

173782

**ZEOLİT ESASLI SERAMİK NEM SENSÖRÜ  
ÜRETİMİ VE UYGULAMASI**

**Ömer Faruk TÜRKSEVER**  
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü  
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Aralık – 2002

**"Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca kabul edilen 010280 nolu proje kapsamında desteklenmiştir."**

**Anadolu Üniversitesi  
Merkez Kütüphane**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ömer Faruk Türksever'in Zeolit Esaslı Seramik Nem Sensörü Üretimi ve Uygulaması başlıklı Seramik Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi. ~~18.12.2002~~ tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Aydın DOĞAN	
Üye	: Doç. Dr. Servet TURAN	
Üye	: Yrd. Dr. Savaş KOPARAL	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08.01.2003 tarih ve ...114... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü  
Prof. Dr. Osman ÖZER  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Müdürü

Anadolu Üniversitesi  
Merkez Kütüphane

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YAPAY ZEOLİT ESASLI SERAMİK NEM SENSÖRÜ ÜRETİMİ VE UYGULAMASI

ÖMER FARUK TÜRKSEVER

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aydın DOĞAN  
2002, 132 sayfa

Yapay zeolitler ve doğal zeolitlerin neme karşı duyarlılığı bilinen bir gerçektir. Farklı katkı maddeleri kullanılarak hazırlanan yüzeyden fazla yapay zeolit türü vardır. Bu çalışmada hidrojen katyonu içeren zeolit Y tozunun nem sensörü olarak kullanılabilirliği araştırıldı. Zeolit Y tozu standart tekniklerle (XRD, EDX, DTA-TG, SEM) karakterize edilerek ticari nem sensör hammaddeleri ile karşılaştırıldı. Zeolit Y tozunun nem sensörü üretiminde kullanılabilirlik kapasitesini belirlemek için serbest toz modeli geliştirildi. Sonra farklı iki yöntem kullanılarak sensör numuneleri üretildi. Ölçümler için rezistif esaslı çalışan elektronik devre ve kontrollü nem kabini tasarlandı. Nem kabini içerisine sabitlenen referans nem sensörü ile üretilen sensör numunelerinin elektriksel özellikleri (cevap verme süresi, hassasiyet ve çalışma aralığı) osilaskopla ölçüldü. Elde edilen bilgiler frekans-bağıl nem grafiklerine dönüştürüldü. Sonuç olarak serbest toz modeline göre zeolit Y tozunun nem sensörü üretiminde kullanılabileceği belirlendi. Fakat elektriksel özelliklerin daha hassas ölçülebilmesi ve tekrarlanabilir sonuçların elde edilebilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerektiği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Zeolit Y, Nem Sensörü

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **THE PRODUCTION AND APPLICATION OF CERAMIC HUMIDITY SENSOR BASED ON ARTIFICIAL ZEOLITE**

**ÖMER FARUK TÜRKSEVER**

**Anadolu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Ceramic Engineering Program**

**Supervisor: Assoc. Prof. Aydın DOĞAN  
2002, 132 pages**

Both natural and synthetic zeolites are sensitive to humidity. There are more than hundred and fifty artificial zeolite types, which are prepared by using different additives. In this study, zeolite Y that consists of hydrogenation was used for fabricating humidity sensors. First of all, zeolite Y powder was characterized by standard techniques (XRD, EDX, DTA-TG and SEM) and compared with the commercial raw materials presently used for humidity sensor applications. A free powder model was developed to determine the ability of zeolite Y powder as a humidity sensor. After that, samples were prepared by two different methods. A humidity chamber and a resistive based electronic circuit were designed for the measurements. The reference sensor and the samples produced were set in the humidity cabin and their electrical properties (response time, sensitivity and working range) were investigated on oscilloscope. The study points that; zeolite Y powder can be used to produce humidity sensors. But it is necessary to develop new methods to achieve high sensitivities and reproducibility.

**Keywords: Zeolite Y, Humidity Sensors**

## TEŞEKKÜR

Değerli hocam Doç. Dr. Aydın DOĞAN'a bana olan güvenini hiçbir zaman yitirmediği için sonsuz teşekkürler.

Öğretim Görevlisi Erman ÜZGÜR'e ve Malzeme Bilimi ve Mühendisliğindeki tüm Öğretim Görevlilerine projeye olan destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Fen–Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Görevlisi Sayın Prof. Dr. Ertuğrul YÖRÜKOĞULLARI'na ve projeye katkılarından dolayı Fizik Bölümü Öğretim Görevlilerine ve ayrıca Fizik Mühendisi Bülent SEMERCİ'ye teşekkür ederim.

Çalışmalarımda yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Malzeme Bilimi ve Mühendisi Hilal GÜLER'e sonsuz teşekkürler.

Her konuda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme en içten dileklerle teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Su Molekülünün Tanımı ve Özellikleri .....	2
1.1.1. Su Molekülünün Tanımı .....	2
1.1.2. Su Molekülünün Yapısı .....	3
1.1.2.1. Hidrojen bağı veya köprüsü .....	4
1.1.3. Suyun Faz Diyagramı .....	6
1.1.4. Suyun Buhar Basıncı .....	7
1.2. Nem Kavramı ve Çeşitleri .....	8
1.2.1. Rutubet (Moisture) .....	8
1.2.2. Nem (Humidity) .....	8
1.2.3. Çiylenme Noktası Sıcaklığı .....	9
1.2.4. Gaz-Buhar Karışımları .....	10
1.2.5. Hava Nemini Belirleyen Kriterler .....	11
1.2.6. Havanın Doyurulması .....	12
1.2.6.1. Sabit basınç altında soğutma .....	12
1.2.6.2. Toplam basıncın artırılması .....	13
1.2.7. Hava Neminin Arttırılması .....	13
1.2.7.1. Buhar püskürtülmesi .....	13
1.2.7.2. Adyabatik doyurma .....	13
1.2.7.3. Adyabatik doyurma işlemindeki madde enerji denkliği .....	15
1.2.7.4. Endüstride kullanılan yöntem .....	17
1.2.7.5. Su içinden geçirme .....	18

1.2.8. Hava Neminin Azaltılması .....	18
1.2.9. Hava Neminin Hesaplanması .....	19
1.2.9.1. Mutlak nem .....	19
1.2.9.2. Bağıl nem .....	20
1.2.9.3. Yüzde nem .....	21
1.2.10. Nemli Havanın Entalpisi .....	22
1.2.11. Hava Nem Diyagramları .....	24
1.3. Adsorpsiyon Tanımı ve Özellikleri .....	26
1.3.1. Adsorpsiyon Tanımı .....	26
1.3.2. Kapilerite .....	28
1.3.2.1. Kapiler yükselme .....	30
1.3.2.2. Kapiler alçalma .....	31
1.3.3. Fiziksel ve Kimyasal Adsorpsiyon .....	32
1.3.4. Fiziksel ve Kimyasal Adsorpsiyon Arasındaki Farklar .....	34
1.3.5. Fiziksel Adsorpsiyon Kinetiği .....	34
1.4. Hava Neminin Ölçülmesi .....	35
1.4.1. Ağırlık Değişimi .....	36
1.4.2. Nem Ölçerler (Higrometreler) .....	36
1.4.2.1. Psikrometreler veya fizikrometreler (Islak ve kuru termometreli higrometreler) .....	37
1.4.2.2. Saçlı higrometreler .....	40
1.4.2.3. Dolaylı yöntemle nem ölçen higrometreler .....	41
1.4.2.4. Yayınımlı higrometreler .....	48
1.4.2.5. Soğurulma tayflı higrometreler .....	49
1.4.2.6. Kolometrik (amperometrik) higrometreler .....	49
1.4.2.7. Nem sensörleri .....	49
1.5. Sensör Tanımı ve Sınıflandırılması .....	53
1.5.1. Sensör Tanımı .....	53
1.5.2. Aktif ve Pasif Sensörler .....	55
1.5.2.1. Aktif Sensörler .....	56
1.5.2.2. Pasif Sensörler .....	56
1.5.3. Fiziksel Yönüyle Enerji Çeşitleri .....	56

1.5.4. Sensörlerin Sınıflandırılması .....	58
1.6. Seramik Sensörler .....	61
1.6.1. Sensör Yapımında Kullanılan Seramikler .....	63
1.6.2. Sensör Yapımında Kullanılan Seramiklerin Sınıflandırılması ..	64
1.6.2.1. Kimyasal kompozisyona göre sınıflandırma .....	64
1.6.2.2. Faz kompozisyona göre sınıflandırma .....	64
1.6.2.3. Fiziksel özelliklere göre sınıflandırma .....	65
1.6.3. Gözenekli Seramiklerin Özellikleri .....	65
1.6.4. Seramik Sensörün Çalışmasını Etkileyen Temel Özellikler .....	66
1.6.4.1. Elektron iletkenliği .....	66
1.6.4.2. İyon iletkenliği .....	67
1.6.4.3. Katkılı elektron iletkenliği .....	68
1.6.4.4. Stokiyometrik olmayan kristallerde elektrik iletkenliği	69
1.6.5. Seramik Tane Yüzeyinin Elektriksel Özellikleri .....	69
1.6.6. Seramik Tane Sınırının Elektriksel Özellikleri .....	70
1.6.7. Seramik Sensörlerin Üretim Yöntemleri .....	70
1.6.7.1. Geleneksel yöntemle seramik sensör üretimi .....	70
1.6.7.2. Teknik yöntemlerle seramik sensör üretimi .....	73
1.6.7.3. Organik bileşenli kompozit seramik sensör üretimi .....	74
1.6.7.4. Seramik sensör üretiminde kalın film teknolojisi .....	74
1.6.8. Seramik Nem Sensörlerinin Sınıflandırılması .....	75
1.6.9. Seramik Nem Sensörlerinde Olması Gereken Özellikler .....	76
1.6.10. Seramik Sensörlerin Uygulama Alanları .....	77
1.6.11. Seramik Nem Sensörlerinin Ölçüm Devreleri .....	77
1.6.12. Bazı Firmalar Tarafından Yapılmış Nem Sensörleri .....	78
1.7. Sensör Karakteristikleri .....	79
1.7.1. Sıcaklık Karakteristikleri .....	79
1.7.2. Cevap Verme Karakteristiği .....	79
1.7.3. Cevap Verme Süresi .....	79
1.7.4. Hassasiyet .....	80
1.7.5. Nem için Çalışma Aralığı .....	81
1.7.6. Sıcaklık için Çalışma Aralığı .....	81



1.7.7. Çalışma Voltajı .....	81
1.7.8. Çalışma Frekansı .....	82
1.8. Yapay ve Doğal Zeolitler Hakkında Genel Bilgi .....	82
1.8.1. Zeolitlerin Yapısı .....	82
1.8.2. Seramik Nem Sensörü Üretiminde Zeolitlerin Kullanımı .....	87
1.8.3. Seramik Nem Sensörü Üretiminde Zeolit Y'nin Kullanımı .....	89
1.9. Amaç .....	90
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>91</b>
2.1. Zeolit Y Tozunun Karakterizasyon Testleri .....	91
2.2. Deney Düzeneginin Hazırlanması .....	91
2.2.1. Serbest Toz Modeli .....	96
2.2.2. Rezistif Esaslı Çalışan Seramik Nem Sensörü .....	96
2.3. Sensör Taşıyıcı Altlıkların Hazırlanması .....	97
2.4. Elektrotlama için Maske Hazırlanması .....	97
2.5. Sensör Numunelerinin Hazırlanması .....	98
2.5.1. Organik Bileşenli Kompozit Seramik Sensör Üretimi .....	98
2.5.2. Geleneksel Yöntemle Seramik Sensör Üretimi .....	101
<b>3. SONUÇLAR .....</b>	<b>104</b>
3.1. Zeolit Y Tozunun Karakterizasyon Sonuçları .....	104
3.2. Serbest Toz Modelinin Ölçüm Sonuçları .....	109
3.3. Rezistif Esaslı Çalışan Seramik Nem Sensörünün Ölçüm Sonuçları .....	109
3.4. Üretilen Organik Bileşenli Seramik Nem Sensörlerinin Karakterizasyon Sonuçları .....	110
<b>4. TARTIŞMA ve ÖNERİLER .....</b>	<b>128</b>
<b>5. KAYNAKLAR .....</b>	<b>131</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Dalga mekaniğine göre su molekülü	3
1.2. Polar ve kovalent bağlı su molekülünün şeması [4]	4
1.3. Sudaki kovalent ve hidrojen bağları [4]	4
1.4. Su molekülündeki simetrik iki oksijen atomu arasındaki uzaklık [4]	5
1.5. Su molekülünün geometrik biçimi [4]	5
1.6. Suyun faz diyagramı [4]	6
1.7. Suyun buhar basıncının (P) sıcaklıkla (t) değişimi [4]	7
1.8. Havanın adyabatik olarak doyurulması [5]	14
1.9. Faz dönüşüm ısıları [4]	16
1.10. Hava neminin artırılması [5]	17
1.11. Hava neminin azaltılması [5]	19
1.12. Hava nem diyagramı [5]	25
1.13. Kapiler değişim [8]	28
1.14. Suyun yüzey geriliminin sıcaklıkla değişimi [4]	30
1.15. Sıvıların kapiler yükselmesi [9]	30
1.16. Sıvının kapiler alçalması [9]	31
1.17. Psikrometre (Islak ve kuru termometreli higrometre) [10]	37
1.18. Psikrometre ile hava neminin ölçülmesi [10]	40
1.19. Saçlı higrometre [10]	41
1.20. Isıl elektrik ısı pompası ile soğutulan ve optik köprü ile denetlenen aynalı higrometre (Optik higrometre) [10]	43
1.21. Osilasyonlu higrometre [10]	45
1.22. Geri beslemeli kapasitif çiylenme noktalı higrometrenin ölçüm devresi	45
1.23. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kapasite değişimi [10]	46
1.24. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak doymuş su buharının kısmi buhar basınç değişimi [4]	47
1.25. Isıl iletkenlik algılayıcılı (mutlak nem algılayıcılı) higrometre [10]	47
1.26. Değişik buhar miktarlarındaki çıkış gerilimleri [10]	48
1.27. Kapasitif bir algılayıcının frekans-bağıl nem grafiği	50
1.28. Kapasitif esaslı polimer nem sensörlerinin genel yapısı [12]	51

1.29. Lityum Klorür (LiCl) esaslı nem sensörlerinin genel yapısı [12]	52
1.30. Rezistif esaslı polimer nem sensörlerinin genel yapısı [12]	52
1.31. Rezistif esaslı seramik nem sensörlerinin genel yapısı [12]	53
1.32. Sensör sisteminin blok diyagramı [11]	54
1.33. “EMD-2000” mikro bağıl nem sensörünün frekans-bağıl nem grafiği	55
1.34. Çalışma prensibine göre sensörlerin sınıflandırılması [11]	59
1.35. Geleneksel yöntemle seramik sensör üretimi [11]	71
1.36. Zeolitlerin üç boyutlu iskelet yapısı [20]	86
1.37. İkincil yapı birimlerinin üç boyutlu düzlemde bağlanmaları [20]	87
2.1.a. Tasarlanan deney düzeneği	94
2.1.b. Nem kabini	95
2.2. Serbest toz modeli	96
2.3. Rezistif esaslı çalışan seramik nem sensörü	96
2.4. Taşıyıcı altlık (bakırlı pertinaks)	97
2.5. İnterdijital iletim yolu	97
2.6. Bakır levhadan hazırlanan interdijital iletim yolu	98
2.7. Organik bileşenli kompozit seramik sensör üretim akım şeması	100
2.8. A ve B seri numaralı sensör numunelerin genel modeli	101
2.9. Geleneksel yöntemle seramik nem sensör üretimi	102
2.10. Farklı iletim yollarına sahip sensör modelleri	103
3.1. Zeolit Y tozunun 25°C’deki XRD analiz sonucu	104
3.2. Zeolit Y tozunun EDX analiz sonucu	105
3.3. Zeolit Y tozunun diferansiyel termal analiz (DTA) sonucu	106
3.4. Zeolit Y tozunun termo gravimetrik analiz (TG) sonucu	106
3.5. Zeolit Y tozunun farklı sıcaklıklardaki (250°C, 500°C, 750°C, 1000°C) X-ışınları difraktometre (XRD) analiz sonucu	107
3.6. Zeolit Y tozunun taramalı elektron mikroskop (SEM) analiz sonucu	108
3.7. Serbest toz modelinin frekans-bağıl nem grafiği	109
3.8. Rezistif esaslı çalışan referans nem sensörünün frekans-bağıl nem grafiği	110
3.9. A <sub>1</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	111
3.10. A <sub>2</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	111

3.11. A <sub>3</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	112
3.12. A <sub>4</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	112
3.13. B <sub>1</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	113
3.14. B <sub>2</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	114
3.15. B <sub>3</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	114
3.16. B <sub>4</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı	115
3.17. A <sub>1</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği	116
3.18. A <sub>2</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği	116
3.19. A <sub>3</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği	117
3.20. A <sub>4</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği	117
3.21. B <sub>1</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği	118
3.22. B <sub>2</sub> modelinin frekans bağıl-nem grafiği	118
3.23. B <sub>3</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği	119
3.24. B <sub>4</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği	119
3.25. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C’de üretilmiştir)	120
3.26. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C’de üretilmiştir)	120
3.27. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C’de üretilmiştir)	121
3.28. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C’de üretilmiştir)	121
3.29. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C’de üretilmiştir)	122
3.30. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C’de üretilmiştir)	122
3.31. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C’de üretilmiştir)	123
3.32. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C’de üretilmiştir)	123
3.33. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C’de üretilmiştir)	124
3.34. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C’de üretilmiştir)	124
3.35. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C’de üretilmiştir)	125
3.36. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C’de üretilmiştir)	125
3.37. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C’de üretilmiştir)	126
3.38. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C’de üretilmiştir)	126
3.39. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C’de üretilmiştir)	127
3.40. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C’de üretilmiştir)	127

## ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. Suyun kaynama noktasının basınç ile değişimi	7
1.2. Suyun değişik sıcaklıklardaki buhar basınçları [18]	11
1.2. (Devam) Suyun değişik sıcaklıklardaki buhar basınçları [18]	12
1.3. Su ve su buharına duyarlı adsorplayıcılar	27
1.4. Su buharına duyarlı (nem çekici) kimyasallar	36
1.5. Islak ve kuru termometre sıcaklıkları ile belirlenmiş bağıl nem değerleri	39
1.6. Malzemelerin baskın özelliklerine göre sensörlerin sınıflandırılması	62
1.7. Seramik nem sensörü üretimde kullanılan yapay zeolitler	89
2.1. Zeolit Y tozunun genel özellikleri	91
2.2. Aşırı doymuş tuz solüsyonları (ASTM-E104)	92
2.3. Yüzde ağırlıkça hazırlanan karışımlar	99
3.1. Zeolit Y tozunun EDX analiz sonucu	105

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

- $dQ_1$  : Buharlaştırma sırasında havadan alınan ısı miktarı ( $^{\circ}C$ )
- $dt$  : Düşen hava sıcaklığı miktarı ( $^{\circ}C$ )
- $d\omega$  : Hava içinde buharlaşan su miktarı (kg)
- $t_y$  : Adyabatik doyum sıcaklığı veya ıslak termometre sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
- $t$  : Doymamış havanın ilk sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
- $\omega$  : Havanın başlangıçtaki mutlak nemi (kg su/kg kuru hava)
- $\omega_o$  : Adyabatik doyum sonundaki mutlak nemi (kg su/kg kuru hava)
- $h_1$  : Havanın girişteki entalpisi (kJ/kg kuru hava)
- $h_2$  : Havanın çıkıştaki entalpisi (kJ/kg kuru hava)
- $h_s$  : t Sıcaklığındaki suyun entalpisi (kJ/kg kuru hava)
- $m_s$  : 1kg Kuru hava içindeki buharlaşan suyun kütlesi (kg)
- $\Phi$  : Bağlı nem
- $\mu$  : Yüzde nem
- $h_b$  :  $t^{\circ}C$ 'deki Buharın entalpisi (kJ/kg)
- $\Delta h_b$  : Suyun referans noktadaki buharlaştırma entalpisi (kJ/kg)
- $c_p$  : Su buharının sabit basınçta ortalama ısınma ısısı (kJ/kg $^{\circ}C$ )
- $t_o$  : Referans nokta sıcaklığı ( $0^{\circ}C$ )
- $h_h$  :  $t^{\circ}C$ 'deki Kuru havanın entalpisi (kJ/kg)
- $\bar{c}_p$  : Kuru havanın sabit basınçta ortalama ısınma ısısı (kJ/kg $^{\circ}C$ )
- $P$  : Sıvı kolonu tarafından oluşturulan hidrostatik basınç (mmHg)
- $P$  : Sıvı yoğunluğu (g/cm $^3$ )
- $\gamma$  : Yüzey gerilimi (Nm $^{-1}$ )
- $h$  : Kapiler yüksek (m)
- $\theta$  : Yer çekim ivmesini (m/s $^2$ )

## 1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın özellikle ikinci yarısı malzeme bilimi ve mühendisliği alanında olağanüstü teknolojik gelişmelere sahne olmuştur. Katı hal fiziği ve malzeme bilimi dallarında gerçekleştirilen araştırmalarla malzemelerin daha detaylı incelenebilmesini sağlayacak yeni laboratuvar imkanlarına ulaşılmış ve yapılan bu çalışmalarla malzeme özellikleri; moleküler, atomik ve elektronik düzeylerde incelenebilir hale gelmiştir. Seramik bilimi ve mühendisliği bu gelişmelerden en fazla yararlanan uygulama alanlarının başında gelmektedir [1].

Modern seramik mühendisliğinin temelleri, özellikle 1960'lı yıllardan sonra malzeme bilimindeki gelişmelere paralel olarak başlayan ve günümüzde de devam etmekte olan bilimsel araştırmalara dayanmaktadır. Bu çalışmaların sonucu olarak günlük hayatımızda büyük sayılarda ve çeşitli amaçlarla kullanılan modern seramikler geliştirilmiştir [2].

Elektronik, optik, elektrotik, mekanik ve biyoseramikler olarak sınıflandırılan teknik seramikler bu tasnife girmektedir. Günlük yaşantımızda pek farkına varmadığımız bu seramikler hayatımızın kolaylaşmasına ve modernleşmesine büyük katkılar getiren ileri teknoloji malzemeleridir [3].

Birbiriyle etkileşim halinde olan bütün bilim dallarında olduğu gibi, seramik biliminin de bir çok bilim dalı ile etkileşimi söz konusudur. Özellikle bilgisayar ve elektronik sanayiinde kullanılan ileri teknoloji seramiklerinden; elektro seramikler, optik ve elektrotik seramikler teknolojinin büyük bir gereksinimi olarak oldukça fazla kullanım alanı bulmaktadır.

Her alanda hızla gelişen günümüz teknolojisi, endüstriyel işletmelerdeki üretim proseslerinde yer alan fiziksel ve/veya kimyasal parametrelerin ölçüm ve kontrolünde kullanılan cihazların geliştirilmesine bağlıdır. Bu amaca uygun olarak kullanılacak bir çok bilgisayar ve elektronik sistemin, işletim mekanizmasını harekete geçiren ve/veya bu cihazların çok hassas çalışmasını sağlayan elektronik devre elemanlarından sensörler, gelişimin bir ölçüsü olarak dikkat çekmektedir.

Sensör üretiminde bir çok malzeme kullanılmasına karşılık özellikle teknik seramikler sınıfında yer alan elektro seramikler ile elektrotik seramiklerin tercih edilmesinin en önemli sebebi; sensörlerden beklenen bir çok özelliğin seramik

malzemelerce karşılanabiliyor olmasının yanı sıra diğer malzemelere göre daha ucuz olmalarına bağlıdır.

Sensörlerin üretilmesi ve kullanılmasıyla ilgili olarak bir çok ülkede sürdürülen araştırma ve geliştirme çalışmaları son yirmi yılda hızla artmıştır. Ülkemizde ise bu konuda henüz yeterli bir çalışma mevcut değildir. Bu sebeptendir ki, çok farklı alanlarda kullanım imkanları olan her türlü sensör (özellikle seramik, polimerik, metalik ve kompozit malzemelerin kullanıldığı sensörler) başta Avrupa ve Amerika olmak üzere bir çok Uzak Doğu ülkesinden ithal edilmektedir [3].

Üstün özelliklerine bağlı olarak, çok farklı alanlarda başarıyla kullanılabilen bir çok sensör vardır. Bu çalışmayla; seramik nem sensörlerinin, kullanım ve üretiminin ülke genelinde benimsenerek yaygınlaşması hedeflendi.

### **1.1. Su Molekülünün Tanımı ve Özellikleri**

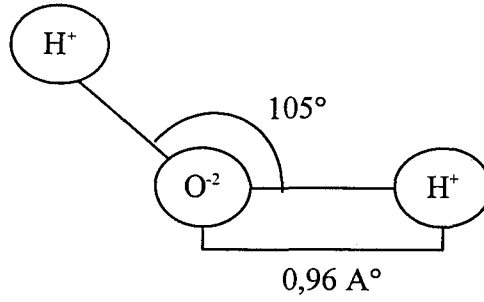
Doğal maddeler arasında sürekli hareket halinde olan su, dünyadaki normal sıcaklık ve basınç koşulları altında donma ve kaynama noktaları arasındaki büyük farktan dolayı genellikle sıvı olarak bulunur. Yeryüzünün %75'ini, insan vücudunun %70'ini, kanın yaklaşık %78'ini kapsar. Okyanuslar dünyadaki suyun %97'sini oluştururken kalan %3'lük kısım tatlı sulardır. Tatlı suyun 3/4'ü buzullar, 1/4'ü yer altı sularıdır. Göller ve nehirler tatlı suların %1.5'ini oluşturur. Dünyadaki toplam su miktarı petrol türevlerinin yanmasıyla yılda 5 milyon ton artmaktadır. Dünyayı saran atmosferdeki su, nem adı verilen buhar, sis ve bulut halinde bulunur [4].

#### **1.1.1. Su Molekülünün Tanımı**

Su, hidrojen ( $H_2$ ) ile oksijen ( $O_2$ ) arasındaki reaksiyonun bir ürünüdür. Gaz halindeki bu iki element  $300^{\circ}C$ 'nin altında hissedilir derecede birleşmez. Yani reaksiyon hızı düşüktür. Sıcaklığın yükselmesiyle reaksiyon hızı da artar.  $500^{\circ}C$ 'den itibaren birleşme meydana gelir. Yanma sıcaklığı katalizör ile düşürülür. Birleşme reaksiyonda açığa çıkan ısı, mol başına 68,5 Kcal'dir. %6'dan

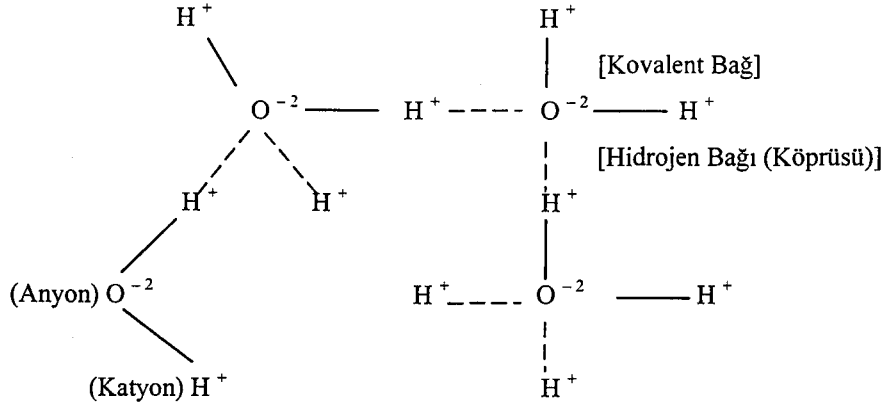






Şekil 1.2. Polar ve kovalent bağlı su molekülünün şeması [4]

Her bir su molekülündeki oksijen, bir diğer su molekülündeki protonu çekmek suretiyle Şekil 1.3'deki gruplaşmaları yapar. Hidrojenin esas bağlı bulunduğu su molekülüne ait bağ düz, başka bir su molekül tarafından çekilmesi de noktalı çizgiyle gösterilmiştir. Bu bağlara hidrojen bağları yada hidrojen köprüleri denir. HF ve NH<sub>3</sub> gibi bazı bileşiklerde de görülen bu bağlar kovalent bağlardan zayıf, Van der Waals kuvvetlerinden daha kuvvetlidir.

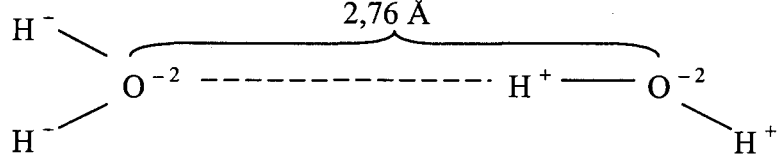


Şekil 1.3. Sudaki kovalent ve hidrojen bağları [4]

### 1.1.2.1. Hidrojen bağı veya köprüsü

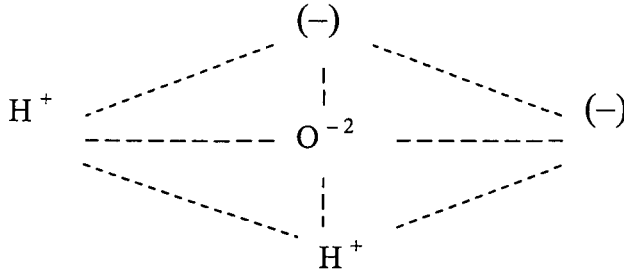
Hidrojen atomu eğer, elektronegatif bir atomla bağlanırsa kovalent bağ teşekkül eder. Bu durumda molekül içindeki hidrojen atomu bağın ucunda adeta proton gibi yer alır. Kovalent bağlı diğer atomlarda olduğu gibi pozitif yüklü protonun etrafı elektronlarla çevrilmemiştir. Bu şekilde kasyon özelliğine bürünen hidrojen (H), anyonlar tarafından çekilerek kuvvetli elektronegatif atomlar arasında bir köprü oluşturur. Bu köprüye hidrojen bağı veya hidrojen köprüsü denilmektedir.

Su molekülündeki oksijenler hidrojene göre simetriktir. Su molekülünü oluşturan hidrojen ve oksijen molekülleri aralarındaki uzaklık Şekil 1.4'de gösterildiği gibi 2.76 Å dur.



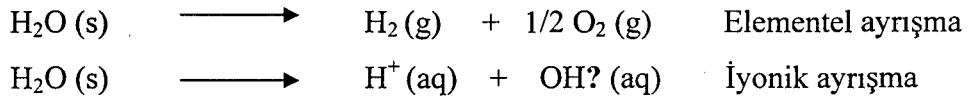
Şekil 1.4. Su molekülündeki simetrik iki oksijen atomu arasındaki uzaklık [4]

Normal şartlarda sıvı olan suyun hidrojen köprüleri (hidrojen bağları) üç boyutlu bir ağ meydana getirme özelliğindedir. Bu yüzden suyun geometrik biçimi Şekil 1.5'deki gibi iki köşesi negatif düzgün dört yüzlüdür [4].



Şekil 1.5. Su molekülünün geometrik biçimi [4]

Su molekülü çok kararlı bir bileşik olduğu için sadece elektrolizle yada yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 2728°C'de) elementlerine ayrıştırılabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise hidrojen ( $H^+$ ) ve hidroksil ( $OH^-$ ) iyonlarının ayrışması gözlenir. Bu durum aşağıda verilen reaksiyon denklemleri ile özetlenmiştir [4].



Sıcaklıkla yapılacak olan elementel ayrışma oranının miktarı başlangıçtaki su miktarının yaklaşık olarak %11'i kadardır.

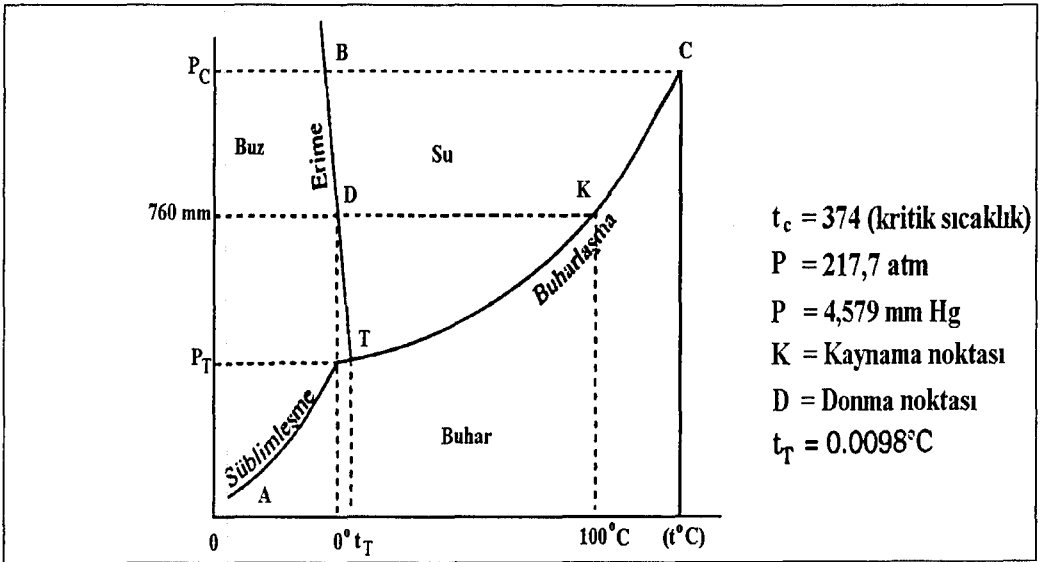
Yapısal olarak sekiz değişik su molekülü tanımlanmaktadır.

Bunlar:

1. Monomer su molekülü ( $H_2O$ ),
2. Küçük polimer su molekülü ( $H_2O$ )<sub>n</sub>  $n=2 - 4$ ,
3. Büyük polimer su molekülü ( $H_2O$ )<sub>n</sub>  $n > 4$ ,
4. Sulu çözeltilerde iyonları çevreleyen hidrasyon su molekülü,
5. Apolar moleküllerin yapılarında bulunan ve maddeyi çit şeklinde saran su molekülü,
6. Minerallerin yapısından ısıtılarak uzaklaştırılabilen kristal (billur) su molekülü,
7. Yoğunluğu düşük, içi boş hegzagonal buz halindeki su molekülü,
8. Buhar halindeki su molekülüdür.

### 1.1.3. Suyun Faz Diyagramı

Açık hava basıncı (1 atm.) altında buz ile su karıştırıldığında; iki faz kaldığı sürece sistemin sıcaklığı  $0^{\circ}C$ 'dir. Bu karışımın bulunduğu kabın havası tamamen boşaltıldığında buz-su-buhar fazları birebirleriyle denge haline geçer. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi bu durumdaki sıcaklık  $0,0098^{\circ}C$  iken buhar basıncı  $4,57$  mmHg olur [4].



Şekil 1.6. Suyun faz diyagramı [4]

Kritik sıcaklığın üstünde bulunan bir gaz yada buhar en yüksek basınçlarda bile sıvılaştırılmaz. Örneğin; su buharı ancak 374°C'nin altındaki bir sıcaklıkta sıvılaştırılabilir.

1kg buz 0°C'de katı halden sıvı hale geçerken yaklaşık 80 kcal. ısı yayar. Buna buzun gizli erime ısısı denir. 1kg su 100°C'de sıvı halden buhar haline geçerken 54 kcal ısı alır ki buna suyun gizli buharlaşma ısısı denir.

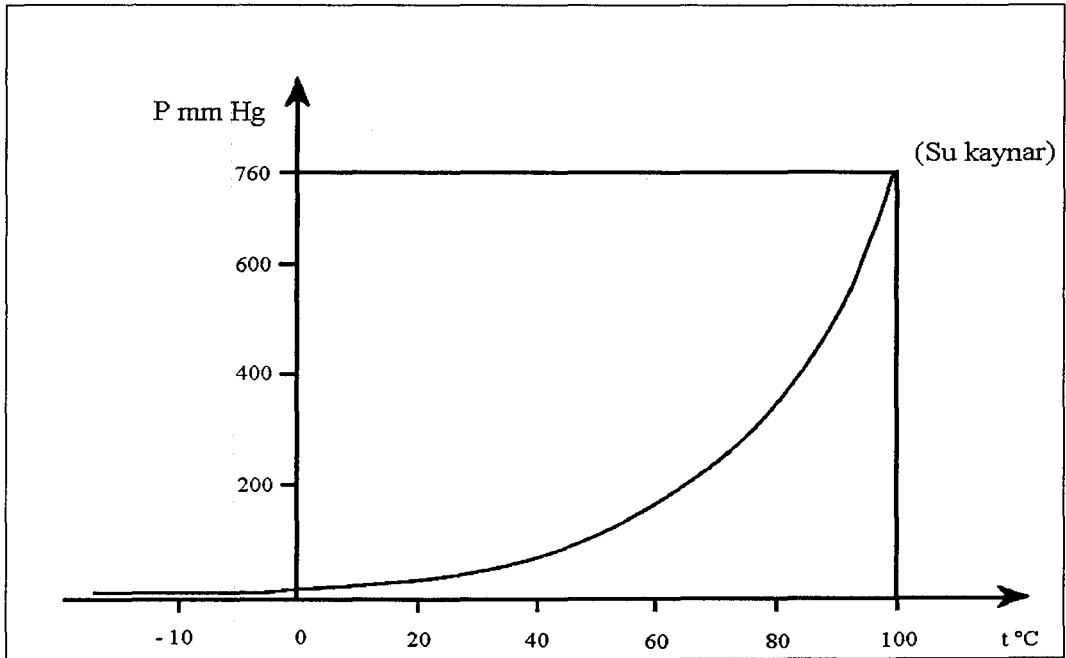
#### 1.1.4. Suyun Buhar Basıncı

Sıcaklığın artması ile artan buhar basıncı, dış basınca eşit olduğunda su kaynar. Kaynama noktasının basınç ile değişimi Çizelge 1.1'de verilmiştir [4].

Çizelge 1.1. Suyun kaynama noktasının basınç ile değişimi [4]

Basınç (kN/m <sup>2</sup> )	1	10	100	1000	10000	22100
Kaynama Noktası (°C)	7	46	100	180	311	3742

Suyun her sıcaklıkta, bir buharlaşma basıncı olduğu Şekil 1.7'de verilmiştir. 0°C'nin altında çok azda olsa buharlaşma görülmektedir [4].



Şekil 1.7. Suyun buhar basıncının (P) sıcaklıkla (t) değişimi [4]

Grafikten okuyabildiğimiz bazı değerler şunlardır:

- $-30^{\circ}\text{C}$ 'de suyun buharlaşma basıncı: 0,288 mmHg,
- $-10^{\circ}\text{C}$ 'de suyun buharlaşma basıncı: 1,950 mmHg,
- $0^{\circ}\text{C}$ 'de suyun buharlaşma basıncı: 4,6 mmHg,
- $20^{\circ}\text{C}$ 'de suyun buharlaşma basıncı: 17,54 mmHg,
- $25^{\circ}\text{C}$ 'de suyun buharlaşma basıncı: 23,76 mmHg.

## 1.2. Nem Kavramı ve Çeşitleri

Endüstriyel veya özel uygulamalara bağlı olarak farklı yöntemlerle nemin tanımı yapılabilir. Havada su, su buharı halinde bulunur ve miktarı sabit basınçta sıcaklıkla değişir [5].

Sıvı ve katılardaki nem genel olarak toplam kütledeki (ıslak ağırlığa göre) su yüzdesi olarak verilir. Bazı durumlarda kuru ağırlık dikkate alınır [5].

Sıvılardaki nem genellikle ağırlık olarak milyonda bir parça (ppm) olarak tanımlanır. "*1 parts per million (ppm), 1kg madde karışımındaki 1 mg madde konsantrasyonudur*" [5].

### 1.2.1. Rutubet (Moisture)

Genel olarak herhangi bir malzemenin su içeriği ile ilgili olan moisture terimi pratik nedenlerden dolayı sadece sıvılar ve katılarda kullanılır. Buna göre moisture terimi; bir sıvı veya katıdaki emilme veya birikme sonucu oluşan su içeriği olarak tanımlanır [5].

### 1.2.2. Nem (Humidity)

Gazlardaki su içeriğini tanımlamada kullanılır [5].

### 1.2.3. Çiylenme Noktası Sıcaklığı

Doymamış haldeki gaz–buhar karışımının toplam basıncı sabit tutularak sıcaklığı düşürülecek olursa, karışım içindeki buharın kısmi basıncı sabit kaldığı halde bağıl nem miktarı artar. Bunun sebebi sıcaklığın azalmasıyla birlikte buharın doyumluk basıncının da düşmesinden ileri gelir. Soğutmaya devam edildiğinde öyle bir noktaya ulaşılır ki, bu sıcaklıktaki sıvının buhar basıncı karışım içindeki buhar kısmi basıncına eşit hale gelir. Gaz buhar karışımının %100 doyum hale geldiği bu ilk sıcaklığa çiylenme noktası sıcaklığı denir.

Çiylenme noktasında bulunan bir gaz–buhar karışımını soğutmaya devam edecek olursak doyum haldeki bu karışımın içinde bulunan buharın bir kısmı yoğunlaşacaktır. Bunun sonucu olarak karışımdaki buhar mol sayısı, dolayısıyla karışımın buhar kısmi basıncı gittikçe azalacaktır. Fakat yoğunlaşma süresince karışımın doyumluk hali değişmeyecektir [5].

Hava–su buharı karışımının değişik sıcaklıklardaki sayısal değerleri üç örnekle verilmiştir.

1. Hava–su buharı karışımının ilk ölçüm sıcaklığı 30°C'e ise ölçülen değerler:

- Suyun buhar basıncı (30°C): 31,82 mmHg,
- Karışımın buhar kısmi basıncı (30°C): 23,76 mmHg olduğunda,
- Bağıl Nem (30°C): %74,67'dir.

2. Hava–su buharı karışımının sıcaklığı 25°C'ye düşürüldüğünde yeni değerler:

- Suyun buhar basıncı (25°C): 23,76 mmHg
- Karışımın buhar kısmi basıncı (25°C): 23,76 mmHg değişmediği için,
- Bağıl Nem (25°C): %100 olur.

3. Hava–su buharı karışımının sıcaklığı 20°C'ye düşürüldüğündeki yeni değerler:

- Suyun buhar basıncı (20°C): 17,54 mmHg,
- Karışımın buhar kısmi basıncı (20°C): 17,54 mmHg'ya düşer ve
- Bağıl Nem (20°C): %100 değeri değişmez.

Yukarıda verilen örnekler hava–su buharı karışımının sıcaklığı 30°C'den 25°C'ye düşürüldüğünde karışımın kısmi buhar basıncı değişmediği halde %100 doyumluğa ulaşılmıştır. Doyum hale ulaşılan bu ilk sıcaklık çiylenme noktası

sıcaklığıdır. Çiylenme noktası sıcaklığının altındaki her sıcaklıkta doymunluk derecesi değışmezken karışımın buhar kısmı basıncı sıvının yoğunlaşma miktarının artmasıyla sürekli düşmektedir.

#### 1.2.4. Gaz–Buhar Karışımları

Sıvılar temas ettikleri gaz fazı içerisinde buharlaşır. Gaz fazı içerisindeki buharın kısmı basıncı sıvının cinsine ve ortam sıcaklığına bağlıdır. Ancak buharı taşıyan gazın cinsine bağlı değildir [5].

Bir sıvının bir gaz içinde buharlaşması belli bir sıcaklıkta denge haline kadar devam eder. Denge halinde ise gaz fazı buharla doymun hale gelir. Denge hali durgun bir hal değildir. Sıvı fazdan gaz fazına, gaz fazından sıvı fazına kütle transferi devam eder. Fakat her iki yöne doğru devam eden, kütle transferinin eşit hızda olmasından dolayı net bir buharlaşma veya yoğunlaşma görülmez.

Belli bir sıcaklıkta sıvı ile denge halinde olan bir gaz–buhar karışımı içindeki sıvının kısmı buhar basıncı maksimum değerdedir ve bu basınç söz konusu sıcaklıktaki sıvının buhar basıncına eşittir. Bu nedenle bir gaz–buhar karışımının doymun halde olup olmadığı yalnızca buhar basıncı ile belirlenemez. Aynı zamanda sıcaklığında bilinmesi gerekir [5].

Pratikte gaz–buhar karışımları içindeki buharın kısmı basıncı genellikle doymun haldekinden daha düşük olur. Bu duruma doymamış hal denir. Sıvı buharı ile doymamış olan bu gaz–buhar karışımı içerisine yeniden sıvı buharlaştırılarak ilave edilirse karışım doymun hale getirilebilir. Buna benzer şekilde, doymamış bir gaz–buhar karışımı sabit basınç altında belli bir sıcaklığa kadar soğutulursa yine doymun hale ulaşılabilir [5].

