**T.C.**
**MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ ANABİLİM DALI**

# ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN NEM SENSÖRÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NALAN İPKİN**

**NİSAN 2018**

**MUĞLA**

**MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**TEZ ONAYI**

**NALAN İPKİN** tarafından hazırlanan **ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN NEM SENSÖRÜ** başlıklı tezin, 09/04/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Enerji Anabilim Dalı'nda yüksek lisans derecesi için gerekli şartları sağladığı oybirliği ile kabul edilmiştir.

---

**TEZ SINAV JÜRİSİ**

Prof. Dr. Habibe BAYHAN **(Jüri Başkanı)** İmza:

Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Genel Fizik Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Prof. Dr. Neşe KAVASOĞLU**(Danışman)** İmza:

Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Genel Fizik Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Dr. Öğr. Üyesi Aslı ÖZTÜRK KİRAZ **(Üye)**

Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü,
Pamukkale Üniversitesi, Denizli İmza:

---

**ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI ONAYI**

Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ İmza:

EnerjiAnabilim Dalı Başkanı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Danışman, Prof. Dr. Neşe KAVASOĞLU İmza:

Fen Bilimleri Fizik Bölümü,Genel Fizik Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Savunma Tarihi: 09/04/2018

---

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Enerji Verimliliği İçin Nem Sensörü’ adlı çalışmanın, tarafımdan bilimsel olarak ahlaki değerlere ters düşmeyecek şekilde yazıldığını, yararlandığım bilimsel çalışmaların göstergelerinden oluştuğunu ve bunlara atıf yaparak yararlanıldığını belirtirim. Sonuçların bu tez çalışması kapsamında elde edildiğini akademik ve etik kurallara uygun olduğunu beyan ederim.

Nalan İPKİN

09/04/2018

# ÖZET
# ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN NEM SENSÖRÜ

Nalan İPKİN

Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Neşe KAVASOĞLU

Nisan 2018, 97 sayfa

Enerji kaynaklarının kısıtlı olduğu dünyamızda enerjinin verimli olarak kullanılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Sensör teknolojilerindeki gelişmeler enerjinin verimli kullanılabilmesi konusunda en büyük yardımcılardır. Bu tez çalışmasında tıpta, endüstride, tarımda, elektrikli ev aletlerinde yaygın olarak kullanılan ve enerji verimliliğinin sağlanmasında etkili olan nem sensörleri üretilmiştir. Tez çalışmasında $Cd(CH_3COO)_2.2H_2O$ (kadmiyum asetat dihidrat), $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ (çinko asetat dihidrat) ve $SnCI_2.2H_2O$ (kalay II klorür dihidrat) başlangıç çözeltileri kullanılarak farklı hazırlama koşullarında döndürmeli kaplama yöntemi ile nem sensörleri üretilmiştir. Üretilen nem sensörlerinde çözücü, molarite değerleri ve kaplama parametreleri optimize edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde çözücü olarak % 50 su, % 50 alkol kullanılarak 0,5 M'lık $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ ve $SnCI_2.2H_2O$ başlangıç çözeltilerinin değişik yüzdelerle karışımından hazırlanan nem sensörlerinin alttaş üzerine homojen bir şekilde kaplandığı gözlenmiştir. Hazırlanan nem sensörleri üzerinde yapılan elektriksel ölçümler, sensörlerin geniş bir nem aralığında keskin elektriksel değişimler sergilediğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Nem Sensörü, Sol-Gel, Döndürmeli Kaplama Yöntemi, Nem Ölçüm Düzeneği

## ABSTRACT

## HUMIDITY SENSOR FOR ENERGY EFFICIENCY

Nalan İPKİN

Master of Science (M.Sc.)

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy

Supervisor: Prof. Dr. Neşe KAVASOĞLU

April 2018, 97 pages

In our world, where energy resources are limited, it is of utmost importance that energy can be used efficiently. Development in sensor technologies are the greatest help in the efficient use of energy. In this thesis, humidity sensors which are widely used in environment, industry, agriculture, electrical appliances and which are effective in ensuring energy efficiency are produced. In the thesis studies, humidity sensors were produced by spin coating method under different preparation conditions using Cd $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ (cadmium acetate dihydrate), Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ (zinc acetate dihydrate), $SnCI_2$. $2H_2O$ (tin II chloride dihydrate) starting solutions. Solvent, molarity and coating parameters are optimized in the produced humidity sensors. As a result of the studies, it was observed that the humidity sensors prepared from the mixture of different percentages of 0,5 M zinc acetate dihydrate and tin (II) chloride dihydrate starting solutions using 50 % water and 50 % alcohol as solvent were uniformly coated on the substrate. The electrical measurements made on the prepared humidity sensors show that the prepared sensors exhibit sharp electrical changes in a wide range of humidity.



**Keywords:** Humidity Sensor, Sol-Gel, Spin Coating Method, Humidity Measurement Set-up

# ÖNSÖZ

Tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, teorik bilgi aşamasında ve deneysel çalışmalarda beni yalnız bırakmayan danışmanım, Sayın Hocam Prof. Dr. Neşe KAVASOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmamın hazırlanmasında bilimsel katkılarda bulunan, özellikle deneysel çalışmalarda bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan Sayın Prof. Dr. A. Sertap KAVASOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Sensör Üretimi ve Karakterizasyonu Laboratuvarı'nın kurucusu, Fizik Bölümü Öğretim Üyesi saygıdeğer hocamız Prof. Dr. Murat BAYHAN'a teşekkür ederim.

Tezin deneysel kısmı gerçekleştirilirken kullanılan cihazların çalışma prensipleri konusunda bilgilerini benimle paylaşan, kıymetli zamanını ayırıp sabırla elinden gelen yardımı yapan Öğretim Görevlisi Sayın Özcan BİRGİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarımın tüm aşamasında beni maddi ve manevi her konuda sabırla destekleyen değerli ailem, eşim Gökhan İPKİN'e ve biricik oğlum Göktürk İPKİN'e minnettar olduğumu belirtmek isterim.

## İÇİNDEKİLER

**ÖNSÖZ** ..... **vi**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**
**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... **ix**
**ÇİZELGELER DİZİNİ** ..... **x**
**SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ** ..... **xiii**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
**2. TEORİ** ..... **10**
2.1. Havadaki Nem ..... 10
2.1.1. Mutlak nem ..... 10
2.1.2. Bağıl nem ..... 11
2.2. Nem Sensörü ..... 12
2.2.1. Nem sensörü çalışma prensibi ..... 13
2.2.2. Nem sensörü çeşitleri ..... 16
*2.2.2.1. Rezistif nem sensörü* ..... *19*
2.3. İnce Film ..... 20
2.4. İnce Film Üretim Teknikleri ..... 21
2.4.1. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ..... 22
2.4.2. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ..... 23
*2.4.2.1. Isıl buharlaştırma yöntemi* ..... *25*
2.5. Vakum Pompaları ..... 25
2.5.1. Mekanik pompası ..... 26
2.5.2. Difüzyon pompası ..... 27
2.6. Sol-gel Yöntemi ..... 28
2.6.1. Sol-gel yönteminde kullanılan bileşenler ..... 31
*2.6.1.1. Ön başlatıcılar* ..... *31*
*2.6.1.2. Alkoller* ..... *32*
*2.6.1.3. Katalizör* ..... *33*
2.6.2. Sol-gel oluşumu ..... 34
*2.6.2.1. Hidroliz reaksiyonu* ..... *34*
*2.6.2.2. Yoğunlaşma reaksiyonu* ..... *35*

2.6.3. Sol-gel ile film kaplama yöntemi ..... 37
*2.6.3.1 Döndürmeli kaplama yöntemi ..... 37*
**3. DENEYSEL SİSTEMLER ..... 41**
3.1. Sol-gel Döndürmeli Kaplama Sistemi ..... 41
3.2. Isıl Buharlaştırma Sistemi ..... 43
3.3. Nem Ölçüm Odacığı ..... 47
**4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ..... 59**
4.1. Alttaşların Hazırlanması ..... 59
4.2. Alttaşların Temizlenmesi ..... 60
4.3. Sol-gel Yöntemi ve İnce Film Hazırlığı ..... 61
4.3.1. CdO nem sensörlerinin hazırlanması ..... 62
4.3.2. $SnO_2$ nem sensörünün hazırlanışı ..... 66
4.3.3. ZnO nem sensörünün hazırlanması ..... 69
4.3.4. ZnO ve $SnO_2$ nem sensörü hazırlanışı ..... 70
**5. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 75**
**6. SONUÇLAR ..... 82**
**KAYNAKLAR ..... 86**
**EKLER ..... 93**
Ek. A**.** Tezin deney aşamasında kullanılan kimyasal özellikleri ..... 93
**ÖZGEÇMİŞ ..... 97**

# ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Müzede bulunan eserlerde önerilen nem aralıkları ..... 4
Çizelge 2.1. Nem sensörünün sahip olması gereken özellikler ..... 16
Çizelge 2.2. Nem algılama teknikleri ve çalışma yöntemleri ..... 18
Çizelge 2.3. İnce film üretme teknikleri ..... 21
Çizelge2.4. Sol-gel kaplama yönteminin avantajları ve dezavantajları ..... 31
Çizelge 4.1. Sol-gel çözelti oluşumu için hazırlanan yüzde (%) ve kütle (g) miktarları ..... 92
Çizelge 6.1. Asetik asit $C_2H_4O_2$ Özellikleri ..... 93
Çizelge 6.2. Etanol $C_2H_6O$ Özellikleri ..... 94
Çizelge 6.3. Çinko oksit ZnO Özellikleri ..... 94
Çizelge 6.4. Kalay oksit $SnO_2$ Özellikleri ..... 95
Çizelge 6.5. Çinko asetat dihidrat Zn $(CH_3COO)_2.2H_2O$ Özellikleri ..... 95
Çizelge 6.6. Kalay II klorür dihidrat $SnCI_2.2H_2O$ Özellikleri ..... 96
Çizelge 6.7. Kadmiyum asetat dihidrat Cd $(CH_3COO)_2.2\ H_2O$ Özellilleri ..... 96

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. DHT 11 Sıcaklık nem sensörü 6
Şekil 1.2. LDR aydınlatma sensörü, MQ gaz sensörü 6
Şekil 2.1. Grotthuss mekanizması proton transferi 14
Şekil 2.2. Empedans Değişimi İle Nem Arasındaki İlişki 19
Şekil 2.3 Kimyasal buhar biriktirme çalışma prensibi 22
Şekil 2.4. Isıl Buharlaştırma sistemi şematik gösterimi 24
Şekil 2.5. a). Cam vakum odası, (b). Polikarbanat malzemeli vakum odası, (c). Vaksis 26
Şekil 2.6. Mekanik Pompa ve şematik gösterimi 26
Şekil 2.7. Difüzyon pompası ve çalışma prensibi 27
Şekil 2.8. Sol-gel kaplama yöntemi işlem basamakları 28
Şekil 2.9. a). Asit katalizör kullanılarak oluşturulan jel yapısı, (b). Baz katalizör kullanılarak oluşturulan jel yapısı 33
Şekil 2.10. Sol-gel yöntemi oluşum basamakları 34
Şekil 2.11 Jelleşme oluşum mekanizması 36
Şekil 2.12. Döndürmeli kaplama yönteminin aşamaları (a). Damlatma, (b). Döndürmenin başlatılması, (c). Yüksek hızda döndürme, (d). Buharlaştırılması 38
Şekil 2.13. İnce filmin kalınlığının, dönme hızı, dönme süresi ve damlatılan sol hacmi ile ilişkisini gösteren grafikler 39
Şekil 2.14. Döndürmeli kaplama yöntemi uygulandıktan sonra nem sensörü üzerinde oluşan şekil bozuklukları 40
Şekil 3.1. Sol – gel yöntemi kullanılarak farklı çözücülerle hazırlanmış homojen çözeltiler 41
Şekil 3.2. Döndürmeli kaplama cihazı (Model HO- TH- 05) ve kaplanan alttaş 42
Şekil 3.3. Döndürmeli kaplama yöntemi şeması 42
Şekil 3.4. Isıl Buharlaştırma Sistemi-Vaksis Ar-Ge ve Mühendislik 43
Şekil 3.5. Metal malzemelerin konulduğu pota ve alttaş tutucu ile tutturulan nem sensörü 44
Şekil 3.6. Metal Buharlaştırma Kaynakları (a). Tel tungsten sepet, b). Metal hazneli pota 45
Şekil 3.7. Isıl buharlaştırma sitemi içindeki ışıma 45

Şekil 3.8. Isıl buharlaştırma sisteminde elektriksel kontak almada kullanılan maskeler 46
Şekil 3.9. Maske ile üzerine metal kontak alınan neme duyarlı ince filmler 46
Şekil 3.10. Nem ölçüm odacığında kullanılan buhar üreticisi ve kontrol odacığı 48
Şekil 3.11. Kontrol odacığına yerleştirilen referans sensör ve hazırlanan ZnO -$SnO_2$ nem sensörü 48
Şekil 3.12. Nem ölçüm odacığı ünitesi ve ekipmanlarının şematik gösterimi 49
Şekil 3.13. Nem ölçüm odacığında kullanılan elektronik ekipmanlar 50
Şekil 3.14. Wheatstone köprüsü 50
Şekil 3.15. Test edilen nem sensörünün direncini ölçen ve kayıt eden yazılımın ekran görüntüsü 51
Şekil 3.16. Wheatstone köprüsü 52
Şekil 3.17. Nem sensörü direncinin tespit edilmesi için kullanılan Wheatstone köprüsü 57
Şekil 3.18. Origin pro-8 grafik editörünün bilgisayar ekranı görüntüsü 58
Şekil 4.1. Alttaş olarak kullanılan mikroskobik camlar (76 × 26 mm / 3 × 1 inch) 60
Şekil 4.2. Ultrasonik temizleyici (LC 30 H) 61
Şekil 4.3. CdO nem sensörü kaplama parametreleri 62
Şekil 4.4. Elektronik ölçüm cihazı (Shimadzu electronic balence, type BL-220 H) 63
Şekil.4.5. Sol-gel uygulaması için çözelti hazırlama aşamaları 63
Şekil 4.6. Manyetik karıştırıcı (Hot & Stir, MS-300) 64
Şekil 4.7. Alttaşın döndürmeli kaplama sistemine yerleştirilmesi ve kaplama sonrası görünümü 65
Şekil 4.8. Alttaşa tam kaplanamayan CdO nem sensörleri 65
Şekil 4.9 $SnO_2$ nem sensörü kaplama parametreleri 66
Şekil 4.10. Sol-gel döndürmeli kaplama yöntemi ile hazırlanan $SnO_2$ nem sensörü ve kaplama parametreleri 67
Şekil 4.11. $SnO_2$ nem sensörü kaplama parametreleri 68
Şekil 4.12. Isıl buharlaştırma yöntemi ile üzerine ızgara maske kullanılarak AI metali kaplı nem sensörü 68
Şekil 4.13. ZnO nem sensörü kaplama parametreleri 70
Şekil 4.14. ZnO ve $SnO_2$ nem sensörü (1.seri ve 2.seri için) kaplama parametreleri 71
Şekil 4.15. Su ve alkol kullanılarak hazırlanan Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ ve $SnCI_2$. $2H_2O$ karışımı çözeltiler 72
Şekil 4.16. Döndürmeli kaplama yöntemi ile kaplanan lacivert görünümlü nem sensörleri 73
Şekil 4.17. ZnO ve $SnO_2$ sol-gel çözeltisi ile hazırlanan ikinci seri nem sensörleri 73

Şekil 4.18. Isıl buharlaştırma işleminde kullanılan Cu blok ve delikli maske 74
Şekil 5.1. 4060 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği 76
Şekil 5.2. 5050 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği 77
Şekil 5.3. 6040 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği 78
Şekil 5.4. 7030 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği 79
Şekil 5.5. 8020 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği 80
Şekil 5.6. Elektriksel karakterleri incelenen nem sensörleri 81

