T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

Zn, Ti, Sn OKSİT YAPILARININ SAW TRANSDUSER İLE GAZ ALGILAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, SENSÖR VERİLERİNİN ANALİZİ

Cihat TAŞALTIN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK

GEBZE
2013

DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/02/2013 tarih ve 2013/10 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 13/03/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Cihat TAŞALTIN 'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK

ÜYE : Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

ÜYE : Doç. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU

ÜYE :Prof. Dr. Sait Eren SAN

ÜYE : Doç. Dr. Yusuf YERLİ

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Not: Formdaki boşluklar mutlaka Ms Word ortamında doldurulacak.

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI **:Zn, Ti, Sn OKSİT YAPILARININ SAW TRANSDUSER İLE GAZ ALGILAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, SENSÖR VERİLERİNİN ANALİZİ**

TEZİN YAZARI **:Cihat TAŞALTIN**

Bu tezde, çinko oksit (ZnO), kalay dioksit (SnO_2) ve titanyum dioksit (TiO_2) nano yapılı ince filmler yüzey akustik dalga (SAW) transduserler üzerine kaplanıp sensör özellikleri incelenmiştir. Elde edilen nano yapıların SAW'un karakteristiğine olan etkilerinin belirlenmesi amacıyla SAW transduser üzerine farklı kalınlıklarda filmler kaplanmıştır. Bu yapıların akım-gerilim (I-V) karakteristikleri ile Saçılma (S) parametreleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir. ZnO, SnO_2 ve TiO_2 yapıları için iletkenlik-kayıp-kaplama kalınlığı grafikleri birbirine bağlı olarak oluşturulmuştur.

SAW sensörler, uçucu organik bileşiklere, neme ve nemli ortamdaki uçucu organik bileşiklere karşı test edilip, sensör özelliklerindeki değişim iletkenlik-kayıp-kaplama kalınlığı için oluşturulan grafik dikkate alınarak araştırılmıştır. Algılama mekanizması, film kalınlığına bağlı olarak açıklanmıştır. İlave olarak, nemli ortamın sensör cevapları üzerine etkisi de araştırılmıştır.

Principle Component Analysis (PCA) ve Hierarchical Component Analysis (HCA) veri analiz teknikleri kullanılarak, sensör karakteristiğinin kaplama kalınlığına bağlılığı belirlenmiştir. PCA tekniğiyle, aynı kaplama malzemesi kullanılarak elde edilen sensör dizisinin seçiciliği belirlenmiştir. HCA tekniğiyle, sensör dizisindeki her bir sensörün karakteristiklerindeki farklılıklar belirlenmiştir. SAW sensörler için, aynı algılayıcı film kullanılarak farklı karakteristikte sensör yapılarının oluşturulabileceği belirlenmiştir.

SUMMARY

THESIS TITLE: **INVESTIGATION OF GAS SENSORS PROPERTIES OF THE Zn, Sn, Ti OXIDE STRUCTURES ONTO THE SAW TRANSDUCERS AND SENSOR DATA ANALYSIS**

AUTHOR **: CİHAT TAŞALTIN**

In this thesis, Zinc oxide (ZnO), tin dioxide (SnO_2) and titanium dioxide (TiO_2) nanostructured thin films were coated on SAW transducer and their gas sensing properties were investigated. To determine the effects of the coated nanostructured films on the characteristics of the SAW transducers, the films were coated with different thicknesses and measurements of I-V and S-parameters of these films were performed. The conductivity-loss-coating thickness graphs of ZnO, SnO_2 and TiO_2 nanostructured films were obtained depending to each other.

SAW sensors were tested against to volatile organic compounds, humidity, and volatile organic compounds in presence of humid ambient, and the variation of the responses of the SAW sensors was investigated according to the conductivity-loss-coating thickness graph. Sensing mechanism was explained depending on the film thicknesses. The effects of the humidity on SAW responses was also investigated.

The dependence of the coating thickness on the characteristics of the sensors was determined by Principle Component Analysis (PCA) and Hierarchical Component Analysis (HCA) data analysis techniques. Selectivity of the obtained sensor array having same coating material was determined by PCA technique. The differences of the characteristics of the each sensor in the sensor array were determined by HCA technique. It is determined that, by using same sensing film the different sensor structures have different characteristics can be obtained for SAW sensors.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesiyle yol gösterici olan, çalışmalarıma yön veren, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü öğretim üyesi değerli hocam Sayın Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK' e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Birlikte çalışmaya başladığımız 1998 yılından bu yana bir ağabey yakınlığı ile çalışmalarıma yön veren, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Dumlupınar Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesi öğretim üyesi değerli hocam Doç. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU'na ve Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi değerli hocam Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL'a, tezimin değerlendirilmesinde katkılarını esirgemeyen değerli jüri üyelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında ihtiyaç duyduğum alt yapı ve kimyasalların temininde sağladığı kolaylıklardan dolayı TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'ne, ölçüm malzemelerinin hazırlanmasında yaptıkları yönlendirmelerden dolayı grup çalışma arkadaşlarıma ve Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Bölümü öğretim üyesi değerli hocam Sayın Prof. Dr. Vefa AHSEN'e ve çalışmalarıma destek veren tüm iş arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim öğretim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren, sevgili Anneme, Babama, tez çalışmam süresince bana sonsuz destek veren çok değerli eşim ve hayat arkadaşım Nevin TAŞALTIN'a, oğlum Ahmet Selim TAŞALTIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Cihat TAŞALTIN

Gebze 2013

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET I
SUMMARY II
TEŞEKKÜR III
İÇİNDEKİLER DİZİNİ IV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ VII
ŞEKİLLER DİZİNİ VIII
TABLOLAR DİZİNİ XIII
1 GİRİŞ 1
1.1 Motivasyon 1
1.2 Amaç 3
1.3 Tezin Organizasyonu 4
2 GENEL BİLGİLER 5
2.1 Akustik Transduser 5
2.1.1 Piezoelektrik Etki 5
2.1.2 Akustik Dalga 6
2.1.3 Yüzey Akustik Dalgasının IDT Yapısı İle Üretilmesi 9
2.1.4 SAW Eşdeğer Devre Modeli 12
2.1.5 Yüzey Akustik Dalgasının Pertürbasyon Mekanizması 17
2.1.5.1 Yüzey Akustik Dalgası-Kütle etkileşimi 18
2.1.5.2 Yüzey Akustik Dalgası-Elektriksel Etkileşimi 19
2.1.5.3 Yüzey Akustik Dalgası-Viskoelastik Etkileşim 24
2.2 Algılayıcı Katman 26
2.2.1 Metal oksitler ve Algılayıcı Tabaka Olarak Kullanımı 28
2.2.2 Metal oksit Filmlerin SAW Transduser için Algılayıcı Tabaka Olarak Kullanımı 30
2.2.2.1 Çinko Oksit 33
2.2.2.2 Kalay Oksit 34
2.2.2.3 Titanyumdioksit 35
2.2.3 Metaloksit Filmlerin Üretimi 36
2.2.3.1 RF Sputter Tekniği ile Metal oksit Filmlerin Elde Edilmesi 36

2.2.3.2 Sol-Gel Yöntemi İle Metal oksit Filmlerin Elde Edilmesi 37
2.2.3.3 Elektro-Spray (ES) Kaplama Tekniği 39
2.3 Sensör Tepkileri Analiz Metotları 41
2.3.1 Principal Component Analaysis (PCA) 43
2.3.2 Hierarchical Clustering Analysis(HCA) 43
3 DENEYSEL YÖNTEM 46
3.1 Elektropsray Kaplama Sistemi 46
3.2 SAW Transduser ve Sürücü Devresi 48
3.2.1 SAW Rezonatör 48
3.2.2 Osilatör Devresi 50
3.3 Nano Parçacık Sentezi 52
3.3.1 ZnO Nano Yapıların SAW Üzerine Büyütülmesi 52
3.3.2 Kalay Oksit Nano Parçacık Sentezi 53
3.3.3 Titanyumdioksit Nano Parçacık Sentezi 53
3.4 Analiz ve Karakterizasyon 55
3.4.1 Metaloksit Nano Parçacık Kaplı SAW transduserlerin Yüzeylerinin Yapısal Analizleri 55
3.4.2 Metaloksit Nano Parçacık Kaplı SAW'ın Elektriksel ve İmpedans Karakterizasyonu 55
3.4.2.1 İletkenlik Ölçümleri 55
3.4.2.2 Network analizörü ölçümleri 56
3.4.2.3 Gaz Sensörü Ölçümleri 57
4 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME 60
4.1 Yapısal ve Elektriksel Analizler 61
4.1.1 ZnO Sonuçları 61
4.1.1.1 ZnO Yapısal Analizleri 62
4.1.1.2 ZnO Filmin Elektriksel Analizleri 68
4.1.2 SnO_2 Sonuçları 73
4.1.2.1 SnO_2 Yapısal Analizler 74
4.1.2.2 Nano yapılı SnO_2 Filmin Elektriksel Analizleri 77
4.1.3 TiO_2 Sonuçları 79
4.1.3.1 Nanoyapılı TiO2 Filmin Yapısal Analizleri 79
4.1.3.2 Nano yapılı TiO_2 Filmin Elektriksel Analizleri 85

4.2 Sensör Sonuçlarının Değerlendirilmesi 87
4.2.1 ZnO kaplı SAW'ların Sensör Sonuçları 88
4.2.1.1 ZnO kaplı SAW Sensörlere Nem etkisi 92
4.2.1.2 ZnO kaplı SAW Sensörlerin Gaz Algılaması Üzerindeki Nem Etkisi 92
4.2.2 SnO_2 kaplı SAW'ların Sensör Sonuçları 94
4.2.2.1 SnO_2 kaplı SAW Sensörlere Nem etkisi 96
4.2.2.2 SnO_2 kaplı SAW Sensörlerin Gaz Algılaması Üzerindeki Nem Etkisi 98
4.2.3 TiO_2 kaplı SAW'ların Sensör Sonuçları 100
4.2.3.1 TiO_2 kaplı SAW Sensörlerin Nem Tepkileri 103
4.2.3.2 TiO_2 kaplı SAW Sensörlerin Gaz Algılaması Üzerindeki Nem Etkisi 105
4.3 Veri İşleme 108
4.3.1 ZnO Verilerinin Değerlendirilmesi 108
4.3.2 SnO_2 Verilerinin Değerlendirilmesi 110
4.3.3 TiO_2 Verilerinin Değerlendirilmesi 112
5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 114
5.1 Metal Oksit Yapıların Üretimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 114
5.2 Metal Oksit Yapılı SAW Sensörlerin Elektriksel ve Sensör Özelliklerinin Değerlendirilmesi 115
5.3 Veri İşlem Sonuçları 116
KAYNAKLAR 117
ÖZGEÇMİŞ 127

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

EDS : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

EDX : Energy Dispersive X-ray (Enerji Ayırım X ışını)

XRD : X-Ray Diffraction (X Işını Kırınımı)

ppm : Part per million (milyonda kısım)

V : Gerilim

I : Akım

SAW : Surface Acoustic Waves (Yüzey Akustik Dalgaları)

QCM : Quartz Crystal Microbalance

PCA : Principal Component Analysis

HCA : Hierarchical Clustering Analysis

ZnO : Çinko Oksit

SnO_2 : Kalay di-Oksit

dB :desibel

TiO_2 : Titanyum di-Oksit

VOC : Volatile Organic Compound

IDT : Interdigital Transducer

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

1 Kuartz kristali üzerine uygulanan kuvvete karşı kristal içindeki polarizasyon değişimi. 5

2 Elektrik alana göre kristalin davranışı. a) Elektrik alan yokken kristalin durumu, b) –y yönelimli (+y den -y) elektrik alanın oluşturduğu mekanik basma tepkisi, c) +y yönelimli (-y den +y) elektrik alanın oluşturduğu mekanik çekme tepkisi. 6

3 a) Enine dalga, b) Boyuna dalga. 7

4 Rayleigh Dalgası 7

5 a) IDT yapısı ve akustik dalga üretimi, b) İki portlu SAW transduser. 8

6 a) Kuartz Kristal yapısı ve eksenleri b) ST-X kesim kuartz Kristal 9

7 Oluşturulan yüzey dalgasının genliğinin IDT boyunca değişimi. 10

8 1. ve 3. Harmoniklere ait şekillenimler. 11

9 Transduser band genişliği. 12

10 Tek Portlu SAW ve Eşdeğer devresi 13

11 a) çift potlu SAW transduser yapısı, b) çift portlu SAW transduser yapısının eşdeğer devresi 13

12 Saçılma parametreleri. 15

13 Yüzey akustik dalgası tarafından evanescent elektrik alanı. 19

14 SAW ile İnce filmin içerisindeki yük taşıcıları arasındaki Akustoelektrik etkileşimi tanımlamak için kullanılan eş değer devre modeli 20

15 İletkenlik ve kapasite değişimlerinin kayıp (a) ve frekans kayması(b) üzerine etkisinin karakteristik şekli (Değerler GaAs içindir) 24

16 Metal oksit bir yapının oksijen absorblaması sonucu band yapısındaki değişim 29

17 Metal oksit filmin enerji-band diyagramı ve eşdeğer devre 29

18 Yamazoe'ya göre metal-oksit yapıların gaz algılama aşamaları 32

19 ZnO Kaplanmış SAW transduserin UV sensörü uygulaması 32

20 ZnO Wurtzite (Hegzagonal simetri) yapısı 33

21 Rutil yapıda kristallenen SnO_2 yapısı 34

22 RF sputter kaplama sisteminin şematik görünümü 37

23 a) ES kaplama sisteminin şematik görünümü, b) ES kaplama sisteminin fotoğrafı 40
24 a) Kütle spektroskopisi üzerindeki ES sistemin Şematik görünümü ,b) ES kaplama esnasında damlacık oluşumu 41
25 N tane sensör için P tane analitin oluşturduğu örnek uzay. 42
26 a) Ayrık Kümeler, b) HCA gerçekleştirilen kümeleme işlemi ve Dendogram yapısı 44
27 Kümeler arası mesafenin hesaplanmasında uygulanan yöntemler. 45
28 Kümeleme aşamaları ve iki küme arasındaki uzaklık. 45
29 a) ES kaplama sistemi, b) ES kaplama sisteminin genel görünümü. 47
30 İğnenin ucunda oluşan koni yapısı. 47
31 Kullanılan SAW'larda alıcı ve verici IDT'lerin elektrot ve elektrotlar arası genişliği. 48
32 Tez çalışmasında kullanılan SAW rezonatörün AFM görüntüsü 50
33 a) SAW osilatör devresine ait devre şeması, b) SAW rezonatör bağlantı şeması. 51
34 6+1 adet 433MHz SAW rezonatörü çalıştırabilen osilatör devresi. 51
35 İmpedans-Frekans değişimi. 57
36 Kayıp-Frekans değişimi. 57
37 Sensör test sistemi. 59
38 Data okuma ve ölçüm hücreleri. 59
39 Nano yapılı ZnO filme ait XRD spektrumu. 63
40 Küresel yapılardan oluşmuş öbeklenmeler 64
41 Yüzeyde dağılımları homojen olmayan film yapısı. a) Elektrotlar üzerinden alınan görüntü, b) Ara bölgeden alınan görüntü 65
42 Yüksek frekans kaymalarındaki film yapısı 66
43 Düşük frekans kaymasına ait SAW'un EDS analizi 67
44 Yüksek frekans kaymasına ait SAW'un EDS analizi 67
45 Nanoyapılı ZnO film kaplı SAW transduserin AFM görüntüsü 68
46 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin 69
47 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin kayıp 69
48 Yaklaşık 1MHz frekans kaymasına sahip SAW transduser için I-V eğrisi. 70
49 Nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserler için iletkenlik-kayıp, 71

50 Nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserler için normalize iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması değişimleri 72
51 Nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserlerin kaplama miktarına bağlı olarak kayıp parametresi üzerinde meydana gelen değişim. 72
52 Tavlama sıcaklığına bağlı olarak oluşan SnO_2 kristal fazları 74
53 SnO_2 formuna ait XRD spektrumu. 75
54 Düşük frekans kaymasına sahip SAW transduser üzerine kaplanan nano yapılı SnO_2 filmin a) düşük büyütmeli, b) yüksek büyütmeli SEM görüntüleri. 75
55 Yüksek frekans kaymasına sahip SAW transduser üzerine kaplanan SnO_2 filmin 76
56 Yüksek frekans kaymasına sahip SAW yüzeyi. 76
57 a) EDS analizi spektrumu, b) analiz edilen bölgenin SEM görüntüsü. 77
58 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin 78
59 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin 78
60 Nanoyapılı SnO2 film kaplı SAW transduserler için normalize iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması değişimleri 79
61 550 ^{0}C sıcaklıkta tavlanan nano yapılı TiO_2 filme ait XRD spektrumu 80
62 a) Rutile, b) anatase fazdaki TiO_2 nano yapıların SEM görüntüleri 80
63 Farklı çözelti hacmi kullanılarak elde edilen TiO_2'ye ait SEM görünüsü 81
64 a) PVP monomer yapısı b) Titanium(IV) butoxide 82
65 TiO_2 Fiber yapılı kaplamalar 83
66 PVP konsantrasyonu artırılmış çözelti ile elde edilen TiO_2 yapıya ait SEM görüntüsü 83
67 6000 zincir uzunluğuna sahip PVP ile gerçekleştirilen kaplamaya ait SEM görüntüsü 84
68 a) Kayıp-Frekans, b) Empedans Kayıp, c) kayıp-iletkenlik, frekans kayması-iletkenlik eğrisi 86
69 420 kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörünün sensör cevabı 89
70 Orta seviyede(~1400kHz) kaplanmış SAW için elde edilen sensör cevabı 90
71 Orta seviyede(~1300kHz) kaplanmış SAW için elde edilen sensör cevabı 90
72 En yüksek frekans kaymasına sahip (2,4 MHz) SAW dan elde edilen sensör tepkisi 91
73 Nano yapılı ZnO kaplı SAW sensörün yalnızca nem değişimlerine olan tepkisi 92

74 Farklı nem seviyelerinde kloroform ölçümü ile elde edilen sensör cevabı 93
75 Farklı kaplama kalınlıklarda SAW üzerine kaplanmış ZnO nano yapılı sensörlerin farklı nem seviyelerinde ölçülen a)Aseton b) Kloroform c) Propanol d) Trikloretilene karşı sensitiviteleri 94
76 a) 140kHz, b) 650kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörlerin farklı gazlara karşı sensör tepkileri 95
77 850kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün tepkisi 96
78 1100kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün tepkisi 96
79 155 kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'ın nem değişimlerine olan tepkisi 97
80 360kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'ın nem 97
81 Yüksek frekans kayması bölgesindeki sensörün nem değişimine olan tepkisi 98
82 a) Düşük, b) Orta, c) Yüksek frekans kaymasına sahip SAW sensörlerin farklı nem ortamlarında ve farklı konsantrasyonlardaki kloroforma karşı sensör tepkileri 99
83 a) metanol b) propanol c) etanol sensitivite bar diyagramları 100
84 a) düşük b) orta c) yüksek frekans kayması bölgelerindeki etanol tepkileri 101
85 Düşük frekans kaymasına sahip SAW sensör için elde edilen sensör tepkileri 102
86 Orta seviyede frekans kaymasına sahip SAW sensör tepkileri 102
87 Yüksek frekans kaymasına sahip SAW sensör için elde edilen sensör tepkileri 103
88 40kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'ın nem değişimlerine olan tepkisi 103
89 Yaklaşık 650kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'un neme tepkisi 104
90 Yaklaşık 1.5MHz kaplama frekansı kaymasına sahip TiO_2 kaplı SAW'un nem tepkisi 105
91 a) Toluen için sensitivite bar diyagramları b) 45kHz kaymasına sahip SAW sensörlerin farklı nem ortamlarında Toluen karşı sensör tepkileri 106
92 a) Kloroform b) propanol sensitivite bar diyagramları 106
93 45kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün a) aseton ve b) trikloretilene olan tepkileri 107
94 a) Aseton b) Trikloretilen sensitivite bar diyagramları 107
95 ZnO için elde edilen PCA grafiği a) Rh % 0, b) Nemli ortam. 109
96 ZnO için gerçekleştirilen HCA sonucu (dendogram) 110

97 Etanol, kloroform ve trikloretilenden elde edilen PCA grafiği 111

98 SnO_2 kaplı SAW sensörlerden elde edilen veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiş HCA sonucu 111

99 a) Rh %0 Nem ortamında b) Rh % 50 Nem ortamında gerçekleştirilen gaz ölçümlerinden elde edilen PCA sonuçları 112

100 TiO_2 nano yapıların kaplı olduğu SAW sensörleri için elde edilen HCA sonucu 113

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	**Sayfa**
1 Kristal kesim yönlerine göre dalga hızı ve	9
2 Metaloksit yapılar ve Algılanabilecek gazlar	31
3 SAW Components firmasından SR434G 2-port resonator bilgileri.	49
4 Test edilen gazların, molekül ağırlığı, polaritesi ve ölçüm aralığı.	58
5 Nano yapılı ZnO film için gerçekleştirilen SAW kaplamaları için kaplama miktarları ve buna bağlı olarak elde edilen frekans kaymaları	62
6 EDS analizi.	67
7 Nano yapılı SnO_2 film kaplı SAW transduserlerin kaplanmasında kullanılan çözelti miktarları ve buna bağlı olarak elde edilen frekans kaymaları.	73
8 SAW transduser üzerindeki SnO_2 filmin EDS analizi.	77
9 SAW üzerindeki TiO_2'in EDS analizi	84
10. TiO_2 kaplı SAW çalışmalarında kullanılan kaplama miktarları ve buna bağlı olarak gerçekleşen frekans kaymaları	85
11 Test edilen gazlar ve konsantrasyonları	87

1 GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Sensörler, bulundukları ortamdaki fiziksel veya kimyasal değişimleri elektrik sinyaline dönüştürebilen aygıtlardır. Gaz ortamında çalışan ve gazların ortamda varlığını ve konsantrasyonunu ölçmeye yönelik kullanılan aygıtlar ise "gaz sensörleri" olarak adlandırılır. [1].

Endüstriyel işlemlerin sürdürülmesinde, fiziksel ve kimyasal değişimlerin belirlenebilmesi için ölçüm cihazlarına gereksinim vardır. 1860 yılında Wilhelm Von Siemens, bakır bir telin elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimini gözlemlemek suretiyle ilk sensörü imal etmiştir. 1900'lü yılların başından günümüze kadar endüstriyel problemlerin çözümlenmesi için sensörlere olan gereksinim artarak devam etmektedir. Günümüzdeki nanoelektronik yapılanmadaki teknolojik ilerleme ve geldiği noktaya paralel olarak sensör teknolojileri de benzer ivme ile ilerlemeye devam etmektedir. Mikroelektronik ve nanoelektronik aygıt yapılarındaki kazanımlar sensör teknolojilerini de etkilemektedir. Sensörler böylece akıllı (smart) sensörler olarak üretilmekte ve bilinen sensör problemlerinin çözümlenmesinde elektronik yöntemler kullanılmaktadır [1].

Gaz ve sıvı ortamda bulunabilecek analitlerin algılanmasına yönelik uygulamalarda, yöntem ve tekniklerin geliştirilmesi, teknolojik gelişmelere paralel olarak çeşitlilik göstermektedir. Algılama mekanizması üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, sensörlerin algılamasının modellendiği tasarımlar ile farklı yapılı nanosensörler kullanıma sunulmaktadır. Böylece daha güvenilir, ucuz ve kararlı sensörler tüketicilerin kullanımına sunulmaktadır. Sensör algılama tekniklerinden en iyi bilinenlerinden birisi de, basit ve halen birçok sensörün temel çalışma prensibini oluşturan iletkenlikteki değişimlerin ölçülmesi esasına dayanan sensör sistemlerdir. Bu sistemlerde; sensör ortamında herhangi bir gaz/sıvı analiti bulunduğunda algılayıcı malzemenin iletkenliği analitin konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Analit kontsantrasyonu ile iletkenlik değişimi arasındaki ilişki değeri belirlenirse, iletkenlikteki değişime bakılarak analit konsantrasyonu belirlenebilmektedir. Bir diğer sensör tipide, bir piezoelektrik malzeme içinde oluşturulan akustik dalgaların frekansındaki değişimlerin analit konsantrasyonuna bağlı olarak ölçülmesi esasına dayanan sensör sistemlerdir [2]. Bu yapılar; Kuartz Kristal Mikrobalans (Quartz Crystal Microbalance,

(QCM)), Yüzey Akustik Dalgaları (Surface Acoustic Wave, (SAW)) ve Hacim Akustik dalgaları (Bulk Acoustic Wave, (BAW)) olarak isimlendirilmektedir. Akustik temelli sistemlerdeki bu çeşitliliğin sebebi, akustik dalganın, piezoelektrik malzemenin içinde veya yüzeyinde ilerlemesi ile ilgilidir. Akustik tabanlı sensörler çoğunlukla kütle duyarlı yapılardır. Bu sensörlerde, belirli bir frekansta titreşmekte olan piezoelektrik malzeme (transduser) yüzeyinde biriken kütle, transduserin temel frekansında kaymaya neden olmaktadır. Ancak SAW tipi transduserler için frekanstaki değişimler sadece transduser yüzeyinde biriken kütleye bağlı değildir [3,4]. SAW üzerindeki alıcı verici antenler arasındaki iletkenlik, kapasite ve indüktif etkiler de frekans kaymasına neden olabilmektedir [3]. Bu durum, algılamada elde edilen elektriksel değişimin tek bir parametreye bağlı olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, SAW tabanlı sensörlerde kütlenin yanı sıra iletkenlik ve aynı zamanda kapasitif etkiler de etkin olabilmektedir [4]. Bu etkilerden hangisinin ne kadar baskın olduğunun bilinmesi ise, sensörün seçiciliğinin hangi parametrelere ne kadar bağımlı olduğunun bir göstergesidir.

Metal oksitlerin sensör özellikleri yoğun olarak çalışılan alanlardan birisidir. SAW transduserler ve performans parametrelerinin belirlenmesi, nano yapıların oldukça farklı alanlarda uygulanmaya başlamasıyla yeniden gündeme gelmiş konulardandır. Nano yapılı algılayıcıların ince filmlerden daha farklı elektriksel karakteristiklere sahip oldukları bilinmektedir [3,4]. Buda, SAW tabanlı sensörlerde algılayıcı olarak nano yapıların kullanılmasıyla gerek düşük konsantrasyonlardaki gazların algılanabilmesi gerekse de daha küçük boyutlu sensör ve sistemlerinin geliştirilebilmesini mümkün hale getirmektedir.

Nano yapıların sensörlerde algılayıcı olarak kullanılmaları genelde,

- ✓ Nano tel
- ✓ Nano tüp
- ✓ Nano parçacık

olmak üzere üç farklı yapıda olmaktadır[5].

Nano yapıların sensör uygulamaları ile ilgili çalışmaların incelenmesinde ağırlıklı olarak, algılayıcı olarak kullanılan nano yapıların sensör performanslarının elektriksel iletkenliğindeki değişimlerin ölçülmesi suretiyle belirlendiği görülmektedir [6,7]. Algılayıcı tabakanın elektriksel iletkenliğindeki değişimler algılayıcı malzeme ile hedef moleküller arasındaki yük alış-verişine dayalıdır. Çoğu durumda, hedef moleküller algılayıcı yüzeyinde

adsorplanmasına rağmen bu ikisi arasında bir yük alış-verişi olmamaktadır. Dolayısıyla, algılayıcı tabakanın elektriksel iletkenliğindeki değişimlerin yanı sıra kütlesindeki değişimlerinde ölçülebilmesi oldukça önemlidir. SAW sensörler kullanılarak yapılan çalışmalarda, kütle algılanmakta bunun sonucunda SAW sensörün salınım frekansı ile iletkenlik değeri baskın olarak değişmektedir [3-5]. Bu sebepten, bu çalışmada, kaplama kalınlığının artırılması ile SAW sensörün elektrotları arasındaki değişime ve buna bağlı olarak da algılamanın ve kayıp parametresinin nasıl değiştiğine odaklanılmıştır.

1.2 Amaç

Bu tez çalışmasında, SAW transduserler yüzeyine ZnO, SnO_2 ve TiO_2 metal oksit nano yapıların oluşturulması, oluşturulan bu yapıların SAW transduserin elektriksel özellerini nasıl değiştirdiğinin belirlenmesi ve sensör özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. SAW transduser üzerindeki kapasite, iletkenlik, kayıp gibi parametrelerle kaplamadan kaynaklanan frekans kayması arasında bir ilişki ortaya konulmaya çalışılmıştır. Ayrıca transduser üzerindeki kaplama miktarının değiştirilmesi ile elde edilen sensörlerin verileri, Principle Component Analysis (PCA) ve Hierarchical Component Analysis (HCA) işleme teknikleri kullanılarak incelenmiş, bu değişimlerin sensör dizisi üzerindeki etkileri açıklanmaya çalışılmıştır.

Bu kapsamda tezin amacı üç ana başlık altında toplanabilir;

a) ZnO, SnO_2 ve TiO_2 nano yapıların SAW transduser üzerinde oluşturulması ve bu yapıların SAW'un elektriksel özelliklerini nasıl değiştirdiğinin incelenmesi.

b) Algılayıcı olarak ZnO, SnO_2 ve TiO_2 nano yapıların kullanıldığı SAW tabanlı sensör dizilerinin oluşturulması ve gaz algılama özelliklerinin incelenmesi.

c) Sensör dizilerinden elde edilen verilerin PCA ve HCA gibi değişik veri işleme teknikleri kullanılarak gazların kalitatif (kimlik) ve sensörlerin karakteristik farklılıklarının belirlenmesi.

1.3 Tezin Organizasyonu

"Zn, Ti, Sn Oksit Yapılarının SAW transduser ile gaz algılama özelliklerinin incelenmesi, sensör verilerinin analizi" başlıklı bu tez çalışması Genel Bilgiler, Deneysel Yöntem, Bulgular ve Değerlendirme, Sonuçlar ve Değerlendirme olmak üzere dört ana bölümde hazırlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında SAW transduserler kullanıldığından, Genel Bilgiler başlığı altında piezo elektrik etki hakkında bilgi verilmiş, piezoelektrik özellikle SAW yapıları arasındaki ilişki ortaya konulmaya çalışılmıştır. SAW transduserin frekans ve kayıp gibi parametrelerini etkileyen faktörler matematiksel yaklaşımlar ile açıklanmaya çalışılmıştır. Tez kapsamında algılayıcı katman olarak metal-oksit yapılar kullanıldığından bu malzemelerin gaz algılama özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Sensör dizilerinden elde edilen verilerinin nasıl analiz edileceği ile veri işleme sonucu elde edilen sonuçlarla sensör yapıları arasındaki ilişkilere ait bilgiler yine bu bölümde sunulmuştur.

Deneysel Yöntem başlığı altında tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla kullanılan cihaz ve sistemler hakkında bilgi verilmiştir.

Bulgular ve Değerlendirme başlığı altında, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve elde edilen veriler Genel Bilgiler başlığı altında verilen teorik altyapı kullanılarak açıklanmaya çalışılmıştır.

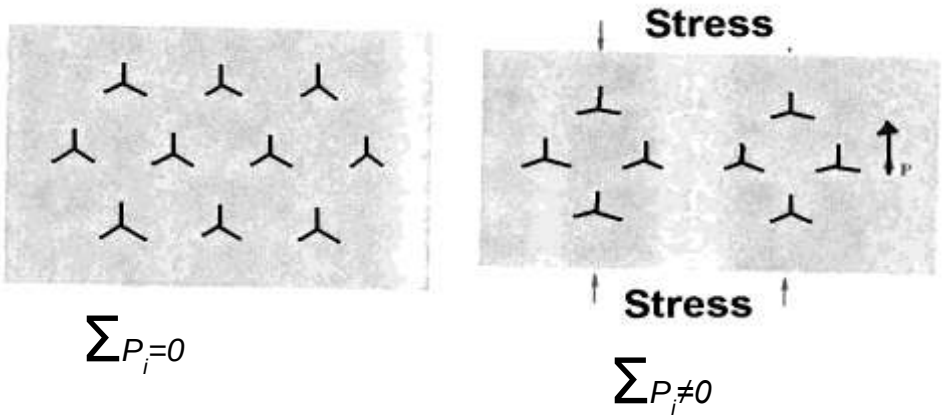
Sonuçlar ve değerlendirme bölümünde tez kapsamında elde edilen sonuçların nedenleri hakkında yaklaşımlarda bulunulmuştur.

2 GENEL BİLGİLER

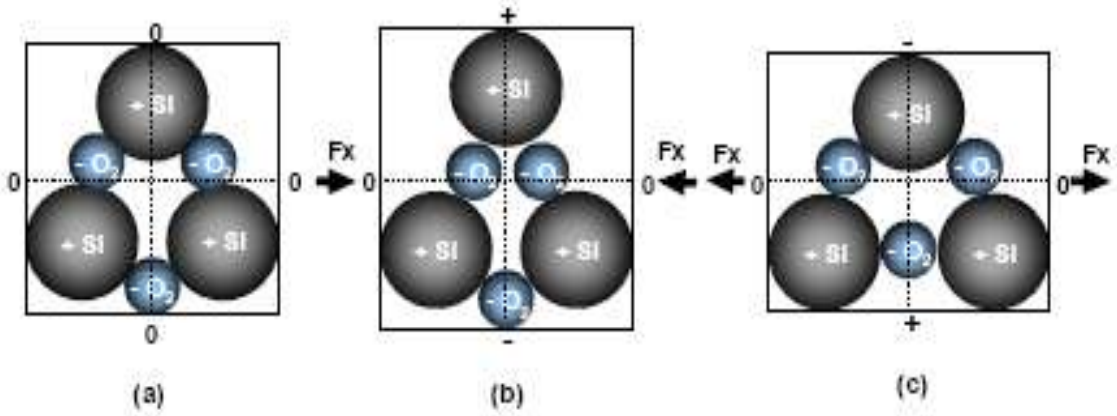
2.1 Akustik Transduser

2.1.1 Piezoelektrik Etki

Piezoelektrik etki kısaca, malzeme üzerine mekanik bir etki uygulandığında elektrik sinyali, elektrik sinyali uygulandığı zaman ise mekanik bir tepki vermesi şeklinde ~~veren~~ tanımlanabilir. 1880 yılında Jacques ve Pierre Curie tarafından keşfedilen bu etki; malzemenin negatif ve pozitif yük merkezleri çakışık olmamasından dolayı fiziksel etkilere elektriksel tepki, elektriksel etkilere de mekanik tepki vermesi şeklinde açıklanabilir. Bu nedenle bu yapılar doğal bir dipol momente sahiptir. Ayrıca doğal yapılarında durağan halde toplam dipol momenti sıfır olmasına rağmen, uygulanan kuvvetin veya elektrik alanın yönüne göre bir polarizasyona veya deformasyona uğrayan lokal polarize malzeme özellikleri gözlemlenmektedir. Bu özelliklere sahip kristallerden başlıcaları Kuartz ve Baryum Titanat'dır. Şekil 1 Kuartz kristali üzerine uygulanan mekanik kuvvete karşı kristal içindeki polarizasyonun değişimini şematik olarak göstermektedir. Şekil 2a ise Kuartz kristali üzerine uygulanan elektrik alana karşı kuartz tarafından oluşturulan mekanik tepkiyi göstermektedir. Şekil 2b de kuartz kristale –y yönelimli bir elektrik alan uygulanması durumunda oluşan mekanik basma kuvveti tepkisi, Şekil 2c'de ise +y yönelimli elektrik alan uygulanması durumunda oluşan çekme kuvveti tepkisinin oluşumu gösterilmektedir.



Şekil.1 Kuartz kristali üzerine uygulanan kuvvete karşı kristal içindeki polarizasyon değişimi.

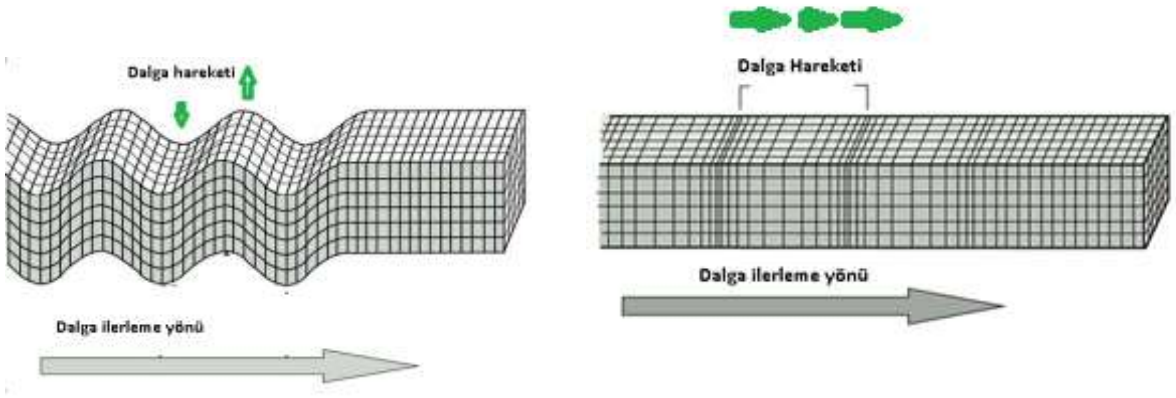


Şekil.2 Elektrik alana göre kristalin davranışı. **a) E**lektrik alan yokken kristalin durumu, **b)** –y yönelimli (+y den -y) elektrik alanın oluşturduğu mekanik basma tepkisi, **c)** +y yönelimli (-y den +y) elektrik alanın oluşturduğu mekanik çekme tepkisi.

2.1.2 Akustik Dalga

Katı malzemeler içinde akustik dalga ilerleyişi atomların göreceli olarak yer değiştirmesi ile mümkün olur. Bu yer değiştirme basma ve çekme anlamına gelen "strain" olarak tanımlanır. Atomların kristal yapı içindeki mikro yer değiştirmeleri ve dolayısı ile yüklerin de yer değiştirmelerine neden olur. Bu değişimin büyüklüğü atomun durağan (equilibriumstate) halinden ne kadar uzaklaştığı ile ilgilidir. Yüklerin yer değiştirmesi atomların yer değiştirmesinin bir fonksiyonudur. Yer değiştiren atomlar bir kütle-yay etkileşimi gibi tekrar eski pozisyonlarına gelmek için kristal yapı içerisinde iç kuvvet ya da "stress" olarak tanımlanan bir ters etkileşim kuvveti meydana getirirler. Bu ikili etkileşimin "strain - stress" belli periyodiklikle tekrarlanması ise dalga hareketini oluştururlar. Bu dalga akustik dalga olarak isimlendirilir. Oluşturulan akustik dalganın ilerleyiş yönü malzeme tarafından karakteristik olarak sınırlanmıyorsa oluşturulan bu dalga tüm yapı içerisine serbest olarak yayılır.

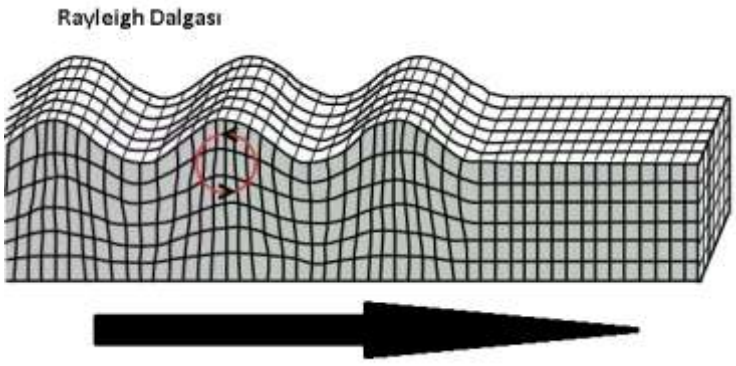
Akustik dalganın katı içerisinde yayılması genel olarak iki farklı şekilde gerçekleşir. Bunlar enine ve boyuna dalgalar olarak ifade edilen yayılma biçimleridir. Boyuna dalgalarda dalga hareketi ile dalganın ilerleme yönü paraleldir enine dalgalarda ise diktir (Şekil.3).



a) **b)**

Şekil.3 a) Enine dalga, **b)** Boyuna dalga.

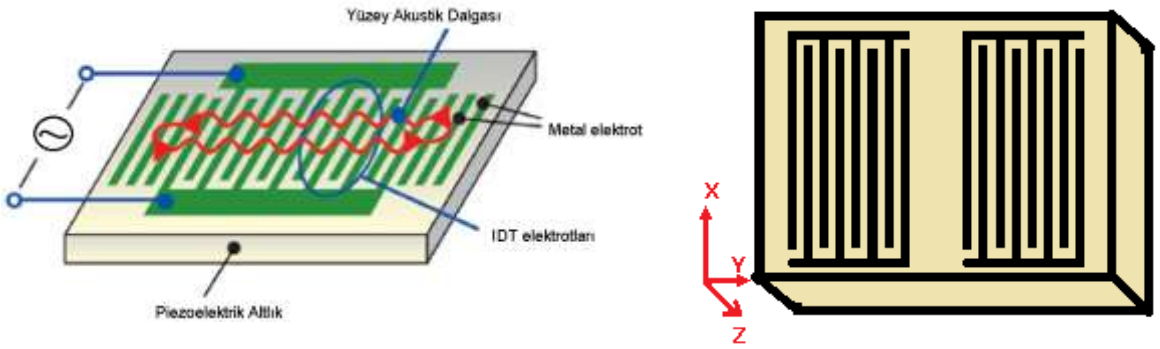
Bir diğer dalga şekillenimi ise Rayleigh dalgası olarak bilinen dalga şeklidir. Enine ve boyuna dalganın bir tür kombinasyonu şeklinde oluşan bu dalga tamamen yüzeyde oluşur ve malzemenin içerisine doğru dalga genliği üstel olarak azalır ve sönümlenir. 1885 yılından Rayleigh tarafından keşfedilmiş ve ismiyle anılmaktadır. Rayleigh dalgası malzemede hem dalganın ilerleme yönünde hem de malzeme yüzeyinin normali yönünde hareket etmektedir. Şekil 4 de Rayleigh dalgası görülmektedir. Ayrıca, Rayleigh tarafında da bu modda hareket eden dalganın, yüzeye yakın bölgede hapsedilebileceği de gösterilmiştir[8].



Şekil.4 Rayleigh Dalgası

1963 yılında ise birbirinden bağımsız olarak Mortley ve Rowen tarafından yüzey akustik dalgasının malzeme yüzeyinin her yönünde aynı hızda ve frekansta hareket etmediği, sabit engellerle hızlarının değiştirilebileceği keşfedilmiştir. [9,10]. Bu durum 1965 yılında

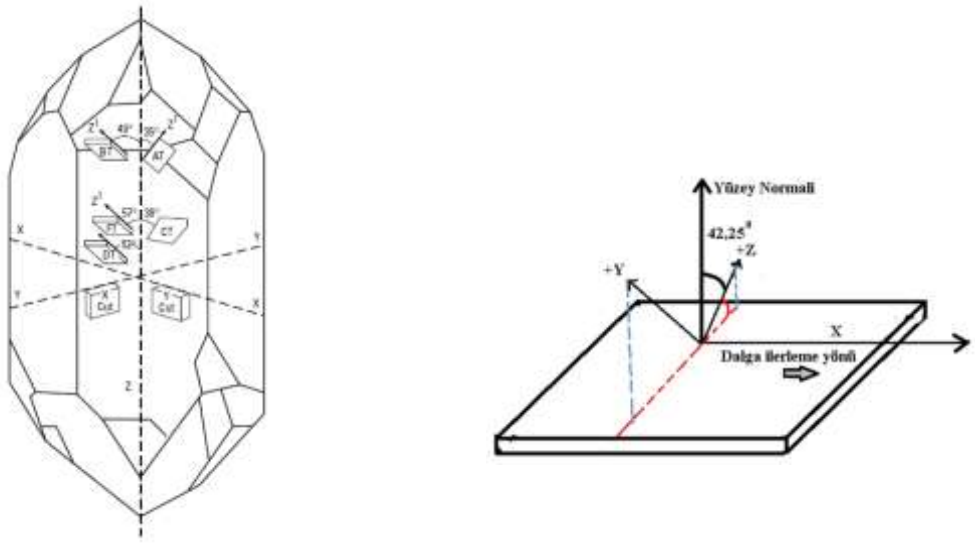
White and Voltmer tarafından daha da geliştirilerek yüzeye yerleştirilecek Inter Digital Transducers (IDT) olarak tanımlanan yapılarla yüzey akustik dalganın yüzeyde üretilebileceğini, ve ikinci bir IDT yapısının kullanılması ile yüzeydeki akustik dalganın elektrik sinyali olarak elde edilebileceğini gösterilmiştir [11]. Piezoelektrik bir malzeme yüzeyine iki IDT yapısının karşılıklı konumlandırılmasıyla elde edilen transduser, günümüzde çift portlu SAW olarak bilinen yapılardır. (Şekil.5).



a) **b)**

Şekil.5 a) IDT yapısı ve akustik dalga üretimi [12], **b)** İki portlu SAW transduser.

SAW transduserin bir ucundaki IDT'ye zamanla değişen (AC) bir sinyal uygulanırsa transduser yüzeyinde bir gerilme oluşur ve böylece yüzey dalgası üretilmiş olur. Üretilen bu dalganın hızı, oluşturuldukları malzemeye ve malzemenin kristal yönelimine bağlı olarak değişir. Kristal kesim yönlerine göre dalga hızı ve elektromekanik etkileşim Tablo.1'de verilmiştir. Şekil.6'da ise ST-X kesim kuartz kristalinin durumu verilmektedir. Oluşturulan akustik dalganın frekansı kullanılan kristalin cinsine ve IDT'nin parmak aralığı mesafesine bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Şekil 6a da doğal bir kristal ve eksenler görülmektedir. Kristalin eksenlerin kristalin fiziksel ve elektriksel parametrelerine bağlı olarak belirlenir. Z-ekseni aynı optik eksen olarak bilinir ve ışığa davranışı anizotroptur bu nedenle optik eksen olarak tanımlanır. X-ekseni elektriksel eksen olarak tanımlanır. X-ekseninde kristal üzerine bir basma veya çekme kuvveti uygulandığında kristalden en fazla gerilim tepkisi elde edilir. Y-ekeni ise sıcaklığa en fazla duyarlı eksendir. ST, BT ve AT gibi kesimli yüzeyler ise X Y Z eksenlerini kristal düzleminin farklı açılarla kesmesi ile oluşmuş yapılardır. Şekil 6b de ST -X kesim kristal görülmektedir.



a b

Şekil.6 a) Kuartz Kristal yapısı ve eksenleri b) ST-X kesim kuartz Kristal

Tablo.1 Kristal kesim yönlerine göre dalga hızı ve elektromekanik etkileşim katsayısı (K^2)[13].

