



**ÇÖZÜCÜ BUHARININ GÖRÜNTÜYE
DÖNÜŞTÜRÜLEREK DERİN ÖĞRENME TABANLI
SINIFLANDIRMA YAKLAŞIMI İLE KİMLİK VE
KONSANTRASYON TESPİTİ**

Ferda DAL

Doktora Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK
2022
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ÇÖZÜCÜ BUHARININ GÖRÜNTÜYE DÖNÜŞTÜRÜLEREK DERİN ÖĞRENME
TABANLI SINIFLANDIRMA YAKLAŞIMI İLE KİMLİK VE KONSANTRASYON
TESPİTİ**

(Identity and Concentration Detection with Deep Learning Based Classification Approach by
Converting Solvent Vapor to Image)

DOKTORA TEZİ

Ferda DAL

Danışman: Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

Erzurum
Aralık, 2022

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**ÇÖZÜCÜ BUHARININ GÖRÜNTÜYE DÖNÜŞTÜRÜLEREK DERİN ÖĞRENME
TABANLI SINIFLANDIRMA YAKLAŞIMI İLE KİMLİK VE KONSANTRASYON
TESPİTİ**

Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK danışmanlığında, Ferda DAL tarafından hazırlanan bu çalışma, 20/12/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oybirliği / ~~oy çokluğu~~ (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Tevhit KARACALI Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Barış ÖZYER Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ahmet DURLU Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun/.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma Tübitak 1001projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 118M747

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK danışmanlığında sunulan “ Çözücü Buharının Görüntüye Dönüştürülerek Derin Öğrenme Tabanlı Sınıflandırma Yaklaşımı ile Kimlik ve Konsantrasyon Tespiti ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	6	30
Kuramsal Temeller	17	30
Materyal ve Metot	18	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	3	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	21	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ferda DAL	Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK
26.12.2022	26.12.2022
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☒ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamı yaparken bilgi ve deneyimleri ile bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen her daim anlayış gösteren çok değerli hocam Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK'e, tez çalışması süresince bilgi ve tecrübeleriyle tezime vermiş olduğu desteklerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Tevhit KARACALI'ya, Dr. Öğr. Üyesi Ömer ÇOBAN'a ve Doç. Dr. Barış ÖZYER'e; tecrübe ve fikirleriyle bana yol gösteren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Emin Argun ORAL'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca laboratuvar çalışmalarımız için gerekli fiziksel ortamı ve desteği sağlayan Sayın Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU' na teşekkür ederim.

Doktora çalışmamı yaparken tezime katkılarının yanı sıra yoğun çalışma tempoma gösterdiği anlayış ve sabrı için eşim Selim DAL' a, her daim yanı başımda olduğunu hissettiğim oğlum Abdullah Asaf DAL'a, destekleri ile güçlü kalmamı sağlayan ailelerimizin her bir bireyine teşekkürü bir borç bilirim. Tezime katkılarından dolayı kardeşim M. Dilanur AKARSU' ya ayrıca teşekkür ederim.

Bu tez 118M747 nolu 'Kokunun Görüntüye Dönüştürülmesi ile Koku Sensörü Gerçekleştirilmesi' isimli Tübitak 1001 projeleri kapsamında desteklenmiştir. Tezime destekleri için teşekkür ederim.

Ferda DAL

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇÖZÜCÜ BUHARININ GÖRÜNTÜYE DÖNÜŞTÜRÜLEREK DERİN ÖĞRENME TABANLI SINIFLANDIRMA YAKLAŞIMI İLE KİMLİK VE KONSANTRASYON TESPİTİ

Ferda DAL

Danışman: Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

Amaç: Bu çalışmada gözenekli silisyum (GS) tabanlı kimyasal yapının üretimi gerçekleştirilip SWIR kamera ile kızılötesi ışın kaynağı arasına yerleştirilerek yeni bir sensör yapısı oluşturulması amaçlanmıştır. Ortama farklı çözücüler gönderilerek GS yapı yüzeyinde oluşan farklılıkları görmek amacıyla SWIR kamera ile alınan video kayıtlarının oluşturduğu veri tabanı ve bu veri tabanını oluşturan görüntüler derin öğrenme ve sınıflandırma algoritmaları yardımıyla analiz edilip çözücü buharı türü ile çözücü buharı türü ve konsantrasyon büyüklüklerini sınıflandırma işleminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Sistemde giriş verisi olarak, bu çalışma ile tasarlanan sensör sistemi ve ölçüm düzeneği kullanılarak elde edilen altı farklı çözücü buharı ve her birinin altı farklı konsantrasyon değeri için kaydedilen SWIR kamera video verisi kullanılmıştır. Bu video kaydı içerisindeki resimlerden ilk adımda HOG (Histogram of Oriented Gradients) tabanlı öznitelikler çıkarılmıştır. İkinci adım ile derin öğrenme alanında kullanılan LSTM (Long Short-Term Memory) sınıflandırıcı yardımıyla girişe uygulanan resimlerin hangi çözücü buharı türü ile hangi çözücü buharı türü ve bunun hangi konsantrasyonuna ait olduğunun sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Tümleşik sensör sistemi oluşturulmuş olup ortama farklı çözücüler gönderilip gözenekli silisyum yapıdan geçen ışık miktarının değişimiyle farklı görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntülerdeki farklılıklar SWIR kamera yardımıyla video şeklinde kaydedilmiş veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanını oluşturan video verilerinden derin öğrenme algoritmaları sayesinde çözücü buharı türü ile çözücü buharı türü ve konsantrasyonuna ait sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç: Bu çalışma ile çözücü buharı türü ve konsantrasyonu tespitini pratik uygulamalarda gerçekleştirecek özellikte yeni bir cihaz geliştirilmiştir. Önerilen bu cihaz; çözücü buharını algılayıp görüntüye dönüştüren bir sensör sistemi ve bununla elde edilen büyük veriyi etkin biçimde işleyen bir yazılımdan oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: GS sensör, SWIR kamera, HOG özniteliği, LSTM, video işleme.

Aralık 2022, 95 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

IDENTITY AND CONCENTRATION DETECTION WITH DEEP LEARNING BASED CLASSIFICATION APPROACH BY CONVERTING SOLVENT VAPOR TO IMAGE

Ferda DAL

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

Purpose: In this study, it is aimed to produce a porous silicon (GS) based chemical structure and to create a new sensor structure by placing it between the SWIR camera and the infrared light source. In order to see the differences in the surface of the GS structure by sending different solvents to the environment, the database was created by the video recordings taken with the SWIR camera and the images forming this database were analyzed with the help of deep learning and classification algorithms, and it was aimed to classify the solvent vapor type, solvent vapor type and concentration magnitudes.

Method: As input data in the system, SWIR camera video data recorded for six different solvent vapors and six different concentration values of each, obtained by using the sensor system and measurement setup designed in this study, was used. In the first step, HOG (Histogram of Oriented Gradients) based features were extracted from the images in this video recording. In the second step, with the help of the LSTM (Long Short-Term Memory) classifier used in the field of deep learning, the classification of which solvent vapor type and which solvent vapor type and its concentration belonged to the pictures applied to the input was carried out.

Findings: An integrated sensor system has been created and different patterns have been obtained by sending different solvents to the environment and changing the amount of light passing through the porous silicon structure. The differences in these patterns were recorded in video form with the help of SWIR camera and a database was created. Thanks to the deep learning algorithms from the video data that make up this database, the classification process of the solvent vapor type and solvent vapor type and concentration has been carried out.

Results: With this study, a new device has been developed to detect the type and concentration of solvent vapor in practical applications. This recommended device; It consists of a sensor system that detects the solvent vapor and converts it into an image, and a software that effectively processes the big data obtained with it.

Keywords: GS Sensor, SWIR camera, HOG feature, LSTM, video processing.

December 2022, 95 sayfa

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
MATERYAL VE METOT.....	10
Sensör Fabrikasyonu	10
Gözenekli silisyumun oluşum süreci ve elektrokimyasal aşındırmanın temelleri	10
Silisyum inceltme ve temizleme aşamaları	14
Gözenekli silisyum fabrikasyon sistemi	18
Karbonlama (Sensör yüzeyi pasifleştirme) ve tavlama işlemi	23
Tümleşik Sensör Sistemi: GS-SWIR Kamera Entegrasyonu	25
Tümleşik sensör bileşenleri.....	26
GS sensör entegrasyonu	28
Ölçüm Düzeneği.....	30
Gaz besleme bloğu	31
Yeni sensör cihazı	34
Yapay Zeka Temelli Çözücü Buharı Kimliklendirme	34
Veri tabanı oluşturma.....	34
Video sınıflandırma işlemi.....	38
Yansıma Ölçüm Sistemi.....	43
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	45
Yansıma Ölçüm Sisteminden Alınan Sonuçlar.....	45
Tümleşik Sensör Sisteminden Alınan Sonuçlar	53
Geçen Işığın Çözücü Buharı Uygulama-Temizleme Çevrimindeki Değişimi.....	56

t - SNE (t-Distributed Stochastic Neighbour Embedding) Yöntemi ile Boyut	
İndirgeme ve Verinin İki Boyutlu Temsili.....	62
Çözücü Buharı Türünün ve Konsantrasyonunun Sınıflandırılması	64
HOG öznitelik çıkarma	65
Eğitim ve test süreçleri (Sınıflandırıcı sonuçları)	66
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	72
Öneriler	74
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	80



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. IUPAC Gözenek Boyutunun Sınıflandırılması	13
Tablo 2. Silisyum Dilimlerin Başlangıç ve Son Durumdaki Kalınlıkları.....	17
Tablo 3. GSFP Üretim Parametreleri.....	21
Tablo 4. Kullanılan Çözücü Buharı ve Konsantrasyon Sayıları	38
Tablo 5. Hata Matrisinin Temel Gösterimi.....	42
Tablo 6. Çözücü Buharı Sınıflandırma Sonuçları.....	67



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Geleneksel anodizasyon hücresinin şematik görünümü	11
Şekil 2. Gözenekli silisyumda gözenek oluşum mekanizması.....	12
Şekil 3. Isıtma sistemi	15
Şekil 4. Kalınlık ölçüm sistemi	15
Şekil 5. Silisyum inceltme düzeneği	16
Şekil 6. İnceltmeden önceki silisyum dilim (üsteki dilim), inceltildikten sonraki silisyum dilim.....	16
Şekil 7. İnceltilecek altı farklı silisyum dilim.....	17
Şekil 8. Elektrokimyasal anodik dağlama düzeneği.....	19
Şekil 9. Çift tanklı elektrokimyasal anodizasyon hücresi	19
Şekil 10. Hava tahliye motorlu eldivenli kutu.....	20
Şekil 11. Anodizasyon hücresinin orta kısmına yerleştirilen silisyum dilim	21
Şekil 12. Anodizasyon deney düzeneği.....	21
Şekil 13. GSFP yapı	22
Şekil 14. GSFP yapının SEM görüntüleri (a) yüzey, (b) yan kesit (devamı).....	23
Şekil 15. Tavlama düzeneği	24
Şekil 16. (a) Karbonlama ve tavlama işleminden önceki GS yapı (b) Karbonlama ve tavlama işleminden sonraki GS yapı	24
Şekil 17. Sensör ölçüm sistemi.....	26
Şekil 18. SWIR kamera	26
Şekil 19. SWIR kamera ile objektifi arasındaki alüminyum soğutucu	27
Şekil 20. Objektifi ile sensör hücresi arasındaki optik yol.....	27
Şekil 21. Sensör test hücresini LED'e bağlayan aparat	28
Şekil 22. Kamera soğutucu bağlantısı	28
Şekil 23. Test hücresi (a), numune tutucu ile birlikte görünüşü (b).....	29
Şekil 24. Tümüleşik Sensör Sistemi: Üstten görünüm (a), yandan görünüm (b), kesit görünümü (c)	29
Şekil 25. Sistemin ana blok diyagramı	31
Şekil 26. Kontrollü buharlaştırıcı ve taşıyıcı sistemi. Sistemin görünümü (a) ve şematik gösterimi (b)	32
Şekil 27. CEM sistemi buharlaştırma ünitesi	34

Şekil 28. Sıcaklık ve gaz değişimi detaylı grafiği (a) süpürme gaz akışı grafiği (b)seyreltme gaz akışı grafiği (c) kimyasal gaz akışı grafiği	36
Şekil 29. LSTM sınıflandırıcısı temel yapısı	40
Şekil 30. Yansıma ölçüm sistemi şematik gösterimi(a), gerçek görüntü(b)	43
Şekil 31. Çoklu noktadan alınan yansıma spektrumları	45
Şekil 32. Sensör yüzeyi üzerinden alınan farklı noktaların çınlama dalga boyu	46
Şekil 33. Çınlama dalga boyu seviye eğrileri.....	46
Şekil 34. GSFP üzerinde alınan yansıma ve geçirme spektrumu.....	47
Şekil 35. GSFP üzerindeki bir noktaya ait giren, çıkan ve geçirme spektrumları	47
Şekil 36. Ölçümlerle elde edilen 40x40=1600 pikselden oluşan teorik görüntü	48
Şekil 37. (a) A noktasındaki (26,26) indisli pikselin yüksek genlikli çıkan ışık spektrumu (b) B noktasındaki (33,32) indisli pikselin yüksek genlikli çıkan ışık spektrumu	48
Şekil 38. Tek noktadan alınan yansıma spektrumu	49
Şekil 39. Çoklu noktadan alınan çınlama dalgaboyları (a) 2D görüntü (b) 3D görüntü	50
Şekil 40. Çoklu noktadan alınan yansıma görüntüleri (a) 2D görüntü (b) 3D görüntü.....	51
Şekil 41. Çoklu noktadan alınan geçen ışık görüntüleri (a) 2D görüntü (siyah-beyaz) (b) 2D görüntü (renkli) (c) Gerçek kamera görüntüsü	52
Şekil 42. 425 ppm konsantrasyonunda sisteme verilen propanolun farklı anlarda alınan kamera görüntüleri.....	54
Şekil 43. Her bir çözücü buharının dağılımını gösteren kamera görüntüleri	55
Şekil 44. Sisteme verilen propanolun farklı konsantrasyonları için alınan kamera görüntüleri	56
Şekil 45. Sisteme çözücü buharı verilmeden önce alınan kamera görüntüsü	57
Şekil 46. Geçen ışık değişiminin gözlemlendiği alan	58
Şekil 47. Farklı konsantrasyonlardaki propanol için gri seviye değişim grafikleri: 85 ppm (a), 170 ppm (b), 255 ppm (c), 340 ppm (d), 425 ppm (e), 510 ppm (f).....	59
Şekil 48. Farklı konsantrasyonlardaki propanol için gri seviye değişim grafiği.....	60
Şekil 49. Farklı çözücü buharlarının 170 ppm konsantrasyonu için gri seviye değişim grafiği (a). Farklı çözücü buharlarının 425 ppm konsantrasyonu için gri seviye değişim grafiği (b)	61
Şekil 50. t- SNE blok diyagramı	62
Şekil 51. (a) Çözücü buharı türü için t-SNE yöntemi ile iki boyutlu temsil (b) Çözücü buharı türü ve konsatrasyonu için t-SNE yöntemi ile iki boyutlu temsil	63

Şekil 52. Sistemin blok diyagramı	65
Şekil 53. Propanolun farklı anlardaki alınan kamera görüntülerinin gradyan histogramı	66
Şekil 54. Çözücü buharı türü sınıflandırma sisteminin hata matrisi	68
Şekil 55. Heptan çözücü buharı konsantrasyonu sınıflandırma sisteminin hata matrisi	69
Şekil 56. Çözücü buharı ve konsantrasyon sınıflandırma sisteminin hata matrisi	71



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

2D	: İki Boyutlu Görüntü
3D	: Üç Boyutlu Görüntü
BR	: Bragg Reflection (Bragg Yansıması)
CEM	: Buharlaştırma Sistemi
CNN	: Convolutional Neural Network (Evrişimli Sinir Ağı)
DA	: Doğal Anodik
EL	: Elektrolüminesans
FN	: Yanlış Negatif
FP	: Fabry-Perot
FP	: Yanlış Pozitif
GP	: Gaussian Process (Gauss Süreci)
GS	: Gözenekli Silisyum
GSFP	: Gözenekli Silisyum Fabry-Perot
HF	: Hidroflorik Asit
HOG	: Histogram of Oriented Gradients (Yönlendirilmiş Gradyanların Histogramı)
IL	: İyonik Sıvı
LED	: Light-Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LFC	: Sıvı Akış Kontrol Ünitesi
LSTM	: Long Short-Term Memory (Uzun Kısa Süreli Bellek)
MFC	: Kütle Akış Kontrol Ünitesi
MKL	: Çoklu Çekirdek Öğrenme
OF	: Optical Flow (Optik Akış)
PCA	: Temel Bileşen Analizi
PL	: Fotolüminesans
PR	: Örüntü Tanıma
PSi	: Porous Silicon (Gözenekli Silikon)
RGB	: Red - Green- Blue (Kırmızı-Yeşil-Mavi)
RNN	: Recurrent Neural Network (Özyinelemeli Sinir Ağı)
SVM	: Support Vector Machines (Destek Vektör Makineleri)
SWIR	: Short Wave Infrared (Kısa Dalga Kızılötesi)

TMM	: Thue-Morse Model
TN	: Gerçek Negatif
TP	: Gerçek Pozitif
t-SNE	: t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding
VOC	: Uçucu Organik Buhar
YSA	: Yapay Sinir Ağları

Simgeler

$\tilde{C}_t$	: Aday hücre durumu
C_t	: Hücre durumu
E_0	: Enerji
N_2	: Azot gazı
A	: Amper
cm	: Santimetre
f	: Unutma kapısı
G	: Gradyan Büyüklüğü
h	: Sonuç bilgisi
I	: Giriş ışık spektrumu
i	: Giriş bilgisi
L	: Görüntü
mA	: Miliamper
mm	: Milimetre
n	: Kırılma indisi
nm	: Nanometre
O	: Çıkış ışık spektrumu
o	: Çıktı bilgisi
P	: Gözeneklilik
P	: GS sensör geçirme spektrumu
ppm	: Parts per million (milyonda bir)
Pt	: Platin
sn	: Saniye
θ	: Gradyan Yönü
λ	: Dalga boyu
σ	: Sigmoid

GİRİŞ

Canlılar çevrede meydana gelen fiziksel ya da kimyasal değişimleri duyu organlarıyla algılar (ışık, sıcaklık, PH vb.). Canlıların bu özelliğinden esinlenerek sensörler üretilmektedir. Gaz sensörleri, sensör türleri içinde önemli yere sahiptir ve hayatımızın her anında karşılaştığımız, boyut olarak küçük, işlev olarak büyük sistemlerdir. Evlerimizde, iş yerlerimizde, alışveriş merkezlerinin kapalı otoparklarında, çalıştığımız endüstriyel tesislerde, kısacası hayatımızın her alanında gazlarla karşı karşıyayız. Bu gazlar patlayıcı ya da zehirleyici özellikleri ile can ve mal güvenliğimizi tehdit etmektedir (Gupta *et al.* 2013). Ucuz, güvenilir, küçük ve düşük güç tüketen gaz sensörleri; sağlık, askeri, eğitim ve çevre koruması gibi birçok alan için geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğundan gaz sensörlerine büyük bir ilgi vardır. Yüksek seçicilik ve hassaslıkta daha iyi gaz sensörleri talebi arttıkça, gerekli yüzey ve hacim özelliklerine sahip daha uygun malzeme bulmanın yanında yeni tip gaz sensörlerinin geliştirilmesi üzerine yoğun çaba sarf edilmektedir.

Silisyumun aşındırılmasıyla elde edilen gözenekli silisyum (GS) malzemelere dayalı sensörler; küçük boyuta, yüksek hassasiyete sahip olup düşük maliyetle kolay bir şekilde üretilmekte ve kimyasalları hızlı ve kolay bir şekilde analiz etme yeteneğine sahiptirler (Kim *et al.* 2011). Ayrıca GS sensörlerin yüzey alanının yüksek olması, birkaç nanometreden mikrona kadar farklı morfoloji ve büyüklükte gözeneklerin oluşturulabilmesi ve gözenekli tabakaların elektrokimyasal anodizasyon yoluyla kontrol edilebilir bir şekilde üretimi ile sensörün hassasiyeti artmaktadır. Yine GS üretim aşamasında kullanılan parametreler (akım yoğunluğu, elektrolit formülasyonu, sıcaklık, aşındırma süresi ve Si kristalinin direncinin değişimi) kontrol altında tutularak üretim işlemi gerçekleştirildiğinde istenilen özellik ve hassasiyette karmaşık çok katmanlı yapılar hazırlanabilmektedir (Sailor 2012).

GS yapının malzeme özelliklerinde meydana gelen değişimlerden dolayı gaz algılama uygulamalarında tercih edilen malzeme olmuştur. Bu özellikler ise elektriksel (iletkenlik, direnç, kapasitans vb.), elektrokimyasal (iletkenlik, amperometrik, impedimetrik ve potansiyometrik), optik (yansıma, fotoluminesans, flüoresan vb.) ve termal (sıcaklık değişimi) özelliklerdir (Dhanekar and Jain 2012). Gaz algılama uygulamalarında, GS sensörlerin çalışma prensibi, sensörün gaz ve gazın farklı konsantrasyonları ile etkileşimi sonucu gözenekli silisyum tabakaların kırılma indisinin değişmesinden kaynaklanan optik spektral kaymadır. Gözenekli yapı içerisine herhangi bir gaz sızdığında gözenekli silisyum sensörün kırılma indisi

değişmektedir (artmaktadır) ve yansıma spektrumunda kaymaya neden olmaktadır (daha uzun dalga boyu bölgesine). Bu kaymanın miktarı ve hızı GS sensörü oluşturan gözenekli tabakaların kalınlıklarının ve gözenekliliğin farklı olmasından dolayı da aynı olmayacaktır. Gazın dolmasıyla birlikte gözenekli yapıda meydana gelen yansıma spektrumundaki değişim analiz edilerek gaz tespiti yapılabilmektedir (Ivanova *et al.* 2019). Yine gözenekli silisyum sensörler vasıtasıyla gazların farklı konsantrasyonları kullanılarak yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar alınabilmektedir (Park *et al.* 2010, Shang *et al.* 2011).

Kamera ile kayıt alınarak kokunun görüntüye dönüştürülebilmesi ve bu görüntülerin kullanılarak yapay zeka temelli sensör sisteminin geliştirilmesi bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Bu çalışmada da küçük boyutlu ve yüksek hassasiyette olması, ucuz ve kolay bir şekilde üretilebilmesinin yanı sıra kimyasalları hızlı bir şekilde tanıma özelliğinden dolayı GS yapı tercih edilmiştir. Gözenekli silisyumun (GS) yüzeyinde üretim parametrelerinden dolayı farklı gözenekliliğe sahip bölgeler ve farklı kalınlıkta tabakalar bulunmaktadır. Bu bölgelerde organik çözücü buharları gibi kimyasalların davranışlarının farklı olması, GS' nin her bir noktasının farklı bir sensör gibi davranmasına yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında GS' nin üzerindeki her bir nokta incelenmektedir ve her bir noktaya tek tek bakmak yerine GS yapı arkasına yerleştireceğimiz kamera yardımıyla yüzeyin tümüne bakılmaktadır ve tamamen yeni bir yolla gaz ve kimyasal buharların tespiti yapılabilmektedir. Bu yeni teknikte üretimi gerçekleştirilen GS yapı, bir ışık kaynağı (LED) ile SWIR kamera arasına yerleştirilip GS sensör sistemi oluşturulmaktadır ve LED ile GS yapı aydınlatılmaktadır. Aydınlatıcı kaynağının ışıma spektrumu değişmeyeceği için GS yapının yansıma spektrumundaki değişimden kaynaklanan geçen ışık şiddetinde değişim olmaktadır. Böylece SWIR kamera yardımıyla bu değişimin videosu alınarak veri tabanı oluşturulmaktadır. Bu videolar da farklı görüntülerden oluşmaktadır. Görüntülerdeki bu farklılıklar kullanılarak ilgili çözücü buharına ait kimliklendirme ve konsantrasyon tayini makine öğrenme tekniklerinden derin öğrenme ve görüntü işleme yardımıyla yapılmaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

Organik çözücüler, kimya endüstrisinde ve laboratuvarlarda büyük miktarlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Dai *et al.*2016). Organik çözücülerin çoğu, tehlikeli ve toksik özelliklere sahip organik kimyasallardır (Mckee *et al.*2015; Plocosteet *al.* 2017). Bu nedenle çok düşük konsantrasyonlarda bile çevre kirliliğine ve insan sağlığına zarar verirler. Örneğin metanol, alkollü içeceklerde yalnızca yüzde birkaç konsantrasyonda körlüğe neden olabilir ve hatta insan yaşamını tehdit edebilir (Gupta *et al.*2013), havada aşırı düzeyde benzene uzun süre maruz kalmak lösemiye ve potansiyel olarak ölümcül bir kan kanserine neden olabilir (Rana and Verma 2013), karbondioksit (CO_2) gazı, küresel ısınmaya ve hava kirliliğine neden olan en önemli sera gazlarından biridir (Kayahan 2018). Bu nedenle endüstride, tıpta, gıda güvenliğinde ve çevre kontrolünde organik çözücülerin konsantrasyonunu yüksek hassasiyet ve düşük maliyetle belirleme yönteminin bulunması önemlidir. GS (gözenekli silisyum) sensörlerin yüksek yüzey alanı ve aynı zamanda birkaç nanometreden mikrona kadar farklı morfoloji ve büyüklükte gözeneklerin oluşturulmasına izin veren, gözenekli tabakaların elektrokimyasal anodizasyon yoluyla kontrol edilebilir bir şekilde üretimi ile hassasiyeti artmaktadır. Ayrıca akım yoğunluğunun, elektrolit formülasyonunun, sıcaklığın, aşındırma süresinin ve Si kristalinin direncinin değişimi yoluyla karmaşık çok katmanlı yapıların hazırlanabilmesi de bir diğer kritik gelişmedir (Sailor 2012). Bu tür yapılar esasen diğer gözenekli malzemelerle (örn. alüminyum oksitler, zeolitler) elde edilemez, bu da GS' yi algılama uygulamaları için ideal bir aday yapar. Ek olarak GS, yüzey kimyası yöntemleri kullanılarak veya hedef moleküllere özgüllük sağlayan diğer materyallerle infiltre edilerek kolayca işlevselleştirilebilir. Yeterli bir katkılama seviyesinde, gözenekli silikon yüksek derecede iletken olabilir ve bu nedenle çok alanlı (multiparametric) algılamaya temel sağlayan, optik sinyallere paralel olarak elektrik alanındaki analitlere yanıt verebilir (Igor 2015).

Gözenekli silisyum ilk kez Uhlir (1956) tarafından 1956 yılında keşfedilmiştir. Uhlir silisyumun elektriksel aşındırılmasıyla ilgili çalışırken uygulanan anodik akımın silisyum yüzeyinde kahverengimsi bir tabaka oluşturduğunu gözlemlemiştir Daha sonra Turner (1958) bu tabakayı daha detaylı araştırmış ve bu tabakaya “Gözenekli Silisyum” adını vermiştir (Aydın 2010).

Gözenekli silisyumun yüzey alanının geniş olması, anodik aşındırma sonrasında iç yüzeyinin tamamen hidrojenle kaplanmış olması ve havada oksidasyona oldukça duyarlılığı

(çok hızlı oksitlenmesi) kimyasal sensör uygulamaları alanında, 1970-1980 yılları arasında ilgiyi üzerine çekmiştir. Canham (1990), anodik akım uygulama süresinin artmasıyla birlikte gözenekli silisyum yapı oluşumunda silisyum iskeletin daraldığı, gözeneklerin ise genişlediğini gözlemlenmiştir. Lehman ve Gösele' nin (1991) çalışmalarında gözenek genişliğinin ve gözenekli silisyum yapının özelliklerinin (elektriksel, morfolojik ve optik özelliklerinin); anodizasyon esnasında uygulanan akım yoğunluğu ve uygulama süresi, kullanılan hidroflorik asit konsantrasyonu, tek kristal silisyumun tipi ve öz direnci, aydınlatma ile değiştiği belirtilmiştir. Setzu *et al.* (1998), farklı akım yoğunluklarıyla oluşturulan GS yapı üzerindeki anodizasyon sıcaklığının etkisini inceleyerek gözeneklilik, kırılma indisi ve GS/külçe Si arayüzey pürüzlülüğünü gözlemlemişlerdir. GS/külçe Si arayüzey pürüzlülüğünün düşük sıcaklıklarda azaldığını tespit etmişlerdir. Pavesi (1997), GS'nin fiziksel özellikleri, dielektrik GS çoklu tabakaların fabrikasyonu işlemi sonucunda PL ve yansıma ölçümleri, GS çoklu tabakaların yaşlanma etkisi ve uygulama alanları üzerine kapsamlı bir derleme yayınlamıştır. Bisi *et al.* (2000), GS' nin üretimi; fiziksel, kimyasal, elektriksel ve optik özellikleri; teorik çalışmaları ve uygulamaları üzerine bir derleme yayınlamışlardır.

Martin *et al.* (1996), n tipi silisyumdan üretimi gerçekleştirilmiş olan GS 'nin anodizasyon akım yoğunluğunun ve bu akım yoğunluğunun uygulanma süresinin PL' nin üzerine etkisini incelemişlerdir. Anodizasyon akım yoğunluğu ve uygulanma süresi arttıkça PL şiddetinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Pavesi ve Mazzoleni (1995), DBR (Bragg ayna yapısı) ve mikrokaviteyi oluştururken uygulanan akım yoğunluğu ve süresini ayarlayarak GS' den kontrollü ışıma elde ederek istenen dalga boyunda dar ışıma elde etmişlerdir. Chan and Fauchet (1999), periyodik olarak oluşturulan iki adet GS çoklu tabaka aynanın (DBR) arasına yüksek ışıma verimli GS tabakanın oluşturulduğu mikrokavite çınlama yapısının PL ve EL ölçümlerini yapmışlardır. Oluşturulan mikrokavite yapısının, PL ve EL spektrumunda önemli ölçüde daralmaya sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Canham (2000) ile Pavesi *et al.* (2000) silisyum tabanlı lazerlerin geleceğinden bahsederken GS çoklu tabaka yapısı ve mikrokavite ile ışıma spektrumlarının daraltıldığını ve ince tabaka nanokristal formlarda optik kazanç elde ettiklerini söylemişlerdir.

Cullis *et al.* (1997)' nin derleme çalışmasında o güne kadar GS üretim işlemi için geliştirilmiş üretim teknikleri, GS' nin fiziksel incelenme teknikleri ve GS 'nin PL özellikleri incelenmiştir. Hou *et al.* (1996), hidroflorik asit tabanlı çözeltide elektrokimyasal anodik dağlama yöntemi için yeni bir metot önermişlerdir. Geleneksel anodik dağlamada sabit akım veya sabit gerilim kaynağı DC' dir. Önerilen yeni metotta akım veya gerilim darbeleridir. Darbeler arası zamanda akım veya gerilim uygulanması durdurulur. Bundan dolayı gözenek

uçlarına taze çözelti ulaşımı kolaylaşır ve yine gözenek uçlarındaki hidrojen gazı ortamı terk eder. Böylelikle aynı sürede DA dağlamaya göre daha homojen ve daha kalın tabaka elde edildiği gösterilmiştir. Yine Grover *et al.* (2000), darbeli anodizasyon tekniği ile GS üretmişler ve HF konsantrasyonunun ve darbe genişliğinin fonksiyonuna bağlı olarak değişen tabakalar elde etmişlerdir. Givant *et al.* (2000), geleneksel elektrokimyasal anodik dağlamaya alternatif olarak yanal anodik dağlama önermişlerdir. Bu teknik ile GS /Silisyum ara yüzeyinin daha keskin olduğunu ve daha kontrollü anodizasyon gerçekleştirdiklerini açıklamaktadırlar. Harraz (2014)' ın yayınladığı makalede, GS fabrikasyonunda iki ana yöntem yaygın olarak uygulandığından bahsetmiştir: (i) elektrokimyasal aşındırma ve (ii) stain aşındırmadır. Elektrokimyasal aşındırmadan önce, gözeneklerin güvenli bir şekilde oluşturulduğu en uygun akım yoğunluğunun belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Tekli ve çoklu tabaka GS oluşumundan ve buna sebep olan etkenin uygulanan akımın sabit veya değişken olmasından kaynaklandığından bahsetmiştir. Bu makalede, çeşitli kimyasal türlerin, gazların ve biyomoleküllerin tespiti için optik ve elektriksel GS sensörleri alanında son dönemde kaydedilen gelişmeler özetlenmiştir. GS sensörleri için şu anda kullanılan temel ilkeler ve algılama mekanizmaları da ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Silisyumda ısıma olayının görülmemesine rağmen üretilen GS yapılarda ısıma olaylarının görülmesi, GS yapıların diyot ve sensör davranışının mümkün olabileceğini göstermektedir, diyot ve sensör uygulamalarında kullanılmaktadır. Gözenekli silisyumun içteki geniş yüzeye yayılması ve çok katmanlı yapıda olması nedeniyle yüzey bağları, özellikle Si-O bağlarının gözenekli silisyumun optik, elektrik ve gaz duyarlılığı özelliklerinin ayarlanmasında önemli rol oynadıkları bilinmektedir. Gözenekli silisyumun bu özellikleri ortam nemliliğine de çok duyarlıdır. Bunlar GS hakkındaki araştırmaları arttırmıştır. Bu durum özellikle Metal-GS yapıların gaz sensörleri gibi kullanılmasına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır (Tsai *et al.* 1991). Taliercio *et al.* (1995), gözenekli silisyumun etkili bir oksijen sensör olarak kullanılabileceğini önerirlerken gözenekli silisyum yapının biyosensör olarak da kullanılabileceği düşünülmüştür.