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| M | Madde konsantrasyonu (mol/L) |
| MV | Mega volt |
| L | Litre |
| GHz | Gigahertz |
| cm | Santimetre |
| $cm^3$ | Santimetre küp |
| $m^3$ | metre küp |
| g | Gram |
| µ | Mikro |
| $m_v$ | Su buharı kütlesi |
| V | Hava hacmi |
| mmHg | Milimetre civa |
| Torr | Basınç birimi |
| mbar | Milibar |
| Pa | Pascal |
| kPa | Kilo pascal |
| K | Kelvin sıcaklık |
| °C | Santigrat sıcaklık |
| $P_W$ | Havadaki nem miktarının gerçek kısmi basıncı |
| $P_S$ | Nemli havanın doygunluk buhar basıncı |
| Bar | Basınç birimi |
| $e^-$ | Elektron bulutu |
| kΩ | Kilo ohm |
| MΩ | Mega ohm |
| nm | Nano metre |
| µm | Mikro metre |
| M | Kaplanacak metal malzeme |
| R | Alkil grubu |
| n | Valans durumu ifadesi |
| DHT11 | Sıcaklık nem sensörü |

| | |
|---|---|
| LDR | Light Dependent Resistor |
| MQ-2 | Gaz sensörü |
| VRA | Viriable Rate Application |
| TDR | Time Domain Reflectomer |
| EC | Elektriksel iletkenlik |
| GMS | Granuler Matrix sensor |
| NTC | Negative Temperature Coefficient |
| PTC | Positive Temperature Coefficient |
| $^{TM}$(FSS) | Food Sentiel System |
| $PPM_v$ | Parts per million by volume |
| $PPM_w$ | Parts per million by weight |
| D/F | Dew point / Frost point |
| RH | Relative Humidity |
| CDV | Kimyasal buhar biriktirme |
| PVD | Fiziksel buhar biriktirme |
| rpm | Revolutions per minute |
| Mo | Molibden |
| Ta | Tantal |
| W | Tungsten |
| UV | Ultraviyole (morötesi) |
| TMOS | Tetrametoksisilan |
| TEOS | Tetraetoksisilan |
| $C_2H_4O_2$ | Asetik asit |
| $C_2H_6O$ | Etanol |
| ZnO | Çinko oksit |
| $SnO_2$ | Kalay oksit |
| CdO | Kadmiyum oksit |
| $H_3^+O$ | Hidronyum |
| $H_2O$ | Su |
| $H^+$ | Hidrojen atomu(proton) |
| $OH^-$ | Hidroksil |
| $Zn\ (CH_3COO)_2.2H_2O$ | Çinko asetat dihidrat |
| $SnCI_2.2H_2O$ | Kalay II klorür dihidrat |
| $Cd\ (CH_3COO)_2.2H_2O$ | Kadmiyum asetat dihidrat |

# 1. GİRİŞ

Türkiye'de hızlı nüfus artışı ve beraberinde getirdiği ihtiyaçlar nedeniyle enerji gereksinimi her geçen gün artış gösterir. Teknolojinin ve sanayileşmenin hızlı artışı her alanda enerji gereksinimini zorunlu hale getirir. İnsanların barınma, konaklama, sağlık ve temel ihtiyaçları gibi birçok gereksinimleri teknolojinin hızlı ilerlemesine ortam hazırlar. Değişen ve gelişen modern dünyanın görünen en büyük etkisi enerjidir. Artan enerji talebinde, enerjinin temininin verimli bir şekilde sağlanabilmesi için yeni teknolojik gelişmelere ihtiyaç duyulur. Devlet bu ihtiyaçlara paralel olarak enerjiyi güvenilir, çevreye uyumlu, temiz, işletim ve üretim maliyeti düşük temin etmek için çeşitlendirme arayışı içine girer. Yapılan yeniliklerde eski, kullanışsız, hantal ve enerji verimliliği düşük teknolojiler yerine daha ergonomik, nanoteknolojik ürünler kullanmak maliyeti düşürerek Türkiye'yi eskimiş enerji tutsağı olmaktan kurtarır. Piyasa koşullarının geçerliliği, çevre sağlığının gözetilmesi ve teknolojik yenilikler Türkiye'deki enerji kullanımını biçimlendirmektedir (Atılgan, 2000; Karataşlı vd., 2016). Sosyal ve ekonomik sürecin sağlıklı şekilde ilerlemesi ve istenen kalkınma seviyesine ulaşılması için enerji en temel girdidir. Yapılan araştırmalar sonucu Türkiye'nin dışa bağımlılığı 2009 itibarı ile % 71 olarak saptanırken, 2015'te % 68, 2020'de ise % 70 enerji talebi ile karşılaşacağımız tahmin edilmektedir (Yanar ve Kerimoğlu, 2011). Talep artışına bağlı olarak bu talebin karşılanması için 2020 yılına kadar ülke elektrik üretimine yaklaşık 78000 MV'lık bir kapasite gerekir (Atılgan, 2000; Mucuk ve Uysal, 2009). Enerji talebinin istenen zamanda ve miktarda temin edilmesi için ülkenin, mevcut kaynaklarını etkin şekilde kullanması gerekir. Enerji verimliliği için yapılan çalışmaların başarısında tek başına insan kontrolünün yeterli olmadığı kanıtlanmıştır. Sürdürülebilir enerji tasarrufu elde etmenin tek yolu, kullanıcıların tesisatın enerji kullanımını ölçmesine, analiz, kontrol ve kumanda etmesine yardımcı olacak otomasyon çözümlerini uygulamasıdır. Bu uygulamalardan biri de nem için gerçekleştirilen otomasyon çalışmalarına katkıda bulunmaktır.

İş kollarında beliren ihtiyaçlar doğrultusunda teknolojik buluşlar gelişmeye başlamıştır. Nem ölçüm cihazının muciti 1519 yılında vefat eden Leonardo Da

Vinci'dir. Leonardo Da Vinci, bir yün yumağını nem emmeden önce ve nem emdikten sonraki kütle farkını hesap edebildiği bir sistem geliştirmiştir. Bu buluş, prensip olarak nemi kolayca emen higroskopik maddelerin kullanılmasından ibarettir. Yunancadan gelen hygro, nem ve meter ölçer olarak adlandırılır. Leonardo Da Vinci'nin ilk ölçümü yapmasının ardından bugüne kadar geçen sürede, nem ölçer bolca değişime uğramıştır. Bazı nem ölçerlerde lityum klorür kullanılır ve nemi emdikçe değişen elektriksel dirençler nem seviyesinin ölçümünün cevabını verir (Anonim, 2018a). Sensörler, fiziksel ve kimyasal değişimleri algılayarak uygun elektriksel sinyallere dönüştüren aygıtlardır. Sensörler ışık şiddeti, yer değişimi, ortam sıcaklığı, manyetik alan gibi birçok fiziksel ve kimyasal değişimden etkilenerek bu değişimleri elektronik sinyallere dönüştürür. Nem sensörü, sinyal düzenleyici, sinyal işleyici, bellek aygıtları, veri kaydedici ve dönüştürücüleri içeren dedektör sisteminin bir parçasıdır (Kavasoğlu, 2001).

Yaşam alanlarındaki nem insanların yaşamını etkilediği gibi doğada var olan diğer canlıların yaşamlarını da etkilemektedir. Ticari amaç için yapılan hayvan yetiştiriciliğinde yüksek verim elde edebilmek için uygun genetik yapıyı ortaya çıkaracak ortam koşullarının karşılanması gerekir. Ülkemiz koşulları düşünüldüğünde sıcaklığın yanında yüksek nemin de görülmesi yetiştirilen hayvanların üzerlerinde sahip oldukları ısıyı atamamalarına sebep olur. Yetiştirilen hayvanları strese katarak yem alımını azaltır ve süt verimini düşürür. Örneğin; inekler günde 5 L suyu solunumla nem olarak yetiştirildikleri ortama verirler. Sıcak havalarda bu miktar daha da artış göstererek yetiştirme alanlarında rutubet artışına ve duvarlarda, tavanda damlacık oluşumuna sebep olur. Büyükbaş hayvanların yetiştirildiğinde ahırlarda en ideal nem oranı % 50-75 olarak saptanmıştır. Daha yüksek ve daha düşük nem değerlerinde hayvanlar strese girer, verim düşerek hayvanların hastalıklara hassasiyeti artar.

Bal arılarının koku alma duyusu üzerinde yapılan araştırmada değişen neme bağlı olarak verimin olumlu yönde etkilendiği belirlenmiştir. Arıların neme karşı duyarlılık gösteren higroskopik özellikli antenleri, nemli ortamlarda hareketliliklerinin artmasına sebep olmaktadır (Resch vd., 1997). Kovanlarda yavru çıkarma dönemi olan bahar ve yaz aylarında kurtçukların ölmemesi için neme daha çok ihtiyaç duyarlar.

Nem artışı, metal yüzeylerin paslanmasına, gıdaların ve ahşap malzemelerin çürümesine, elektronik eşyaların kısa devre yaparak bozulmasına, bina statiğinin zayıflamasına, kültür ve sanat eserlerinin zarar görmesine, mikroorganizmaların

üremesine sebep olur. Müzelerde objelerin korunması ve tahrip olmasını engelleyici, birtakım tedbirler alınır. Müze objelerinin korunmasındaki pek çok sorunun kaynağı nemdir. Müze içinde aşırı ıslak yapılan yer temizliği, yoğun şekilde yapılan ziyaretçi grupların nefesleri, müze içinde yetersiz ısıtmadan kaynaklanan yoğuşma, onarım gerektiren ve sızıntıya sebep olan tesisatlar nemin ortamdaki artış sebebi olarak gösterilebilir. Objelerin sağlıklı şekilde korunup saklanması için nemin belli aralıklarla ölçülmesi ve sürekli kontrol altında tutulması gerekir.

Müzelerdeki bağıl nemin saptanması için ayar gerektiren Higrometre ve Thermohigrograf ile ayar gerektirmeyen Psikometre kullanılır. Ayar gerektiren nem ölçerler bağıl nemi doğrudan alet üzerinde okunmasına fırsat verir. Vitrin içine yerleştirilerek ayda bir kere ayarlama yapılarak kullanılabilir. Ayar gerektirmeyen Psikometre ise bağıl nem düzeyini bir tablo kullanarak hesaplanması ile saptar ve vitrin içinde kullanılmaz. Yaz aylarında oluşan aşırı nem objeler üzerinde genleşme sonucu biçim değişikliğine ve mikrobiyolojik üremeye neden olurken, kış aylarındaki kuru hava objeler üzerinde deformasyona sebep olacak çatlamalara neden olur. Organik malzemeden oluşan eserler (ahşap, kâğıt, deri, parşömen, kemik vs.) bitkisel ve hayvansal kökenli olup bol miktarda karbon taşıdığından higroskopik özellik gösterirler. Higroskopik bu eserler kuru ise havadan nem emerler ya da hava kuru ise havaya nem verirler. Nem farklılaşmasının sonucu olarak da eserler üzerinde boyut değişikliği gözlenir. Organik malzemeli eserlerin korunması için müze içinde bağıl nemin % 50-65 arasında tutulması gerekir. İnorganik malzemelerden oluşan eserler ise higroskopik özellik göstermediklerinden dolayı ortam ile nem alışverişi yapmazlar ve boyut değişikliği göstermezler. Çizelge 1.1'de müze içindeki bazı eserler için gerekli nem aralıkları belirtilmiştir. İnorganik malzemeli eserlerin korunması için eserlerin bulunduğu ortamda bağıl nemin % 45'in altında tutulması gerekir (Poyraz, 2008). Bu yüzden sıcak iklime sahip bölgelerde soğutucu etkisi olan nem gidericiler, soğuk iklime sahip bölgelerde ise hava nemini emerek lityum klorür içinden geçirip nemin düşmesini sağlayan kurutucu etkisi olan nem gidericiler kullanılır.

**Çizelge 1.1. Müzede bulunan eserlerde önerilen nem aralıkları**

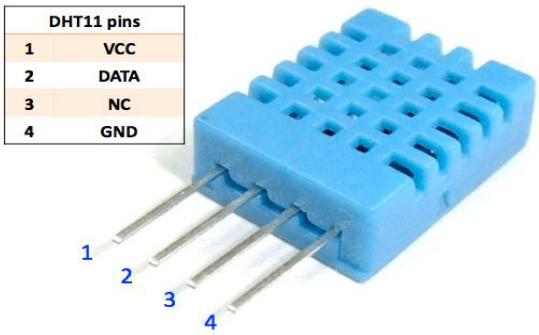
| Eserin cinsi | Önerilen Bağıl Nem Değerleri |
|---|---|
| Taş eserler | % 20-30 |
| Kemik eserler | % 40-60 |
| Dokuma eserler | % 30-50 |
| Deri eserler | % 40-60 |
| Metal eserler | % 30 |

Evlerde kullanılan mikrodalga fırınlar, yiyecek içindeki su moleküllerinin titreştirilmesi yöntemiyle pişirmeyi sağlar ve radyo dalgalarını kullanır. Mikrodalga cihazlarının içinde şebeke akımını elektronik dalgalara (mikrodalga) çeviren magretron bulunur. Mikrodalgalar ilk kez 1945 yılında radar olarak kullanılması düşünülen magretronun keşfedilmesi ile ortaya çıkmıştır. Magretron, anot olarak görev yapan büyük bakır bir bloktan oluşur. Anot bloğunun içinde ısıtıcı flaman iletkenleri ile taşınımı gerçekleşen silindirik özelliğe sahip katot blok vardır ve yüksek emilim hızına sahiptir. Magretron doğru akımlı elektrik enerjisini mikrodalgalara dönüştürür. Mikrodalga içinde oluşan bu dalgalar cihazın içinde eşit olarak dağılır ve cihazın metal iç duvarından yansıtılır. Mikrodalga enerjisi malzemenin içinde bulunan su moleküllerini titreştirerek ısı enerjisine dönüştürür böylece malzemenin pişmesi için gerekli ısı sağlanmış olur (Celep ve Özcan, 2011; Anonim, 2018b). Mikrodalga nem sensörü, suyun mikrodalga enerjisini absorbe eder ve absorbe edilen enerji miktarı bize malzeme içindeki su miktarını verir. Absorbe edilen enerji süresi yiyeceklerin sahip olduğu su miktarına göre değişir. Daha geniş bir ifade ile mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun radyo dalgaları ile kızıl ötesi ışınlar arasındaki bölümde çalışma gösterir. 1 GHz ile 1000 GHz aralığında frekansa sahip olup, dalga boyları 0,1 cm-100 cm olan elektromanyetik dalgalardır. Frekans ile dalga boyu arasında ters bir ilişki olup yüksek frekanslı dalgalar kısa dalga boyuna, düşük frekanslı dalgalar yüksek dalga boyuna sahiptir. Normal fırınlarda ışık kapaktaki gözeneklerden rahatlıkla dışarıya çıkabilir ve fırının içi rahatlıkla gözlenebilir çünkü buradaki ışığın frekansı büyük dolayısıyla dalga boyu küçüktür. Ancak mikrodalgalarda kullanılan elektromanyetik dalganın frekansı düşük, dalga boyu büyüktür bu yüzden yüksek dalga boyuna sahip dalgalar kapaktaki gözeneklerden geçemez ve tekrar içeri yansırlar. Mikrodalga fırınlar su moleküllerinin rezonans frekansı olan 2,45 GHz

frekans aralığında çalışırlar ve bu mikrodalga ışıması en çok su tarafından soğrulur. Mikrodalga içine konulan yiyecekler azda olsa su içerdiğinden ışıma emilimi sonrasında ısınır ancak yiyeceklerin konulduğu kaplar su içermediğinden ısınma gerçekleşmez. Bu frekans aralığındaki dalgalar su ve bazı maddelerce emilir sonrasında dalgalar maddelerin moleküllerini atomik olarak harekete geçirir, mikrodalga enerjisi ısıya dönüştürülmüş olur. Mikrodalgalarda çoğunlukla sağlamlık, güvenilirlik, kullanılabilirlik ve sahip olduğu dijital teknoloji sayesinde genellikle Hydronix nem sensörleri kullanılır. Hydronix mikrodalga nem sensörleri sahip oldukları dahili hafıza ve dijital gösterge sayesinde malzemenin ortalama nem değeri hakkında biz kullanıcılara bilgi verir (Anonim, 2018c).

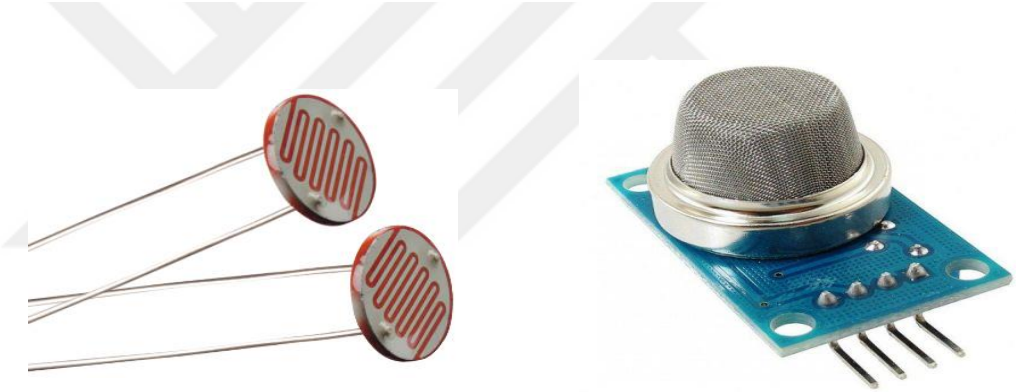
Çamaşır kurutucuları yıkanan çamaşır üzerine rezistans yardımı ile sıcak hava üfleyerek çamaşırların üzerindeki suyun buharlaşmasını sağlar böylece çamaşırlar istenen seviyede kurutulur. Çamaşırlardaki nem seviyesi tambur kanat saçı ile tambur arasına yerleştirilen nem sensörü ile ölçülür. Tamburdaki nem sensörü mikroişlemciye gönderdiği sinyallere göre program cihazı uygun programı sağlar. Yıkanan çamaşırlar üzerinde bulunan nem seviyesi nem sensör plakaları arasında direnç ölçümü ile belirlenir. Kullanılan sensör plakaları tespit ettiği gerilimi kontrol kartlarına iletir ve böylece çamaşırlarımız ekstra kuru, normal kuru ve ütü kuruluğunda kurutulur. Çamaşır üstüne üflenen havanın nemi alındığı için, kurutma daha kısa sürede tamamlanır ve daha az enerji sarfiyatı sağlanır.