Gaz–buhar karışımları ile gaz karışımları arasındaki en önemli fark, gaz–buhar karışımlarının sabit basınç altında soğutulması ile içinde bulundukları buharın yoğunlaştırılabilmesidir. Bunun dışında düşük basınçlardaki gaz–buhar karışımlarını aynen gerçek gaz karışımlarında olduğu gibi bir ideal gaz karışımı olarak düşünebiliriz. Bu durumda gaz–buhar karışımları içinde (buharın yoğunlaşma sıcaklığının üzerinde kalınması koşulu ile) ideal gaz denklemleri kullanılabilir [5].



### 1.2.5. Hava Nemini Belirleyen Kriterler

Hava ile su buharı karışımı en çok rastlanan gaz–buhar karışımıdır. İçinde su buharı bulunan havaya nemli hava denir. Hava içindeki su buharını ifade eden “nem” terimi gaz–buhar karışımları için kullanılmaktadır. Fakat hava nemi ısıtma, kurutma, klima ve havalandırma gibi bir çok endüstriyel işlemlerin temelini oluşturduğundan gaz–buhar karışımlarından ayrı ve özel olarak incelenmesi gerekir [5].

Atmosferik hava daima içinde bir miktar su buharı taşıdığı için kuru değildir. Fakat sis ve yağmur gibi özel hallerin dışında da genellikle doymun değildir. Normal sıcaklıklarda suyun buhar basıncı çok küçük olduğundan suyun hava içinde buharlaşma hızında çok yavaştır. Eğer hava belli bir sıcaklıkta uzun süre su ile temas edecek olursa, hava içindeki su buharı kısmi basıncı suyun söz konusu sıcaklıktaki buhar basıncına erişinceye kadar buharlaşmaya devam eder. Bu anda hava su buharı ile doymun hale gelir ve hava içindeki buharın kısmi basıncı maksimum bir değer alır [5].

Doymun hal, buhar–sıvı denge halini ifade eder. Suyun değişik sıcaklıklardaki buhar basıncı bellidir. Suyun buhar basınçları Çizelge 1.2’de 5°C ile 100°C arasındaki sıcaklıklar için verilmiştir.

Çizelge 1.2. Suyun değişik sıcaklıklardaki buhar basınçları [5]

T (°C)	P <sub>s</sub> (mmHg)
5	6,543
10	9,209
15	12,79
20	17,54
25	23,76
30	31,82
35	42,18
40	55,32
45	71,88
50	92,51

**Çizelge 1.2. (Devam) Suyun değişik sıcaklıklardaki buhar basınçları [5]**

<b>T (°C)</b>	<b>P<sub>s</sub> (mmHg)</b>
55	118,0
60	149,4
65	187,5
70	233,7
75	289,1
80	355,1
85	433,6
90	525,8
95	633,9
100	760,0

Eğer her hangi bir hava içindeki su buharı kısmi basıncı, Çizelgede verilen basınca eşitse söz konusu havanın doymun olduğu anlaşılır. Su buharı kısmi basıncının Çizelgede verilen değerden küçük olması halinde ise, hava doymamış haldedir [5].

#### **1.2.6. Havanın Doyurulması**

Doymamış hava, iki yöntem kullanılarak doymun hale getirilir.

1. Sabit basınç altında soğutma
2. Toplam basıncın artırılması

##### **1.2.6.1. Sabit basınç altında soğutma**

Sabit basınç altında soğutulan havanın sıcaklığı belli bir değere düştüğünde doymun hale gelir. Bu işlem sırasında hava içinde bulunan su buharı kısmi basıncı sabit kalır fakat sıcaklık düşürüldükçe suyun buharlaşma basıncında azalma olacağından, bu yolla havayı doymun hale getirmek mümkündür.

Örneğin; 25°C sıcaklıktaki su buharı kısmi basıncı  $P_s=9,2$  mmHg olan doymamış bir hava sabit basınç altında 10°C'ye kadar soğutulacak olursa doygun hale gelir. Çünkü 10°C'deki suyun buhar basıncı 9,2 mmHg' dir.

#### **1.2.6.2. Toplam basıncın arttırılması**

Doymamış havanın toplam basıncı arttırıldığında doygun hale gelir. Dalton kısmi basınçlar yasasına göre toplam basıncı arttırılan havanın içindeki su buharının kısmi basıncıda  $P_i=X_i \cdot P$  bağıntısına uygun olarak artar. Böylece hava içindeki su buharı kısmi basıncı, söz konusu sıcaklıktaki su buharı basıncına kadar arttırılabilir. Yukarıdaki örnekte verilen 25°C sıcaklıkta su buharı kısmi basıncı  $P_s=9,2$  mmHg olan doymamış bir havayı doyurmak için aynı sıcaklıkta 23,76 mmHg basınç değerine kadar sıkıştırmak yeterli olacaktır. Sıkıştırılan havadaki su buharı kısmi basıncı ( $P_s$ ), 25°C'deki suyun buhar basıncına, yani 23,76 mmHg değerine eşit olacaktır.

#### **1.2.7. Hava Neminin Arttırılması**

Hava nemini arttırmak için kullanılan çeşitli yöntemlerden en önemlileri şunlardır [5].

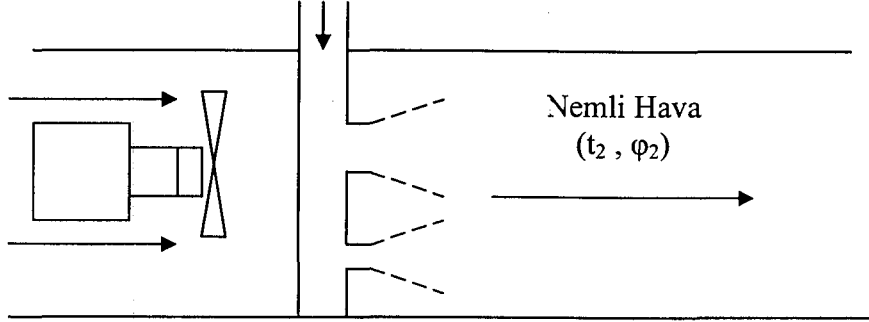
##### **1.2.7.1. Buhar püskürtülmesi**

Hava içine doğrudan buhar püskürtülerek nem istenilen düzeye kadar arttırılabilir. Bu işlem sırasında havanın sıcaklığında da artış olur. Bu yöntemin en önemli sakıncası, buhar içinde bulunan bazı yabancı gazların havaya koku vererek kirletmesidir.

##### **1.2.7.2. Adyabatik doyurma**

Doymamış haldeki hava içine, izole bir sistemde pulverize edilen su püskürtülerek buharlaşması sağlanır. Böylece havanın rutubeti artarken sıcaklığı

düŖer. Sıcaklığı  $t_1$ , bağıl nemi  $\varphi_1$  olan havanın adyabatik olarak doyrurulması Ŗekil 1.8’de verilmiŖtir. ÇıkıŖtaki hava sıcaklığı  $t_2$ ’ye düŖerken bağıl nemi  $\varphi_2$ ’ye yükselir.



Ŗekil 1.8. Havanın adyabatik olarak doyrurulması [5]

GiriŖteki hava neminin düŖük ve sıcaklığının yüksek olması istenir. Bağıl nemi düŖük olan hava içinde su daha kolay buharlaŖırken bağıl nem miktarı arttikça suyun hava içinde buharlaŖması zorlaŖır. Bu nedenle pratikte çoğu zaman havanın bağıl nemi %100 doygun hale getirilemez. Yinede uygun koŖullar sağlandığında havanın bağıl nemi bu yöntemle %100 doygun hale getirilebilir.

İŖlem adyabatik yapıldığından suyun buharlaŖması için gerekli ısı havadan alınır. Bunun sonucu olarak nemle doyrurulan havanın sıcaklığı düŖer. Bu yüzden klima tesislerinde istenilen sıcaklığa ulaŖıla bilinmesi için çıkıŖ havasının yeniden ısıtılması gerekir.

Nemle doyrurulan havanın son sıcaklığına “*adyabatik doyrurma sıcaklığı*” denir. Bu sıcaklık ıslak termometre sıcaklığına çok yakındır. Aradaki fark ıslak termometre sıcaklığının ölçülmesi sırasında çevreye olan ısı transferinin önlenememesinden ileri gelir. Bununla birlikte pratikte ıslak termometre sıcaklığı olarak ölçülen değer çok az bir hata ile adyabatik doyrurma sıcaklığı olarak kullanılır.

Sıcaklığı  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ve mutlak nemi  $\omega$  olan bir havanın adyabatik doyrurma sıcaklığı 1-1’de verilen denklemlerle hesaplanır:

$$dQ_1 = dt + d\omega (1,87 dt)$$

1-1

Burada;  $dQ_1$ , buharlaşma sırasında havadan alınan ısı miktarını

$dt$ , düşen hava sıcaklığı miktarını

$d\omega$ , hava içinde buharlaşan su miktarını (kg) göstermektedir.

Adyabatik doyum işlemi sırasında hava içinde  $d\omega$  kadar suyun buharlaşması sırasında havadan alınan ısı  $dQ_1$  kadardır. Bu durumdaki havanın sıcaklığı  $dt^\circ\text{C}$  kadar düşmüş olur. Bu ısı  $d\omega$  kadar suyun buharlaşması ile kazanıldığı için ikinci ısı değeri 1-2'de verilen denklemlerle tanımlanır.

$$dQ_2 = d\omega [ 2500 + 1,87 ( t - t_y ) ] \quad 1-2$$

İşlem adyabatik olduğu için bu iki ısı değeri bir birine eşit fakat ters işaretlidir. Yukarıda verilen 1-1 ve 1-2 eşitliklerinin integrali alınacak şekilde düzenlenirse yeni eşitlik;

$$d\omega/[1 + 1,87\omega] = dt/[2500 + 1,87 ( t - t_y )] \text{ olur.} \quad 1-3$$

1-3 eşitliğinin sol tarafını  $\omega$  dan  $\omega_0$ 'a sağ tarafının da  $t^\circ\text{C}$ 'den  $t_y$ 'ye kadar integrali alınırsa adyabatik doyum sıcaklığını veren bağıntının son hali elde edilmiş olur [18]. Bu bağıntı;

$$t_y = t - [2500 (\omega_0 - \omega)]/[1 + 1,87 \omega] \text{ olur.} \quad 1-4$$

Burada;  $t_y$ , adyabatik doyum sıcaklığı veya ıslak termometre sıcaklığını

$t$ , doymamış havanın ilk sıcaklığını

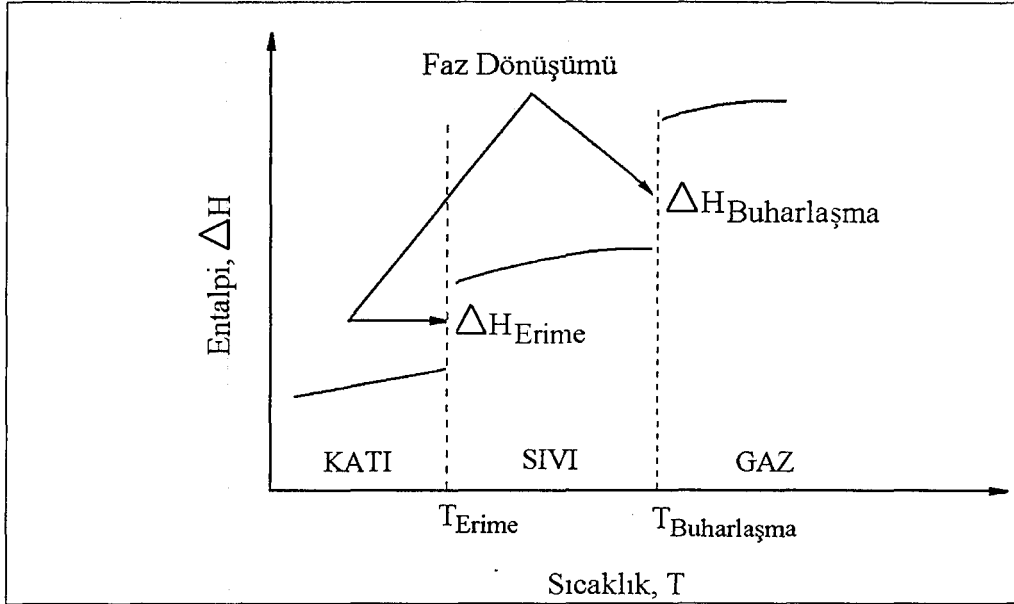
$\omega$ , havanın başlangıçtaki mutlak nemini (kg su/kg kuru hava)

$\omega_0$ , adyabatik doyum sonundaki mutlak nemi (kg su/kg kuru hava) göstermektedir.

### 1.2.7.3. Adyabatik doyum işlemindeki madde enerji denkliği

Adyabatik doyum işleminde sistem ile çevresi arasında hiçbir ısı alışverişi olmaz. Bu nedenle sisteme giren entalpiler toplamı sistemden çıkan

entalpiler değerine eşit olur. Saf maddenin faz dönüşüm ısıları belli bir sıcaklık için sabit ve bellidir. Faz dönüşüm ısılarının diyagramı Şekil 1.9'da verilmiştir.



Şekil 1.9. Faz dönüşüm ısıları [4]

Farklı sıcaklıklardaki suyun buharlaşma entalpileri; 0°C'de  $\Delta H_b = 2501$  (kJ/kg), 25°C'de  $\Delta H_b = 2442$  (kJ/kg) dır. Bu değerler aynı zamanda su buharının söz konusu sıcaklıktaki yoğunlaşma ısılarıdır [5].

Şekil 1.9'da görüldüğü gibi doymamış hava sisteme  $t_1$  sıcaklığında ve  $\omega_1$  mutlak neminde girmekte,  $t_2$  sıcaklığında ve  $\omega_2$  mutlak neminde çıkmaktadır. Adyabatik doyurma işlemi sırasında hava içinde buharlaşan suyun kütlesi  $m_s$  (kg) ve sıcaklığı da  $t_2$  ise, aşağıda 1-5 ve 1-6'da verilen madde-enerji denklileri yazılabilir [5].

$$\text{Su denkliği : } m_s = \omega_2 - \omega_1 \quad 1-5$$

$$\text{Isı denkliği : } h_2 = h_1 + m_s h_s \quad 1-6$$

Burada;  $h_1$ , havanın girişteki entalpisini (kJ/kg kuru hava)

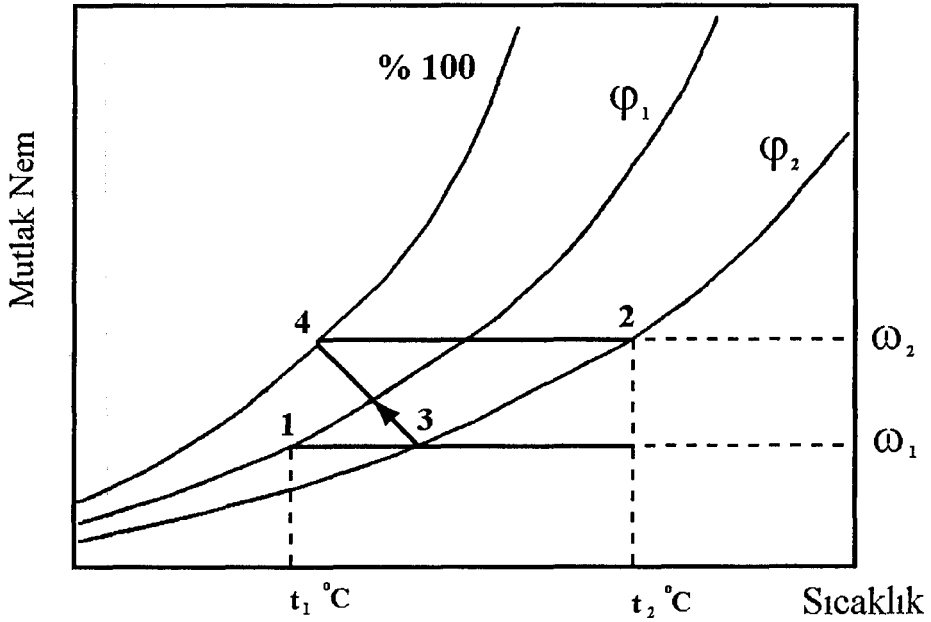
$h_2$ , havanın çıkıştaki entalpisini (kJ/kg kuru hava)

$h_s$ ,  $t$  sıcaklığındaki suyun entalpisini (kJ/kg kuru hava)

$m_s$ , 1kg kuru hava içindeki buharlaşan suyun kütlesini göstermektedir (kg).

#### 1.2.7.4. Endüstride kullanılan yöntem

Havanın hem sıcaklığının hem de bağıl neminin istenilen değerlere yükseltilebilmesi için önce hava belli bir sıcaklığa kadar sabit basınç altında ısıtılır. Böylece havanın bağıl nemi düşürülerek adyabatik doyurma işlemine hazır hale getirilir (Eğer atmosferden alınan havanın bağıl nemi yeteri kadar düşük ise ön ısıtma yapılmasına gerek kalmayabilir). Adyabatik doyurma yapılarak hava içinde yeterli miktarda su buharlaştırılır. Bu işlem sırasında havanın bağıl nemi yükselirken sıcaklığında düşme olur. Daha sonra bu hava sabit basınç altında uygun bir sıcaklığa kadar ısıtılarak istenilen sıcaklık ve bağıl nemde hava elde edilir. Şekil 1.10'da bir noktasında (1) noktasında ( $t_1$ ,  $\varphi_1$ ) halinde bulunan bir havanın, sıcaklığı ve mutlak nemi artırılarak ( $t_2$ ,  $\varphi_2$ ) halindeki (2) noktasına yükseltilmesi görülmektedir.



Şekil 1.10. Hava neminin artırılması [5]

Şekil 1.10'da görüldüğü gibi (1) noktasında olan hava önce (1-3) yoluyla sabit basınç altında ısıtılır. Bu hava adyabatik olarak doyurularak (4) noktasında doymuş hale getirilir. Doymuş haldeki bu havanın bağıl nemine % 100'den ( $\varphi_2$ ) ye düşürebilmek için sabit basınç altında ( $t_2$ ) sıcaklığına kadar (4-2) yoluyla ısıtılır.

Böylece hava ( $t_1, \phi_1$ ) halinden ( $t_2, \phi_2$ ) haline kadar mutlak nemi ( $\omega_2 - \omega_1$ ) kadar arttırılmış olur.

#### 1.2.7.5. Su içinden geçirme

Su içinden geçirilen havanın nemi arttırılabilir. Ancak suyun hava içinde yeteri kadar buharlaşabilmesi için geniş yüzeylerde uzun süre temas etmesi gerekir bu işlem dolgulu kolonlar içinde yapılır. Nem ile doyurulacak hava kolon içinde n yukarıya hareket ederken yukarıdan su verilir. Bu işlem sonunda havanın mutlak nemi artarken sıcaklığı düşer. Eğer havanın çıkışta belli bir sıcaklıkta olması istenirse giren su veya hava önceden ısıtılır [5].

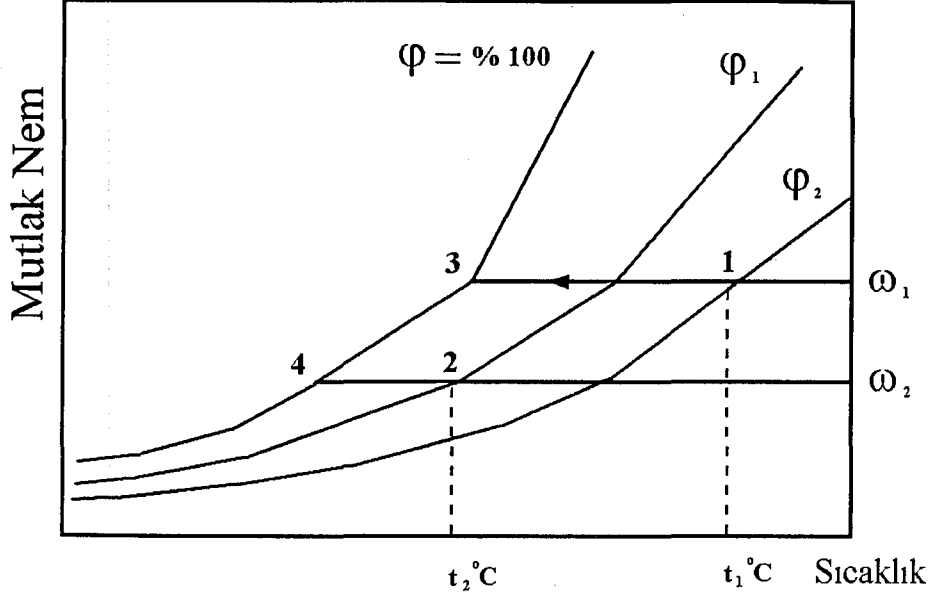
#### 1.2.8. Hava Neminin Azaltılması

Hava neminin azaltılmasının en basit yolu, hava içindeki su buharının yoğunlaştırılarak uzaklaştırılmasıdır. Bu amaçla hava ya sabit basınç altında çiylenme noktasının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulur yada sabit sıcaklıkta sıkıştırılarak basıncı arttırılır. Her iki halde de hava içinde bulunan su buharının bir kısmı yoğunlaşarak ayrılır [5].

Klima tesislerinde daha çok birinci yol izlenir. Yaz aylarında atmosferden alınan sıcak hava normal sıcaklıklara kadar soğutulduğunda bağıl nem çok yükselir. Hatta çiylenme noktasına bile erişilebilir. Yüksek bağıl nem insanların yaşam ortamları için uygun değildir. Bu nedenle klima tesislerinde hava içinde bulunan su buharının bir kısmının yoğunlaştırılarak azaltılması yoluna gidilir. Bu amaçla Şekil 1.11'de verilen yol izlenir.

Atmosferden  $t_1$  sıcaklığında ve  $\omega_1$  bağıl neminde alınan hava önce sabit basınç altında (1-3) yoluyla soğutulur. (3) noktasında bağıl nem %100'e ulaşır ve hava içindeki su buharı yoğunlaşmaya başlar. Hava çiylenme noktasının altında soğutulmaya devam edilirse, yoğunlaşma nedeniyle havanın mutlak nemi gittikçe azalır. Böylece istenilen mutlak nem değerine varılabilir. Yoğunlaştırma işleminden sonra doymuş halde bulunan hava  $t_2$  sıcaklığına kadar sabit basınç altında ısıtılır. Böylece  $\phi_2$  bağıl neminde hava elde edilmiş olur.





Şekil 1.11. Hava neminin azaltılması [5]

### 1.2.9. Hava Neminin Hesaplanması

Hava içindeki su buharı kısmi basıncı çok küçük olduğundan, nemli hava bir ideal gaz karışımı olarak düşünülebilir. Böylece nemli havada ideal gaz denklemleri kullanılarak hesap yapılabilir. İdeal gaz yasalarına dayanılarak elde edilen ve hava neminin hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

1. Mutlak nem
  - a. Molar mutlak nem
  - b. Kütleli mutlak nem
2. Bağlı nem
3. Yüzde nem

#### 1.2.9.1. Mutlak nem

Birim kütledeki kuru havanın taşıdığı su buharı kütlesi olarak tanımlanır ve molar ve kütleli olarak iki şekilde ifade edilir.

##### A. Molar mutlak nem

Bir mol kuru havanın taşıdığı su buharının mol sayısıdır. Molar nem, söz konusu havanın toplam basıncı (P) ve hava içinde bulunan su buharı kısmi basıncına (P<sub>s</sub>) bağlı olarak aşağıda verilen 1-7'deki denklemlerle hesaplanır.

$$\omega_{\text{molar}} = P_s / (P - P_s) \text{ mol su buharı/1 mol kuru hava} \quad 1-7$$

#### B. Kütlesel mutlak nem

1kg kuru havanın taşıdığı su buharının ağırlığıdır. Havanın kütlesel mutlak nemi 1-8'de verilen denklemlerle bulunabilir.

$$\omega_{\text{kütlesel}} = 0,622 P_s / (P - P_s) \text{ kg su buharı/1kg kuru hava} \quad 1-8$$

1-8'deki bağıntılardan da görüldüğü gibi mutlak nem, hava içinde bulunan su buharı kısmi basıncı ile nemli havanın toplam basıncına bağlıdır. Belli bir barometrik basınç söz konusu olduğunda havanın mutlak nemi yalnızca su buharının kısmi basıncına bağlı kalır. Fakat bu bağıntı lineer değildir. Her mutlak nem için ayrı bir su buharı kısmi basıncı söz konusudur. Hava basıncının sabit kalması halinde mutlak nem yalnız su buharı kısmi basıncı ile kontrol edilebilir.

#### 1.2.9.2. Bağlı nem

Belli bir V hacmindeki nemli hava içinde bulunan su buharı mol sayısının aynı sıcaklıkta ve hacimde doymuş hava içinde bulunan su buharı mol sayısına oranıdır. Bu oranı oluşturmak için, su buharı kısmi basıncı P<sub>s</sub>, hacmi V ve sıcaklığı T olan bir nemli hava içinde n<sub>s</sub> mol su buharı olduğu düşünülürse bu hava aynı sıcaklık ve hacimde doymuş hale getirildiğinde su buharı basıncı P<sub>s</sub><sup>o</sup> ve su buharı mol sayısı da n<sub>s</sub><sup>o</sup> olur. Her iki durum için ideal gaz denklemi yazılırsa;

$$P_s \cdot V = n_s R T \quad 1-9$$

$$P_s^o \cdot V = n_s^o R T \quad 1-10$$

1-9 ve 1-10'daki iki denklem taraf tarafa bölünmesi ile elde edilen eşitliğin her iki tarafı 100 ile çarpılarak 1-11'de verilen bağıl nem denklemi bulunur.

$$\Phi=100 (n_s/n_s^{\circ})=100 (P_s/P_s^{\circ}) \quad 1-11$$

1-11'deki bağıntıdan da görüldüğü gibi bağıl nem hava içinde bulunan su buharı kısmi basıncının aynı sıcaklıktaki suyun buhar basıncına oranına eşittir. Doymun haldeki havanın su buharı kısmi basıncı ise söz konusu sıcaklıktaki suyun buhar basıncına eşittir (söz konusu sıcaklıktaki doymamış hava sabit sıcaklıktaki su buhar basıncına kadar sıkıştırılarak doymun hale getirilir). Sonuç olarak; bağıl nem buharlaşan sıvının cinsine, sıcaklığına ve basıncına bağlı olduğu halde gazın cinsine bağlı değildir.

### 1.2.9.3. Yüzde nem

Herhangi bir andaki mutlak nemin aynı sıcaklık ve toplam basınçtaki doymun havanın mutlak nemine oranıdır. Yüzde nem  $\mu$  işareti ile gösterilir ve *doymunluk yüzdesi* olarak da tanımlanabilir. Aşağıda verilen 1-12 ve 1-13'deki denklemler yüzde nemi tanımlamaktadır.

$$\mu=(\omega/\omega^{\circ}) 100 \quad 1-12$$

$$\mu=\phi (P-P_s^{\circ}/P-P_s) 100 \quad 1-13$$

1-13'deki denklemin son eşitliğinden de görüldüğü gibi yüzde nem bağıl nemden farklıdır. Yinede bir birine çok yakın olan bu iki değer her ikisi de doymunluk yüzdesi olarak kullanılmaktadır. Genellikle doymun haldeki su buharı basıncı ( $P_s^{\circ}$ ) su buharı kısmi basıncından ( $P_s$ ) büyük olduğu için bağıl nem değeri de ( $\phi$ ) yüzde nem ( $\mu$ ) değerinden büyüktür. Doymun hale ulaşıldığında ise yani  $P_s=P_s^{\circ}$  olduğunda, bağıl nem ( $\phi$ ) yüzde neme ( $\mu$ ) eşittir.

Yukarıda verilen hesaplama yöntemlerine ek olarak çiylenme noktasının ölçülmesiyle de karışım içindeki buharın kısmi basıncı belirlenebilir. Bu yöntem stokiometrik hesaplamalarda büyük kolaylık sağlar. Deneysel olarak ölçülebilen

çiylenme noktasından, su buharı kısmi basıncına oradan da mutlak nem ve bağıl nem değerlerine hesapla geçilebilir. Çiylenme nin başladığı sıcaklık kullanılarak buharın o sıcaklıktaki doyumluk basıncı Çizelge 1.2'den okunur. Böylece söz konusu gaz–buhar karışımının nemi kolaylıkla hesaplanabilir. Bu yöntem, endüstride hava nemi kontrolünde büyük kolaylık sağlar. 0°C altındaki çiylenme noktasında nem hemen donarak yavaşça kristal kafes büyümesi (kar tanesi gibi) ölçüm belirsiz olur. Buna rağmen 0°C altındaki sıvı fazda, uzatılmış zaman için moleküler ajitasyon konveksiyon oranı, örnek gaz sıcaklığı, yabancı maddeler ve başka değişkenlere bağlı olarak nem var olabilir.

### 1.2.10. Nemli Havanın Entalpisi

Nemli bir havanın entalpisi hava içinde bulunan su buharının ve kuru havanın entalpileri toplamından oluşur. Mutlak nemi  $\omega$  (kg su/kg kuru hava) ve sıcaklığı  $t$  olan nemli bir havanın entalpisi için 1-14'de verilen bağıntı geçerlidir.

$$h = h_h + \omega h_b \quad 1-14$$

Burada;  $h$ , nemli havanın entalpisini (kj/kg kuru hava)

$h_h$ , kuru havanın entalpisini (kj/kg kuru hava)

$h_b$ , su buharının entalpisini (kj/kg buhar)

$\omega$ , havanın mutlak nemini (kg su/kg kuru hava) göstermektedir.

Kuru hava ve su buharının entalpilerini hesaplamak için bir referans noktasının seçilmesi gerekir. Su buharı için referans noktası olarak aynen buhar çizelgelerinde olduğu gibi suyun üçlü noktası (0,01 ve 4,6 mmHg) alınır. Bu noktada doyum suyun entalpisi sıfır kabul edilir. Suyun referans noktadaki buharlaşma entalpisi 2500 kj/kg olarak alınmıştır. Herhangi bir  $t$  deki 1kg buharın entalpisi 1-15'de verilen denklemle hesaplanır:

$$h_b = \Delta h_b + c_p (t - t_0) \quad 1-15$$

Burada ;  $h_b$ , t°C'deki buharın entalpisini (kj/kg)

$\Delta h_b$ , suyun referans noktadaki buharlaşma entalpisini (kj/kg)

$c_p$ , su buharının sabit basınçta ortalama ısınma ısısını (kj/kg°C)

$t_o$ , referans nokta sıcaklığını (0°C) göstermektedir.

Bilinen değerler 1-15'de verilen buharın entalpi denkleminde yerine yazılırsa t°C'deki hava içinde bulunan 1kg buharın entalpsi 1-16'da verilen eşitliğe dönüşür.

$$h_b = 2500 + (1,87) t \quad 1-16$$

Buhar entalpisinden ayrı olarak 1kg kuru havanın entalpisinin de hesaplanması gerekir. Kuru havanın entalpisini hesaplamak için referans nokta olarak 0°C veya düşük sıcaklıklarda negatif entalpi değeri elde etmek için -20°C seçilmektedir. Kuru havanın sabit basınçtaki ortalama ısınma ısısı, normal sıcaklıklar için 1,0 kj/kg°C alınabilir. Referans noktada kuru havanın entalpsi sıfır kabul edildiğine göre herhangi bir t°C sıcaklığındaki kuru havanın entalpsi ise 1-17'de verilen denklemlerle hesaplanır ( $t_o = -20^\circ\text{C}$  alınmıştır).

$$h_h = \bar{c}_p (t - t_o) \quad 1-17$$

Burada ;  $h_h$ , t°C'deki kuru havanın entalpisini (kj/kg)

$\bar{c}_p$ , kuru havanın sabit basınçta ortalama ısınma ısısını (kj/kg°C)

$t$ , hava için referans nokta sıcaklığını (°C) göstermektedir.

Bilinen bu değerler 1-17'deki kuru havanın entalpi denkleminde yerine yazılırsa t sıcaklığındaki 1kg kuru havanın entalpsi için 1-18'deki bağıntı bulunur.

$$h_h = 1,0 (t + 20) \quad 1-18$$
$$h_h = t + 20$$

Nemli havanın entalpsi 1kg kuru hava için verilir. Bunu elde etmek için 1kg kuru hava ile bunun yanında bulunan su buharının entalpsi toplanır. Sıcaklığı

$t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ve mutlak nemi  $\omega$  olan bir nemli havanın entalpisini hesaplayabilmek için 1kg buharın entalpisi  $h_b$  ile 1kg kuru havanın entalpisinin  $h_h$  bilinen değerlerinin 1-19'da verilen denklemde yerine yazılması gerekir.

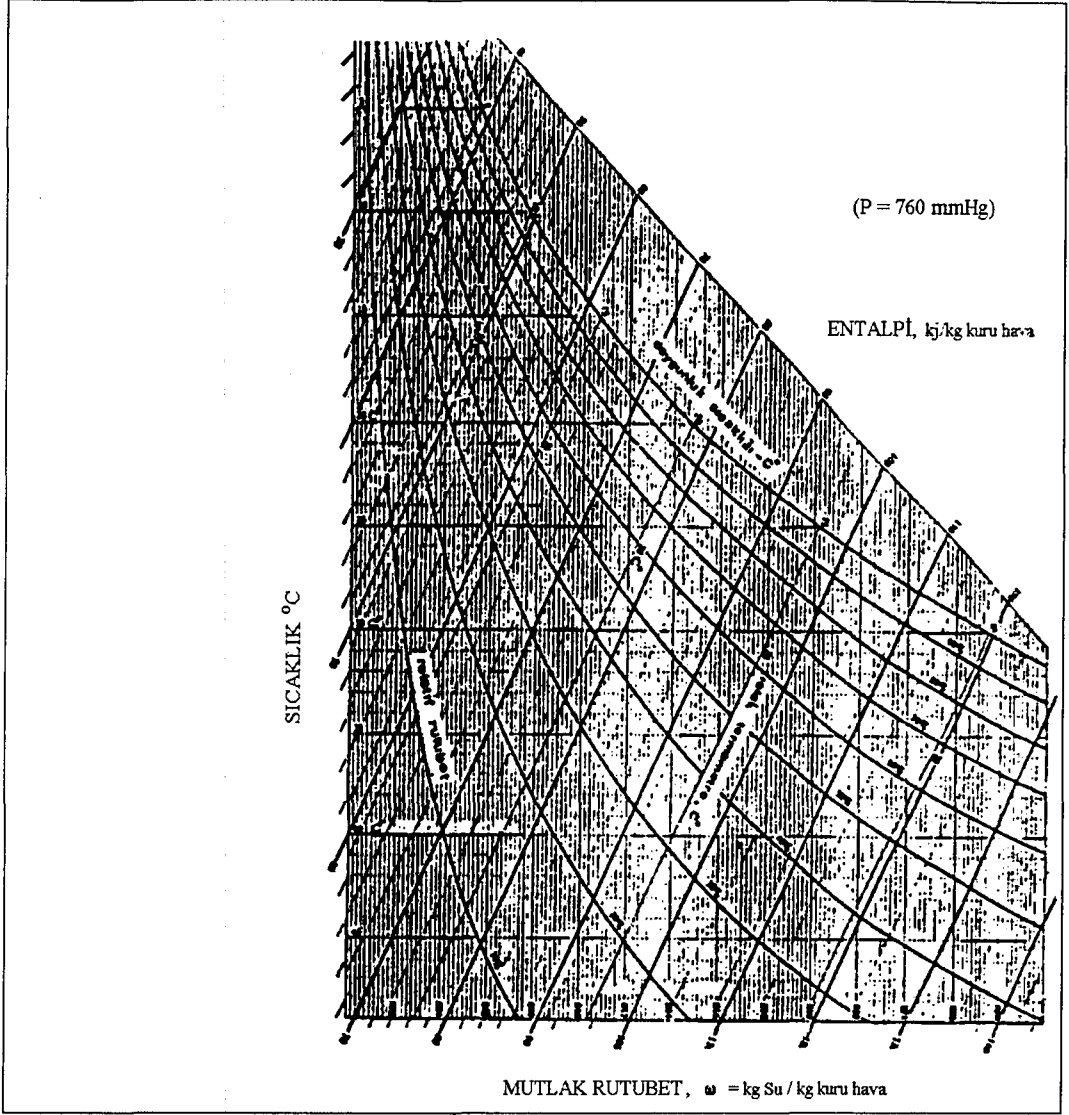
$$h = h_h + \omega h_b \quad 1-19$$

Böylece nemli hava entalpisinin son hali 1-20'deki denklemle verilir.

$$h = (t + 20) + \omega (2500 + 1,84) \quad 1-20$$

### 1.2.11. Hava Nem Diyagramları

Havanın mutlak neminin, bağıl neminin, çiylenme noktasının, ıslak termometre sıcaklığının ve entalpisinin doğrudan okunabildiği hava nem diyagramları hazırlanmıştır. Bu diyagramlardaki apsiste kuru termometre sıcaklığı, ordinatta ise mutlak nem veya hava içindeki su buharı kısmi basınç değerleri bulunur. Havanın nem değerleri ile ilgili tüm verileri bir arada gösterilebildiği hava nem diyagramı Şekil 1.12'de verilmiştir.



Şekil 1.12. Hava nem diyagramı [5]

Her diyagram belli bir toplam basınç (genellikle 760 mmHg) için hazırlanmıştır. Buna rağmen nem hesaplarında toplam basıncın etkisi çok az olduğundan, toplam basıncın biraz değişik olması halinde aynı diyagramı çok az bir hata ile pratik olarak kullanmak mümkündür.

Havanın kütesel mutlak nemini veren 1-8'deki denklemden de görüldüğü gibi mutlak nem havanın basıncı ve hava içinde bulunan su buharı kısmi basıncına bağlıdır. Toplam basınç sabit tutulduğunda, mutlak nem yalnızca hava içinde bulunan su buharı kısmi basıncının fonksiyonu olur.

1-11'de verilen denklemde ise bağıl nem hem su buharı kısmi basıncına hem de suyun buhar basıncı yoluyla dolaylı olarak sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle

hava nem diyagramında sabit bağıl nem eğrileri hiperbolik eğriler halinde görülür. Bağıl nemin %100 olduğu eğriye *doygunluk eğrisi* denir. Bu eğri her sıcaklık için maksimum mutlak nemi ifade eder. Diğer taraftan bu eğri mutlak nemi bilinen bir havanın çiylenme noktasının belirlenmesinde de kullanılabilir.

Hava nem diyagramında ıslak termometre sıcaklıkları eğri doğrular halinde verilmiştir. Bir havanın ıslak ve kuru termometre sıcaklıkları bilirse, diyagramdan bağıl nem doğrudan okunabilir.

Doygunluk eğrisi üzerinde ıslak ve kuru termometre sıcaklıkları bir birine eşittir. Bu noktadaki bağıl nem değeri de %100' dür. Nemli havanın entalpisi, ıslak termometre sıcaklığına yaklaşık olarak paralel bir değişim gösterir. Mutlak nemi ve sıcaklığı bilinen havanın entalpisini diyagramdan doğrudan okumak mümkün olur. Entalpi değerleri kJ/kg kuru hava olarak verilmiş olup, referans olarak hava için  $-20^{\circ}\text{C}$  su için  $0^{\circ}\text{C}$  seçilmiştir.

### 1.3. Adsorpsiyon Tanımı ve Özellikleri

İlk defa 1773 yılında Schede ve 1777 yılında Abbe Fontana tarafından keşfedilmiştir. Lowtiz 1785 yılında aktif kömürün bazı çözeltilerin rengini giderdiğini göstermiştir. Adsorpsiyon üzerine ilk sistematik araştırmayı 1814 yılında Saussure yapmıştır. Bu konu ile daha sonraki yıllarda yapılan araştırmaların 1930'a kadar olanını Mc. Bain, 1942'ye kadar olanını S. Brunauer ve 1951 yılına kadar olanını da kimya mühendisliğindeki kullanım yerleri itibariyle Mantell özetlemiştir [6].

#### 1.3.1. Adsorpsiyon Tanımı

Sabit basınçta bir gaz veya buhar aktiflenmiş (ısıtılarak kristal suyun uzaklaştırılması) bir katı ile temas ettirildiğinde hacminin küçüldüğü gözlenir. Eğer aynı işlem sabit hacimde yapılırsa bu defada basıncının düştüğü gözlenir. Bu durum; gaz veya buharın bir kısmının aktiflenmiş katı tarafından alındığını gösterir. Bu durum iki şekilde olabilir [6].



Bunlar:

1. Adsorpsiyon (bünye içine soğurulma–emilme):

Gaz molekülleri veya buharın katı tarafından soğurulması (emilmesi) olayıdır.

2. Adsorpsiyon (yüzeğe tutunma–yapışma):

Bu olayda ise gaz molekülleri veya buhar katı yüzeyine tutunur (yapışır).

Bu her iki durum aynı anda olursa sorpsiyon olarak tanımlanır.

Gaz veya buharı alan katıya adsorplayıcı (adsorbent), katının yüzeyinde tutunan gaz veya buhara da adsorplanan (adsorbate) denir. Çok sayıdaki farklı adsorplanabilecek maddelere karşılık selektif olarak duyarlılığı olan bir çok adsorplayıcı bilinmektedir. Sadece su ve su buharına duyarlı adsorplayıcılar Çizelge 1.3’de verilmiştir [7].

Çizelge 1.3. Su ve su buharına duyarlı adsorplayıcılar [7]

Adsorplanan	Adsorplayan	A(m <sup>2</sup> /g)	Sıcaklık ( K)	Max.P.(kPa)	Metot	Veri
Su	Aktif Karbon (Cloth CDE)	1350	303	0,8 Psat.	Gravimetrik	Grafiksel
	Aktif Karbon (HGI - 780)	724	303	0,9 Psat.	Gravimetrik	Grafiksel
	Aktif Karbon (Shirasagi S)	972	303	0,9 Psat.	Gravimetrik	Grafiksel
Su	Karbon Molekül Eleği (Cesa)	—	303	3	Volumetrik	Grafiksel
Su	Silika Jel	355–	299	Psat.	Gravimetrik	Grafiksel
	Silika jel (Davison 3)	455	298-274	Psat.	Gravimetrik	Grafiksel
	Silika Jel (KSK)	299	348	Psat.	Volumetrik	Grafiksel
	Silika jel (Mobil Sorbead)	380	301-326	12	Gravimetrik	Çizelge
	650					
Su	Silika (G-200-0, Univlever)	—	298	0,8 Psat.	Gravimetrik	Grafiksel
	Silika (Hi Sil 233)	—	298	0,6 Psat.	—	Grafiksel
Su	Zeolit (KNaX)	—	296-373	76	—	Grafiksel
	Zeolit (NaX)	—	296-373	76	—	Grafiksel
	Zeolit (NK20B, Cesa)	—	303	3	Volumetrik	Grafiksel
	Zeolit (5A)	—	303	3	Volumetrik	Grafiksel

Burada; A, adsorpsiyon malzemesinin yüzey alanını

Sıcaklık, kelvin cinsinden çalışma sıcaklığını

Max.P, adsorpsiyon cinsinden izoterminin maksimum basıncını

Psat., adsorplanan sıvının doymuş buhar basıncını

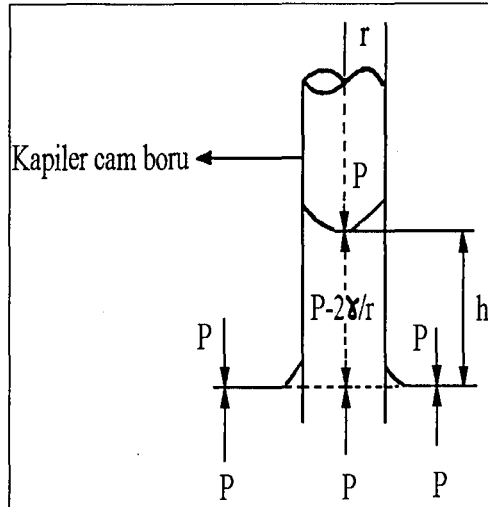
Metot, deneysel teknikleri

Veri, deneysel sonuçlarının sunuluş yöntemlerini göstermektedir.

Bazı katılar gözenekli yapıya sahip olduklarından iç yüzeyleri dış yüzeylerinden daha büyüktür. Fakat iç yüzeylerindeki adsorpsiyon dış yüzeylerindeki kadar kolay değildir. Çünkü gaz molekülleri içeri girerken katının atom, molekül veya iyonları ile etkileşirler. Gaz veya buhar gözenekli maddenin kapiler boyutundaki iç boşluklarında yoğunlaşıyorsa buna kapiler kondensasyon denir [6].