Karacalı *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada, fiber optik kablunun ve GS yapının yanlış konumlandırılmasından kaynaklanan istenmeyen yansımalar gibi geleneksel GS sensörlerinin bazı sorunlarını ortadan kaldırmak amacıyla GS tabanlı sensörler için yenilikçi bir tasarım önerilmiştir. Birbirine yakın kırılma indisine sahip alkollerin yansıma ölçümleri, önerilen sensör ve geleneksel sensörlerle alınmıştır. Her iki sensör de neredeyse aynı hassasiyete sahiptir ve her ikisi de çok yakın kırılma indekslerine sahip iki alkolün tanımlanmasında etkili olmuştur. Önerilen sensörünün tekrarlanabilirliğinin geleneksel sensöre göre daha yüksek olduğunu ve sensörün algılama uygulamalarında kolay konumlandırma ve

esnekliğe izin verdiği gösterilmiştir. Öte yandan, önerilen sensör geleneksel sensörle karşılaştırıldığında kapsayıcı bir imalat süreci ve metodik bir hazırlık gerektirdiğinden bahsedilmiştir.

Klyui *et al.* (2017), ince GS katmanlarının büyüme parametrelerinin yerinde kontrol edilmesi için otomatik bir sistem önermişlerdir. Sistem, GS katmanlarının büyüme hızının belirlenmesine ve zamanla GS' nin büyüme hızındaki değişikliklerin izlenmesine olanak sağlamıştır. GS filmlerinden su-etanol çözeltilerinin ve şarapların ayrışması esnasında yansıma katsayılarının, şekillerinin ve konumlarının farklı davranışı gözlemlenmiştir. Maksimum ve minimum noktadaki farklılıklar, film gözenekliliğinin derinlik ile dağılımında homojen olmadığına işaret etmiştir. Öte yandan, adsorbe moleküller ve gözenek yüzeyi arasındaki etkileşim modundaki farklılıklar, ayrışma esnasında optik karakteristiklerin kinetiğinde farklılık yaratmıştır. Elde edilen sonuçlar, gözenekli maddelere dayalı seçici optik sensörlerin geliştirilmesi için yararlı olmuştur.

GS yüzeylerin malzeme özelliklerinde meydana gelen bu değişimlerin, algılama amaçları için temel teşkil ettiğinden; bu değişiklikler elektriksel (iletkenlik, direnç, kapasitans vb.), elektrokimyasal (iletkenlik, amperometrik, impedimetrik ve potansiyometrik), optik (yansıma, fotoluminesans, flüoresan vb.) ve termal (sıcaklık değişimi) sinyaller şeklinde olabilmektedir. Biyosensörler; glukoz izlenmesi, böcek öldürücü tespiti, bakteri ve virüs tespiti, gıdadaki ilaç kalıntılarının belirlenmesi ve yeni bileşiklerin biyolojik aktivitesinin değerlendirilmesi gibi geniş bir yelpazeye sahiptir (Dhanekar and Jain 2012).

Son yıllarda, gaz algılama; çevresel izleme, ülke güvenliği, endüstriyel emisyon kontrolü, nefes teşhisi ve gıda kalite kontrolündeki yaygın uygulamaları nedeniyle akademi ve sanayide büyük ilgi görmüştür (Korotchenkov 2013). Gaz algılama uygulamalarında, GS sensörlerin çalışma prensibi, sensörün çözücü buharı ve çözücü buharının farklı konsantrasyonları ile etkileşimi sonucu gözenekli silikon tabakaların kırılma indisinin değişmesidir. Gözeneklere çözücü buharı dolduktan sonra GS tabakanın etkin kırılma indisinde ve buna bağlı olarak yansıma spektrumunun değişikliğe neden olur. Böylece, yansıma spektrumu analiz edilerek gözenekler içinde adsorbe edilen çözücü buharının molekülleri tespit edilebilir (Ivanov *et al.* 2019). GS sensörün bu gibi özellikleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarla CO_2 gazının tespiti yapılabilmektedir. CO_2 gazının konsantrasyonu arttıkça GS sensörün akımı (artar) ve PL yoğunluğunun (azalmış) değiştiği görülmüştür (Kayahan 2018). Yine başka bir çalışmada doymuş etanol buharına maruz bırakılan GS yapının buhar akışı başlamadan önce ve başladıktan sonraki beş farklı zamanda alınan ölçüm spektrumları kaydedilmiştir. Maksimum tepe piki değeri zamanla azalmış ve tepe noktası iki ayrık duruma

bölünmüştür. Ayrıca spektrumların kırmızıya kayması meydana geldiği görülmüştür. (Ghulinyan *et al.* 2006). GS sensörde uygulanan akım yoğunluğunun sensör üzerine etkisi incelenmiş, üç farklı akım yoğunluğu kullanılarak üretilen sensörün aseton ve etanol buhar varlığında hassasiyeti değerlendirilmiş, asetona karşı daha hassas olduğu görülmüştür (Kareem *et al.* 2021). GS yapının kullanılması, polar bir bileşik olan asetonitril buharına olan duyarlılığı polar olmayan bir bileşik olan kloroform buharına olan duyarlılığından daha fazla olduğu görülmüştür (Manakov *et al.* 2019).

Buhar varlığından etkilenen renk değişikliğinin miktarının belirlenmesini sağlayan, kolorometrik teknik kullanılarak yapılan GS sensör uygulamalarına ait çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde “Smart dust” kavramı kullanılarak mikrogözeneklere toluen yoğunlaştığında, tüm parçacığın kırılma indisi artar ve bu da fotonik pikte kırmızı bir kaymaya yol açar. Yeşilden kırmızıya renk değişimi çıplak gözle kolayca görülebilmektedir (Sailor *et al.* 2005).

Başka bir çalışmada da sensör araştırmasında renk bilimine dayalı bir renk farkı görüntü tekniği uygulanmıştır. Farklı dozlarda (etanol buharı yokken ve etanol buharının dört farklı konsantrasyonu 140ppm, 2000ppm, 10000ppm ve 22500ppm) etanol buharlarına maruz kalma sırasında GS Bragg reflektörünün görüntüleri yüksek hızlı bir kamerayla ardından bir renk farkı denklemi ile dijital işleme tabi tutulmuştur. Renk farkı görüntülerindeki açıklığın, buhar konsantrasyonundaki artışla birlikte genel olarak arttığı görülmüştür. Yine aynı çalışmada, akım ve PL (fotoluminesans) yoğunluk tepki sinyalleri, bu araştırmadan elde edilen renk farkı tepki sinyali ile karşılaştırmak için ölçülmüştür. Bu renk farkı tepki sinyalinin duyarlılığı PL yanıtından daha yüksektir ve saptanabilir konsantrasyon aralığı mevcut yanıtın daha geniştir (Park *et al.* 2010).

Gaz algılama ve Bragg reflektörü ile duyarlılığının karşılaştırılması için Thue-Morse çok katmanlı (TMM) uygulamasının bir örneği Moretti *et al.* (2007) tarafından raporlanmıştır. Metanol, pentan, izopropanol ve izobütanole maruz kaldığında BR'ye göre daha yüksek bir TMM duyarlılığı gözlenmiştir. Bu gerçek, BR ile karşılaştırıldığında yüksek ve düşük gözenek katmanları arasındaki arayüzlerin azalmış miktarı nedeniyle TMM yapısı için daha etkili kılcal yoğunlaşma ile açıklanmıştır. Bununla birlikte, bu sonuçların alternatif bir yorumu, BR ve TMM için kılcal yoğunlaşmada dolgu faktörünü kritik olarak belirleyen farklı gözenek morfolojisi (yüksek ve düşük gözenekli tabakaların dizileri ve kalınlığı) ile ilişkilendirilmiştir (Casanova *et al.* 2012).

Rea *et al.* (2009) yaptığı çalışmada, Bragg ızgaralı düzlemsel dalga kılavuzu kavramı VOC (etanol, IPA) algılaması için kullanılmıştır. İletim spektrumundaki rezonans piki, organik

buharlara maruz kaldığında hızlı ve geri dönüşümlü bir kırmızı kayma meydana gelmiştir. Tepki ve geri kazanım süresi sırasıyla 0,3 s ve 3 s olarak belirlenmiş, bu da cihazın yanıt verebilirliğinde ve tersinirlikte mükemmel bir hız göstermiştir. Dalga kılavuzunun çekirdek tabakasındaki Bragg ızgara yapısı ve ilgili ölçüm mekanizması (rezonans pikinin spektral kayması), birkaç VOC' a maruz kaldığında sadece iletim kayıplarının tespit edildiği başka bir çalışmaya kıyasla cihaz performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir (Arrand *et al.*1999).

Nano-gözenekli silikon (GS) mikro boşluk yapılarına dayalı fotonik sensör kullanılarak sıvı bir ortamda organik çözücülerin belirlenmesi için üç yöntem (uçucu organik bileşik (VOC), sıvı damlası ve doymuş buhar basıncı) sunulmuş ve karşılaştırılmıştır. Bunların arasında, VOC yöntemi, silikon gözeneklerine organik çözücünün birikmesi nedeniyle sensör yüzeyinde analitin yüksek buhar basıncını oluşturabildiğinden düşük çözücü konsantrasyonlarında en yüksek hassasiyeti sağlamıştır. Sudaki etanol konsantrasyonu arttıkça dalga boyu kayması görülmüş ve yine alkoldeki metanol konsantrasyonu arttıkça da dalga boyu kaymasının arttığı görülmüştür. Düşük çözücü konsantrasyonlarında bile yüksek hassasiyet sağlanmıştır (Bui *et al.* 2019).

Optik GS sensör dizisinin ve örüntü tanıma (PR) algoritması, en yaygın VOC' lerin tanınmasında uygulanmıştır. Burada, GS Rugate filtreleri, sensör elemanların maksimum kimyasal çeşitliliğini sağlamak için beş farklı iyonik sıvıyla (IL) infiltre edilmiştir. Dizideki altı elementin (beş GS / IL kompoziti ve bir çıplak GS Rugate filtresi) yanıtı (pik spektral kayma) ölçülmüş, ardından temel bileşen analizi (PCA) ile işleme tabi tutulan üç farklı konsantrasyonda altı farklı VOC ile ölçülmüştür ve VOC' ların ayrımı gerçekleştirilmiştir (Albert *et al.* 2000; Rock *et al.* 2008 and Shang *et al.* 2011).

Bahsedilen bu yöntemler ne kadar kullanışlı ve verimli olursa olsun, bu sensörlerin bahsedilen karmaşık algılama görevleri için ne kadar uygun olduğu tartışma konusu olmuştur. Bundan dolayı sistemden doğru bilgiyi elde etme, yöntemin uygunluğu ile sınırlı olsa da bu soruyu çözmek için sensörün yanıt bilgileri, sinyal işleme teknikleri ile analiz edilmiştir. Uygun sinyal işleme prosedürleri uygulanarak gerçekleştirilen bir çalışmada, iki boyutlu dalgacık dönüşümü ile optik temelli kimyasal sensörün cevabı olan sinyalin önemli özniteliklerinin bulunmasından ve dolayısıyla incelenen sensörlerin ayırt edebilme ve ölçme yeteneklerinin geliştirilmesinin sağlanmasından bahsedilmiştir. Elde edilen dalgacık katsayıları, SVM' de kullanılmak üzere bir vektör biçiminde birleştirilmiştir. Bu öznitelik vektörleri train ve test aşamasında kullanılarak GS tabanlı kimyasal sensöre gönderilen altı farklı gazın (aseton, asetaldehit, amonyak, benzen, izopropanol ve tolüen) hangi sınıfa ait olduğuna karar verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada iki boyutlu dalgacık dönüşümü kullanılarak

elde edilen başarı oranının tepe dalgaboyu kaydırma özneliliğinin kullanılarak elde edilene oranla daha başarılı olduğu görülmüştür (Murguia et al. 2013).

Carreira and Zisserman (2017) yaptığı bir çalışmada, eylem tanıma için video sınıflandırma işlemi üzerinde çalışılmıştır. Mevcut eylem sınıflandırma veri kümesindeki (UCF-101 ve HMDB-51) videoların azlığı video mimarilerini iyi bir şekilde tanımlamayı zorlaştırdığından Kinetics (400 insan eylem sınıfı ve sınıf başına 400'den fazla klip içermektedir) veri kümesindeki videolar ışığında yeniden değerlendirilmiştir. Kinetics veri kümesi ile ön eğitimden sonra, I3D modellerinin (Two-Stream Inflated 3D ConvNet) eylem sınıflandırmasında kullanılmasıyla en son teknolojiye göre önemli ölçüde iyileşme olmuş ve HMDB51 veri kümesinde başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.

Zolfaghari et al. (2017) yaptığı bir çalışmada, eylem tanıma için video sınıflandırma çalışmasında en önemli görsel bilgileri hesaplayan ve birleştiren üç akışlı bir ağ mimarisi önerilmiştir. Bu bilgiler ise poz(pose), hareket (OF) ve görünüş (RGB). Mevcut yaklaşımlar, üç ayrı özelliğe sahip insan duruşunun zamansal dinamiklerini modellemiştir ve insan vücudu parçalarının konumunu hızlı bir evrişim ağı ile hesaplamayı önermiştir. Bu kombinasyon zaman içinde vücut bölümlerinin zamansal dinamiklerini yakalayabilmiştir ve eylem tanıma performansını iyileştirmek için değerlidir.

Qian and Sengupta (2019) gerçekleştirdiği çalışmada ise HMDB51 tarafından sağlanan eğitim ve test videoları üç ayrı bölümde kullanılmakta ve doğruluğu üç ayrı eğitim / test bölümüne göre ortalama olarak rapor edilmiştir. Her üç bölüm için de eğitim setindeki videolar, SVM' leri çoklu çekirdek öğrenme (MKL) çerçevesi altında eğitmek için kullanılmıştır. Eğitim veriseti farklı ağlardan (Inception ve ResNet) farklı özellikler (RGB ve Optic Flow) konusunda SVM kullanılarak eğitilmiştir. Burada, iDT ve MIFS gibi ek özellikler eklenmiş ve diğer yöntemlerle birleştirilerek eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. Test verisetindeki sınıflandırma doğruluğu, sonuçları değerlendirmek için kullanılmıştır. Tahmin sürecinin çeşitli aşamalarından gelen çekirdeklerin birleştirilmesi ile artan doğruluk sağladığı anlaşılmıştır (Qian and Sengupta, 2019). Yine aynı çalışmada, eğitim süresini hızlandırmak için, eğitim veriseti altkümelere bölünmüştür ve GP kullanılarak eğitilmiştir. Her alt küme farklı ağlardan (Inception ve ResNet) farklı özellikler (RGB ve Optic Flow) konusunda eğitilmiştir. Füzyon işlemi ile doğruluğun arttığı anlaşılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Sensör Fabrikasyonu

Gözenekli silisyumun oluşum süreci ve elektrokimyasal aşındırmanın temelleri

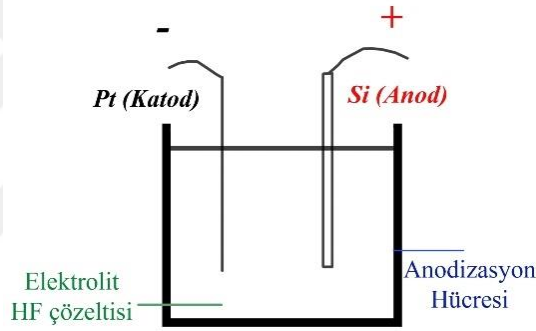
Yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biri olan silisyum doğada kum ve kuvarst biçiminde bulunmaktadır. Kumun saflık derecesi çok düşük olduğundan kullanıma uygun değildir. Ancak kuvarsın % 90' ı silisyumdur. Kuvars işlenerek silika, silikadan da silisyum elde edilir. Silisyumun saflaştırılması ile de çok kristalli silisyum elde edilir. Çok kristalli silisyumun işlemlere tabi tutulması sonucu tek kristalli silisyum elde edilir (Gör Bölen 2018).

Silisyum atomu, periyodik cetvelin V. grup elementleri (As, Sb, P, N gibi) ile katkılıandığında n-tipi Si elde edilir. Bu elementlerin son yörüngelerinde beş valans elektron bulunur. Bu elektronların dört tanesi Si atomunun son yörüngesinde bulunan silisyumun dört valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur, geriye kalan tek elektron ise katkı atomuna zayıf bir şekilde bağlıdır ve çok kolay iyonlaşır. Bu durumda katkı atomu Si kristaline örgü içinde serbestçe hareket edebilen bir elektron vermiş olur. Katkı atomuna elektron verdiği için donör denir ve katkılanan silisyuma da n-tipi silisyum denir. Donör atomları yarıiletken enerji bant diyagramında yasak bant aralığında ve iletim bandı alt sınırı yakınındadır. n-tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu boşluk konsantrasyonundan büyük olacaktır. Bu nedenle elektriksel iletkenlikte elektronlar baskın olacaktır. Yani, n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar, azınlık yük taşıyıcıları ise boşluklardır (Sze and Kwong, 2007).

Si atomu, periyodik cetvelin IIIA grubu elementleri (In, Ga, Al, B gibi) katkılıandığında p-tipi Si elde edilir. III. grup elementlerinin son yörüngelerinde üç valans elektron bulunur. Bu üç elektron Si atomunun son yörüngesinde bulunan dört valans elektronun üçü ile kovalent bağ yapar ve Si atomunun bir elektronu bağ yapamaz. Bu elektronun karşısında boşluk olur ve bu boşluk Si- Si bağlarından bir elektronun bu boşluğa yerleşmesiyle doldurulabilir. Bu defa da elektronun kopmuş olduğu yerde bir boşluk meydana gelir, bu boşluk da başka komşu atomlardan kopan elektronlarla doldurulur. Bunun sonucunda valans bandında boşluk oluşmuş olur ve bu boşluk örgü içerisinde katkı atomundan bağımsız olarak hareket eder. Katkı atomu Si kristalinden bir elektron aldığı için akseptör denir, katkılanan silisyuma ise p-tipi silisyum denir. Akseptör atomları yarıiletken enerji bant diyagramında valans bandının hemen üzerine yerleşir (Sze and Kwong, 2007).

Aydın Yüksel (2010) tarafından bildirildiğine göre silisyumun bulunması 1823 yılında gerçekleşmiş, ilk silisyum dedektör Ollie tarafından 1935 yılında yapılmış, yüksek saflıkta elde edilmesi ise Du Pont (1939) tarafından gerçekleştirilmiştir. Tek kristal silisyum olarak Czochralski (1952) tarafından üretilmiştir. 1952 yılına gelindiğinde ise silisyum ticari olarak geniş skalalı entegre devre ve cihaz yapımının %80' den fazlasında kullanılmıştır. 1990 yılında silisyumdan elektrokimyasal yöntemle elde edilen görünür bölgede fotolüminesans veren gözenekli silisyumun keşfiyle optik sistemlerde de kullanılmaya başlanmıştır.

Gözenekli silisyum oluşumunda anodizasyon işlemi tercih edilmektedir. Daha kontrollü, güvenilir, ekonomik ve kolay hedefe ulaşmayı sağlayan elektrokimyasal aşındırma işlemi olduğundan GS üretiminde tercih edilmektedir (Fissell *et al.* 2009; Burham *et al.* 2015). İki elektrot arasına elektrik akımı uygulanarak HF çözeltisi yardımıyla nanogözenekli yapı oluşumunu sağlayan elektrokimyasal aşındırma işlemine 'anodizasyon' denir (Gör Bölen 2018). Şekil 1' de geleneksel anodizasyon hücresi verilmektedir.



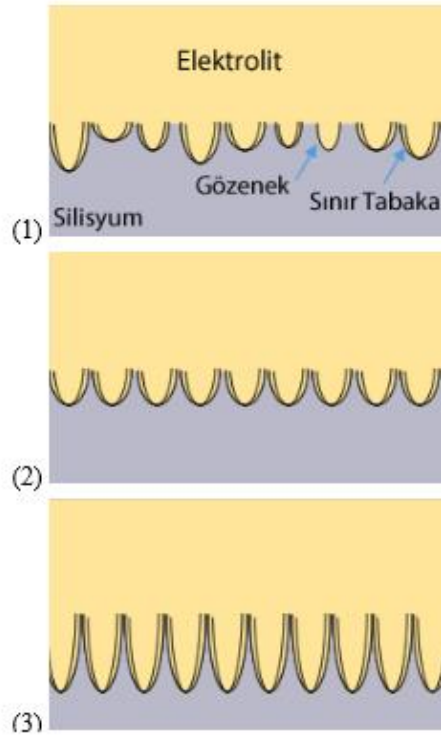
Şekil 1. Geleneksel anodizasyon hücresinin şematik görünümü

Bu işlem gerçekleştirilirken anot olarak silisyum, katot olarak ise platin (Pt) veya hidroflorik aside dayanıklı farklı iletken malzemeler kullanılabilir.

Temiz silisyum yüzeyi, su tutmama (hydrophobic) özelliği gösterir. Hidroflorik asit (HF) çözeltisi, anodizasyon esnasında silisyumun yüzeyinde tutunamaz. Çözeltiye etanol ilave edilerek HF çözeltisinin yüzeye tutunması sağlanır. Yine etanol kullanılarak anodizasyon esnasında açığa çıkan hidrojen gazının silisyum yüzeyinde birikmesi engellenir. Etanol en önemli faydalarından biri de etanol gözenekler tarafından sulu çözeltilere göre daha çabuk emilir. Bu sayede gözenekler derinlemesine, tektip ve düzgün oluşur. Tüm bu avantajları nedeni ile anodik dağlama çözeltisi etanolle seyreltilmiş hidroflorik asit çözeltisinden oluşmaktadır. Ayrıca anodizasyon hücresinin yapımında aside dayanıklı polimerler kullanılmaktadır (teflon gibi).

Gözenekli silisyum oluşumunda aktif rolü HF oynar. Gözenekli silisyum oluşurken elektrolit ile elektrot arayüzeyinde Si-H bağı oluşur ve HF de bulunan flor iyonlarının bu

bağlara atak yapması ile çözünme meydana gelir. Bu çözünme ile Şekil 2’ de verildiği üzere hareketli taşıyıcılar silisyum-elektrolit arayüzeyini terk eder ve burada sınır tabaka yani taşıyıcıdan arındırılmış bir bölge (deplasyon bölgesi) meydana gelir. Taşıyıcıların bulunmadığı bu bölgenin direnci çok yüksektir. Bu nedenle direncin zayıf olduğu bölge olan gözenek uçlarında çözünme devam eder. Gözeneklerin oluşumu başladığı zaman oluşum, silisyumun içine doğru sürer ve yeterli pozitif yük taşıyıcısı olduğu müddetçe gözenek uçlarında devam eder (Karacalı 2003).

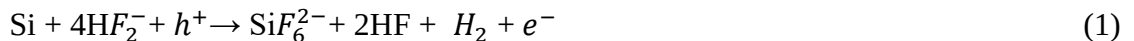


Şekil 2. Gözenekli silisyumda gözenek oluşum mekanizması

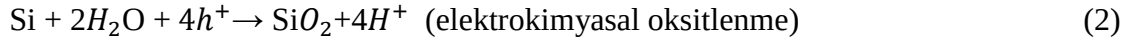
(1) Başlangıçta silisyum yüzeyinde geliş güzel oluşan gözenekler, (2) Gözeneklerin yönelimli büyümesi ve sınır tabakanın oluşumu, (3) Gözenek oluşumunun ileri safhası (Bisi *et al.* 2000)

Silisyum yüzeyinin kontrollü bir şekilde aşınmasını sağlamanın diğer önemli bir aşaması da uygulanan anodik akım veya potansiyeldir. Silisyum yüzeyi düşük pH’lı hidroflorik asit çözeltisi etkisiyle aşınmaz iken anot (Si) ile katot (Pt) arasına uygulanan potansiyel farkı sayesinde anot ile katot arasında akım oluştuğundan silisyumun hidroflorik asit ile aşındırılması sağlanır.

Kritik akım yoğunluğunun altındaki düşük potansiyel durumda gözenekli silisyum oluşur. Elektrolit ile elektrot arayüzeyi Si-H bağının oluşması sonucu arayüzey, H ile kaplanır. HF’ nin flor iyonlarının bu bağlara atak yapması ile çözünme meydana gelir. Bu çözünmenin denklemi aşağıda verilmektedir (Lehman 2002).



Kritik akım yoğunluğunun üstündeki yüksek potansiyel durumunda öncelikle elektrokimyasal oksitlenme oluşur. Daha sonra bu oksit, HF' den dolayı kimyasal olarak çözünür (Lehman 2002).



Gözenekler oluşurken kendi kendini düzenleyen bir yapı söz konusu olur. Çözülme silisyum yüzeyindeki kusurlarda başlar ve yüklerden arındırılmış bölge anodizasyon akımının geçişini zorlaştırmaya kadar gözenek duvarında devam eder. Gözenek duvarında direncin artması sonucu gözenekler uçlardan ilerlemeye devam eder. Bu sayede gözenekler numune boyunca oluşurlar. Bu durum Beale modeli olarak bilinir (Beale *et al.*, 1985).

IUPAC (International Union Of Pure and Applied Chemistry) tarafından gözenek boyutu üç sınıfta toplanmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. IUPAC Gözenek Boyutunun Sınıflandırılması (Bisi *et al.* 2000)

Gözenek Genişliği(nm)	Gözenek Tipi
<2	Mikro
2-50	Mezo
>50	Makro

GS yapısını tanımlamak için çalışılan en yaygın belirleme parametresi numune gözeneklilik ölçeğidir (porosity). Silisyum tabakanın tamamen GS' ye dönüştüğü kabul edilerek gözeneklilik p şu şekilde hesaplanır.

$$p = 100 \times (\text{Si'un yoğunluğu} - \text{GS'un yoğunluğu}) / \text{Si'un yoğunluğu}$$

$$p > \%60 \text{ olduğu zaman ışına görünür bölgeye düşmektedir (John and Singh 1995)}$$

Gözeneklilik, kalınlık, gözenek çapı ve mikroyapı gibi GS'nin bütün özellikleri anodizasyon şartlarına bağlıdır. HF yoğunluğu, akım yoğunluğu, malzeme tipi ve öz direnci, anodizasyon süresi, aydınlatma, sıcaklık, ortam nemi ve kurutma şartları anodizasyon şartlarını içerir (Karacalı 2003).

Geleneksel elektrokimyasal anodik dağlama metodunda belli oranda hazırlanmış HF + ethanol çözeltisi içinde silisyum numuneye sabit akım veya sabit gerilim uygulanmaktadır. Bu metotta HF' nin silisyum ile kimyasal tepkimesi gözenek içinde HF yoğunluğunun azalması nedeniyle yavaş olmaktadır. Aynı zamanda hidrojen gazı çıkışı yüzünden de gözenek içinde ve dışındaki HF'nin yer değiştirmesi etkilenecek gözenek uçlarına taze HF'nin gitmesi zorlaşacaktır. Oluşan hidrojen gazı numunenin hücre ile temas ettiği kenar kısımlarda tutunarak

hidrojen baloncukları birikmesine sebep olmakta ve numunenin tüm yüzeyi boyunca homojen GS dağılımını engelleyecektir. Bu sorun, Hou *et al.* (1996) tarafından önerilen darbeli anodik dağlama (puls anodic etching) metodu ile büyük ölçüde çözülmüştür. Bu metotta akım veya gerilim darbeleri olarak gönderildiği için darbeler arası zamanda işlem duracak ve hem gözenek içindeki HF devamlı tazelenecek hem de çıkan hidrojen gazı bir sonraki darbeye kadar gözenegi terkedecektir. Hou *et al.* (1996) bu metotla yapılan numunelerde PL veriminin arttığını da göstermişlerdir.

Gözenekli silisyum çoklu tabaka, farklı gözeneklilikteki tabakaların bir arada bulunması yani gözenekliliği bir tabakadan diğerine değiştirme olarak adlandırılabilir. Farklı anodizasyon şartları uygulayarak farklı gözeneklilikte aynı zamanda farklı kırılma indisinde tabakalar oluşturmak mümkündür. Temel olarak iki tip GS çoklu tabaka oluşturma yöntemi vardır. Bunlardan birincisi, anodizasyon boyunca akım yoğunluğu değiştirilerek elde edilen GS çoklu tabaka oluşturma yöntemidir. İkincisi ise malzeme katkı yoğunluğu GS' yi oluşturan tabaka derinliği ile değiştirilerek elde edilir.

Bu çalışmada GS çoklu tabakalar, akım yoğunluğu değiştirilerek farklı gözeneklilikte tabakaların oluşturulması ile elde edilmiştir. Bu şekilde zamana karşı akım yoğunluğu değiştirilerek derinliğe karşı gözeneklilik miktarı değişen periyodik bir yapı elde edilebilmiştir. Böylece kırılma indisi farklı tabakalar oluşturulmuştur. Kırılma indisi farklı olduğundan farklı yansıma özelliğine sahip tabakalar elde edilmiştir.

GS'nin kırılma indisinin silisyumun kırılma indisinden daha küçüktür. GS'nin kırılma indisinin havanın kırılma indisinden de daha büyük olması beklenir. Temelde GS, hava ve silisyumun karışımından oluşmaktadır. Bundan dolayı gözeneklilik arttıkça kırılma indisi azalacaktır.

Silisyum inceltme ve temizleme aşamaları

GS yapı üretimi için kullanılan silisyum dilimlerinin kalınlığı 700 μm civarında olduğu için kalınlığın etkisi ile geçirgenliğin azaldığı düşünülmektedir. Bundan dolayı GS fabrikasyonundan önce silisyumun mat olan arka tarafından inceltme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem için öncelikle Şekil 3'teki ısıtma sistemi kullanılarak sistem üzerine yerleştirilen prinç silindir bloğun ısıtılması sağlanır ve bu prinç bloğun üzerine reçine sürülerek elimizde bulunan 2cm x 2cm' lik silisyum dilimler yapıştırılır. Prinç blok, silisyum dilimi hem tutma hem de homojen inceltme sağlaması için 5 cm çapında ve 5 cm yüksekliğindedir.



Şekil 3. Isıtma sistemi

Daha sonra Şekil 4’te verilen kalınlık ölçüm sistemi kullanılarak silisyum dilimlerin başlangıç kalınlıkları ölçülür. Kalınlık ölçüm sistemi bir mikrometre olup 1 μ m çözünürlüğe sahiptir.



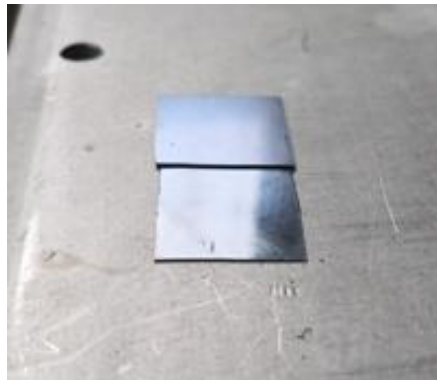
Şekil 4. Kalınlık ölçüm sistemi

Silisyum dilimin dört kenarının orta noktasından başlangıç ölçümleri alındıktan sonra elimizde bulunan altı farklı silisyum dilimin inceltme işlemi, Şekil 5’teki düzenek kullanılarak gerçekleştirildi.



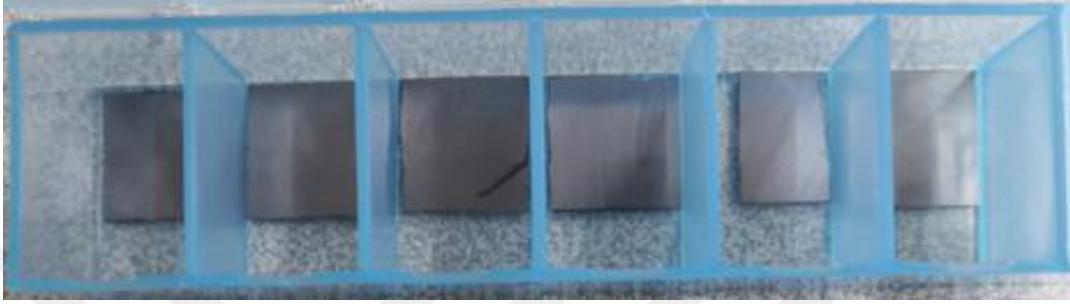
Şekil 5. Silisyum inceltme düzeneği

Silisyum inceltme düzeneğinde mavi simit ortasında bulunan tablaya kullanılacak olan zımpara (800, 1200 veya 2000 nolu) yerleştirilir. Düzenekte bulunan çelik mil yardımıyla silisyum dilimlerin yapıştırıldığı silindirik blok düzeneğe yerleştirilir. Silindirik blok, Şekil 5’ te verilen düzenek sayesinde hem sağa sola hareket eder hem de zımparanın bulunduğu tablanın dönüşünden kaynaklanan dönme momentinden dolayı kendi etrafında dönme işlemi gerçekleşir. Pirinç blok üzerinde belirlenen I-II- III- IV konumları sırasıyla ön tarafa gelecek şekilde yerleştirilip düzenek çalıştırılır. Belirlenen konumda belirlenen süre boyunca düzenek çalıştırıldıktan sonra silisyum dilimin aşınma işlemi gerçekleşir ve kalınlığı ölçülür. İstenilen kalınlık elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir ve yaklaşık 300 μm ’ ye kadar her bir dilim inceltirilir. Pirinç blokta belirlenen I-II-III-IV konumlarının yer değiştirilerek inceltilmesinde yüzeyin homojen incelmesi hedeflenmiştir. Şekil 6, silisyum dilimin inceltilmeden önce ve inceltildikten sonraki halinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Üstteki silisyum dilimin kalınlığı 730 μm iken alttaki silisyum dilimin kalınlığı 300 μm kalınlığındadır.



Şekil 6. İnceltilmeden önceki silisyum dilim (üstteki dilim), inceltildikten sonraki silisyum dilim (alttaki fotoğraf)

Şekil 7’de inceltilen silisyum dilimler verilmektedir. Bu dilimlerin sırasıyla, inceltilmeden önceki kalınlıkları ve inceltildikten sonraki I-II-III-IV konumlarının kalınlıkları Tablo 2’de verilmektedir. Silisyum dilimlerin dört farklı noktasının başlangıç durumunda ve son durumda ayrı ayrı kalınlıkları ölçülmüştür ve sırası ile I-II- III- IV diye kaydedilmiştir. Başlangıçta her dört bölgede farklı kalınlık ölçülmesinin sebebi pirinç bloğa silisyumu tutturmak için kullanılan reçinenin yüzeyde homojen dağılmamasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. İnceltilen altı farklı silisyum dilim

İnceltme sonrası silisyum dilimin pirinç bloktan ayrılması için tekrar ısıtıldı. Silisyum dilimin parlak yüzeyinde kalan reçine trikloretilen ile temizlendi. İnceltme işleminde mekanik olarak zayıflamaya sebep olabilecek kenar çiziklerini yumuşatmak için oda sıcaklığında 30 saniye %15 KOH çözeltisinde dağlama işlemi yapıldı.