Evlerde kullanılan cihazların ve bulunduğumuz ortamların akıllı hale gelmesi günümüz şartlarında hız kazanmıştır. Akıllı ev sistemlerinde birçok sensör kullanılır ve bu sensörlerin hepsi eş zamanlı olarak veri akışını sağlar. Ev ortamlarında ortaya çıkabilecek yangın, gaz kaçağı, hırsızlık vs. gibi tüm olası olaylar kullanılan sensörler aracılığı ile tespit edilir. Bu uygulama daha az insan müdahalesi ile gündelik hayatta insanlara konforlu bir yaşamı ve güvenliği getirir (Stephen ve Larson, 2004). İnsanlara sunulan bu protatif evler insanlar üzerindeki sorumluluğu azaltır ve insan kaynaklı kazaları önlemiş olur. Günümüzde sıkça kullanılan bu ev sistemlerinde sensör kullanımı tercih edilerek günlük hareketlerin takibi yapılır ve evde yaşayan kişilerin elektrik tüketimi kontrol altına alınmış olur. Şekil 1.1'de örnek olarak akıllı ev sistemlerinde kullanılan sıcaklık nem sensörü (DHT11) görülmektedir. Bu sensör yardımı ile fanlar çalıştırılabilir, pencerelerin açılıp kapanması kontrol edilebilir.




**Şekil 1.1. DHT 11 Sıcaklık nem sensörü (Anonim, 2018d)**

Otomatik ışıklandırma için LDR (Light Dependent Resistor), gaz kaçağını kontrol altına alabilmek için gaz sensörü olarak kullanılan (MQ-2) sensörü Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Kullanılan tüm sensörler bir karta entegre edilerek sistemin çalışması kontrol edilir.



**Şekil 1.2. LDR aydınlatma sensörü, MQ gaz sensörü (Anonim, 2018e)**

Gıda, ilaç, tekstil, endüstri gibi birçok alanda ortaya çıkan çevresel değişkenler ürünlerin kalitesini ve ömrünü olumsuz yönde etkileyebilir. Çevresel değişimleri kontrol altında tutmak ve oluşabilecek sıkıntıların önüne geçmek için ortam şartlarının sürekli ve periyodik olarak ölçülmesi gerekir. Sıcaklık ve nem değerleri fabrikalarda kullanılan birçok cihazın çalışmasını olumsuz yönde etkileyen önemli çevresel faktörlerden biridir. Nem ölçüm uygulamaları çok geniş alanlarda kullanılmaktadır. Tarımda, ısıtma-soğutma (iklimlendirme) sistemlerinde, endüstriyel alanlarda, üretim tesislerinde, depolama alanlarında ve taşıma araçlarındaki koşulları değerlendirmede, saunalarda, seralarda, meteorolojide, nem konusunda hassas ürün ve cihazları korumak için nem kontrolü yaygın olarak yapılır. Hassas tarım uygulamalarının

kullanılması, toprağın mevcut durumunun doğru şekilde belirlenip saptanan ihtiyaçlar doğrultusunda uygulamaların yapılmasını içerir. Üretici kullandığı ürün ve uygulama yapacağı arazinin tüm özelliklerini bilmek ister, bunun içinde elektronik verim izleme ve kayıt sistemlerinden yararlanır. Taneli ürünler için hacimsel esaslı sensörler, domates, patates gibi ürünler için konveyöre bağlı yük sensörleri kullanılır. Ürünün ekileceği tarladaki bölgesel farklılıkların tespiti için değişken esaslı (sensor-based) VRA sistemi kullanılır (Seelan vd., 2003). VRA, gübreleme, sulama ve ilaçlama gibi değişkenlerin etkisini arttırmak için bilgi sunan sistemdir. Bu sistem ürün ve toprak yapısı ile ilgili tüm değişiklikleri algılayarak bilgisayara gönderme şeklinde çalışır. Ürün veriminde nem tek başına yeterli olmasa da önemli bir faktör olarak görülür. Sulamanın toprak nemine bağlı olarak yapılması nem değişiminin farklı sensörlerle izlenmesini gerekli kılar. Bu amaçla Schmitz ve Saurell (2000) kablosuz olarak veri aktarabilen tansiyometre, TDR (Time Domain Reflectometer), EC (Elektriksel iletkenlik), GMS (Granular Matrix Sensor) gibi toprak nemini hızlı ve güvenilir ölçen sensörler hakkında incelemeler yaparak hassas ölçüm için kalibrasyon çalışması yapılması konusunda fikir geliştirmiştir. Damla sulama yöntemi ile sulama programlaması amacıyla Thompson ve ark. (2006) özel bir sensör olan Watermark 200SS ile elektronik tansiyometrelerin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Doğrusal ve dairesel hareket eden sulama sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmış, uzaktan algılama ve hava koşulları verilerini kullanarak sulama sıklığını ayarlayabilen kablosuz sensörler üzerinde araştırma yapmıştır (Evans ve Bergman, 2003). Kablosuz nem sensörleri, sulama uygulamalarında, değişken düzeyli uygulama alanlarında ve üreticilere veri tedarikinde sıklıkla tercih edilir.

Sera içlerinin etkili şekilde kullanılması için sera içindeki ve dışındaki değişkenlerin kontrol altına alınması gerekir. Tüm bu uygulamalar için kullanılacak en etkili yöntem sensör kullanımıdır. Sensörler istenen bilgiyi seçip ölçülebilir bir forma dönüştüren devre elemanlarıdır. Sera içinde sıcaklık önemli bir değişken olup metal ve yarıiletkenlerin sıcaklık karşısında direnç değişimi prensibine bağlı olarak çalışan termorezistif dönüştürücüler (NTC-PTC) kullanılır. Sera içinde toprak nemini ve bağıl nemi ölçmek içinde nem sensörlerine ihtiyaç duyulur. Sera içi nem miktarının tespiti için genellikle kapasitif nem sensörleri kullanılır (Ciğer, 2010). Sera içi havalandırma işlemi sera içinde sıcaklığın yükselmesinin önlenmesi ve bağıl nemin kontrol altına alınması fotosentez için gerekli gazların uygun şekilde sağlanması açısından

önemlidir. Nispi nem yükselirken sera içi sıcaklık da azalırsa bitki yapraklarının yüzeyinde mantar türü hastalıkların artışına sebep olur. Havadaki su buharı olarak ifade edilen nem, birçok endüstriyel alanda kullanıldığı gibi insan rahatlığı içinde son derece önemlidir. Yapılan fiziksel, kimyasal, biyolojik birçok işlemde su buharı oldukça önemli bir unsurdur. Endüstrideki ölçüm kritik önem taşır. Ölçüm sonuçları hem ürünün işletme maliyetini hem de çalışanların sağlığını ve güvenliğini etkiler. Nemin kontrol edilmesi, denetlenmesi endüstriyel alanlarda ve evsel uygulamalarda büyük önem taşır. Tıbbi uygulamalarda, solunum ekipmanlarında, sterilizatörde, biyolojik ürünlerde, kimyasal gaz arıtım işlemlerinde, kurutuculardа, film kurutma ve gıda işleme alanlarında, tarımda çiğ önleme işlemlerinde, toprak nemi izlemede, ev uygulamalarında mikrodalgada, fırında pişirme kontrolü için nem denetimi yapılır. Bütün bu uygulamalarda ortamdaki nem seviyesinin bir göstergesi olarak nem sensörleri kullanılır. Gıda sektöründe ambalajlama işlemi içindeki ürünü korumak, stoklama ve kullanım kolaylığı sunmak açısından büyük önem taşır. Gıda ambalajlanmasında ürünlerin tazeliğini korumak, mikrobiyal bozulma olup olmadığını tespit etmek, oksidatif acılaşma ve sıcaklığa bağlı bozulmaların tespiti için sensörler kullanılır (Gök, 2007). Ambalajın tepe boşluğunda bırakılan gaz molekülleri gaz sensörleri ile ölçülerek gıdanın niteliği hakkında bilgi verir. Ambalanjlanmış gıdalardaki biyolojik değişimleri belirlemek için ayrıca biyosensörler kullanılır. Biyosensörlere örnek olarak SIRA Tecnologies (California, USA) firması tarafından geliştirilen Food Sentinel System $^{TM}$ (FSS) verilebilir. Bu sistem gıda ambalajındaki patojenleri sürekli algılama özelliğine sahip biyosensör sistemidir. FSS biyosensör uygulamasında, barkotun membran kısmına özel bir patojen antikoru yerleştirilir ve mikrobiyal bir değişim gerçekleştiğinde barkot üzerinde siyah bir yapının oluşmasına neden olur (Yam, vd., 2005; Kerry, vd., 2006; Yezza, 2008).

Teknolojinin oluşturduğu tüm yeniliklerin doğa ve çevre dostu olması günümüzde büyük önem taşımaktadır. Tüm endüstriyel ve evsel amaçlı üretilen ürünlerde yapılan yenilikler ürünleri; fonksiyonel, güvenli, akıllı ve verimli olmaya zorlamaktadır. Üretilen makinelerin bulunduğu ortamdaki tüm değişimleri algılayan türden olması için aynı anlama gelen algılayıcılar yani nem sensörleri kullanılır. Beyaz eşya endüstrisi de sensör alanındaki değişmelerin çıktılarından yararlanır. Sensörler üretim teknolojisindeki gelişim sayesinde boyut olarak küçülür ve üretilen ürünlere entegrasyonu kolaylaşır. Ürünlerini müşteriye katma değer katacak şekilde piyasaya

sürmek yeni teknolojide rekabette üstünlük yaratır. Ayrıca bu entegrasyon işlemi, evde ve endüstride kullanılan tüm makinelerde enerji verimliliği, güvenlik, performans artışı ve müşteri memnuniyeti sağlar

# 2. TEORİ

Yapılan bu tez çalışmasının teori kısmında nem, nem sensörü, nem sensörü çeşitleri ve çalışma prensipleri ile ilgili bilgi verilecektir.

## 2.1. Havadaki Nem

Nem ile ilgili yapılan çalışmalar hızlı bir şekilde ilerlemiş nemin insan konforu, endüstriyel çalışmalar ve evsel uygulamalardaki önemi gün geçtikçe önem kazanmıştır. Nem sıcaklığı dengeleyici bir özelliğe sahiptir. Aşırı ısınma ve soğumayı engelleyerek yaşam kalitesini arttırır. Nem, kısaca havadaki su miktarı olarak tanımlanır. Yapılan endüstriyel çalışmalarda nemin doğru şekilde ayarlanması uygulanan ürünün kalitesi açısından önemli bir ölçü oluşturur. Nem seviyesinin doğru şekilde ayarlanması enerji tasarrufu için bize büyük fırsat sunar. Havadaki nem "higrometre" adı verilen bir aletle ölçülür. Nem miktarı sıcaklık, su kütlesinin yüzey genişliği, yükselti, rüzgâr ve buharlaşma şiddeti gibi birçok faktörden etkilenir. Havadaki nem mutlak nem ve bağıl nem olmak üzere iki şekilde ele alınarak incelenir.

### 2.1.1. Mutlak nem

Havanın birim hacmi ($cm^3$ veya $m^3$) başına düşen su buharının gram (g) cinsinden ağırlığıdır. Diğer bir ifade ile mutlak nem atmosfer içindeki su buharı miktarı olarak tanımlanır. Mutlak nem ile su buharı içeriğinin değeri doğrudan ölçülebilir. Sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişen bu değer $\mu/_{m^3}$ .veya $g/_{cm^3}$ birimine sahiptir.

$$Mutlak\ nem = m_v / v \tag{2.1}$$

Denklem 2.1'de $m_v$; su buharı kütlesini (g), V; hava hacmini ($cm^3$ veya $m^3$) ifade etmektedir. $PPM_v$ (Parts per million by volume), $PPM_w$ (Parts million by weight),

D / F (Dew point / Frost point) ifadeleri de mutlak nem ifadeleri olarak kullanılmaktadır. $PPM_v$; birim kuru gaz hacmi başına düşen su buharı içeriği hacmini, $PPM_{w;}$ birim kuru gaz kütlesi başına düşen su buharı kütlesini, çiğlenlenme noktası (Dew point); gazın su buharı içeriğinin sıvı suya yoğunlaşmaya başladığı sıcaklıklığı ($0^{\circ}C$'nin üstünde), donma noktası (Frost point); bir gazdaki su buharının buza dönüştüğü sıcaklıklığı ($0\ ^{\circ}C$'nin altında) ifade eder (Alonaly, 2008; Farahani, 2014).

Çiğlenme noktası başka bir ifade ile, doymuş su buharı basıncının su buharının kısmi basıncına eşit olduğu sıcaklık olarak gösterilir. Çiğlenme ve donma noktası parametreleri gaz basıncının bir fonksiyonu olarak ifade edilir ve sıcaklıktan bağımsızdır. Ortamdaki su buharı miktarına ve basınca bağlı olarak değişim gösterir. PPM mutlak ölçümleri, sıcaklık ve basınçla değişim göstermeyen sabit ölçüm değerleridir.

### 2.1.2. Bağıl nem

Havanın nem miktarının, havanın aynı sıcaklıkta ve basınçta tutabileceği doygunluk nem seviyesine oranı olarak tanımlanır. Doygunluk nemi, sıcaklığın bir fonksiyonudur ve $1m^3$ havanın taşıyabileceği maksimum nem miktarını ifade eder. Havanın taşıyabileceği belli bir nem değeri vardır. Sıcaklık artışına bağlı olarak hava genişler ve taşıyabileceği nem miktarında artış olur. Tam tersi düşünüldüğünde sıcaklık azalışına bağlı olarak soğuyan havanın nem taşıma kapasitesi düşer ve ortamın nem artışı devam ettirilirse yağış oluşur. Doygunluk nemi sıcaklıkla doğru orantılı olacak şekilde değişim gösterir. Bağıl nem (Relative Humiditiy, RH) sıcaklığa bağlı bir büyüklüktür ve göreceli bir ölçümü ifade eder.

$$RH(\%) = \frac{P_W}{P_{S\,(t)}} .100 \qquad (2.2)$$

Denklem 2.2'de belirtilen parametrelerden $P_{w;}$ havadaki nem miktarının gerçek kısmi basıncını, $P_s$; aynı sıcaklığa sahip nemli havanın doygunluk basıncını gösterir. Kısmi basınçlı su buharı olan ($P_w$), ortama su buharının eklenip ortamdaki su buharının çıkartılmasından ve sistem basıncındaki değişimden etkilenir. Doygunluk buhar basıncı ($P_s$), ise sadece sıcaklıktan etkilenir ve basınç birimleri cinsinden (Bar, kPa)

ifade edilir. Bağıl nem yüzde olarak birimlendirilir ve sıcaklıkla ters orantılıdır. Bağıl nem ifadesi endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Belli sıcaklıkta havadaki buharlaşma ile yoğunlaşmanın ne kadar dengede olduğunu gösterir. Bağıl nem küçüldükçe havaya buharlaşma ile salınan su buharı miktarı artar. Bağıl nem arttıkça kişide cilt kuruluğu, azaldıkça insan vücudunda terleme gibi sağlık sıkıntıları ortaya çıkar. Hava her zaman taşıyabileceği kadar nem yüklemez yani ortamda havanın alabileceği kadar su buharı olmadığı durumlarda nem açığı ortaya çıkar. Nem açığının kapanması için hava sıcaklığının azalması havadaki nem oranının artması gerekir. Doyma açığı olan hava (mutlak nem miktarı az), buharlaşma ile ya da mutlak nem miktarı kendisinden fazla olan bir hava akımıyla karşılaştığında birbiri ile karışarak mutlak nem açığını kapatır ve hava kütlesinin sıcaklığı değişmeden nem kazandığı için bağıl nem artar. Hava kütlesi kendisinden daha soğuk bir hava akımı ile karşılaşırsa var olan sıcaklığı düşüş gösterir ve nem miktarı değişmediği için bağıl nem artışı olur. Havanın doyma miktarı ile bağıl nem ters orantılı olarak işlev gösterir (Coşkun, 2003; Farahani, 2014; Fraden, 2010).

