



**SENSÖR VERİSİ BİRLEŞTİRME  
TEKNİKLERİNİN  
ÇOKLU KİMYASAL  
SENSÖR İÇİN UYGULAMASI**

**Mustafa AKBUĞA**

**Yüksek Lisans Tezi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doç. Dr. Tevhit KARACALI  
2017  
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SENSÖR VERİSİ BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN ÇOKLU KİMYASAL  
SENSÖR İÇİN UYGULAMASI**

**Mustafa AKBUĞA**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ERZURUM  
2017**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**SENSÖR VERİSİ BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN ÇOKLU KİMYASAL  
SENSÖR İÇİN UYGULAMASI**

Doç. Dr. Tevhit KARACALI danışmanlığında, Mustafa AKBUĞA tarafından hazırlanan bu çalışma, 29/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı - Elektronik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Çağlar DUMAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Tevhit KARACALI

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 08.06.2017 tarih ve 23.31 nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Cavit KAZAZ**  
Enstitü Müdürü

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

**ÖZET**

Yüksek Lisans Tezi

**SENSÖR VERİSİ BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN ÇOKLU KİMYASAL  
SENSÖR İÇİN UYGULAMASI**

Mustafa AKBUĞA

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tevhit KARACALI

Elektronik sistemlerde koku algılama işlemini yapan aygıtlara koku sensörü ya da elektronik burun denir. Kokunun havada yayılması, koku zerreciklerinin hava içerisinde ısı ve ışık gibi hareket etmesiyle gerçekleşir. Koku sensörleri, bu havadaki değişimleri algılar ve elde ettiği bilgileri karar verme birimine iletir. Karar verme birimi ise sensörlerden gelen bilgileri birleştirerek havadaki kokunun ne olduğunu tahmin etmeye çalışır. Bu tez çalışmasında gözenekli silisyum tabanlı Fabry-Perot yapıdaki kimyasal sensör kullanılarak gelen gazın kimliğine karar veren elektronik burun geliştirilmiştir. Bu sensör her kimyasal gaz için yansıma spektrumunda bir çınlama dalga boyuna sahiptir. Sensöre farklı bir organik çözelti buharı verildiğinde başlangıçtaki çınlama dalga boyu zamanla sağa doğru kayar. Dalga boyundaki bu kayma miktarından faydalanarak çözelti buharının kimliklendirilme işlemi gerçekleştirilir. Literatürde gazların kimliklendirme işlemi tek noktadan alınan dalga boyundaki kayma miktarından faydalanılarak yapılmaktadır. Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak gazların kimliklendirme işlemi çoklu noktalardan ölçülen kayma miktarlarının değerlendirilmesi (birleştirilmesi) sonucu elde edilmektedir. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar önerilen yöntemin literatürde var olan yöntemlere göre gazları kimliklendirme başarısının daha yüksek hassasiyette olduğu tespit edilmiştir.

**2017, 100 sayfa****Anahtar Kelimeler:** Gözenekli Silisyum, Kimyasal Sensör, Elektronik Burun, Data füzyon.

**ABSTRACT**

Master Thesis

**APPLICATION OF SENSOR DATA FUSION TECHNIQUES  
TO MULTI CHEMICAL SENSOR**

Mustafa AKBUĞA

Atatürk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tevhit KARACALI

Devices that perform odor detection in electronic systems are called odor sensors or electronic noses. The spread of the odor in the air occurs when the odor particles move in the air like heat and light. The odor sensors sense the changes in the air and transmit the obtained information to the decision-making unit. The decision-making unit, on the other hand, combines the information from the sensors to try to guess what the smell in the air is. In this thesis, an electronic nose that determines the identity of the incoming gas using a porous silicon-based Fabry-Perot chemical sensor has been developed. This sensor has a resonant wavelength in the reflection spectrum for each chemical gas. When the sensor is given a different organic solution vapor, the initial resonance wavelength shifts to the right over time. By utilizing this amount of shift in the wavelength, the identification of the solution vapor is realized. In the literature, it is indicated that the identification of gases is realized by taking advantage of the amount of shift in the wavelength taken from a single point. In this study, the identification of the gases is obtained as a result of the evaluation of shift amount measured from the multiple points of gas identification process different from the processes mentioned in the literature. Experimental studies in this context indicate that the proposed method has a higher sensitivity to gas identification than the methods available in the literature.

**2017, 100 pages****Keywords:** Porous Silicon, Chemical Sensor, Electronic Nose, Data fusion.

## TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans programında hazırlamış olduğum “Sensör Verisi Birleştirme Tekniklerinin Çoklu Kimyasal Sensör İçin Uygulaması” adlı tez çalışmasında öncelikle her türlü desteğinden dolayı danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tevhit KARACALI’ ya teşekkür ederim. Tez çalışmasının her aşamasında bana yardımcı olan, bilgisi ve deneyimini benimle paylaşan hocam Sayın Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK’ e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımızda, özellikle ölçüm işlemleri sırasında Laboratuvardaki cihazları bizlerden esirgemeyen hocam Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU ‘na teşekkür ederim.

Her başarının arkasında olduğu gibi benim başarımın arkasındaki manevi destekçilerim olan; değerli hocam Sayın Prof. Dr. Murat SUBAŞI ve sevgili arkadaşım Cihan YILMAZ’ a çok teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her anında yanımda olan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mustafa AKBUĞA

Mayıs 2017

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Gözenekli Silisyum Kaynak Özetleri .....	2
1.2. Veri Birleştirme Kaynak Özetleri .....	9
<b>2. KURUMSAL TEMELLER .....</b>	<b>12</b>
2.1. Silisyum .....	12
2.1.1. Silisyumun Elektriksel ve Yapısal Özellikleri .....	12
2.1.2. Silisyumun Reaksiyonları .....	16
2.2. Gözenekli Silisyum .....	16
2.2.1. Gözenekli Silisyumun Oluşum Kimyası .....	17
2.2.2. Elektrokimyasal Aşındırma Temelleri .....	22
2.2.3. Gözenekli Silisyuma Anodizasyon Koşullarının Etkisi .....	27
2.2.3. Gözenekli Silisyumda Çoklu Tabaka Oluşturma .....	34
2.2.4. Çoklu Tabaka Gözenekli Silisyumda Optik Yansımanın Temelleri .....	38
2.3. Çoklu Sensör Veri Füzyonu .....	50
2.3.1. Veri Birleştirme Teknikleri .....	51
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM .....</b>	<b>55</b>
3.1. Gözenekli Silisyumun Optik Özelliklerinin İncelenmesi .....	55
3.1.1. Yansıma Ölçümü Deney Düzeneği .....	55
3.2. Çok noktadan Yansıma Ölçüm Deney Düzeneği .....	57
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>61</b>
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>78</b>
KAYNAKLAR .....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	89

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

- A : Akım birimi, Amper  
c : Işık hızı  
C : Selsiyus derece (Santigrat)  
E : Elektrik Alan  
E<sub>H</sub> : Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi  
E<sub>g</sub> : Yarı iletkenin yasak enerji aralığı  
 $\lambda$  : Dalga boyu  
 $\epsilon$  : Dielektrik sabiti  
 $\epsilon_r$  : Yarı iletkenin bağıl dielektrik sabiti  
 $\epsilon_{eff}$  : Etkin dielektrik sabiti  
I : Akım şiddeti  
I<sub>ps</sub> : Kritik Akım şiddeti  
J : Akım yoğunluğu  
J<sub>ps</sub> : Kritik Akım yoğunluğu  
n : Kırılma indisi  
m : Kütle  
m<sub>e</sub> : Elektronun kütlesi  
m\* : Etkin Kütle  
 $\mathcal{R}$  : Yansımaya Katsayısı  
 $\mathcal{T}$  : Geçirme Katsayısı  
 $\mu$  : Manyetik geçirgenlik  
 $\omega$  : Açısal Frekans  
 $\alpha$  : Soğurma Katsayısı  
 $\rho$  : Özdirenc  
 $\sigma$  : İletkenlik



**Kısaltmalar**

- DC : Doğru Akım
- EMA : Etkin ortam yaklaşımı
- FIPOS : Gözenekli silisyum ile yalıtılmış
- FTIR : Fourier dönüşümlü kızılötesi
- GS : Gözenekli silisyum
- GSM : Gözenekli silisyum mikro kovuk
- GSS : Gözenekli silisyum süper yapı
- KH : Kuantum hapsleme
- LED : Işık yayan diyot ( light Emitting Diode )
- SEM : Taramalı elektron mikroskobu
- TEM : Geçirgen elektron mikroskobu
- TMM : Transfer matris metodu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 1.1.</b> Silisyumun fiziksel görünüşü.....	13
<b>Şekil 2.2.</b> Silisyumun atom yapısı (R. Nave 2001).....	13
<b>Şekil 2.3.</b> Silisyum kristali için kovalent bağ yapısı gösterimi.....	13
<b>Şekil 2.4.</b> Elmas kristal yapısı ve dörtlü bağ düzeni (Kirrel 1996).....	14
<b>Şekil 2.5.</b> Gözenekli silisyumun elektron mikroskobu görüntüsü (Collins <i>et al.</i> 1997) .....	17
<b>Şekil 2.6.</b> Lehman ve Gösele tarafından öngörülen silisyumun aşınma seması (Lehman <i>et al.</i> 1991) .....	19
<b>Şekil 2.7.</b> Gözenekli Silisyumda gözenek oluşum mekanizması. (1) Başlangıçta silisyum yüzeyinde gelişi güzel oluşan gözenekler, (2) Gözeneklerin yönelimli büyümesi ve sınır tabakanın oluşumu, (3) Gözenek oluşumunun ileri safhası (Bisi <i>et al.</i> 2000).....	20
<b>Şekil 2.8.</b> Geleneksel anodizasyon hücresinin yandan şematik görünümü (Canham 1997).....	23
<b>Şekil 2.9.</b> Tek tanklı anodizasyon hücresinin yandan şematik görünümü (Karacalı 2003).....	25
<b>Şekil 2.10.</b> Çift tanklı anodizasyon hücresinin yandan şematik görünümü (Yüksel 2010).....	25
<b>Şekil 2.11.</b> Hidroflorik asidin sulu çözeltisi içindeki katkılı (a) p-tipi ve (b) n- tipi silisyum.....	26
<b>Şekil 2.12.</b> Gözenekli silisyumun elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı (Bisi <i>et al.</i> 2000).....	29
<b>Şekil 2.13.</b> İki farklı hidroflorik asit konsantrasyonu için akım yoğunluğuna bağlı olarak düşük katkılı p- silisyumdan (~1 W.cm) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi (Canham 1997).....	30
<b>Şekil 2.14.</b> İki farklı gözenekli silisyum kalınlığı için akım yoğunluğuna bağlı olarak düşük katkılı p- silisyumdan (~1W.cm) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi. Hidroflorik asit konsantrasyonu, 35% (Canham 1997).....	30
<b>Şekil 2.15.</b> Sabit akım yoğunluğu, hidroflorik asit konsantrasyonu (5%) ve sabit gözenekli silisyum kalınlığı (d=1µm) için akım yoğunluğuna bağlı olarak düşük katkılı p- silisyumdan (~1W.cm) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin anodizasyon süresine bağlı olarak değişimi (Canham 1997).....	31
<b>Şekil 2.16.</b> Sabit akım yoğunluğu ve hidroflorik asit konsantrasyonu için gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının anodizasyon süresine bağlı değişimi (Canham 1997).....	32

<b>Şekil 2.17.</b> İki farklı hidroflorik asit konsantrasyonu için akım yoğunluğuna bağlı olarak gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi (Canham 1997)..	32
<b>Şekil 2.18.</b> Sabit akım yoğunluğu ve hidroflorik asit konsantrasyonu için gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının anodizasyon süresine bağlı değişimi (Canham 1997).....	33
<b>Şekil 2.19.</b> %15 hidroflorik asit konsantrasyonu için akım yoğunluğuna bağlı olarak yüksek katkılı n+ silisyumdan (~0.018W.cm) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi (Canham 1997).....	33
<b>Şekil 2.20.</b> GS'den oluşturulmuş Fabry-Perrot filtre yapısının diyagramı (Pavesi 1997).....	36
<b>Şekil 2.21.</b> 6.8 µm ve %75 gözeneklilige sahip GS'nin yansıma spektrumu (Pavesi 1997).....	37
<b>Şekil 2.22.</b> Gravimetrik ve optik ölçümlerle elde edilmiş gözenekliliğin karşılaştırılması (Pavesi 1997).....	39
<b>Şekil 2.23.</b> Periyodik Çoklu tabaka (Born and Wolf 1975).....	43
<b>Şekil 2.24.</b> 6 Periyotlu ve her periyotta $n_2 = 2.1$ ve $h_2 = 75$ nm, $n_3 = 1.4$ ve $h_3 = 100$ nm olan iki tabakadan oluşmuş çoklu tabakanın TMM ile hesaplanan yansıma spektrumu (Karacalı 2003).....	45
<b>Şekil 2.25.</b> 6 Periyotlu ve periyotta $n_2 = 2.1$ ve $h_2 = 75$ nm, $n_3 = 1.4$ ve $h_3 = 100$ nm olan iki tabakadan oluşmuş aynalar arasında $n_c = 1.35$ ve $h_c = 125$ nm olan mikrovuk için TMM ile hesaplanan yansıma spektrumu (Karacalı 2003).....	46
<b>Şekil 2.27.</b> Darbeli elektrokimyasal anodik dağlama sisteminin blok şeması (Karacalı 2003).....	48
<b>Şekil 2.28.</b> GS fabrikasyonunun gerçekleştirildiği hücre.....	48
<b>Şekil 2.29.</b> GS fabrikasyonu sonucu üretilen TBAG2 sensörün görüntüsü.....	49
<b>Şekil 2.30.</b> Bir füzyon işlemi örneği olarak insan beyni ve algılama sistemi.....	51
<b>Şekil 2.31.</b> Sınıflandırıcıların seri bağlantı şeması.....	52
<b>Şekil 2.32.</b> Sınıflandırıcıların paralel bağlantı şeması.....	52
<b>Şekil 2.33.</b> Sınıflandırıcıların karışık bağlantı şeması.....	53
<b>Şekil 3.1.</b> Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensörün test deney düzeneği (Karacalı 2003).....	55
<b>Şekil 3.2.</b> Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensör testinin, Azot gazı altında alınan yansıma ölçümleri ile TMM ile yapılan simülasyonların gösterimi.....	56
<b>Şekil 3.3.</b> Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensörün XYZ-Stages ilave edilmiş yeni test deney düzeneği.....	57
<b>Şekil 3.4.</b> PC ile kontrol edilebilen yeni düzeneğin genel gösterimi.....	57
<b>Şekil 3.5.</b> XYZ-Stages 'in kontrol ara yüzü.....	58

<b>Şekil 3.6.</b>	Ölçme düzeneğinde numunenin ölçme yüzeyini belirleyen mesafe matrisi.	59
<b>Şekil 3.7.</b>	Ölçme düzeneğinden alınan veri matrisi.....	59
<b>Şekil 3.8.</b>	Sistemde sadece azot gazı varken elde edilen yansıma görüntüsü.....	60
<b>Şekil 3.9.</b>	Sisteme Solvent buharı verilirken elde edilen yansıma görüntüsü.....	60
<b>Şekil 4.1.</b>	Tek noktadan ölçülen Azot gazı yansıma ölçüm dosya içeriği.....	61
<b>Şekil 4.2.</b>	Tek noktadan ölçülen yansıma – Dalga boyu ölçüm sonuçlarının Matlab 'ta grafik olarak çizdirilmesi.....	62
<b>Şekil 4.3.</b>	Ölçüm sonuçlarında önemli olan bölgesinin gösterilmesi.....	62
<b>Şekil 4.4.</b>	Ölçüm sonuçlarında çınlama dalga boyunun gösterimi.....	63
<b>Şekil 4.5.</b>	Tek noktadan ölçülen veri ve gürültünün birlikte gösterimi.....	64
<b>Şekil 4.6.</b>	Yansıma ölçüm sonuçlarından çınlama dalga boyunun tespiti.....	64
<b>Şekil 4.7.</b>	Tek noktadan alınan verilere göre Azot gazı ve Aseton, Etanol organik çözeltili buharlarının yansıma grafikleri.....	65
<b>Şekil 4.8.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının yansıma dalgaboyu grafikleri.....	66
<b>Şekil 4.9.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharının Yansıma Dalga boyu grafikleri.....	66
<b>Şekil 4.10.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharının Yansıma Dalga boyu grafikleri.....	67
<b>Şekil 4.11.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının çınlama frekanslarının gösterimi.....	68
<b>Şekil 4.12.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharına ait çınlama frekanslarının gösterimi.....	68
<b>Şekil 4.13.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharına ait çınlama frekanslarının gösterimi.....	69
<b>Şekil 4.14.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının çınlama frekanslarının renk tonlarıyla gösterimi.....	70
<b>Şekil 4.15.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharına ait çınlama frekanslarının renk tonlarıyla gösterimi.....	70
<b>Şekil 4.16.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharına ait çınlama frekanslarının renk tonlarıyla gösterimi.....	71
<b>Şekil 4.17.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının ölçme noktaları ve çınlama frekanslarının 3D olarak gösterimi.....	71
<b>Şekil 4.18.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharına ait ölçme noktaları ve çınlama frekanslarının 3D olarak gösterimi .....	72
<b>Şekil 4.19.</b>	Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharının ölçme noktaları ve çınlama frekanslarının 3D olarak gösterimi.....	72
<b>Şekil 4.20.</b>	Ölçme verilerinin, veri birleştirme teknikleriyle birleştirilmesi.....	73

<b>Şekil 4.21.</b> Azot gazı ve Aseton çözücü buharına ait dalga boylarının birbirinden farkı.....	74
<b>Şekil 4.22.</b> Azot gazı ve Etanol çözücü buharına ait dalga boylarının birbirinden farkı.....	74
<b>Şekil 4.23.</b> Etanol ve Aseton çözücü buharına ait dalga boylarının birbirinden farkı.....	75
<b>Şekil 4.24.</b> TBAG2 kimyasal sensöre ait Etanol-Aseton-Azot' gazlarının dalga boylarına göre birbirinden farkları.....	75
<b>Şekil 4.25.</b> TBAG2 kimyasal sensöre ait Etanol çözücü buharını en iyi ölçen bölgelerine ait verilerin birleştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	76
<b>Şekil 4.26.</b> TBAG2 kimyasal sensöre ait Azot gazı ve Aseton, Etanol çözücü buharlarını en iyi ölçen bölgelerine ait verilerin birleştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar.....	77

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b>Çizelge 2.1.</b> Silisyum yarı iletkeninin bazı özellikleri.....	14
<b>Çizelge 2.2.</b> IUPAC gözenek boyutunun sınıflandırılması (Bisi <i>et al.</i> 2000).....	21
<b>Çizelge 2.3.</b> Gözenekli silisyum oluşumunda anodizasyon şartlarının gözenekli silisyum parametrelerine etkisi (Bisi <i>et al.</i> 2000).....	34
<b>Çizelge 3.1.</b> Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensörün çözelti buharındaki yansıma spektrumlarının çınlama dalga boyları.....	56



## 1. GİRİŞ

1950'lerden sonra yarı iletkenler üzerine yapılan araştırmalar sonrası lambalı devre elemanlarının yerini diyot, transistor gibi yarı iletken devre elemanları almıştır. Yarı iletken devre elemanlarının geliştirilmesinde en çok germanyum (Ge) ve silisyum (Si) kristalleri kullanılır (Boylestad and Nashelsky 1994). Bu yarı iletken kristallere ısı ve ışık uygulanarak karakteristikleri değiştirilebilir ve bu sayede ısı ve ışığa duyarlı aletlerin yapımı önem kazanır (Canham 1990).

Yarı iletken madde olan Si elementinin üretim maliyetlerinin az olması ve tabiatta çok fazla bulunması nedeniyle, uygulamada Ge göre daha çok ilgi görmektedir. Malzeme teknolojisinde yapılan araştırmalar sayesinde nano boyuttaki yarı iletkenler malzemelerin üretimine başlanmıştır. Nano boyuttaki yarı iletkenler malzemelere en iyi örneklerden biri de Gözenekli silisyumdur.

Silisyumun hidroflorik asit (HF) içerisinde elektrokimyasal aşındırılmasıyla Gözenekli silisyum (GS) üretilir ve bu üretilen GS, süngerimsi bir yapıya sahiptir. Bu süngerimsi yapısı sayesinde çok geniş bir yüzey alanına sahip olur. GS'nin bu yüzey alanı kimyasal etkileşimler yardımıyla optik özellikler de sergileyebilmektedir.

Kimyasal etkileşim yöntemlerinden biri olan elektrokimyasal anodik dağlama yöntemiyle üretilen GS'nin bir özelliği de dağlamanın gözenek duvarlarından ziyade gözenek uçlarına doğru devam etmesidir. Bu özelliğinden dolayı gözenekleri birbirinden farklı tabakalar oluşturmak mümkündür.

Çoklu tabaka GS üretilerek istenilen dalga boyutunda ışımaya yapabilen LED diyot veya değişik gazlara tepki verebilen kimyasal sensörler yapılabilmektedir.

Kimyasal sensör olarak kullanılan çoklu tabakalı GS üzerinden alınacak yansıma sonuçları veri bileştirme teknikleri kullanılarak analiz edildiğinde ortamdaki gazın tam olarak ne olduğu tespit edilebilir. Bu tez çalışmasında yapılacak düzenekle ortamda bulunan Azot gazı ve Aseton, Etanol çözücü buharlarında sensörün hangi noktasında daha iyi ölçüm yapıldığı ve bu ölçülen noktadan alınan verilerinin birleştirilmesiyle de verilen gazın tam olarak kimliklendirilmesi sağlanacaktır.

### 1.1. Gözenekli Silisyum Kaynak Özetleri

Gözenekli silisyum (GS) ilk defa 1956 yılında Uhlir tarafından tek kristal silisyumun hidroflorik asit (HF) içinde elektrokimyasal aşındırma işlemi esnasında keşfedilmiştir. Bu malzeme nanometre mertebesinde mikrometre mertebesine kadar değişen boyutlarda boşluklarla çevrelenmiş, silisyum iskeletten oluşmuş ve yüksek yüzey alanı (yaklaşık  $10^3 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ ) ile karakterize edilmiştir.

Seyreltik hidroflorik asit içinde tek kristal silisyumun anot ve platin (Pt) metalinin katot olarak kullanıldığı bir sisteme uygulanan potansiyel farkından yararlanılarak elektrokimyasal aşındırma (anodizasyon) ile elde edilen gözenekli silisyumun elektriksel, optik karakteristikleri, anodizasyon sürecinde asit konsantrasyonu, sıcaklık, kullanılan tek kristal silisyumun iletkenlik tipi, katkı konsantrasyonu, aydınlatma, anodizasyon zamanı ve akım yoğunluğu gibi parametreler ile değişmektedir.

Silisyum, yarı iletken ve elektronik uygulamalarda çok önemli bir yer teşkil etmesine karşın, dolaylı bant yapılı olması sebebiyle optoelektronik uygulamalarda pek yer alamamaktaydı. Ancak Canham tarafından 1990 yılında gözenekli silisyumun oda sıcaklığında görünür bölgede ışık yayılması (fotoluminesans) göstermesi sebebiyle dikkati üzerine çekmesine ve yoğun araştırmaların başlamasına neden olmuştur. Bu açıdan bakıldığında, tek kristal silisyumdan gözenekli silisyumun elde edilmesi silisyum tabanlı bu malzemeyi optoelektronik uygulamalar için elverişli hale getirmiştir (Karacalı 2003).

Gözenekli silisyum filmlerin yasak bant genişliğinin tek kristal silisyumun yasak bant genişliğine kıyasla daha fazla olduğunu, malzemenin optik geçirgenlik deneyleri ile göstermişlerdir. Yasak bant genişliğinin tek kristal silisyumunkinden fazla olması ilk olarak kuantum sınırlama modeliyle açıklanmış olup, bu modele alternatif ve ek olarak birçok model sunulmuştur (Lehmann 1991).

Gözenekli silisyum yüzeyler silisyum oksitle kaplanır. Gözenekli silisyumun içteki geniş yüzeye yayılması 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. Dikkate değer bu eğilim, gözenekli silisyum hakkındaki araştırmaları arttırmıştır. Bu durum özellikle Metal-GS yapıların gaz sensörler gibi kullanılmasına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. (Tsai *et al.* 1991)

Taliercio *et al.* (1995), gözenekli silisyumun etkili bir oksijen sensör olarak kullanılabileceğini önerirken, Motohashi *et al.* (1995) okside olmuş gözenekli silisyum yapının biyosensör olarak kullanabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Pavesi and Mazzoleni (1995), DBR ve mikro boşluk için akım yoğunluğu ve dağlama süresini ayarlayarak GS den kontrollü ışımaya elde ederek istenen dalga boyunda dar ışımaya elde etmişlerdir.

Pavesi *et al.* (1996), DBR ve mikro boşluk oluşturdukları GS çoklu tabakalar üzerine elektrik akımı enjeksiyonu sağlamak için ince metal buharlaştırarak Schottky diyot gibi çalışan GS tabanlı RCLED üretimini ilk defa gerçekleştirmişlerdir. Yansıma, PL ve EL ölçümleri ile karakterize etmişlerdir.

Hou *et al.* (1996), HF tabanlı çözeltilerde elektrokimyasal anodik dağlama için yeni bir metot önermişlerdir. Geleneksel anodik dağlamada sabit akım veya sabit gerilim kaynağı DC iken; önerilen yeni metotta akım veya gerilim darbelidir. Darbeler arası zamanda akım veya gerilim uygulanmadığı için gözenek uçlarına taze çözelti ulaştığı ve yine gözenek uçlarındaki hidrojen gazı ortamı terk ettiği için aynı sürede DA dağlamaya göre daha homojen ve daha kalın tabaka elde edildiğini AFM ve SEM analizleri ile göstermişlerdir.

Canham *et al.* (1996), o tarihe kadar ki GS teknolojisi kullanan optoelektronik uygulamaları için geliştirilmiş yenilikleri içeren bir derleme yayınladılar. Bu yayında GS LED, GS dalga kılavuzu, GS foto detektörleri gibi uygulama alanlarında yapılan çalışmalar derlenmiştir.

Martin *et al.* (1996), n tipi silisyumdan oluşturulmuş GS 'nin PL'i üzerine anodizasyon zamanı ve akım yoğunluğunun etkisini incelemişlerdir. Anodizasyon zamanı ve akımı arttıkça PL şiddetinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Mizuno *et al.* (1996), HF tabanlı çözeltilerde elektrokimyasal anodik dağlama sonrası açık devre şartlarında herhangi bir oksidasyon yapmadan 500 Watt'lık tungsten lamba ile aydınlatarak daha mavi bölgede ışımaya gözlemlediklerini rapor etmişlerdir.

Berger *et al.* (1997), GS çok tabakalı yığımları dielektrik filtre olarak ifade etmişler ve 950°C nin üzerindeki sıcaklıklarda termal oksidasyon ile kısa dalga boylarında GS tabakaların daha az soğurma yapacağını göstermişlerdir. Çoklu tabaka GS 'den Bragg yansıtıcıları ile yapılan filtrelerden ziyade rugate filtrelerin yansıma spektrumlarında istenmeyen yan bantların bastırıldığı ifade edilmiştir.

Pavesi (1997), GS'nin fiziksel özellikleri, dielektrik GS çoklu tabakaların fabrikasyonu yansıma ve PL ölçümleri, dielektrik Bragg aynaları ile PSM deneysel sonuçlarının karşılaştırılması, GS çoklu tabakaların yaşlanma etkisi ve uygulama alanları üzerine kapsamlı bir derleme yayınlamıştır.

Billat *et al.* (1997), yüksek ve düşük kırılma indisli GS tabakalarından Bragg yansıtıcı ve Fabry-Perot filtre gibi tipik optik girişim filtreler oluştururken yeni bir metod uygulamışlardır. Bu metotta GS oluşumu esnasında işlemi birkaç kez durdurarak HF konsantrasyonunun ilk seviyeye dönmesini ve bu sayede kararlı GS tabakalar elde etmişlerdir.

Hilbrich *et al.* (1997) Elektrokimyasal dağlama esnasında akım yoğunluğunu periyodik olarak değiştirerek kızılötesi bölgeden UV bölgeye kadar değişen spektral aralıkta GS optik filtreler elde ederek spektrometresiz nicel soğurma spektroskopisinde optik algılayıcı olarak kullanılabilirliğini göstermişlerdir. .

Pavesi and Dubos (1997 ), GS çoklu tabakaların yansıma spektrumlarında durdurucu bant genellikle 200-250 nm genişliğinde olmaktadır. GS çoklu tabakaları rastgele kalınlıkta tabakalardan oluşturularak stop bandı görünür bölgenin ortalarından kırmızı ötesi bölge boyunca kaydırmışlardır.

1997 yılına kadar üzerine yapılan çalışmalar ve iyileştirmeleri içeren bir derleme yayınlandı. Bu çalışmada o güne kadar geliştirilmiş GS fabrikasyon teknikleri, fiziksel inceleme teknikleri ve GS 'nin PL özellikleri incelenmiştir (Cullis *et al.* 1997).

Paladyum (Pd) kaplı gözenekli silisyum yapılar (Pd/GS) bir dış kaynaktan gerilim uygulanması ile hidrojen dedeksiyonunu sağlandığı Polishchuk *et al.* (1998) tarafından açıklanmıştır.

Setzu *et al.* (1998), farklı akım yoğunluklarında GS oluşumu üzerine anodizasyon sıcaklığının etkisini inceleyerek, gözeneklilik, kırılma indisi ve GS külçe Si arayüzey pürüzlülüğünü gözlemlemiştir. Düşük sıcaklıklarda GS /külçe Si arayüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir.

Yamani *et al.* (1998), HF tabanlı çözeltiye H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave ederek elektrokimyasal anodik dağlama gerçekleştirmişlerdir. Yüksek oranda oksitleyici olan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sayesinde kristalit boyutlarının küçülüp yeşil/mavi bölgede ışımaya yaptığını, bu durumun hapisleme modelini desteklediğini rapor etmişlerdir.

Pavesi (1998), GS tabanlı etkin ışımaya veren LED üzerine bugüne kadar yaptığı iyileştirmeler üzerine çalışma yapmıştır bu çalışmada PSM ile gerçekleştirilmiş LED uygulamalarından da bahsetmiştir.

Squire *et al.* (1998), periyodik şekilde gözenekliliği değiştirerek oluşturdukları GS çoklu tabakalar arasındaki GS mikro boşluktan ışık yayılımını detaylı olarak inceledikleri çalışmada sadece GS tabakaların kırılma indisi ve soğurmasının değil aynı zamanda ışımanında karmaşık olduğunu göstermişlerdir.

Volkin *et al.* (1999), GS 'nin optik özelliklerinde oksijenin rolünü ortaya koydukları çalışma ile hem QC etkisini hem de yüzey pasivasyon etkisini açıklayarak GS üzerine yeni bir ufuk açmışlardır. Oluşturulan GS numunelerin bazıları oksijensiz ortamda ve normal ortamda bekletildikten sonra yapılan PL ve FT-IR ölçümleri ile oksijenin silisyumla yaptığı bağlar ile GS 'nin PL pik pozisyon ve şiddeti üzerinde ne kadar etkin olduğunu göstermişlerdir.