Sembol	**Kimyasal Bileşimi**	**Kesim açısı** Dönüş ekseni	**Dalga ilerleme yönü**	**Dalga Hızı(m/s)**	**K^2 (%)**
128L	$LiNbO_3$	128^0 Y	X	3992	5,5
64LN	$LiNbO_3$	64^0 Y	X	4742	11,3
36 LT	$LiNbO_3$	36^0 Y	X	4212	4,7
LT112	$LiNbO_3$	112^0 Y	X	3288	0,64
ST	Quartz	ST	X	3158	0,14

2.1.3 Yüzey Akustik Dalgasının IDT Yapısı İle Üretilmesi

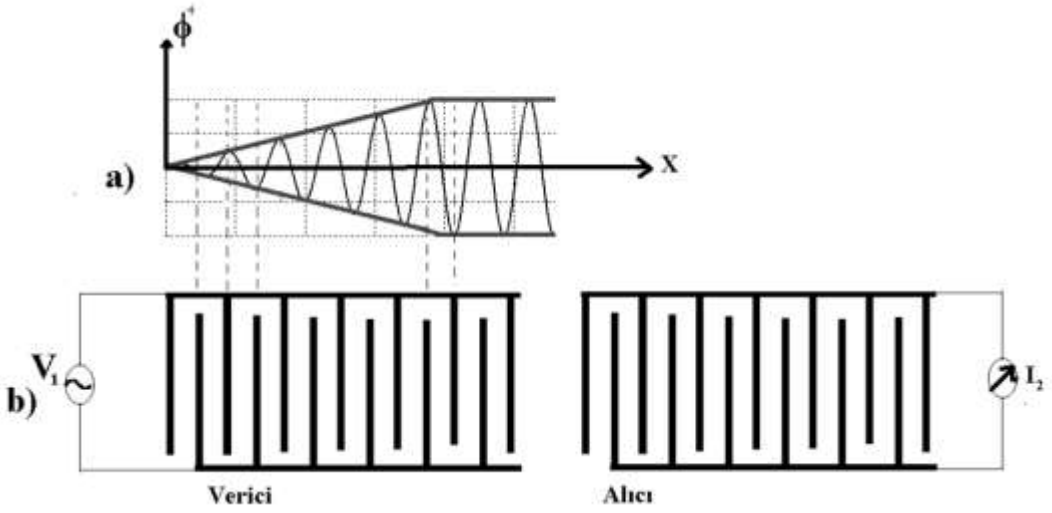
Kuartz altlık üzerine parmak aralıkları sabit IDT yapısının yerleştirilmesi ile yüzey dalgası üretilebilmektedir. Yüzey dalgasının oluşturulması için IDT uçlarına uygulanacak gerilim sonrasında piezoelektrik malzemenin yüzeyinde IDT parmakları yakınında bir gerilme etkisi oluşturulabilir. Bu nedenle, her bir IDT parmağını ayrık bir dalga kaynağı gibi ele alınabilmektedir. Oluşturulan dalga, tüm IDT elektrotları boyunca sürekli olarak oluşturulduğundan elde edilen dalga sürekli dalga formundadır. Şekil.7'de, oluşturulan yüzey

dalgasının genliğinin IDT boyunca değişimi görülmektedir. Bu durumda, bir verici IDT yapısından alıcı IDT yapısına transfer edilebilecek dalganın fonksiyonu; uygulanan V_1 gerilimine (Şekil.7a) bağlı olarak Eşitlik 2.1 deki gibi ifade edilebilir[14].

$$\emptyset^{\mp} = \mu_s V_1 \qquad \textbf{(2.1)}$$

μ_s yüzey dalgasının oluşturulduğu malzemeye bağlı ve frekanstan bağımsız bir değişken olarak değerlendirilebilir. Bu ifadenin konuma bağımlılığı uygulanan gerilimin kaçıncı elektroda uygulandığına ilişkindir. IDT boyunca oluşturulan dalganın genliğindeki değişimi ifade eder (Bkz Şekil 7a). Uygulanan gerilim ile oluşturulan dalganın genliği arasındaki bağıntıyı ifade eder.

$Ø^+$ ve $Ø^-$ ise dalganın oluşturulduğu noktadan sırası ile sağa ve sola (ileri ve geri) doğru ilerleyen dalgayı temsil eder. Oluşturulan dalganın frekansı IDT parmaklıkları arasındaki mesafeye ve parmaklıkların birbirini etkilemelerine bağlıdır [14].



Şekil.7 Oluşturulan yüzey dalgasının genliğinin IDT boyunca değişimi.

Şekil.7b'de gösterilen şekilde oluşturulmuş bir SAW için sağa ilerleyen ($Ø^+$) dalganın denklemi Eşitlik 2.2'de verilmektedir[14]. Burada her parmaklığın oluştuğu gerilme etkisi toplam dalganın büyüklüğüne ilave edilir.

$$\emptyset^{+}(z) = \mu_s \sum_{n=0}^{N_{f-1}} V_n e^{jk(Z-Z_n)} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Burada; N_f ,V_n ,Z_n sırası ile toplam elektrot sayısı, IDT uçlarına uygulanan gerilim ve n. parmaklığın pozisyonunu belirten vektördür k ise dalga sayısıdır. Öte yandan Eşitlik 2.2'ye V_n'nin kesikli fourier transformudur Dolayısıyla SAW yapısının frekansı her bir elektrot yapısının fourierlerinin toplamına eşittir[14,15]. Aynı sinyal değerine sahip iki parmaklık arasındaki mesafe d, n. parmaklık ile 1. parmaklık arasına uygulanan sinyal $V_n = (-1)^n V_0$ ile tanımlanırsa Eşitlik 2.2'den Eşitlik 2.3 türetilebilir.

$$\emptyset^{+}(0) = \mu_s V_0 \sum_{n=0}^{N_{f-1}} (-1)^n e^{-jnkd/2} \qquad \textbf{(2.3)}$$

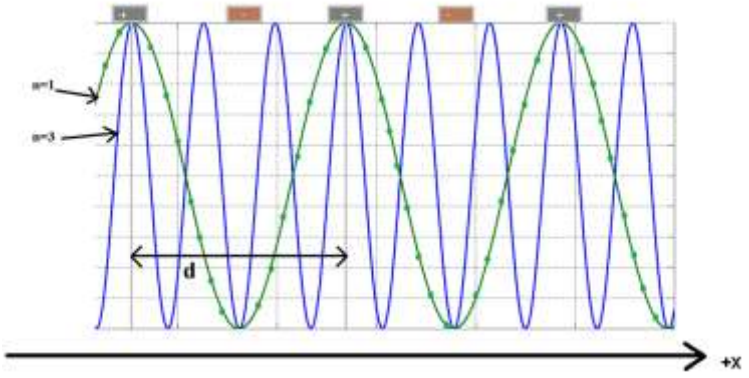
Bu eşitliğin periyodik olarak değişen geometrik bir yapıya sahip olduğu kolayca görülebilir. Öte yandan 2.3 eşitliği dalganın ilerlediği yön boyunca dikkate alınır ve $\frac{kd}{2} = m\pi$ şeklinde bir dönüşüm yapılırsa Eşitlik 2.4 yazılabilir. Burada m pozitif tek sayılardır. Bu dönüşüm yüzey dalgası ile parmaklık arasındaki ilişkiyi ifade eder.

$$|\emptyset^{+}| = |\frac{\sin(X)}{X}| \qquad \textbf{(2.4)}$$

Burada *X*;

$$X = \frac{N_p \pi}{f_0}(f - f_0) \text{ ile verilir.}$$

f_0 ise transduserin IDT yapısı tarafından üretilen frekansıdır (Senkronizasyon frekansı olarak da bilinir). $N_p = N_f/2$ ise IDT içindeki periyotların sayısıdır. Transduserin temel frekansın dışında çalışabileceği diğer harmonik frekanslar ise temel frekansın tek katlarıdır ve $f_m = mf_0$ şeklinde ifade edilir. Şekil.8'de 1. ve 3. harmoniklere ait şekillenim görülmektedir.

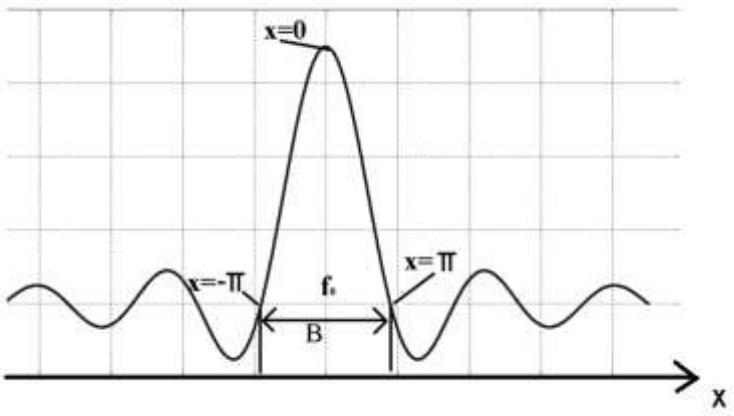


Şekil.8 1. ve 3. Harmoniklere ait şekillenimler.

Eşitlik 2.4'e göre, her yöne ilerleyen dalgalar için Ø 'nin X'e göre değişimi incelenirse X=0 için Ø herhangi bir değerinin olmadığı görülür. Öte yandan X'in değeri π nin katları ile orantılı olarak değişmektedir. X eksenini kestiği noktalar ise $\pm\pi$ ve katlarında olmaktadır. Bu noktaların konumu parmaklık sayısının bir fonksiyonudur (Şekil.9). Ø, sıfır değerini aldığı bu iki nokta arasındaki genişlik transduserin band genişliği (B) ile ifade edilir (2.5).

$$B = 2/N_p \tag{2.5}$$

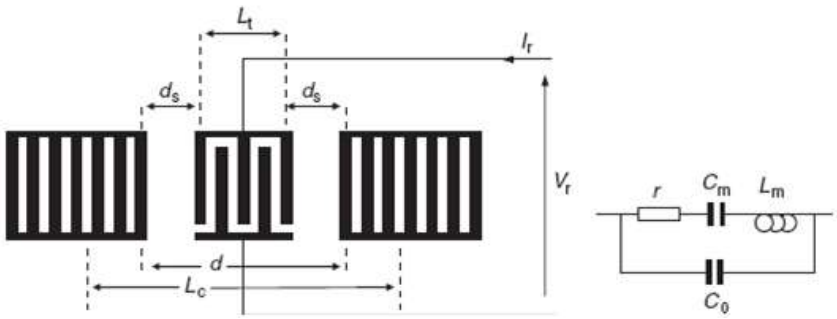
Band genişliği ne kadar dar ise transduserin titreştiği frekanstaki kararlılığı da o kadar yüksektir. Ancak, rezonans bölgesi civarındaki belirsizlik o oranda düşüktür.



Şekil.9 Transduser band genişliği.

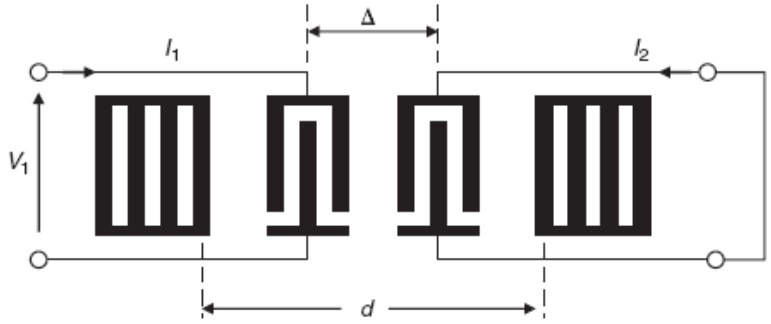
2.1.4 SAW Eşdeğer Devre Modeli

Akustik dalganın ilerlemesi ve ne kadar kayıp ile karşı IDT'ye ulaşabileceğinin matemetiksel olarak tanımlanabilmesi, uygulamada karşılaşılan çeşitli durumların anlaşılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu sebepten, SAW transduserin elektriksel eşdeğer devresinin bilinmesi önemlidir. Bu konuda bilinen yaklaşım Butterworth Van Dyke modeli olarak bilinen modeldir [16]. Bu model, sadece belli frekansta salınım yapan akustik salınıcıları RLC devresi ile modellemektedir. Bu modelin en iyi çalıştığı örnek ise QCM veya tek portlu SAW aygıtlardır. Tek portlu bir SAW yapısı Şekil.10'da görülmektedir.

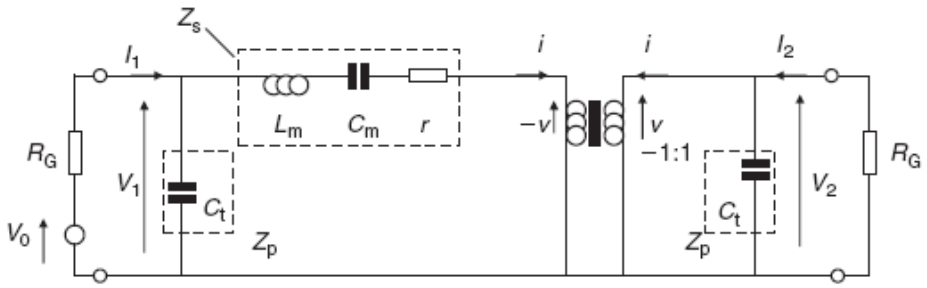


Şekil.10 Tek Portlu SAW ve Eşdeğer devresi [17].

İki portlu bir SAW transduser, yanyana konumlandırılan biri verici diğeride alıcı görevi yapan (birisi salınan diğeri ise bu salınıcıdan etkilenen) iki IDT yapısından oluşur. Dolayısıyla böyle bir yapı için önerilen eşdeğer devre tek portlu yapıdan biraz farklıdır. Şekil.11a'da çift portlu SAW transduser yapısı ve Şekil.11b'de ise çift portlu SAW transduser yapılarının eşdeğer devreleri verilmiştir.



a)



b)

Şekil.11 a) çift potlu SAW transduser yapısı, **b)** çift portlu SAW transduser yapısının eşdeğer devresi [16].

Tek portlu SAW transduserin, QCM transdusere benzetilerek elektriksel modellemesi yapılabilirken iki portlu SAW transduserin elektriksel davranışını açıklamak biraz karmaşıktır. Ancak, her iki tip yapı için saçılma matrisi (P matrisi) olarak isimlendirilen matrisin oluşturulması gerekir [18]. Saçılma matrisi esasen, üretilen sinyalin gücünün ortamdan ne kadar ve ne şekilde etkilenerek iletildiğinin bir ölçüsüdür. Matrisin elemanları ise üretilen, iletilen ve yansıyan sinyallerden oluşmaktadır.

P matrisi

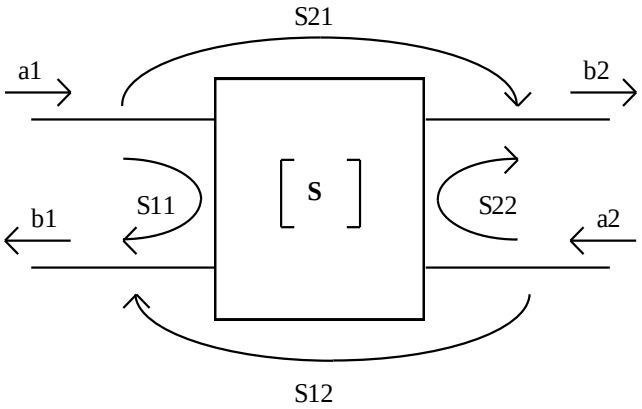
$$\begin{bmatrix} A_{t1} \\ A_{t2} \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} A_{i1} \\ A_{i2} \\ V \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.6)}$$

Burada A_i üretilen veya gelen dalganın genligi, A_t ise karşı IDT'ye ulaşan dalganın genliğidir. V ve I ise sırasıyla dalganın üretildiği IDT'ye uygulanan gerilim ve dalganın ulaştığı IDT'de oluşan akımdır. P matrisi, saçılma parametreleri cinsiden yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & E_1 \\ P_{21} & P_{22} & E_2 \\ D_1 & D_2 & Y \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ u \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.7)}$$

ile ifade edilir. Burada $S_{ij\ (i,j=1,2)}$ saçılma parametreleri, $E_{i\ (i=1,2)}$ elektroakustik uyarım matrisi, $D_{i\ \ (i=1,2)}$ akustoelektrik deteksiyon matrisi olarak tanımlanır. Y ise transduser atmitansı (1/Z) dır. b_1 ve b_2 transduser girişindeki akustik dalgayı, a_1 ve a_2'de transduser çıkışındaki akustik dalgayı temsil eder [19] (Şekil.12). Bu büyüklüklerin matris formu ise Eşitlik 2.8 ile erilir

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.8)}$$



Şekil.12 Saçılma parametreleri.

Saçılma parametrelerinin S_{ij} $_{(i,j=1,2)}$ Şekil.11b'deki eşdeğer devre üzerindeki büyüklüklere dönüşümü ise Eşitlik 2.9 - 2.12'de verilmektedir. Saçılma parametreleri reel ve sanal bileşenden oluşmaktadır. $ds = (1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}$ olmak üzere,

Giriş empedansı;

$$Z_{11} = 50\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{ds} \quad \textbf{(2.9)}$$

Çıkış empedansı;

$$Z_{22} = 50\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{ds} \quad \textbf{(2.10)}$$

Sinyalin geçiş empedansları ise;

$$Z_{12} = 50\frac{2\,S_{12}}{ds} \quad \textbf{(2.11)}$$

$$Z_{21} = 50\frac{2\,S_{21}}{ds} \quad \textbf{(2.12)}$$

eşitlikleri ile ifade edilir [20, 21, 22]. Burada 50 katsayısı RF sinyalinin iletiminin 50 Ω luk ortamda iletilmesi ile ilgilidir. Eşdeğer devre üzerindeki kapasitif ve indüktif etkiler ise

$$L(nH) = 10^9 imag\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)\left(\frac{1}{2\pi f}\right) \quad \textbf{(2.13)}$$

$$C(pF) = -10^{12} imag(Y_{11})(\frac{1}{2\pi f}) \quad \textbf{(2.14)}$$

ile ifade edilir. Burada Y_{11} girişi sinyali tarafından bakıldığında L ve C' nin nasıl değiştigini ifade etmektedir. Çıkış sinyali açısından Y_{22} değeri Y_{11} yerine kullanılmalıdır [23]. Bu değerler gerek tek portlu gereksede çift portlu SAW'u bir bütün sistem olarak değerlendirilerek elde edilecek sonuçlardır. Dolayısı ile ölçüm sonucunda elde edilen C, L ve diğer değerler Şekil 10 ve Şekil 11 deki kapasite indüktans ve empedans (seri ve paralel) sistemden oluşmuş bir sistemin bütününe ait değerlerdir.

Sinyalin iletilmesinde oluşacak kaybın büyüklüğü ise;

$$iL = -20\log\ (S_{21}) \quad \textbf{(2.15)}$$

eşitliği ile ifade edilir [24].

SAW her zaman simetrik bir yapıda olmak zorunda değildir. Özellikle elektronik gereksinimlere göre asimetrik yapılarda da SAW tasarlanmakta ve üretilebilmektedir. Sensör uygulamalarında simetrik yapıda SAW transduserler kullanılmaktadır. Bu sebepten, Şekil.11b'de verilen SAW eşdeğer devresinin elemanlarının değerlerinin hesaplanması konusunda sadece simetrik yapılar ele alınacaktır. Her iki IDT yapısının dış kısmına eklenen yansımayı önleyecek yapılarında tüm yansımaları engellediği durumlar göz önüne alınacaktır Şekil.11b üzerinde gösterilen notasyonlara göre aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\frac{I_1}{V_1} = Y_{11} = P_{33} + \frac{2G_a\Upsilon[\Upsilon+\cos(k\Delta)]}{1-\Upsilon^2} \quad \textbf{(2.16)}$$

Burada r: Yansıma katsayısı ve $\Upsilon = r\exp(-jkd)$, Δ transduser ile rezonans modu arasındaki etkileşim katsayısı, G_a ise akustik iletkenliktir. P_{33} ise transduserin admitansıdır. Simetri durumundan dolayı aynı denklem diğer tarafdaki IDT kolu içinde yazılırsa;

$$\frac{I_2}{V_1} = Y_{12} = \frac{G_a\,[\exp\left(-\frac{jk\Delta}{2}\right)+\Upsilon\exp\,(\frac{jk\Delta}{2})]}{1-\Upsilon^2} \quad \textbf{(2.17)}$$

Burada $\gamma \approx \pm 1$ değerlerini alır +1 değeri yapının simetrik olduğu durumlar içindir -1 ise asimetrik olduğu durumlar için geçerlidir. n, parmaklık sayısı olmak üzere, transduser merkezleri (n+1/2) dalga boyları kadar ayrılırlar ve ise $\cos(k\Delta) = -1$ değerini alır

Bu durumda simetrik durum için $\gamma \approx 1$ ve $\cos(k\Delta) = 1$ dir. Bu durumlar için;

$Y_{11} = \frac{2G_a\Upsilon}{1-\Upsilon}$, $Y_{12} = \frac{G_a(1+\Upsilon)}{1-\Upsilon}$ Şeklinde yazılabilir. Bu durumda Şekil 11.b deki eşdeğer devre elemanları değerleri $Zp=Y_{11}-Y_{12}$ (Paralel koldaki kapasitörden gelen etki) $Zs=1/Y_{12}$ olarak yazılabilir [16].

2.1.5 Yüzey Akustik Dalgasının Pertürbasyon Mekanizması

Piezoelektrik bir yüzey üzerinde oluşturulmuş yüzey akustik dalgasının tekrar elektrik sinyaline dönüştürülmesi Şekil.7'de görüldüğü gibi, alıcı bir IDT yapısı ile gerçekleşebilmektedir. Verici IDT tarafından oluşturulan sinyal alıcı IDT' ye ulaşıncaya kadar ilerlediği yüzey boyunca yüzey akustik dalgasının hızında ve dalganın genliğinde kayıplar oluşur. Bu kayıpların başlıca nedeni, dalganın ilerlerken piezoelektrik malzeme yüzeyinde oluşturduğu mekanik deformasyon, yüzey ile dalga arasındaki elektriksel etkileşimlerdir. Bu etkileşimlerden mekanik deformasyona bağlı olanı; "elektromekanik etkileşim" olarak isimlendirilmektedir ve K^2 ile gösterilen bir parametre ile gösterilmektedir. Her piezoelektrik malzeme için bu değer; farklıdır. Tablo.1'de bazı piezoelektrik malzemelerin için K^2 değerleri görülmektedir. Bu etkileşimde dalganın ilerlediği ortamın elastik ve viskoelastik özellikleri rol oynamaktadır.

Elektriksel etkileşim ise, "akustoelektrik etkileşim" olarak isimlendirilmektedir. Bu etkileşimde ise yüzey iletkenliği, yüzeyin kapasitif ve indüktif özellikleri rol oynamaktadır SAW transduserlerin kimyasal sensör uygulamaları, elektromekanik ve akustoelektrik etkileşim sonucu yüzey akustik dalgasındaki kayıplardan dolayı oluşan frekans kaymalarının ölçülmesi esasına dayanır. Bu sebeple, SAW tabanlı sensör geliştirme çalışmalarında her iki etkinin dikkate alınması gerekir. Diğer yandan, yüzey akustik dalgasını etkileyen fiziksel parametreler sadece elektromekanik ve akustoelektrik etkiler değildir. Yapılmakta olan yeni çalışmalar neticesinde farklı etkileşim mekanizmalarının da bulunabilmesi olasıdır [25,14].

2.1.5.1 Yüzey Akustik Dalgası-Kütle etkileşimi

Yüzey akustik dalgasını etkileyen faktörlerin en başında, akustik dalganın ilerlediği ortamın kütlesinin zamanla değişmesi gelmektedir. Yüzey akustik dalganın yolu üzerine eklenecek yüzey ile senkronize hareket edebilecek özellikte ve miktarda kütle, dalganın hızında ve genliğinde bir değişime sebep olur. Bu etki basitçe, enerjinin bir taraftan diğer tarafa aktarılması problemi dikkate alınarak açıklanabilir ki kimyasal sensör uygulamalarında çalışmalar genellikle bu etki dikkate alınarak yürütülmektedir.

Dalganın ilerlediği yol boyunca herhangi bir saçılmaya uğramadığı kabul edilerek kinetik enerji yoğunluğu U_k olmak üzere, birim yüzey alanı başına kinetik enerji değişimi,

$$\Delta U_k = \frac{\rho_s}{4}(v_{x0}^2 + v_{y0}^2 + v_{z0}^2) \qquad \textbf{(2.18)}$$

ile verilir.

Burada ρ_s yüzey kütle yoğunluğu, v_{x0}, v_y, v_{z0} ise yüzey akustik dalgasının yüzeydeki hızıdır. Öte yandan yüzeydeki parçacık hızı parçacığın yer değiştirmesi(u_i) olmak üzere $v_i = j\omega u_i$ ile verilir. Kinetik enerji yoğunluğundaki artış dalga hızında bir azalma demektir. Dolayısıyla, yüzey kütle yüklemesi sonucu dalga hızındaki değişim

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{\omega v_0 \rho_s}{4}\left(\frac{v_{x0}^2}{\omega P} + \frac{v_{y0}^2}{\omega P} + \frac{v_{z0}^2}{\omega P}\right) \qquad \textbf{(2.19)}$$

İfadesi ile verilir. Burada P güç yoğunluğu olup, $P = Uv$ ile verilir. Dalganın enerjisinin büyük bir kısmının yüzeye yakın bölgede hapsedilmesi çalışma frekansında artışa neden olur. Yüzeydeki parçacık hızı $(P\omega)^{1/2}$ ile orantılı olarak artar. Burada $\left(\frac{v_{i0}^2}{\omega P}\right)_{i=x,y,z}$ ifadesinin büyüklüğü dalganın genliğinden bağımsız olup sadece dalganın üretildiği malzemeye bağımlıdır. Bu ifade, büyük yüzeyler için normalize parçacık hızı olarak ifade edilir [26]. Eşitlik 2.19'daki malzemeye bağılı ifade Eşitlik 2.20'deki gibi bir sabit ile ifade edilebilir. Bu sabit kütle duyarlık faktörü olarak bilinir ve

$$C_m = \frac{\pi v_0}{2}\left(\frac{v_{x0}^2}{\omega P} + \frac{v_{y0}^2}{\omega P} + \frac{v_{z0}^2}{\omega P}\right) \qquad \textbf{(2.20)}$$

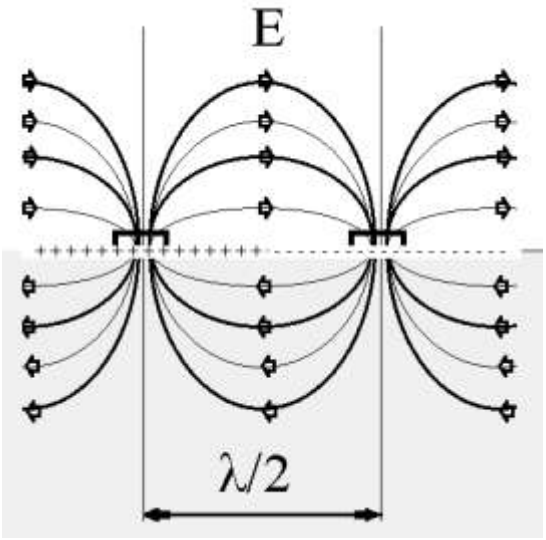
olarak tanımlanır. Bu durumda Denklem (2.19)

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -C_m f_0 \rho_s \qquad \textbf{(2.21)}$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Bu ifade, bir piezoelektrik malzeme içerisinde ilerleyen dalganın hızındaki değişim ile üzerine eklenen kütle arasındaki ilişkiyi en genel ifade eden denklemdir. Denklem 2.21'den açıkça görülebileceği gibi dalga hızındaki değişim çalışma frekansı f_0'a bağlıdır.

2.1.5.2 Yüzey Akustik Dalgası-Elektriksel Etkileşimi

Yüzey akustik dalgası piezoelektrik malzeme içerisinde ilerlerken yüzeyde, bağlı yük tabakası oluşturur. Bu bağlı yük tabakası bir "evanescent elektrik alanı" oluşturur ve daha önce tanımlanan dalga potansiyeli $\emptyset$ 'nin kaynağı bu bağıl yüklerdir. Şekil.13'te evanescent elektrik alanı şekillenimi görülmektedir.



Şekil.13 Yüzey akustik dalgası tarafından evanescent elektrik alanı.

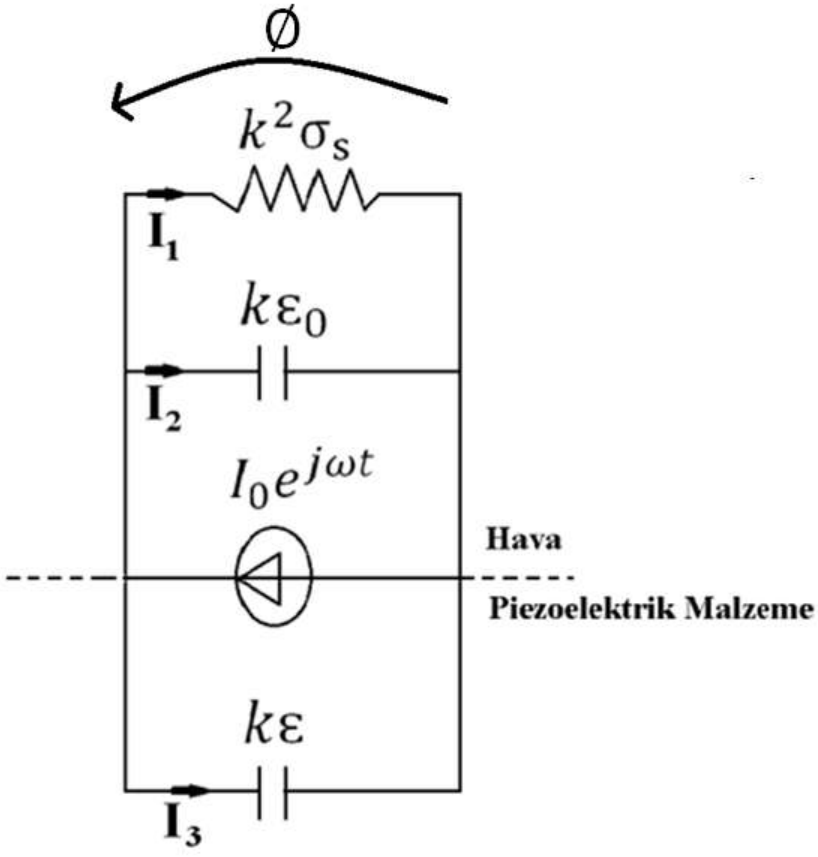
Piezoelektrik malzemenin yüzeyi iletken bir film ile kaplanacak olursa, iletken film içindeki yükler yüzeydeki elektrik alanında etkisiyle bağıl yüklerin yeniden düzenlenmelerine neden olacaktır. Dalga yük etkileşimlerinin SAW üzerindeki etkisi, filmde dalga tarafından oluşturulan akım ile dielektrik ortamdaki deplasman akımını dikkate alan bir modelden belirlenebilir. Dalga tarafından oluşturulan ve zamanla değişen yüzey yükleri bir alternatif akım ile temsil edilebilir. Bu durumda, birim yüzeyde oluşturulan akım, I_0,

$$I_0^2 = 2K^2 \omega k^2 (\varepsilon_{0+} \varepsilon) P_d \qquad \textbf{(2.22)}$$

ile verilir.

Bu eşitlikte, K: elektromekanik etkileşim sabiti olup kullanılan piezoelektrik malzemeye bağlı bir sabittir. Bazı malzemelere ait elektromekanik etkileşim sabitleri Tablo 1 de gösterilmiştir. ε_0 ve ε ise sırası ile havanın ve piezoelektrik malzemenin dielektrik sabitleridir. k ve P ise sırası ile akustik dalga sayısı ($k = 2\pi/\lambda$) ve güç yoğunluğudur (güç/hacim).

İletken bir film ile kaplanmış bir SAW transduserin elektriksel yapısının anlaşılması için evanescent elektrik alanı sonrasında oluşan yapının modellenmesi gerekir. Şekil.14'de iki IDT parmaklığı arasındaki oluşabilecek elektriksel etkileri ortaya koyan eşdeğer devre görülmektedir.



Şekil.14 SAW ile İnce filmin içerisindeki yük taşıcıları arasındaki Akustoelektrik etkileşimi tanımlamak için kullanılan eş değer devre modeli

Burada $k^2\sigma_s$ paralel iletkenliği, σ_s filmin yüzey iletkenliği, σ ise bulk iletkenliğidir . Film kalınlığı h_f ise yüzey iletkenliği $\sigma_s = h_f\sigma$ olarak tanımlanır.

Tüm bu elektriksel etkilerin dalga hızını ve dalganın bir taraftan diğer tarafa iletilirken meydana gelen kayıp'ı ifade etmek mümkündür. Bunun için Rayleigh dalgası ile bir enerji transferinin söz konusu olduğunu dikkate almak gerekir. Bu amaçla, Eşitlik 2.18 ve 2.19 yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad \textbf{(2.23)}$$

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{\Delta U}{U_0} \quad \textbf{(2.24)}$$

tanımlanabilir. Bu denklem, dalga hızındaki değişimin dalganın ilerlediği ortamdaki kütle değişimi ile ters orantılı olduğunu ifade etmektedir. Enerjinin korunumu ilkesinden, güç kaybının, dalga tarafından iletilen güçteki bir azalma ile dengelenmesi gerekir. x-doğrultusunda yayılan bir dalga için *P*,

$$P_d = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad \textbf{(2.25)}$$

şeklide tanımlanır. Kayıplı bir ortam için, enerji yoğunluğu ve güç akışı dalga genliğinin karesi ile orantılıdır. Yani,

$$P(x) = P_0 e^{-2\alpha x} \quad \textbf{(2.26)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -2\alpha P \quad \textbf{(2.27)}$$

ve Denklem 2.26 ile 2.27'nin birleştirilmesiyle,

$$\alpha = \frac{P_d}{2P} \quad (\textbf{2.28})$$

elde edilir. Denklem 2.28 dalgadaki sönüm ile güç kaybı arasındaki ilişkiyi verir.
Diğer yandan, X- yönünde ilerleyen dalga için dalga denklemi yazılırsa,

$$u(x, y, x) = u(y, z) e^{j\omega t - \gamma x} \quad (\textbf{2.29})$$

ϒ: Kompleks dağılım faktörü olup, $\Upsilon = \alpha + jk = \alpha + j\frac{\omega}{v}$ olarak ifade edilir. Eğer frekans sabit ise,

$$\Delta\Upsilon = \Delta\alpha - jk_0\frac{\Delta v}{v_0} \quad (2.30)$$

tanımlanabilir. Bu ifade, k_0 göre normalize edilirse,

$$\Upsilon' = \frac{\Delta\Upsilon}{k_0} = \frac{\Delta\alpha}{k_0} - j\frac{\Delta v}{v_0} \quad (2.31)$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlik 2.31 Eşitlik 2.24 ve 2.28 dikkate alınarak yeniden düzenlenirse $P_{T,}$ aktarılan kompleks güç olmak üzere,

$$P_T = P_d + j2\omega\Delta U \quad (2.32)$$

olarak ifade edilebilir [27].

Eşitlik 2.31 ve 2.32' kullanılarak bu ifade yeniden düzenlenirse

$$\Delta\Upsilon' = \frac{P_T}{2k_0P} \quad (2.33)$$

elde edilir. Bu sonuca göre, Eşitlik 2.22 ve Şekil.11 de verilen çift portlu SAW yapısına göre düzenlenirse kapasitif etkilerden gelen güç aktarımı,

$$P_{T1} = \frac{I_0^2}{2j\omega k(\varepsilon+\varepsilon_0)} \quad (2.34)$$

Yüzeyde iletken bir film olması durumunda bu güç akış ifadesi,

$$P_{T2} = \frac{I_0^2}{2[k^2\sigma_s + j\omega k(\varepsilon+\varepsilon_0)]} \quad (2.35)$$

olur. Eşitlik 2.34 ve 2.35'de gelen güç aktarımları farkı ise akustoelektrik etki olarak bilinen etkiyi ifade eder.

$$P_T = P_{T2} - P_{T1} = \frac{I_0^2}{2[k^2\sigma_s + j\omega k(\varepsilon+\varepsilon_0)]} - \frac{I_0^2}{2j\omega k(\varepsilon+\varepsilon_0)} \quad (2.36)$$

$$C_s = \varepsilon + \varepsilon_0$$

$$P_T = P_{T2} - P_{T1} = \frac{I_0^2\, k^2\sigma_s}{2j\omega kC_s[k^2\sigma_s + j\omega kC_s]} \quad (2.37)$$

elde edilir. Elde edilen 2.37 eşitliği, 2.31 eşitliğindeki değişkenlere göre düzenlenirse,

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{K^2}{2}\frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2+(v_0 C_s)^2} \tag{2.38}$$

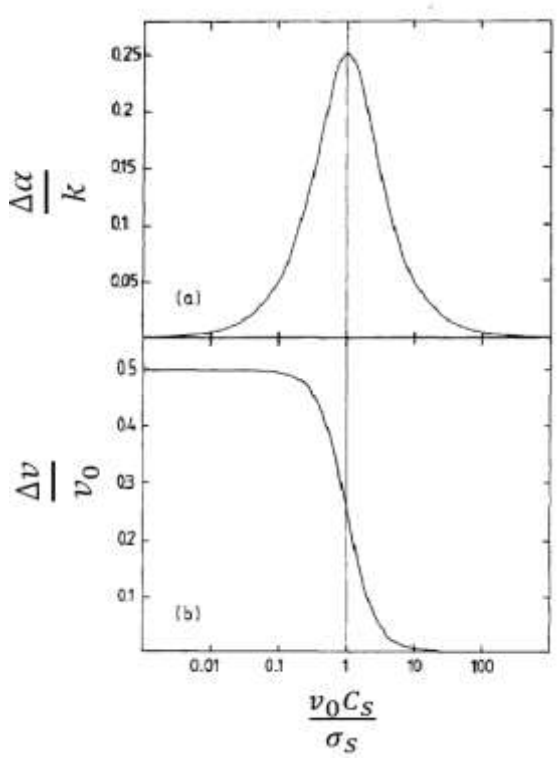
$$\frac{\Delta \alpha}{k} = \frac{K^2}{2}\frac{v_0 C_s \sigma_s}{\sigma_s^2+(v_0 C_s)^2} \tag{2.39}$$

ifadeleri elde edilir [28]. Eşitlik 2.38, iletkenliğin ve/veya kapasitenin frekans kayması üzerindeki etkilerini açıklar. Eşitlik 2.39 ise, iletkenliğin ve/veya kapasitenin güç ve enerji aktarımı üzerindeki etkilerini açıklar. Ayrıca dalganın pertürbasyonunda Eşitlik 2.31 kapalı formda görülen ifadelerde reel kısım aktarılan güçteki sanal kısım ise enerjideki pertürbasyonunu açıklar [26]. Eşitlik 2.38 ve 2.39 'un ayrı ayrı incelenmesi gereklidir. Her iki denklemde de temel değişken iletkenlik ve kapasite değişimidir. Bu değişkenler tamamen SAW transduser üzerine kaplanan ince filmin elektriksel özelliklerine bağlıdır.

Eşitlik 2.39,

$$\frac{\Delta \alpha}{k} = \frac{K^2}{2}\frac{\frac{v_0 C_s}{\sigma_s}}{1+\left(\frac{v_0 C_s}{\sigma_s}\right)^2} \tag{2.40}$$

şeklinde düzenlenirse $\frac{v_0 C_s}{\sigma_s}$ oranının $\frac{\Delta \alpha}{k}$ oranı değişimi üzerinde belirleyici olduğu görülür. Ayrıca $\frac{\Delta \alpha}{k}$ oranı dalganın üretildiği IDT yapısından kayıt edildiği IDT yapısına kadar meydana gelen kayıp olarak da tanımlanır. Kaybın en fazla σ_s=$v_0 C_s$ noktasında gerçekleşeceği kolayca görülebilir. Bu durumda kayıbın maksimum olduğu noktanın öncesinde ve sonrasında, iletkenliğin mi yoksa kapasitenin mi etkin olduğu konusunda yorum yapılabilmektedir. Şekil.15'te, $\frac{v_0 C_s}{\sigma_s}$ oranı değişimine bağlı olarak $\frac{\Delta \alpha}{k}$ (kayıp), ve $\frac{\Delta v}{v_0}$ parametrelerinin değişimleri görülmektedir.



Şekil.15 İletkenlik ve kapasite değişimlerinin kayıp (a) ve frekans kayması(b) üzerine etkisinin karakteristik şekli (Değerler GaAs içindir) [29,30].

Eşitlik 2.38'de ifade edilen iletkenliğin SAW frekansı üzerindeki bu etkisi genel bir ifade ile "akustoelektrik" (AE) etki olarak tanımlanmaktadır.

2.1.5.3 Yüzey Akustik Dalgası-Viskoelastik Etkileşim

Yüzey akustik dalgasının etkileştiği bir diğer parametre ise dalganın yolu üzerine kaplanmış yüzey ile senkronize hareket edebilen ince filmlerdir. Filmin hacminde, elastikliğinde ve/veya mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek değişiklikler dalganın yayılması üzerinde etkili olacaktır. Bu etkiler genelde akustik dalga ile taşınan gücün ve enerjinin kayba uğraması şeklindedir[31]. SAW transduser üzerine kaplanmış filmin mekanik özelliklerindeki değişimin nedeni ise filmin dış ortamdan etkilenmesidir. Bu etkileşim gaz sensörü uygulamalarında dış ortamdaki gaz/gazların ince film tarafından adsorblanması/absorblanması şeklinde gerçekleşir. Bu etkileşim sıvı ortamda çalışan SAW transduserler için de benzer şekildedir.

İnce film üzerinde meydana gelebilecek değişimler iki temel yapıda oluşur. Bunlar; film hacmi sabit kalmak kaydı ile şeklinde meydana gelebilecek değişimler (burulma) ve hacimdeki sıkışmalardır bu durumda ise filmin şekillenimi değişmez. Bu iki tür dışında kalan değişiklikler ise bu iki değişikliğin kombinasyonu şeklindedir [32]. Bu değişiklik tanımı her ne kadar polimer ince filmler için yapılmış olsa da metal ve metal-oksit filmler içinde söz konusudur. Ayrıca sadece SAW transduser üzerine kaplanmış filmlerin mekanik özelliklerine bağlı değişimleri dikkate alan sensör yapıları çok fazla çalışılan bir saha değildir [33].

Lineer izotropik yapıdaki katıların mekanik özellikleri "bulk modülü (K)" ve "shear modülü (G)" ile tanımlanır. İdeal elastik yapılar için K ve G reel değere sahiptir. Katı yapıdaki malzemeler için ise deformasyonun sinüzoidal yapıda olması nedeni ile $K = K' + jK''$, $G = G' + jG''$ olarak ifade edilebilir. K ve G'nin reel kısımları dalganın fazı üzerindeki baskıyı ve sinüzoidal dalga hareketi üzerindeki sıkışmayı ifade eder. Her periyot boyunca ne kadar potansiyel enerjinin depolandığını ve kayıp edildiğini ifade eder[34]. Sanal kısım, kayıp modulü olarak da isimlendirilir. Fazın 90^0 dışındaki baskıyı ve gerilmeyi ifade eder. Enerjideki kaybın veya her periyotta ısıya dönüşen miktarın bir ölçüsüdür [35].

Gerek bulk gerekse de shear akustik dalganın yayıldığı bir transduser yüzeyindeki ince filmin mekanik özelliklerindeki bir değişiklik dalganın gücünde ve/veya taşıdığı enerjisinde değişikliğe neden olur. Bu değişiklik genel olarak bir "kayıp" şeklidedir. Dolayısıyla filmin elastiklik özelliği ile kayıp parametresi arasında bir ilişki vardır. Genel olarak, elastiklik özelliği iyi olan polimerler ve benzeri ince filmler daha fazla kayba neden olmaktadır. Sert ve katı yapıdaki ince filmler ise daha az kayba neden olmaktadır. Bulk modülü ile shear modülü arasındaki kayıplar karşılaştırıldığında bulk moddaki mekanik özelliklerin değişiminden kaynaklanan kayıp miktarı ihmal edilebilir büyüklüktedir. Bu nedenle, QCM transduserlerin kullanıldığı uygulamalarda mekanik özelliklerden kaynaklanan etkiler ihmal edilir. Shear modda titreşen SAW transduser üzerindeki viskoelastik etkileşimler $\frac{\Delta v}{v_0}$ ve $\frac{\Delta \alpha}{k}$ cinsinden eşitlik 2.41 ve 2.42 de verilmektedir.

$$\frac{\Delta v}{v_0} = 4C_e \frac{f_0}{v_0^2}(\Delta h G') \qquad (\mathbf{2.41})$$

$$\frac{\Delta \alpha}{k} = 4C_e \frac{f_0}{v_0^2}(\Delta h G'') \qquad (\mathbf{2.42})$$

Eşitlik 2.41 depoloma modülü G' 'nün özellikle dalga hızındaki değişimler, Eşitlik 2.42 ise kayıp modülü G'' 'nün ise kayıp mekanizmaları üzerinde etkin olduğunu ifade etmektedir.

Bu parametreler SAW transduserin yüzeyi viskolestik bir malzeme ile kaplandığı zaman çok daha önemli hale gelir. Dalga enerjisi, film içerisinde SAW tarafından oluşturulan dalga yolu ile depolanmakta ve dağtılmıştılmaktadır. Filmin oluşturulan dalgaya olan tepkisi filmin kalınlığına ve ne kadar katı olduğuna bağlı olarak değişiklik gösterir[34]. Bu nedenle SAW üzerine kaplanmış filmin viskoelastik tepkisi iki farklı durumda incelenir.

Bunlar;

- Filmin ince ve katı olduğu durumlar (***akustik olarak ince):***Bu yapıdaki film dalganın oluşturulduğu yüzey ile beraber ve düzenli olarak hareket etmektedir.
- Filmin kalın veya yumuşak (elastik) olduğu durumlar (***akustik olarak kalın):*** bu yapıdaki filmler dalganın oluşturulduğu yüzey ile beraber hareket etmezler. Film, dalganın oluşturulduğu yüzeyin hareketine göre gecikmeli olarak hareket eder. Ayrıca hareketin yönü dalganın oluşturulduğu yöne paralel olabileceği gibi bu yöne kesen yönlerde de olabilir[14].

Bu nedenle Eşitlik 2.41 ve 2.42'deki sırasıyla G' ve G'' üzerinde meydana gelecek değişimler dalganın akustik olarak ince veya kalın olarak hareket ettiğine göre büyük değişiklik gösterecektir.

Filmin hangi akustik durumda titreştiğinin ölçüsü $R = \frac{Af v_0 \rho h}{|G|}$ ile verilir. Burada ρ, h, v_0 ve G sırası ile filmin yoğunluğu, kalınlığı, dalganın hızı ve shear moduludur. A ise dalganın oluşturulduğu piezoelektrik altlığa bağlı bir parametredir (Örneğin film akustik olarak ince kaplanmış ise A ST-Kesim kristal için 1.9 dır). $R<<1$ ise film akustik olarak ince yapıdadır. $R>>1$ ise akustik olarak kalın yapıdadır[14].

2.2 Algılayıcı Katman

Sensör teknolojisinin dayandığı temellerden birisi algılayıcı olarak kullanılan tabakadaki tüm değişimlerin belirlenmesidir. [36]. Bölüm 2.1'de SAW transduser algılayıcı tabakasında meydana gelebilecek durumlar üç ana başlık altında irdelenmiştir.

Bunlar algılayıcı filmin,

- kütlesinde meydana gelebilecek değişiklikler,
- elektriksel özelliklerinde meydana gelebilecek değişiklikler,
- mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek değişiklikler

olarak sıralanmaktadır. Bu etkileşimler sonucu, algılayıcı tabakanın akustik dalgayı nasıl etkilediği konuları tartışılmaktadır.

Burada sınıflandırılmış olan etkileşim türlerinin tamamı, algılayıcı filmde bahsedilen değişiklerin olması durumunda bu etkileşimin transduser tarafından ne şekilde elektriksel değişkene dönüştürüleceğidir. Bu değişimin oluşabilmesi için, algılayıcı ara yüzey ve/veya film ile gaz molekülleri arasında bir etkileşim olması gerekir. Bu etkileşimlerin hangilerinin baskın olacağı kullanılan ara yüzey malzemesine bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle, SAW transduserin sensör tepkisi analiz edilirken, kullanılan malzemenin elektriksel ve mekanik özellikleri bir bütün olarak değerlendirilmelidir [3]. Yüzey akustik dalgasının hızındaki değişimlerle kayıp mekanizmalarının gerek kullanılan piezoelektrik malzemenin gerekse yüzeye kaplanan algılayıcı malzemenin hangi özelliklerine bağlı olduğu Denklem 2.43 ve 2.44'den rahatlıkla anlaşılabilir.

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -C_m f_0 \rho_s + 4C_e \frac{f_0}{v_0^2}(\Delta h G') - \frac{K^2}{2}\frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2+(v_0 C_s)^2} \qquad (2.43)$$

$$\frac{\Delta \alpha}{k} = \frac{K^2}{2}\frac{v_0 C_s \sigma_s}{\sigma_s^2+(v_0 C_s)^2} + 4C_e \frac{f_0}{v_0^2}(\Delta h G'') \qquad (2.44)$$

Viskoelastik özelliklere sahip polimerler, sensör çalışmalarında oldukça yoğun kullanılan çeşitli fitalosiyanin ve oksim gibi malzemelerin ve türevlerinin algılayıcı film olarak kullanıldığı durumlarda elektriksel etkilerin yanında shear moddaki değişim de dalga hızı üzerinde etkindir. Fakat viskoelastik özellikleri bulunmayan ZnO ve SnO_2 gibi yapıların algılayıcı olarak kullanımlarında ise sadece kütledeki değişim ve elektriksel etkilerdeki değişim dalga hızı üzerinde etkili olacaktır. Benzer durumlar, Eşitlik 2.44'de ifade edilmiş olan kayıp parametreleri için de söz konusudur.