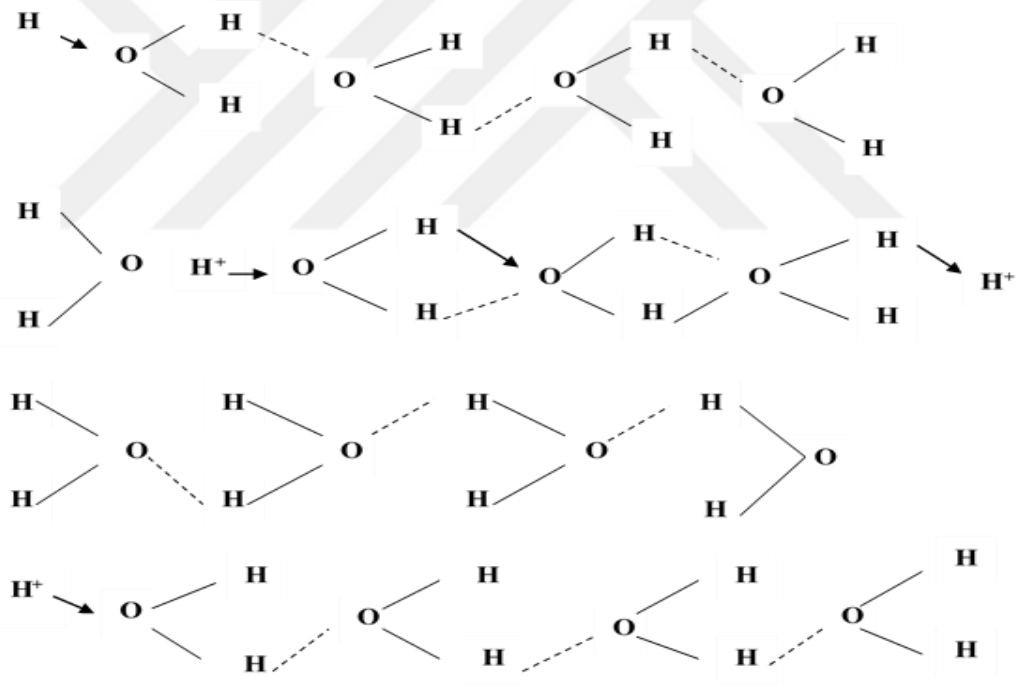
## 2.2. Nem Sensörü

Nem ölçümü için kullanılan nem sensörleri su emme özelliğine bağlı olarak elektriksel parametrelerinde değişim meydana gelen malzemelerden üretilir. Bu özellik kullanılarak birçok alanda etkili şekilde kullanılan seramik ve polimerik sensörler üretilir. Seramik nem sensörleri fiziksel ve kimyasal olarak daha kararlı olduklarından diğer sensörlere göre daha caziptir. Nem sensörleri, su moleküllerinin adsorbsiyonu prensibine göre çalışırlar ve nemin fonksiyonu olarak suyun adsorbe edildiği tabakanın özelliklerinde değişimler meydana gelir. Düşük nem ortamında su molekülleri sensör yüzeyinde kimyasal olarak emilir ve hidronyum ($H_3O^+$) grupları oluşur. Adsorbe edilen ilk su molekülleri yüzeyde yük taşıyıcı olarak görev yapar. Su moleküllerinin emilimi devam ettikçe kümelenme başlar. Bu kümelenme sıvı benzeri hidrojen bağlı su moleküllerin oluşturduğu çok katmanlı bir film şeklindedir (Yuk & Troczynski, 2003). Bu filmler içindeki her bir su molekülü bir hidroksit grubuna bağlıdır. $H_3O^+$'nın $H_2O$ ve $H^{+'}$ ya ayrışması, yüksek nemli ortamlarda $H^+$'' nın yük taşıyıcı olarak kendine göstermesine sebep olur

### 2.2.1. Nem sensörünün çalışma prensibi

Nem sensörleri, algılama ilkelerine göre çeşitlilik gösterse de çalışma prensibi yüzeydeki su moleküllerinin soğurulması esasına dayanır. Soğurma işlemi gaz fazına geçmiş su moleküllerinin yüzeye tutunarak emilmesi şeklinde gerçekleşir. 1804 yılında Theodor Von Grotthuss hidrojen bağlı suyun zincirlerinde proton ($H^+$) iletimi için bir mekanizma önerdi (Grotthuss, 1806; Cukierman, 2005; Miyake ve Rolandi, 2016). 1806 yılında da sıvıların elektrik akımına etkisi ile ayrışması üzerinde çalışmalar yaparak suyun iletkenliği teorisini ortaya çıkardı. Yaptığı çalışmasına kendi adından yola çıkarak Grotthuss (proton transferi) mekanizması adını verdi. Grotthuss mekanizmasında iletim, protonların ($H^+$) bir su molekülünden diğerine hidrojen bağı üzerinden sıçraması ile oluşur (Nenov ve Yordanov, 1996; Kavasoğlu vd., 2005). Proton ($H^+$) iyonunun sahip olduğu iç enerji nem algılamada önemlidir. Proton ile çevresini saran elektron ($e^-$) bulutu arasındaki kuvvetli etkileşim protonun kristal yapı içinde tek başına taşınımını engellemektedir. Katı içindeki taşınımı daha çok moleküler difüzyonla yapılmaktadır. Grotthuss mekanizması gerçekleştirilirken sadece proton hareketlidir, oksijen iyonu hareketsiz olup protonun kristalografik konumuna yakın konumda bulunur (Sata vd., 1999; Alberti ve Casciola, 2001; Khromushin vd., 2002). Nem sensöründe nemin algılanması protonun difüzyonu, moleküllerin yönelmesi ve protonların yer değiştirilmesi basamakları ile gerçekleşir. Su molekülünün sahip olduğu atom ve moleküllere katı yüzey tarafından çekim kuvveti uygulaması şeklinde nem algılama işlemi başlamış olur (Fiziksel soğurma). Metal oksitler kullanılarak hazırlanmış iyonik iletkenliğe sahip nem sensörlerinde serbest taşıyıcılar buhar fazında bulunan su moleküllerinin fiziksel soğurma sonucu oluşturduğu protonlardır. Fiziksel soğurma olayı kimyasal soğurma sonucu su moleküllerinin yüzeyde oluşturdukları hidroksil tabakasının üstünde oluşur. Fiziksel soğurmaya uğrayan ilk su tabakası yüzeyde bulunan iki hidroksile iki hidrojenle bağlanırken, ikinci tabakadaki su molekülleri alt tabakaya tek hidrojen bağı ile bağlanır ve bu olay Grotthuss mekanizmasının gerçekleşmesine zemin hazırlar (McCafferty ve Zettlemayer, 1971; Kavasoğlu, 2001). Atom, molekül ve iyonların bir konumdan başka bir konuma hareket edebilmeleri için sahip olmaları gereken aktivasyon enerjisine bağlı kimyasal bağ oluşumu ile gerçekleşen emilim kimyasal soğurma olarak tanımlanır. Kimyasal soğurma, fiziksel soğurma sürecine göre daha hızlı

gerçekleşir ve sıcaklıkla doğru orantılı olacak şekilde değişim gösterir. Adsorpsiyon miktarı, emilimin gerçekleştiği katı yüzey özelliğine ve soğrulan gaz molekülünün yapısına bağlı olarak değişir (Qu ve Meyer, 1997). Soğurma miktarı, yüzeyi oluşturan katının ve soğrulan gaz moleküllerinin özgün özelliklerine bağlı olup sıcaklığın, derişimin ve basıncın bir fonksiyonudur. Soğurma işleminin gerçekleştiği yüzey heterojen ise moleküllerin bağlanma enerjisinde azalma gözlenir (Alberty, 1987: Decaursey, 2002). Su buharının fiziksel adsorpsiyonu 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleşirken, su moleküllerinin yüzeyde çarpışması ve kendiliğinden iyonlaşması ile proton ($H^+$) ve hidroksil ($OH^-$) birbirinden ayrılır. Nem içeriğinin düşük olduğu yüzeyde yük yoğunlaşır ve yüksek elektrostatik alan meydana gelir. Bu oluşum su moleküllerini kimyasal soğurmaya elverişli hale getirir ve suyun ayrışması ile yük taşıyıcı olarak görev yapan protonların oluşmasına zemin hazırlar (Yamagchi vd., 2000).



**Şekil 2.1. Grotthuss mekanizması proton transferi (Cukiermen, 2005).**

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi dört su molekülü birbirine hidrojen bağları ile bağlı olup, proton ($H^+$) aktarımı soldan sağa doğru gerçekleşir. Birinci zincirde bağlı olan proton ($H^+$), ilk $H_2O$ (su) molekülünün oksijenine tutunarak zincir sonunda OH kovalent bağın oluşmasını sağlar. Kovalent bağ oluşturan oksijene bağlı protonlar $H_5O_2$ (Zundel katyon)'yi yani protonlanmış su dimeri oluşturur. Başlangıçta $H^+$ iyonu veren molekül 2'nci zinciri oluşturmak için tersine döner ve $H^+$ iyonu zincirin sonunda bulunan su

molekülünün ucuna bırakılır. Böylece zincirin sahip olduğu toplam dipol momemt tersine çevrilmiş olur. 4'üncü zincirde dışarıdan $H^+$ protonu transfer edilir ve başlangıçta olduğu gibi dört su molekülünün oluşumu sağlanır.

Gerçekleşen çevrim sırasında farklı sıcaklıklarda $H^+$ aktarımı gerçekleşir ve konum değişikliği için gerekli olan aktivasyon enerjisi arasında tutarsızlıklar oluşur. Sıcaklık azaldıkça iyonların sahip olduğu aktivasyon enerjisi ters orantılı olarak artış gösterir. Düşük sıcaklıkta su molekülünün yeniden oluşması için $H_3O^+$ molekülünün ilk çözülme kabuğundaki dört hidrojen bağının eşzamanlı olarak kırılması gerekir. Bu aşamanın ardından sahip olunan aktivasyon enerjisi $H^+$ iyonunun hareketliliğini aşar. Yüksek sıcaklıklarda suyun yeniden oluşumu için sahip olunan hidrojen bağları kaybedilerek aktivasyon enerjisinde azalma oluşması sağlanır. Proton yüzeyde difüze edilirken oluşan gaz, proton aktarımı için gerekli olan $H_2O$ molekülünün doğal zincirini bozar ve $H^+$ hareketini yavaşlatır (Cukiermen, 2005). İyonlar transfer sırasında hidrojene bağlı kümelere bağlanarak hareket eder ve bağlanma gücü arttıkça göç olayı hızlanır. Hidrojen bağlanma gücü arttıkça O-O arasındaki mesafe kısalır ve moleküller arası transfer kolaylaşır. $H^+$ transferi sırasında alıcı su molekülleri arasında bulunan hidrojen bağları kısalırken, verici su molekülleri arasındaki hidrojen bağları uzar.

Sonuç olarak proton taşınımı, $H_3O^+$ iyonunun kendisine en yakın su molekülüne $H^+$ vermesi ve protonu alan $H_2O$ molekülünün kendisinde var olan diğer bir $H^+$ protonunu serbest bırakması şeklinde gerçekleşir (Yamagchi vd., 2000). Yüzeyde algılanan nem içeriği arttıkça, su gözenekler içinde yoğunlaşır ve adsorbe edilen tabakalarda $H^+$ taşınımı gerçekleşir. Nem sensöründe yüzeyce soğurulan su, malzemenin yüzey / hacim oranında yoğunlaşır ve iletkenlik yüzeyde oluşan protonlarca sağlanır. Neme maruz kalan protonlar elektrik iletkenliğinden sorumlu hale gelir. Nem sensörünün doğru, hassas ölçüm yapabilmesi için sahip olması gereken bazı özellikler vardır. Bir nem sensörünün sahip olması gerekli başlıca nitelikler Çizelge 2.1'de belirtilmiştir.

**Çizelge 2.1. Nem sensörünün sahip olması gereken özellikler (Dinç, 2013)**

| |
|---|
| 1.Geniş bir nem aralığına ve kalibrasyon özelliğine sahip olmalı |
| 2.Kısa sürede cevap vermeli ve tekrarlanabilir olmalı |
| 3.Dayanıklı, uzun ömürlü ve düşük maliyetli olmalı |
| 4.Neme karşı elektriksel özellikleri değişmeli |
| 5. Sıcaklığa karşı gösterdiği bağlılık ihmal edilebilmeli |
| 6. Geniş bir bağıl nem aralığına sahip olmalı |

Nem sensörleri nem ölçümünde kullanılarak hassas ölçümler ile daha net sonuç alınmasına ve iş verimliliğinin artmasına yardımcı olur. Nem ölçümü üretim şartlarını iyileştirmede, yüksek su buharı ve yoğuşma ile oluşabilecek problemlerin önüne geçilmesinde önemli rol oynamaktadır.

### 2.2.2. Nem sensörü çeşitleri

Nem ölçüm yöntemi ortam şartlarına bağlı olarak kullanıcı tarafından seçilir. Ortamın açık ya da kapalı olmasına bakılmaksızın farklı uygulama alanına sahip nem sensörleri farklı çalışma koşulları nedeniyle birbirinden farklı higroskopik algılama malzemesine ve çalışma prensibine sahiptir. Çeşitli nem değerlendirme çalışmalarında ölçülecek özellikler dikkate alınarak mutlak ve bağıl nem ölçümleri yaygın olarak kullanılır. Mutlak nem uygulamaları daha çok çevre analiz çalışmalarında ve kişisel ölçümlerde kullanılırken, bağıl nem tüm endüstriyel alanlarda geniş yer kaplar. Nem çekme özelliğine sahip malzemeler kullanılarak mekaniksel ve elektriksel ölçümlere dayalı olarak hazırlanan nem ölçerler higrometre olarak adlandırılır. Higrometreler bilgileri hafızasında belli zaman aralıklarıyla kaydetmekte, geriye dönük gözlem ve karşılaştırma yapma imkânı sağlamaktadır.

Higrometrelerin uzunluk, hacim, gerilim gibi mekaniksel özellikleri, direnç kapasitans ve frekans gibi elektriksel değişimlerin algılamasını sağlayan türleri mevcuttur.

Amaca uygun sensör seçimi yapılması sonuca daha erken ulaşılmasını sağlar. Mekanik bir makineyi ya da elektronik bir devreyi çalıştırmak için fiziksel ortam değişikliklerini algılayan sensörler ve algıladığı bilgileri elektrik enerjisine çeviren transdüser kullanılır. Sensörleri besleme gerilimine göre pasif ve aktif nem sensörleri; ölçülen özelliğin çıkış büyüklüğüne göre analog ve dijital nem sensörleri olarak incelemek de mümkündür. Algılama tekniğine bağlı olarak en temel higrometreler, psikometrik ve kapasitif nem sensörleridir. Bağıl nemi doğrudan ölçen ve ısı değişimi prensibine göre çalışan psikometrik yöntemlerden biri 'Psikometre' dir. Sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonu olarak ele alınan havadaki su miktarı konsantrasyonu psikometri alanına girer (Rittersma, 2002). Nemli gazların sıcaklık özelliklerini ele alan psikometri, sadece havadaki ve taşıyıcı gazlardaki su buharı miktarını inceler. Psikometre, iki bağımsız sıcaklık probundan oluşur. Bir tanesi ıslak hazneli, diğeri kuru hazneli termometre probu olarak kullanılır. Kuru hazneli termometre probu, atmosferik havanın normal termometre sıcaklığını ifade ederken; yaş hazneli termometre probu, havanın nem değerine bağlı olarak ıslak yüzeylerden buharlaşma derecesini ifade eder. Psikometre, kuru ve yaş hazneli termometreler arasındaki sıcaklık farkının bir göstergesi olarak tanımlanır (Bozkurt ve Kantayı, 1990). Ölçüm yapılırken ıslık hazneli termometre içinde kullanılan bez ya da pamuk ıslatılır ve her iki termometreye de hava akımı buhar üreticisi yardımıyla verilir. Buharlaşmanın gerçekleşmesiyle birlikte ıslak hazneli termometre ile kuru hazneli termometre arasında sıcaklık farkı oluşur. Islak hazneli termometrenin gösterdiği sıcaklık değeri buharlaşmadan dolayı kuru hazneli termometrenin gösterdiği değerden küçük olur. İki termometre arasındaki sıcaklık farkı ne kadar fazla ise hava o kadar kuru yani bağıl nem küçük, fark ne kadar az ise hava o kadar nemli yani bağıl nem yüksek sonucuna varılır. Psikometrik fark 0 ºC ise hava tam doygundur yani bağıl nem % 100 değerindedir denilir.