Buttard *et al.* (1999), az ve aşım katkılı p tipi numunelerden oluşturulmuş GS tabakaların kalınlıklarını X-ışını yansıma ölçümleri ile tayin etmişler, çok kısa süreli dağlama ile elde edilmiş GS numunelerin 10-250 nm kalınlık bölgesinde dağlama zamanıyla kalınlığın doğrusal değiştiğini rapor etmişlerdir.

Chan and Fauchet (1999), iki adet GS çoklu tabaka aynanın arasına yüksek ışımaya verimli GS tabakanın oluşturulduğu mikroboşluk çınlama yapısının PL ve EL ölçümlerini yapmışlardır. Mikroboşluk yapısının PL ve EL spektrumunda önemli ölçüde daralmaya sebep olduğunu gözlemlemişlerdir.

Squire *et al.* (1999), GS 'den oluşturulmuş çoklu tabaka, tek ve daha çok mikroboşluk yapıların optik özelliklerini deneysel ve kuramsal teknikler kullanarak incelemişlerdir. Yansıma ve PL ölçümleri transfer matris teknikleri ile modellenerek deneysel ve kuramsal sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Snow *et al.* (1999), GS 'den oluşturulmuş çoklu tabaka Bragg yansıtıcıların organik çözücülerin buharına maruz kaldıktan sonra yansıma spektrumlarında önemli derecede kayma olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun tabakaların kırılma indisinde meydana gelen değişiklikten kaynaklandığına atfetmişlerdir.

Zangoie *et al.* (1999), elektrokimyasal anodik dağlama yöntemiyle üretilmiş GS Fabry-Perot optik filtreleri açığa bağlı spektroskopik ellipsometri tekniği ile karakterize etmişlerdir. Bu ölçüm sonuçları, Bruggeman EMA tekniği ile birlikte değerlendirilerek tabakaların kırılma indislerinin gerçek ve sanal kısımlarını elde etmişlerdir. Buna ilaveten su ve toluen buharının spektrumunda kırmızıya doğru kaymaya neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Hunkel *et al.* (1999), yanal anodik dağlama ile numunenin bir yanından öteki yanına doğru GS tabakaların kalınlığının arttığı ve yansıma ölçümlerinin bir yandan öteki yana doğru belirli adımlarla alındığında spektrumda stop bandın tabaka kalınlığı arttıkça infrared bölgeye doğru kaydığını göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, yansıma spektrumunda mavi bölgedeki stop bandın kırmızı bölgedekine kıyasla daha düşük olmasının GS 'nin daha kısa dalga boylarında daha fazla soğurma yapmasına atfetmişlerdir.

Pavesi and Mulloni (1999), aşırı katkılı (0,02 ohm cm) ve az katkılı (7 ohm cm) p tipi numunelerde elektrokimyasal anodik dağlama ile çoklu tabaka GS ve PSM çalışması yaparak PL ölçümleri ile her iki tip numunede kıyaslama yapmıştır. Mattei *et al.* (1999), elektrokimyasal anodik dağlama yöntemiyle aşırı katkılanmış (p+) silisyumdan akım yoğunluğu ve anodizasyon zamanını, Fabry-Perot filtrenin infrared bölgeye düşmesi için

uygun mikroboşluk kalınlığı ve kırılma indisi oluşacak şekilde ayarlayarak PSM üretimini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra  $C_{12}H_{26}$  buharına maruz bırakarak Fabry-Perot filtre ile C-H titreşimlerinin etkileşimini incelemişlerdir.

Bisi *et al.* (2000), GS'nin üretimi, elektriksel, yapısal, optik özellikleri, teorik çalışmaları ve uygulamaları üzerine çok ayrıntılı bir derleme yayınlamıştır.

Gaburro *et al.* (2000), GS tabanlı LED'in CMOS üretimi üzerine çalışma yapmışlardır. Elektrokimyasal dağlama ile CMOS üretiminde kullanılan maskeleme malzemeleri arasında çıkan uyumsuzluk sorunu nedeniyle GS oluşum fabrikasyonunun ara aşamada yapılması gerekliliğini tespit etmişlerdir.

Givant *et al.* (2000), geleneksel elektrokimyasal anodik dağlamaya alternatif olarak yanall anodik dağlama önermişlerdir. Bu teknik ile GS /Silisyum ara yüzeyinin daha keskin olduğunu ve daha kontrollü anodizasyon gerçekleştirdiklerini açıklamaktadırlar.

Grover *et al.* (2000), HF konsantrasyonunun ve darbe genişliğinin fonksiyonuna bağlı olarak darbeli anodizasyon tekniğı ile GS üretmişlerdir. PL spektrumlarında çok geniş bir enerji aralığında tuning yaptığını gözlemlemişlerdir.

Canham ile Pavesi ve arkadaşları Nature'de yayınlanan makalelerinde silisyum tabanlı lazerlerin geleceğinden bahsederken GS çoklu tabaka ve mikro boşluklar ile ışım spektrumlarının daraltıldığını ve ince tabaka nanokristal formlarda optik kazanç elde ettiklerini söylemişlerdir. Ayrıca bilim adamlarının nanokristal silisyum lazerlerin 2010 yılına kadar diğer lazerlerin yerini almaya başlayacağını tahmin ettiklerini belirtmişlerdir (Canham 2000, Pavesi *et al.* 2000).

Y. Zhou *et al.* (2000), GS çoklu tabaka üzerine termal işlemin etkisini inceledikleri çalışmada azot atmosferi altında tavlama yaparken sınırlı miktarda da olsa oksitlenme olduğunu, bu durumun kırılma indisinde değişime sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca termal işlemin PS tabakaların yüzey pürüzlülüğünü azalttığını gözlemlemişlerdir.

Mulloni and Pavesi (2000), PSM'de yaşlanma etkisinin çınlama pikinin maviye doğru kaymaya ve ışımanın şiddetlenmesine sebep olduğunu tespit ettikleri çalışmada bu

etkiyi gözlemlemek için PSM'i elektrokimyasal yöntemle oksitlemişlerdir. Bununla birlikte doğal olarak oksitleme ile anodik oksitlemenin aynı özellikleri göstermediğini de bu çalışmada ortaya koymuşlardır.

Setzu *et al.* (2000), GS çoklu tabaka ve Bragg yansıtıcılar oluştururken yüzey pürüzlülüğünü elektrolit viskozitesini değiştirerek azalttıklarını açıkladıkları çalışmada yüksek yansıtıcı özellikleri elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Canon-ELTRAN® çalışanlarından K. Sakaguchi ve arkadaşları, iki tabakalı GS 'nin her bir tabakasına ait gözeneklilik parametresinin anodizasyon şartlarına bağımlılığını inceledikleri çalışmada ikinci tabakanın gözenekliliğinin birinci tabakanın gözenekliliğine ters orantılı olarak bağlı olduğunu göstermişlerdir (Sakaguchi *et al.* 2000).

(Mavi vd., 2001), görünür bölge ve kızılötesi lazer kullanarak fotokimyasal dağlama metodu ile oluşturdukları n tipi GS ince filmlerin PL incelemelerinde Nd:YAG lazer kullanarak dağlanmış numunelerde tek PL piki elde ederken Ar-Ion lazer ile dağlanmış numunelerde iki PL piki gözlemlemişlerdir. Bu sonuçları KH modeli ile analiz ederken uyarma enerjisinin fonksiyonu olarak nano kristal boyutu ve boyut dağılımı üzerine bir çalışma yapmışlardır.

K.Kurdas *et al.* (2001), HF tabanlı elektrokimyasal anodik dağlama yöntemiyle ürettikleri GS 'nin gözeneklilik ve tabaka kalınlığının elektrolit kompozisyonuna bağımlılığını incelemişlerdir. Bu çalışmada elektrolitteki HF oram azaldıkça gözeneklilik ve tabaka kalınlığının arttığı ve daha düzgün GS tabakalar elde ettiklerini açıklamışlardır.

Ohmukai *et al.* (2001), HF tabanlı elektrokimyasal anodik dağlama yönteminde anodizasyon şartları ve PL Karakterizasyonu arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmada akım yoğunluğu ve anodizasyon süresi arttıkça daha güçlü PL elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Xiong *et al.* (2001), darbeli anodik dağlama yöntemiyle GS mikro boşluk ve çoklu tabaka çalışması yapmışlardır. SEM mikrofilm incelemesiyle geleneksel anodik

dağlama yöntemiyle kıyaslandığında daha düzgün tabakalı yapılar elde ettiklerini izah etmişlerdir. Ayrıca PL spektrumlarında 5,6 nm FWHM olan dar pik elde etmişlerdir

Abouelsaood (2002), GS 'nin kılma indisi üzerine yeni bir model önererek Bruggeman EMA modeli dâhil diğer modeller ile kıyaslama yapmış, önerdiği modelin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir.

Xu *et al.* (2002), darbeli anodik dağlama yöntemiyle GS mikroboşluk ve çoklu tabaka oluşturdukları çalışmalarında yansıma ölçümleri yapmış, ayrıca transfer matris metodu (TMM) ile kuramsal olarak yansıma ölçümleri arasında uyum sağlamışlardır.

Şongyan *et al.* (2003), HF tabanlı elektrolitte elektrokimyasal anodik dağlama yöntemiyle hazırlanmış GS numunelerin düşük sıcaklık (250°C) ve yüksek sıcaklık (420-450°C) tavlama işleminden sonra ışımaya özellikleri üzerine inceleme yapmışlar ve gözeneklerin etrafını kaplayan hidrojen bağlarının yüksek kaliteli oksit tabakasıyla yer değiştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Pavesi *et al.* (2003), silisyumun fotonik uygulamalarını sundukları çalışmada ışık kuvvetlendirme karakteristiği, doğrusal olmayan optik etki ve gaz duyarlılığı gibi özellik göstermesi sebebiyle silisyumun aktif fotonik malzemesi olduğunu açıklamışlardır.

Silisyumun indirekt geçişli bir madde olması ve ışımaya olayının görülmemesine karşın, GS yapılarda ışımaya olaylarının gözlenmesi, gözenekli silisyum yapıların diyot ve sensör davranışının mümkün olabileceğini göstermektedir. (Rossi *et al.* 2004).

## 1.2. Veri Birleştirme Kaynak Özetleri

Veri birleştirme işlemi, son yıllarda askeri ve sivil alanlarda üzerinde yoğunlaşan önemli konuların başında gelmektedir. Literatüre bakıldığında veri birleştirme tanımı için çeşitli açık tanımlamaların yapıldığı görülür. Luo 'a göre; farklı kaynaklardan gelen bilgilerin birleştirilerek her durumda sistemi temsil edebilecek tek bir düzenin oluşturulması işlemidir (Luo 1995).

Klein'e göre; çok seviyeli, çok yüzlü bir yöntem olarak belirtilen veri birleştirme işi, otomatik bulma, kurma, değişkenleri birbiriyle bağlama, bir kaniya varma ve verinin farklı kaynaklardan gelen bilgilerin birleşmesi için yapan bir işlem sürecidir (Klain 1999).

Veri birleştirme yaklaşımı yeni olmamasına rağmen yeni algılayıcıların ortaya çıkması teknolojinin ilerlemesi ve gelişen donanımın yaygınlaşması gerçek zamanlı birleştirme imkânlarını mümkün kılmaktadır. Bilgisayar alanındaki gelişmeler yapay zekâ programları ve çeşitli algoritma yapılarının gerçek dünyaya uygulama imkânı sağlamıştır.

Veri birleştirme, sensörlerin algıladığı bilgilerin birbiriyle koordineli karşılaştırılarak en doğru değerlendirmenin yapılmasına olanak sağlar (Linan 2001).

Her sensör için elde edilen olasılık hesaplamaları sayesinde daha kaliteli bilgiye ulaşmak amacıyla birleşik olasılıklarını elde etmek için hesaplamalar yapılır ve sonuç olarak tek bir olasılık elde edilir (Klein 2004).

Veri füzyonu yaklaşımı genel olarak tek bir sensör ile elde edilemeyecek kadar karmaşık ara yüzler için çoklu sensörlerdeki verilerin bir araya getirilerek amaca uygun bilginin elde edilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Mandic 2005).

Çoklu sensör veri birleştirmenin model yapısının, model parametrelerinin bulunması, sensör veri karşı düşürmelerinin bulunması sebebiyle, karar vermek için çeşitli alanlarda farklı teknikler kullanılır (Gülnur 2000) .

Oylama yöntemi ile yapılan veri füzyonunda matematikteki Boolean sistemi kullanılmaktadır. Buna göre en doğru bilgiyi taşıyan sensör verileri ayıklanarak bu bilgilerin kullanılması sağlanmaktadır (Hall 2004).

Kimlik tespitlerinin değerlendirmesini yapmak amacıyla tek veya çoklu kaynaklardan gelen veriler arasındaki ilişkileri ve bağıntıları daha iyi tespit etmek için veri füzyon süreci ard arda yapılan tasnif veya analizlerle ve ek kaynaklara ihtiyaç olup olmadığını belirlemeye çalışır (Birgül vd. 2007).



Çoklu sensör veri birleştirme yöntemleri kapsamında yapılan çeşitli çalışmalar ve uygulamalar göstermektedir ki sensör algılamalarında genellikle kullanılan sayısal yöntemler yanında sembolik yaklaşımlar da giderek büyük önem kazanmaktadır. Literatürdeki araştırmalar sayısal yöntemler, mantıksal yöntemler, rastlantısal yöntemler olmak üzere üç şekilde gruplanabilir. Sembolik yaklaşımlar ise daha yapay zekâ ve uzman sistemler olarak özelleştirilebilir.

Yukarıda verilen tarihi gelişim incelendiğinde yarı iletkenlerin elektronik malzemelerin kullanılmaya başlandığı zamandan günümüze kadar geçen zamanda GS' nin birçok yerde uygulama alanı bulduğu görülecektir. Bu tez çalışmasında, GS'nin sadece optik davranışları üzerinde durulmuş olup, Tevhit Karacalı'nın 106T154 nolu proje çalışmasında yapılmış olduğu tek noktalı yansıma ölçümleri yerine bu tez çalışmasında aynı sensörün farklı noktalarından alınan ölçüm noktaları veri birleştirme yöntemleriyle birleştirilerek GS için yeni bir kullanım alanı bulunmaya çalışılmıştır.

Tezin kurumsal temeller kısmında; silisyumun özellikleri, GS üretimi ve özellikleri anlatılmış olup Materyal ve Yöntem bölümünde; GS'nin farklı gazlar altında alınan çok noktalı ölçüm düzeninin yapısı açıklanmıştır. Araştırma bulguları kısmında; Azot gazı ile Aseton ve Etanol gibi organik çözücülerin sensör tarafından algılanma yeteneği incelenmiş ve Sonuç bölümünde ise; GS'nin örnekleri veri birleştirme teknikleri kullanarak Matlab yazılımı içerisinde analizi yapılarak gazların kimliklendirilmesi için gereken ölçümler yapılmış ve çıkan sonuçlar yorumlanmıştır.

## 2. KURUMSAL TEMELLER

Bu çalışmada kimyasal sensör olarak kullanılan gözenekli silisyumun ana malzemesi silisyumdur. Bu nedenle gözenekli silisyumun özelliklerini tanımadan önce tek kristal silisyumun özelliklerini bilmekte büyük yarar vardır.

Silisyumun çok iyi bilinen elektriksel özellikleri dışında ona yeni teknikler uygulayarak optik veya kimyasal hassasiyetler kazandırmak mümkündür. Bu yüzden tez çalışmamızda diğer yarı iletkenler yerine sadece silisyum ve onun türeği olan gözenekli silisyum üzerine değerlendirmeler yapılacaktır.

### 2.1. Silisyum

Silisyum, önemli bir yarı iletkendir. Doğada serbest olarak bulunmaz, silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) veya çeşitli taş, kum, tuz vb. mineraller şeklinde bulunur. Yıldızlarda, meteorlarda daha çok bulunan silisyum, yer kabuğunun %25,7' si gibi büyük bir kısmını oluşturur. Silisyum kolay işlenebilirliği, katkılındığında elektriksel özelliklerinin kolay kontrol edilebilir oluşu nedeniyle elektronik teknolojisinin en çok tercih edilen malzemelerden biridir.

#### 2.1.1. Silisyumun Elektriksel ve Yapısal Özellikleri

Katı cisimler elektrik özelliklerine göre; iletken, yalıtkan ve yarı iletken olmak üzere üçe ayrılır. İletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalırken yarı iletkenlerde artmaktadır ve elektriksel özdirençleri oda sıcaklığında  $10^{-4}$ - $10^{10}$  ( $\Omega\text{cm}$ ) arasında değişmektedir. İlk olarak 1823 yılında bulunmuştur. 1952 yılında silisyum ticari olarak bütünleşmiş devre elemanı ve cihaz yapımının büyük bir kısmında kullanılmaktadır. 1990 yılında silisyumdan elektrokimyasal yöntemle elde edilen gözenekli silisyumun üretilmesiyle optik sistemlerde de kullanılmaya başlamıştır.

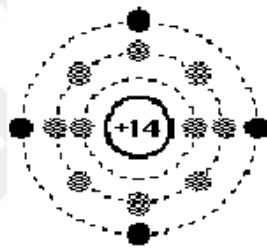
Silisyumun atom numarası 14 olup, fiziksel görünüşü Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



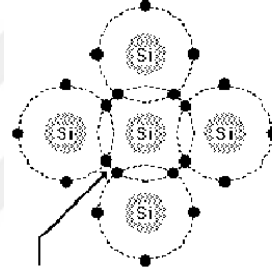
**Şekil 1.1.** Silisyumun fiziksel görünüşü

Elektron dağılımı;

Si:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$  şeklindedir. Silisyumun atomik yapısı Şekil 2.2 ‘de gösterilmiştir.



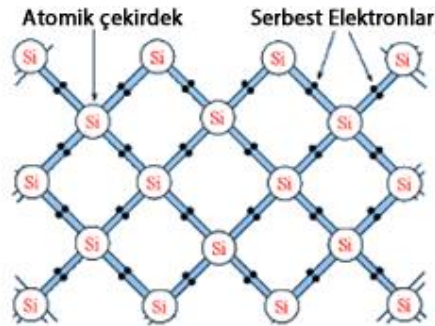
Silisyum



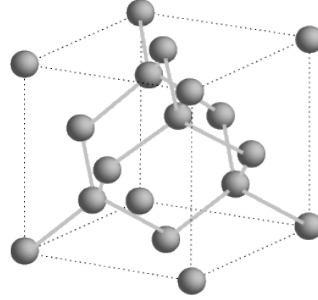
Kovalent bandın paylaşılmış elektronları

**Şekil 2.2.** Silisyumun atom yapısı (R. Nave 2001)

Şekil 2.3 de görülen atomik yapının valans bandında dört elektron bulunduran silisyum atomu kovalent bağlanmayla karakterize edilir.



**Şekil 2.3.** Silisyum kristali için kovalent bağ yapısı gösterimi



**Şekil 2.4.** Elmas kristal yapısı ve dörütlü bağ düzeni (Kirrel 1996)

İstenilen özelliklere sahip yarı iletken elde edebilmek için bazı yabancı atomlar yarı iletken malzemeye katılmaktadır. Silisyumun kristal yapısı Şekil 2.4’de ve bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1 ‘de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Silisyum yarı iletkeninin bazı özellikleri

Özellik	
Ergime Noktası (°C)	1420
Kaynama Noktası (°C)	2355
Sertlik (Mohs)	6,5
Isıl iletkenlik (w/m.K)	150
Örgü parametresi (nm)	0.543
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.33
Dielektrik Katsayısı	12
Kırılma İndisi	3,9

Saf silisyum 3A gruplarındaki elementlerle katlandırıldıklarında p tipi ve 5A gruplarındaki elementlerle katlandırıldıklarında ise n tipi katkı yarı iletkenler oluşur ve bu yöntemle elektriksel davranışları büyük ölçüde değişir. Silisyum atomuna periyodik cetvelin V. grup elementlerinden (As, Sb, P, N) biri katkılı olduğunda n-tipi silisyum elde edilir. V. grup elementlerin son yörüngelerinde beş valans elektronu bulunur. Bu elektronların dördü silisyum atomunun dört valans elektronu ile kovalent bağ kurar, kalan elektron ise katkı atomuna zayıf elektriksel kuvvet ile bağlıdır ve çok kolay iyonlaşır. Yani katkı atomu silisyum kristaline bir elektron vermiş olur ve bu elektron

örgü içinde bağımsız hareket edebilir. Katkı atomu elektron verdiği için donör, donör atomları ile katkılı silisyum ise n-tipi olur. Donör atomlarının yarı iletken içinde buldukları enerji seviyesi, yasak bant aralığında ve iletim bandı alt sınırı yakınındadır.

Akseptör enerji seviyesi  $E_d$ ,

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e}\right) E_H \quad (2.1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada,  $\epsilon_r$  yarı iletkenin bağıl dielektrik sabiti,  $m_e$ ; elektronun kütlesi,  $m_e^*$ ; elektronun etkin kütlesi ve  $E_H$ ; hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir (13,6 eV). n-tipi yarı iletkende donörün iyonlaşmasıyla valans bandında delik oluşmaz. Donör konsantrasyonuna bağlı olarak n-tipi yarı iletkende elektron konsantrasyonu delik konsantrasyonundan büyük olacağından, elektriksel iletkenlikte elektronların rolü daha fazla olacaktır. Bu nedenle n-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları (n) elektronlar, azınlık yük taşıyıcıları (p) ise deliklerdir.

Silisyum atomuna periyodik cetvelin III. grup elementlerinden ( In, Ga, Al, B ) biri katkılıandığında p-tipi silisyum elde edilir. III. grup elementlerin son yörüngelerinde üç valans elektronu bulunur. Bu elektronların üçü silisyum atomunun üç valans elektronu ile kovalent bağ kurar, ancak III. Grup atomun bir elektron eksikliği vardır ve bu nedenle de atomun elektron bağlarından biri boş kalır. Bu delik diğer Si = Si bağlarından kapılan bir elektronla doldurulabilir ve delik elektronun yerine geçer. Böylece silisyum atomunun valans bandında bir delik oluşur ve örgü içerisinde III. Grup elementten bağımsız olarak hareket eder. Yani katkı atomu silisyum kristalinden bir elektron almış olur. Katkı atomu elektron aldığı için akseptör, akseptör atomları ile katkılı silisyum ise p-tipi olur. Akseptör atomlarının yarı iletken içinde buldukları enerji seviyesi, yasak bant aralığında ve valans bandı üst sınırı yakınındadır.

Akseptör enerji seviyesi  $E_a$ ,

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h}\right) E_H \quad (2.2)$$

Bağıntısı ile verilir. Burada,  $\epsilon_r$ ; yarı iletkenin bağıl dielektrik sabiti,  $m_h$ ; deliğin kütlesi,  $m_h^*$ ; deliğin etkin kütlesi ve  $E_H$ ; hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir (13.6 eV).

p-tipi yarı iletkende akseptör atomunun valans bandından bir elektron koparmasıyla valans bandında delik oluşur ancak bu boşluğa karşılık iletim bandına bir elektron çıkmaz. Akseptör konsantrasyonuna bağlı olarak p-tipi yarı iletkende valans bandındaki delik konsantrasyonu iletim bandındaki elektron konsantrasyonundan büyük olacağından, elektriksel iletkenlikte deliklerin rolü daha fazla olacaktır. Bu nedenle p-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları (p) delikler, azınlık yük taşıyıcıları (n) ise elektronlardır.

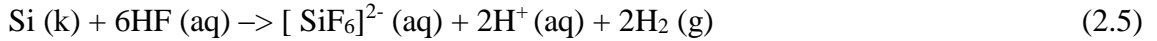
### 2.1.2. Silisyumun Reaksiyonları

Silisyumun parlak yüzeyi, silisyum oksit ile kaplanarak hava ile etkileşmesi engellenir. 900 °C' da silisyum oksijen ile reaksiyona girerek silisyum oksidi oluşturur (2.3). Sıcaklık 1400 °C' a çıkarıldığı zaman ise havadaki azot (N<sub>2</sub>) ile reaksiyona girer (2.4).



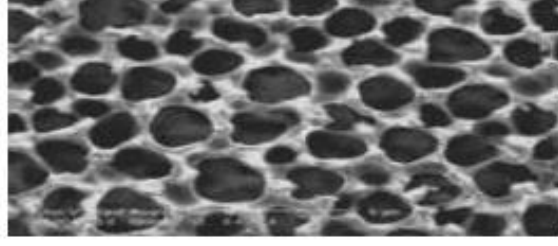
Silisyum, su ve su buharına karşı reaksiyon vermez.

Silisyum normal koşullar altında, asitler ile reaksiyona girmez. Sadece şartlar sağlandığında HF ile reaksiyon girer (2.5).



### 2.2. Gözenekli Silisyum

Bir gözenekli silisyum film tabakası, silisyum katman yüzeyinin elektrokimyasal anodizasyonu ile hazırlanır (Collins *et al.* 1997).



**Şekil 2.5.** Gözenekli silisyumun elektron mikroskobu görüntüsü (Collins *et al.* 1997)

Bilindiği gibi mikro yapı ve kristal yapı analizi için, X-Işını Kırınımı (X.R.D.) kullanılmaktadır. X-Işını Kırınımı analizine göre, GS tabakası tek kristal bir yapıya sahiptir ve orijinal silisyumun kristalografik durumu korunmaktadır. Bununla birlikte, elektron demeti kırınımı analizine göre de, sadece tabaka yüzeyi üzerinde bulunan polikristal silisyumlar görülmüştür (Nasır 1994).

Gözenekli silisyumun lüminesans (ışık saçma) özelliği oldukça yeni bir gelişme ise de, gözenekli silisyum 1956' da silisyumun elektro parlatılması metotlarıyla ilgili bir çalışma esnasında keşfedilmiştir (Uhlir, 1956). Gözenekli silisyumun yapısal özellikleri ve üretim koşulları arasındaki ilgi, daha sonra yapılan çalışmalarda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Buna göre; HF konsantrasyonu, aşındırma sırasında aydınlatma olup olmadığı, akım yoğunluğu, silisyumun katılama tipi ve öz direncinin gözenekli tabakanın morfolojisini etkilemektedir (Smith ve Collins 1992). Si nanokristallerinin boyut ve şeklinin hazırlama koşullarına bağlı olduğu Kanemitsu (1995) tarafından da bildirilmiştir. Ayrıca, gözenek yapısının Si katmanının tipine (n-tipi veya p-tipi) ve anodizasyon parametrelerine (HF asit konsantrasyonu, akım yoğunluğu, aydınlatma vs.) bağlı olduğunu belirtmiştir (Ömür 1999).

### 2.2.1. Gözenekli Silisyumun Oluşum Kimyası

Silisyumun elektrokimyasal aşındırılmasıyla ilgili birkaç farklı model bulunmakla birlikte bunların arasında gözenekli silisyum araştırmalarına katılan bilim adamlarının çoğunun kabul ettiği mekanizma bir boşluğun başlattığı gözenekli silisyumun oluşum mekanizmasıdır.

Gözenek, oluşum süresince gerçekleşen anodik reaksiyon şeklinde yazılabilir. Reaksiyon sonunda kalan ürün  $H_2SiF_6$  veya bazen onun iyonize formu olmaktadır. Gözenek oluşumu süresince meydana gelen 4 silisyum elektronundan sadece ikisi yüzeyde yük transferine katılırken diğer ikisi de kararsız hidrojen oluşumuna katılmaktadır.

Silisyum çözünme reaksiyonları için önerilen çeşitli modeller arasında Lehmann ve Gösele'nin önerdiği mekanizma çok daha fazla kabul görmüştür. Şekil 2.12'de görülen bu oluşum mekanizması adım adım değerlendirilirse;

Şekil 2.12-a Bir boşluğun silisyum yüzeyine gelmesiyle  $F^-$  iyonlarının silisyum yüzeyine gelme eğilimi artar ve  $Si-H$  bağlarını yıkarak  $Si-F$  bağı oluştururlar;



Reaksiyon sonunda kalan ürün  $H_2SiF_6$  veya bazen onun iyonize formu olmaktadır. 2.6'da gösterilen gözenek oluşum süresince gelen 4 silisyum elektronundan sadece ikisi yüzeyde yük transferine katılırken diğer ikisi de kararsız hidrojen oluşumuna katılmaktadır.

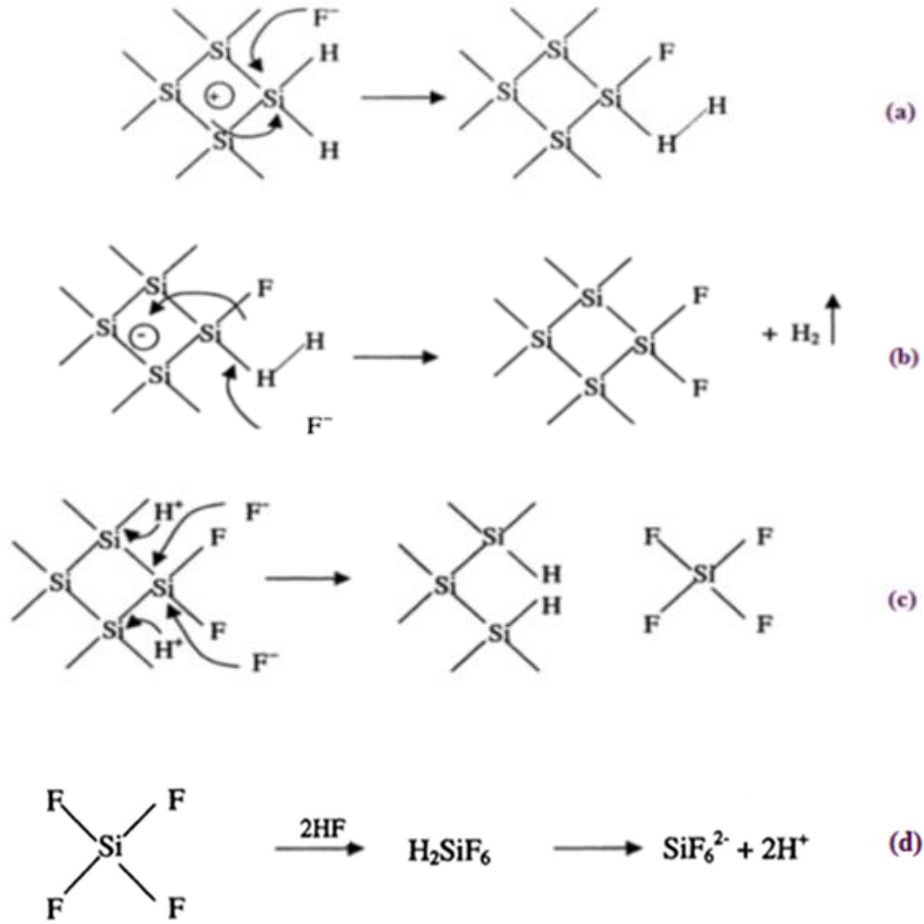
Silisyum çözünme reaksiyonları için önerilen çeşitli modeller arasında Lehmann ve Gösele'nin önerdiği mekanizma çok daha fazla kabul görmüştür. Şekil 2.6'da görülen bu oluşum mekanizması adım adım değerlendirilirse;

Şekil 2.6 - a Bir boşluğun silisyum yüzeyine gelmesiyle  $F^-$  iyonlarının silisyum yüzeyine gelme eğilimi artar ve  $Si-H$  bağlarını yıkarak  $Si-F$  bağı oluştururlar,

Şekil 2.6 - b  $Si-F$  bağındaki florun polarize etkisinden dolayı başka  $F^-$  iyonları da silisyum yüzeyine gelir ve  $H_2$  açığa çıkar,

Şekil 2.6 - c, d  $Si-F$  bağlarının oluşturduğu indüklenmiş polarizasyondan dolayı  $Si-Si$  bağlarındaki elektron yoğunluğu azalır ve  $Si-F$  yoğunluğu artar ve  $SiF_6^{2-} + 2H^+$  tepkimesi oluşur.