### 1.3.2. Kapilerite

Sıvıların ince uzun kapiler tüplerde yükselmesi veya alçalması olayı sıvıların yüzey gerilimleri ile ilgilidir. Su yada her hangi bir sıvının (cıva hariç) kapiler bir boru ile yüzeyinde yükselme eğilimi Şekil 1.13'de verilmiştir [8].



Şekil 1.13. Kapiler değişim [8]

Sıvının cam yüzeyinde yayılması ne kadar büyükse enerji gereksinimi o kadar düşük demektir. Şekil 4.1'deki kapiler boru içerisinde oluşan eğrisel yüzeydeki basınç atmosferik basınçtan yaklaşık olarak  $2\gamma/r$  kadar daha küçüktür.

Kapiler boruda oluşan sıvı yüzeyinin hemen dışındaki basınç atmosferik basınç (P) iken eğri yüzeyinin hemen altında  $P-2\gamma/r$ 'dir. Yüksek dış basınç sıvının kapiler boruda *hidrostatik denge* kurulana kadar yükselmesine neden olur.

Sıvı kolonu tarafından oluşturulan hidrostatik basınç (P); sıvı yoğunluğunun ( $\rho$ ) ve yüksekliğininse (h) olduğu durumda 1-21'de verilen ifadeye eşit olur [8].

$$P = \rho g h \quad 1-21$$

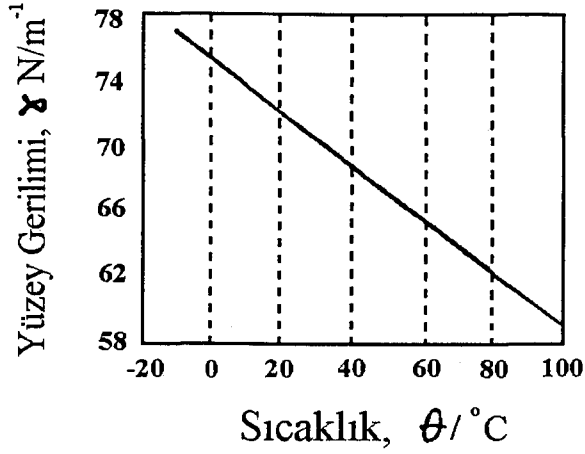
Hidrostatik basıncın denge durumundaki basınç farkına ( $2\gamma/r$ ) eşit olduğu durumda kapiler yükseklik (h) 1-22'deki ifadeye eşit olur.

$$\begin{aligned} \rho g h &= 2\gamma/r \\ h &= 2\gamma/r \rho g \end{aligned} \quad 1-22$$

Bu bağıntı sıvıların yüzey gerilimlerinin oldukça duyarlı olarak ölçülmesine olanak sağlar. Örneğin; 25°C'de su 0,20 mm yarıçapındaki kapilerde 7,36 cm yükselir. Bu sıcaklıktaki yüzey gerilimi ise;

$$\begin{aligned} \gamma &= 1/2 \rho g h r \text{ denkleminde} \\ &= 1/2 (997,1 \text{ kg m}^{-3}) (7,36 \cdot 10^{-2} \text{ m}) (0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 72 \text{ Nm}^{-1} \text{ bulunur.} \end{aligned}$$

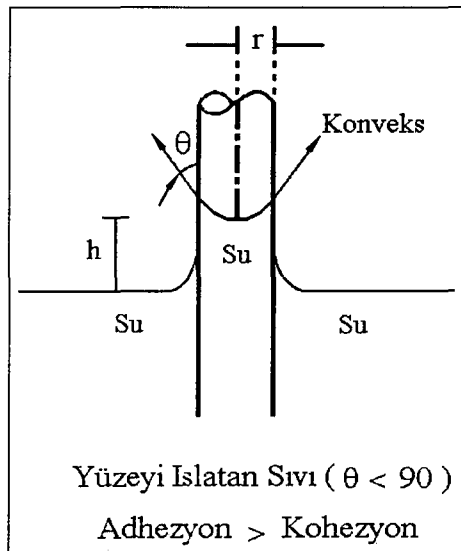
Sıcaklık arttıkça yüzey gerilimi düşer. Suyun yüzey geriliminin sıcaklıkla değişimi Şekil 1.14'de gösterilmiştir [8].



Şekil 1.14. Suyun yüzey geriliminin sıcaklıkla değişimi [4]

### 1.3.2.1. Kapiler yükselme

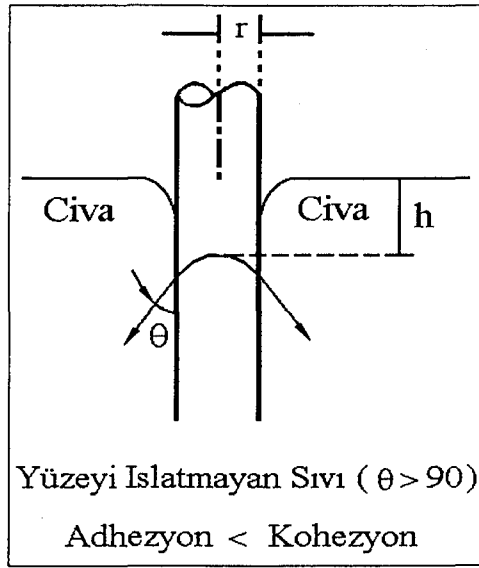
Sıvı ile kapiler boru malzemesi arasındaki adhezyon kuvvetlerinin (farklı cinsteki moleküllerin birbirlerini çekme kuvvetlerinin) sıvı içerisindeki kohezyon kuvvetlerinden (aynı cinsteki moleküllerin birbirlerini çekme kuvvetlerinden) büyük olması durumunda sıvı (su), kapiler tüp duvarı tarafından çekilir. Sonuç olarak dış basınçla dengelenen sıvı maksimum yüksekliğe erişir. Kapiler boruda yükselen sıvı şeklinin konveks (iç bükey) olur. Bu durum Şekil 1.15’de şematize edilmiştir. Suyun (yüzeyi ıslatan sıvı) oda sıcaklığındaki (20°C) yüzey gerilimi  $72,75 \text{ Nm}^{-1}$ ’dir [9].



Şekil 1.15. Sıvıların kapiler yükselmesi [9]

### 1.3.2.2. Kapiler alçalma

Sıvı ile kapiler boru malzemesi arasındaki adhezyon kuvvetleri, sıvı içerisindeki kohezyon kuvvetlerinden küçüktür. Bu durumdaki sıvı (cıva) tüp duvarlarından itilir. Dış basıncı dengelemeye çalışan sıvı maksimum derinliğe ulaşır. Kapiler boruda alçalma sıvının şekli konvaks (dış bükümlü) olur. Bu durum Şekil 1.16'da şematize edilmiştir. Cıvanın (yüzeyi ıslatmayan sıvı) oda sıcaklığındaki (20°C) yüzey gerilimi 472,00 Nm<sup>-1</sup>'dir [9].



Şekil 1.16. Sıvının kapiler alçalması [9]

Yükselmeye sebep olan kuvvet ( $F_y$ ) yüzey geriliminden kaynaklanan kuvvetin düşey bileşenidir. 1-23'de verilen bu kuvvet, uzunluğu ( $2\pi r$ ) olan sıvı kenarı boyunca etkilidir.

$$F_y = 2 \pi r \gamma \cos \theta \quad 1-23$$

Bu kuvvet sıvı kolonu üzerinde aşağıya doğru etkili olan yerçekimi kuvveti ( $F_a$ ) ile dengelenir.

$$F_a = \pi r^2 \rho g h \quad 1-24$$

Denge durumunda etkili olan ve 1-25'de verilen yüzey gerilimi ( $\gamma$ ), 1-23 ve 1-24'de verilen bu iki kuvvetin eşitliğinden elde edilir.

$$\begin{aligned} F_y &= F_a \\ \pi r \gamma \cos \theta &= \pi r^2 \rho g h \\ \gamma &= (r \rho h g) / 2 \cos \theta \end{aligned} \quad 1-25$$

Burada;  $\gamma$ , yüzey gerilimini ( $N/m^{-1}$ )

$r$ , tüpün yarı çapını (m)

$\rho$ , sıvının özgül ağırlığını ( $kg/m^3$ )

$h$ , kapiler yüksekliği (m)

$\theta$ , yer çekim ivmesini ( $m/s^2$ ) göstermektedir.

### 1.3.3. Fiziksel ve Kimyasal Adsorpsiyon

Adsorpsiyon esnasında bir birine değen gaz ile katı molekülleri arasında ortak bir yüzey meydana gelir. Bu ortak yüzeydeki gaz ile katı molekülleri birbirlerini elektrostatik, kovalent veya van der Waals kuvvetlerinin etkisi ile çeker veya iter.

Gaz ile katı arasında; zayıf van der Waals kuvvetleri (dispersiyon, yönelme veya indükleme) ile meydana gelen yoğunlaşmaya benzer bir etkileşme varsa fiziksel adsorpsiyon, kimyasal bağ etkileşimi gibi kuvvetli aktiflenmiş bir etkileşme varsa kimyasal reaksiyona benzer bir olay olan kimyasal adsorpsiyon oluşur.

Şekil ne olursa olsun katı ile gaz arasındaki ortak yüzeyde etkili olan kuvvetler, sıvılarda olduğu gibi yüzey gerilimini değiştirirler.

Katı (kristal veya amorf) ve sıvıların atomik yapısını oluşturan atomlar incelendiğinde yapının ortasında yer alan atom veya moleküllerin her yönde çekildiği (eşit veya farklı kuvvetlerle) gözlenir. Fakat yüzeylerinde yer alan atom veya moleküllere yüzey yönünde hiçbir kuvvet etki etmez. Katılarla sıvıların yüzey gerilimleri karşılaştırıldığında katıların daha yüksek yüzey gerilimlerine sahip oldukları saptanmıştır.

Adsorplanan atom veya molekül yüzeyde dengesiz olan kuvvetlerin bir kısmını doyurarak yüzey gerilimlerin düşürürler. Bu aynı zamanda serbest yüzey enerjisinin düşmesi ve adsorpsiyon olayının kendiliğinden oluşması anlamına gelir. Serbest yüzey enerjisi yüzeyin birim değerini büyültmek için yapılan iş olarak tanımlanmaktadır.

Üç boyutlu hareket eden gaz molekülleri bir katı yüzeyinde adsorbe oldukları zaman iki boyutlu hareket etmek zorunda kalırlar. Bu durumdaki gaz moleküllerinin daha düzenli hale gelmeleriyle entropileri düşer.  $\Delta G$  ve  $\Delta S$  değişmelerinin daima negatif olması, 1-26'da verilen Gibbs bağıntısından da görüldüğü gibi adsorpsiyon ısısının ( $\Delta H$ ) negatif olmasını gerektirir.

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S \quad 1-26$$

1-26'da verilen adsorpsiyon ısısı ( $\Delta H$ ), Clasius–Clapeyron denklemine benzeyen 1-27'deki bağıntıdan da bulunabilir.

$$\left( \frac{d \ln P}{d (1/T)} \right) \quad 1-27$$

Burada; P, deneysel olarak bulunan buhar basıncını

T, deney sıcaklığını ( $^{\circ}\text{C}$ )

R, ideal gaz sabitini göstermektedir.

Kalorimetrik yöntemlerle de adsorpsiyon ısısı tayin edilebilir. Ayrıca adsorplanan gaz miktarı arttıkça adsorpsiyon ısısının düştüğü görülmüştür.

Sonuç olarak; fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon oluşumları ekzotermiktir (ısı veren). Bazı özel durumlarda kimyasal adsorpsiyon endotermik (ısı alan) özellikler gösterebilir [6].

### 1.3.4. Fiziksel ve Kimyasal Adsorpsiyon Arasındaki Farklar

Her iki oluşumunda ekzotermik (ısı veren) olmasına rağmen birbirinden ayrılan belirgin özellikleri vardır. Bu iki farklı oluşumu birbirinden ayırt eden beş temel özellik şunlardır:

1. Adsorpsiyon ısısı; fiziksel adsorpsiyonda yoğunlaşma ısısına, kimyasal adsorpsiyonda ise reaksiyon ısısına yakındır.
2. Fiziksel adsorpsiyon tek tabakalı (mono moleköl) olabileceği gibi çok tabakalı (multi moleküler) da olabilir. Kimyasal adsorpsiyon ise sadece tek tabakalı (mono moleköl) olabilir.
3. Adsorplanan miktar fiziksel adsorpsiyonda sıcaklıkla azaldığı halde kimyasal adsorpsiyonda artar.
4. Fiziksel adsorpsiyonda gaz tersinir olarak dışarı verilirken kimyasal adsorpsiyonda ise dışarı verilemez. Çünkü gaz ile katı molekülleri arasında bir kompleks meydana gelmiştir. Yani gaz eski özelliğini tamamen kaybetmiştir.
5. Fiziksel adsorpsiyonda elektrostatik kuvvetler (iyonik veya metalik katılarda etkili) ile van der Waals kuvvetleri etkili iken, kimyasal adsorpsiyonda kovalent bağ kuvvetleri etkilidir.

### 1.3.5. Fiziksel Adsorpsiyon Kinetiği

Adsorplayıcının her gramında adsorplanan gaz veya buhar miktarı, denge halindeki sıcaklığın, basıncın ve adsorplayıcı ile adsorplanan maddelerin değişken özelliklerinin bir fonksiyonudur.

Adsorplayıcı katı ile adsorplanan gaz teması geçtikten sonra adsorpsiyon dengesinin kurulmasına kadar geçen zamanda, meydana gelen olaylar adsorpsiyon kinetiği ile ilgilidir.

Fiziksel adsorpsiyon kinetiğinin oldukça karmaşık olmasına rağmen teorik olarak difüzyon denklemi (kısmi diferansiyel denklemi) göz önüne alınarak incelenebilir.



Barrer ve Ibbitson fiziksel adsorpsiyon kinetiğini parabolik difüzyon yasasına göre incelemişlerdir.

Denge hali kurulduktan sonra adsorplayıcının birim kütlesinin adsorpladığı buhar ve gaz miktarı, yalnızca son basıncın ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. 1-28'de verilen eşitlik bu durumu açıklamaktadır.

$$x/M=f ( P, T) \quad 1-28$$

1-28'deki eşitliğe göre; sabit sıcaklıkta adsorplanan miktar 1-29'daki gibi basıncın bir fonksiyonudur. 1-29'daki denklemden elde edilen eğriye *adsorpsiyon izotermi* denir.

$$x/M=f (P) \quad T \text{ (sabit)} \quad 1-29$$

Sabit basınçta adsorplanan miktar ise 1-30'da verildiği gibi sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu denklemden elde edilen eğriye *adsorpsiyon izobarı* denir.

$$x/M=f (T) \quad P \text{ (sabit)} \quad 1-30$$

Adsorplanan miktar sabit tutulursa bu seferde denge basıncı 1-31'de görüldüğü gibi sıcaklıkla değişir. Bu denklemden elde edilen eğriye ise *adsorpsiyon izokoru* denir.

$$P=f (T) \quad x/M \text{ (sabit)} \quad 1-31$$

#### 1.4. Hava Neminin Ölçülmesi

Endüstride hava neminin ölçülmesi için kullanılan farklı yöntemler vardır. Genel olarak iki ana sınıfa ayırabildiğimiz bu yöntemler sırasıyla şunlardır.

### 1.4.1. Ağırlık Değişimi

Belli hacimdeki nemli hava su buharına duyarlı (nem çekici) kimyasalların üzerinden geçirilir. İşlem sonunda nem çekici kimyasalların üzerinde meydana gelen kütle artışı ölçülerek söz konusu hava içindeki nem miktarı bulunur. Bu yöntemde kullanılan su buharına duyarlı (nem çekici) kimyasallar Çizelge 1.4’de verilmiştir.

Çizelge 1.4. Su buharına duyarlı (nem çekici) kimyasallar

Nem Çekici	Kurutma Sonrası Havadaki Atık Nem Değişimi mg. su/L hava	Nem Tutma Oranı %	Rejenerasyon (yenileme) Sıcaklığı	Kullanılmayan Ortamlar
Aluminyum Oksit	0,005	25	200 – 250 *	Kükürt ve karbonil grubu içeren bileşikler
Bakır Sülfat (Susuz)	2,8	30	250 – 270	—————
Kalsiyum Klorür (granül)	0,14 – 0,25	30	250	Amonyak, amin, alkol, aldehit, fenol
Kalsiyum Oksit	0,65	30	1000	Asit, asit türevi, aldehit, keton
Kalsiyum Sülfat (Susuz)	0,07	6,6	200 – 225	—————
Magnezyum Oksit	0,75	30	800	Asidik bileşikler
Magnezyum Perklorat (Susuz)	0,002	40 – 60	230 – 250	Organik bileşikler
Moleküler Elek (Zeolit)	0,004	20	150 – 300	—————
Potasyum Hidroksit	0,9	40	—————	Asit, ester, amid
Silika Jel	0,07	21	120 – 180 *	Fenol, HF, asit, asit türevleri, fenol

\* Eter ve peroksitlerin neminin alınmasında rejenera (yenileme) edilmezler.

### 1.4.2. Nem Ölçerler (Higrometreler)

Havanın nemini ölçmeye yarayan aygıtlar olarak tanımlanan nem ölçerler (higrometreler); atmosferdeki su buharı miktarını, altı farklı fiziksel olayın

ölçümünden yararlanarak tespit ettikleri için altı farklı nem ölçer bilinmektedir. Bunların yanı sıra kolomerik (amperometrik) nem ölçerlerde mevcuttur. Bu durumda bilinen nem ölçerleri yedi ayrı grupta inceleyebiliriz [10].

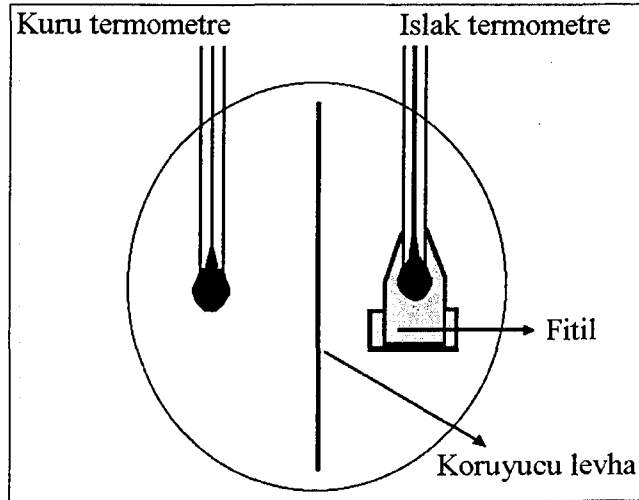
Bunlar sırasıyla şunlardır:

1. Psikrometreler veya fizikrometreler,
2. Saçlı higrometreler,
3. Dolaylı yöntemle nem ölçen higrometreler,
4. Yayınımlı higrometreler,
5. Soğurulma tayflı higrometreler,
6. Kolometrik (amperometrik) higrometreler,
7. Nem sensörleri.

#### 1.4.2.1. Psikrometreler veya fizikrometreler

(Islak ve kuru termometreli higrometreler)

Kuru veya yaş termometre yöntemi olarak da bilinen bu tip higrometrelerle ortamın yaş ve kuru sıcaklıkları termodinamik yöntemler kullanılarak ölçülür. Şekil 1.17'den de görüldüğü gibi bu tip higrometreler; bir haznesi ıslak, diğeri kuru olmak üzere iki termometreden oluşur [10].



Şekil 1.17. Psikrometre (Islak ve kuru termometreli higrometre) [10]

Kuru termometre hava sıcaklığını ölçen normal bir termometredir. Islak termometrenin haznesi bir fitil ile sarılıdır. Fitol su ile dolu bir kap içine daldırılarak termometre haznesinin sürekli olarak ıslak kalması sağlanır. Doymamış bir hava akımında tutulan ıslak termometre sıcaklığı, kuru termometre sıcaklığından daha düşüktür. Islak termometrenin düşük olmasının nedeni fitil üzerinde buharlaşan suyun gerekli ısıyı termometre haznesinden almasından ileri gelir. Hava ne kadar doymamış halde ise fitil üzerinde buharlaşma o kadar fazla olur. Bunun sonucu olarak ıslak ve kuru termometreler arasındaki fark büyür.

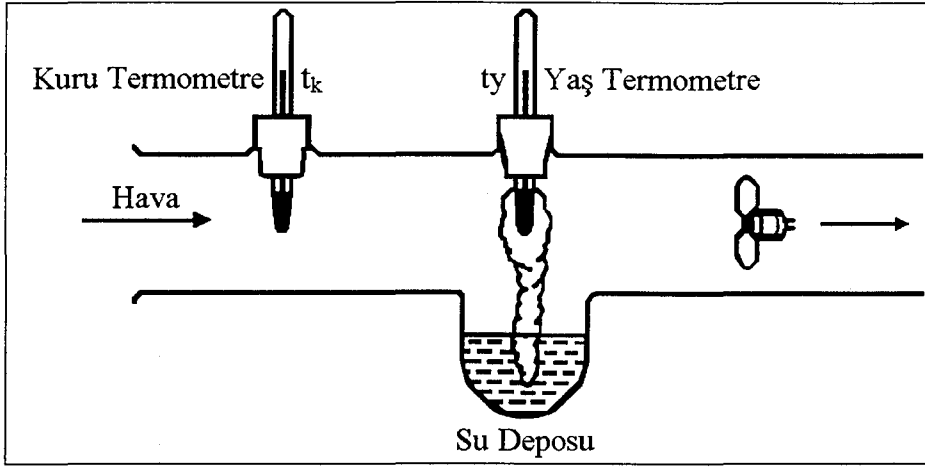
Islak ve kuru termometreli higrometrelerden okunan sıcaklıklar yardımı ile söz konusu havanın bağıl nemi bu amaç için hazırlanmış Çizelge 1.5 veya Şekil 1.11'den doğrudan okunabilir.

Islak ve kuru termometrelerden okunan  $t_k$  sıcaklığı ve  $(t_k - t_y)$  sıcaklık farkına göre düzenlenmiş havanın bağıl nem değerleri Çizelge 1.5'de verilmiştir.

Çizelge 1.5. Islak ve kuru termometre sıcaklıkları ile belirlenmiş bağıl nem değerleri,  $t_k$  : Kuru termometre sıcaklığı (°C),  $t_y$  :Islak termometre sıcaklığı (°C) [10]

$t_k - t_y$	$t_k = 40$	$t_k = 35$	$t_k = 30$	$t_k = 25$	$t_k = 20$	$t_k = 15$	$t_k = 10$	$t_k = 5$	$t_k = 0$	$t_k = - 5$
0,2	97	97	96	96	96	98	98	97	96	95
0,4	94	94	93	92	91	96	95	94	93	90
0,6	91	90	89	88	87	94	93	91	89	86
0,8	88	87	86	84	83	92	90	88	85	81
1	85	84	83	81	78	90	88	86	81	76
1,2	82	81	79	77	74	88	86	83	78	71
1,4	80	78	76	74	70	86	83	80	74	66
1,6	77	75	73	70	66	84	81	77	71	62
1,8	74	72	70	67	63	82	79	75	67	48
2	72	69	67	63	59	80	77	72	64	43
2,2	67	64	61	57	51	78	74	69	60	39
2,4	62	59	55	50	44	76	72	67	57	34
2,6	57	54	50	44	37	74	70	64	53	29
2,8	53	49	44	39	31	73	68	61	30	18
3	48	44	39	33	24	71	66	58	46	7
3,5	44	40	35	28	18	66	60	52	38	
4	40	36	30	22	12	61	55	45	29	
4,5	36	32	25	17	6	57	50	39	21	
5	33	28	21	12		53	44	33	13	
6	29	24	17	8		44	34	20		
7	26	20	13			36	24	7		

Islak ve kuru termometreli higrometreler ile yeterli duyarlıkta ölçüm yapabilmek için fitil üzerinden çevreye ısı ve kütle transferinin etkili bir şekilde yapılması gerekir. Bu nedenle termometre üzerinden en az 5m/s'lik bir hava akımı geçirilmelidir. Böylece hava akımının ıslak termometre haznesinden buharlaşma sonucu almış olduğu ısı yanında, çevreden hazneye doğru olan ısı transfer hızı ihmal edilecek kadar küçük kalır. Sonuç olarak ıslak ve kuru termometreler arasındaki sıcaklık farkının yalnızca buharlaşan sudan ileri geldiği kabul edilebilir. Şekil 1.18'de psikrometre ile hava neminin ölçülmesi şematize edilmiştir.



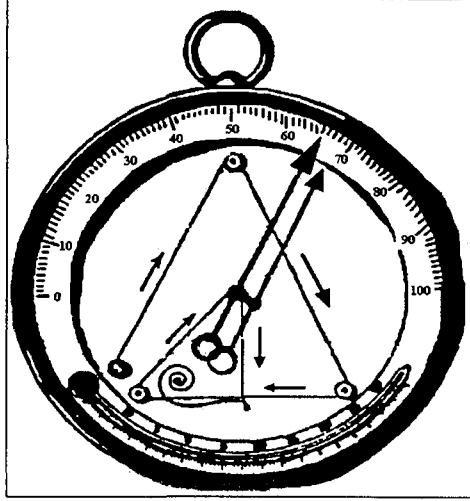
Şekil 1.18. Psikrometre ile hava neminin ölçülmesi [10]

#### 1.4.2.2. Saçlı higrometreler

Nem etkisi altında boyut değiştiren organik malzemelerin kullanıldığı mekanik aygıtlardır. Bu prensibe uygun olarak çalışan saçlı, karbon filmli ve burmalı nem ölçerler mevcuttur.

İnsan saçı hava nemine karşı çok duyarlıdır. Nem arttıkça lineer olarak uzar. Genellikle at kılının kullanıldığı saçlı higrometrelerde saçın uzama özelliğinden yararlanılarak hava nemi doğrudan ölçülür.

Saçlı higrometrelerle sadece 50°C'nin altındaki sıcaklıklarda ölçüm yapılabilir. Bu nedenle meteorolojik ölçümlerde kullanılabilen bu higrometreler kurutma tünellerinde kullanılamaz. Şekil 1.19'da şematize edilmiş örnek bir higrometre görülmektedir [10].



Şekil 1.19. Saçlı higrometre [10]

Bu metodun modern uygulamalarında silikon polimid bimorf deformasyonun sebep olduğu eğilme gerinimli voltaj sinyalinde piezoelektrik dönüştürücüler kullanılır [10].

#### 1.4.2.3. Dolaylı yöntemle nem ölçen higrometreler

Düşük nem seviyelerinin izlenmesinde kullanılan hassas kontrol sistemlerindeki nem ölçerlerin çoğu, özellikle %0,5 ile %1 arasındaki tipik bağıl nem değerlerindeki ölçümlerin tekrar edilmesine bağlı olarak histerisiz etkiler gösterirler. Bu durum ise sınırlayıcı bir faktör olabilir. Bu yüzden nem ölçümlerinde dolaylı metotlarında dikkate alınması gerekir.

Bu yöntemde yer alan higrometre cihazları ile ölçülecek havanın nemi iki farklı etkiye maruz bırakıldığı için bu sınıfta yer alan nem ölçerleri iki ana gruba ayırabiliriz. Bunlardan birincisi çiylenme noktalı higrometrelerdir. Bu higrometrelerin temel çalışma prensibi; cihazın çiylenme noktası sıcaklığına kadar soğutulmasına dayanır. İkinci grupta yer alan ısı iletkenlik algılayıcı higrometrelerde ise termistör tabanlı bir algılayıcı kullanılır. Bu higrometrelerin çalışma prensibi; termistör tabanlı algılayıcının ortam sıcaklığının yaklaşık 170°C üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılmasına dayanır.

#### A. Çiylenme noktalı higrometreler

Dolaylı nem ölçüm metotlarından ilki olan çiylenme noktası sıcaklığının belirlenmesinden sonra mutlak ve bağıl nem hesabına geçilebilir. Bilindiği gibi çiylenme noktası sıcaklığı su buharı ve suyun (veya herhangi bir sıvı ve buharının) dengede olduğu sıcaklıktır. Buhar ve sıvı fazın dengede olduğu bu sıcaklık doyma noktasıdır [10].

Çiylenme noktası sıcaklığından mutlak nem hesabına geçilebilmesi için çiylenme noktasındaki doymuş buhar basıncının (belli bir sıcaklıktaki havanın kısmi buhar basıncının söz konusu sıcaklıktaki suyun buhar basıncına eşit olma hali) yanı sıra nemli hava içeren ortamın toplam basıncının da bilinmesi gerekir.

Su buharının yoğunlaşmasını kullanarak çiylenme noktasını ölçebilen cihazlar olarak tanımlanan çiylenme noktalı nem ölçerlerin farklı çalışma mekanizmalarına göre bilinen üç değişik modeli vardır. Bu modeller sırasıyla aşağıda belirtilmiştir.

##### i. Optik (spektroskopik) higrometre

Genel olarak bu tip cihazlarda infrared ile ultraviyole ışık bölgesinde değişen nemli havanın iletimindeki optik indeks değişimi kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra havadaki nem değişimine bağlı olarak değişen mikrodalga veya ses iletiminin de kullanılabildiği bu tür cihazların çalışma aralığı 1 ile 1000 ppm arasındaki nem değerleriyle sınırlıdır [10].

Minimum histerisiz etkilerle nem ölçümünün yapılabildiği bir Metot olan optik higrometrelerde nemli hava çok parlak bir yüzey üzerinden geçirilirken yüzey sıcaklığı düşürülürse belli bir sıcaklıkta yüzeyde buğulanma görülür. Buğulanmanın başladığı bu sıcaklık söz konusu doymamış havanın çiylenme noktasıdır.

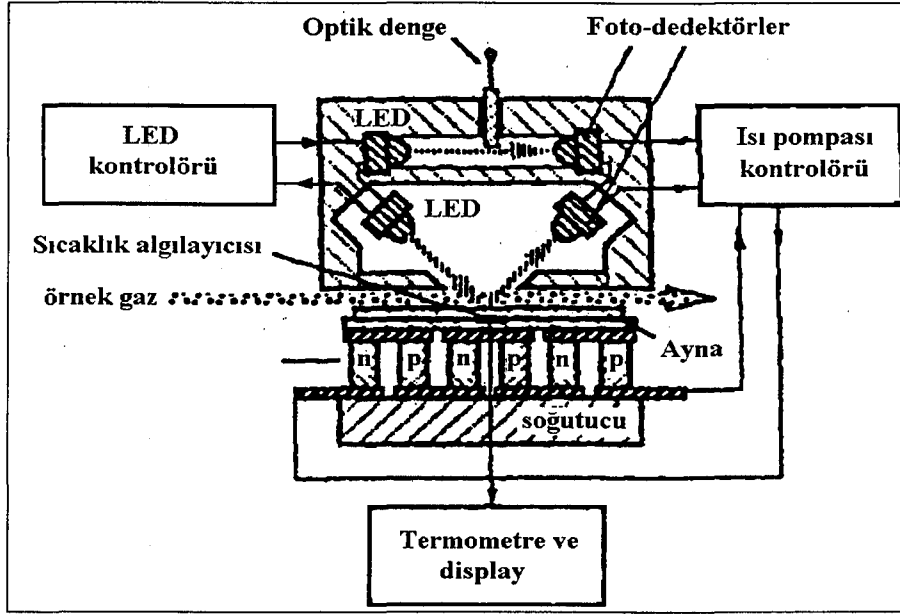
Optik higrometrenin temel çalışma oluşturan bu temel fikre göre yüzey sıcaklığı ısı elektrik ısı pompası ile hassasça regüle edilebilen bir aynanın kullanılması gerekir. Aynanın sıcaklığı çiylenme oluşumunun eşiğinde kontrol edilir.

Örnek hava aynanın yüzeyine pompalandığında eğer çiylenme noktası geçilirse havanın nemi su damlacıkları şeklinde aynanın üzerine birikir. Su



damlacıklarının ışık ışınlarını parçalamasından dolayı aynanın yansıtıcılık özelliği değişir. Bu değişikliklerde optik köprü yardımıyla hassasça tespit edilir.

Optik köprü ile denetlenen ve ısıl elektrik ısı pompası ile soğutulan aynalı higrometrenin (optik higrometrenin) basitleştirilmiş bir blok diyagramı Şekil 1.20’de verilmiştir [10].



Şekil 1.20. Isıl elektrik ısı pompası ile soğutulan ve optik köprü ile denetlenen aynalı higrometre (Optik higrometre) [10]

Peltier etkisi ile çalışan ısı pompası içinde sıcaklık algılayıcısı içeren ince aynalı yüzeyden ısıyı uzaklaştırır. Bu sıcaklık algılayıcısı aynanın sıcaklığını gösteren dijital termometrenin bir parçasıdır. Higrometrenin devresi diferansiyel tiptedir. Üstteki opto–algılayıcı, ışık yayan diyot (led) ve foto-dedektör değişimlerin kompanzasyonu için kullanılırken opto–yalıtıcı ayna yansıtıcılığının ölçülmesi içindir. Higrometrenin hassas ölçüm yapılabilmesi için kullanılan ışık algılayıcılarının simetrisi üst opto yalıtıcının ışık yoluna yerleştirilmiş takoz biçimli optik bir dengeleyici ile sağlanır. Şekil 1.20’de verilen opto–yalıtıcı, aynaya göre 45 derecelik bir açı ile alt kısma yerleştirilmiştir. Çiylenme noktasının üzerinde ayna kuru ve yansıtıcılığı en yüksektir. Isı pompasının kontrolörü ısı pompası ile aynanın sıcaklığını azaltır. Suyun yoğunlaşması anında aynanın yansıtıcılığı aniden düşerek fotodedektördeki foto akımının azalmasını

sağlar. Foto–dedektör sinyalleri ile aynanın yüzeyinde ek yoğunlaşma ve buharlaşmanın oluşması istenilmediğinden aynanın yüzey sıcaklığı çiylenme noktası seviyesinde tutulmaya çalışılır. Bu sebeple foto-dedektör sinyalleri ısı pompasının elektrik akımını regüle etmesi için kontrolöre gönderilir.

Gerçekte su molekülleri sürekli olarak yüzeye tutunma ve yüzeyden ayrılma eğilimindedirler. Fakat yoğunlaşma yoğunluğunun net seviyesi denge durumuna ulaştığında yüzeyde olması beklenen tutunma ve ayrılma eğiliminin değişmediği görülür.

Aynalı yüzeyin algılanan sıcaklığı tam olarak geçerli çiylenme noktasını belirlediğinden bu sıcaklık nemin en temel ve doğru ölçüm metodu olarak düşünülür. Histerisiz hemen hemen yok edilebilir ve duyarlılık 0,03°C çiylenme noktasına yakındır. Çiylenme noktasından bağıl nem, buhar basıncı diğer bütün nem parametreleri geçerli sıcaklık ve basınç bilindiği sürece elde edilebilir.

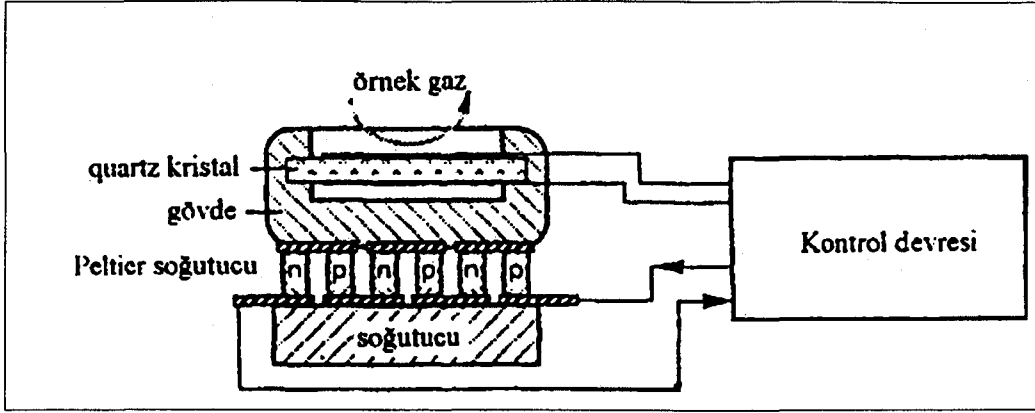
Bu metotla ilgili bazı problemler vardır. Bunlardan birincisi yüksek fiyatı, diğeri potansiyel ayna kirliliği ve üçüncüsü de ısı pompasının oldukça yüksek güç tüketimidir.

Kirlenme problemleri parçacık filtrelerinin kullanımı ve aynayı çiylenme noktasının biraz aşağısında kasıtlı olarak soğutup aşırı bir yoğunlaşmanın ardından hızlıca ıltma tekniği ile hemen hemen giderilebilir. Böylece aynanın kirleri uzaklaştırılarak temizlenmiş olur [10].

#### ii. Osilasyonlu (piezoelektrik) higrometre

Çiylenme sıcaklığının ölçüldüğü osilasyonlu higrometrede soğutulmuş plakanın kütle değişimi dedekte edilir. Soğutulmuş plakanın üretiminde bir osilatör devresinin parçası olan ince kuvars kristali (NTC) kullanılır. Kütle değişiminin ölçülmesi için kullanılan ince kuvars kristal plakalarının osilasyonu piezoelektrik etkiye sahiptir. Bu sebeple osilasyonlu higrometreye piezo elektrik higrometrede denilmektedir.

Kuvars kristalinin sıcaklığını kontrol eden peltier soğutucusu yüksek doğruluk derecesi ile kuvars kristaline ısıl olarak kuplajlanmıştır. Şekil 1.21'de osilasyonlu higrometre basitçe şematize edilmiştir.

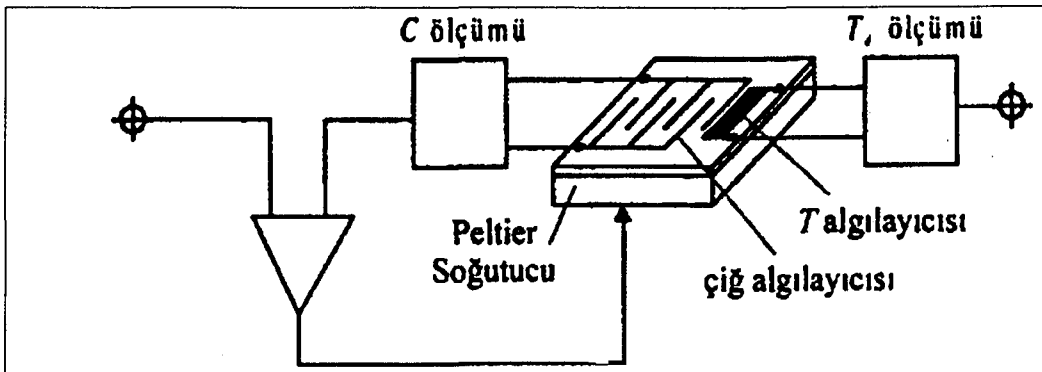


Şekil 1.21. Osilasyonlu higrometre [10]

Sıcaklık çiylenme noktasına düştüğünde ince bir su tabakası kuvars kristalinin açık yüzeyi üzerine birikir. Kristalin kütlesi değiştiğinden osilatörün rezonans frekansı  $f_0$ 'dan  $f_1$ 'e kayar. Yeni frekans  $f_1$  yüzeydeki su tabakasının kalınlığına karşılık gelir. Frekans kayması çiylenme noktası sıcaklığında kuvars kristalini kararlı duruma getirmek için kristalin sıcaklığını değiştirir. Bunu peltier soğutucudan geçen akımı kontrol ederek yapar. Piezoelektrik higrometrenin tasarımındaki temel zorluk minimum mekanik yüklemde kristali küçük boyutunu değiştirmeden soğutucu ve kristal arasında yeterli ısıl kuplajın sağlanmasıdır [10].

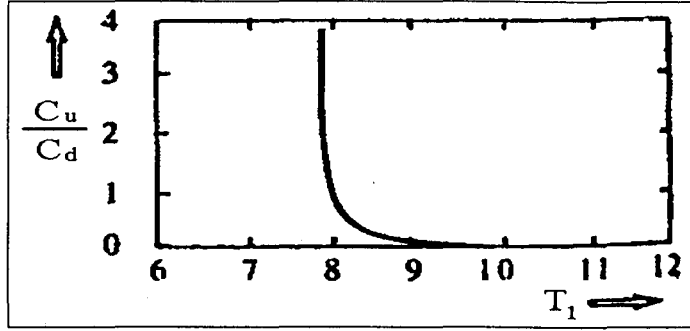
### iii. Geri-beslemeli kapasitif higrometre:

Regtien tarafından entegre devre teknolojisi ile yapılan kapasitif duyarlı ve geri-beslemeli çiylenme noktalı nem ölçer sisteminin ölçme devresi Şekil 1.22'de verilmiştir.



Şekil 1.22. Geri beslemeli kapasitif çiylenme noktalı higrometrenin ölçüm devresi [10]

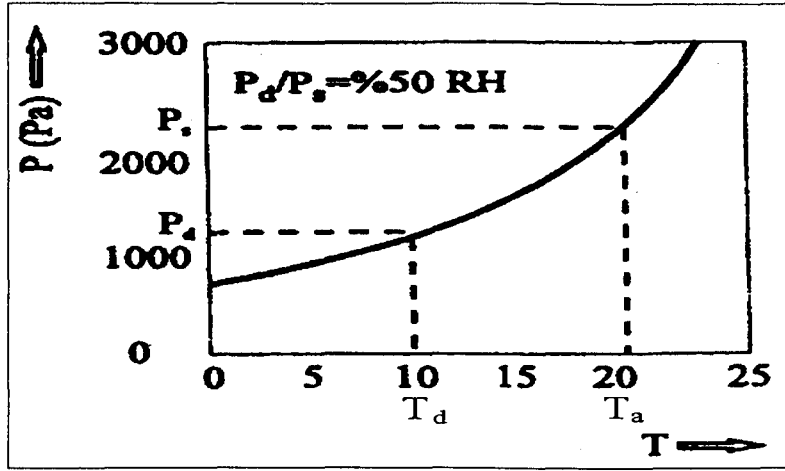
Şekil 1.22'deki gibi çiylenme noktası sıcaklığında yoğunlaşan su buharını tutan silikon gövdenin üzerinde tarak biçiminde (interdijital) düz bir kondansatör vardır. Bilinen modellerinde altın, alüminyum veya polikristal silikon kullanılmıştır. Gövdenin çiylenme noktası sıcaklığına kadar soğutulması gerektiği için gövde minyatür bir peltier soğutucu üzerine yerleştirilmiştir. Yoğunlaşan su buharını tutan gövdenin sıcaklık değişikliğini ölçebilmek için silikon gövdeye bir diyot veya transistör entegre edilmiştir. Silikonun sıcaklık iletkenliği çok yüksek olduğu için gövdenin sıcaklık değişikliğini ölçmede kullanılacak sıcaklık algılayıcısını tarak biçimindeki düz kondansatör kenarına bile yerleştirilmesi gerçek çip sıcaklığının ölçülmesine yeter. Şekil 1.23'de görüldüğü gibi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çiylenme noktası sıcaklığında kapasitans hızlıca düşer.



Şekil 1.23. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kapasite değişimi [10]

Kapasite ölçücü devrenin çıkışı ile Peltier soğutucunun akımı kontrol edildiği zaman çok hassa bir aygıt elde edilir. Geri besleme sisteminin kullanılmasıyla gövde üzerinde yoğunlaşan su buharı miktarı sabit tutulabilir.

Çiylenme noktasının sıcaklığının ölçülmesi ile nem değerleri çok hassas olarak belirlenebilmektedir. Kullanılan bu metot da su buharının yoğunlaşmaya başladığı ilk sıcaklık olan çiylenme noktası sıcaklığına kadar düz bir yüzey soğutulmaktadır. Hava oldukça nemli ise yüzey sıcaklığındaki küçük bir azalma yeterli olmaktadır. Hava kuru ise yoğunlaşmanın görülebilmesi için yüzeyin daha fazla soğutulması gerekir. Soğuk hava ılık havaya göre daha az nem içerir. Şekil 1.24'de sıcaklığın bir fonksiyonu olarak doymuş su buharının kısmi buhar basınç değişimi verilmiştir.



