü oranlanmış ve 0.494 değerinde bir iletkenlik katsayısı bulunmuştur. Bu değer iletkenlik ölçümü için kalibrasyon katsayısı olarak kullanılmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yb/CIGS/Mo Fotosensörün Yapısal ve Elektriksel Karakterizasyonu

Mo üzerine üretilmiş CIGS ince filmlerin yapısal özellikleri Cu K α ($\lambda = 0.15418$ nm) dalga boyunda GIXRD (Grazing Incidence X-Ray Diffraction) metoduyla araştırıldı. GIXRD ölçümü, CIGS yapısı içerisindeki kristal boyutların ve yönelim değişimlerinin tespit edilebilmesi için 3°, 5°, 10° geliş geliş açılarında 10°-78° (2 Θ) aralığında alınmış ve farklı geliş açılarında elde edilen GIXRD paternleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

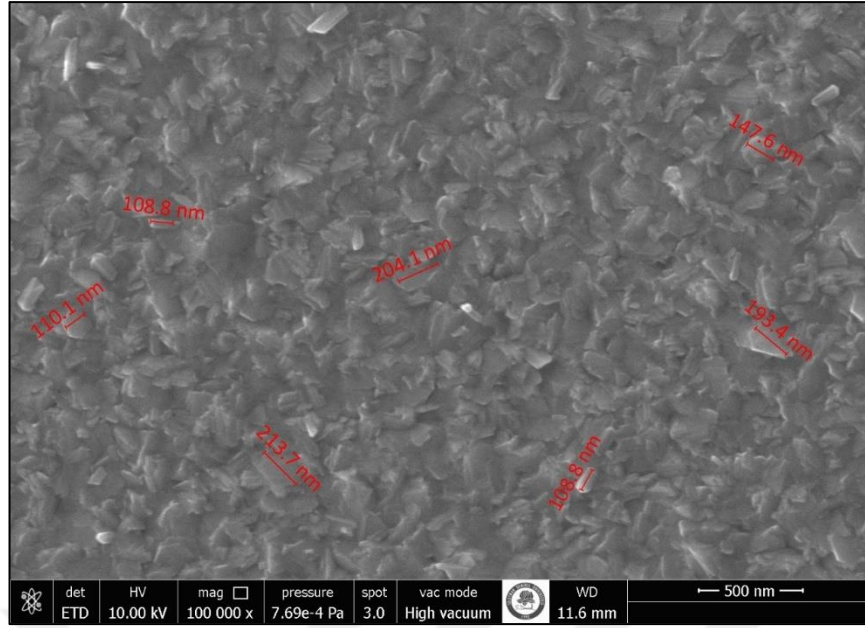


Şekil 4.1. Farklı geliş açılarındaki GIXRD grafikleri

Şekil 4.1’de görülen GIXRD analizinden CIGS yapısının farklı yönelimlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen XRD analizi PDF 00-040-1488 standardı ile eşleşmektedir. XRD paterninde 27.4°, 45.6°, ve 53.9° (2 Θ) açılarında görülen pikler CIGS yapısına aittir ve sırasıyla (112), (204/220), (312/116) kristal yönelimlerine karşılık gelmektedir. CIGS fazına ait yönelimlerin XRD verisi toplanan derinlik değiştiğçe birbirlerine göre yoğunluklarının değiştiği görülmektedir. Bunun sebebinin

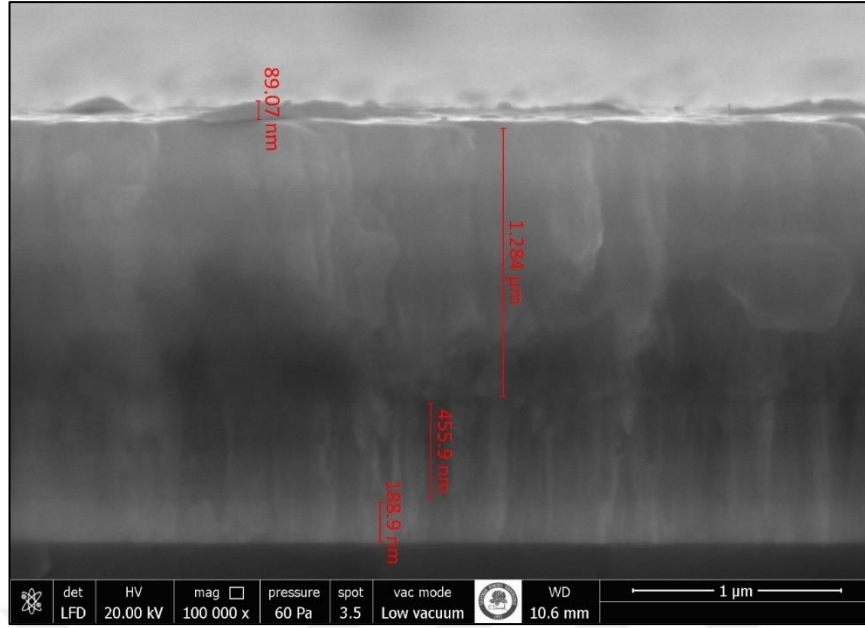
bütün CIGS hacmi içerisinde elementel oran değişiminin yapının yönelimi üzerine etkisi olduğu düşünölmüştür. Bununla beraber (112) yöneliminin, farklı geliş açılarında alınan bütün GIXRD paternlerinde ana pik olduğu görölmektedir. CIGS (112) ana pikinin kristal boyutları Debye Scherer denklemi ile 3°, 5° ve 10° geliş açlarına göre sırasıyla yaklaşık olarak 16.5 nm, 15.9 nm ve 15.8 nm olarak hesaplanmıştır. XRD paterninde görölen diğer piklerin Mo alt katmanına ait olduğu ve PDF 00-042-1120 standardı ile eşleştii belirlenmiştir. 40.5° ve 73.7° (2θ) açılarında görölen piklerin Mo malzemesinin sırasıyla (110) ve (211) yönelimlerine ait olduğu tespit edilmiştir. XRD ölçümünde geliş açısı arttıkça Mo katmanına yakın bölgelerden veri alınmaya başlanmış, bu sebeple Mo pikleri belirgin hale gelmiştir. Ayrıca CIGS (112) yöneliminin sol tarafında görölen görece küçük pikin $Cu_{2-x}Se_x$ fazının (112) yönelimini belirttiği tespit edilmiştir. Elde edilen GIXRD sonuçları daha önce yayınlanmış olan çalışmamız ile uyumludur [71].

Şekil 4.2’de 100 000 büyütmede CIGS ince filmlerin yüzeyinden alınmış FE-SEM görüntüleri görölmektedir. Elde edilen FE-SEM görüntülerinde yüzey üzerinde çok fazla kontrast farkının olmaması yüzeyin homojen şekilde kaplandığını göstermektedir. SEM görüntülerinde film yüzeyinde 108.8 nm ile 213.7 nm arasında farklı büyüklöklere sahip kümelenmelerin olduğu görölmektedir. Polikristal malzemelerde yüzeydeki kümelenmelerin 50 nm’den büyük olması, literatürde kristallenmenin iyi olduğu şeklinde yorumlanmaktadır [92-94].



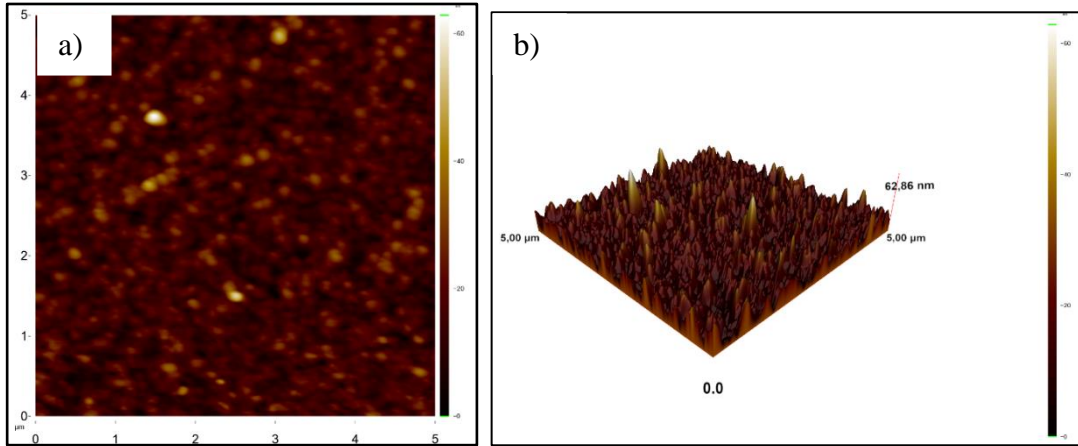
Şekil 4. 2. CIGS ince filmlerin yüzeyinden alınmış FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.3’de arka kontak olarak ikili katman Mo katmanı, fotoaktif katman olan CIGS katmanı ve yüzeye ön kontak olarak kaplanmış Yb malzemeleri açıkça görülmektedir. Aygıtın kesit görüntüsünden birinci ve ikinci Mo katmanlarının sırasıyla yaklaşık olarak 189 nm ve 456 nm kalınlıkta oldukları ve Mo katmanının toplam kalınlığının 645 nm olduğu tespit edilmiştir. İlk Mo katmanının ikinci Mo katmanından istenildiği gibi daha yoğun halde olduğu da kesit görüntüsünden açıkça görülmektedir. Mo üzerine depolanan fotoaktif CIGS katmanının 1.284 μm kalınlığa sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca nokta kontak olarak kaplanan Yb katmanının kalınlığının da yaklaşık olarak 89 nm olduğu Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Üretilen fotodetektörün kesitten alınmış FE-SEM görüntüsü ve katman kalınlıkları

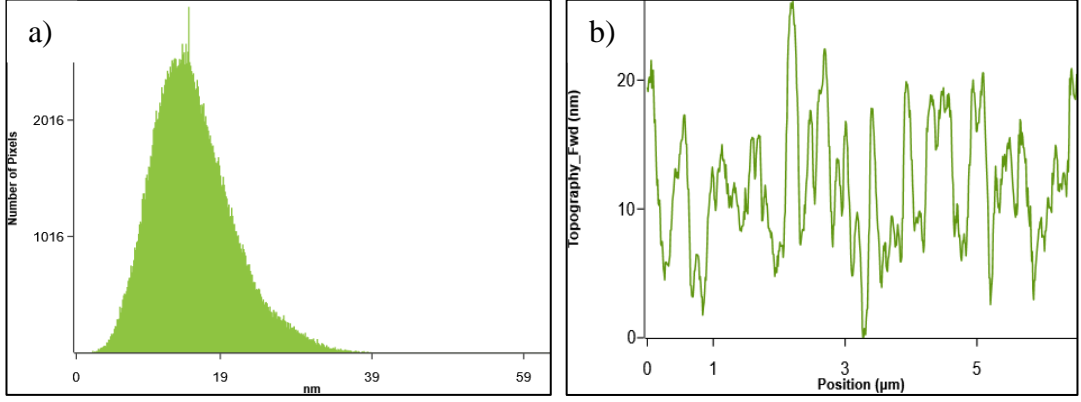
CIGS katmanının 2 ve 3 boyutlu AFM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.4'te verilmiştir. AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alan üzerinden alınmıştır. AFM görüntülerinden FE-SEM görüntülerini destekleyici şekilde yüzeyin homojen olduğu görülmektedir. Ayrıca ortalama yüzey pürüzlülüğü $R_{\text{avg}} = 4.40 \text{ nm}$ olduğu AFM sisteminden tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. a) 2D AFM görüntüsü, b) 3D AFM görüntüsü