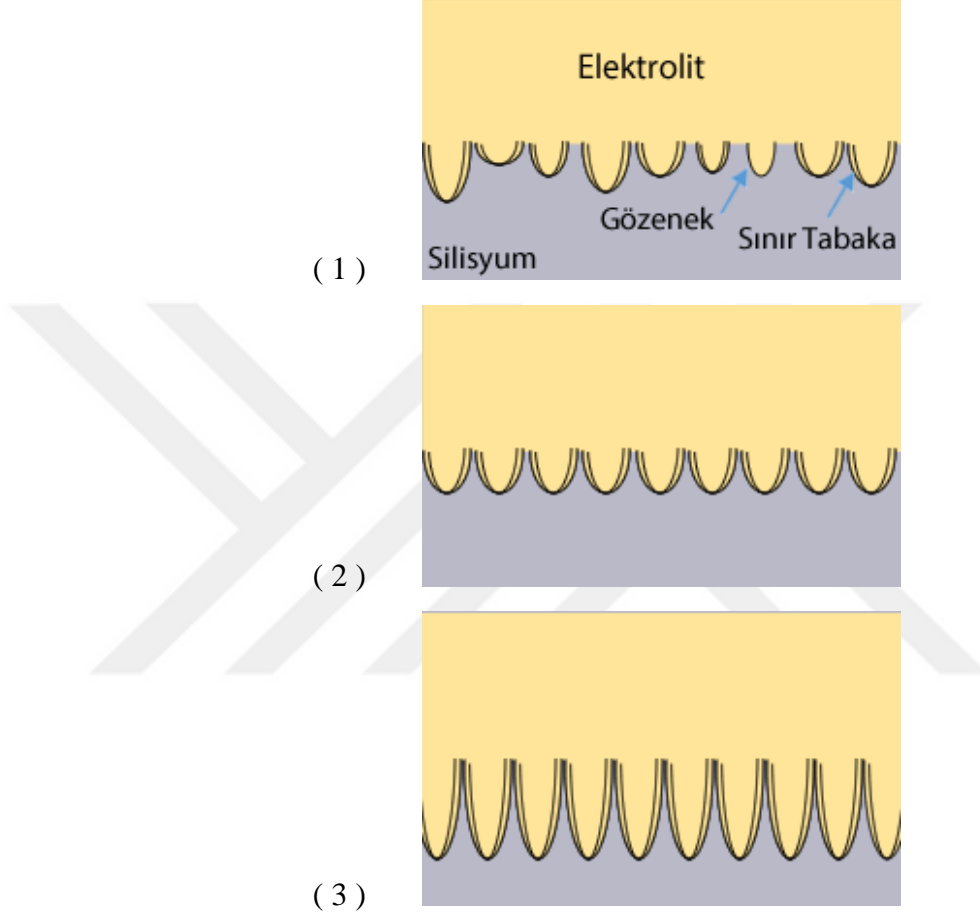




**Şekil 2.6.** Lehman ve Gösele tarafından öngörülen silisyumun aşınma seması (Lehman *et al.* 1991)

Akım yoğunluğu kritik değerin üstüne çıkarsa, gözenekli silisyum filmi silisyum tabandan kopmaktadır. Düşük akım yoğunluklu rejimde, gözenekli silisyum oluşumunu incelersek; Si/elektrolit ara yüzünde yüzeydeki hareketli yük taşıyıcılarının tüketilmesiyle bir bölge oluşur (Şekil 2.7). Bu bölge katkısız silisyumla karşılaştırıldığında yüksek dirençlidir. Yüksek katkı n ve p- tipi silisyum için incedir.

Katkı seviyesinin belirli bir durumuna kadar düşük katkılı p- tipi silisyum için ise bu tabaka oluşmaz.



**Şekil 2.7.** Gözenekli Silisyumda gözenek oluşum mekanizması. (1) Başlangıçta silisyum yüzeyinde gelişen gözenekler, (2) Gözeneklerin yönelimli büyümesi ve sınır tabakanın oluşumu, (3) Gözenek oluşumunun ileri safhası (Bisi *et al.* 2000)

Şekil 2.7'den şu sonuçları çıkarabiliriz.

1. Gözeneklerin boyutu hem sınır bölgesinin genişliği hem de yük transfer mekanizmasıyla ilişkilidir.

2. Yüksek katkılı altlıkta (silisyum) yük transferinde yük tünellemesi baskındır ve sınır bölge genişliği gözenek boyutuna yansır, 10 nm civarında gözenek oluşumu gözlenir.
3. Düşük katkılı silisyumda karanlıkta anodizasyon ile oluşan gözenekli silisyumda gözenek boyutu katkı yoğunluğuna bakmaksızın, yaklaşık 10-100 nm (mezo gözenek) aralığındadır.
4. Aydınlatma altında ise gözenek boyutu katkı yoğunluğu ve anodizasyon şartlarına bağlıdır ve gözenek çapları 0.1-20 nm (makro gözenekli) aralığındadır.

**Çizelge 2.2.** IUPAC gözenek boyutunun sınıflandırılması (Bisi *et al.* 2000)

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

Gözenekli silisyum oluşumunu açıklamak için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bazı modeller Si-HF sisteminin deneysel koşullarla ilişkisini kuran çözünme mekanizması ile ilgili iken bir diğer model ise silisyum-elektrolit ara yüzeyinde elektrik alanın yeniden dağılımına dayanır. Kuantum sınırlamanın etkin olduğunu belirten modeller de bulunmaktadır. Aşağıda bu modeller açıklamalarıyla verilmektedir.

### 1. Beale modeli

Beale modelinde (Beale 1985) tek kristal silisyum yüzeyinde de gözenekli silisyum filmin meydana gelebilmesi için silisyumun anot, platinin ise katot işlevi gördüğü anodizasyon sistemine uygulanan akım dikkate alınmıştır. Elektrik alanla birlikte yüzeyde bölgesel düzensizlikler meydana geldiği, p-tipi silisyumda Si-HF sisteminde kutuplaşmanın kolaylıkla gerçekleştiği ve boşluk oluşumu ile silisyumun aşınmaya başlaması mekanizmayı açıklamaktadır. Yüksek katkılı n-tipi silisyumdan gözenekli silisyum oluşumu ancak akım geçişinin yanında aydınlatma ile birlikte mümkün

olmaktadır. Her iki kristal tipi (n ya da p) için de yüksek gerilim gereklidir. Silisyumdaki akım geçişi ve aydınlatma, yüzey bozuklukları ve bölgesel boşlukların oluşumuna neden olur. Bu olay gözeneklerin büyümesini başlatarak yüzeyin düzgün olmayan çözünmesine yol açar ve çözünme zinciri devam eder. Beale modelinin temel avantajı katı sistemlere uygun olmasıdır. Bu model aynı zamanda bant diyagramlarına ve Schottky bariyerlerine uyumlu sonuçlar verir.

## 2. Difüzyonla Sınırlı Model

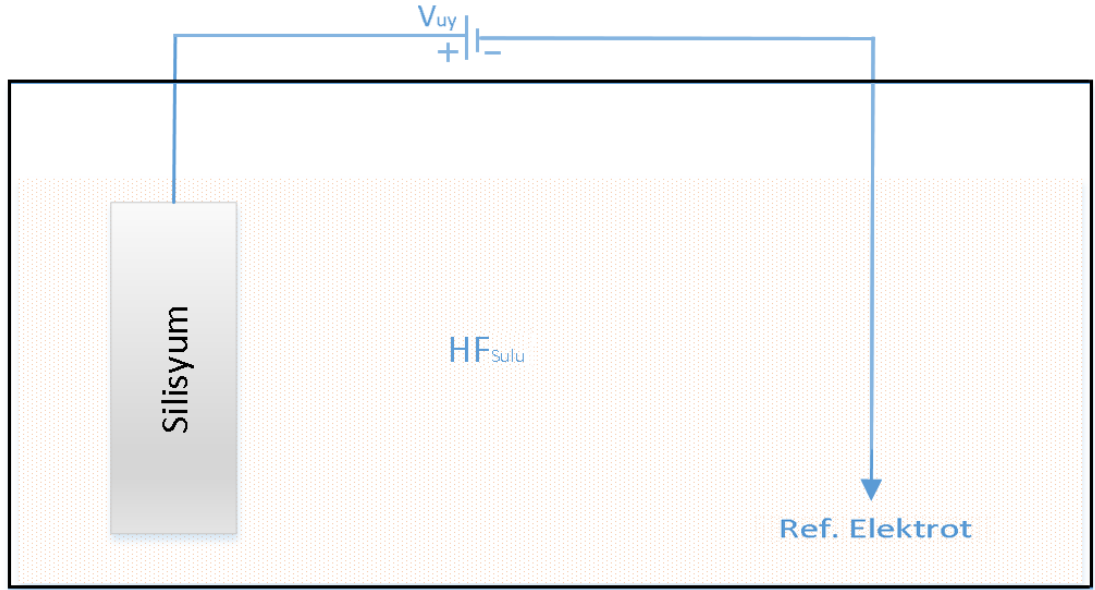
Difüzyonla Sınırlı Model, gözenekli silisyum oluşumunu rastgele adımlar olarak tanımlar. Gözenekler oluşurken boşluk silisyum yüzeyinin içine difüze olur ve silisyum atomları ile oksitleşme reaksiyonuna girer. Bunu elektronların difüzyonla yüzeyden ayrılması takip eder. Bu hareketin doğası rastgeledir ve rastgele boşlukların oluşumuna neden olur. Reaksiyon zinciri devam eder ve yüzeyde düzensiz çözünme ile birlikte gözenek oluşumu sürer. Hidroflorik asit konsantrasyonu ve uygulanan potansiyel, gözeneklilik sürecini kontrol eder (Smith and Collins 1992). Bu modelin temel avantajı difüzyon fiziği ve elektrokimyasal olaylarla uyumudur.

## 3. Kuantum Sınırlama Modeli

Bu modelde Collins *et al.* (1997) gözenekli silisyumun doğasını kuantum sınırlama modeli ile açıklamışlardır. Bu modele göre, gözenekli silisyumun yapısı kuantum noktalardan meydana gelmektedir. İletkenlik bandındaki elektronlar bu nano-boyutlardaki potansiyel engeller ile sınırlandırılır. Ancak potansiyel engeli asabilecek kadar yüksek enerjiye sahip olan yük taşıyıcıları kristalde etkin olabilirler. Böylece, en düşük enerjili elektron geçişinin enerjisi artar. Bu da gözenekli silisyumun oda sıcaklığında fotoluminesans göstermesini açıklamaktadır. Geçiş enerjisinin giderek yükselmesi ile bu süreç gözenekli silisyumda boşluk üretimini durdurur ve üst limit böylece belirlenir.

### 2.2.2. Elektrokimyasal Aşındırma Temelleri

Gözenekli Silisyumun en önemli avantajı temel ve kolay uygulanabilir bir yöntem ile oluşturulmasıdır. Temel anodizasyon hücresi Şekil 2.8’de görülmektedir.



**Şekil 2.8.** Geleneksel anodizasyon hücresinin yandan şematik görünümü (Canham 1997)

Burada anot olarak tek kristal silisyum, katot olarak Ref. Elektrot platin (Pt) ve elektrolit olarak hidroflorik asit çözeltisi kullanılmaktadır. Dışarıdan bir gerilim uygulandığında anot ile katot arasında akım gözlenmektedir. Anodizasyon hücresi yapımında ise teflon gibi aside dayanıklı polimerler kullanılmaktadır.

Anodizasyon olarak adlandırılan bu sistemi oluşturan bileşenler tek tek incelemek gerekirse:

**Elektrolit:** Elektrolit olarak genellikle seyreltik hidroflorik asit çözeltisi kullanılmaktadır. Malzemenin ilk keşfinde hidroflorik asit seyreltmede de-iyonize veya yüksek saflıkta su kullanılmakla birlikte gözenekli silisyum oluşturma tarihsel gelişimi sürecinde farklı seyrelticilerin kullanılabilmesi ileri sürülmüştür. Temiz silisyum yüzeyinin su sevmeyen (hidrofobik) olması nedeniyle hidroflorik asit sulu çözeltisine saf Etanol katılarak silisyum yüzeyinin ıslanabilirliği artırılmıştır. Etanol ile hazırlanan çözeltiler gözenek oluşumu sırasında gözenek içine sızarken, sulu hidroflorik asit çözeltisi gözenek içine sızamaz. Bu özellik gözenekli silisyum tabakasının derinde tekdüze ve homojen olması için çok önemli kabul edilmiştir. Bunlara ek olarak anodizasyon sürecinde hidrojen gazı oluşumu meydana gelmektedir.

Bu nokta gözenekli silisyum fabrikasyonu bölümünde ayrıntılı olarak incelenecektir. Hidroflorik asit sulu çözeltisi kullanıldığında hidrojen gazı baloncukları silisyum yüzeye yapışırken Etanol içeren veya sadece Etanol ile seyreltilen hidroflorik asit çözeltisi kullanıldığında, bu baloncukların silisyum yüzeyinden uzaklaştıkları gözlenmiştir. Gözenekli silisyum oluşumuna sıcaklığın etkisini azaltmak veya en aza indirmek için, hidroflorik asit çözeltisine gliserol ekleyerek çözelti akışkanlığı artırılmaktadır.

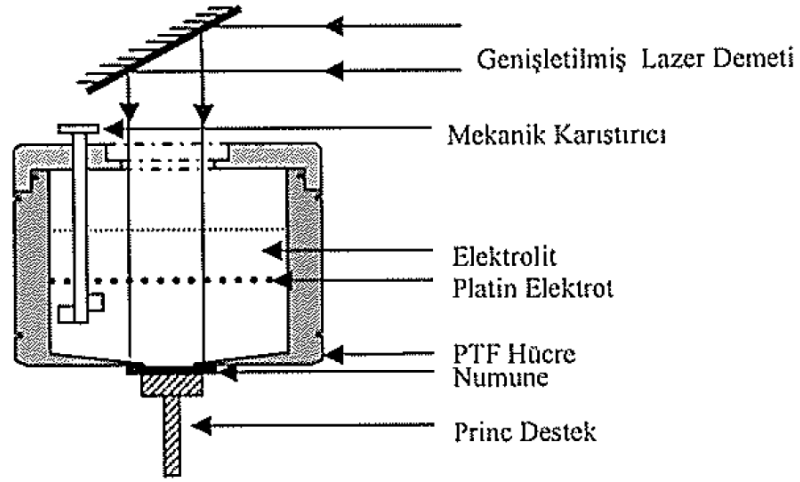
**Potansiyel Fark:** Silisyum yüzeyinin aşınmasının kontrolünün diğer bir önemli bileşeni anodik akım veya potansiyeldir. Silisyum yüzeyi düşük pH 'lı hidroflorik asit etkisiyle aşınmazken, silisyumun anot olarak kullanıldığı anodizasyon işleminde uygulanan potansiyel farkı silisyumun hidroflorik asit ile aşındırılmasını sağlar. Bu sistemlerde silisyum anot gibi davranır ve katot olarak platin kullanılır. Anot ile katot arasında gerilim farkı oluşturulduğunda Si altlık üzerinde gözenekli silisyum film oluşur. Anodizasyon süreci sonunda oluşan gözenekli silisyumun kalınlık, gözeneklilik gibi özelliklerinin düzenliliği, homojenliğini sağlamak için sabit tutulmaktadır.

### **Anodizasyon Hücreleri:**

1.TiP: Şekil 2.8'de en temel anodizasyon hücresi görülmektedir. Bu hücrenin avantajı temel ve kolay uygulanabilir olmasıdır. Dezavantajı ise A ve B noktaları arasındaki potansiyel farkı nedeniyle oluşabilecek homojen olmayan yapılardır.

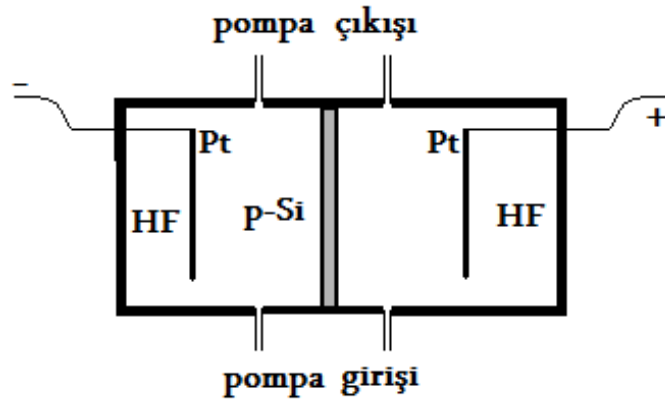
2.TiP: Şekil 2.9'da görülen anodizasyon hücresinin geleneksel hücreden (Şekil 2.8) farkı, tek kristal silisyum anodizasyon hücresinin tabanına yerleştirilmiş olması ve arka kontak olarak alüminyum (Al) tabaka kullanılmasıdır. Alüminyum tabaka düşük dirençli tek kristal silisyum için yeterli olurken yüksek dirençli silisyumun arka yüzeyine alüminyum kaplanmalı ve tavlanarak omik hale getirilmelidir. Kontakın omik olması, gözenekli silisyum yapının homojen olmasında çok önemlidir.

Gözenekli silisyum tek kristal silisyumun sadece elektrolit tarafına bakan yüzeyinde oluşmaktadır. Bu sistem gözeneklilik ve kalınlık parametrelerinin kontrolü açısından daha kolay uygulamaya sahip olması nedeniyle geniş çapta kullanılmaktadır.



**Şekil 2.9.** Tek tanklı anodizasyon hücresinin yandan şematik görünümü (Karacalı 2003).

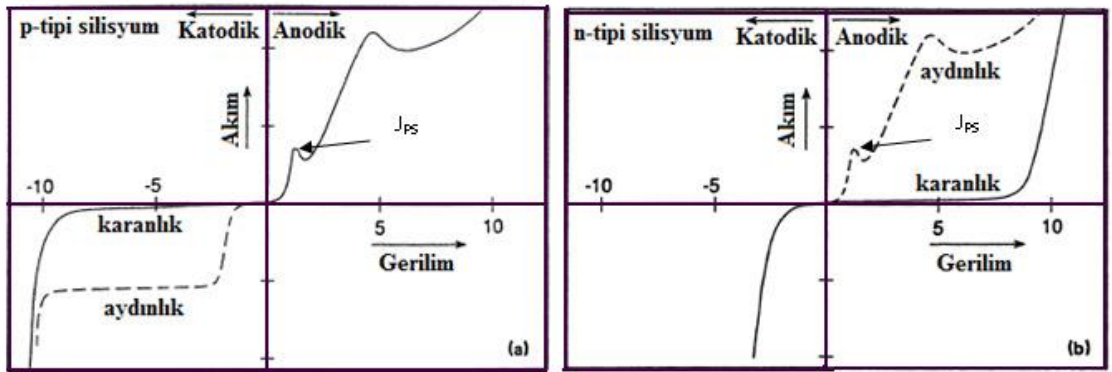
3.TiP: Şekil 2.10'da çift tank geometrilili anodizasyon hücresi görülmektedir. Burada arka kontak görevini elektrolit görmektedir. Böylece oluşan gözenekli silisyum yapı metal kirliliğinden de arındırılmış olmaktadır. Tek kristal silisyum ile iki bölüme ayrılan hücrede iki geniş tabaka platinlerin biri anot biri katot olmak üzere simetrik olarak hidroflorik asit elektrolite daldırılmıştır. Elektrolit; kimyasal pompalar ile dolaştırılmaktadır ve bu sayede H<sub>2</sub> balonları silisyum yüzeyinden uzaklaştırılmaktadır. Aydınlatma gerektiren anodizasyon süreçlerinde anodizasyon hücresinin yapıldığı malzeme 15%'e kadar ışık geçirgen, hidroflorik aside dayanıklı pleksiglas kullanılarak problem çözülmektedir.



**Şekil 2.10.** Çift tanklı anodizasyon hücresinin yandan şematik görünümü (Yüksel 2010)

Elektrolit/Yarı iletken Akım Gerilim Karakteristiği: Son zamanlarda gözenekli silisyum çalışmalarında alternatif modeller kullanılmasına rağmen birçok çalışmada gözenekli silisyum oluşumunun elektrokimyasal akım-gerilim karakteristiğiyle ilgili olarak yarı iletken/elektrolit ara yüzünün Schottky diyot modeliyle ilişkilendirmişlerdir. Bu modeli Collins *et al.* (1992) öne sürmüşlerdir. Silisyum elektrokimyasının temel bilgisi gözenek oluşumunun temelini oluşturmaktadır. Sulu çözelti içerisinde silisyuma potansiyel fark uygulandığında, ölçülebilir bir dış akım meydana gelir. Bununla birlikte, silisyum/elektrolit ara yüzeyinde akım geçişi olmadığı için elektronik akımdan iyonik akıma bir değişim olmaktadır. Bu anlamda, silisyum ara yüzeyinde bir veya daha çok maddenin kimyasal yollarla birleşmesi ya da ayrışması meydana gelir. Potansiyel uygulanmasıyla gözenekli silisyum oluşumunun doğası olan kesin kimyasal reaksiyon başlar.

Şekil-2.11’de hidroflorik asidin sulu çözeltisi içindeki katkılı n ve p-tipi silisyum için tipik akım gerilim karakteristiği görülmektedir. Bazı önemli farklar dışında, yarı iletken/elektrolit ara yüzü için akım-gerilim eğrileri ideal Schottky diyot karakteristiği göstermektedir.



**Şekil 2.11.** Hidroflorik asidin sulu çözeltisi içindeki katkılı (a) p-tipi ve (b) n- tipi silisyum

Şekil 2.11’de görüldüğü üzere ideal Schottky diyot karakteristiğinden farklı durumlar söz konusudur. Bunlar;



1. n ve p tipi silisyumun çoğunluk yük taşıyıcıları farklı olmakla birlikte ara yüzde meydana gelen kimyasal reaksiyon aynıdır.
2. Ters yön karanlık akımlar normal Schottky diyotta beklenen değerlerden yaklaşık üç kat fazladır.
3. Hem n hem de p-tipi silisyum katodik olarak kutulanmış ve anot olarak görev yapmaktadır. Katodik reaksiyonun en önemli kısmı Si/HF ara yüzünde hidrojen gazı oluşumuyla birlikte suyun indirgenmesidir.
4. Silisyum aşındırma sisteminde anot olarak rol oynadığında yüzeyi çözünmektedir ve silisyum içine doğru derin boşluklar oluşur. Eğer anodik potansiyel belirli bir değerin (bu değer sınır akım değeri olarak bilinir (JGS)) üstüne çıkarsa silisyum yüzeyinden gözenekli silisyum film kopar ve silisyum yüzeyi elektro-cilalama olayı gerçekleşerek yüzey ayna görünümü alır.
5. Sınır akım değerini belirleyen küçük elektro cilalama piki (JGS), Şekil-2.11'de görülmektedir. Anodik aşındırmada sistemdeki akım yoğunluğu (J) değeri, sınır akım yoğunluğu değerinin (JGS) altında ise ( $0 < J < J_{GS}$ ) gözenekli silisyum yapı tek kristal silisyum yüzeyinde oluşur.
6. Sınır akım yoğunluğunun değeri, aşındırma parametreleri ve silisyum katkı konsantrasyonuna bağlıdır.
7. Silisyum yüzeyinde aşınma, boşluğun oluşturduğu kusurdan başladığı için n-tipi silisyum için gözlenen akım-gerilim karakteristiği, ancak anodizasyon sürecinde silisyum yüzeyinin aydınlatılması durumunda gözlenebilmekte yani gözenekli silisyum (Şekil 2.11-b) oluşmaktadır (Collins 1992).

### **2.2.3. Gözenekli Silisyuma Anodizasyon Koşullarının Etkisi**

Gözenekli Silisyumun tüm özellikleri, gözeneklilik, kalınlık, gözenek çapı ve mikro yapısı, anodizasyon koşullarına bağlı olarak değişir. Anodizasyon koşullarıysa;

- Hidroflorik asit konsantrasyonuna, hidroflorik asitin seyreltilmesi için kullanılan sıvının cinsine (distile su veya Etanol ve bunların oranlı karışımları),
- Akım yoğunluğuna,
- Tek kristal silisyumun tipi ve direncine,
- Anodizasyon süresine,
- n-tipi silisyum için aydınlatmaya,
- Sıcaklığa,
- Ortamın nemine,
- Kurutma koşullarına,

bağlıdır. Yapılan çalışmalarda, yüksek hidroflorik asit konsantrasyonlu elektrolit kullanıldığında silisyum yüzeyinde daha düşük boyutlu gözenek ve gözeneklilige sahip gözenekli silisyum yapı oluştuğu, anodizasyon süresi arttıkça gözenekli silisyum tabakanın kalınlığı arttığı gözlenirken, bununla birlikte gözenekli silisyum tabakanın derinlerinde anizotropinin de arttığı bildirilmiştir.

Gözeneklilik, gözenekli silisyum tabakanın oluşumu sürecinde yapılan kütle ölçümleriyle belirlenebilmektedir. Anodizasyon öncesi tek kristal silisyumun kütlesi ( $m_1$ ), anodizasyon sonrası GS/Si yapının kütlesi ( $m_2$ ) ve gözenekli silisyum tabakanın akım değeri artırılarak veya KOH/NaOH'a daldırılarak tek kristal silisyumdan ayılmasından sonra kalan tek kristal silisyumun kütlesi ( $m_3$ ) ise gözeneklilik ( $P(\%)$ ),

$$P(\%) = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_3)} \quad (2.7)$$

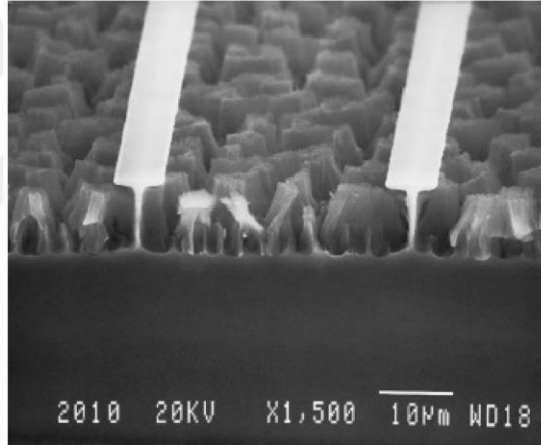
formülüyle gözenekli silisyum tabakanın kalınlığı ise,

$$d = \frac{(m_1 - m_3)}{\rho \cdot S} \quad (2.8)$$

ifadesi ile belirlenmektedir.

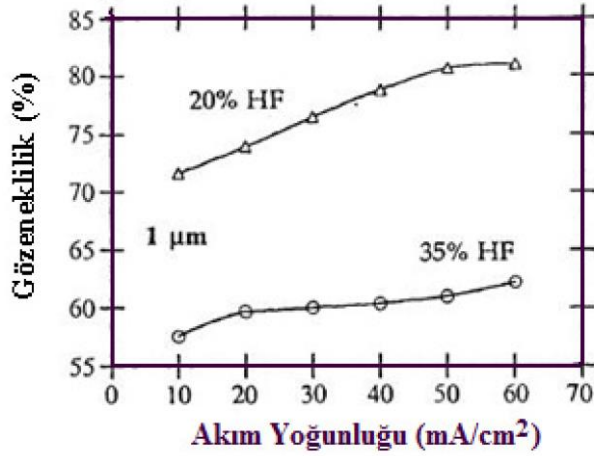
Burada  $\rho$  tek kristal silisyumun yoğunluğu, S tek kristal silisyumda koparılan gözenekli silisyum tabakanın yüzey alanıdır.

Gözeneklilik, mikroskobik bir parametredir ve gözenekli silisyum filmler hakkında mikroskobik bir bilgi vermediği için tartışmalara açık olabilir. Bu nedenle SEM analizi çalışmalara açıklık getirmiştir. Literatür bilgileri, n-tipi silisyum malzeme kullanılarak hazırlanan gözenekli silisyum filmlerin gözenek boyutlarının p-tipine göre daha büyük olduğunu ve katkı konsantrasyonunun artmasıyla gözenekli silisyum yapısındaki boşlukların azaldığı söylenmektedir (Şekil 2.14). Ayrıca anodizasyon şartlarının, gözenekliliğe değiştirdiği çeşitli yayınlarda SEM analizi ile gösterilmiştir (Smith and Collins 1992).



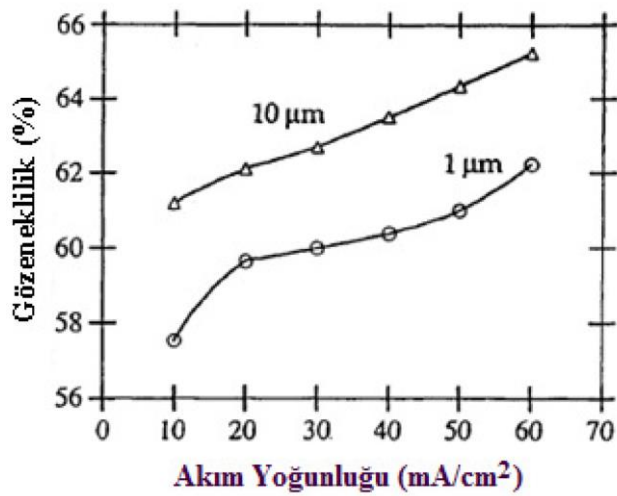
**Şekil 2.12.** Gözenekli silisyumun elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı (Bisi *et al.* 2000)

Önce Halimaoui (1997) sonra Pavesi *et al.* (1997), yüksek ve düşük katkılı p-tipi tek kristal silisyumdan farklı hidroflorik asit konsantrasyonlarında elde edilen farklı akım yoğunluklu anodizasyon süreçlerinde akım yoğunluğu arttıkça gözenekliliğin arttığını belirlemişlerdir. Şekil 2.13'te düşük katkılı p- tipi silisyumda ( $\sim 1W.cm$ ) iki farklı hidroflorik asit konsantrasyonu için oluşturulan sabit kalınlıklı ( $d=1\mu m$ ) gözenekli silisyumun gözenekliliğinin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi görülmektedir.