Tablo 2. Silisyum Dilimlerin Başlangıç ve Son Durumdaki Kalınlıkları

Numune ismi	Kalınlık(µm)	I	II	III	IV
747P003	Başlangıç	745	765	760	770
	Son durum	250	300	310	340
747P004	Başlangıç	820	835	830	845
	Son durum	340	300	340	300
747P005	Başlangıç	765	760	780	770
	Son durum	310	300	330	330
747P006	Başlangıç	780	760	770	760
	Son durum	330	350	310	310
747P007	Başlangıç	740	760	760	790
	Son durum	310	330	300	310
747P008	Başlangıç	740	740	760	760
	Son durum	300	340	340	370

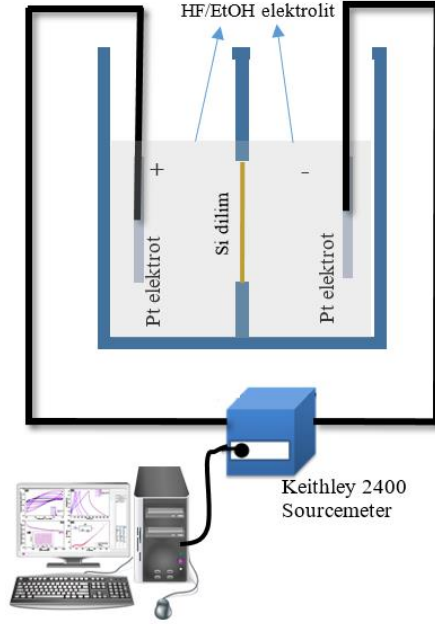
Silisyum dilimin inceltme işleminden sonra kirlenmesi nedeniyle temizleme işlemi gerçekleştirildi. Temizleme işlemi için aşağıdaki temizleme adımları, verilen karışım oranında ve sürelerde tek tek uygulandı ve numunemizin temizlik aşaması tamamlanmış oldu.

- Asetonda 5 dakika ultrasonik olarak yıkama
- Methanolde 5 dakika ultrasonik olarak yıkama
- Deiyonize su ile 5 dakika yıkama
- $H_2O:H_2O_2:NH_3$; 5:1:1 çözeltisinde 15 dk bekletme (H_2O ve NH_3 70°C' de hazırlandıktan sonra H_2O_2 ilave edilir, 2 dk çözeltinin hazırlanmasından sonra kullanıma hazır olur.)
- Deiyonize su ile 5 dakika durulama
- Seyreltik HF'de ($H_2O:HF$; 10: 1) 2 dk bekletme
- $H_2O:H_2O_2:HCl$; 4:1:1 çözeltisinde 15 dk bekletme (H_2O ve HCl 70°C' de hazırlandıktan sonra H_2O_2 ilave edilir, 4 dk çözeltinin hazırlanmasından sonra kullanıma hazır olur.)
- Deiyonize su ile 5 dakika durulama
- Seyreltik HF'de ($H_2O:HF$; 10: 1) 2 dk bekletme
- Deiyonize su ile iyice durulama
- Azot gazı (N_2) ile kurutma

Gözenekli silisyum fabrikasyon sistemi

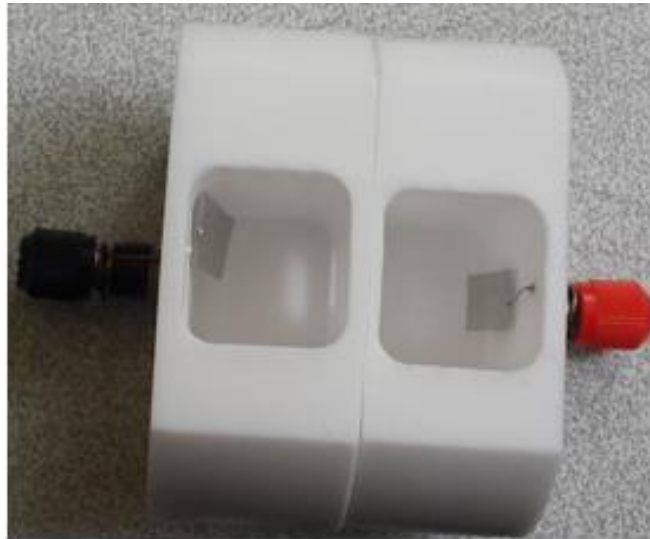
Sınıflandırma çalışmalarında kullanılan ve aynı zamanda kendi tasarımı olan sistem gözenekli silisyum (GS) tabanlı tümleşik sensör sistemidir. Bu sensör sisteminin bir parçası olan GS yapının üretimi için elektrokimyasal anodik dağlama yöntemi (anodizasyon) kullanılır. Anodizasyon, diğer tip aşındırma işlemlerine göre daha kontrollü, güvenilir, ekonomik ve kolay hedefe ulaşmayı sağlayan bir elektrokimyasal aşındırma işlemi olduğundan GS yapı oluşturulurken bu yöntem tercih edilmektedir (Fissell *et al.* 2009; Burham *et al.* 2015).

Anodizasyon işleminde ethanol ile seyreltilmiş HF çözeltisi içine yerleştirilen iki elektrot arasına sabit akım uygulanarak çözelti içindeki silisyum aşındırılır (Burham *et al.* 2014; Burham *et al.* 2015). Anodizasyon işlemi sonucunda oluşan GS yapının gözeneklilik ve tabaka kalınlığı gibi özellikleri; HF konsantrasyonu, katkılama miktarı, uygulanan akım yoğunluğu, aşındırma zamanı ve silikonun öz direnci gibi birçok parametreye bağlıdır (Burham *et al.* 2015). Bu çalışmada uygulanan akım yoğunluğu ve aşındırma zamanı dışındaki diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bu yöntemle farklı akım yoğunlukları uygulanarak farklı gözenekliliğe sahip GS yapı üretilmiştir. Yine farklı olan bu akım yoğunluğu farklı sürelerde uygulanarak farklı kalınlığa sahip tabakalardan oluşan GS yapı elde edildi. Böylece farklı gözeneklilik ve farklı kalınlıklara sahip katmanlardan oluşan ve sınıflandırma çalışmalarında kullanılan GS yapı üretimi gerçekleştirildi. Şekil 8' de kullanılan anodizasyon düzeneği verilmektedir.



Şekil 8. Elektrokimyasal anodik dağlama düzeneği

Anodizasyonun gerçekleştirildiği hücre teflon kütükten oluşmaktadır. Birbirinin özdeşi iki parça halinde çift tanktan oluşan hücre tipi kullanılmıştır (Şekil 9). 0,01-0,02 $\Omega \cdot \text{cm}$ öz dirence sahip, aşırı katkılı p tipi silisyum kullanılmıştır. $2 \times 2 \text{ cm}^2$ boyutlarında olan silisyum dilimin bu hücreler arasına tutturulup $1 \times 1 \text{ cm}^2$ lik alanda GS oluşumu gerçekleştirildi. Her iki tankın elektriksel bağlantısı platin elektrot ile sağlanmaktadır. Silisyumun parlak yüzeyi GS tabakalar oluşturmak için, mat olan arka tarafı ise elektro parlatma işlemi için kullanılır. GS oluşturulduğu taraf (parlak yüzey) akım kaynağının + ucuna (kırmızı port) bağlanır, - uç (siyah port) ise mat olan tarafa bağlanır. Anodizasyon sırasında ortama kimyasal buharların yayılmasını önlemek amacıyla anodizasyon hücresi, hava tahliye motorlu bir eldivenli kutu içine yerleştirilmiştir (Şekil 10).

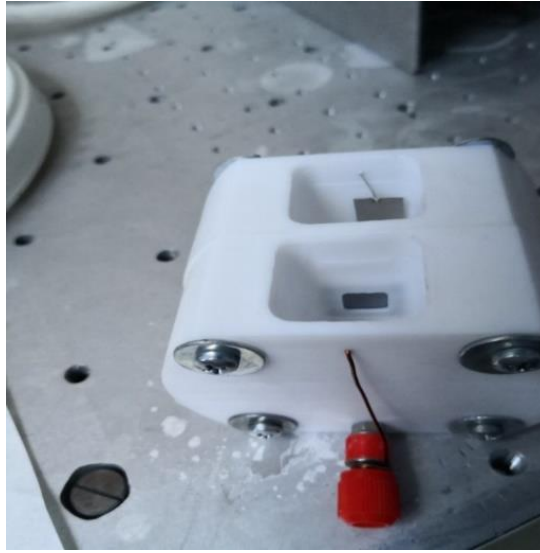


Şekil 9. Çift tanklı elektrokimyasal anodizasyon hücresi



Şekil 10. Hava tahliye motorlu eldivenli kutu

Anodizasyon işlemine başlarken GS yapıyı oluşturacak olan silisyum dilim, iki parçadan oluşan anodizasyon hücresinin orta kısmına yerleştirilir ve sızdırmazlığın sağlanması amacıyla hücrenin silisyum dilime temas eden kısımlarına silikon gres uygulanır ve vidalar yardımı ile numunenin sıkışması sağlanır. Anodizasyon hücresinde elektrolit olarak kullanılan ve silisyumda gözeneklerin açılmasını sağlayan çözelti ile silisyum dilimin temas edecek kısmı açık bırakılmıştır (Şekil 11). Bu açık kalan alan $1 \times 1 \text{ cm}^2$ lik alandır ve GS yapı bu alan içinde oluşur. Anodizasyon hücresindeki her iki tank da silisyum yüzeyini geçecek şekilde hazırlanmış olan etanol ile seyretilmiş HF (2/1) çözeltisi ile doldurulur. Şekil 12’ deki deney düzenğinde görüldüğü gibi kırmızı uca (+), siyah uca (-) gerilim uygulayarak GS yapı elde edilir. Silisyum dilim tipi, elektrolit çözelti konsantrasyonu ve periyot gibi parametreler sabit tutulup süreler ve akım yoğunlukları değiştirilerek Tablo 3’ te verilen parametreler kullanılarak GS yapısı elde edildi. Sisteme başlangıçta 200 mA’ den 2 mA’ e kadar düşecek şekilde akım verilip silisyum ve havanın kırılma indisinin birbirine yaklaşması ve silisyumdan havaya yumuşak bir geçişin olması hedeflenmektedir. Daha sonraki aşamada ise Tablo 3’ te belirlenen süre boyunca 2 mA daha sonra yine belirlenen süre boyunca 75 mA akım verilerek ve bu durum altı kez tekrarlanarak altı periyotlu yapı elde edilmiştir. Bu altı periyot tamamlandıktan sonra sisteme önce 75 mA daha sonra 2 mA’ lik akımlar belirtilen sürelerde verilerek ikinci altı periyotlu yapı da elde edilmiştir. Böylece gözenekli silisyum Fabry-Perot (GSFP) yapı oluşturulur. Üretilen GSFP yapı Şekil 13’ te verilmiştir.



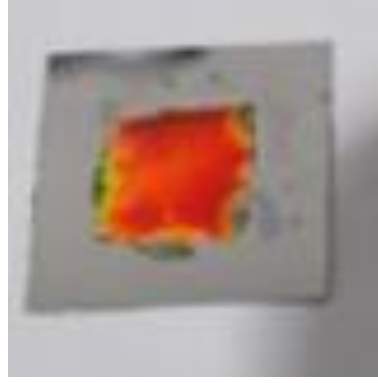
Şekil 11. Anodizasyon hücresinin orta kısmına yerleştirilen silisyum dilim



Şekil 12. Anodizasyon deney düzeneği

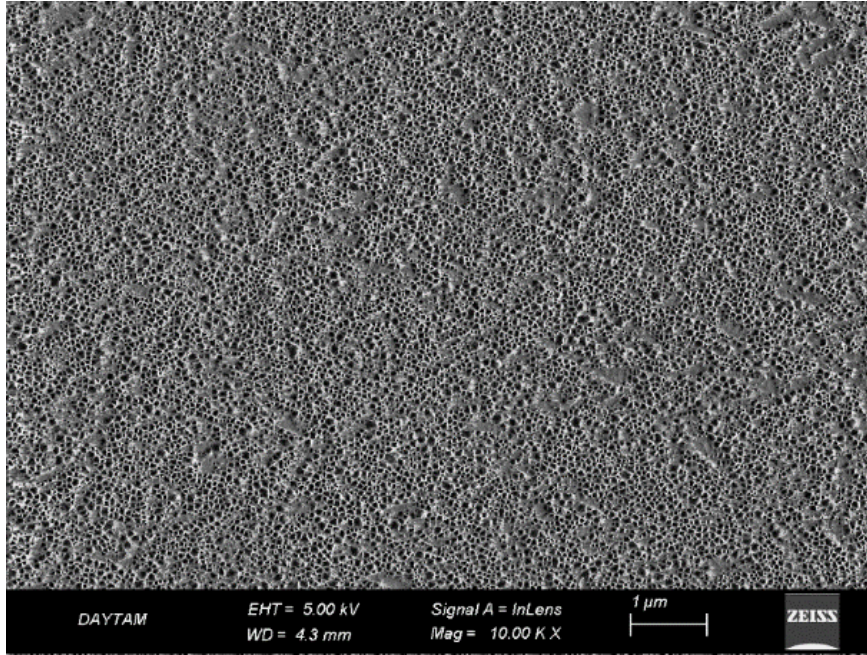
Tablo 3. GSFP Üretim Parametreleri

Tip	P ⁺ Silisyum , 0.01-0.02 ohm. cm		
Elektrolit	HF (%48) /Etoh(%95) , 1:2 (Vol.)		
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	200'den 2'ye (indis uyum tabakası)		
	2 (Düşük gözenekli tabaka)	6 periyot	
	75 (Yüksek gözenekli tabaka)		
Süre (milisaniye)	30 (İndis uyum tabakası)		
	29568 (Düşük gözenekli tabaka)	6 periyot	
	7946 (Yüksek gözenekli tabaka)		



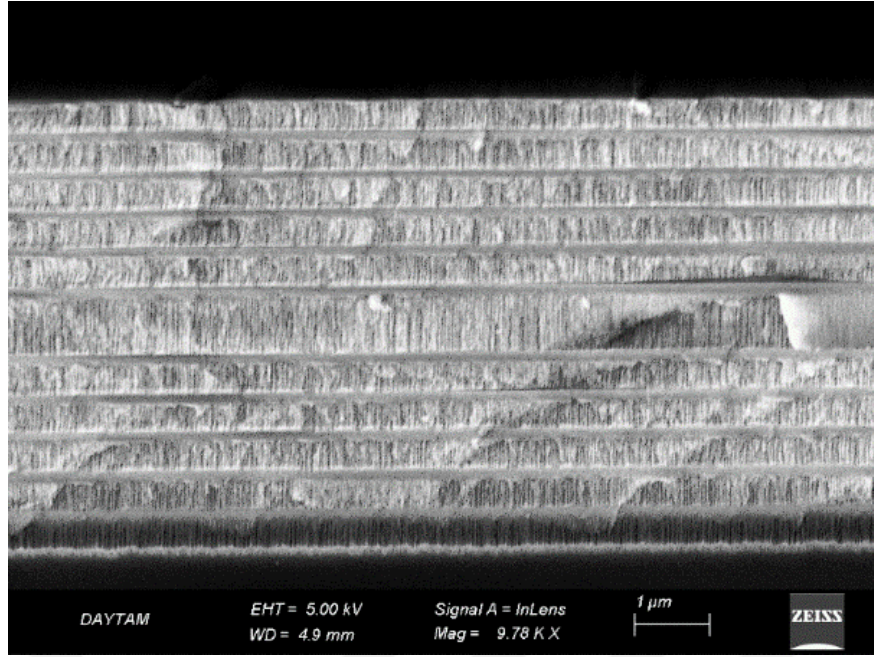
Şekil 13. GSFP yapı

Aynı parametrelerle üretilen başka bir numunenin SEM görüntüleri Şekil 14' te verilmiştir (Karacali and Cicek 2011). Yüzey görüntüsünden gözeneklilik açık olarak gözlemlenmektedir. Kesit görüntüsünde ise düşük gözenekli ve yüksek gözenekli tabakalardan kaynaklanan kontrast farkı net şekilde görünmektedir. İnce olan tabaka düşük gözenekli, kalın olan tabaka yüksek gözenekli tabakadır. Bu iki tabaka altı kez tekrarlandıktan sonra yön değiştirilerek orta bölgede microkavite olarak adlandırılan yüksek gözenekli dolayısıyla düşük kırılma indisli bölge oluşur. Böylece Fabry-Perot yapısı elde edilmiş olur. Fabry-Perot yapının yansıma spektrumundaki çınlama frekansını bu mikrokavite bölgesi belirlemektedir. Mikrokavitenin üstünde ve altındaki tekrarlı yapılar Bragg aynaları olarak adlandırılır. Bu tabakalar sayesinde yansıma spektrumunda çınlama frekansının her iki tarafında yansıtıcı bloklar oluşmaktadır.



(a)

Şekil 14. GSFP yapının SEM görüntüleri (a) yüzey, (b) yan kesit



(b)

Şekil 14. GSFP yapının SEM görüntüleri (a) yüzey, (b) yan kesit (devamı)

Karbonlama (Sensör yüzeyi pasifleştirme) ve tavlama işlemi

Karbonlama işlemi, malzeme belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre kimyasal içerisinde bekletilerek gerçekleştirilir. Karbonlama işleminde amaç, açık kalan bağların doyurulmasıdır.

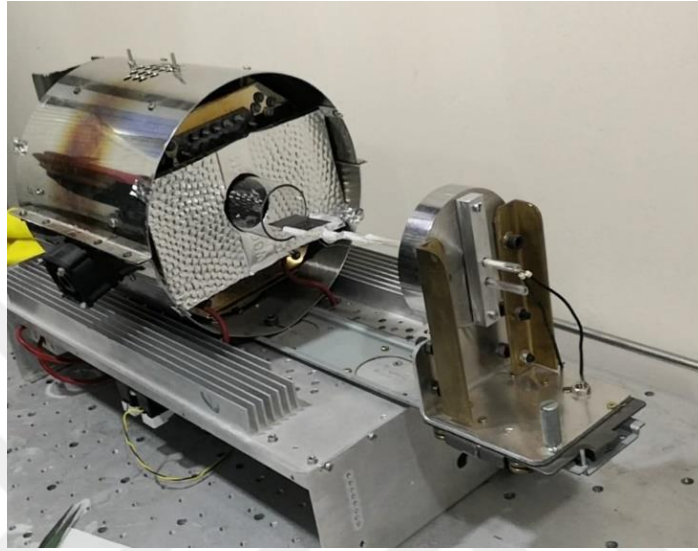
Bu çalışmada yapılan karbonlama işleminde ise üretilen numune, 80° C sıcaklıkta 1-Decene maddesi içerisinde 24 saat bekletilerek açık bağların doyurulması sağlandı. Böylece sistemimize gaz verilince gazın, üretilen GS yapıya sadece fiziksel olarak dolması sağlanmaktadır. Kimyasal bir olay gerçekleşmemektedir. Karbonlama işlemi gerçekleştirildikten sonra da GS yapıyı tavlama işlemi gerçekleştirildi.

Tavlama (ısıl işlem), malzemeyi belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıp bu sıcaklıkta belli bir süre tuttuktan sonra kontrollü olarak soğutma işlemidir. Isıl işlemde amaç, atom hareketlerini kontrol altına almaktır.

Bu çalışmada yapılan tavlama işleminde ise öncelikle fırın boşken 1000° C sıcaklığa kadar ısınması sağlandı. Isınma işlemi gerçekleştirildikten sonra ısınma işlemi durduruldu. Daha sonra GS yapı fırının haznesine yerleştirilerek fırın tekrar çalıştırıldı ve GS yapı kademeli olarak fırının içine doğru gönderildi. Bu şekilde GS yapı yavaş yavaş ısınır ve yüzeyde kimyasal kalmışsa yavaş yavaş buharlaşması sağlanır. Fırın sıcaklığı 1000° C sıcaklığa ulaşınca fırının çalışması durduruldu ve sıcaklık yaklaşık 200° C sıcaklığa ulaşınca GS yapı fırın içinden kademeli olarak çıkarıldı. Tavlama işlemi bu şekilde gerçekleştirildi. GS yapı yüzeyinde bulunan aktif bağların bu şekilde pasif hale getirilmesi sağlanır (Önceki işlemler sırasında

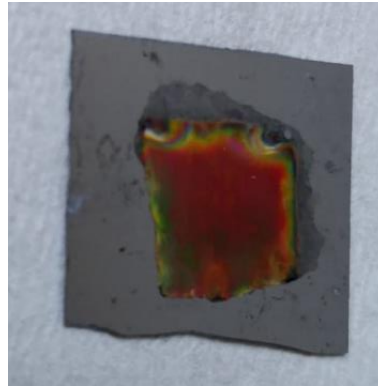
oluşan iç gerilimin alınması ve homojenleştirme (daha çok sonraki işlemlerin kırılmadan yapılabilmesi için)).

GS yapı oluşturulduktan hemen sonra tavlama işlemi yapılırsa GS yapıda kalan kimyasalın buharlaşıp gözeneklere zarar verebilir. Bundan dolayı silisyumdan GS yapı oluşturulduktan bir gün sonrasında bu işlemi uygulamanın daha sağlıklı sonuç verebileceği düşünülmektedir. Kullanılan tavlama düzeneği Şekil 15'te verilmektedir.



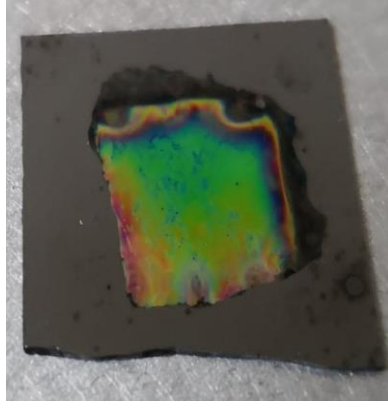
Şekil 15. Tavlama düzeneği

Şekil 16'da karbonlama ve tavlama işleminden önceki GS yapı (a görüntüsü), karbonlama ve tavlama işleminden sonraki GS yapı (b görüntüsü) verilmektedir.



(a)

Şekil 16. (a) Karbonlama ve tavlama işleminden önceki GS yapı (b) Karbonlama ve tavlama işleminden sonraki GS yapı



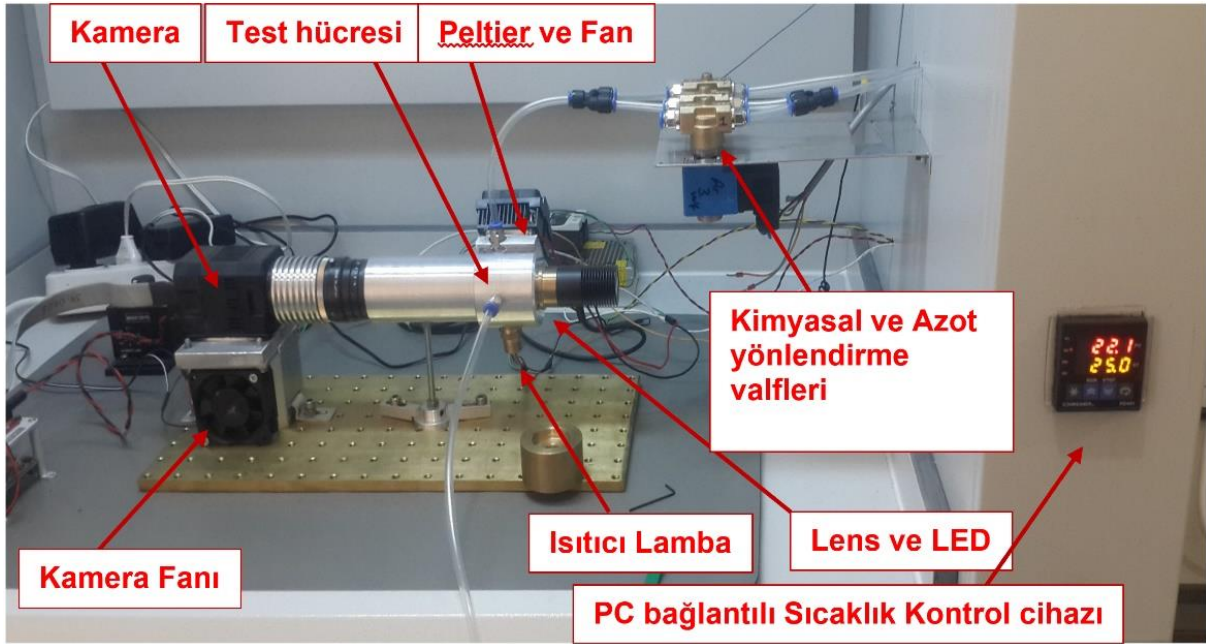
(b)

Şekil 16. (a) Karbonlama ve tavlama işleminden önceki GS yapı (b) Karbonlama ve tavlama işleminden sonraki GS yapı (devamı)

Tümleşik Sensör Sistemi: GS-SWIR Kamera Entegrasyonu

Silisyumdan kontrollü bir şekilde GS yapı üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yapı SWIR (kısa dalga kızılaltı) bölgedeki bazı dalga boyu ışınlarını geçirirken diğerlerini yansıtacak şekilde çalışmakta olup etkin kırılma indisi, periyodik olarak değiştirilen tabakalar ile sağlanmaktadır. Bu GS yapı, kimyasal ile etkileştiğinde kimyasal bu gözeneklere tutunmakta ve etkin kırılma indisinde değişikliğe sebep olmaktadır. Kimyasallar ile etkileştiğinde tabakaların kırılma indisinin değişime uğramasıyla bu tabakalardan yansıyan ışık şiddetinde dolayısıyla geçen ışık şiddetinde de değişim olmaktadır. Işığın geçtiği GS yapının arka tarafına SWIR bölge kamera ile bakıldığında farklı görüntüler alınmaktadır. Bu durumda farklı kimyasallar GS yüzeyinde farklılık oluşturmaktadır. Yani GS yüzeyi her kimyasala aynı tepkiyi vermemektedir. Bunun nedeninin üretim parametrelerinden dolayı GS yapının özelliklerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Birbirine yakın özelliklere sahip kimyasalların bile GS yapıya yoğunlaşma ve tekrar buharlaşma davranışları farklıdır. Bu durum, aynı bölgede farklı kimyasalların farklı hızlarda gözeneklere tutunma ve gözeneklerden ayrılma davranışı göstermesine sebep olmaktadır. Elde edilen görüntüde farklı görüntüye sebep olmasından dolayı ayırt edici bilgi olarak kullanılarak kimliklendirme ve konsantrasyon tespiti yapmak mümkün olabilmektedir. Bu düşünceden hareketle GS yapı, SWIR kamera ve LED (GS yüzeyini aydınlatmak için) arasına entegre edilip SWIR kamera ile tümleştirilmesi sağlanmaktadır. Böylece farklı özellikteki çözücü buharları uygulandığında, GS yapı bir taraftan LED ile aydınlatılıp diğer taraftan GS yapı yüzeyindeki değişimler SWIR kamera yardımıyla video formatında kaydedilip işlenerek çözücü buharı kimliklendirme ve konsantrasyon tespiti yapılabilmektedir.

Söz konusu SWIR kameranın sensör test hücresi ile entegrasyonunun da gösterildiği tümleşik sensör ölçüm sistemi ve bileşenleri Şekil 17’de verilmektedir ve bu yapıyı oluşturan bileşenler detaylı bir şekilde aşağıda anlatılmaktadır.



Şekil 17. Sensör ölçüm sistemi

Tümleşik sensör bileşenleri

Tümleşik sensör yapısı; GS yapı, SWIR kamera, optik yol soğutucusu, bağlantı aparatı (sensör test hücresini LED’e bağlayan aparat) ve kamera soğutucusu bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bölümde GS yapı (daha önceki kısımda anlatıldı) dışındaki bileşenler tanıtılmaktadır.

SWIR kamera

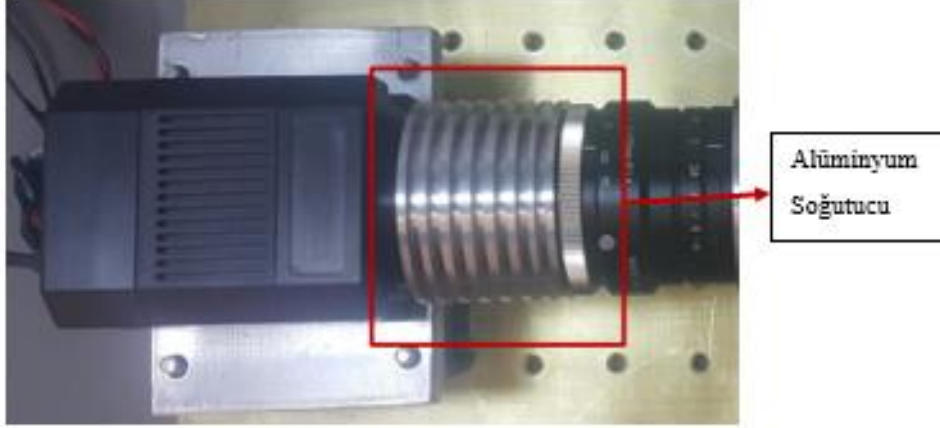
Bu çalışmada kullanılan kamera SWIR kameradır (Şekil 18). SWIR kamera, 900-1700 nm SWIR spektral bandında çalışır ve çözünürlüğü 512x640’dır.



Şekil 18. SWIR kamera

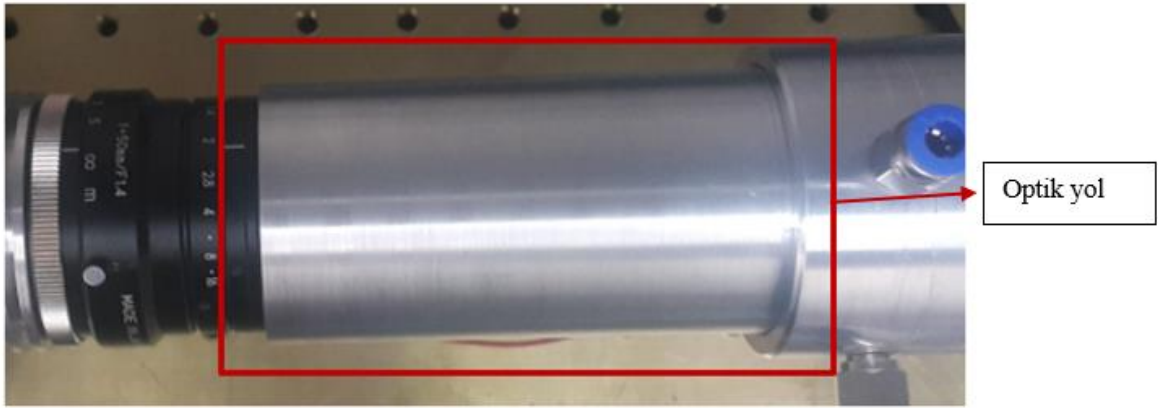
Optik yol soğutucusu

Kamera ile objektifi arasına hem soğutma işlevini gören hem de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ GS orta bölgesinin görüntüsünün kamera sensörü üzerine düşmesini sağlayan odak uzaklığı için alüminyum bileşen eklenmiştir (Şekil 19).



Şekil 19. SWIR kamera ile objektifi arasındaki alüminyum soğutucu

Objektif ile sensör test hücresi arasına silisyum dilimin orta bölgesindeki $1 \times 1 \text{ cm}^2$ lik (gözenekli bölge) alanı odaklayabilmek için yaklaşık 12 cm optik yol olması gerektiğinden alüminyum optik yol arabirimi eklenmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. Objektifi ile sensör hücresi arasındaki optik yol

Bağlantı aparatı (sensör test hücresini LED'e bağlayan aparat)

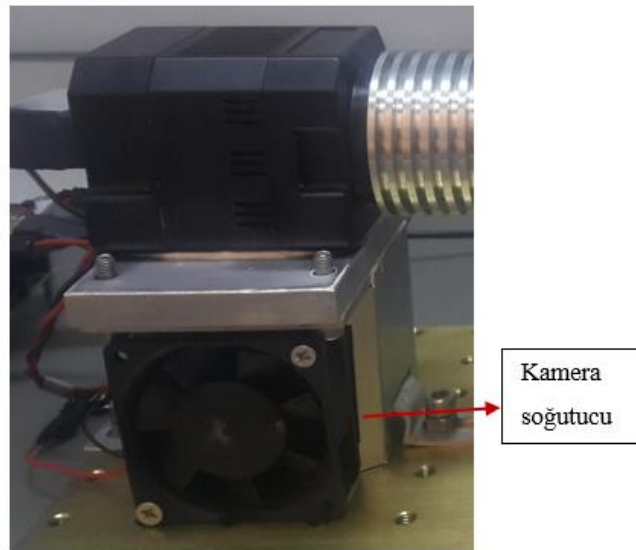
Sensör test hücresi ile kameranın kuplağı bir prinç blok ile sağlanmaktadır. Prinç blokta, LED ışığının silisyum dilimin $1 \times 1 \text{ cm}^2$ lik alanını aydınlatması için ışık toplayıcı lens bulunmaktadır (Şekil 21).



Şekil 21. Sensör test hücrecini LED’e bağlayan aparat

Kamera soğutucusu

Kamera çalışırken ısındığı için fan ile soğutulan bir alüminyum soğutucu üzerine monte edilmiştir (Şekil 22).