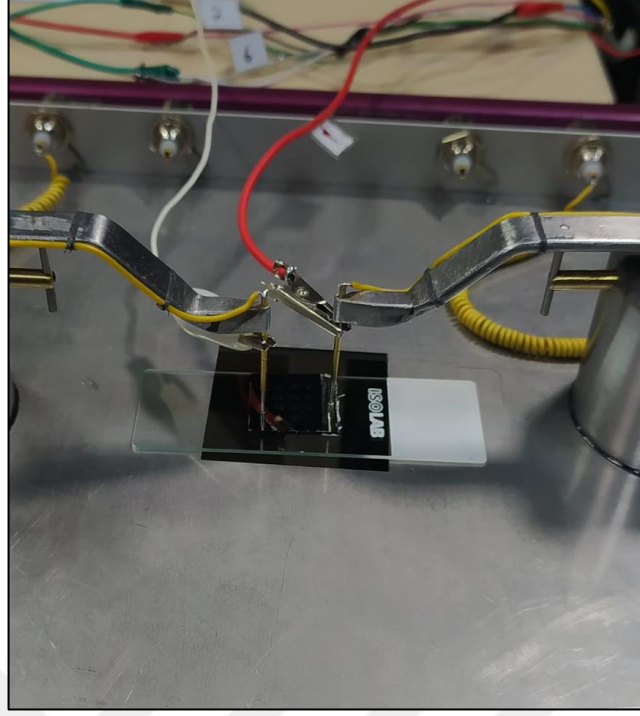
Şekil 4.5'de sırasıyla 2 boyutlu AFM görüntüsünün histogram eğrisi ve 2 boyutlu AFM görüntüsünde sol üst köşeden sağ alt köşeye kadar çizgi topoğrafyası grafiği verilmiştir. Elde edilen histogram eğrisinden yüzeyin tamamen olmasa bile görece homojen olduğu görülmektedir. Ayrıca çizgi topoğrafyası grafiğindeki maksimum ve

minimum noktaları farkının ortalama yüzey pürüzlülüğü olan 4.40 nm'ye yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.5. a) 2 boyutlu AFM görüntüsünün histogram eğrisi, b) 2 boyutlu AFM görüntüsünde çizgi topoğrafyası grafiği

CIGS filmi, sıcak nokta prob yöntemi ile p tipi olarak tanımlanmıştır. Üretilen Yb/CIGS cihazlarının elektriksel ve fotoelektrik ölçümleri, karanlık ve aydınlıkta -2 V ile 2 V aralığında Fytronix 9000 Solar I-V ve C-V ölçüm sistemi ile elde edilmiştir. Cihazların fotoelektrik ölçümleri güneş ışığı (300-1 000 nm) ve monokromatik kızılötesi ışık (747 nm) altında alınmıştır. Ölçümler sırasında cihazlar, güneş ışığı için 20-100 mW/cm² ve kızılötesi için sadece 100 mW/cm² aralığında 5 farklı ışık yoğunluğuna maruz bırakılmıştır. Böylece, iki farklı ışık kaynağı için bazı fiziksel parametreler ve foto tepki performansları değerlendirilecektir. Üretilen Yb/CIGS/Mo aygıtın elektriksel karakterizasyonu yapılırken elde edilmiş bir görüntüsü Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Yb/CIGS/Mo fotosensörün elektriksel ölçümlerinin alınma şekli

Bir metal ile p tipi bir yarı iletken arasında Schottky arayüzünün oluşması için, metalin iş fonksiyonu, yarı iletkenin iş fonksiyonundan daha küçük olmalıdır. Metal yarı iletken arayüzünde (MS) yeterli termal enerjiye sahip taşıyıcılar, ana iletim mekanizması termoiyonik emisyon olduğunda her iki yönden geçebilir. Schottky diyotunun akım-gerilim (I-V) denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Denklem (4.1), Denklem (4.2)) [91].

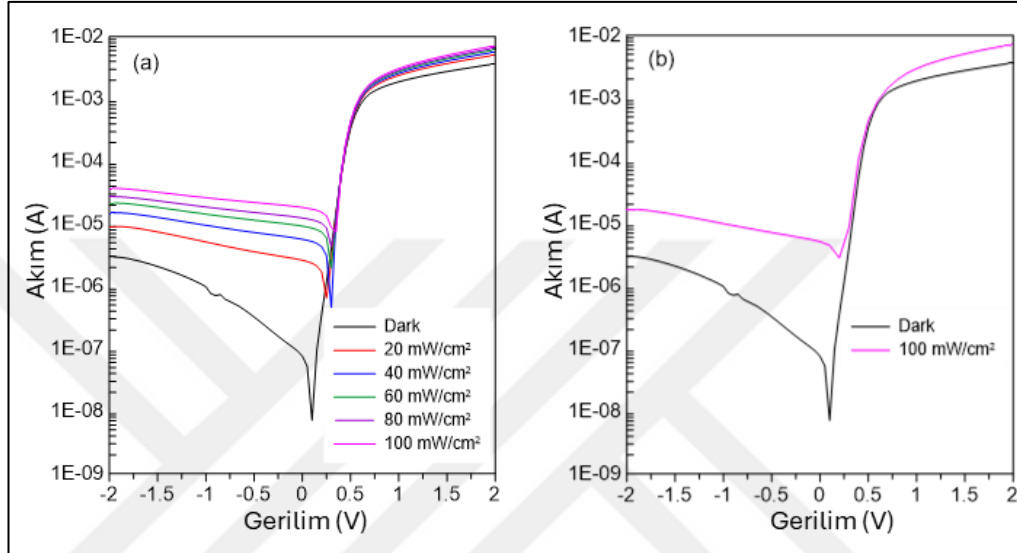
$$I = AJ_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right)\right] \quad (4.1)$$

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bo}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

Bu denklemlerde, q elektron yüküdür, J_0 ters doyma akım yoğunluğudur, n idealite faktörüdür, k Boltzmann sabitidir, A^* Richardson sabitidir (CIGS için $84 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$) ve ϕ_{bo} sıfır önyargı bariyer yüksekliğidir. A , $4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 'lik alandır. R_s seri dirençtir. J_0 değeri yarı logaritmik I-V karakteristiğinin düz çizgi kesişiminden belirlenebilir ve aynı karakteristiğin doğrusal kısmının eğimi idealite faktörünü verir. ϕ_{bo} , J_0 , A ve A^* değerleri kullanılarak Denklem (4.3) ile hesaplanabilir [89].

$$\phi_{bo} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^*T^2}{J_0}\right) \quad (4.3)$$

Cihazların karanlık ve aydınlık I-V karakteristikleri güneş ışığı için Şekil 4.7’de ve kızılötesi için Şekil 7b’de gösterilmiştir. I-V karakteristikleri yarı logaritmik bir ölçekte verilmiştir.



Şekil 4.7. Mo/CIGS/Yb fotosensörün I-V karakteristikleri a) güneş ışığı için farklı yoğunluklar, b) kızılötesi ışık

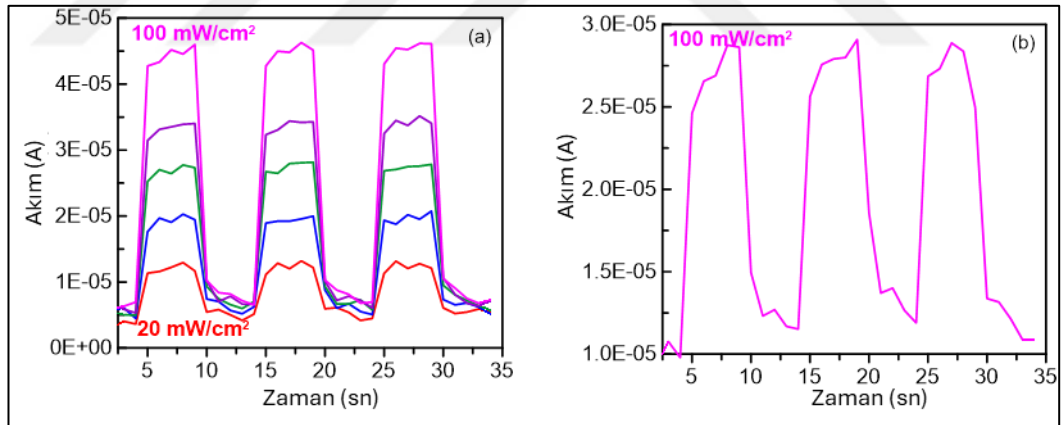
Çizelge 4.1’de hesaplanan idealite faktörleri, bariyer yükseklikleri ve doğrultma oranları verilmiştir. İdealite faktörleri karanlık, güneş ışığı ve kızılötesi için sırasıyla 1.55, 1.63 ve 1.97 olarak hesaplanmıştır. Metal ve yarı iletken arasında oksitlenmiş bir yalıtım tabakasının oluşumu, seri direnç etkisi ve arayüz durumları n değerinin birlikten büyük olmasına neden olur.

Çizelge 4.1. Yb/CIGS fotosensörün karanlık ve farklı ışıklar altında hesaplanan bazı diyot özellikleri

Işık kaynağı	Aydınlatma Yoğunluğu (mW/cm ²)	İdealite Faktörü	Bariyer Yüksekliği (eV)	Doğrultma Oranı (±2V)
Karanlık	–	1.55	0.84	1 252
Güneş Işığı	100	1.65	0.82	196
Kızılötesi Işık	100	1.97	0.78	438

Bu değerlerin literatürde var olan diğer çalışmalar ile kıyaslaması bu tezin çıktılarında biri olan yayında verilmiştir [91]. Doğrultma oranı (RR), belirli bir voltaj aralığında ileri ve geri önyargıda elde edilen maksimum akımların oranı olarak ifade edilebilir. Bu oran, doğrultucu diyotun kalitesinin bir göstergesidir. Tablo 1'den görülebileceği gibi, karanlıktaki RR, aydınlatma değerlerinden daha büyüktür. Bu beklenen bir durumdur çünkü karanlıktaki sızıntı akımı, aydınlatma altındaki akımdan çok daha düşüktür. Ancak güneş ışığı kızılötesi ve diğer dalga boylarını içerdiğinden kızılötesinden daha fazla elektronu uyarır, bu nedenle Tablo 2'de görüldüğü gibi güneş ışığının RR'sinin kızılötesinden daha düşük olması beklenir. RR değerleri karanlık, güneş ışığı ve kızılötesi için sırasıyla 1 252, 196 ve 438 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler literatürdeki birçok çalışmadan daha iyidir [91]. Işığın etkisi nedeniyle fotodiyotların bariyer yüksekliği değerinde bir azalma olduğu görülmektedir.

Cihazların fotoakım ölçümleri güneş ışığı ve kızılötesi için sırasıyla Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Açma-Kapama süresi 5 saniyede tutulmuştur. Ölçümler -2 V'luk ters önyargı altında alınmıştır.



Şekil 4.8. Zaman bağımlı fotoakım çizimleri (I-t), a) güneş ışığı için farklı yoğunluklar, b) kızılötesi ışık

Şekil 4.8'de görülebileceği gibi, fotoakım değerleri ışık açıldığında hızla maksimum değerine ulaşır ve ışık açık kaldığı sürece dengede kalır. Maksimum fotoakım değerleri güneş ışığının yoğunluğuna bağlı olarak 100-450 mA aralığında değişir ve kızılötesi için yaklaşık 250 mA'dır. Bu sonuç, ışık fotonlarının taşıyıcılar tarafından iyi emildiğini ve eşdeğer bir fotoakım oluşturduğunu göstermektedir. Işık yoğunluğu arttıkça, serbest yük taşıyıcılarının sayısı da artar. Işık kapatıldığında, fotoakım değeri

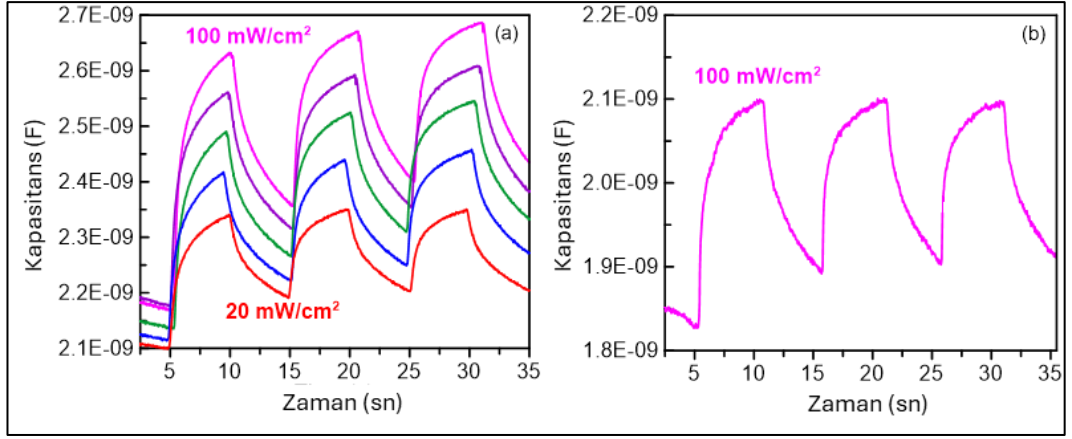
hızla başlangıç değerine döner. Bunun nedeni, ışık kapatıldığında yük taşıyıcılarının derin seviyelerde yakalanması veya tuzağa düşürülmesidir [91]. Zamana bağlı akım grafikleri incelendiğinde, yükselme ve azalma sürelerinin güneş ışığı için kızılötesinden daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, güneş ışığının yoğunluğu arttıkça yükselme ve azalma süreleri azalmaktadır. Bir fotodiyotun duyarlılığı (R), birim güç yoğunluğu başına üretilen fotoakım miktarı olarak tanımlanabilir. Öte yandan, algılama (D^*), üretilen foto cihazın zayıf optik sinyalleri algılama yeteneği hakkında fikir verir. Fotodiyotların R ve D^* değerleri Denklem (4.4) ve Denklem (4.5) kullanılarak hesaplanır [34,35].