2.2.1 Metal oksitler ve Algılayıcı Tabaka Olarak Kullanımı

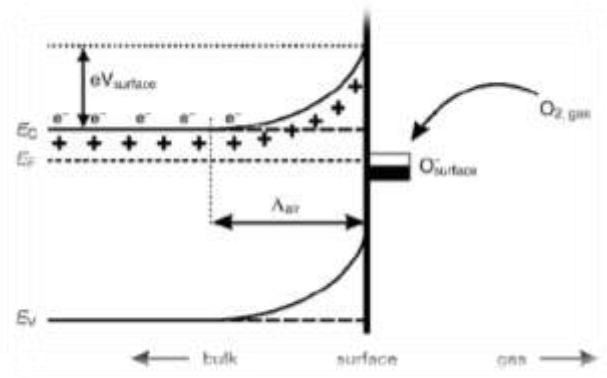
Metal oksit yapıların sensör olarak kullanımı oldukça yaygın ve üzerinde yoğun çalışılan konulardandır. Metal oksitler uzun süre elektriksel ve kimyasal özelliklerini koruyabilmeleri özellikleriyle ilgi odağı olmuşlardır. Özellikle 1990'lı yıllarda başlayan nanoteknolojik uygulamalar, metal oksit yapıların nano boyutlu olarak sentezlenmesinin önünü açmıştır. Metal oksitlerin gerek ince filmlerinin ve gerekse nano boyutlu yapılarının çeşitli tekniklerle kolay elde edilebilir olması bu sahada yapılan çalışmaların hızla artmasının bir başka nedenidir.

Metal oksit ince filmler ve nano yapılar, çoğunlukla iletkenliklerindeki değişimlerin ölçülmesi esasına dayanan tekniklerle sensör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi, algılama mekanizmalarının indirgenme, yükseltgenme reaksiyonları ile gerçekleşmesidir[37]. Bu nedenle, iki tip algılama mekanizması gerçekleşir; bunlardan biri, algılanan yüklü moleküllerin (NO_2 ve O_2 vb.) boş bölgelere tutunmasıyla, elektronların iletim bandından çekilerek iletkenliğin azalmasına neden olan etkidir. Diğeri ise, CO ve H_2 gibi gaz moleküllerinin yüzeyde tutunan oksijenle reaksiyona girip iletkenliğin artmasına sebep olan yakalanmış elektronu iletim bandına geri salması ile gerçekleşen etkidir[38]. Redoks reaksiyonları olarak bilinen, iletkenliğin azalmasına ve artmasına neden olan indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları aşağıdaki iki örnekte gösterilmiştir.

İndirgenme (İletkenlikte azalma) $$CO + O \rightarrow CO_2 + e^- \quad (2.45)$$

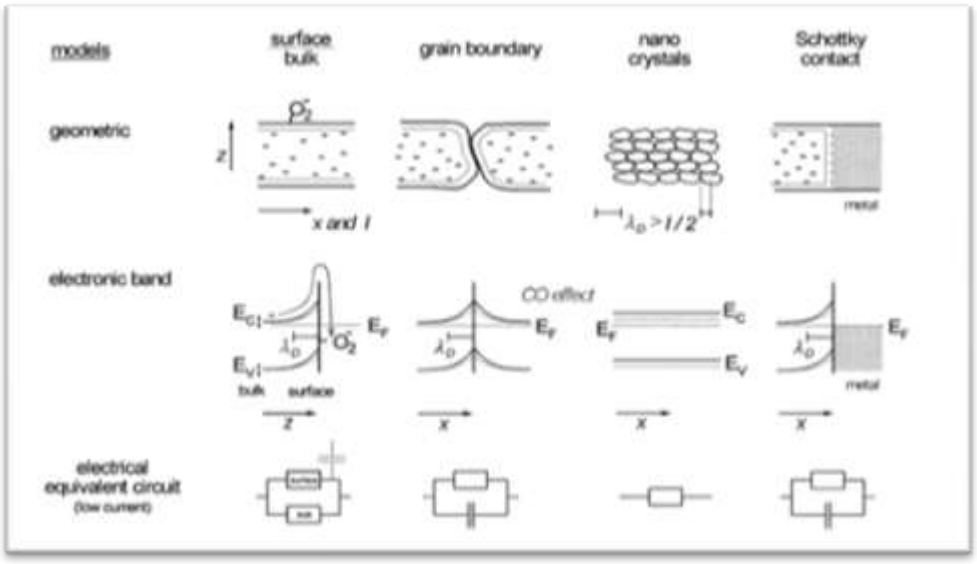
Yükseltgenme (İletkenlikte artma) $$NO + e^- \rightarrow NO^- \quad (2.46)$$

İndirgenme veya yükseltgenme reaksiyonları çoğunlukla filmin yüzeyinde meydana gelir[37]. Reaksiyon sonucunda, iletim bandına çıkabilecek elektron sayısı ya artar veya azalır. İletim bandına çıkan elektronların sayısı algılama mekanizmasına bağlı olarak değişir. Bu değişim iletkenliğin değişiminin de nedenidir. Şekil.16'da, metal oksit bir yapının oksijen absorblaması sonucu band yapısında meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil.16 Metal oksit bir yapının oksijen absorblaması sonucu band yapısındaki değişim [36].

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi bu algılama mekanizmasının "ince filmler" için geçerli olmasıdır. Eğer film yapısında süreklilik yok ise algılama mekanizması, bu sürekliliğin nasıl bozulduğuna bağlı olarak farklı faktörlerin de işin içinde olduğu karmaşık bir hal alır. Filmin sürekli kabul edilmesi halinde, parçacık büyüklüğünün Debye uzunluğundan küçük olması gerekir. Metal oksit filmi oluşturan nano parçacıkların boyunun debye uzunluğundan küçük yada yakın olması durumda ise metal oksit filmin çalışma mekanizması dolayısı ile eşdeğer devresi faklılıklar göstermektedir(Bkz Şekil 17).



Şekil.17 Metal oksit filmin enerji-band diyagramı ve eşdeğer devre [39].

Şekil.17'den de görüleceği üzere oluşan filmin eşdeğer devresinin ve enerji-band diyagramının oluşumunu belirleyen temel parametre Debye uzunluğudur. (Şekil.17, λ_D: Debye uzunluğu). Parçacık büyüklüğü Debye uzunluğunun üzerinde olduğu sürece sensör

davranışı seri ve/veya paralel direnç ve kapasiteden oluşmuş devre ile açıklanabilir hale gelmektedir.

Ayrıca metal oksit filmlerin sensör özellikleri sıcaklığın da fonksiyonudur. Sıcaklığın artması ile uzay yükü bölgesindeki (λ_{air}) elektron sayısı, sıcaklıkla değişecektir. Bu durum, yüzeyden ortama salınan ve/veya tuzaklanan elektron sayısını değiştireceğinden yüksek sıcaklıklarda sensörün daha iyi çalışacağının göstergesidir [40].

Seçicilik metal oksit tabanlı katı hal gaz sensörlerinin en zorlu problemlerinden birisidir. Gaz sensörlerinde seçiciliğini artırmak için katkılama, empedans ölçümleri, sıcaklığın değiştirilmesi, kapasite değişimine bağlı ölçümler ve metal oksit filmin başka bir film ile kaplanması gibi yöntemler uygulanmaktadır [41,42,43,44].

Metal oksit yapıların sensör özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan en temel yöntem bu yapıların iletkenliklerindeki değişimlerin ölçülmesidir. Bir diğer yöntem ise algılamadan kaynaklanan filmin iletkenliğinde kütlesinde ve/veya elastikliğinde meydana gelen değişimlerin tümünün bir değer üzerinde ölçülmedir. Son yöntemin uygulanması SAW transduserlerin kullanımı ile gerçekleşebilmektedir. Filmin iletkenliğinde kütlesinde ve elastikliğinde meydana gelen değişimler frekans, faz farkı gibi tek bir fiziksel büyüklük üzerinden ölçülebilmektedir.

2.2.2 Metal oksit Filmlerin SAW Transduser için Algılayıcı Tabaka Olarak Kullanımı

Bölüm 2.1.5'de yüzey akustik dalgasının pertürbasyon mekanizmaları anlatılmıştı. Birçok sensör uygulamasında, akustik dalganın hızındaki değişimin yüzey akustik dalgasının yolu üzerinki kütleden kaynaklandığı varsayılır. Bu çalışmalarda elektriksel etkilerin ağırlıklı olarak bir etkisinin olmadığı kabul edilmektedir [45,46]. Fakat bu konuda 1972 ve 1984 yıllarında R. B. Hemphill tarafından yapılan çalışmada yüzey akustik dalgalarının, dalganın yolu üzerinde bulunan ortamın elektriksel özelliklerine bağlılığı ile ilgili bir çok çalışma yapılmış[47,48] ancak daha sonraki yapılan çalışmalarda birçok algılayıcı tabaka için algılama mekanizması algılayıcı tabakanın kütlesindeki değişime dayandırılmış ve elektriksel değişimler ihmal edilmiştir. Algılayıcı tabakanın elektriksel özelliklerindeki değişimlerin

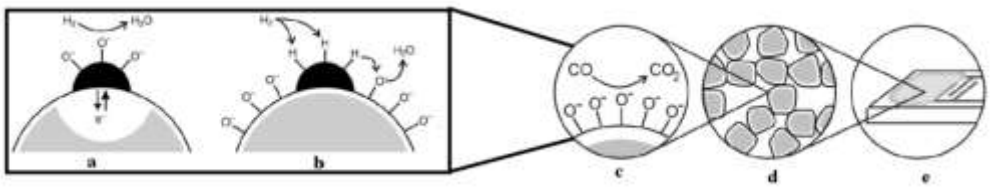
ihmal edilmesinin asıl nedeni, algılayıcı tabakanın elektriksel özelliklerindeki değişimlerin dikkate alınabilmesi için algılayıcı tabakanın yeterince ince ve düzenli bir şekilde SAW transduser üzerine oluşturulması gereksinimi ve ara yüzey tabakasının elektriksel iletkenliğinin ve/veya kapasitesinin maruz kaldığı gaz ile değişiyor olmasındandır. Aksi takdirde, Akustoelektrik (AE) etkilerden bahsedilemez[49]. Bu etkiyi gözleyen ilk araştırıcılardan olan Hemphill, çalışmalarında algılayıcı ara katmanı palladyum ile kaplamış ve AE etkilerini test edebilmiştir. Daha sonraki çalışmalarında ise Vanadyum dioksit kullanarak oksit yapılarında AE etki gösterebileceğini göstermiştir. 2000'li yılların başında, Hemphill'in çalışmalarına ek olarak Polonyalı araştırmacı Wieslaw P. Jakubik ve ekibi tarafından algılayıcı olarak organik yarıiletken olarak bilinen phthalocyanine (Pc) moleküllerinin kullanıldığı ~~de~~ yüzey akustik tabanlı sensör uygulamalarında AE etkilerin söz konusu olduğu gösterilmiştir [50].

Metal oksit yapılarla oluşturulan algılayıcılarda ölçülen fiziksel büyüklük, yapının iletkenliğindeki değişimdir. Diğer yandan, metal oksit yapıların gazlarla olan etkileşim mekanizmaları yapılan birçok çalışma ile açıklanmıştır. Tablo 2'de hangi metal oksit yapılar ile hangi gazların algılanabileceğine ilişkin veriler gösterilmiştir.

Tablo.2 Metaloksit yapılar ve Algılanabilecek gazlar [51]

Metal Oksit	**Algılanabilecek gaz/gazlar**	**Çalışma sıcaklığı (^{0}C)**
SnO_2	CO, H_2, CH_4	200–400
WO_3	O_3, NO_x, H_2S SO_2	300–500
Ga_2O_3	O_2, CO	600–900
In_2O_3	O_3, NO_x	200–400
MoO_3	NH_3, NO_2	200–450
TiO_2	O_2, CO, SO_2	350–800
ZnO	CH_4, $C4H_{10}$, O_3, NOX	250–350
Fe_2O_3	CH_4, NO_2	250–450

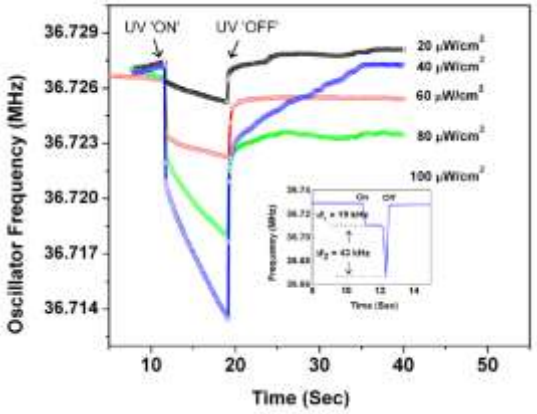
N. Yamazoe'ye göre metal oksitlerin algılama süreci üç aşamalıdır [52]. Bunlar; yüzeyde gerçekleşen elektronik veya kimyasal etkileşimler (reseptor function), mikro yapının bu etkiyi tüm yapı boyunca sürdürebilmesi (transduser function) ve mikro yapılar tarafından taşınan etkinin sensör tepkisi olarak ölçülmesidir. Bu işlem, Şekil.18'de detaylı olarak görülmektedir.



Şekil.18 Yamazoe'ya göre metal-oksit yapıların gaz algılama aşamaları [52].
a) Elektronik etkileşim, b) Kimyasal etkileşim, c) Reseptör fonksiyonu,
d) Transduser fonksiyonu e) Algılayıcı sensör yapısı

Metal oksit yapıların ince film olarak SAW transduser üzerindeki davranışları ayrı bir araştırma konusudur. SAW transduserin algılama mekanizmasında iletkenlikteki değişimin bir parametre olarak girmesi metal-oksit yapıların SAW transduserler için algılayıcı film olarak kullanılmasını cazip hale getirmiştir [53,54,4]. Diğer yandan, Eşitlik 2.43 dikkatle incelendiğinde, iletkenlikteki değişimin frekans değişimine olan etkisinin SAW transduserin bilinen kütle duyarlı özelliği ile paralel olacağı gözükmektedir. Bu durum, algılayıcı filmin iletkenliğinin de algılamaya pozitif yönde katkı yapabilecek bir parametre olarak dikkate alınmasını gerektirmektedir. İletkenliğin de algılama mekanizmasında yer alabileceği en önemli algılayıcı ara yüzey malzemesi ise metal oksitlerdir [55].

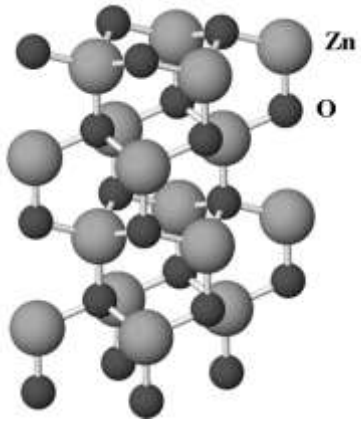
SAW üzerine kaplanmış metal oksit tabakalar kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer uygulama ise UV sensörü geliştirme çalışmalarıdır(Şekil 19). Tamamen algılayıcı katmanın iletkenliğindeki değişim ve buna bağlı olarak SAW transduserin temel frekansındaki değişimdir. Frekanstaki bu değişim $\frac{\Delta v}{v_0} \approx -\frac{K^2}{2}\frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2+(v_0 C_s)^2}$ ile ifade edilebilir [56].



Şekil.19 ZnO Kaplanmış SAW transduserin UV sensörü uygulaması [56]

2.2.2.1 Çinko Oksit

Elektriksel özellikleri bakımından ZnO, yarıiletken ile iletken malzeme sınırında yer almaktadır [57]. ZnO'nun genelde n-tipi yarıiletkenlik göstermesine rağmen belirli koşullar altında p-tipi iletkenlik gösterdiği de belirtilmektedir. ZnO Wurtzite (hegzagonal simetri) yapısında kristalleşmektedir [58]. Bu yapıda kristalleşmiş olan ZnO'nun kristal yapısı Şekil 20'de verilmiştir. ZnO, elektriksel, optik ve piezoelektrik özelliklerinin basınç, sıcaklık ve katkılanan çeşitli malzemelerle kolayca değişmesi [57] nedeniyle foto detektörlerden optik olarak tetiklenebilen anahtarlara, Ultra-Violet (UV) kaynaklardan gaz sensörlerine kadar birçok geniş uygulama alanına sahiptir [59].



Şekil.20 ZnO Wurtzite (Hegzagonal simetri) yapısı [60].

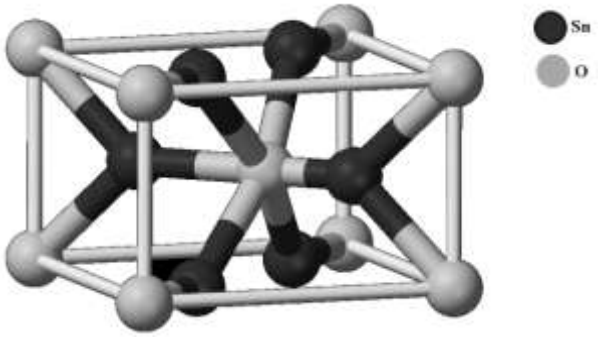
Özellikle elektriksel özelliklerindeki kararlı davranışları nedeniyle gaz sensörü uygulamalarında geniş yer bulmuştur [61]. Kimyasal metotlarla nano parçacık, nano tel ve nano çubuk yapılarının kolayca oluşturulabilir olması nedeniyle farklı nano yapılardaki ZnO'lerin gerek sensör gerekse elektriksel özellikleri yoğun olarak incelenmektedir [62, 63, 64].

ZnO yapılarının algılayıcı katman olarak kullanımında, sensör performansının ölçülmesinde başlıca iki yöntem mevcuttur. Bunlar, oluşturulan nano veya ince film yapısının iletkenliğindeki değişimin ölçülmesi veya SAW transduser üzerine kaplanarak SAW transduserin rezonans frekansındaki değişimin ölçülmesidir [65, 66, 67, 68, 69, 70].

ZnO, piezoelektrik özellikleri nedeniyle hem SAW için altkatman hem de algılayıcı yüzey olarak kullanılmıştır [71,72]. Ancak, nano tel, nano parçacık gibi yapıların da kolayca sentezlenebilir olması nedeniyle kuartz, $LiNbO_3$ gibi SAW altkatman üzerine algılayıcı katman olarak kullanılmaya devam edilmiştir [73,74]. Elde edilen bu yapılarla NO_x, etanol ve amonyak gibi gazları algılama özellikleri tüm detaylarına kadar incelemiştir [72-74].

2.2.2.2 Kalay Oksit

Kalay Oksit (SnO_2), düşük elektrik direncine ve yüksek optik geçirgenliğe—sahip olmasından dolayı güneş pilleri, LED (ligt emittig diode) ve panel ekranlar gibi pek çok teknolojik alanda uygulama alanı bulmuştur [75]. SnO_2, n-tipi yarıiletken özelliğe sahiptir. Özellikle gaz sensörü uygulamalarında elektriksel özellikleri nedeniyle yaygın bir uygulama alanı bulmuştur. Rutil yapıda kristalleşen SnO_2 yapısı Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil.21 Rutil yapıda kristallenen SnO_2 yapısı [76]

SO_2'nin gaz sensörü alanındaki ilk uygulaması ise 1962 yılında Seiyamai T. [77] ile başlamış olup K. Ihokura ve J. Watson tarafından ilk olarak patentlenmiştir [78, 79]. Bu tarihten itibaren üzerinde yoğun olarak çalışılan SnO_2 yapılar, kolay ve ucuz olarak üretilebilirliği ve düşük sıcaklılarda bile yüksek hassasiyette sensör yapılarının geliştirilebilmesine olanak sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. SnO_2 yapısından oluşturulmuş sensörler kullanılarak ortamdaki gaz kompozisyonundaki değişimler kolayca takip edilebilmektedir [80,81, 82, 83]. Ancak, karbonmonoksit (CO) gibi gazların algılanabilmesi için seçicilik ve duyarlılık özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Ag, Pd ve Ru gibi metallerle katkılanarak istenen özellikler kazandırılmaya çalışılmaktadır [84, 85, 86]. Algılama esnasında, SnO_2 yapısının direncinde değişimler

meydana geldiğinden, bu tür sensörlerde ölçülen parametre bu yapının direncidir. Bu sebepten, algılama mekanizmasının açıklanması ile ilgili çalışmalarda bu değişimin nedenleri üzerine odaklanılmıştır. [68, 71, 87, 88]. Bu değişimler yapıya giren oksijenin (atomik veya moleküler yapıda) yapıya elektron enjekte etmesi veya yapıdan elektron çekmesi neticesinde oluşmaktadır. Algılamada kritik sıcaklık 175 ^{0}C olup bu sıcaklığın üzerinde ve altında meydana gelen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir [89.

$$CO + O^-_{ads} \rightarrow CO_2 + e^-$$ 175 ^{0}C'den yüksek sıcaklıklarda

$$2CO + O^-_{2,\,ads} \rightarrow 2CO_2 + e^-$$ 175 ^{0}C'den düşük sıcaklıklarda

Bu reaksiyon mekanizmasından da anlaşılacağı üzere düşük sıcaklığa (oda sıcaklığına) doğru yaklaşıldıkça sensörün duyarlığı azalacaktır.

2.2.2.3 Titanyumdioksit

Gaz sensörü çalışmalarında yoğun kullanılan metal oksitlerden bir diğeri de Titanyumdioksit (TiO_2)'tir [90]. TiO_2, sensör uygulamalarının yanı sıra güneş pili çalışmalarında, optik dalga kılavuzu çalışmalarında ve birçok tıbbi alanda uygulama bulmaktadır [91]. TiO_2, üç farklı kristal yapıda kristalleşmektedir. Bunlar; anataz, rutil ve brokittir. Her fazın sensör özelliklerinin birbirinden farklı olduğu bilinmektedir [92]. Sensör performansının diğer fazlara göre daha iyi olması nedeniyle anataz fazı, gaz sensörü uygulamalarında en çok tercih edilen fazdır [93]. Diğer yandan, etanol buharının algılanması için ise rutil fazda kristallenmiş TiO_2 yapısının daha uygun olduğu rapor edilmiştir[94].

TiO_2 tabanlı sensörlerde algılama mekanizması söz konusu filmin elektriksel direncindeki değişimlerle açıklanabilir. Algılama mekanizması; yapıya giren oksijenin (atomik veya moleküler yapıda) yapıya elektron enjekte etmesi veya yapıdan elektron çekmesi şeklinde çalışmaktadır. Bu sebepten, TiO_2 yapısı sensör olarak kullanılabildiği gibi Nb ve Sn gibi metal veya metal oksitlerle katkılanarak çeşitli sensör yapıları elde edilebilmektedir [95]. Katkılama işlemiyle sensörlere ölçülmek istenen gaz/gazlara daha fazla duyarlılık, düşük sıcaklıkta yüksek sensör tepkisi verme gibi özellikler kazandırılmaktadır.

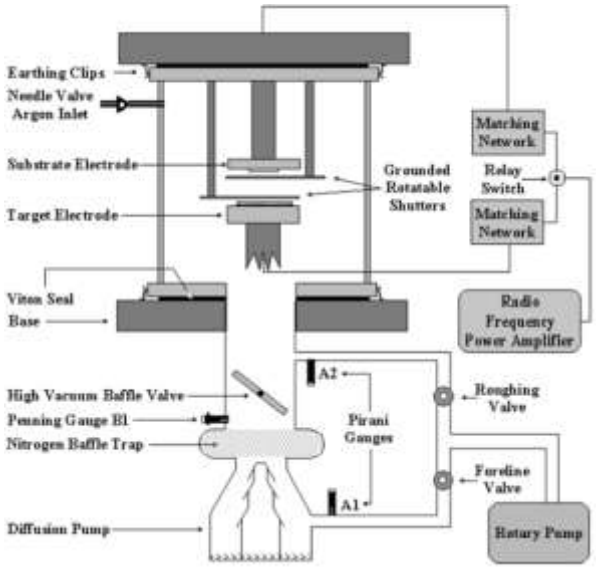
TiO_2 yapısının SAW transduserler üzerine algılayıcı film olarak kullanımı W. Wlodarski ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmalar daha çok H_2'nin algılanmasına yönelik olup sensör performansları oda sıcaklığının üzerinde test edilmiştir [96]. Daha sonra M. Penza, TiO_2 nanotüpleri NO_2 gazı ölçümleri için SAW transduser üzerinde algılayıcı tabaka olarak kullanmış ve oda sıcaklığında ölçümler gerçekleştirmiştir[97].

2.2.3 Metaloksit Filmlerin Üretimi

Sensör uygulamalarında metal oksit ince filmlerin üretiminde kullanılan yöntem oldukça önemlidir. Elde edilecek ince filmin uygulamadaki performansı, filmin alt katman üzerinde nasıl şekillendiği ile yakından ilgilidir. Düzensiz ve homojen olmayan bir film yapısının ve/veya içinde kirlilik barındıran filmlerin uygulamaya getireceği çeşitli zorlukların olabileceği açıktır. Ayrıca, filmi üretmekte kullanılan tekniklerin filmin yeniden üretilmesini sağlayacak nitelikte olması gerekir yani film üretiminin tekrarlanabilir olması gerekir. Bu amaçla, çeşitli film üretme teknikleri geliştirilmiştir. Bunların başlıcaları, Physical Vapor Deposition (PVD), Chemical Vapor Deposition (CVD) ve Sol-Gel yöntemidir. Bu teknikler kullanılarak elde edilen filmlerin, oksitli yapılara dönüşmesi için farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tutulmaları gerekebilir. Ayrıca RF sputter kullanılarak oksit bir kaynaktan filmin istenilen yüzey üzerine oluşturulması teknikleri de mevcuttur. Hangi tekniğin kullanılacağı elde edilmek istenen metal okside ve filmin oluşturulacağı yüzeye göre değişiklik gösterebilir [98]. SAW transduserler üzerine oluşturulan metal oksit yapıların üretim tekniklerini ise, RF sputter, Sol-Gel ve sentetik nano yapılı metal oksit parçacıkların spin-coater ile SAW yüzeyine kaplanması olmak üzere üç grupta toplamak mümkündür.

2.2.3.1 RF Sputter Tekniği ile Metal oksit Filmlerin Elde Edilmesi

RF Sputter tekniği, kaynak malzeme olarak kullanılacak olan yapının inert gazlardan oluşturulmuş plazma iyonları tarafından bombardıman edilmesi esasına dayanır. Çoğunlukla inert gaz olarak argon tercih edilir. Bombardıman yoluyla koparılan atomlar kaplanacak yüzeye manyetik alan yardımıyla iletilir. Bu şekilde elde edilen filmler oldukça düzgün ve kontrollü elde edilmektedir. Fakat RF sputter tekniği pahalı bir tekniktir. Şekil 22'de RF sputter kaplama sisteminin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil.22 RF sputter kaplama sisteminin şematik görünümü [99].

Bu yöntem ile gerek oksitli yapılar gerekse de metalik yapıların ince filmleri elde edilebilmektedir [100,101].

2.2.3.2 Sol-Gel Yöntemi İle Metal oksit Filmlerin Elde Edilmesi

Sol-gel tekniği, filmi elde edilecek çözeltinin yüzeye kaplanması ve çözeltinin yüzeyden uçurulması esasına dayanır. Sol-gel tekniği, kelime anlamıyla solüsyon-jelleşme (solution-gelation) kelimelerinin kısaltmasıdır. RF sputter kaplama tekniği ile karşılaştırıldığında uygulaması oldukça kolay ve ucuz bir tekniktir.

Sol-gel işlemi, basit olarak şu şekilde ifade edilebilir; bir sıvı faz içinde kolloidal süspansiyon şeklinde bulunan katının (sol) zamanla üç boyutlu katı inorganik ağ yapılarını (jel) oluşturması olarak tanımlanabilir. Burada "sol" olarak ifade edilen çözelti, katı taneciklerin sıvı içerisindeki kararlı bir süspansiyonudur. Bu parçacıkların üzerine etki eden kuvvetler Van der Waals kuvvetleri ile elektriksel kuvvetlerdir. "gel" ise molekülün çözelti içinde genişleyerek makro boyuta ulaşmış halidir. Katı ve sıvı faz arasında, devamlılığı olan bir ara fazdır. Sol-gel tekniği, 1840'lı yıllarda keşfedilmiştir ve 1930'lu yıllardan itibaren yaygın olarak çalışılmaya başlanmıştır.

Sol-jel tekniğinde kullanılan 3 temel bileşen vardır. Bunlar; başlangıç malzemeleri, çözücüler ve katalizörlerdir. Sol veya jeldeki metal katyonunu içeren kimyasal reaktan, kimyasal başlangıç malzemesi olarak isimlendirilir. Başlangıç malzemelerinin kimyasal dönüşümleri oldukça karmaşıktır. Bu reaksiyonlar, yoğun kollodial taneciklerin dispersiyonuna ve onların jeldeki aglomerasyonuna yol açar. Başlangıç malzemeleri iki ana grupta toplanır:

- Metalik tuzlar
- Alkoksitler

Metalik tuzlarının genel formülü M_mX_n olarak verilmektedir. Burada M metal, X anyonik grup, m ve n ise stokiyometrik katsayılardır. Metalik tuzları sulu çözeltilerde kullanmak ucuz fakat reaksiyon kontrolü zor bir üretim metodudur. Alkoksitlerin genel formülü ise $M(OR)_n$ olarak verilmektedir. Formülde n alkol grubunun M katyonuyla kombinasyonunu göstermektedir. İçerdikleri yüksek elektronegatif OR grubundan dolayı, metal alkoksitlerin reaksiyona katılımları oldukça yüksektir. Metal alkoksitin bünyesindeki alkil grupları değiştirilerek fiziksel özelliklerde farklılıklar sağlanabilir. İki başlangıç malzemesi grubunun da çözelti kimyası birbirinden çok farklı olduğu için su ya da organik çözücünün sol-gel işleminde çözücü olarak seçimi kullanılan başlangıç malzemesine bağlıdır. Kullanılacak başlangıç malzemesi film gelişiminde çok önemli bir rol oynadığı için kararlı ve düşük zehirlilik seviyesine sahip bir başlangıç malzemesi seçimi çok önemlidir [102].

Sol-gel işlemi film oluşturmak için önemli bir yöntem olmakla birlikte elde edilen filmlerin oksit formlarının oluşturulabilmesi için ısıl işlem gerektirir. Bu işlem, metalik tuzların veya alkoksitlerin oluşturmuş olduğu filmlerin oksit haline dönüşmesini ve yapıdaki organik bileşenleri yapıdan uzaklaşmasını sağlar.

Sol-gel tekniğiyle oksit formlu ince filmlerin oluşturulabilmesi için çözeltinin filmin oluşturulacak yüzeye uygun yöntemlerle kaplanması ve sonrasında ısıl işlem uygulanması gereklidir. Kaplama işlemi için birçok yöntem mevcut olmakla birlikte, hangi yöntemin kullanılacağı kaplama çözeltisine, kaplama yapılacak yüzeye ve istenilen film kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Aşağıda ince film elde etme amacıyla sık kullanılan kaplama yöntemleri sıralanmıştır.

- Daldırarak Kaplama Tekniği (Dip Coating)
- Döndürerek Kaplama Tekniği (Spin Coating)
- Püskürtme Kaplama Tekniği (Spray Coating)
- Akış Kaplama Tekniği (Flow Coating)
- Laminer Kaplama Tekniği (Laminar Coating)
- Merdaneli Kaplama Tekniği (Roll Coating)
- Baskı Kaplama Tekniği (Printing)

Bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları olabileceği göz önünde bulundurularak kaplamada hangi yöntemin kullanılacağı tespit edilebilir.

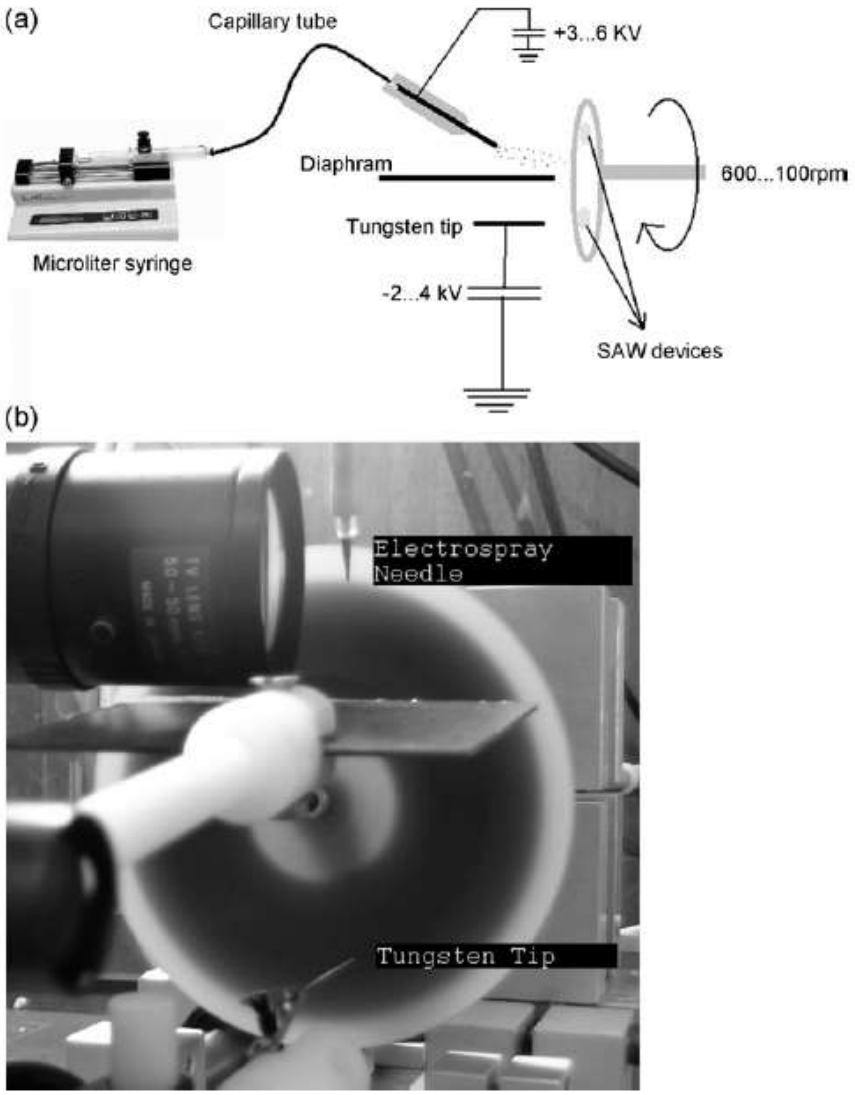
2.2.3.3 Elektro-Spray (ES) Kaplama Tekniği

Elektro-Spray (ES) yöntemi, yüklü küçük damlacıkların kaplanacak yüzeye yüksek gerilim yardımı ile iletilmesi esasına dayanır. ES kaplama tekniğini, diğer kaplama tekniklerinden farklı kılan neden, yüzeyde oluşturulacak filmin morfolojisinin ve kalınlığının kontrol edilebilir olmasıdır. [103]. Örnek bir ES kaplama sistemi Şekil.23'de verilmiştir.

Bu yöntemin en önemli avantajları;

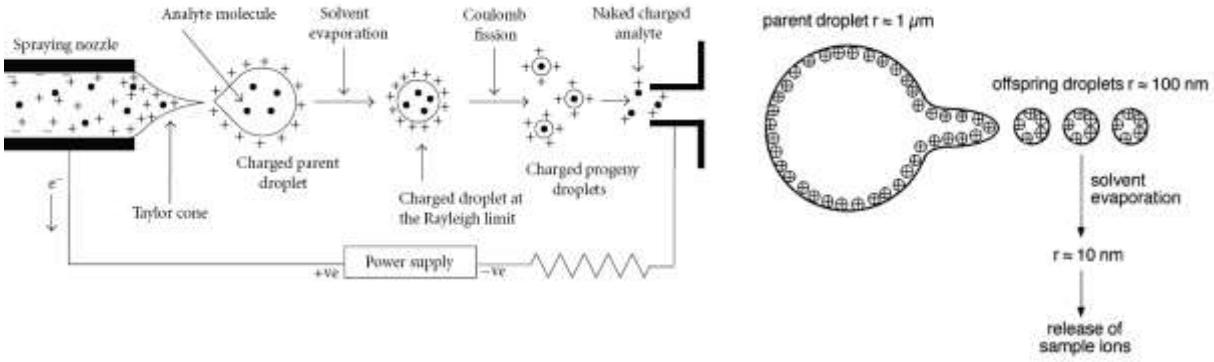
- Yüzeyde oluşturulan filmin kalınlığının çözelti konsantrasyonu ve hacmi değiştirilerek kolayca değiştirilebilir olması,
- Kaplama çözeltisi içine eklenen polimerlerle nanofiber, nanotel ve nanoparçacık gibi yapıların oluşturulabilir olması,

sayılabilir. Bu avantajların gerçekleşebilmesi için kaplama süresince Taylor konisi olarak isimlendirilen ince metal borunun ucundaki sıvı şekillenimin sabit kalması gereklidir. Aksi



Şekil.23 a) ES kaplama sisteminin şematik görünümü,
b) ES kaplama sisteminin fotoğrafı [104].

takdirde, kontrol edilebilir bir film yapısından bahsetmek mümkün değildir. ES tekniği, esasen analitik kimya laboratuarlarının temel cihazlarından olan kütle spektroskopisinin iyonlaştırma ünitesinin ince film elde etmek için kullanımıdır. Kaplama süresince Taylor konisinden çıkan damlacığın büyüklüğü koni yapısının oluşturulduğu ucun çapına ve kaplama süresi boyunca aynı şekillenimde oluşturulması ile ilgilidir. Taylor konisinin yatay piramit şeklinde olmasının sebebi, sıvı yüzey gerilimi ile uygulanan elektrik alanı arasındaki dengedir. Taylor konisinden kopan damlacığın hedefe ulaşana kadar buharlaşması sebebiyle sürekli küçülmesi söz konusudur [105]. Damlacığın şekillenimi Şekil.24'de verilmektedir.



Şekil.24 a) Kütle spektroskopisi üzerindeki ES sistemin Şematik görünümü [106], **b)** ES kaplama esnasında damlacık oluşumu [107].

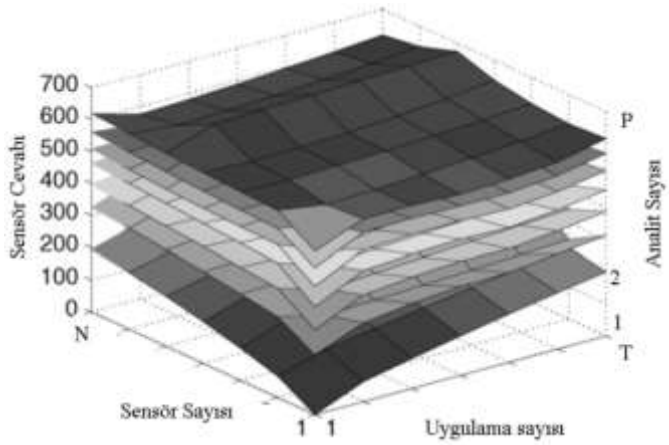
Hedefe ulaşan yüklü damlacıkların yüklerinin boşaltılması gerekmektedir. Aksi takdirde, Coulomb etkileşimleri nedeniyle arkadan gelen damlacıklar hedefe ulaşamayacaktır [108]. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için kullanılacak yöntem filmin oluşturulacağı yüzeyin iletken veya yalıtkan olmasına göre değişiklik gösterir. Filmin oluşturulacağı yüzey iletken ise yüzeyi topraklamak bu Coulomb etkileşimlerini ortadan kaldıracaktır. Ancak yüzey yalıtkan ise kaplama sisteminde AC kaynak veya yüzeyi negatif yük ile yüklemek için negatif DC kaynak kullanımı gereklidir. Şekil.23a'da negatif kaynak kullanılarak oluşturulmuş bir sistem verilmektedir.

2.3 Sensör Tepkileri Analiz Metotları

Bir sistemden elde edilen verilerin doğru yöntem ve metotlar kullanılarak değerlendirilmesi o sistemin doğru şekilde karakterize edilmesi için oldukça önemlidir. Bu nedenle, sensör çalışmalarında, sensör verilerinin analiz edilmesi aşaması en kritik aşamadır. Sensör verilerinin bir veri seti olarak dikkate alınarak gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğu, sensör verisi ile verilerin alındığı ortamın fiziksel ve/veya kimyasal bilgisi arasında ilişki kurmaya yöneliktir [109]. Gaz sensörleri açısından fiziksel ve/veya kimyasal bilgi, ortamda bulunan gaz/gazların kimlikleri ve konsantrasyonlarıdır. Bu tür çalışmalarda diziyi oluşturan sensörlerin farklı seçiciliğe sahip oldukları kabul edilir [110]. Çalışmanın bu şekilde ele alınması, sensörün veri üreten bir uç eleman olarak değerlendirildiği anlamına gelmektedir. Bu durum, uzman sistemler, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi yapay zeka bileşenlerinin kullanılarak ilgilenilen ortama ilişkin güvenilir

fiziksel ve/veya kimyasal bilginin oluşturulmasına olanak sağlar [110]. Diğer yandan, aynı veri seti kullanılarak sensörlerin birbirinden karakteristik olarak ne kadar farklı olduklarına dair bilginin de elde edilmesi mümkündür. İstatistiksel değerlendirme yöntemlerinden Principal Component Analysis (PCA) ve Hierarchical Clustering Analysis (HCA), sensör verileri kullanılarak sensörlerin karakterize edilebildiği başlıca veri işleme tekniklerdir [109].

Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan veri işleme teknikleri değerlendirilmek istenirse problemi N tane sensörden oluşmuş bir dizinin P sayıda analite karşı test edildiği durumlardan oluşmuş bir veri seti gibi düşünebiliriz. Her bir P durumu T sayıda farklı gaz konsantrasyonu uygulanarak elde edilmiş olsun. Bu durumda, veri setimiz NxP tane durumdan oluşmaktadır. Her bir P durumu için oluşan uzaysal şekil birbirinden farklı ve/veya aynı olabilir. Şekil.25'de N tane sensör için P tane analitin oluşturduğu örnek uzaysal şekillenim verilmektedir.



Şekil.25 N tane sensör için P tane analitin oluşturduğu örnek uzay.

Bu çok boyutlu verinin etiketlendirilebilmesi için veri setinin anlamlı parametrelere göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu uygulamada veri setinin analite göre nasıl şekillendiğinin incelenmesi bir PCA problemi olarak ele alınabilir. Diğer yandan, sensörlerin cevaplarının birbirine ne kadar benzediğinin incelenmesi de bir HCA problemi olarak ele alınabilir.

2.3.1 Principal Component Analaysis (PCA)

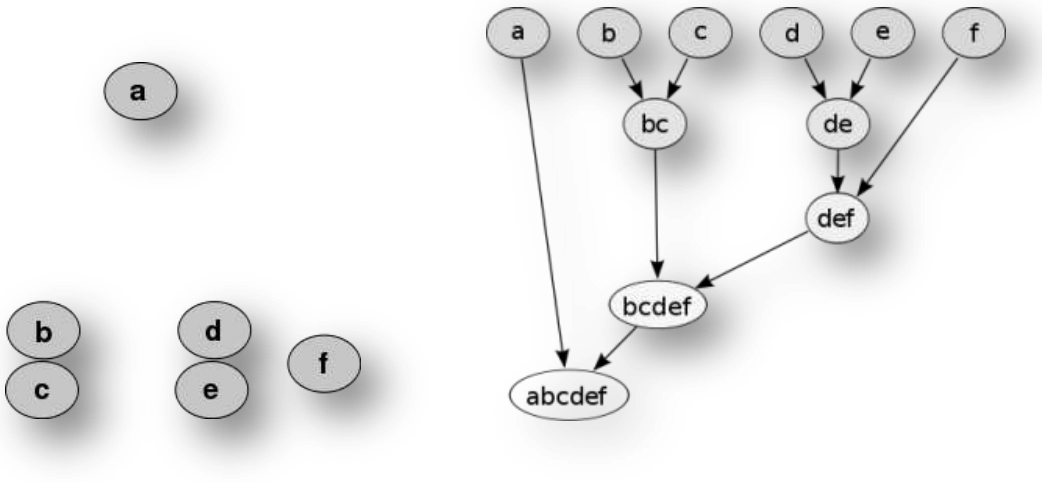
Principal Component Analysis (PCA), genel olarak değişkenler arasındaki bağımlılık yapısının yok edilmesi veya boyut indirgeme amacıyla kullanılan bir analiz olduğu gibi başka analizler için veri hazırlama tekniği olarak da kullanılmaktadır. Bu teknik kullanılarak ele alınan veri kümesi, gerçek değişkenlere bağlı olarak tanımlanan temel bileşenlerle (Principal Components) tanımlanır ve temel bileşenler birbirine dik düzlemler olmak üzere gerçek değişkenlerin doğrusal kombinasyonlarına karşılık gelir.

Temel bileşenler, gerçek değişkenlere bağlı olarak üretilen birbirinden bağımsız değişkenlerdir ve ağırlık faktörleri, temel bileşenlerle gerçek değişkenler arasındaki korelasyonu ifade etmekte, ayrıca değişkenlerin kendi aralarındaki ilişkiyi de göstermektedir. Birinci mertebeden temel bileşen, en büyük varyans değerine sahip olduğu için, gerçek veriler arasındaki ilişkiyi en yüksek derecede açıkladığı kabul edilen bileşendir [111]. PCA, kısaca, çok sayıdaki özelliklerin belli bir nitelik yönünden özetlenmesi ve ortak nitelik ve biçimlerden bir soyutlama yapabilmeyi mümkün kılmaktadır. Bu özelliğiyle, çok sayıda ve farklı boyuttaki bilgi setinin kapsadığı ortak ve temel anlamı tanımlayabilmeyi sağlayan istatistiksel bir yöntemdir [111]. Farklı boyuttaki bilgi setinin kapsadığı ortak ve temel anlamların birbirinden farklılıklarını ortaya koymaya yarayan bir yaklaşımdır. Bu yöntem ile ilgilenilen veri setini oluşturan bileşenlerin birbirine ne kadar benzediği ve/veya benzemediği konusunda bir fikir elde edilebilir. Birbirlerine benzeyen veri setleri temel bileşenlerin oluşturduğu uzayda birbirlerine yakın noktalarda konumlanacak birbirlerine benzemeyen veri setleri ile birbirlerinden uzak noktalarda konumlanacaklardır. Bileşenlerin matematiksel büyüklükleri ve temel bileşenler uzayında oluşan gruplar arası uzaklık, birimsiz olup bileşenlerinin kendi içinde ne kadar farklılaştığının bir ölçüsü olarak bakılabilir. PCA hesaplama aşamaları; standart sapma, kovaryans, özvektör ve özdeğer bulma işlemlerinden ibarettir.

2.3.2 Hierarchical Clustering Analysis(HCA)

Hierarchical Clustering Analaysis (HCA) olarak bilinen Kümeleme Analizinin (Clustering Analysis) temel amacı, nesneleri (birimleri) sahip oldukları karakteristik özelliklerine göre gruplamaktır. Kümeleme analizi, nesneleri küme içinde çok benzer,

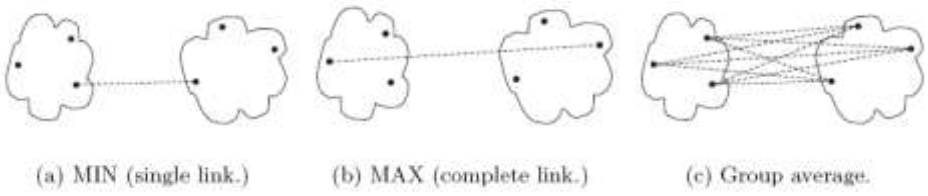
kümeler arasında çok farklı olacak biçimde ayırır. Kümeleme işlemi başarılı olursa, bir geometrik çizim yapıldığında nesneler küme içerisinde birbirine çok yakın, kümeler ise birbirinden uzak olacaktır [112]. Hiyerarşik ayrıştırma sırasında, "ağaç veri yapısı" olarak da bilinen dendogram kullanılır. Dendogram, hiyerarşik kümeleme tekniğiyle elde edilen kümelerin görselleştirilmesini sağlar. Bir dendogramın yapısı kökler, iç düğüm ve yapraklardan oluşur. Dendogram kökü tüm birimlerin bir araya gelmesiyle oluşan ana kümeyi içerir. Dendogramın yapraklarıysa bir araya getirilmeyen tek bir birimden oluşan kümeleri içerir. Dendogramın iç düğümleri (küme) ise, birimlerin bir araya gelerek oluşturdukları kümeyi gösterir. Bu durum Şekil.26'da gösterilmektedir.