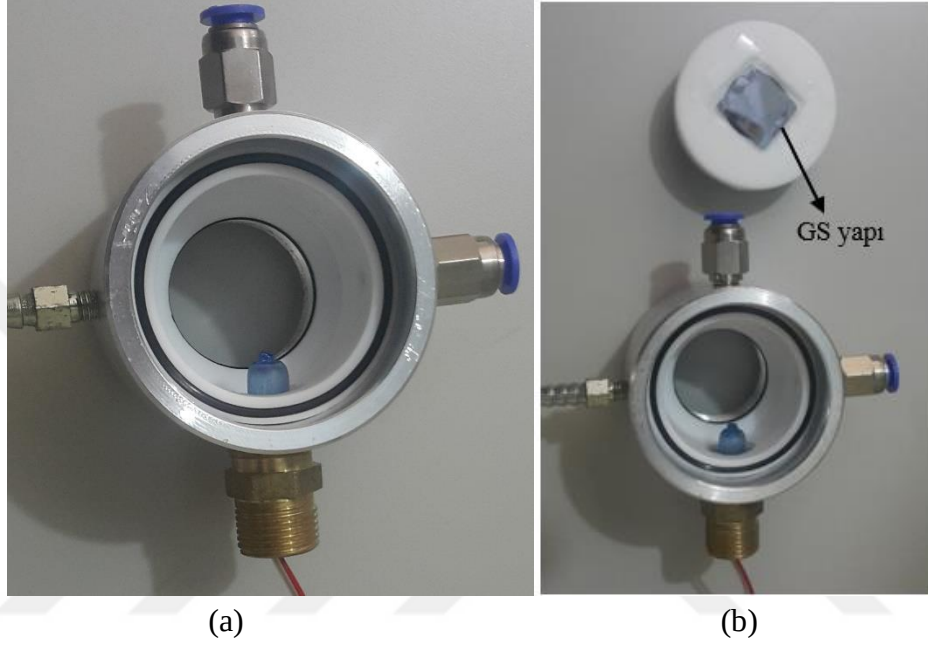


Şekil 22. Kamera soğutucu bağlantısı

GS sensör entegrasyonu

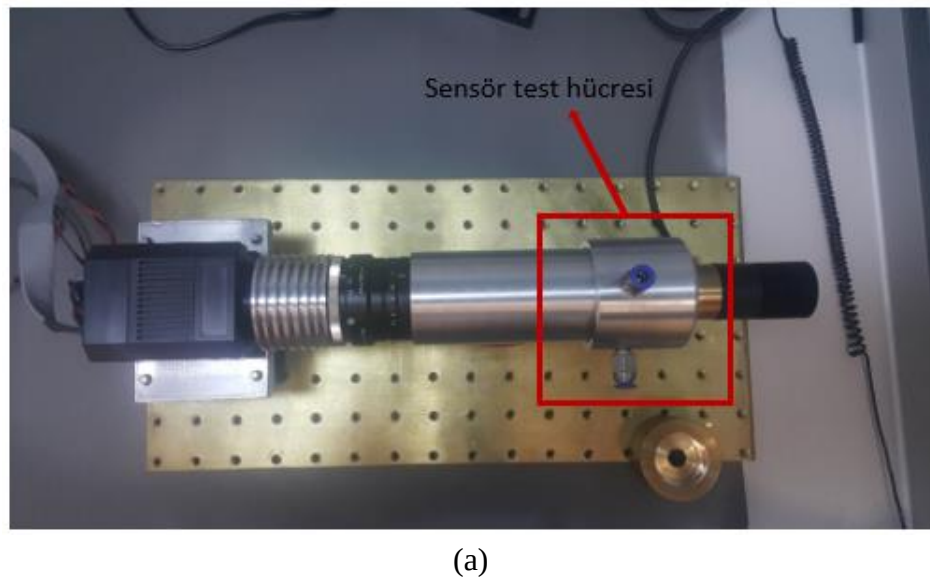
Bu çalışmanın temel amacı, yeni bir yöntem ile hem çözücü türünü hem de çözücü türü ve konsantrasyonunu sınıflandırma işlemini gerçekleştirebilmektir. Bunun için üretilen GS yapının kamera ile entegrasyonu yapıp üst taraftan LED ile aydınlatılması sağlandı. Sonrasında geçen ışığı görüntüleyen SWIR kamera ile video kayıtları alındı ve sınıflandırma işlemi gerçekleştirildi.

GS yapının kamera hücresine entegrasyonu ise Şekil 23'teki test hücresi (a görüntüsü), numune tutucu aparat (b görüntüsü) ve Şekil 21 'de verilen sensör test hücresini LED'e bağlayan aparat kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test hücresi; kimyasal gaz giriş ve çıkış bağlantıları, ısıtıcı ve sıcaklık ölçüm bağlantıları bulunan kamera ve LED arasında konumlanacak şekilde alüminyum içine teflon geçirilmiş yapıdan oluşmaktadır. Üretilen GS yapı numune tutucuya yerleştirilip test hücresi ile birleştirilir ve sensör test hücresini LED'e bağlayan aparat yardımıyla kamera ile entegrasyonu sağlanır.

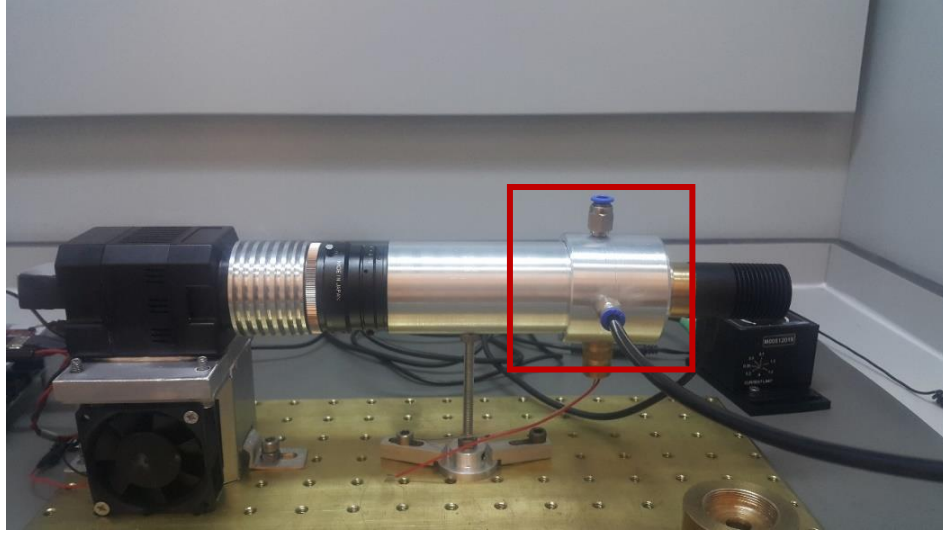


Şekil 23. Test hücresi (a), numune tutucu ile birlikte görünüşü (b)

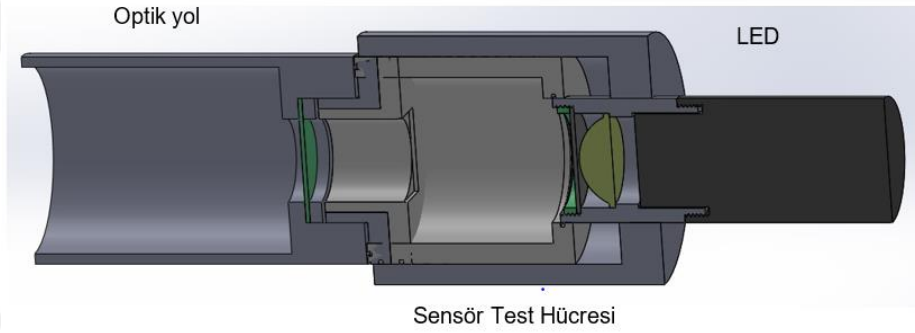
Şekil 24'te tümleşik sensör sistemi ve test hücresinin SWIR kameraya entegre edildiği kısım gösterilmektedir. Tüm sistem prinçten yapılmış bir optik tabla üzerine monte edilmiştir.



Şekil 24. Tümleşik Sensör Sistemi: Üstten görünüm (a), yandan görünüm (b), kesit görünümü (c) (Çoban 2021)



(b)



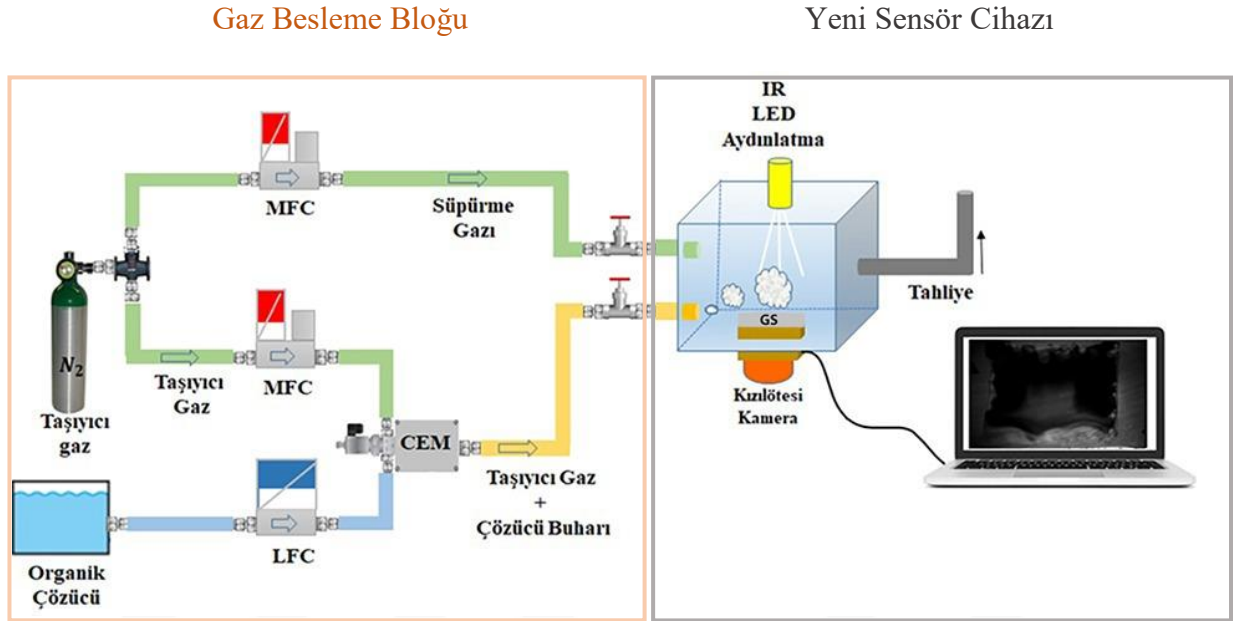
(c)

Şekil 24. Tümlüşik Sensör Sistemi: Üstten görünüm (a), yandan görünüm (b), kesit görünümü (c) (Çoban 2021) (devamı)

Ölçüm Düzeneği

SWIR kamera video verisi kullanılarak çözücü buharı kimliklendirme ve konsantrasyon tayini gerçekleştirilirken kullanılan sistemin ana blok diyagramı Şekil 24’te verilmektedir. Şekil 24’ te önerilen sistem ile tamamen yeni bir yolla gaz ve kimyasal buharların tespiti yapılabilmektedir. Gözenekli Silisyum (GS)’ dan Fabbry-Perrot yapısı elde edildi. Bu yeni teknikte üretimi gerçekleştirilen GS yapının alt yüzeyine bir kamera entgre edilip üstten bir ışık kaynağı (LED) ile aydınlatılmaktadır ve böylece GS yapı yardımıyla kamerada ışımaya örüntüsü elde edilmektedir. Işıma örüntüsünün elde edilmesinde, gözenek içine gaz ya da kimyasal buharın dolması sonucunda etkin kırılma indisinin değişmesi ve bundan dolayı Fabry-Perrot (FP) yapının yansıma spektrumunda kayma olması etkili olmaktadır. Bu kaymanın miktarı ve hızı GS yapının her bölgesinde FP yapıyı oluşturan gözenekli tabakaların kalınlıklarının ve gözenekliliğinin (dolayısı ile etkin kırılma indisinin) farklı olmasından dolayı aynı olmayacaktır. Aynı zamanda farklı kimyasal buharları için davranış ya da örüntü farklılık

gösterecektir. Aydınlatıcı kaynağının ışımaya spektrumu değişmeyeceği için FP filtresinin yansıma spektrumundaki değişiminden kaynaklanan geçen ışınların şiddetindeki değişim sayesinde kameradan elde edilen her bir görüntüde farklı örüntüler elde edilmektedir. Örüntülerdeki bu farklılıklar kullanılarak ilgili çözücü buharına ait kimliklendirme ve konsantrasyon tayini makine öğrenme tekniklerinden derin öğrenme ve örüntü işleme yardımıyla yapılacaktır. Şekil 25’te önerilen sistem, gaz besleme bloğu ve yeni sensör cihazı olmak üzere iki ana bloktan oluşmaktadır.



Şekil 25. Sistemin ana blok diyagramı

Gaz besleme bloğu

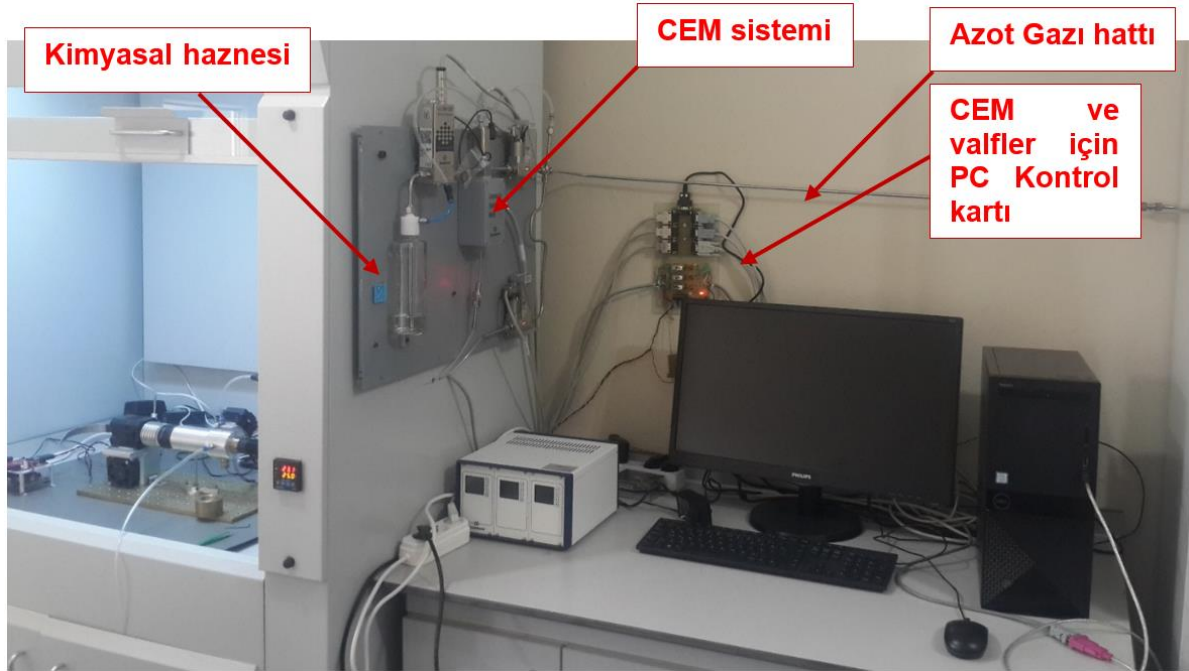
Çözücü buharı türü ile çözücü buharı türü ve konsantrasyonu sınıflandırma çalışmalarını gerçekleştirebilmesi için sisteme altı farklı çözücü buharı ve bunların her birinin altı farklı konsantrasyonunun istenen ve doğru miktarlarda gönderilebilmesi önem arz etmektedir. Çözücü buharı başlangıçta sıvı halde bulunmaktadır. Gaz besleme bloğu, sensör cihazında kullanılmak üzere sıvıları buharlaştırabilir, istenilen miktarlarda karıştırarak oluşturabilir ve taşıyıcı gaz akımında istenilen hızda taşıyabilir. 1000 gram/saat hıza kadar gaz karışımları hazırlayabilme özelliğine sahiptir.

Gaz besleme bloğu Şekil 26’ da verilmektedir. Bu çalışmada CEM serisi buharlaştırma sistemi kullanılmıştır. Bu sistem gaz karışımlarını (1000 gram/saate kadar) hazırlamak ve kütle akış kontrolünü gerçekleştirmek için kullanılan bir sistemdir. Sistem, sıvı akış kontrol ünitesi, gaz akış kontrol ünitesi ve buharlaştırma ünitesinden oluşmaktadır.

Sıvı akış kontrol ünitesinden (LFC) geçen sıvı bir karışım vanası tarafından kontrol edilir. Sistem, cihazların çalışması için gerekli olan bir güç kaynağı ile sistemin ayarlanması ve

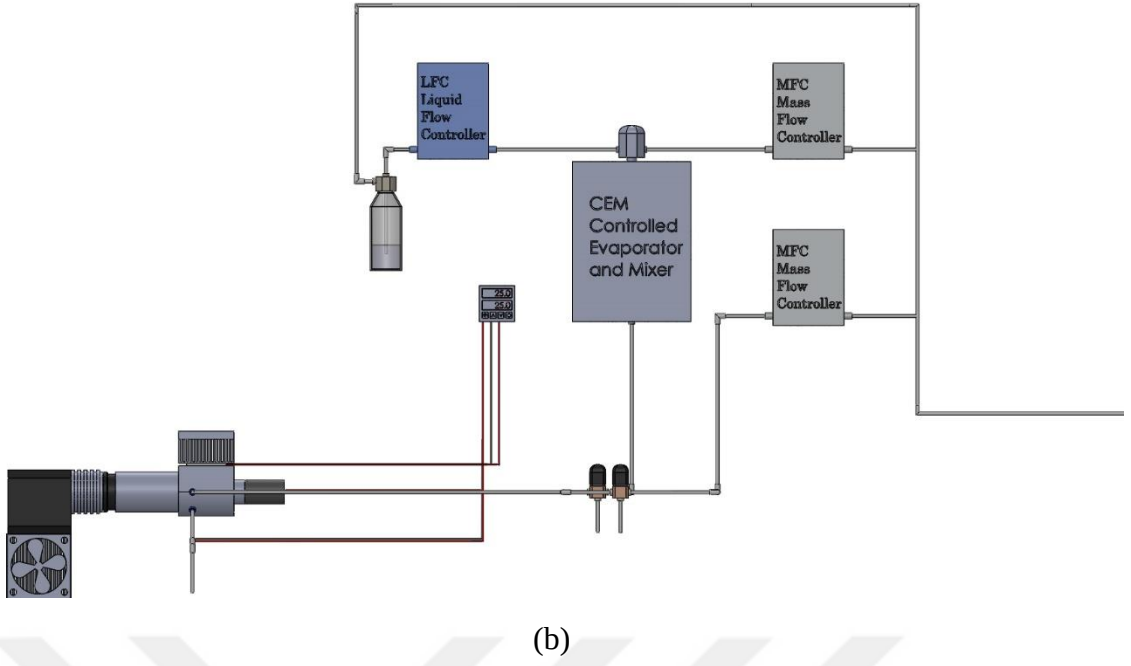
izlenmesi için bir bilgisayar ile iletişim kuran okuma/kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Taşıyıcı ve çözücü miktarı sırasıyla gaz akış kontrol ünitesi (Kütle Akış Kontrolör-MFC) ve sıvı akış kontrol ünitesi (LFC) tarafından ayarlandıktan sonra bunlar karıştırılır ve sabit konsantrasyon ve akış hızına sahip bir gaz karışımı elde etmek için CEM cihazına beslenir. Bu kurulum sayesinde, farklı türde ve farklı konsantrasyonlarda çözücü buharı hazırlanabilmekte ve çalışmadaki sensör cihazına uygulanabilmektedir.

Sıvı akış kontrol ünitesi (LFC), test hücreğine gönderilmek istenen çözücü buharının eldesi için buharlaştırma ünitesine (CEM) çözücünün kontrollü bir şekilde gönderilmesini sağlamaktadır. Ünite enerjilendirildiğinde sıvı akış kontrol ünitesi içinde konumlandırılmış U şeklindeki kılcal boru titreşim yapmaya başlar. Borunun her iki ucuna konumlandırılmış sensörler borunun hareketini algılar ve sinüzoidal bir çıkış sinyali üretirler. Boru boş olduğunda ya da herhangi bir akış olmadığında sensörlerin ürettiği sinyaller aynı fazlı olur. Boru içerisinden akışkan geçirildiğinde ise sensörlerden gelen çıkış sinyalleri arasında bir faz farkı meydana gelir. Bu faz farkı boru içerisinden birim zamanda geçen sıvının miktarı hakkında bilgi verirken sinyalin periyodu ise akışkanın özkütlesi hakkında bilgi verir.



(a)

Şekil 26. Kontrollü buharlaştırıcı ve taşıyıcı sistemi. Sistemin görünümü (a) ve şematik gösterimi (b) (Çoban 2021)



Şekil 26. Kontrollü buharlaştırıcı ve taşıyıcı sistemi. Sistemin görünümü (a) ve şematik gösterimi (b) (Çoban 2021) (devamı)

Hem taşıyıcı hem de seyreltici gaz olarak Azot gazı (N_2) kullanılmış ve bu gazın kontrolü, gaz akış kontrol ünitesi ile yapılmıştır. Kontrol edilen taşıyıcı gaz, buharlaştırma işlemini karışımın bir bileşeni olarak arttırmak ve oluşan buharı taşımak için kullanılır. Sistemin oluşturduğu gaz karışımındaki çözücü buharı ile taşıyıcı gazın miktarları bilindiği için çalışmada elde edilen buharın konsantrasyonu hesaplanabilir ve istenilen konsantrasyon biriminden değerlendirilebilir. Gaz akış kontrol ünitesinde, içerisine gaz yolu boyunca konumlandırılmış sıcaklık sensörlerinden gelen bilgi ile gaz kontrolünü sağlamaktadır. Gaz ilk sensörden geçtikten sonra ısıtıcı tarafından ısıtılır ve ikinci sensörden geçer. Her iki sensörden okunan sıcaklık değerleri arasındaki fark gaz akışı hakkında bilgi verir. Eğer gaz akışı yoksa sensörler arasında sıcaklık farkı oluşmaz.

Kontrollü bir şekilde akışı sağlanan çözücü, buharlaştırma ünitesine ulaşır ve orada buharlaştırılarak buhar fazına geçirilir. Taşıyıcı gaz olarak kullanılan N_2 gazının içerisinde seyreltilmiş bir şekilde test hücrelerine yönlendirilir. Buharlaştırma ünitesi 200 °C'ye kadar ısınabilme kapasitesine sahiptir (Şekil 27).



Şekil 27. CEM sistemi buharlaştırma ünitesi

Yeni sensör cihazı

Şekil 25’te verilen sistemin ana blok gösteriminin ikinci kısmını oluşturan yeni sensör cihazı tasarımı, üretimini gerçekleştirilen Gözenekli Silisyum yapı ile SWIR kamera entegrasyonunu kapsamaktadır. Bu kısım yukarıda ‘Tümleşik Sensör Sistemi: GS-SWIR Kamera Entegrasyonu’ başlıklı konu altında detaylıca anlatılmaktadır.

Özetle GS yapının arka tarafına SWIR kamera entegre edilip ön tarafında ise kızılötesi ışın kaynağı (LED) kullanılarak sensörün aydınlatılması sağlanmıştır. CEM serisi buharlaştırma sistemi sayesinde farklı tür ve farklı konsantrasyonlarda çözücü buharları uygulanabilmektedir. GS sensördeki gözeneklerin içine farklı çözücü buharlarının dolması veya aynı gazın farklı konsantrasyonlarının dolmasıyla etkin kırılma indisi değişmektedir ve yansıma spektrumunda kayma meydana gelmektedir (Karacalı 2009). Ortama farklı çözücü buharı ve bunların farklı konsantrasyonları gönderildiğinde GS yapı sayesinde farklı örüntüler oluşmaktadır. Bu örüntülerin farklılıklarını görmek amacıyla video kaydı alınabilecek şekilde SWIR kamera ile GS yapı tümleşik hale getirip yeni bir dizayn gerçekleştirilmiştir. Sensör yüzeyinde meydana gelen bu farklılıklar SWIR kamera yardımıyla video şeklinde kaydedilmiş ve veri seti oluşturulmuştur.

Yapay Zeka Temelli Çözücü Buharı Kimliklendirme

Veri tabanı oluşturma

Sınıflandırma çalışmalarında kullanılan veri tabanı; solvent (çözücü) buharının kontrollü bir şekilde elektrokimyasal anodizasyon yöntemi ile üretilen GS yapıya gönderilmesi ve bu yapı yüzeyinde meydana gelen değişimin bir SWIR kamerayla izlenip buna ait video kaydının alınması ile oluşturulmuştur.

Video kayıtları toplam altı aşamalı bir süreç takip edilerek üretilmiştir. Tüm bu aşamalar Şekil 28 ile gösterilmiş olup aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır. İlgili şekilde yatay eksende

yer alan zaman büyüklüğüne göre hizalanmış üç ayrı grafik ile süpürme gazı (a görüntüsü), seyreltme gazı (b) ve kimyasal akışları (c) farklı renkler ile gösterilmiştir.

Hücrenin Isıtılması: Ölçüm hücresine çözücü buharı uygulamadan önce hücre 0,2 litre/dakika gaz akışında (azot (N_2)) 65 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak önceki kullanımlardan kalan artıklar temizlenir. Bu işlem yaklaşık olarak 2 dakika sürmekte olup bu süre zarfında herhangi bir video kaydı oluşturulmamaktadır.

Hücrenin Soğutulması: Isıtma işlemini takiben ölçüm hücresinin kabuk kısmında yer alan bir peltier soğutucu yardımıyla, hücre sıcaklığı 25°C sıcaklığa düşüncüye kadar soğutma işlemi uygulanmakta ve bu sıcaklık değerine ulaşıldıktan sonra kararlılık sağlanması için ek olarak 20sn süre beklenilmektedir. Soğutma aşamasında da herhangi bir video kaydı oluşturulmamaktadır.

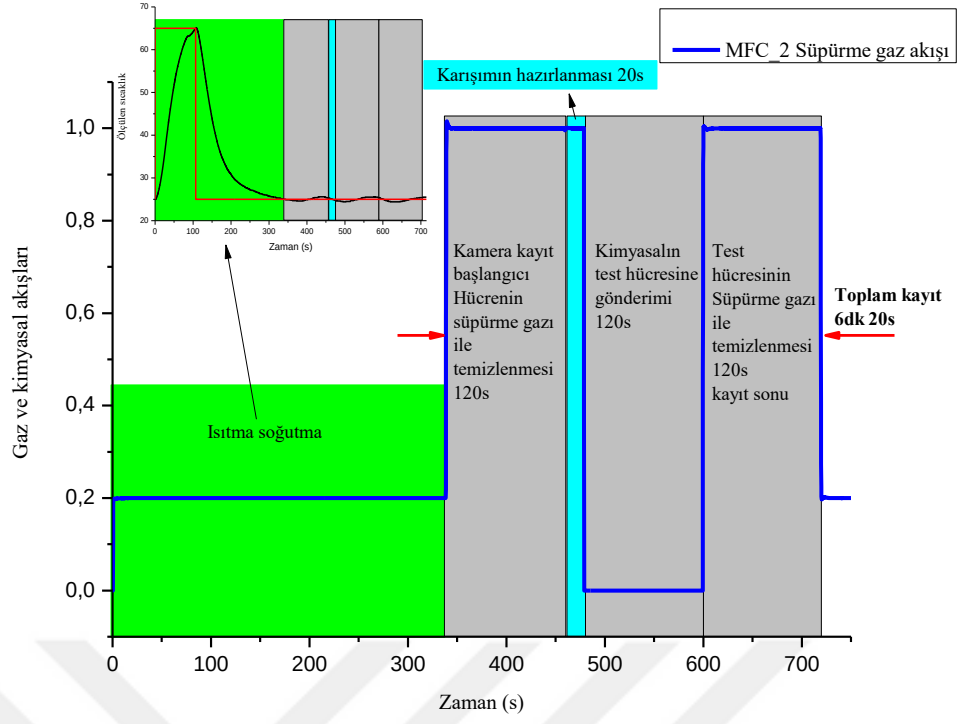
Süpürme Gazı Uygulanması: Bu aşamada 120sn süre ile hücreye süpürme gazı olarak sadece azot (1litre/dakika) verilerek hücrenin temizlenmesi sağlanmakta olup bu süreç Şekil 28 (a) da birinci gri bölge olarak işaretlenmiştir. Bu aşamanın başlangıcı aynı zamanda video kaydının da başlangıcını oluşturmaktadır.

Karışımın Hazırlanması: Şekil 28 (c) de açık mavi ile işaretlenen ve süresi 20sn olan bu zaman diliminde, oranı önceden belirlenen ve hücreye gönderilecek karışım hazırlanır ve kararlı hale ulaşana kadar dışarı akıtılır. Kimyasal miktarının kararlı hale gelmesi 20sn sürer bu sürede seyreltme gazı da 1litre/dakika'ya ayarlanır. Bu aşamada video kaydı devam etmektedir.

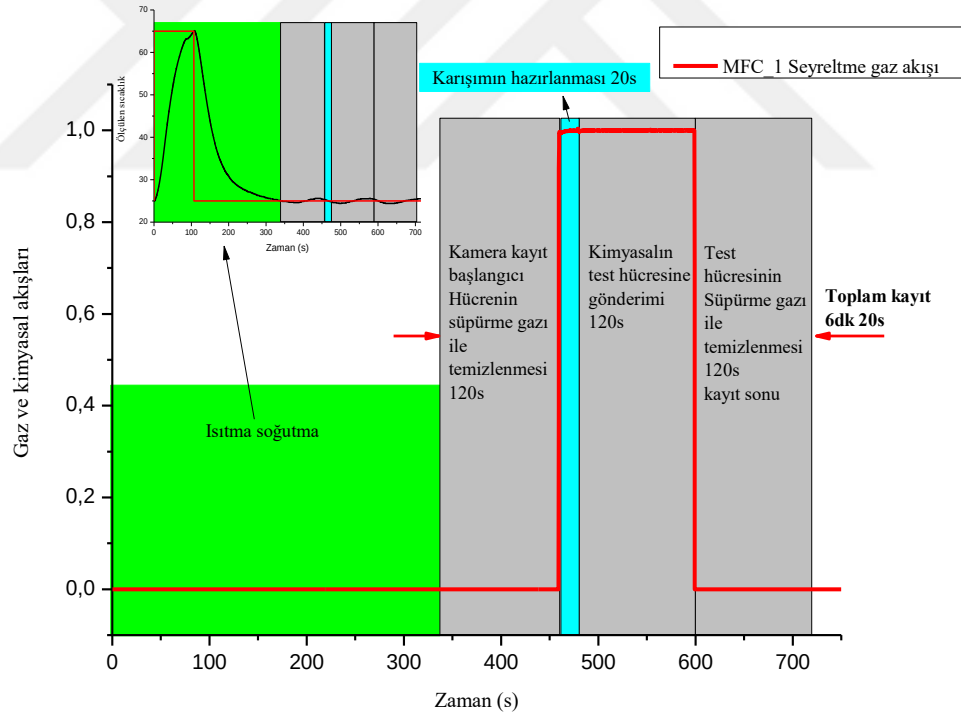
Hücreye Kimyasal Uygulanması: Takip eden 120sn boyunca, seyreltme gazı (Şekil 28 (b)) ile birlikte hazırlanmış olan ve çözücü buharı içeren karışım ölçüm hücresine uygulanır. Bu aşama şekilde Şekil 28 (c) de ikinci gri bölge olarak işaretlenmiş olup bu aşama video kaydının önemli ve sınıflandırma açısından kimliklendirme bilgisi içeren bir bölümünü oluşturmaktadır.

Son Süpürme Gazı Uygulanması: Şekil 28 (a) da üçüncü gri bölge olarak işaretlenmiş bu son aşama ile karışım uygulama adımı sonlandırılıp süpürme gazı olarak yine azot (N_2) uygulanır. Video kaydının son adımını oluşturan ve süresi yine 120sn olarak belirlenen bu aşama da sınıflandırma açısından önemli görsel detay içermektedir.

Sonuç olarak; veri setinde yer alan SWIR video kayıtları, ilgili altı adımlı bu sürecin son dört adımını boyunca kaydedilmiş olup veri tabanında yer alan her bir kayıt uzunluğu 380sn'dir.

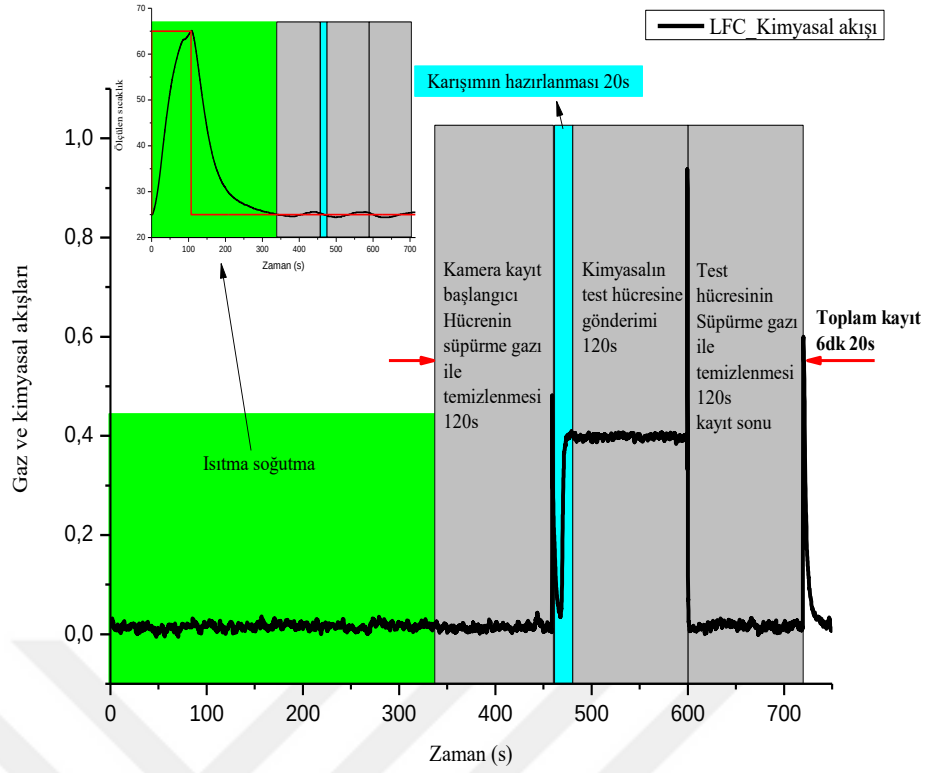


(a)



(b)

Şekil 28. Sıcaklık ve gaz değişimi detaylı grafiği (a) süpürme gaz akışı grafiği (b)seyreltme gaz akışı grafiği (c) kimyasal gaz akışı grafiği (Çoban 2021)



(c)

Şekil 28. Sıcaklık ve gaz değişimi detaylı grafiği (a) süpürme gaz akışı grafiği (b)seyreltme gaz akışı grafiği (c) kimyasal gaz akışı grafiği (Çoban 2021) (devamı)

Bu çalışmada bu amaçla altı farklı buhar kullanılmış olup bunlar metanol, etanol, propanol, aseton, heptan ve hekzan çözücülerinden elde edilmiştir. Dolayısıyla çalışmanın ilk adımı altı farklı çözücü buharının sınıflandırması şeklinde düzenlenmiştir. Buna ek olarak; sınıflandırma çalışmalarının ikinci bölümünde tüm çözücü buharlarına ait konsantrasyon değerlerini de belirlemek amacıyla veri tabanı oluşturma çalışmaları her bir çözücü buharının yine altı farklı konsantrasyon değeri kullanılarak yinelenmiştir. Bu konsantrasyon büyüklükleri sırasıyla 85, 170, 255, 340, 425 ve 510 ppm değerlerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla sınıflandırma çalışmalarının gerçekleştirilmesi maksadıyla altı farklı çözücü için her biri altı farklı konsantrasyondan oluşan toplam 36 farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Tüm bunlara ek olarak; önerilen derin öğrenme tabanlı sınıflandırma işlemlerinin sağlıklı ve gerekli verimde gerçekleştirilebilmesi için her bir farklı çözücü/konsantrasyon ölçümü 10 kez tekrarlanmış ve toplamda 360 farklı ölçüm elde edilmiştir. Kullanılan çözücü buharları ve konsantrasyonları, konsantrasyon başına video sayısı ve toplam video sayısı Tablo 4’te verilmektedir.