**Şekil 2.13.** İki farklı hidroflorik asit konsantrasyonu için akım yoğunluğuna bağlı olarak düşük katkılı p- silisyumdan (~1 W.cm) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi (Canham 1997)

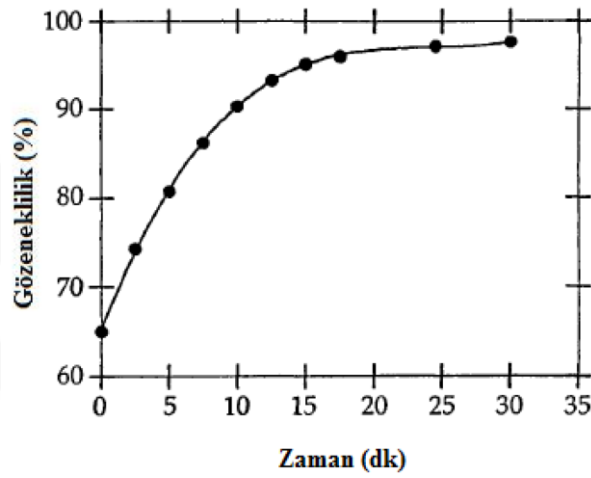
Şekil 2.13'ten görüldüğü gibi 1µm kalınlığa sahip gözenekli silisyum tabaka için, farklı iki hidroflorik asit konsantrasyonunda, akım yoğunluğunun artmasıyla gözenekliliğin arttığı gözükmemektedir. Yine sabit bir akım yoğunluğu için hidroflorik asit konsantrasyonunun artmasıyla gözenekliliğin arttığı açıktır. Gözenekli silisyum tabakanın kalınlığı değiştiğinde gözenekliliğinin akım yoğunluğuna bağlı değişimi çalışmada görülmektedir (Şekil 2.16).



**Şekil 2.14.** İki farklı gözenekli silisyum kalınlığı için akım yoğunluğuna bağlı olarak düşük katkılı p- silisyumdan (~1W.cm) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi. Hidroflorik asit konsantrasyonu, 35% (Canham 1997)

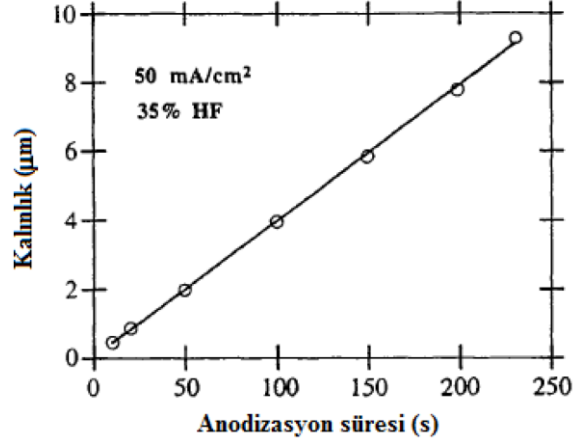
Düşük katkılı p-silisyumdan ( $\sim 1 \text{ W.cm}$ ) sabit hidroflorik asit konsantrasyonu (5%) için oluşturulan sabit kalınlıklı ( $d=1 \mu\text{m}$ ) gözenekli silisyumun gözenekliliğinin anodizasyon süresine bağlı olarak değişimi Şekil 2.14'de görülmektedir.

Düşük katkılı p- silisyumdan ( $\sim 1 \text{ W.cm}$ ) sabit hidroflorik asit konsantrasyonu (5%) için oluşturulan sabit kalınlıklı ( $d=1 \mu\text{m}$ ) gözenekli silisyumun gözenekliliğinin anodizasyon süresine bağlı olarak 15 dk. ya kadar artmış bu süreden fazla sürelerde yaklaşık olarak sabit kalmıştır.



**Şekil 2.15.** Sabit akım yoğunluğu, hidroflorik asit konsantrasyonu (5%) ve sabit gözenekli silisyum kalınlığı ( $d=1 \mu\text{m}$ ) için akım yoğunluğuna bağlı olarak düşük katkılı p- silisyumdan ( $\sim 1 \text{ W.cm}$ ) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin anodizasyon süresine bağlı olarak değişimi (Canham 1997)

Sabit akım yoğunluğu ( $50 \text{ mA/cm}^2$ ) ve hidroflorik asit konsantrasyonunda (35%) gravimetrik yöntemle belirlenen gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının anodizasyon süresine bağlı olarak değişimi Şekil 2.15'de görülmektedir.

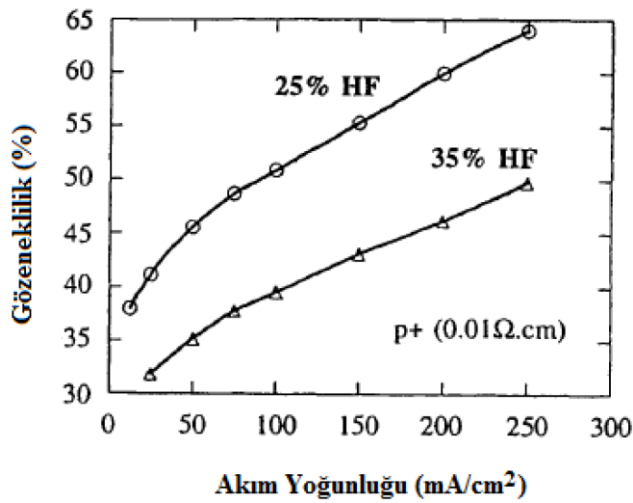


**Şekil 2.16.** Sabit akım yoğunluğu ve hidroflorik asit konsantrasyonu için gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının anodizasyon süresine bağlı değişimi (Canham 1997)

Şekilden de görüldüğü gibi anodizasyon süresi arttıkça gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının doğrusal olarak arttığı görülmektedir.

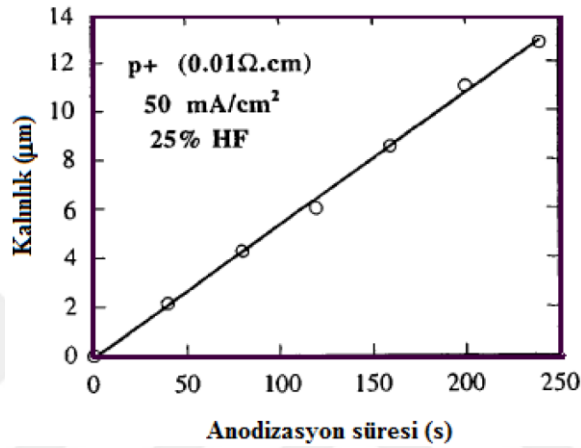
Yüksek katkılı p+ silisyumdan ( $\sim 0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ ) iki farklı hidroflorik asit konsantrasyonu için oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi Şekil 2.16'da görülmektedir.

Anlaşılabileceği üzere, her iki hidroflorik asit konsantrasyonunda akım yoğunluğu arttıkça gözeneklilik artmaktadır. Yine sabit bir akım yoğunluğu için hidroflorik asit konsantrasyonunun artmasıyla gözenekliliğin azaldığı görülmektedir.



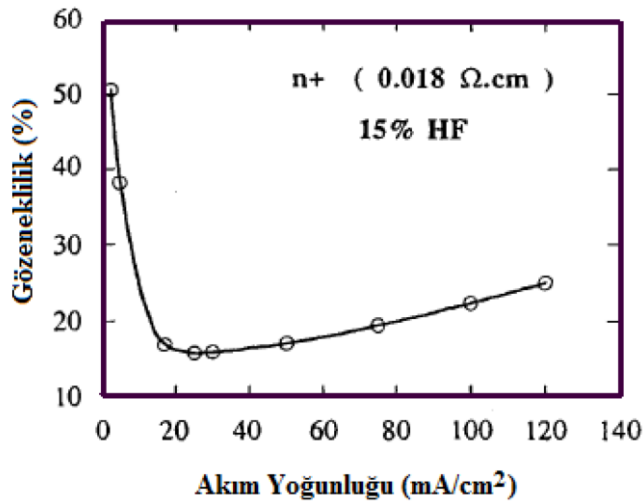
**Şekil 2.17.** İki farklı hidroflorik asit konsantrasyonu için akım yoğunluğuna bağlı olarak gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi (Canham 1997)

Şekil 2.18’de sabit akım yoğunluğu ( $50 \text{ mA/cm}^2$ ) ve hidroflorik asit konsantrasyonunda (25%) gravimetrik yöntemle belirlenen gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının anodizasyon süresine bağlı olarak değişimi görülmektedir. Şekil 2.20’den de görüldüğü gibi anodizasyon süresi arttıkça gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının lineer olarak arttığı görülmektedir.



**Şekil 2.18.** Sabit akım yoğunluğu ve hidroflorik asit konsantrasyonu için gözenekli silisyum tabakanın kalınlığının anodizasyon süresine bağlı değişimi (Canham 1997).

Şekil 2.19’de yüksek katkılı n+ silisyumdan ( $\sim 0.018 \text{ W.cm}$ ) 15% hidroflorik asit konsantrasyonu için oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi görülmektedir.



**Şekil 2.19.** %15 hidroflorik asit konsantrasyonu için akım yoğunluğuna bağlı olarak yüksek katkılı n+ silisyumdan ( $\sim 0.018 \text{ W.cm}$ ) oluşturulan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin değişimi (Canham 1997)

**Çizelge 2.3.** Gözenekli silisyum oluşumunda anodizasyon şartlarının gözenekli silisyum parametrelerine etkisi (Bisi *et al.* 2000)

Bu parametrelerin artması ile	Gözeneklilik	Aşınma oranı	Sınır akım değeri
<b>HF Konsantrasyonu</b>	Azalıır	Azalıır	Artar
<b>Akım Yoğunluğu</b>	Artar	Artar	-
<b>Anodizasyon süresi</b>	Artar	Sabit	-
<b>Sıcaklık</b>	-	-	Artar
<b>Si katkı seviyesi (p-tipi)</b>	Azalıır	Artar	Artar
<b>Si katkı seviyesi (n-tipi)</b>	Artar	Artar	-

Örneğin, yüksek akım yoğunluklarında ve düşük hidroflorik asit konsantrasyonlarında, gözeneklerin daha fazla genişlediği ve n-tipi silisyum tek kristali üzerinde hazırlanan gözenekli silisyumun gözenekliliğinin lineer boru şeklinde olmaya eğilim gösterdiği John and Singh (1995) tarafından benzetim metoduyla gösterilmiştir.

Yine başka bir çalışmada Collins *et al.* (1997) zayıf katkılı p-tipi silisyum ile yapılan gözenekli silisyum süngerimsi bir morfolojiye sahipken, n-tipi ve yoğun katkılı p-tipi silisyum ile yapılan gözenekli silisyumun sütunlar halinde gözeneklendiğini ve gözenekliliğin 50-90 % oranları arasında artmasıyla birlikte lüminesans şiddetinin arttığını göstermiştir.

Beale *et al.* (1985) farklı morfolojili gözenekli silisyum yapıları tek kristal silisyumun katkı tipi, hidroflorik asit konsantrasyonu, anodizasyon akım yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak elde etmiş ve incelemişlerdir.

### 2.2.3. Gözenekli Silisyumda Çoklu Tabaka Oluşturma

GS 'nin en önemli özelliklerinden biri dağlamanın gözenek uçlarında devam etmesidir. Bu özelliğinden dolayı farklı anodizasyon şartları uygulanarak farklı gözeneklilikte ve farklı kırılma indislerinde tabakalar oluşturmak mümkündür. GS çoklu tabaka, gözenekliliği bir tabakadan diğerine değiştirme olarak adlandırılabilir. Temel olarak iki



tip GS çoklu tabaka oluşturma yöntemi vardır. Birincisi, anodizasyon boyunca akım yoğunluğu değiştirilerek ikincisi ise malzeme katkı yoğunluğu derinlikle değiştirilerek elde edilir. İkinci durumda keskin ara yüzeyler elde edilir. Ancak birinci yöntem ucuz ve kolay olduğu için yaygın çalışma konusu olmaktadır. Çünkü ikinci tip için Si taban malzeme üzerine tabakalı ince film büyütme gereklidir. Gerekli altyapı itibarı ile bu teknik ileri laboratuvar imkânları gerektirmektedir (MBE veya iyon ekme teknikleri gibi).

GS çoklu tabakalar akım yoğunluğu değiştirilerek değişik mertebede gözeneklilik oluşturulması ile elde edilir. Bu yolla zamana karşı akım yoğunluğu profili sayesinde derinliğe karşı gözeneklilik miktarı değişen periyodik bir yapı elde edilebilir. Böylece kırılma indisi farklı tabakalar oluşturulur. HF yoğunluğu ve malzeme katkısı, kırılma indisinde azami değişiminde çok önemlidir. Kırılma indisi için en fazla değişim miktarı aşırı katkılanmış p tipi silisyumda elde edilir. N tipi malzemelerde fazla çalışma olmadığından bu konu bilinmemektedir. Çok tabakalı GS, tek tabakalı GS' den optik olarak farklıdır. Bu tür yapılar parlak görünüme ve farklı renge sahiptir ve kantitatif yansıma ölçümlerinde en yüksek yansıma değerleri gösterirler.

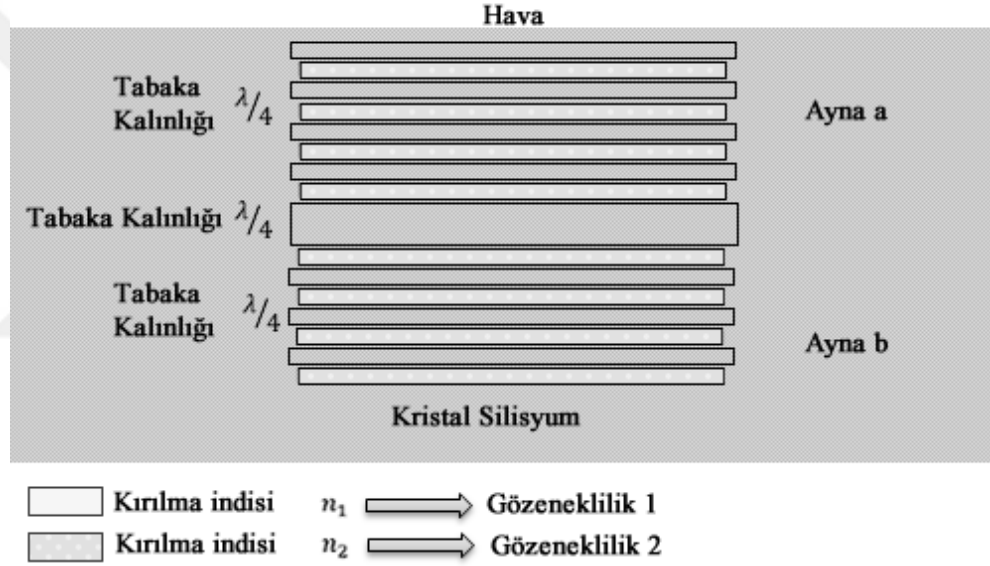
GS çoklu tabakaların tabii uygulaması dielektrik Bragg yansıtıcılardır (DBR). Bunlar düşük ( $n_L$ ) ve yüksek ( $n_n$ ) kırılma indisli ayrı tabaka yığınlarıdır. Dalga boylarının verilen değerlerinde çok yüksek yansıma ulaşmak için yığındaki her tabakanın optik kalınlığı ( $n_d$ ), merkez dalga boyunun değerinin  $1/4$  'ü mertebesindedir. Yüksek yansıma bölgesi durdurucu bant olarak adlandırılır ve  $n_h/n_L$  oranıyla ve tabakaların sayısı ile artar.

En yüksek yansıma büyük merkez dalga boyunda ulaşılır. Bu, GS tabakalarının soğurma etkisi yüzündendir. Dalga boyu azaldıkça GS tabakaların soğurma etkisi artmaktadır.

Periyodik olarak tekrarlanan GS tabakaların sayısı optimize edilmesi gerekir. En iyi sonuca 15 periyodda ulaşılmıştır. GS 'nin S-bandında (400-800nm) çok geniş spektrum aralığı vardır. Bu durum GS mikrovuk (GSM) kullanılarak daraltılabilir. GSM elde etmek için aktif tabakalar bir optiksel boşluk içine yerleştirilmelidir. İki DBR arasına gömülen merkez aktif GS tabaka ile elde edilen Fabry-Perot kullanılarak sağlanabilir.

GSM de hem aynalar hem de mikrovokuk GS den oluşur. GSM de foton ve eksiton kipleri arasındaki çiftlenme zayıftır. Işık yayını merkez tabakaların tümünde gerçekleşir ancak dışarı yönelen spektrumun yarı yükseklik genişliğinin azaltılmasında DBR aktif rol oynar ve sonuçta ışımaya spektrumu keskin bir tepeye dönüştürür. Anodizasyon parametreleri ve başlangıç malzemenin tipi önemlidir. Örneğin malzeme katkısı dikkate alınırsa  $p^+$  tipi, anodizasyon akımı ve kırılma indisinde yüksek varyasyona izin verilirken  $p^+$  tipi daha fazla ışıltama gösterir.

$p^+$  ve  $p^-$  arasında en önemli fark; Durdurucu-Bant,  $p^-$  esaslı GSM de daha dardır.



**Şekil 2.20.** GS'den oluşturulmuş Fabry-Perrot filtre yapısının diyagramı (Pavesi 1997)

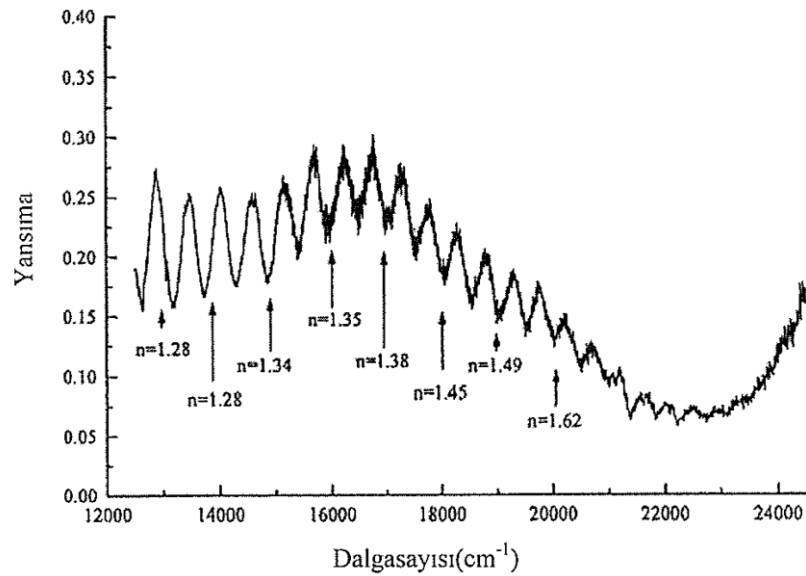
Yarı iletken yüzeyden ışımaya lazer yapılarında Fabry-Perrot (FP) filtre temeline dayanan Bragg yansıtıcıları kullanılmaktadır (Singh 1995). GS'nin yapısı gereği Bragg yansıtıcılar ve mikroboşluk değişik akım ve değişik süreler uygulanarak elde edilebilmektedir. Bragg yansıtıcılar GS tabakalarından oluştuğu için iyi bir FP filtre elde etmede her bir tabakadaki GS dağılımının homojen olması, tabakalar arası yüzeyin düz ve pürüzsüz olması gereklidir. GS kullanılarak yapılan FP filtrelerde genelde geleneksel elektrokimyasal anodik dağlama metodu uygulanmaktadır. Bu metotta HF'nin silisyum ile kimyasal reaksiyonu gözenek içinde HF konsantrasyonunun azalması

nedeniyle yavaş olmaktadır. Aynı zamanda hidrojen gazı çıkışı yüzünden de gözenek içinde ve dışındaki HF in yer değiştirmesi etkilenecektir. Bu çıkan hidrojen gazı numunenin hücre ile temas ettiği kenar kısımlarda tutunarak hidrojen baloncukları birikmesine sebep olarak numunenin tüm yüzeyi boyunca homojen GS dağılımını engelleyecektir. Bu sorunu Hou ve arkadaşları (1996) tarafından önerilen darbeli anodik dağlama (puls anodic etching) metodu büyük ölçüde çözmüştür. Bu metotta akım veya gerilim darbeli olarak gönderildiği için darbeler arası zamanda işlem duracağı için hem gözenek içindeki HF devamlı tazelenecek hem de çıkan hidrojen gazı bir sonraki darbeye kadar gözeneği terk edecektir. Hou ve arkadaşları aynı zamanda bu metotla yapılan numunelerde PL veriminin arttığını da göstermişlerdir. Darbeli anodik dağlama üzerine yapılan daha sonraki bir çalışmada ise darbe genişliği değiştirilerek PL tepesinin geniş enerji aralığında ayarlama yapılabileceği gösterilmiştir (Grover *et al.* 2000).

GS'nin kırılma indisi  $n$ , ince numunelerin yansıma ölçümlerindeki girişim saçığından (fringes) ele edilebilir (Şekil 2.8). Yansıma ölçümlerinde birbirini ardışık takip eden iki yansıma tepesinden (2.7) optik kalınlık ( $n_d$ ) elde edilir (Mazzoleni and Pavesi 1995).

$$2nd \left( \frac{1}{\lambda_r} \right) - \left( \frac{1}{\lambda_{r+1}} \right) = 1 \quad (2.9)$$

Burada  $n$  kırılma indisi,  $d$  tabaka kalınlığı ve  $\lambda_r$ ' inci yansıma en yüksektir.



**Şekil 2.21.** 6.8 µm ve %75 gözenekliliğe sahip GS'nin yansıma spektrumu (Pavesi

1997).

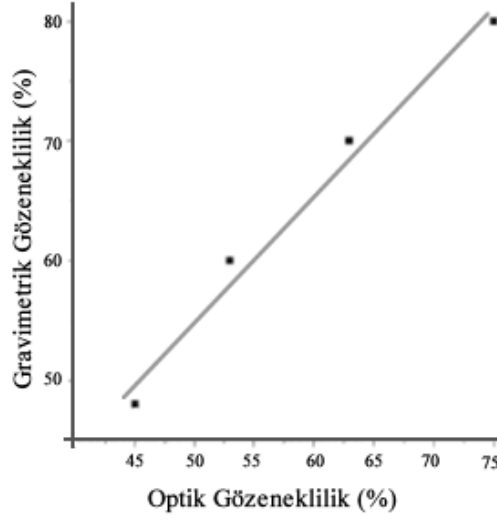
GS'nin kırılma indisinin külçe silisyumun kırılma indisinden daha küçük ve havanın kırılma indisinden daha büyük olması beklenir. Temelde GS hava ve silisyumun karışımı olduğu için gözeneklilik arttıkça kırılma indisi azalacaktır. Kırılma indisinin gerçek kısmı ile dielektrik sabiti arasında bir ilişki olduğu için ( $n = \sqrt{\varepsilon}$ ) Bruggeman etkin ortam teorisi (EMA) gözeneklilik ve kırılma indisi arasında uygun bir ilişki sunmaktadır (2.8).

$$f \frac{\varepsilon - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon - \varepsilon_{eff}} + (1 - f) \left( \frac{\varepsilon_M - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon - \varepsilon_{eff}} \right) = 0 \quad (2.10)$$

Burada  $f$  gözeneklilik,  $\varepsilon$  silisyumun dielektrik sabiti,  $\varepsilon_M$  havanın dielektrik sabiti,  $\varepsilon_{eff}$  GS'nin etkin dielektrik sabitidir.

#### 2.2.4. Çoklu Tabaka Gözenekli Silisyumda Optik Yansımanın Temelleri

Gözeneklilik, gravimetrik (terazi ile tartarak), gaz tutama (adsorbition) BET tekniği veya yansıma ölçümleri ile EMA tekniği birlikte kullanarak tayin edilebilmektedir. BET tekniği ile gözeneklilik tahininde doğru sonuca ulaşmak için gözenekliliğin homojen ve mikrogözenek boyutlarda olması gereklidir. Çünkü BET tekniği mikrogözenek yapılarda doğruya yakın sonuç verirken mezo ve makrogözenek yapılarda hata oranı artmaktadır.



**Şekil 2.22.** Gravimetrik ve optik ölçümlerle elde edilmiş gözenekliliğin karşılaştırılması (Pavesi 1997)

Şekil 2.22 da verildiğine göre gravimetrik gözeneklilik tayini ve yansıma ölçümleri ile EMA tekniğinin birlikte kullanılması sonucu optiksel gözeneklilik tayini arasında doğrusal bir ilişki vardır. Özellikle çoklu tabaka GS'lerde her bir tabakanın gözenekliliği dolaylı olarak optik yolla tayin edilebilmektedir.

$10^6 \Omega\text{cm}$  gibi yüksek öz direnci GS'nin iletkenliğinin ihmal edilebilir ( $\sigma = 0$ ) derecede küçük olması dolayısı ile yarı yalıtkan – dielektrik - özellik göstermektedir. Bu nedenle GS 'nin elektriksel ve optiksel özellikleri dielektrik sabiti  $\epsilon$  ile tanımlanır. Kalınlığı  $h$ , kırılma indisi  $n$ , dielektrik sabiti  $\epsilon$  olan homojen dielektrik film için yansıma ve geçirme katsayıları Maxwell denklemleri aracılığı ile bulunabilir. Elektromanyetik dalga özelliği gösteren ışığın elektrik ve manyetik alan bileşenleri mevcuttur. Işığın geldiği düzleme dik olan elektrik alan bileşenine enine elektrik dalgası (TE) ve manyetik alan bileşenine enine manyetik dalga (TM) denir,  $z$  yönü boyunca  $h$  kalınlığında olan homojen dielektrik film için  $yz$  düzleminde gelen TE dalgaları için  $E_y = E_z = 0$  dır. Zamana bağımlılığı  $\exp(-i\omega t)$  olarak kabul ederek Maxwell denklemleri altı skaler denkleme dönüşür.

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} + \frac{i\epsilon\omega}{c} E_x = 0 \quad (2.11a)$$

$$\frac{i\omega\mu}{c} H_x = 0 \quad (2.12a)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 \quad (2.11b)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} + \frac{i\omega\mu}{c} H_y = 0 \quad (2.12b)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = 0 \quad (2.11c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} + \frac{i\omega\mu}{c} E_x = 0 \quad (2.12c)$$

(2.11a), (2.12b) ve (2.12c) denklemlerinden  $H_y$  ve  $H_z$  yok edilerek

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 E_x = \frac{d(\log \mu)}{dz} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (2.13)$$

$$n^2 = \varepsilon\mu, k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \alpha = n \sin \theta \quad (2.14)$$

(2.13)'ü çözmek için biri  $y$ 'yi içeren diğeri  $z$ 'yi içeren iki fonksiyon tarafından meydana geldiğini düşünürsek;

$$E_x(y, z) = Y(y)U(z) \quad (2.15)$$

Buna göre;

$$E_x = U(z)e^{i(K_0\alpha y - \omega t)} \quad (2.16)$$

$H_y$  ve  $H_z$  aynı şekilde

$$H_y = V(z)e^{i(K_0\alpha y - \omega t)} \quad (2.17)$$

$$H_z = W(z)e^{i(K_0\alpha y - \omega t)} \quad (2.18)$$

olur. (2.11a), (2.12b) ve (2.12c) denklemlerinden yararlanarak güç fonksiyonları  $U$ ,  $V$  ve  $W$  ile ilişkili denklemler;

$$V' = ik_0[\alpha W + \varepsilon U] \quad (2.19a)$$

$$U' = ik_0\mu V \quad (2.19b)$$

$$\alpha U + \mu V = 0 \quad (2.19c)$$

Bu denklemlerden  $\theta$  gelen ışık ile  $z$  eksenindeki açı ve  $\alpha = \sin \theta$  olmak üzere;

$$\frac{d^2 U}{dz^2} + (k_0^2 n^2 \cos^2 \theta) U = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d^2 V}{dz^2} + (k_0^2 n^2 \cos^2 \theta) V = 0$$

elde edilir. Bu iki denklemin çözümünden

$$U(z) = A \cos(k_0 n z \cos \theta) + B \sin(k_0 n z \cos \theta)$$

$$V(z) = \frac{1}{i} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cos \theta \{ B \cos(k_0 n z \cos \theta) - A \sin(k_0 n z \cos \theta) \} \quad (2.20)$$

bulunur.

$$U = F U_0 + f V_0$$

$$U = G U_0 + g V_0 \quad (2.21)$$

(2.20) ve (2.21) denklemleri,  $\beta = k_0 n z \cos \theta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n z \cos \theta$  ve  $p = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cos \theta$  olmak

üzere homojen dielektrik filmin karakteristik matrisi;

$$M(z) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$m_{11} = \cos(k_0 n z \cos \theta) = \cos \beta = m_{22}$$

$$m_{12} = -\frac{i}{p} \sin(k_0 n z \cos \theta) = -\frac{i}{p} \sin \beta \quad (2.23)$$

$$m_{21} = -i p \sin(k_0 n s \cos\theta) = -i p \sin\beta$$

olmaktadır.