Şekil 1.24. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak doymuş su buharının kısmi buhar basınç değişimi [4]

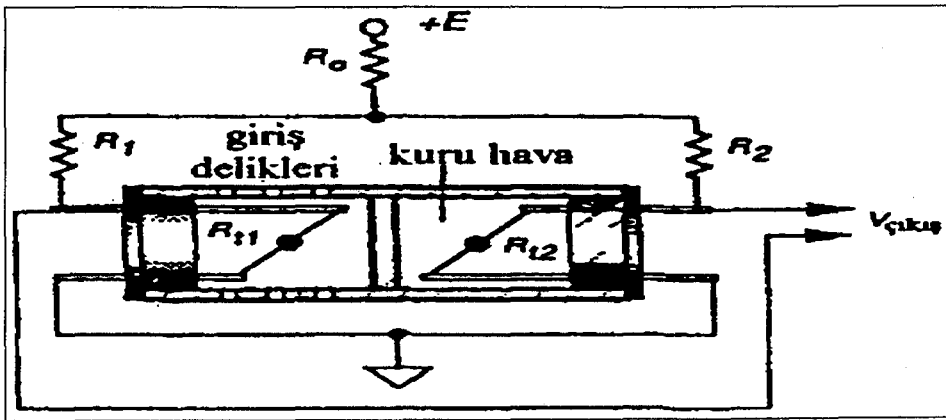
Şekil 1.24’de verilen grafikten bağıl nem şu şekilde belirlenebilir: İlk olarak ortam sıcaklığı  $T_s$  için suyun buhar basıncı  $P_s$  belirlenir. Daha sonra yoğunlaşmanın oluşmaya başladığı çiylenme noktası sıcaklığı  $T_d$ ’ye kadar yüzey soğutulur. Eğriden çiylenme noktası sıcaklığındaki  $T_d$  doymuş su buharının kısmi basıncı  $P_d$  bulunur. Buradan da bağıl nem hesabına geçilir.

$$\text{Bağıl Nem} = P_d/P_s$$

1-32

B. Isıl iletkenlik algılayıcılı (mutlak nem algılayıcılı) higrometre

Termistör tabanlı bir algılayıcının kullanıldığı ısıl iletkenlik algılayıcılı higrometrenin basitleştirilmiş şeması Şekil 1.25’de verilmiştir [14].

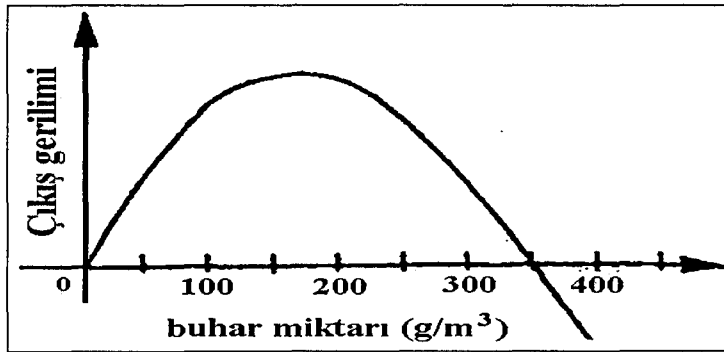


Şekil 1.25. Isıl iletkenlik algılayıcılı (mutlak nem algılayıcılı) higrometre [10]

Gövdeye olan ısı iletkenlik kaybını en aza indirebilmek için  $R_{t1}$  ve  $R_{t2}$  ile gösterilen iki küçük termistör ince tellerle desteklenmiştir. Soldaki  $R_{t1}$  termistörü küçük havalandırma delikleri içeren bölme içinde dışarıdaki havaya maruz bırakılır. Sağdaki  $R_{t2}$  termistörü ise kuru hava içeren yalıtılmış bölmeye kapatılmıştır. Her iki termistör  $R_{t1}$  ve  $R_{t2} + E$  gerilimi ile beslenen  $R_1$  ve  $R_2$  köprü devresine bağlanmıştır. Termistörler elektrik akımının geçişinden dolayı kendiliğinden ısınır.

Sıcaklıkları yaklaşık olarak çevre sıcaklığının  $170^{\circ}\text{C}$  üzerine kadar yükselir. Başlangıçta bir sıfır noktası oluşturmak için köprü devresi kuru havada dengeye getirilir. PZT termistör kristalleri kullanılan bu cihazda yüzeye biriken su buharı miktarına bağlı olarak çıkış geriliminde değişen rezonans frekansı ölçülür.

Isıl iletkenlik algılayıcı bu higrometrenin çıkış değerleri mutlak nemin sıfır olduğu başlangıç noktasından itibaren aşamalı olarak artar.  $150 \text{ gr/m}^3$  civarındaki su buharı miktarında doyuma ulaşan cihazın çıkış gerilimi su buharının  $345 \text{ gr/m}^3$  olduğu noktada polaritesini değiştirerek azalır. Bu durum Şekil 1.26'daki grafikte izah edilmiştir [10].



Şekil 1.26. Değişik buhar miktarlarındaki çıkış gerilimleri [10]

#### 1.4.2.4. Yayınımlı higrometreler

Su buharının gözenekli bir ortam içerisindeki yayınımlı ölçen cihazlardır.

#### 1.4.2.5. Soğurulma tayflı higrometreler

Neme bağı renk değıştiren  $\text{CoCl}_2$  malzemelerin kullanıldığı bu cihazlarda su buharının soğurulma tayflı ölçülür. Cihazın çalışma aralığı %20-80 arasındaki bağıl nem değerleri ile sınırlıdır.

#### 1.4.2.6. Kolometrik (amperometrik) higrometreler

Suyun elektrolizi için gerekli elektriksel enerjinin kullanıldığı bu tip higrometreler 1 ile 100 ppm aralığındaki nem değerlerinde çalışır.

#### 1.4.2.7. Nem sensörleri

Su buharının algılayıcı yüzeye fiziksel adsorpsiyonundan kaynaklanan elektriksel değişikliklerin, elektronik yöntemlerce ölçülebildiğı sistematik cihazlardır. Bu grupta yer alan ve fazla yer kaplamayan nem sensörlerini, çalışma prensiplerinin farkına göre ikiye ayırıyoruz. Bunlardan ilki kapasitif ikincisi rezistif (iletkenlik) nem sensörüdür [11].

##### A. Kapasitif nem sensörü

Hava ile doldurulmuş bir kapasitör bağıl nem sensörü (algılayıcısı) olarak çalışabilir. Çünkü atmosfer içindeki nem 1-33'de verilen eşitliğe göre havanın elektriksel iletkenliğini değiştirir.

$$\Psi=1+ [211/T] [P + (48 P_s/T) H] 10^{-6} \quad 1-33$$

Burada;  $\Psi$ , elektriksel iletkenliğı

T, mutlak sıcaklığı (kelvin)

P, nemli havanın basıncını (mmHg)

$P_s$ , T sıcaklığındaki su buhar basıncını (mmHg)

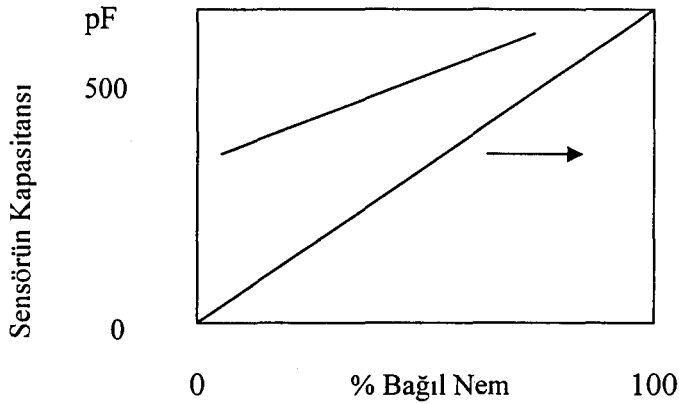
H, bağıl nem (%) değerini göstermektedir.

1-33'de verilen eşitlik nemli havanın dielektrik sabitini ve dolayısıyla kapasitansın bağıl nemle orantılı olduğunu gösterir.

Kapasitör levhaları arasındaki boşluk hava yerine neme maruz kaldığında dielektrik sabiti bariz olarak değişen uygun bir yalıtkan ile doldurulabilir.

Kapasitif nem sensörü (algılayıcı) üretimindeki ilk aşamada neme duyarlı (higroskopik) monolitik (tek parça) bir tabaka oluşturulur. Daha sonraki aşamada ise kesilerek uygun boyutlara getirilen neme duyarlı tabakanın geniş olan iki yüzeyi metalik elektrotlarla (kimyasal veya fiziksel biriktirme metotlarından birisi) kaplanır. Elektrotlarla kaplanan neme duyarlı monolitik tabaka bir tutucu ile askıya alınarak elektronik devrenin terminallerine bağlanır. Böyle bir algılayıcının kapasitansı bağıl nem (H) ile yaklaşık orantılıdır.

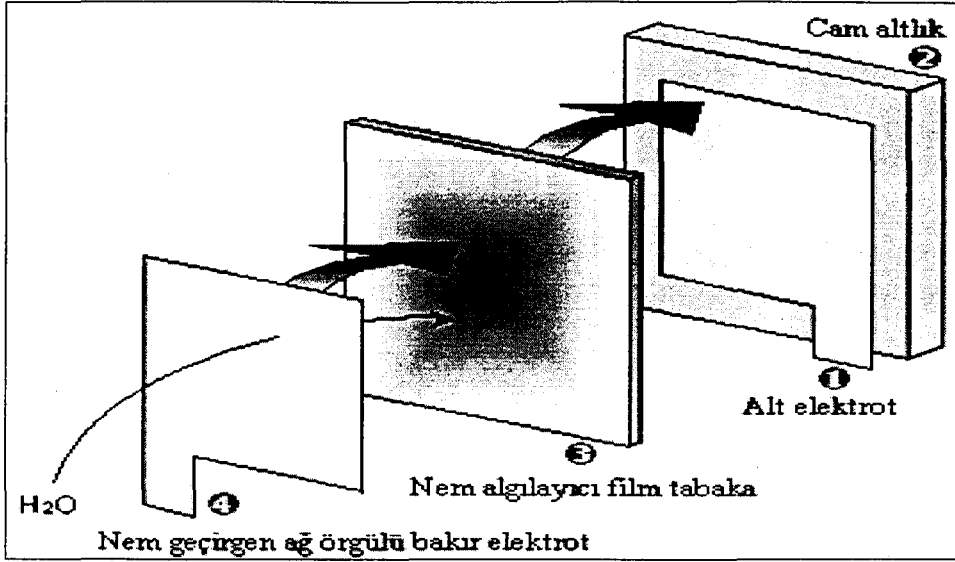
%5 ile %90 arasındaki bağıl nem değerlerinde %2 doğrulukla çalışan kapasitif bir nem sensörünün frekans-bağıl nem grafiği Şekil 1.27'de verilmiştir.



Şekil 1.27. Kapasitif bir algılayıcının frekans-bağıl nem grafiği

Kapasitif nem sensörlerinin genel yapısına uygun olarak üretilmiş örnek bir kapasitif algılayıcı tasarımında dielektrik malzeme olarak 8–12  $\mu\text{m}$  kalınlığında nemi duyarlı (higroskopik) selüloz asetat bütirat polimer tabaka ve plastikliği artırıcı olarak da dimetilefitalat kullanılmıştır. 8–12  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki ince film polimer tabakanın boyutu 12x12 mm'dir. 200 Å kalınlığında ve 8 mm çapındaki altın gözenekli disk elektrotlar vakum biriktirme metoduyla polimer tabakanın üzerine kaplanmıştır. Kapasitif nem sensörü üretiminde kullanılan genel yapı Şekil 1.28'de verilmiştir.





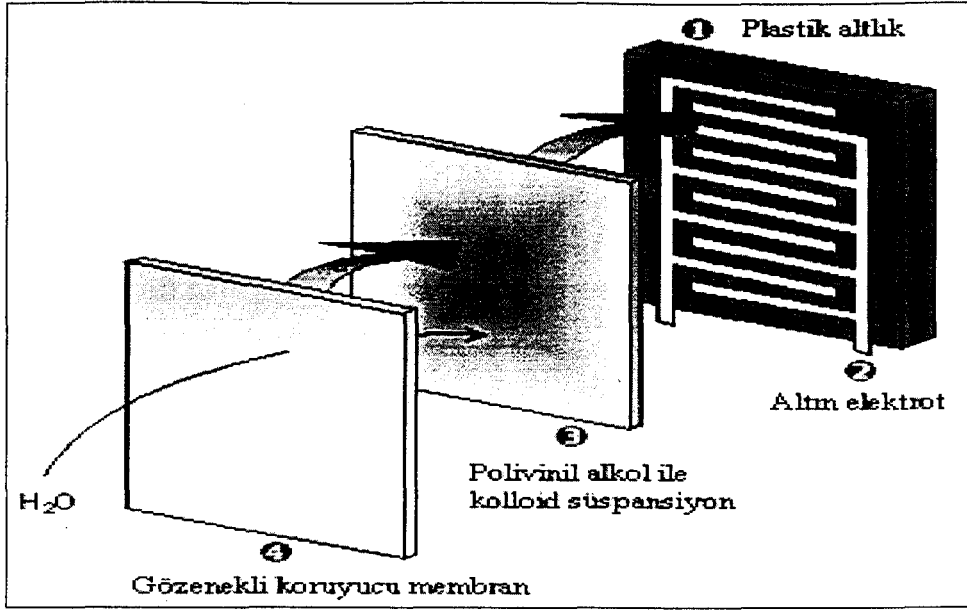
Şekil 1.28. Kapasitif esaslı polimer nem sensörlerinin genel yapısı [12]

#### B. Rezistif nem sensörü

Rezistif esaslı nem sensörlerinde değişik nem değerleriyle direnci değişen malzemeler kullanılır. Neme duyarlı tabakanın dielektrik özellikleri nemin fiziksel adsorpsiyonu ile değişir.

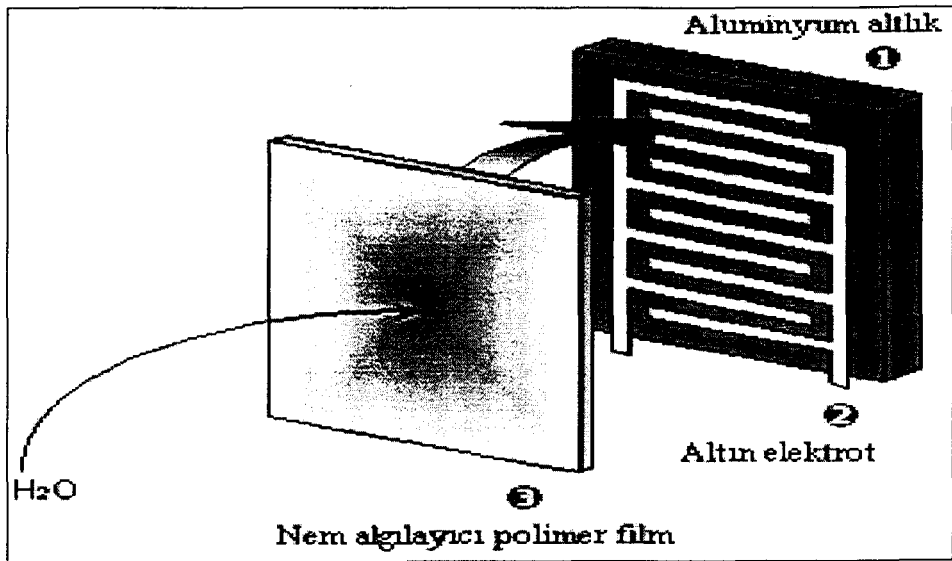
Nemi algılayacak malzeme eğer biriktirme yöntemiyle üretilecek ise sensör ile nem arasında çok geniş bir temas alanı sağlamak için ikili inter dijital elektrot üzerine sensör malzemesi biriktirilir. Diğer durumda ise nemi algılayacak malzemenin üretim yöntemine bağlı olarak istenilen mikron kalınlığına ulaşamıyorsa ikili inter dijital elektrot nemi algılayacak malzeme üzerine kaplanır.

İlk kez 1935 yılında F.W. Dunmore tarafından ağırlıkça %2 ile %5 oranında sulu lityum klorür (LiCl) çözeltisi içeren higroskopik (neme duyarlı) film geliştirilmiştir. Üretilen bu ilk nem sensörünün genel yapısı Şekil 1.29'da basitçe şematize edilmiştir [12].



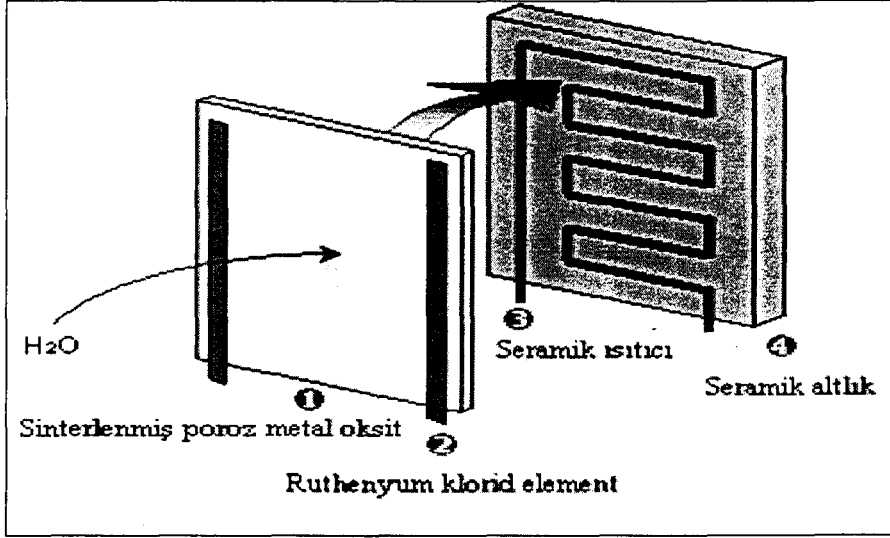
Şekil 1.29. Lityum Klorür (LiCl) esaslı nem sensörlerinin genel yapısı [12]

Diğer bir örnekte pope elemanı olarak adlandırılan polisitrin (köpük) kullanılır. İstenilen yüzey karakteristiklerinin sağlanabilmesi için polimerik bir malzeme olan köpüğün sülfürik asitle işlenmesi gerekir. Başka bir polimer malzeme olan katı poli-elektrolitler neme duyarlı ince film malzemesi üretiminde kullanılabilir. Farklı uygulamalar için neme duyarlı tabakayı taşıyan altlık olarak silikon kullanılabilir. Rezistif esaslı çalışan polimer nem sensörlerinin genel yapısı Şekil 1.30'da şematize edilmiştir.



Şekil 1.30. Rezistif esaslı polimer nem sensörlerinin genel yapısı [12]

Dielektrik özellikte olan teknik seramik hammaddeleri rezistif ve kapasitif özellikte çalışan nem sensörü üretimi için ideal malzemelerdir. Seçilecek olan teknik seramik hammaddelerinin ideal bir nem sensörü üretimi için gerekli olan genel hammadde özelliklerine (gözenek ve tane boyut dağılımı, yüzey alanı, adsorpsiyon–desorpsiyon süreleri) uygun nitelikler taşıması gerekir. Rezistif esaslı çalışan seramik nem sensörlerinin genel yapısı Şekil 1.31’de şematize edilmiştir.



Şekil 1.31. Rezistif esaslı seramik nem sensörlerinin genel yapısı [12]

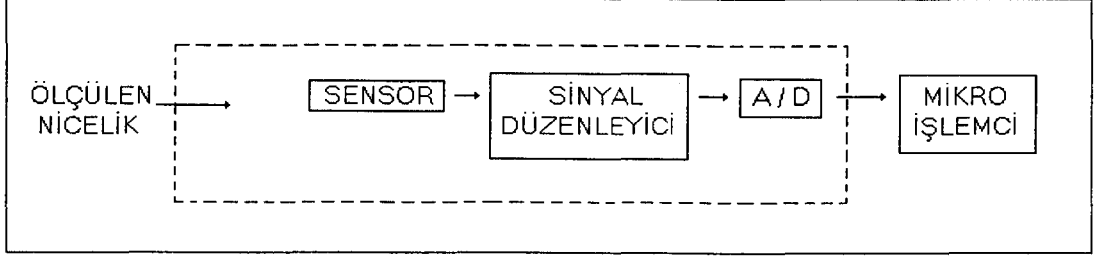
## 1.5. Sensör Tanımı ve Sınıflandırılması

### 1.5.1. Sensör Tanımı

Sensör kelimesi Latince “Sentire: Farkına varmak” kelimesinden türetilmiştir. Uluslararası Elektronik Komitesi (ICE)’nin yaptığı tanıma göre sensöre, girdi değişkenini ölçüme uygun bir sinyal haline getiren ölçüm zincirinin en önemli elemanıdır [11].

Sensörlerin geniş anlamda bir tanımını yapmak gerekirse şöyle diyebiliriz. Sensörler; çevredeki fiziksel veya kimyasal uyarıcılardan yayılan ve insan duyu organları ile çok az veya hiç hissedilemeyen uyarıları çok hassas bir şekilde selektif olarak algılayıp bunları ölçülebilir niceliklere çeviren elektronik devre elemanları olarak tanımlanabilir.

Bütün sensörlerin temel çalışma prensibi Şekil 1.32'deki blok diyagramında verilmiştir. Sensörlerin çıkış sinyalinin formatı sürekli ise analog, darbeli ise dijital, darbeli ve bilgisayar-yazılım destekli ise akıllı sensör olarak adlandırılır.



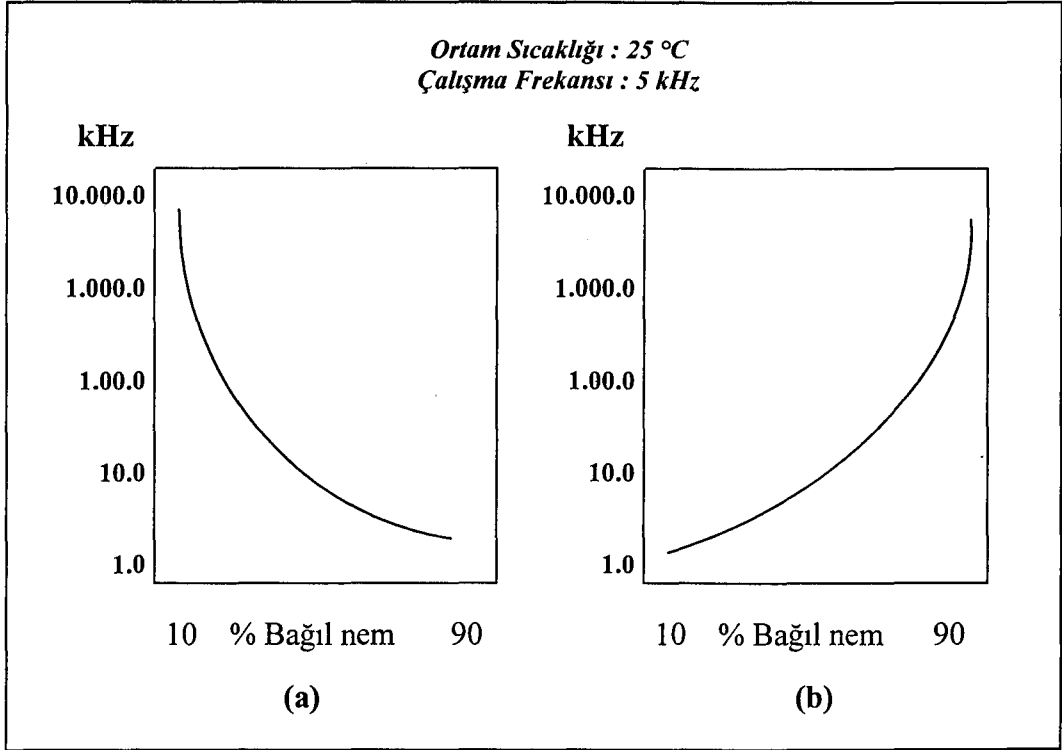
Şekil 1.32. Sensör sisteminin blok diyagramı [11]

Fiziksel ve kimyasal etkilere bağlı çok karmaşık olan verilerin sürekli, hatasız, hızlı ve hassas bir şekilde analizi için kullanılan elektronik sistemlerin devre elemanlarında; giriş elemanı olarak sensör, çıkış elemanı olarak da dönüştürücülerin kullanılabileceği gibi aynı anda hem algılayıcı hem de dönüştürücü özellik gösteren termistörler ile kompleks sensörler kullanılabilir.

İlk olarak fiziksel veya kimyasal uyarıların, sensörler tarafından hassas ve seçimli olarak algılanmasıyla, ölçüm ve kontrollerde kullanılan elektronik sistemler için geçerli bir giriş sinyali oluşturulmuş olur. Daha sonraki aşamada ise sensörlerde oluşan bu ilk giriş sinyali, ya çevirici olarak kullanılan bir dönüştürücü tarafından yada sensör malzemesinin kendi bünyesi içinde oluşan bazı elektro-kimyasal olaylar sonucunda, elektronik sistemin işleyiş prensibini oluşturan; iyonik veya elektronik iletim mekanizmalarından, her hangi birini harekete geçirebilecek bir çıkış sinyaline dönüştürülür.

Sistemin bütünlüğünü sağlayacak ilave elektronik devre elemanları ile çıkış sinyalleri filtre edilip yükseltilerek doğru ve güvenilir elektronik veriler elde edilir. Bu verilerden yola çıkılarak sistematik bir veri analizi yapmak mümkündür. Bunun için; sensörler tarafından algılanabilecek nitelikteki uyarıların miktar veya şiddetindeki değişikliklerle, bu değişikliklere bağlı olarak ölçülen (voltmetre veya ampermetre ile) elektronik değerler arasındaki birbiriyle bağıntılı fonksiyonel bir grafiğin (frekans-bağıl nem grafiğinin) çizilmesi gerekir.

İlk kez 1960'larda, Amerikadaki Bilimsel Fizik–Kimya Şirketi tarafından kullanılan; “EMD–2000” isimli mikro bağıl nem sensöründen elde edilen iki farklı frekans bağıl nem değişimleri (rezistif ve kapasitif) Şekil 1.33'de örneklendirilmiştir.



Şekil 1.33. “EMD–2000” mikro bağıl nem sensörünün frekans-bağıl nem grafiği  
(a) Rezistif esaslı çalışan nem sensörü, (b) Kapasitif esaslı çalışan nem sensörü

Bu iki farklı frekans-bağıl nem grafiği incelendiğinde; ortam neminin artmasıyla kullanılan sensördeki elektriksel direncin azaldığı, kapasitansın ise arttığı görülmektedir. Sensör sisteminin karakteristikleri temelde sensörün özellikleri ile belirlenir.

### 1.5.2. Aktif ve Pasif Sensörler

Bütün sensörlerin çalışma karakteristikleri incelendiğinde; en belirgin farklılığın, algılanacak nitelikteki enerjinin ölçülebilecek bir büyüklüğe çevirimiinde ortaya çıkar. Buna göre aktif ve pasif olmak üzere iki tip sensör vardır [11].

### 1.5.2.1. Aktif Sensörler

Algılayabilecek nitelikteki uyarıcının enerji kaynağına bağımlı olarak kendi kendini uyaran sensörlerdir. Hiçbir akım kaynağı ile beslenmeyen fakat uyarıldığında enerji çevirimine veya iletimine bağılı olarak sensör bünyesinde oluşan değişikliklerle sensörden ölçülebilir bir akım elde edilir. Isıl çiftleri ve piezoelektrik malzemeleri aktif sensörlere örnek olarak verebiliriz.

### 1.5.2.2. Pasif Sensörler

Modülasyonlu sensör olarak da bilinen bu tür sensörler algılanabilecek nitelikteki enerjiyi bir formdan diğer bir forma direkt dönüştüremez. Kendi kendini uyaramayan pasif sensörlerin enerji çevirim mekanizmasını harekete geçirebilmek için düşük voltajlı sabit bir akım kaynağı ile beslenmesi gerekir. Nem ve gaz sensörleri birer pasif sensördür.

### 1.5.3. Fiziksel Yönüyle Enerji Çeşitleri

Sensörlerdeki en belirgin karakteristik özelliğin, algılanabilecek nitelikteki enerjinin ölçülebilecek bir büyüklüğe çevirimine bağılı olduğunu biliyoruz. Bu sebeple, bilinen tüm enerji çeşitlerinin sahip oldukları özelliklere göre sınıflandırılabilmesi gerekir. Fiziksel yönüyle ayırt edebildiğimiz enerji çeşitleri şunlardır [13]:

1. Atom enerjisi; çekirdek ve elektronlar arasındaki kuvvetle,
2. Elektrik enerjisi; elektriksel alan, akım ve gerilimle,
3. Yer çekim enerjisi; gravimetrik çekimle,
4. Manyetik enerji; manyetik alanla,
5. Kütle enerjisi; rölativite teorisiyle ( $E=mc^2$ ),
6. Mekaniksel enerji; kuvvet, yer değiştirme, moment ve ivmeyle,
7. Moleküler enerji; moleküllerdeki bağ enerjisiyle,
8. Nükleer enerji; çekirdekteki bağ enerjisiyle,

9. Radyasyon enerjisi; gama ışını, X ışını, kızılötesi ve görünür ışık ile mikro dalgalarla elektromanyetik dalgalarla,
10. Isı enerjisi; moleküllerin ve atomların kinetik enerjileriyle ilgili olarak tanımlayabildiğimiz enerji türleridir.

Sensör her hangi bir sürecin yada maddenin belli bir özelliğinin niceliksel olarak tanımını sağlar. Madde katı, sıvı veya gaz olabilir. Süreç ise durgun yada hareketli olabilir. Niceliksel olarak belirlenecek özellik birkaç değişik şekilde oluşturulabilir. Bu özellik fiziksel veya kimyasal bir doğaya sahip olmalıdır [14].

Sensörü fonksiyonel hale getirmek için çeşitli fiziksel etkiler ve çalışma prensipleri denenmiştir. Fonksiyonel yeteneklerine göre insan duyu organları ile karşılaştırabildiğimiz sensörler [15]:

1. Optik sensörler.....Görme duyasu,
2. Gaz sensörleri.....Koklama duyasu,
3. Sıcaklık, basınç sensörleri.....Dokunma duyasu,
4. Akustik sensörler.....Duyma duyasu,
5. Kimyasal sensörler.....Tat alma duyasu.

Ultraviyole yada kızılötesi ışınlar, elektromanyetik alan, kokusuz gazlar gibi insan duyu organları ile algılanamayan bir çok uyarı sensörler tarafından çok hassas olarak tespit edilebilir. Buna karşılık insan duyu organlarının sensörlere göre çok daha karmaşık olan çalışma prensipleri, taklit edilemeyen yapıları ve uzun ömürleri ile daha üstün özelliklere sahip oldukları kabul edilmektedir.

Sensörler için bazı şartlar söz konusudur. Bu şartlar temel ya da spesifik olabilir. Çalışma prensibine ve yapımına bağlı olarak aranacak özellikler şunlardır [13];

- yüksek hassasiyet,
- doğrusallık,
- kesin sonuç vermesi,
- histeri olmaması,
- üretilebilirlik,
- yüksek tepki hızı,

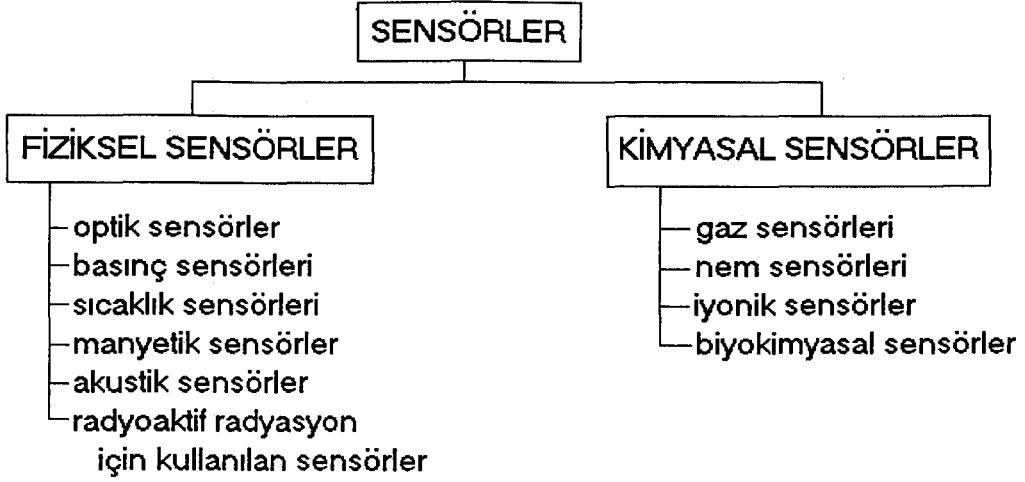
- seçicilik,
- değişime açıklık,
- geniş ölçüm aralığı,
- sıcaklık aralığı,
- karışıklıklara karşı kararlılık,
- basit kalibrasyon olanağı,
- yüksek güvenilirlik,
- uzun çalışma süresi (dayanıklılık),
- yaşlanmaya dayanıklılık,
- ısı, titreşim, asit, baz, toz gibi ortam şartlarına dayanıklılık,
- güvenlik,
- düşük maliyet,
- küçük boyut, düşük ağırlık ve mukavemet.

#### 1.5.4. Sensörlerin Sınıflandırılması

Sensörler çalışma prensibine, kullanım amacına, çıkış sinyalinin cinsine, kullanılan malzemeye ve üretim teknolojisine bağlı olarak sınıflandırılabilir.

Çalışma prensibine göre sınıflandırma Şekil 1.34'deki gibidir. Fiziksel ve kimyasal sensörler olarak iki gruba ayrılır. Fiziksel sensörler piezoelektrik, iyonizasyon, termoelektrik, fotoelektrik, magnetoelektrik gibi fiziksel etkileri algırlar. Ölçülen nicelikteki ufak değişimler elektrik sinyaline dönüştürülürler. Kimyasal sensörle kimyasal adsorpsiyon veya elektrokimyasal reaksiyon sonucu ölçülen değişimler elektrik sinyallerine dönüştürülür. İki grubun içine dahil edilemeyen sensörler de mevcuttur. Birçok sensör fiziksel prensiplere dayanarak çalışır. Kimyasal sensörler için güvenilirlik, toplu üretim, ücret gibi çeşit problemler söz konusu olabilir. Bu zorlukların bir çoğu giderilmiş ve kimyasal sensörlerin uygulama alanı genişlemiştir [11].





Şekil 1.34. Çalışma prensibine göre sensörlerin sınıflandırılması [11]

Kullanım amacına göre sensörler [11];

- Basınç ve kuvvet sensörleri,
- Seviye belirleme sensörleri,
- Hız sensörleri,
- Hızlanmayı belirleyen sensörler,
- Titreşim için kullanılan sensörler,
- Manyetik alan saptamada kullanılan sensörler,
- Vakum için kullanılan sensörler,
- Yer değiştirmeyi saptayan sensörler,
- Tüketimi belirleyen sensörler,
- Sıcaklık sensörler,
- Radyoaktif radyasyon için kullanılan sensörler,
- Nem sensörleri,
- Gaz sensörleri,
- Biyosensörler vb. olarak sınıflandırılırlar.

Çıkış sinyalinin cinsine göre sensörler 4 gruba ayrılır [11]:

1. Analog Sensörler: Elektriksel olmayan nicelikleri analog elektrik sinyaline dönüştürürler.

2. Dijital Sensörler: Elektriksel olmayan nicelikleri dijital akış sinyaline dönüştürürler.
3. Dijital Olmayan Sensörler: Ölçülen nicelikleri frekansa ya da akış sinyaline çevirirler
4. Temel Sensörler: Çıkış sinyali düşük veya yüksek bir seviyeye ayarlanıp belirli bir başlangıç değeri ölçüldüğünde algılama gerçekleşir.

Kullanılan malzeme açısından sensörler şu şekilde sınıflandırılabilir [11];

- Metal,
- Seramik,
- Polimer,
- Kompozit.

Malzemelerin fiziksel özelliklerine göre [11];

- İletken,
- Yarı iletken,
- Dielektrik,
- Magnetik.

Malzemenin kristal yapısına göre [11];

- Tek kristalli,
- Çok kristalli,
- Amorf şeklinde sınıflandırma yapılır.

Sensörlerin üretim teknolojilerine göre sınıflandırılması şu şekildedir [11];

- Entegre edilmiş sensörler,
- İnce film sensörleri,
- Kalın film sensörleri,
- Seramik sensörler.

Entegre edilmiş sensörler silikon (Si) altlık üzerine kurulu yarı iletken entegre devrelerin üretim teknolojisi temel alınarak üretilir. Sinyali ölçmede kullanılan elektronik devre aynı çip üzerinde yer alır.

İnce film sensörleri dielektrik altlık üzerine hassasiyete sahip uygun bir malzemenin ince film halinde uygulanması ile üretilirler. Yeni teknolojilerle elektronik devrenin bu altlık üzerine yerleştirilmesi mümkündür.

Kalın film sensörleri genelde  $Al_2O_3$ 'den yapılmış seramik altlık üzerine uygun karışımın uygulanması ile üretilirler. Sonrasında sıcaklık uygulanarak film şekillendirilir. Seramik sensörler standart bir seramik teknolojisi ile ya da sol-jel gibi değişik yöntemlerle üretilebilir. Hazırlık işlemlerinden sonra şekillenen parça yüksek sıcaklıkta pişirilir. Üretim teknolojisine bağlı olarak çeşitli avantaj ya da dezavantajlar söz konusu olabilir.

Araştırma, geliştirme aşamasındaki yatırımın düşük olması, sensör parametrelerinin kararlılık göstermesi gibi faktörlere bağlı olarak seramik ve kalın film üretim teknolojileri daha çok tercih edilir [11].

## 1.6. Seramik Sensörler

Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle inorganik özellikte ametal malzemeler sensör üretiminde kullanılmaya başlamıştır. Bu sayede sıcaklığa dayanım, korozyona dayanıklılık, aşınma direnci gibi malzeme özellikleri anlaşılmıştır [16].

Seramiklerin sensör üretiminde kullanımı malzemenin aşağıda belirtilen dört farklı özellikleri ile belirlenir [16]:

1 Pişme koşulları ve kompozisyon ayarlanarak seramiklerin mikro yapısı düzenlenebilir. Mikro yapının elektriksel, manyetik, optik, ısıl, mekanik özellikler üzerinde kuvvetli etkisi vardır.

2 Seramikler yüksek sıcaklık dayanımına ve ortam etkilerine dirençlerinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirler.

3 Seramiklerin üretim sürecindeki işlemler karmaşık değildir. Bileşenlerin karıştırılması, presleme, yüksek sıcaklıkta pişirmeden ibarettir.

4 Seramikler genelde ucuz malzemelerle üretilirler. Dolayısıyla seramikten yapılmış sensörler de oldukça ucuzdur.

Seramiklerin yapısal özellikleri tanelerin kristal yapısına, tane sınırlarına, taneyle gözenekler arasındaki yüzeye ve yapıdaki gözeneklere bağlıdır. Bu özelliklere dayanarak yığınsal ve yüzey özellikleri seramik sensör yapımında önemlidir [11].

Seramik sensör malzemeleri 3 şekilde sınıflandırılabilir [11]:

1. Taneleri fiziksel özelliklerine göre (yığınsal özellikler),
2. Tane sınır özelliklerine göre,
3. Yüzey özelliklerine göre.

**Çizelge 1.6.** Malzemelerin baskın özelliklerine göre sensörlerin sınıflandırılması [16]

<b>Baskın özellik</b>	<b>Genel uygulama</b>	<b>Fonksiyonel özellik</b>
Yığınsal özellikler	Sıcaklık sensörü Oksijen gaz sensörü Oksijen gaz sensörü Basınç sensörü Kızılötesi ışın sensörü Ultrasonik sensör Kapasitans sıcaklık sensörü Manyetik sıcaklık sensörü Kritik sıcaklık sensörü	NTC Termistörü Katı elektrolit Yarı iletken Piezoelektrik Piezoelektrik Piezoelektrik Ferroelektrik Ferromanyetik Yarı iletken
Tane sınırı özellikleri	Sıcaklık sensörü Gaz sensörü Basınç sensörü	PTC Termistörü Yarı iletken Yarı iletken
Yüzey özellikleri	Nem Sensörü	

Bu özellikler yük taşıyıcısının oluşumunu ve taşıma hızını belirler. Bir çok seramik malzeme çok kristalli yapıya sahip olduğundan hangi özelliğin baskın olduğu belirlenmelidir [16].

Çizelge 1.6'da sensörlerin baskın olan özelliklere göre sınıflandırılması görülmektedir. Bazı seramik sensörlerde kullanılan seramikler dielektrik, manyetik, piezoelektrik gibi malzeme karakteristiği taşırlar. Yani, fiziksel özellikler baskındır. Kızılötesi ışını sensörleri piezoelektrik etki altındadır. Ultrasonik sensörler piezoelektrik etkisi ile çalışır.

Seramikler yapısal özellikleri ve yığınsal, yüzeysel, gözenek özellikleri açısından çeşitli sensörlerin yapımında kullanışlıdır. Seramik tarafından sunulan olasılıklar da geniştir. Kompozisyona giren bileşenlerin seçimi ve fonksiyonellik açısından kolaylık sağlarlar.

### 1.6.1. Sensör Yapımında Kullanılan Seramikler

Genel olarak seramikler tek tip kristal, amorf faz ve gaz fazından oluşan bir sistemden oluşurlar. Tek kristal fazı tanelerden oluşur. Amorf faz taneler arasını dolduran oksit esaslı camdır. Amorf faz seramik malzeme kompozisyonunda yer almayabilir. Yoğunluğu arttırmak amacıyla camsı faz da dahil edilebilir. Gaz fazı taneler arasındaki gözenekleri dolduran gazdır. Gaz fazın kompozisyonu ortam atmosferi ile belirlenebilir [11].

Seramiklerin özellikleri temel olarak kristal fazı ile ilgilidir. Gaz fazın özellikler üzerindeki etkisi gaz ve nem ölçmede kullanılan seramik sensörler için önemlidir.

Piezoseramikler, ferritik seramikler, PTC-Termistörler, NTC-Termistörler, varistörler ve ferroelektrik seramikler için gözenek hacminin minimuma indirilmesi istenir. Bazı özel seramik malzemeler için ise, özellikleri belirlenmiş gözenekli bir yapı istenir. Gaz ve nem sensörleri için gözenekler önemlidir.

Seramikler avantajlara bağlı olarak sensör yapımında tercih edilirler [11]:

- Hammaddeler ucuzdur ve kolay elde edilebilir,
- Teknolojik ekipman düşük maliyetlidir,
- Üretim süreci, tasarımı ve kontrolü kolaydır,
- Bazı istisnalar haricinde üretim süreci hava atmosferinde gerçekleştirilir,
- Seramik teknolojisi hem büyük hem de küçük ölçekli üretim için uygundur,
- Tane, yüzey, tane sınırı özellikleri ile oynanarak olasılıklar genişletilebilir,
- Seramik teknolojileri kullanılarak çeşitli özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilebilir.

## **1.6.2. Sensör Yapımında Kullanılan Seramiklerin Sınıflandırılması**

Seramiklerin sınıflandırılması [11];

1. Kimyasal kompozisyona,
2. Faz kompozisyonuna,
3. Fiziksel özelliklere (elektrik, manyetik, dielektrik) göre yapılıdır.

### **1.6.2.1. Kimyasal kompozisyona göre sınıflandırma**

Seramikler kimyasal kompozisyona göre oksit ve oksit olmayan (nitür, borür, karbür vb.) şeklinde ikiye ayrılabilir. Oksit olan seramikler sensör yapımında en çok kullanılan malzemelerdir [11].

Oksit olan seramikler kendi aralarında [11];

1. Tek oksit içeren,
2. İki veya daha fazla oksit içeren seramikler olarak ikiye ayrılırlar.

Tek oksitli yapı ile iki veya daha fazla oksit içeren yapı birleşerek katı çözeltiliyi oluştururlar. Metal atomları kafes yapısındaki metal atomunun yerini alır. Katı çözeltiler oluşturarak özellikleri geniş bir alanda kontrol etmek mümkündür [11].

Kasıtlı olarak safsızlık atomları katılarak çeşitli özellikler elde edilebilir. Safsızlıkların varlığına bağlı olarak oksit içerikli seramikler ilave edilmiş veya ilave edilmemiş (kimyasal olarak saf) olabilirler [11].

### **1.6.2.2. Faz kompozisyona göre sınıflandırma**

Seramikler içerdikleri faz sayısına göre tek fazlı ve çok fazlı seramikler olarak ayrılırlar. Seramik içerisindeki gözenekler ayrı bir faz sayılmaz. Tek fazlı seramikler camsı faz içermez ve yığın içerisindeki taneler aynı kristal yapıya sahiptir. Yapı cam faz içeriyor ise ve taneler tek bir faza ait ise ya da camsı fazın yanında çok fazla taneler varsa bu seramik çok fazlı yapıya sahiptir. Çok fazlı

seramik malzemeler kompozit seramikler olarak da bilinir. Kompozit seramiklerin kullanımı özellikle rezistör yapımında tercih edilir [11].