Tablo 4. Kullanılan Çözücü Buharı ve Konsantrasyon Sayıları

Gaz	Konsantrasyon (ppm)	Konsantrasyon Başına Video Sayısı	Toplam Video Sayısı
Metanol	85-170-255-340-425-510	10 video	60 video
Etanol	85-170-255-340-425-510	10 video	60 video
Aseton	85-170-255-340-425-510	10 video	60 video
Hekzan	85-170-255-340-425-510	10 video	60 video
Heptan	85-170-255-340-425-510	10 video	60 video
Propanol	85-170-255-340-425-510	10 video	60 video

Video sınıflandırma işlemi

Bu çalışmada kullanılan derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcı, temel olarak “öznitelik çıkarma” ve “sınıflandırıcı” olarak adlandırılan iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu sisteme giriş verisi olarak, bu çalışma ile tasarlanan sensör sistemi ve ölçüm düzeneği kullanılarak elde edilen altı farklı çözücü buharı ve her birinin altı farklı konsantrasyon değeri için kaydedilen SWIR kamera video verisi kullanılmıştır. Bu video kaydı içerisindeki resimlerden ilk adımda HOG (Histogram of Oriented Gradients) tabanlı öznitelikler çıkarılır. İkinci adım ile derin öğrenme alanında kullanılan ve yinelemeli sinir ağı (RNN) tabanlı bir mimari olan LSTM (Long Short-Term Memory) sınıflandırıcı kullanılarak elde edilen bu öznitelikler yardımıyla girişe uygulanan resimlerin hangi çözücü buharı ile hangi çözücü buharı ve bunun hangi konsantrasyonuna ait olduğunun sınıflandırması gerçekleştirilmektedir.

HOG (Histogram of Oriented Gradients) özniteliği

Kullanılan sınıflandırma modelinin ilk aşaması olan HOG öznitelik çıkarma işlemi genel olarak makina öğrenmesi ve görüntü işleme alanlarında kullanılan ve büyük bir veri kümesini tanımlamak için gerekli olan daha sade ve tanımlayıcı bilgiyi elde etmeyi amaçlar. Bu çalışmada kullanılan HOG öznitelik çıkarma işlemi ilk defa Shashua *et al.* (2004) ve Dalal and Triggs (2005) tarafından önerilmiştir. Bu yaklaşımda temel amaç, verilen görüntüyü bir grup lokal histogramlar olarak tanımlamaktır. Bu gruplar, görüntünün lokal bir bölgesindeki gradyanların yönelimlerinde, gradyanların büyüklüklerinin toplandığı histogramlardır (Peker vd 2012). Başka bir deyişle nesneyi içerdiği açılar ile betimleyen bir tanımlayıcı olarak da ifade edilebilir.

Bu amaçla kullanılan HOG özniteliği elde edilirken uygulanan işlemler aşağıda verilen ve kısaca açıklanan aşamalardan oluşmaktadır.

- Önce videoyu oluşturan her bir görüntü belirlenen boyuttaki karesel bölgelere ayrılır.
- Sonrasında her bir karesel bölge içindeki pikseller için gradyan yönleri ve gradyan büyüklükleri hesaplanır.
- Bu karesel bölgelerin her biri için ayrı ayrı oryantasyon histogramı hesaplanır. Histogramlar oluşturulurken, hücre içerisindeki her bir pikselin gradyan büyüklüğü sahip olduğu açığa göre histogram bölgelerine dağıtılır (Dalal and Triggs 2005).
- Son olarak da oluşturulan histogramlar normalize edilerek bir araya getirilir ve HOG özneteliği olarak kullanılır.

Görüntülere ait gradyan büyüklüğü, bunların iki boyutlu filtreler ile süzgeçlenmesi ile oluşturulur. Bu amaçla genel olarak yatay ve dikey filtreler bir arada uygulanmaktadır. Analiz edilecek görüntü L olsun. Her pikselin (x, y) büyüklüğü (G) ve yönü (θ) olmak üzere verilen denklemlerle tanımlanır (Firuzi *et al.* 2018):

$$G_x(x, y) = L(x+1, y) - L(x-1, y) \quad (4)$$

$$G_y(x, y) = L(x, y+1) - L(x, y-1) \quad (5)$$

$$G(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1}(G_y(x, y) / G_x(x, y)) \quad (7)$$

Bu şekilde $G_x(x, y)$ ve $G_y(x, y)$ ile gösterilen görüntünün yatay ve dikey gradyan büyüklükleri hesaplanıp sonrasında Denklem 4 ve 5 ile tanımlandığı biçimde sırasıyla gradyan büyüklüğü ve gradyan yönü hesaplanır.

LSTM sınıflandırıcı

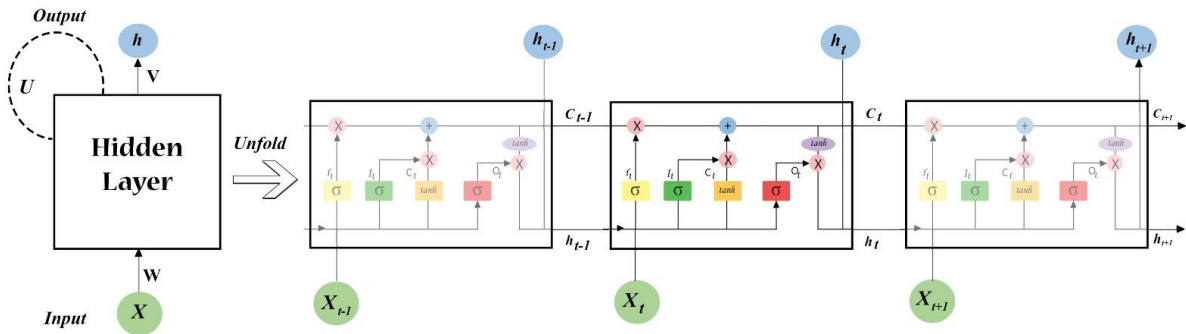
LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek Ağlarında) derin öğrenme algoritması 1997’de Hochreiter ve Schmidhuber tarafından RNN mimarisinin dezavantajlarını yok etmek için ortaya atılan bir tekrarlayan sinir ağı olarak bilinmektedir (Hochreiter and Schmidhuber 1997). RNN’ nin performansı uzun vadeli bağımlılık sorunu için tatmin edici olmadığından RNN’ yi geliştirmek için LSTM sinir ağı önerilmiştir (Song et al 2020). LSTM’ ler, uzun vadeli bağımlılıkları öğrenebilen ve varsayılan olarak uzun süreler boyunca bilgileri hatırlayabilen özel bir RNN türüdür (Le *et al.* 2019). Bunu, yapısında bulunan bellek hücreleri ve kapılar aracılığıyla yapmaktadır. LSTM’ de özel bir hafıza hücresi kullanılarak uzun geçmişlerin öğrenilmesi mümkün olmaktadır. Özellikle doğal dil işleme kapsamında oluşturulan dil modellerinde geçmiş bilginin unutulmaması gerektiğinden tekrarlayan sinir ağlarını kullanmak

oldukça avantajlı olabilmektedir. LSTM, hafıza geçişli mekanizması ile uzun vadeli bağımlılıkları öğrenebildiği için sıralı veya zaman serisi problemlerinde de önerilmektedir (Firuzi *et al.* 2018). Aynı zamanda konuşma (Graves *et al.* 2013), metin işleme (Fernandez *et al.* 2007), müzik (Samui *et al.* 20018) ve sınıflandırma (Raj *et al.* 2018) uygulamalarında LSTM mimarileri kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

LSTM zamana bağlı problemlerde avantaj sağladığından bu çalışmada da kullanılmıştır. Önerilen çalışmada veri tabanı videolardan oluşmaktadır. Bilindiği üzere videolar da zamana bağlı olarak değişmektedir. Yani her zaman dilimi farklı resimlerden oluştuğundan ve bilgiyi dizi işleme yoluyla ilk zaman diliminden son zaman dilimine kadar taşımak gerektiğinden LSTM tercih edilmektedir. Yani videodaki bilgiler LSTM' in ekleme ve çıkarma yeteneği sayesinde sırasıyla iletilebilmektedir.

LSTM hücreleri içerisinde hangi bilgilerin unutulacağı hangilerinin hatırlanacağına karar veren kapılar bulunmaktadır. Bu kapılar sırasıyla girdi kapısı, çıktı kapısı, unutma kapısı olarak adlandırılır. Girdi kapısı, bellek hücresine giriş aktivasyonunu (yeni bir değerin bellekte ne derece aktığını) kontrol ederken, çıktı kapısı bellek hücresinin çıktı aktivasyonunu hesaplamak için bellekteki değerin ne kadar kullanıldığını kontrol eder (Oytun ve Morgül 2021). Unutma kapısı sigmoid işlevi içerdiğinden bellek hücresinde hangi bilgilerin saklanması veya unutulması gerektiğini öğrenmekten sorumludur. Sigmoid işlevi, her bir bileşenin ne kadarının geçmesine izin verilmesi gerektiğini açıklayan sıfır ile bir arasında sayılar üretir. Tanh işlevi, duruma eklenen yeni bir vektör oluşturur (Qadeer *et al.* 2020).

LSTM yapısında önemli bir unsur da bellek hücresi durumudur (memory cell state). Bellek hücresi, bu üç kapının yardımıyla hücreye seçici olarak bilgi eklemek veya çıkarmak için tüm zincir boyunca ilerler (Song *et al.* 2020). Bellek hücre durumu, kapılardan üretilen çıktılara göre güncellenir. Şekil 29' da LSTM sınıflandırıcısının temel yapısı verilmektedir.



Şekil 29. LSTM sınıflandırıcısı temel yapısı

LSTM ağının özel prosedürleri aşağıdaki gibidir (Song *et al.* 2020):

- a) LSTM ağının ilk adımı, gerekli olmayan ve bu adımda hücreden çıkarılacak olan bilgileri tanımlamaktadır. f_t unutma kapısında, önceki C_{t-1} hücre durumundan hangi bilgilerin atılması gerektiğine karar verilir.

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (8)$$

- b) Sonraki adımda, x_t giriş bilgisinin hangi bilgilerinin giriş kapısındaki C_t hücre durumuna depolanması gerektiğine karar verilir. Burada i_t giriş bilgisi ve $\tilde{C}_t$ aday hücre durumu güncellenir.

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (9)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (10)$$

- c) Aday bellek $\tilde{C}_t$ ile uzun süreli bellek C_t 'yi birleştiren mevcut zaman adımının C_t hücre durumu güncellenir.

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (11)$$

- d) Çıktı bilgisi o_t ve hücre durumu C_t nin kullanıldığı çıkış kapısındaki h_t sonuç bilgisi elde edilir.

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (12)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (13)$$

Burada W girdi ağırlıklarını, U tekrarlayan ağırlıkları, b ise sapma miktarıdır. f , i , o simgeleri de sırasıyla unutma kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısını temsil etmektedir.

Üç kapının da aktivasyon fonksiyonu sigmoid fonksiyonudur (σ) ve 0 ile 1 arasındaki değer alır. Aktivasyon fonksiyonu olan $\tanh$ ise değeri -1 ve 1 arasına sıkıştıran hiperbolik tanjant fonksiyonudur.

Aktivasyon fonksiyonunun her ikisi de ağın doğrusal olmama durumunu geliştirmek için kullanılır ve bunlar şu şekilde ifade edilir:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (14)$$

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (15)$$

Performans ölçütü

Makine öğrenmesi çalışmalarında; kullanılan modelin performansını belirlemek için elde edilen tahmin niteliğinin, hedeflenen nitelik değerlerine ne ölçüde yaklaşıldığı veya uzaklaşıldığının bir göstergesi olan ve hata matrisi (confusion matrix) adı verilen matris

formattaki değerlendirme sonuçlarından faydalanılır. İki sınıflı bir sınıflandırma problemi için örnek hata matrisi Tablo 5 ile gösterilmiştir. Bunun benzeri veya daha çok sınıflı hata matrislerinde, değerlendirme sonucu Gerçek Pozitif (True Positive-TP), Yanlış Pozitif (False Positive-FP), Gerçek Negatif (True Negative-TN) ve Yanlış Negatif (False Negative-FN) olmak üzere dört farklı durumdan birine denk gelmekte olup bunlar aşağıda tanımlanmışlardır.

TP: Gerçekte pozitif olarak etiketlenmiş nitelik, algoritma tarafından da pozitif olarak tahmin edilir.

TN: Gerçekte negatif olarak etiketlenmiş nitelik, algoritma tarafından da negatif olarak tahmin edilir.

FP: Gerçekte negatif olarak etiketlenmiş nitelik, algoritma tarafından hatalı olarak pozitif olarak tahmin edilir.

FN: Gerçekte pozitif olarak etiketlenmiş nitelik, algoritma tarafından hatalı olarak negatif olarak tahmin edilir.

Tablo 5. Hata Matrisinin Temel Gösterimi

		HEDEF	
		Pozitif	Negatif
TAHMİN	Pozitif	TP	FP
	Negatif	FN	TN

Bu şekilde elde edilen değerlendirme sonucunda arzu edilen durum; doğru kurgulanmış bir model kullanılarak (bu çalışmada uygun seçilmiş öznelik ve sınıflandırıcı ikilisi) asıl diyagonal üzerindeki büyüklüklerin mümkün olduğu ölçüde büyük olmasının sağlanabilmesidir. Özellikle bu matriste yer alan tüm hücreler veri setinde yer alan ilgili “hedef örnek” sayılarına bölünmek suretiyle normalize edildiğinde, model performansının görsel olarak kolay bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir.

Bu dört değerlendirme sonucu kullanılarak yine kullanılan model performansını belirleyen başkaca performans değerlendirme metrikleri de tanımlanmaktadır. Bunlar;

Doğruluk Oranı (Accuracy Rate): Sınıflayıcının yapmış olduğu tahminlerin ne oranda doğru olduğunun bir ölçüsü olup aşağıda tanımlanmıştır.

$$(TP+TN)/\text{Toplam Örnek Sayısı} \quad (16)$$

Hata Oranı (Error Rate): Sınıflayıcının yapmış olduğu tahminlerin ne oranda hatalı olduğunun bir ölçüsü olup “doğruluk oranı” aksine düşük olması istenir. Denklem 15 ile aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$(FP+FN)/\text{Toplam Örnek Sayısı} \quad (17)$$

Geri Çağırma (Recall): Gerçekte pozitif olarak etiketlenmiş örneklerin ne oranda doğru olarak tahmin edildiğinin bir ölçüsü olup bunun da “doğruluk oranı” gibi mümkün olduğunca yüksek olması hedeflenir. Bu metrik aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

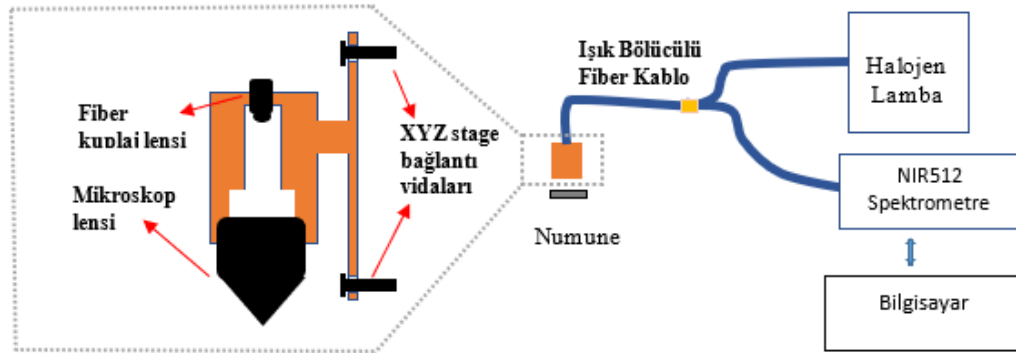
$$TP/(TP+FN) \quad (18)$$

Hassasiyet (Precision): Yapılan pozitif tahminlerin ne oranda doğru olduğunun bir ölçüsü olup yine büyük olması hedeflenen ve Denklem 17 ile tanımlanan bir performans değerlendirme metriğidir.

$$TP/(TP+FP) \quad (19)$$

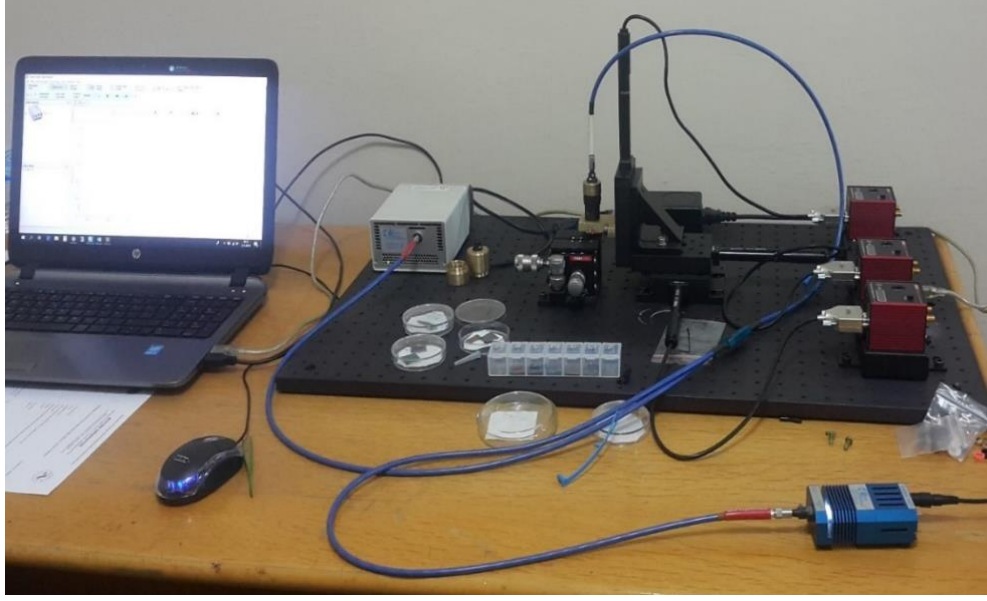
Yansıma Ölçüm Sistemi

Üretilen GSFP yapıların karakterizasyonunda, Şekil 30’ da verilen yansıma ölçüm sistemi önemli yer tutar. 900-1700 nm bölgesinde GSFP yapısının parametrelerinin belirlenmesinde en önemli ölçüm düzeneğidir. Bilgisayar kontrollü XYZ stage ile yüzey haritalaması işlemi de gerçekleştirilebilmektedir. Işık kaynağı, Ocean Optics LS-1 halojen lamba ve Ocean Optics NIR512 Spectumeters ölçüm sisteminin aktif bileşenlerini oluşturur. Işık bölücülü fiber optik vasıtası ile ışık kaynağı, numuneye düşürülen ve yansıyan ışığı toplayan mercek ve spektrometre arasında optik bağlantı sağlanır. Yansıma ölçüm sistemi ile üretilen GS yapının yüzeyi belli aralıklarla taranıp numuneye gönderilen ışığın taranan her nokta için yansıma spektrumu elde edilir.



(a)

Şekil 30. Yansıma ölçüm sistemi şematik gösterimi(a), gerçek görüntü(b)



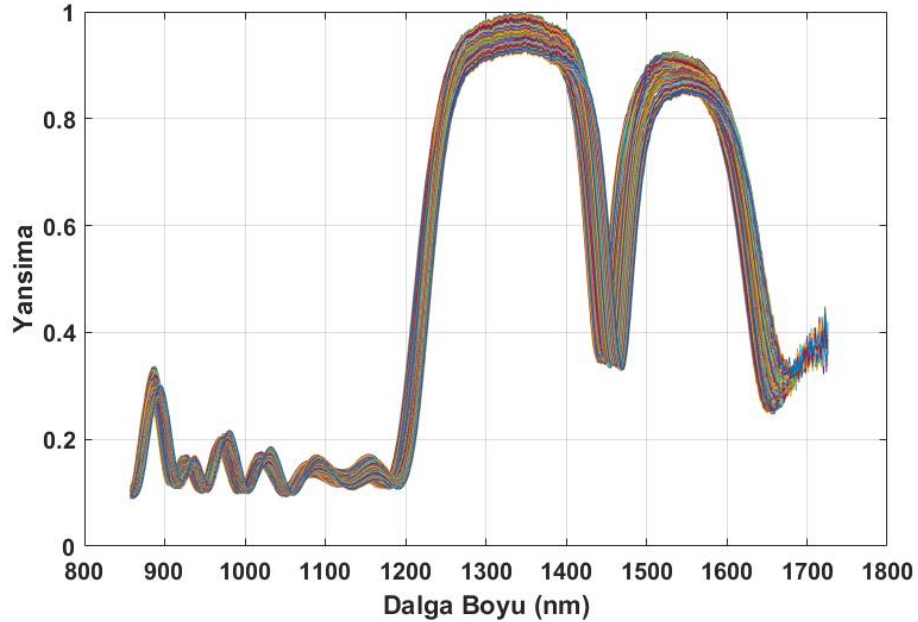
(b)

Şekil 30. Yansıma ölçüm sistemi şematik gösterimi(a), gerçek görüntü(b) (devamı)

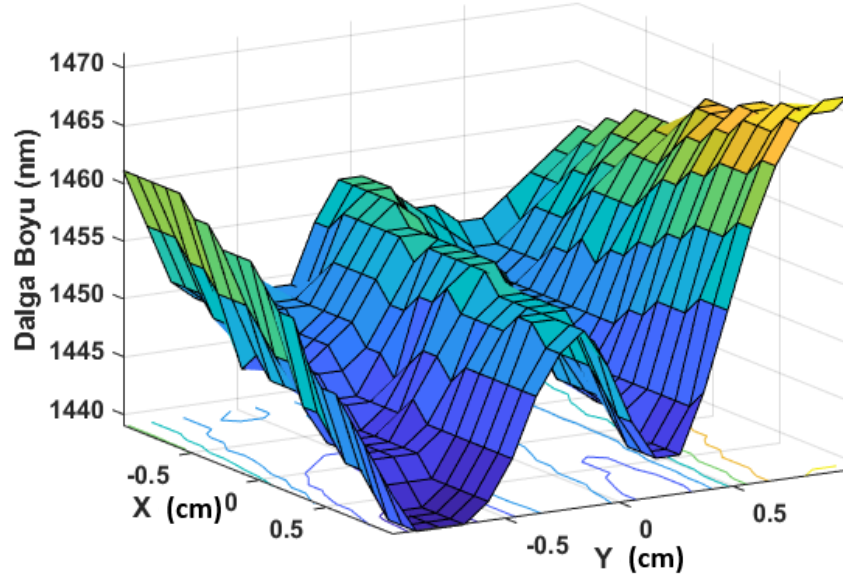
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yansıma Ölçüm Sisteminden Alınan Sonuçlar

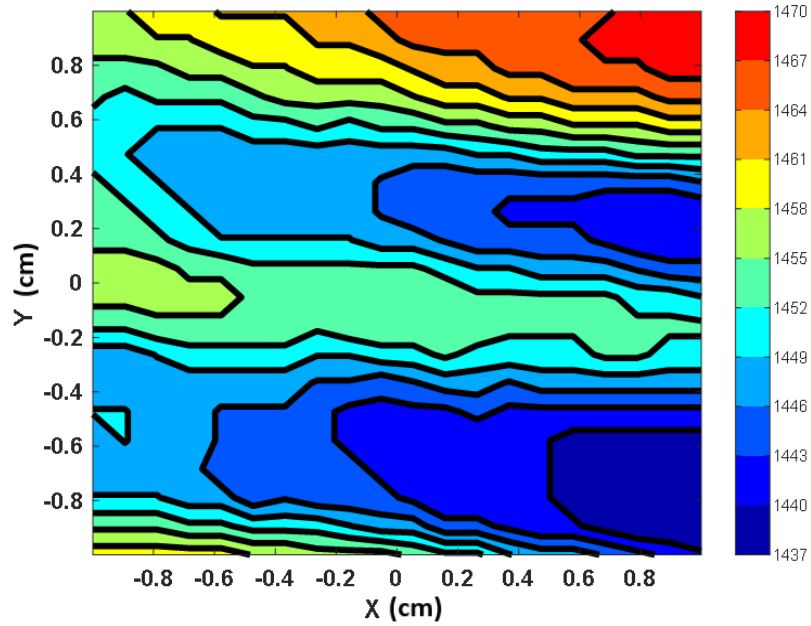
Üretilen GSFP yapısının çoklu noktada karakterizasyonunu incelemek üzere $1 \times 1 \text{ cm}^2$ olan yüzey üzerinde 0,05 cm adımlarla 400 (20 x 20) farklı noktadan dalga boyuna karşılık yansıma ölçümleri alınmıştır ve Şekil 31’ deki dalga boyuna karşılık yansıma grafiği elde edilmiştir. Bu grafik incelendiğinde farklı noktalardan alınan yansıma spektrumlarının, rezonans (çınlama) dalga boylarının 1450 nm civarında değiştiği gözlenmektedir. Ölçüm noktalarındaki çınlama dalga boylarını, GS yapı üzerindeki konumları ile incelemek için ölçüm noktalarına karşın çınlama dalga boyu değerleri Şekil 32’ de gösterilmiştir. Şekil 33’ te ise Şekil 32’de gösterilen grafiğin seviye eğrileri görülmektedir. Bu iki grafik incelendiğinde sensör üzerinden alınan farklı noktaların, farklı sensörler gibi çalışabileceği görülmektedir. Her bir nokta üzerine düşen (içerisine aldığı) çözücü buharı miktarına (konsantrasyonu) ve türüne göre birbirine benzer ancak farklı miktarlarda kayma olacaktır. Bu farklılıklar çözücü buharlarının kimliklendirilmesinde faydalı olacaktır.



Şekil 31. Çoklu noktadan alınan yansıma spektrumları

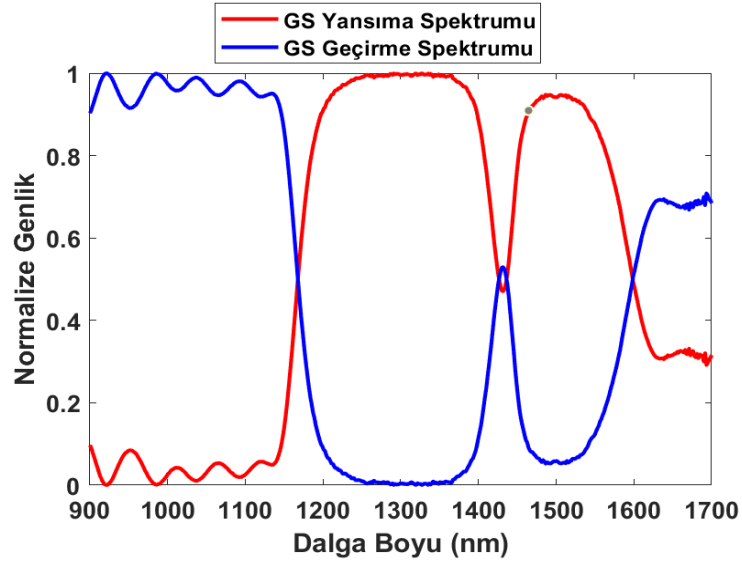


Şekil 32. Sensör yüzeyi üzerinden alınan farklı noktaların çınlama dalga boyu



Şekil 33. Çınlama dalga boyu seviye eğrileri

Üretilen GS yapının SWIR kamera görüntüsünün nasıl olacağını teorik olarak kestirmek için sensör üzerinde $40 \times 40 = 1600$ noktadan alınan yansıma spektrumu ölçümleri kullanıldı. Şekil 34' te GS yapı üzerinde orta bir bölgeden alınan yansıma spektrumu ve yansıma spektrumundan elde edilen geçirme spektrumu görülmektedir.



Şekil 34. GSFP üzerinde alınan yansımaya ve geçirme spektrumu

GS sistemi, belirli bir zaman aralığında lineer ve zamanla değişen sistem olarak kabul edilebilir. Bu durumda herhangi bir andaki geçirme spektrumu GS' nin frekans cevabı olarak kabul edilebilir ve girişten verilen ışığın spektrumu ile çarpıldığında (konvolüsyon teoremi) çıkış sinyalinin spektrumu aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$O(\lambda) = I(\lambda) P(\lambda) \quad (\text{Konvolüsyon teoremi}) \quad (20)$$

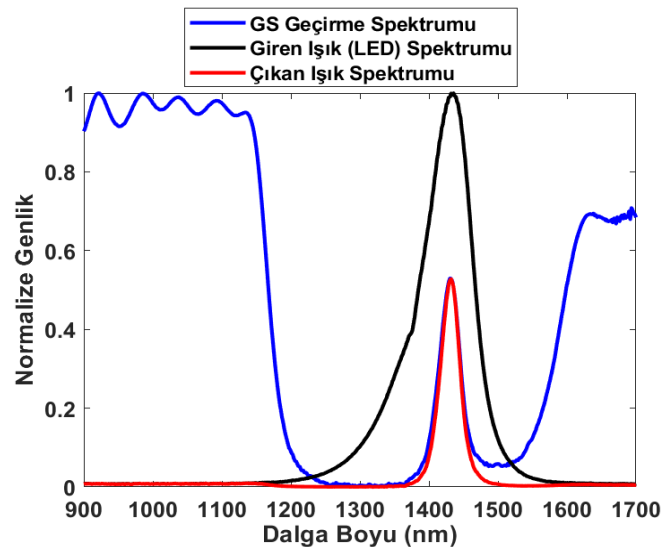
Burada:

$I(\lambda)$: Giriş ışık spektrumu

$P(\lambda)$: GS sensör geçirme spektrumu

$O(\lambda)$: Çıkış ışık spektrumu

Şekil 35'te GS yapı üzerindeki bir noktaya ait geçirme spektrumu ile giren ve çıkan ışık spektrumları görülmektedir.

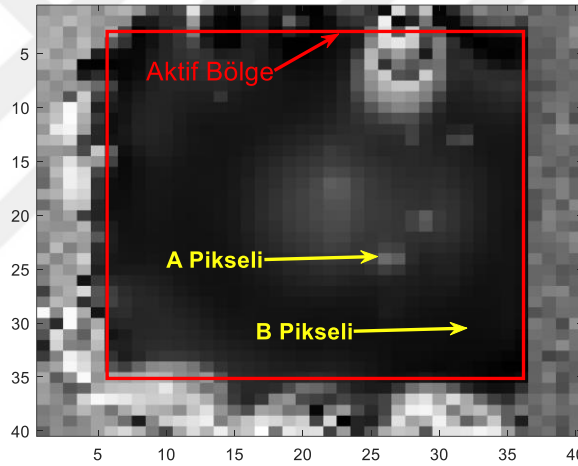


Şekil 35. GSFP üzerindeki bir noktaya ait giren, çıkan ve geçirme spektrumları

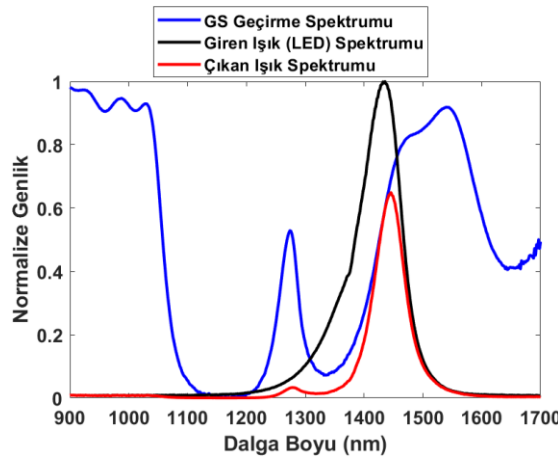
Çıkan ışığa ait spektrumdan enerji hesaplanarak ilgili pikseldeki parlaklık değeri elde edilmektedir. Çıkan ışık spektrumu yardımıyla GS yapı üzerindeki ilgili noktadan çıkan ışığın enerjisi E_0 aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$E_0(u, v) = \sum_{\lambda} |O(u, v; \lambda)|^2 \quad (21)$$

Bu enerji teorik olarak görüntüsünü bulmaya çalıştığımız kamera görüntüsünün ilgili pikseldeki parlaklığına karşılık gelmektedir. Şekil 36' da yukarıda anlatılan yöntem yardımıyla yansıma ölçümleri kullanılarak elde edilen teorik görüntü verilmektedir ve kırmızıyla gösterilen bölge GS' nin çınlama frekansı bölgesidir. Bu bölge üzerinde alınan A (26,26) ve B (33,32) noktalarına ait çıkan ışık spektrumları Şekil 37 (a) ve (b)'de görülmektedir. Burada dikkat edilirse A noktasında çıkan ışık genlik spektrumu, B noktasına oranla genlik olarak daha büyük olduğundan bu noktanın enerjisi daha yüksek çıkmakta bu da ilgili pikselin B noktasına nispeten daha parlak görünmesine sebep olmaktadır. Teorikte hesaplanan her bir pikselin parlaklık değeri bu piksellerin gri seviye değerine (geçen ışık miktarına) denk gelmektedir.