Kapasitif nem sensörleri iki ince elektrot arasına dielektrik geçirgenliği olan polimer tabakanın yerleştirilmesi ile oluşur. Kapasitif sensörler, üzerlerine su buharı geldiğinde ince filmin dielektrik katsayısındaki değişime bağlı olarak elde ettiği bilgiyi analitik olarak istenilen yararlı bilgiye dönüştüren kimyasal sensörlerdir. Bu tip sensörler, analiz edilen madde ile kimyasal etkileşime giren kimyasal bir tabaka ve bu etkileşim sonucunda ortaya çıkan cevabı elektriksel sinyale dönüştüren bir dönüştürücüden oluşur. Yüksek seçici özelliğe sahip, hızlı, duyarlı ve tekrarlanabilir özellikte olması ilaç, gıda, kimya gibi birçok endüstri alanında kullanılmasına fırsat verir. Kapasitif

nem sensörü yapımında polimer, gözenekli seramikler, silikon malzemeler gibi higroskopik özellik gösteren malzemeler kullanılır. Higroskopik yarı iletken malzemenin elektron çiftlerinin arasına yerleştirilmesi ile çalışır. Sensörün üretiminde kullanılan yarı iletken malzemelerinin iletkenlik sabiti, normal oda sıcaklığında bulunan su buharının yarı iletkenlik sabitinden küçük olduğu için su buharı sensör tarafından adsorbe edilir ve sensörün kapasitans değerindeki değişim ile nem ölçümü gerçekleştirilir (Dinç, 2013). Nem sensörlerinin nemi algılama teknikleri ve çalışma mekanizmaları Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.2. Nem algılama teknikleri ve çalışma yöntemleri (Tavşanoğlu, 2006).**

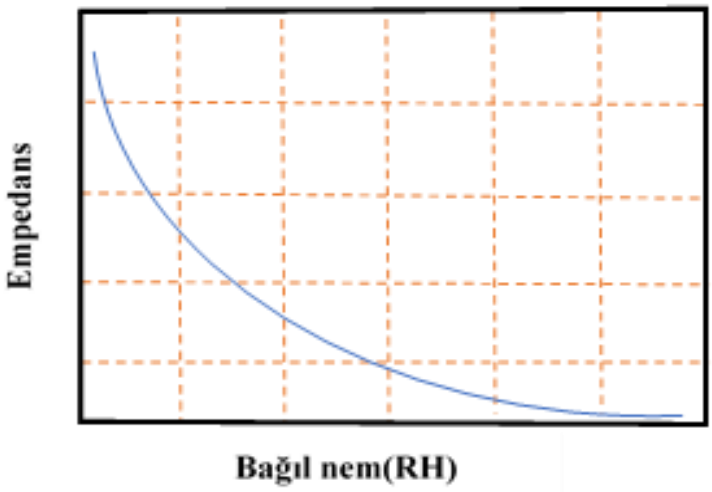
| Algılama | Çalışma mekanizması |
|---|---|
| Kapasite Değişimi | Soğurduğu su / nem miktarına bağlı olarak dielektrik sabiti değişen kapasite elemanıdır |
| Elektrik Yükü | Soğurduğu su buharı miktarından elde ettiği yük ile akım geçiren elektrottur. |
| Çiğ noktası | Yoğuşma olayının başladığı sıcaklık miktarıdır. |
| Kütle Miktarı | Belli hacimde bulunan hava miktarıdır. |
| Elektromanyetik geçirgenlik | Bulunulan ortamdaki nem miktarına bağlı olarak kızılötesi yansıtma miktarının algılanmasıdır. |
| Rezistans Değişimi | Algıladığı nem miktarına bağlı olarak direnç değiştiren elemandır. |
| Psikometrik | Kuru ve yaş termometreler ile nemin belirlenmesidir. |

Piyasaya sürülen nem sensörleri, bakım ve sürekli kalibre edilmeye ihtiyaç duyulmaksızın 10 yıl kullanım güvenliğine sahip olmalıdır. Üretim sürecinde tutarlılık göstererek kullanıcıya tahmin edilebilir çıktı üretir özelliğe sahip olmalıdır (Patissier, 1999).

Bu tez çalışmasında üretilen ve elektriksel özellikleri incelenen rezistif nem sensörleri ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda ayrıca verilmiştir.

### *2.2.2.1. Rezistif nem sensörü*

İletken polimer, tuz veya işlemden geçirilen tabakalar gibi higroskopik malzemeden üretilen rezistif nem sensörleri (direnç tabanlı nem sensörü) ortamın nemine duyarlılık gösterir ve havadaki nemin empedans değişimi oluşturması esasına dayanır. Havayı geçirme özelliğine sahip delikli bir kaplama, neme duyarlı bir iletken ve kontak metallerden oluşur. Bu empedans değişimi akım, gerilim ya da direnç büyüklüklerin ölçülmesine fırsat verir. Rezistif nem sensörleri çevredeki su moleküllerini adsorbe ederek sensör malzemesinin elektriksel direncinde değişime sebep olmaktadır. Bu tip sensörler empedans değişimlerine oldukça hassas cevap verir ve % 100 bağıl nemin olduğu ortamlarda dahi zarar görmez. Hata oranları % 2 ile % 3 bağıl nem aralığındadır. Bu tip nem sensörleri kimyasal dayanıklılığı fazla olan seramik malzemelerden, düşük nemli ortamlarda bile duyarlılık gösteren polimer esaslı malzemelerden ve cevap süresi uzun olan elektrolit malzemeden üretilmektedir.




**Şekil 2.2. Empedans değişimi ile nem arasındaki ilişki (Fontes, 2005).**

Ortamın nemi ile algılayıcı malzemenin direnci arasında ters bir oran vardır ve nem değeri arttıkça direnç değeri düşüş gösterir. Çoğu rezistif nem sensörü için empedans aralığı 1 kΩ ile 100 MΩ arasında değişim gösterir (Fontes, 2005). Nem ile empedans

arasındaki ilişki Şekil 2.2'de belirtilmiştir. Nem sensörü üretiminde algılayıcı malzeme olarak hidrofilik ve hidrifobik organik polimerler, seramik malzemeler, metal oksitler ve polimer kompozitler kullanılır. Metal oksitler ve seramikler neme duyarlılıklarının yüksek olması, gözenekli yapıları ve kimyasal dayanıklılarından dolayı sıklıkla tercih edilir. ZnO, MgO, CoO ve $SnO_2$ elektriksel özelliklerinde meydana gelen değişimlere dayalı olarak çalışan metal oksitlerdir. Ayrıca $TiO_2$, MgAlO ve ZnCrO gibi seramik malzemeler ve $KCIO_2$, NaCI ve $K_2CO_3$ gibi katı elektrolitler ve metal tuzları gibi inorganik yapılar nem sensörü üretiminde sıklıkla kullanılır. Polimerlerin sadece yalıtkan olduğu fikri kendine has iletkenliği olan elektroaktif polimerlerle ilgili yapılan çalışmalar sayesinde değişmiştir. Bu değişimle birlikte polimer iletkenliğini arttırılmasıyla ilgili birçok araştırma yapılmış metallerin elektriksel ve mekanik özellikleri polimerlerin özellikleri ile birleştirerek yeni malzemeler oluşturma fikri yaygınlaşmıştır. Polimerlere metal tuzları katılarak iletkenliğin polimer örgüsüne katılan metal faz üzerinden gerçekleşmesi sağlanırken, kullanılan diğer uygulama ise polimer içinde uygun bir tuz çözdürülerek oluşan iyonik iletkenlikten yararlanmaktır (Saçak, 2010; Dinç, 2013). İletken polimeri yalıtkan polimerlerden ayıran en önemli fark ardışık olarak değişim gösteren tek ve çift bağlara sahip olmasıdır. İletken polimerler elde edildikten sonra amaca uygun karakterize edilmeye çalışılır (Çarbaş, 2016).

## 2.3. İnce Film

Bu tez çalışmasında incelenen nem sensörleri ince film formunda üretilmiştir. Bu sebeple bu kısımda ince film hakkında kısa bilgi verilecektir.

Günümüzde bilimsel çalışmaların hız kazanması ince film teknoloji üzerinde yapılan çalışmaları zorunlu hale getirmiştir. İnce filmler ilk olarak cam yüzeyler üzerine dekoratif şekilde kullanılmıştır. 19. yüzyılda ince film üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar artmış ve 1838'de ilk ince film 'elektroliz' yöntemi ile üretilmiştir. İnce film üretimi ile ilgili farklı yıllarda farklı uygulamalarla birçok bilim adamı çalışma yapmıştır. Faraday 'asal gaz içerisinde buharlaştırma' yöntemi ile, Nahrworld ve Kundt 'Joule ısıtma' yöntemi ile son olarak Bunsen 'kimyasal' yöntem kullanarak ince

film üretimine katkıda bulunmuştur (Kundt, 1888; Wills, 2011; Sönmezoğlu vd., 2012).

İnce film, kalınlığı 0,5 nm ile birkaç µm arasında değişen malzemedir. İnce filmler malzemenin atomlarının ve moleküllerinin kaplanacakları yüzeye düzenli olarak dizilmesi ile hazırlanır. Gündelik hayatta kullanılan birçok malzemenin içinde yer alarak, kullanıldığı malzemelerin mekanik ve elektriksel özelliklerinde performans artışına fırsat verir. Yarıiletken birçok malzemede, yalıtım ve iletim kaplamalarında, bilgisayar ve haberleşme donanımlarında, sensörlerde ince film uygulamaları sıkça kullanılır. İnce film uygulamalarının hızla ilerleyip değişim göstermesi yeni teknolojik gelişmelere imkân sağlamıştır.

## 2.4. İnce Film Üretim Teknikleri

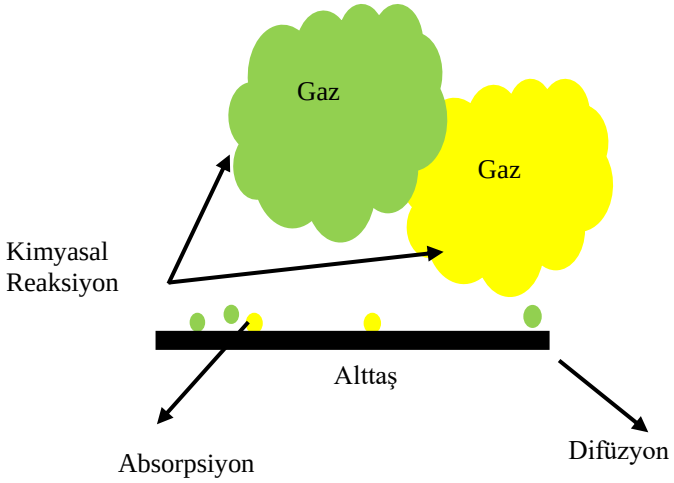
Çizelge 2.3'te ince film üretim teknikleri sınıflandırılmıştır. Alt metinde bu tekniklerle ilgili kısa bilgi verilecektir.

**Çizelge 2.3. İnce film üretme teknikleri**



### 2.4.1. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi, ince film kaplamak için kullanılan malzeme üretim tekniğidir ve geniş bir basınç yelpazesine sahiptir. Düşük basınçta uygulandığında biriktirme verimliliği ve yüzeyde oluşan kaplamanın eşbiçimliliği artış gösterir. Kimyasal buhar birikimi, gaz fazında bulunan malzemelerin dışarıdan ısıtılmış altlık malzeme yüzeyine difüze olması ile gerçekleşir. Kaplama işlemi gaz fazında gerçekleştiğinden homojen bir kaplama için altlığın belli bir geometrik şekle sahip olma şartı yoktur ve kaplama kalınlığı tüm yüzeye eşit olarak dağılır (Ertürk, 2012). Kaplama işlemi, kaplama yapılacak malzemenin türüne göre 500 ºC-1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleşir ve kaplama kalınlığı 10 µm'den daha incedir. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi, ısıya dayanıklı kaplamalar, yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik, tungsten gibi malzemelerin hazırlanmasında, güneş pillerinin üretiminde ve korozyonu engelleyici yüzeylerde ince film kaplaması olarak kullanılır. Gaz fazında bulunan reaktan ve kimyasal reaksiyon sonucu oluşan gazlar alttaş yüzeyinde bir sınır tabakası oluşturur ve bu tabaka boyunca gerçekleşen tüm kimyasal reaksiyonlar oluşacak malzemenin özelliklerini ve kaplamanın çökelme hızını etkiler (Carlsson ve Martin, 2010).




**Şekil 2.3. Kimyasal buhar biriktirme çalışma prensibi**

Kimyasal buhar biriktirmenin çalışma prensibi Şekil 2.3'te belirtilmiştir.

### 2.4.2. Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

Sanayi alanındaki artış beraberinde aşınmaya dayanıklı malzeme ihtiyacını arttırmış ve 19. yy başlarında ortaya çıkan vakum teknolojisinin temelini hazırlamıştır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ince film üretim tekniklerinden buhar fazda büyütme teknikleri içinde yer alır. Fiziksel buhar biriktirme tekniği, vakum ortamında bir ısıtıcı (rezistans, lazer, elektron bombardımanı vb.) yardımı ile buharlaştırılan kaplayıcı malzemenin kaplanacak yüzey üzerinde ince bir film katmanı halinde biriktirilmesi temeline dayanır. Başka bir ifade ile PVD biriktirme tekniği, katı haldeki ham maddenin yüksek enerji ile iyonlaştırılmış plazma haline getirilerek, kaplanacak yüzeye malzemenin kontrollü bir şekilde yapıştırılması olarak tanımlanır. Tekli ve çoklu halde katmanlar oluşturarak kaplama imkânı sunar. Uygulama gerçekleştirilirken doğru ekipmanların seçimi, kaplanacak malzemelerin temizlenmesi, elde edilecek kaplamanın homojenliği açışından önemlidir. PVD biriktirme tekniği, tıpta, mikroelektronik alanında, dekoratif alanlarda, tıbbi uygulamalarda, otomotiv parçalarında, mimari camlarda ve korozyona karşı direnç gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılır. Kaplanacak malzeme metal ise ısıl buharlaştırma yöntemi oldukça kullanışlıdır.

Bu bölümde fiziksel buhar biriktirme yöntemleri arasında yer alan ve tezin deneysel kısmında kullanılan metal malzemeyi buharlaştırmayı sağlayan ısıl buharlaştırma (termal evaporatör) sürecinden bahsedilecektir.

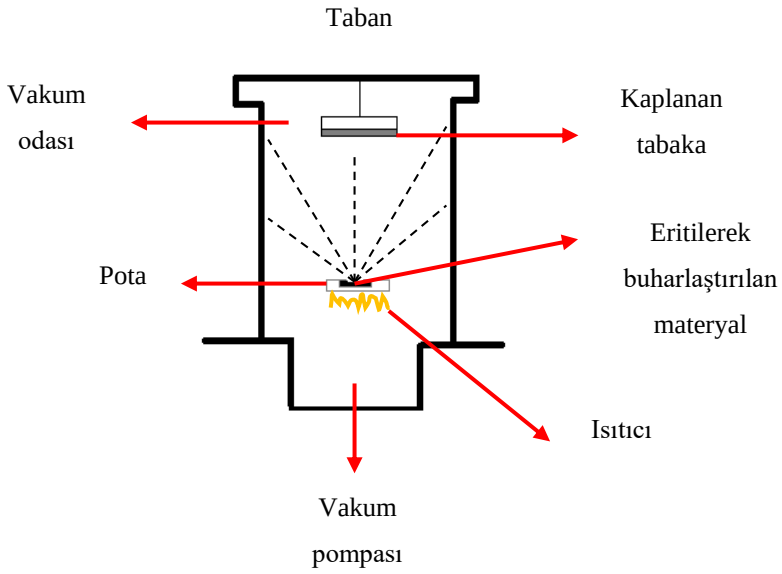
#### *2.4.2.1. Isıl buharlaştırma yöntemi*

Metal malzemelerin bir ısıtıcı yardımı ile yüksek vakum altında buharlaştırılmasına dayanan ince film kaplama yöntemidir. Isıl buharlaştırmada, kaplanacak malzeme ile kaplanacak yüzey arasında buharlaşan gaz molekülleri herhangi bir çarpışma yapmadan kaplanacak yüzeye ulaşır. Fiziksel buhar biriktirme teknolojisinin parçası olarakta bilinen bu yöntem 1800'lü yıllarda ortaya çıkmıştır. İlk olarak 1857 yılında Faraday' ın metal bir teli vakum altında buharlaştırılarak kaplama yapması bu tekniğin başlangıcı olarak kabul edilir. 1887'de Nahrwold vakumda buharlaştırma yoluyla ince metal film kaplamıştır (Chopra,1969; George, 1992; Harsha, 2006). 1888'de Kundt ince filmlerin kırılma indeksini ölçmek için bu yöntemde hazırlanan ince filmleri

kullanmıştır (Bunshah, 1994; Nalçacıgil, 2011). 1917'de Stuhlmann akkor gümüş kablo kullanarak vakumda ayna oluşturmuştur (Stuhlmann, 1917; Nalçacıgil, 2011).