### 1.6.2.3. Fiziksel özelliklere göre sınıflandırma

Elektriksel özelliklerine göre seramikler 3 gruba ayrılır [11];

1. Yalıtkan,
2. Yarı iletken,
3. İletken.

Dielektrik özelliklerine göre [11];

1. Doğrusal,
2. Doğrusal olmayan şekilde ikiye ayrılırlar.

Kutuplanma mekanizmalarına göre dielektrik seramikler üçe ayrılırlar [11];

1. Piezoelektrik seramikler,
2. Piroelektrik seramikler,
3. Ferroelektrik seramikler,

Manyetik özelliklerine göre [11];

1. Ferrit,
2. Ferrit olmayan şekilde sınıflandırılırlar.

### 1.6.3. Gözenekli Seramiklerin Özellikleri

Gözenekler, seramik taneleri arasındaki boş alanlardır. Yüzeydeki gözeneklerin dışarı açılışına göre üçe ayrılırlar. Açık gözenekler iki yüzeye de açılırlar, tüm yapı boyunca yer alırlar veya bir yüzeyden başlar ve belli bir hacim dolanıp yine aynı yüzeye açılırlar. Yarı açık özellikteki gözenekler yüzeyden başlarlar ve yapı içerisinde belli bir derinliğe kadar uzanırlar. Dışa tek açılımları vardır. Kapalı gözenekler yapı içerisinde yer alırlar ve dışarı açılımları yoktur.

Gözeneklerin ara yüzeyleri çeşitli şekillerde olabilir. Silindirik, dikdörtgen, kare gibi her tür şekle rastlanabilir [17].

Gözenekler için temel özellik boyutlarıdır. Ara yüzey çapı (D) boyutu belirlemede kullanılır. Boyutlarına göre gözenekler mikro gözenekler ( $D < 2$  nm), kılcal gözenekler ( $2 < D < 200$  nm) ve makro gözenekler ( $D > 200$  nm) olarak üçe ayrılırlar. *Nem sensörlerinde 3 nm sınırlayıcı boyuttur.* 3 nm altında gözenek yoksa, %30 bağıl nemin altında neme karşı hassasiyet düşüktür [11].

Seramik sensörün üretiminde gözenek boyutunun, ve yüzey alanının kontrol edilmesi gerekir. Bu sorun uygun bir sıcaklık rejiminin belirlenmesi ve uygun katkıların ilavesi ile çözülebilir.

Sensörün hassas olması açısından gözenekliliğin yüksek olması ve geniş gözenek boyutunun olması gerekmez. Seramik cinsine ve dış etkenlere bağlı olarak optimum aralık belirlenmelidir. Nem sensörleri için kuru atmosfer şartlarında yüksek gözenek direncin artmasına neden olur. Bu durumda düşük nem değerlerinin ölçülmesi pratik açıdan imkansızdır [11].

#### **1.6.4. Seramik Sensörün Çalışmasını Etkileyen Temel Özellikler**

Seramik sensörün dış etkilere tepkisi rezistans veya elektrik akımındaki değişim ile belirlenir. Bu durumda oksit içerikli seramiklerin elektriksel özelliklerinin anlaşılması gerekir. Elektriksel özellikler yığinsal, yüzeysel ve tane sınırı özelliklerinden etkilenirler [16].

##### **1.6.4.1. Elektron iletkenliği**

Katı hal fazında her bir iyon kendine ait yerde sabit konumdadır. Her pozitif iyon (katyon) negatif iyon ile (anyon) çevrilidir. Yük dengesi vardır ve bunlar denge halindedir. Bileşiğin kimyasal formülünde yer almayan yabancı element yapı içerisine giremez.

Elektronlar ise elektriksel alan etkisi altında serbestçe hareket edebilirler. Has iletkenlerde  $E_a$  enerji aralığı küçük olduğundan elektriksel alan veya ısı



enerji etkisinde aktive olan yeterli sayıda elektron enerji aralığına atlayarak boş iletim bandına geçer ve iletim sağlar.

Bir kristale enerji aralığını atlatacak kadar elektriksel alan uygulanırsa kovalent bağdan bir elektron serbest hale geçer ve artı elektrota doğru hareket ederken geride bir elektron deliği bırakır. Bu durumda valans enerji bandında bir boş düzey oluşur. Elektronlar eksiden artıya doğru giderek eksi yük taşıyıcı olurken elektron deliği de artıdan eksiye doğru giderek artı yük taşıyıcı olur. Has yarı iletkenlerin elektriksel iletkenliği 1-34'de verilen eşitlik deki, gibi artı ve eksi yük taşıyıcılarının iletkenlikleri toplamı kadardır.

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p \quad 1-34$$

1-34'de verilen eşitlikte  $\sigma_n$  eksi yük taşıyıcısı olan elektronların sağladığı iletkenlik,  $\sigma_p$  artı yük taşıyıcısı olan elektron deliğinin sağladığı iletkenlik ve  $\sigma$  has yarı iletkenin iletkenliğidir. Has yarı iletkenlerde elektronlarla elektron boşlukları çiftler halinde oluştuğu için birbirlerine eşittir [16].

#### 1.6.4.2. İyon iletkenliği

İyonik iletkenlik durumunda yük taşıyıcısı iyonlardır ve iyonik iletkenlik gösteren birçok seramik malzeme iyonik bağlarla bağlıdır. İyon hareketine karşı olan enerji bariyeri oda sıcaklığında yüksektir. Sıcaklık arttığında iyonlar titreşmeye başlar ve enerji bariyerini aşarlar. Bu şekilde malzeme iyonik olarak iletken hale gelir. Sıcaklık arttıkça iyonik iletkenlik de artmaya devam eder.

İyon tüm yük dengesini bozmayacak şekilde hareket edebilir. Açık kafes konumlarının ve nokta hatalarının varlığı iyonların hareketliliğini iyi yönde etkiler. Frenkel ve Schottky hataları ile boşluklar nokta hatalarının iki temel mekanizmasıdır. Schottky hatası eşit elektrik yüküne sahip bir katyonla bir anyonun boşluğu şeklindedir. Frenkel hatası ise kafes yapısındaki bir iyonun yerinden çıkıp ara yer boşluğuna geçmesiyle oluşur. Boşluklar ise kristal yapısı içinde bulunmayan, yeri boş olan atomlar tarafından oluşturulur. Nokta hataları enerji bariyerini düşürerek iyonik iletkenliği artırırlar.

İyon iletkenliği NTC termistörlerde kullanılabilir. Ancak aktivasyon enerjisi yüksek olduğundan kristal özelliklerin de modifikasyonlar gereklidir. Oldukça kararlı olan  $ZrO_2$  katı elektrolitinde oksijen iyonları ancak  $2200^\circ C$  üzerinde iletkenlik gösterirler [16].

#### 1.6.4.3. Katkılı elektron iletkenliği

Kendiliğinden olan elektron iletkenliği kristallerde düşük olduğundan bazı katkı elemanlığı konularak iletkenlik artırılır. Katkı elemanlarının miktarı atomsal yüzde olarak %0,001-0,01 civarındadır. Katkılı yarı iletkenler n tipi ve p tipi olmak üzere iki gruba ayrılırlar. n tipi katkılı iletkende katkı elemanı yük taşıyıcı olarak elektron, p tipi katkılı da ise elektron boşluğu sağlar.

İki değerlikli metal atomlarından bazıları üç değerlikli bir atomla yer değiştirirse üç valans elektronunun ikisi yerleşir ve birisi boşta kalır. Bir adet fazla elektron elektrik alan etkisi altında iletim bandına geçer ve artı elektroda doğru yük taşır. Bu nedenle bu tür yarı iletkenlere eksi veya n tipi yarı iletken denir. Bu durumda üç değerlikli atom da verici konumundadır.

İki değerlikli metal atomlarının bir kısmı bir değerlikli atomla yer değiştğinde iki kovalent bağdan birinde bir elektron eksik kalacaktır. Bir değerlikli atom alıcı elemandır. Uygulanan elektrik alan etkisi altında, elektronlar hareket ederken elektron deliklerini kullanırlar. Bu şekildeki iletkenlik pozitif yük taşıyıcısının hareketine benzer ve artı veya p tipi yarı iletkenlik olarak bilinir.

$NiO$  içinde  $Li^+$ 'un yer değiştirmesi örnek verilebilir. Kafesteki yük dengesini sağlamak amacı ile  $Ni^{+3}$  ve  $Ni^{+2}$  alanları oluşur. Elektronlar bu delikler arasında atlayarak hareketi sağlarlar.

Katkılı iletkenlik has iletkenlikten daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden NTC termistörlerin yapımında katkılı iletkenlik tercih edilir. Yarı iletkenlerin özelliklerinden yararlanılarak çok sayıda elektronik aygıt geliştirilmiştir. Temel olarak  $ZnO$  esaslı metal oksit varistörler, PTC termistörler, gaz sensörleri ve nem sensörleri katkılı iletkenlik ile üretilmişlerdir. Nem sensörlerinde katkı kullanılmaktaki amaçlardan birincisi düşük nem değerlerinde direnci düşürmektir. Nem sensörlerinde nem miktarı arttıkça direnç düşer. Düşük

nem değerlerinde (%30 bağıl nemin altı) direnç 10 MΩ'a geçer ve bu değer altında ölçüm güçleşir. Diğer amaç ise ikinci katkılarla hassasiyeti arttırmaktır [11].

#### 1.6.4.4. Stokiyometrik olmayan kristallerde elektrik iletkenliği

Bileşiklerde bileşiği oluşturan elemanların sayılarının oranı kesin ve sabittir. Bazı bileşiklerde ise mevcut elemanların oranı kesin ve tamsayı kesrine eşit olmayabilir. Bu durum ortamın sıcaklığından ve atmosferinden kaynaklanabilir. Net elektriksel yükün sıfır olması boşlukla ya da ara yer atomlar ile sağlanır [11]. Oksijen atomunda bu olaya sıkça rastlanır. Bahsedilen durum verilen denklem ile gösterilir. Oluşan oksijen boşlukları artı yüklüdür. Kristal yarı iletkenlik özelliğine sahiptir [16].



#### 1.6.5. Seramik Tane Yüzeyinin Elektriksel Özellikleri

Özellikle nem sensörleri için önemli olan bu mekanizma Ichinose tarafından araştırılmıştır. Temel ilke fiziksel olarak adsorplanmış suyun iyonik iletkenlik oluşturmasıdır. Genel olarak belirli bir hacimde maksimum yüzey alanı yaratmak için gözenekli malzemeler kullanılır. Gözenekli malzemenin yüzeyine suyun adsorplanması ya da suyun yüzeyden ayrışması sonucu direnç değişimi gözlenir. Bu da temel mekanizmayı oluşturur. Malzemedeki gözeneklerin küçük ve şekillerinin muntazam olması gerekir [11].

ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve spinel gibi malzemeler bu kritere uyarlar. Uzun dönem kullanımı açısından ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ın tane yüzeyi Li katkılı amorf bir malzeme ile kaplanır. Li katkılı malzeme su ile temas ederek Li-V-O-(OH)<sub>n</sub> amorf bileşiğini oluşturur. OH<sup>-</sup> iyonun adsorplanması dirençte değişime neden olur ve nem seviyelerini gösterir [18].

### 1.6.6. Seramik Tane Sınırının Elektriksel Özellikleri

Tane sınırı özellikleri baskın olan PTC termistörleri iyi bir örnektir.  $BaTiO_3$  ve katı çözeltileri PTC özellik gösterirler. Her tanenin yüzeyinde yerel yüklerin oluşturduğu bariyer yer alır. Bu bariyer tabakası düşük dirence sahip yarı iletken özellikteki tane çekirdeğinin etrafında yüksek dirençli bir kabuk oluşturur.

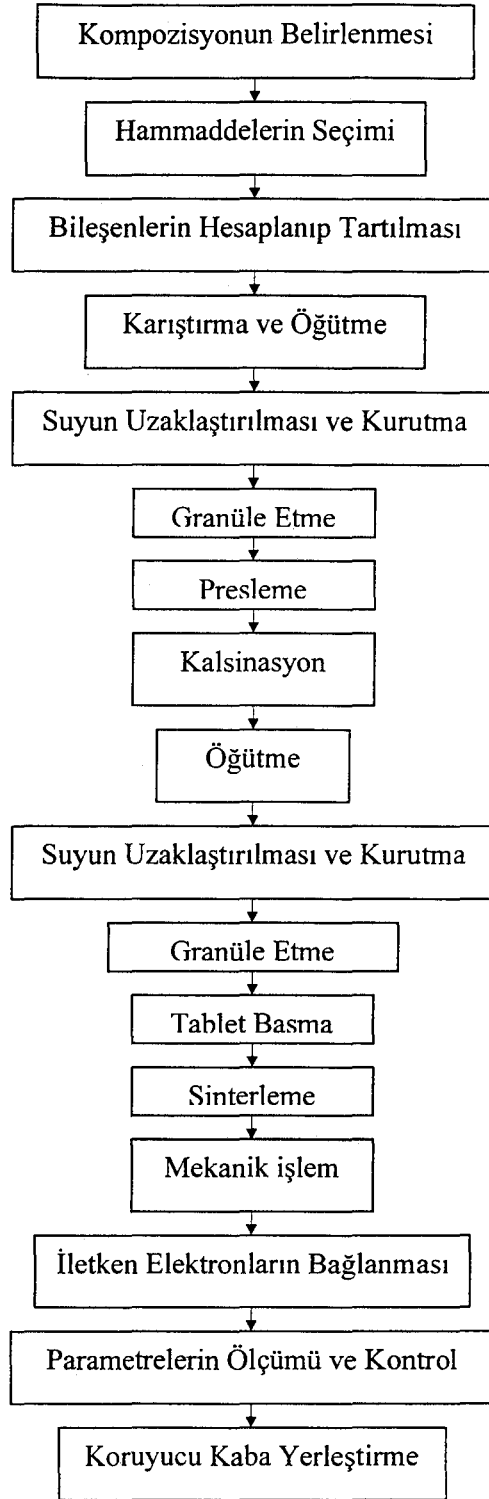
Tane sınırı özellikleri katkı malzemesine ve oluşum esnasında atmosferde yer alan oksijen miktarına bağlıdır. Var olan herhangi bir safsızlık tane sınırında birikir ve/veya hazırlama sırasında tane büyüme oranını değiştirir. İnce taneli seramik düşük voltajlara karşı hassas iken kaba taneli seramik yüksek voltajlarda hassastır. Soğuma döngüsü içinde oksijenin yapıya alınması en sondaki PTC karakteristiğini belirlemede önemli rol oynar [19].

### 1.6.7. Seramik Sensörlerin Üretim Yöntemleri

Seramik sensör üretiminde geleneksel seramik sensör üretimi, teknik seramik sensör üretimi, organik bileşenli kompozit seramik sensör üretimi ve kalın film teknolojisi olmak üzere dört farklı yöntem kullanılır [11].

#### 1.6.7.1. Geleneksel yöntemle seramik sensör üretimi

Geleneksel seramik sensör üretim yönteminde  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $SnO_2$ ,  $BaO$ ,  $SrO$ ,  $CoO$  gibi oksitlerin yanı sıra  $BaCO_3$ ,  $SrCO_3$ ,  $NaCO_3$ ,  $MnCO_3$  gibi karbonatlarda hammadde olarak kullanılır [11]. Üretim süreci Şekil 1.35'deki gibidir.



Şekil 1.35. Geleneksel yöntemle seramik sensör üretimi [11]

Hammadde seçimi kompozisyona bağlı olarak yapılır. Baryum oksit, stronsiyum oksit yerine karbonatları tercih edilir. Alkali oksitlerde karbonatları şeklinde katılırlar. Diğer hammaddeler genellikle oksit esaslıdır. Kimyasal

kompozisyona ve hammaddelere bağlı olarak her bileşenin miktarı en az %0,01–0,1 hata payı ile hesaplanır.

Karıştırma ve öğütme aşamalarında hammaddelerin homojen şekilde karışması sağlanır. Bilyeli yada düzlemsel değirmenler kullanılır. Sensör seramikleri gibi ince yapılı seramiklerde bilye ve kepler SiC, ZrO<sub>2</sub> gibi sert malzemeler kullanılır. Oksit tozlarının tane boyutu 5 µm'yi geçmemelidir. Bu şekilde tozların reaksiyona girme olasılığı artar. İşlem sıvı bir ortamda, çoğunlukla da damıtılmış bir suda gerçekleşir. Filtreleme ve fırında kurutma yapılarak bünyedeki su uzaklaştırılır. Kuru karışım elde edilir. Toz karışımına özel plastikleştiriciler katılarak uygun şekilde granüller elde edilir. Özel kalıplı presler kullanılarak silindirik şekil verilir. Düşük sıcaklıklar (600–1200°C) uygulanarak kalsinasyon yapılır. Katı hal kimyasına dayanarak reaksiyonlar gerçekleşir ve son bileşik oluşturulur.

Silindirik şekilli parçalar mm boyutunda parçalanarak öğütülür. Kurutma ve granülasyon işlemlerinden sonra önceden belirlenen haliyle şekillendirme yapılır. Tablet halindeki sensörler genellikle 5-15 mm çapa ve 1-2 mm kalınlığa sahiptirler.

Sinterleme aşaması seramikler için önemlidir. Sinterleme sıcaklığı her seramik malzeme için farklıdır. Sinterleme işlemi 30 dakika ile 12 saat süresince devam eder. Seramik malzeme yoğun hale gelir ve tane yüzeyleri, tane sınırları oluşur. Sinterleme genelde hava ortamında gerçekleşir. Bazı özel uygulamalarda redüktif ya da oksidatif atmosfer seçilebilir. Yavaş soğutma ile tabletlerin mekanik strese maruz kalması engellenir. Sinterleme işlemi tamamlanan tabletler parçalar bölünür. Taşlama ve temizleme işlemlerinden sonra iletken elektrotlar uygulanır. Vakumla buhar çöktürme veya kalın film teknolojisi uygulanarak elektrotlar oluşturulur.

Uygulama alanlarına bağlı olarak sensör parametreleri ölçülür. Üretim teknolojisi ve kompozisyonun uygunluğu kesinleşir. Sensör, çalışma şartlarına uygun üretildikten sonra koruma kabına yerleştirilir. Firma tarafından sensör cinsini ifade eden harf ve rakamsal semboller işlenir.

Bahsedilen teknoloji uygulanabilir ve ucuz olması, kolaylığı, hammaddelerin ucuz ve elde edilebilir olması, küçük ve büyük ölçekli üretime

uygun olması açısından tercih edilir. Homojenitenin düşük olması, kararlılığa bağlı olarak oksitlerin reaksiyon girme yeteneğinin düşük olması olumsuz taraflarıdır [11].

#### **1.6.7.2. Teknik yöntemlerle seramik sensör üretimi**

Teknik yöntemler ile daha homojen yapılar elde edilebilir. Geleneksel olmayan yöntemler solüsyon tekniği, buhar fazı tekniği ve tuz ayrıştırma tekniği olmak üzere üçe ayrılır.

##### **A. Solüsyon Tekniği**

Sensör seramiklerinde en yaygın biçimde kullanılır. Birden çok bileşene sahip kompozit seramik malzemeler için uygundur. İşlemden çeşitli asitlerin (asetik asit, okzalik, sülfürik, nitrik, hidroklorik, vb.) suda çözünebilir tuzları kullanılır. İçerikteki çözücü uzaklaştırılır.

Solüsyon tekniği üç değişik şekilde yapılabilir. Çözücünün buharlaştırılması işleminde yavaş bir şekilde çözücü buharlaştırılır. Karışımın homojenitesi düşüktür. Çöktürme-filtre etme yönteminde ana katyonları içeren çöktürücü solüsyon ilave edilir. Kimyasal reaksiyon sonrası ince bir toz halinde kimyasal bileşen elde edilir. Bu yöntem oksit içerikli yapılarda, katı çözeltilerde, ferritlerde, NTC ve PTC termistörlerde kullanılır.

Ekstraksiyon-filtre etme metodunda sol-jel yöntemi kullanılır. Metal alkoksilleri ile oluşturulan metal polimeri organik çözücüde çözülür ve metal-polimer jeli elde edilir.

Solüsyon teknikleri genel seramik teknolojisi ile birleştirilebilir. Bu teknoloji ile üretilebilen fazların reaksiyona girme eğilimi yüksektir ve standart seramik teknolojisine göre katı faz reaksiyonları daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir.

##### **B. Buhar Fazı Tekniği**

Buhar fazında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu yüksek saflığa, yüksek reaksiyon eğilimine sahip fazlar elde edilir. Genel seramik teknolojisinde birincil hammadde olarak kullanılabilirler.

### C. Tuz Ayrıştırma

Solüsyon tekniğinde kullanılan tuzlar ısı olarak oksitlere ayrılır. Bu oksitler yüksek reaksiyon kapasitesine sahiptir ve genel seramik teknolojisinde kullanılabilir.

#### 1.6.7.3. Organik bileşenli kompozit seramik sensör üretimi

Kompozit seramiğin bileşeni inorganik ise, bahsedilen yöntemlerden biri kullanılır. Organik bileşen genellikle polimer ya da epoksi reçinedir.

Polimer uygun bir organik çözücü ile çözülür ve toz halindeki oksitle karıştırılır. Karışım homojenize edilir ve metal kalıplara dökülür. Çözücü buharlaştıktan sonra iletken elektrotlar uygulanır.

#### 1.6.7.4. Seramik sensör üretiminde kalın film teknolojisi

Sensör üretimi için 10-100 µm kalınlığında çok kristalli yapıya sahip filmler kullanılır. Seramiğe benzer yapıları vardır. Kalın film sensörleri daha kısa tepki sürelerine ulaşmak mümkündür. Ağırlık olarak monolitik sensörlerden daha hafiftirler.

Kalın film teknolojisi baskı devre tekniği olarak da bilinir. Uygun özellikteki pasta altlık malzemesi üzerine basılır. Altlık malzemesi çoğunlukla  $Al_2O_3$  esaslıdır.

Baskı devre tekniğinde altlık malzemesi mekanik ve organik kirliliklerden temizlenir. Pasta altlık yüzeyine vakum altında uygulanır. Pasta içerisindeki organik çözücünün ayrışabilmesi için kaplanan film kurutulur. Pastanın sinterleme sıcaklığına kadar sıcaklık yükseltilir ve bir süre sabit tutulur. Böylelikle film altlığa sabitlenmiş olur. Kompozisyona bağlı olarak pastalar hava ortamında 400-1200°C aralığında sinterlenir. Mekanik gerilimi önlemek açısından yavaş soğutma yapılır.

Kalın film teknolojisi seramik sensör üretiminde yaygın olarak kullanılır. Daha az malzeme gerektirmesi, daha düşük sıcaklıkta sinterleme yapılabilmesi, daha kısa sürede tepki vermesi açısından baskı devre tekniği tercih edilir. Bunun



Yaygın bir sınıflandırma sensörleri yarı iletken sensörler, yüzey iletkenliğine sahip iyonik sensörler (proton sensörleri) ve katı elektrolitlerden yapılmış sensörler olarak gruplandırılır. Yarı iletken sensörler yarı iletken malzemelerden imal edilirler. İletkenliği elektronlar sağlar ve özellikleri tane yüzeylerine ve tane sınırlarına bağlıdır. Proton tipi sensörler dielektrik malzemelerden ve yüksek direnç gösteren yarı iletken malzemelerden yapılırlar. İletkenlikleri adsorplanan su moleküllerinin oluşturduğu tabakada hareket eden protonlarca sağlanır. Katı elektrotlardan yapılmış sensörlerin iletkenlikleri iyoniktir ve oksijen iyonlarının hareketi ile gerçekleşir [11].

#### 1.6.9. Seramik Nem Sensörlerinde Olması Gereken Özellikler

Sensör malzemelerinin sensörün verimliliğini sağlamak açısından bazı şartlara sahip olmaları istenir. Aranılan şartlar şunlardır [13]:

1. Güvenilir olması ve uzun servis süresine sahip olması,
2. Sıcaklığa bağlılığının düşük olması,
3. Kirli atmosferde kararlı olması,
4. Korozyona sebep olan çeşitli gazların bulunduğu ortamda kararlı olması,
5. Geniş çalışma aralığına sahip olması (0–100%BN ve 0-100°C),
6. Yüksek hassasiyet göstermesi,
7. Kısa sürede cevap vermesi,
8. Kuru havada rezistansının  $10^7 \Omega$ 'u geçmemesi,
9. Termal ve kimyasal açıdan dayanıklı olması,
10. Düzeltmeye gerek duymaması,
11. Histeri göstermemesi,
12. Teknolojik özellikte ve düşük fiyatlı olması,
13. Yenilenebilir olması,
14. Elektrik devrelerine uygun olması.

### 1.6.10. Seramik Sensörlerin Uygulama Alanları

Nem sensörleri tıp, tarım gibi bir çok alanda uygulamaya sahiptirler. Ev içi alanlarda da (yiyecek hazırlama araçları, kurutucu, havalandırma) uygulamaları vardır. Seramik nem sensörlerinin potansiyel kullanımı klimalar, mikrodalga fırınlar, video kayıt cihazları, bazı elektrikli cihazlar üzerinedir. Seralarda nem ayarının düzenlenmesi geç olgunlaşma gibi sorunları önler. Yine bir çok endüstriyel alanda kurutma işlemi sırasında enerji sarfiyatını azaltmak açısından bağıl nemin belirli bir aralıkta seyretmesi istenir. Yiyecek üretim sektöründe de nem yiyeceklerin tadında değişikliğe neden olduğundan nemin kontrolü önemlidir. Nem sensörleri üretim sırasında statik elektriğin varlığını kontrol etmek açısından elektronik endüstrisinde kullanılır [16].

### 1.6.11. Seramik Nem Sensörlerinin Ölçüm Devreleri

Seramik sensörlerin bazı temel özelliklerine bağlı olarak ölçüm devreleri kurulmalıdır. Sensör düşük nem değerlerinde yüksek rezistansa sahiptir. %0-100 bağıl nem aralığında direnç 3-6 kat oranında değişim gösterebilir. Nem sensörlerinin kutuplanma etkisini önlemek amacı ile ölçümler alternatif akım (AC) şartlarında yapılmalıdır. Doğru akım (DC) köprü devreleri bu açıdan uygulanabilir değildirler. Bu nedenle seramik nem sensörleri alternatif akım köprü devresine bağlanarak direnç ve kapasitanslarındaki değişim gözlenir. Çoğunlukla analog çıkışa sahip alternatif akım ölçüm devreleri ve frekans veya zaman çıkışı olan çevrim devreleri kullanılır.

Analog çıkışa sahip alternatif akım ölçüm devreleri belli bir frekansa sahip alternatör ve çıkış amplifikatöründen oluşurlar. Daha karmaşık devreler de oluşturulabilir. Devre çıkışında büyüklüğü sensörün direnci ile değişen sinyal elde edilir. %40'dan düşük bağıl nem değerlerinde seramik sensör direnci oldukça artar. Bu aralıktaki uygulama için çok düşük akım veren amplifikatör kullanılmalıdır. Frekans veya zaman çıkışına sahip dönüşüm devreleri bağıl nemi frekans ya da zaman aralığına çevirirler [11].

### 1.6.12. Bazı Firmalar Tarafından Yapılmış Nem Sensörleri

Sensör imalatı yapan bazı firmalar seramik materyallerini kullanarak nem sensörleri de üretirler. Sensörün nem duyarlılığı gövdesi  $ZrCrO_4$ , spinel tanecikleri ve bir cam faz olan vanadyum bileşimli seramik karışımdır. Sensör oda koşullarında %30 bağıl nemde 300 k $\Omega$  değerinden %90 bağıl nemde 4 k $\Omega$  nemlik değerine sahiptir.

H104C sensörü aşağıda verilen parametrelere sahiptir.

- Nem çalışma aralığı..... %10-90 Bağıl Nem
- Duyarlılık (R10/R90) ..... 1,7-1,8
- Sıcaklık çalışma aralığı ..... 0-50°C
- Maksimum çalışma gücü (AC) ..... 1 mW
- Çalışma frekansı ..... 50 Hz-1kHz
- Isı depolama aralığı..... (-20)-(+85)°C

CIMAREC Co. Ltd. firması tarafından üretilen ve PEWATRON AG Wallisellen Zürich tarafından dağıtımı yapılan CGS-H14 serisine ait seramik nem sensörleri; bunlar basit yapılara sahiptir, kullanımları kolaydır ve çok güvenilirlerdir. CGS-H14 DC yi CGS-H14 ten ayıran fark; bu sensörün termistör özelliğine sahip olmasıdır. Bu serideki sensörler aşağıdaki parametrelere sahiptirler.

- Isı depolama aralığı ..... 0-50°C
- Nem depolama aralığı ..... %10-90 BN
- Nem çalışma aralığı ..... %30-90 BN
- Sıcaklık çalışma aralığı ..... 0-50°C
- Çalışma voltajı (AC) ..... 1 V (50Hz-1kHz)
- Güç değeri ..... 0,3 mW
- Nominal empedans değeri ..... 60k $\Omega$  (25°C'de %50 RH değerinde)

Buna benzer bir çok firmanın ürettiği seramik nem sensörleri mevcuttur.

## 1.7. Sensör Karakteristikleri

$R=f(BN)$  ve  $C=f(BN)$  fonksiyonları sensör karakteristiğini belirler. Bu karakteristik özellikler  $\ln R=f(BN)$ ,  $\ln C=f(BN)$ ,  $\ln R=f(\ln BN)$ ,  $\ln C=f(\ln BN)$ ,  $\ln R=f(1/BN)$ ,  $\ln C=f(1/BN)$  gibi çeşitli şekillerde olabilir. Sensör özelliklerini belirleyen karakteristik özellikler şunlardır [11]:

### 1.7.1. Sıcaklık Karakteristikleri

Sabit nem değerinde kapasitansın veya rezistansın sıcaklığa bağlılığına sensör karakteristik sıcaklığı denir.

### 1.7.2. Cevap Verme Karakteristiği

Nem değerinde belirgin değişiklik olduğunda kapasitans ve rezistansın sıcaklığa bağlılığı cevap verme karakteristiği olarak adlandırılır. Bu karakteristik belirlenmiş iki nem değeri aralığında ölçülür.

### 1.7.3. Cevap Verme Süresi

Cevap verme süresi  $t$  cevap verme karakteristiğinden türetilir. Bu parametre sensörün nem değişikliği karşısında güvenilir sonucu vermek için gerekli süreyi belirler. Cevap verme süresi bir nem değerinden diğerine geçişte meydana gelen rezistans değişimi ile tanımlanır. Bağlı nem  $BN_1$ 'den  $BN_2$ 'ye değişirken  $BN_2 > BN_1$  ve bu nem değerleri için rezistans  $R_1$  ve  $R_2$  iken 1-36'daki eşitlikleri geçerlidir.

$$\Delta R_0 = R_1 - R_2$$

$$\Delta R = R(t) - R_2 \quad 1-36$$

Burada  $R(t)$ ,  $t$  anında ölçülen rezistans değeridir. Göz önüne alınması gereken diğer bir eşitlik de 1-37'deki gibidir ve  $T$  zaman sabitidir.

$$\Delta R = \Delta R_0 \exp(-1/T) \quad 1-37$$

Cevap verme süresi bahsedilen 1-37'deki eşitliğin eğimi ile belirlenir. Sadece oluşturulan eğriler ile cevap verme süresini belirlemek hataya neden olabilir. Temel neden, farkı çaplara sahip gözeneklerde aktivasyon ve desorpsiyon hızının farklı gerçekleşmesidir. Bu durumda belirli zaman aralıkları göz önüne alınmalıdır.

Cevap verme süresini belirlemede daha geçerli bir yöntem kullanılmaktadır. Desorpsiyon ve adsorpsiyon değerlerinde meydana gelen son değişimin %90'ına ulaşmak için gerekli süre 1-38'de verilen eşitlik ile saptanır. Bu durumda diğer analitik yöntemin kullanılmasına gerek yoktur.

$$\Delta R (T)/\Delta R_0 = 0,9 \quad 1-38$$

#### 1.7.4. Hassasiyet

Hassasiyet farkı şekillerde tanımlanabilir.

1. Nem değerindeki değişim  $\Delta BN = BN_2 - BN_1$ , ise rezistans  $\Delta R = R_1 - R_2$ 'ye göre değişir. Bu tanıma göre bağıl nemdeki %1'lik değişime karşılık oluşan rezistans 1-39'da verildiği gibi değişim yüzdesidir.

$$\text{Hassasiyet} = 100 \cdot \Delta R / (R_2 \cdot \Delta BN) \quad 1-39$$

2. Hassasiyet 1-40'da verilen eşitliğe uygun olarak farklı nem değerlerinde ölçülmüş  $R_1$  ve  $R_2$  rezistanslarının oranlanması ile bulunur.

$$\text{Hassasiyet} = R_1/R_2 \quad 1-40$$

3. Özellikle proton nem sensörleri için geniş bir nem aralığında 1-41'deki gibidir. Denklemden k hassasiyet olarak adlandırılır ve karakteristiğinin eğimi ile belirlenir. A ve B ise katsayılarıdır.

$$R=A \exp(-k R H) \quad 1-41$$

4. Bazı nem sensörleri NTC termistörlerinde olduğu gibi aktivasyona dayalıdır. 1-42'de verilen eşitlikteki gibi K parametresi hassasiyet için bir ölçüdür ve A sabit sayıdır.

$$R =A \exp( K/RH ) \quad 1-42$$

5. Yarı iletken seramik sensörlerin iletkenliği suyun buhar basıncına 1-43'de verilen eşitlikle bağlıdır.  $\beta$  indeksi hassasiyetin ölçüsüdür.

$$\sigma=\sigma_0 \cdot p^{\beta}su \quad 1-43$$

#### 1.7.5. Nem için Çalışma Aralığı

Sensörün istenilen kesin ölçümü sağladığı bağıl nem aralığıdır. Suyun buhar basıncı için çalışma aralığı aynı şekilde belirlenir.

#### 1.7.6. Sıcaklık için Çalışma Aralığı

Nemi ölçmede kullanılan malzemenin çalışabildiği sıcaklık aralığıdır. Bu aralığı malzemenin kararlılığı, sensörün çalışma prensibi, sensörün hassasiyeti gibi parametreler etkiler.

#### 1.7.7. Çalışma Voltajı

Her sensör için çalışma voltajı belirlidir. Voltaj değeri elektrik akımı sensörden geçerken meydana gelebilecek olası hasar ile sınırlıdır. Güç kaynağı da direkt akım (DC) veya alternatif akım (AC) olarak belirlenir.

Bazı sensör malzemeleri direkt akımda polarize olduklarından güçlerini alternatif kaynağından almalıdırlar.

### 1.7.8. Çalışma Frekansı

Çoğu nem sensörü alternatif akım voltajından güç alır ve gerekli frekans sağlanır. Frekans değerindeki artış ile beraber rezistans (kapasitans) ve hassasiyet azalır. Bu nedenle güç kaynağı için optimum frekans değeri belirlenmelidir.

## 1.8. Yapay ve Doğal Zeolitler Hakkında Genel Bilgi

Zeolitler, ilk kez 1756 yılında İsveçli mineralog Frederich Cronstedt tarafından bulunmuştur. Isıtıldığında patlayarak dağıldığı için yunancada kaynayan taş anlamına gelen “zeolit” ismi verilmiştir. Mineral türü olarak 1750’lerden beri bilinmelerine rağmen, kristal yapıları X–Işınları Kırınımı, I.R. Adsorpsiyonu, Nükleer Manyetik Rezonans, Elektron Spin Rezonansı gibi yöntemlerin gelişmesiyle ancak 1930’larda çözümlenebilmiştir. 1932 yılında Mc. Bain (1975’de Breck) tarafından zeolitler *molekül eleği* olarak adlandırılmıştır. Saf ve düzgün yapıları sentetik zeolitler ilk defa 1930 yılında sentezlenmiştir. Üretimleri ise 1948 yılında Union Carbide Corporation tarafından gerçekleştirilmiştir. Bugün 150’den fazla yapay zeolit mevcuttur [20].

### 1.8.1. Zeolitlerin Yapısı

Zeolitler; çerçeve (kafes) yapıları silikatlar (tektosilikatlar), yani (Al-O-Si) kristal yapıları silikatlar grubundadır. Zeolitlerin yapıları boşluklar içermekte olup, bal peteği veya kafes görünümündedirler. Zeolitlerdeki bu bal peteği veya kafes yapısı, 2-12 Å arasında kanal veya boşluk boyutuna sahiptir. Bu boşluklarda çeşitli katyonlar ve su bulunabilmektedir. Katyonlar genellikle alkali ve toprak alkali metallerdir. Alkali ve toprak alkali metal iyonları sulu çözeltilerde hareketlidirler. Bu iyonlar zeolitlere zayıf bağlarla bağlı olduklarından (kristal yapıda polar su molekülü ile birlikte buldukları için) sulu solüsyonlarla kolaylıkla değiştirilebilir. Bu nedenle zeolitler iyon değiştirici olarak kullanılmaktadır [20].

Zeolit yapısındaki boşluk ve kanallarda bulunan katyonların yerleri bellidir. Ancak, değişik tür zeolit mineraller inde farklılıklar gözlenir. Susuzlaştırma (dehidrasyon) işlemi ile zeolitın gözenekleri içindeki su molekülleri yapıdan kolaylıkla uzaklaştırılabilir. Bu işlem için zeolitler genellikle 100 ile 400°C arasındaki sıcaklıklarda ısıtılır. Bu sıcaklıkta suyunu kaybeden zeolitik yapının iskeleti bozulmaz. Su moleküllerinin yapıdan uzaklaştırılması sonucu tüm hacmin yarısına varan oranlarda boşluk elde edilmesi mümkündür. Dehidrate edilerek aktif hale getirilen zeolitlerin, sulu (nemli) ortama maruz bırakılmasıyla kaybettikleri suyu tamamen geri adsorplamaları sağlanabilir.

Susuzlaştırma işlemi ile zeolitın gözenekleri içindeki polar su molekülü ile bağlı iyonların bünyeden tamamen uzaklaşması yada yüzeye yakın gözenek çeperlerine yerleşerek gözenek boyutunu daraltması görülebilir. Bazı katyonlar ise kolay değişmeyen yerlerde, yani çok yüzlü yapının içindedir. Bunlar iyon değişiminde rol almazlar. Zeolitlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine temel oluşturan kanal ve boşluklar çok yüzlülerin arasındaki boşluklardır. Yapı içinde tek tip kanal olabileceği gibi (genelde yapay zeolitlerde olduğu gibi), farklı boyutlu birkaç tip kanal da bulunabilir (çoğunlukla doğal zeolitlerde olduğu gibi). Zeolitlerin gözenek boyutları kristal yapılarına ve bir dereceye kadar da içerdikleri katyonlara bağlıdır.

Çoğu zeolit teki kristal yapı Si–O–Al atomlarının meydana getirdiği halkalarla bağlanmış gözeneklerden oluşur. Bu halkaların oluşturduğu geçit pencere olarak adlandırılır ve pencere boyutu halkalardaki atom sayısı ile orantılıdır. Zeolitlerdeki bu pencereler 4 ile 12 arasında oksijen atomu içerir. Penceredeki alüminyum ile silisyum iyonlarının toplamı pencerede mevcut olan oksijen atomlarının toplam sayısına eşittir. 6, 8, 10 ve 12 elemanlı halkalardan meydana gelen pencerelerin boyutları sırasıyla 0,25, 0,5, 0,6, 0,7 nm dolayındadır. Zeolitın kristal yapısındaki, altı oksijen iyonu içeren pencerenin yaklaşık 0,25 nm olan boyutu, ancak su gibi çok küçük moleküllerin geçişine izin verir [21].

Zeolit yapısındaki temel yapı birimi: SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> düzgün dörtyüzlüleridir (tetrahedralleridir). Bu birimde merkezde Si veya Al atomları, köşelerde ise oksijen atomları vardır. Silisyum iyonu +4, alüminyum iyonu +3 ve oksijen iyonu –2 değerlikli olduğundan bir silisyum iyonu kendini çevreleyen dört oksijen

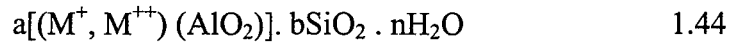


iyonunun ancak -4 değerliğini karşılar. Böylece her oksijen iyonunun -1 değeri kalır ve başka bir silisyum iyonu ile birleşebilir. Silisyum iyonunun yerinde alüminyum iyonunun bulunduğu dört yüzlülerin elektrik yükünün dengelenmesi (bilindiği gibi tüm sistemler termodinamik olarak en düşük enerjiye sahip, kararlı yapılara dönme eğilimindedirler) ve kararlı bir kristal yapısı için ek bir artı yüke ihtiyaç duyarlar. Bu, ek artı yük değiştirilebilir katyonlarca (alkali ve toprak alkali katyonlarca) sağlanır. Löwenstein kuralı uyarınca bir oksijen iyonu iki alüminyum iyonuna bağlanamaz; yani Al-O-Al bağları oluşturulamaz [21].

Bu dörtyüzlülerin çeşitli şekillerde bir araya gelmeleri ve düzleşmeleri sonucu “ikincil yapı birimi” denilen tek veya çift yada dörtlü, beşli ve altılı dörtyüzlülerden meydana gelmiş birimler oluşur [20].

İkincil yapı birimlerinin bir araya gelmesi ile çeşitli çokyüzlüler (polihedra) ve sonuçta bu çok yüzlülerin bileşimi ile, zeolitlerin üç boyutlu boşluklu, iskelet yapıları ortaya çıkar [20].

Dörtyüzlülerin oluşturduğu iskelet, katyonlar ve su molekülleri ile birlikte zeolitlerin sahip olduğu genel kimyasal formülü oluştururlar. Zeolitlerin genel kimyasal formülü 1.44’de verilmiştir.



Burada,  $M^+$  genellikle ; Na, K, Li,  $M^{++}$  ise ; Ca, Mg, Fe, Ba, Sr’dır.

Si/Al oranı zeolitlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Bazı zeolitler de Si/Al oranı belirli sınırlar içerisinde değiştirilebilir. Mineral asitleri aracılığıyla yada kompleks oluşturma yoluyla alüminyumun bir bölümü yapıdan uzaklaştırılabilir. Si/Al oranı Zeolit A’da yaklaşık 1 (Löwenstein kuralı gereğince ulaşılabilecek en yüksek Al oranı) iken Zeolit X’de 1,5’dir. Zeolit A ve X en yüksek katyon kapasitesi olan zeolitlerdir.

Bundan dolayı heterojen ve hidrofilik (su seven) bir iç yüzeye sahiptirler. Bu durum zeolitlerin alüminyum silikat yapısı içinde yer alan katyonlarının yüksek elektrostatik gradyan alanları oluşturması ile açıklanır.

Si/Al oranı arttıkça (yaklaşık 7,5 olduğu zaman) iç yüzey homojenleşir. Silikaca zengin bazı zeolitler hidrofobik (su sevmeyen) olmasına karşılık organofilik bir iç yüzeye sahiptirler. Hidrofobik özelliklerin Si/Al oranının 10'a yakın olduğu durumlarda başladığı gözlenmiştir.

Zeolitin gözeneklerinde bulunan katyonların türü, sayısı ve yerleri gözenek içindeki elektrik yükü dağılımını etkiler. Bu nedenle katyon değiştirme yoluyla zeolitlerin gaz ve sıvı moleküllerinin geçişine izin veren pencere boyutları ve dolayısıyla adsorplama özellikleri değiştirilebilir.

Zeolitlerin mikro gözenekleri sentezlendiklerinde kristal suyu ile dolu durumdadırlar. Zeolitlerin polar ve polarize olabilen moleküllere daha fazla ilgi göstermesi Si/Al oranının 10'dan küçük olmasına bağlıdır. Bu oranın 1'e yaklaşmasıyla hidrofilik özellik artmaktadır. Bu özelliğin temelinde zeolit kristal yapısının anyonik niteliği ve bu yapının elektrik yükünü dengeleyen katyonların neden olduğu elektrostatik alan vardır. Bu özelliğinden dolayı zeolitler, gaz ve sıvılar içinde bulunan su buharının tutulmasında kullanılmaktadırlar [21].

Zeolitlerin adsorplayıcı olarak kullanım alanları iki ana grupta toplanabilir.

- Bunlar: 1. Arıtma
2. Ayırma

Genel olarak; arıtma uygulamalarının *zeolitlerin polar ya da polarize olabilen moleküllere olan yüksek kapasite ve seçicilik özelliğine* ve ayırma işlemlerinin ise *zeolitlerin molekül eleme özelliğine* dayandığı söylenebilir.

Ancak, hava içerisindeki oksijen ile azotun bir birinden ayrılması, bu moleküllerin boyutları arasındaki farklılığa değil, azotun quadrupl momentinin zeolit içerisindeki katyonlarla etkileşmesi sonucu, zeolitin azota karşı daha fazla ilgi duymasıyla azotu seçici olarak adsorplamasına dayanır [21].

Zeolitlerin farklı kullanım alanları iki ana başlık altında toplanabilir.