$$R = \frac{I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}}{P_{\text{in}} A} \quad (4.4)$$

$$D^* = \frac{R}{(2qI_{\text{dark}}/A)^{1/2}} \quad (4.5)$$

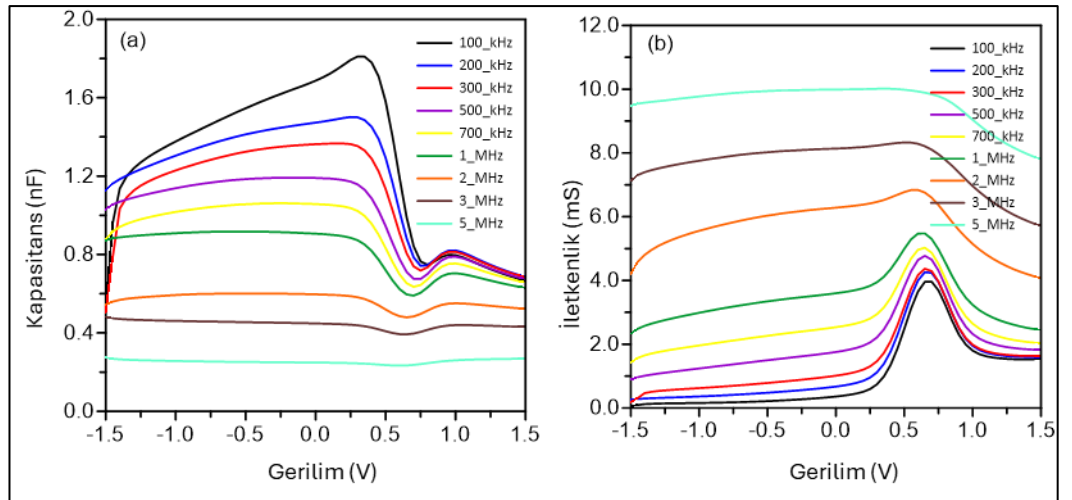
Burada P_{in} ışık gücüdür, I_{photo} ve I_{dark} aydınlık ve karanlık koşullardaki akımdır. q elektron yüküdür. Duyarlılık ve detektivite değerleri -1.9 V'da hesaplanmıştır. 100mW/cm^2 güneş ışığı için duyarlılık değeri 8.5 mA/W ve detektivite değeri 1.74×10^9 Jones olarak bulunmuştur. Kızılötesi ışık için aynı parametreler 3.4 mA/W ve 7.01×10^8 Jones olarak hesaplanmıştır. Güneş ışığı ve kızılötesi için R ve D^* farklılıkları I-V ve I-t çizimleriyle uyumludur.

Foto cihazların üretiminde önemli parametrelerden biri cihazın foto-kapasitif özelliğidir. Böylece cihazın kapasitif özellikleri ışık altında incelenebilir. Zamana bağlı fotoakım grafiği gibi, cihazın zamana bağlı kapasitans ölçümleri farklı güneş ışığı yoğunlukları ve kızılötesi ışık altında alınmıştır. Bunlar Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Zaman bağımlı kapasitans çizimleri, a) güneş ışığı için farklı yoğunluklar, b) kızılötesi ışık için

C-t ölçümleri 10 kHz frekansında alınmıştır. Başlangıç kapasitans değeri farklı güneş ışığı yoğunlukları için 2.1-2.2 nF aralığında bulunmuştur. Güneş ışığı açıldığında kapasitans artmış ve sonra doymun hale gelmiştir. Aynı ölçüm parametrelerinde başlangıç değeri kızılötesi için 1.85 nF ve 2.1 nF’de doymun hale gelmiştir. Güneş ışığı kapandığında kapasitans yavaşça azalır ve her yoğunluk için başlangıç kapasitansına yakın bir değere ulaşır. Kızılötesi için benzer davranış gözlenmiştir. Bu bulgular üretilen cihazların foto-kapatif davranış gösterdiğini ve fotodedektör veya fotodiyot olarak kullanılabileceğini söylemek için yeterlidir.



Şekil 4. 10. Frekansa bağlı a) C-V çizimleri, b) G-V çizimleri

100 kHz-5 MHz aralığında alınan kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümleri sırasıyla Şekil 4.10’da verilmiştir. Frekansa bağlı olarak C-V ve G-V karakteristiklerinin değerlendirilmesi, arayüz durumunun AC sinyalini takip etme

yeteneğini belirlemek için oldukça önemlidir. C-V ve G-V karakteristikleri incelendiğinde, kapasitansın frekans arttıkça azaldığı, iletkenliğin ise arttığı görülmektedir. Literatürde Schottky diyotlar için de benzer davranış bildirilmiştir. Hem C-V-f hem de G-V-f grafiklerinden görülebileceği gibi, Yb/CIGS arayüzü arasındaki durumlar 1 MHz'in üzerinde uygulanan AC sinyali takip edememektedir.

4.2. Solüsyonların ICP-OES Ölçüm Sonuçları ve Veri Seti

İyon kromatografisi (ICP-OES) ölçümü için Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Perkin Elmer OPTIMA 5300 DV ICP-OES sistemi ile alınmıştır. Temel olarak ICP-OES sistemi, incelenen numune içerisindeki element içeriğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. ICP-OES'de, bir numune solüsyonu, ilgili analitlerin uyarılmış duruma, gaz fazı atomlarına veya iyonlarına dönüştürüldüğü endüktif olarak eşleştirilmiş bir argon plazma deşarjına sürekli olarak aspire edilir (yani nebulize edilir). Hazırlanan numunelerin ICP-OES ölçümleri Çizelge 4.2'de verilen parametrelerle alınmıştır.

Çizelge 4.2. ICP-OES ölçüm parametreleri

Plazma Gaz Akışı	15 L/dk
Ek Gaz Akışı	0.2 L/dk
Nebulayzır Gaz Akışı	0.6 L/dk
Güç	1 450 W
Torç Kaset Konumu	-3
Pomplama Hızı	1.5 mL/dk
Temizleme (purge)	Normal
Çözünürlük	Normal
Entegrasyon Süresi	Min:10 s Maks:20 s
Okuma Gecikmesi	60 s
Ölçüm Tekrarı	3

ICP-OES sisteminde içerikleri tespit edilen 300 adet numunenin SDÜ YETEM Merkezinde bulunan Keysight empedans analizörü sistemi ile elektriksel iletkenlik (EC) seviyeleri belirlenmiştir. Empedans analizörleri, frekansın bir fonksiyonu olarak karmaşık elektriksel empedansı ölçen bir cihazdır. Bu, test edilen bir cihaza uygulanan akım ve voltajın faza duyarlı ölçümünü içerirken, ölçüm frekansı ölçüm boyunca istenildiği takdirde değiştirilebilmektedir. İncelenen numunelerin Alınan EC sonuçları 75 kHz frekans ve 14.4 V gerilim değeri için elde edilmiştir.

ICP-OES verilerinden elde sonuçlar ve EC ölçüm sonuçları tez çalışmasında kullanılacak olan yapay zekâ algoritmaları için veri setini oluşturmaktadır. Burada ICP-OES sonuçları girdi EC ölçüm sonuçları ise çıktı olarak değerlendirilmiştir. Böylece 3 girdi ve 1 çıktı şeklinde olacak şekilde veri seti tamamlanmıştır. Elde edilen veri seti Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti

Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
0.00	0.00	0.00	0.04
2.85	0.00	0.00	10.06
24.57	0.00	0.00	2.55
38.20	0.00	0.00	3.59
42.95	0.00	0.00	4.11
51.96	0.00	0.00	5.36
55.70	0.00	0.00	6.10
60.97	0.00	0.00	6.94
68.29	0.00	0.00	8.58
81.96	0.00	0.00	10.72
0.00	108.90	0.00	4.83
0.00	255.27	0.00	7.56
0.00	362.82	0.00	11.78
0.00	448.00	0.00	11.78
0.00	69.29	0.00	15.84
0.00	101.20	0.00	2.21
0.00	201.20	0.00	3.15
0.00	255.41	0.00	8.59
0.00	149.66	0.00	5.43
0.00	289.37	0.00	10.25
0.00	0.00	190.63	14.51
0.00	0.00	400.76	29.02
0.00	0.00	582.06	43.53
0.00	0.00	671.31	72.55
0.00	0.00	826.02	87.06
0.00	0.00	983.11	101.57
0.00	0.00	1 143.52	116.08
0.00	0.00	1 360.00	130.59
0.00	0.00	1 586.03	145.10
0.00	0.00	1 712.02	163.22
2.85	108.90	0.00	14.90
24.57	255.27	0.00	10.12

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti (Devamı)

Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
38.20	362.80	0.00	15.37
42.95	448.05	0.00	15.89
51.96	69.29	0.00	21.20
55.70	101.21	0.00	8.31
60.97	201.20	0.00	10.10
68.29	255.43	0.00	17.17
81.96	149.67	0.00	16.16
4.85	0.00	190.63	28.74
26.57	0.00	400.76	33.99
40.20	0.00	582.06	49.54
44.95	0.00	671.31	79.08
53.96	0.00	826.02	94.84
57.70	0.00	983.11	110.09
62.97	0.00	1 143.52	125.44
70.29	0.00	1 360.00	141.59
83.96	0.00	1 586.03	158.25
0.00	108.95	190.65	19.34
0.00	255.21	400.71	36.58
0.00	362.85	584.03	55.31
0.00	448.05	672.38	84.33
0.00	69.27	822.03	102.90
0.00	101.21	984.19	103.78
0.00	201.20	1 142.41	119.24
0.00	255.43	1 360.48	139.19
0.00	149.63	1 575.51	150.54
3.85	109.62	190.21	29.62
25.57	255.97	401.77	39.35
39.23	363.53	583.01	59.11
43.95	448.71	671.33	88.65
52.96	69.99	827.01	108.47
56.74	101.97	982.14	110.09
61.97	201.98	1 145.23	126.39
69.29	256.15	1 361.72	147.98
82.96	150.37	1 579.33	161.47
4.35	151.36	1 711.04	123.55
4.83	151.72	1 581.08	127.99
5.34	152.44	1 581.11	132.44
5.17	153.16	1 582.84	136.88
6.42	153.88	1 582.81	141.33

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti (Devamı)

Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
6.66	154.51	1 584.58	145.77
7.73	155.29	1 584.59	150.21
7.87	155.92	1 584.58	154.66
8.25	156.62	1 586.35	159.10
8.76	157.33	1 586.34	163.55
9.21	158.54	1 588.11	167.99
9.89	158.73	1 588.10	172.43
10.95	159.41	1 588.10	176.88
10.78	160.12	1 589.89	181.32
11.93	160.86	1 589.86	185.77
11.94	161.57	1 591.64	190.21
12.12	162.29	1 591.61	194.65
12.45	162.91	1 591.63	199.10
12.74	163.62	1 593.32	203.54
13.05	164.33	1 593.32	207.99
14.35	165.65	1 595.12	212.43
14.42	165.71	1 595.13	216.87
15.35	166.42	1 596.87	221.32
15.99	167.12	1 596.82	225.76
16.73	167.84	1 596.81	230.21
16.62	168.59	1 598.63	234.65
17.23	169.21	1 598.61	239.09
17.82	169.93	1 600.37	243.54
18.11	170.62	1 600.39	247.98
18.30	171.32	1 602.10	252.43
19.09	172.41	1 602.12	256.87
19.41	172.71	1 602.14	261.31
20.23	173.41	1 603.90	265.76
20.54	174.11	1 603.9	270.20
21.62	174.83	1 605.65	274.65
21.84	175.56	1 605.67	279.09
22.79	176.22	1 605.66	283.53
22.85	176.94	1 607.41	287.98
23.35	177.65	1 607.42	292.42
23.87	178.38	1 609.16	296.87
24.35	179.91	1 609.14	301.31
24.85	179.71	1 610.92	305.75
25.33	180.41	1 610.93	310.20
25.55	181.13	1 610.92	314.64