GS'nin manyetik geçirgenliği  $\mu = 1$  dir. Buna göre  $p = \sqrt{\epsilon} \cos\theta = n \cos\theta$  olur. Gelen, yansıyan ve geçen dalgaların elektriksel alanlarını sırasıyla G, R, T olarak göstererek,  $\epsilon_1$  ve  $\epsilon_2$ , birinci ve sonuncu homojen dielektrik tabakaların dielektrik sabiti,  $\theta_1$  ve  $\theta_2$ , gelen ve geçen dalgaların z eksenini ile yaptıkları açı olarak kabul ederek TE dalgası için aşağıdaki denklemler kullanılabilir.

$$U_0 = G + R \quad U(z) = T \quad (2.24)$$

$$V_0 = p_1(G - R) \quad V(z) = p_1 T$$

$$p_1 = \sqrt{\epsilon} \cos\theta_1 \quad p_1 = \sqrt{\epsilon} \cos\theta_1 \quad (2.25)$$

$U_0$ ,  $V_0$ ,  $U$  ve  $V$  arasındaki ilişki 2.21 denkleminde verilmişti. 2.21, 2.24 ve 2.25 denklemleri birlikte kullanarak;

$$G + R = (m_{11} + m_{12}p_1)T \quad (2.26)$$

$$p_1(G - R) = (m_{21} + m_{22}p_1)T$$

$$r = \frac{R}{G} = \frac{(m_{11} + m_{12}p_1)p_1 - (m_{21} + m_{22}p_1)}{(m_{11} + m_{12}p_1)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_1)} \quad (2.27)$$

$$t = \frac{T}{G} = \frac{2p_1}{(m_{11} + m_{12}p_1)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_1)}$$

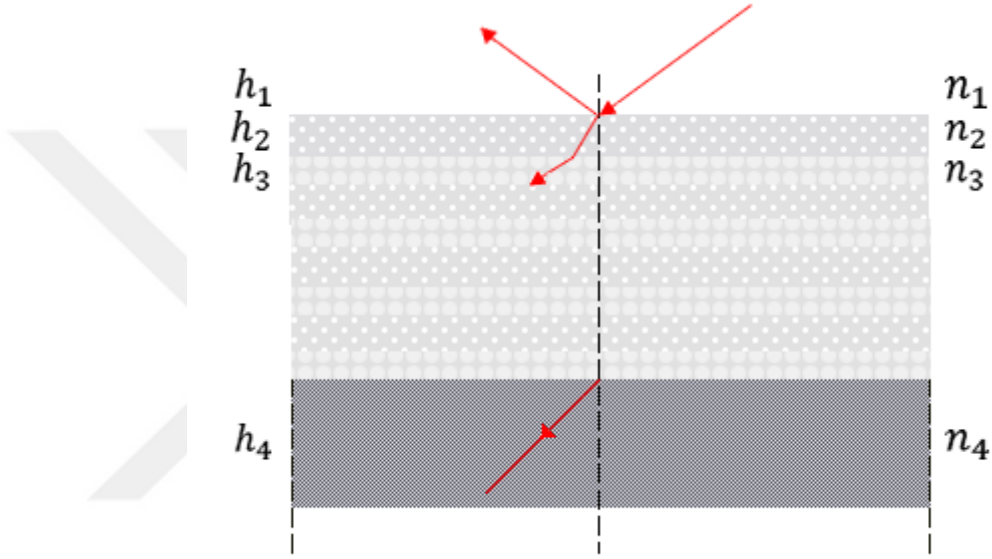
Yansıma katsıyısı  $\mathfrak{R}$  ve geçirgenlik katsayıyısı  $\mathfrak{S}$ , r ve t katsayılarından elde edilir.

$$\mathfrak{R} = |r|^2$$

$$\mathfrak{S} = \frac{p_1}{p_1} |t|^2 \quad (2.28)$$



Şimdiye kadar  $h$  kalınlığında, kırılma indisi  $n$ , dielektrik sabiti  $\epsilon$  olan homojen dielektrik tek tabaka film için yansımaya ve geçirme katsayılarını belirleşi gösterildi. Kalınlıkları  $h_2$  ve  $h_3$ , kırılma indisleri düşük ve yüksek  $n_2$  ve  $n_3$  olan homojen ve art arda gelen tabakalardan oluşan yapılar çoklu tabaka olarak adlandırılır. Bu şekilde çoklu tabaka kırılma indisi  $n_1$  ve  $n_2$ , olan iki homojen ortam arasında kabul edilerek yansımaya ve geçirme katsayıları yeniden hesap edilebilir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Periyodik Çoklu tabaka (Born and Wolf 1975)

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 h_2 \cos \theta_2 & \beta_3 &= \frac{2\pi}{\lambda_0} n_3 h_3 \cos \theta_3 \\ p_2 &= n_2 \cos \theta_2 & p_3 &= n_3 \cos \theta_3 \end{aligned} \quad (2.29)$$

İkinci ve üçüncü tabakanın karakteristik matrislerinin çarpımı bir periyodun karakteristik matrisini verir.

$$M_2(h) = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & -\frac{i}{p_2} \sin \beta_2 \\ -ip_2 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & -\frac{i}{p_3} \sin \beta_3 \\ -ip_3 \sin \beta_3 & \cos \beta_3 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$M_2(h) = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{p_3}{p_2} \sin \beta_2 \sin \beta_3 & -\frac{i}{p_2} \sin \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{i}{p_3} \sin \beta_3 \cos \beta_2 \\ -ip_2 \sin \beta_2 \cos \beta_3 - ip_3 \sin \beta_3 \cos \beta_2 & \cos \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{p_2}{p_3} \sin \beta_2 \sin \beta_3 \end{bmatrix}$$

$$a = \cos \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{1}{2} \left( \frac{p_2}{p_3} + \frac{p_3}{p_2} \right) \sin \beta_2 \sin \beta_3 \quad \text{ve} \quad U_n(x) = \frac{\sin[(N+1) \cos^{-1}(x)]}{\sqrt{1-x^2}}$$

İkinci tür *Chebyhev* Polinomu olmak üzere N periyotlu matrislerin çarpımı

$$M_2(Nh) = M_2(h) \cdot M_2(h) \dots \dots M_2(h) = (M_2(h))^N \text{ dir.} \quad (2.31)$$

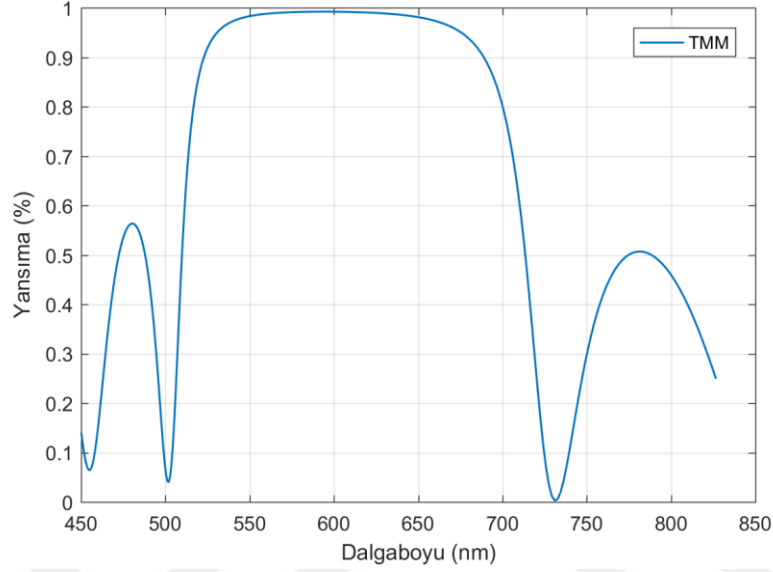
$$(M_2(h))^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \text{ ve}$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= \left[ \cos \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{p_3}{p_2} \sin \beta_2 \sin \beta_3 \right] U_{N-1}(a) - U_{N-2}(a) \\ M_{12} &= -i \left[ \frac{1}{p_2} \sin \beta_2 \cos \beta_3 + \frac{1}{p_3} \sin \beta_3 \cos \beta_2 \right] U_{N-1}(a) \\ M_{21} &= -i [p_2 \sin \beta_2 \cos \beta_3 + p_3 \sin \beta_3 \cos \beta_2] U_{N-1}(a) \\ M_{22} &= -i \left[ \cos \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{p_2}{p_3} \sin \beta_2 \sin \beta_3 \right] U_{N-1}(a) - U_{N-2}(a) \end{aligned} \quad (2.32)$$

şeklindedir.

Bu matris N periyotlu iki farklı kırılma indisi ve kalınlığından oluşmuş çoklu tabakanın karakter matrisi veya transfer matrisi olarak adlandırılır (Born and Wolf 1975) ve çoklu tabaka GS'nin yansıma spektrumunun modellenmesinde kullanılır. Bu matrisin öz vektörleri 2.27 denklemlerinde yerine konduktan sonra 2.28 denklemleri aracılığı ile yansıma katsayısı  $\mathfrak{R}$  ve geçirgenlik katsayısı  $\mathfrak{S}$  elde edilir.

$n_1=1$  (hava),  $n_2=2.1$  ve  $h_2=75$  nm,  $n_3=1.4$  ve  $h_3=100$  nm,  $n_1$ , dalga boyuna bağlı silisyumun kırılma indisi olmak üzere Matlab analiz programında yukardaki denklemlerden yararlanarak 6 periyotlu çoklu tabaka için dalga boyuna bağlı yansımaya modeli (TMM- Transfer Matris Modeli) şekil 2.11 de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



**Şekil 2.24.** 6 Periyotlu ve her periyotta  $n_2=2.1$  ve  $h_2=75$  nm,  $n_3=1.4$  ve  $h_3=100$  nm olan iki tabakadan oluşmuş çoklu tabakanın TMM ile hesaplanan yansımaya spektrumu (Karacalı 2003)

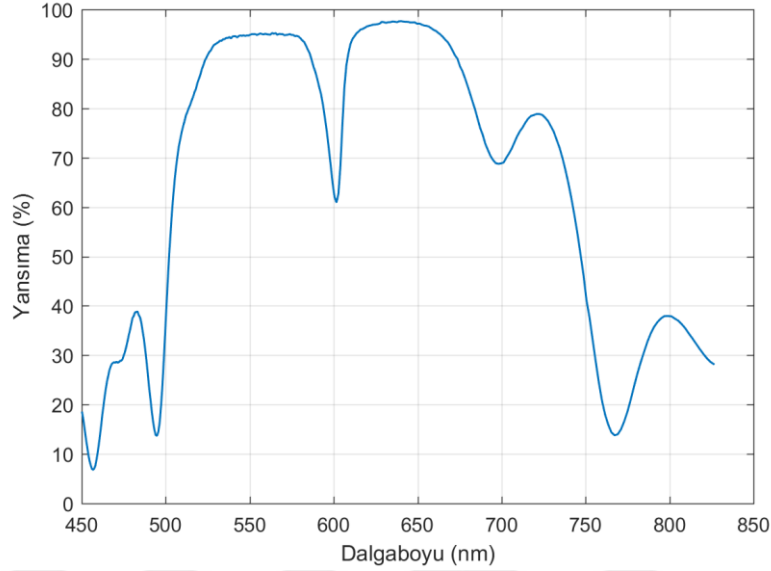
Yüzeiden yayınım yapan lazer (VCSEL) yapılarında ve GS çoklu tabaka ve mikroboşluk yapılarında yukardaki çoklu tabaka için türetilmiş karakteristik matris sadece üst ayna için geçerlidir. VCSEL ve PSM yapıları üst ayna, mikroboşluk (veya aktif tabaka) ve alt ayna tabakalarından oluşur (şekil 2.7).  $M_{üst}$ , üst aynanın karakteristik matrisi,  $M_{alt}$ , alt aynanın karakteristik matrisi ve  $M_{cav}$ , mikrokovuk karakteristik matrisi olmak üzere tüm sistemin transfer matrisi,

$$TM = M_{üst} * M_{cav} * M_{alt} \quad (2.33)$$

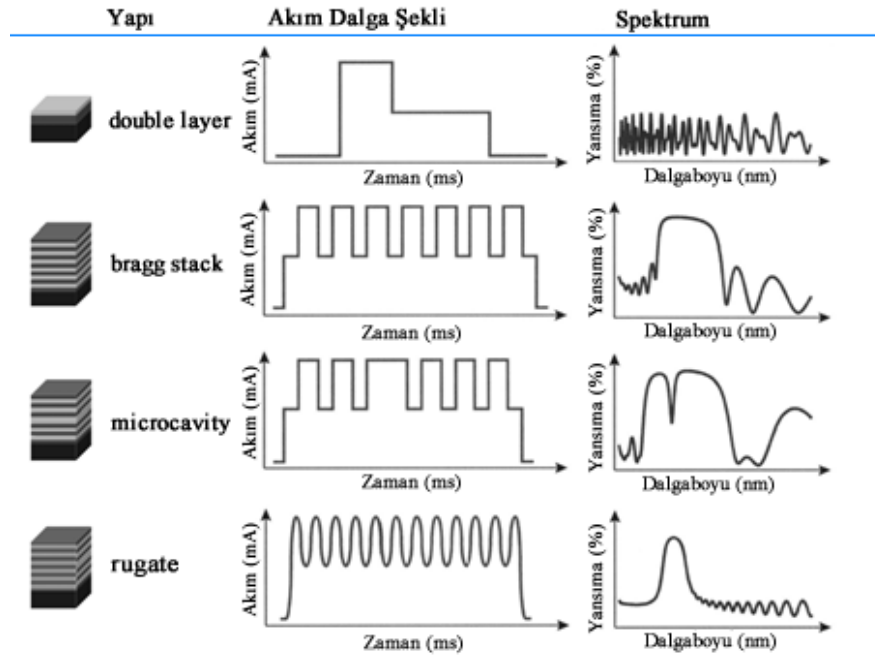
olmaktadır.

$n_1=1$  (hava),  $n_2=2.1$  ve  $h_2=75$  nm,  $n_3=1.4$  ve  $h_3=112.5$  nm,  $n_c$ , dalga boyuna bağlı Silisyumun kırılma indisi,  $n_c=1.35$  ve  $h_c=116.66$  nm olarak alınmıştır. Matlab analiz

programıyla vasıtasıyla yukardaki denklemlerden yararlanarak GSM veya VCSEL için dalga boyuna bağlı yansımaya şekil 2.12 de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



**Şekil 2.25.** 6 Periyodlu ve periyotta  $n_2=2.1$  ve  $h_2=75\text{nm}$ ,  $n_3=1.4$  ve  $h_3=100\text{nm}$  olan iki tabakadan oluşmuş aynalar arasında  $n_c=1.35$  ve  $h_c=125\text{ nm}$  olan mikrovuk için TMM ile hesaplanan yansımaya spektrumu (Karacalı 2003)



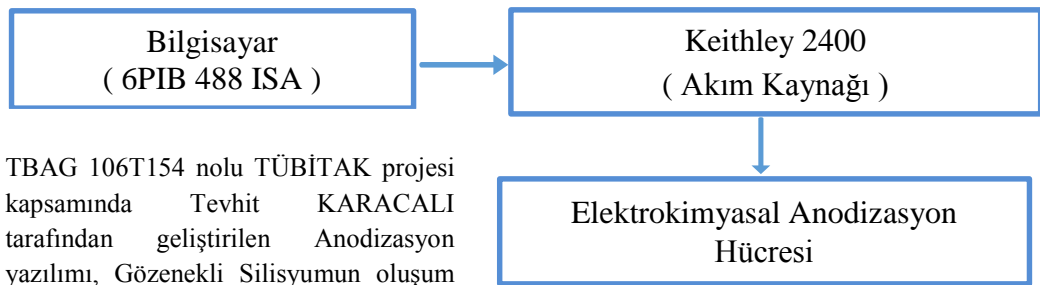
**Şekil 2.26.** Çoklu tabaka Gözenekli Silisyumun üretim şekline göre Optik tepkisi

### 2.2.3. Gözenekli Silisyum Fabrikasyonu için Darbeli Anodik Dağlama Düzenegi

Elektrokimyasal dağlama yöntemi en basit anlamda elektrolit, reaksiyonun gerçekleştiği hücre ve uygulama potansiyeli gibi üç temel kısımdan oluşur. Bunlara ilaveten n tipi numuneler için aydınlatmaya da ihtiyaç vardır. P<sup>++</sup> tipi numunelerde aydınlatmaya ihtiyaç duyulmaz. Ancak oluşumunun kontrollü olmasını sağlamak için temel olarak bu özellikleri sağlayan, bilgisayar ile kumanda edilebilen daha karmaşık bir sistem kullanılır. Bu çalışmada Darbeli anodik dağlama için kurulan sistemin blok şema gösterimi Şekil 2.27' deki gibidir.

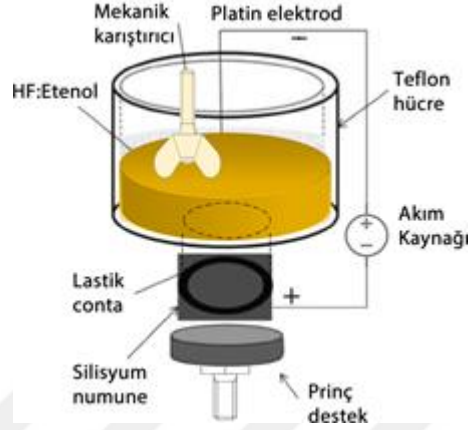
GS oluşumunda kullanılan elektrolitin ana malzemesi HF' dir. Sulandırılmış HF, temiz silisyumun yüzeyinin şu tutmama (hydrophobic) özelliğinden dolayı tutunamaz. Bu nedenle çözeltiye Etanol ilave edilerek çözeltilerin yüzeyi ıslatma özelliği artırılır. Ayrıca Etanol, GS gözenekleri içinde açığa çıkan hidrojen gazının silisyum yüzüne yapışmasını büyük ölçüde engeller. Buna ilaveten GS gözenekleri Etanollü çözeltileri sulu çözeltilerden çok daha iyi emer. GS tabakalarının derinine tekdüzen ve homojen olması için bu durum çok önemlidir. Mekanik karıştırıcı yardımıyla hem açığa çıkan hidrojen gazı ortamdaki büyük ölçüde uzaklaştırılır hem de numune yüzeyine taze çözeltilerin ulaşması sağlanır.

Elektrokimyasal işlemin gerçekleştirildiği hücre genellikle Teflon® gibi asit ve çözücülere dirençli polimerden yapılır.



TBAG 106T154 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında Tevhit KARACALI tarafından geliştirilen Anodizasyon yazılımı, Gözenekli Silisyumun oluşum parametrelerini belirlenmektedir.

**Şekil 2.27.** Darbeli elektrokimyasal anodik dağlama sisteminin blok şeması (Karacalı 2003)



**Şekil 2.28.** GS fabrikasyonunun gerçekleştirildiği hücre

Şekil 2.28’de gösterilen fabrikasyon hücresinin sensör numunesi üretmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir.

- Platin elektrot ile GS elektrot arasındaki mesafe (20 mm)
- Üretim hücresinin iç genişliği (30 mm)
- Üretim hücresinin boyu (70 mm)
- Akım kaynağı (Güç kaynağı akım kaynağı olarak kullanılmıştır)
- GS oluşturulan çap (R= 11 mm, S @ 95 mm<sup>2</sup>)
- HF asidine dayanıklı conta,
- Vida (düzgün bir sıkıştırma için üçlü vida sistemi kullanılmıştır)

Gözenekli silisyum örneği, 0.01-0.02  $\Omega$ -cm öz dirençli, p++ tipi numune kullanılmıştır (n- tipi numune kullanılmış olsaydı numuneye hem omik eklem yapılması hem de numune üzerine ışık verilmesi gerekecekti). Düşük öz dirençli p++ tipi numunelere omik eklem işlemi yapılmamıştır. Pirinç destek içine gömülmüş konik uçlu tungsten

sondaların numuneye fiziki teması ile kolaylıkla omik eklem oluşturulmuştur. Üretim tankı da iyonize su ile ardından etil alkol ile durulanmıştır. Etil alkol (Eth) ile durulama, De iyonize su (DI su) ile durulama, HF: DI su (1:20 hacimsel ) çözeltisi içinde 30 dakika bekletilme, De iyonize su ile birkaç dakika durulama yapılarak ön hazırlama işleminden sonra GS, Şekil 2.28' deki üretim tankına yerleştirilerek üretim aşamasına geçilmiştir.

GS numunesi <100> yönelimli p<sup>++</sup> (0.01-0.02 Ω-cm öz dirençli ) Silikon kıymık üzerinde darbeli anodik aşındırma ile hazırlanmıştır. Çözelti 1: 2 oranında bir HF (% 40) ve Etanol (% 95) karışımıdır. Geniş gözeneklilik aralığı (% 40-% 80) tarafından oluşturulan yüksek yansıtıcı katmanları elde etmek için hem yüksek derecede katkılı altlık hem de 1: 2 çözelti oranları seçilmiştir. Fabry-Perot boşluğuna sahip iki ayna, düşük ve yüksek gözenekli GS katmanları oluşturarak yapılmıştır. Elektrokimyasal anodik aşındırma işlemi, numunenin ve platin telinin seçileceği bir Teflon® hücresinde gerçekleştirilmiştir.

Anot ve katot, sırasıyla 18. Düşük yoğunluklu tabaka için akım yoğunluğu 6 mA / cm<sup>2</sup> ve yüksek gözeneklilik derecesi için 50 mA / cm<sup>2</sup> ve aşındırma süreleri sırasıyla 14.4 ve 5.5 s'dir. Darbe anodizasyon imalat tekniği olarak seçildiğinden etkili aşındırma süreleri sırasıyla yaklaşık olarak 14.4 sn,13 sn' ye ve 5.5 sn de 5 sn ' ye düşürülür (10 Hz ve% 90 görev devri). Bu işlem, üst dağıtılmış Bragg reflektör (DBR) için bilgisayar kontrollü modülasyon ile 6 kez tekrarlanır. Aynı süreç, ancak ters sırayla, alt DBR için gerçekleştirilir. Böylece, iki DBR arasındaki ara yüzeydeki iki bitişik yüksek gözeneklilik alt katmanı mikrokavit oluşturmuştur.

Bu şekilde, 400-900 nm dalga boyu bölgelerinde yansıtıcı spektrumu olan TBAG2 'yi üretmek mümkündür. İşlemden sonra örnek, Etanolde 5 dakika bekletilir ve ortam koşullarında kurutulur.



**Şekil 2.29.** GS fabrikasyonu sonucu üretilen TBAG2 sensörün görüntüsü

### 2.3. Çoklu Sensör Veri Füzyonu

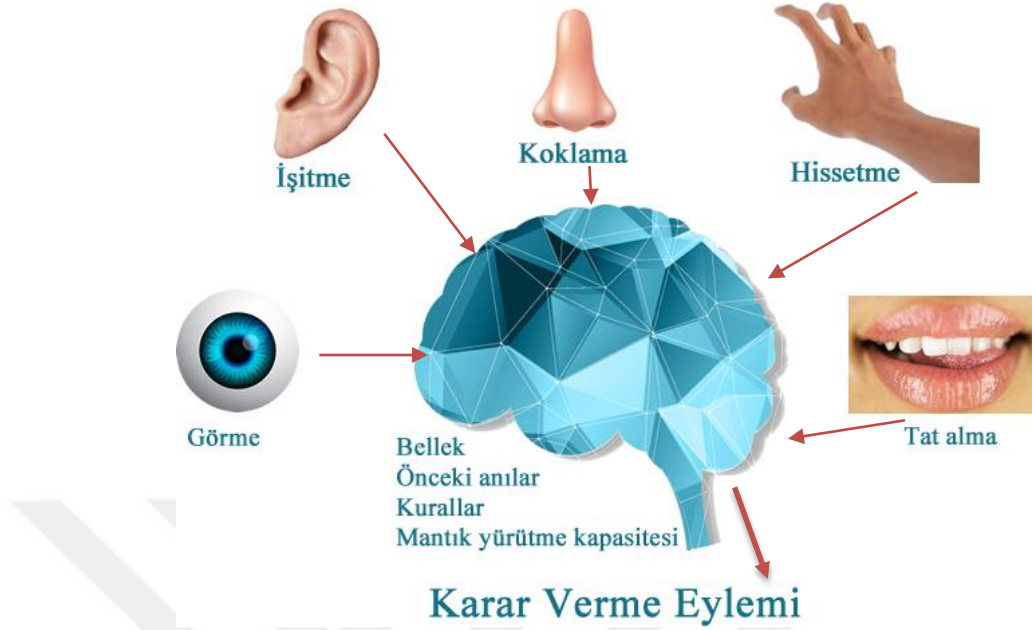
Veri ( bilgi ) füzyonu çeşitli kaynaklardan gelen bilgilerin birleştirilmesi anlamına gelir. Bağımsız veya istenenden fazla bilgi içeren kaynaklardan gelen verilerin birleşimi neticesinde alınan kararlar genellikle kaynakların teker teker kullanılması ile alınan kararlardan daha iyi sonuç üretir. İnsanın görme duyusu, veri füzyonunun avantajlarını ve faydalarını belirtmek için iyi bir örnektir. İnsanın iki gözü farklı görüş açlarına sahiptir ve bu farklı görüş açılarından alınan bilginin beyin tarafından birleştirilmesi sonucu cisimlerin konumunun ve derinliğinin daha kesin olarak algılanmasına sebep olur. Bu nedenle iki gözü kullanılarak çevreden alınacak bilgi tek göz ile elde dılecek bilgilerden daha fazla çevresel bilgi içerir ve bu oldukça kıymetlidir. İki göze sahip olmanın diğler bir avantajı da biri diğlerinin yedeğı durumundadır; gözlerden biri devre dışı kalırsa, derinlik bilgisi azalmış olsa bile diğeri ile görüş hala mümkündür.

İnsan beyni iki gözden gelen bilgiyi çok kısa sürede analiz ederek kolayca birleştirebilir. Fakat iki farklı kameradan gelen görüntü bilgisinin iki sayısı toplar gibi kolayca birleştirilmesi mümkün değıildir. Örneğın 3D görüntülerin oluşturulmasında bu şekilde iki kamera kullanılır. Her iki kameranın sağılamış olduğı görüntüler analiz edilerek bu görüntülerin sağılamış olduğı bilgilerde ortak noktalar ve farklılıklar ortaya konur ve bir algoritma ile ancak birleştirmek mümkün olur. Veri füzyonunu kullanmanın birçok avantajı vardır:

- Tek bir sensöre göre daha doğıru sonuç üretir.
- Sensörlerden biri arızalansa bile diğlerinden doğıru sonuç almaya devam edilir.
- Çalışma koşulları değıişse bile veri almaya en uygun sensör bilgi vermeye devam eder.
- Hareketli çevreden ölçülen sensör verileri sabit bölgeden alınan verilere göre daha kıymetlidir.

Veri füzyonun daha iyi anlaşılması için kendi çevresini algılamaya çalışan insan sistemi örnek verilebilir (Şekil 2.30).





**Şekil 2.30.** Bir füzyon işlemi örneği olarak insan beyni ve algılama sistemi

İnsan görme, koku alma, dokunma, işitme ve tat gibi birçok duyu organına sahiptir. Bu duyu organları vasıtasıyla ancak çevresi hakkında bilgi sahibi olabilir. Bu duyu organlarından elde edilen veriler beyinde işlenir. Bunu yapmak için beyin bellekteki anıları, deneyimleri kullanır. Beyin, ayrıca akıl yürütme yeteneklerini, duyuların sağladığı mevcut bilgilerin tümünü inceleyerek harekete geçmek için "veri birleştirme" yapar.

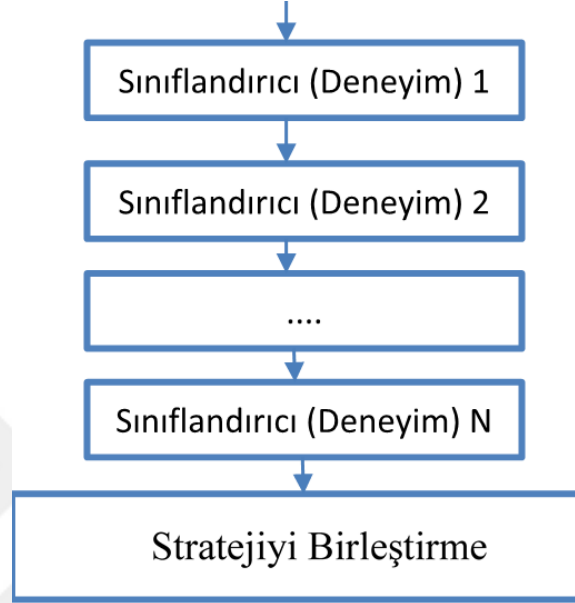
Şekil 2.30 'de gösterilen görme, koku alma, dokunma, işitme ve tat alma gibi her bir duyu organına sınıflandırıcı denebilir. Örneğin tat alırken tatlı, acı ve ekşi gibi sınıflar oluşturabiliriz.

### 2.3.1. Veri Birleştirme Teknikleri

Çeşitli alanlardan gelen bilgileri değerlendirip karar verebilmek için bilgilerin sınıflandırılıp birleştirilmesi gerekir. Bu işlem üç değişik şekilde yapılmaktadır. Bunlar;

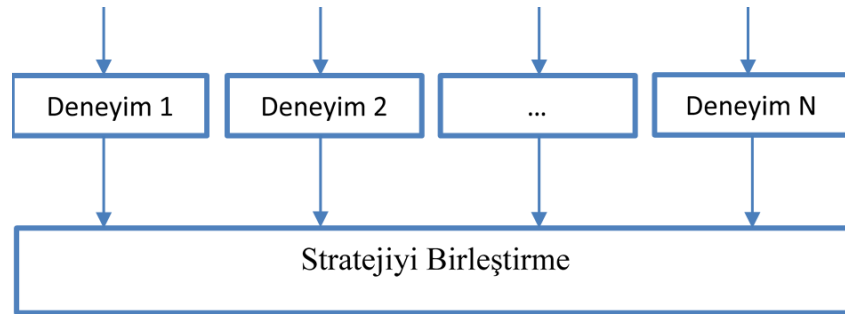
- 1) Seri birleştirme
- 2) Paralel birleştirme
- 3) Karışık birleştirme

**Seri birleştirme:** Birden fazla sınıflandırıcıdan gelen sensör bilgileri seri bir şekilde birleştirilir (Şekil 2.31). Birinden gelen verinin hatalı olması durumunda sonuç elde edilemez. Bütün sınıflandırıcıların doğru bilgi üretmesi gereklidir.



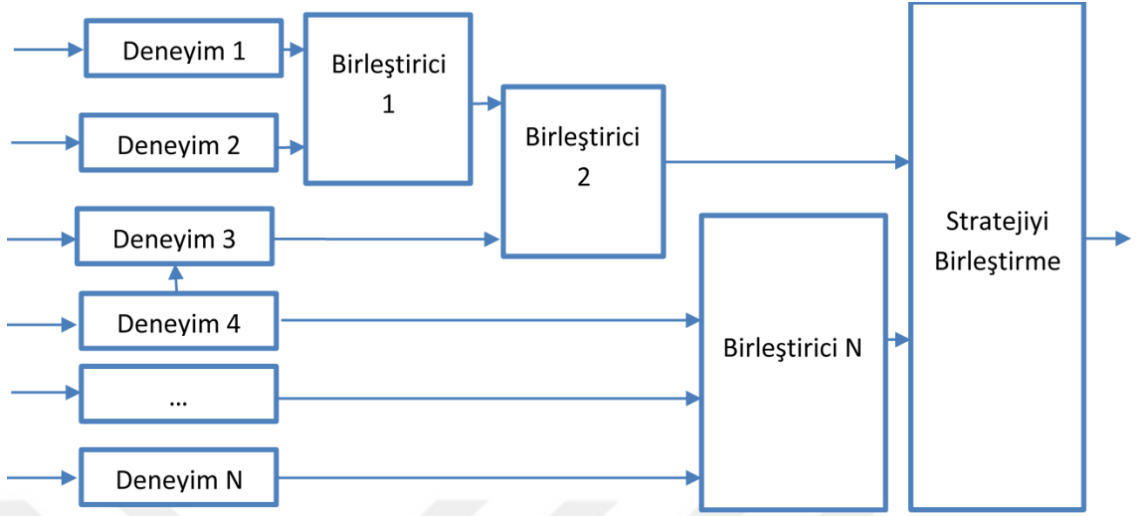
**Şekil 2.31.** Sınıflandırıcıların seri bağlantı şeması

**Paralel birleştirme:** Bu işlemde sınıflandırıcıdan gelen bilgi paralel şekilde birleştirilir (Şekil 3.32). Sınıflandırıcıların birinde oluşan hatalı bilgi sistemin karar almasında çok etkili değildir.



**Şekil 2.32.** Sınıflandırıcıların paralel bağlantı şeması

**Karışık birleştirme:** Bu işlemde sınıflandırıcıdan gelen bilgi hem paralel hem de seri şekilde birleştirilir (Şekil 2.33). Sınıflandırıcıların önemli veri taşıyan kısmı seri şekilde destekleyici bilgi taşıyan kısmı paralel olarak birleştirilir. Tüm sistemin anlamlı veri üretebilmesi için sınıflandırıcıların doğru bir şekilde anlamlandırılması gereklidir.



**Şekil 2.33.** Sınıflandırıcıların karışık bağlantı şeması

Çoklu sensör birleştirmede kullanılan teknikler genellikle dört ayrı kategoriye ayrılabilir.