Buharlaştırma işlemi yüksek vakum altında gerçekleşir ve vakum arttırıldıkça birim hacimde bulunan molekül sayısı giderek azalır. Başka bir ifade ile vakum, 760 mmHg olarak kabul edilen açık hava basıncını pompalar yardımı ile kademeli olarak düşürmektir. Vakum seviyesi arttırıldıkça belirlenen hacim içindeki molekül sayısı logaritmik olarak azalır. Vakum, hava basıncının atmosfer basıncının altına düşmesi olarak tanımlanabilir. Hava, 1 Bar hava basıncı altında genel olarak $m^3$'te $10^{25}$ partüküllü bir gaz karışımıdır. Patüküller tanımlanmış hacmin duvar yüzeylerine basınç uygular. Partiküllerin sayısal değerinin düşmesi bulundukları hacmin yüzeyine uyguladıkları basıncın düşmesi anlamına gelir. Vakumun amacı uzun bir mesafede bir hat boyunca parçacığı taşımak ve temiz bir yüzey elde etmektir. Sonuç olarak ortamın vakum değeri ile ortamda var olan molekül sayısı arasında ters ilişki vardır. 750 Torr-1 Torr arası düşük vakum, 1 Torr-$10^{-3}$ Torr arası orta vakum, $10^{-3}$-$10^{-6}$ Torr arası yüksek vakum aralığı olarak ifade edilir. Basınç ile vakum birimleri aynı büyüklüklerle ifade edilir. Vakum seviyeleri, mbar, Bar, Torr ve Pa gibi birimlerle ifade edilir. Yapılan çalışmalarda birim olarak Torr veya Pascal kullanıldı.

$$1\ Pa = 10^{-5}\ Bar = 987.10^{-8}\ Atm = 750.10^{-5}\ Torr\ (mmHg)$$




**Şekil 2.4. Isıl buharlaştırma sistemi şematik gösterimi**

Şekil 2.4'te ısıl buharlaştırma sisteminin genel şematik gösterimi verilmektedir. Bu yöntem, buharlaşma sıcaklığı 1773 K'nin altında olan katı malzemeleri buharlaştırma işleminde kullanılır. Sıcaklığa karşı yüksek direnç gösteren pota (hazne) içerisine buharlaştırılacak katı malzeme yerleştirilir ve yüksek akım düşük gerilim uygulanarak pota etrafına sarılı rezistans teller yardımı ile ısıtma işlemi yapılır. Maliyetinin oldukça düşük olmasının yanında hızlı uygulanabilirliğe sahip bir süreçtir. Pota, kaplanacak malzemenin eritildiği yer olarak tanımlanır ve yapı malzemesi olarak genellikle ısıya dayanıklı, erime noktası yüksek molibden (Mo), tungsten (W), tantal (Ta) gibi malzemelerden veya $TiB_2$-BN gibi metaller arası bileşiklerden yapılır. Kuartz, grafit, alüminyum, berilyum, bor-nitrat ve zirkonyumdan üretilmiş potalarda direkt ısıtmada kullanılmaktadır (Tombak, 2012). Katı malzemenin buharlaştırılması için kullanılan ve buharlaştırma kaynağı olarak adlandırılan potalar, metalik sarılı teller, bobin veya sepet şeklinde olabilir. Evaporatörde kaynak olarak kullanılan malzemelerin erime sıcaklıkları molibden (E.N. 2890 K), tungsten (E.N. 3683 K) ve tantal (E.N. 3269 K) olarak belirtilir.

## 2.5. Vakum Pompaları

Isıl buharlaştırma işleminde, kaplanacak yüzey üzerinde oluşacak gaz emilimini en aza indirgemek ve vakum odasında kaplama işlemi sırasında oluşan parçacıkları, pislikleri absorbe edebilmek için kullanılan vakum sisteminde vakum pompaları yer almaktadır. Vakum odaları, kaplanacak malzemeyi, buharlaştırılan metal parçacığı ve taşıyıcıları, potaları alabilecek büyüklükte olup beklenen vakum değerinin elde edilmesi için cam ve çelikten üretilmiştir. Vakum odaları, kaplama işleminin gerçekleştiği ve vakum pompaları ile bağlantı kurulduğu yerdir. Vakum pompaları da özel dizayn edilmiş bu vakum odalarına kauçuk veya metal parçalarla bağlanmıştır. Vakum odasında istenen basınç değerini dengelemek ve enerji kaybını en aza indirgemek için vakum pompaları kullanılır. Vakum pompalarında yağ sirkülasyonu sürekli olarak devam eder ve yağ karter içinde depo edilir. Vakum etkisi ile yağ karterinden pompa tarafından emilen yağ, hava girişinden temin edilen hava ile tekrar kartere püskürtülür. Yağın depo edildiği yer olarak tanımlanan karterdeki yağın görevi; yağı depolamak, sızdırmazlık sağlamak ve oluşan ısının uzaklaştırılmasını sağlamaktır. Su, kir ve diğer tüm

aşındırıcı yabancı maddeler pompa yağında birikir. Farklı malzemelerden yapılmış vakum odaları Şekil 2.5'te verilmiştir.

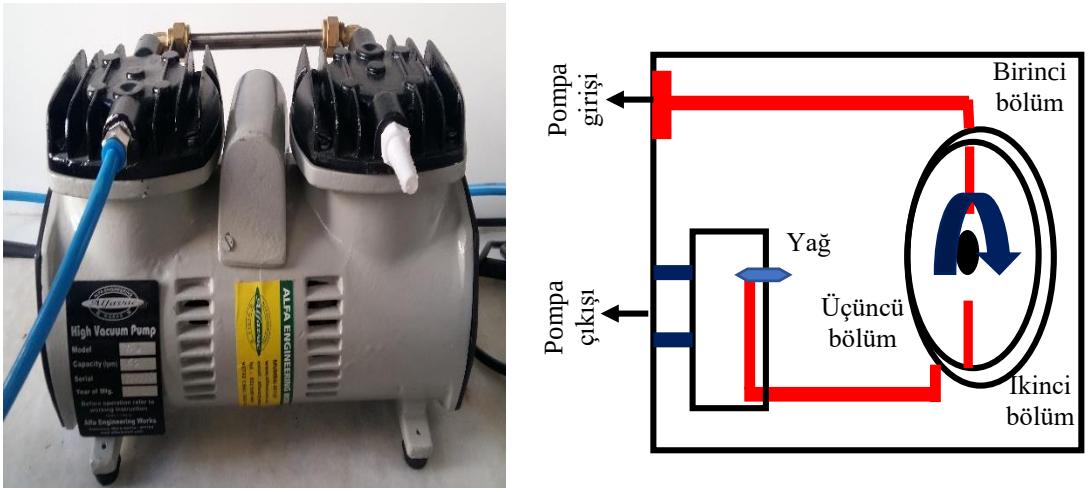


**(a)** **(b)** **(c)**

**Şekil 2.5. (a). Cam vakum odası, (b). Polikarbonat malzemeli vakum odası, (c). Vaksis**

### 2.5.1. Mekanik pompa

Mekanik pompa vakum odasındaki basıncı, vakum pompası ile bağlantılı sürgülü valfin kolay açılabilmesi için $10^{-2}$ Torr gibi yaklaşık bir değere ulaştırır ve vakum odasında oluşacak gaz moleküllerini tutarak sistemden kolaylıkla uzaklaştırılmasını sağlar.

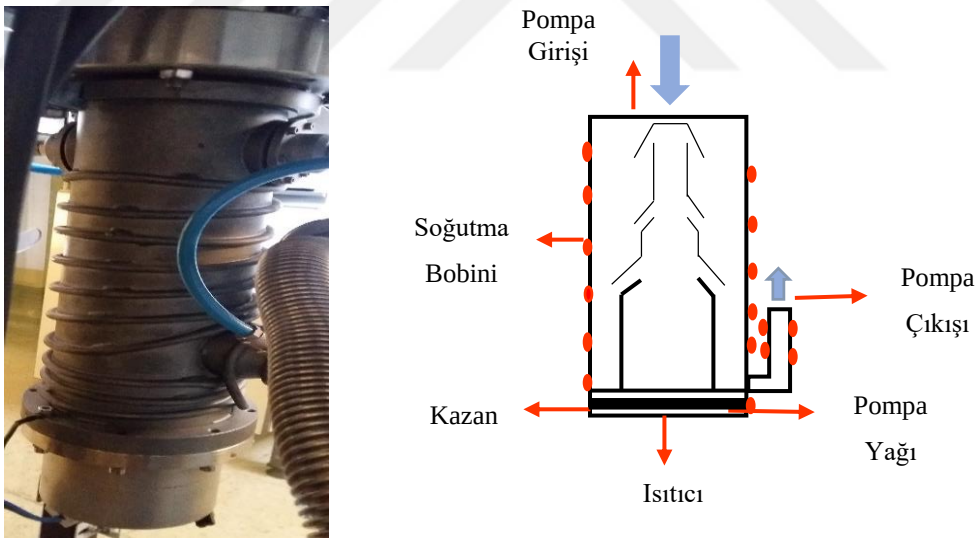



**Şekil 2.6. Mekanik pompa ve şematik gösterimi**

Mekanik pompalar vakum odasından topladığı gaz moleküllerini alarak ilgili kısım olan pompa girişine iletir burada tutma ve sıkıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra valften önceki kısımda ortamın basıncı atmosferik basınca ulaştığı an sıkıştırdığı gaz moleküllerini valften dışarı bırakır. Vakum alma işleminde kullanılan mekanik pompa ve çalışma prensibi Şekil 2.6'da belirtilmiştir.

### 2.5.2. Difüzyon pompası

Difüzyon pompası, vakum odası $5.10^{-1}$ Torr'dan daha düşük basınca ulaştığında çalışmaya başlar. Havayı çıkış supabından çıkmasını sağlayacak yeterlilikte bir basınçla sıkıştırır, sıkıştırma işlemi atmosfer basıncına ulaşana kadar devam eder. Difüzyon pompası, özel vakum yağının ısıtılması prensibine göre çalıştığı için soğutma suyu vanası mutlaka açık vaziyette tutulmalıdır. Soğutma suyu vanası difüzyon pompası çalışır durumdayken açık durumda değilse yağ damlacıkları vakum odasına geçebilir bu durum da vakum ortamında kirliliğe sebep olur. Difüzyon pompası ve şematik gösterimi Şekil 2.7'de verilmiştir.

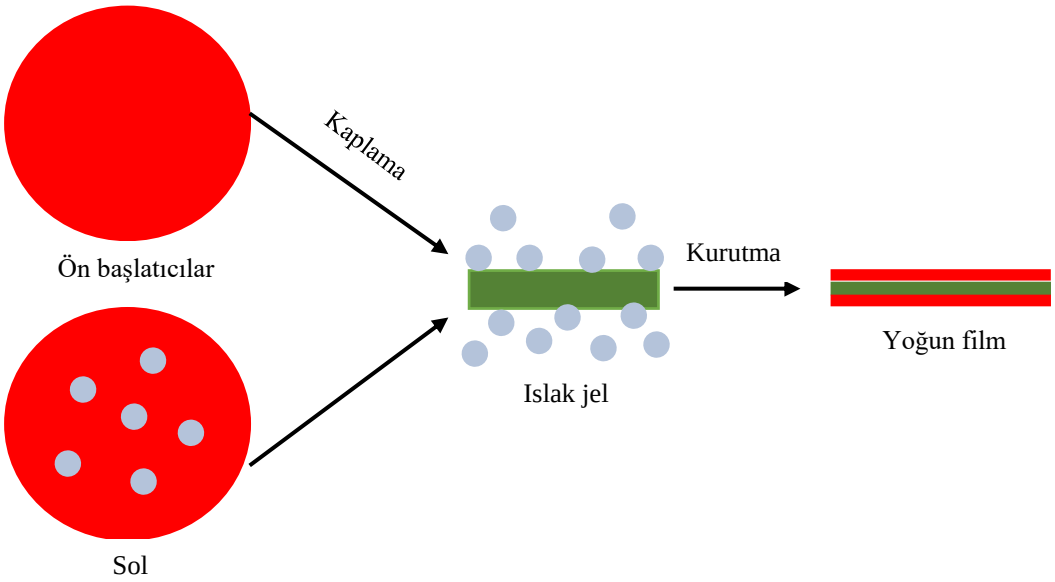



**Şekil 2.7. Difüzyon pompası ve çalışma prensibi**

## 2.6. Sol-gel Yöntemi

Sıvı fazda büyütme tekniği, sol-gel, elektrokimyasal yöntem ve kimyasal banyo yöntemi olarak üç başlık altında ele alınan ince film kaplama tekniğidir. Yapmış olduğumuz çalışmada neme duyarlı nem sensörlerinin üretimi için sıvı faz ince film üretim tekniği olan sol-gel yöntemi kullanıldı. Bu bölümde sol-gel tekniğinden bahsedilecektir.

Sol-gel yöntemi, cam, seramik, metal ve plastik alttaşların kaplanarak yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla sıkça kullanılan bir teknik olarak karşımıza çıkar. İstenilen özellikleri karşılayacak biçimde hazırlanmış olan sıvının kurutulması ile katı malzeme üretme işlemi olarak da tanımlanır. Çözelti formundan yola çıkarak farklı uygulama alanlarına yönelik malzemelerin (cam, seramik, kompozit vs.) üretim tekniğidir. Seramik alanında ortaya çıkan bu yöntem kimyasal polimerizasyonla yeni polimerik cam ve seramiklerin üretilmesine olanak sağlar. Düşük sıcaklıklarda geniş ve küçük yüzeylerin kolayca kaplanmasına fırsat verir. Değişebilir kalınlık avantajı ile çok ince ve kalın filmler yapmak mümkündür. Sol-gel kaplama yöntemi ile yüzey istenilen malzeme ile oda sıcaklığında kaplanırken, yapılan ısıtma işlemi ile birlikte yüzeyde istenilen fazın elde edilmesine imkân sunar. Sol-gel kaplama yönteminin işlem basamakları Şekil 2.8'de belirtilmiştir.




**Şekil 2.8. Sol-gel kaplama yöntemi işlem basamakları**

İlk metal alkoksit $SiCI_4$ (silisyum tetraklorür) ile alkol karışımının atmosfere maruz kaldığında jelleştiğini bulan Ebelmen tarafından 1846'da keşfedilmiştir. 1884'te Grimaux tetrametoksilanı, hidroliz yöntemini kullanarak silisik asit solünü hazırlamıştır. Uzunca bir dönem sol-gel yöntemine dair önemli bir gelişme gözlenmezken bu süreçteki en büyük atılım 1923'te silika jel kurutucuların ve katalizör malzemelerin öncüsü olan W. A. Patrick'in silika jeli kurutup gözenekli silika elde etmesidir (Wright ve Sommerdijk, 2001). 1930'larda Geffcken tarafından alkoksitlerin optik filmlerin hazırlanmasında kullanılabileceği ispatlanmıştır (Brinker ve Scherer, 1990). Geffcken ve Bergen sol-gel prosesiyle çok katlı optik katmanlar hazırlamışlar ve Schroeder bu proses için tek ve karışık tabakalar kullanarak ince film tekniğini geliştirmiştir. İlk ürün 1953 yılında ortaya çıkmıştır (Dislich ve Hınz, 1982). Graham, jelin gözenekli bir ağdan oluştuğunu ileri sürmüştür. Yüksek sıcaklıklarda ergiyen moleküler düzeydeki homojen oksitlerin karışımını hazırlamak için düşük sıcaklıkta kimyasal karıştırma kullanma fikri Roy ve arkadaşları tarafından ileri sürülmüştür (Zarzycki, 1984). 1956 yılında da Roy ve arkadaşları faz denge çalışmaları için çeşitli karışım metotları denemişlerdir (Roy, 1956). Sol-gel yöntemi metallerin, tarihi eserlerin korozyona karşı korunması, plastik, porselen vs. gibi malzemelerin dayanıklılığının arttırılması, plastiklerin UV ışınlarına karşı korunması, nem dayanıklılığının arttırılması, $CO_2$ ve $O_2$ geçirgenliğinin azaltılması, dekoratif görünüm kazandırılması, camların buzlanmaya ve buğulanmaya karşı korunması amacıyla sıklıkla kullanılır. Ayrıca fosfatlama ve kromatlama sistemleri yerine anti statik özellik kazandırma amaçlı kaplama, gıda, otomotiv, beyaz eşya, cam sanayinde de tercih edilen bir yöntemdir (Özbey, 2004). İnce film üretiminde sol-gel tekniği sıvı fazda büyütme teknikleri arasında yer alır. Bu yöntem kullanılarak üretilen ince filmin her yeri aynı saflıkta ve aynı kalınlıkta elde edilir. Kaplanan filmin mikro yapısı kolayca incelenebilir ve düşük sıcaklıkta hazırlanmaya fırsat verdiği için enerji tasarrufu sağlar. Kaplanacak olan cismin yüzey özelliğinden bağımsız olarak tek ya da çok katlı kaplama yapabilme fırsatı verir. Bu yöntemi uygulayarak yığın kütleler, fiberler, kaplama filmleri, saclar, mikrofiltreler ve sol içerisinde çöktürülerek küresel partiküller oluşturulur (Banaz, 2009). Sol-gel prosesi, ön başlatıcılar (metal alkoksit, metal tuzları, nitratlar vs.) ile inorganik bileşiklerin belli oranlarda birleştirilerek bir solüsyon oluşturması ve bu solüsyonun uygun sıcaklıklarda karıştırılarak bir dizi kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi ile oluşan taneciklerin birleşerek bir ağ meydana getirmesi (jelleşme), ve bu ağın zamanla büyüyerek bütün sıvı içini kaplaması yani jeli