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti (Devamı)

Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
26.33	181.86	1 612.69	319.09
26.66	182.55	1 612.67	323.53
27.31	183.28	1 614.40	327.97
27.89	183.92	1 614.43	332.42
28.72	184.62	1 616.11	336.86
28.88	185.36	1 616.18	341.31
29.07	186.50	1 616.15	345.75
29.82	186.74	1 617.94	350.19
30.38	187.42	1 617.96	354.64
30.83	188.19	1 619.65	359.08
31.44	188.89	1 619.65	363.53
31.76	189.54	1 619.70	367.97
32.37	190.29	1 621.47	372.41
32.76	190.91	1 621.45	376.86
33.32	191.63	1 623.23	381.30
33.81	192.34	1 623.22	385.75
34.64	193.14	1 624.97	390.19
34.88	193.70	1 624.94	394.63
35.39	194.43	1 624.95	399.08
35.33	195.12	1 626.71	403.52
36.72	195.81	1 626.73	407.97
36.64	196.51	1 628.48	412.41
37.24	197.26	1 628.49	416.85
37.12	197.94	1 628.49	421.30
38.43	198.61	1 630.21	425.74
38.72	199.36	1 630.22	430.19
39.46	200.30	1 631.97	434.63
39.86	200.76	1 631.98	439.07
40.21	201.45	1 633.79	443.52
40.34	202.18	1 633.73	447.96
40.41	202.85	1 633.71	452.41
41.60	203.58	1 635.48	456.85
41.03	204.27	1 635.45	461.29
42.26	204.97	1 637.24	465.74
43.91	205.64	1 637.27	470.18
44.78	206.39	1 638.97	474.63
44.37	207.45	1 639.93	479.07
44.02	207.79	1 639.97	483.51
45.34	208.48	1 640.72	487.96

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti (Devamı)

Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
45.76	209.16	1 640.75	492.40
45.46	209.85	1 642.51	496.85
46.46	210.54	1 642.54	501.29
47.78	211.21	1 642.51	505.73
47.23	211.97	1 643.27	510.18
48.03	212.64	1 644.28	514.62
48.12	213.34	1 646.03	519.07
49.44	214.31	1 646.03	523.51
49.84	214.71	1 647.72	527.95
50.37	215.42	1 647.77	532.40
50.83	216.13	1 647.77	536.84
50.99	216.81	1 649.54	541.29
51.25	217.54	1 649.55	545.73
52.31	218.26	1 651.29	550.17
52.87	218.96	1 651.28	554.62
53.33	219.61	1 653.07	559.06
53.56	220.33	1 653.03	563.51
54.96	221.62	1 653.04	567.95
54.71	221.74	1 654.83	572.39
55.01	222.41	1 654.80	576.84
55.42	223.13	1 656.56	581.28
56.56	223.84	1 656.56	585.73
56.96	224.51	1 656.54	590.17
57.78	225.23	1 659.49	594.61
57.32	225.95	1 658.75	599.06
58.33	226.64	1 660.03	603.50
58.97	227.33	1 660.03	607.95
59.56	228.12	1 661.81	612.39
59.63	228.71	1 661.63	616.83
60.32	229.41	1 661.75	621.28
60.41	230.14	1 663.12	625.72
61.37	230.86	1 663.18	630.17
61.89	231.51	1 665.32	634.61
62.10	232.25	1 665.42	639.05
62.61	232.90	1 665.32	643.50
63.33	233.62	1 667.14	647.94
63.74	234.33	1 667.15	652.39
64.75	235.48	1 668.83	656.83
64.62	235.72	1 669.42	661.27

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti (Devamı)

Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
65.32	236.45	1 670.42	665.72
65.13	237.13	1 670.40	670.16
66.35	237.87	1 670.42	674.61
66.12	238.55	1 672.63	679.05
67.02	239.24	1 672.67	683.49
67.44	239.95	1 674.12	687.94
68.12	240.66	1 674.10	692.38
68.42	241.31	1 675.83	696.84
69.45	242.32	1 675.81	701.27
69.78	242.76	1 675.68	705.71
70.73	243.46	1 677.62	710.16
70.99	244.11	1 677.62	714.60
71.23	244.80	1 679.34	719.05
71.45	245.53	1 679.36	723.49
72.35	246.25	1 679.31	727.93
72.77	246.95	1 681.17	732.38
73.56	247.62	1 681.15	736.82
73.78	248.31	1 682.86	741.27
74.01	249.59	1 682.85	745.71
74.42	249.72	1 684.62	750.15
75.23	250.48	1 684.63	754.60
75.11	251.18	1 684.63	759.04
76.46	251.86	1 686.37	763.49
76.74	252.51	1 686.32	767.93
77.25	253.25	1 688.13	772.37
77.84	253.93	1 688.13	776.82
78.61	254.62	1 689.88	781.26
78.66	255.32	1 689.88	785.71
79.41	256.56	1 689.87	790.15
79.97	256.75	1 691.63	794.59
80.34	257.44	1 691.65	799.04
80.60	258.19	1 693.34	803.48
81.31	258.89	1 693.36	807.93
81.82	259.51	1 693.37	812.37
82.67	260.24	1 695.16	816.81
82.85	260.95	1 695.15	821.26
83.29	261.63	1 696.91	825.70
83.74	262.35	1 696.91	830.15
84.46	263.65	1 698.67	834.59

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti (Devamı)

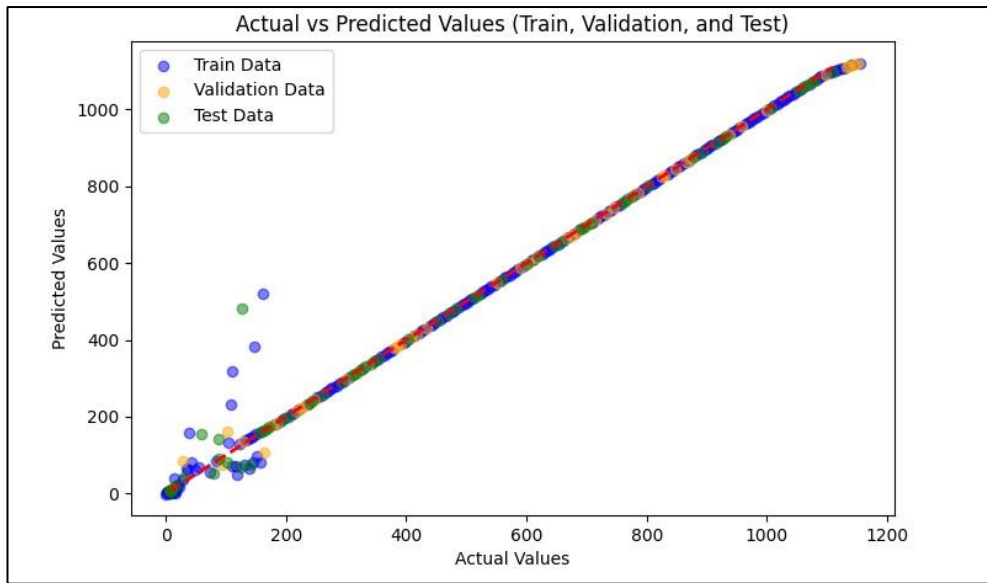
Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
84.52	263.74	1 698.66	839.03
85.12	264.43	1 698.66	843.48
85.32	265.16	1 700.40	847.92
86.12	265.85	1 700.44	852.37
86.65	266.58	1 702.14	856.81
87.14	267.27	1 702.14	861.25
87.47	267.96	1 702.17	865.70
88.47	268.63	1 703.93	870.14
88.92	269.31	1 703.93	874.59
89.91	270.73	1 705.67	879.03
89.90	270.78	1 705.68	883.47
90.37	271.45	1 707.43	887.92
90.84	272.12	1 707.46	892.36
91.41	272.88	1 707.44	896.81
91.69	273.56	1 709.13	901.25
92.31	274.24	1 709.19	905.69
92.85	274.94	1 710.90	910.14
93.13	275.63	1 710.94	914.58
93.34	276.31	1 712.74	919.03
94.35	277.61	1 712.75	923.47
94.85	277.74	1 712.73	927.91
95.34	278.42	1 714.42	932.36
95.86	279.11	1 714.41	936.80
96.30	279.88	1 716.23	941.25
96.74	280.59	1 716.23	945.69
97.12	281.25	1 716.27	950.13
97.85	281.94	1 717.95	954.58
98.22	282.64	1 717.94	959.02
98.45	283.31	1 719.77	963.47
99.86	284.61	1 719.78	967.91
99.97	284.71	1 721.45	972.35
100.23	285.42	1 721.44	976.80
100.55	286.17	1 721.44	981.24
101.66	286.83	1 723.23	985.69
101.81	287.56	1 723.23	990.13
102.31	288.29	1 724.89	994.57
102.85	288.92	1 724.88	999.022
103.62	289.68	1 726.63	1 003.46
103.75	290.36	1 726.69	1 007.91

Çizelge 4.3. ICP-OES ve EC ölçümleri sonucu elde edilen veri seti (Devamı)

Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)	İletkenlik (mS/cm)
104.06	291.40	1 726.73	1 012.35
104.71	291.72	1 728.50	1 016.79
105.14	292.41	1 728.48	1 021.24
105.69	293.10	1 730.21	1 025.68
106.05	293.81	1 730.23	1 030.13
106.66	294.59	1 730.22	1 034.57
107.42	295.28	1 732.05	1 039.01
107.84	295.96	1 732.03	1 043.46
108.24	296.67	1 733.75	1 047.90
108.71	297.34	1 733.74	1 052.35
109.51	298.44	1 735.51	1 056.79
109.83	298.75	1 735.51	1 061.23
110.34	299.46	1 735.54	1 065.68
110.62	300.17	1 737.25	1 070.12
111.61	300.84	1 737.27	1 074.57
111.32	301.54	1 739.08	1 079.01
112.41	302.23	1 739.06	1 083.45
112.77	302.91	1 739.09	1 087.90
113.93	303.64	1 740.74	1 092.34
113.12	304.34	1 740.74	1 096.79
114.33	305.83	1 742.56	1 101.23
114.11	305.76	1 742.57	1 105.67
115.61	306.43	1 744.27	1 110.12
115.42	307.19	1 744.24	1 114.56
116.84	307.89	1 744.22	1 119.01
116.23	308.58	1 746.01	1 123.45
117.55	309.25	1 746.02	1 127.89
117.34	309.94	1 747.74	1 132.34
118.23	310.66	1 747.73	1 136.78
118.87	311.33	1 749.55	1 141.23
119.56	312.03	1 749.53	1 145.67
119.77	312.75	1 749.55	1 150.11
120.23	313.44	1 751.38	1 154.56

4.3. Ham Veri Setinin YSA Kullanılarak İncelenmesi

Çizelge 4.2’de gösterilen 3 giriş ve 1 çıkışa sahip 300 örneğin analizi yapılmıştır. Bu ilk analiz için Matlab üzerinde YSA modellemesi yapılmıştır. Toplam 50 nöron kullanılarak 30 yinleme gerçekleştirilmiştir. Verilerin eğitildiği grafikteki R değeri 0.866 olarak bulunmuştur. Doğrulama ve test grafikleri için aynı değer sırasıyla 0.658 ve 0.891 olarak hesaplanmıştır. [95]. Bu sonuçlar nispeten daha temel seviyede ve az nöron sayısı oluşturularak elde edilmiştir. Matlab üzerinde yapılan bu analizin dışında Python üzerinde ham veri seti, TensorFlow ile genişletilmiş veri seti ve Pytorch ile genişletilmiş veri setlerinin regresyon modellerindeki hata metrikleri hesaplanmıştır. Hata metrik sonuçları olan MSE (Mean Squared Error), R^2 ve R değerleri incelenen veri setine ne kadar yakınsama yapılabildiği ve ortaya çıkan hataları vermektedir. MSE, bir modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar saptığını gösteren bir hata ölçütüdür. MSE’nin düşük olması modelin hatalarının küçük olduğunu, yüksek olması ise modelin tahminlerinin gerçek değerlerden büyük sapmalar gösterdiğini ifade eder. R^2 , modelin bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki değişimini ne kadar iyi açıkladığını gösterir. 1’e yakın R^2 değerleri, modelin çok iyi bir performans gösterdiğini ifade eder. R değeri, modelin gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki korelasyonu ifade eder. 1’e yakın R değerleri, modelin tahminlerinin gerçek değerlere çok yakın olduğunu gösterir. Şekil 4.11’de ham veri setinin Python üzerinde elde edilmiş eğitim, doğrulama ve test sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.11. Ham veri setinin eğitim, doğrulama ve test sonuç grafiği

Şekil 4.11 incelendiğinde elde edilen eğitim MSE, doğrulama MSE ve test MSE değerleri sırasıyla 1 540.447, 273.150, 2 466.737 olarak bulunmuştur. Aynı şekilde eğitim, doğrulama ve test değerleri için R^2 sonuçları sırasıyla 0.998, 0.998, 0.980 olarak elde edilmiştir. Aynı değerlerin R sonuçları ise sırasıyla 0.994, 0.999, 0.990 olarak hesaplanmıştır.