**İşaret Seviyesi:** Kalman, Bayes, istatistik karar verme teorisi yöntemleri.

**Piksel Seviyesi:** Lojik filtreler, matematik morfoloji, görüntü cebri ve benzetimsel tavlama (Simulated Annealing).

**Özellik Seviyesi:** Sıkı istatistik, Gauss- Markov hesaplaması ve genişletilmiş Kalman filtresi.

**Sembol Seviyesi:** Bayes, Dempster-Shafer, güvenlilik faktörleriyle üretim kuralları, bulanık mantık.

Stratejiyi Birleştirme yöntemleri, filtreleme ve işaret artırma tekniklerini içerir. Bu alanda çok kullanılan bazı teknikler, ağırlıklı ortalama (Öğrenilen yaklaşımda sistem, istenilen performansa ulaşmaya dek ağırlıklar ayarlanır), Kalman Filtresi (Kalman Filtreleme, çevre durumu üzerine tanımlanmış olasılık yoğunluğu fonksiyonu her yeni veri geldiğinde rekürsif olarak hesaplayan durum hesaplama yöntemidir. Ölçüm modeli lineerdir ve üzerine gürültü eklenir) ve genişletilmiş Kalman filtresidir (Lineer olmayan sistemleri lineerleştiren bir tekniktir).

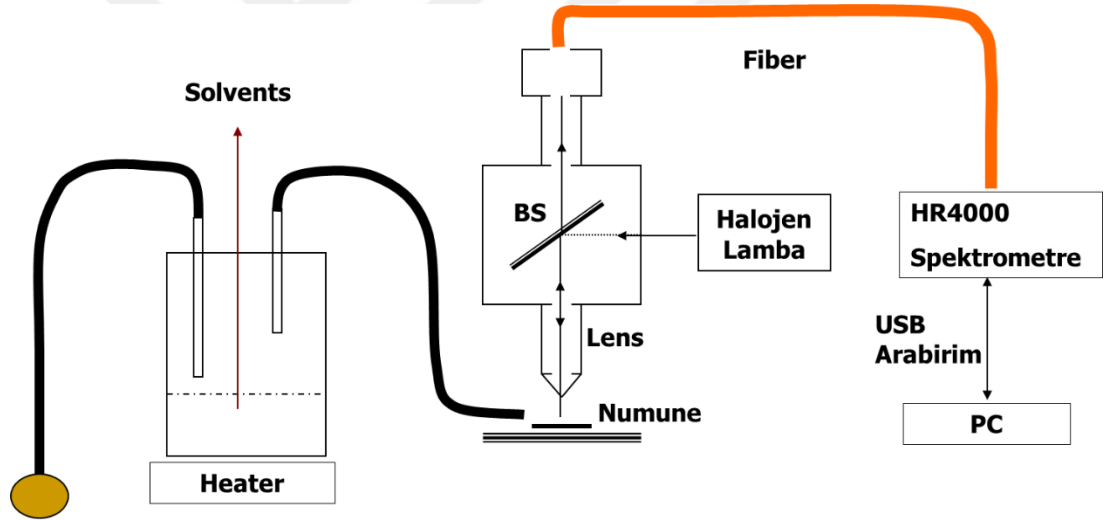


### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1 Gözenekli Silisyumun Optik Özelliklerinin İncelenmesi

##### 3.1.1 Yansımaya Ölçümü Deney Düzenegi

Yansımaya ölçümlerinin yapılabilmesi için Şekil 3.1'de gösterilen bir optik karakterizasyon düzenek kuruldu. Kimyasal sensör şekilde numune ile gösterilen yere bağlanarak yansımaya ölçümleri önce çözücü yokken yalnızca azot gazı altında ve daha sonra çözücüler ile yansımaya spektrumları alındı. Trikloretilen ve aseton çözücüler için deney tekrarlandı.

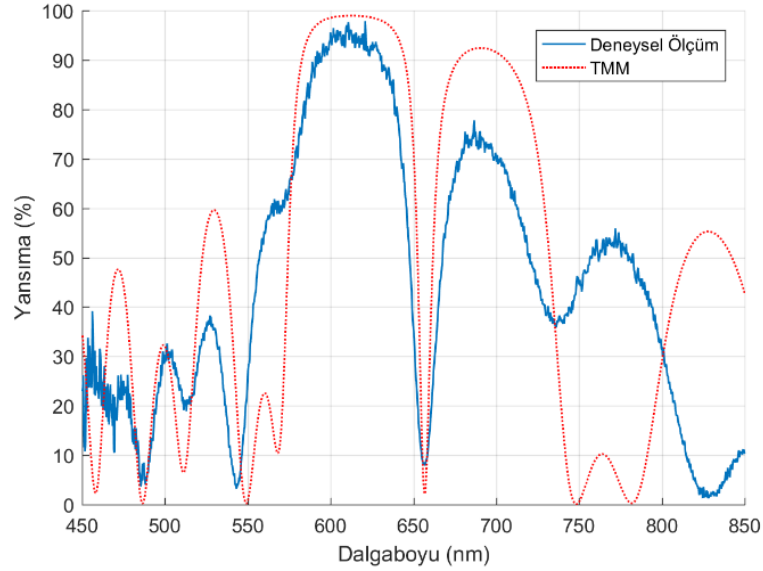


**Şekil 3.1.** Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensörün test deney düzenegi (Karacalı 2003)

Bunun için halojen lambanın ışık spektrumu bir taşıyıcı fiber kablonun ucuna yerleştirilen aynadan alınarak referans olarak kaydedildi. Bir taşıyıcı fiber kablo ucunda herhangi bir şey yokken spektrum alınarak sistemin görüntüsü olarak kaydedildi. Sensörden gelen spektrumdan gürültü spektrumu çıkarıldıktan sonra aynadan gelen referans spektrumuna oranlayarak % cinsinden yansımaya spektrumu elde edildi. Spektrumlar ve Transfer Matris Modeli kullanılarak yapılan simülasyonlar Şekil 3.2 de verildi (Karacalı 2003).

HR4000 spektroskopisi, tek dalga boylu ışıkla uyarılan numuneden yayınlanan karakteristik ışığın bir monokromatör ve detektör aracılığı ile dalga boyuna veya enerjiye bağlı olarak şiddetinin kaydedilmesini sağlar. Azot gazı akış miktarı bir akış ölçer tarafından kontrol edilmiştir.

Optik giriş olarak, özel tasarlanmış optik fiberler kullanılmıştır. Spektrum dağılımının karşılığı olan analog elektriksel sinyal, bir ara yüz ile sayısal sinyale çevrilerek bir yazılım yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılır (Karacalı 2003).



**Şekil 3.2.** Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensör testinin, Azot gazı altında alınan yansımaya ölçümleri ile TMM ile yapılan simülasyonların gösterimi

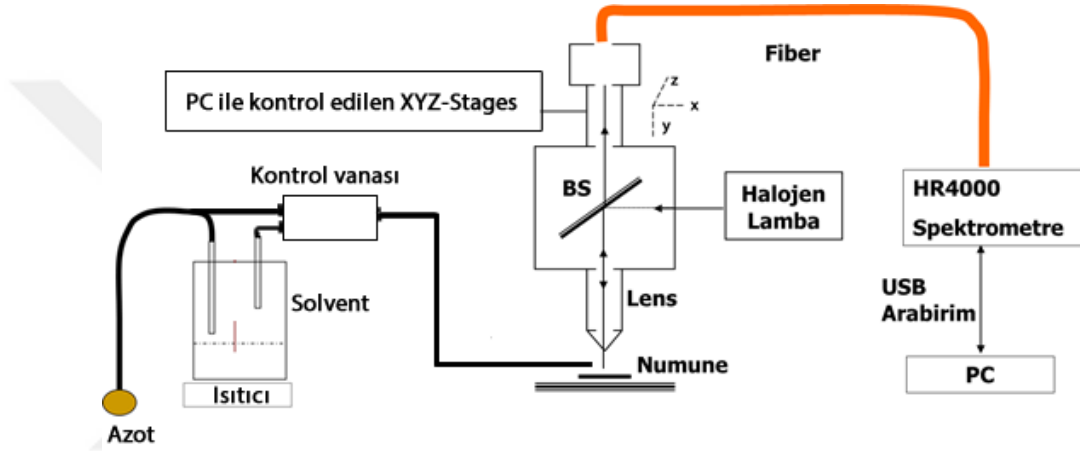
**Çizelge 3.1.** Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensörün çözelti buharındaki yansımaya spektrumlarının çınlama dalga boyları

Çözücü Buharı	Çınlama Dalga Boyu (nm)
Azot	660

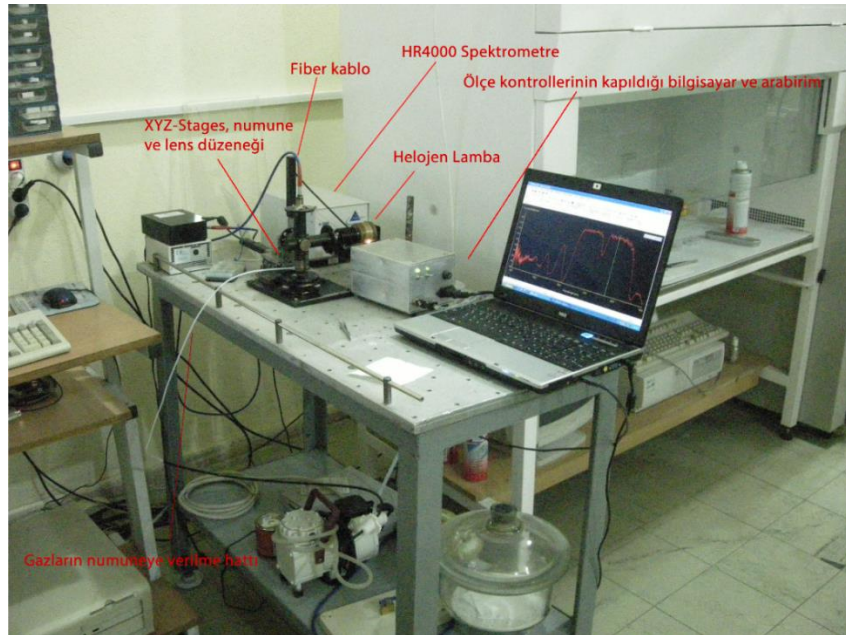
Tablo 3.1'deki Çınlama Dalga Boyundaki kayma, her bir çözücü için hesaplanmıştır. Gözeneklerdeki etkin kırılma indeksleri, silikonun dalga boyu bağımlılığı göz önüne alındığında Bruggeman EMA ve TMM vasıtasıyla teorik olarak tahmin edilmiştir.

### 3.2 Çok Noktadan Yansıma Ölçüm Deney Düzeneği

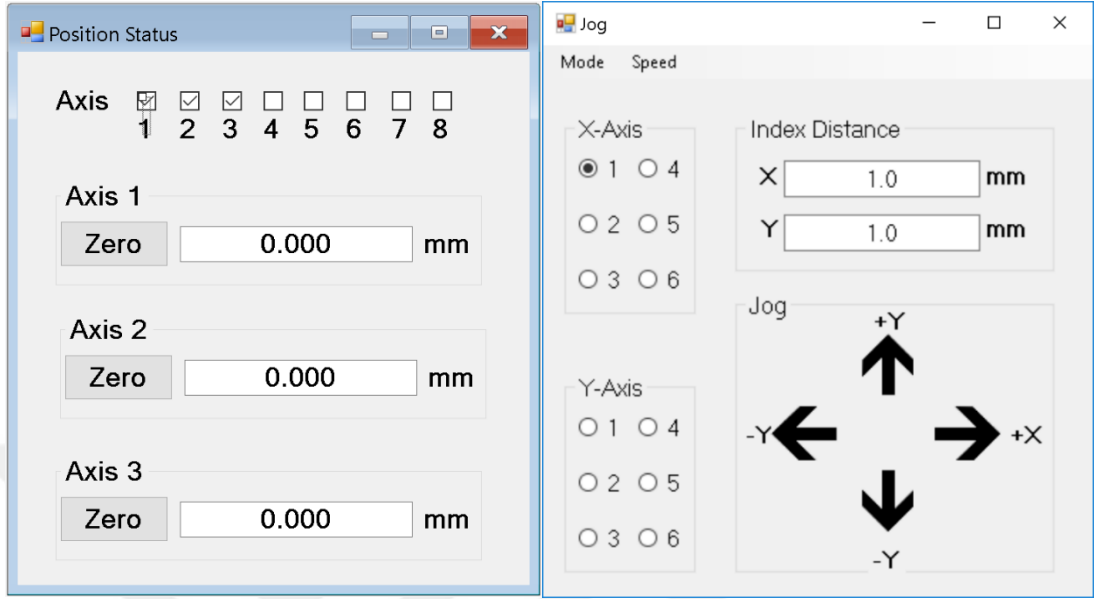
Yansıma ölçümleri için önceden tasarlanan bir sisteme (Karacalı, 2003) XYZ-Stages ilave edilerek yeniden düzenlendi. Aydınlatma kaynağı olarak yine önceki sistemdeki gibi halojen lamba tercih edildi. Sensörün değişik noktalarından çoklu yansıma ölçümleri almak için bilgisayar tarafından kontrol edilen XYZ-Stages kullanıldı. Düzeneğin basitleştirilmiş şematik gösterimi şekil 3.3 de gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** Fiber optik kablo kuplajlı kimyasal sensörün XYZ-Stages ilave edilmiş yeni test deney düzeneği



**Şekil 3.4.** PC ile kontrol edilebilen yeni düzeneğin genel gösterimi



Şekil 3.5. XYZ-Stages 'in kontrol ara yüzü

Şekil 3.4 de gösterilen ölçüm düzeneğinde numune, lensin orta noktasına gelecek şekilde gözle kontrol edilerek bağlanır. Bilgisayara bağlı XYZ-Stages 'in programı çalıştırılarak Şekil 3.5 'de gösterilen "Position Status" penceresinden sıfırlama işlemi yapılır ve lens başlangıç konumuna getirilir.

Jog penceresindeki (Index Distance) X-Y değerlerine Şekil 3.6 de gösterilen kırmızı renkli noktadan başlanarak mesafe matrisindeki sayısal değerler mm cinsinden yazılır ve  $a_1$  noktasından ölçme işlemine başlanır. XYZ-Stages'e X-Y butonlarına basılarak girilen başlangıç değeri değiştirilir ve böylece lens kontrol edilerek ölçme noktalarını değiştirir. Kontrol vanası Azot tarafında açılarak ortama sadece taşıyıcı Azot gazı verilir ve numunenin gözenekleri üzerinde bulunan yabancı gazların süpürülmesi sağlanır. Şekil 3.8 deki sistemde sadece Azot gazı varken elde edilen yansıma görüntüsü görülmektedir. Sisteme Solvent buharı, taşıyıcı azot gazı ile birlikte verilirse ikinci belirlenen noktadan ölçmeye devam edilebilir. Sisteme Solvent buharı verilirken elde edilen yansıma görüntüsü Şekil 3.9 de görülmektedir. Bu işlem şekil 3.7 deki veri matrisindeki tüm değerler elde edilene kadar devam edilir.

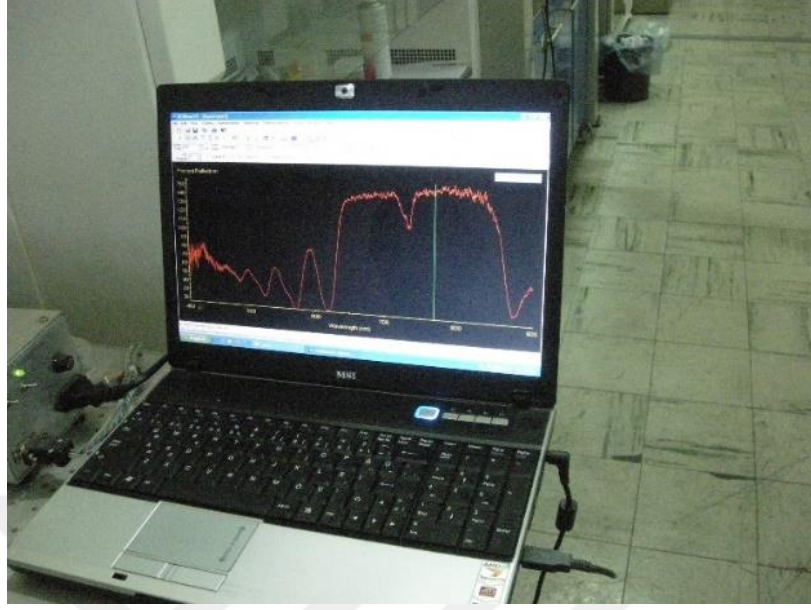


	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8		
● $a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	0.8	
0.6	$b_1$	$b_2$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	
	$c_1$	$c_2$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$	0.4
0.2	$d_1$	$d_2$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$	$d_{10}$	
	$e_1$	$e_2$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$e_8$	$e_9$	$e_{10}$	0.0
-0.2	$f_1$	$f_2$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$	
	$g_1$	$g_2$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$g_7$	$g_8$	$g_9$	$g_{10}$	-0.4
-0.6	$h_1$	$h_2$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$h_9$	$h_{10}$	
	$i_1$	$i_2$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$i_6$	$i_7$	$i_8$	$i_9$	$i_{10}$	-0.8
	$j_1$	$j_2$	$j_2$	$j_3$	$j_4$	$j_5$	$j_6$	$j_7$	$j_8$	$j_9$	$j_{10}$	

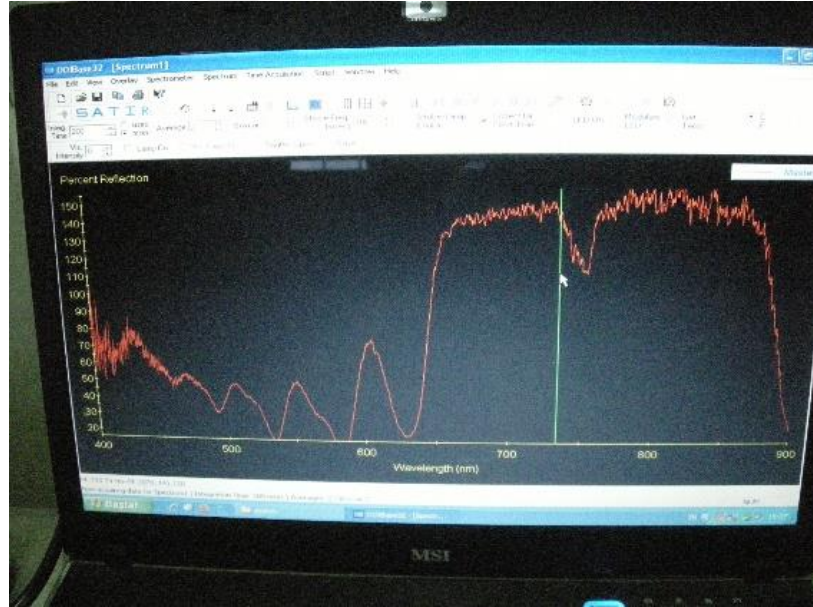
Şekil 3.6. Ölçme düzeneğinde numunenin ölçme yüzeyini belirleyen mesafe matrisi

$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
$b_1$	$b_2$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$
$c_1$	$c_2$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
$d_1$	$d_2$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$	$d_{10}$
$e_1$	$e_2$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$e_8$	$e_9$	$e_{10}$
$f_1$	$f_2$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$
$g_1$	$g_2$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$g_7$	$g_8$	$g_9$	$g_{10}$
$h_1$	$h_2$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$h_9$	$h_{10}$
$i_1$	$i_2$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$i_6$	$i_7$	$i_8$	$i_9$	$i_{10}$
$j_1$	$j_2$	$j_2$	$j_3$	$j_4$	$j_5$	$j_6$	$j_7$	$j_8$	$j_9$	$j_{10}$

Şekil 3.7. Ölçme düzeneğinden alınan veri matrisi



Şekil 3.8. Sistemde sadece azot gazı varken elde edilen yansımaya görüntüsü



Şekil 3.9. Sisteme Solvent buharı verilirken elde edilen yansımaya görüntüsü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çok noktadan Yansıma Ölçüm Deney Düzenine Azot gazı verilerek ölçme işlemine başlandığında; ilk ölçme noktasında sistem “a1” isimli REFLECTION dosyası üretir. Bu dosyanın içeriği Şekil 4.1 de görüldüğü gibidir. Bu dosya “notepad.exe” metin düzenleme programında açıldığında 3600 satırdan oluştuğu kolayca görülecektir. Dosya içerisindeki 1 ile 19. satırlar arası veriler genelde sistemin ölçme parametrelerini tanımlayan açıklama ifadeleri ile doludur. Matlab Analiz programında bu satırlar dikkate alınmadan 20 ile 3667 arasındaki veriler Matlab programı yardımıyla analiz edildiğinde Şekil 4.2 de gösterilen Yansıma (%) – Dalga boyu (nm) grafiği elde edilecektir.

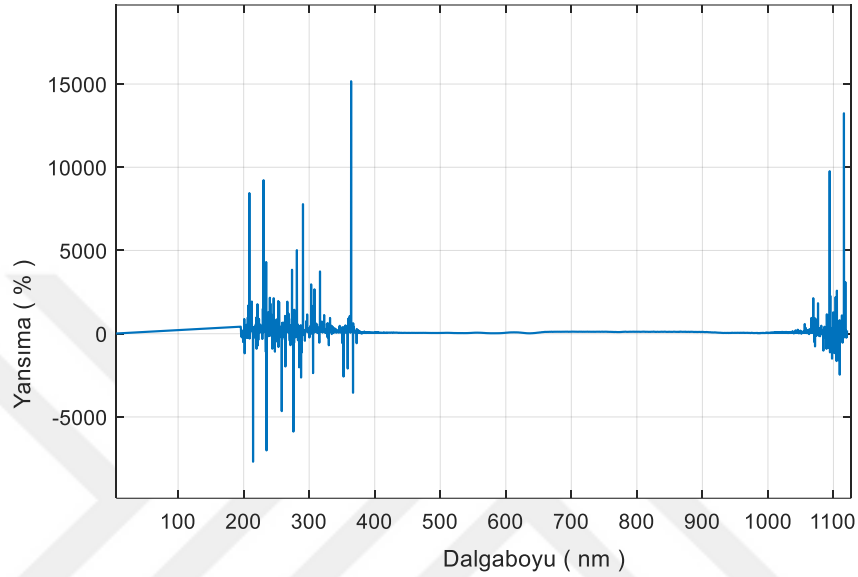
```

a1.Master.Reflection - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
1      OOIBase32 Version 2.0.6.3 Data File
2      ++++++
3      Date: 04-20-2011, 19:17:10
4      User: Valued Ocean Optics Customer
5      Spectrometer Serial Number: HR4C062
6      Spectrometer Channel: Master
7      Integration Time (msec): 200
8      Spectra Averaged: 2
9      Boxcar Smoothing: 0
10     Correct for Electrical Dark: Enabled
11     Time Normalized: Disabled
12     Dual-beam Reference: Disabled
13     Reference Channel: Master
14     Temperature: Not acquired
15     Spectrometer Type: S4000
16     ADC Type: HR4000
17     Number of Pixels in File: 3648
18     Graph Title:
19     >>>>Begin Spectral Data<<<<
20     195.62  845.747
21     195.89  223.922
22     196.16  -118.311
23     .....
.      .....
..     .....
...    .....
....   .....
3665   .....
3666   1120.52  2.214
3667   1120.76  394.383
3668   >>>>End Spectral Data<<<<

```

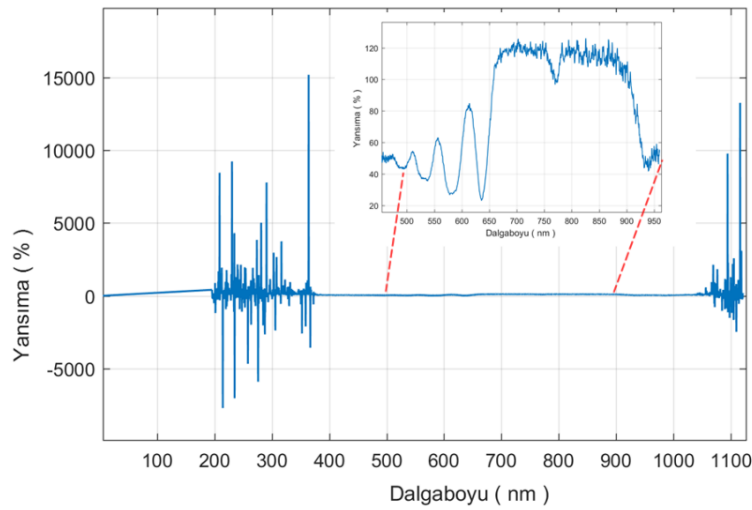
Şekil 4.1. Tek noktadan ölçülen Azot gazı yansıma ölçüm dosya içeriği

Şekil 4.2'deki grafiğin Y eksenini; "a1.Master.Reflection" doyasının 20 satırdan başlayan ilk sütundaki (195.62) sayısal Yansıma yüzdesini, X eksenini ise ikinci sütundaki (845.747) ile başlayan sayısal dalga boyunu vermektedir.



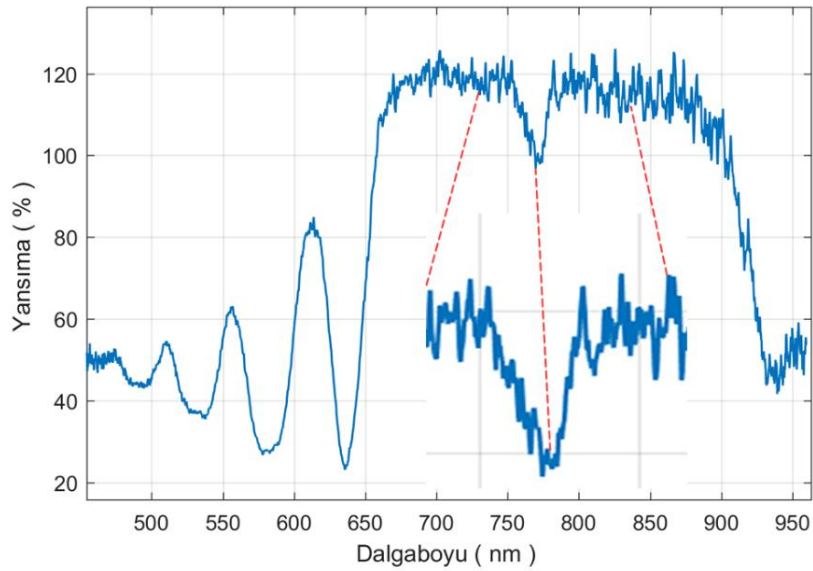
**Şekil 4.2.** Tek noktadan ölçülen yansıma – Dalga boyu ölçüm sonuçlarının Matlab'ta grafik olarak çizdirilmesi

X eksenini üzerindeki 0 ile 1100 nm arasındaki verilerin yalnızca bir kısmı bizim için değerlidir. Bu önemli verilerin bulunduğu alan Şekil 4.3 de kırmızı çizgilerle ( 500 - 950 nm) gösterilmiştir.



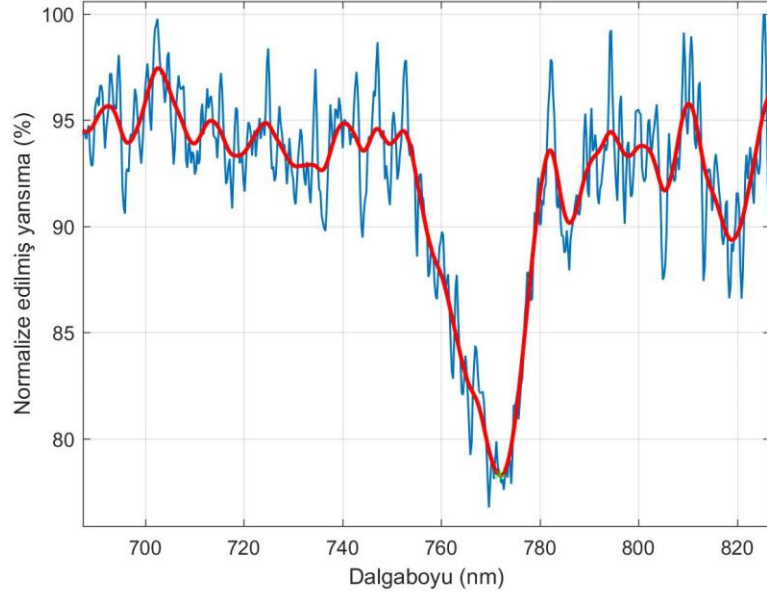
**Şekil 4.3.** Ölçüm sonuçlarında önemli olan bölgesinin gösterilmesi

Sensör, Azot gazı için Şekil 4.4’ de gösterilen grafikte orta noktadaki kırmızı çizgiyle ifade edilen bölgede diğer alanlara göre daha büyük bir değişim göstermektedir. Bu değişim noktasına Çınlama dalgaboyu adı verilir. Dalga boyunun 1 ‘e bölümü ise Çınlama frekansı bulunur. Bu özel noktada sisteme Azot taşıyıcı gazı ile birlikte başka bir gaz verildiğinde çınlama dalgaboyu sağa doğru kayar. Gönderilen gaz kesilerek sadece Azot gaz verildiğinde ise sensör verileri yeniden başlangıçtaki çınlama dalgaboyuna geri döner.



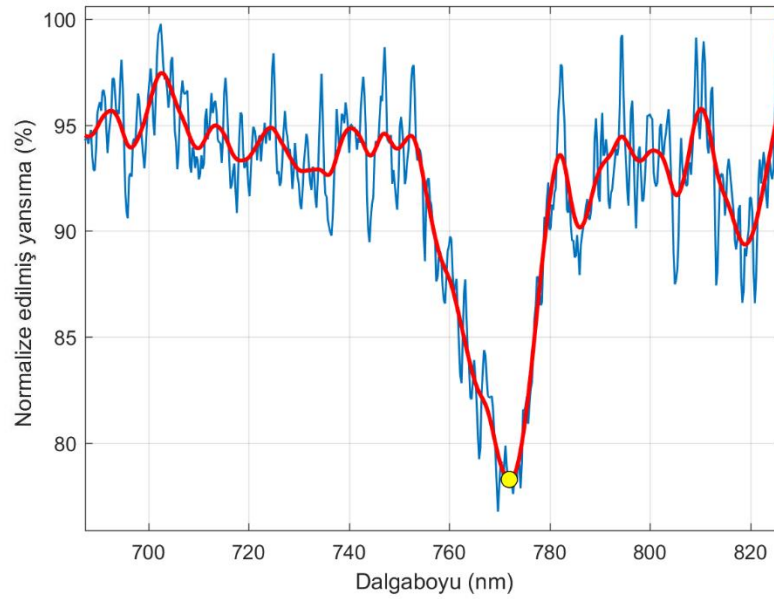
**Şekil 4.4.** Ölçüm sonuçlarında çınlama dalga boyunun gösterimi

Şekil 4.5 ‘deki grafikte mavi çizgi ile gösterilen verilerde deney düzeneğinden kaynaklanan bir miktar gürültü mevcuttur. Ayrıca ölçme işlemine başlangıçta numune yerine ayna ile başlandığından ayna ile sensör arasında meydana gelen yükseklik farkından dolayı yansımada bir miktar sapmalar gözlenmektedir. Bu gürültünün veriden temizlenmesi amacıyla “Alçak Geçiren Filtre” olarak Kalman filtresi kullanılmıştır. Yansıma farklarının giderilmesi içinse ölçme verileri normalize edilerek çizdirilmiştir. Veriler üzerinde yapılan bütün düzenlemeler sonrasında gürültüsüz ve düzeltilmiş veriler şekil 4.6 de kırmızı renkte gösterilmiştir.