Bunlar:

1. Arıtma İşlemleri:

1. a. Kurutma:

Doğal gaz, parçalama gazları, soğutma sistemleri, soğutucu devreleri

1. b. CO<sub>2</sub> tutulması:

Doğal gaz, havanın sıvılaştırılmasıyla ayrılmasından önce

1. c. Kükürt Bileşiklerinin tutulmasında:

Doğal gaz ve sıvılaştırılmış petrol gazlarının tatlılaştırılmasında

1. d. Çevre kirlenmesinin önlenmesi:

Hg, NO<sub>x</sub>'in atık akımlarından tutularak ayrılmasında

2. Ayırma İşlemleri:

2. a. Normal parafin/izoparafin ayrıştırılması

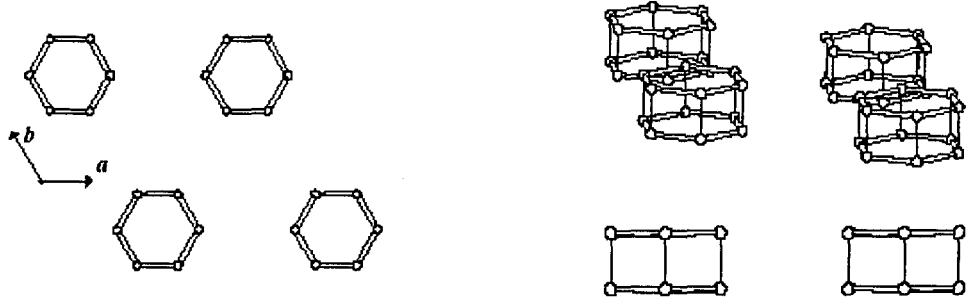
2. b. Ksilenlerin ayrıştırılması

2. c. Olefinlerin ayrıştırılması

2. d. Havadan oksijen (ve azot) eldesi

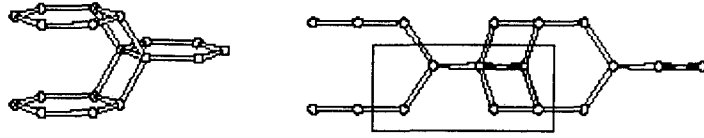
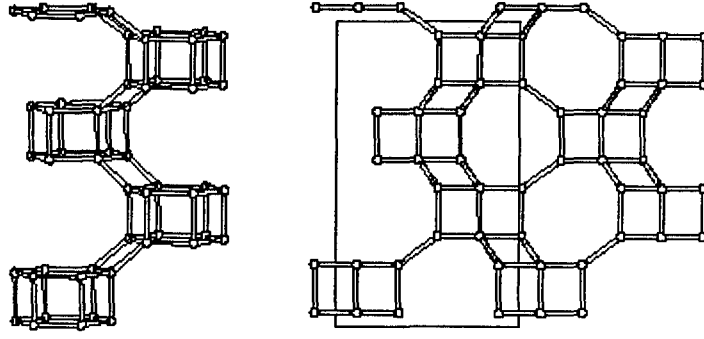
2. e. Şekerlerin (Früktöz–dekstroz–polisakkarid) ayrıştırılması

Zeolitlerin üç boyutlu boşluklu, iskelet yapılarını oluşturan ikincil yapı birimlerinin şeması Şekil 1.36'da verilmiştir [20].

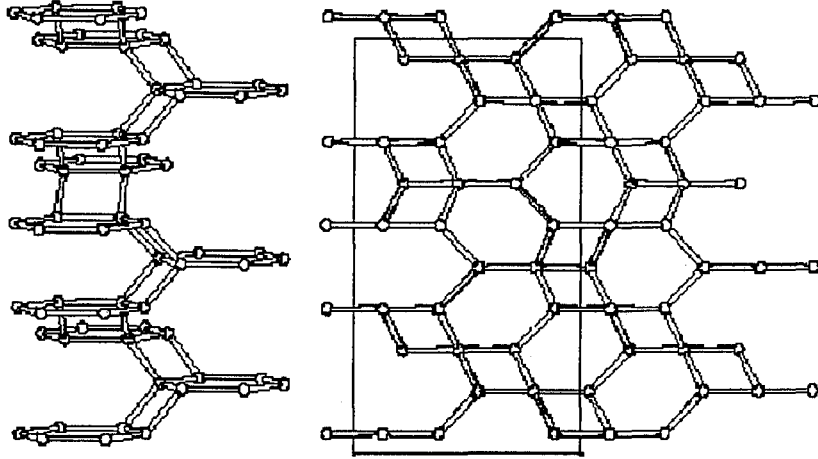


Şekil 1.36. Zeolitlerin üç boyutlu iskelet yapısı [20]

İkincil yapı birimlerinin üç boyutlu düzlemde farklı bağlanmaları Şekil 1.37'de şematize edilmiştir [20].



(a)



(b)

Şekil 1.37. İkincil yapı birimlerinin üç boyutlu düzlemde bağlanmaları [20]

### 1.8.2. Seramik Nem Sensörü Üretiminde Zeolitlerin Kullanımı

Nem sensörü üretiminde hammadde kaynağı olarak metal, seramik, polimer ve kompozit malzemeler kullanılabilir. Bu malzemeler arasından çok

geniş kullanım alanına sahip olan seramikler tercih edilmiştir. Nem çekici olarak oksit ve oksit dışı bir çok seramik hammaddesi mevcuttur. Zeolitler su ve su buharına duyarlı oksit esaslı adsorplayıcı seramik hammaddeleri arasında yer alır. Su buharına duyarlı bir çok zeolit vardır. Bunlardan bazıları Çizelge 1.3’de verilmiştir.

Seramik nem sensörü üretiminde hammadde kaynağı olarak zeolit kullanılmasının sebepleri:

1. Doğal hammaddelerden kolaylıkla sentezlenebilmeleri,
2. Adsorpsiyon uygulamalarında sıklıkla kullanılıyor olmaları,
3. Düşük kısmi basınçlarda bile yüksek adsorpsiyon kapasitelerine sahip olmaları (bu durum toplam hacimlerinin % 50’sinin boşluk olmasıyla ve toplam yüzey alanlarının yaklaşık %90’ının geniş iç yüzey alanına (1000 m<sup>2</sup>/g) sahip olmalarıyla açıklanabilir.),
4. Nem çekici katyonlara sahip olmaları (dipole sahip serbest su molekülü olarak tanımlanan nem, zeolitlerde mevcut olan alkali ve toprak alkali katyonlar (iyonlar) sayesinde tane yüzeyine çekilirler. Zeolitlerin tane yüzeylerinde oluşan bu çekim etkisi alkali ve toprak alkali katyonların oluşturduğu elektrostatik çekim etkisiyle açıklanabilir.),
5. Su molekülünün geçebileceği gözenekliliğe sahip olmaları (tek bir su molekülünün boyutu yaklaşık 3 nm dir. Sadece su molekülünün geçebileceği gözenekliliğe sahip olan zeolit tanelerinin iç yapısında su molekülüne karşı kapiler bir etki oluşur. Zeolitlerin bu özelliği sayesinde seracılıkta toprak neminin ayarlanmasında ve ısı cam üretiminde nem tutucu olarak kullanılır.),
6. Düşük sıcaklıklarda çok kısa sürelerle yenilenebilir olmaları (zeolitler kristal yapıları bozulmadan yaklaşık 500°C’ye kadar ısıtılabilirler. Sadece su molekülüne duyarlı zeolit tanelerinden beklenen etki %100’e yakın fiziksel adsorpsiyon dur. Fiziksel adsorpsiyon da olması beklenen adsorpsiyon – desorpsiyon dönüşümü kısa süreli ve kendiliğinden oluşan bir etkidir. Neme duyarlı zeolitler deki bu dönüşüm etkisini zeolit tanelerini yaklaşık 120°C gibi düşük sıcaklıklarda ısıtarak hızlandırmak mümkündür. Yeni nem değerlerine karşı ısıtılarak aktif hale getirilen

zeolitlerin ısıtma süresinin 10 saniyeyi geçmemesi sensörün cevap verme süresini uzatmamak için gereklidir.),

7. Kimyasal dayanımlarının yüksek olması (zeolitlerin iyonları alkali veya toprak alkali katyon içeren bazik tuz solüsyonlarıyla yıkanarak değiştirilebilir. Ayrıca mineral asitleri kullanılarak zeolitler deki istenmeyen katyonlar yıkanabilir. Zeolitlerin kristal yapılarında mevcut olan katyonların seyreltik asit veya baz solüsyonlarıyla yıkanarak temizlenmesi veya değiştirilmesi kristal yapılarına zarar vermez. Sadece gözenek çaplarını değiştirir.).

Zeolitlerin sahip olduğu bu üstün özelliklerden dolayı seramik nem sensörü üretiminde kullanılabilirlikleri araştırılmıştır.

### 1.8.3. Seramik Nem Sensörü Üretiminde Zeolit Y'nin Kullanımı

Seramik nem sensörü üretiminde kullanılan yapay zeolitler farklı çalışma prensiplerine göre Çizelge 1.7'deki gibi sınıflandırılabilir [22].

Çizelge 1.7. Seramik nem sensörü üretimde kullanılan yapay zeolitler [22]

Seramik nem sensörünün çalışma prensibi	Kullanılan zeolit türü
1. Kapasitif (Paralel Plaka)	AlPO <sub>4</sub> -5, -H3, -H1 MeAPO-5 (Me=Mn, V, Co, Fe) MAPO-36 Nb-TMS-1
2. Rezistif (İnterdijital)	NaY
3. Empedans	NaY
4. Yüzey Akustik Dalga	NaY NaA
5. Mikro Balans (Kuars Kristali)	Silialit NaY NaA
6. Optik	NaY/ Ru Kaplanmış

## 1.9. Amaç

Zeolitlerin geniş yüzey alanına sahip kristal kafes yapıları ve nem çekici özellikleri bilinen bir gerçektir.

Bu çalışmada International Zeolyst şirketinden alınmış katyonu hidrojen olan zeolit Y kullanılacaktır. Kullanılan zeolit Y'nin hidrojen katyonu ve su molekülünün geçişine uygun kristal yapısı neme olan duyarlılığını sağlar.

Zeolit esaslı seramik nem sensörlerinin üretim yöntemlerinde excimer laser gibi pahalı teknolojiler kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise kolaylıkla uygulanabilecek ekonomik yöntemler kullanılacaktır. Bunlar sırasıyla organik bileşenli kompozit seramik sensör üretim yöntemi ve geleneksel yöntemle seramik sensör üretimidir.

Yaygın olarak kullanılan seramik nem sensörlerinin çalışma prensiplerini kapasitif ve rezistif, olmak üzere iki ana sınıfa ayırabiliriz. Kapasitif esaslı çalışan seramik nem sensörlerin de farklı nem değerlerine bağlı olarak oluşan kapasitif değişim etkisinin ölçüm değerleri birbirine çok yakındır. Bu nedenle rezistif esaslı çalışan seramik nem sensörü üretilecektir.

Bu çalışmanın amaç; zeolitın nem çekici özelliği kullanılarak rezistif esasla çalışan ekonomik bir nem sensörü üretmektir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çizelge 1.7’de verilen sınıflandırmaya göre rezistif esaslı çalışan bir seramik nem sensörü üretiminde katyonu sodyum ( $\text{Na}^+$ ) olan Zeolit Y kullanılmıştır. Bu çalışmada ise katyonu hidrojen ( $\text{H}^+$ ) olan Zeolit Y’nin kullanılabilirliği araştırılmıştır. International Zeolyst şirketinden alınan Zeolit Y tozunun genel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [23].

Çizelge 2.1. Zeolit Y tozunun genel özellikleri [23]

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Mol Oranı	İçerdiği Kation	Ağırlıkça % $\text{Na}_2\text{O}$	Birim Hücre Boyutu (Å)	Yüzey Alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
80	Hidrojen	0,03	24,24	700

“International Zeolyst Corporation”

### 2.1 Zeolit Y Tozunun Karakterizasyon Testleri

Yarı kantitatif mineraller oranı kullanılarak X-Işınları Difraktometre (XRD-Rigaku Rint 2000) cihazı ile Zeolit Y tozunun mineralojik faz analizi yapılmıştır. Tümüyle homojen olan tozların kimyasal bileşenlerinin belirlenmesinde enerji saçılımlı X-ışınlar spektrometre (EDX) analiz yöntemi kullanılabilir. Deneysel çalışmada kullanılan Zeolit Y tozunun ağırlıkça yüzde oksit içeriğinin belirlenmesinde noktasal EDX analizi uygulanmıştır. Farklı sıcaklıkların Zeolit Y yapısı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için DTA-TG cihazı ile termal analiz yapılmıştır. Ayrıca farklı sıcaklıkların ( $250^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$  ve  $1000^\circ\text{C}$ ) etkisi ile oluşabilecek yapısal değişiklikler yapılan XRD analizi ile kontrol edilmiştir. Tozun tane morfolojisinin (tane şekli, boyut ve dağılımı) görülebilmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

### 2.2 Deney Düzenekinin Hazırlanması

Üretilen nem sensöründeki elektriksel değişikliklerin hızlı, kontrollü ve sürekli olarak ölçülebilmesi için termodinamik prensiplere uygun kapalı bir



sistemin kullanılması gerekir. Bu amaca uygun olarak bir nem çemberi tasarlanmıştır.

Nem kabininin içerisindeki sıcaklık ve nem değerleri standart çalışan bir nem ölçerle kontrol edilmiştir. Nem kabinin dışında kalan bölgenin sıcaklık ve nem değerleri de yine standart çalışan başka bir nem ölçerle kontrol edilmiştir. Ölçümler için tasarlanan deney düzeneği Şekil 2.1.a'da nem çemberi Şekil 2.1.b'de verilmiştir.

Kabin içerisinde sabit nem değerlerinin oluşturulabilmesi için E104 numaralı ASTM standardı kullanılmıştır. Standarda uygun olarak hazırlanan aşırı doymuş tuz çözeltileriyle sabit nem değerleri elde edilmiştir. Kullanılan standart ilk kez 1987 yılında ASTM standartlarına dahil edilmiş ve 1991 yılında yenilenmiştir. Sabit nem değerlerinin oluşturulması için kullanılan tuz solüsyonları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Aşırı doymuş tuz solüsyonları (ASTM- E104)

Kimyasallar	Lityum Klorür (LiCl)	Potasyum Asetat (KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> )	Sodyum Klorür (NaCl)	Baryum Klorür (BaCl <sub>2</sub> )	Potasyum Nitrat (KNO <sub>3</sub> )
% R.H. (25°C)	11,3 ± 0,3	22,5 ± 0,3	75,3 ± 0,1	90 ± 2	93,6 ± 0,6

Farklı nem değerlerinin de ölçülebilmesi için kabin içerisine kontrollü su buharı verilmiştir. Kabin içinde oluşturulan nemin homojen dağılımı için kabin içerisine (tavanına) fan takılmıştır. Kabin içerisindeki sıcaklık ve nem değerleri standart çalışan bir nem ölçerle kontrol edilmiştir.

Üretilen sensör numuneleri klamensli numune tutucuları ile nem kabini içerisine sabitlenmiştir. Klamensli numune tutucularının çıkışı RS 232 girişine uygun soketlere lehimlenmiştir. Kabin içinde oluşturulan farklı nem değerlerine bağlı olarak sensör numunelerinin yüzeyinde ölçülebilir elektriksel değişiklikler oluşur. Sensör yüzeyindeki fiziksel adsorpsiyon miktarının artması yüzey iletkenliğini artırır. Sensör yüzeyinde oluşan direnç değişimini daha hassas ölçmek için 7555 entegresi içeren frekans değişkenli analog bir devre yapıldı ve 2-1'deki bağıntı kullanıldı. Sensör yüzeyinde oluşan iletkenlik değişimi üretilen bu devreyle osilaskoba iletilir. Rezistif esaslı çalışan bu elektronik devre

üretilecek sensörlerin çalışabilirliğini belirlemek için tasarlanmıştır. Osilaskop devrenin iletebildiği elektriksel büyüklükleri frekans değişimi olarak gösterir. Frekans ile direnç arasında ters orantılı bir bağıntı vardır.

$$f = \frac{1}{1,4 \times R \times c \text{ (sabit)}} \quad 2-1$$

Burada; f, frekansı

R, direnci

c, kapasitansı göstermektedir.

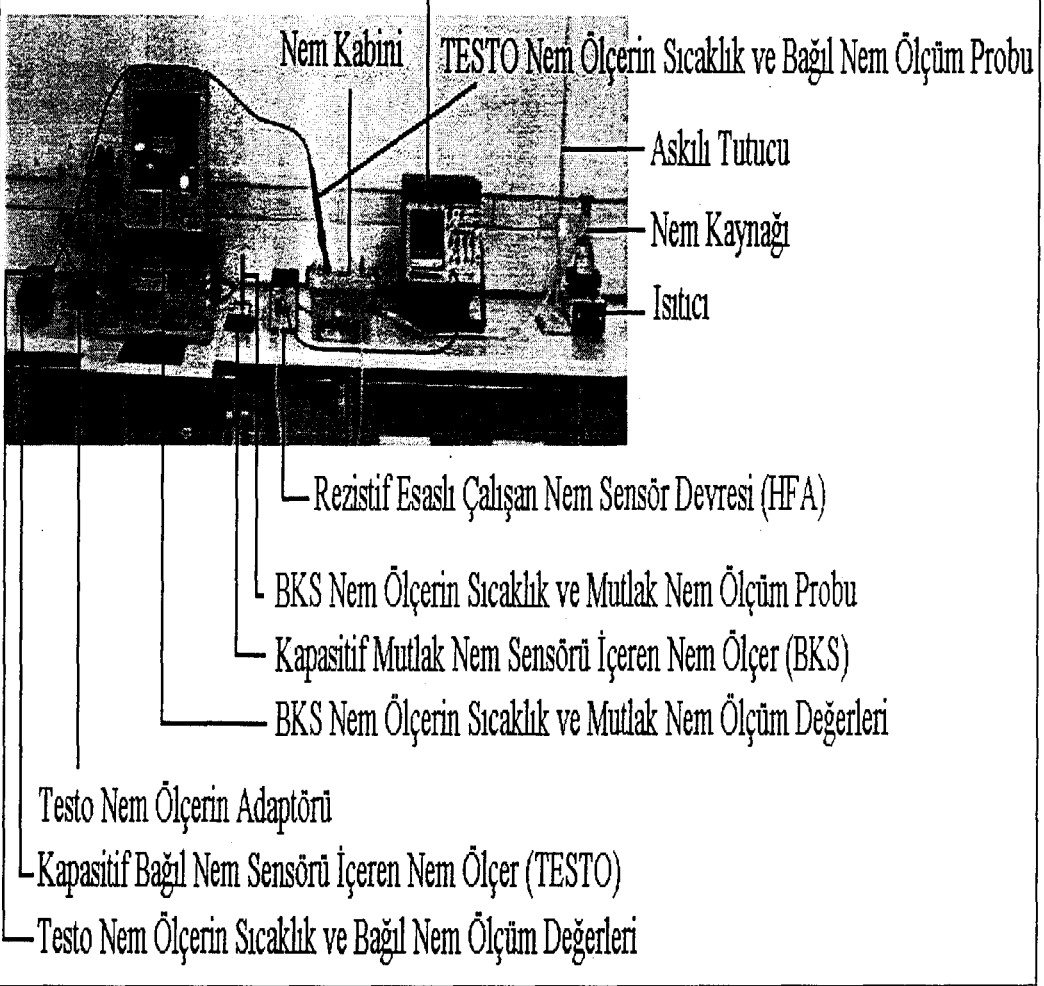
2-1'de verilen denkleme göre değişkenler frekans ve dirençtir. Frekansın artması direncin azaldığını ve dolayısıyla iletkenliğin arttığını gösterir. Bu sebeple osilaskopla yaptığımız tüm ölçüm sonuçlarından elde ettiğimiz frekans-bağıl nem grafiklerinde; artan nem değerlerine karşılık frekans artışı beklemekteyiz. Genel olarak rezistif esaslı çalışan tüm nem sensörlerinin frekans-bağıl nem değişimlerini gösteren frekans bağıl nem değişim sonuçlarında artan nem değerlerine karşılık direnç azalması (logaritmik vb.) görülmektedir.

Rezistif esaslı çalışan nem sensörlerinin frekans-bağıl nem grafiğinden okunan ilk frekans değeri sensörün algılayabildiği en düşük nem seviyesidir. İlk ve son frekans değerlerinin arasında kalan bölge ise sensörün çalışma aralığıdır.

Sürekli ve ani değiştirilen nem değerlerine karşılık sensörde oluşan ani frekans değişiklikleri sensörün cevap verme süresini gösterir.

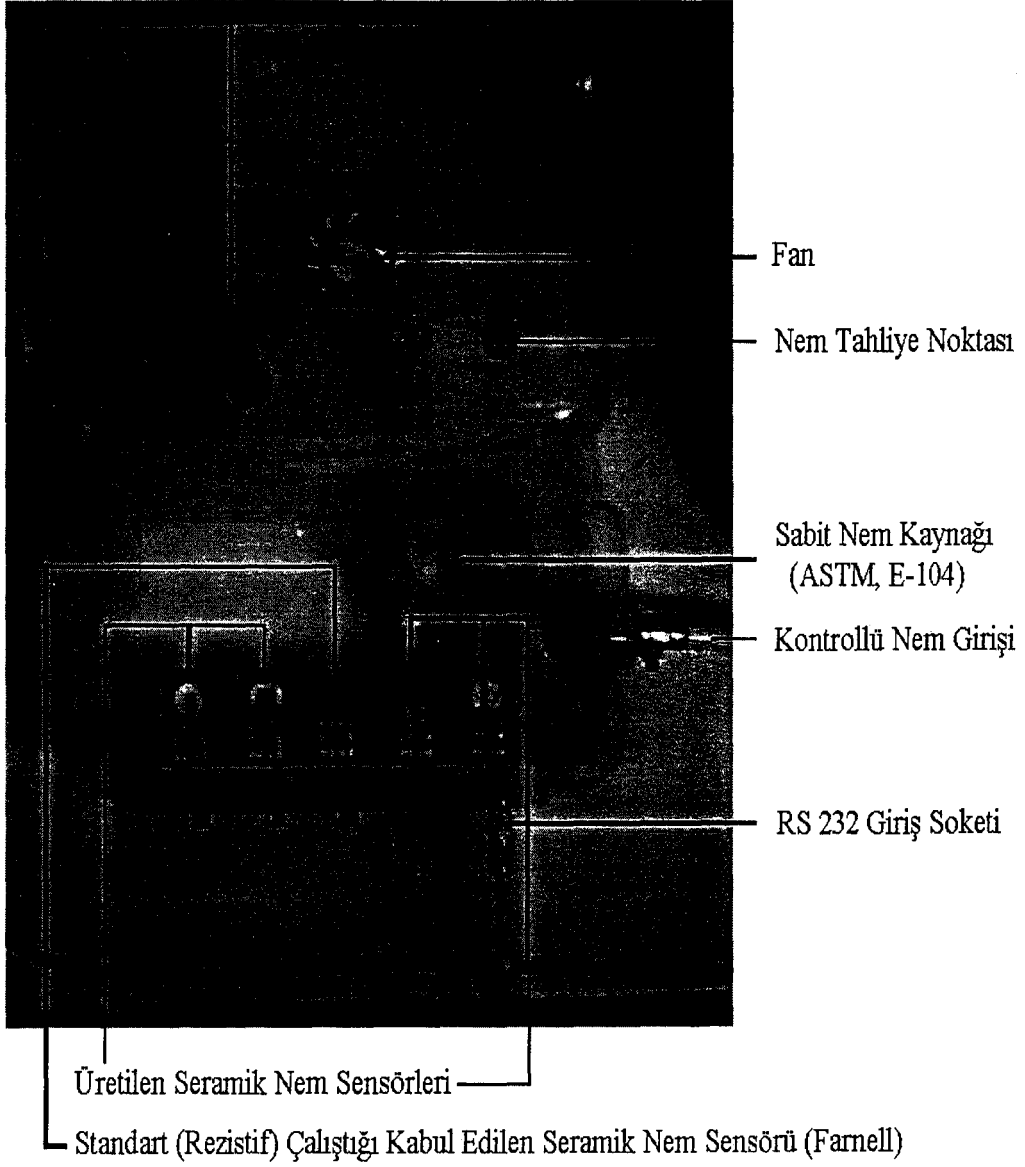
Standart çalışması beklenen nem sensörlerinde olması gereken en önemli özelliklerden biriside; sensörün sabit nem değerlerinde frekans kayması göstermemesidir. Ölçüm süresi yeterince uzun tutularak frekans kayması olup olmadığı belirlenir.

## Üretilen Seramik Nem Sensörlerinin Osilaskop ile Ölçülen Frekans Değerleri



Şekil 2.1.a. Tasarlanan deney düzeneği

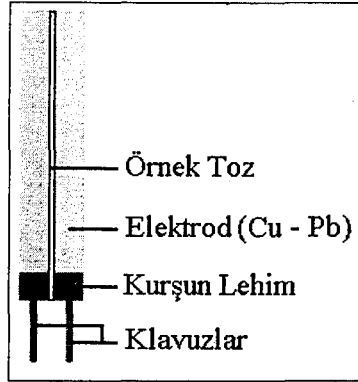
TESTO Nem Ölçerin Sıcaklık ve Mutlak Nem Ölçüm Probu



Şekil 2.1.b. Nem kabini

### 2.2.1. Serbest Toz Modeli

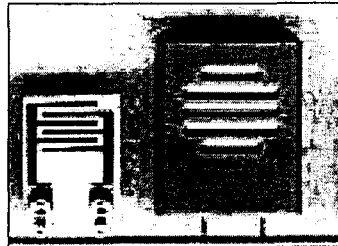
Zeolit Y tozunun neme karşı etkinliğinin belirlenebilmesi için serbest toz modeli geliştirilmiştir. Modelin hazırlanması için 6 mm eninde 30 mm boyunda bakırlı pertinaks kullanılmıştır. Fotolitografik yöntemle hazırlanan ve nem kabini içindeki klamensli numune tutucularına sabitlenen serbest toz modeli Şekil 2.2’de verilmiştir. Farklı nem değerlerine karşılık gelen frekans değişimleri osilaskopla ölçülmüştür.



Şekil 2.2. Serbest toz modeli

### 2.2.2. Rezistif Esaslı Çalışan Seramik Nem Sensörü

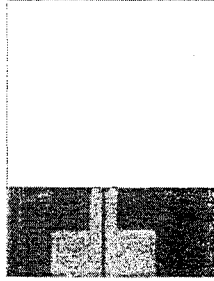
Kabin içindeki çalışma ortamının kontrolü ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması için kabin içine rezistif esaslı çalışan ve standart kabul edilen bir seramik nem sensörü (Farnell kodu: 732-837) takılmıştır. Tüm deney süresince nem kabini içindeki klamensli numune tutucularına sabitlenmiş seramik nem sensörünün yapısı Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Rezistif esaslı çalışan seramik nem sensörü

### 2.3. Sensör Taşıyıcı Altlıkların Hazırlanması

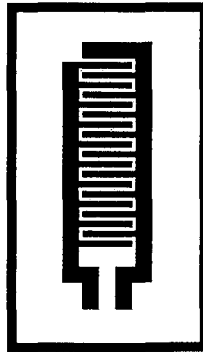
Taşıyıcı altlık olarak kullanılan bakırlı pertinaks fotolitografik yöntemle hazırlanmıştır. İlk önce 1,5 cm eninde 2,5 cm boyunda bakırlı pertinaks kesilir. Aydınger kağıdı üzerine kılavuzların lehimleneceği yollar çizilir. Pertinaks üzeri pozitif 20 spreyi ile boyanır. Aydınger üzerine çizilen lehim yolları pozitif 20'nin yüzeyine gelecek şekilde kapatılıp ultraviyole ışık altında 45 dakika pozlanır. Pozlanan bakırlı pertinaks demir 3 klorür banyosuna alınıp lehim yolları kalana kadar bekletilir. Lehim yolları belirginleştikten sonra ışığa dirençli pozitif 20 boyası sodyum hidroksitle yıkanır. Son olarak saf su ile yıkanıp kurutulmuş altlık kullanıma hazırdır. Hazırlanan taşıyıcı altlık Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Taşıyıcı altlık (bakırlı pertinaks)

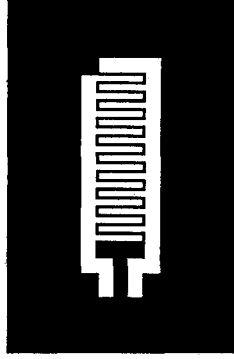
### 2.4. Elektrotlama için Maske Hazırlanması

Sensörün yüzey iletkenliğini sağlayacak inter dijital elektrot, fotolitografik yöntemle hazırlanır. 1,5 cm eninde, 2,5 cm boyunda, 125 mikron kalınlığında bakır levha kesilir. Şekil 2.5'deki iletim yolu aydınger kağıdı üzerine çizilir.



Şekil 2.5. İnterdijital iletim yolu

Bakır levha üzeri pozitif 20 ile boyanır. Aydınlar kağıdına çizilen iletim yolunun mürekkepli yüzeyi bakır levha üzerindeki pozitif 20 ile yüz yüze gelecek şekilde kapatılıp ultraviyole ışık altında 45 dakika pozlanır. Pozlanan bakır levha demir 3 klorür banyosu ile yıkanır. İletim yolları açığa çıktıktan sonra sodyum hidroksit banyosu ile pozitif 20 boyası yıkanır. Saf su ile yıkanıp kurutulan bakır levha maskeleyme için kullanıma hazırdır. İnterdijital iletim yolları oluşturulan bakır levha Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Bakır levhadan hazırlanan interdijital iletim yolu

## 2.5. Sensör Numunelerinin Hazırlanması

Zeolit esaslı seramik nem sensör numuneleri iki farklı üretim metodu kullanılarak hazırlanmıştır. Bunlar:

1. Organik bileşenli kompozit seramik sensör üretimi,
2. Geleneksel yöntemle seramik sensör üretimi.

### 2.5.1. Organik Bileşenli Kompozit Seramik Sensör Üretimi

Organik bileşenli kompozit seramik sensör üretiminde inorganik bileşen olarak oksit, organik bileşen olarak polimer yada epoksi reçine kullanılır. Su ve su buharının korozif aşındırma etkisine karşı yüksek mukavemet gösteren epoksi reçineler kullanılmıştır.

Bunlar:

- A. Loctite
- B. Clear Epoxy

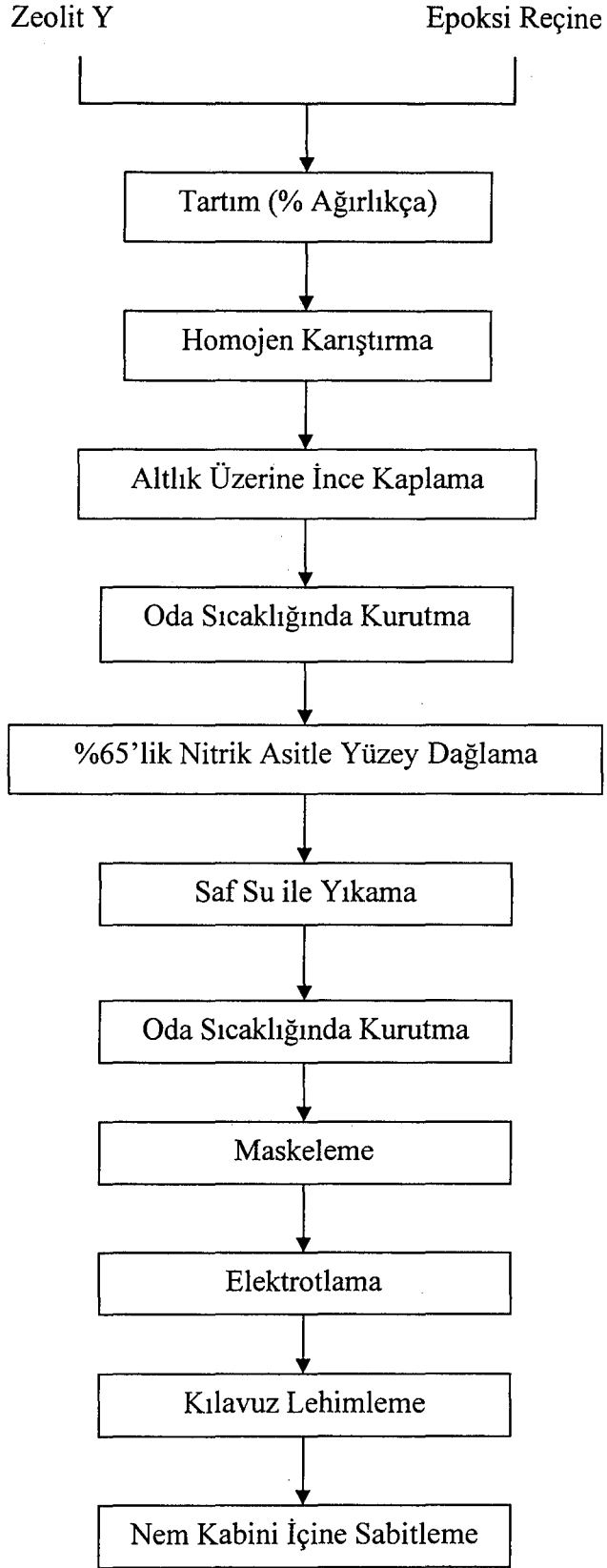
Loctite kullanılan numuneler A serisi, Clear Epoxy kullanılan numunelerde B serisi olarak adlandırılmıştır. A ve B serilerinin her birinden dört farklı numune hazırlanmıştır. Yüzde ağırlıkça hazırlanan numunelerin oransal miktarları Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Yüzde ağırlıkça hazırlanan karışımlar

A Seri Numuneleri		B Seri Numuneleri	
% Zeolit Y	% Loctite	% Zeolit Y	% Clear Epoxy
10	90	10	90
20	80	20	80
30	70	30	70
40	60	40	60

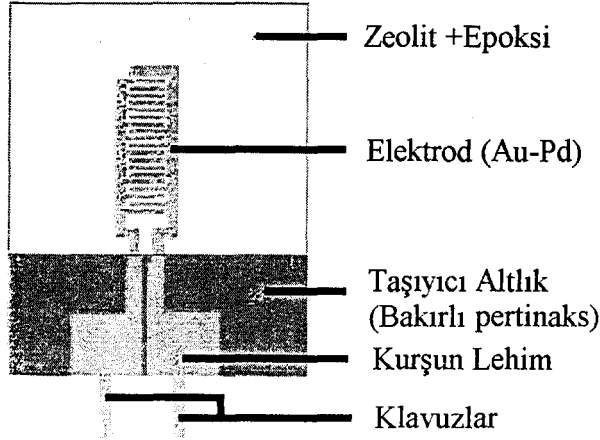
Sensör numuneleri Çizelge 2.3’deki oranlara göre tartılmıştır. %100’lük her bir karışımların toplam ağırlığı 0,5 gramdır. Karışımların kısa sürede katılaşmaya başlamasından dolayı 10 saniye içerisinde homojen karıştırma yapılır. Hazırlanan karışımlar bakırlı pertinaks (altlık) üzerine ince kaplama yapıldıktan sonra oda sıcaklığında 12 saat kurumaya bırakılmıştır. Zeolit Y ve epoksi bileşiminden oluşan kaplama yüzeyleri %65’lik nitrik asit banyosunda 15 saniye dağlanmıştır. Bakır levhadan hazırlanan inter dijital maske dağlanmış yüzey üzerine geçici olarak tutturulmuştur. Maskelenen numuneler altın paladyum karışımı ile ince film kaplama ile kaplama cihazında 30 saniye elektrotlanmıştır. Yüzeyde oluşturulan inter dijital iletim yolu ile elektronik devre arasında sabit bağlantı sağlamak için taşıyıcı altlık ile kılavuzlar lehimlenmiştir. Kullanılan üretim akım şeması Şekil 2.7’de verilmiştir.





Şekil 2.7. Organik bileşenli kompozit seramik sensör üretim akım şeması

Nem kabini içerisinde sabitlenen A ve B seri numaralı sensör numunelerin genel modeli Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. A ve B seri numaralı sensör numunelerin genel modeli

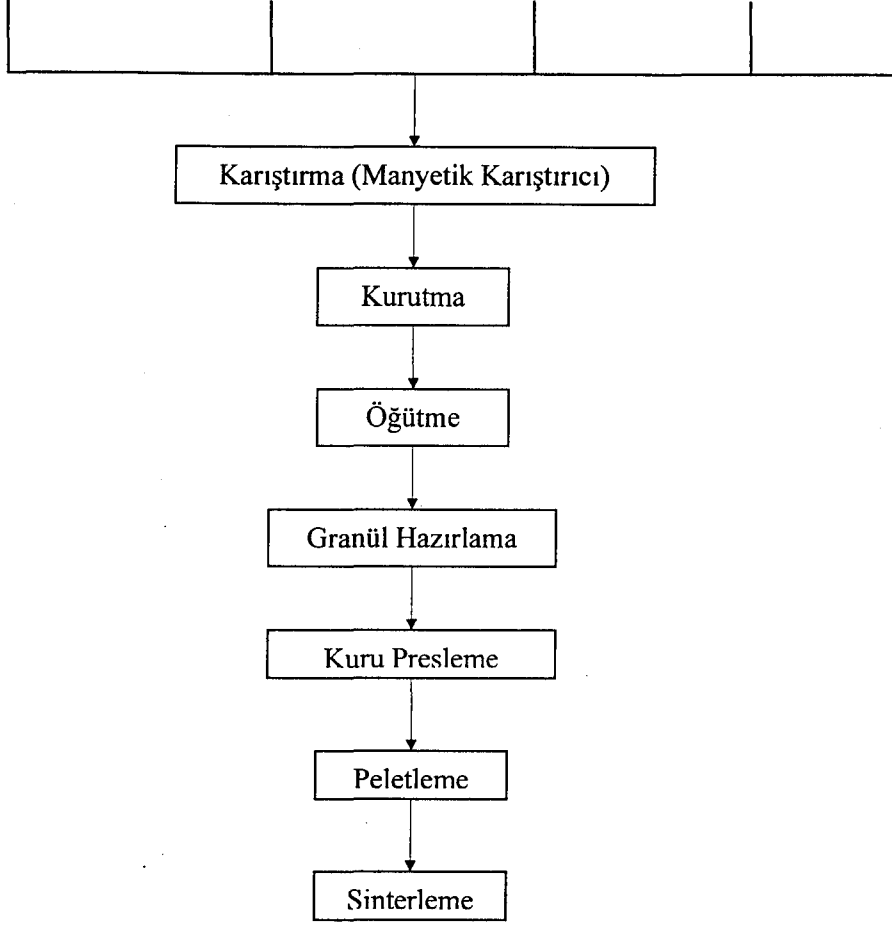
Organik bileşenli kompozit seramik sensör üretim yöntemine uygun olarak hazırlanan A ve B seri numaralı sensör numunelerinin yüzeylerindeki gözenek dağılımı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

### 2.5.2. Geleneksel Yöntemle Seramik Sensör Üretimi

Geleneksel yöntemle hazırlanan seramik nem sensörünün üretim akım şeması Şekil 2.9’da verilmiştir. Organik katkılarla hazırlanan karışımın toplam ağırlığı 15,75 gramdır.

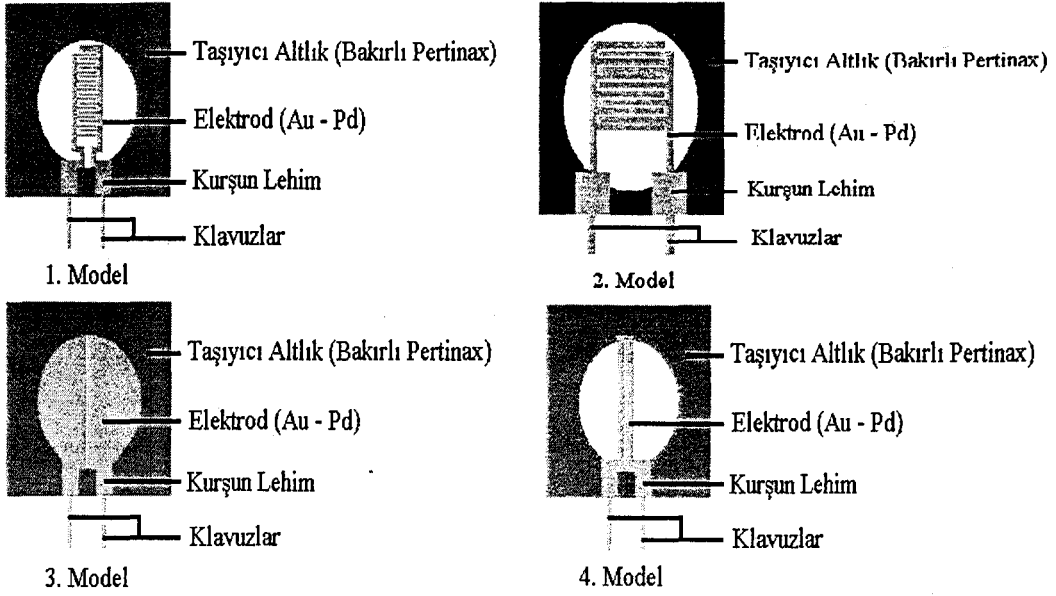
Hazırlanan sulu karışımın homojenleşmesi için yaklaşık 1 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılıp 75°C’lik etüvde tamamen kurutulmuştur. Kurutulan karışım alüminyum havanda elle öğütülmüştür. Öğütme işlemi topaklanmaların giderilmesi için uygulanmıştır. Toz halindeki karışım düşük nem değeri ile nemlendirilerek granül hale getirilmiştir. Son olarak tek yönlü kuru presle 17mm çapında, 1mm kalınlığında peletler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerdeki organik katkıların giderilmesi için farklı sıcaklıklarda (500°C, 650°C, 800°C, 950°C) 1 saat sinterlenmiştir. Sinterlenen her bir numune %65’lik nitrik asit banyosunda 5 dakika süreyle yıkanmıştır. Asitle dağlanmış sensör numuneleri saf su ile yıkanıp kurutulmuştur.

Plastikleştirici (PEG) Dağıtıcı (DARVAN C) Bağlayıcı (PVA) Çözücü (Saf Su) Zeolit Y  
(0,25 gr) (0,25 gr.) (0,25 gr.) (10 mlt.) (5 gr.)



Şekil 2.9. Geleneksel yöntemle seramik nem sensör üretimi

Numunelerin nem kabini için sabitlenebilmesi için bakırlı pertinakstan yeni bir taşıyıcı altlık hazırlanmıştır. Eni ve boyu 20 mm olan bakırlı pertinaklar kesilmiştir. Kare şeklindeki bakırlı pertinakların merkezlerine 17 mm'lik delikler açılmıştır. Kılavuzların lehimleneceği kontak noktaları fotolitografi yöntemi ile hazırlanmıştır. Taşıyıcı altlıktaki kontak noktaları altta kalacak şekilde ters çevrilip 17 mm'lik deliklere sensör numuneleri yerleştirilmiştir. Numunelerin yerleştirildiği deliklerin üstü polimer epoksi ile doldurulmuştur. Sensör yüzeyinde 4 farklı iletim modeli oluşturularak nem kabini içerisine sabitlenmiştir. Farklı iletim yollarına sahip sensör modelleri Şekil 2.10'da verilmiştir.