Eğitim MSE'si 1 540.447 ile oldukça düşük görünmektedir. Bu sebeple modelin, eğitim verisinde düşük hata yaptığı yani bu veri seti üzerinde iyi bir performans sergilediği anlamına gelmektedir. Doğrulama MSE'si 273.150, eğitim MSE'sinden çok daha düşüktür. Buradan, modelin doğrulama verisinde oldukça iyi performans gösterdiği sonucu çıkarılabilir. Test MSE'si ise 2 466.737 ile diğer iki değere kıyasla oldukça yüksektir. Bu, modelin test verisinde daha büyük hatalar yaptığını ve eğitim ile doğrulama setlerindeki kadar iyi genelleme yapamadığını işaret etmektedir.

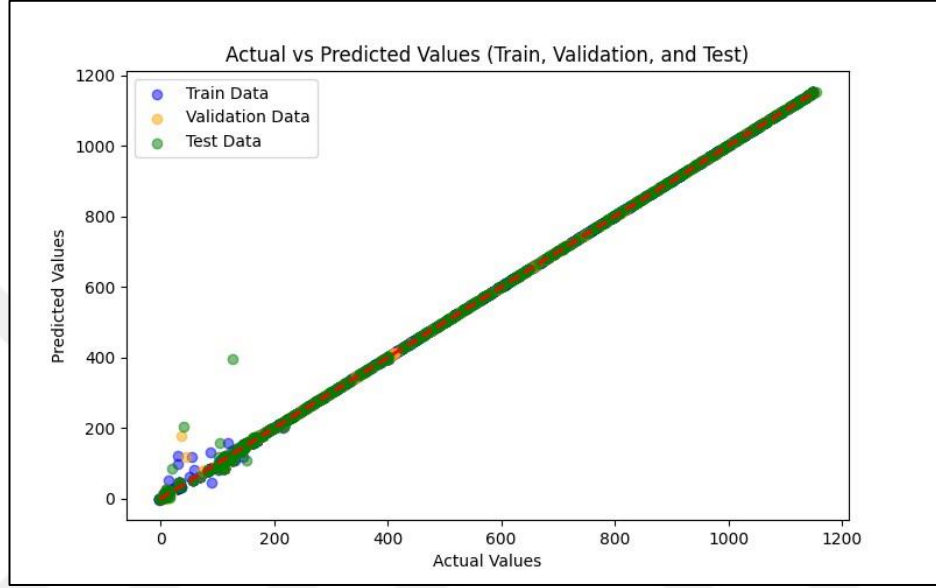
Eğitim ve doğrulama R^2 ; her ikisi de 0.998 ile çok yüksektir. Bu, modelin eğitim ve doğrulama verilerinde çok iyi bir uyum sağladığını göstermektedir. Test R^2 ; 0.980, yine oldukça iyi, ancak eğitim ve doğrulama setlerindeki kadar yüksek değildir. Bu durum, modelin test setinde performansının biraz düştüğünü, ancak hâlâ iyi anlamına gelmektedir.

Eğitim ve doğrulama R; 0.994 ve 0.999 ile çok iyi bir korelasyonu göstermektedir. Model, eğitim ve doğrulama verilerinde yüksek doğrulukla tahmin yapmaktadır. Test R: 0.990, oldukça iyi bir korelasyondur, ancak eğitim ve doğrulama setlerindeki kadar başarılı değildir.

Modelin eğitim ve doğrulama performansı oldukça iyi, ancak test verisinde performansında belirgin bir düşüş görülmektedir. Bu durum, modelin doğrulama verisine biraz fazla uyum sağladığını ve gerçek dünyadaki yeni verilerde (test verisi gibi) biraz daha fazla hata yapabileceğini göstermektedir. Aşırı uyum sağlama belirtilerinin olduğu, bu nedenle modelin genelleme yeteneğini artırmak için daha fazla düzenleme (regularization) yapılması gerektiği ya da daha fazla test verisinin kullanımına ihtiyacının olduğu sonucu çıkarılabilir.

4.4. Genişletilmiş Veri Setlerinin İncelenmesi ve EC Ölçer ile Test Edilmesi

Elde edilen veri setini eğitilmiş modeli üzerinden genişletilen veri setinde 3000 ayrı türetilmiş veri mevcuttur. Bu genişletilmiş veri setinin doğruluk oranını belirlemek için öncelikle Python üzerinde incelemeler yapılmıştır. Yapılan inceleme sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. TensorFlow ile eğitilmiş modelin eğitim, doğrulama ve test sonuç grafiği

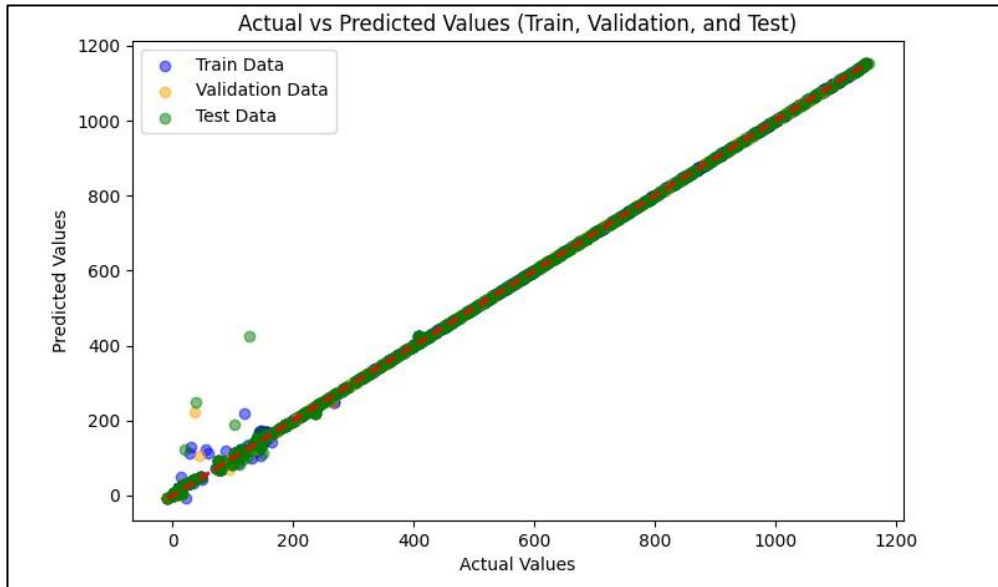
Şekil 4.12 üzerinden elde edilen eğitim MSE, doğrulama MSE ve test MSE değerleri sırasıyla 22.841, 59.218, 178.075 olarak bulunmuştur. Aynı Şekilde eğitim, doğrulama ve test değerleri için R^2 sonuçları sırasıyla 1.000, 1.000, 0.999 olarak elde edilmiştir. Aynı değerlerin R sonuçları ise sırasıyla 1.000, 1.000, 0.999 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ise ham veri setine benzer olarak Şu Şekilde yorumlanabilir.

Eğitim MSE’si için 1 540.447 ile oldukça düşük bir değerdir. Model, eğitim verisinde düşük hata yapmaktadır, yani bu veri seti üzerinde iyi bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir. Doğrulama MSE değeri 273.150, eğitim MSE’sinden çok daha düşüktür. Bu, modelin doğrulama verisinde oldukça iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Test MSE’si ise 2 466.737 ile diğer iki değere kıyasla oldukça yüksek çıkmıştır. Bu, modelin test verisinde daha büyük hatalar yaptığını ve eğitim ile doğrulama setlerindeki kadar iyi genelleme yapamadığını göstermektedir. Bu farklar

göz önüne alınırsa modelin doğrulama setine aşırı uyum sağladığını veya test verisinin daha zorlayıcı olduğu sonucu çıkarılabilir.

Eğitim ve Doğrulama R^2 değerlerinin her ikisi de 0.998 olarak oldukça yüksek hesaplanmıştır. Bu, modelin eğitim ve doğrulama verilerinde çok iyi bir uyum sağladığını göstermektedir. Test R^2 değeri 0.980 olarak oldukça iyi, ancak eğitim ve doğrulama setlerindeki kadar yüksek değildir. Bu durum, modelin test setinde performansının biraz düştüğünü, ancak hâlâ oldukça iyi olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Eğitim ve Doğrulama R değerleri 0.994 ve 0.999 ile oldukça iyi bir korelasyon kurulduğunu göstermektedir. Model, eğitim ve doğrulama verilerinde yüksek doğrulukla tahmin yapmaktadır. Test R değeri 0.990 olarak oldukça iyi bir korelasyon sonucudur. Ancak eğitim ve doğrulama setlerindeki kadar yüksek değildir. Modelin eğitim ve doğrulama performansı oldukça iyi, ancak test verisinde performansında belirgin bir düşüş görülmektedir. Bu durum, modelin doğrulama verisine biraz fazla uyum sağladığını ve gerçek dünyadaki yeni verilerde biraz daha fazla hata yapabilme ihtimalini göstermektedir. Modelin genelleme yeteneğini artırmak için daha fazla düzenleme yapılabilir.



Şekil 4.13. PyTorch ile eğitilmiş modelin eğitim, doğrulama, test sonuç grafiği

Şekil 4.13 üzerinden elde edilen eğitim MSE, doğrulama MSE ve test MSE değerleri sırasıyla 32.577, 86.811, 249.481 olarak bulunmuştur. Aynı şekilde eğitim, doğrulama ve test değerleri için R^2 sonuçları sırasıyla 1.000, 0.999, 0.998 olarak elde edilmiştir. Aynı değerlerin R sonuçları ise sırasıyla 1.000, 1.000, 0.999 olarak hesaplanmıştır.

Eğitim verisi üzerinde 32.577 ile oldukça düşük bir MSE değeri elde edilmiş. Bu, modelin eğitim sırasında verileri iyi öğrendiğini göstermektedir. Doğrulama MSE'si ise 86.811 olarak hesaplanmış, bu da modelin eğitim verisinde gösterdiği başarıyı doğrulama verisinde aynı seviyede sürdüremediği anlamına gelmektedir. Test MSE'si 249.481 oldukça yüksek bir değerdir. Bu değer modelin test verisi üzerinde ciddi bir hata yapabileceğini göstermektedir.