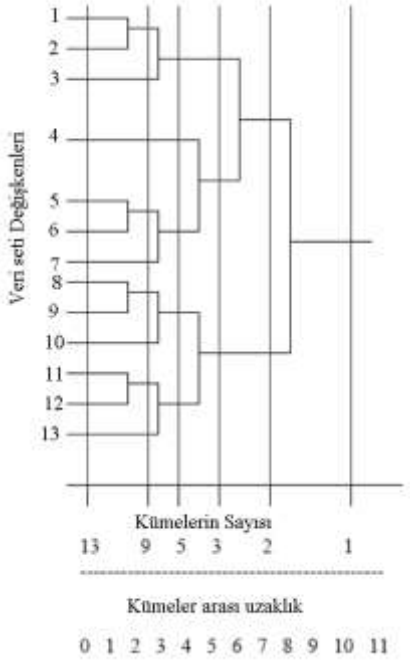
Şekil.26 a) Ayrık Kümeler, **b)** HCA gerçekleştirilen kümeleme işlemi ve Dendogram yapısı [113].

Nesneler ya da kümeler arasında benzerliklerin bulunması esasına dayanan bu yöntem sensör cevapları dikkate alınarak birbirine benzeyen sensörlerin belirlenmesinde büyük fayda sağlamaktadır. HCA analizi, bir veri setinde yer alan birimlerin kümelenmesi işlemi bu birimlerin birbirleriyle olan benzerlikleri ya da birbirlerine olan uzaklıkları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu uzaklıkların hesaplanmasında kullanılacak yöntemler problemin şekline ve veri setini oluşturan değişkenlerin sayısına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Şekil.27'de kümeler arası mesafenin nasıl hesaplandığına ilişkin yaklaşımlar görülmektedir. Kümeleme analizinde iki küme arasında ki mesafeye herhangi bir sınırlama getirilmemiş ise veri setinin oluşturan tüm değişkenler bir grup olana kadar kümeleme işlemi devam eder.

Kümeleme aşamaları (Dendogram gösterimi) ve iki küme arasındaki uzaklık Şekil.28'de görülmektedir.



Şekil.27 Kümeler arası mesafenin hesaplanmasında uygulanan yöntemler [114].



Şekil.28 Kümeleme aşamaları ve iki küme arasındaki uzaklık.

İki küme arasındaki uzaklık değişkenlerin büyüklüğüne göre belirlendiği için uzaklık birimi birimsiz olup verinin cinsine ve büyüklüğüne göre değişen göreli bir değerdir. Kümeleme işlemleri için kullanılan hesaplama tekniklerinden bazıları; Öklidyen (euclidian), Manhattan, Minkowski ve Pearson uzaklık ölçüleridir. Uzaklık formülleri p boyuta sahip 2 birim arasındaki uzaklığa göre verilmiştir. Öklidyen uzayı için iki küme arasındaki uzaklık eşitlik 2.47 de verildiği gibidir.

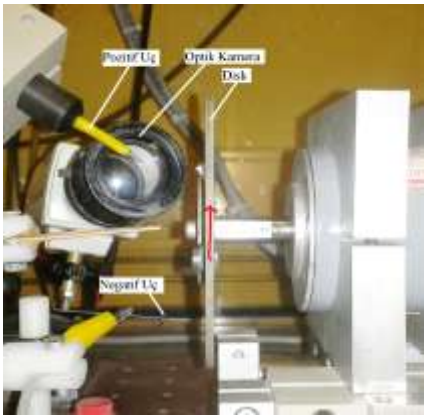
$$d(i,j)=\sqrt{(x_{i1}-x_{j1})^2+(x_{i2}-x_{j2})^2+\ldots+(x_{ip}-x_{jp})^2} \qquad \textbf{(2.47)}$$

3 DENEYSEL YÖNTEM

Tez çalışmasına, ZnO, SnO_2 ve TiO_2 nano boyutlu filmlerin üretilmesi ile başlanmıştır. ZnO, SnO_2 ve TiO_2 nano boyutlu filmlerin gerek toz halde gerekse farklı fiziksel boyuttaki yapılarının üretimine ilişkin birçok bilgi literatürde mevcuttur. Ancak, ZnO, SnO_2 ve TiO_2 nano boyutlu filmlerin SAW transduser üzerine elektrospray tekniği kullanılarak üretilmesi bir ilk uygulamadır. ZnO, SnO_2 ve TiO_2 nano boyutlu filmler SAW transduser üzerine daha çok RF sputter kaplama tekniği kullanılarak kaplanmaktadır. Elde edilen film yapılarının SAW yüzeyindeki morfolojisinin belirlenmesi amacı ile SEM, AFM ve XRD analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarından; oluşan filmin yüzeydeki dağılımının homojenlik durumu ve kristal yapısı belirlenmiştir. Elektriksel analizler ise network analizörü ve elektrometre yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analizler yardımı ile filmin iletkenliğinin ve SAW 'un yüzeyinde meydana getirilen dalganın iletiminde oluşan kayıp parametresinin elde edilen filme bağlılığı belirlenmiştir. SAW'ların sensör özellikleri ise, osilatör devresi, ölçüm hücresi ve veri iletişim sistemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu bölümde, tezin deneysel aşamasında kullanılan yöntemler, cihazlar ve deney seti hakkında bilgi verilecektir.

3.1 Elektropsray Kaplama Sistemi

Elektrospray (ES) kaplama sisteminde, filmin oluşturulacağı yüzeyler genellikle yalıtkan yüzeyler olacağından, biri pozitif diğer negatif kaynak olmak üzere iki yüksek gerilim kaynağı kullanılmıştır. Kullanılan yüksek gerilim kaynakları FuG Elektronik GmbH (Almanya) HCP 35-12500 model olup polaritesi değiştirilebilir özelliktedir. Kaplama çözeltisi, pozitif yüksek gerilim uygulanabilen bir ince metal boru vasıtası ile kaplanacak yüzeye yönlendirilmektedir. Kaplama çözeltisinin akışı bir mikro şırınga ile denetlenmiştir. Kullanılan mikro şırınga KD Scientific (ABD) firmasından temin edilmiştir. Şematik görünümü Şekil.23a'da verilen sistemin fotoğrafları Şekil.29'da verilmektedir. Negatif elektrot Tungsten korona olarak seçilmiştir. Kaplanacak yüzeyin kaplama işlemi süresince negatif yük ile yüklenmesi sağlanmıştır. Kaplanacak numune bir disk üzerine yerleştirilip disk 1000 rpm sabit hızda döndürülmüştür. Pozitif yüksek gerilim elektrodu pozitif yüklenen kaplama çözeltisinin damlacık olarak kaplanacak yüzeye ulaştırılmasını sağlanmıştır. Negatif yüksek gerilim elektrodu ile de numune negatif yük ile yüklenmiştir. Diskin sürekli dönmesi nedeniyle her bir çevrimde bu işlem periyodik olarak kaplama süresince sürdürülmüştür.



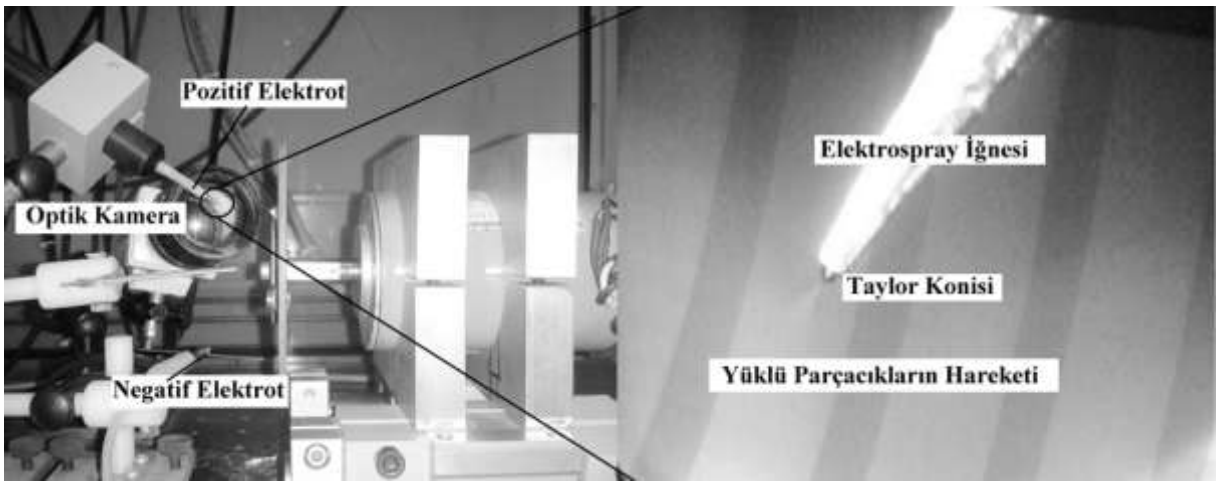
a)



b)

Şekil.29 a) ES kaplama sistemi, **b)** ES kaplama sisteminin genel görünümü.

Kaplama sistemi üzerinde sürekli negatif ve pozitif yük değişimi olduğundan havada asılı duran yüklü tozlardan etkilenmesi söz konusudur. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için sistem küvez içine yerleştirilmiştir. ES ile gerçekleştirilen kaplama esnasında, kaplama iğnesi ucunda Taylor koni yapısının oluşması ve kaplama süreci boyunca muhafaza edilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla, kaplama debisi 50 µl/saat ten 400 µl/saat' e kadar, kaplama gerilimleri pozitif elektrot gerilimi +2,5 kV'den +8 kV aralığında, negatif elektrot için ise -1,0 kV den -3,5 kV aralığında değiştirilmiştir ve tüm kaplama çözeltileri için optimize edilmiştir. Optimum kaplama gerilimi ve debisi kaplama çözelti iğnesinin ucunda koni yapısının oluşması ve sürekliliğini koruması durumuna göre belirlenmiştir. Şekil.30'da, iğnenin ucunda oluşan koni yapısı kamera sistemi ile sürekli olarak gözlemlenmiştir.

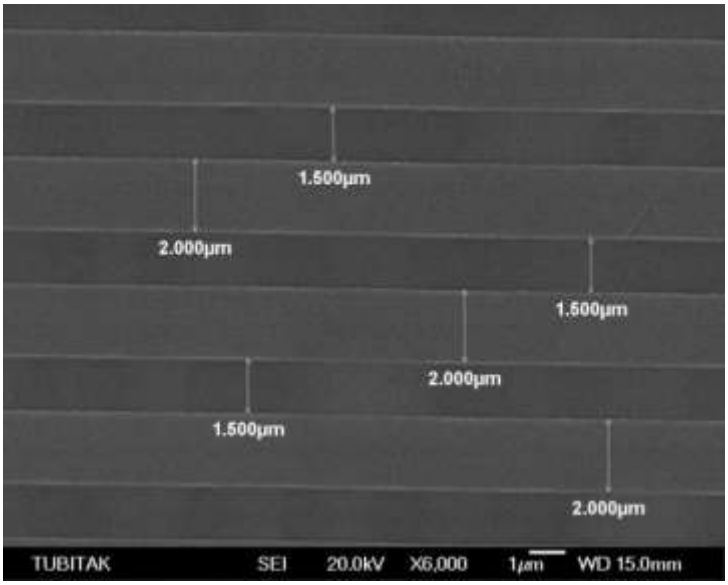


Şekil.30 İğnenin ucunda oluşan koni yapısı.

3.2 SAW Transduser ve Sürücü Devresi

3.2.1 SAW Rezonatör

Tez çalışmasında, 433 MHz temel rezonans frekansına sahip SR434G 2-port SAW transduserler kullanılmıştır. Kullanılan transduserler, TO-39 tutucunun elektrotlarına bağlantıları yapılmış olarak SAW Components (Dresden GmbH, Almanya) firmasından satın alınmıştır. SAW yapıları, piezoelektrik olarak ST- kesim Kuartz yüzeyine oluşturulmuş olup Rayleigh dalga yapısına sahiptir. IDT elektrot genişliği ve iki elektrot arasındaki mesafe sırası ile ~2µm ve ~1,5µm (Şekil.31).



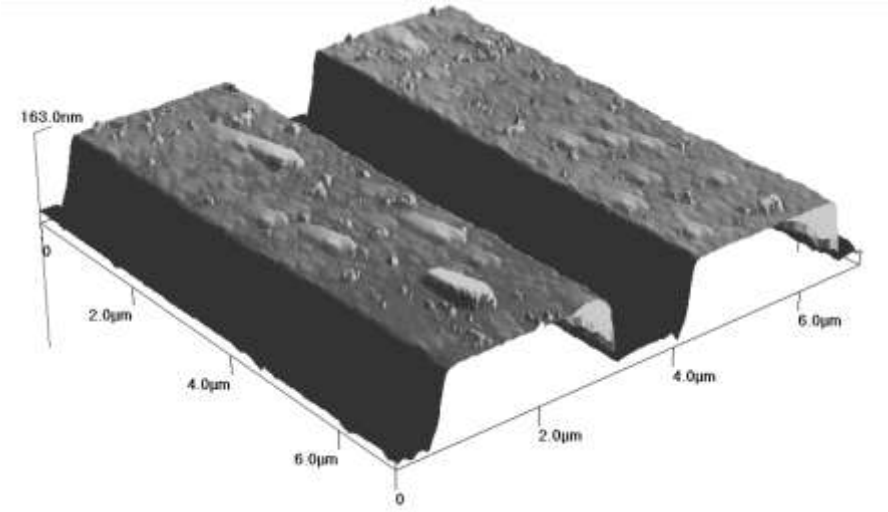
Şekil.31 Kullanılan SAW'larda alıcı ve verici IDT'lerin elektrot ve elektrotlar arası genişliği.

Şekil.8'de verilen IDT elektrotları ile 1. ve 3. harmoniğe ait şekillenimler dikkatle incelendiğinde, oluşturulan dalganın frekansı ile IDT nin yapısı arasında bir ilişkinin olduğu kolayca görülebilir. Bu ilişki λ dalga boyu, v_0 kristal yapı içindeki ses hızı (Tablo.1) olmak üzere $f_0 = \frac{v_0}{\lambda}$ şeklinde ifade edilir. Dalga boyu ise, elektrot genişliği ve iki elektrot arasındaki mesafenin toplamının iki katıdır. Bu yönlendirmeler dikkate alındığında tez çalışmasında kullanılan SAW'un 1. harmonik frekansının 430MHz civarında olması gerektiği kolayca görülebilir. Tablo.3'te tez çalışmasında kullanılan SAW rezonatörlere ait SAW Components firmasından alınan bilgi verilmiştir.

Tablo.3 SAW Components firmasından SR434G 2-port resonator bilgileri.

		Minimum	**Typical**	**Maximum**	**Unit**
Centre frequency	f_C	433.845	433.92	433.995	MHz
Insertion Loss	IL		7.0	9.0	dB
Loaded quality factor	Q_L		7.500		
Unloaded quality factor	Q_U		11.000		
Ageing of center frequency				-50/+50	ppm
Equivalent Circuit elements					
Motional capacitance	C_1		0.449		fF
Motional inductance	L_1		299.65		µH
Motional resistance	R_1		70		Ω
Parallel capacitance	C_0		4.2		pF
Storage temperature range		-40		+125	°C
Operating temperature range		-40		+125	°C
Turnover temperature	T_0	15		30	°C
Temperature coefficient of frequency	TCF		-0.032		ppm/K²

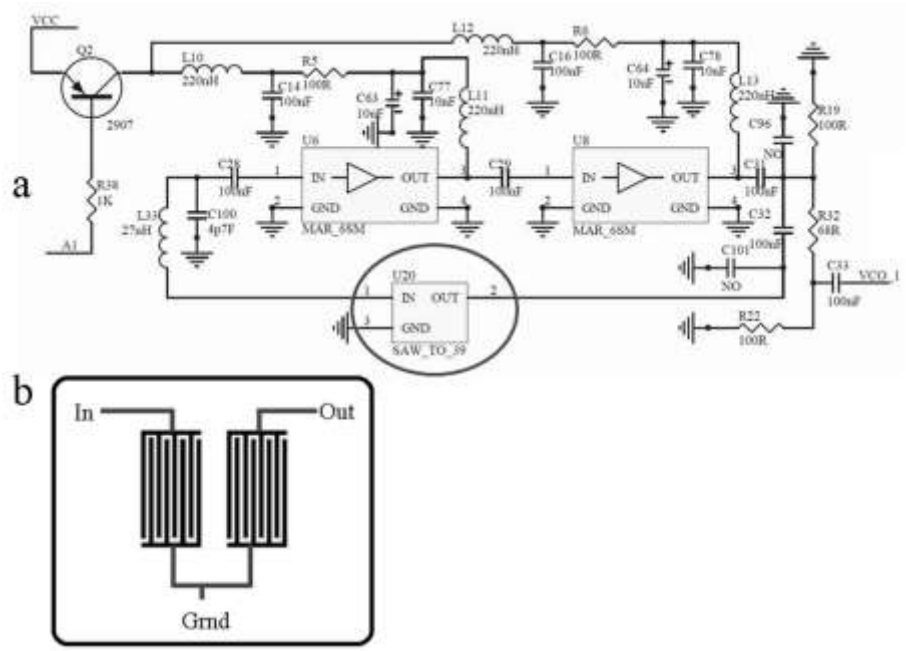
Kullanılan SAW rezonatörün IDT yapısı üzerinden alınan AFM görüntüsü Şekil.32'de verilmiştir. AFM görüntüsüne göre tez çalışmasında kullanılan SAW'ın parmaklık kalınlığı ~160 nm olduğu görülmektedir.



Şekil.32 Tez çalışmasında kullanılan SAW rezonatörün AFM görüntüsü (Elektrotlar üzerinden).

3.2.2 Osilatör Devresi

SAW rezonatörleri, rezonans frekansında çalıştırabilen osilatör devresi TUBİTAK MAM ME'de gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen osilatör devresi ve SAW rezonatörün bağlantısını gösteren şemalar Şekil.33'de gösterilmiştir. Devre, bir güç katı ve osilatör katından oluşmaktadır. Osilator devresinde aktif eleman ERA 6 transistorüdür(MAR_6SM). Devrenin salınım frekansı SAW rezonansıdır. Osilatör devresinin çıkışından salınım frekansı frekansmetre yardımı ile okunmaktadır. Tez kapsamında kullanılan osilatör kartı üzerinde, Şekil.33a'da gösterilen devre yapısından 7 adet bulunmakta olup 6 tanesi sensör olarak kullanılan SAW rezonatörleri, kalan bir tanesi ise referans SAW rezonatörü titreştirmek için kullanılmaktadır. Osilatör kartı Şekil.34'de verilmiştir.



Şekil.33 a) SAW osilatör devresine ait devre şeması, **b)** SAW rezonatör bağlantı şeması.



Şekil.34 6+1 adet 433MHz SAW rezonatörü çalıştırabilen osilatör devresi.

SAW osilatör devresinden referans kristal ile sensör kristali arasında bir ~~ki~~ frekans farkı üretilmektedir. Böylece 433MHz yüksek frekans etkilerinden etkilenilmeden referans SAW ile sensor SAW arasındaki fark frekansı alınabilmektedir. Tez kapsamında alınan sensor verileri bu fark değerleridir. Bu sebepten, gerek kaplama esnasında gerekse sensör performansları ölçümlerinde aynı referans SAW kullanılmıştır.

3.3 Nano Parçacık Sentezi

ZnO yapısının SAW üzerinde oluşturulabilmesinde belirleyici limit kaplama sonrasında SAW rezonatörün titreşime devam edebiliyor olmasıdır. SAW üzerine kaplanan malzemenin kütlesi ve elektriksel özellikleri SAW üzerinde bir frekans kaymasına neden olacağı Eşitlik 2.43 de görülebilir. Bu kayma dolayısı ile gerçekleştirilecek kaplama miktarı ise Eşitlik 2.44'de ifade edilen $\frac{\Delta\alpha}{k}$ oranı üzerinde de bir değişime neden olur. Bunun anlamı ise, dalga iletiminde meydana gelen kayıp miktarıdır. Bu miktar sürücü devre veya network analizörü ile karşılanabilir bir miktarda ise titreşim devam edecek aksi durumda ise titreşim duracaktır.

Bu limitlerin belirlenmesi amacı ile kaplama çözeltisi miktarı, en düşük miktardan düşük artışlarla, titreşiminin durduğu noktaya kadar artırılarak uygulanmıştır. Bir mikro-şırınga vasıtası ile kaplama sistemine aktarılan çözelti miktarının kontrollü biçimde artırılmış, çözelti konsantrasyonu ve kaplama gerilimleri ise sabit tutulmuştur.

3.3.1 ZnO Nano Yapıların SAW Üzerine Büyütülmesi

ZnO, elektriksel, optik ve mekanik özellikleri itibariyle literatürde yoğun olarak çalışılan malzemelerdendir [115]. Tez çalışması kapsamında, ZnO ince film hazırlamak için başlangıç malzemesi olarak yoğun olarak kullanılan çinko asetat dihidrat [$Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$] kullanılmıştır. Organik formdaki oluşturulan çinko asetat film 350^0C ve yukarı sıcaklıkta tavlanması ile ZnO elde edilebilmektedir [116, 117]. Tavlama sonrası bu yapıların altlıklardan dökülme olmaması ve oksitlenme sürecinde parçacıkların agrega olup bir araya gelmesinin önlenmesi için dietanol amin veya PVP gibi organikler çinko asetat çözeltisi içine eklenmiştir. Literatür araştırmasında, çinko asetat dihidrat ile ZnO yapısının gerçekleştirebildiği görülmüştür. Bu amaçla, 20mL 0,1M çinko asetat dihidrat çözeltisi metanol içinde hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözeltiye 1-2 damla dietanol amin eklenmiştir. Eklenen dietanol amin tavlama esnasında yanarak film yüzeyinden uzaklaşacağı için miktarı önemsenmemiştir.

ZnO nano parçacık filmlerinin yapısal karakterizasyonlarının kolay yapılabilmesi için başlangıç çözeltisi Si alt taban üzerine ES tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Kaplanan bu yapılar 2 saat süresince 350^0C sıcaklıkta atmosfere açık olarak tavlanmıştır. Tavlama

sonucunda oluşan yapının SEM, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilerek hedeflenen yapının oluşup oluşmadığı görülmeye çalışılmıştır. Diğer yandan, kaplama çözeltisi ve konsantrasyonunun olabildiğince alt limitlerden başlaması, mümkün olabilecek alt limitin tespiti açısından önemli olduğundan, 0,1M olarak hazırlanan çözelti 1:10 oranında seyreltilerek kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tüm kaplama işlemlerinde çözelti konsantrasyonu 0,01M ve çözelti debisi 100µL/saat olarak sabit tutulmuştur. Kaplama kalınlığı kullanılan kaplama çözeltisi artırılarak artırılmıştır. Kullanılan kaplama çözeltisi hacimleri 30-360 µL arasında değişmektedir.

3.3.2 Kalay Oksit Nano Parçacık Sentezi

SnO_2 sensör özellikleri bakımından üzerinde yoğun olarak çalışılan malzemelerdendir. Yoğunlukla direncindeki değişim dikkate alınarak sensör özellikleri incelenmektedir. Literatürde SAW üzerine oluşturulmuş SnO_2 ile gerçekleştirilmiş çalışma fazla bulunmamakla birlikte SnO_2 yapısının oluşturulmasına yönelik birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerde doğrudan metalik kalay kullanıldığı gibi, kalayın alkoksit formları da kullanılmaktadır [118]. Alkoksit formlar ise $SnCl_2$ ile KOH veya NaOH reaksiyonlarından kolayca elde edilebilmektedir. Alkoksitlerin 350^0C de 2 saat süresince ısıl işleme tabi tutulması ile SnO_2 nano parçacıklar elde edilebilir [101, 119]. SnO_2 nano yapıların oluşturulması için başlangıç malzemesi olarak $SnCl_2$ ve KOH kullanılmıştır. $SnCl_2$ ve KOH reaksiyonundan ortaya çıkan bileşik santrifüj ve saf su ile yıkama işlemleri ile KCl'den arındırılmıştır. Reaksiyonu aşağıda gösterildiği gibidir.

$$SnCl_2 + 2KOH \longrightarrow Sn(OH)_2 + 2KCl$$

Elde edilen $Sn(OH)_2$ bileşiği metanol ile 15mg/ml konsantrasyonunda süspande edilip ES yöntemi kullanılarak önce yapısal analizi için Si alt katman üzerine, sonra da SAW transduserler üzerine kaplanmıştır. Kaplama çözeltisinin hacmi artırılarak film kalınlığı artırılmaya çalışılmıştır.

3.3.3 Titanyumdioksit Nano Parçacık Sentezi

TiO_2, elektriksel ve sensör özellikleri bakımından yoğun olarak çalışılan bileşiklerdendir. Bu sebepten, TiO_2 yapısını elde etmek için literatürde birçok yöntem mevcuttur [120,121]. Elde edilecek yapıya herhangi bir katkılama işlemi yapılıp

yapılmayacağına göre uygun yöntemler seçilebilir. Literatürde çoğunlukla $TiCl_4$, $Ti(OH)_4$ ve Ti n-Butoksid en yoğun olarak kullanılan başlangıç malzemelerindendir [122].

TiO_2 nano yapıları oluşturmak için 2ml Ti n-Butoksid, 3ml asetik asit içinde çözülerek 10d argon altında karışmaya tabi tutulmuştur. Daha sonra argon atmosferinde 15ml etanol eklenerek 3 saat oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Bu işlem sonucunda 0,3M olarak elde edilen çözelti 1:10 oranında seyreltilerek ES kaplamalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu kaplamalar 550^0C sıcaklıkta 2 saat süresince tavlanarak TiO_2 yapısı elde edilmiştir. Elde edilen bu yapıların SEM, XRD, ve EDS analizlerinde anatase fazda TiO_2 olduğu görülmüştür. Ancak bu yapılarla kaplanan SAW'un çalışmadığı görülmüştür. SEM analizlerinde ise oluşan nano parçacık büyüklüğünün 100 - 200nm arasında olduğu görülmüştür. Bu durumda elde edilen en ince film bile SAW transduserin çalışmasına engel olmaktadır. Bu sebepten, tanecik boyutunun daha küçük oluşması için kaplama çözeltisine polimer zincir uzunluğu 1.300.000 olan PVP eklenmiştir. Bu yöntem esasen TiO_2 nano fiber elde etmek için kullanılan bir yöntemdir [123]. SAW üzerinde oluşturulabilecek film kalınlığı ile literatürdeki nano fiber kalınlığı karşılaştırıldığında, nano fiber yapısının daha kalın olduğu görülmüştür. Bu sebepten, literatürdeki çalışmalarda eklenen PVP oranlarından daha az PVP eklenerek fiber yapısının oluşmasının da önüne geçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan PVP konsantrasyonu 50 mg/ml dir.

Ayrıca, 3 adet QCM yüzeyine farklı kalınlıklarda TiO_2 nano yapılar oluşturulmuştur. TiO_2'in QCM yüzeyine kaplanması ile ES yöntemi kullanılarak oluşturulan nano yapıların akustik titreşimini engelleyip engellemediği sorusunun cevabını araştırılmıştır. QCM'in frekans değişimi QCM yüzeyine gelen kütle ile lineer orantılıdır. Oluşturulan filmin QCM yüzeyi ile hareket edip etmediğinin belirlenmesi, SAW üzerine TiO_2 nano yapı oluşturmada ES yönteminin uygun olup olmadığı hususunda fikir verecektir.

TiO_2 nano yapılar oluşturulmuş SAW'un titreşiminin durması nedeni ile transduser üzerine nano yapılı film oluşturma çalışmalarında SAW'un titreşiminin karşılaşılan güçlükler nedeni ile zincir uzunluğu 1.300.000 olan PVP eklenmiş çözelti ile 3 adet QCM farklı kalınlıklarda kaplanarak yüzeyde TiO_2 yapısı elde edilmiştir. QCM 'in bu çalışmada kullanılmasının nedeni, oluşturulan TiO_2'in kütlesi dolayısı ile mi yoksa elastitiye nedeni ile mi SAW'un titreşimini durdurduğu sorusuna cevap aramaktır.

3.4 Analiz ve Karakterizasyon

3.4.1 Metaloksit Nano Parçacık Kaplı SAW transduserlerin Yüzeylerinin Yapısal Analizleri

SAW transduser üzerinde oluşturulan metal oksit nano parçacıkların yapısal analizleri SEM ve AFM ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca SEM analizleri esnasında EDS analizleri de yapılmıştır. EDS analizi, test edilen hacmin hangi atomlardan oluştuğu bilgisini vermektedir. Dolayısıyla, yapının istenen yapı olup olmadığı konusundan bilgi elde edilebilmektedir. Tez kapsamında gerçekleştirilen analizler TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü bünyesinde bulunan cihazlarla gerçekleştirilmiştir. Analizler ve kullanılan cihaz marka modelleri aşağıdaki gibidir. XRD analizleri için Shimadzu XRD-6000 marka/model, SEM analizleri FEG SEM JEOL JSM 6335F marka/model, AFM analizleri için ise AFM-Q Scope marka/model cihazlar kullanılmıştır.

3.4.2 Metaloksit Nano Parçacık Kaplı SAW'ın Elektriksel ve İmpedans Karakterizasyonu

Metal oksit nano parçacıkların SAW transduserlerin elektriksel ve empedans özelliklerini nasıl değiştirdiğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu değişimin sensör özelliklerine etkilerinin belirlenebilmesi için Şekil.15'de verilmiş olan karakteristik eğrilerin her kaplama maddesi için ayrı ayrı elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, film kaplı SAW transduserlerin I-V değişimleri ve tüm S-parametreleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.4.2.1 İletkenlik Ölçümleri

Farklı kalınlıklarda metal oksit film ile kaplanan SAW transduserlerin yüzey iletkenliğindeki değişimin belirlenmesi için tüm transduserlerin ±10 V aralığında ve 0,05V adımlı artışlarla I-V ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, elde edilen değerlerin karşılaştırılabilir olması için kuru hava ortamında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler, SAW üzerinde bulunan iki IDT'den birisinin uçlarına elektrometre bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen akım ve gerilim değerleri, Eşitlik 3.1'de verilen denklem kullanılarak Siemens (S) cinsinden iletkenlik değeri hesap edilmiştir.

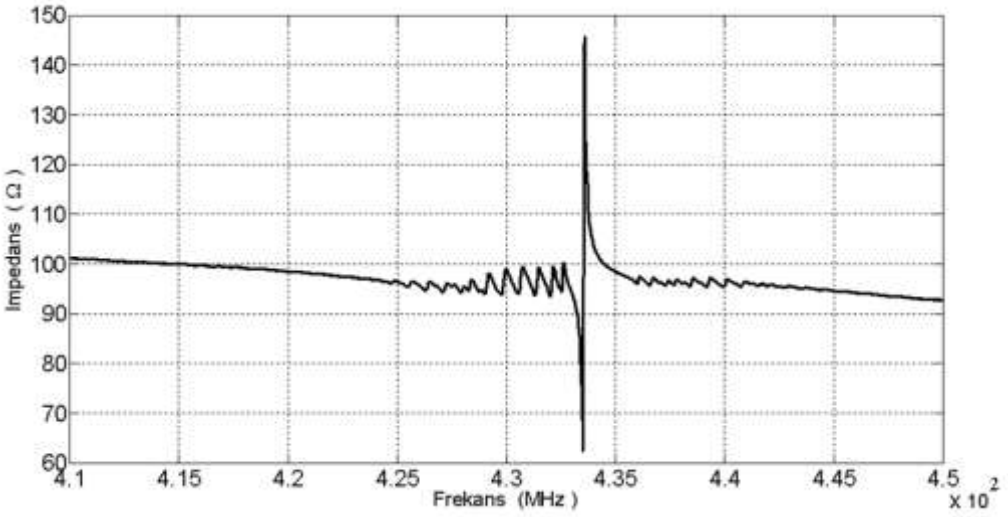
$$S = \frac{I}{V}\frac{1}{(2n-1)dl} \quad \textbf{(3.1)}$$

Bu denklem I akım, V gerilim, n IDT nin parmaklık cifti sayısı, d ve l ise sırasıyla IDT'yi oluşturan metalik filmin kalınlığı ve parmaklık uzunluğudur. Tez çalışmasında kullanılan SAW transduserin her bir IDT'sine ilişkin bu değerler şu şekildedir. n=34 adet, l=720 μm, d=0.160 μm.

3.4.2.2 Network analizörü ölçümleri

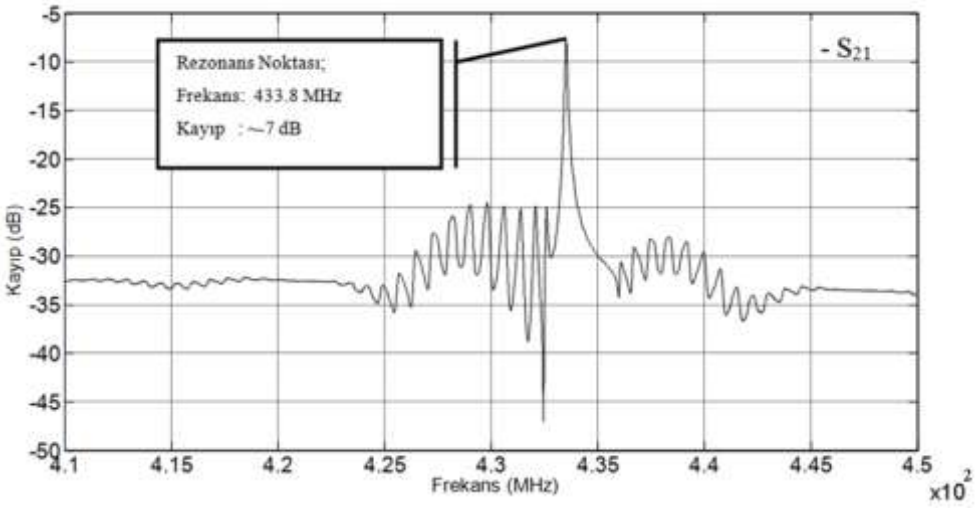
SAW transduser üzerine gerçekleştirilen kaplamaların SAW transduserin karakteristiğini nasıl değiştirdiğinin belirlenmesi için network analizörü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Network analizörü ölçümleri 410-450 MHz aralığında, 18001 nokta üzerinden ve tüm S-parametrelerinin ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. S parametreleri S11, S12, S21 ve S22 olmak üzere dört bileşenden ve her bileşen reel ve imajiner olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Bölüm 2'de, bu parametrelerin nasıl kullanılacağına ilişkin detaylı bilgi verilmiştir. Tez çalışmasında Agilent N5230A marka/model network analizörü kullanılmıştır. Bu ölçümlerde SAW transduserin kaplama sonrasında değişen empedans ve kayıp (IL) parametreleri değişimlerine ait bilgiler elde edilmiştir. Bu bilgiler, akustik dalganın perturbasyonunun nasıl gerçekleştiği konusunda gerek duyulacak bilgi bileşenlerinden birisidir.

Tez çalışmasında kullanılan SAW transduserin empedans ve kayıp parametresi değişimleri Şekil.35 ve Şekil.36'da verilmiştir. Şekil.36'da rezonans noktası olan 433.8MHz empedans keskin şekilde değişmektedir.



Şekil.35 İmpedans-Frekans değişimi.

Kayıp-frekans değişimi ise Şekil.36'da verilmiştir. Ayrıca rezonans noktasında kaybın olabildiğince azaldığı ve rezonans noktasında ~7dB civarında değer aldığı görülmektedir.



Şekil.36 Kayıp-Frekans değişimi.

3.4.2.3 Gaz Sensörü Ölçümleri

Geliştirilmiş olan herhangi bir yapının gaz sensörü özelliklerinin ölçülebilmesi için test sistemi, ölçülecek gazı istenilen konsantrasyon aralığında üretebilir ve elektriksel değişimi ölçebilir nitelikte olmalıdır. Bu sebepten, tez çalışmasında kullanılan test sistemini

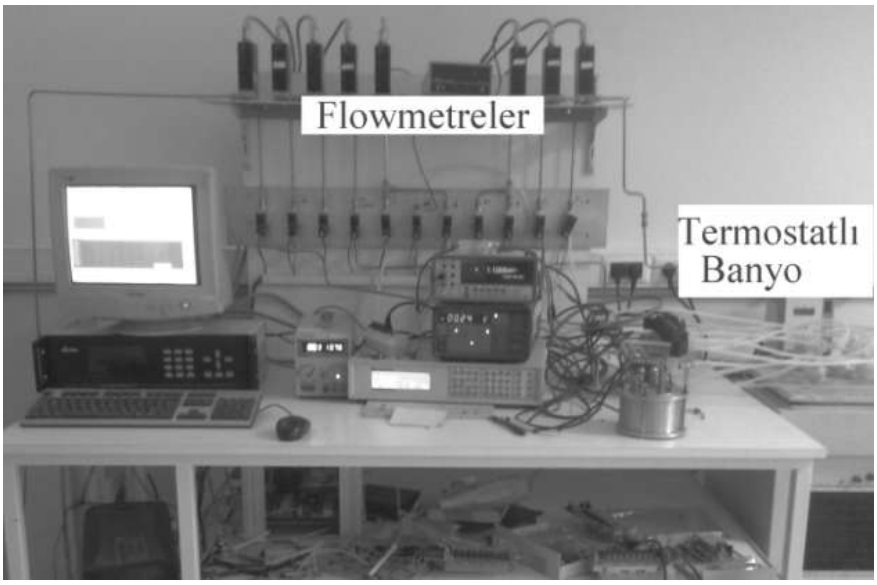
iki bölümde ele almak gerekir. Bunlar; ölçülmek istenen gaz ya da gazların üretildiği bölüm ve sensör verilerinin ölçüldüğü bölümdür.

Tez çalışmasında kullanılan test gazları oda sıcaklığında sıvı halde olduğundan istenilen konsantrasyonda oluşturulabilmesi için soğutulması gerekmektedir. Gazın oluşturulması için soğutulmuş sıvının içinden belli debide hava geçirilmesi gerekmektedir. Soğutma sıcaklığının ne olacağı Antoine denklemi ile belirlenmektedir [124]. Bu denklem, tamamen doldurulmamış bir kapta 1 atmosfer basıncında ve sabit sıcaklıkta tutulan kabın üst kısmında oluşacak sıvı buharının buhar basıncının değerinin ne olacağının cevabını verir. Oluşan sıvı buharı, gaz-sıvı dengesi bozulmadan debisi bilinen bir hava akışı ile sıvı yüzeyinden süpürülebilir. Süpürülen havanın içinde bulunan gazın konsantrasyonu, Antoine eşitliği ile hesap edilen değerdedir. İstenilen gaz konsantrasyonu, bu akışın belli oranlarda seyreltilmesi ile elde edilebilir. Sistem içinden geçen havanın debisinin kontrol edilebilir olması gerektiğinden sisteme giren tüm hava flowmetreler üzerinden kontrollü olarak verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan gazların üretildiği sıvı formlar -10^0C de sabit tutulmuştur. Tablo.4'de test edilen gazların -10^0C sıcaklıktaki ve 22^0C sıcaklıktaki (test ortamı sıcaklığı) konsantrasyonu ve ölçülen konsantrasyon aralığı görülmektedir. Tez çalışmasında kullanılan test sistemi Şekil.37'de verilmiştir.

Tablo.4 Test edilen gazların, molekül ağırlığı, polaritesi ve ölçüm aralığı.

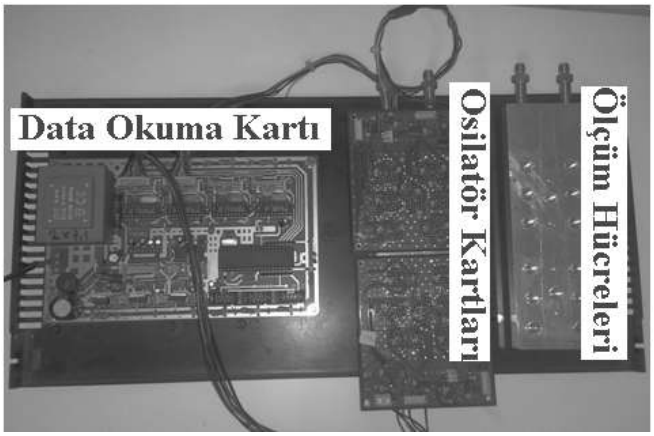
Ölçülen Gaz	**Molekül Ağırlığı(g)**	**Polaritesi [125,126] (Debye)**	**Konsantrasyon (ppm)**		p^0**(-10 ^{0}C) ppm**	p^0**(22 ^{0}C ppm**
			Maks.	**Min.**		
Aseton	58,8	2,84	6800	1360	54400	270000
Tri-Kloretilen	131,3	(0,8)*	3100	550	15800	87000
Kloroform	119,3	1,04	5800	1150	46200	220000
Etanol	46,0	1,69	2300	460	9200	66200
Propanol	60,0	1,68	660	132	2650	22300
Metanol	32,0	1,70	4120	515	20600	140000
Su Buharı	18,0	1,85				

**Sıvı ortamda tespit edilen değerdir.*



Şekil.37 Sensör test sistemi.

Ölçümler, referans SAW kristaline göre farkların ölçülmesi ile gerçekleştirildiği için her 0.5s periyotlarla SAW transduserin frekans değeri okunarak gerçekleşmiştir. Toplam ölçüm periyodu ise 3 saniyedir. Hangi SAW kristalinin ölçüleceği osilatör devresi üzerinden binary kod ile seçilerek gerçekleştirilmiştir. SAW transduserin frekans değeri bir sayıcı vasıtası ile okunmakta ve RS-232 aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.



Şekil.38 Data okuma ve ölçüm hücreleri.

Tez çalışmasında aynı anda 4 adet osilatör devresini çalıştırabilen ve verileri RS-232 aracılığıyla bilgisayara aktarabilen bir okuyucu devre kullanılmıştır (Şekil.38). Bu durum aynı anda 24 adet SAW ölçülmesine olanak sağlamaktadır.

4 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez kapsamında, ZnO, SnO_2 ve TiO_2 nano yapılı ince film kaplı SAW transduserin hazırlanması, oluşan yapının yapısal karakteristiklerinin belirlenmesi, elektriksel ve sensör özelliklerinin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. SEM ve elektriksel analizlerin gerçekleştirilebilmesi için her kaplamadan ikişer adet hazırlanmıştır. Bu SAW transduserlerden bir tanesi SEM çalışmalarında diğeri ise elektriksel özellikleri ve sensör özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca ZnO için SAW elektrotlarının ne kadar doldurulduğunun belirlenmesi amacıyla AFM analizi yapılmıştır.

ZnO, SnO_2 ve TiO_2 ince filmlerin SAW transduserler üzerine oluşturulmasında karşılaşılan en önemli sorun elde edilen film yapısının kalınlığının ve filmi oluşturan nano parçacıkların büyüklüğünün SAW transduserin titreşmesine engel olmasıdır. Bu sebepten, ince ve daha küçük nano parçacıklardan oluşan film yapılarının geliştirilmesine çalışılmıştır. Bu aşamalar SEM yardımı ile takip edilmiştir. Ayrıca, hazırlanan ZnO, SnO_2 ve TiO_2 filmlerin kristal yapıları XRD analiziyle belirlenmiştir.

ZnO, SnO_2 ve TiO_2 film kaplı SAW transduserler gerek SAW karakteristikleri açısından gerekse sensör özellikleri açısından incelenmiştir. Sensör verileri çeşitli veri işleme teknikleri ile değerlendirilerek SAW üzerinde oluşturulmuş filmin morfolojisine bağlı olarak gaz algılama özellikleri irdelenmiştir.

SAW üzerine gerçekleştirilen herhangi bir kaplama SAW'un rezonans frekansının kaymasına neden olacağını Bölüm 2 de detaylı olarak anlatılmıştı. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen kaplama işlemlerinde de SAW'un rezonans frekansındaki kaymalar iki şekilde ifade edilmiştir. Bunlar, Network analizörü sonuçlarına göre ve Bölüm 3.2.2 de detayları verilen osilatör kartı üzerinden elde edilen sonuçlara göredir. Network analizörü ile doğrudan rezonans frekansı ölçüldüğü için sonuçlar, rezonans frekansı civarındaki kaymayı doğrudan gösterecek şekilde yansıtılmıştır. Osilatör kartı üzerinden elde edilen sonuçlar ise biri kaplı diğeri kaplanmamış iki SAW arasındaki farkı vermektedir. Bu nedenle Tablo 5, 7, 9 daki Δf ve sensör cevapları iki SAW arasındaki fark değeridir. Bu nedenle Bölüm 3.2.2 de vurgulandığı gibi tüm işlemlerde referans kristal sabit tutulmuştur. Gerek kaplamadan

kaynaklanan kayma frekansının belirlenmesinde gerekse sensör ölçümlerinde sabit tutulan kristal dış ortamdan izole edilmiştir.

Sensör cevapları irdelenirken kaplamadan kaynaklanan frekans kaymasının değeri esas alınmıştır. Bu değer osilatör kartı üzerinden okunan değer olup gerek elektriksel analiz çalışmalarında gerekse de ver işlem çalışmalarında bu değerler kullanılmıştır. Kısaca sensör cevabı $\Delta f = f_{sensör\ cevabı} = f_{referens\ SAW} - f_{sensör\ SAW}$ şeklindedir. Yalnızca algılamadan kaynaklanan frekans kaymalarının gösterildiği sensör grafiklerinde verilen sensör cevabı ise, frekans değişimi değerinden (Δf) sensörün temiz ortamdaki frekans değerinin (f_{ref}) çıkartılması ile oluşmaktadır ($f_{sensör\ cevabı} = \Delta f - f_{ref}$) .

4.1 Yapısal ve Elektriksel Analizler

Bu bölümde, tez kapsamında değerlendirilen ZnO, SnO_2 ve TiO_2 filmlerin SAW üzerindeki yapılarının yapısal, I-V ölçümleri ve network analizörü ile gerçekleştirilen elektriksel analiz sonuçları irdelenmiştir.

4.1.1 ZnO Sonuçları

Bu bölümde, nano yapılı ZnO filmin sentezi, yapısal karakterizasyonu ve SAW transduserin nano yapılı ZnO filme bağlı olarak elektriksel karakterizasyonları ve diğer özelliklerinin nasıl değiştiğine ilişkin deney sonuçları verilmiştir. Tablo.5'te, ZnO için gerçekleştirilen SAW kaplamaları, kaplama miktarları ve buna bağlı olarak elde edilen frekans kaymaları görülmektedir.

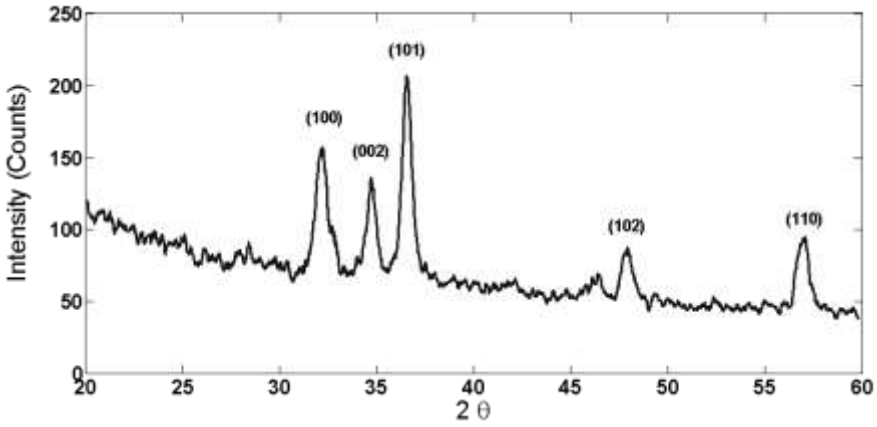
Tablo.5 Nano yapılı ZnO film için gerçekleştirilen SAW kaplamaları için kaplama miktarları ve buna bağlı olarak elde edilen frekans kaymaları

No	Kaplama Miktarı (µl)	Δf (kHz)
1	30	10
2	60	50
3	80	77
4	100	165
5	120	250
6	140	296
7	200	377
8	240	642
9	250	717
10	280	874
11	320	1104
12	300	1266
13	340	1586
14	360	2400

4.1.1.1 ZnO Yapısal Analizleri

Metal oksit yapıların elde edilmesi aşamasında kullanılan yöntem ve deneysel süreçler "3.3 Nano Parçacık Sentezi" başlığı altında irdelenmiştir. Bu bölümde SEM, XRD gibi görüntüleme ve karakterizasyon yöntemleri ile elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara göre şekillendirilen deney aşamaları irdelenecektir.