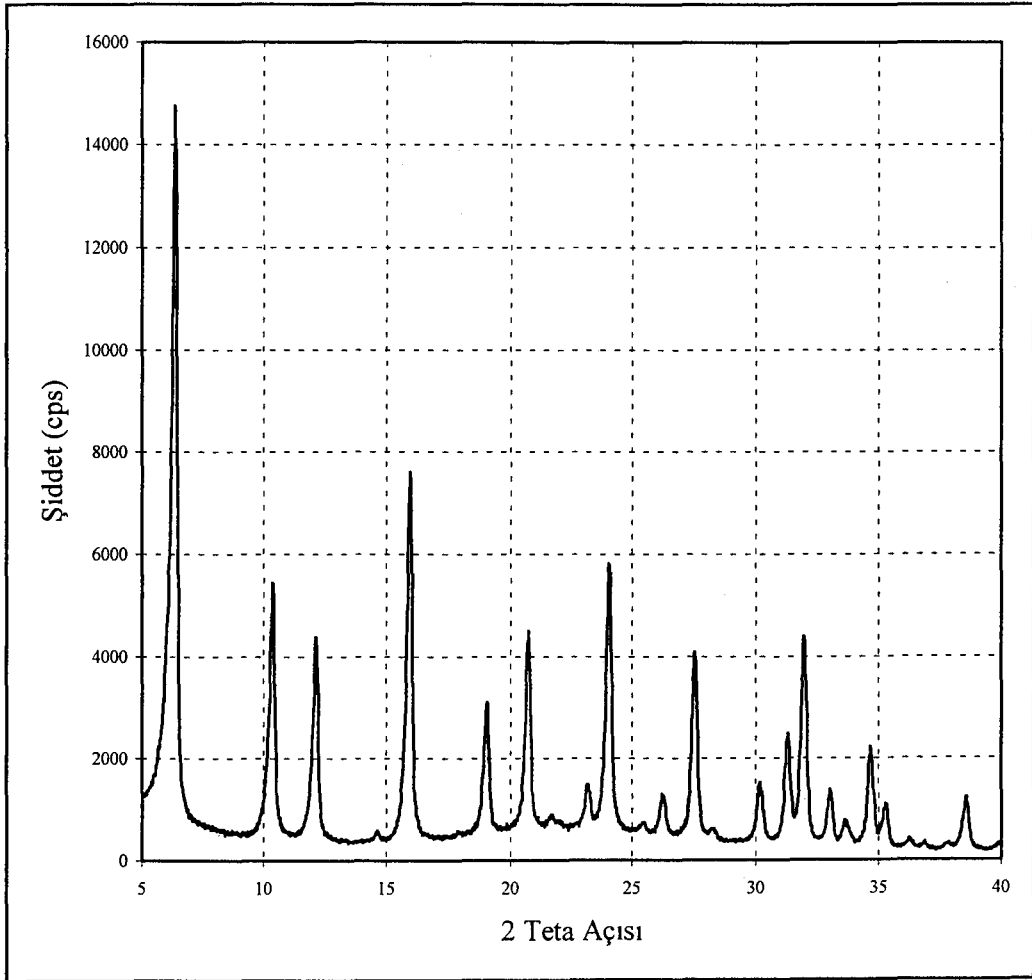
Şekil 2.10. Farklı iletim yollarına sahip sensör modelleri

Sonuç olarak dört farklı sıcaklıkta sinterlenmiş ve dört farklı iletim modeline sahip 16 numune üretilmiştir. Direnç değişimlerinin çok az olabileceği düşünülerek daha sonraki devrelerde kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla direnç değişimleri frekans değişimine dönüştürülmüş ve osilaskopta ölçülmüştür. Her bir numunenin osilaskopta yapılan ölçümleri sonucunda değişik frekans değerleri görülmüştür. Elde edilen tüm sonuçları frekans-bağıl nem grafiğine dönüştürülmüştür.

### 3. SONUÇLAR

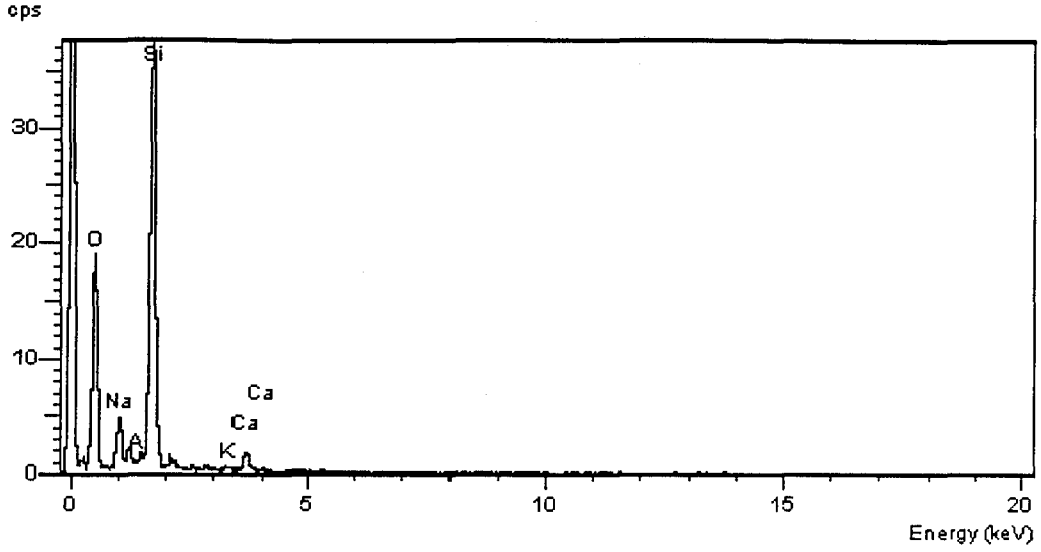
#### 3.1. Zeolit Y Tozunun Karakterizasyon Sonuçları

Deneyde kullanılan Zeolit Y tozunun oda sıcaklığındaki (25°C) XRD analizi sonucu Şekil 3.1'de verilmiştir. Analiz sonucundaki karakteristik piklerin 5-40 derece arasında olduğu görülmüştür. Bu aralıktaki piklerin silika, potasyum alüminyum silikat, sodyum magnezyum silikat ve kalsiyum silisit olduğu bulunmuştur.



Şekil 3.1. Zeolit Y tozunun 25°C'deki XRD analiz sonucu

Zeolit Y tozunun oksit bileşenlerini oluşturan elementler yapılan noktasal EDX analiz ile belirlenip Şekil 3.2'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 3.2. Zeolit Y tozunun EDX analiz sonucu

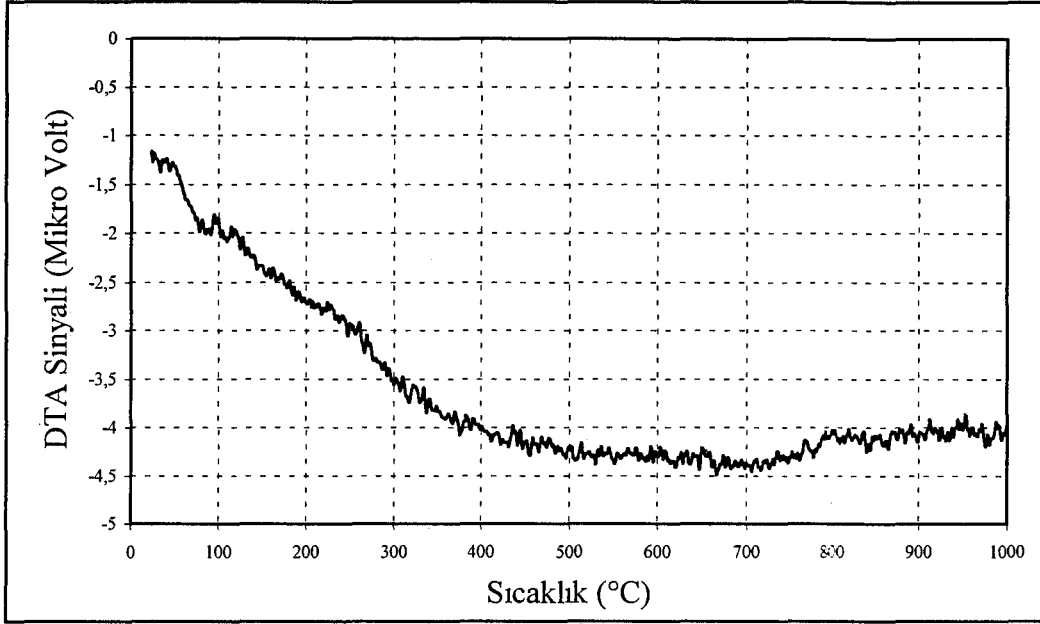
EDX analiz sonucuna göre Zeolit Y tozunu oluşturan elementlerin yüzde oksit bileşikleri bulunmuştur. Yüzde oksit bileşikler oranına göre Zeolit Y tozunun  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  mol oranı 8,31'dir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Zeolit Y tozunun EDX analiz sonucu

Oksit Bileşen	% Ağırlık
$\text{Na}_2\text{O}$	10,46
$\text{MgO}$	3,29
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,62
$\text{SiO}_2$	80,55
$\text{K}_2\text{O}$	0,48
$\text{CaO}$	3,60

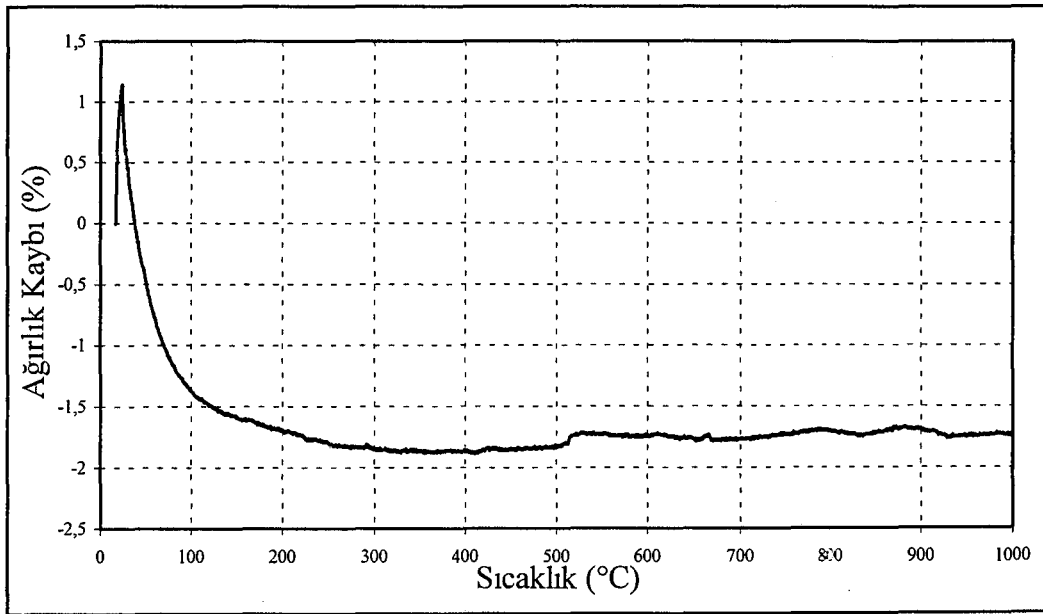
Sıcaklık artışının Zeolit Y tozu üzerinde yapması düşünülen yapısal değişiklik etkisi DTA-TG cihazıyla belirlenmiştir. Kullanılan termal analiz cihazıyla  $1000^\circ\text{C}$ 'ye  $5^\circ\text{C}/\text{dk}$ . ısınma hızıyla çıkılmıştır.  $1000^\circ\text{C}$  de bir saat beklenip  $5^\circ\text{C}/\text{dk}$ . soğuma hızı ile oda sıcaklığına inilmiştir Şekil 3.3'de verilen

diferansiyel termal analiz (DTA) sonucuna göre Zeolit Y tozun da hiçbir kimyasal reaksiyon görülmemiştir.



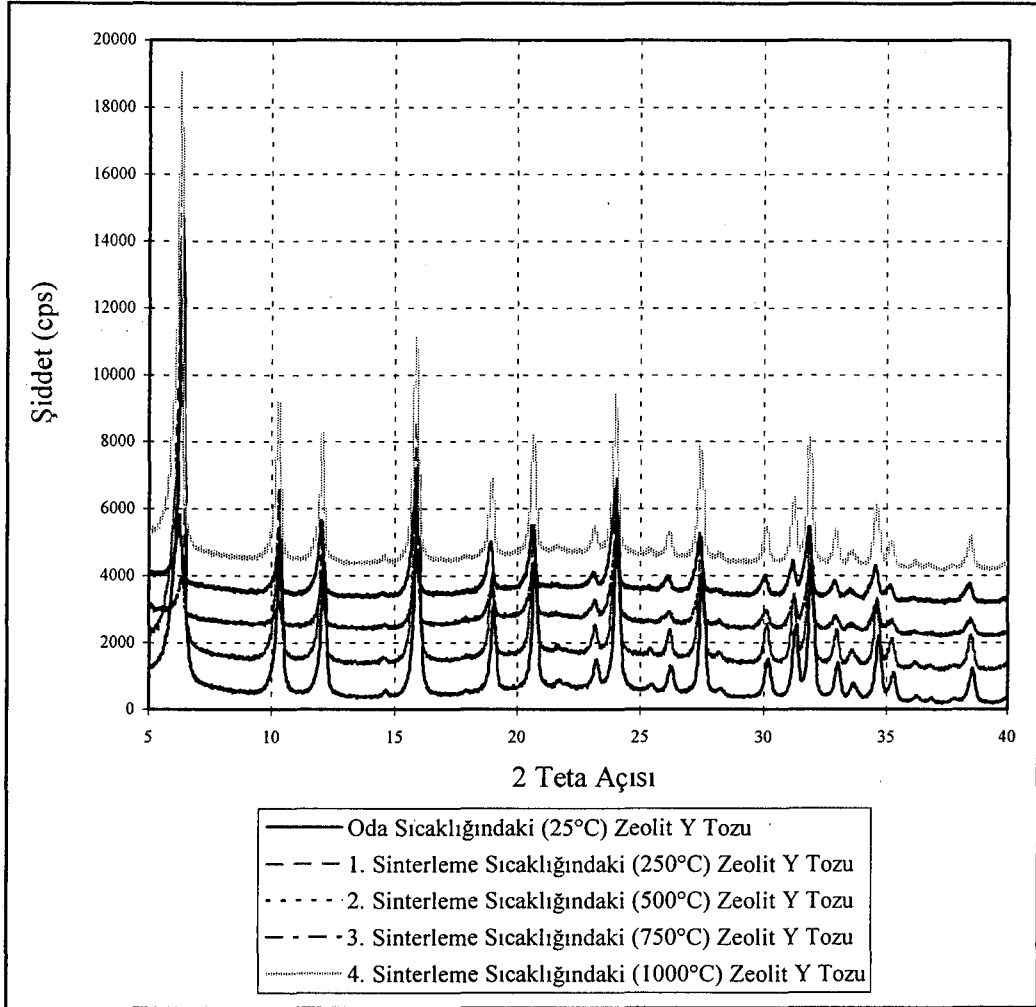
Şekil 3.3 Zeolit Y tozunun diferansiyel termal analiz (DTA) sonucu.

Termo gravimetrik (TG) analiz sonucunda ise %1,76'lık ağırlık kaybı görülmüştür. Elde edilen analiz sonucu Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Zeolit Y tozunun termo gravimetrik analiz (TG) sonucu.

Zeolit Y tozu 1000°C' ye kadar farklı sıcaklıklarda (250°C, 500°C, 750°C, 1000°C) sinterlenmiştir. DTA-TG analiz sonucunun doğrulanması için her bir sıcaklıktaki toz numunelerinin X-ışınları difraktometre (XRD) cihazı ile karakterizasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tek bir grafikte birleştirilerek Şekil 3.5'de verilmiştir.

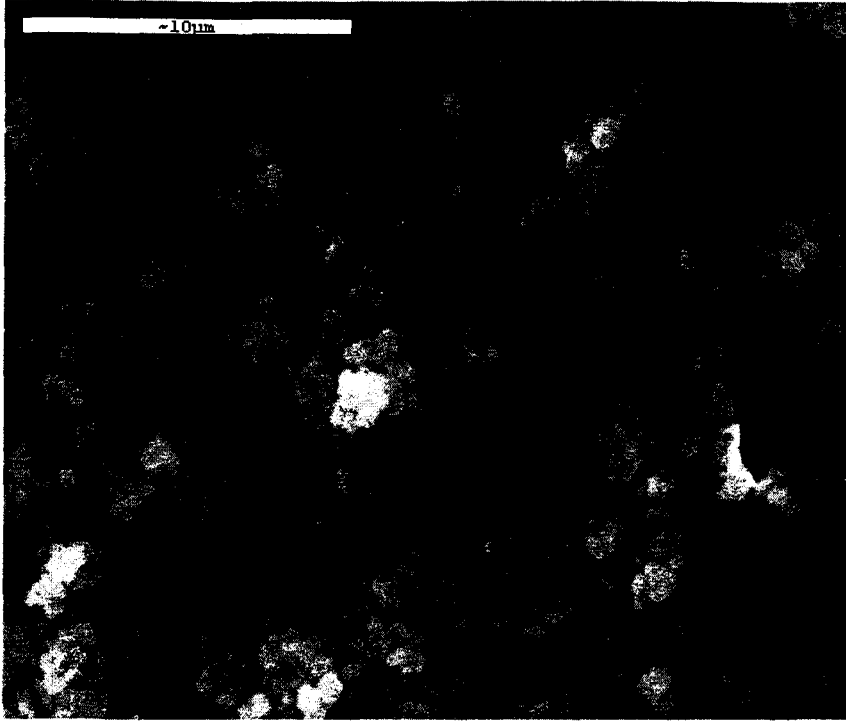


Şekil 3.5. Zeolit Y tozunun farklı sıcaklıklardaki (250°C, 500°C, 750°C, 1000°C)

X-ışınları difraktometre (XRD) analiz sonucu

Zeolit Y tozunun tane morfolojisinin (şekli, boyutu ve dağılımı) daha iyi görüntülenebilmesi için taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı kullanılmıştır. Analiz sonucuna göre tozlar 1 mikronun altındadır. Elde edilen görüntüler Şekil 3.6'da verilmiştir.





(a)



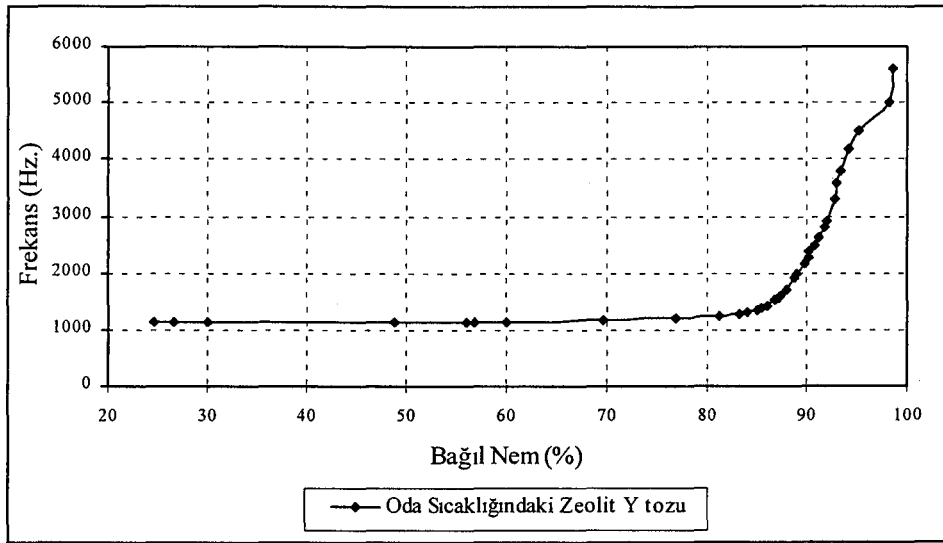
(b)

Şekil 3.6. Zeolit Y tozunun taramalı elektron mikroskop (SEM) analiz sonucu

- (a) Zeolit Y tozunun genel görünümü
- (b) Zeolit Y tozundaki aglomereler

### 3.2. Serbest Toz Modelinin Ölçüm Sonuçları

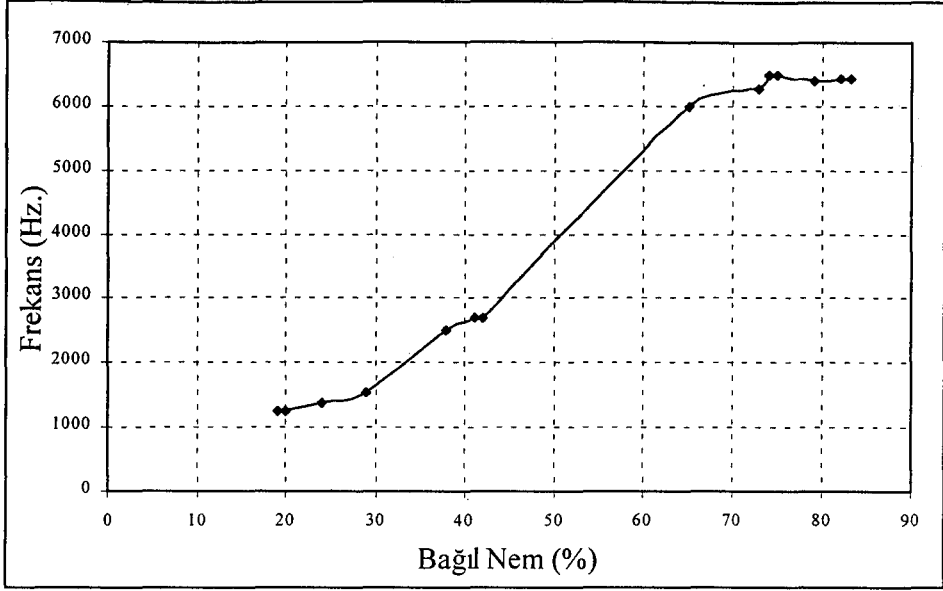
Nem kabini içerisinde sabitlenen serbest toz modelinin farklı nem değerlerine karşılık gelen frekans değişiklikleri frekans-bağıl nem grafiğine dönüştürülerek Şekil 3.7’de verilmiştir. Buna göre Zeolit Y tozunun %24,7-%60 nem değerleri arasındaki frekans değeri 1140 Hz.’de sabit kalmıştır. %60-%98,5 nem değerleri arasında ise 1140 Hz.’den 5600 Hz.’e kadar frekans artışı göstermiştir.



Şekil 3.7. Serbest toz modelinin frekans-bağıl nem grafiği

### 3.3. Rezistif Esaslı Çalışan Seramik Nem Sensörünün Ölçüm Sonuçları

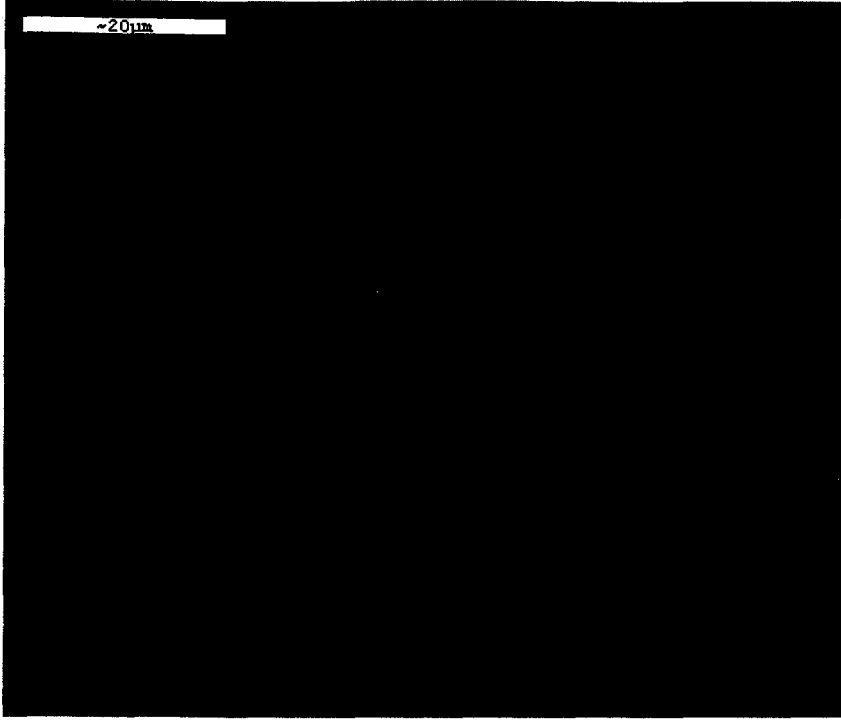
Rezistif esaslı çalışan ve standart kabul edilen seramik nem sensörünün (Farnell kodu: 732-837) osilaskopla ölçülen frekans değişiklikleri ile farklı nem değerleri arasında, frekans-bağıl nem grafiği çizilmiştir. Frekansın bağıl neme karşı değişimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Elde edilen frekans-bağıl nem değişimlerine göre %19-%83 nem değerleri arasında ölçülen frekans 1260 Hz.’den 6500 Hz.’e kadar artış göstermiştir.



Şekil 3.8. Rezistif esaslı çalışan referans nem sensörünün frekans-bağıl nem grafiği

### 3.4. Üretilen Organik Bileşenli Seramik Nem Sensörlerinin Karakterizasyon Sonuçları

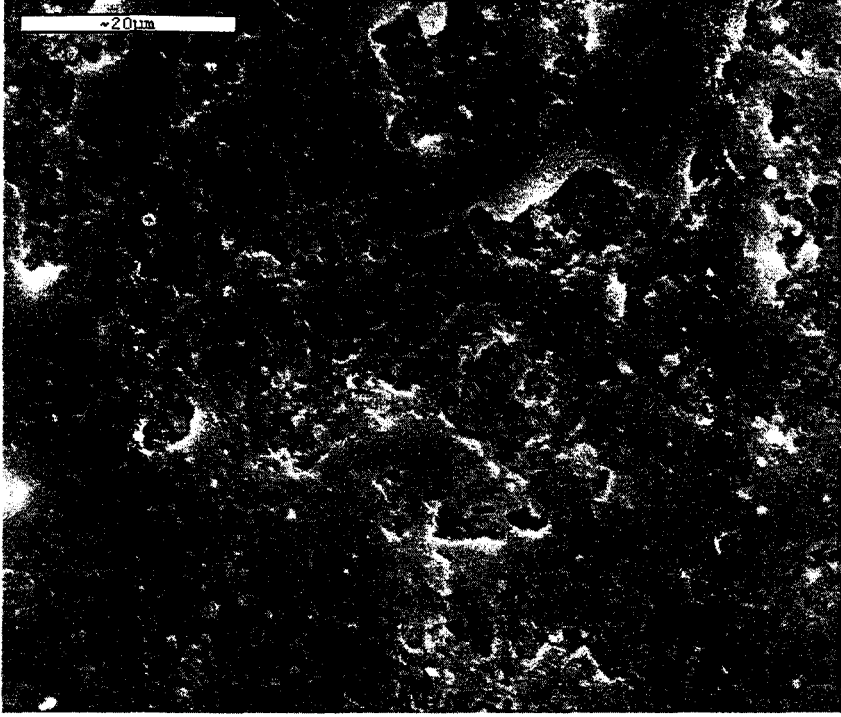
Üretilen organik bileşenli seramik nem sensörünün A ve B seri numaralı modellerinin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı ile görüntülenmiştir. A seri numaralı sensör numunelerinin (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> ve A<sub>4</sub>) SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir. Loctite epoksi reçine ile karıştırılıp altlık üzerine kaplandıktan sonra asitle dağlanan A seri numaralı sensör numunelerinin SEM görüntülerinde kalıcı gözenekler görülmüştür.



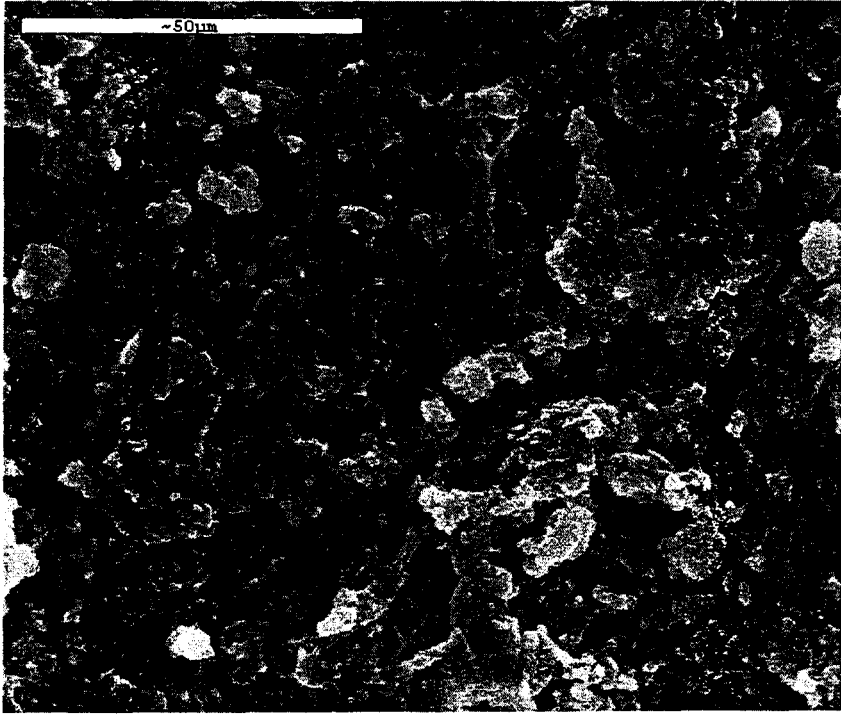
Şekil 3.9. A<sub>1</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı



Şekil 3.10. A<sub>2</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı

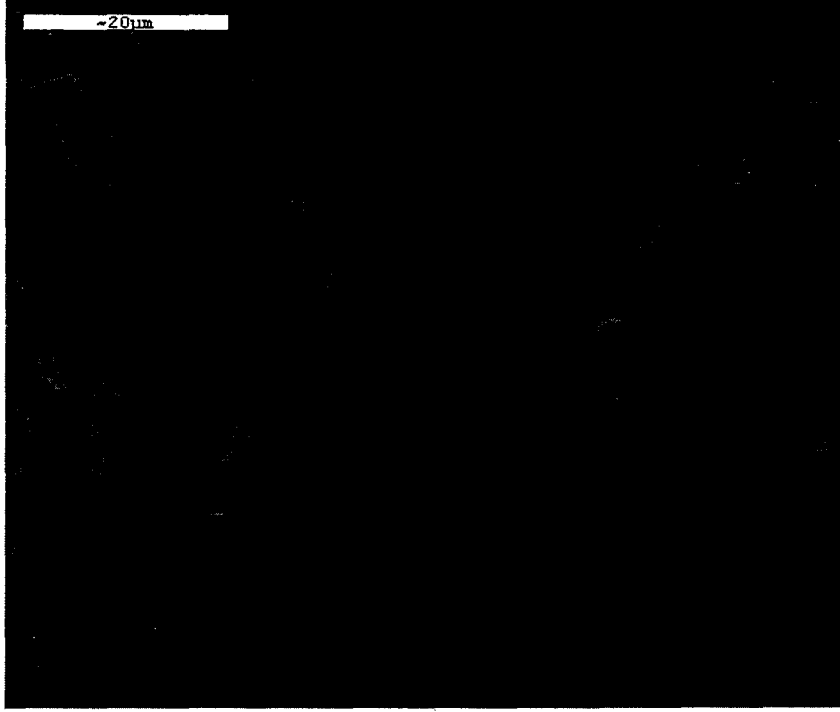


Şekil 3.11. A<sub>3</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı

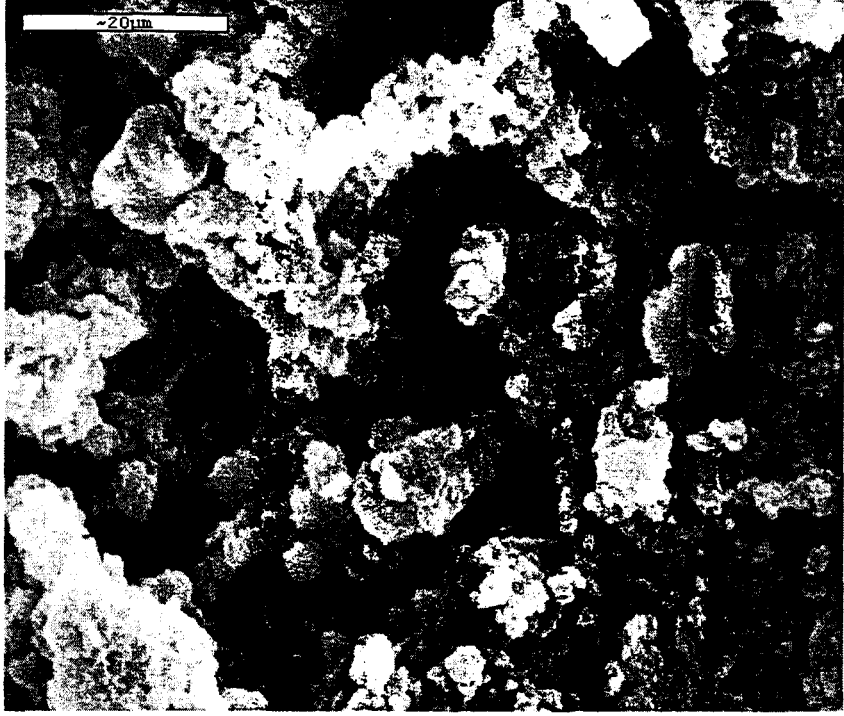


Şekil 3.12. A<sub>4</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı

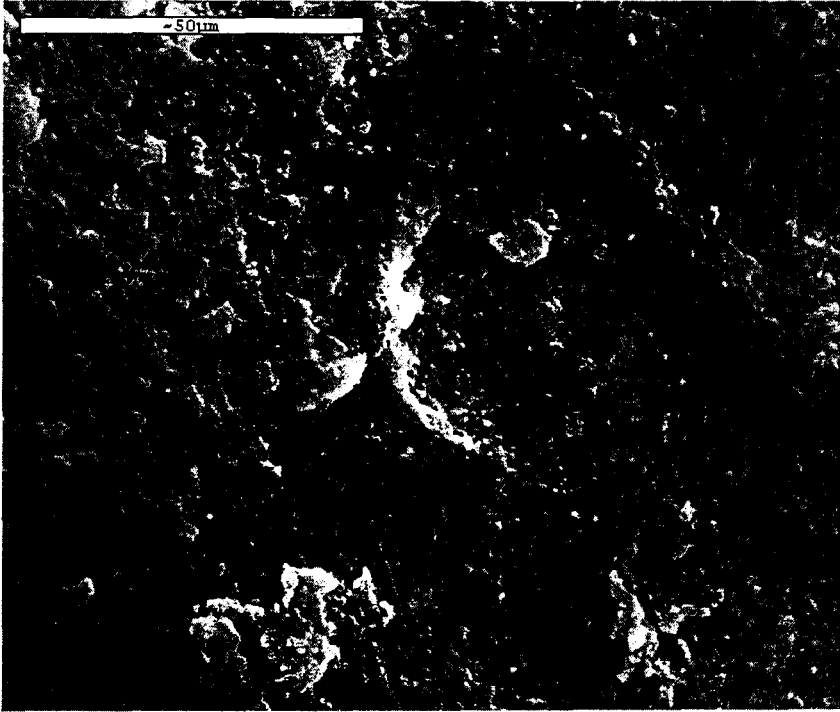
B seri numaralı sensör numunelerinin (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub>) SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilmiştir. Clear epoksi reçine ile karıştırılıp altlık üzerine kaplandıktan sonra asitle dağlanan b seri numaralı sensör numunelerinin SEM görüntülerinde de kalıcı gözenekler görölmüştür.



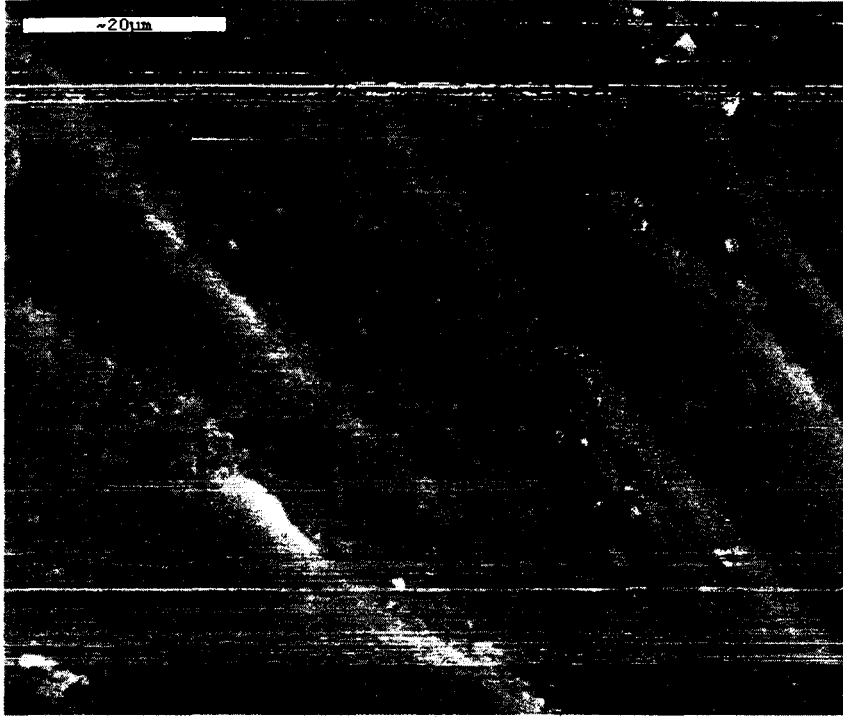
Şekil 3.13. B<sub>1</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı



Şekil 3.14. B<sub>2</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı



Şekil 3.15. B<sub>3</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı

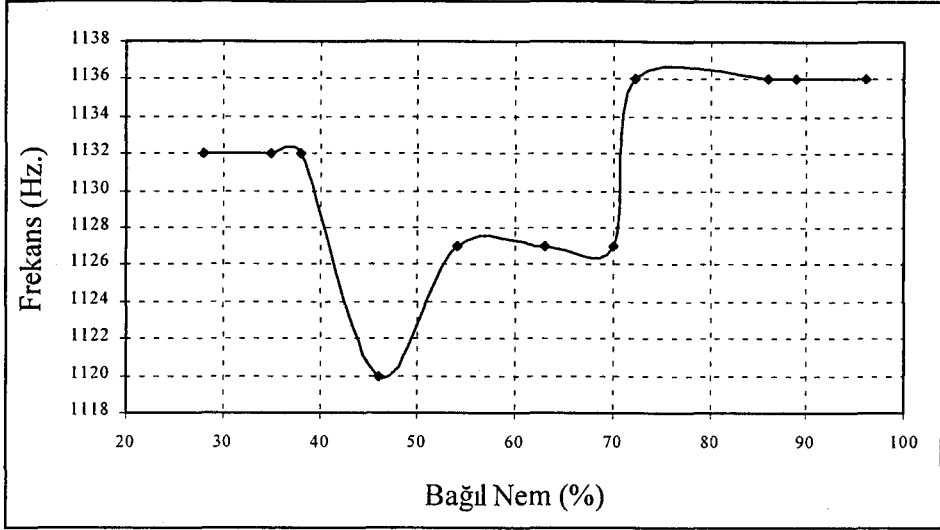


Şekil 3.16. B<sub>4</sub> numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı

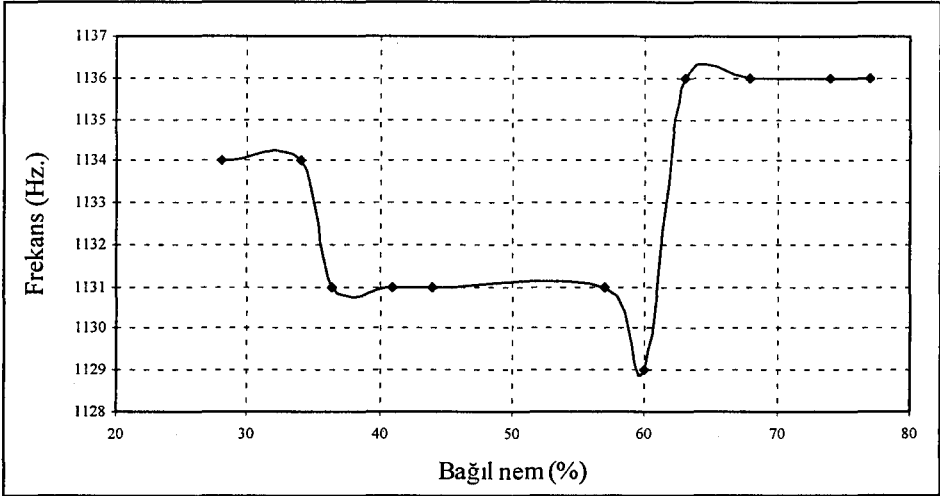
A ve B seri numaralı sensör numuneleri nem kabini içerisine sabitlenerek farklı nem değerlerine karşılık gelen frekans değişimleri ölçülmüştür. Her bir sensör numunesinin farklı nem değerlerindeki ölçüm sonuçları frekans-bağıl nem grafiklerine dönüştürülmüştür.

A seri numaralı modeller için %28-%96 bağıl nem değerleri arasında ölçülen frekans değişimleri 1118Hz. ile 1280 Hz. aralığındadır. A seri numaralı sensör numunelerinin (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> ve A<sub>4</sub>) frekans-bağıl nem grafikler sırasıyla Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verilmiştir.

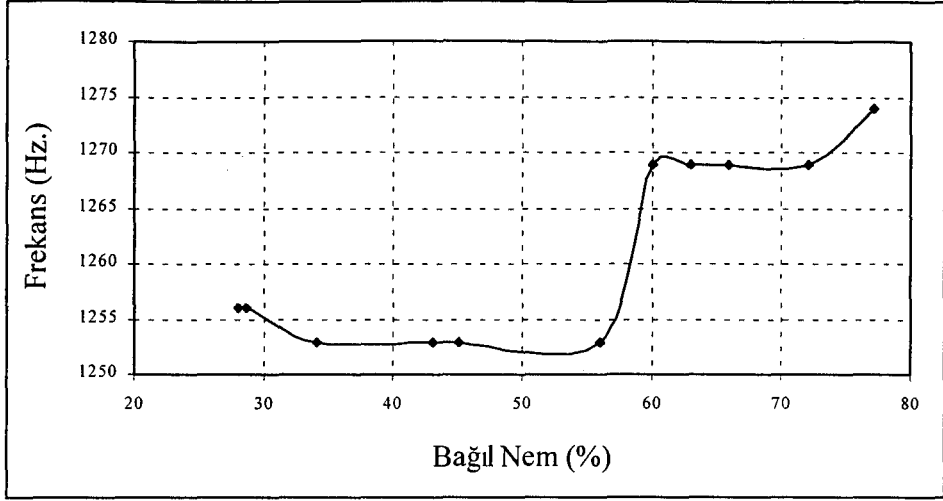




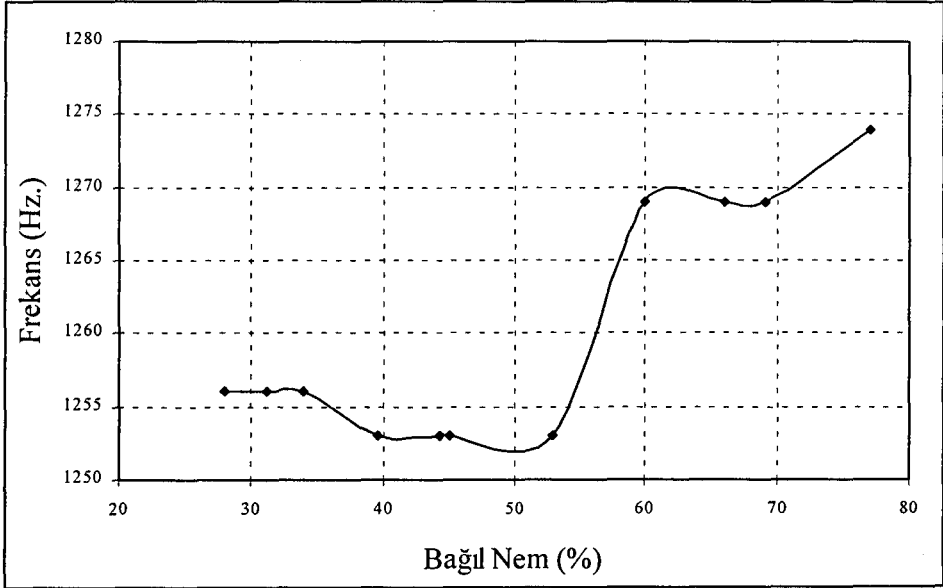
Şekil 3.17. A<sub>1</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği



Şekil 3.18. A<sub>2</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği

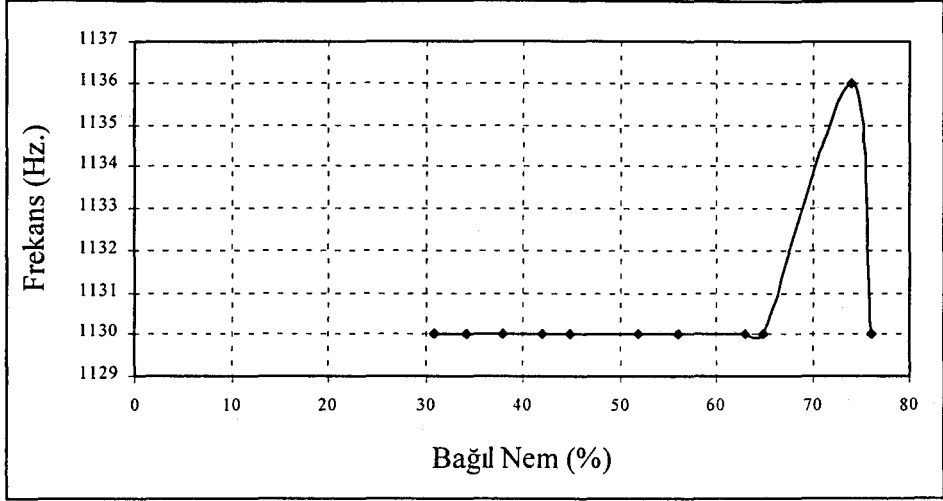


Şekil 3.19. A<sub>3</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği

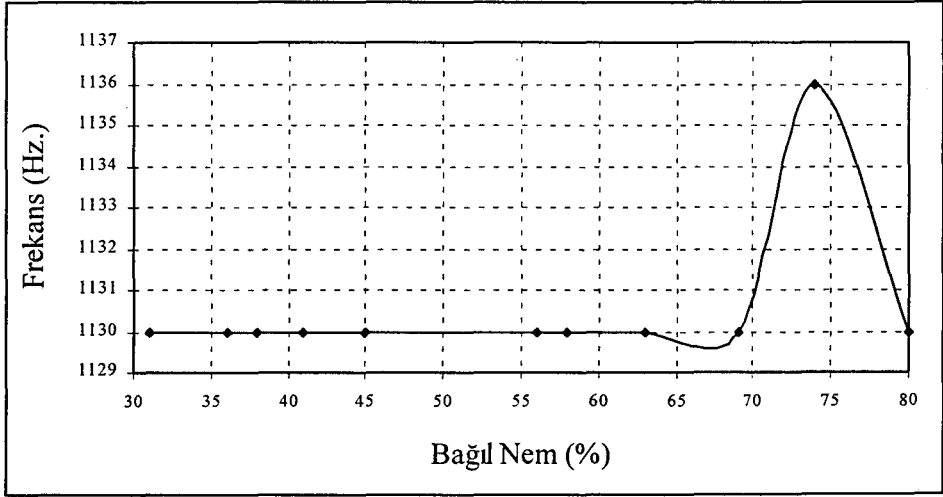


Şekil 3.20. A<sub>4</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği

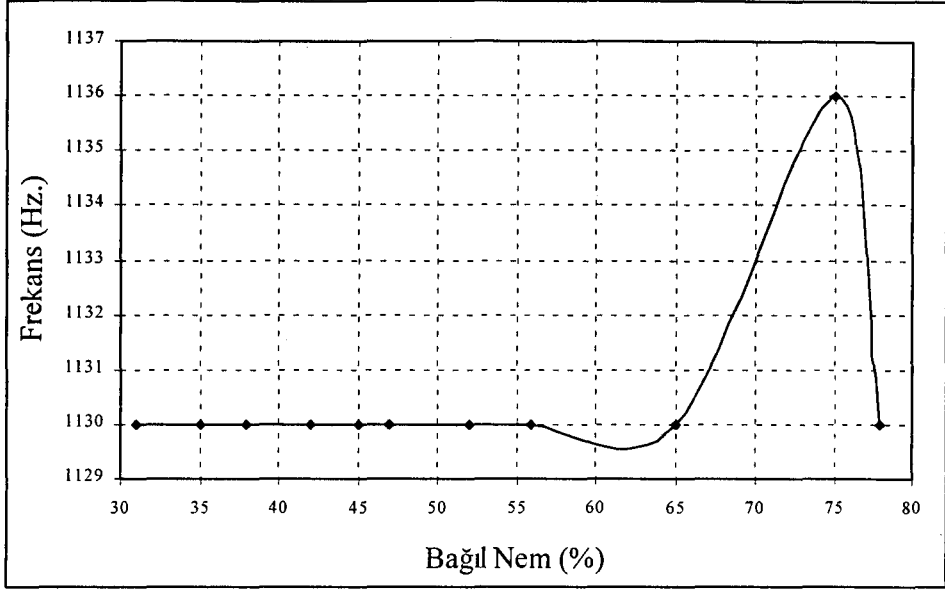
B seri numaralı modeller için %30-%80 bağıl nem değerleri arasında ölçülen frekans değişimleri 1000 Hz. ile 2500 Hz. aralığındadır. B seri numaralı sensör numunelerinin (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub>) frekans-bağıl nem grafikleri sırasıyla Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'de verilmiştir.