Eğitim verisinde 1.000'lık bir R^2 değeri, modelin eğitim verisinde çok iyi bir uyum sağladığını göstermektedir. Ancak bu durum aşırı öğrenmenin bir belirtisi olabilir. Doğrulama ve test setlerindeki R^2 değerleri 0.999 ve 0.998 olarak de oldukça yüksektir. Bu, test setindeki yüksek MSE değerine rağmen modelin genellikle iyi bir performans gösterdiğini işaret etmektedir. Eğitim ve doğrulama setlerinde 1.000'lık R değeri modelin tahminlerinin mükemmel korelasyona sahip olduğunu göstermekte, test setinde ise 0.999'lık R değeri neredeyse mükemmel bir korelasyon olduğunu ifade etmektedir. Verilen değerler incelendiğinde modelin eğitim seti üzerinde mükemmel bir uyum gösterdiği, doğrulama ve test setlerinde de oldukça iyi sonuçlar elde ettiği söylenebilir. Ancak test setindeki MSE'nin yüksek olması, modelin aşırı öğrenme yapmış olabileceğini düşündürüyor. R^2 ve R değerlerinin yüksek olması, modelin doğrulama ve test setlerinde genel olarak başarılı olduğunu, fakat test MSE'deki yüksekliğin bazı noktalarda sapmalar yaşandığını göstermektedir. Modelin genellenebilirliğini artırmak için test MSE'sinin daha düşük değerlere indirilmesi üzerinde çalışılabilir; bu durum daha geniş bir veri seti, farklı düzenleştirici yöntemler veya çapraz doğrulama ile iyileştirilebilir. Bununla beraber TensorFlow ve PyTorch ile genişletilen iki ayrı veri seti ayrı ayrı test edildiğinde farklı iletkenlik seviyeleri için farklı Mg, P ve K sonuçları ortaya koyduğu görülmüştür. Çizelge 4.4'de TensorFlow ve PyTorch için 3 farklı iletkenlik seviyesinde Mg, K ve P sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. TensorFlow ve PyTorch için 3 farklı iletkenlik seviyesinde Mg, K ve P sonuçları

	İletkenlik (mS)	Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)
TensorFlow	369.592	29.866	186.705	444.391
	143.754	4.961	151.756	389.294
	7.487	2.779	108.906	0.105
PyTorch	369.592	29.415	186.075	443.178
	143.754	5.478	149.728	389.653
	7.487	2.853	108.877	0.211

Çalışmanın en son aşamasında üretilmiş olan EC ölçer cihazla rastgele kimyasal yoğunluklarında hazırlanan 10 farklı numunenin iletkenlik ölçümleri alınmıştır. Bu test numuneleri için üretilen EC ölçer sistem ile ölçülen ve EC sonuçlarına göre genişletilmiş veri setinde karşılık gelen kimyasal oranlar ile Keysight Empedans Analizatörü ve ICP-OES ölçümünde elde edilen sonuçlar (deneysel sonuçlar) Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. 10 farklı numune için üretilen sistem ile elde edilen sonuçları ve deneysel sonuçlar

	İletkenlik (mS)	Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)
Üretilen Sistem ile Elde Edilen Sonuçlar	16.23	1.53	56.60	3.21
	167.88	3.77	180.55	595.31
	220.52	17.57	197.54	334.97
	300.54	18.26	141.71	479.16
	348.63	34.73	152.57	523.92
	378.83	26.83	155.94	496.07
	585.65	66.08	267.31	541.67
	717.66	57.87	192.92	395.56
	1 098.37	134.12	358.49	213.53
	1 147.33	97.08	330.04	665.75
Keysight Empedans Analizatörü ve ICP-OES Sonuçları	15.84	0.00	69.29	0.00
	163.22	0.00	0.00	512.14
	216.87	14.85	165.71	411.31
	283.53	22.35	176.23	427.82
	345.75	29.35	186.03	443.21
	376.86	32.85	190.92	450.97
	581.28	55.85	223.17	501.55
	714.60	70.85	244.11	534.54
	1 092.34	113.35	303.65	628.02
	1 141.23	118.85	311.36	640.14

Çizelge 4.5’de elde edilen sonuçlar değerlendirilirse veri setinin düşük kimyasal yoğunluğuna sahip olduğu noktalarda doğru tahminler yapamadığı ve ICP-OES sonuçlarına göre sıfır olan kimyasal bileşenler için var olduğunu tahmin ettiği bulunmuştur. Bununla beraber yüksek kimyasal bileşen yoğunluğuna sahip olan numunelerde doğruluk oranının daha yüksektir. Üretilen sistemin başarı hataların mutlak değerlerinin ortalaması şeklinde hesaplanabilir. Her bir numunede Mg, K ve P için elde edilen hata payı oranları farklıdır. Fakat veri seti için daha yoğun kimyasal bileşen oranına sahip numunelerde hataların mutlak değerlerinin ortalaması %18.32 olarak hesaplanmıştır. Bu değer yaklaşık %81.68’lik başarı oranının olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar makine öğrenimi hata metrik değerlerine göre farklıdır ve daha yüksek hata oranına sahiptir. Çünkü sadece makine öğrenimiyle veri genişletmesi üzerinden elde edilen hata metrik sonuçlarından bir deneysel hata payı olduğundan sözü edilemez. Fakat üretilen EC ölçerin elde ettiği değerlere karşılık bir Mg, P ve K sonuçları gözlemlendiği takdirde bu çalışmanın tamamen deneysel sonuçlardır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında önemli bilimsel çalışma konularından biri olan tarımsal inovasyon konusu ele alınmış ve uzaktan eğitim sürecinde öğrenci ve akademisyenlere yardımcı olabilecek bir uzaktan eğitime yardımcı elektronik sistem geliştirilmiştir.

Üretilen sistem üzerinde hidroponik tarım ile yetiştirilmek istenen aydınlanma seviyesini ölçebilecek bir ince film fotodedektör üretilmiştir. Bu sensörün üretimi sırasında p-tipi CIGS yarı iletken malzemesi çift katmanlı Mo ince film üzerine termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak biriktirilmiş ve bu yapı üzerine kare şeklinde Yb kontaktları yapılarak pratik bir fotodiyot üretilmiştir. Cihazda aktif katman olarak kullanılan CIGS malzemesinin yapısal ve yüzey özellikleri incelenmiştir. CIGS tabanlı fotodiyotun elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Fotodiyot özellikleri güneş ışığı ve kızılötesi radyasyon altında incelenmiştir. Cihazın ışığa cevabı zamana bağlı akım ve kapasitans ölçümleri alınarak test edilmiştir. Frekansa bağlı olarak alınan kapasitans ölçümleri kullanılarak cihazın arayüz durumlarının izlenebildiği frekans seviyesi değerlendirilmiştir. Frekansa bağlı olarak cihazın iletkenlik karakteristikleri incelenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları doğrultusunda tepkisellik ve dedektör özellikleri gibi bazı fiziksel parametreler elde edilen grafikler üzerinden hesaplanmış ve yorumlanmıştır. Cam/Mo/CIGS/Yb Schottky fotodiyotları fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile üretilmiştir. Mo üzerindeki CIGS tabakasının yapısal ve morfolojik karakterizasyonu yapılmıştır. Akım-gerilim (IV) karakteristikleri karanlıkta, güneş ışığında ve kızılötesinde incelenmiştir. Diyotların idealite faktörü ve sıfır önyargı bariyer yüksekliği karanlıkta sırasıyla 1.55 ve 0.84 eV olarak hesaplanmıştır. Zamana bağlı akım grafikleri incelendiğinde, yükselme ve bozulma sürelerinin güneş ışığı için kızılötesinden daha düşük olduğu görülmektedir. Güneş ışığının yoğunluğu arttıkça yükselme ve bozulma süreleri azalmaktadır. 100 mW/cm² güneş ışığı için duyarlılık değeri 8.5 mA/W ve dedektivite değeri 1.7×10^7 Jones olarak bulunmuştur. Kızılötesi ışık için aynı parametreler 3.4 mA/W ve 7.1×10^6 Jones olarak hesaplanmıştır. Ayrıca farklı frekanslar için kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim karakteristikleri değerlendirildi. Yb/CIGS fotodiyotlarının hassasiyetinin kızılötesine göre güneş ışığı altında daha iyi olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, üretilen Yb/CIGS fotodiyotunun

kızılötesi ve görünür bölgeler için bir sensörün üretiminde uygulanabilir olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın diğer aşamasında, Mg, K ve P elementleri içeren 300 hidroponik besin çözeltisine ait ICP-OES ve EC ölçüm sonuçları Phyton arayüzünde TensorFlow ve Pytorch kütüphaneleri ile eğitilmiş ve genişletilmiştir. Genişletilmiş olan veri setlerinin hata metrik sonuçları hesaplanmış ve makine öğrenimi için oldukça iyi sonuçlar verdikleri görülmüştür. TensorFlow ile genişletilen veri seti bulut ortamına aktarılmıştır. Üretilen EC ölçer sistem aracılığı ile iletkenlik seviyeleri ölçülen solüsyonların genişletilmiş veri seti ile karşılaştırılması sonucu sadece iletkenlik kullanılarak Mg, K ve P seviyelerinin ne olabileceğine dair bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Genişletilmiş veri seti ve ölçülen EC sonuçları kıyaslandığı takdirde genişletilmiş veri setinin düşük kimyasal yoğunluğuna sahip olduğu noktalarda doğru tahminler yapamadığı ve ICP-OES sonuçlarına göre sıfır olan kimyasal bileşenler için var olduğunu tahmin ettiği bulunmuştur. Bununla beraber yüksek kimyasal bileşen yoğunluğuna sahip olan numunelerde doğruluk oranının daha yüksektir. Üretilen sistemin başarı oranı ara bölgelerden kalan hataların mutlak değerlerinin ortalamasının yüzde halinin 1'den çıkarılması ile bulunmuştur. Her bir numunede Mg, K ve P için elde edilen hata payı oranları farklıdır. Fakat veri seti için bu iki bölgenin arasında kalan kimyasal bileşen oranına sahip numunelerde ise yaklaşık %81.68'lik başarı oranında doğruluk gösterdiği tespit edilmiştir. Literatürde tez çalışmasında elde edilen EC ölçer ile Mg, K ve P miktarlarını anlık olarak okuyan bir çalışma olmadığı için kıyaslanamamakta fakat umut verici olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Tez çalışmasında üretilen uzaktan veri okuyabilen sistem ve Yb/CIGS ince film fotosensörler seri üretime geçildiği takdirde yurt içi ve yurt dışı satışı gerçekleştirilebilecek ve böylece ülkemize hem ekonomik hem de teknolojik anlamda katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında geliştirilmiş olan teknoloji, hidroponik tarım üzerine çalışan bütün kuruluş ve bilim insanlarının önemli sorunlarından biri olan, besleyici solüsyon içerisindeki kimyasal bileşen oranlarının anlık olarak belirlenmesi sorununa bir çözüm yolu olma niteliği taşımaktadır. Bu sebeple yapılacak olan bilimsel çalışmalar hızlanmasına katkı verebilecektir. Konu ile ilgili daha fazla yayın ve bilgi edinilmesine

katkı sağlanacaktır. Ayrıca bitki fizyolojisi çalışmalarında karşılaştırmalı çalışmalar yapmak isteyen öğrenci ve akademisyenler için de uzaktan bağlanabilecekleri ve uzaktan eğitim aşamasında da kullanabilecekleri bir misyona sahiptir. Çalışmada geliştirilen fikir ve teknoloji gelecek zaman içerisinde tarımsal inovasyon kapsamında geliştirilebilecek farklı bitki gelişimi izleme teknolojilerinin ön çalışması olabilme niteliğini de taşımaktadır.

Elde sonuçlar ve başarı oranı göz önüne alındığında üretilen sistemin umut gelecek zaman içerisinde farklı sorunlara karşılık çözümler üretebilecektir. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, geliştirilen aygıtların uzaktan eğitim ve tarım inovasyon konularında gerçek zamanlı veri okuma cihazı olarak kullanılabilceğini açıkça göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Z. Qiang, A. G. Obando, Y. Chen ve C. Ye, "Revisiting distance learning resources for undergraduate research and lab activities during COVID-19 pandemic", *J. Chem. Educ.*, c. 97, sy 9, ss. 3446-3449, Eyl. 2020, doi: 10.1021/acs.jchemed.0c00609.
- [2] Yükseköğretim Kurumu. "YÖK 100/2000 Doktora Bursu Kapsamında Pandemi Özel Çağrısına Çıkıldı." [Yok.gov.tr](https://www.yok.gov.tr/Sayfalar/Haberler/2020/100-2000-doktora-projesi-pandemiye-ozel-cagriya-cikildi.aspx). 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.yok.gov.tr/Sayfalar/Haberler/2020/100-2000-doktora-projesi-pandemiye-ozel-cagriya-cikildi.aspx>.
- [3] G. Şahin, M. Taksim ve B. Yitgin "Effects of the European Green Deal on Turkey's electricity market," *İşletme Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, c. 1, sy. 1, ss. 40-58, Aralık 2020, doi: 10.33416/baybem.835052.
- [4] E. Anadol, "Dünya Nüfusunun Tarihsel Süreçteki Değişimi." [Erhananadol.com](https://erhananadol.com). 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://erhananadol.com/dunya-nufusunun-tarihsel-surecteki-degisimi/>.
- [5] TÜİK, "Kişi Başına Tarım Alanı." [Cevreselgostergeler.csb.gov.tr](https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr). 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/kisi-basina-tarim-alani-i-85832>.
- [6] R.Sera, "Hidroponik Tarım (Topraksız Tarım) Bitki Yetiştirme Çeşitleri." [Refissera.com](https://www.resifsera.com). 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.resifsera.com/bilgi-bankasi/hidroponik-tarim-topraksiz-tarim-bitki-yetistirme-cesitleri>.
- [7] S. Mashumah, M. Rivai ve A. N. Irfansyah, "Nutrient film technique based hydroponic system using fuzzy logic control," *2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*, Bali, Endonezya, 2018, ss. 387-390, doi: 10.1109/ISITIA.2018.8711201.
- [8] B. Dunn ve H. Singh, "Electrical Conductivity and pH Guide for Hydroponics", 2016, *Oklahoma State University*. doi: 10.13140/RG.2.2.20271.94885.
- [9] N. M. Hanafiah, S. Samsuri, S. Yusup ve N. Amran. "Effects of nutrients on the growth of pak-choi (*brassica chinensis* l.) seedlings in a hydroponic system," *Platform: A J. of Sci. and Tech.*, c. 2, sy. 1, ss. 23-31, July 2019, doi:10.61762/pjstvol2iss1art4920
- [10] R. A. Sarooshi ve G. C. Cresswell. "Effects of hydroponic solution composition, electrical conductivity and plant spacing on yield and quality of strawberries," *Austr. J. of Exp. Agric.*, c. 34 sy.1, ss. 529-535, 1994, doi: 10.1071/EA9940529.
- [11] M. Fuangthong ve P. Pramokchon, "Automatic control of electrical conductivity and PH using fuzzy logic for hydroponics system," *2018 International*

Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT), Phayao, Thailand, 2018, ss. 65-70, doi: 10.1109/ICDAMT.2018.8376497.