İlk aşamada ZnO yapısının elde edilmesinde kullanılan yöntem ile ZnO yapısının oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir. Bu amaçla oksitli silisyum yüzeyine ES yöntemi kullanılarak film oluşturulmuştur. Şekil 39'da ZnO formuna ait XRD spektrumu görülmektedir.



Şekil.39 Nano yapılı ZnO filme ait XRD spektrumu.

Elde edilen spektrum würtzite yapıda kristallenmiş ZnO yapısına ait olup beraberinde başka kirlilik olmadığı anlaşılmıştır. Spektrumun y-ekseni değerleri alınan sinyalin şiddeti ile orantılıdır. Bu sebepten, bu değerlerin büyüklüğü değerlerin elde edildiği yapının kalınlığı ile orantılıdır.

SAW üzerine ZnO kaplama çalışmasında kaplanabilecek alt ve üst limitler için yapılan çalışmada kaplama aralığı 30- 360µl olarak tespit edilmiştir. Bu aralıkta toplamda 14 adet SAW kaplanmıştır. Bu kaplamalarda en yüksek frekans farkı 2.4MHz olarak elde edilmiştir ve bu değerin üzerinde bir kaplama kalınlığı gerçekleştirilmek istendiğinde SAW transduserin titreşimi durmuştur. Bunun nedeni, SAW üzerinde oluşturulmuş olan ZnO filmin kütlesinin ve elastikliğinin dalga iletimine engel olmasıdır.

SAW titreşimini durduran bir başka neden ise, yüzeyde oluşturulan filmin homojen olmaması ve buna bağlı olarak yüzeyin belli noktalarında küçük adacıklar şeklinde bir araya gelmesidir. Bu durumda, dalganın ilerlemesi yüzeyde oluşan tepecikler tarafından durdurulmakta veya dalga bu tepeciklerden saçılmaktadır. Yüzeydeki film yapısı ile SAW karakteristiği arasında bir ilişki geliştirebilmek için her kalınlıkta SAW transduser için aşağıdaki test ve analizler gerçekleştirilmiştir.

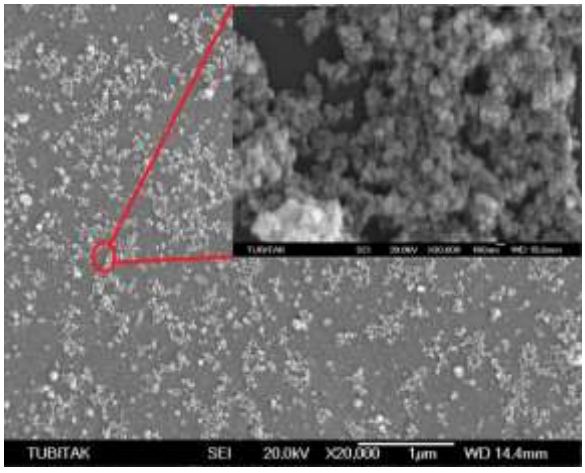
Bunlar;

- ✓ SEM analizleri (Kaplamanın yüzeydeki duruşu belirleyebilmek için)
- ✓ I-V karakteristiği ölçümleri (Kaplamanın iletkenliğinin belirlenmesi için)
- ✓ Network analizörü ölçümleri (S-parametreleri üzerinden Empedans ve kayıp parametrelerini hesaplamak için)

Gerçekleştirilen SEM analizlerinde düşük frekans kaymalarına sahip SAW transduserlerin yüzeyleri tamamen ZnO tarafından kaplanmamaktadır. Düşük frekans kaymalarının gerçekleştiği kaplamaları iki ayrı sınıfta incelemek gerekir.
Bunlar;

- 0- 800kHz arasında frekans kaymasına neden olan kaplamalar .
- 800- 1800kHz arasında frekans kaymasına neden olan kaplamalar .

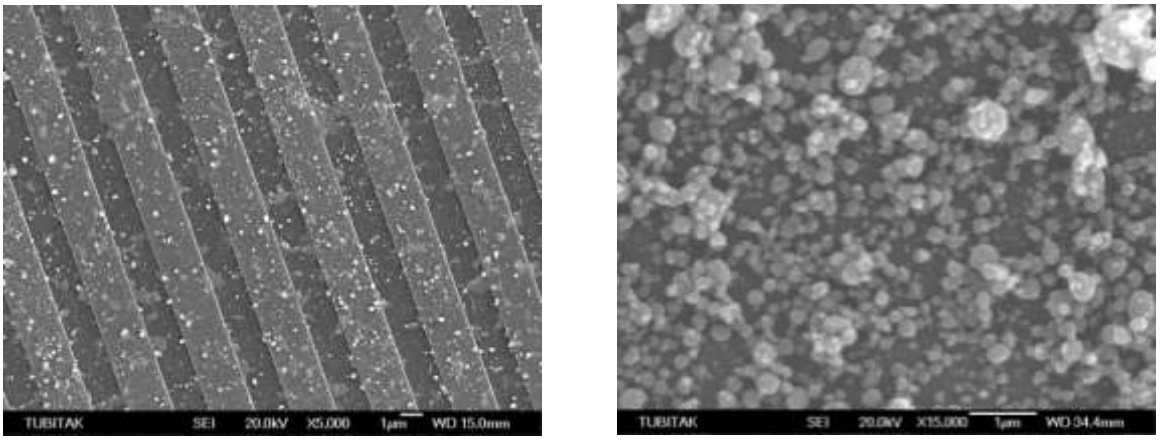
800kHz'e kadar yapılan kaplamalarda yüzey tamamen ZnO ile kaplanmamakla birlikte yüzeyde çapları ~50nm olan küresel yapılardan oluşmuş öbeklenmeler görülmektedir. Bu durum Şekil.40'da görülmektedir.



Şekil.40 Küresel yapılardan oluşmuş öbeklenmeler

0-800kHz aralığında gerçekleştirilen kaplamalar için tekrarlanabilir yapıların gerçekleştirilmesi mümkündür. Ayrıca, yapılar arasında fiziksel bir temas olmaması nedeni ile sensör cevabı üzerinde sadece ab/adsorblanan kütlenin etkisi söz konusudur. Elektriksel parametrelerden gelen herhangi bir etkinin gözlenmesi söz konusu değildir. 800-1800kHz arasındaki frekans kaymalarına sahip kaplamalarda ise yüzeyde 50-500nm çaplarında değişen küresel yapıların oluştuğu gözlenmiştir. Bu yapıların yüzey üzerinde dağılımları homojen olmadıklarından tekrarlanabilir yapıların elde edilmesi daha güçtür. Bu aralıktaki SAW'lar
I-V (akım-gerilim) ve network analizörü ölçümleri sonuçlarına göre değerlendirildiğinde diğer bölgelere göre farklı karakteristiğe sahip olduğundan bu aralık "***aktif bölge***" olarak isimlendirilecektir. Şekil'41 de yüzeyde dağılımları homojen olmayan film yapısının SEM fotoğrafı görülmektedir.

800-1800kHz aralığındaki kaplamalara göre tekrarlanabilir yapıların gerçekleştirilmesi daha kolaydır. Yapılar arasında fiziksel bir temas olmaması nedeniyle sensör cevabı üzerinde sadece ab/adsorblanan kütlenin etkisi söz konusudur. Elektriksel parametrelerden gelen herhangi bir etkinin gözlenmesi söz konusu değildir. 800 - 1800kHz arasındaki frekans kaymalarına sahip kaplamalarda ise yüzeyde 50 - 500nm çaplarında değişen küresel yapıların oluştuğu gözlenmiştir. Bu yapıların yüzey üzerinde dağılımları homojen olmadıklarından tekrarlanabilir yapıların elde edilmesi daha güçtür. Bu aralıktaki SAW transduserler I-V (akım-gerilim) ve network analizörü ölçümleri sonuçlarına göre değerlendirildiğinde diğer bölgelere göre farklı karakteristiğe sahip olduğundan bu aralık "aktif bölge" olarak isimlendirilecektir. Şekil.41'de, yüzeyde dağılımları homojen olmayan film yapısının SEM fotoğrafı verilmiştir.

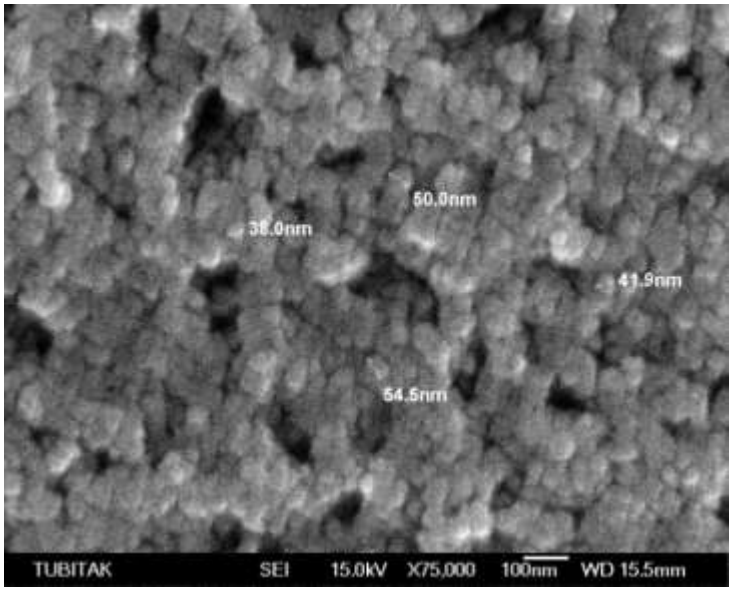


a) **b)**

Şekil.41 Yüzeyde dağılımları homojen olmayan film yapısı. **a)** Elektrotlar üzerinden alınan görüntü, **b)** Ara bölgeden alınan görüntü

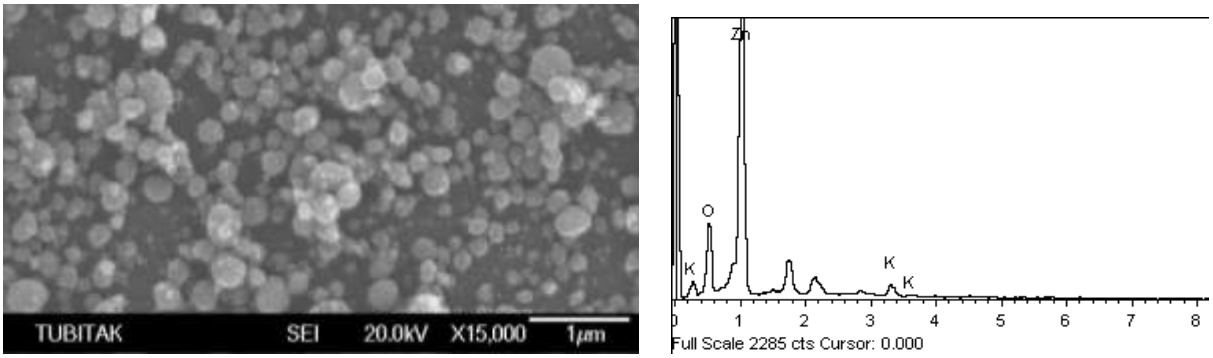
Sensör cevapları açısından ön bir değerlendirme yapılırsa; filmi oluşturan yapılar arasında çok yoğun fiziksel temas noktaları olmaması, filmi oluşturan küresel yapıların çaplarının farklı olması nedeni ile bu bölgedeki SAW transduserlerin cevaplarında filmin elastikliğinin etkisi çoğu zaman baskın hale gelmektedir. Bu durum kaplama kalınlığının 1MHz civarında olduğu durumlarda net olarak gözlenmiştir. Bu sonuçlar sensör cevaplarının değerlendirdiği bölümde tartışılacaktır. 1800kHz'den daha yüksek frekans kaymalarında ise film yapısının çapı ~50nm civarında oluşan küreciklerden oluşmuş bir katman tarafından oluşturulduğu gözlenmiştir (Şekil.41). Elektrotlar arası iletimin sağlandığı bu durumda

elektriksel etkilerin de frekans kaymasına katkıda bulunması söz konusudur. Şekil.43'de yüksek frekans kaymalarında ZnO filmin yüzey görüntüsü verilmiştir. İletkenliğin frekans kayması ile ilişkilendirildiği grafik üzerinden daha rahat görülebilir (Şekil.49). Diğer yandan, sensör cevapları üzerinde filmin elastikliğinden daha çok ad/absorblanan kütlenin ve elektriksel özelliklerindeki değişimlerin etkin olduğu ilerleyen bölümlerde gösterilecektir.



Şekil.42 Yüksek frekans kaymalarındaki film yapısı

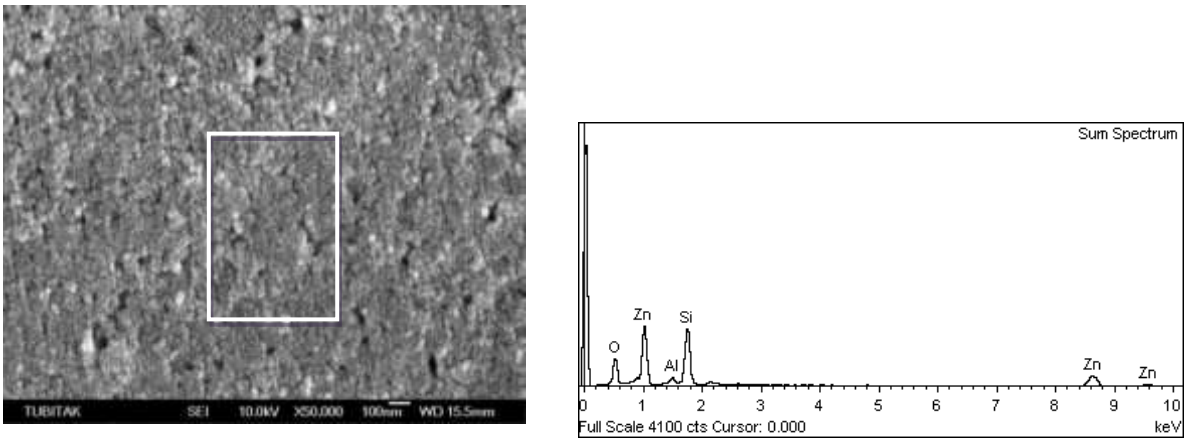
SEM üzerinde gerçekleştirilen bir diğer analiz de EDS analizidir. Bu analiz ile görüntüsü alınan yapıların gerçekte oluşturulmak istenen yapıya ait olup olmadığı hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Gerçekleştirilen SEM- EDS analizleri hem düşük hem de yüksek frekans kaymalarına sahip SAW üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil.43 ve Şekil.44'de sırası ile yaklaşık olarak 300kHz ve 1MHz frekans kaymalarına sahip SAW kaplamaları için EDS analizleri görülmektedir. Bu analizlerden de anlaşılacağı üzere oluşturulmak istenen ZnO yapısına ait elementler görülmektedir. Şekil.43'de görülen K elementi ise toplam integral alanının çok küçük olması nedeniyle toplam sinyal içerisindeki belirsizliklerden gelmektedir.



a) **b)**

Şekil.43 Düşük frekans kaymasına ait SAW'un EDS analizi

a) Analiz edilen bölgenin SEM görüntüsü b) Analiz Spektrumu



a) **b)**

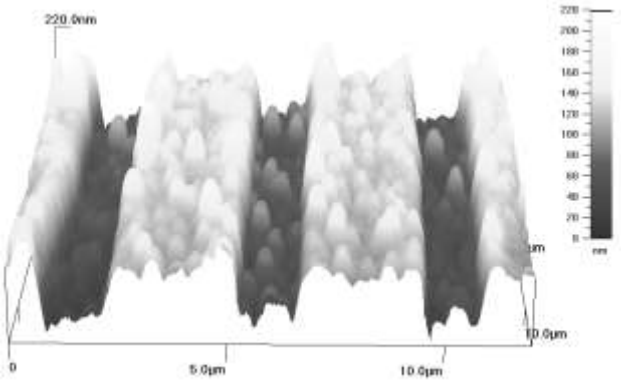
Şekil.44 Yüksek frekans kaymasına ait SAW'un EDS analizi

a) Analiz edilen bölgenin SEM görüntüsü b) Analiz Spektrumu

Tablo.6 EDS analizi.

Element	Weight%	Atomic%
O K	29.49	52.26
Al K	2.57	2.70
Si K	27.04	27.30
Zn K	40.90	17.74
Totals	100.00	100.00

Ayrıca kaplanan SAW transduserin kaplama sonrası yüzey morfolojisini belirlemek amacıyla IDT elektrotları üzerinden AFM görüntüsü alınmıştır. Elde edilen bu görüntüye göre ZnO yapısı elektrotların arasında ve üzerinde büyümektedirler. Bunun başlıca nedeni, ES kaplama yönteminin kullanılmış olmasıdır. Şekil.45'de ZnO kaplı SAW transduserin AFM görüntüsü görülmektedir. Bu görüntüdeki SAW transduserin frekans kayması ~2MHz'dir.



Şekil.45 Nanoyapılı ZnO film kaplı SAW transduserin AFM görüntüsü (frekans kayması ~2MHz).

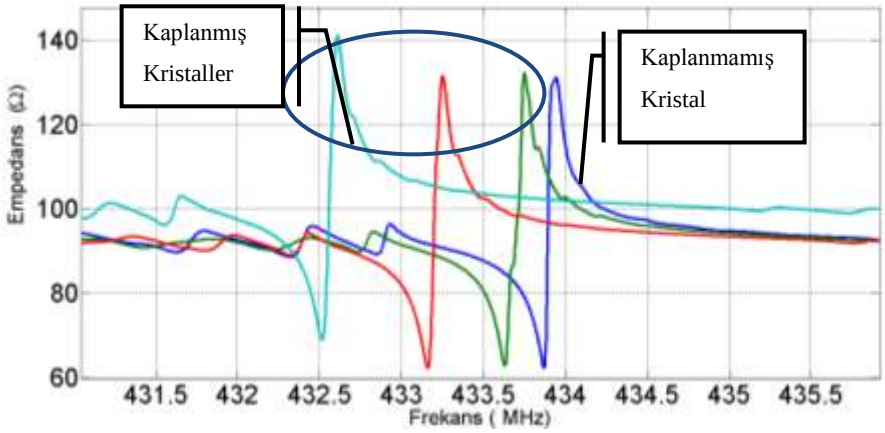
4.1.1.2 ZnO Filmin Elektriksel Analizleri

ZnO yapıların büyütüldüğü SAW transduserlerin karakterize edilmesinde gerekli bir diğer analiz ise network analizörü ölçümleri ve IDT yapılarının I-V ölçümleridir.

Network analizörü ile gerçekleştirilen S-parametreleri ölçümleri Bölüm 2'de verilen denklemler kullanılarak ihtiyaç duyulan kayıp ve empedans bilgileri türetilmiştir. Ayrıca, SAW transduser üzerinde bulunan IDT yapısının I-V karakteristiği DC ±10 V aralığında ve 0,05V adımlarla çıkarılmış ve her bir SAW transduserin iletkenliği Siemens olarak hesaplanmıştır.

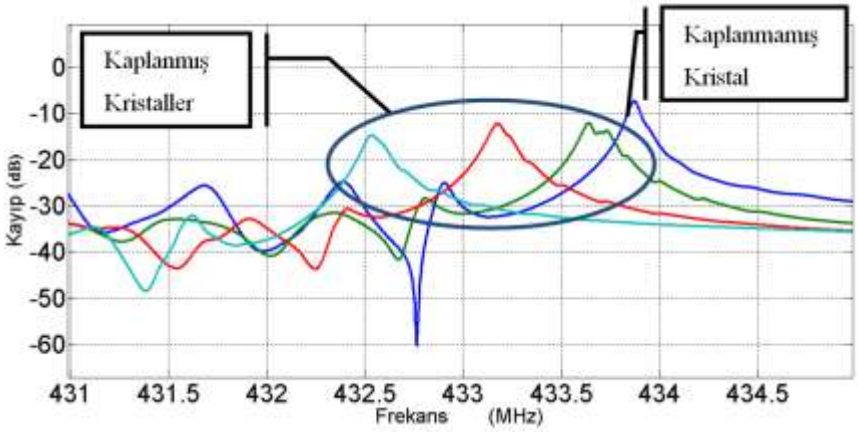
Network analizörü ölçümlerinde empedans parametrik olarak yapıyı oluşturan elemanların direncine, kapasitene, indüktansına ve ölçüldüğü frekansın fonksiyonudur. Bu nedenle, empedans değişimleri yapının rezonans bölgesinin kaymasını takip etmek amacıyla

kullanılmıştır. Şekil.46'da hiç kaplanmamış SAW transduserin farklı miktarlarda kaplama işlemi gerçekleştirilmiş SAW kristallerinin empedans değişimleri görülmektedir.



Şekil.46 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin impedans değişimleri.

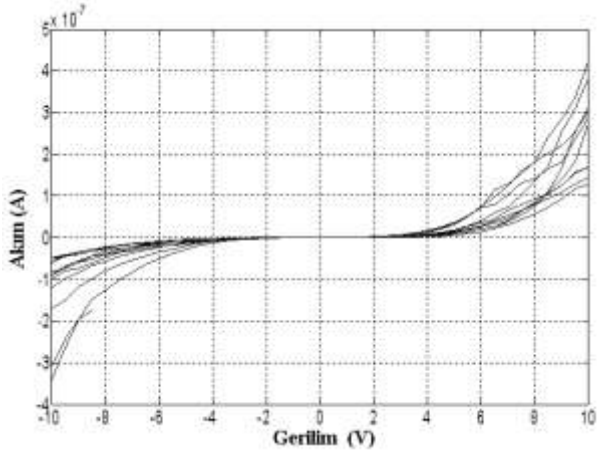
S-parametrelerinden çıkarımı gerçekleştirilen bir diğer parametre de kayıp parametresidir. Esasen, $\frac{\Delta\alpha}{k}$ şeklinde ifade edilmiş olan bu parametre SAW transduserin hem elektriksel özelliklerindeki değişimi hem de mekanik özelliklerindeki değişimi barındırır (Eşitlik 2.44). Bu sebepten, gerçekleştirilen tüm kaplama aralığında bu parametrenin ölçülmesi gerekmektedir. Şekil.47'de kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin kayıp değişimleri görülmektedir. Şekilde irdelenen SAW kristalleri için kayıp miktarı kaplama miktarı ile artmaktadır.



Şekil.47 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin kayıp değişimleri.

Bölüm 2'de detayları verilen ve Şekil.15'de karakteristik değişimi verilmiş olan kayıp-iletkenlik değişim eğrisinde bu artışın bir maksimumu olduğu belirtilmiştir. Bu maksimum kayıp noktası SAW üzerine kaplanan malzemeye ve yüzeyde oluşturulan filmin morfolojisine bağlı olarak değişmektedir. Tez kapsamında incelediğimiz kaplama malzemelerinden birisi olan ZnO için bu değişim Şekil.49'da iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması cinsinden bütünleştirilerek irdelenmiştir.

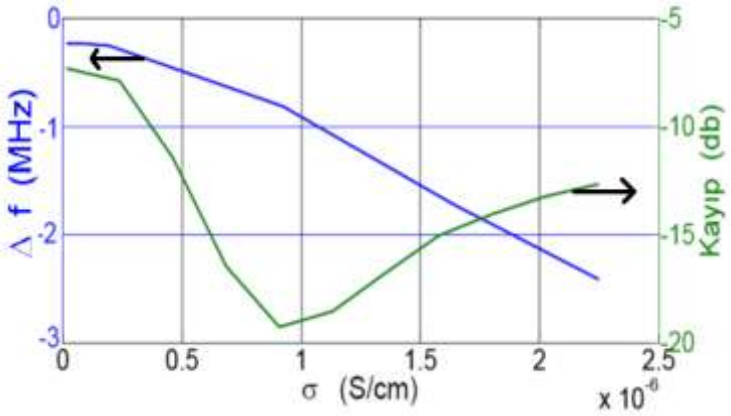
Frekans kayması nedeniyle meydana gelen rezonans noktasının kaymasını ve kayıp parametrelerini ilişkilendirebilmek için dikkate alınması gereken bir diğer değişken ise I-V karakteristiğinden türetilen iletkenlik bilgisidir. Bölüm 3'de İletkenlik Ölçümleri başlığı altında verilen şartlarda tüm nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserlerin I-V ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İletkenlik ölçümlerinde kaplama miktarı ile iletkenliğin artışı düşük kaplama miktarlarında yavaş olurken, kaplama miktarı arttıkça artış eğimi de artmaktadır. Bunun başlıca nedeni, filmi oluşturan nano yapıların yüzeyde birbirlerine temas etmeye başlamaları sonucunda iletim hattının oluşabilmesidir. Yaklaşık 1MHz frekans kaymasına sahip SAW transduser için I-V eğrisi Şekil.48'de verilmiştir.



Şekil.48 Yaklaşık 1MHz frekans kaymasına sahip SAW transduser için I-V eğrisi.

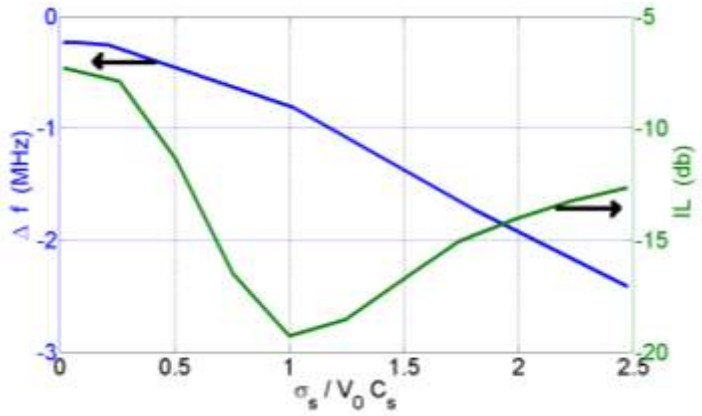
Nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduser üzerinde gerçekleştirilen elektriksel ölçümlerin (Network analizörü ölçümleri ve I-V ölçümleri) bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu şekilde yapılacak bir değerlendirme ile ES yöntemi kullanılarak SAW transduser üzerinde oluşturulmuş olan nano yapılı ZnO filmin nasıl şekillendiği hakkında bilgi elde edilebilecektir. Ayrıca, Eşitlik 2.43 ve 2.44 verilen denklemlerin sonuçlarını bir bütün

olarak değerlendirmeye olanak sağlayacaktır. Şekil.49'da iletkenlik-kayıp ve iletkenlik-frekans kayması değerlerinin bir bütün olarak verildiği grafik görülmektedir.



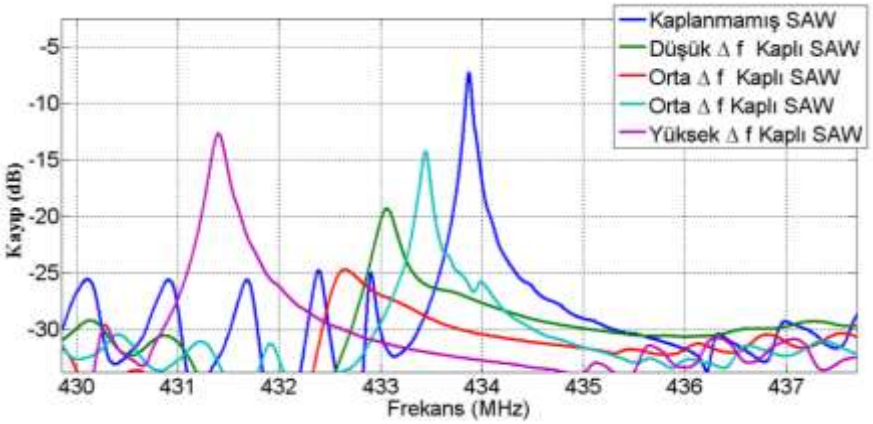
Şekil.49 Nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserler için iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması değişimleri.

Şekil.49'da verilmiş olan bu grafiğin Eşitlik 2.43 ve 2.44 denklemleri de dikkate alınarak $\frac{1}{v_0 C_s}$ cinsinden normalize edilmesi gerekir. Bu işlem için $\frac{\Delta\alpha}{k} = \frac{\Delta v}{v_0}\frac{v_0 C_s}{\sigma_s}$ şeklinde yazmak mümkündür. Bu durumda $\frac{\Delta\alpha}{k}$ ve $\frac{\Delta v}{v_0}$ değerlerinin maksimum olabilmesi için $\frac{v_0 C_s}{\sigma_s} = 1$ olma zorunluluğu vardır. Bu sebepten, iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması verileri bir grafik üzerinde toplanmıştır. Ayrıca $\frac{\Delta\alpha}{k}$ ifadesinin maksimum olduğu nokta "1" olacak şekilde iletkenlik verisi düzenlenmiştir. Bu düzenleme için $\frac{\sigma_s}{v_0 c_s} = 1$ olduğu nokta için $\sigma_{s=} v_0 c_s = 0{,}9\ 10^{-6}\ \Omega^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tüm iletkenlik değerleri $0{,}9\ 10^{-6}$ rakamına bölünerek normalize edilmiştir. İletkenlik verisinde yapılan bu düzenlemeden sonra iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması cinsinden bütünleştirilerek veriler grafikte verilmiştir (Şekil.50).



Şekil.50 Nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserler için normalize iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması değişimleri.[127]

Elde edilen bu karakteristik eğriler, ES yöntemi ile SAW üzerine kaplanan nano yapılı ZnO filmin nasıl şekillendiğini açıklamaktadır. Ayrıca, Bölüm 4'de ifade edildiği gibi iletkenlik artışı kaplama miktarı ile artmaktadır. Ancak kayıp parametresi iletkenlikle paralel artmamaktadır. Bu değişimin sebebi, iletkenliğin kayıp parametresine etkisinin ikinci dereceden olmasıdır. Şekil.51'de frekans kayması ile oluşan kayıp değişimi verilmiştir.



Şekil.51 Nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserlerin kaplama miktarına bağlı olarak kayıp parametresi üzerinde meydana gelen değişim.

Elde edilen bu eğrinin önemi, nano yapılı ZnO film kaplı SAW transduserlerin sensör performansları ile karşılaştırıldığında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle; düşük iletkenlik sonucunda düşük frekans kaymasına sahip bölge, kayıbın en büyük değere ulaştığı bölge ve iletkenliğin en büyük değere ulaştığı bölge olmak üzere bu eğri üç ana parçaya ayrılarak sensör cevapları irdelenecektir.

4.1.2 SnO_2 Sonuçları

Bu bölümde, nano yapılı SnO_2 filmin SAW transduser üzerine kaplanması, yapısal karakterizasyonu ve SAW transduserlerin SnO_2'ya bağlı olarak elektriksel karakterizasyonları ve diğer özelliklerinin nasıl değiştiğine ilişkin deney sonuçları irdelenecektir. Tablo.7'de nano yapılı SnO_2 filmin SAW üzerine kaplanması için kullanılan çözelti miktarları ve buna bağlı olarak elde edilen frekans kaymaları verilmiştir.

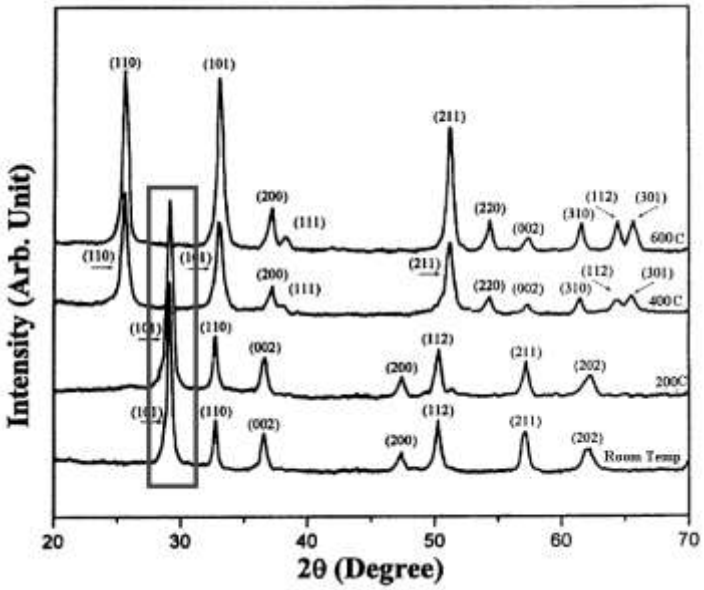
Tablo.7 Nano yapılı SnO_2 film kaplı SAW transduserlerin kaplanmasında kullanılan çözelti miktarları ve buna bağlı olarak elde edilen frekans kaymaları.

No	Kaplama Miktarı (µl)	DF (kHz)
1	30	163
2	60	313
3	90	350
4	120	400
5	150	460
6	180	550
7	210	650
8	240	750
9	270	850
10	300	910

SAW transduser üzerine SnO_2 film kaplamada, kaplanabilen en yüksek çözelti hacmi 500µl olarak gerçekleşmiştir. Kaplanan en yüksek miktara karşılık oluşan frekans kayması ise ~900kHz'dir. Kaplanan çözelti hacmi ve oluşan frekans kayması ZnO çalışması ile karşılaştırıldığında, birim çözelti hacmi başına oluşan frekans kayması SnO_2 çalışmasında daha yüksektir. Bu durum, nano yapılı SnO_2 filmin yüzeye daha homojen olarak yayılmasından ve buna bağlı olarak elektrotlar arası iletimin gerçekleşmesindendir.

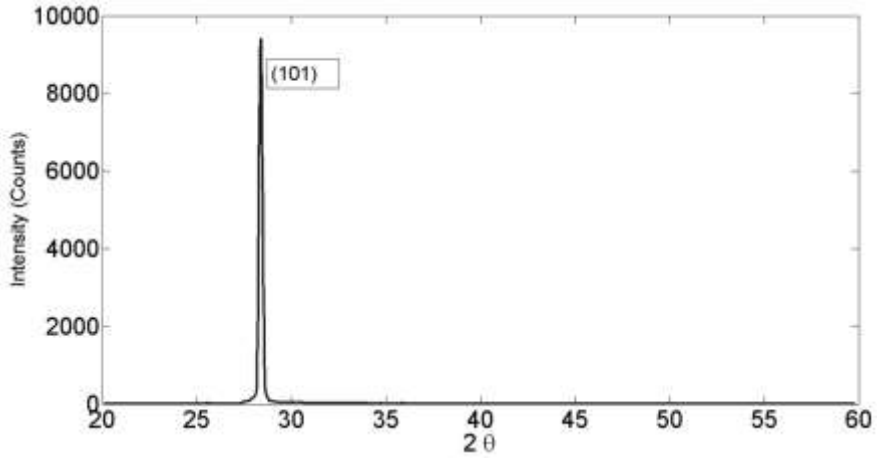
4.1.2.1 SnO_2 Yapısal Analizler

$Sn(OH)_2$'in SnO_2 sentezi için başlangıç çözeltisi olarak kullanılması, SnO_2 yapısının içerisinde sentez çözeltisi kaynaklı herhangi bir kirliliğin oluşumunu ortadan kaldırmıştır. Diğer yandan, tavlama ısısına bağlı olarak farklı kristal yapılarının da oluşabiliyor olması nedeniyle SnO_2 sentezinde tavlama sıcaklığı 350^0C olarak sabitlenmiştir. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak oluşan SnO_2 kristal fazları Şekil.52'de verilmiştir.



Şekil.52 Tavlama sıcaklığına bağlı olarak oluşan SnO_2 kristal fazları [128].

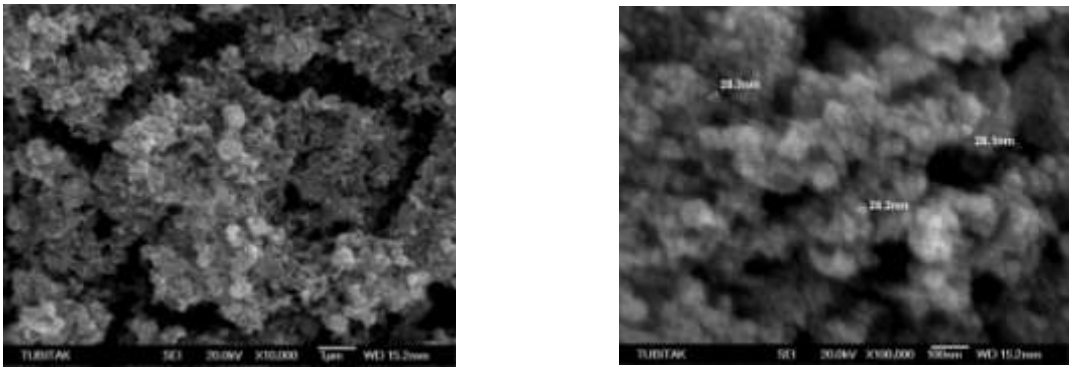
ES yöntemi ile öncelikle Si alt taban üzerine kaplamalar yapılıp 350^0C'de 2 saat süresince tavlanarak yapının oksit haline dönüşmesi sağlanmıştır. Daha sonra Si alt taban üzerine oluşturulan oksit yapısının XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu analizlerde, (101) yöneliminde kristalleşme olduğu görülmüştür. Ayrıca, 350^0C'de tavlandıkları için diğer yönelimlerde kristal yapısının oluşmadığı görülmüştür. Şekil.53'de elde edilen XRD spektrumu görülmektedir.



Şekil.53 SnO_2 formuna ait XRD spektrumu.

Birçok yöntemde, SnO_2 oluşturulması için $SnCl_2.2H_2O$ başlangıç çözeltisi olarak kullanılmaktadır[128]. Bu çözelti ile oluşturulan oksit yapılarının XRD spektrumunda tavlama sıcaklığına bağlı olarak birçok faz aynı anda oluşabilmektedir. Şekil 52'de tavlama sıcaklığına bağlı olarak oluşan fazlara ait XRD spektrumu gözükmektedir.

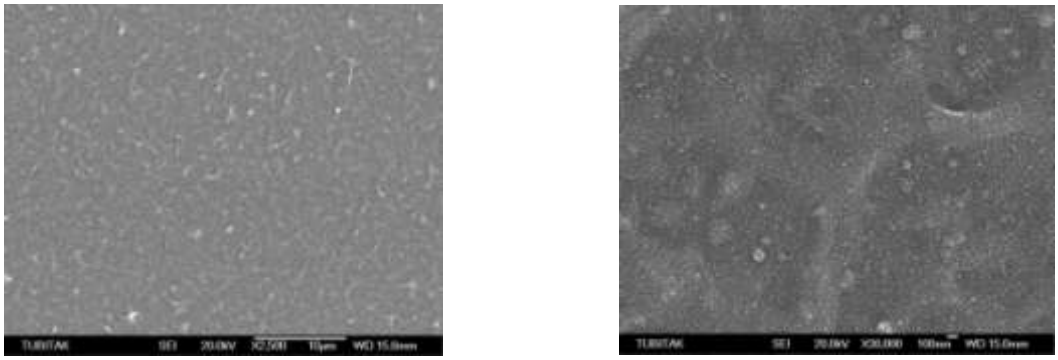
Gerçekleştirilen SEM analizlerinde nano yapılı SnO_2 filmin SAW transduser üzerine homojen olarak yayıldığı görülmektedir. Filmin SEM görüntüsünde düşük frekans kaymalarında ve yüksek frekans kaymalarında farklılıklar görülmektedir. Şekil.54'de düşük frekans kaymasına sahip SAW transduser üzerine oluşturulmuş SnO_2 filminin düşük ve yüksek büyütmelerde SEM görüntüleri verilmiştir. Ayrıca, düşük frekans kaymalarında yani ince oluşturulmuş film yapıları çapları ~28nm olan tanecikli yapılardan meydana gelmektedir. Bu taneciklerin oluşturduğu yapılar içinde büyük boşluklar bulunmaktadır.



a) **b)**

Şekil.54 Düşük frekans kaymasına sahip SAW transduser üzerine kaplanan nano yapılı SnO_2 filmin **a)** düşük büyütmeli, **b)** yüksek büyütmeli SEM görüntüleri.

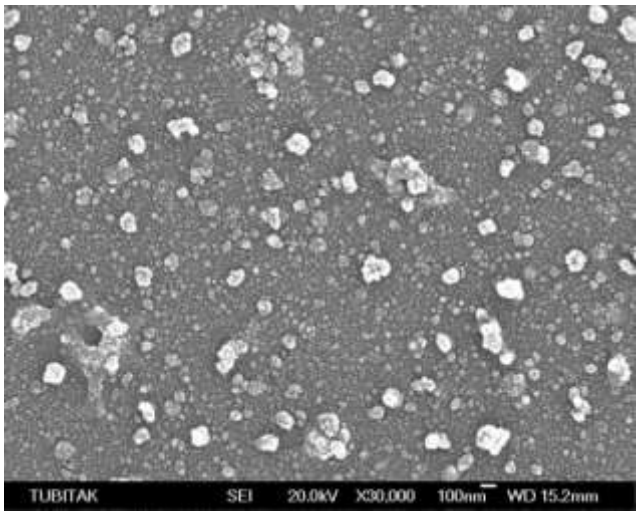
Kaplama miktarı dolayısıyla frekans kayması artırıldıkça yüzeyde oluşan boşluklar yok olup sıkı bir film yapısı gözlemlenmektedir. Bu durum, Şekil.55'de verilmiştir.



a) **b)**

Şekil.55 Yüksek frekans kaymasına sahip SAW transduser üzerine kaplanan SnO_2 filmin **a)** düşük büyütmeli, **b)** yüksek büyütmeli SEM görüntüleri.

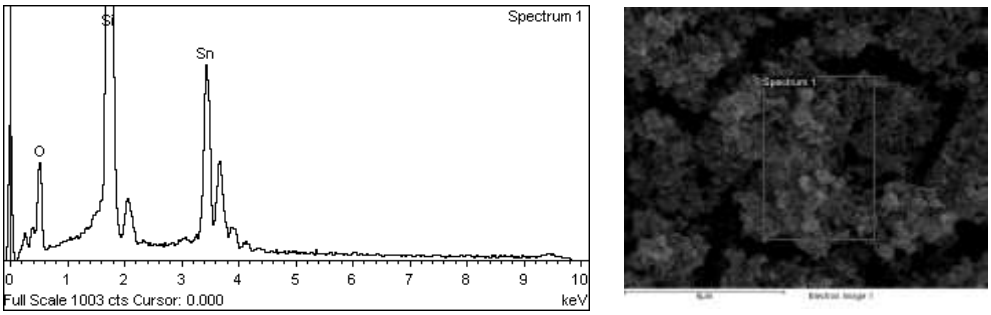
Daha yüksek frekans kaymalarında ise yüzeyde çapları 100nm'den büyük yapılar da oluşmaktadır (Şekil.56). Oluşan bu yapıdan dolayı SAW transduserin titreşimi durmaktadır.



Şekil.56 Yüksek frekans kaymasına sahip SAW yüzeyi.

Frekans kayması dolayısıyla yüzeyde oluşturulan filmin kalınlığına göre filmin morfolojisinde oluşan bu değişimin sensör özellikleri üzerinde de farklılığa neden olması muhtemeldir. Bu etkiler, sensör sonuçlarının tartışılacağı bölümlerde tartışılacaktır.

SAW üzerine oluşturulan filmin SEM-EDS analizlerinde ise XRD analizine paralel sonuçlar elde edilmiştir. Oluşturulan film yapısının içinde beklenmeyen herhangi bir kirlilik söz konusu değildir. Şekil.57'de EDS analizi spektrumu ve analiz edilen bölgenin SEM görüntüsü verilmiştir. Tablo.8'de EDS analizi sonucunda, analiz edilen bölgedeki elementler ve yüzde değerleri verilmektedir. Tablo 8 ve Şekil 57a'da görülen silisyuma ait pik SAW transduserin yapısında bulunan silisyumdan kaynaklanmaktadır.



a) **b)**

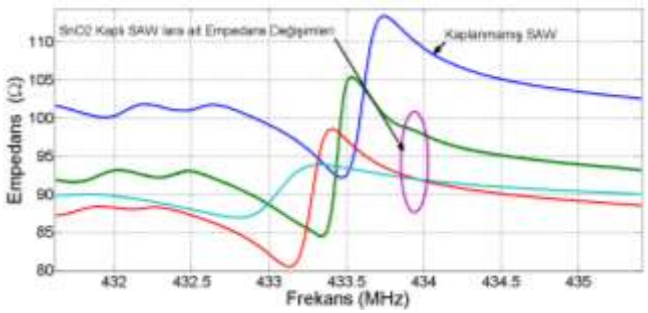
Şekil.57 a) EDS analizi spektrumu, **b)** analiz edilen bölgenin SEM görüntüsü.

Tablo.8 SAW transduser üzerindeki SnO_2 filmin EDS analizi.

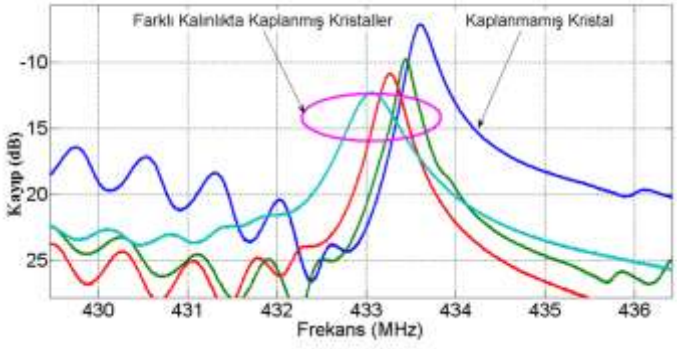
Element	Weight %	Atomic %
O K	24.89	46.42
Si K	42.79	45.46
Sn L	32.31	8.12
Totals	100.00	100.00

4.1.2.2 Nano yapılı SnO_2 Filmin Elektriksel Analizleri

ES yöntemi kullanılarak SAW transduser üzerine kaplanan filmin, SAW transduserin karakteristiği üzerinde nasıl bir değişiklik yaptığının belirlenmesi amacı ile network analizörü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlerde empedanstaki ve kayıp parametresindeki değişimler Şekil.58 ve Şekil.59'da verilmiştir. Kaplama nedeniyle empedansta ve kayıpta meydana gelen değişimleri gösterebilmek için kaplanmamış SAW transduserin değerine yakın değerlerdeki SAW transduserlerin verileri grafiğe dahil edilmiştir.



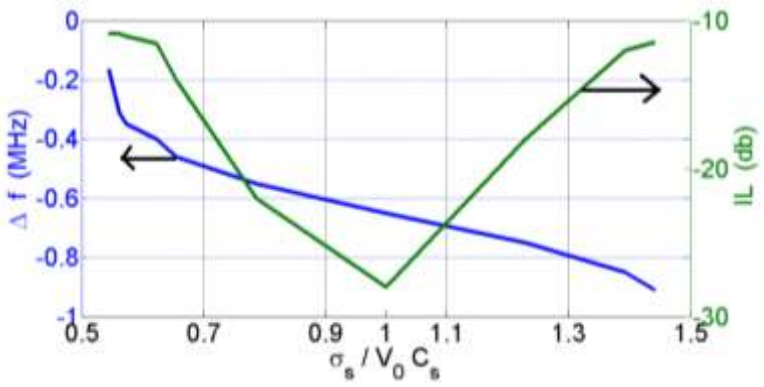
Şekil.58 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin impedans değişimleri.



Şekil.59 Kaplanmamış ve farklı miktarlarda kaplanmış SAW kristallerinin kayıp parametresi değişimleri.

Ayrıca, kaplama ile SAW transduser yüzeyinde meydana gelen iletkenlik değişimlerini inceleyebilmek için ZnO çalışmasında olduğu gibi I-V ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, ±10 V_{dc} aralığında ve 0,05V adımlarla gerçekleştirilmiştir. Her bir SAW transduserin iletkenliği Siemens cinsinden hesaplanmıştır.

Kayıp, frekans kayması ve iletkenlik değişimlerini tek bir grafik üzerinde Şekil.60'da gösterilmiştir. Ortak eksen olan x-ekseni, $\frac{1}{v_0 C_s}$ cinsinden normalize edilmiştir. Bu işlem için $\frac{v_0 C_s}{\sigma_s} = 1$ olma zorunluluğu ZnO çalışmalarında anlatıldığı gibidir. İletkenlik değişimi üzerinde bu düzenleme için $\frac{\sigma_s}{v_0 c_s} = 1$ olduğu nokta için $\sigma_s = v_0 c_s = 6.1\text{x } 10^{-6}\ \Omega^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tüm iletkenlik değerleri $6.1\text{x } 10^{-6}$ rakamına bölünerek normalize edilmiştir.