meydana getirmesi olarak tanımlanır. Sol-gel yönteminde ilk aşama olarak oluşan sol, peptizasyon sonucu elde edilebilen gözle görülemeyecek kadar küçük 1µm boyutuna sahip taneciklerdir. Jel ise, sol fazına göre daha yoğun bir faza sahip olup solun kondenzasyonu ile oluşumu başlar. Jelin yapısı parçacıklar arasında oluşacak çapraz bağın miktarına bağlıdır ve oluşan bağlar büyük yapılı ise jel daha sert bir hal alır (Boz, 2016). Hidroliz ve kondenzasyon reaksiyonları solün viskozitesini jel oluşumu gerçekleşene kadar düşürür ve ardından yoğunlaşma reaksiyonları başlar. Partüküllerin bir araya gelmesi sonucu sıvı içinde ağ oluşumu gerçekleşir. Sol-gel yöntemi, oksit kaynağı olarak metal alkoksit veya metal bileşikleri, hidroliz kaynağı olarak su, çözücü olarak alkol ve katalizör olarak asit ya da baz kullanılarak başlar. Sol-gel yöntemi ile oluşturulan çözelti 1 µm boyutlu katı parçacıkların sıvı içerisinde homojen olarak dağılmasıyla elde edilir. Sol-gel prosesi sıvı bir 'sol' faz ile katı bir 'jel' fazdan oluşur. Jel ıslak bir çözeltidir ve jel ısıtılarak üzerindeki su ile alkol fazlalığının giderilmesi gerekir. Çözücü yüzeyden uzaklaştırılırken hacimde % 75'ten fazla büzülme gözlenir ve bu durum jelde parçalanmaların oluşmasına neden olur. Yüzeydeki sıvı fazlalığını uzaklaştırmak için yapılan kurutma işlemi sonucu yüzeyde % 0-50 oranında gözenekler oluşabilir. Bu uygulama sırasında yüksek gözeneklere sahip kuru jel ortaya çıkar. Kurutulmuş bir inorganik jelin, düşük yoğunluklu yapısını korumak için gözeneklerin üzerini kaplayan seyrelticinin kritik noktasını aşmamak gerekir. Bu proses sentezi zamana bağlı bir dizi işlem basamağı ile oluşur. İlk adım olarak başlangıç maddeleri uygun çözücülerle reaksiyona katılarak homojen bir çözelti hazırlanır. Moleküller arası Van Der Walls ve elektriksel itme kuvvetlerinin etkisi yer çekimi kuvvetine göre daha fazla olduğu için solü meydana getiren malzemeler dibe çökmez (Ertek, 2011). Sol kaplandığı tabaka yüzeyinde ıslak jel haline dönüşür. Yapılan sıcaklık uygulaması ve kurutma işleminden sonra daha derişik jel haline geçerek ince film oluşumu gerçekleşir. Oluşturulan molekül çözelti içinde genişler ve büyük boyuta ulaşarak jeli oluşturur. Jelin elastik özelliği katı yapının devamlılığını sağlar. Sol-gel uygulama sürecinde ana malzeme çözücü içinde çözünürken hidroliz ve polimerizasyon gibi birçok kimyasal reaksiyon gerçekleşir ve kolloidal yapıda olan sole dönüşür. Kolloidal yapı homojen ile heterojen arasında bir özellik gösterir ve alttaş üzerine uygulandığında ıslak jel haline dönüşür. Teknoloji ve endüstri sektöründe uygulama kolaylığı açısından sıkça tercih edilir. Sol-gel kaplama yönteminin avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.4'te verilmiştir.

**Çizelge2.4. Sol-gel Kaplama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları**

| Sol-gel kaplama yönteminin avantajları | Sol-gel kaplama yönteminin dezavantajları |
|---|---|
| 1. Uygulama metodu basittir. | 1. Uygulama aşaması uzundur. |
| 2. Hava kirliliğini en aza indirir. | 2. Ön başlatıcılar pahalı ve neme duyarlı olabilir. |
| 3.Seçilen kimyasallar zararsız seçildiği sürece sağlığa zararı yoktur. | 3. Jelleşme aşamasında çözeltiyi sabit viskozitede tutmak zordur. |
| 4. Düşük sıcaklıkta oldukça esnek bir kaplama alanı oluşturur. | 4. Kaplama aşamasında malzeme kaybı yaşanır. |
| 5. Yüksek saflıkta malzeme üretimi sağlar. | 5. Uygulama uzun zaman kaybına sebep olur. |
| 6. Kaplamanın gerçekleştiği ortam düşük sıcaklıkta gerçekleştiği için kullanılan malzemenin bozunmasını en aza indirir. | 6. Başlangıç aşamasında zararlı malzeme seçimi sağlığımızı olumsuz etkiler. |
| 7. Homojen olarak katkılamaya olanak sunar. | 7. Geniş büzülme, gaz, su ve organik malzeme kalıntılarına bağlı olarak kuru monolitik jeli yoğun bir monolitik cama sinterlemek zordur. |
| 8. Yaşlanma ve kurutma aşamaları kontrol edilerek malzemenin gözenek boyutu kontrol edilebilir. | 8. Yoğuşma ve kurutma aşamalarında büzülmeler, yüzeyde çatlamalar gözlenir. |

### 2.6.1. Sol-gel yönteminde kullanılan bileşenler

#### *2.6.1.1. Ön başlatıcılar*

Metal alkoksitler içerdikleri elektronegatif-OR grubu nedeniyle çok kolay reaksiyona girer ve sol oluşturmak için organik çözücülerde başlangıç maddesi olarak kullanılır. -OR'deki alkil grupları değiştirilerek farklı fiziksel özellikler elde edilir. Sol oluşumunu sağlayan metal alkoksitler genel gösterim olarak $M(OR)_n$ şeklindedir.

- M; kaplanacak metal malzeme

- R; alkil grubu $CH_3$ (metil), $C_2H_5$ (etil) vs.
- n; valans durumunu ifade eder

Klorür, nitrür vs. inorganik sulu çözeltilerde ön başlatıcı olarak metal tuzları kullanılır. Filmlerdeki C (karbon) fazlalığı alkil grubundaki değişimlerin sonucu olarak gelişir. Su bu uygulamada oldukça önemlidir. Su moleküler yapıya dahil olduğu gibi gerekli olan orandan az kullanılması reaksiyonun yavaşlamasına sebep olur. Bundan dolayı sol-gel prosesinde reaksiyonların gerçekleşmesi için uygun çözücülerin kullanılması gerekir. Çözelti oluşturulurken genellikle metal tuzlar için su, metal alkoksitler için alkol kullanılır. Metal alkoksitler, nitratlar, hidroksit gibi inorganik bileşikler belirli oranda su ve asitle birleşerek bir solüsyon oluşturur. Bu solüsyon, belli sıcaklıkta karıştırılarak birtakım kimyasal olayların gerçekleşmesini sağlar. Yüzeyde kimyasal etkileşimler sonucu bir ağ oluşur ve bu ağ git gide büyür, tüm noktalara ulaşarak jel oluşur. Sol ise sıvı içindeki kolloidal parçaların kararlı bir süspansiyonudur. Alkoksitler sol oluşturmak için başlangıç maddesi olarak kullanılır. Kolloidal tanecikler gözle görülemeyecek kadar küçüktür ve boyutları 500 nm ($1\ nm=10^{-9}\ m$) dir. Jel ise katı ile sıvı arasında bir faz olup bol su içeren ve kolloidal taneciklerin çöktürülmesi ile elde edilir. En çok kullanılan alkoksitler tetrametoksisilan (TMOS) ve tetraetoksisilan (TEOS) gibi alkoksisilanlardır (Şam, 2001).

#### *2.6.1.2. Alkoller*

OH grubu ile alkil gruplarının birleşmesi ile oluşur. Sudan hafiftir ve su ile her oranda karışır. Molekül kütleleri arttıkça kaynama noktaları yükselir. Bu yükselmeye bağlı olarak suda çözünme miktarları da aynı oranda azalır. Nötr bileşikler olup suda iyonlaşmaz. Amorf özelliklerinden dolayı alkali metallere karşı asit, kuvvetli asitlere karşı baz gibi davranır. Mono alkol grubuna giren tersiyer alkoller fazlaca bazik özellik gösterir. Alkoller, alken maddelerine $H_2O$ ilave edilmesi, alkil halojenürlerin seyreltilmiş NaOH ya da KOH çözeltisi ile beraber ısıtılması ile karboksilli, keton ve aldehit asitlerinin Grignard bileşiği yöntemi ile oluşur.

Grignard bileşiği yöntemi`;

Aldehit + R – MgX bileşiğinden sekonder alkol (2.3)

Keton – Mg – X bileşiğinden tersiyer alkol (2.4)

Formaldehit + R – MgX bileşiğinden primer alkol (2.5)

Alkoller bu proseste başta kullanılır ve metal alkoksitlerle tepkimeye girer.

$CH_3$-OH metil alkol (metanol) (2.6)

$CH_3$-$CH_2$-OH etil alkol (etanol) (2.7)

$CH_3$-$CH_2$-$CH_2$-OH propil alkol (propanol) (2.8)

$CH_3$-$CH_2$-$CH_2$-$CH_2$-OH bütil alkol (bütanol) (2.9)

$CH_3$-$CH_2$-$CH_2$-$CH_2$-$CH_2$-OH pentil alkol (pentanol) (2.10)

### *2.6.1.3. Katalizörler*

Asit ve bazlar sol-gel yöntemi uygulama basamaklarında gerçekleşen hiçbir reaksiyona katılmayarak sadece reaksiyonunun hızını etkileyen malzemelerdir ve homojen çözelti oluşumu sırasında katalizör olarak kullanılır. Katalizör olarak kullanılan asit ve bazlar jelin tanecik oluşum reaksiyonlarının belirlenmesinde etkin olarak kullanılır. Hazırlanan çözeltiye asit ya da baz eklemek prosesi hızlandırır (Toygun vd., 2013). Katalizör katılmadan da hidroliz reaksiyonları gerçekleşir ancak bu durum reaksiyonun yavaş gerçekleşmesine neden olur. Sol-gel yönteminde kullanılan asit ve baz türü hidroliz reaksiyonunun oranını etkilemektedir. HCI, asetik asit, KOH, aminler, HF gibi asitler sol-gel uygulamasında sıkça kullanılır. Uygulama sürecinde oluşan solün asitlik ve bazlık derecesi düşük ise jelleşme sürecinin arttığı kabul edilir

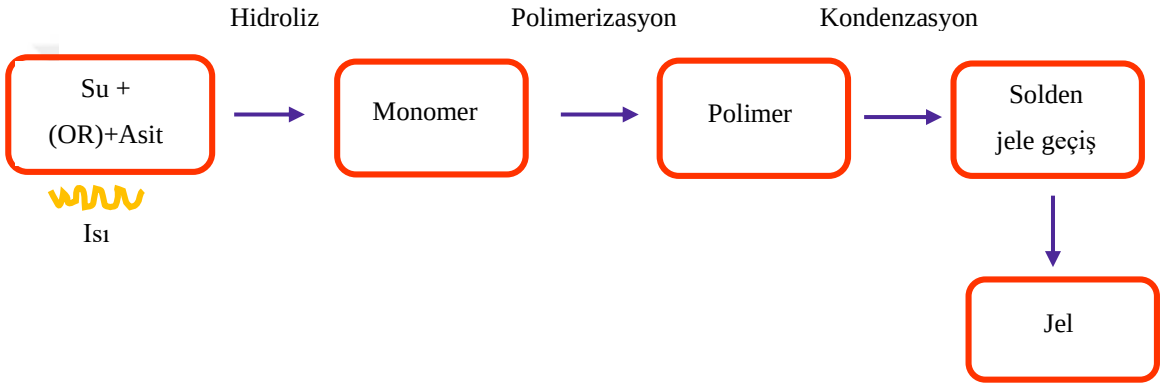


**(a)** **(b)**

**Şekil 2.9. (a). Asit katalizör kullanılarak oluşturulan jel yapısı, (b). Baz katalizör kullanılarak oluşturulan jel yapısı**

Asit katalizörleri hafif bağlarla bağlı polimer oluştururken, baz katalizörleri daha kuvvetli bağlarla bağlı polimerler oluşturur. Asit ve baz katalizör kullanılarak oluşturulan jel yapısı Şekil 2.9'da belirtilmiştir. Sol-gel uygulamalarında asit katalizör kullanıldığında ön başlatıcıların hidrolizi kondenzasyon reaksiyonundan daha hızlı gerçekleşirken, baz katalizör kullanıldığında kondenzasyon reaksiyonları hidroliz reaksiyonundan hızlı gerçekleşir. Bu reaksiyonlarda kullanılan katalizörün türüne bağlı olarak jel yapısında farklılaşmalar oluşur.

Sol-gel oluşumunun zamana bağlı olarak birbirini takip eden işlem basamakları Şekil 2.10'da gösterilmiştir.




**Şekil 2.10. Sol-gel yöntemi jel oluşum basamakları**

İlk adım olarak uygun ön başlatıcılar çözücülerle reaksiyona katılır ve istenen molaritede homojen çözeltiler elde edilir. Çözelti oluşumunun ardından hidroliz, polimerizasyon, kondenzasyon ve jelleşme basamakları gerçekleşir.

### 2.6.2. Sol-gel oluşumu

Sol-gel yöntemi (solution gelation), başlangıç malzemelerinin hidrolizi ve sol oluşumu ile başlar. Solün yoğunlaştırılması ve sistemdeki çözücülerin uzaklaştırılarak jelin oluşumu ile devam eder.

#### *2.6.2.1. Hidroliz reaksiyonları*

Hidroliz reaksiyonları su ve alkol miktarına bağlı olarak tüm -OR grupları -OH olana kadar devam eder.

$$M\,(OR)_4 + H_2OHO \rightarrow M\,(OR)_3 + ROH \quad (2.11)$$

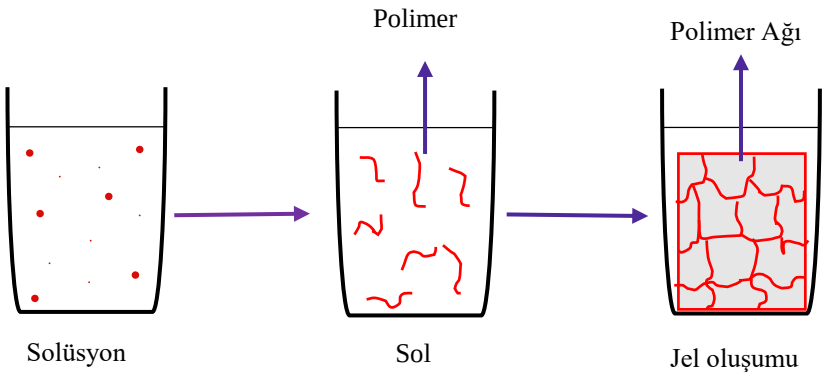
Metal alkoksitlere bağlı bulunan alkil uzunluğu arttıkça -OR bağını kırmak zorlaşacağından hidroliz hızı azalır. Metal alkoksitlerin hidroliz reaksiyonuna katılımı metal atomun sahip olduğu elektronegatifliğe bağlıdır. Elektronegatiflik metal alkoksitlerin basit formüllerinde valans durumu gösteren 'n' ile ifade edilir ve bu değer arttıkça elektronegatiflikte artar. Ayrıca metal alkoksitlerin kimyasal reaktiflikleri moleküllerin kompleksliği artıkça düşer. Hidroliz reaksiyonları sonucunda solün oluşumuna zemin hazırlayan peptizasyon olayları gerçekleşir. Peptizasyon yapısının oluşumunda genellikle elektrolitler kullanılır ve bu elektrolitler çözelti içinde var olan taneciklere yük vererek kararlı kolloidal yapıların oluşmasını sağlar. Negatif yüke sahip kolloidal çözeltiler bazlarla, pozitif yüklü kolloidal çözeltiler asitlerle peptitleşirler. Peptitleşmenin gerçekleşmesi için çözeltiye verilen elektrolit gereğinden az ya da çok olmamalıdır. İstenen orandan daha fazla eklenen elektrolitler sıvı içindeki tanecikleri yüksüz bırakır ve peptitleşmeyi engeller, bu oran gereğinden az olursa çözeltiye aktarılan yük yetersiz geleceğinden çökelti oluşur (Toygun vd., 2013).