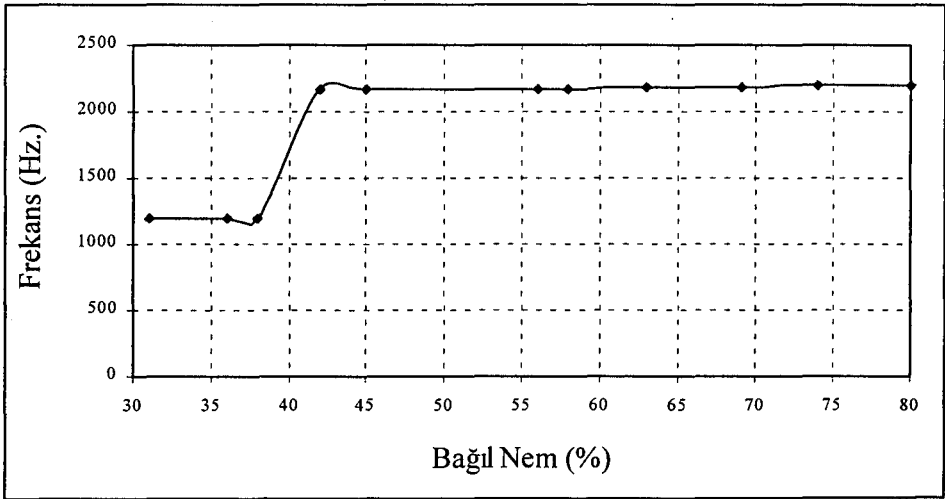
Şekil 3.21. B<sub>1</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği



Şekil 3.22. B<sub>2</sub> modelinin frekans bağıl-nem grafiği



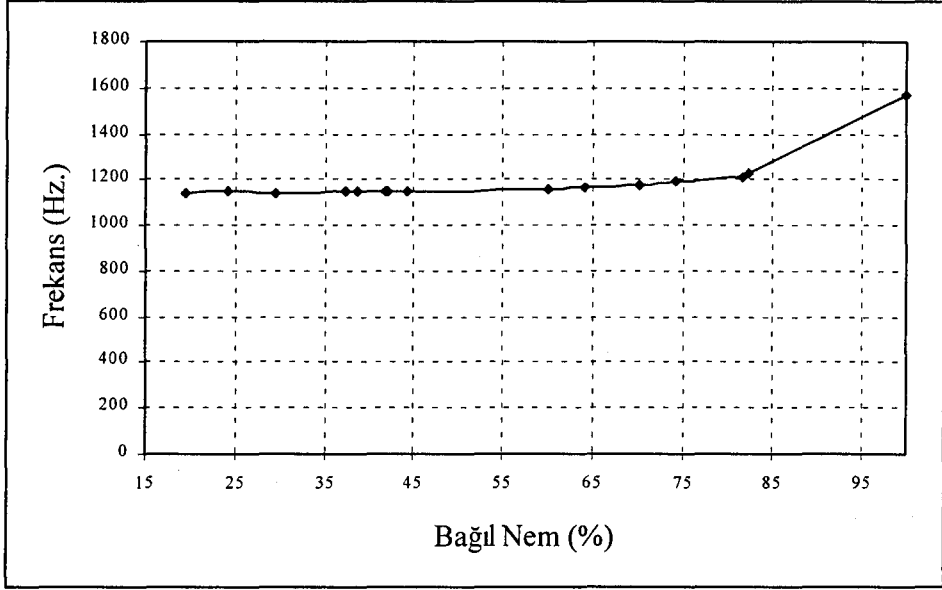
Şekil 3.23. B<sub>3</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği



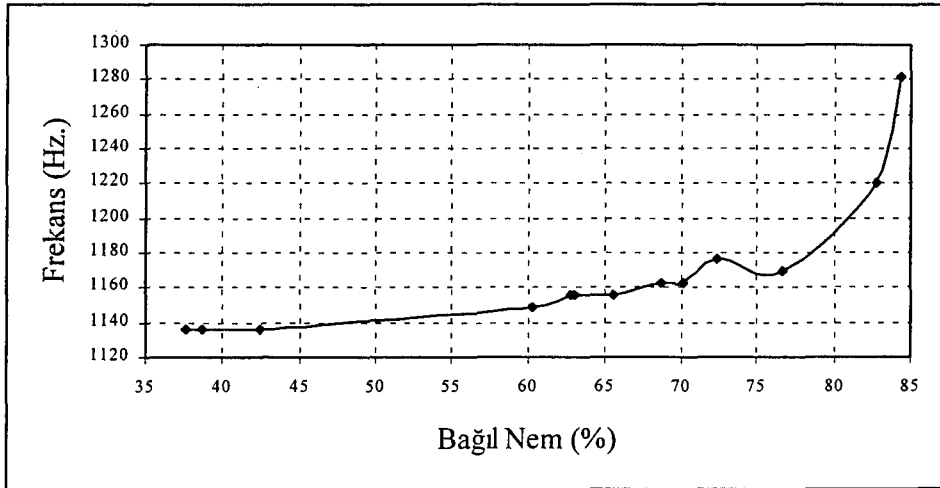
Şekil 3.24. B<sub>4</sub> modelinin frekans-bağıl nem grafiği

Geleneksel yöntemle üretilen seramik sensör numuneleri dört farklı sıcaklıkta (500°C, 650°C, 800°C, 950°C) sinterlenerek dört farklı iletim modeli ile denenmiştir. Herbir numune nem kabini içerisine sabitlenerek farklı nem değerlerine karşılık gelen frekans değişiklikleri osilaskopla ölçülmüştür. Bağıl nem-frekans değişimlerinden elde edilen ölçüm sonuçları frekans-bağıl nem grafiklerine dönüştürülmüştür. Tüm modeller için %20-%90 bağıl nem değerleri arasında ölçülen frekans değişimleri sırasıyla 1.Model için; 1120-1800 Hz., 2.Model için; 1100-1190 Hz., 3.Model için; 1150-2050 Hz., 4.Model için; 1136-

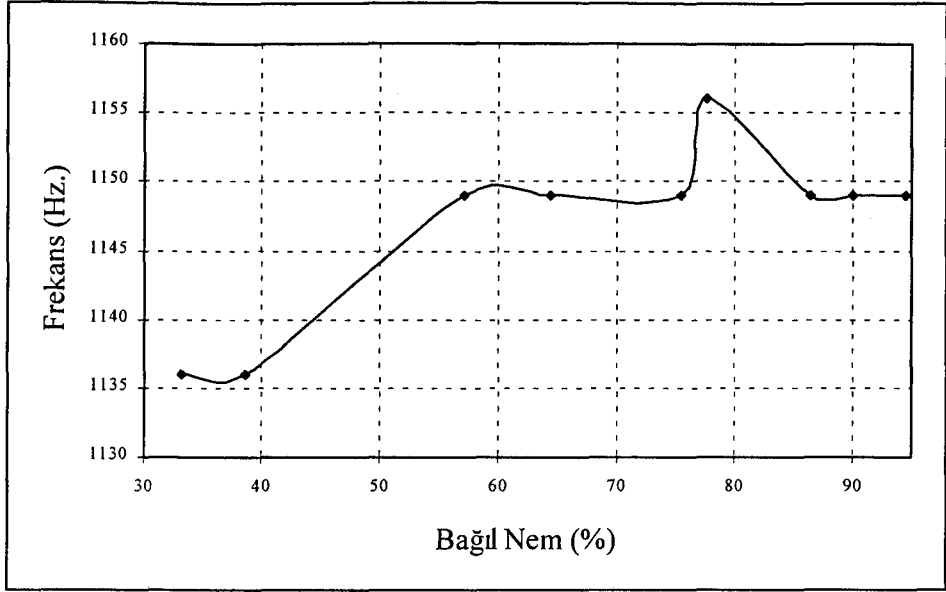
1850 Hz. aralığındadır. Ölçüm sonuçlarında elde edilen frekans-bağıl nem grafikleri sırasıyla 1.Model için Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de, 2.Model için Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de, 3.Model için Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da 4.Model için Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'da verilmiştir.



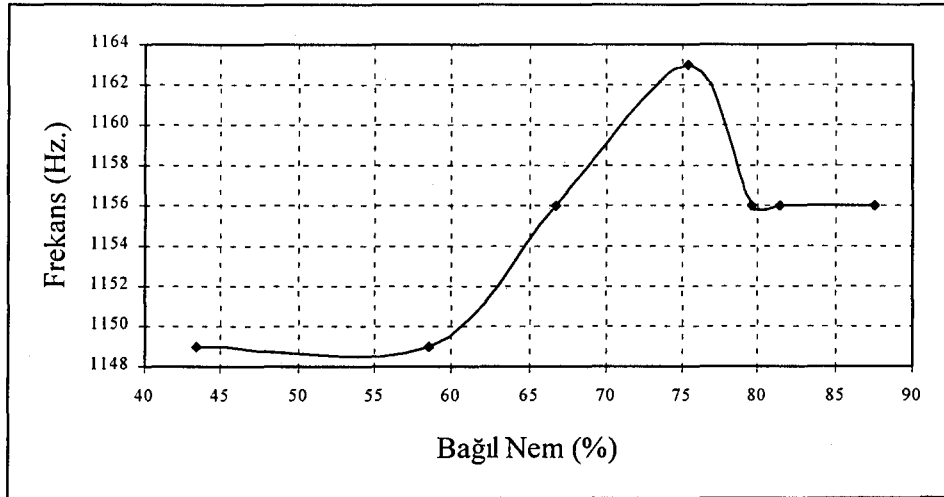
Şekil 3.25. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C'de üretilmiştir)



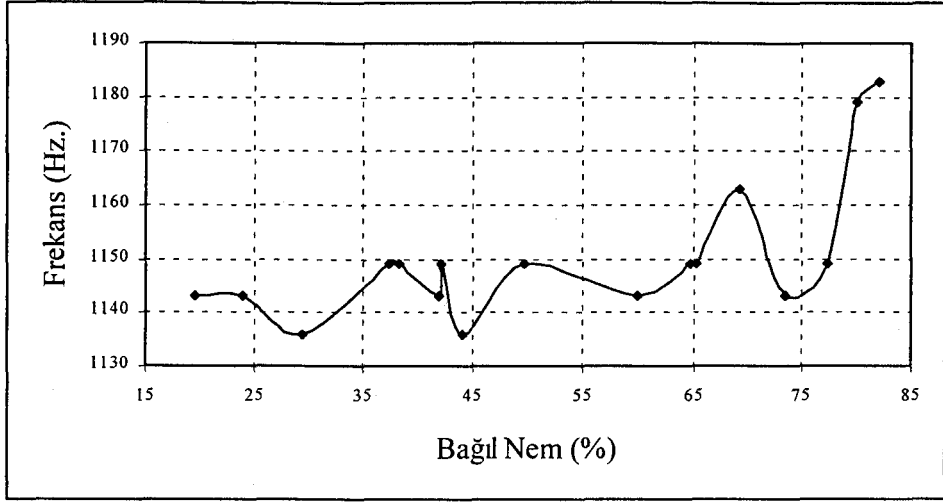
Şekil 3.26. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C'de üretilmiştir)



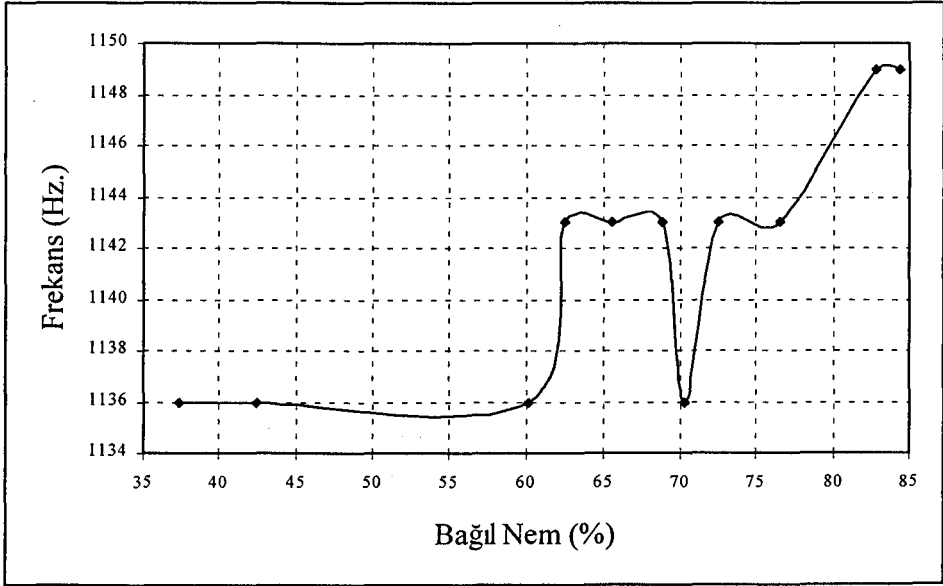
Şekil 3.27. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C’de üretilmiştir)



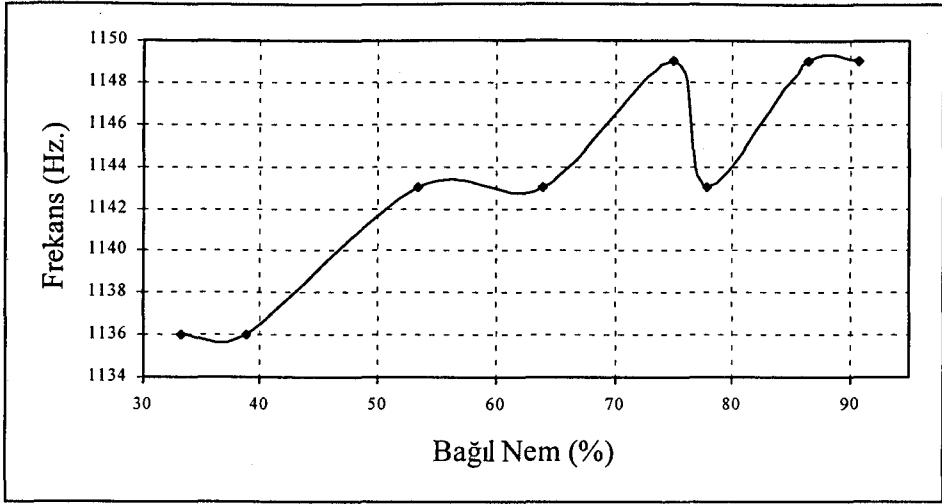
Şekil 3.28. 1. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C’de üretilmiştir)



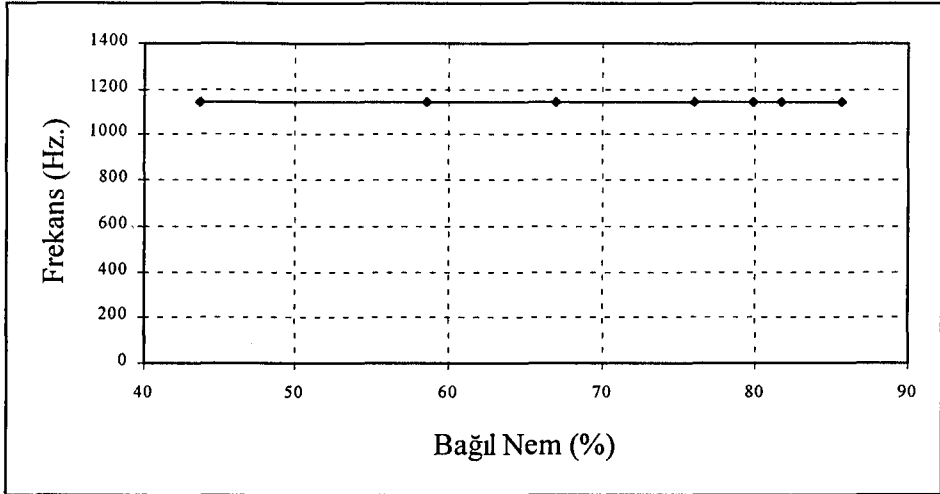
Şekil 3.29. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C'de üretilmiştir)



Şekil 3.30. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C'de üretilmiştir)

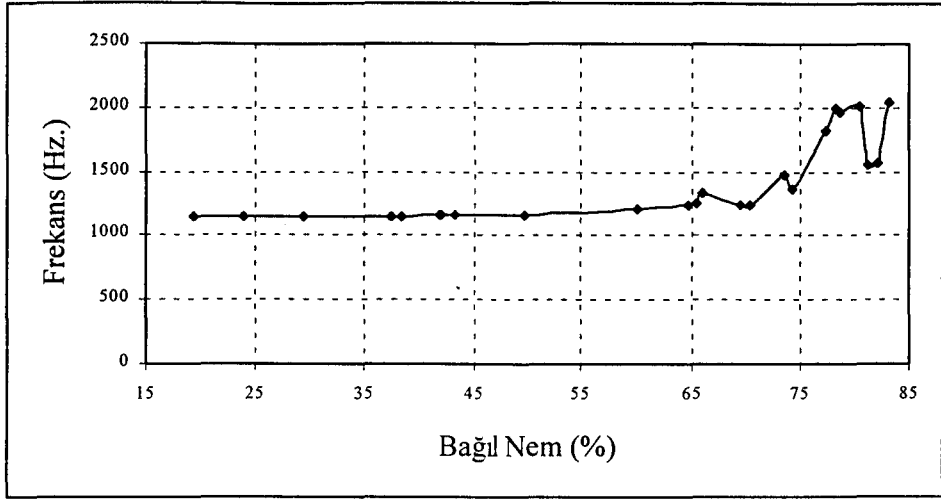


Şekil 3.31. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C'de üretilmiştir)

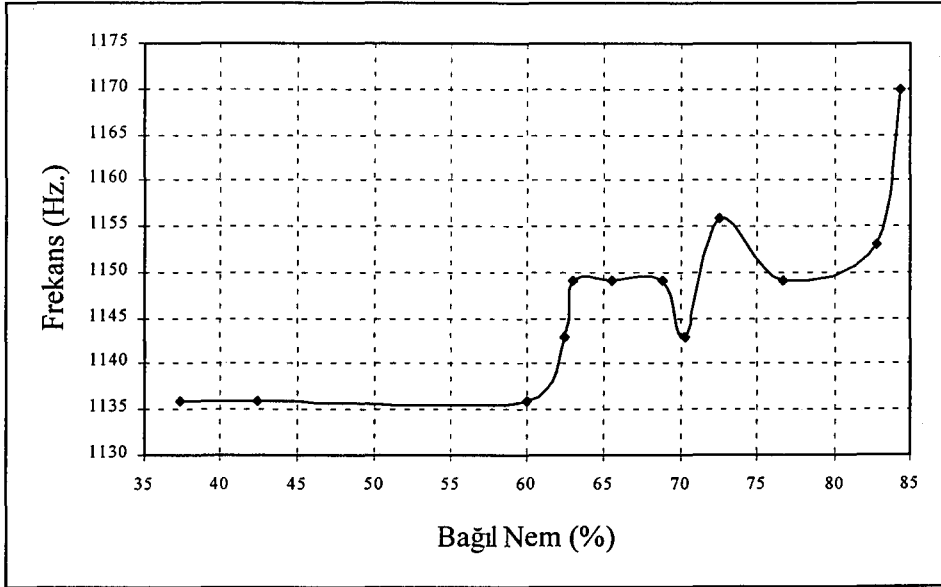


Şekil 3.32. 2. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C'de üretilmiştir)

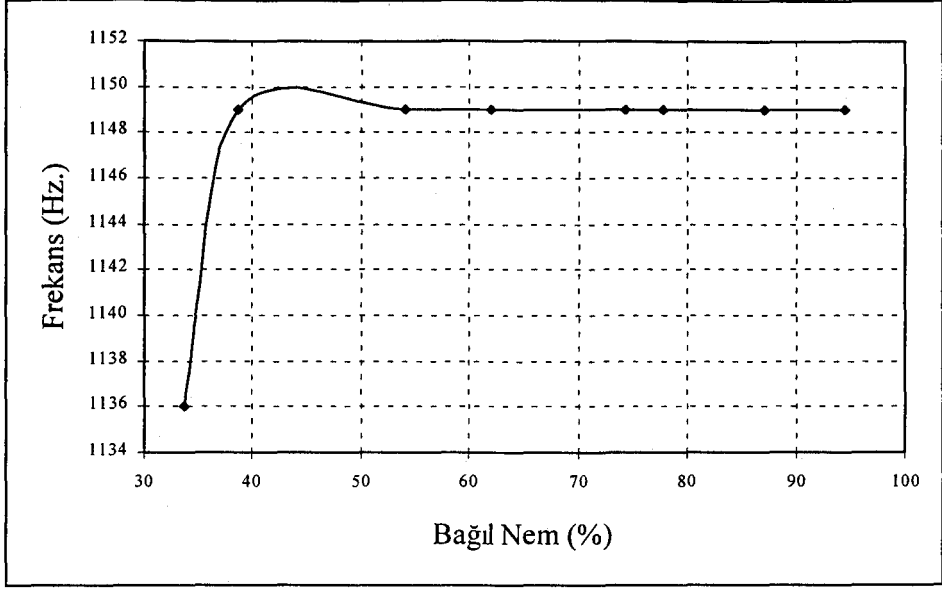




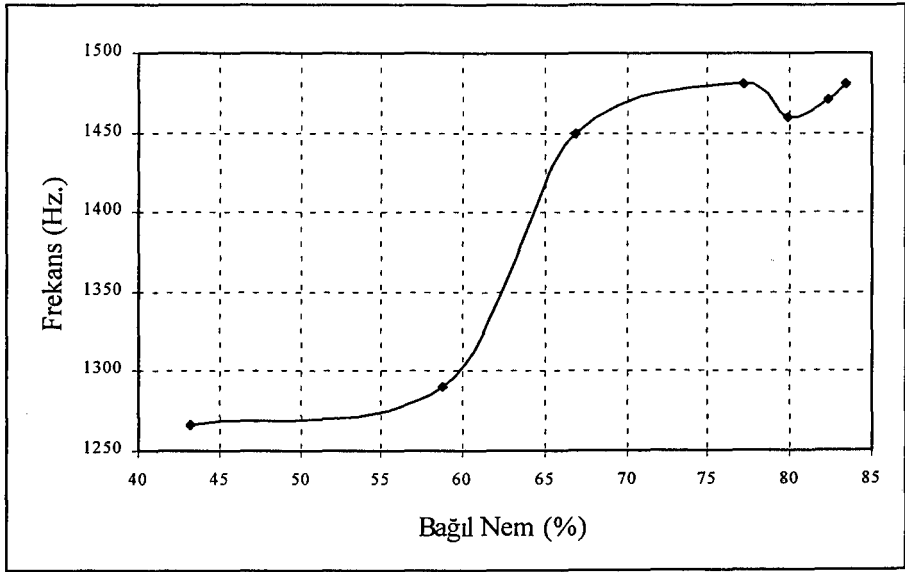
Şekil 3.33. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C'de üretilmiştir)



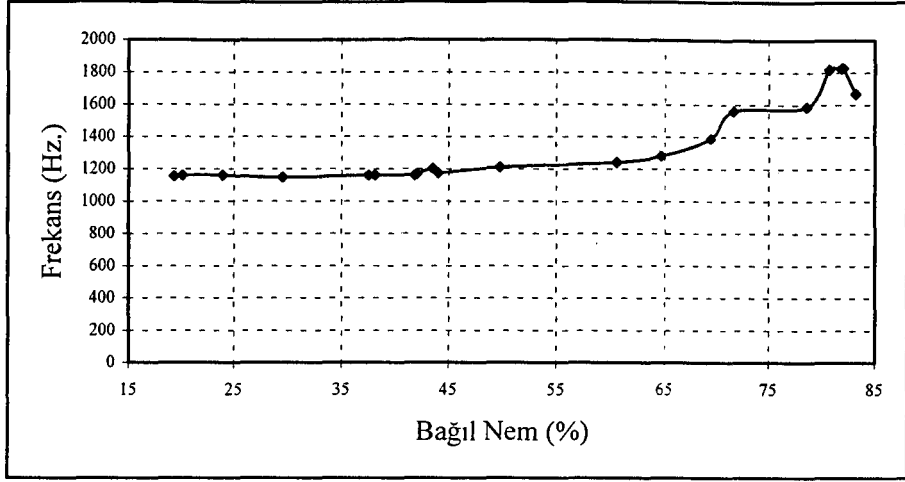
Şekil 3.34. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C'de üretilmiştir)



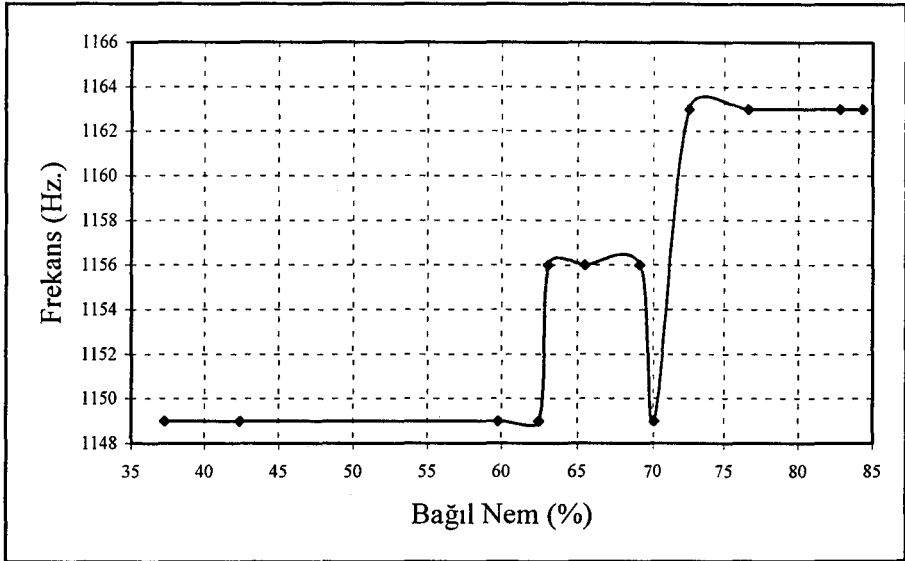
Şekil 3.35. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C'de üretilmiştir)



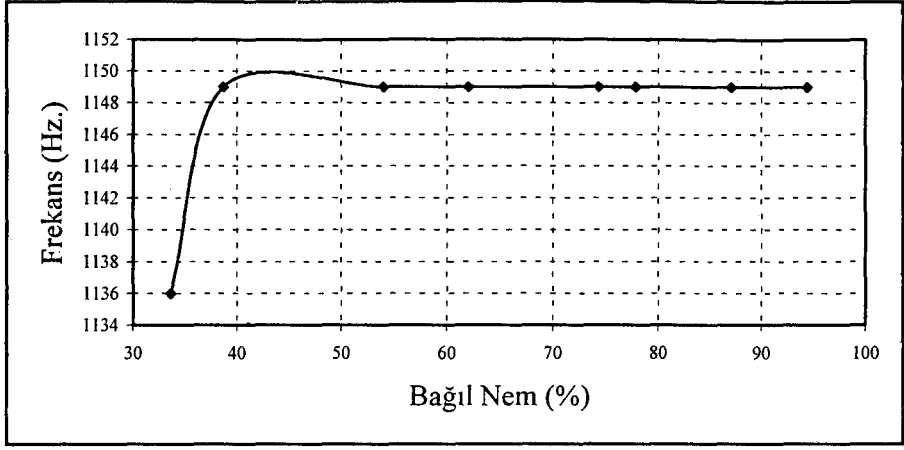
Şekil 3.36. 3. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C'de üretilmiştir)



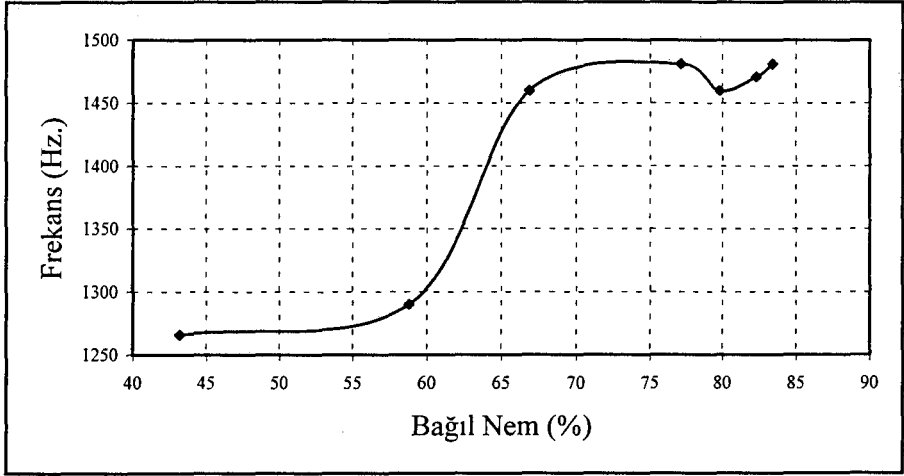
Şekil 3.37. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (500°C'de üretilmiştir)



Şekil 3.38. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (650°C'de üretilmiştir)



Şekil 3.39. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (800°C'de üretilmiştir)



Şekil 3.40. 4. Modelin frekans-bağıl nem grafiği (950°C'de üretilmiştir)

#### 4. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Zeolitlerin polar olan su molekülüne karşı gösterdikleri hidrofilik etki Si/Al mol oranının 10'dan küçük olmasına bağlıdır. Bu oranın bire yaklaşması Zeolitlerdeki hidrofilik etkiyi artırır. Zeolit Y tozunun noktasal EDX analizinden elde edilen ve Çizelge 3.1'de verilen yüzde oksit içeriğine göre  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  mol oranı 8,31'dir. Bu sonuç deneyde kullanılan Zeolit Y tozunun hidrofilik etkiye sahip olduğunu gösterir. Bu nedenle nem sensörü üretiminde kullanılabilir.

Rezistif esaslı çalışan tüm nem sensörleri, her ölçüm sonunda ısıtılarak yeni ölçüme hazır hale getirilir. Isıtma işlemi kısa aralıklarla ve düşük sıcaklıklarda (yaklaşık  $105^\circ\text{C}$ ) yapılır. Böylece sensör yüzeyinde oluşan fiziksel adsorpsiyon hızla temizlenerek yeni ölçüme hazır hale getirilir.  $1000^\circ\text{C}$ 'ye kadar yapılan DTA analiz sonucuna göre Zeolit Y tozunda hiçbir kimyasal reaksiyon (endotermik veya ekzotermik) pikine rastlanmamıştır. Sadece TG analizinde %1,76'lık ağırlık kaybı saptanmıştır. TG analiz sonucunda görülen  $200^\circ\text{C}$  civarındaki ani ağırlık kaybı Zeolit Y tozunun yapısındaki fiziksel suyun uzaklaştığını gösterir. Farklı sıcaklıklarda ( $250^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$ ) yapılan XRD analiz sonuçları Zeolit Y tozunun kristal yapısının değişmediğini doğrulamıştır. Bu sonuçlar Zeolit Y tozunun ısıtılarak tekrar aktif hale getirilebileceğini gösterir.

SEM analiz sonucuna göre Zeolit Y tozundaki tanelerin tamamının  $5\ \mu\text{m}$ 'nin altında olduğu görülmüştür. Yaklaşık  $2\ \mu\text{m}$  boyutundaki aglomereler Zeolit Y tozundaki tanelerin gerçekten daha büyük görünmesine neden olmuştur. Tek bir Zeolit Y tozunun sahip olduğu tane şekli ve boyutu teknik nedenlerden dolayı net olarak görüntülenememiştir.

Serbest toz modelinin osilaskopla yapılan ölçüm sonucunda elde edilen frekans-bağıl nem grafiği Zeolit Y tozunun nem sensörü olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

Rezistif esaslı çalışan seramik nem sensörünün osilaskopla yapılan ölçüm sonucunda elde edilen frekans-bağıl nem grafiği ise ölçümlerde kullanılan deney düzeneğinin çalışma prensibini doğrulamıştır. Bu sonuca göre tasarlanan nem kabini dış ortamdan tamamen yalıtılabilmektedir. Nem kabini içerisine sabitlenen

sensör numunelerinin farklı nem değerlerine karşılık yüzey iletkenlikleri değişmektedir. Sensör numunelerinin yüzeyinde görülen elektriksel yüzey iletkenlik değişimi elektro-kimyasal bir süreçtir. Elektriksel yüzey iletkenliğine bağlı tüm değişiklikler frekans cinsinden ölçülmüştür. Ölçümlerde osilaskop kullanılmıştır. Osilaskoba iletilen tüm elektriksel değişiklikler 7555 işlemcisi içeren elektronik bir devre ile sağlanmıştır. Rezistif esaslı çalışan seramik nem sensöründen elde edilen sonuçlar tasarlanan elektronik devrenin doğru çalıştığını göstermiştir.

Organik bileşenli kompozit seramik sensör yöntemine uygun olarak üretilen A ve B seri numaralı sensör modellerinde Zeolit Y tozuyla su direnci yüksek epoksiler (Loctite ve Clear Epoxy) karıştırılmıştır. Kullanılan epoksilerin Zeolit Y tozu ile karıştırıldığında kısa sürede doygun hale gelmesi (karışım yoğunluğunun artması viskoziteyi artırmıştır) ve kısa sürede katılaşması Zeolit Y tozunun epoksi içerisine yüzde ağırlıkça fazla ilave edilememesine neden olmuştur. Karışımlarda kullanılan Zeolit Y tozu toplam ağırlığın %40 kadar ilave edilmiştir. Yüzde ağırlıkça kullanılan bu oran her iki epoksi karışımı için sınırlayıcı olmuştur. Üretim yöntemini değiştirmeden suyun aşındırma direncine karşı yüksek direnç gösteren ve uzun sürede katılaşan başka epoksiler kullanılabilir.

Karışım sonrası kısa sürede yoğunlaşarak katılaşan epoksiler Zeolit Y tozunun yüzeyini tamamen kapladığı için % 65'lik nitrik asitle sensör yüzeyleri dağlanmıştır. Dağlama sonrası sensör yüzeylerindeki gözenek boyutu hızla artmıştır. Yüzeyde oluşturulan gözeneklilik su moleküllerinin yoğunlaştığı büyük gözeneklere dönüşmüştür. Nitrik asitle yapılan yüzey dağlaması üretilen sensör numunelerinin cevap verme karakteristiğini kötü yönde etkilemiştir. Taşıyıcı olarak kullanılan altlıklar termal dağlamaya uygun değildir. Alternatif olarak yeni bir taşıyıcı altlık üzerinde termal dağlama ve zeolit yapısına zarar vermeyecek başka asitler kullanılabilir.

Üretilen nem sensörlerinin frekans-bağıl nem grafiklerinden elde edilen ölçüm sonuçları, standart kabul edilen bir seramik nem sensörünün ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun için tasarlanan deney düzeneğindeki nem kabini içerisine rezistif esaslı çalışan ve standart kabul edilen bir seramik nem

sensörü (Farnell kodu: 732-837) sabitlenmiştir. Farklı nem değerlerine karşılık gelen ölçüm sonucu frekans-bağıl nem grafiğine dönüştürülerek Şekil 3.10'da verilmiştir.

A ve B seri numaralı sensör modellerinin Şekil 3.19'dan Şekil 3.26'ya kadar verilen frekans-bağıl nem değişim sonuçları Şekil 3.10'da verilen ve standart (rezistif) kabul edilen seramik nem sensörünün frekans-bağıl nem değişim sonucu ile karşılaştırılmıştır. Buna göre üretilen sensör modellerinin istenilen standartlarda çalışmadığı görülmüştür. Bu sensör modellerinde kullanılan epoksiler zeolit tozundaki mevcut gözenekleri kapatmıştır. A ve B seri numaralı modellerdeki zeolit tozu neme karşı aktif olamamıştır.

Geleneksel seramik sensör üretim yöntemine uygun olarak dört farklı sıcaklıkta sinterlenerek üretilen yeni sensör modelleri dört farklı iletim modeli ile denenmiştir. Şekil 3.27'den Şekil 3.42'ye kadar verilen frekans-bağıl nem değişim sonuçları Şekil 3.10'da verilen ve standart (rezistif) çalıştığı kabul edilen seramik nem sensörünün frekans-bağıl nem değişim sonucu ile karşılaştırılmıştır. Buna göre üretilen yeni sensör modellerinin de istenilen standartlarda çalışmadığı görülmüştür. Preslenerek tek parça haline getirilen bu sensör modellerinde ise farklı sinterleme sıcaklıkları ve uygulanan pres basıncı zeolit tozunda mevcut olan gözenekliliği kapatmıştır. Daha düşük pres basınçlarında numune alınamamıştır.

Kullanılan üretim yöntemleri ile elde edilen sensör modellerinin hassasiyetleri, algılama sınırları ve tekrarlanabilirlikleri düşüktür.

Serbest toz modelinden elde edilen sonuca göre Zeolit Y tozu seramik nem sensörü üretiminde kullanılabilir. Fakat yapılan deneyler üretim yöntemlerinin yeterli olmadığını göstermiştir. Bu sebeple alternatif üretim yöntemlerinin denenmesi gerekir, örneğin elektroforetik kaplama.

## KAYNAKLAR

- [1] TİMUÇİN, M., *İleri teknolojik seramik üretimi elektronik ve mekanik seramikler*, SEKOM (Seramik ve Kompozit Araştırma Ünitesi), Proje Sonuç Raporu, Ankara, Türkiye (1995)
- [2] ARCASOY, *Seramik teknolojisi*, Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi, İstanbul, Türkiye (1983)
- [3] GEÇKİNLİ, A.E., *İleri teknoloji malzemeleri*, İTÜ. Matbaası, İstanbul, Türkiye (1991)
- [4] MUTLUAY, H., *Su kimyası*, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş. Cağaloğlu, İstanbul, Türkiye (1996)
- [5] YALÇIN, H., ve GÜRÜ, M., *Stokiyometri*, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye (2000)
- [6] YÖRÜKOĞULLARI, E., *Doğal zeolitlerde adsorpsiyon uygulamaları*, Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları, No:7, Eskişehir, Türkiye (1997)
- [7] VANELZUELA, D.P. ve MYERS, A.L., *Adsorption equilibrium data handbook*, by Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA (1989)
- [8] SARIKAYA, Y., *Fizikokimya*, Gazi Kitabevi, Ankara, Türkiye (2000)
- [9] SOYDAN, A.B., ERBİL, C. ve SARAÇ, A.S., *Teori ve problemleri ile fiziksel kimya*, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., Cağaloğlu, İstanbul, Türkiye (1999)
- [10] GÜRDAL, O., *Algılayıcılar ve dönüştürücüler*, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara, Türkiye (2000)
- [11] NENOV, T.G. ve YORDANOV, S.P., *Ceramic sensors technology and applications*, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, USA (1996)
- [12] <http://ibdcom.yamatake.co.jp/products/fp3/background.html>
- [13] SERBEST, G., *Fiziksel ölçümlerde sensörler*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye (2000)



- [14] ÖZTÜRK, Z.Z., *Kimyasal sensör teknolojileri ve sensör malzemeleri*, Savunma Sanayiindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu (Cilt 2), Ankara, Türkiye 817-824 (1997)
- [15] TOFIELD, B.C., *State of the art future prospects for solid state gas sensors*, Solid State Gas Sensors (Ed: MOSELEY, P.T. ve TOFIELD, B.C.) IOP Publishing Ltd. Philadelphia, USA 201-205, 218-222 (1987)
- [16] NİTTA, T., *Development and application of ceramics humidity sensors*, Chemical Sensor Technology, Vol. 1, (Ed: SEIYAMA. T.), Kodansha Ltd., Tokyo 57-78 (1988)
- [17] TURAN, S., AY, N. ve KURAMA, S., *Gözenekli seramik malzemelerin mikro yapı incelemeleri*, Anadolu Üniversitesi Araştırma Fonu, Sonuç Raporu, Eskişehir, Türkiye (1999)
- [18] HÜBERT, T., *Humidity-sensing materials*, A Publication of the Materials Research Society, MRS. Bulletin, **24**, Number 6, 49-52, USA (1999)
- [19] ICHINOSE, N., *Introduction to fine ceramics applications in engineering*, Great Britain by An Chor Brendon Ltd., US (1987)
- [20] <http://www.mam.gov.tr/etkinlikler/kitap/>
- [21] YÜCEL, H., *Zeolitler ve uygulama alanları*, III. Ulusal Kil Kongresi Bildiriler Kitabı, Türkiye 391-402 (1987)
- [22] MUNOZ, T., ve BALKUS, K.J., *Preparation of FeAPO-5 molecular sieve thin films and application as a capacitive type humidity sensor*, J. Am. Chem. Soc., **10**, 4114-4122 (1998)
- [23] <http://www.zeolyst.com/zeolites&catalyst/typicalproperties>