Şekil.60 Nanoyapılı SnO2 film kaplı SAW transduserler için normalize iletkenlik-kayıp, iletkenlik-frekans kayması değişimleri.

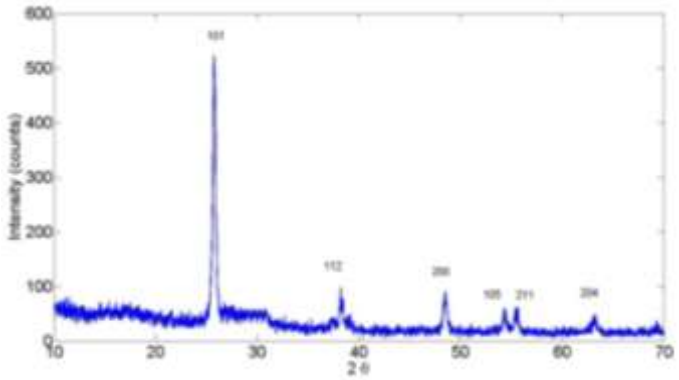
4.1.3 TiO_2 Sonuçları

Tez çalışması kapsamında üzerinde çalışılan bir diğer metal oksit ara yüzey malzemesi de TiO_2'dir. Bu bölümde, oluşturulan TiO_2 yapılarının yapısal karakteristikleri XRD ve SEM analizleri ile açıklanmaya çalışılacaktır. Ayrıca, network analizörü ve I-V ölçümleri yardımı ile SAW transduserin karakteristiğinin nasıl değiştiği açıklanmaya çalışılacaktır.

4.1.3.1 Nanoyapılı TiO2 Filmin Yapısal Analizleri

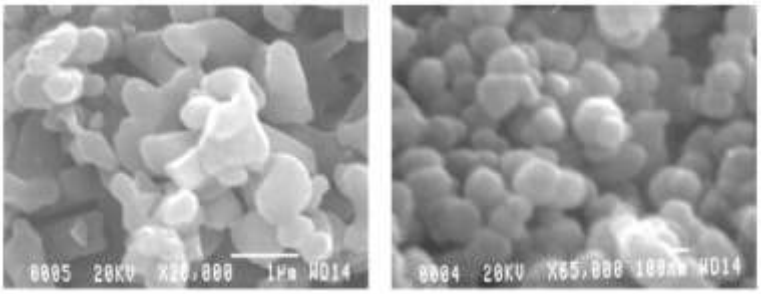
Nano yapılı TiO_2 filmi, titanyum n-butoksit çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır. Çözeltinin hazırlanış detayları Bölüm 3'de verilmiştir. SAW transduser üzerine kaplanan TiO_2 filmin SAW transduserin titreşimini engellemesi nedeniyle biri titanyum n-butoksit, etanol ve asetik asit kullanılarak, diğeri ise bu karışıma 1.300.000 zincir uzunluğunda PVP eklenerek iki tip çözelti hazırlanmıştır.

Elde edilen filmlerin XRD spektrumu analizlerinde oluşan spektrumun sonradan eklenen PVP'ye bağlı olmadığı görülmüştür. Bu durum beklenen bir durumdur. Çünkü sonradan eklenen PVP sadece oluşan küresel yapıların çaplarının azaltılmasını sağlayacak ve tavlama esnasında yapıdan uzaklaşacaktır. Ayrıca, her iki çözelti için tavlama sıcaklığı 550^0C olarak sabit tutulduğundan, faklı bir faz yapısının oluşması beklenmemektedir. Elde edilen XRD spektrumu Şekil.61'de verilmiştir.



Şekil.61 550 ^{0}C sıcaklıkta tavlanan nano yapılı TiO_2 filme ait XRD spektrumu

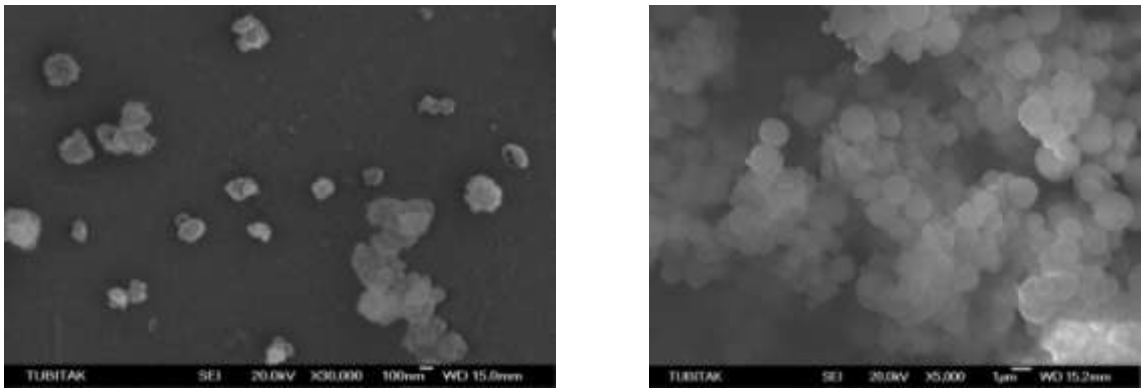
PVP eklenmeden oluşturulmuş nano yapılı TiO_2 filmlerin SEM analizlerinde, TiO_2 nano yapıların küresel şekilde olduğu gözlenmiştir. Bu durum, oluşturulan filmin anatase fazında oluştuğunu göstermektedir. TiO_2 yapısının hangi fazda olduğu, XRD analizleri ile anlaşılabileceği gibi SEM görüntülerinden de anlaşılabilir. Anatase ve rutile fazdaki TiO_2 nano yapılara ilişkin SEM görüntüleri Şekil.62'de verilmiştir.



a) **b)**

Şekil.62 a) Rutile, b) anatase fazdaki TiO_2 nano yapıların SEM görüntüleri [129].

İlk çözelti kullanılarak gerçekleştirilen sentez çalışmalarında elde edilen SEM resimleri Şekil 63'de gösterilmiştir. Düşük çözelti hacimlerinde (10-30µl) yapılan kaplamalarda Şekil 63' te gösterilen morfolojiye benzer formlar görülmüştür.



(a) (b)

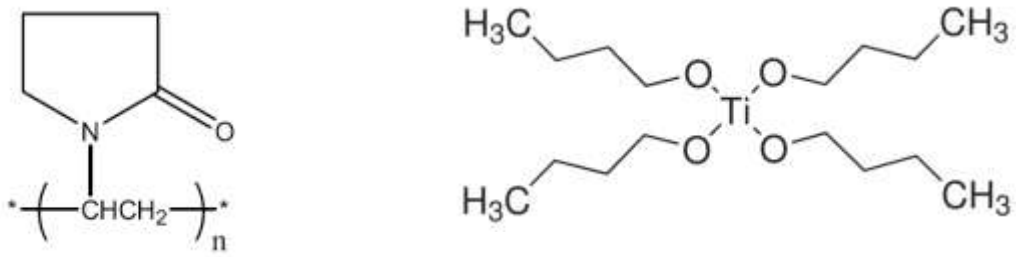
Şekil.63 Farklı çözelti hacmi kullanılarak elde edilen TiO_2'ye ait SEM görünüsü
a) 10-30µl b) 50-100µl

Bu durum oluşan filmin homojen olmadığını ve yüzeyde tepecikler halinde toplanmaların olduğunu göstermektedir. Homojen olmayan film yapısının ise SAW'un titreşimini engellemesinin yanı sıra SAW sinyali üzerinde bir gürültü sinyali oluşturması söz konusudur. Çözelti hacmi artırıldığında ise film yüzeyi kaplamakta fakat çapı 1µm civarında küresel formlar oluşmaktadır. Bu durum ise SAW 'un titreşimine engel olmaktadır.

Oluşturulan nano yapıların SAW titreşimine engel olması nedeni ile benzer yöntem kullanılarak QCM üzerine TiO_2 nano yapılar oluşturulmuştur. Bu yapılar, 0.3M olarak hazırlanmış çözeltinin 1:10 oranında metanol ile seyreltilerek hazırlanmış yeni çözelti ile QCM yüzeyine 20, 100 ve 200µl kaplamalar gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Bu kaplamalar sonucunda elde edilen frekans kayması ~8, ~50 ve ~100kHz'dir. Ayrıca SEM analizlerinde yapının Şekil 63. b'dekine benzer şekilde oluştuğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuç ile ES yöntemi ile oluşturulan TiO_2'in QCM üzerinde yüzey ile beraber titreştiği görülmüştür. SAW'un titreşimine engel oluşturan neden ise yüzeyde oluşan TiO_2'in kütlesi ve film morfolojisidir. Yüzeyde sürekli yapıda bir film oluşmamaktadır. Bu durum QCM için problem olmamakla birlikte SAW için problem oluşturmaktadır.

Film homojenliğinin artırılması ve oluşan küresel formların daha düşük çaplarda oluşturulması amacı ile çözelti içerisine PVP eklenmiştir. PVP bir polimer zinciri olup zincirin her halkasını oluşturan monomer yapı şekil 63.a'da görüldüğü gibidir. Her halkada

bulunan çift bağlı oksijen bir polar kutup oluşturmaktadır. Çözelti içerisindeki Ti- n-Butoksit (Şekil 64. b) molekülü bu serbest uçlarla yük etkileşimine girmektedir.



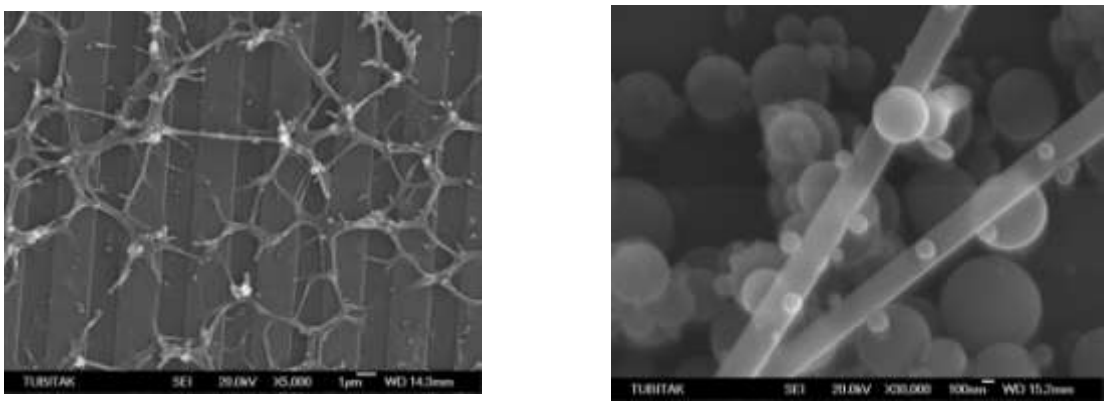
(a) (b)

Şekil.64 a) PVP monomer yapısı b) Titanium(IV) butoxide

PVP molekülü boyunca sarmal oluşturan Ti-butoxide molekülü tavlama süreci ile oksit formuna girmektedir. Bu yöntem Ti-nano tel (nano-fiber) sentezlemek için sıkça başvurulan yöntemlerdendir[130].

Nano-fiber sentez çalışmalarında PVP konsantrasyonu en düşük ~20 mg/ml civarından başlamakta olup, tez çalışmalarında da fiber ve daha büyük çaplı yapıların oluşumunu engellemek için PVP konsantrasyonu 24 mg/ml olarak sabit tutulmuştur. Ti-Kaplama çözeltisi içerisinde Ti-butoxide konsantrasyonu ise 20 mg/ml olarak sabit tutulmuştur. Bu değerleri belirlenmesinde Dan Li ve arkadaşları[130] tarafından gerçekleştirilen çalışma esas alınmıştır.

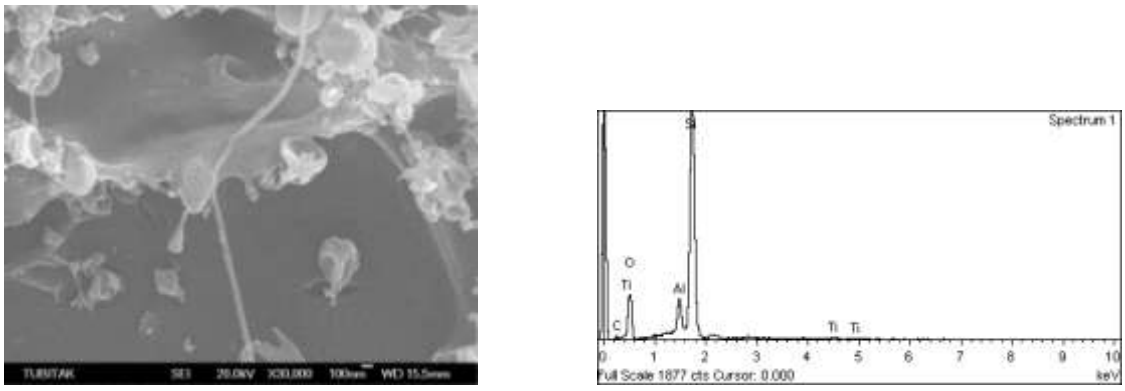
PVP konsantrasyonu, Ti-butoxide konsantrasyonundan yüksek olursa daha küçük parçalanmanın gerçekleşeceği muhtemeldir. Aksi durumda ise PVP zincirlerine Ti-butoxide takılacağından oluşacak yapı ya fiber oluşumuna kayacak ya da daha büyük parçacıkların oluşumuna neden olacaktır. Şekil 64'de Dan Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmadaki oranlarda gerçekleştirilen kaplama sonucu yüzeyde oluşan fiber yapıları görülmektedir. Şekil 65.a'da PVP konsantrasyonu ve Ti-butoxide konsantrasyonları 100mg/ml ve 120mg/ml dir. Şekil 65 b'de ise 20mg/ml ve 48mg/ml dir.



(a) (b)

Şekil.65 TiO_2 Fiber yapılı kaplamalar

Bu nedenle PVP / Ti-butoxide oranı az bir miktar PVP lehine kaydırılmıştır. Bu durum yüzeyde fiber oluşumunu engellemiş, tüm yüzeyin kaplanmasını sağlamıştır. Şekil 66.a'da PVP konsantrasyonu artırılmış çözelti ile elde edilen TiO_2 yapıya ait SEM görüntüsü, Şekil 66 b'de EDS analizi görülmektedir.



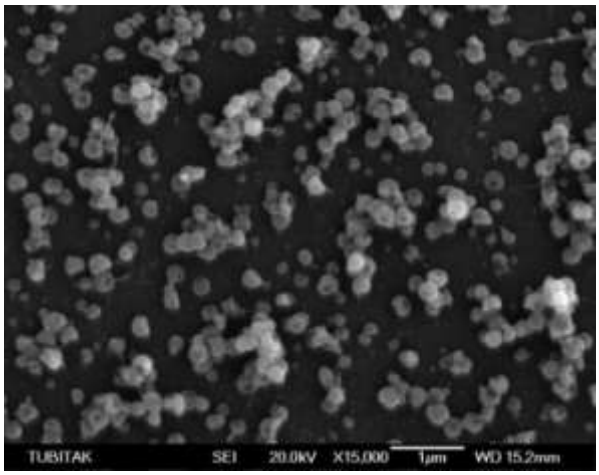
(a) (b)

Şekil.66 PVP konsantrasyonu artırılmış çözelti ile elde edilen TiO_2 yapıya ait SEM görüntüsü

Tablo 9 SAW üzerindeki TiO_2'in EDS analizi

Element	Weight %	Atomic %
C K	6.94	11.60
O K	40.83	51.24
Al K	5.10	3.80
Si K	46.01	32.89
Ti K	1.13	0.47
Totals	100.00	100.00

Bir diğer önemli parametre ise PVP'nin zincir uzunluğudur. Düşük zincir uzunluğuna sahip PVP kullanımında TiO_2 küresel formda oluşmaktadır. Şekil 68'de 6000 zincir uzunluğuna sahip PVP ile gerçekleştirilen kaplamaya ait SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil.67 6000 zincir uzunluğuna sahip PVP ile gerçekleştirilen kaplamaya ait SEM görüntüsü

PVP/Ti-butoxide oranı dikkate alınarak elde edilen çözelti Tablo 10'da verilen kaplama miktarlarında SAW üzerine kaplanmıştır. Ayrıca oluşan frekans kayması da Tablo 10'da görülmektedir.

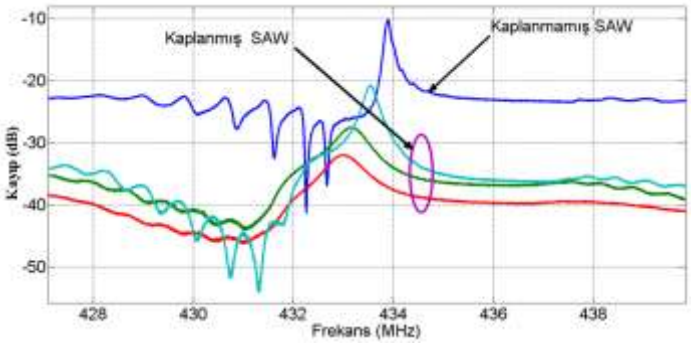
Tablo 10. TiO_2 kaplı SAW çalışmalarında kullanılan kaplama miktarları ve buna bağlı olarak gerçekleşen frekans kaymaları

No	Kaplama Miktarı (µl)	DF (kHz)
1	10	35
2	20	122
3	30	209
4	40	306
5	45	454
6	50	571
7	55	758
8	60	946
9	65	1033
10	70	1120
11	75	1208
12	80	1448
13	85	1589

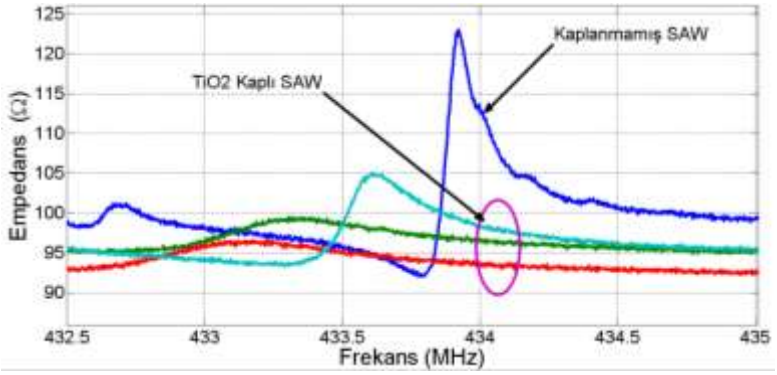
4.1.3.2 Nano yapılı TiO_2 Filmin Elektriksel Analizleri

SAW transduserlerin empedans ve kayıp spektrumları üzerinde etkili olabilecek parametreler eşitlik 2.43 ve 2.44 belirtildiği gibidir. SAW üzerine kaplanan filmin kütlesi ve elastitiyesi, empedans ve kayıp spektrumlarının değişimi üzerinde oldukça etkilidir. Bu nedenle oksit formda oluşturulacak filmler için yapıyı oluşturan temel parçacıkların çaplarının küçüklüğü ve yüzeyde birbirlerine temas eder durumda ve homojen olarak dağılmış olmaları önemlidir. Yapıyı oluşturan parçacıklar 100 nm veya daha büyük ve film yapısı Şekil 62 ve 64'te görüldüğü gibi belli bir formda yüzeyde durmuyorlar ise SAW'un empedans ve kayıp spektrumları oldukça bozulacaktır. Bu durum SAW'un çalıştırılabilir bir yapıda olmasından uzaklaşması demektir. Çünkü enerjinin bir IDT'den diğer IDT'ye aktarımı zorlaşmış, kayıplar artmıştır. Bu durum Şekil 69'da verilmiş olan kayıp-frekans (a), ve empedans-frekans (b) eğrilerinde görülmektedir. Ayrıca tüm TiO_2 kaplı SAW'lar dikkate alınarak

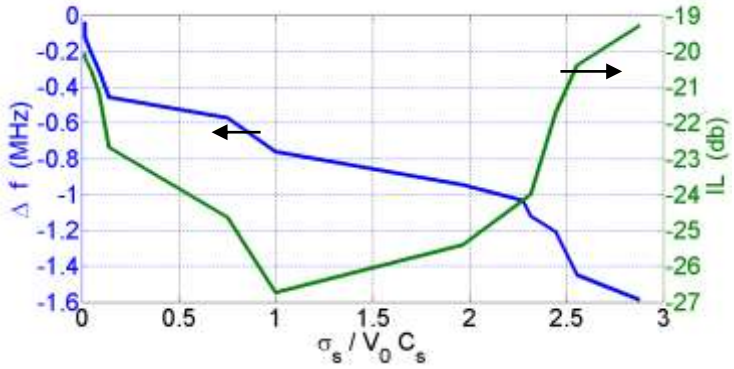
oluşturulan kayıp-iletkenlik, frekans kayması-iletkenlik eğrisi (Şekil 69 c) üzerinde kayıp değişimi ~-20dB civarından başlamaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil.68 a) Kayıp-Frekans, **b**) Empedans Kayıp, **c**) kayıp-iletkenlik, frekans kayması-iletkenlik eğrisi

Kayıp, frekans kayması ve iletkenlik değişimlerini $\frac{1}{v_0 C_s}$ cinsinden normalize edildiğinde $\sigma_{s=}v_0 c_s = 9.23\ 10^{-6}\ \Omega^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tüm iletkenlik değerleri $9.23x10^{-6}$ rakamına bölünerek normalize edilmiştir (Şekil 67 c).

Kaplama ile band genişliği artmakta buna bağlı olarak kayıp spektrumu bozulmaktadır. Bu nedenle spektrumun yayvan bir hal almaktadır. Bu durum spektrumun tepe noktası olan rezonans noktasının sabit bir noktada oluşmaması durumunu ortaya çıkarır. Bu rezonans noktasının sürekli kayması dolayısı ile sensör tepkisi üzerinde bir gürültünün oluşmasına neden olur. Bu durumlar sensör sonuçlarının analiz edildiği bölümde irdelenecektir.

4.2 Sensör Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, SAW üzerine oluşturulmuş olan ZnO, SnO_2, ve TiO_2 yapıların sensör performansları, Bölüm 3.4.2.3 de verilmiş olan ölçüm sisteminde ve Tablo 4 te verilmiş olan gazlar ve konsantrasyon aralıklarında test edilmiştir. ZnO, SnO_2 ve TiO_2 kaplı SAW'ların sensör sonuçları, Bölüm 4.1'de elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilerek açıklanmaya çalışılacaktır.

Tez çalışması kapsamında ölçümü gerçekleştirilen gazlar ve özellikleri Tablo 4'te verilmişti. Ölçüm adımları ise aşağıdaki tabloda verilmiştir. Her bir gaz ölçümü 5 farklı konsantrasyon uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümü yapılan gazlar ve her adımdaki konsantrasyonları, Tablo 11'de gösterildiği gibidir.

Tablo 11 Test edilen gazlar ve konsantrasyonları

Gaz	1. Uygulama (ppm)	2. Uygulama (ppm)	3. Uygulama (ppm)	4. Uygulama (ppm)	5. Uygulama (ppm)
Kloroform	1155	2310	3465	4620	5775
Metanol	515	1030	2060	3090	4120
Etanol	460	920	1380	1840	2300
Propanol	132	264	396	528	660
Trikloretilen	553	1027	1501	2054	3081
Aseton	1360	2720	4080	5440	6800

4.2.1 ZnO kaplı SAW'ların Sensör Sonuçları

Farklı frekans kaymalarına sahip ZnO kaplı SAW transduserlerin sensör performansları, Şekil 51'de verilmiş olan "***iletkenlik-frekans kayması, iletkenlik-kayıp***" eğrisi ile ilişkilendirilerek irdelenecektir. Şekil'51 de verilen bu eğri sensör cevapları ile ilişkilendirilirken üç ana bölgeye ayrılmıştır.

Bu bölgeler;

1-Düşük frekans kaymasının olduğu bölgeler (0-~800kHz arası)
2-Orta seviyede gerçekleşmiş frekans kayması (~800-~1800kHz arası)
3-Yüksek frekans kaymasını olduğu bölgeler (~1800-~2400kHz arası)

Bu şekilde bir sınıflandırmanın yapılmasındaki temel dayanak sensör ölçümlerinde bu bölgelerdeki sensörlerin farklı sensör karakteristiği göstermesidir. Ayrıca böyle bir sınıflama bölüm 4.1.1.1 ve 4.1.1.2'de ifade edilmiştir. Bölgelerin sınırlandırılmasında kullanılan frekans aralıkları yaklaşık bir değer için verilmiş olup keskin bir sınır değerinden bahsedebilmek mümkün değildir.

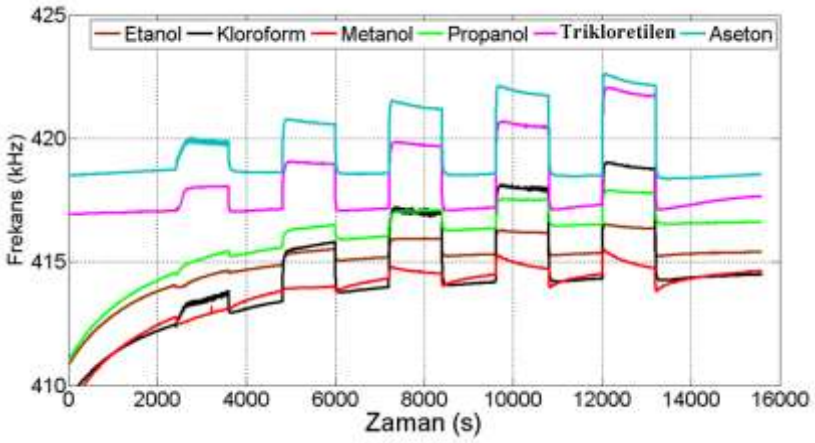
Düşük frekans kaymalarında elde edilen sensör cevabı, ağrılıklı olarak yüzeydeki ZnO nano-yapıların gaz absorsiyonu üzerinden gerçekleşmektedir.

Bu nedenle sensör cevabı;

$$\Delta f_R = \Delta f_m - \Delta f_G \qquad \textbf{(4.1)}$$

Olarak ifade edilebilir.

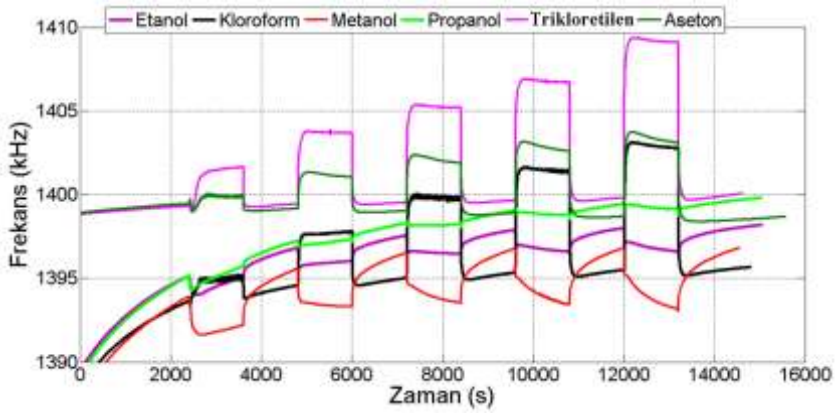
Burada, Δf_R : Sensör Cevabı, Δf_m : Sensör cevabına absorblanan kütleden gelen katkı, Δf_G: Sensör cevabına filmin elastitiyesinin algılamaya bağlı olarak değişmesinden gelen katkı olarak tanımlanabilir. Düşük frekans kaymasına sahip bir SAW sensörün tepkisi Şekil 69'da görülmektedir.



Şekil.69 420 kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörünün sensör cevabı

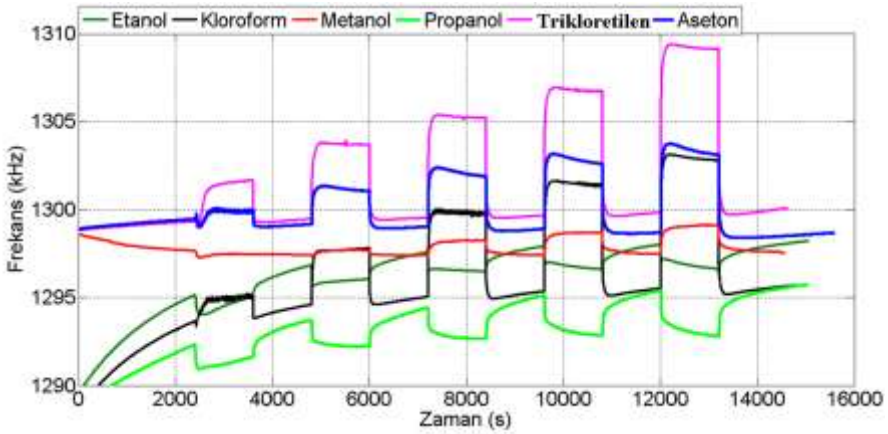
Şekil 40'da verilmiş olan SEM görüntüsü dikkatle irdelendiğinde SAW yüzeyinde oluşturulmuş olan ZnO yapılarının birbirleri ile sürek temas halinde olmadıkları görülebilir. Bu durum, iki elektrot arasında elektron iletimi söz konusu olmadığını göstermektedir. Bu nedenle sensör cevabı, absorblanan kütle üzerinden gerçekleşmektedir. Öte yandan yapısal bir süreklilik söz konusu olmadığından çok düşük frekans kaymalarının gerçekleştiği film yapılarında elastitiye etkisi ihmal edilebilir.

Filmin elastitiyesi, frekans kayması arttıkça kendini göstermeye başlayacağından filmin homojen olarak yüzeyde oluşmaması, yüzeye tam olarak yapışmaması gibi durumlarda her zaman dikkate alınmalıdır. Özellikle orta seviye diye isimlendirilmiş olan bölge aralığında gerçekleştirilen kaplamalarda filmin elastitiyesi kendini baskın olarak göstermektedir. Bu nedenle kayıp eğrisi yayvan şekil almakta ve band genişliği artmaktadır. Bu durum sensör cevabı üzerinde gürültü, tersine cevap gibi durumları ortaya çıkarmaktadır. Çünkü frekans kaymasına filmin elastitiye değişimi negatif olarak etki etmektedir. Bu şekil 70 ve 71'de orta seviyede kaplanmış SAW için elde edilen sensör cevaplarında görülmektedir.



Şekil.70 Orta seviyede(~1400kHz) kaplanmış SAW için elde edilen sensör cevabı

Propanol, metanol ve etanol tepkileri filmin elastitiyesi nedeni ile azalmış ve hatta yön değiştirmiştir. Öte yandan bu türlü kaplamalarda filmi oluşturan nano yapıların birbiri ile az da olsa temas etme durumunun söz konusu olduğu ve bu nedenle, sensör cevabı üzerinde elektriksel etkilerin de etkin olabileceği göz ardı edilmemelidir.



Şekil.71 Orta seviyede(~1300kHz) kaplanmış SAW için elde edilen sensör cevabı

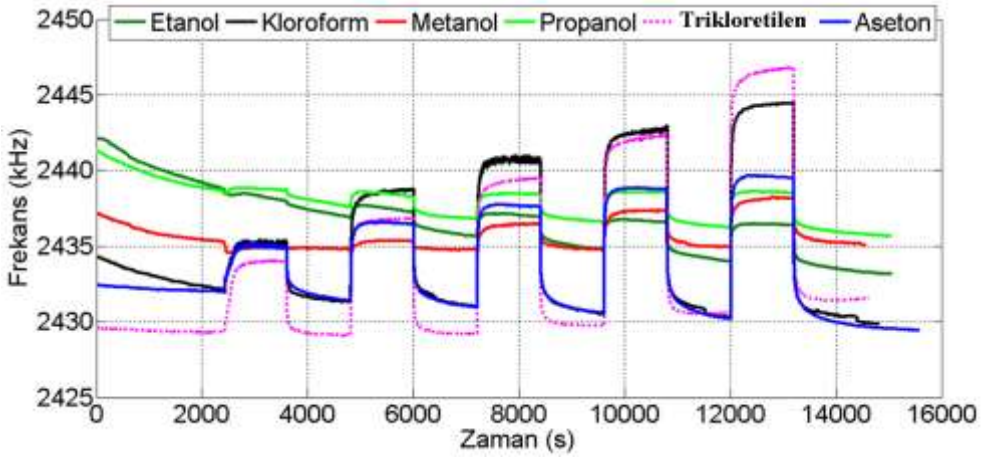
Propanol, metanol ve etanol uygulandığında sensör cevabı üzerinde elastitiye etkisi söz konusu olurken kloroform, aseton ve trikloretilen uygulandığında ise böyle bir etkinin baskın olmadığı gözlemlenmektedir. Sensör cevabı ise

$$\Delta f_R = \Delta f_m + \Delta f_\sigma - \Delta f_G \qquad \textbf{(4.2)}$$

olarak gerçekleşmektedir. Burada Δf_σ sensör cevabı üzerindeki elektriksel etkileri ifade etmektedir. Δf_G : Orta seviyede gerçekleşen frekans kaymasına sahip SAW sensörlerin sensör cevapları üzerinde baskın olabileceği Şekil 70 ve 71'de görülmektedir.

Elastitiyenin baskın olduğu bölgelerde sensör malzemesinin karakterize edilebilmesi oldukça zor olmaktadır. Ancak, film oluşturma aşamaları tekrarlanabilirliği açısından standardize edilebilirse, veri işleme prosesleri açısından olumlu sonuçların elde edilmesi mümkündür. Kısaca aynı malzeme ile farklı sensör özelliğine sahip yapıların elde edilmesine imkan vermektedir.

Film kalınlığının artırılması dolayısı ile frekans kaymasının artırılması durumunda ise filmin SAW yüzeyindeki formu, Şekil 44'de gösterildiği gibi oluşmaktadır. Bu durumda nano yapılar birbirlerine doğrudan temas etmekte ve elektrotlar arası iletim sağlanmaktadır. Öte yandan oluşturulan Şekil 44'deki film, Şekil 40, 41 ve 43 ile karşılaştırıldığında; nano-yapıların yüzeye homojen olarak dağıldığı ve film yapısında düzensizliklerin yok olduğu sonucuna varılabilir. Film yapısındaki bu şekillenim nedeni ile elastitiye etkisinden gelen etkilerin de azalacağı beklenmelidir. En yüksek frekans kaymasına sahip (2,4MHz) SAW dan elde edilen sensör tepkisi Şekil 73'de gösterilmiştir.



Şekil.72 En yüksek frekans kaymasına sahip (2,4 MHz) SAW dan elde edilen sensör tepkisi

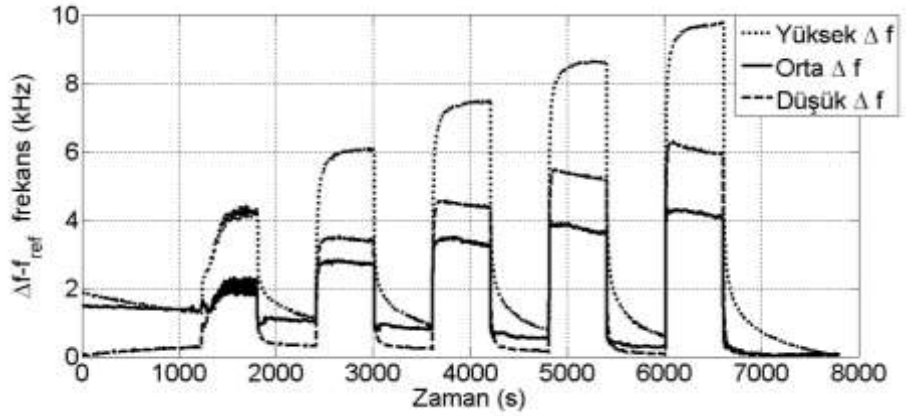
Bu yapıdaki SAW sensörün algılama mekanizması eşitlik 4.2 ile ifade edilebilir. Ancak film yapısındaki homojenlik nedeni ile Δf_G baskısı azalmakta, Δf_σ dan gelen etkiler de algılama mekanizmasında rol oynamaktadır. Ayrıca film kalınlığı artmış olduğundan Δf_m den gelen katkı diğer bölgelere nazaran daha büyük ve baskındır.

4.2.1.1 ZnO kaplı SAW Sensörlere Nem etkisi

Sensör tepkileri açısından irdelenmesi gereken bir diğer parametre de nemin algılama üzerindeki etkisinin nasıl olduğudur. Tez çalışmasında gerçekleştirilen ölçümlerde, nemin algılama üzerine etkisi de incelenmiştir. Bu inceleme için, belirlenen gazlar % 20, 50 ve 75 RH oranlarında tekrar ölçülmüştür.

Nano yapılı ZnO kaplı SAW sensörün yalnızca nem değişimlerine olan tepkisi Şekil 73'te verilmiştir. Nem, % RH şeklinde uygulanmış olup uygulanan nem oranları (%10, 20, 50, 60, 75) şeklindedir. Şekil üzerindeki f_{ref} ile ifade edilen değer ortamda nemin olmadığı frekans değeridir.

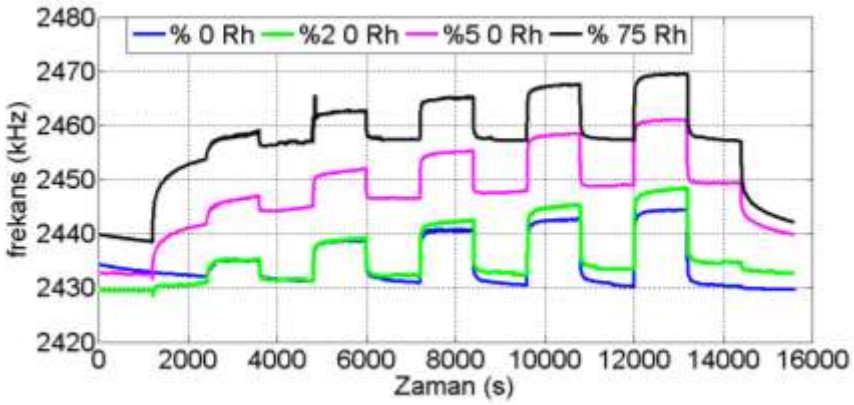
SAW sensörlerin neme olan tepkileri kaplama frekansı kaymalarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Orta seviyede yani aktif bölge olarak ifade edilen bölgedeki SAW'un cevabı düşük ve yüksek kaplama frekansı kaymalarının oluştuğu sensörlere daha düşüktür.



Şekil.73 Nano yapılı ZnO kaplı SAW sensörün yalnızca nem değişimlerine olan tepkisi

4.2.1.2 ZnO kaplı SAW Sensörlerin Gaz Algılaması Üzerindeki Nem Etkisi

Farklı nem değerine sahip ortamlarda gerçekleştirilen gaz ölçümlerinde ise nem, sensör değeri üzerinde öteleme etkisi yapmakta, ayrıca sensör cevabının büyüklüğünü de kısmen artırmaktadır. Bu durum Şekil 74'de farklı nem seviyelerinde kloroform ölçümü ile elde edilen sensör cevabı üzerinde görülmektedir. Sensör kaplama kalınlığı 2.4MHz dir.



Şekil.74 Farklı nem seviyelerinde kloroform ölçümü ile elde edilen sensör cevabı

Metanol ve etanol ölçümlerinde ise nem olumsuz etkilemekte nem artışı ile sensör cevabı yok olmaktadır.

Sensörün her bir gaza karşı karakteristiğini oluşturabilmek için sensör cevaplarının ölçülen gazın konsantrasyonu ile ilişkilendirilmesi gerekir. Bu esasen sensörün "*sensitivite*" sinin ortaya çıkarılmasından başka bir şey değildir.

Sensitivite: Uygulanan gazın konsantrasyondaki artış ile sensör cevabı arasındaki artışın ilişkilendirilmesidir. Bu ilişkilendirme farklı sensör yapıları için farklı farklı ifade edilmekle birlikte SAW sensörler için "*S*" olmak üzere;

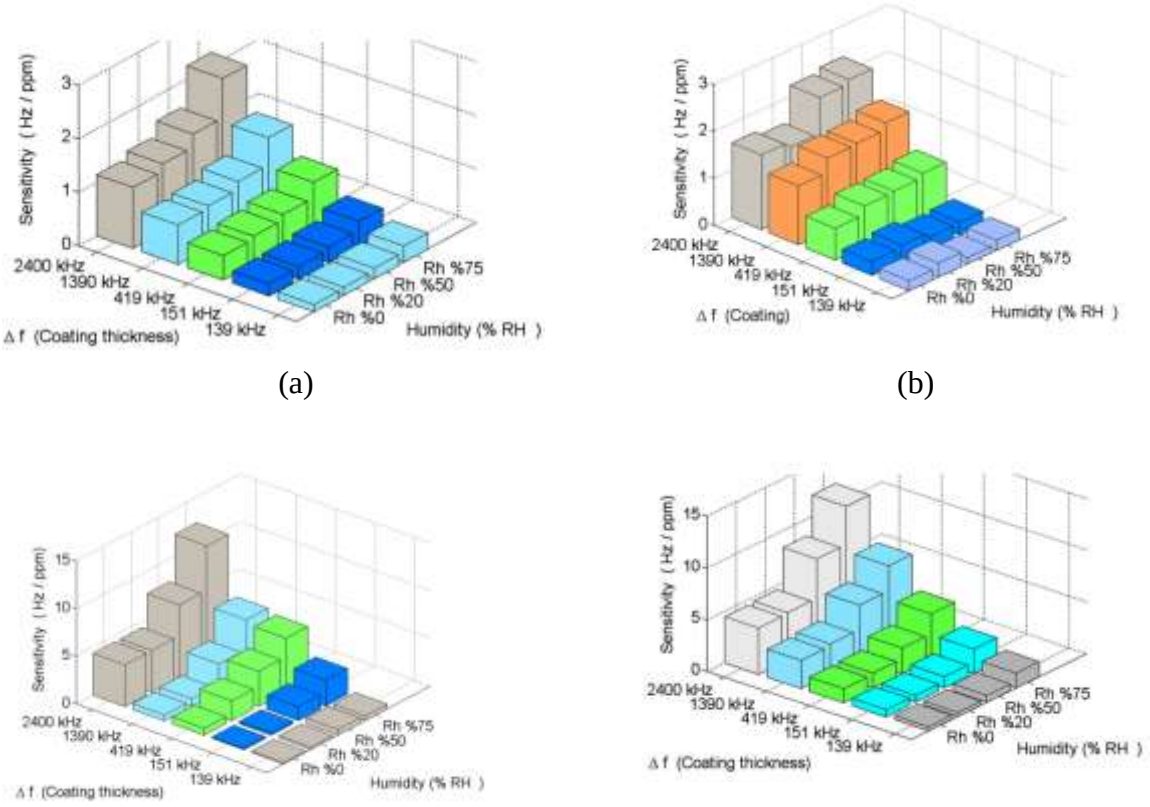
$$f_{sensör\ cevabı} = SxC_{konsatrasyon} \qquad \textbf{(4.3)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Her bir gaz konsantrasyonu uygulaması için elde edilen sensör cevabı bir grafik üzerine işlenirse birinci dereceden bir eğimin oluştuğu görülür. Sensitivitenin, bu eğim açısının tanjant'ına eşit olduğu görülebilir.
Dolayısı ile;

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta C} \qquad \textbf{(4.4)}$$

olarak ifade edilebilir.

Bu hesaplamalar nano yapılı ZnO kaplı SAW sensör cevapları için gerçekleştirildiğinde Şekil 75'deki bar diyagram elde edilmiştir.



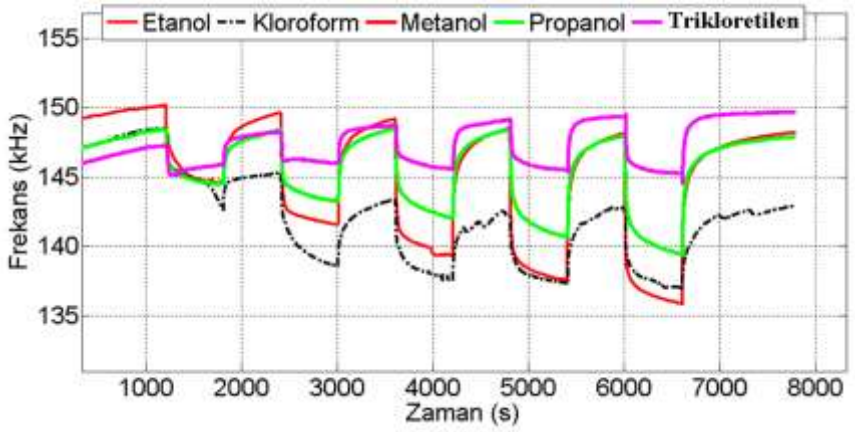
Şekil.75 Farklı kaplama kalınlıklarda SAW üzerine kaplanmış ZnO nano yapılı sensörlerin farklı nem seviyelerinde ölçülen a)Aseton b) Kloroform c) Propanol d) Trikloretilene karşı sensitiviteleri

Propanol ve trikloretilen cevapları üzerinde nem sensör tepkisinin büyüklüğünü artırırken aseton ve kloroform için büyük bir artış olmamaktadır. Bu durum Şekil 74' te de görülebilir.

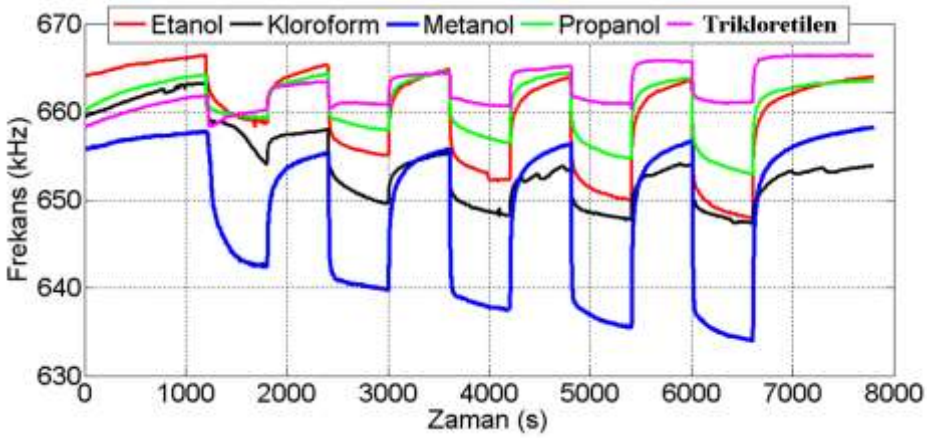
4.2.2 SnO_2 kaplı SAW'ların Sensör Sonuçları

SAW üzerine oluşturulmuş SnO_2 nano yapıların sensör karakteristikleri ZnO'dan oldukça farklılık göstermektedir. Düşük frekans kaymasına sahip SAW sensörler üzerinde bile filmin elastitiyesi etkin olabilmektedir. Bunun başlıca nedeni filmin ZnO yapısının aksine gözenekli bir yapıda oluşması ve tüm yüzeyi homojen olarak örtmesidir. Bu durum Şekil 55, 56 ve 57'de görülebilir. Bu nedenle sensör cevabı; $\Delta f_R = \Delta f_m + \Delta f_\sigma - \Delta f_G$ düşük frekans

kaymalarında bile üç parametrenin toplamından oluşmaktadır. Öte yandan test edilen gaz/gazların yapıya kolayca yayınır olması oluşan filmin mekanik özelliklerini dolayısı ile yapının elastitiyesini etkilemesi söz konusudur. Şekil 76 a ve b'de ~140kHz ve ~650kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörlerin farklı gazlara karşı sensör tepkileri görülmektedir.