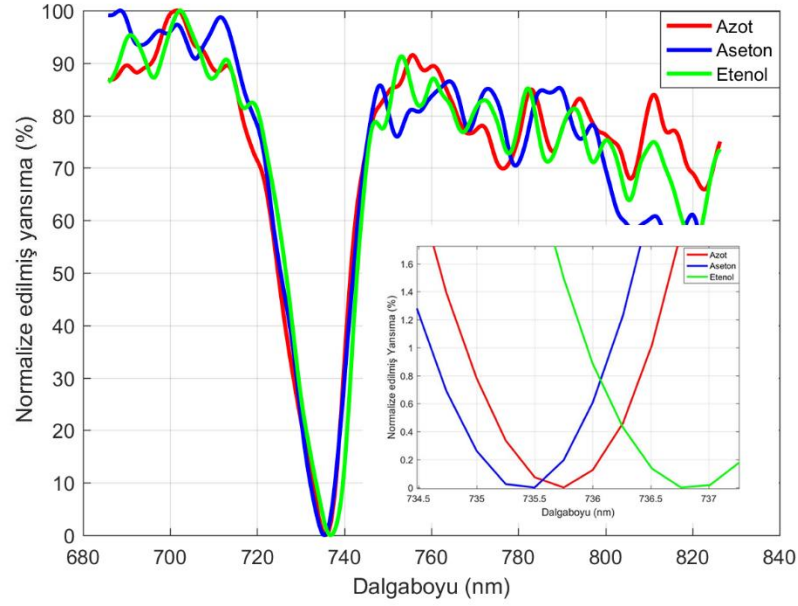


**Şekil 4.5.** Tek noktadan ölçülen veri ve gürültünün birlikte gösterimi

Gürültüden arındırılan veriler içerisinde çınlama dalgaboyunu bulabilmek için en küçük yansımamanın olduğu noktanın bulunması gerekir. Bu nokta Şekil 4.6 de sarı daire ile gösterilmiştir.

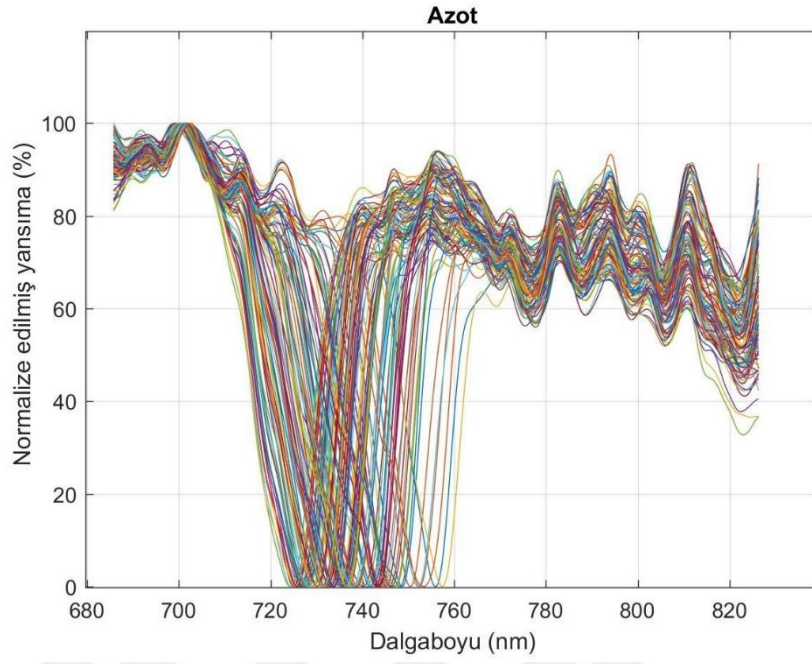


**Şekil 4.6.** Yansımaya ölçüm sonuçlarından çınlama dalga boyunun tespiti

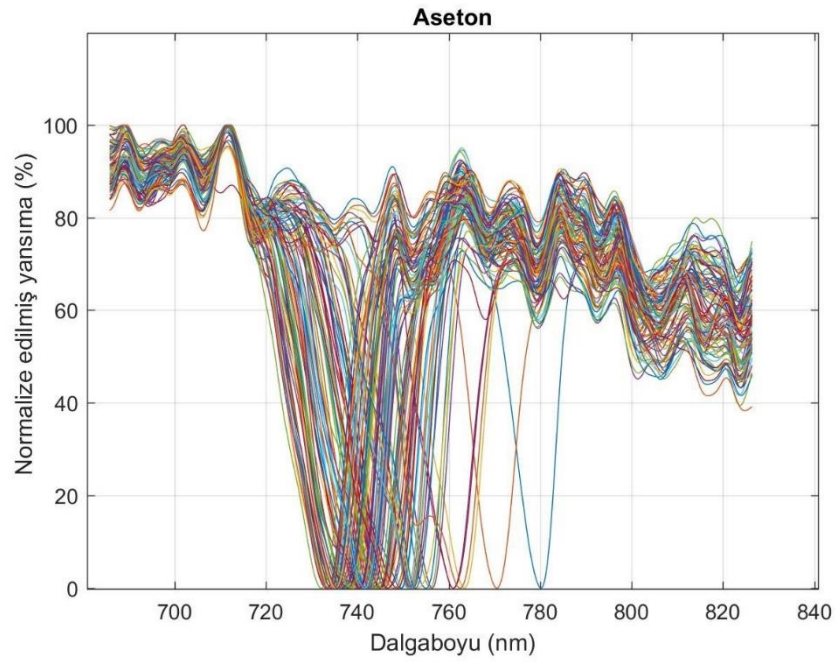


**Şekil 4.7.** Tek noktadan alınan verilere göre Azot gazı ve Aseton, Etenol organik çözeltili buharlarının yansıtma grafikleri

Şekil 4.7 'de sensörün verilen gazlar için tespit edilen en düşük noktalar görülmektedir. Grafikte en düşük dalga boyu olarak ölçülen Azot gazı için kırmızı çizgi 738 nm, Azot gazı –Aseton çözücü buharı için mavi çizgi 744nm ve Azot gazı-Etenol çözücü buharı için ise Yeşil çizgi 766 nm' dir. Şu ana kadar bulunan veriler sadece a1 noktasında alınan yansıtma dosyasının değerlendirilmesiyle elde edilmiştir. Bu işlemler (a1,a2...a10),(b1,b2...b10) ...(j1,j2...j10) olacak şekilde 100 ayrı noktadan alınan yansıtma dosyası için de tekrar edilmesiyle Azot için Şekil 4.8, Aseton için şekil 4.9 'da Etenol içinse şekil 4.10 elde edilecektir.

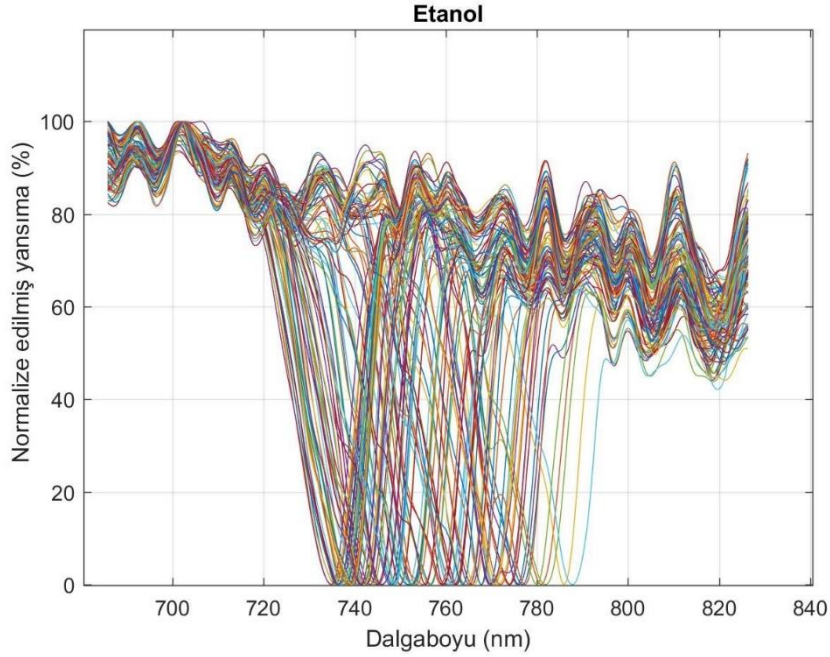


**Şekil 4.8.** Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının yansımaya dalgaboyu grafikleri



**Şekil 4.9.** Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharının Yansımaya Dalga boyu grafikleri

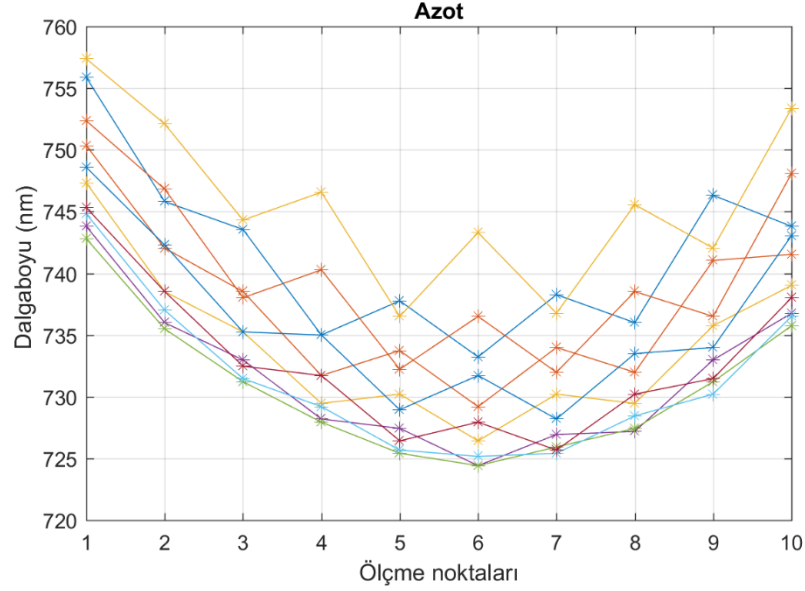




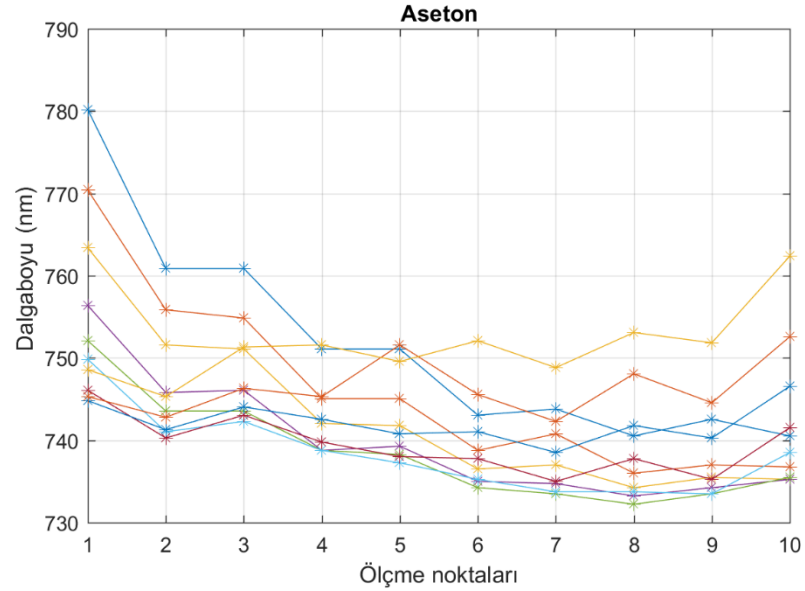
**Şekil 4.10.** Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharının Yansımaya Dalga boyu grafikleri

Çok noktadan ölçülen verilerin çizdirildiği grafikler incelendiğinde Azot için (720-760 nm), Aseton için (730-780 nm) ve Etanol içinse (735-790 nm) arasında bir alanda değişim gösterdiği görülecektir. Dalga boyundaki bu değişim aralıkları bile gazların birbirinden kısmen ayrılmasını sağlayabilir. Grafiklerden daha iyi bir sonuçlar görebilmek için her bir noktanın çınlama frekansları bulunmalıdır. Bu işlem Matlab programıyla yapıldığında Azot için şekil 4.11, Aseton için şekil 4.12 ve Etanol için şekil 4.13 grafikleri elde edilecektir. Bu grafiklerde X eksenini ölçme noktasını gösterirken Y eksenini ise bu noktadaki en düşük yansımaya sahip dalga boyunu göstermektedir. Çok noktadan yoğun bilgi içeren grafiğe nazaran bu grafiklerden yorum yapmak daha kolaydır. Azot gazı verilen sensörün orta noktaları köşe noktalarına göre daha düşük çınlama frekansına sahiptir. Aseton çözücü buharı verildiğinde ilk noktalar yüksek çınlama frekansına sahipken orta ve son noktalar yaklaşık aynı çınlama frekansına sahiptir. Etanolde ise ilk kısımlar yüksek çınlama frekansına sahipken ortalarda ve sonlarda benzer çınlama frekansı görülmektedir. En son noktada ise çınlama frekansı yeniden yükselişe geçtiği görülmektedir. Grafiğin 1, 2, 3 ile ifade edilen bölgeler ve çizgilerdeki renkler ölçme noktalarını göstermektedir. Bu üç grafikte önemli bilgiler içerirse de sensörün ölçmeye hassas noktaları ve ölçtüğü gazların kimlikleri üzerine kesin

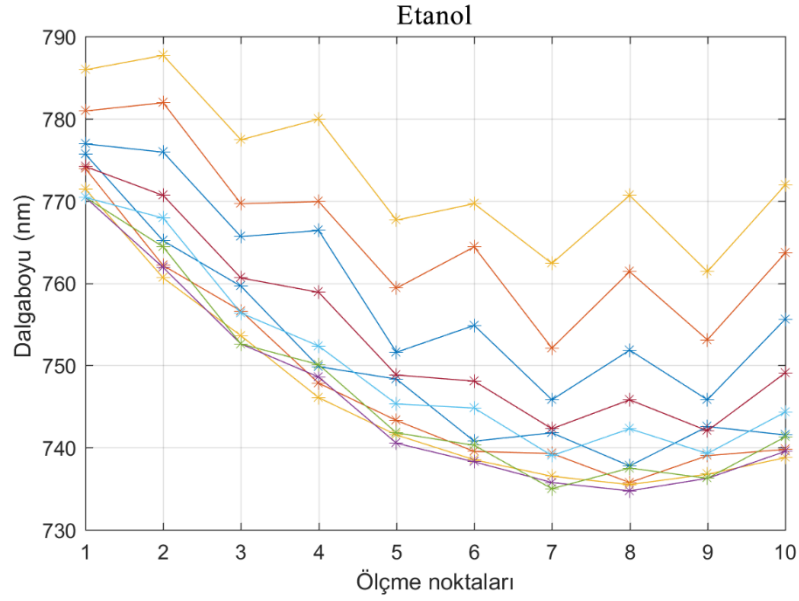
karar vermek kolay değildir. Şekil 4.14 de gösterilen üç boyutlu grafikler incelendiğinde x ve y eksenleri ölçme noktasını gösterirken grafikteki renk dağılımı çınlama frekansını göstermektedir.



**Şekil 4.11.** Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının çınlama frekanslarının gösterimi

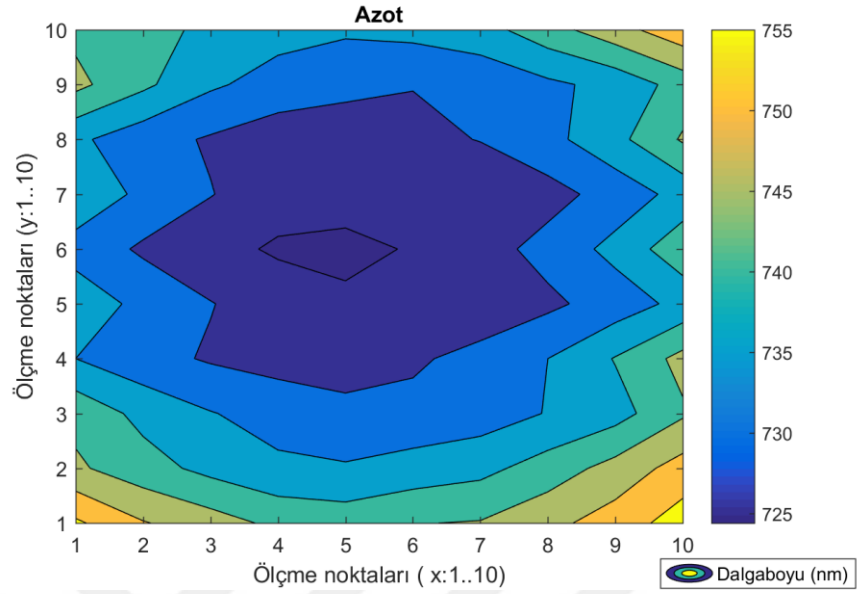


**Şekil 4.12.** Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharına ait çınlama frekanslarının gösterimi

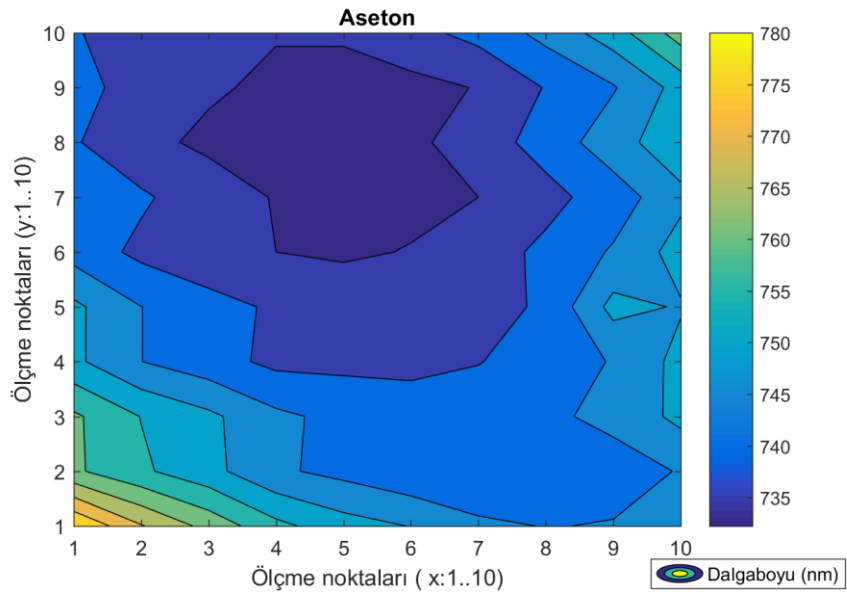


**Şekil 4.13.** Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharına ait çınlama frekanslarının gösterimi

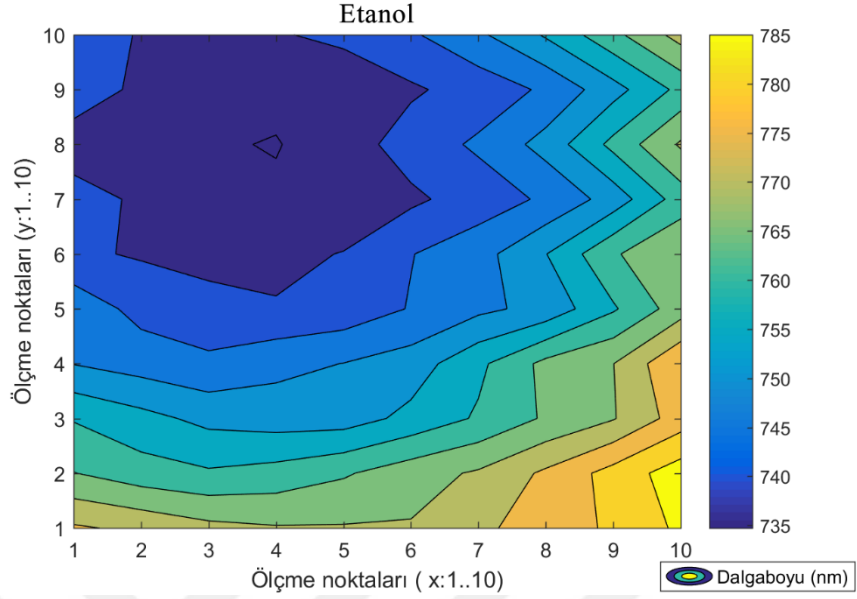
Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 da çizilen 3 boyutlu grafiklerde çınlama frekansları renk tonları ile gösterilmiştir. Azot gazı ve Aseton, Etanol çözücü buharlarının sensör üzerinde hangi noktalarda daha hassas ölçme yaptığı bu grafiklerden kolayca anlaşılabilir. Koyu mavi renk ile ifade edilen noktalar sensörün gazları ayırt edemediği noktaları sarı ve turuncu renk ile ifade edilen bölgelerin ise gazları çok iyi ayırt edebildiğini göstermektedir. Bu grafikler ile her bir gazın resmi renkleri yardımıyla ortaya konabilir.



**Şekil 4.14.** Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının çınlama frekanslarının renk tonlarıyla gösterimi

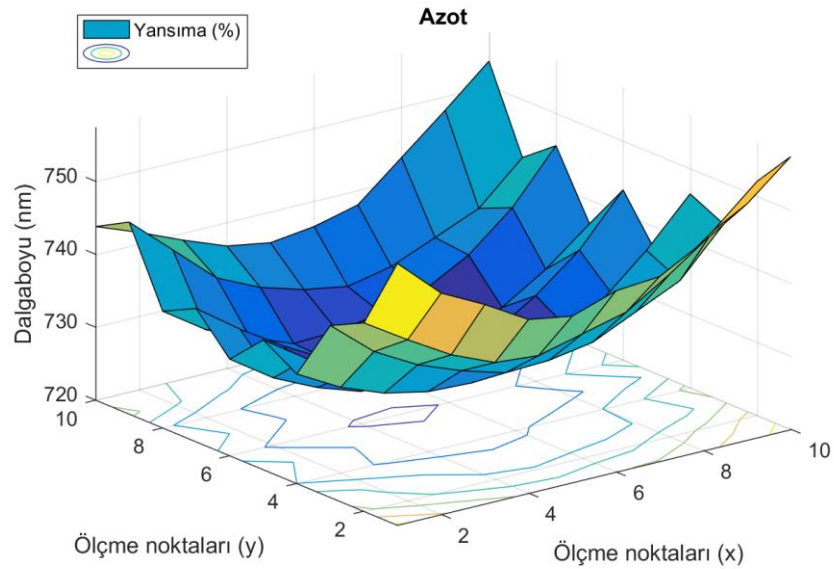


**Şekil 4.15.** Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharına ait çınlama frekanslarının renk tonlarıyla gösterimi

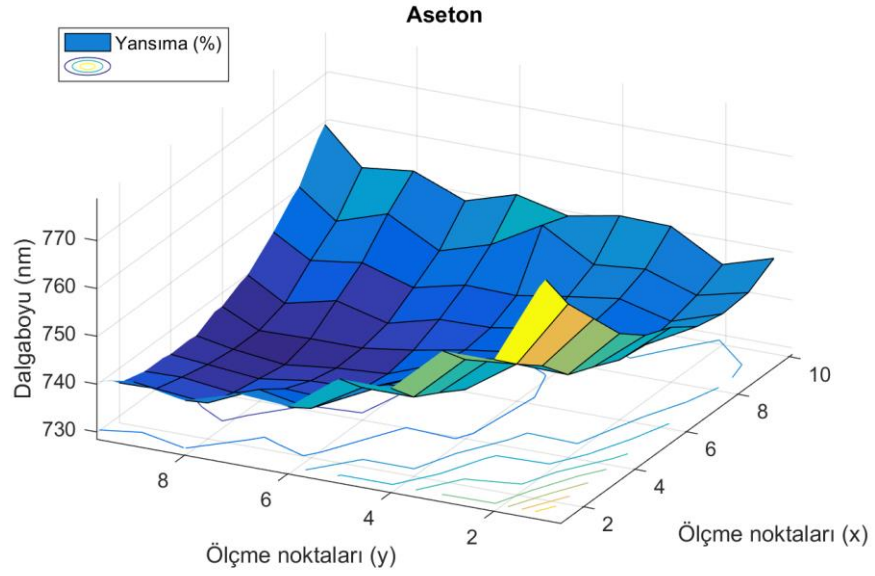


**Şekil 4.16.** Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharına ait çınlama frekanslarının renk tonlarıyla gösterimi

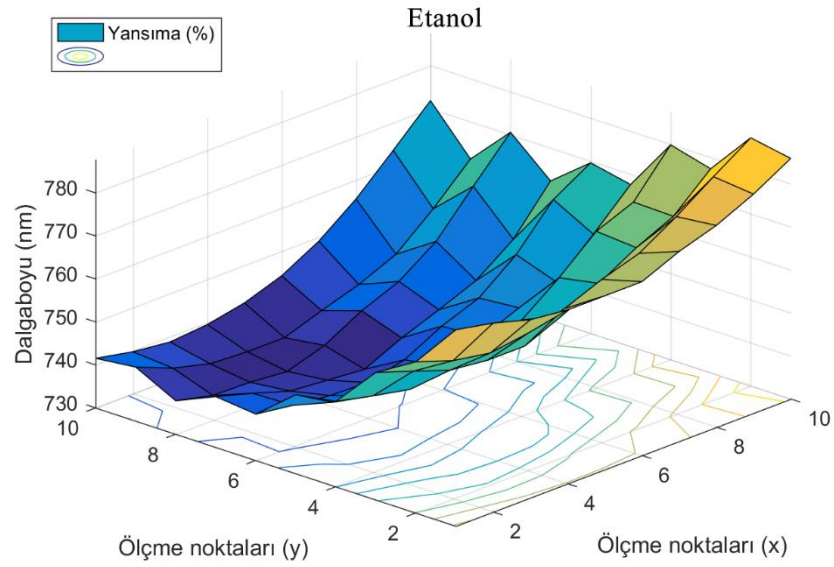
Renkler ile gösterilen bilgiler hem renk hem de ölçme noktalarıyla birlikte çizildiğinde Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilen grafikler ortaya çıkmaktadır. Bu grafiklere yakından incelendiğinde hem ölçme noktaları hem de çınlama frekansları rahatça görülebilmektedir.



**Şekil 4.17.** Çok noktadan alınan verilere göre Azot gazının ölçme noktaları ve çınlama frekanslarının 3D olarak gösterimi

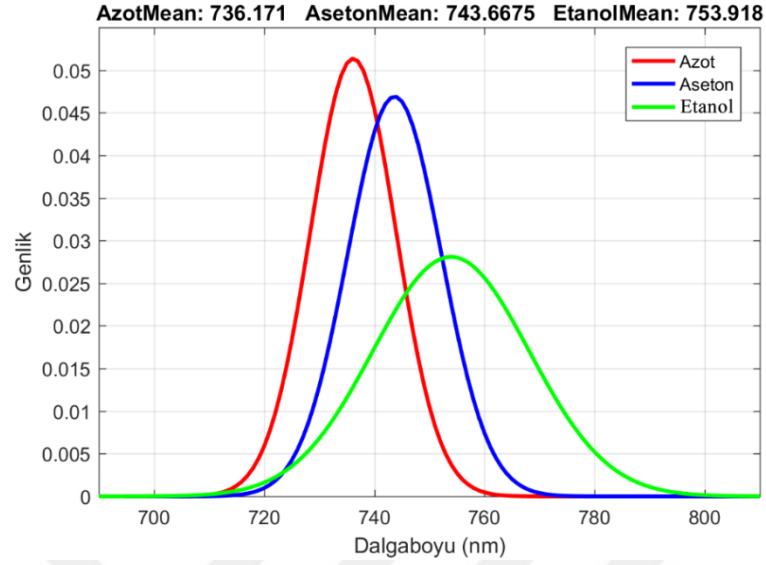


**Şekil 4.18.** Çok noktadan alınan verilere göre Aseton çözücü buharına ait ölçme noktaları ve çınılama frekanslarının 3D olarak gösterimi



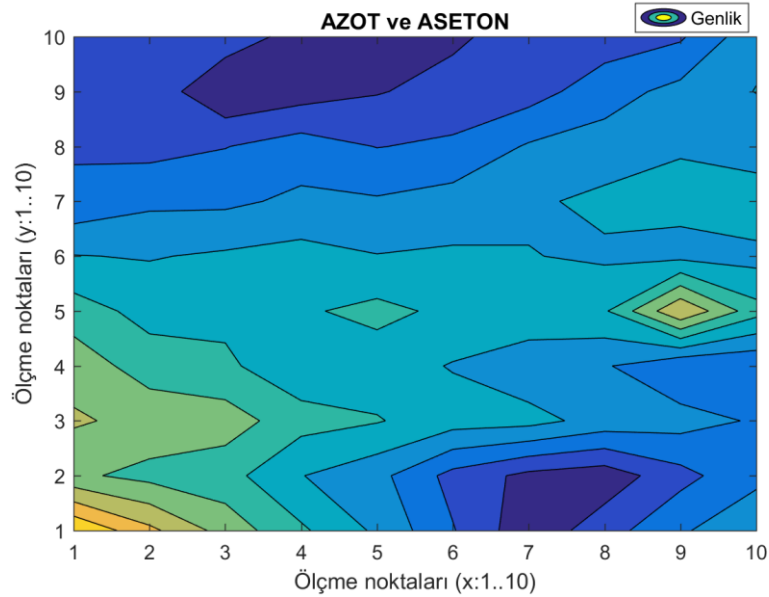
**Şekil 4.19.** Çok noktadan alınan verilere göre Etanol çözücü buharının ölçme noktaları ve çınılama frekanslarının 3D olarak gösterimi

Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 'deki grafiklerden sensörün hangi bölgelerinden daha verimli bilgiye sahip olduğu kolayca ayırt edilebilir.