- [12] S. Ruengittinun, S. Phongsamsuan ve P. Sureeratanakorn, "Applied internet of thing for smart hydroponic farming ecosystem (HFE)," *2017 10th International Conference on Ubi-media Computing and Workshops (Ubi-Media)*, Pattaya, Thailand, Ağu. 2017, ss. 1-4, doi: 10.1109/UMEDIA.2017.8074148.
- [13] A. L. Seyfferth ve D. R. Parker, "Determination of low levels of perchlorate in lettuce and spinach using ion chromatography-electrospray ionization mass spectrometry (IC-ESI-MS)," *J. Agric. Food. Chem.*, c. 54, sy. 6, ss. 2012–2017, Mar. 2006, doi: 10.1021/jf052897v.
- [14] M. Turhan ve N. Abut, "Utilization of li-ion battery assisted fuel cell system in warships," *J. Fuel. Cell Sci. Technol.*, c. 8, sy. 6, 2011, doi: 10.1115/1.4003979.
- [15] M. Turhan, "The Requirement to increase the quality of power electronics in warships," *Balkan J. of Elect. and Comp. Eng.*, c. 7, sy. 1, ss. 1-5, Ocak 2019, doi: 10.17694/bajece.455424.
- [16] M. Turhan, "Smart touch voltage limitation," *Sakarya Uni. J. of Sci.*, c. 25, sy. 2, ss. 547–553, Nisan 2021, doi: 10.16984/saufenbilder.812423.
- [17] P. Heremans, A. K. Tripathi, A. J. De Meux, E. C. P. Smiths, B. Hou, G. Pourtois ve G. H. Gelinck, "Mechanical and electronic properties of thin-film transistors on plastic, and their integration in flexible electronic applications," *Adv. Mat.*, c. 28, sy. 22, ss. 4266-4282, Ocak 2016, doi: 10.1002/adma.201504360.
- [18] P. C. Sentelhas, J. E. B. A. Monteiro ve T. J. Gillespie, "Electronic leaf wetness duration sensor: Why it should be painted," *Int. J. Biometeorol.*, c. 48, sy. 4, ss. 202–205, 2004, doi: 10.1007/s00484-004-0200-z.
- [19] K. Arslan, "Eğitimde yapay zekâ ve uygulamaları," *Batı Anadolu Eğitim Bilimleri Dergisi.*, c. 11, sy. 1, ss. 71-88, 2020.
- [20] T. G. Seyhan, S. Seyhan, H. Silleli ve H. Yılmaz, "Dikey tarım tesislerinde yapay aydınlatma prensipleri," *Ziraat Mühendisliği*, c. 1, sy. 376, ss. 97–106, Ocak 2023, doi: 10.33724/zm.1197035.
- [21] R. A. V. Rossel, D. J. J. Walvoort, A. B. McBratney, L. J. Janik ve J. O. Skjemstad, "Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties," *Geoderma*, c. 131, sy. 1–2, ss. 59–75, Mart 2006, doi: 10.1016/j.geoderma.2005.03.007.
- [22] C. A. Yavru, M. Kaleli, İ. S. Üncü, M. Koç ve D. A. Aldemir, "Solar and infrared light sensing comparison of Yb/CIGS photodiode," *Sens. Actuators A Phys.*, c.347, p. 113973, Eylül 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113973.

- [23] Y. Tas, S. Eminoglu, G. Atila, Y. Yıldız ve U. Bozkurt, “Teachers self-efficacy beliefs and opinions about distance education during the Covid-19 pandemic,” *Turkish Online Journal of Distance Education*, c. 22, sy. 4, ss. 229-253, Kasım 2021, doi: 10.17718/tojde.1002868
- [24] S. L. Schneider ve M. L. Council, “Distance learning in the era of COVID-19,” *Arch. Dermatol Res.*, c. 313, sy. 5, ss. 389–390, Temmuz 2021, doi: 10.1007/s00403-020-02088-9.
- [25] E. Irmak, “Uzaktan eğitim amaçlı internet tabanlı laboratuvar uygulaması” Doktora Tezi, Fen bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007. [Çevrimiçi] Erişim: https://avesis.gelisim.edu.tr/yonetilen-tez/573410a7-d476-4e0d-8ea2_cfb5bdcdb709/uzaktan-egitim-amacli-internet-tabanlı-laboratuvar-uygulaması
- [26] F. A. Candelas, S. T. P. Mendez, F. Torres, F. G. O. Zamora, P. Gil ve J. Pomares, “A virtual laboratory for teaching robotics,” *Int. J. Enginnering Educ.*, c. 19, sy. 3, ss. 363-370, 2003.
- [27] Z. Tatli ve A. Ayas, “Virtual laboratory applications in chemistry education,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, c. 9, sy.1, ss. 938–942, 2010, doi: 10.1016/j.sbspro.2010.12.263.
- [28] S. D. Olabbarriaga, T. Glatard ve P. T. de Boer, “A virtual laboratory for medical image analysis,” *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed*, c. 14, sy. 4, ss. 979–985, Temmuz 2010, doi: 10.1109/TITB.2010.2046742.
- [29] C. Tüysüz, “The effect of the virtual laboratory on students achievement and attitude in chemistry,” *International Online Journal of Educational Sciences*, c. 2, sy. 1, ss. 37–53, 2010.
- [30] T. Budai ve M. Kuczmann, “Towards a modern, integrated virtual laboratory system,” *APH*, c. 15, sy. 3, ss.191-204, Mart 2018, doi: 10.12700/APH.15.3.2018.3.11.
- [31] E. Kılavuz ve İ. Erdem, “Agriculture 4.0 applications in the world and transformation of turkish agriculture,” *E-journal of New World Sciences Academy*, c. 14, sy. 4, ss. 133–157, Kasım 2019, doi: 10.12739/nwsa.2019.14.4.3c0189.
- [32] B. Uyan, “Tarımın küresel güç sistemine dönüşme sürecinde inovasyonun rolü,” *İktisadi Yenilik Dergisi*, c. 5, sy. 2, ss.83-93, Temmuz 2018.
- [33] Worldometers, “Current World Population.” Worldometers.info. 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.worldometers.info/world-population/#google_vignette
- [34] B. Bingöl, “Dikey tarım,” *Ormancılık Dergisi*, c. 11, sy. 2, ss. 92-99, 2015.

- [35] B. Bingöl, “Alternatif tarım yöntemleri; aeroponik, akuaponik, hidroponik,” *Harman Time Dergisi*, c. 7, sy. 82, ss. 34-42, Aralık 2019.
- [36] G. Dede ve E. Türkan, “Balık ve bitkilerin birlikte yetiştirildiği sistem: aquaponik sistemler,” *Stb.org.tr*. 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.stb.org.tr/uploads/arastirmalar/dokuman/arastirmalar/balik-ve-bitkilerin-birlikte-yetistirildigi-aquaponik-sistemler-1691071008-8.pdf>
- [37] M. Kerim ve S.U. Tırıl, “*Su ürünleri yetiştiriciliğinde akuaponik uygulamaları*,” *XV. Ulusal Su Ürünleri Sempozyumu*, Rize, Türkiye, ss. 1-7, 2019.
- [38] Tarım Orman Bakanlığı, “Alatarım.” *Arastirma.tarimorman.gov.tr*. 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/alata>
- [39] S. H. Kang, Y. K. Kim, D. S. Choi ve Y. E. Sung, “Characterization of electrodeposited CuInSe₂ (CIS) film,” *Electrochim. Acta*, c. 51, sy. 21, ss. 4433–4438, Temmuz 2006, doi: 10.1016/j.electacta.2005.12.021.
- [40] Y. Song, G. Yu, B. Xie, K. Zhang ve F. Huang, “Visible-to-near-infrared organic photodiodes with performance comparable to commercial silicon-based detectors,” *Appl. Phys. Lett.*, c. 117, sy. 9, ss. 093302, Ağustos 2020, doi: 10.1063/5.0018274.
- [41] X. Bao, G. Yu, J. Dai ve X. Zhu, “Li-Fi: Light fidelity-a survey,” *Wireless Networks*, c. 21, sy. 6, ss. 1879–1889, 2015, doi: 10.1007/s11276-015-0889-0.
- [42] R. Karthika ve S. Balakrishnan, “Wireless communication using Li-Fi technology,” *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, c. 2, sy. 3, ss. 7–14, 2015, doi: 10.14445/23488549/ijece-v2i3p107.
- [43] A. Sarkar, S. Agarwal ve A. Nath, “Li-Fi Technology : Data Transmission through Visible Light,” *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, c. 3, sy. 6, ss. 1–12, Temmuz 2015.
- [44] S. Kulkarni, A. Darekar ve P. Joshi, "A survey on Li-Fi technology," *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, Hindistan, 2016, ss. 1624-1625, doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566413.
- [45] Z. Huang, J. E. Carey, M. Liu, X. Guo, E. Mazur ve J. C. Campbell, “Microstructured silicon photodetector,” *Appl. Phys. Lett.*, c. 89, sy. 3, ss. 1-3, 2006, doi: 10.1063/1.2227629.
- [46] B. Murali, M. Madhuri ve S. B. Krupanidhi, “Near-infrared photoactive Cu₃BiS₃ thin films by co-evaporation,” *Journal of Applied Physics*, c. 115, sy.1, ss. 173109, May 2014 doi: 10.1063/1.4875495.