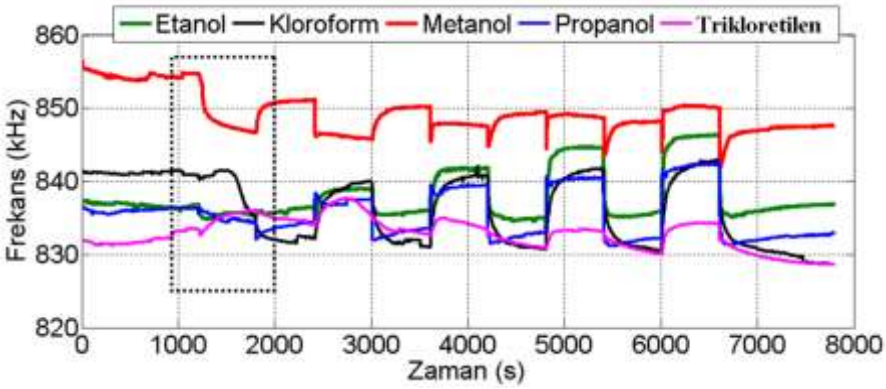
(a)



(b)

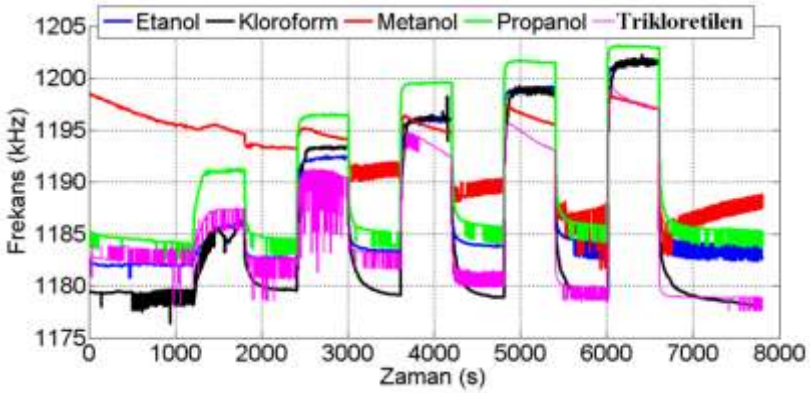
Şekil.76 a) 140kHz, b) 650kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörlerin farklı gazlara karşı sensör tepkileri

Frekans kaymasının artırılması durumunda ise Δf_R üzerinde Δf_m, Δf_σ nin baskısı artmaktadır. Şekil 77'de metanol tepkisinin konsantrasyon arttıkça yön değiştirmesi diğer gazlara karşı ise Şekil 76 'nın tersi yönde tepki vermesi Δf_m, Δf_σ nin baskısının artığını göstermektedir. Şekil 77'de 850kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün tepkisi görülmektedir.



Şekil.77 850kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün tepkisi

Frekans kayması mümkün olabilen en yüksek noktaya çıkartıldığında ise test edilen tüm gazlar için $(\Delta f_m + \Delta f_\sigma) > \Delta f_G$ durumu söz konusudur. Şekil 78'de bu durum gözükmektedir.



Şekil.78 1100kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün tepkisi

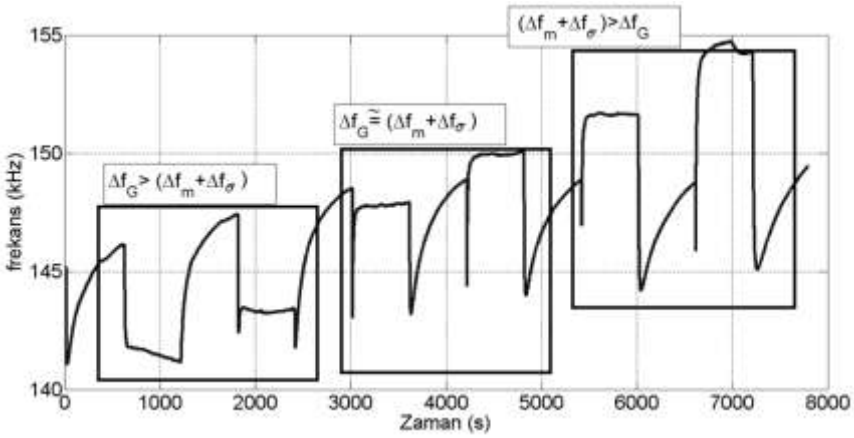
Sensör sinyali üzerindeki gürültüler SAW üzerine gerçekleştirilen kaplamadan ve osilatör sisteminden kaynaklanmaktadır.

4.2.2.1 SnO_2 kaplı SAW Sensörlere Nem etkisi

SAW transduser üzerine kaplanmış SnO_2 nano yapıların gaz sensörü cevapları bölüm 4.2.2. de irdelenmişti. Bu bölümde kaplama malzemesinin farklı nem seviyelerine karşı sensör cevapları irdelenecektir. Uygulanan nem oranları ZnO için % 10, 30, 40, 50, 60, 75 RH dır.

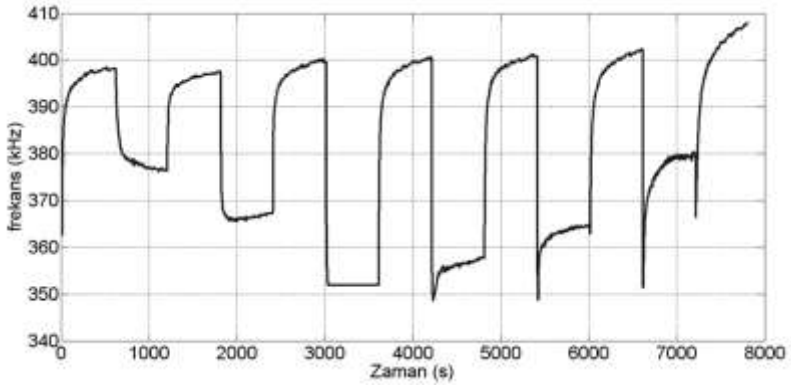
Sensörlerin neme olan karakteristik tepkileri, gaz uygulamaları ile aynı olup düşük frekans kaymalarında, düşük nem oranlarında ve yüksek nem oranlarında farklı şekilde oluşmaktadır. Düşük nem oranlarında elastitiye etkisi baskın olurken yüksek nem oranlarında

absorplanan kütleden dolayı bu baskı azalmakta, hatta ortadan kalkmaktadır. Şekil 79'da 155kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'ın nem değişimlerine olan tepkisi üzerinde bu etkiler görülmektedir.



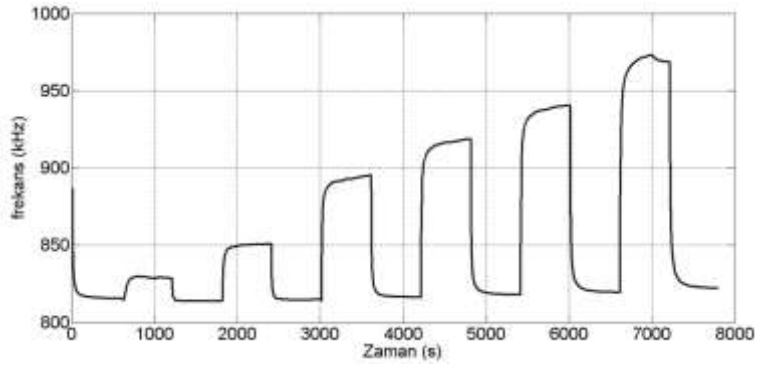
Şekil.79 155 kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'ın nem değişimlerine olan tepkisi

Orta seviyede frekans kaymasına sahip sensör için ise, sensör tepkisi ağırlıklı olarak elastitiyesinin baskısı altında oluşmaktadır. Ancak nem oranı % 60 ve üzerine çıktığında nemin absorblanmasından kaynaklanan kütle artışı nedeni ile elastitiye etkisi baskılanmaktadır. Bu durum Şekil 80 'de görülmektedir.



Şekil.80 360kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'ın nem değişimlerine olan tepkisi

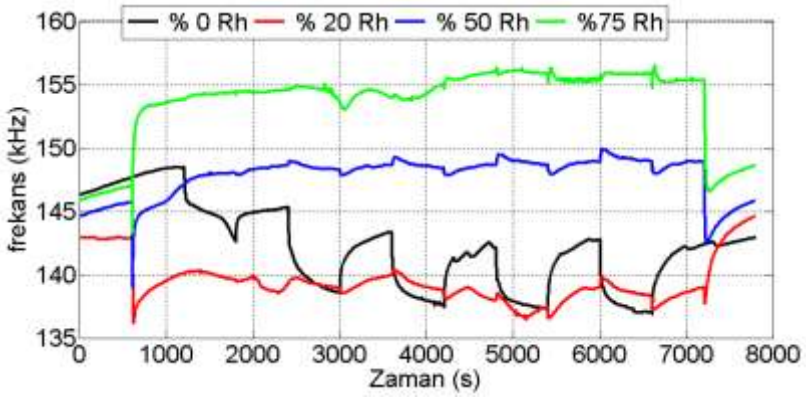
Yüksek frekans kaymalarının oluştuğu durumlarda ise, tepki tamamen pozitif yöne dönmektedir. Tepkinin bu şekilde oluşması $(\Delta f_m + \Delta f_\sigma) > \Delta f_G$ şeklinde ifade edilse de kütleden gelen etkinin baskın olduğu göz ardı edilmemelidir. Şekil 81'de yüksek frekans kayması bölgesindeki sensörün nem değişimine olan tepkisi görülmektedir.



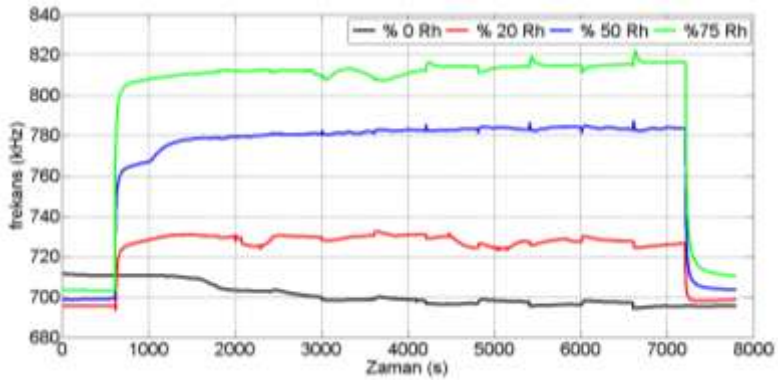
Şekil.81 Yüksek frekans kayması bölgesindeki sensörün nem değişimine olan tepkisi

4.2.2.2 SnO_2 kaplı SAW Sensörlerin Gaz Algılaması Üzerindeki Nem Etkisi

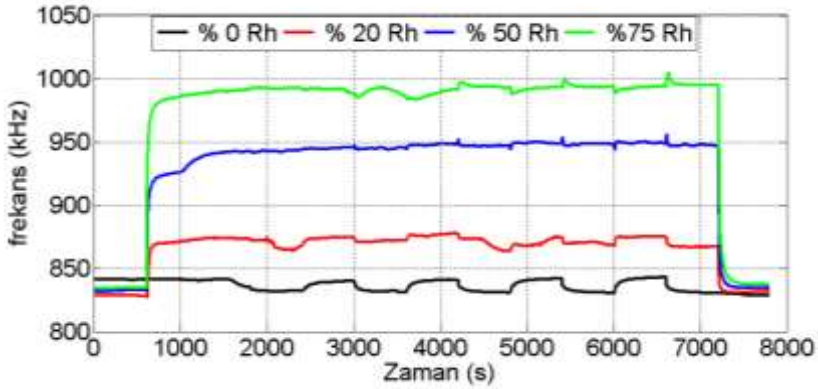
Farklı nem değerine sahip ortamlarda gerçekleştirilen gaz ölçümlerinde ise neme olan tepki gaza olan tepkiye göre çok büyüktür. Ayrıca nem oranı arttıkça gaza olan tepki azalmakta, hatta yok olmaktadır. Şekil 82'de düşük, orta ve yüksek frekans kaymalarına sahip SnO_2 nano yapıların kaplı olduğu SAW sensörlerin farklı nem ortamlarında kloroforma karşı verdiği tepkiler görülmektedir.



(a)



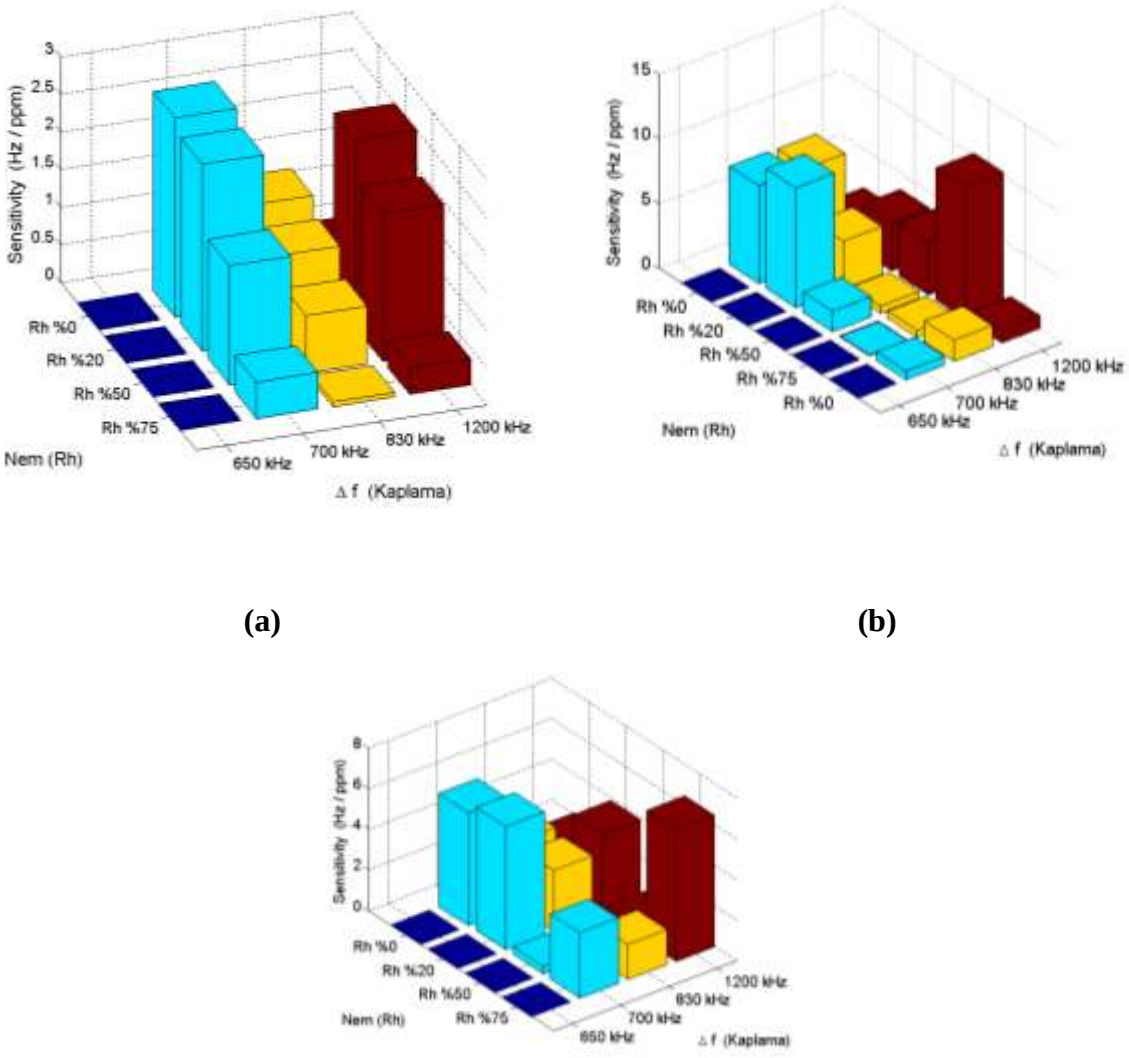
(b)



(c)

Şekil.82 a) Düşük, b) Orta, c) Yüksek frekans kaymasına sahip SAW sensörlerin farklı nem ortamlarında ve farklı konsantrasyonlardaki kloroforma karşı sensör tepkileri

SnO_2 nano yapıların kaplı olduğu SAW sensörlerin neme olan tepkilerinin çok yüksektir. Nem artışı ile kloroform, trikloretilen gibi gazlara karşı elde edilen sensör tepkileri azalmakta ve kaybolmaktadır. Bu nedenle sensitivite hesapları sadece etanol, metanol ve propanol için yapılmıştır. Şekil 83'te etanol, metanol ve propanol için sensitivite bar diyagramları görülmektedir. Bar diyagramlarının değerlerinden de anlaşılacağı üzere değişim oldukça az ve nem artışına paralel olarak sensitivitede düzenli bir artış ya da azalma görülmemektedir. Bu nedenle bu yapıların nem dışında ölçülen diğer gazlar için sensör olarak kullanımı mümkün gözükmemektedir.



Şekil.83 a) metanol b) propanol c) etanol sensitivite bar diyagramları

4.2.3 TiO_2 kaplı SAW'ların Sensör Sonuçları

TiO_2 nano yapıların sensör karakteristikleri ZnO'ya benzer özellik göstermektedir. Sensör tepkileri düşük, orta ve yüksek frekans kaymaları için farklı karakteristik göstermektedir. Sensör tepkileri, Şekil 68c'de verilmiş olan kayıp-iletkenlik, frekans kayması-iletkenlik eğrisi ilişkilendirilerek irdelendiğinde, Şekil 68'de verilen eğrinin ZnO sonuçlarında olduğu gibi üç ana bölgeye ayrılabildiği görülebilir.

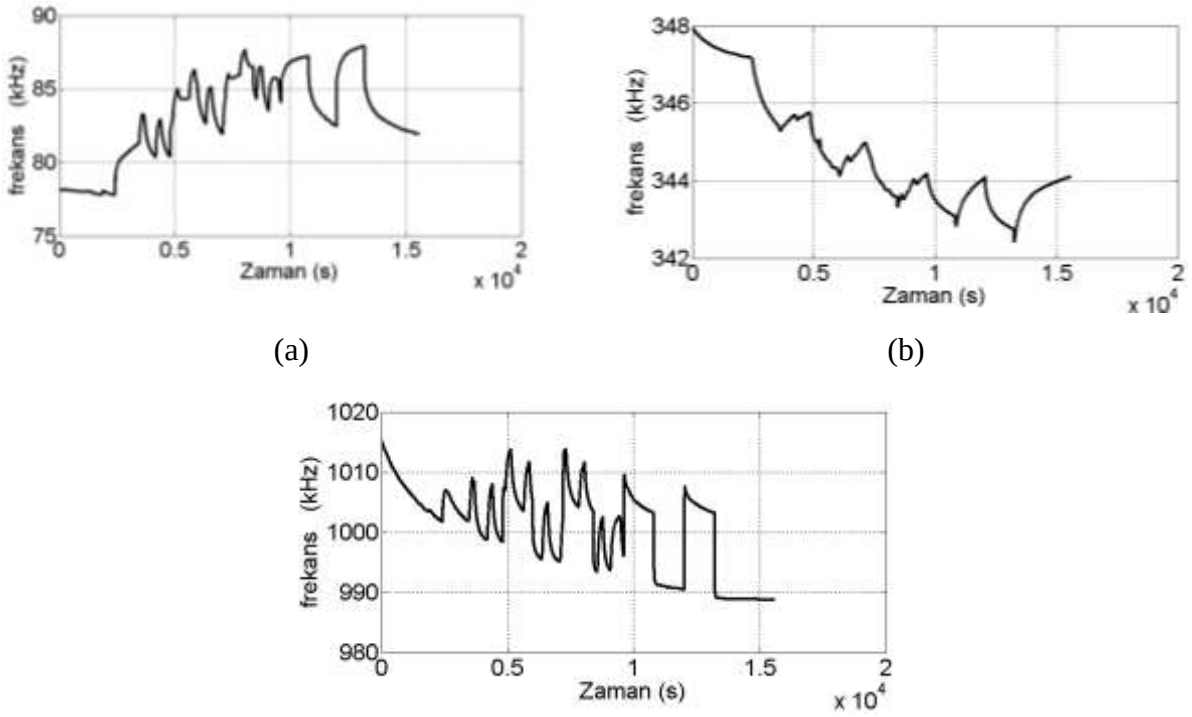
Bu bölgeler;

- Düşük frekans kaymasının oluştuğu bölge; 0- ~600kHz aralığında,
- Orta frekans kaymasının oluştuğu bölge; ~600- ~900kHz aralığında,

- Yüksek frekans kaymasının oluştuğu bölge; ~900- ~1700kHz ve üzeri.

olarak sınıflandırılabilir.

Nano yapılı TiO_2 kaplı tüm sensörlerin etanole olan tepkileri düzenli bir sensör cevabı karakteristiği göstermediğinden değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Şekil 84 a) düşük b) orta c) yüksek frekans kayması bölgelerindeki etanol tepkileri gösterilmiştir.

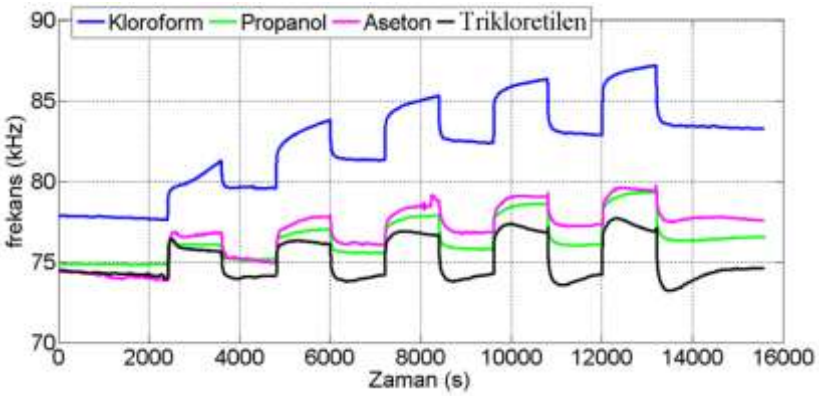


(a) (b)

(c)

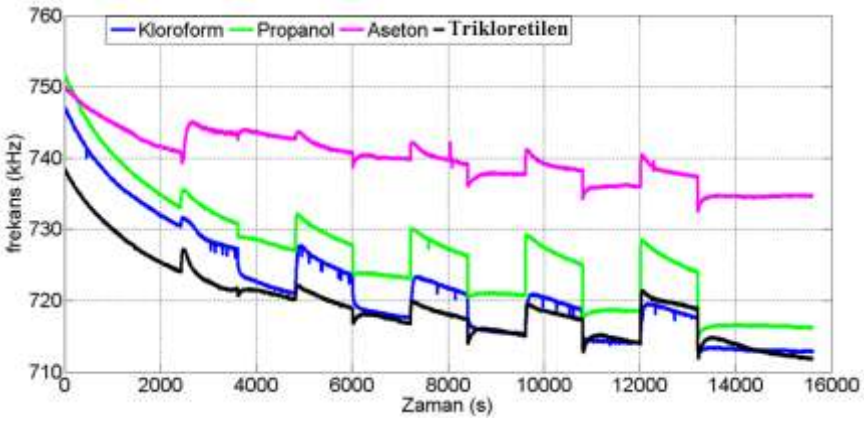
Şekil.84 a) düşük **b)** orta **c)** yüksek frekans kayması bölgelerindeki etanol tepkileri

Düşük frekans kaymasının olduğu bölgelerde sensör tepkisi ağırlıklı olarak, film tarafından ad/absorblanan kütle ve iletkenlikteki değişim $(\Delta f_m + \Delta f_\sigma)$ üzerinden gerçekleşmektedir. Ancak filmi oluşturan nano yapıların birbirine temas noktalarının az olması nedeni ile sensör tepkisinin ağırlıklı olarak ad/absorblanan kütleden kaynaklandığını söylemek mümkündür. Şekil 85'te düşük frekans kaymasına sahip SAW sensörün kloroform, propanol, aseton ve trikloretilen için elde edilen sensör tepkileri görülmektedir.



Şekil.85 Düşük frekans kaymasına sahip SAW sensör için elde edilen sensör tepkileri

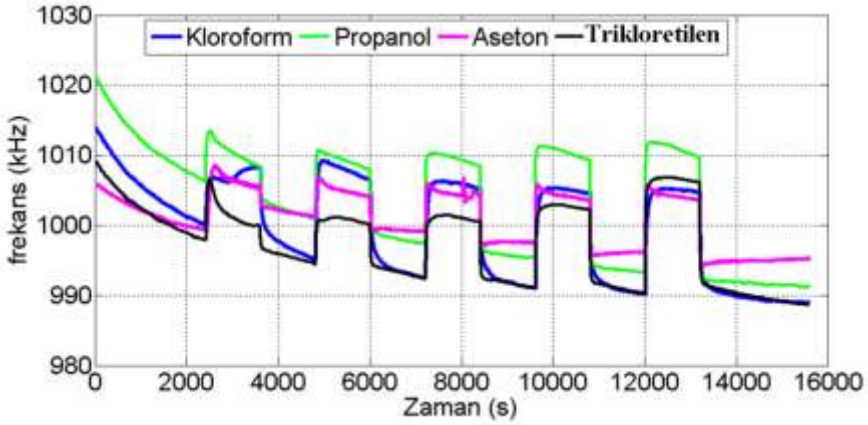
Orta seviyede frekans kaymasının olduğu bölgelerde sensör tepkisi ise $(\Delta f_m + \Delta f_\sigma - \Delta f_G)$ her üç etkinin toplamı şeklinde olmaktadır. Ancak kütle ve elektriksel etkilerden etki filmin elastitiyesinden baskın karakterdedir. Düşük gaz konsantrasyonlarında ise tepki algılama mekanizması $\Delta f_m + \Delta f_\sigma \approx \Delta f_G$ şeklinde oluşmaktadır. Bu nedenle düşük konsantrasyonlarda tepki oldukça düşük hatta sönümlenmiş olarak gözükmektedir. Konsantrasyon arttıkça tepki algılama mekanizması $(\Delta f_m + \Delta f_\sigma) > \Delta f_G$ şeklinde oluşmakta buna bağlı olarak pozitif yönde bir tepki görülmektedir. Şekil 86'da orta seviyede frekans kaymasına sahip TiO_2 nano yapıların kaplı olduğu SAW sensörün gaz tepkileri görülmektedir.



Şekil.86 Orta seviyede frekans kaymasına sahip SAW sensör tepkileri

Yüksek frekans kaymasının oluştuğu bölgelerde ise tepki $(\Delta f_m + \Delta f_\sigma - \Delta f_G)$ her üç etkinin toplamı şeklinde olmakla ve sensörlerin tepkileri pozitif yönde oluşmaktadır. Bu bölgede oluşan sensör tepkisi üzerinde, iletkenlikten kaynaklanan etki diğer bölgelere göre daha yüksek olmaktadır. Şekil'87 de yüksek frekans kaymasına sahip SAW sensör için elde edilen sensör tepkileri görülmektedir.

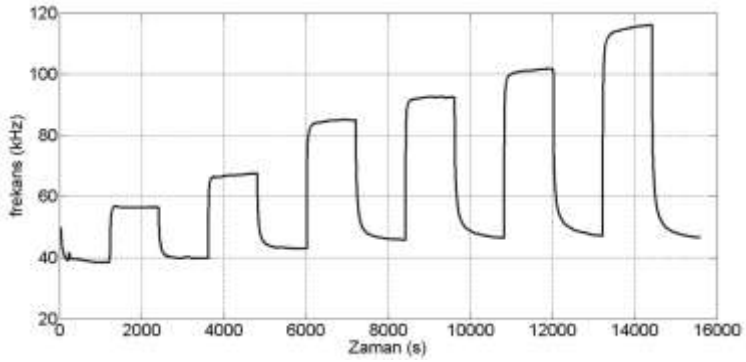
Her üç bölge algılama özellikleri bakımında irdelendiğinde, yüksek frekans bölgesi dışında seçicilik söz konusu olmamaktadır. Ancak yüksek frekans kaymasının oluştuğu bölgelerde propanol tepkisi diğer gazlara göre daha yüksek oluşmaktadır.



Şekil.87 Yüksek frekans kaymasına sahip SAW sensör için elde edilen sensör tepkileri

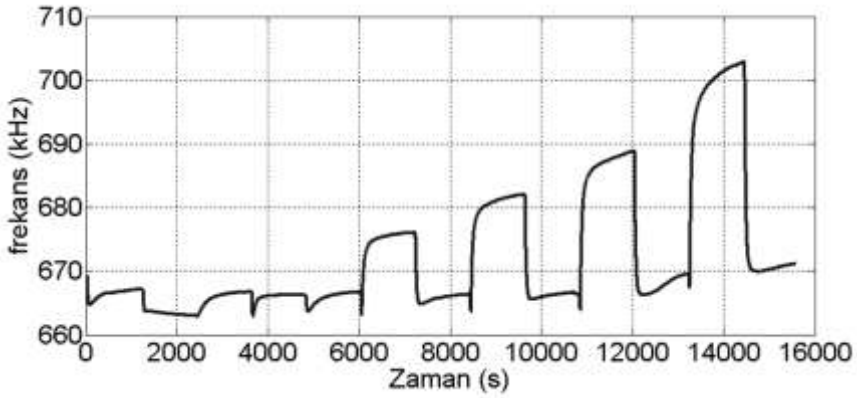
4.2.3.1 TiO_2 kaplı SAW Sensörlerin Nem Tepkileri

TiO_2 nano yapılı SAW sensörlerin nem değişimlerine olan tepkileri kaplama miktarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Düşük frekans kaymasının gerçekleştiği kaplamalarda algılama mekanizması ağırlıklı olarak ab/adsorblanan nemin kütlesinden kaynaklanan etkilerden oluşmaktadır. Bu nedenle neme olan sensör cevap süresi oldukça kısadır. Bu durum Şekil 88'de TiO_2 nano yapıların kaplanması ile oluşmuş 40kHz'lik bir frekans kaymasına sahip SAW'un nem değişimlerine (% 10, 30, 40, 50, 60, 75 RH) olan tepkisi görülmektedir.



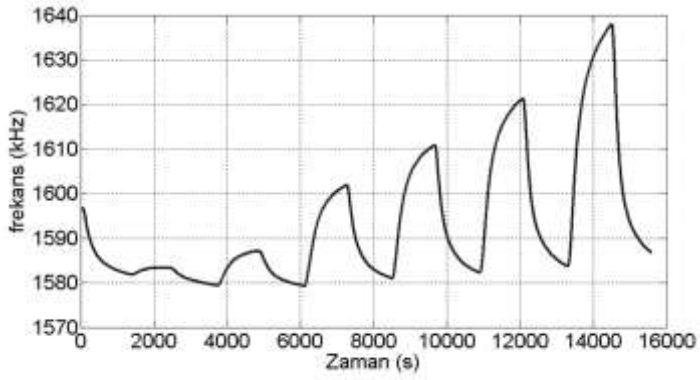
Şekil.88 40kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'ın nem değişimlerine olan tepkisi

SAW yüzeyine oluşturulan TiO_2 miktarının artırılması elde edilen sensör yapılarının nem değişimlerine tepkileri gaz değişimlerine olan tepkilerine paralellik göstermektedir. Orta seviyede frekans kayması oluşturacak şekilde kaplama işlemi gerçekleştirilmiş SAW 'larda nem tepkileri üzerinde filmin elastitiyesinden gelen etkiler düşük nem oranlarındaki tepkiyi örtmektedir. Nem oranının artırıldığı bölgelerde ise ab/adsorblanan nemin kütlesinden kaynaklanan etkiler ile elastitiyesinden gelen etkiler arasındaki fark tepkiyi oluşturmaktadır. Bu durum Şekil 89'da görülmektedir. Bu nedenle düşük frekans kaymasındaki nem tepkisi orta seviyedeki frekans kaymasındaki tepkiden daha yüksektir. (Bkz Şekil 88 ve 89)



Şekil.89 Yaklaşık 650kHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'un neme tepkisi

Kaplama frekansı kaymasının 900kHz'den daha yukarıya artırılması durumunda ise algılama mekanizması üzerinde ad/absorblanan kütle baskısı artmaktadır. Şekil 90'da yaklaşık 1,5MHz kaplama frekansı kaymasına sahip SAW'un nem tepkisi görülmektedir. Bu tepki Şekil 88 ve 89'da gösterilmiş olan tepkilerden daha yavaş (cevap süresi uzun), sensör cevabı büyüklüğü ise Şekil 88'de gösterilmiş olan tepki kadardır. Bu durum; algılama mekanizmasının $\Delta f_m + \Delta f_\sigma - \Delta f_G$ şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, kütleden gelen etki (Δf_m) absorblama hızı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, absorbsiyon hızının da tepkinin hızlı ve/veya yavaş olacağı üzerinde belirleyici rol oynayabileceği göz ardı edilmemelidir.

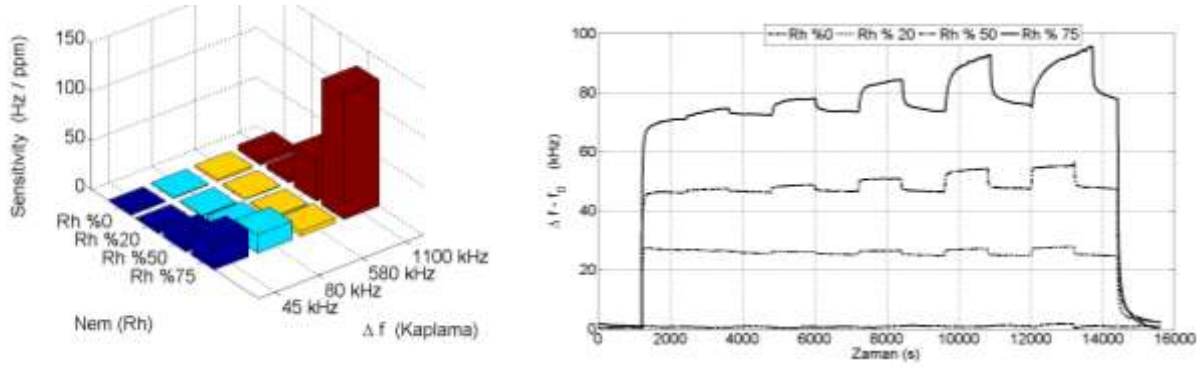


Şekil.90 Yaklaşık 1.5MHz kaplama frekansı kaymasına sahip TiO_2 kaplı SAW'un nem tepkisi

4.2.3.2 TiO_2 kaplı SAW Sensörlerin Gaz Algılaması Üzerindeki Nem Etkisi

Farklı nem değerine sahip ortamlarda gerçekleştirilen gaz ölçümlerinde ise nem, sensörlerin tepkileri üzerinde, öteleme etkisi, nem artışına paralel olarak sensör tepkisinde azalma veya artma şeklinde etki etmektedir. Sensör üzerinde gerçekleşen bu etkilerin sensör üzerinde oluşumu, ölçülen gaza ve kaplama kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

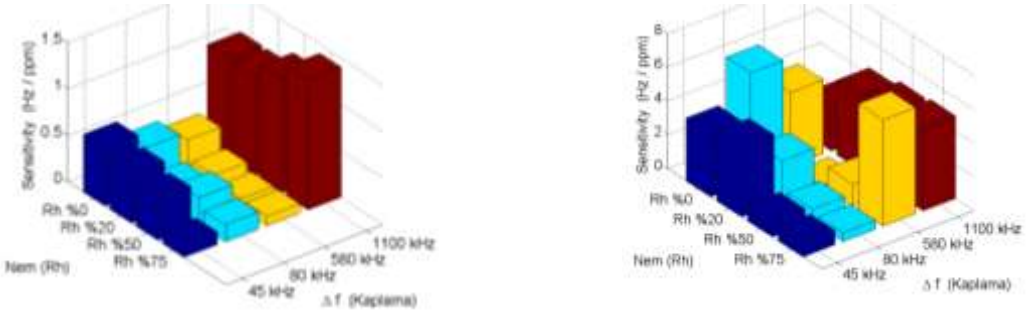
TiO_2 kaplanmış SAW sensörler ile gerçekleştirilen toluen ölçümlerinde nem artışı ile birlikte toluene olan sensör tepkisi de artmaktadır (Bkz. Şekil 91. a). SAW üzerindeki kaplama (600-900kHz aralığında) miktarının artırılması durumunda ise elastitiye etkisi kendisini göstermeye başladığından nem tarafından oluşturulan bu etki baskılanmaktadır. Kaplama kalınlığının (900-1700kHz aralığında) yeterince artırılması durumunda ise oluşan tepki ağırlıklı olarak absorblanan kütleden kaynaklı hale gelmekte, elastitiye etkisi azalmaktadır. Şekil 91.b'de farklı frekans kaymalarına sahip SAW sensörlerin toluenin farklı nem seviyelerindeki ölçümlerinde elde edilen sensitivite değişimleri bar diyagram olarak görülmektedir.



a b

Şekil.91 a) Toluen için sensitivite bar diyagramları b) 45kHz kaymasına sahip SAW sensörlerin farklı nem ortamlarında Toluen karşı sensör tepkileri

Kloroform ölçümlerinde ise nem, sensör tepkisini azaltmakta RH %75 civarında ise sensör tepkisi tamamen kaybolmaktadır. 900-1700kHz aralığındaki sensörlerin sensitivitelerinde kısmi bir artış görülmektedir (Bkz Şekil 92. a). Propanol ölçümünde de benzer karakteristik görülmektedir. Nem artışının sensör tepkisi üzerindeki etkisi kloroforma göre daha keskin olup düşük frekans kaymaları bölgelerinde sensör tepkisi keskin şekilde azalmaktadır. Orta seviyedeki frekans kaymaları bölgelerinde ise tepki nem artışı ile düzensizleşmektedir. Yüksek frekans kaymalarının oluştuğu bölgede ise sensörün sensitivitesindeki artışı oldukça yavaştır. Bu durum, Şekil 92.b'deki sensitivite bar diyagramında görülebilir. Ayrıca nem artışı, sensörün cevap ve geri dönüşüm süresini de artırmaktadır. Bu nedenle sensörün karakteristik tepkisi nem artışı ile bozulmaktadır.

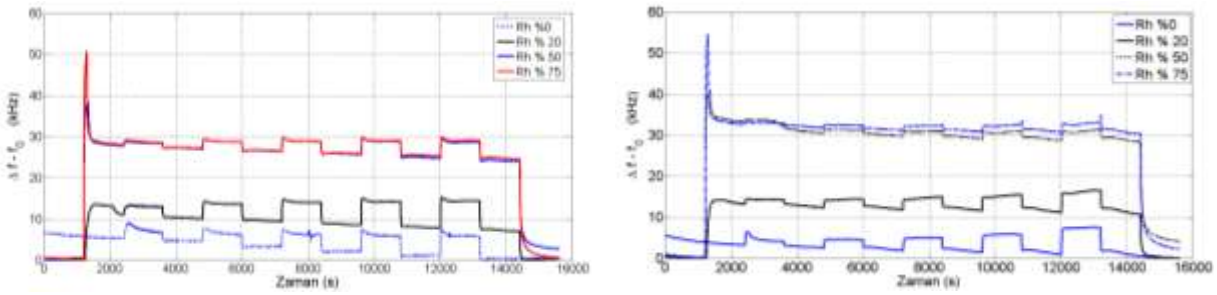


(a) (b)

Şekil.92 a) Kloroform b) propanol sensitivite bar diyagramları

Aseton ve trikloretilen ölçümlerinde ise, sensitivite büyüklüğü ölçülen diğer gazların değerlerinden düşüktür. Nem artışına paralel olarak sensör tepkisi büyüklüklerinde azalma meydana gelmekte fakat bu azalma sensör karakteristik tepkisini bozmamakta, sensörün

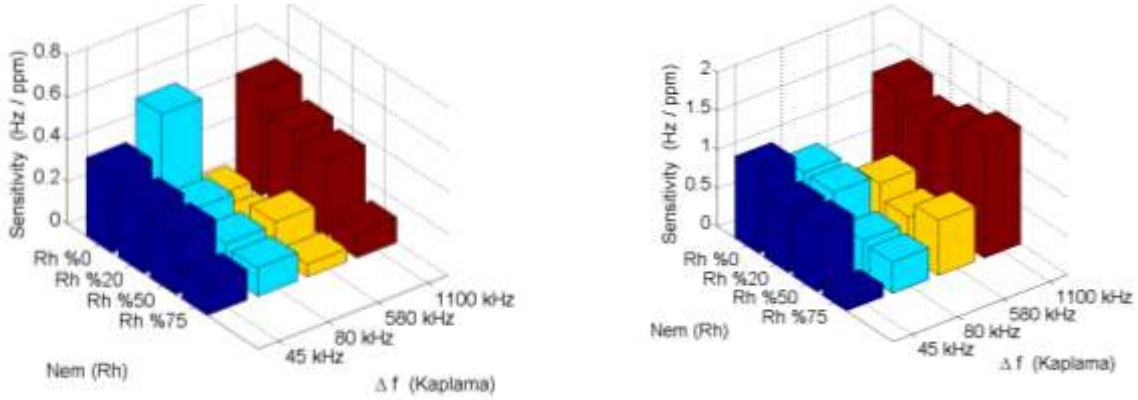
cevap veya geri dönüşüm süresini fazla etkilememektedir. Farklı nem seviyelerinde 45kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün aseton ve trikloretilene olan tepkileri Şekil 93'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil.93 45kHz frekans kaymasına sahip SAW sensörün **a)** aseton ve **b)** trikloretilene olan tepkileri

Nem hemen hemen tüm bölgelerdeki sensörlerin tepkilerinde dolayısı ile sensitivitelerini azaltıcı yönde etkilemektedir. Sadece yüksek frekans kayması bölgesinde Triklor etilen için elde edilen sensitivite değeri üzerinde kısmi bir artış görülmektedir. Bu durum Şekil 94 üzerinde görülmektedir.



(a) (b)

Şekil.94 a) Aseton b) Trikloretilen sensitivite bar diyagramları

4.3 Veri İşleme

Aynı kaplama malzemesinin farklı miktarlarda kullanılmasının SAW sensör üzerinde farklı frekans kaymalarına neden olduğu önceki bölümlerde ifade edilmişti. Ayrıca, farklı frekans kaymalarına sahip SAW sensörlerin aynı kaplama malzemesi kullanılsa bile algılama mekanizmasında baskın olan etkilerin farklı olabileceği önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu farklılık, aynı kaplama malzemesinden ve farklı frekans kaymalarına sahip SAW sensörlerden oluşmuş bir dizinin karakteristiğinin farklı olabileceği durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle oluşturulan sensör yapılarının verilerinin de irdelenmesi gerekmektedir. Tez kapsamında gerçekleştirilen veri işleme çalışmaları, aynı malzeme kullanılarak oluşturulmuş sensör dizisi elemanlarının birbirinden ne kadar farklılaştığının ortaya konulmasını amaçlamaktadır.

Bu kapsamda, farklı kaplama bölgelerine ait sensörlerden oluşturulmuş dizinin verileri ölçülen gaz uzayını ne kadar yüksek doğrulukta tanımlayabildiği sorusuna cevap aranacaktır. Yüksek doğrulukta tanımlamak; oluşturulan sensör yapılarının her gaz için farklı bir karakteristik tepki oluşturması demektir. Diziyi oluşturan sensörlerin her gaz için benzer karakteristikte veri üretmesi, oluşturulan sensör dizisinin ölçülen uzayı doğru şekilde tanımlayabilme olasılığını azaltmaktadır. Bu nedenle sensör dizisi elemanlarının her birinin birbirinden farklı sensör davranışı oluşturması istenen bir durumdur.

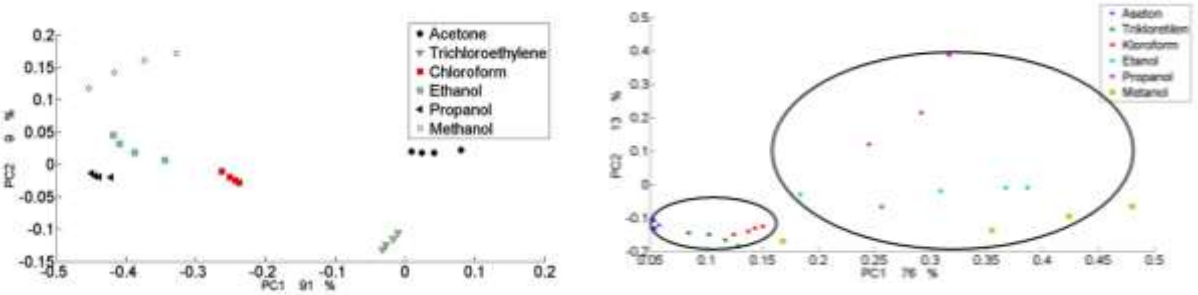
Sensörlerin ölçülen gaz uzayı ne kadar doğru tanımlayabildiği ve karakteristik olarak birbirinden ne kadar farklı olduğu sorularının cevapları PCA ve HCA yöntemleri kullanılarak araştırılacaktır. Kullanılacak bu veri işleme yöntemlerine ait detaylar Bölüm 2.3'de verilmiştir.

4.3.1 ZnO Verilerinin Değerlendirilmesi

ZnO verilerinin incelenmesi için Şekil 75'de irdelenmiş sensörlerin tepkileri PCA hesaplamaları için veri seti olarak kullanılmıştır. Veri setinin bu şekilde seçilmesinin nedeni,

kaplama frekansları ve kayıp parametreleri dikkate alınarak oluşturulan tüm bölgeleri örnekleyecek veri setinin oluşturulmasıdır.

Elde edilen veri setinin RH %0 için gerçekleştirilen PCA hesaplamalarında alkoller ve diğer gazlar farklı bölgelerde konumlanmaktadırlar. Ayrıca, ölçülen tüm gazlar PCA grafiği üzerinde farklı bölgeleri işgal etmektedirler. Herhangi bir iç içe girişim gözlemlenmemektedir. Bu durum Şekil 95.a'da görülmektedir. Ortama nem verildiğinde alkoller ve diğer gazlar PCA grafiği üzerinde farklı bölgelerde konumlanmaktadır. Ancak alkoller daha geniş bir alana saçılmakta ve tüm alkol grubu gazlar iç içe karışmaktadır. Öte yandan trikloretilen, kloroform ve aseton birbirlerine yaklaşmakta ancak PCA grafiği üzerinde ortak alanı işgal etmemektedirler.

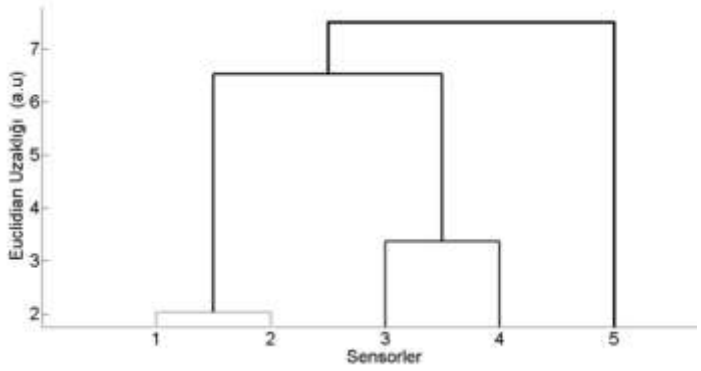


a b

Şekil.95 ZnO için elde edilen PCA grafiği a) Rh % 0 [127] b) Nemli ortam.

Sensör verileri açısından gerçekleştirilen incelemede, oluşturulan sensör dizisinin verileri üzerinden gerçekleştirilen PCA analizi ile ölçülen gazların kimliklerine göre ayırımı büyük oranda gerçekleştirilebilmekte. Dolayısı ile ölçümü yapılan gaz uzayına her bir sensörün tepkisi farklı karakterde oluşmaktadır. Bu nedenle sensör dizisinin karakteristik cevabı her gaz için farklı olmaktadır.

Her bir sensörün diğerinden ne kadar farklı ve/veya benzediği araştırılmak istenirse HCA hesaplamalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. HCA hesaplamalarında kullanılan veri seti PCA ile aynıdır. ZnO için gerçekleştirilen HCA sonucu Şekil 96'daki dendogramda gösterilmiştir.



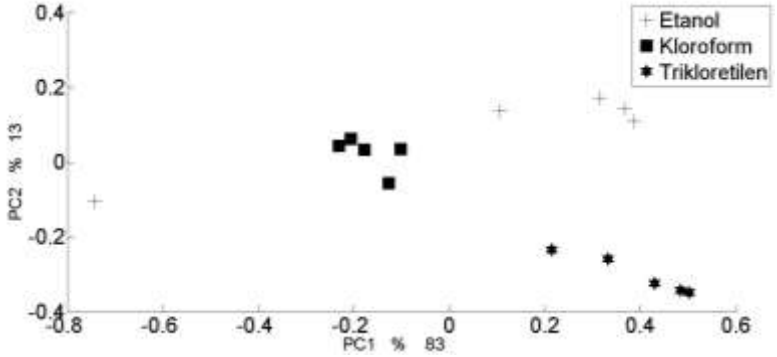
Şekil.96 ZnO için gerçekleştirilen HCA sonucu (dendogram)

Şekil üzerinde, x- eksenindeki sensörlerin kaplama kalınlıkları sırası ile 139, 151, 419, 1390 ve 2400kHz'dir. 1. ve 2 sensör, 3. ve 4. sensör ayrı ayrı grup oluşturmaktadırlar. 5. sensör ise bu dört sensörün oluştuğu gruba sonradan eklenmektedir. Sensörlerin, Bölüm 4.2.1 de yapılmış olan gruplamada hangi bölgede oldukları dikkate alınırsa, elde edilen bu dendogram Bölüm 4.2.1 de yapılmış olan ayrımı doğrulamaktadır.