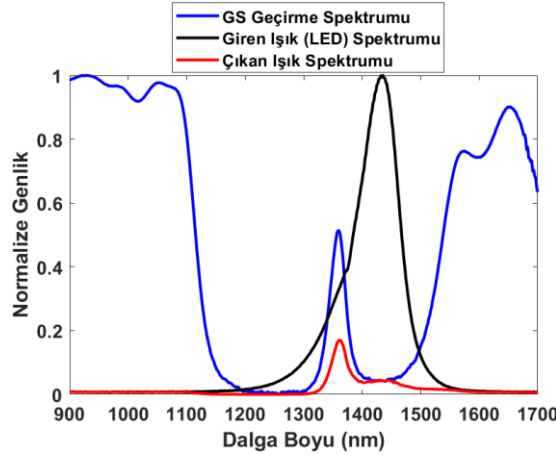


Şekil 36. Ölçümlerle elde edilen 40x40=1600 pikselden oluşan teorik görüntü



(a)

Şekil 37. (a) A noktasındaki (26,26) indisli pikselin yüksek genlikli çıkan ışık spektrumu (b) B noktasındaki (33,32) indisli pikselin yüksek genlikli çıkan ışık spektrumu

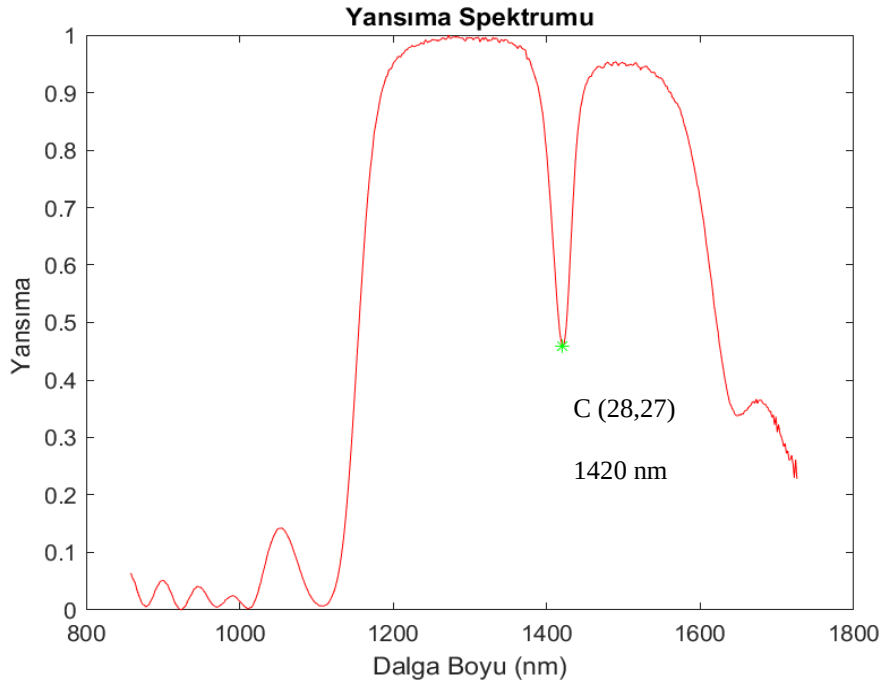


(b)

Şekil 37. (a) A noktasındaki (26,26) indisli pikselin yüksek genlikli çıkan ışık spektrumu (b) B noktasındaki (33,32) indisli pikselin yüksek genlikli çıkan ışık spektrumu (devamı)

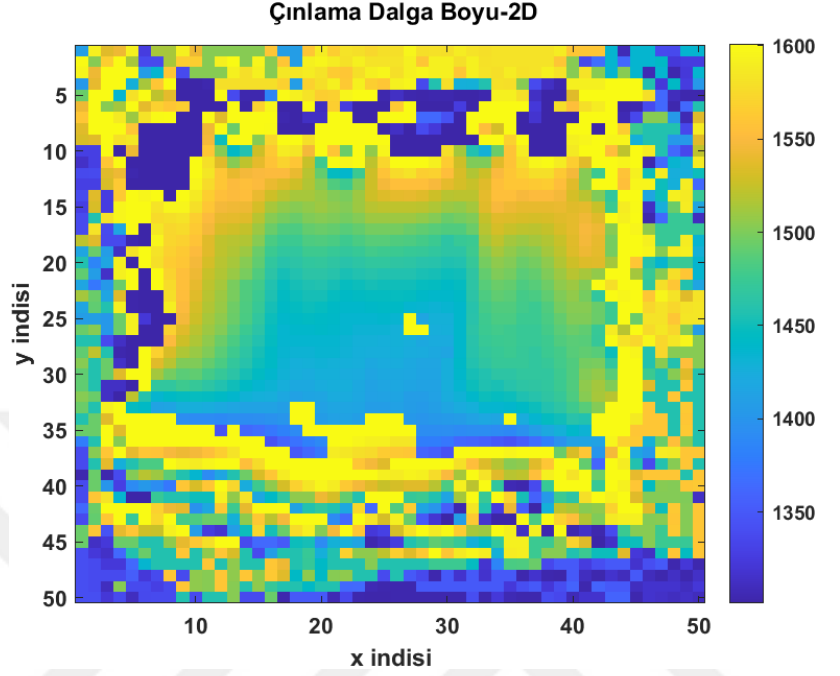
Son olarak üretilen ve aynı zamanda video kayıtları alırken kullanılan GS yapı olan T_028 kodlu numunenin çoklu noktada karakterizasyonunu incelemek üzere 0.025 cm adımlarla 2500 (50 x 50) farklı noktada yansımaya ölçümleri alındı.

T_028 kodlu numunenin üzerinde taranan noktalardan biri olan C (28,27) indisli pikselden alınan ölçümler analiz edilerek dalga boyuna karşılık yansımaya grafiği çizdirildi (Şekil 38). Şekil 38’ de yeşil işaretli nokta çınlama dalga boyu değerini göstermektedir. Çınlama dalga boyu iki maksimum yansımaya bandının arasında bulunan minimum noktanın x eksenindeki karşılığıdır. y eksenindeki karşılığı ise yansımaya değerini vermektedir. Bu noktaya ait olan C (28,27) indisli pikselin çınlama dalga boyu değeri 1420 nm’dir.

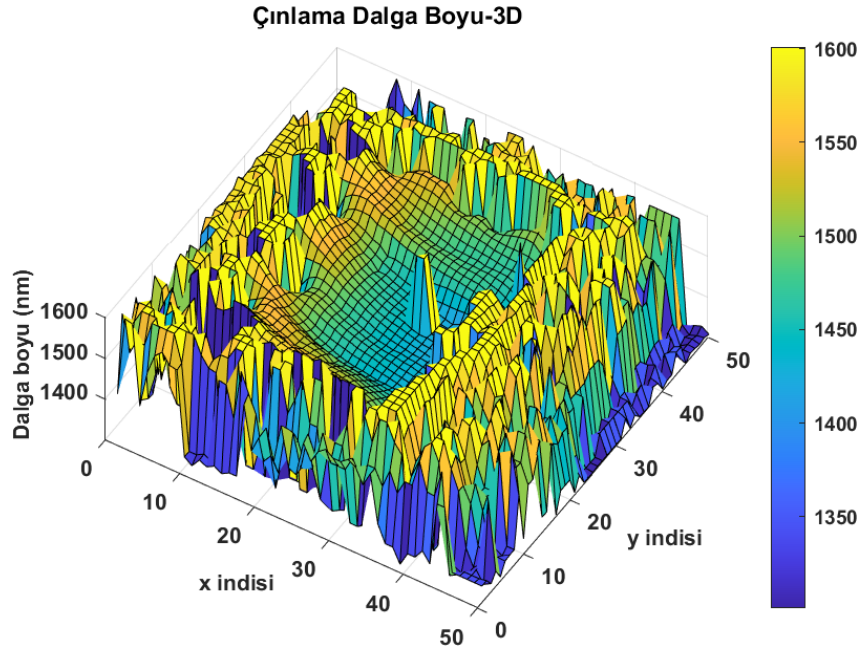


Şekil 38. Tek noktadan alınan yansımaya spektrumu (T_028 kodlu numune)

Şekilde 38’ de verildiği üzere T_028 kodlu numunenin yüzeyini oluşturan her bir piksel için çınlama dalga boyları belirlenip bir matris içinde tutulmuştur. Bu matrisin görüntüye dönüştürülmesiyle elde edilen ve her bir pikselin çınlama dalga boyunu veren görüntüler Şekil 39 (a) ve Şekil 39 (b) ile verilmektedir.



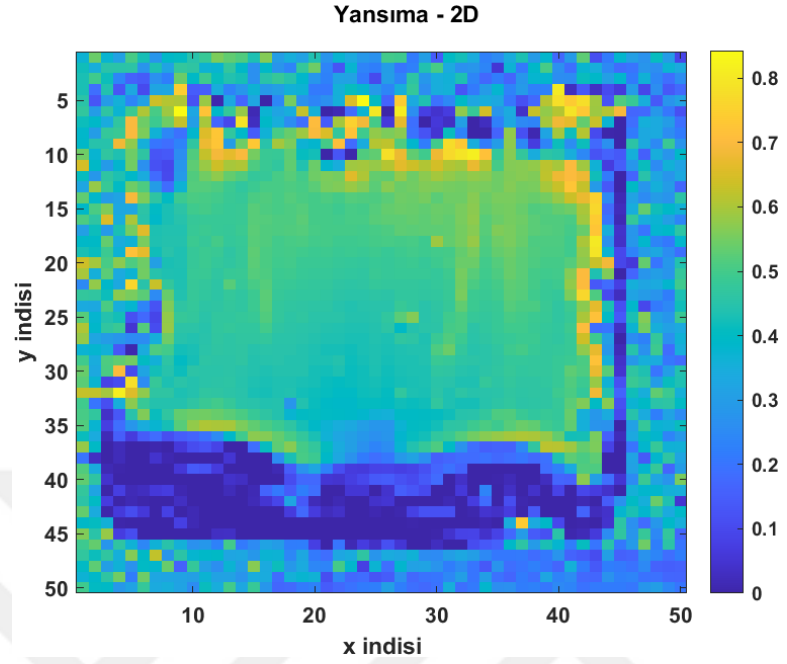
(a)



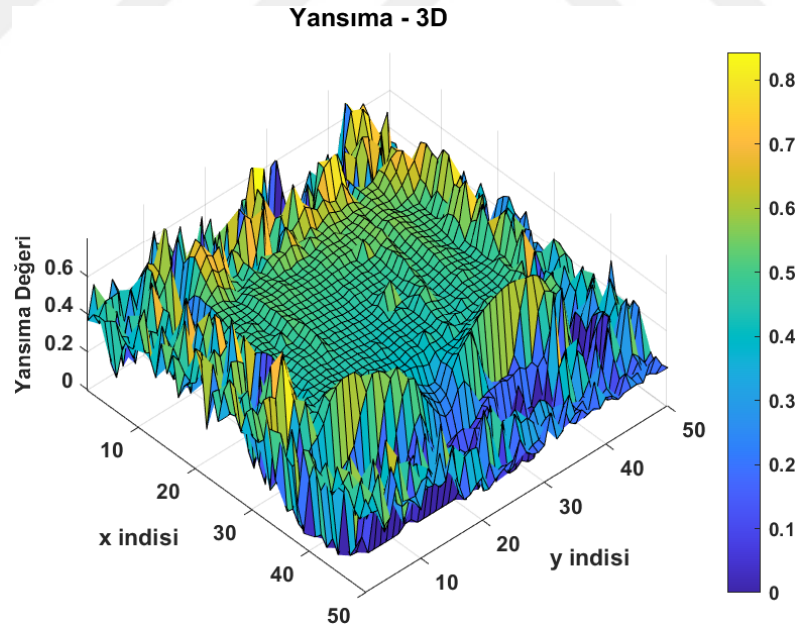
(b)

Şekil 39. Çoklu noktadan alınan çınlama dalgaboyları (a) 2D görüntü (b) 3D görüntü (T_028 kodlu numune)

Yine aynı numune üzerinde alınan ölçümlerde çınlama dalgaboyuna karşılık gelen yansıma değerleri görüntüye dönüştürülünce 2D görüntüsü Şekil 40' daki (a) da, 3D görüntüsü ise (b) de verilmektedir.



(a)

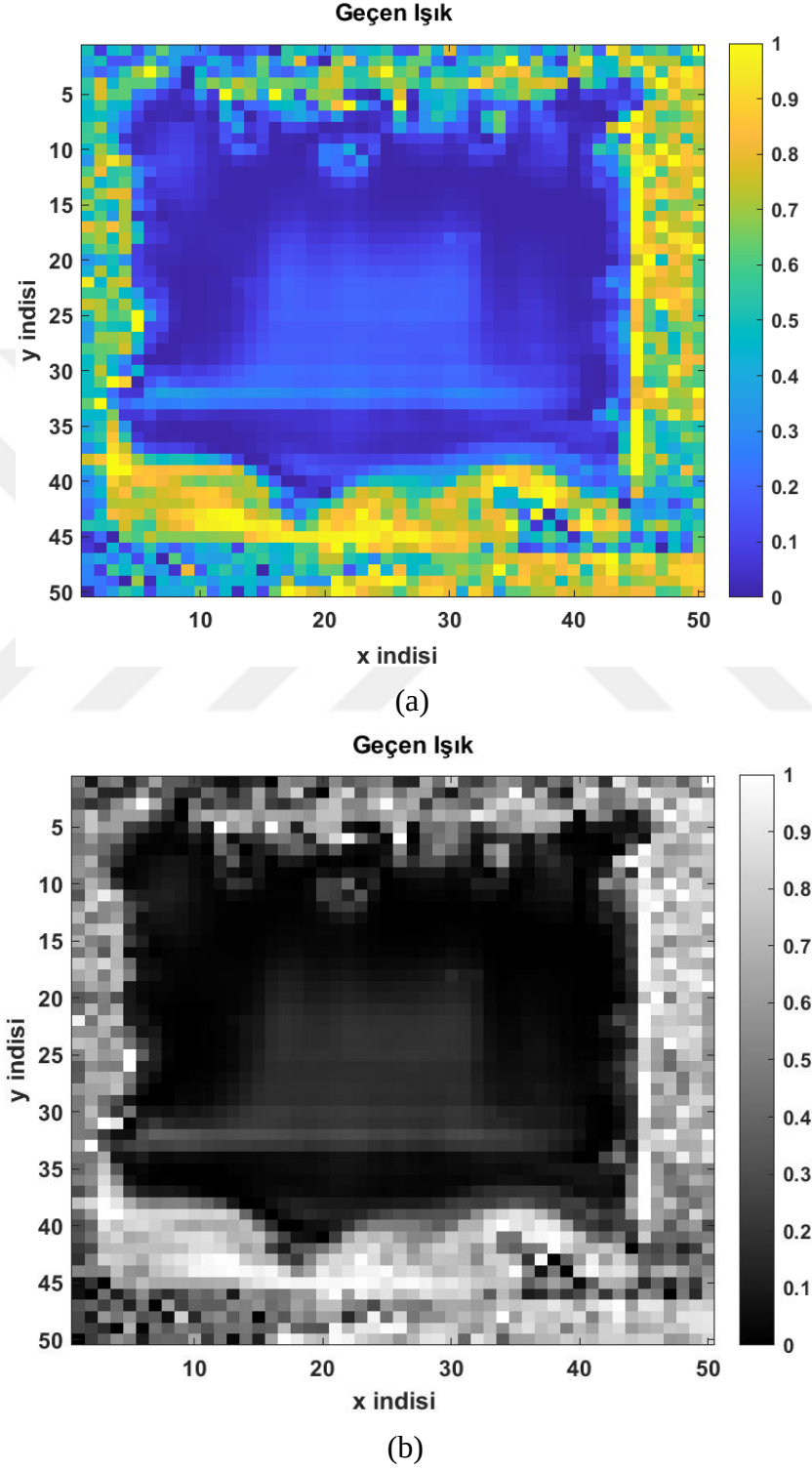


(b)

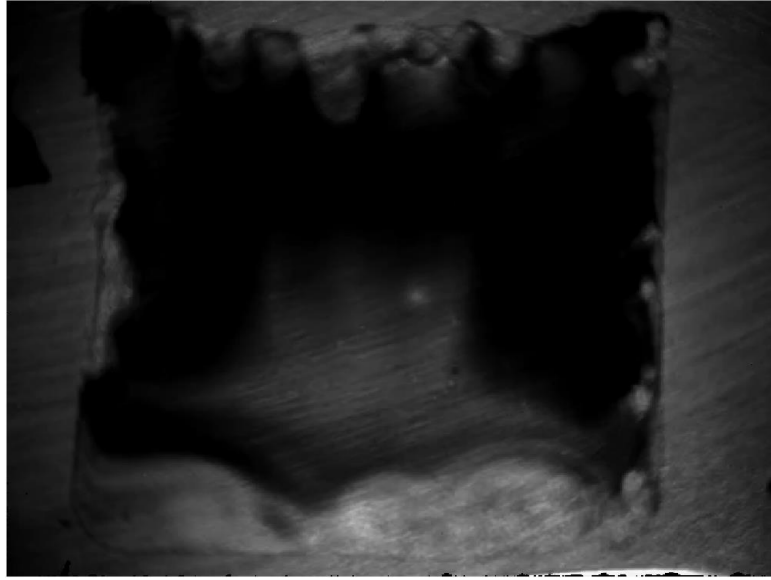
Şekil 40. Çoklu noktadan alınan yansıma görüntüleri (a) 2D görüntü (b) 3D görüntü (T_028 kodlu numune)

T_028 kodlu numune üzerinde alınan ölçümlerden Şekil 34' te verilen örnek pikselin enerjisinin hesaplandığı denklem (Denklem 19) yardımıyla elde edilen parlaklık değeri (geçen ışık miktarı), GS yapıyı oluşturan her bir piksel için hesaplanıp Matlab Programı yardımıyla

görüntüye dönüştürülmesiyle elde edilen görüntü Şekil 41 (a)' da görülmektedir. Şekil 41 (b)'de ise bu görüntünün siyah beyaz hali verilmektedir. Şekil 41 (c)'de ise video kayıtlarında kullandığımız GS yapı olan T_028 kodlu numuneden ortamda çözücü buharı yokken alınan kamera görüntüsü verilmektedir. Bu görüntülerden de anlaşıldığı üzere çizdirilen geçen ışık görüntüsü ile kameradan alınan gerçek görüntü arasında büyük benzerlik bulunmaktadır.



Şekil 41. Çoklu noktadan alınan geçen ışık görüntüleri (a) 2D görüntü (siyah-beyaz) (b) 2D görüntü (renkli) (c) Gerçek kamera görüntüsü (T_028 kodlu numune)



(c)

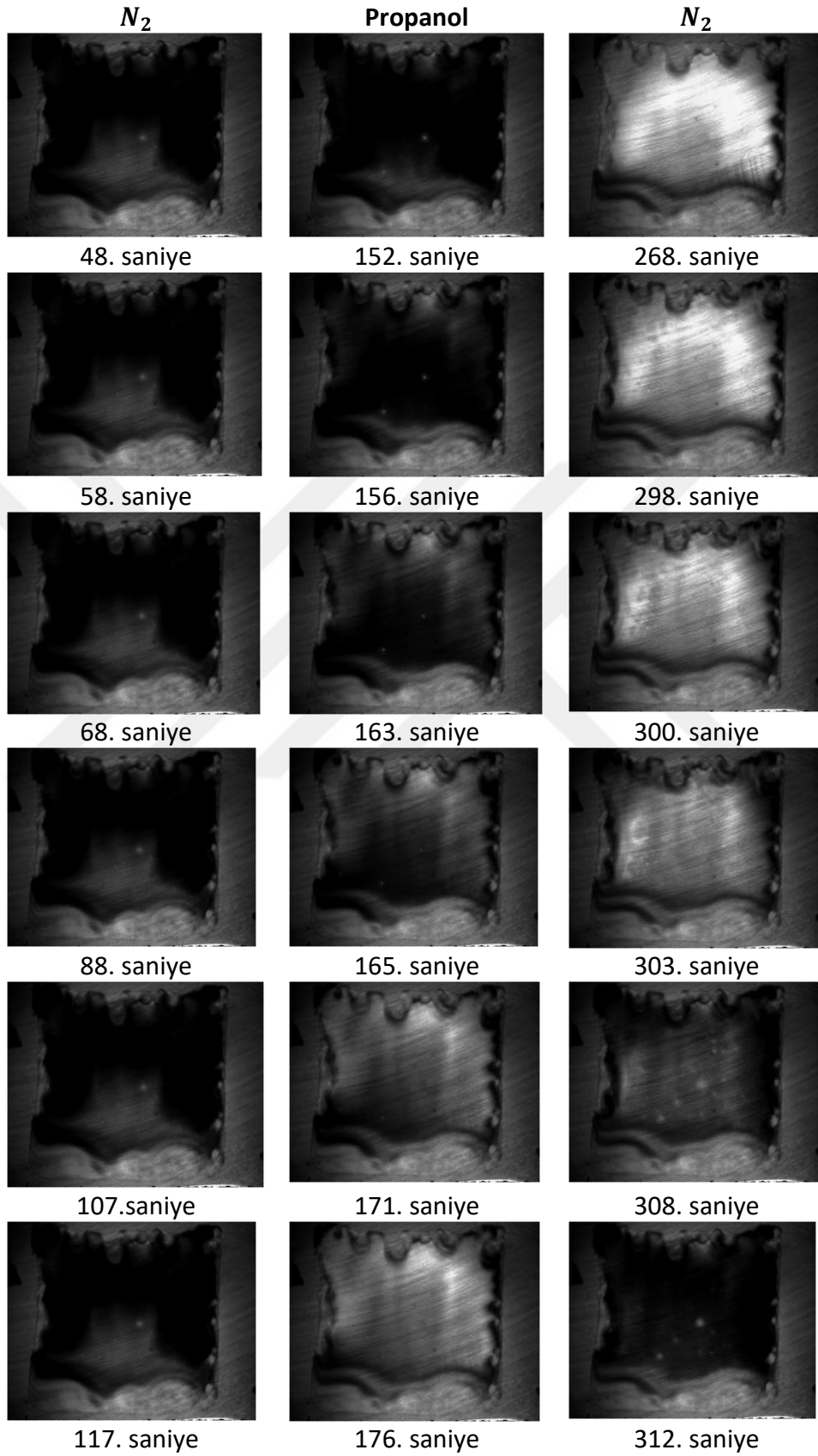
Şekil 41. Çoklu noktadan alınan geçen ışık görüntüleri (a) 2D görüntü (siyah-beyaz) (b) 2D görüntü (renkli) (c) Gerçek kamera görüntüsü (T_028 kodlu numune) (devamı)

Tümleşik Sensör Sisteminden Alınan Sonuçlar

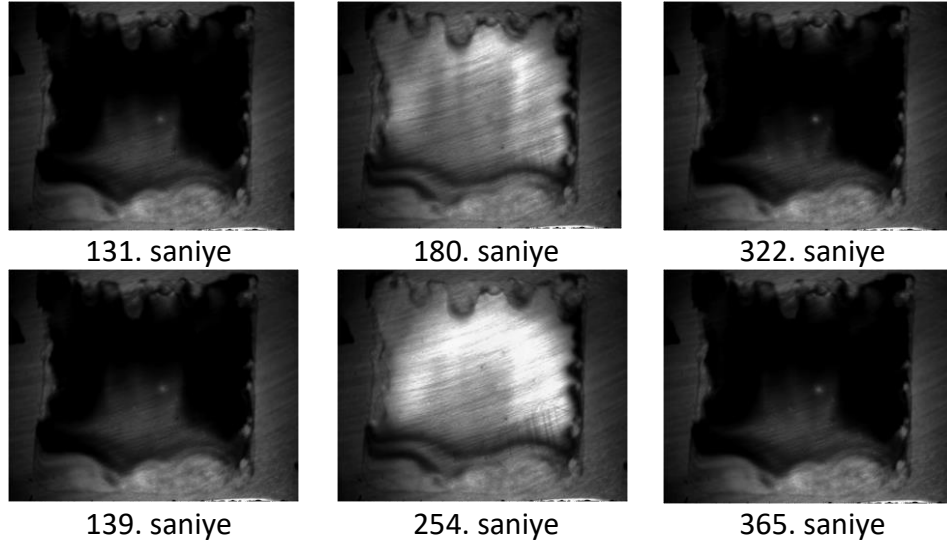
Sınıflandırma çalışmalarında kullanılan veri tabanı, altı farklı çözücü buharı (metanol, etanol, propanol, aseton, heptan ve hekzan) ve bunların altı farklı konsantrasyonu kullanılarak (85, 170, 255, 340, 425 ve 510 ppm) alınan video kayıtlarından oluşmaktadır. Veri tabanına ait sınıflandırma çalışmalarına başlamadan önce videoları oluşturan resimler incelenerek altı farklı çözücü buharının ve bunların farklı konsantrasyonlarının kullanımıyla oluşan görüntü farklılıklarının görülmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda propanolun 425 ppm konsantrasyonu için alınan kamera görüntüleri incelenmiştir. Şekil 42’ de propanol çözücü buharının 425 ppm konsantrasyonu için alınan kamera kaydının sırasıyla artan sn’ lerindeki (8 farklı zamanda) kamera görüntüleri verilmiştir. İlk sütunda ortamda sadece süpürme gazının (N_2) olduğu henüz çözücü buharının verilmediği durumda alınan kamera kaydı görüntüleri verilmektedir. İkinci sütun, ortama 425 ppm konsantrasyonunda propanol çözücü buharının (propanol+taşıyıcı gaz) verildiği süre boyunca artan sn’ lerde alınan kamera kayıtları verilmektedir. Üçüncü sütunda ise propanol çözücü buharının sisteme gönderimi durdurulup ortamda sadece süpürme gazı (N_2) varken farklı sn’ lerde alınan kamera kaydı görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerin karşılaştırılmasından da görüldüğü üzere ortamda sadece süpürme gazı (N_2) varken sensör yüzeyinde bir değişiklik olmamaktadır. 425 ppm konsantrasyonunda propanol çözücü buharı gönderilmeye başlandıktan sonra değişim başlıyor ve propanol çözücü buharının sisteme gönderimi duruluncaya kadar bu değişim artarak devam etmektedir. Propanol çözücü buharı gönderimi durdurulup sisteme sadece süpürme gazı (N_2) gönderilmeye devam ediliyor ve

ortamdaki çözücü buharı hızlı bir şekilde sistemden uzaklaşarak hızlı bir geriye dönüş sağlanmaktadır.

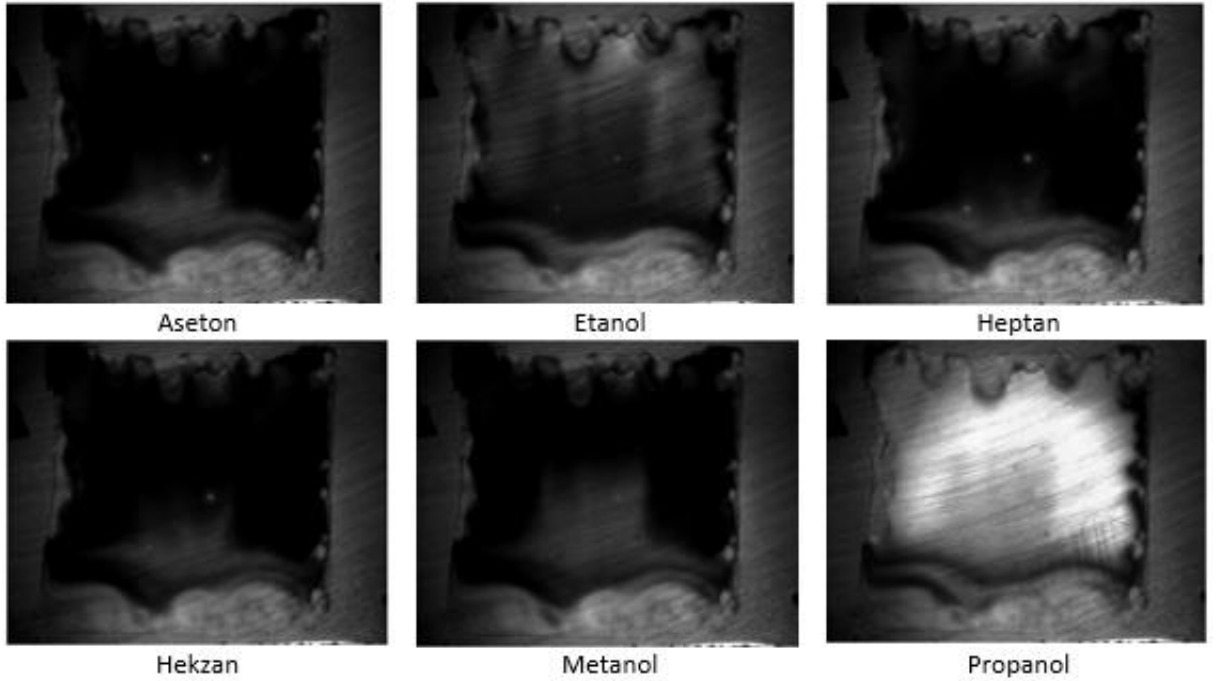


Şekil 42. 425 ppm konsantrasyonunda sisteme verilen propanolun farklı anlarda alınan kamera görüntüleri



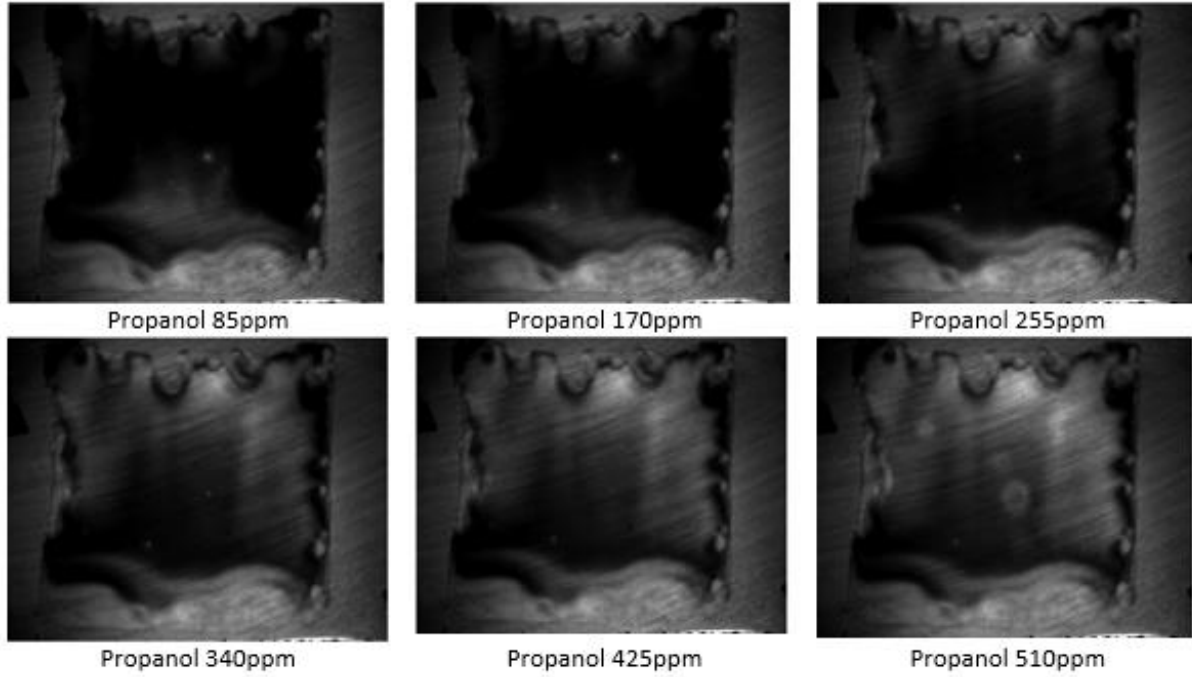
Şekil 42. 425 ppm konsantrasyonunda sisteme verilen propanolun farklı anlarda alınan kamera görüntüleri (devamı)

Şekil 28’de verilen ve veri tabanı oluşturulurken bahsedilen süreç takip edilerek altı farklı çözücü buharının 425 ppm konsantrasyon değeri için elde edilen video kayıtlarının 231. saniyesinde alınan kamera görüntüleri Şekil 43 ile verilmiştir. Bu görüntülerin genel olarak karşılaştırılmasından da görüleceği üzere, her biri farklı biçimde şekillenmiş olup bu durum sınıflandırma açısından önem arz etmekte ve bu bilgi ancak tüm görseller bir arada değerlendirildiğinde çözücü buharı türünün ve konsantrasyonunun sınıflandırılması açısından ayırt edici anlam ifade etmektedir.



Şekil 43. Her bir çözücü buharının dağılımını gösteren kamera görüntüleri (231.saniye)

Benzer biçimde Şekil 44 ile propanol çözücü buharının 85 ppm, 170 ppm, 255 ppm, 340 ppm, 425 ppm ve 510 ppm konsantrasyonları için elde edilen video kayıtlarının 155. saniyesindeki kamera görüntüleri verilmiştir. Bunlardan da anlaşılabacağı üzere; belirli bir çözücü buharının farklı konsantrasyonlarının aynı anlarına denk gelen görsellerinde de sınıflandırma açısından önem arz edecek farklılıklar yer almaktadır.