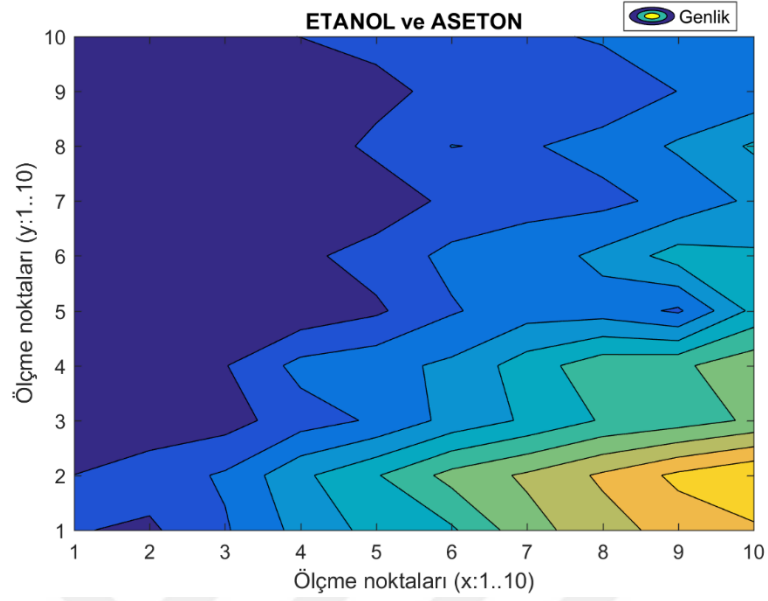
**Şekil 4.20.** Ölçme verilerinin, veri birleştirme teknikleriyle birleştirilmesi

Şekil 4.20 ' deki grafik 100 ayrı bölgelerden gelen bilgiler, veri birleştirme (Data fusion) yöntemleriyle birleştirilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Matlab programıyla yapılan analizde her bir ölçme noktasından gelen Yansıma (%) – Dalgaboyu (nm) bilgisinin ağırlıklı ortalaması alındığında dalga boyları sırasıyla Azot:736.171 nm, Aseton:743.6675 nm ve Etanol:753.918 nm olarak çıkmaktadır. Bu veriler ile gazların birbirinden ayırt edilmesi dalga boyları birbirine çok yakın çıkması nedeniyle çok hassas analiz gerektirmektedir.

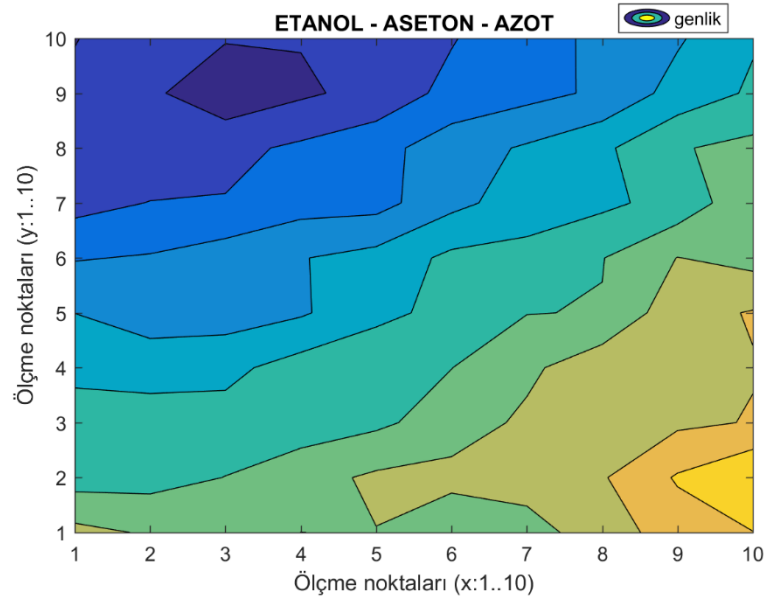




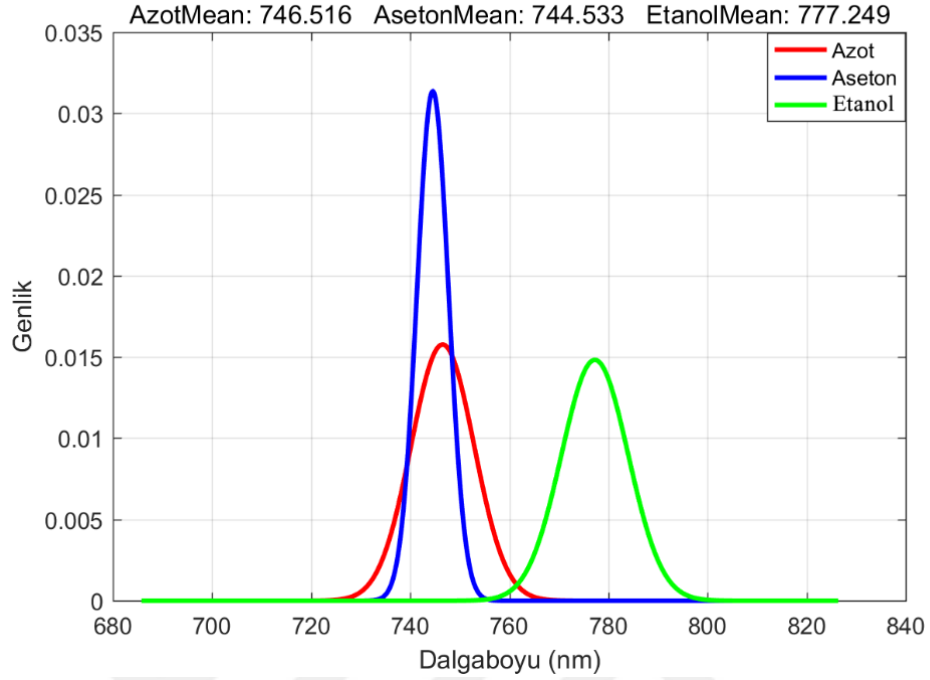




**Şekil 4.23.** Etanol ve Aseton çözücü buharına ait dalga boylarının birbirinden farkı

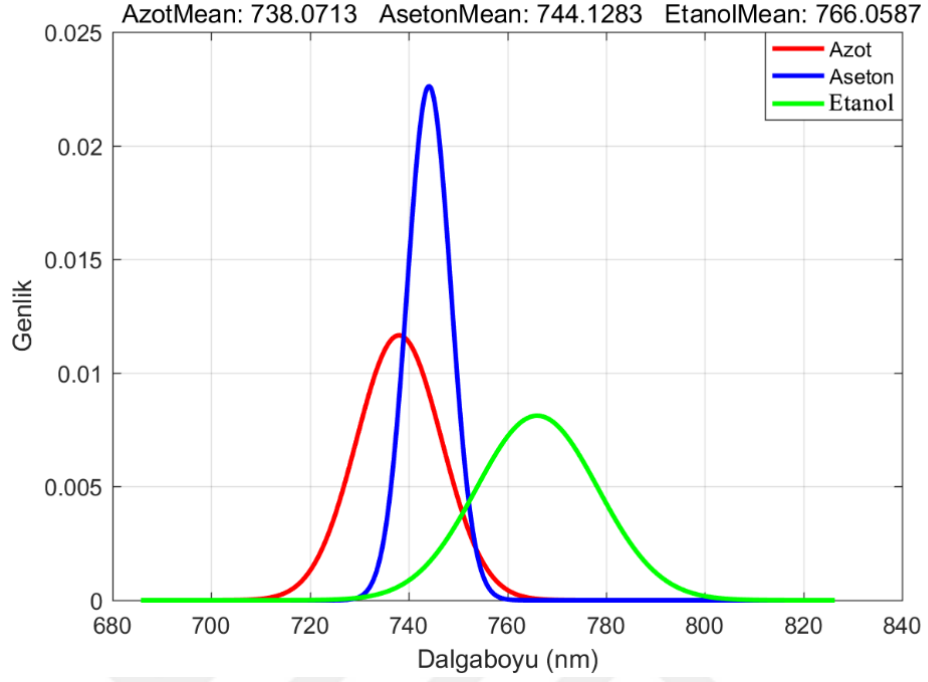


**Şekil 4.24.** TBAG2 kimyasal sensöre ait Etanol-Aseton-Azot' gazlarının dalga boylarına göre birbirinden farkları



**Şekil 4.25.** TBAG2 kimyasal sensöre ait Etanol çözücü buharını en iyi ölçen bölgelerine ait verilerin birleştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar

Etanolün daha kesin yöntemle ayırt edilebilmesi için sensörün ölçülen her noktasını almak yerine Etanole duyarlı bölgelerdeki veriler alınarak yeniden analiz yapıldığında Şekil 4.25'deki grafik ortaya çıkmaktadır. Bu grafiğe dikkat edildiğinde Etanolün dalga boyu diğer gazlardan daha net ayırt edildiği görülecektir. Fakat dalga boyları farklı olsa da Azot ve Etanolün genlikleri birbirine çok yakın çıkmaktadır. Bu durumun düzeltilmesi için sensörün hangi bölgesinin tüm gazlara duyarlı olduğunun bilinmesi gerekir.



**Şekil 4.26.** TBAG2 kimyasal sensöre ait Azot gazı ve Aseton, Etanol çözücü buharlarını en iyi ölçen bölgelerine ait verilerin birleştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar

Ölçme sistemine verilen tüm kimyasalların daha kesin yöntemle ayırt edilebilmesi için sensörün her ölçülen noktasını almak yerine sensörün verilen kimyasallara duyarlı bölgelerdeki veriler alınarak birleştirildiğinde ise Şekil 4.26'deki grafik ortaya çıkmaktadır. Bu grafiğe dikkat edildiğinde hem genlik hem de dalga boylarının daha net ayırt edilebildiği görülmektedir.

## 5. SONUÇ

Sensör Verisi Birleştirme Tekniklerinin Çoklu Kimyasal Sensör İçin Uygulaması isimli Yüksek Lisans Tez çalışması 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada gözenekli silisyum üzerinde Fabry-Perot yapıların nasıl oluşturulduğu kimyasal sensörün fabrikasyonu anlatılmıştır. İkinci aşamada çok noktalı bir optik ölçme düzeneği geliştirilerek Azot gazı ile Aseton ve Etanol gibi organik çözücülerin buharları sensör tarafından algılanma yetenekleri incelenmiştir. Bu çözücülerin etkileri kimyasal sensör üzerindeki 100 ayrı noktadan ölçüm yapılarak araştırılmıştır. Üçüncü aşamada ise elde edilen ölçüm sonuçlarının Matlab programında veri birleştirme teknikleri kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçlarının sensör hassasiyeti üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

Birinci bölümdeki çalışmada;

Kimyasal sensör olarak kullanılan malzeme, Silisyum elementinin özel bir düzenele Gözenekli Silisyuma dönüştürülerek üretilir. Silisyum kolay işlenebilirliği, katkılıandığında elektriksel özelliklerinin kolay kontrol edilebilir oluşu, nedeniyle elektronik teknolojisinin en çok tercih ettiği malzemelerden biridir. Silisyum normal koşullar altında, asitler ile reaksiyona girmez. Sadece şartlar sağlandığında HF ile reaksiyon girer. Bir gözenekli silisyum film tabakası, silisyum katman yüzeyinin elektrokimyasal anodizasyonu ile hazırlanır. Elektrokimyasal dağlama yöntemi en basit anlamda elektrolit, reaksiyonun gerçekleştiği hücre ve uygulama potansiyeli gibi üç temel kısımdan oluşur. Bunlara ilaveten n tipi numuneler için aydınlatmaya da ihtiyaç vardır. P++ tipi numunelerde aydınlatmaya ihtiyaç duyulmaz. Ancak oluşumunun kontrollü olmasını sağlamak için temel olarak bu özellikleri sağlayan, bilgisayar ile kumanda edilebilen sistemler tercih edilir.

Gözenekli Silisyum (GS) 'un gözeneklilik, kalınlık, gözenek çapı ve mikro yapısı gibi özellikleri Anodizasyon koşullarına bağlı olarak değişir. Tez çalışmasında kullanılan kimyasal sensör; <100> yönelimli p++ (0.01-0.02  $\Omega$ -cm öz dirençli ) Silikon kıymık üzerinde darbeli anodik aşındırma ile hazırlanmıştır. Çözelti 1: 2 oranında bir HF (% 40) ve Etanol (% 95) karışımıdır. Geniş gözeneklilik aralığı (% 40-% 80) tarafından

oluşturulan yüksek yansıtıcılı katmanları elde etmek için hem yüksek derecede katkılı altlık hem de 1: 2 çözelti oranları seçilmiştir. Fabry-Perot boşluğuna sahip iki ayna, düşük ve yüksek gözenekli GS katmanları oluşturularak yapılmıştır. Elektrokimyasal anodik aşındırma işlemi, numunenin ve platin telinin seçileceği bir Teflon® hücresinde gerçekleştirilmiştir. Anot ve katot, sırasıyla 18. Düşük yoğunluklu tabaka için akım yoğunluğu 6 mA / cm<sup>2</sup> ve yüksek gözeneklilik derecesi için 50 mA / cm<sup>2</sup> ve aşındırma süreleri sırasıyla 14.4 ve 5.5 s'dir. Darbe anodizasyon imalat tekniği olarak seçildiğinden etkili aşındırma süreleri sırasıyla yaklaşık olarak 13 ve 5 sn' ye düşürülür (10 Hz ve% 90 görev devri). Bu işlem, üst dağıtılmış Bragg reflektör (DBR) için bilgisayar kontrollü modülasyon ile 6 kez tekrarlanır. Aynı süreç, ancak ters sırayla, alt DBR için gerçekleştirilir. Böylece, iki DBR arasındaki ara yüzeydeki iki bitişik yüksek gözeneklilik alt katmanı mikrokavit oluşturmuştur. Bu şekilde, 400-900 nm dalga boyu bölgelerinde yansıtıcılı spektrumu olan TBAG2 kodlu sensör olarak üretilmiştir (Karacalı 2003).

İkinci bölümdeki çalışmada;

Yansıma ölçümünün yapılabilmesi için Şekil 3.3'de gösterilen bir optik karakterizasyon düzenek kullanıldı. TBAG2 kimyasal sensörü şekilde numune ile gösterilen yere bağlanarak yansıma ölçümleri önce çözücü yokken yalnızca azot gazı altında ve daha sonra çözücüler ile yansıma spektrumları sistemden ölçüldü. Aseton ve Etanol çözücüler için deney yeniden tekrarlandı. Bunun için halojen (450-850 nm alanında ışık veren) lambanın spektrumu bir taşıyıcı fiber kablonun ucuna yerleştirilen aynadan alınarak referans olarak kaydedildi. Bir taşıyıcı fiber kablo ucunda herhangi bir şey yokken spektrum alınarak sistemin görüntüsü olarak kaydedildi. Sensörden gelen spektrumdan gürültü spektrumu çıkarıldıktan sonra aynadan gelen referans spektrumuna oranlayarak % cinsinden yansıma spektrumu elde edildi. HR4000 spektroskopisi, tek dalga boylu ışıkla uyarılan numunedan yayınlanan karakteristik ışığın bir monokromatör ve detektör aracılığı ile dalga boyuna veya enerjiye bağlı olarak şiddetinin kaydedilmesini sağlandı. Azot gazı akış miktarı bir akış ölçer tarafından kontrol edildi.

Optik giriş olarak, özel tasarlanmış optik fiberler kullanılmıştır. Spektrum dağılımının karşılığı olan analog elektriksel sinyal, bir ara yüz ile sayısal sinyale çevrilerek bir yazılım yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılır. Sensörün değişik noktalarından çoklu yansıma ölçümleri almak için bilgisayar kontrollü XYZ-Stages kullanıldı. Şekil 3.4 de gösterilen ölçüm düzeneğinde numune, lensin orta noktasına gelecek şekilde gözle kontrol edilerek bağlandı. Bilgisayara bağlı XYZ-Stages 'in programı çalıştırılarak Şekil 3.5 'de gösterilen "Position Status" penceresinden sıfırlama işlemi yapılır ve lens başlangıç konumuna getirilir. Jog penceresindeki (Index Distance) X-Y değerlerine Şekil 3.6 de gösterilen kırmızı renkli noktadan başlanarak mesafe matrisindeki sayısal değerler mm cinsinden yazılır ve a\_1 noktasından ölçme işlemine başlanır. XYZ-Stages'e X-Y butonlarına basılarak girilen başlangıç değeri değiştirilir ve böylece lens kontrol edilerek ölçme noktalarını değiştirir. Kontrol vanası Azot tarafında açılarak ortama sadece taşıyıcı azot gazı verilir ve numunenin gözenekleri üzerindeki yabancı gazların süpürülmesi sağlanır. Şekil 3.8 deki sistemde sadece azot gazı varken elde edilen yansıma görüntüsü görülmektedir. Sisteme Solvent buharı, taşıyıcı azot gazı ile birlikte verilirse ikinci belirlenen noktadan ölçmeye devam edilir. Sistemde Solvent buharı verilirken elde edilen yansıma görüntüsü Şekil 3.9 da görülmektedir. Bu işlemler şekil 3.7 deki veri matrisindeki tüm değerler elde edilene kadar devam edilir.

Üçüncü bölümdeki çalışmada;

Çok noktadan Yansıma Ölçüm Deney Düzeneğine Azot gazı verilerek ölçme işlemine başlandığında; ilk ölçme noktasında sistem "a1" isimli REFLECTION Dosyası üretmiştir. Bu dosyanın içeriği Şekil 4.1 de görüldüğü gibidir. Bu dosya "notepad.exe" text düzenleme programında açıldığında 3600 satırdan oluştuğu görülür. Dosya içerisindeki açıklama metinleri atılarak Matlab programı yardımıyla analiz edildiğinde Şekil 4.2 de gösterilen Yansıma (%) – Dalga boyu (nm) grafiği çizdirilmiştir. Bu çizdirilen grafikte Dalga boyu eksenindeki bütün bilgiler (0 - 1100 nm) kullanmak yerine ( 700 ile 850 nm) arasında yansıma ölçüm değerleri kullanıldı. Diğer alanlara göre bu alan daha büyük bir yansıma değişimi gösterdiği için özel olarak seçilmiştir. Bu seçilen alandaki gürültü, kalman filtresi (Alçak geçiren Filtre) yardımıyla atıldıktan sonra en küçük yansımanın olduğu nokta Matlab programı yardımıyla tespit edilmiştir. Bu nokta Şekil 4.6 da sarı daire ile gösterilmiştir. Çınlama frekansı adı verilen, bu özel

noktada sisteme Azot taşıyıcı gazı ile birlikte başka bir gaz verildiğinde çınlama frekansı sağa doğru daha yüksek bir dalgaboyuna doğru kaydığı görülmüştür. Gönderilen gaz kesilerek sadece Azot taşıyıcı gaz verildiğinde ise sensör verileri yeniden ilk başlangıç noktasındaki değere döndüğü görülmüştür.

Şekil 4.7 'de sensörün verilen gazlar için tespit edilen en düşük noktalar görülmektedir. Grafikte en düşük Dalga boyu olarak ölçülen Azot için 738 nm, Aseton için 744nm ve Etanol için ise 766 nm' dir. Şu ana kadar bulunan veriler sadece bir noktasında alınan yansıma dosyasının değerlendirilmesiyle elde edildi. Sensörün 100 ayrı noktası dikkate alınarak yansıma dosyaları Matlab programında analiz edildiğinde Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 'deki grafiklerden sensörün ölçtüğü dalga boyları ve ölçme noktalarını gösteren grafikler elde edilmiştir. Matlab programında dalga boyuna göre ağırlıklı ortalamaları alınarak verilen Etanol buharına en duyarlı veriler birleştirilerek (Data fusion) Şekil 4.25 'daki grafik elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde sensörün Etanol buharını diğer kimyasallara göre çok iyi tespit ettiği görülmektedir.

Bu çalışma aşağıdaki sonuçları ortaya çıkarmaktadır.

- Darbeli Anodik Dağlama yöntemiyle üretilen Microcavity yapıya sahip Gözenekli Silisyum, kimyasal sensör olarak kullanılabilir.
- Kimyasal sensör olarak kullanılan Gözenekli Silisyumun her bir noktası aynı yapısal özelliklere sahip olmadığı için ölçme yapılan noktalar farklı hassasiyetlere sahiptir. Tek noktadan yapılan ölçmelerde ölçme başarısı tesadüflere dayalıdır. Ölçmek için seçilen nokta hassas olmayan bir bölgeye denk geldiğinde başarısız olurken, hassas bir noktada ise başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu sebeple üretilen her bir sensörlerden çok noktalı ölçümler yapılarak sensör karakterizasyonu yapılabilir.
- Çok noktadan yapılan ölçümler tek noktadan yapılan ölçümlere göre daha net sonuçlar ortaya koymaktadır.
- Tezde anlatılan düzenele laboratuvarında bulunan Azot gazı, Aseton ve Etanol gibi kimyasal çözücüler birbirinden ayırt edilebilmektedir. Önerilen düzeneğe farklı gazlar da gönderilerek yeni tespit yapmak mümkündür.





**KAYNAKLAR**

- Abouelsaood, A., 2002. Modeling light. Scattering from mesoporous silicon, *J. Appl. Phys.*, 91, 2753
- Beale, M.I.J., Benjamin, J.D., Uren, M.J., Chew, N.G. ve Cullis, A.G., 1985. An Experimental and Theoretical Study of The Formation and Microstructure of Porous Silicon, *J. Cryst. Growth*, 73(3): 622-636.
- Berger, M.G., Arens-Fischer, R., Thonissen, M., Krüger, M., Billat, S., Lüth, H., Hilbrich, S., Theifi W. and Grosse, P., 1997. Dielectric filters made of PS: advanced performance by oxidation and new layer structures, *Thin Solid Films*, 297, 237.
- Bisi, O., Ossicini, S., Pavesi, L., 2000. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics, *Surface Science Reports*, 38:1-126.
- Biroğul, S. Sönmez, Y. 2007. Neden Veri Füzyonu, Akademik Bilişim 2007 Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Canham L.T., 1990. "Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers", *Appl. Phys. Lett.*, 57(10): 1046-1048.
- Canham, L.T., Cox, T.I., Loni, A., Simons, A.J., 1996. Progress towards silicon optoelectronics using porous silicon technology, *Applied Surface Science*, 102, 436.
- Canham L., 1997. Properties of Porous Silicon, DERA, Malvern, UK.
- Canham, L.T., 2000. Gaining light from silicon, *Nature*, 408, 411.
- Chan, S. and Fauchet, P.M., 1999. Tunable, narrow, and directional luminescence from porous silicon light emitting devices, *Appl. Phys. Lett.*, 75, 274.
- Chan, M.H., So, S.K. ve Cheak, K.W., 1996. *J. Appl. Phys.* 79: 3273.

- Chan, C.H. ve Chen, Y.F., 1999. *Solid State Commun.*, 111: 681-685.
- Collins, R.T., Fauchet, P.M. ve Tischler, M.A., 1997. "Porous Silicon: From Luminescence to LEDs", *Physics Today*. 50(1): 24-31.
- Cullis, A.G., Canham, L.T., Calcott, P.D.J., 1997. The structural and luminescence properties of porous silicon, *J. Appl. Phys.*, 82, 909.
- Gaburro, Z., Belluti, P. and Pavesi, L., 2000. CMOS Fabrication of a Light Emitting Diode Based on Silicon/ Porous Silicon Heterojunction, *Phys. Stat. Sol.*, 182, 407.
- Givant, A., Shappir J. and Sa'ar, A., 2000. Porous Silicon on Insulator: A New Approach to Fabricate Porous Silicon Based Optoelectronic Devices, *Phys. Stat. Sol.*, 182, 419.
- Grover, R., Narasimhan, K.L., Sharma, D.K., 2000. Pulsed Anodic Anodisation of Porous Silicon Films, *Journal of Porous Materials*, 7, 377
- Halimaoui A., 1997. *Surf. Sci. Lett. (Netherlands)*, 306: L550-4.
- Hall, D., 2004. "Mathematical techniques in multisensor data fusion", MA: Artech House.
- Hilbrich, S., 1997. The Application of porous silicon interference filters in optical sensors, *Thin Solid Films*, 297, 250.
- Hou, X. Y., Fan, H., Xu, L., Zhang, F., Li, M., Yu, M. and Wang X., 1996. Pulsed anodic etching: An effective method of preparing light-emitting porous silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 68, 2323.
- Hunkel, D., Butz, R., Ares-Fisher, R., Marso, M. and Lüth, H., 1999. Interference filters from porous silicon with laterally varying wavelength of reflection, *Journal of Luminescence*, 80, 133.
- John, G.C. ve Singh, V.A., 1995. Porous Silicon: Theoretical Studies, *Physics Reports*, 263: 93- 151.

- Kanemitsu, Y., 1995. Light Emission From Porous Silicon and Related Materials, Physics Reports, 263: 1-91.
- Karacalı.T, Cakmak, B., Efeoğlu, H., 2003. Aging of porous silicon and the origin of Blue Shift, Optics Express, 11, 1237.
- Karacalı., 2003. Darbeli Anadizasyon Tekniği ile Gözenekli Si ve Gözenekli Si Tabanlı Fabry-Perot yapıların Üretimi : Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Koshida, N. and Koyama, H., 1992. Visible elektro luminescence from porous silicon, Appl. Phys. Lett., 60, 347.
- Koyama, H.and Koshida, N.,1993. Photo-assisted tuning of luminescence from porous silicon, J. Appl. Phys., 74, 6365.
- Klein, L.,A., 1999. Sensor and data fusion concepts and application, Tutorial texts in optical engineering , vol.TT35, SPIE optical engineering image.
- Klein, L.A. 2004. Sensor and Data Fusion a Tool for Information Assessment and Decision Making. SPIE Press, 324, Washington.
- Lehmann, V. and Gösele, U., 1991. Porous Silicon Formation A Quantum Wire Effects, Appl. Phys. Lett., 58: 856-858.
- Lehmann, V., 1995. Porous Silicon, Science and Technology, 1, Paris
- Lehman, V., 2002. Electrochemistry of Silicon, Wiley-WCH Verlag GmbH, 271, Federal Republic of Germany.
- Llinas, J., And Waltz, E., 1999. "Multisensor data fusion", Boston, MA: Artech House.
- Lus, O.Ç.,2004),Gözenekli silisyum eklemlerin elektriksel özellikleri, Doktora Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Luo, R. C. and Kay, M. G., 1995. "Multisensor integration and fusion for intelligent machines and systems", Ablex publishing corporation, Norwood, New Jersey.

- Martin, P., Fernandez, J. F., Cuevas, F., Alguerö, M. and Sánchez, C., 1996. Influence of anodization time and current density on the photoluminescence of porous n-Si, *Thin Solid Films*, 276, 212.
- Mandic, D. Obradovic, D Kuh, A. Adali, T. Trutschel, U. Golz, M. De Wilde, P. Barria, J. Constantinides, A. Chambers, J., 2005. Data Fusion For Modern Engineering Applications: An Overview, *International Conference on Artificial Neural Networks*, POLONYA.
- Mattei, G., Alieva, E. V., Petrov, J. E. and Yakovlev, V. A., 1999. Enhancement of adsorbate vibrations due to interaction with microcavity mode in porous silicon superlattice, *Surface Science*, 427, 235.
- Mazzoleni, C. and Pavesi, L., 1995. Application to optical components of dielectric porous silicon multilayers, *Appl. Phys. Lett.*, 67, 2983.
- Mulloni, V., Gaburro, Z., and Pavesi, L., 2000. Porous Silicon Microcavities as Optical and Electrical Chemical Sensors, *Phys. Stat. Sol.(a)*, 182, 479.
- Noguchi, N. ve Suemune, I., 1993. Luminescence Silicon Synthesized by Visible Light Irradiation, *Appl. Phys. Lett.*, 62(12):1429-1431.
- Nazan, C., 2008. Gözenekli Silisyumun Optik ve Elektriksel özelliklerine Metalizasyon katkısının İncelenmesi. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Pavesi L. ve Dubos P., 1997. *Semicond. Sci. Technol.*, 12: 570-5.
- Polishchuk, V., Souteyrand, E., Martin, J. R., vd., 1998. *Analytica Chimica Acta*, 375(3): 205- 210.
- Smith, R.L. ve Collins, S.D., 1992. Porous Silicon Formation Mechanisms, *Journal Appl. Phys.*, 71:R1-21.
- Snow, P.A., Squire, E. K., Russel P. S. J., 1999. Vapor sensing using the optical properties of porous silicon Bragg mirrors, *J. Appl. Phys.*, 86, 1781.

- Squire, E. K., Snow, P. A., Russell, P. St. J., Canham, L. T., Simons, A. J. and Reeves C. L., 1998. Light emission from porous silicon single and multiple cavities *Journal of Luminescence*, 80, 125.
- Squire, E. K., Russel P. S. J. and Snow, P. A., 1998. Optimized light emission from layered porous silicon structures, *Applied Optics*, 37, 7107.
- Setzu, S., Ferrand, P., Romestain, R., 2000. Optical properties of multilayered porous silicon, *Material Science and Engineering*, B69-70, 34.
- Singh, J., 1995. *Semiconductor Optoelectronics*, ISBN:0-07-057637-8
- Süreyya, A., 2010. Gözenekli Silisyum Esaslı Sensörlerin Hazırlanması ve İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Taliercio, T., Dilhan, M. ve Massone, E., 1995. *Thin Solid Films*, 255: 310.
- Tsai, C., vd., 1991. *Appl. Phys. Lett.*, 59:2815.
- Uhlir, A., 1956. Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon, *Bell System Tech. J.*, 35:333- 347.
- Xu, D., Guo, G., Gui, L., Tang, Y., Qin, G.G., 2002. *Pure Appl. Chem.* 72: 237 Xu, S.H., Xiong Z.H., Gu, L.L., Liu, Y., Ding, X. M., Zi, J., Hou, X.Y., 2002, Naneline light emission from porous silicon multilayers and microcavities, *Semicond. Sci. Technol.*, 17,1004.
- Yamani, Z., Asshab, S., Nafyef, M., 1998. Red to green rainbow photoluminescence from unoxidized silicon nanocrystallites., *J. Appl. Phys.*, 83, 3929.
- Zhou, Y., Snow, P.A., Russel, P. S. J., 2000. Strong modification of photoluminescence in erbium-doped porous silicon microcavities, *Appl. Phys. Lett.*, 77, 2440.
- Zhou, Y., Snow, P.A., Russel, P.S.J., 2000. The Effect of Thermal Processing on Multilayer Porous Silicon Microcavity, *Phys. Stat. Sol.(a)*, 182, 319.

Zangoie, S., Jansson, R. and Anvin, H., 1999. Ellipsometric characterization of anisotropic porous silicon Fabry-Perot filters and investigation of temperature effects on capillary condensâtion efficiency, *J. Appl. Phys.*, 86, 850.



## ÖZGEÇMİŞ

1974’ yılında ARTVİN ili Yusufeli ilçesinde dünyaya gelen Mustafa AKBUĞA ilk, orta ve Lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 1992 yılında başladığı Atatürk Üniversitesi Erzincan Meslek yüksekokulu Endüstriyel Elektronik Bölümü’nden okul birincisi olarak mezun oldu. 1994 yılında Dikey geçiş ile başladığı Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği’nden 1998 yılında mezun oldu.

1999-2000 yıllarında Kısa dönem olarak Askerlik görevini tamamladı. 2000 yılında Milli Eğitim Bakanlığı Erzurum Atatürk Endüstri meslek Lisesinde Meslek dersi öğretmeni olarak göreve başladı. 2001 yılında Atatürk Üniversitesi Erzurum Meslek Yüksekokuluna kurumlar arası muvafakat ile geçiş yaptı.

2001 yılında Bilgi İşlem Merkezi Bilgisayar bilimleri dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. İngilizce hazırlık sınıfında iken devamsızlık sebebiyle Yüksek Lisans eğitime ara verdi. 2009 yılında af kanunundan yararlanarak ( Eğitime başladığı bölüm öğrenci olmadığı için ) Atatürk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Y. Lisans eğitime yeniden başladı hâlen bu bölümde eğitime devam etmektedir.