4.3.2 SnO_2 Verilerinin Değerlendirilmesi

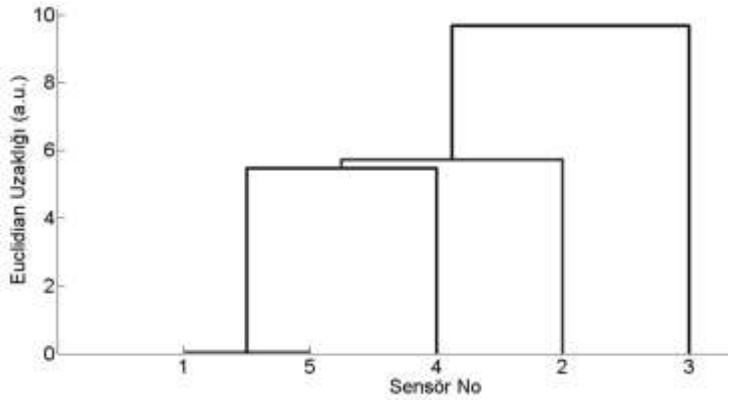
SnO_2 nano yapılarla kaplanmış SAW sensörlerin tepkileri Bölüm 4.2.2.1 ve 4.2.2.2 de irdelenmiştir. Bu bölümlerden de görüleceği üzere sensör karakteristikleri elastitiyeden gelen etkiler ve test edilen ortamın neminden çok fazla etkilenmekte ve bozulmaktadır. İdeal sensör tepkileri RH % 0 da elde edilebilmektedir. Nemin % 20, 50 ve 75 olduğu durumlarda gerçekleştirilen sensör ölçümlerinde sensörlerin neme olan tepkileri çok yüksek olduğundan ve nemden olumsuz etkilendiğinden PCA ve HCA çalışmalarında sadece Rh % 0 için elde edilen veriler kullanılmıştır.

PCA analizlerinde ölçülen gazlardan sadece etanol, kloroform ve trikloretilen PCA gösterimi üzerinde birbirinden ayrılabilmektedir. PCA hesaplarına etanol, propanol ve metanolün dahil edilmesi durumunda tüm gaz grupları PCA gösterimi üzerinde iç içe girmektedir. Şekil 97'de etanol, kloroform ve trikloretilenden elde edilen PCA grafiği görülmektedir.



Şekil.97 Etanol, kloroform ve trikloretilenden elde edilen PCA grafiği

Sensörlerin birbirinden karakteristik olarak ne kadar farklı olduğunun belirlenmesi için gerçekleştirilen HCA hesaplamalarında da elastitiyeden gelen bozucu etkiler kendini göstermektedir. HCA gösteriminde, sensörlerin oluşturdukları gruplanmalar kaplama kalınlığına bağlı olarak şekillenmemektedir. Bu durum elastitiyeden gelen etkilerin tüm kaplama kalınlığı bölgelerinde baskın olabilmektedir. Şekil 98'de SnO_2 kaplı SAW sensörlerden elde edilen veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiş HCA sonucu görülmektedir. Bu analizde kullanılan sensörlerin kaplama frekansları 200, 650, 750, 830 ve 1200kHz dir.

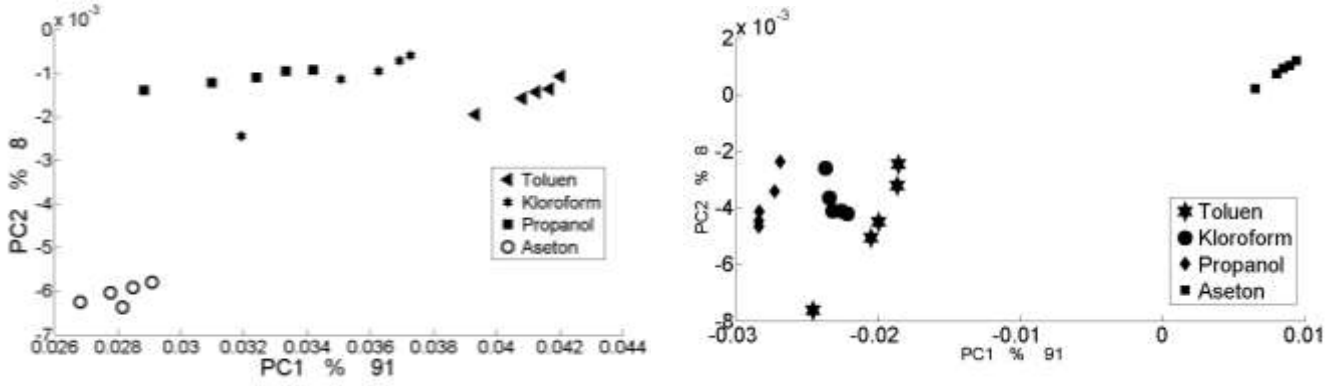


Şekil.98 SnO_2 kaplı SAW sensörlerden elde edilen veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiş HCA sonucu

4.3.3 TiO_2 Verilerinin Değerlendirilmesi

TiO_2 nano yapılar kaplanarak oluşturulmuş SAW sensörlerden elde edilen veriler incelendiğinde; elastitiye etkisi ~600 - ~900Khz aralığında kendisini göstermekle birlikte tepki yönünü değiştirecek büyüklükte olmamaktadır. Bu etki sadece sensör tepkisinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bölüm 4.2.3'de oluşturulmuş olan bölgelerden alınan örnek sensörlerin verileri, ölçülen gaz uzayı hakkında bilgi oluşturabilecek nitelikte olabilmektedir.

Nemin etkisi dikkate alındığı durumda ise PCA grafiği üzerinden gazların bulundukları bölgelerde değişim olmakla birlikte gazların işgal ettikleri alanlar birbiri ile örtüşmemektedir. Bu durum ölçülen gazların kimlikleri hakkında bilgi elde etmek için yeterli bir sonuçtur. Şekil 99 a) Rh % 0 Nem ortamında b) RH % 50 Nem ortamında gerçekleştirilen gaz ölçümlerinden elde edilen PCA sonuçları görülmektedir.

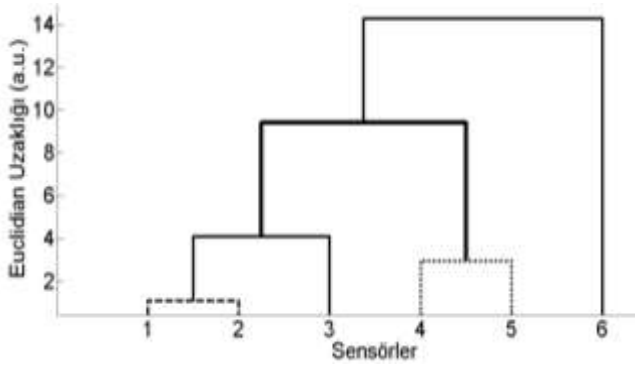


(a) (b)

Şekil.99 a) Rh %0 Nem ortamında b) Rh % 50 Nem ortamında gerçekleştirilen gaz ölçümlerinden elde edilen PCA sonuçları

Sensörlerin birbirinden karakteristik olarak ne kadar farklı olduğunun belirlenmesi için gerçekleştirilen HCA hesaplamalarında ise elde edilen sonuç ZnO'ya benzerdir. Şekil 100'de elde edilen HCA sonucu gösterilmiştir. HCA grafiği üzerinde benzer karakteristikte olan sensörler grup oluşturmaktadır. 1. ve 2. Sensörler, Bölüm 4.2.3'de verilen düşük frekans kayması bölgesini, 3. ve 4. sensörler orta seviyede frekans kayması bölgesini ve 5. sensör de

yüksek frekans kayması bölgesini temsilen HCA hesaplamasına dahil edilmiştir. Hesaplamalara dahil edilen sensörlerin frekans kayması sırası ile 45, 90, 330, 580 ve 1100kHz dir.



Şekil.100 TiO_2 nano yapıların kaplı olduğu SAW sensörleri için elde edilen HCA sonucu

5 SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu bölümde tez, kapsamında SAW transduser üzerinde, nano boyutlu film olarak üretilen ZnO, SnO_2 ve TiO_2 yapılarının üretim sonuçları, sensör özellikleri değerlendirilecek, gerçekleştirilen bu çalışmanın literatüre olan katkısı vurgulanacaktır**.**

5.1 Metal Oksit Yapıların Üretimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Metal oksit yapılarının elde edilmesinde kullanılan yöntemler Bölüm 2.2.3'de verilmiştir. Metal oksit yapılı gaz sensörü araştırmalarında bu yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Filmin iletkenliğindeki değişimin ölçülmesine dayalı sensörlerin araştırılmasında film kalınlığı 1- 2µm veya daha fazla olabilmektedir. Bu nedenle oluşturulan yapılar birbirine tamamen temas edebilmekte, transduser elektrotları arasında iletim sağlanmaktadır. Ancak, SAW uygulamalarında, film kalınlığı nm boyutlarında olmak zorundadır. Aksi takdirde SAW'un titreşimi durmaktadır. Bu nedenle literatürde RF-Sputter tekniği yoğun olarak kullanılmaktadır. RF sputter tekniği diğer tekniklerle karşılaştırıldığında oldukça pahalıdır. Bu nedenle kaplama işlemlerinde kimyasal proseslerde olduğu gibi Sol-Gel tekniği de tercih edilen yöntemlerdendir.

Tez çalışmasında alternatif olarak Sol-Gel yöntemi için kullanılan çözelti spin-coater yerine ES yöntemi kullanılarak film tabakası elde edilmiştir. Bu şekilde yüzeye kaplanan madde miktarı kontrol edilebilir hale gelmiştir. Oksit formlu filmlerin elde edilmesinde uygulanan bu yöntem literatüre önemli bir katkıdır.

ES kullanılarak oluşturulan metal oksit yapıların boyutlarının da kontrol edilebilmesi mümkündür. Kullanılan çözeltinin konsantrasyonu oluşacak nano yapının boyutları arasında doğrudan bir ilişki söz konusudur. Düşük konsantrasyonlu çözeltilerin kullanılması yüzeyde oluşacak çözeltinin homojenliğini destekleyecek, oluşacak nano yapıların daha küçük çaplı olmasını sağlayacaktır. Bu nedenle tez çalışmasında kullanılan çözelti konsantrasyonu düşük tutulmuştur. Ancak tavlama esnasında yüzeyde oluşan yapıların tekrar birbiri ile birleşme olasılığı söz konusudur. TiO_2 çalışmasında gerçekleştirilen ilk çalışmalarda SAW'un çalışmamasının nedeni budur. Bu nedenle nano-fiber elde etme yöntemlerinde kullanılan

1.300.000 zincir uzunluğuna sahip PVP molekülü çözeltiye eklenmiş ve oluşan nano-parçacıkların düşük çaplı olması sağlanmıştır. PVP konsantrasyonu ile çözelti konsantrasyonu arasındaki oran, oluşacak yapının nano parçacık veya nano tel olacağını belirlemektedir (Bkz. Şekil 65).

5.2 Metal Oksit Yapılı SAW Sensörlerin Elektriksel ve Sensör Özelliklerinin Değerlendirilmesi

SAW transduser üzerine metal oksit yapıların oluşturulması ile SAW sensörler oluşturulmaktadır. Oluşturulan filmin SAW'un karakteristiğini ve sensör cevabını nasıl değiştirdiği ise eşitlik 2.43 ve 2.44 de verilmiştir. Bu eşitlikler SAW yüzeyine kaplanan filmin SAW'un elektriksel özelliklerini, titreştiği rezonans frekansını ve dalganın iletiminde meydana gelen kayıp miktarını değiştireceğini göstermektedir. Bu nedenle kaplama kalınlığı veya frekans kayması ile iletkenlik ve kayıp arasında bir ilişkinin aranması gerekmektedir. Şekil 15'de verilen ve kaplama kalınlığı ile iletkenlik ve kayıp arasında ilişkiyi gösteren eğrinin kullanılan tüm kaplama malzemeleri için ortaya konulması gerekmektedir. Bu amaçla farklı kalınlıklarda gerçekleştirilen kaplamalar için I-V ve Network analizörü çalışmaları gerçekleştirilmiş olup ZnO, SnO_2 ve TiO_2 için bu eğriler oluşturulmuştur. ES yöntemi kullanılarak oluşturulmuş metal oksit kaplı SAW sensörler için elde edilen bu sonuçlar literatüre önemli bir katkıdır. Sensör yapılarının irdelenmesi ile elde edilmiş olan bu eğriler dikkate alınmış, sensör sonuçları ile sensörün elektriksel özelliği arasında ilişki aranmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan ZnO, SnO_2 ve TiO_2 için orta seviyede oluşturulmuş frekans kaymasına sahip SAW sensörlerin sensör özellikleri üzerinde elastitiye etkisi oldukça baskındır. Ancak düşük ve yüksek frekans kaymasının gerçekleştiği bölgelerde ise kütle ve elektriksel etkilerden gelen etkiler daha baskındır. SnO_2 için elastitiye etkisi hemen tüm bölgelerde baskındır. Bu nedenle tepki yönü genellikle ters yönde oluşmaktadır. Bunun başlıca nedeni oluşan nano yapıları birbirine bağlayan güçlü bir bağ yapısının oluşamamasıdır. Tavlama esnasında oksit yapıları çeşitli çaplarda ve küresel formlarda oluşmaktadır. Oluşan bu formları birbirine bağlayan güçlü bağlar olmadığından elastitiye etkisi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, elde edilen oksit yapıların iletkenlikleri literatür ile karşılaştırıldığında bu filmlerin iletkenlikleri de düşük seviyede oluşmaktadır.

Sensör özellikleri bakımında elde edilen sonuçlar irdelendiğinde; kaplama kalınlığı ile sensörlerin seçiciliği ve duyarlılığı değişmektedir. Bu durum sensitivite bar diyagramları değişimlerinde ve veri işlem çalışmalarında elde edilen PCA sonuçlarından kolaylıkla görülebilir.

Sensör özellikleri açısından irdelenmesi gereken bir diğer parametre de nem etkisidir. Hemen hemen tüm yapılar nem değişiminden oldukça etkilenmektedir. Ayrıca nemli ortamda gerçekleştirilen ölçümlerde nem, sensörlerin seçiciliğine ve duyarlılığına da etki etmekte, ağırlıklı olarak sensör cevabını ötelemektedir. ZnO kaplı yapılar için nem, sensitiviteyi artırmakta ancak SnO_2 ve TiO_2 için azaltmaktadır.

Nem, SnO_2 kaplı SAW'ların cevaplarını tamamen örtmektedir. Bunun nedeni, SnO_2 ile H_2O arasında suyun üzerinde bulunan OH^- grupları üzerinden absorbsiyon/desorpsiyon mekanizmasının gerçekleşiyor olmasıdır[131]. Bu mekanizma, SnO_2 yapılarının tarafından su moleküllerinin absorbe/adsorbe edilmesi şeklinde çalışmaktadır. Bu nedenle yüzeyde meydana gelen kütle artışı SAW'un frekansını değiştirmekte ve bir nem algılaması gerçekleşmektedir. Diğer gazlar için, absorbsiyon/adsorbsiyon mekanizması gerçekleşmekle birlikte yapıya giren gaz molekülü SnO_2 filmin elastitiyesini daha fazla etkilemektedir. Bu nedenle ters yönde sensör cevabı oluşmaktadır.

5.3 Veri İşlem Sonuçları

Sensör cevapları irdelendiğinde, sensör cevaplarının kaplama kalınlığına oldukça bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle, PCA hesaplamaları için farklı kalınlık bölgelerine ait sensör tepkileri giriş verisi olarak alınmıştır. Bu durumda Şekil 95, 97, ve 99'daki sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum aynı algılama malzemesi kullanılarak seçiciliği ve duyarlılığı farklı sensör yapılarının oluşturulabileceğini göstermektedir[127]. Bu durumu doğrulayan bir diğer sonuç ise HCA sonuçlarıdır. HCA hesaplamaları sonucu elde edilen dendogramlar üzerinde sensörler karakteristiklerine göre farklı eucliadian mesafelerinde konumlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. D. K. Schroder "Semiconductor Material and Device Characterization", McGraw Hill, New York, (1999) 1- 5
2. Nehad M. Tashtoush, PhD. Thesis, Concordia University Montreal Quebec Canada, (1996)
3. M. Penza, P. Aversa, G. Cassano, W. Wlodarski, K. Kalantar- Zadeh, "Layered SAW gas sensor withsingle-walledcarbonnanotube-basednanocompositecoating" Sensors and Actuatours B 127 (2007)-168-178
4. R. S. Falconer, R. Lec, J. F. Vetelino and Z. Xu, ,"Optimization Of a SAW Metal Oxide Gas Sensor",Ultrasonics Symposium, Vol 1 (1989) 585-590

5 Jong-Heun Lee, "Gas sensors using hierarchical and hollow oxide nanostructures: Overview", Review, Sensors and Actuators B 140 (2009) 319–336

6 Le Viet Thong, Nguyen Duc Hoa, Dang Thi Thanh Le, Do Thanh Viet, Phuong Dinh Tam, Anh-Tuan Le and Nguyen Van Hieu,, "On-chip fabrication of SnO_2-nanowire gas sensor: The effect of growth time on sensor performance", Sensors and Actuators B 146 (2010) 361-367

7 Nevin Taşaltın, Sadullah Öztürk, Necmettin Kılınç, Hayrettin Yüzer, Zafer Ziya Öztürk "Fabrication of vertically aligned Pd nanowire array in AAO template by electrodeposition using neutral electrolyte " Nanoscale Research V:5, 7,(2010), 1137-1143

8. Rayleigh, Lord Proc. London Math. Soc. 17,(1885) 4-11
9. W.S.Mortley UK Patent 988 102 (1963)
10. J.R. Rowen U.S. Patent 3 289 114 (1963)
11. R. M. White and F.W. Voltmer "Direct Piezoelectric coupling to surface elastic waves", Appl. Phys. Lett., 7, (1965), 314-316
12. http://www.mpdigest.com/issue/Articles/2007/june/triquint/Default.asp
13. http://www.freepatentsonline.com/6700300.html
14. D. S. Ballantine, R. M. White, S. J. Martin, A. J. Ricco, E. T. Zellers, G. C. Frye , H. Wohltjen, "Acoustic Wave Sensors " Academic Press, San Diego (1997)
15. D. K. Frederic, and A. B. Carlson, "Linear Systems in Comminication and Control" Wiley: Newyork (1971)
16. A. Arnau, Y. Jimmenez, T. Sogorb, "An Extended Butterworth-Van Dyke Model for

Quartz Crystal Microbalance Applications in Viscoelastic Fluid Media ",IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, V. 48, no. 5,(2001), 1367-1382

17. D. Morgan, "Surface Acoustic Wave Filters With Application to Electronic Communications and Signal Processing ",Elsevier Ltd (2007)
18. G. Tobalka, "Mixed Matrix Representation of SAW Transducers", IEEE trans., SU-26,(1979), 426-428
19. G. Kovacs, " A Generalized P-Matrix Model For SAW Filters", in Proc. of the 2003, IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 707–710, (2003)
20. http://edocs.soco.agilent.com/display/genesys2010/S-Parameters
21. http://www.sss-mag.com/pdf/an-95-1.pdf
22. http://en.wikipedia.org/wiki/S-parameters
23. ww.ece.unh.edu/courses/ece711/refrense_material/s_parameters/3TestSpars4Circuits.pdf
24. W. Soluch "Design of SAW Synchronous Resonators on ST Cut Quartz", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, V. 46, no. 5, (1999), 1324-1326
25. Manoj Kumar Ram, Venkat R. Bhethanabotla, " Sensors for Chemical and Biological Applications", CRC Press , Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742 (2010)
26. A. J. Slobodnik, E.D. Conway, R. T. Delmonico, "Microwave Acoustic Handbook, Vol 1a Surface wave velocities; National Technical Information Service, U. S. Dept. of Commerce(1973).
27. S. J. Martin, A. J. Ricco, T.M Niemczyk, G. C. Frye,"Characterization of SH acoustic plate mode liquid sensors", Sensors And Actuators, 20, (1989) 253-268
28. R. M. White, "Surface elastic waves", IEEE Proc. 58 (1970) 1238-1276
29. A. Wixforth, "Interaction of surface Acoustic Waves, Electrons, and Light", International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 10. No.4 (2000) 1193-1227,World Scientific Publishing Company
30. C.C.W. Ruppel, T.A. Fjeldly ," Advances in Surface Acoustic Wave Technology, Systems and Applications", Vol. 2 (2001) World Scientific Publishing Company

31. A. J. Ricoo, S.J.Martin "Thin metal film characterization and chemical sensors: Monitoring Electronic conductivity, Mass loading and Mechanical Properties with Surface Acoustic Wave Devices", This Solid Films, 206 (1991) 94- 101
32. J. D. Ferry "Viskoelastic Properties of Polymers", 3rd Ed., (1980) Wiley New york
33. N M. Tashtoush "SAW humdity Sensor and an Enviromental Electronic Nose System", Phd Thesis, (1996) , Concordia University, Quebec, Canada
34. J. D. Ferry,"Viscoelastic properties of polymers", 3th Ed., (1980), Wiley, New York
35. A. J. Ricoo, " SAW Chemical Sensors: An expanding Role With global impact", The electrochemical Society Interface (1994), 38-44
36. Hua Bai and Gaoquan Shi, "Gas Sensors Based on Conducting Polymers", Review, Sensors (2007), 7, 267-307
37. Chengxiang Wang, Longwei Yin , Luyuan Zhang, Dong Xiang and Rui Gao " Metal oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors", Review, Sensors, (2010), 2088-2106
38. S. Öztürk, Yüksek Lisans Tezi, Fizik Bölümü, " Gaz Sensörü Uygulamaları için ZnO ve Katkılı ZnO Nanotellerin Üretilmesi", Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, (2009).
39. N. Barsan, U. Weimar, "Conduction Model of Metal Oxide Gas Sensors", Journal of Electroceramics, 7, (2001), 143–167
40. I. Simon, N. Barsan, M. Bauer. U Weimar "Micromachined metal oxide gas sensors:opportunities to improve sensor performance", Sensors and Actuators B 73 (2001) 1-26
41. H. Nanto, T. Minami, S. Takata, J. Appl. Phys. 60 (1986) 482-484
42. G. Faglia, P. Nelli and G. Sberveglieri, Sens. Act. B Chem. 19 (1994) 497 – 499
43. A. Heilig, N. Barsan, U. Weimar,M. Schweizer-Berberich, J.W. Gardner,W. Gopel, Sens. Act. B Chem. 43 (1997) 45 - 51.
44. A.T. Nimal, Upendra Mittal, Mohan Singh, Mamta Khaneja, G.K. Kannan, J.C. Kapoor, Vinita Dubey, P.K. Gutch, Gobardhan Lal, K.D. Vyas, D.C. Gupta," Development of handheld SAW vapor sensors for explosives and CW agents " Sens. Act. B Chem. 135 (2009) 399 - 410.
45. Wang Wen, He Shitang, Li Shunzhou, Liu Minghua, Pan Yong," Enhanced sensitivity of SAW gas sensor coated molecularly imprinted polymer incorporating high frequency stability oscillator" Sensors and Actuators B 125 (2007) 422–427

46. Xiaosong Du, Zhihua Ying, Yadong Jiang, Zhongxiang Liu, Taojun Yang, Guangzhong Xie, "Synthesis and evaluation of a new polysiloxane as SAWsensor coatings for DMMP detection", Sensors and Actuators B: 134 (2008) 409-413

47. B. Hemphill, "Attenuation of surface waves on a piezoelectric coated with thin metal films," in Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 1972, pp. 340–342.

48. B. Hemphill, "Effect of a thin-film phase-transition metal on surface acoustic wave propagation," in Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 1984, pp. 1006–1010.

49. Fisher, B., Malocha, D, " Study of the Acoustoelectric Effect for SAW Sensors", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57,(2010), 698-706

50. Wieslaw P. Jakubik, Marian W. Urba´nczyk, Stanislaw Kochowski, Jerzy Bodzenta, "Palladium and phthalocyanine bilayer films for hydrogen detection in a surface acoustic wave sensor system", Sensors and Actuators B 96 (2003) 321–328

51. G. Korotcenkov, " Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice?", Materials Science and Engineering B 139 (2007) 1–23

52. N. Yamazoe, G. Sakai, K. Shimanoe, Catal. Surv. Asia 2003, 7, 63–75.

53.A. Z. Sadek, D. Buso, A. Martucci, P. Mulvaney, W. Wlodarski, and K. Kalantar-zadeh, "Titanium Dioxide-Based 64◦ YX LiNbO3 Surface AcousticWave Hydrogen Gas Sensors", Journal of Sensors, 2008, Article ID 254283

54. S.J. Ippolito, S. Kandasamy, K. Kalantar-Zadeh, W. Wlodarski," Layered SAW hydrogen sensor with modified tungsten trioxide selective layer " Sensors and Actuators B 108 (2005) 553–557

55. Daipayan Dasgupta and K. Sreenivas, "Frequency hopping due to acousto-electric interaction in ZnO based surface acoustic wave oscillator", Journal Of Applied Physics 110, 044502 (2011)

56. Nuri W. Emanetoglu, Jun Zhu, Ying Chen, Jian Zhong, Yimin Chen, and Yicheng Lu, "Surface acoustic wave ultraviolet photodetectors using epitaxial ZnO multilayers grown on r-plane sapphire", Applied Physıcs Letters, Vol:85 No:17 pp 3702-3704

57. P. H. Miller, Jr., The Electrical Conductivity of Zinc Oxide, Physical Review,(1941), Vol, 60, 890-895

58. M. Ozan ÖZER Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Universitesi, 2006

59. H. Chik, J. Liang, S. G. Cloutier, N. Kouklin, and J. M. Xu, Periodic array of uniform ZnO nanorods by second-order self-assembly, Applıed Physıcs Letters Vol 84, N. 17 (2004), pp 3376-3378

60. Chung-Yuan Ren, Shan-Haw Chiou, Chen-Shiung Hsue , "Ga-doping effects on electronic and structural properties of wurtzite ZnO", Physica B: Condensed Matter, Vol 349, Issues 1–4, 15 (2004), pp 136–142

61. A. Forleo, L. Francioso, S. Capone, P. Siciliano, P. Lommens, Z. Hens, Synthesis and gas sensing properties of ZnO quantum dots ,Sensors and Actuators B 146 (2010) pp. 111–115

62. L.F. Dong, Z.L. Cui, Z.K. Zhang, Gas sensing properties of nano-ZnO prepared by arc plasma method, Nanostruct. Mater. 8 (7) (1997) pp 815–823.

63. H. Gong, H. J.Q., J.H. Wang, C.H. Ong, F.R. Zhu, Nano-crystalline Cu-doped ZnO thin film gas sensor for CO, Sens. Actuators B 115 (2006) pp 247–251.

64. C. Li, Z. Du, H. Yu, T. Wang, Low-temperature sensing and high sensitivity of ZnO nanoneedles due to small size effect, Thin Solid Films 517 (2009) pp 5931– 5934

65. X.Y. Du1, Y.Q. Fu-, et all, "ZnO film for application in surface acoustic wave device", Journal of Physics: Conference Series 76 (2007) ,012035, pp 1-6

66. A. Z. Sadek, W. Wlodarski, K. Kalantar-zadeh, D. A. Powell, " H_2 and NO_2 Gas Sensors with ZnO Nanobelt Layer on 36° LiTaO3 and 64° LiNbO3 SAW Transducers", roceedings of the Fourth IEEE Sensors 2005 Conference, Irvine, CA, USA, 30 October - 3 November 2005.

67. Wu, Y.; Li, X.; Liu, J. H.; He, Y. N.; Yu, L. M.; Liu, W. H., "ZnO Nanomaterials Based Surface Acoustic Wave Ethanol Gas Sensor", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol 12, 8, pp. 6505-6509

68. S.P. Heluani, G. Braunstein, M. Villafuerte, G. Simonelli, S. Duhalde, " Electrical conductivity mechanisms in zinc oxide thin films deposited by pulsed laser deposition using different growth environments ", Thin Solid Films 515 (2006) 2379–2386

69. A.D. Mason, C.-C. Huang, S. Kondo, M.T. Koesdjojo, Y.H. Tennico, V.T. Remcho, J.F. Conley Jr. ," Synthesis; Functionalization; and Environmental Stabilization of ZnO nanobridge Transducers for Gas and Liquid-phase Sensing", Sensors and Actuators B, Vol 155, pp 245-252

70. Soumya Krishnamoorthy, Agis A. Iliadis, "Properties of high sensitivity ZnO surface acoustic wave sensors on SiO_2/(100) Si substrates", Solid-State Electronics 52 (2008) 1710–1716

71. Tsuneo Mitsuyu, Osamu Yamazaki, Kenzo Ohji, Kiyotaka Wasa, "Piezoelectric thin films of zinc oxide for saw devices", Ferroelectrics, Vol 42, Issue 1, (1982) , pp 233-240

72. M.C. Horrillo, M.J. Fern´andez, J.L. Fontecha, I. Sayago, M. Garc´ıa, M. Aleixandre, J. Guti´errez, I. Gr`acia, C. Can´e, "Optimization of SAW sensors with a structure ZnO–SiO_2–Si to detect volatile organic compounds ", Sensors and Actuators B 118 (2006) 356–361

73. A.Z. Sadek, W. Wlodarski, Y.X. Li, W. Yu, X. Li, X. Yu, K. Kalantar-zadeh, " A ZnO nanorod based layered ZnO/64° YX LiNbO3 SAW hydrogen gas sensor", Thin Solid Films 515 (2007) 8705–8708

74. M. Penza, A.Z. Sadek, P. Aversa, D.G. Mcculloch, W. Wlodarski, K.Z. Kalantar, SAW Gas Sensors with Metal Oxides Nanoplatelets Layers, Sensor Letters 2011 9, 2, 920-924.

75. Matthias Batzill , Ulrike Diebold, "The surface and materials science of tin oxide", Review, Progress in Surface Science 79 (2005) pp, 47–154

76. http://en.wikipedia.org/wiki/Tin_dioxide (07.08.2012)

77. Seiyama, T.; Kato, A.; Fujiishi, K.; Nagatani, M. A "new detector for gaseous components using semiconductive thin films". Anal. Chem. 1962, 34, 1502.

78. K. Ihokura and J. Watson, “The Stannic Oxide Gas Sensor Principles and Applications.” CRC Press, Boca Raton, FL, 1994.

79. T. A. Miller, S. D. Bakrania, C. Perez, M. S. Wooldridge," Functional Nanomaterials", Chapter 30, pp 1-24 ISBN: 1-58883-067-5 Copyright © 2006 by American Scientific Publishers

80. W. Göpel in “Sensors: A Comprehensive Survey”, Weinheim: VCH, 1992

81. V. M. Jiménez, A. R. González-Elipe, J. P. Espinós, A. Justo, and A. Fernández, Sens. Actuators B 31, 29 (1996)

82. W. Göpel and K. D. Schierbaum, " SnO_2 sensors: current status and future trends" Sens. Actuators B 26-27 (1995), pp. 1–12

83. N. Yamazoe, New approaches for improving semiconductive gas sensors, Sens Actuators B 5 (1991) 7–19.

84. W.-X. Li, C. Stampfl, M. Scheffler, Insights into the function of silver as an oxidation catalyst by ab initio atomistic thermodynamics, Phys. Rev. B 68 (2003) 165412.

85. B.L.M. Hendriksen, S.C. Bobaru, J.W.M. Frenken, Oscillatory CO oxidation on Pd(100) studied with in situ scanningtunneling microscopy, Surf. Sci. 552 (2004) 229.

86. H. Over, M. Muhler, Catalytic CO oxidation over ruthenium bridging the pressure gap, Prog. Surf. Sci. 72 (2003) 3.

87. L. Hozer, translation editor D. Holland, "Semiconductor Ceramics: Grain Boundary Effects." Ellis Horwood, New York; PWN-Polish Scientific Publishers, Warsaw, 1994.

88. C. O. Park and S. A. Akbar," Chemical and bio-ceramics " J. Mater. Sci. 38, 4611 (2003).

89. Barsan, N.; Weimar, U. Conduction Model of Metal Oxide Gas Sensors. J. Electroceram. 2001, 7, 143-167.

90. Ulrike Diebold ," The Surface Science of Titanium Dioxide " , Surface Science Report, 48, (2003), 53-229

91. Su Hui Lim, M S M Saifullah, Hazrat Hussain,WeiWei Loh and Hong Yee Low, "Direct imprinting of high resolution TiO_2 nanostructures " Nanotechnology 21 (2010) 285303 , pp 1-6

92. N. Ruzycki, G. S. Herman, L. A. Boatner, and U. Diebold, "Scanning tunneling microscopy study of the anatase (1 0 0) surface," Surf Sci., vol. 529, pp. 239-244, 2003.

93. M. C. Carotta et al., "Gas sensors based on semiconductor oxides: basic aspects onto materials and working principles," Mater. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 828, pp. A4.6.1 - A4.6.11, 2005.

94. Jyh Ming Wu, " Tin-Doped Rutile Titanium Dioxide Nanowires: Luminescence, Gas Sensor, and Field Emission Properties", Journal of Nanoscience and Nanotechnology Vol. 12, 1434–1439, 2012

95. Zachary Mark Seeley, Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, "Titanium Dioxide Thin Films for High Temperature Gas Sensors", Thin Solid Films 519 (2010) 434-438

96. A. Z. Sadek, D. Buso, A. Martucci, P. Mulvaney, W. Wlodarski, and K. Kalantar-zadeh "Titanium Dioxide-Based 64◦ YX LiNbO3 Surface AcousticWave Hydrogen Gas Sensors", Journal of Sensors Volume 2008, Article ID 254283, 5 pages doi:10.1155/2008/254283

97. M. Penza, A. Z. Sadek, H. D. Zheng, P. Aversa, D. G. McCulloch, K. Kalantar-zadeh, and W. Wlodarski, " SAW Gas Sensors with Titania Nanotubes Layers", SENSOR LETTERS Vol. 9,(2011), pp 1–4

98. John L. Vossen,Werner Kern, "Thin Film Processes II",Academic Press, Inc. 1250 Sixth Avenue, Sandiago, CA 92101, ISBN:0-12-72851-3 (alk. Paper)

99. http://www.study-on-line.co.uk/whoami/thesis/chap3.html (02.08.2012)

100. M. Penza, L. Vasanelli, "SAW NOx gas sensor using WO3 thin-film sensitive coating", Sensors and Actuators B 41 (1997) 31-36

101. http://en.wikipedia.org/wiki/Sputter_deposition

102. Orkun Durmuş, Vanadyum Oksit İnce Filmlerinin Sol – Jel Yöntemi İle Hazırlanması Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi İTÜ 2011

103. Paul Kebarle, Michael Peschke, " On the mechanisms by which the charged droplets produced by electrospray lead to gas phase ions, ", Analytica Chimica Acta 406 (2000) pp, 11–35

104. C. Tasaltin, I. Gurol, M. Harbeck, E. Musluoglu, V. Ahsen, Z.Z. Ozturk, Synthesis and DMMP sensing properties of fluoroalkyloxy and fluoroaryloxy substituted phthalocyanines in acoustic sensors, Sensors and Actuators B 2010, 150, 781- 787.

105. Andries P. Bruins, Review Mechanistic aspects of electrospray ionization Journal of Chromatography A, 794 (1998) 345–357

106. P. Kebarle, Y. Ho, in R.B. Cole (Editor), Electrospray Ionization Mass Spectrometry, Wiley, New York, 1997

107. Andries P. Bruins Review Mechanistic aspects of electrospray ionization Journal of Chromatography A, 794 (1998) 345–357

108. F. Bender, L. Wachter, A. Voigt, M. Rapp, Deposition of high quality coatings on SAW sensors using electrospray, Proc. IEEE Sens. 1 (2003) 115–119.

109. Bekir Mumyakmaz, Ahmet Özmen, Mehmet A. Ebeoglu, Cihat Tasaltin, Ilke Gürol " A study on the development of a compensation method for humidity effect in QCM sensor responses " Sensors and Actuators B 147 (2010) pp. 277–282

110. Ali Gulbag, Fevzullah Temurtas , Cihat Tasaltin, Zafer Ziya Ozturk, "A study on radial basis function neural network size reduction for quantitative identification of individual gas concentrations in their gas mixtures", Sensors and Actuators B 124 (2007) 383–39

111. Meral Demiralay,"Hiyerarşik Kümeleme Algoritmaları İle Veri Madenciliği

Uygulamaları", Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi (2005)

112. Hair, F., Anderson, R., Tatham, R. and Black, W. (1995) Multivariate Data Analysis with Readings, 5th ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall

113. http://en.wikipedia.org/wiki/Hierarchical_clustering (14.08.2012)

114.http://www.users.cs.umn.edu/~kumar/dmbook/index.php (14.08.2012)

115. Edit Pál, Viktória Hornok, Albert Oszkó, Imre Dékány," Hydrothermal synthesis of prism-like and flower-like ZnO and indium-doped ZnO structures", Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 340 (2009) , PP, 1–9.

116. Xiulan Hu, Yoshitake Masuda, Tatsuki Ohji and Kazum Kato, " Rapid Low-temperature Synthesis of Porous ZnO Nanoparticle Film by Self-hydrolysis Technique ", Key Engineering Materials Vol. 445 (2010) pp 123-126

117. Z L S Seow, A SWWong, V Thavasi, R Jose, S. Ramakrishna and G W Ho," Controlled synthesis and application of ZnO nanoparticles, nanorods and nanospheres in dye-sensitized solar cells", Nanotechnology 20 (2009) 045604, PP 1-6

118. Shi-min Liu, Wan-yu Ding, Wei-wei Jiang, Wei-ping Chai, " Synthesis and characterization of nanocrystalline SnO_2 powder", Materials Science Forum Vols. 675-677 (2011) pp 267-270

119. WANG Yali, GUO Min, ZHANG Mei, and WANG Xidong, "Template-free hydrothermal synthesis of single-crystalline SnO_2 nanocauli flowers and their optical properties", Rare Metals, Vol. 28, No. 5, Oct 2009, p. 449-452

120. Agne`s Pottier, Corinne Chane´ac, Elisabeth Tronc, Le´o Mazerolles and Jean-Pierre Jolivet, " Synthesis of brookite TiO_2 nanoparticles by thermolysis of $TiCl_4$ in strongly acidic aqueous media", J. Mater. Chem., 2001, 11, 1116–1121

121. G.L. Li and G.H. Wang, "Synthesis and characterization of rutile TiO_2 nanowhiskers", J. Mater. Res., Vol. 14, No. 8, (1999) PP 3346-3354

122. Jeffrey C.S. Wu, I.-Hsiang Tseng and Wan-Chen Chang, " Synthesis of titania-supported copper nanoparticles via refined alkoxide sol-gel process ", Journal of Nanoparticle Research 3: (2001),113–118

123. Xiwen Zhang , Shiyou Xu , Gaorong Han, "Fabrication and photocatalytic activity of TiO_2 nanofiber membrane", Materials Letters 63 (2009) 1761–1763

124. Cihat TAŞALTIN, " Quartz kristal mikrobalans (QCM) interdigital transdüserlerde arayüzey film preporasyon parametrelerinin gaz algılama özelliklerine etkisinin incelenmesi ", Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi (2000)

125. http://www.wiredchemist.com

126. http://en.wikipedia.org/wiki/Solvent

127. C. Tasaltin, M. A. Ebeoglu, Z. Z. Özturk, "Acoustoelectric Effect on the Responses of SAW Sensors Coated with Electrospun ZnO Nanostructured Thin Film." Sensors V: 12 N: 9, (2012) 12006-12015.

128. Feng Li, Liying Chen, Zhiqiang Chen, Jiaqiang Xu, Jianmin Zhu, Xinquan Xin " Two-step solid-state synthesis of tin oxide and its gas-sensing property" Materials Chemistry and Physics 73 (2002) 335–338

129. Joseph A. Trimboli, B.A. " The Development and Characterızatıon of Titiana Based Gas Sensors For Combustion Process Monitoring", The Ohio State University, Doktora Tezi (2005)

130. Dan Li, Younan Xia, " Fabrication of Titania Nanofibers by Electrospinning", NANO LETTERS (2003) V: 3, N: 4 PP 555-560

131. Zhi Chen and Chi Lu Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms SENSOR LETTERS (2005), Vol. 3, PP 274–295,

ÖZGEÇMİŞ

EĞİTİM:

1993 – 1997 (Lisans) Selcuk Üniversitesi Fizik Böl. Konya

1997-2000 (Y. Lisans) Marmara Üniversitesi Fizik Böl, Istanbul

2009-2013 (Doktora) Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fizik Böl, Gebze/Kocaeli

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN YAYINLAR:

SCI & SCIE KAPSAMINDAKİ YAYINLAR

C. Tasaltin, M.A. Ebeoglu,Z.Z Ozturk. Acoustoelectric Effect on the Responses of SAW Sensors Coated with Electrospun ZnO Nanostructured Thin Film. Sensors 2012, 12, 12006-12015.

HEKEMLİ DERGİLERDEKİ YAYINLAR (KONFERANS ve PROCEEDINGS)

- **KONFREANSLAR**

- **C. Tasaltin**, M.A. Ebeoglu,Z.Z Ozturk. "Electrospun Nanostructured ZnO Thin Films on SAW Sensors for VOC Detection", The 14Th International Meeting on Chemical Sensors May 20 - 23, 2012, Nürnberg/Nuremberg, Germany

- **PROCEEDINGS**

- **C. Tasaltin**, M.A. Ebeoglu,Z.Z Ozturk. "Electrospun Nanostructured ZnO Thin Films on SAW Sensors for VOC Detection", PP: 1510 – 1512 DOI: 10.5162/IMCS2012/P2.4.5 (http://www.ama-science.org/home/details/1296)

ULUSLARARASI HAKEMLİ DERGİLERDEKİ YAYINLAR:

h indeks=6, Toplam Atıf Sayısı 102, (www.scopus.com a göre,2013)

1. T. Basova, **C. Taşaltın**, A.G. Gürek, M. A. Ebeoğlu, Z.Z. Öztürk, V. Ahsen, Mesomorphic Phthalocyanine as Chemically Sensitive Coatings for Chemical, Sensors, Sensors and Actuators B 96 (2003) 70–75
2. Fevzullah Temurtas, **Cihat Tasaltin**, Hasan Temurtas, Nejat Yumusak, and Zafer Ziya Ozturk, A Study on Neural Networks with Tapped Time Delays: Gas Concentration

Estimation, LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE ICCSA 2004, LNCS 3046, pp. 398–405, 2004. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004

3. Fevzullah Temurtas, **Cihat Tasaltin**, Hasan Temurtas, Nejat Yumusak, and Zafer Ziya Ozturk, Fuzzy Logic and Neural Network Applications on the Gas Sensor Data: Concentration Estimation, LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE ICCSA 2003, LNCS 2869, pp. 179–186, 2004. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
4. A.Özmen, F. Tekce, M.A. Ebeoğlu, **C. Taşaltın** and Z.Z. Öztürk, Finding the composition of gas mixtures by a phthalocyanine-coated QCM sensor array and an artificial neural network, Sensors and Actuators B 115 (2006) 450-454
5. Ali Gulbag, Fevzullah Temurtas, **Cihat Tasaltin** and Zafer Ziya Öztürk, A Study on Radial Basis Function Neural Network Size Reduction for Quantitative Identification of Individual Gas Concentrations in their Gas Mixtures, Sensors and Actuators B 124 (2007) 383-392
6. Bekir Mumyakmaz, Ahmet Özmen, M. Ali Ebeoğlu**, Cihat Taşaltın**, Predicting gas concentrations of ternary gas mixtures for a predefined 3D sample space, Sensors and Actuators B 128 (2008) 594-602
7. Zafer Ziya Öztürk, **Cihat Tasaltin**, Güleda Engin, Ayse Gürek, Devrim Atilla, Vefa Ahsen, Mahir Ince, Evaluation of a fast wastewater odour characterisation procedure using a chemical sensor array, Environmental Monitoring and Assessment, Volume 151, Number 1-4 (2009)
8. Ali Gulbag, Fevzullah Temurtas, **Cihat Tasaltin**, Zafer Ziya Ozturk, A neural network implemented microcontroller system for quantitative classification of hazardous organic gases in the ambient air, International Journal of Environment and Pollution, Volume 36, Number 1-3 (2009)
9. Bekir Mumyakmaz, Ahmet Özmen, Mehmet A. Ebeoğlu, **Cihat Taşaltın**, İlke Gürol, A study on the development of a compensation method for humidity effect in QCM sensor responses, Sensors and Actuators B147, (2010), 277-282
10. **C. Tasaltin**, I. Gurol, M. Harbeck, E. Musluoglu, V. Ahsen, Z.Z. Ozturk, Synthesis and DMMP sensing properties of fluoroalkyloxy and fluoroaryloxy substituted phthalocyanines in acoustic sensors, Sensors and Actuators B: Chemical, 510, 2, (2010), 781-787

11. M. Harbeck, **C. Taşaltın**, I. Gürol, E. Musluoğlu, V. Ahsen, Z. Z. Öztürk, Preferential sorption of polar compounds by fluoroalkyloxy substituted phthalocyanines for the use in sorption based gas sensors, Sensors, Sensors and Actuators, B: Chemical, B, 510, 2, (2010), 616-624.

ULUSLARARASI KONFERANSLAR

1. International Conference On Thin Film Organic Films September 19-24 2002, **C Taşaltın**, T. Basova, A.G. Gurek M.A Ebeoglu, Z.Z. Ozturk V. Ahsen "Mesomorphic Phthalocyanines Chemically Sensitivities Coatings ",

2. 3rd Joint Australian/American Conference on Mine Countermeasures&Demining 2004, Canberra, Australia, E. Musluoglu, Z. Ziya Öztürk, V. Ahsen, M. Ali Ebeoglu, **C. Tasaltin**, I. Gurol, G. Gumus, Z. Sen, N. Ugur
3. "NOSE II sensors for security workshop and exhibition" 14-15 june 2004 JRC-ISPRA, ITALY **Cihat Taşaltın**, Zafer Ziya Öztürk, Mehmet Ali Ebeoğlu "DETECTION OF EXPLOSIVES BY ELECTRONİC NOSE"
4. İ. Gürol, G. Gümüş, E. Musluoglu, **C. Taşaltın**, Z. Z. Öztürk, V. Ahsen, M. A. Ebeoğlu, N. Uğur, Z. Şen and Y. Arslan "Detection of Explosive Chemicals with Chemical Sensors", 11-16 July 2004, New Orleans, Louisiana, USA.
5. İ. Gürol, G. Gümüş, E. Musluoglu**, C. Taşaltın**, Z. Z. Öztürk, V. Ahsen, M. A. Ebeoğlu, N. Uğur, Z. Şen and Y. Arslan "Detection Of Chemical Warfare Agent With Chemical Sensors", 11-16 July 2004, New Orleans, Louisiana, USA.
6. Workshop on "Bio-mimetic sensing:Emerging Applications and Technologies" Rome,16-17 September 2004, **Cihat Taşaltın**, Mehmet Ali Ebeoğlu, Zafer Ziya Öztürk "Detection of Explosive Chemicals and Chemical Warfare Agent Simulants with Chemical Sensors"
7. **Cihat Taşaltın**, İlke Gürol, Gülay Gümüş, Nevin Taşaltın, Zafer Şen, Dilek Dündar, Yadigar Arslan, Mehmet Ali Ebeoğlu, Emel Musluoglu, Zafer Ziya Öztürk, Vefa Ahsen, "NOSE II Workshop", Istanbul, 7-8/11/2005.

8. "The 11Th International Meeting on Chemical Sensors 16-19 July 2006" **C. Taşaltın**, Z. Z. Öztürk , V. Ahsen, E.Musluoğlu, M. A. Ebeoğlu, İ. Gürol, G. Gümüş, Z. Şen, N. Taşaltın "Optimization of coating parameters for QCM sensor"
9. "The 12Th International Meeting on Chemical Sensors 13-16 July 2008" **C. Tasaltin**, I. Gurol, M. Harbeck, D. Dundar, E. Musluoglu1, Z.Z. Ozturk, V. Ahsen,"Fluorinated phthalocyanines sensitive to DMMP as coatings for QCM sensors"
10. "The 14Th International Meeting on Chemical Sensors May 20 - 23, 2012, Nürnberg/Nuremberg, Germany ", **Cihat Taşaltın**, Mehmet Ali Ebeoğlu, Zafer Ziya Öztürk Electrospun Nanostructured ZnO Thin Films on SAW Sensors for VOC Detection"