- [47] L. Ye, H. Li, Z. Chen ve J. Xu, "Near-infrared photodetector based on MoS₂/Black phosphorus heterojunction," *ACS Photonics*, c. 3, sy. 4, ss. 692–699, Nisan 2016, doi: 10.1021/acsp Photonics.6b00079.
- [48] F. Zhuge, Z. Zheng, P. Luo, L. Lv, Y. Huang, H. Li ve T. Zhai, "Nanostructured materials and architectures for advanced infrared photodetection," *Adv. Mat. Technologies*, c. 2, sy. 8, ss. 170005, Mayıs 2017, doi: 10.1002/admt.201700005.
- [49] J. Li, Z. Wang, Y. Wen, J. Chu, L. Yin, R. Cheng, L. Lei, P. He, C. Jiang, L. Feng ve J. He, "High-performance near-infrared photodetector based on ultrathin Bi₂O₂Se nanosheets," *Adv. Funct. Materials*, c. 28, sy. 10, ss. 1706437, Mar. 2018, doi: 10.1002/adfm.201706437.
- [50] N. Li, Z. Lan, L. Cai ve F. Zhu, "Advances in solution-processable near-infrared phototransistors," *J. Mater. Chem. Chemistry C*, c. 7, sy. 13, ss. 3711-3729, 2019, doi: 10.1039/C8TC06078A.
- [51] S. T. Kim, J. S. Yoo, M. W. Lee, J. W. Jung ve J. H. Jang, "CuInSe₂-based near-infrared photodetector," *Applied Sciences*, c. 12, sy. 92, ss. 1-7, Dec. 2021, doi: 10.3390/app12010092.
- [52] S. Qiao, J. Liu, X. Niu, B. Liang, G. Fu, Z. Li, S. Wang, K. Ren ve C. Pan, "Piezophototronic effect enhanced photoresponse of the flexible Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) heterojunction photodetectors," *Adv. Funct. Mater.*, c. 28, sy. 19, ss. 1707311, Mayıs 2018, doi: 10.1002/adfm.201707311.
- [53] D. G. Moon, J. H. Yun, J. Gwak, S. Ahn, A. Cho, K. Shin, K. Yoon ve S. Ahn "Cu(In,Ga)Se₂ thin films without Ga segregation prepared by the single-step selenization of sputter deposited Cu-In-Ga-Se precursor layers," *Energy Environ. Sci.*, c. 5, sy. 12, p. 9914, Kasım 2012, doi: 10.1039/c2ee22804a.
- [54] C. D. Bailie, M. G. Christoforo, J. P. Mailoa, A. R. Bowring ve E. L. Unger, "Semi-transparent perovskite solar cells for tandems with silicon and CIGS," *Energy Environ. Sci.*, c. 8, sy. 3, ss. 956–963, Aralık 2014, doi: 10.1039/c4ee03322a.
- [55] H. Shen, T. Duong, J. Peng, D. Jacobs, N. Wu, J. Gong ve Y. Wu, "Mechanically-stacked perovskite/CIGS tandem solar cells with efficiency of 23.9% and reduced oxygen sensitivity," *Energy Environ. Sci.*, c. 11, sy. 2, ss. 394–406, Ocak 2018, doi: 10.1039/c7ee02627g.
- [56] M. Suryawanshi, G. L. Agawane, S. M. Bhosale, S. W. Shin, P. S. Patil, J. H. Kim ve A. Moholkar "CZTS based thin film solar cells: a status review," *Materials Technology*, c. 28, sy. 1–2, ss. 98–109, Şubat 2013, doi: 10.1179/1753555712Y.0000000038.
- [57] M. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Kimoto, Y. Yasaki, T. Kato ve H. Sugimoto, "Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%,"

IEEE J. Photovolt., c. 9, sy. 6, ss. 1863–1867, Kasım 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2937218.

- [58] C. A. Yavru, “Cu(InGa)Se₂ (CIGS) ince filmlerin termal buharlaştırma yöntemi ile üretilmesi ve karakterizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://acikerisim.sdu.edu.tr/handle/123456789/31092>
- [59] I. Hünsche, C. Oertel, R. Tamm, W. Skrotzki ve W. Knabl, “Microstructure and texture development during recrystallization of rolled molybdenum sheets,” *Materials Science Forum*, c. 470, sy. 1, ss. 495–500, Eylül 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.467-470.495.
- [60] P. M. P. Salomé, J. Malaquias, P. A. Fernandes ve A. F. da Cunha, “Mo bilayer for thin film photovoltaics revisited,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, c. 43, sy. 34, ss.345501, Ekim 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/34/345501.
- [61] G. Gordillo, M. Grizález ve L. C. Hernandez, “Structural and electrical properties of DC sputtered molybdenum films,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 51, sy. 3–4, ss. 327–337, 1998, doi: 10.1016/S0927-0248(97)00236-5.
- [62] K. H. Ong, R. Agileswari, B. Maniscalco, P. Arnou, C. C. Kumar, J. W. Bowers ve M. B. Marsadek “Review on substrate and molybdenum back contact in CIGS thin film solar cell,” *International Journal of Photoenergy*, c. 2018, sy. 1, ss. 910269, Ekim 2018, doi: 10.1155/2018/9106269.
- [63] B. S. Yadav, A. C. Badgujar ve S. R. Dhage, “Effect of various surface treatments on adhesion strength of magnetron sputtered bi-layer Molybdenum thin films on soda lime glass substrate,” *Solar Energy*, c. 157, ss. 507–513, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.068.
- [64] Z. H. Li, E. S. Cho ve S. J. Kwon, “Molybdenum thin film deposited by in-line DC magnetron sputtering as a back contact for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells,” *Appl. Surf. Sci.*, c. 257, sy. 22, ss. 9682–9688, Eylül 2011, doi: 10.1016/j.apsusc.2011.06.101.
- [65] M. Kaleli, C. A. Yavru, M. Koç, S. Akyürekli ve A. B. Bayram, “Termal buharlaştırma yöntemiyle hazırlanan Ga katkılı CuInSe₂ ince filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesi”, *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, c. 12, sy. 2, ss. 19–32, Kasım 2017.
- [66] W. Daranfede, M. S. Aida, N. Attaf, J. Bougdira ve H. Rinnert, “Cu₂ZnSnS₄ thin films deposition by ultrasonic spray pyrolysis,” *J. Alloys Compd.*, c. 542, sy. 1, ss. 22–27, 2012, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.07.063.
- [67] H. H. Sheu, Y. T. Hsu, S. Y. Jian ve S. C. Liang, “The effect of Cu concentration in the photovoltaic efficiency of CIGS solar cells prepared by co-evaporation technique,” *Vacuum*, c. 131, sy. 1, ss. 278–284, 2016, doi: 10.1016/j.vacuum.2016.07.008.

- [68] F. Long, W. Wang, J. Du ve Z. Zou, "CIS(CIGS) thin films prepared for solar cells by one-step electrodeposition in alcohol solution," *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 152, sy. 1, ss. 012074, 2009, doi: 10.1088/1742-6596/152/1/012074.
- [69] S. Sönmezoğlu, M. Koç ve S. Akin, "İnce film üretim teknikleri," *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 28, sy. 5, ss. 389–401, Eylül 2012.
- [70] M. Kaleli ve C. A. Yavru, "Zamanla değişen altta sıcaklığının ultrasonik spreylendirme yöntemiyle üretilen CdS ince filmlerin yapısal özellikleri üzerine etkisi," *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 10, sy. 1, ss. 156–162, Mart 2020, doi: 10.21597/jist.600418.
- [71] M. Kaleli ve C. A. Yavru, "Depth profile crystal orientation determination of Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ thin films by GIXRD method applying skin depth theory," *J. Mater. Sci: Mater. Electron*, c. 30, sy. 22, ss. 20154–20159, Eylül 2019, doi: 10.1007/s10854-019-02390-x.
- [72] P. Echlin, "*Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*," Berlin, Heidelberg, Springer, 2010.
- [73] G. Tyler ve J. Yvon, "ICP-OES, ICP-MS and AAS techniques compared," *Icp Optical Emission Spectroscopy*, c. 1, sy. 1, ss. 1-11, 2023.
- [74] J. W. Olesik, "Elemental Analysis using an evaluation and assessment of remaining problems," *Analytical Chemistry*, c. 63, sy. 1, ss. 12-21, Ocak 1991.
- [75] S. C. Wilschefski ve M. R. Baxter, "Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects," *Clinical Biochemist Reviews*, c. 40, sy. 3, ss. 115–133, Aug. 2019, doi: 10.33176/AACB-19-00024.
- [76] Ö. Altınel, "PLC tabanlı su iletkenlik ölçümü ve depolama kontrolü" Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2009. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/8101>
- [77] G. Boczkaj ve A. Fernandes, "Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: A review," *Chemical Engineering Journal*, c. 320, sy. 1, ss. 608-633, Temmuz 2017, doi: 10.1016/j.cej.2017.03.084.
- [78] C. Karakuş, "Makine Öğrenmesi Temelleri Ders Notu," Studocu.com. 25.10.2024. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.studocu.com/row/document/turk-alman-universitesi/analysis-ii/mak-ogrenmesi/41175323>
- [79] B. Mahesh, "Machine Learning Algorithms - A Review," *IJSR*, c. 9, sy. 1, ss. 381–386, Ocak 2020, doi: 10.21275/art20203995.

- [80] A. Singh, N. Thakur ve A. Sharma, "A review of supervised machine learning algorithms," *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, New Delhi, Hindistan, 2016, ss. 1310-1315.
- [81] H. N. Canolat, "Makine öğrenimi yöntemleri ile Türkiye istatistiki bölgelerinde covid-19 yaygınlığının analizi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2022.
- [82] J. Zou, Y. Han ve S. S. So, "Overview of artificial neural networks," *Methods in Molecular Biology*, c. 458, sy. 1, ss. 14-22, 2008, doi: 10.1007/978-1-60327-101-1_2.
- [83] A. Demirhan, Y. Alper KILIÇ ve İ. Güler, "Tıpta yapay zekâ uygulamaları," *Yoğun Bakım Dergisi*, c. 9, sy. 1, ss. 31-41, 2010.
- [84] P. Goldsborough, "A tour of TensorFlow," 2016, *arXiv:1610.01178*.
- [85] A. Paszke, S. Gross, S. Chintala, G. Chanan, E. Yang ve A. Lerer, "Automatic differentiation in PyTorch," *31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*, Long Beach, CA, USA, 2017.
- [86] C. A. Yavru ve M. Kaleli, "DC Saçırma Metoduyla Üretilmiş Çift Katmanlı Mo İnce Filmlerin Yarı Kantitatif Doku Analizinin Yapılması ve Kutup Figürlerinin Araştırılması", *Süleyman Demirel Üniv. Fen Bilim. Enst. Derg.*, c. 27, sy. 2, ss. 191–196, 2023, doi: 10.19113/sdufenbed.1117506.
- [87] C. A. Yavru, İ. S. Üncü, M. Kaleli ve S. Akyürekli, "CIGS ince film yüzeyindeki morfolojik farklılıkların GLCM görüntü işleme yöntemi ile incelenmesi," *Süleyman Demirel Üniv.Fen Edebiyat Fak. Fen Derg.*, c. 17, sy. 2, ss. 460–477, Kasım 2022, doi: 10.29233/sdufeffd.1125106.
- [88] C. A. Yavru, İ. S. Üncü, M. Kaleli ve S. Akyürekli, "CIGS İnce Film Yüzeyindeki Morfolojik Farklılıkların GLCM Görüntü İşleme Yöntemi ile İncelenmesi", *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, c. 17, sy. 2, ss. 460–477, 2022, doi: 10.29233/sdufeffd.1125106.
- [89] D. A. Aldemir, M. Kaleli ve C. A. Yavru, "Electrical and photoelectric properties of Yb/CIGS thin film Schottky photodiode," *Sens. Actuators. A Phys.*, c. 311, sy.1, ss. 112091, Ağustos 2020, doi: 10.1016/j.sna.2020.112091.
- [90] C. A. Yavru, M. Kaleli, İ. S. Üncü, S. A. A. Al-Saedi ve D. A. Aldemir, "Comparison of Cu, Al, and Zr metallic contacts for chalcopyrite CIGS thin-film," *J Mater. Sci: Mater. Electron*, c. 34, sy. 14, ss. 1176, Mayıs 2023, doi: 10.1007/s10854-023-10585-6.
- [91] C. A. Yavru, M. Kaleli, İ. S. Üncü, M. Koç ve D. A. Aldemir, "Solar and infrared light sensing comparison of Yb/CIGS photodiode," *Sens. Actuators A Phys.*, c. 347, ss. 113973, Kasım 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113973.

- [92] J. Kim, D. Lee, S. Park ve J. Kim, "Structural analysis of CIGS film prepared by chemical spray deposition structural analysis of CIGS film prepared by chemical spray deposition," *Current Applied Physics*, c. 11, sy. 1, ss. 88-92, 2014, doi: 10.1016/j.cap.2010.11.089.
- [93] H. H. Sung, D.C. Tsai, Z. C. Chang, T. J. Chung, S. C. Liang, E. C. Chen ve F. S. Shieu, "The structural evolution of Cu(In,Ga)Se₂ thin film and device performance prepared through a three-stage process," *Mater Sci. Semicond. Process*, c. 41, ss. 519–528, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.mssp.2015.10.024.
- [94] A. B. Jain, Y. R. Toda ve D. N. Gujarathi, "Structural and Electrical properties of Thermally Evaporated Nanostructured CuInSe Thin Films," *IOSR JAP*, c. 9, sy. 2, ss. 19–26, Mart 2017, doi: 10.9790/4861-0902021926.
- [95] C. A. Yavru ve İ. S. Üncü, "Development Of A Distance Education Experiment Set That Allows The Ratio Of Chemical Components In Hydroponic Farming Nutrient Liquid To Be Estimated By Artificial Intelligence," *International Journal of Engineering and Innovative Research*, c. 6, sy. 2, ss. 116–125, Jul. 2024, doi: 10.47933/ijeir.1481594.