Şekil 44. Sisteme verilen propanolun farklı konsantrasyonları için alınan kamera görüntüleri (155. saniye)

Geçen Işığın Çözücü Buharı Uygulama-Temizleme Çevrimindeki Değişimi

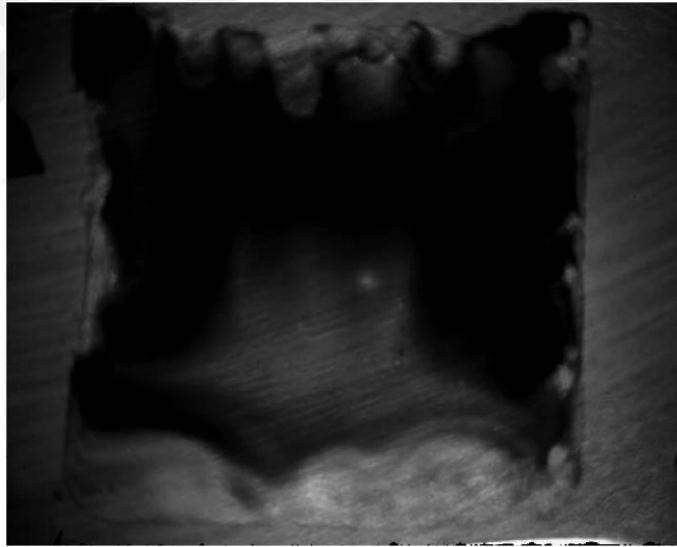
Gaz besleme bloğu aracılığı ile tümleşik sensör sistemine gönderilen çözücü buharları istenilen miktarlarda oluşturabilmekte ve taşıyıcı gaz akımında istenilen hızda taşınabilmektedirler. İstenilen miktarlarda ayarlanan çözücü buharları tümleşik sensör sistemine gönderilir. GS yapıyı oluşturan gözeneklere çözücü buharının dolması sonucu etkin kırılma indisinde kayma meydana gelir. Bu kayma miktarı ve hızı gözeneklerin kalınlıkları ve gözenekliliğin farklı olmasından aynı olmayacaktır. Farklı çözücü buharları ve çözücü buharının farklı konsantrasyonları için de farklılık gösterecektir. Çözücü buharı ile etkileştiğinde tabakaların etkin kırılma indisinin değişime uğramasıyla geçen ve yansıyan ışınların şiddetlerinde farklılık olması nedeniyle SWIR kamera ile bakıldığında farklı görüntüler alınmaktadır. Bu durum aynı bölgede farklı çözücü buharlarının farklı hızlarda gözeneklere tutunma ve gözeneklerden ayrılma davranışı göstermesine böylece elde edilen görüntüde farklı örüntüye sebep olmaktadır.

Bu farklılıkları görebilmek amacıyla kameradan alınan video kayıtlarını oluşturan her bir görüntü Matlab programı aracılığıyla analiz edilip incelenmiştir. Sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

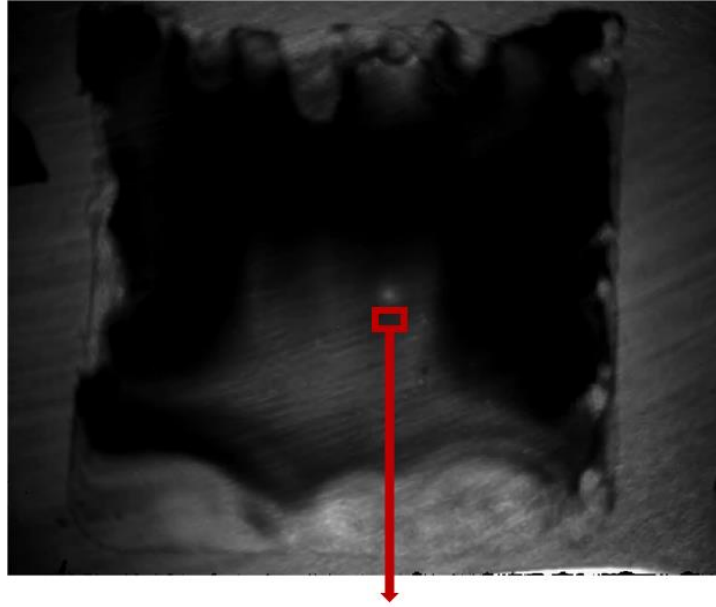
Şekil 45’ te video kayıtlarını oluşturan görüntülerden çözücü buharı verilmeden hemen önce alınan kamera görüntüsü verilmektedir.

Sisteme propanol çözücü buharı verildiğinde alınan video kaydı incelenerek Şekil 46’ da verilen kırmızı alan içindeki bölgede çözücü buharının dolup boşalmasıyla ilgili olarak görüntüdeki değişimin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Şekil 46’ da değişimin fazla olduğu bu bölgede (gri seviye gözlem bölgesi) sensör sistemine gönderilen propanol çözücü buharının altı farklı konsantrasyonu için geçen ışık miktarının değişimi gözlemlenmek istenmiştir.

Bu çerçevede Şekil 28’ de verildiği üzere kamera kaydının alındığı süre boyunca (380 sn) değişimin fazla olduğu düşünülen gri seviye gözlem bölgesindeki geçen ışık miktarındaki değişim, videoyu oluşturan her bir görüntü için hesaplanıp çizdirilmiştir. Zamana karşılık normalize genliği veren gri seviye değişim grafikleri Şekil 47’ de verilmektedir.



Şekil 45. Sisteme çözücü buharı verilmeden önce alınan kamera görüntüsü



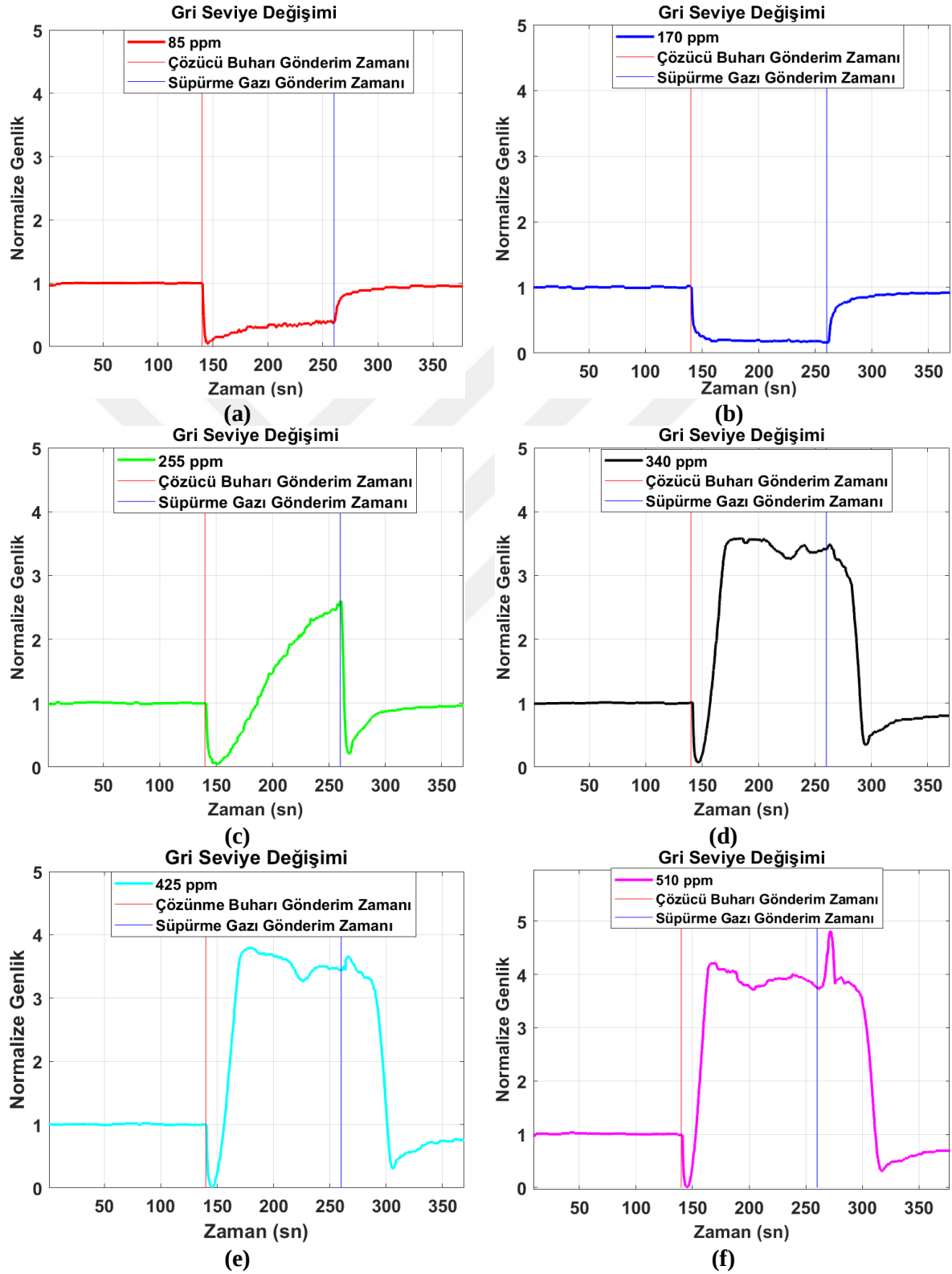
Gri seviye gözlem bölgesi

Şekil 46. Geçen ışık değişiminin gözlemlendiği alan

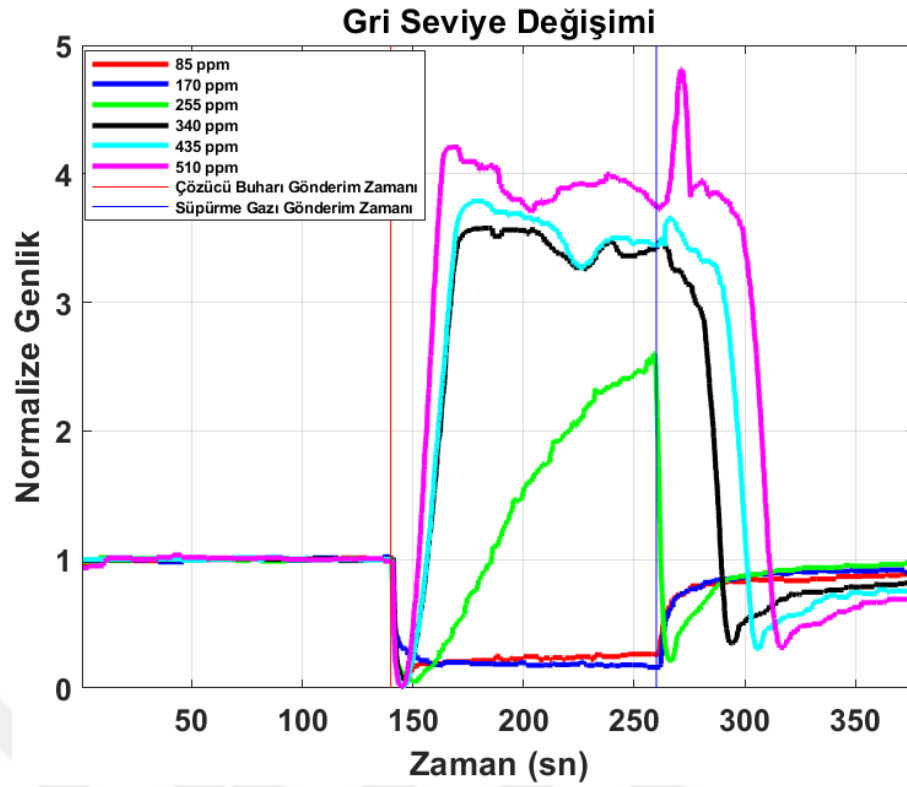
Şekil 47’i oluşturan grafikler elde edilirken propanol çözücü buharının farklı konsantrasyonlarının (85 ppm-170 ppm- 255 ppm- 340 ppm-425 ppm- 510 ppm) tümleşik sensör sistemine uygulandığı video kayıtları kullanılmaktadır. Her bir konsantrasyon için bir video analiz edilmiş olup bu videoyu oluşturan her bir resmin belirlenen bölge için zamana karşılık normalize genliği veren gri seviye değişimi grafiği elde edilmiştir. Bu grafik sensörden geçen ışık miktarı değişimini vermektedir.

Grafikler incelendiğinde propanol çözücü buharının her bir konsantrasyonundaki değişimin farklı olduğu görülmektedir. Bu da kimliklendirme ve konsantrasyon tespiti yapılabileceğini mümkün kılmaktadır. Gözenek içine çözücü buharın dolması sonucunda etkin kırılma indisi değişmektedir ve bundan dolayı yansıma spektrumunda kayma olmaktadır. Çözücü buharının artan konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak kırılma indisindeki değişimden dolayı yansıyan ışık miktarı dolayısıyla da geçen ışık miktarındaki değişim artmaktadır. Farklı konsantrasyonlar için bu grafikler üst üste çizdirilince bu fark daha net anlaşılmaktadır ve Şekil 48’ de verilmektedir. Sisteme çözücü buharının gönderildiği saniyeden önceki zaman diliminde gri seviye değişimi olmamaktadır. Bu zaman diliminde ortamda sadece süpürme gazı bulunmaktadır ve bu gaz GS yüzeyinde değişikliğe sebep olmamaktadır. Çözücü buharının sisteme gönderildiği andan itibaren GS yüzeyinde değişiklik zamanla artmaktadır. Bundan dolayı gri seviye değişimi de artmaktadır. Sisteme çözücü buharı gönderiminin durdurulup sadece süpürme gazının gönderilmesi ile sistemden çözücü buharı temizlenerek sistem başlangıç haline geri dönmektedir. Bu geriye dönüşün gerçekleştiği zaman diliminde de GS yüzeyindeki gri seviye değişimi çözücü buharı konsantrasyonuna göre farklılık

göstermektedir. Süpürme gazının gönderildiği saniye aynı olmasına rağmen konsantrasyon arttıkça çözücü buharının sistemden uzaklaşma süresinin de değiştiği (arttığı) görülmektedir. Yine propanolun düşük konsantrasyonu için gri seviye değişiminin daha az olduğu konsantrasyon arttıkça gri seviye değişiminin de arttığı Şekil 48’de görülmektedir.



Şekil 47. Farklı konsantrasyonlardaki propanol için gri seviye değişim grafikleri: 85 ppm (a), 170 ppm (b), 255 ppm (c), 340 ppm (d), 425 ppm (e), 510 ppm (f)

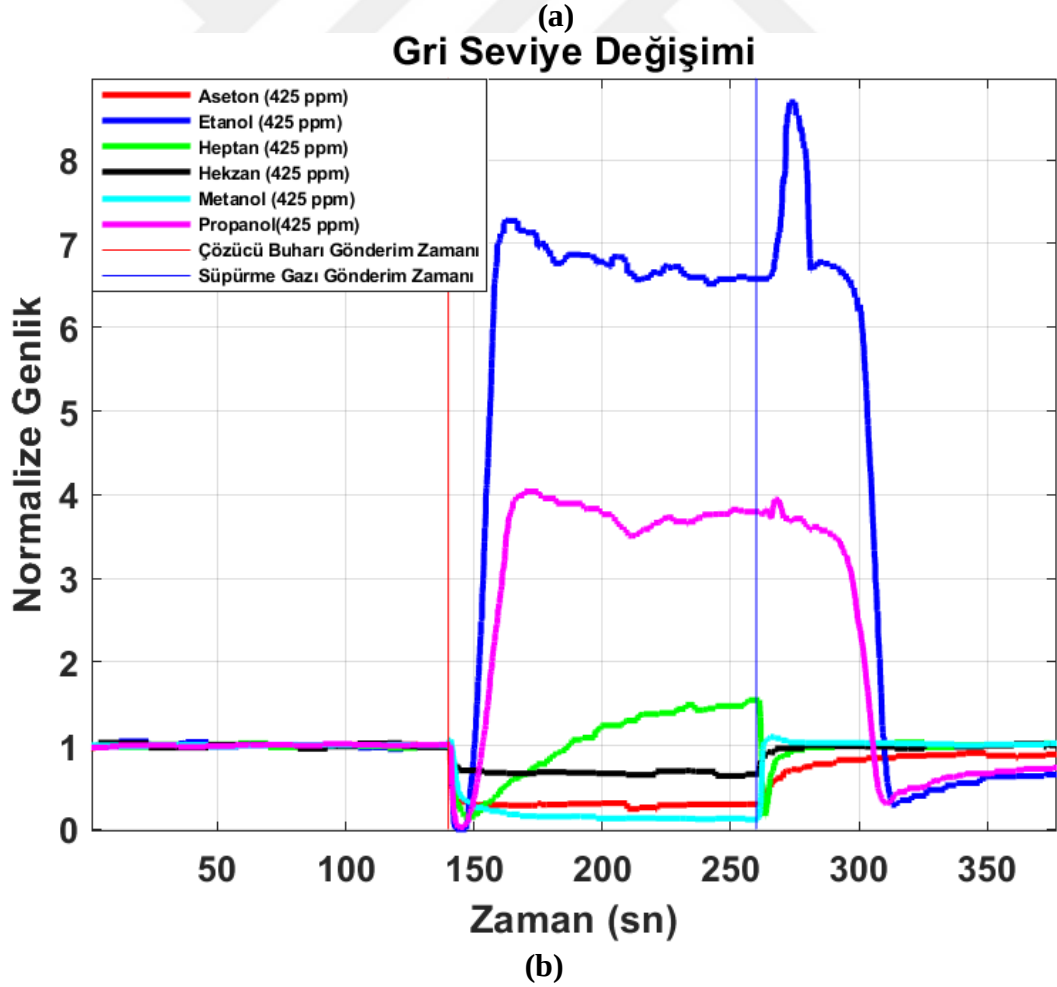
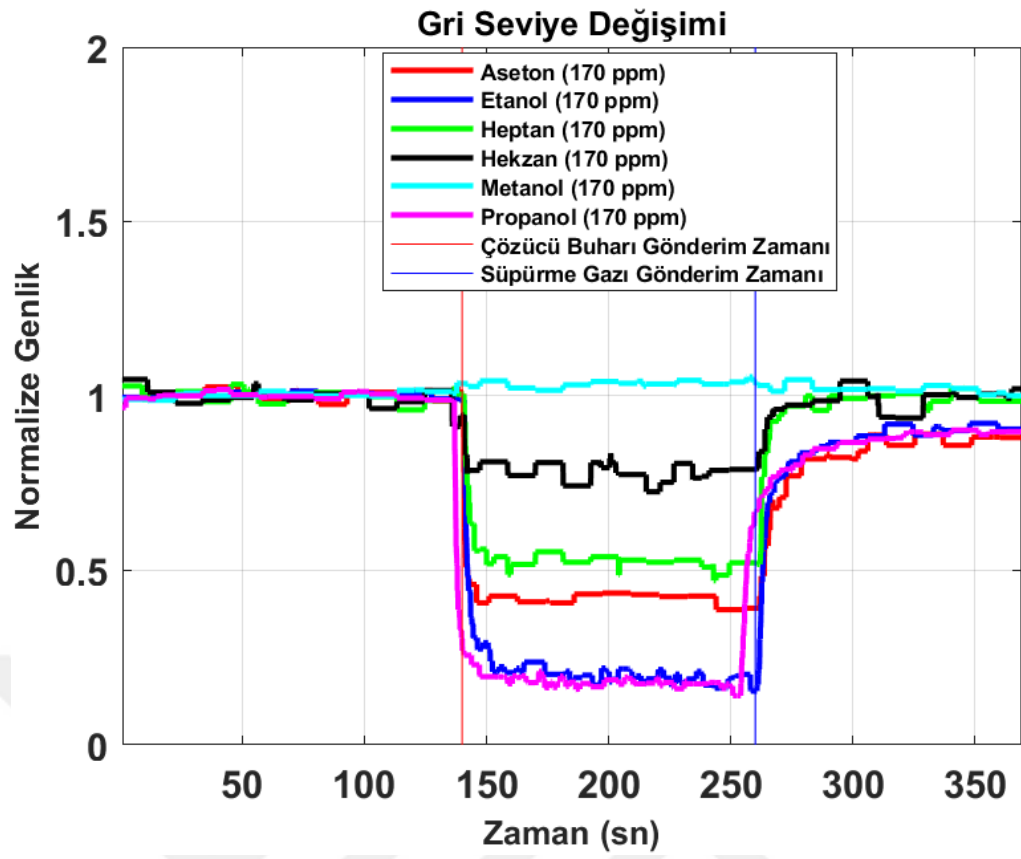


Şekil 1. Farklı konsantrasyonlardaki propanol için gri seviye değişim grafiği

Yine farklı çözücü buharlarının aynı konsantrasyonları için gri seviye değişimini görmek amacıyla yapılan bu çalışma tekrarlanmıştır. Bu çalışma, iki farklı konsantrasyon için (170 ppm- 425 ppm) için gerçekleştirilmiştir. Şekil 49 (a)' da farklı çözücü buharlarının 170 ppm konsantrasyonu (düşük konsantrasyon) için gri seviye değişim grafiği verilmektedir. Şekil 49 (b)' de ise farklı çözücü buharlarının 425 ppm konsantrasyonu (yüksek konsantrasyon) için gri seviye değişim grafiği verilmektedir. Bu grafiklerden farklı çözücü buharları için gri seviye değişiminin farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır.

Düşük konsantrasyonda (170 ppm) gri seviye değişiminin yüksek konsantrasyondakine (425 ppm) göre daha az olduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Bu da düşük konsantrasyondan dolayı kırılma indisi değişiminden dolayı dalga boyundaki kaymanın ve geçen ışık miktarının daha az olmasından ve düşük konsantrasyonda çözücü buharının GS yüzeyine tutunması, yüzeyden ayrılması farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu görüntülerin genel olarak karşılaştırılmasından da görüleceği üzere; her biri farklı biçimde şekillenmiş olup bu durum sınıflandırma açısından önem arz etmekte ve çözücü buharı kimliklendirme ve konsantrasyon tayini açısından ayırt edici anlam ifade etmektedir.



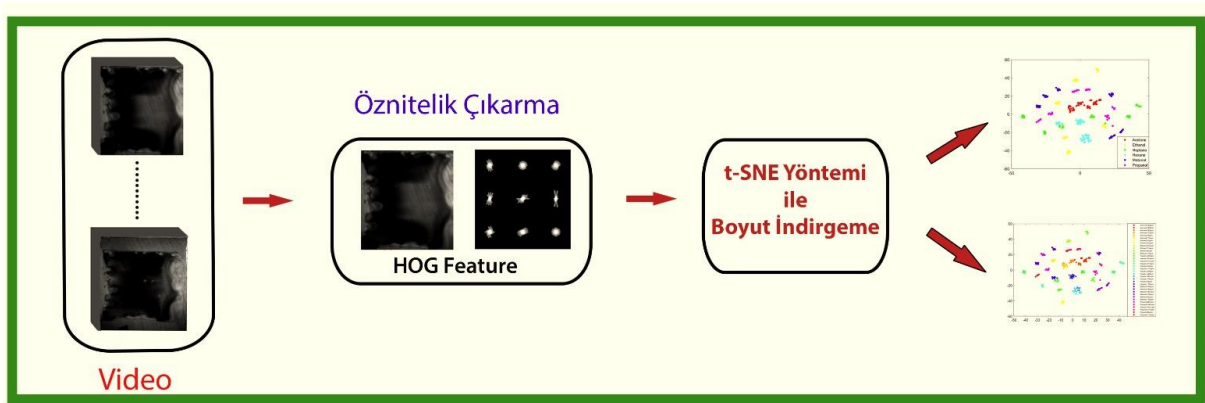
Şekil 49. Farklı çözücü buharlarının 170 ppm konsantrasyonu için gri seviye değişim grafiği (a). Farklı çözücü buharlarının 425 ppm konsantrasyonu için gri seviye değişim grafiği (b)

t - SNE (t-Distributed Stochastic Neighbour Embedding) Yöntemi ile Boyut İndirgeme ve Verinin İki Boyutlu Temsili

t-SNE (t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding), yüksek boyutlu veri kümelerinin görüntülenmesi (Linderman and Steinerberger, 2019) için yararlı olan doğrusal olmayan bir boyut küçültme tekniğidir. t-SNE, hem yüksek boyutlu orijinal veri uzayında hem de daha düşük boyutlu yansıtılan uzayda ikili benzerlik dağılımlarını eşleştirerek verilerin yerel yapısını korumaya çalışır (Chan *et al.*, 2018). Bu teknikle birlikte gerekli olan zaman ve ihtiyaç duyulan depolama alanı azaltılır. Yine bu teknikle veri, iki boyutlu veya üç boyutlu gibi çok düşük boyutlara küçültüldüğünden verileri görselleştirmek daha kolay hale gelir.

t-SNE’ de her bir veri noktası rastgele düşük boyutlu bir temsil ile başlar ve orijinal uzayda yakın olan noktaları birbirine yakın, uzak olanları ise birbirinden uzak tutmaya çalışır. t-SNE birbirine uzak noktaların arasındaki uzaklığı korumaktansa birbirine yakın noktalara daha çok önem verir.

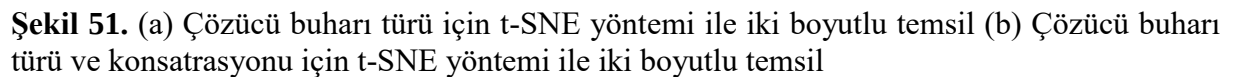
Bu çalışmada kullanılan veri tabanı 360 adet videodan oluşmaktadır ve her bir videoda da yaklaşık 8200 adet resim bulunmaktadır. Her bir resim de 512x640 ebatlarında olup veri tabanı çok yüksek boyutlu bir veriyi temsil etmektedir (bir video için 512x640x8200 boyutundadır). t- SNE ile yüksek boyuttaki bu verinin düşük boyutlu bir temsili oluşturulup verileri görselleştirmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Şekil 50’ de verilen t-SNE blok diyagramında, girişe uygulanan videoları oluşturan her bir resimden ilk adımda HOG (Histogram of Oriented Gradients) tabanlı öznitelikler çıkarılır ve videoyu temsil edecek şekilde düzenlenir. Bu şekilde boyutun daha küçük hale getirilmesi hedeflenir. İkinci adım ile t- SNE yöntemi ile boyut indirgeme işlemi gerçekleştirilir ve iki boyutlu temsili resim oluşturulur.

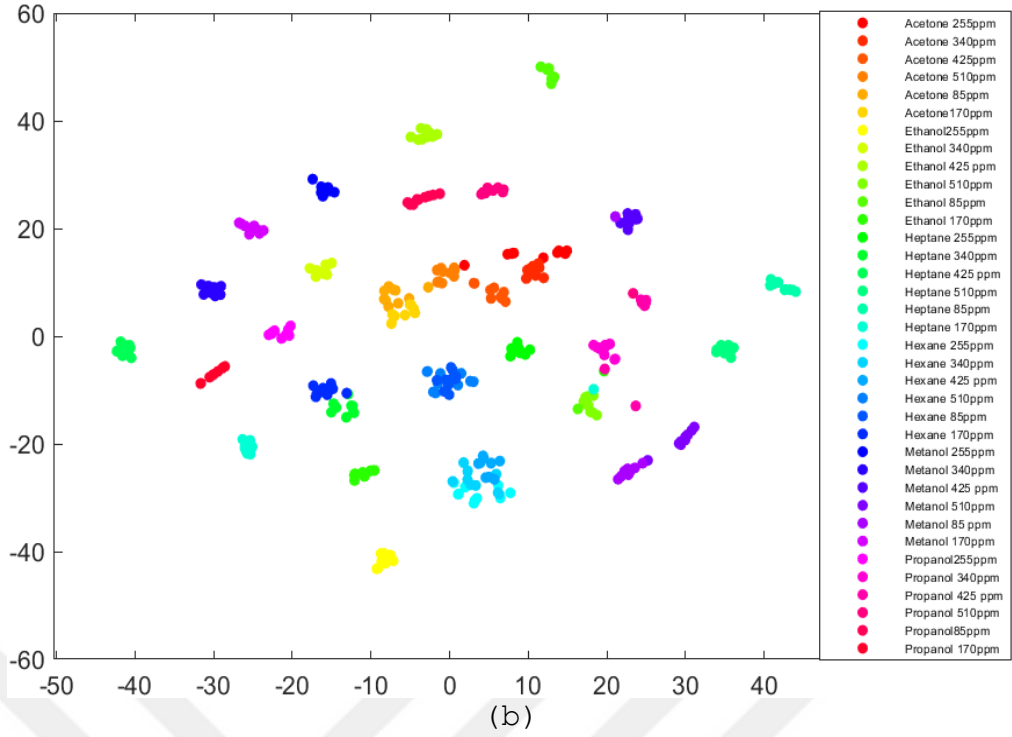


Şekil 50. t- SNE blok diyagramı

Veri tabanını oluşturan videoların her biri 380sn’dir. Çalışmanın bu aşamasında video kaydının karışımının 120sn boyunca ölçüm hücresi/düzenine gönderildiği zaman dilimi

bu buları kimliklendirme ve konsantrasyon tayini yapı

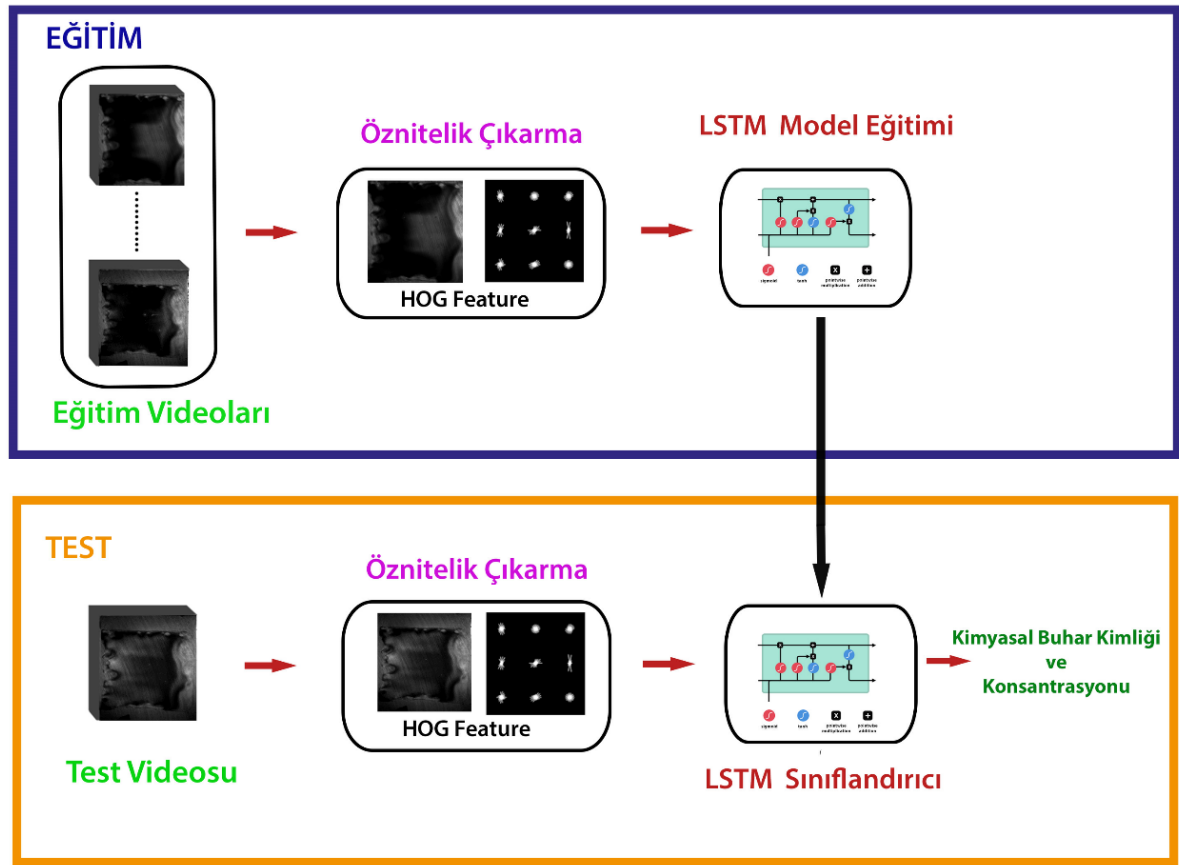




Şekil 51. (a) Çözücü buharı türü için t-SNE yöntemi ile iki boyutlu temsil (b) Çözücü buharı türü ve konsantrasyonu için t-SNE yöntemi ile iki boyutlu temsil (devamı)

Çözücü Buharı Türünün ve Konsantrasyonunun Sınıflandırılması

Çalışmada önerilen “çözücü türü ve konsantrasyonu sınıflandırma yöntemine” ait blok diyagram Şekil 52 ile gösterilmiştir. Derin öğrenme tabanlı bu sınıflandırıcı temel olarak “öznitelik çıkarma” ve “sınıflandırıcı” olarak adlandırılan iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu sistemin giriş verisi olarak detayları daha önce açıklandığı üzere; yine bu çalışma ile tasarlanan sensör sistemi ve ölçüm düzeneği kullanılarak elde edilen altı farklı çözücü buharı ve her birinin altı farklı konsantrasyon değeri için kaydedilen SWIR kamera video verisi kullanılır. Bu video verileri, blok diyagramda sınıflandırıcı sistem girişinde yer alan ve “Eğitim Videoları” ve “Test Videoları” olarak gösterilen videoları oluşturmaktadır. Bu şekilde girişe uygulanan videoları oluşturan her bir resimden ilk adımda HOG (Histogram of Oriented Gradients) tabanlı öznitelikler çıkarılır. İkinci adım ile derin öğrenme alanında kullanılan ve yinelemeli sinir ağı (RNN) tabanlı bir mimari olan LSTM (Long Short-Term Memory) sınıflandırıcı kullanılarak elde edilen bu öznitelikler yardımıyla girişe uygulanan videoların hangi çözücü buharına ait olduğunun sınıflandırılması gerçekleştirilir. Ayrıca bu videonun hangi çözücü buharı ve bunun hangi konsantrasyonuna ait olduğunun sınıflandırılması da gerçekleştirilebilmektedir.



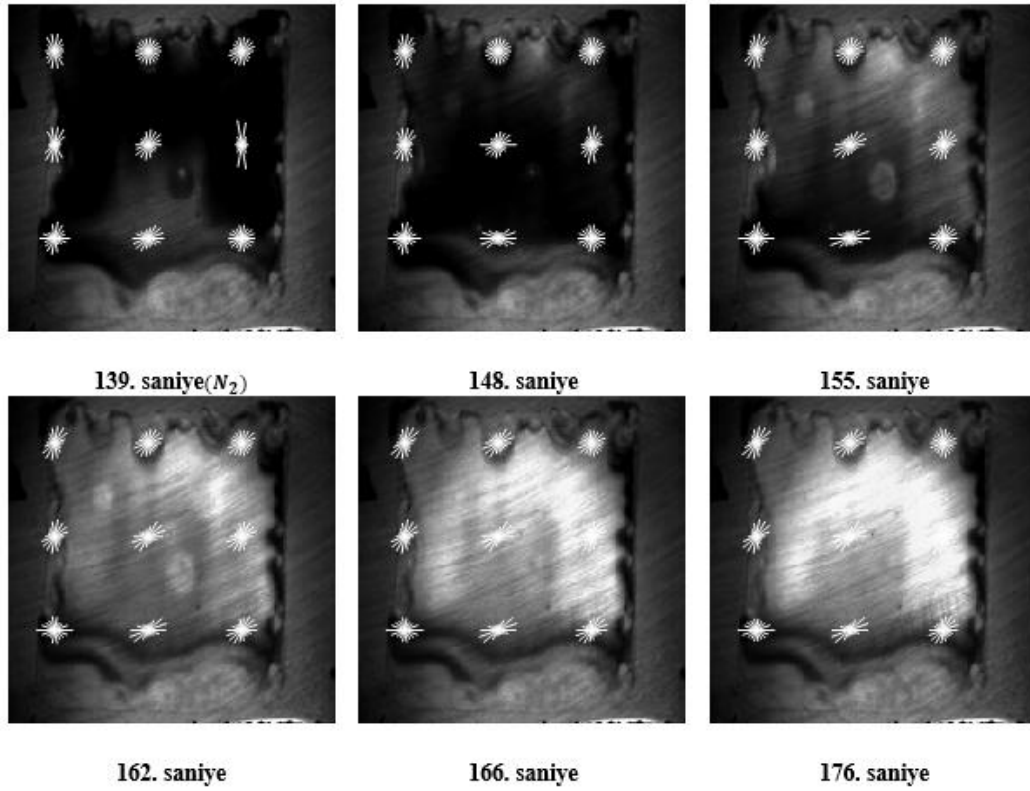
Şekil 52. Sistemin blok diyagramı

HOG öznitelik çıkarma

Şekil 52’de sınıflandırıcı girişindeki video kaydında yer alan her bir görüntü önce büyüklüğü önceden belirlenen karesel bölgelere ayrılıp her bir bölgede yönlendirilmiş grandyanların histogramı hesaplanır. Bu amaçla kullanılan 380s süreli her bir video kaydının her birinde yaklaşık 8200 adet resim yer almakta olup her biri için elde edilen HOG öznitelikleri bir araya getirilerek ilgili video kaydını tanımlayan öznitelik verisi oluşturulmuştur.

İlk olarak her bir video kaydı çerçevesi 512x640 ebatlarında olup HOG öznitelik çıkarma işlemi için her bir video kaydı çerçevesi 224x224 ebatlarında olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu çerçevelerin her biri de 64x64 ölçülerinde karesel bölgelere ayrılıp her bir çerçeve için gradyan büyüklüğü ve gradyan yönü değerleri hesaplanmıştır. Gradyan büyüklüğü ve gradyan yönü değerleri kullanılarak oryantasyon histogramı elde edilmiştir. Her bir çerçevenin oryantasyon histogramı da 1x144 boyutundadır.

Şekil 53’te propanol çözücü buharının 510 ppm konsantrasyonu için alınan kamera kaydının sırasıyla artan sn’ lerindeki (altı farklı zamanda) kamera görüntüleri ve bu görüntülerin gradyan histogramı temsilleri verilmiştir. Bu video görüntülerinin her biri birbirinden farklıdır ve bundan dolayı da görüntülerin değişimiyle gradyan yön ve büyüklüğü de farklılık göstermektedir.



Şekil 53. Propanolun farklı anlardaki alınan kamera görüntülerinin gradyan histogramı

Eğitim ve test süreçleri (Sınıflandırıcı sonuçları)

Genel olarak makine öğrenmesi uygulamalarında, kullanılan sınıflandırıcı önce mevcut veri ve bunun ait olduğu sınıf bilgisi kullanılarak farklı sınıfları tanıması için eğitilir. Bu eğitim aşlında sınıflandırıcının kullandığı bazı parametrelerin belirlenmesi adıımıdır. Öte yandan yeni veri söz konusu olduğunda; aynı sınıflandırıcı, uygulanan eğitimden elde edilen parametrelerin ışığında verinin sınıfını tayin etmek için kullanılır. Bu yaklaşım ile elde edilen veri, sınıflandırma çalışmasını gerçekleştirmek amacıyla da benzer şekilde kullanılmıştır. Bu anlamda; geliştirilen sensör sistemi ve ölçüm hücresi kullanılarak elde edilen SWIR kamera video veri seti önce eğitim ve test olarak adlandırılan sırasıyla %80 ve %20 oranlarında iki parçaya bölütlenmiştir. Sonrasında bunlardan eğitim bölütleri kullanılarak daha önce tanıtılan LSTM tabanlı sınıflandırıcı eğitilmiş ve oluşturulan test bölütü kullanılarak da sınıflandırıcının performansı belirlenmiştir.

Yürütülen sınıflandırma çalışmalarında; epoch sayısı, öğrenme oranı gibi bazı sınıflandırıcı hiper-parametreleri optimize edilerek en uygun değerler tespit edilmiştir.

Bu anlamda bu çalışmada gerçekleştirilen sınıflandırma çalışmaları iki aşamalı olarak yürütülmüştür. Bunlardan ilki “Çözücü Buharı Türü Sınıflandırma” ikincisi ise “Çözücü Buharı Konsantrasyonu Sınıflandırma” üçüncü ise “Çözücü Buharı Türü ve Çözücü Buharı Konsantrasyonu Sınıflandırma” olarak yürütülmüş ve aşağıda açıklanmışlardır.

Çözücü buharı türü sınıflandırma

Bu adımda yürütülen sınıflandırma çalışması; metanol, etanol, propanol, aseton, heptan ve hekzan çözücülerinin tespiti için toplam altı sınıflı bir çalışma olarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla altı farklı gazın altı farklı konsantrasyonunun 10 tekrarı için elde edilen 360 kayıttan oluşan tüm veri seti kullanılmıştır. Ayrıca tüm bu sınıflandırma çalışmaları, SWIR kamera video kayıtlarının üç farklı zaman dilimi için ayrı ayrı yürütülmüş ve her biri için elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Kullanılan zaman dilimleri:

- Karışımının (çözücü buharı+taşıyıcı gaz) 120sn boyunca ölçüm düzeneğine gönderildiği zaman dilimi (Şekil 28’ de ikinci gri bölge). Bu dilimde tümleşik sensör sistemi, tespiti yapılacak karışıma maruz kalmaktadır.
- Karışımının sisteme gönderilmesine son verilerek 120sn boyunca ölçüm düzeneğine sadece süpürme gazı (N_2) gönderildiği zaman dilimi (Şekil 28’de üçüncü gri bölge). Bu dilimde tespiti yapılacak karışım tümleşik sensör sisteminden uzaklaştırılmaktadır.
- Bu iki zaman diliminin toplamı olan 240sn süre boyunca (Şekil 28’de ikinci ve üçüncü gri bölgeler).

Bu adımda elde edilen sonuçlar ışığında; sensör sisteminin çözücü buharı ile “maruz olup-temizlenme” çevriminde, sınıflandırma açısından performansı en yüksek olan zaman bölgesi tespit edilmiş ve sınıflandırma çalışmalarının ikinci adımı sadece bu zaman dilimi kullanılarak yürütülmüştür.

Veri tabanı- zaman bölgesi değerlendirme sonuçları

Bu adımda SWIR kamera ile elde edilen video görüntülerinde, çözücü türü sınıflandırma problemi açısından en uygun olan zaman bölgesinin belirlenmesi ile ilgili değerlendirme sonuçları sunulmuştur. Yukarıda da ifade edildiği üzere; bu çalışma için karışımın gönderildiği, süpürme gazının uygulandığı ve bunların her ikisinin peş peşe yer aldığı üç farklı zaman bölgesi aday olarak belirlenmiş ve her biri için sınıflandırma sonuçları ayrı ayrı elde edilmiştir. Buna ait elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 6 ile verilmiştir.

Tablo 6. Çözücü Buharı Sınıflandırma Sonuçları

Zaman Bölgesi	Doğruluk Oranı (%)
Karışım Uygulama (süre 120s)	95
Süpürme Gazı Uygulama (süre 120s)	90.3
Karışım Uyg. + Süpürme Gazı Uyg. (süre 240s)	95

Çözücü buharı konsantrasyonu sınıflandırma

Oluşturulan video kayıtlarında karışımının ölçüm hücresine 120sn boyunca uygulandığı zaman bölgesi kullanılarak belirlenen çözücü buharının konsantrasyon sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözücü buharı olarak heptan kullanılmıştır. Heptanın 12 farklı konsantrasyonu (74 ppm-85 ppm-143 ppm-170 ppm-221 ppm-255 ppm-294 ppm-340 ppm-368 ppm-425 ppm-441 ppm-510 ppm) için sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Sadece bu sınıflandırma çalışmasında kullanmak üzere var olanlar dışında heptanın altı farklı konsantrasyonu (74 ppm-143 ppm-221 ppm-294 ppm-368 ppm- 441 ppm) için de 10 kez ölçüm yapılmış ve video kaydı alınmıştır). Heptan çözücü buharı için her konsantrasyona ait 10 adet video olmak üzere toplam 12 farklı konsantrasyon için 120 adet video bulunmaktadır. Bu 120 adet video kullanılarak sisteme verilen video kaydının heptanın hangi konsantrasyonuna ait olduğunun sınıflandırılması gerçekleştirilmiş ve sınıflandırma performansı %96.7 olarak bulunmuştur. % 96.7 doğruluk oranının, heptanın konsantrasyonlarına göre dağılımını veren hata matrisi oluşturulmuş ve Şekil 55 ile verilmiştir.

Hata Matrisi													
Çıkış Sınıfı	Heptan 221ppm	10 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 255ppm	0 0.0%	10 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 294ppm	0 0.0%	0 0.0%	10 8.3%	1 0.8%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90.9% 9.1%
	Heptan 340ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	9 7.5%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 368ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 441ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	9 7.5%	0 0.0%	2 1.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	81.8% 18.2%
	Heptan 425ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.8%	10 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90.9% 9.1%
	Heptan 510ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 6.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 74ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 85ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 143ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 8.3%	0 0.0%	100% 0.0%
	Heptan 170ppm	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 8.3%	100% 0.0%
Hedef Sınıfı													
	Heptan 221ppm	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	90.0% 10.0%	100% 0.0%	90.0% 10.0%	100% 0.0%	80.0% 20.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	96.7% 3.3%

Şekil 55. Heptan çözücü buharı konsantrasyonu sınıflandırma sisteminin hata matrisi

Çözücü buharı türü ve çözücü buharı konsantrasyonu sınıflandırma

Bu sınıflandırma çalışmasında da mevcut 360 video kaydından oluşan veri tabanının tamamı kullanılmıştır. Ancak bu sefer problem, altı ayrı çözücünün her birinin altı ayrı konsantrasyon değerini belirlemek maksadıyla toplam 36 sınıflı bir çalışma olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla veri tabanında yer alan tüm kayıtlar, her bir çözücünün farklı konsantrasyonlarını temsil edecek şekilde 36 sınıf için etiketlenerek kullanılmışlardır.

Bir önceki aşamada yürütülen sınıflandırma çalışmaları ışığında; konsantrasyon sınıflandırma sadece ilgili karışımının 120sn boyunca ölçüm düzeneğine gönderildiği zaman dilimi (Şekil 28(c)' de ikinci gri bölge) için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar da buna uygun olarak sunulmuştur.

SWIR kamera video kayıtlarının ilgili karışımın ortama uygulandığı zaman bölgesi kullanılarak elde edilen çözücü buharı türü ve konsantrasyonu sınıflandırma çalışmalarına ait hata matrisi Şekil 56 ile verilmiştir. Belirlenen konsantrasyondaki çözücü buharı karışımının 120sn boyunca sisteme gönderildiği kısım videoda alınıp işlenerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirildiğinde %88.6 ile en yüksek sistem performansı elde edilmiştir.

Hedef Sınıfı

[illegible]

Şekil 56. Çözücü buharı ve konsantrasyon sınıflandırma sisteminin hata matrisi

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında üretimi gerçekleştirilen GS yapının fabrikasyon parametreleri, düşük ve yüksek gözenekli tabakaların periyodik olarak tekrarlanması sağlanacak şekilde belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak kısa dalga kızılaltı bölgede (SWIR bölge (900nm-1700nm)) çalışan gözenekli silisyum yapı üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yapı SWIR bölgedeki bazı dalga boyu ışınlarını geçirirken diğerlerini yansıtacak şekilde çalışmakta olup etkin kırılma indisi periyodik olarak değişen tabakalar ile sağlanmaktadır. Ayrıca çözücü buharı (kimyasal) ile etkileşime girdiği zaman davranışı değişen optik bir aygıttır.

Bu GS yapı, SWIR bölgede (900nm-1700nm) çalışan bir kamera ile 1450 nm dalga boyu tepe noktası olan bir LED (GS yüzeyini aydınlatmak için) arasında olacak şekilde entegre edilip SWIR kamera ile tümleştirilmesi sağlanmaktadır. Böylece farklı özellikteki altı farklı çözücü buharı (metanol, etanol, propanol, aseton, hekzan, heptan) uygulandığında GS yüzeyindeki değişimler SWIR kamera yardımıyla video formatında kaydedilebilmiştir. Ayrıca altı farklı çözücü buharının altı farklı konsantrasyonu uygulanarak da kamera kayıtları alınmıştır. Her konsantrasyon 10 kez uygulanıp kameradan her bir gazın her konsantrasyonu için 10 farklı kayıt alınmıştır. Alınan bu kayıtlar kullanılarak bu yapının sensör olabilme kabiliyeti derin öğrenme algoritmaları ile incelenmiştir.

Ölçüm düzeneği; sıcaklığı kontrol edilebilen sensör test hücresinin SWIR kamera ve LED arasında optik bileşenlerle ile entegre edildiği tümleşik bir yapı ve oda sıcaklığında sıvı olan çözücülerini kontrollü buharlaştırıp taşıyıcı olan N_2 gazı ile tümleşik sensör sistemine ulaştıran bir sistemden oluşmaktadır. Tümleşik sensör sistemine öncelikle sadece taşıyıcı gazı N_2 gönderilerek ölçüme hazır hale getirilmiştir. Sonra incelenecek çözücü yukarıda detaylı bir şekilde anlatılan gaz besleme bloğu sayesinde kontrollü buharlaştırılıp taşıyıcı gaz ile seyreltilerek sensör sistemine istenilen konsantrasyonda gönderilmiştir. Daha sonra karışımın sisteme gönderilmesine son verilip sisteme sadece süpürme gazı olan N_2 gazı verilmiştir. Bu aşamalar gerçekleştirilirken her konsantrasyon için kamera video kaydı 10 kez tekrarlanmıştır. Her bir çözücü buharı için 60 adet olmak üzere toplamda 360 adet video kaydı alınıp veri tabanı oluşturulmuştur. Her bir videonun süresi 380 saniyedir.

Veri tabanını oluşturan video kayıtları incelendiğinde farklı çözücü buharları ve farklı konsantrasyonları için farklılık göstermektedir. Yani sensörün yüzeyi her çözücü buharına aynı tepkiyi vermemektedir. Bunun nedeninin üretim parametrelerinden dolayı GS yapının

özelliklerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Birbirine yakın özelliklere sahip çözücü buharlarının bile GS yapıya yoğunlaşma ve tekrar buharlaşma davranışları farklıdır. Bu durum aynı bölgede farklı kimyasalların farklı hızlarda gözeneklerde tutunma ve ayrılma davranışı göstermesine böylece elde edilen görüntüde farklı örüntüye sebep olması ayırt edici bilgi olarak kimliklendirme ve konsantrasyon tespiti yapmayı mümkün kılmaktadır.

SWIR kamera ile alınan video kayıtları kullanılarak gri seviye değişim grafikleri elde edilmiştir. Aynı çözücü buharının farklı konsantrasyonları için ve farklı çözücü buharlarının aynı konsantrasyon değerleri için de gri seviye değişim grafikleri elde edilmiştir. Her bir çözücü buharının ve farklı konsantrasyonlarının sensör sistemine uygulanması sonucu kamera ile alınan geçen ışık miktarı farklılık gösterdiğinden gri seviye değişimi de farklılık göstermektedir.

Yine alınan video kayıtları kullanılarak t-SNE yöntemi ile yüksek boyutlu olan veri tabanının boyut indirgeme işlemi gerçekleştirilmiştir ve iki boyutlu temsilleri oluşturulmuştur. Hem altı farklı gazın hem de altı farklı gazın altı farklı konsantrasyonu için gerçekleştirilen iki boyutlu görüntülerde sınıflandırma yapılabileği sonucuna varılmıştır.

Çözücü buharı türü ile çözücü buharı türü ve konsantrasyonu sınıflandırma yönteminde derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcı temel olarak “öznitelik çıkarma” ve “sınıflandırıcı” olarak adlandırılan iki ana bileşenden oluşmaktadır. Veri tabanını oluşturan her bir videoyu oluşturan görüntüler kullanılarak ilk olarak HOG tabanlı öznitelikler çıkarılmıştır. İkinci olarak LSTM sınıflandırıcı kullanılarak elde edilen bu öznitelikler yardımıyla girişe uygulanan resimlerin hangi çözücü buharına ait olduğunun sınıflandırılması yapılabilmektedir. Ayrıca hangi çözücü buharına ve bunun hangi konsantrasyonuna ait olduğunun sınıflandırılması da gerçekleştirilebilmiştir.

Elde edilen bu sonuçlara göre; tümleşik sensör sistemi ve ölçüm düzeneği kullanıldığında, ortamda yer alan çözücü buharını sınıflandırmada en uygun zaman dilimi, ilgili karışımın ortama uygulandığı bölge olup sınıflandırma bu zaman aralığında gerçekleştirildiğinde sınıflandırmada doğruluk oranı artmaktadır. Bu sonuçlar ışığında diğer performans belirleme işlemleri de bu zaman bölgesi kullanılarak yürütülmüştür. Belirlenen konsantrasyondaki çözücü buharı karışımının 120s boyunca sisteme gönderildiği zaman dilimindeki kamera kayıtları alınıp işlenerek çözücü buharı türü ve konsantrasyonu sınıflandırma işlemi gerçekleştirildiğinde en yüksek performans elde edilmiştir.

Öneriler

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çözücü buharı kimliklendirme ve konsantrasyon tespiti; hastalık tespiti, gıda analizi, yangın sistemleri, güvenlik ve çevre koruması gibi birçok alan içinde geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğundan önem arz etmektedir. Bundan dolayı sistem performansının iyileştirilebilmesi faydalı olacaktır. Bunun için hem GS optik özelliklerinin değişimine sebep olabilecek farklı özellikteki GS yapıların üretimi gerçekleştirilip çalışmalar yenilenebilir hem de farklı çözücü buharları kullanılarak sistemin performansı incelenebilir. Bu şekilde oluşturulan farklı veri tabanı kullanılarak aynı öznelilik ve sınıflandırıcı ile sistem test edilebilir ya da farklı öznelilikler ve farklı sınıflandırıcılar da denenerek sistemin performansının artırılabilceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Albert, K.J., Lewis, N.S., Schauer, C.L., Sotzing, G.A., Sitzel, S.E., Vaid, T.P., Walt, D.R., 2000. Cross-Reactive Chemical Sensor Arrays. *Chemical Reviews*, 100, 2595–2626.
- Arrand, H.F., Benson, T.M., Loni, A., Arens-Fischer, R., Krueger, M.G., Thoenissen, M., Lueth, H., Kershaw, S., Vorozov, N.N., 1999. Solvent Detection Using Porous Silicon Optical Waveguides. *Journal of Luminescence*, 80, 119–123.
- Aydın Yüksel, S., 2010. ‘Gözenekli Silisyum Esaslı Sensörlerin Hazırlanması ve İncelenmesi’ Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Beale M. I. J., Benjamin J. D., Uren M. J., Chew M. I. J., Cullis A. D., 1985. An Experimental and Theoretical Study of the Formation and Microstructure of Porous Silicon. *Journal of Crystal Growth*, 73, 622-632.
- Bisi, O., Ossicini, S., Pavesi, L., 2000. Porous Silicon: A Quantum Sponge Structure for Silicon Based Optoelectronics. *Surface Science Reports*, 38:1-126.
- Bui, H., Pham, V. H., Hoang, T. H. C., Pham, T. B., Do, T. C., 2019. Determination of Low Solvent Concentration by Nano-Porous Silicon Photonic Sensors Using Volatile Organic Compound Method. *Environmental Technology*, 40 (26), 3403-3411.
- Burham N., Hamzah A. A., Majlis B. Y. 2015. Effects of Alcohol Diluents on Nanopore Structure of Electrochemically Etched Silicon Membrane. *Microelectronic Engineering*. 141, 160-167.
- Canham, L., 2000. Gaining Light from Silicon. *Nature*, 408, 411-412.
- Canham, L.T., (1990). Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers. *Appl. Phys. Lett.*, 57 (10), 1046-1048.
- Carreira, J. and Zisserman A., 2017. ‘Quo Vadis, Action Recognition? A New Model and the Kinetics Dataset. *Computer Science: Computer Vision and Pattern Recognition*., 6299–6308.
- Casanova, F., Chiang, C.E., Ruminski, A.M., Sailor, M.J., Schuller, I.K., 2012. Controlling the Role of Nanopore Morphology in Capillary Condensation. *Langmuir*, 28, 6832–6838.
- Chan, D. M., Rao, R., Huang, F. and Canny, J. F., 2018. t-SNE-CUDA: GPU-Accelerated t-SNE and its Applications to Modern Data. 30th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing
- Chan, S. and Fauchet, P.M., 1999. Tunable, Narrow, and Directional Luminescence from Porous Silicon Light Emitting Devices. *Appl. Phys. Lett.*, 75, 274.
- Cullis, A.G., Canham, L.T., Calcott, P.D.J., 1997. The Structural and Luminescence Properties of Porous Silicon. *Journal of Applied Physics*, 82, 909.
- Çoban, Ö., 2021. Tümlüş Sensör Sistemi Görüntüsü.
- Çoban, Ö., 2021. Kontrollü Buharlaştırıcı ve Taşıyıcı Sistemi Görüntüsü.
- Çoban, Ö., 2021. Sıcaklık ve Gaz Değişimi Detaylı Grafiği.
- Dai Q., Min X., Weng, M. A., 2016. Review of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in Indoor Air Environment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66 (10), 941–950.

- Dalal N. and Triggs B., 2005. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. In C. Schmid, S. Soatto, and C. Tomasi, editors, *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, 886–893.
- Dhanekar, S. and Jain, S., 2013. Porous Silicon Biosensor: Current Status. *Biosensors and Bioelectronics*, 41, 54-64.
- Fernández, S., Graves, A., Schmidhuber, J., 2007. An Application of Recurrent Neural Networks to Discriminative Keyword Spotting. In *International Conference on Artificial Neural Networks*, 220–229.
- Firuzi, K., Vakilian, M., Phung B. T., Blackburn T.R., 2018. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(2), 542-550.
- Fissell, W. H., Dubnisheva, A., Eldridge, A. N., Fleischman, A. J., Zydney, A. L., & Roy, S. (2009). High-Performance Silicon Nanopore Hemofiltration Membranes. *Journal of Membrane Science*, 326(1), 58-63.
- Ghulinyan, M., Gaburro, Z., Wiersma, D.S., Pavesi, L., 2006. Tuning of Resonant Zener Tunneling by Vapor Diffusion and Condensation in Porous Optical Superlattices. *Phys. Rev., B* 74, 045118–045123.
- Givant, A., Shappir J., Sa'ar, A., 2000. Porous Silicon on Insulator: A New Approach to Fabricate Porous Silicon Based Optoelectronic Devices. *Physica Status Solidi*, 182, 419.
- Gör Bölen, M., 2018. 'Gözenekli Silisyum Tabanlı Yakıt Pili Membranı Üretimi' Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ezurum Teknik Üniversitesi, Erzurum.
- Graves, A., Mohamed, A., Hinton, G., 2013. Speech Recognition with Deep Recurrent Neural Networks. In *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 6645–6649.
- Grover, R., Narasimhan, K.L., Sharma, D.K., 2000. Pulsed Anodic Anodisation of Porous Silicon Films. *Journal of Porous Materials*, 7, 377.
- Gupta, N., Ashok, S. A., Kumar D. S., 2013. A Rare Presentation of Methanol Toxicity. *Ann Indian Acad Neurol*, 16(2), 249–251.
- Harraz, F., 2014. Porous Silicon Chemical Sensors and Biosensors: A Review. *Sensors and Actuators B: Chemical* 202 (2014) 897–912.
- Hochreiter, S. and Schmidhuber, J., 1997. Long Short-term Memory. *Neural Computation*, 9(8):1735–1780.
- Hou, X. Y., Fan, H., Xu, L., Zhang, F., Li, M., Yu, M., Wang X., 1996. Pulsed Anodic Etching: An Effective Method of Preparing Light-Emitting Porous Silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 68, 2323.
- Igor, A.L., 2015. Porous Silicon Structures as Optical Gas Sensors. *Sensors*, 15(8), 19968-19991.
- Ivanov, I.I., Klyuia, N.I., Skryshevsky V. A., 2019. Colorimetric Analysis of Optical Reflection from Thin Porous Silicon for Detection of Organic Liquids. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 280, 102-108.
- John, G. C. and Singh, V. A., 1995. Poroussilicon: Theoretical Studies. *Physics. Reports* 263 (2), 93-151.
- Karacalı, T., 2003. Darbeli Anodizasyon Tekniği ile Gözenekli Si ve Gözenekli Si Tabanlı Fabry- Perot Yapılarının Üretimi: Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

- Karacali, T., Alanyalioglu, M. and Efeoglu, H., 2009 .Single and Double Fabry-Perot Structure Based on Porous Silicon for Chemical Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 90, 12, 1667-1672.
- Karacali, T., Hasar, U.C., Ozbek, I.Y., Oral, E.A., Efeoglu, H., 2013. Novel Design of Porous Silicon Based Sensor for Reliable and Feasible Chemical Gas Vapor Detection. *J. Lightwave Tech*, 31, 295–305.
- Kareem, M. H., Adi, M., Haitham, T. H., 2021. The Effect of Current Density on the Properties of Porous Silicon Gas Sensor for Ethanol and Methanol Vapour Detection. *Journal of Applied Sciences & Nanotechnology*, 1 (4), 2788-6867.
- Kayahan, E., 2018. Porous Silicon Based CO_2 Sensors with High Sensitivity. *Optics*, Volume 164, 271-276.
- Kim, H.J., Kim, Y.Y., Lee, K.W. and Park, S. H., 2011. A Distributed Bragg Reflector Porous Silicon Layer for Optical Interferometric Sensing of Organic Vapour. *Sensors Actuators: B. Chemical*, 155 (2), 673–678.
- Klyui, N. I., Ivanov, I.I., Kyslovets, O.S., Avksentyeva, L. V., Skryshevsky, V. A., 2017. Features of The Use of Optical Reflection from Thin Porous Silicon for Detection of Organic Liquids. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 242, 1177–1185.
- Korotchenkov, G. 2013. *Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications*. Springer Science & Business Media: Berlin, Germany.
- Le, X. H., Viet Ho, H., Lee, G., Jung, S., 2019. Application of Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network for Flood Forecasting. *MDPI Journal*, 11(7), 1387.
- Lehman, V., 2002. *Electrochemistry of Silicon*. Wilwy-WCH Verlag GmbH, 271, Federal Republic of Germany.
- Lehmann, V. and Gösele, U., 1991. Porous Silicon Formation A Quantum Wire Effects. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 856-858.
- Linderman, G. C. and Steinerberger, S., 2019. Clustering with t-SNE, Provably. *SIAM Journal on Mathematics of Data Science.*, 1(2), 313-332.
- Manakov, S.M., Ibraimov, M.K., Sagidolda, Ye., Zhumatova, S.A., Darmenkulova, M.B., 2019. Detection of Acetonitrile and Chloroform Using Structures on The Base of Porous Silicon. *Eurasian Chemico. Technological Journal*, 21(1), 89-93.
- Martin, P., Fernandez, J. F., Cuevas, F., Alguerö, M., Sánchez, C., 1996. Influence of Anodization Time and Current Density on the Photoluminescence of Porous n-Si. *Thin Solid Films*, 276(1-2), 212-215.
- Mckee, R.H., Adenuga M.D., Carrillo, J.C., 2015. Characterization of The Toxicological Hazards of Hydrocarbon Solvents. *Crit Rev Toxicol*, 45(4), 273–365.
- Moretti, L., Rea, I., De Stefano, L., Rendina, I., 2007. Periodic Versus Aperiodic: Enhancing The Sensitivity of Porous Silicon Based Optical Sensors. *Applied Physics Letters*, 90, 191112–191115.
- Murguía, J., Vergara, A., Olmos, C., Wong, T., Fonollosa, J., Huerta, R., 2013. Two-Dimensional Wavelet Transform Feature Extraction for Porous Silicon Chemical Sensors. *Analytica Chimica Acta*, 785:1-15.
- Oytun, G. and Morgül, Ö., 2021. LSTM Based Classification of Targets Using FMCW Radar Signals. *IEEE Signal Processing and Communications Applications*.

- Park, S.H., Seo, D., Kim, Y.Y. and Lee, K.W., 2010. Organic Vapor Detection Using A Color-Difference Image Technique for Distributed Bragg Reflector Structured Porous Silicon. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 147, 775–779.
- Pavesi, L., 1997. Porous Silicon Dielectric Multilayers and Microcavities. *La Rivista del Nuovo Cimento*, 1978-1999, 20(10), 1.
- Pavesi, L., Negro, L.D., Mazzoleni, C., Franzo, G. and Priolo F. 2000. Optical Gain in Silicon Nanocrystals. *Nature*, 408, 440-444.
- Peker, M., Altun, H., Karakaya, F., 2012. HOG Temelli Bir Yöntem ile Ölçek ve Yönden Bağımsız Gerçek Zamanlı Nesne Tanıma. *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*.
- Plocoste, T., Jacoby-Koaly, S., Petit, R.H., Molinie, J., Roussas, A., 2017. In Situ Quantification and Tracking of Volatile Organic Compounds with a Portable Mass Spectrometer in Tropical Waste and Urban Sites. *Environmental Technology*, 38 (18), 2280–2294.
- Qadeer, K., Rehman W. U., Sheri, A. M., Park, I., Kim, H. K., Jeon, M., 2020. A Long Short Term Memory (LSTM) Network for Hourly Estimation of $PM_{2.5}$ Concentration in Two Cities of South Korea. *MDPI Journals*, 0(11), 3984;
- Qian, Y. and Sengupta, B., 2019. Pillar Networks: Combining Parametric with Non-Parametric Methods for Action Recognition. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 118, 47–54.
- Raj, H., Weihong, Y., Banbhani, S.K., Dino, S.P., 2018. LSTM Based Short Message Service (SMS) Modeling for Spam Classification. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Machine Learning Technologies*, 76-80.
- Rana, S.V. and Verma, Y., 2005. Biochemical Toxicity of Benzene. *J Environ Biol*, 26(2), 157–168.
- Rea, I., Iodice, M., Coppola, G., Rendina, I., Marino, A., De Stefano, L. A, 2009. Porous Silicon-Based Bragg Grating Waveguide Sensor for Chemical Monitoring. *Sensors and Actuators B Chemical*, 139, 39–43.
- Rock, F.; Barsan, N.; Weimar, U., 2008. Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chemical. Reviews*, 108, 705–725.
- Sailor, M.J. and Link, J.R. 2005. “Smart Dust”: Nanostructured Devices in a Grain of Sand. *Chemical Communication*, 11, 1375–1383.
- Sailor, M.J., 2012. *Porous Silicon in Practice*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
- Samui, S., Chakrabarti, I., Ghosh, S.K., 2018. Tensor Train Long Short-Term Memory for Monaural Speech Enhancement. *ArXiv Preprint ArXiv:1812.10095*.
- Setzu, S., Letant, P. S., Romestain, R., Vial, J.C., 1998. Improvement of the Luminescence in p-Type as-Prepared or Dye Impregnated Porous Silicon Microcavities. *Journal of Luminescence*, 80(1-4), 129-132.
- Shang, Y., Zhang, H., Wang, X., Wu, J., 2011. An Optical Olfactory Sensor Based on Porous Silicon Infiltrated with Room-Temperature Ionic Liquid Arrays. *Chemistry- A European Journal*, 17 (48), 13400–13404.
- Shashua A., Gdalyahu Y., Hayon G.. 2004. Pedestrian Detection for Driving Assistance Systems: Single-frame Classification and System Level Performance. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*.

- Song, X., Liu, Y., Xue, L., Wang, J., Zhang, J., Wang J. Jiang, L., Cheng, Z., 2020. Time-Series Well Performance Prediction Based on Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network Model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 186, 106682.
- Sze, M. S. and Kwong K. N., 2006. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons Inc., 832, Hoboken, New Jersey.
- Taliercio, T., Dilhan, M., Massone, E., Gue, A.M., Fraisse, B., Foucaran, A., 1995. Realization of Porous Silicon Membranes for Gas Sensor Applications. *Thin Solid Films*, 255: 310-312.
- Tsai, C., vd., 1991, *Appl. Phys. Lett.*, 59:2815.
- Uhlir, A., 1956. Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon. *Bell System Technical Journal*, 35(2), 333-347.
- Zolfaghari, M., Gabriel L. O., Sedaghat N., Brox T., 2017. Chained Multi-stream Networks Exploiting Pose, Motion, and Appearance for Action Classification and Detection. *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2904-2913.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ferda DAL
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Mecidiye Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2015)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2022)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
118M747 nolu ‘Kokunun Görüntüye Dönüştürülmesi ile Koku Sensörü Gerçekleştirilmesi’ isimli Tübitak 1001 projesi	
Çalıştığı Kurum	
Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Erzurum Bölge Müdürlüğü	