#### *2.6.2.2. Yoğunlaşma Reaksiyonu*

Hidrolize uğrayan iki malzeme birbirine oksijen köprüsü ile bağlanarak yoğunlaşma reaksiyonlarını oluşturur.

$$(OR)_3M - OH + HO - M(OR)_3 \rightarrow (OR)_3 - O - M\,(OR)_3 + OH \quad (2.12)$$

Reaksiyon ürünleri art arda birleşerek yoğunlaştırma reaksiyonlarının başlamasını sağlar. Yoğunlaşmanın devam etmesiyle tanecikler birbiriyle bağlanarak polimerleri oluştur ve büyük çaplı monomerler elde edilir. Bu olay polimerizasyon olarak tanımlanır. Sol-gel yönteminde jelleşmenin ilk adımı olan polimerleşme evresinde öncelikle solüsyon içinde oluşan monomerler polimerleşerek tanecikleri oluşturur ardından tanecikler boyut değiştirerek büyümeye başlar ve son olarakta tanecikler sıvı içinde birbirine bağlanarak ağ şeklindeki jelleşme oluşumunu gerçekleştirir. Jel oluşum aşaması Şekil 2.11'de gösterilmiştir.




**Şekil 2.11. Jelleşme oluşum mekanizması (Gültekin, 1997).**

Sıvı içinde taneciklerin bütünleşerek ağ yapısını oluşturması yoğunlaşma (kondenzasyonu) reaksiyonları sonucu gerçekleşir. Jeller, sıvı içinde var olan partiküllerin topaklanmasıyla ya da kondenzasyon reaksiyonu sonucu taneciklerin birbirine dokunarak kümeler oluşturmasıyla ortaya çıkar. Oluşan kümeler kovalent bağlar sayesinde fonksiyonel gruplara dönüşür. Sol-gel yönteminde polimer ağlarının oluşmasında sıcaklık, asit-baz derecesi, katalizör, reaksiyon süresi ve konsantrasyon gibi birçok faktör etkilidir (Evcin, 2006). Jel, hidroliz ve kondenzasyon reaksiyonları sonucu oluştuğu için bu reaksiyonları etkileyen tüm parametrelerden doğrudan etkilenir.

Kimyasal reaksiyonlar sonrası jel oluşumunun tamamlanmasıyla uygulanması gereken aşama yaşlandırmadır. Yaşlandırma sürecinde jel uzun süre bekletilir ve kararlı bir forma dönüşmesi sağlanır. Dönüşüm aşamasında, kondenzasyon reaksiyonları sonucu oluşan ağın bağlanabilirliğini arttıran polimerleşme evresi gözlenir. Ardından jelin büzülmesi sağlanarak homojen çözelti içinde var olan sıvının atılması olarak tanımlanan sineriz işlemi gerçekleşir. Son olarak katı fazdan sıvı fazın ayrılması işlemi olan faz ayrımı beklenilerek yaşlandırma evresi tamamlanır.

Sol-gel prosesinin son aşaması oluşan jelin kurutulmasıdır. Kurutma işlemi sırasında jelin yüzeyinde büzülmeler ve çatlamalar gözlenir. Bu aşamadaki mekanik aşınmaları önlemek için kurutma hızına ve ısıtma süresine dikkat edilmelidir. Sol-gel yöntemi uygulanırken başlangıçta kullanılan asit ve bazlar jel üzerinde gözenek oluşumuna sebep olur. Katalizör olarak asit kullanılırsa jel üzerinde küçük gözenekler, baz kullanılırsa jel üzerinde büyük gözenekler oluşur. Büyük gözeneklerin bazıları kurutma esnasında boşalırken, küçük gözenekler çözücü ile etkileşerek ıslak kalır ve

çözelti içinde büyük bir iç basınç farkı yaratır. Kurutma esnasında oluşan bu basınç farkı istenmeyen bir durumdur ve jel yüzeyinde çatlamalara sebep olur. Kuruma sırasında oluşan çatlamaları önlemek için, oluşturulan solun bileşimi, kullanılan katalizör, ince filmin kalınlığı gibi birçok faktöre dikkat edilmelidir. Yapılan bu çalışmada sol-gel yöntemi ile hazırlanan homojen çözeltide jel oluşumu için uygulanan kurutma aşamasını oda sıcaklığında gerçekleştirdik.

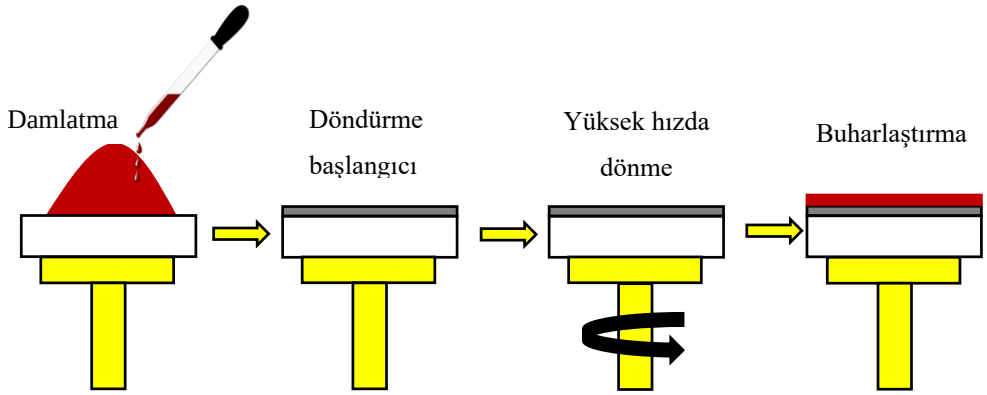
### 2.6.3. Sol-gel ile film kaplama yöntemi

Sol-gel yöntemi kendi içinde, daldırmalı kaplama (dip coating), püskürtmeli kaplama (spray coating), akış kaplama (flow coating), lamine kaplama (laminar coating), merdaneli kaplama (roll coating), baskı kaplama (printing) ve döndürmeli kaplama (spin coating) gibi değişik uygulama şekillerine sahiptir. Bu bölümde tezin deney aşamasında neme duyarlı alttaşlar oluştururken sıkça kullanılan sol-gel uygulama yöntemi olan döndürmeli kaplama uygulamasından bahsedildi.

#### *2.6.3.1. Döndürmeli kaplama yöntemi*

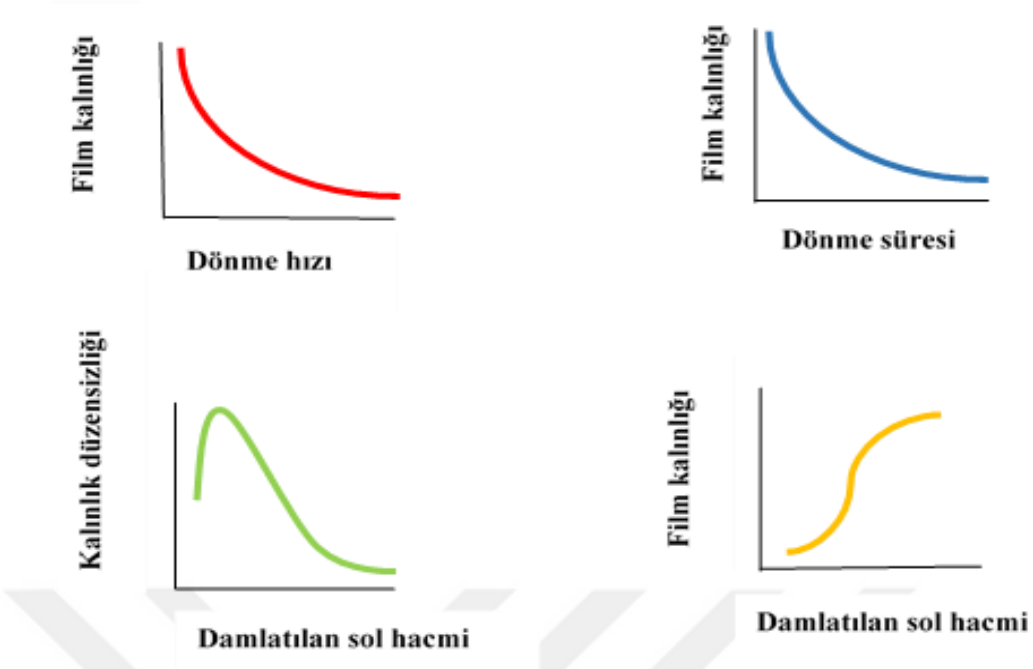
Döndürmeli kaplama yöntemi ile ilgili bilgiler 70 yıl öncesine dayanır. Döndürmeli kaplama yöntemi kullanılarak hazırlamış ilk ince film kaplaması 1958'de Emslie tarafından fosfor parçacıkları içeren polimerin bir fotoyalıtkan ile kaplanması şeklinde yapılmıştır. Döndürmeli kaplama metodu daha çok mikroelektronik endüstrisinde kullanılır. Bu kaplama metodu nano mertebesinden mikro mertebesine kadar tüm boyutlarda film kalınlıkları elde etmeye imkân sunar. Alttaş yatay bir eksen üzerine oturtulur ve döndürme işlemi başlatılır. Döndürme devam ederken sol-gel yöntemi ile değişik molaritede hazırlanan homojen çözelti alttaşın büyüklüğüne göre belli bir miktar alınarak istenen kalınlığa uygun olarak damlatma işlemi gerçekleştirilir ve çözeltinin merkezkaç kuvvetinin etkisi ile alttaş yüzeyine yayılması sağlanır (Ertek, 2011; Yazal, 2014). Döndürme işlemi tamamlandıktan sonra kaplamanın uygulandığı alttaş oda sıcaklığında ya da fırın ortamında tavlanmaya bırakılır.

Döndürmeli kaplama metodu damlatma, döndürmenin başlatılması, döndürme ve buharlaştırma gibi bir seri işlem basamakları ile gerçekleşir ve bu basamaklar Şekil 2.12'de belirtilmiştir.




**Şekil 2.12. Döndürmeli kaplama yönteminin aşamaları (a). Damlatma, (b). Döndürmenin başlatılması, (c). Yüksek hızda döndürme, (d). Buharlaştırılması**

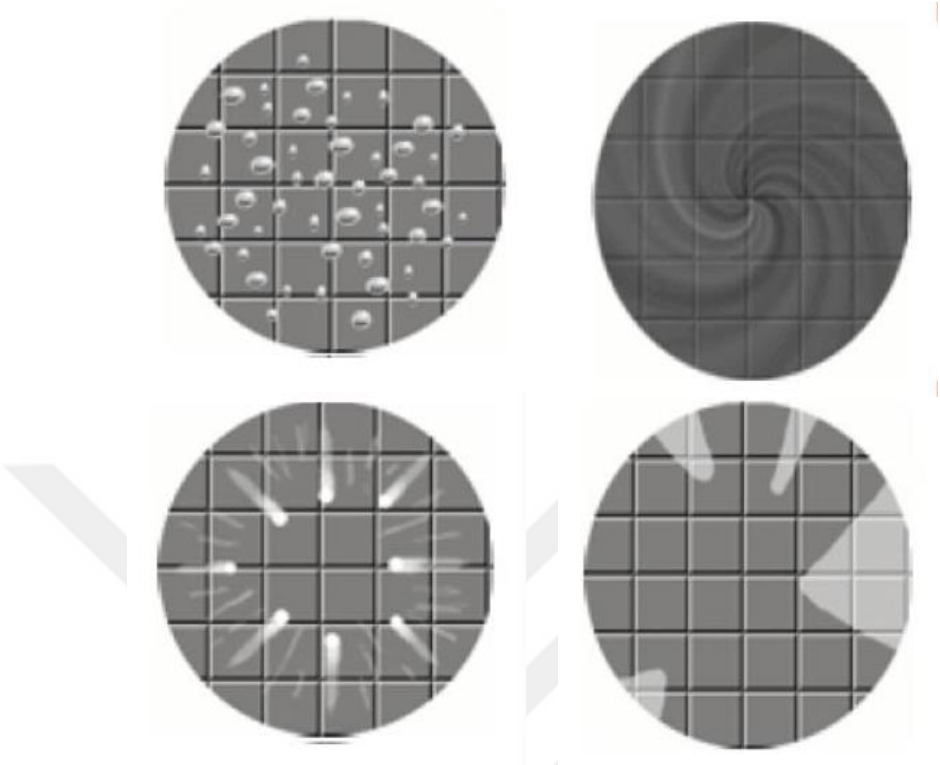
'rpm' uygulama sırasında alttaşın yerleştirildiği yatay eksen olan mekanik parçanın dakikada kaç devir yaptığını gösterir ve İngilizce olarak 'Revolutions per minute' ifadesinin kısaltılmış şeklidir. Sabitleme işlemi pürüzsüz yüzeye sahip ince filmin kaplanmasına fırsat verir. İnce film oluşturulurken homojenliğinin ne gibi faktörlere bağlı olduğu Şekil 2.13'te grafiklerle belirtilmiştir. Döndürmeli kaplama işlemi uygulandıktan sonra oluşturulan ince filmin kalınlığı, çözeltinin viskozitesine, kuruma hızına, kaplama işleminin gerçekleştirildiği devir sayısına ve yatay eksenin dönme hızına bağlı olarak değişir.




**Şekil 2.13. İnce filmin kalınlığının, dönme hızı, dönme süresi ve damlatılan sol hacmi ile ilişkisini gösteren grafikler**

Döndürmeli kaplama yöntemi uygulanırken cam üzerine damlatılan homojen çözelti döndürme sırasında oluşan merkezcil kuvvet ile viskozitenin birbirini dengelemesi sonucu filmin üzerinde düzgün bir görünüm kazanır. Cam üzerine damlatılan homojen çözeltinin yüzeyde dağılmasında statik ve dinamik yöntemler etkilidir. Kaplanacak olan alttaş büyük boyutta ise yüzeyin tamamen kaplanabilmesi için yüksek hızda döndürülmesi ve fazla miktarda çözelti damlatılması gerekir. Bu tür uygulamalarda damlatma işlemi olarak statik yöntem kullanılır ve çözelti merkeze yakın olarak damlatılmalıdır. 500 devir/dak dönme hızına sahip uygulamalarda daha az miktarda çözeltiye ihtiyaç duyan dinamik yöntem kullanılır. Alttaş, dönmenin kazandırdığı hızla üzerindeki fazla kalan sıvıyı atar ve geride kalan sıvının kaplanacak yüzeye tamamen yayılmasını sağlar. Filmin kalınlığı azaldıkça yüzeyden taşan sıvının miktarı da doğru orantılı olarak azalma gösterir. Kaplama işlemi devam ederken hatalı enjeksiyon kullanımına bağlı olarak cam yüzeyinde pürüzlülüğe sebep olabilecek baloncuk benzeri yapılar oluşur. Ayrıca kullanılan homojen çözeltinin tam merkeze enjekte edilmemesi ve dönme süresinin çok kısa tutulması cam yüzeyinde girdap benzeri hataların oluşmasına neden olur. Dönme hızının çok yüksek tutulması, sıvının merkez

dışına doğru enjeksiyonu ve damlatma işlemi gerçekleşmeden önce kullanılan cam yüzeyinde var olan partiküller yüzeyde dışa doğru çekilmelerin oluşmasına sebep olur.



**Şekil 2.14. Döndürmeli kaplama yöntemi uygulandıktan sonra nem sensörü üzerinde oluşan şekil bozuklukları (Karaçalı, 2010).**

Hazırlanan nem sensörleri üzerinde oluşabilecek şekil bozuklukları Şekil 2.14'te belirtilmiştir. Uygulama sırasında homojen çözelti yüzeye az damlatılırsa cam üzerinde kaplanmamış yüzeyler oluşur ve istenilen homojenlikte bir alttaş elde edilemez. Kaplama işlemi sırasında yüzeye damlatılan homojen çözeltinin sadece % 2 veya % 5'i kaplamada kullanılır ve geriye kalan % 98-95'lik kısmı dönmenin kazandırdığı ivme ile kaplama kabının içine boşaltılır (Özbey, 2004).

# 3. DENEYSEL SİSTEMLER

Yapılan tez çalışmasında neme duyarlı ince filmler sol-gel yöntemi ile elektriksel ölçümler için alınan kontaklar ise PVD yöntemi ile hazırlandı. Bu kısımda sol-gel döndürmeli kaplama sistemi, PVD ince film hazırlama sistemleri ve neme duyarlı elektriksel ölçümlerin yapıldığı düzenek anlatılacaktır.

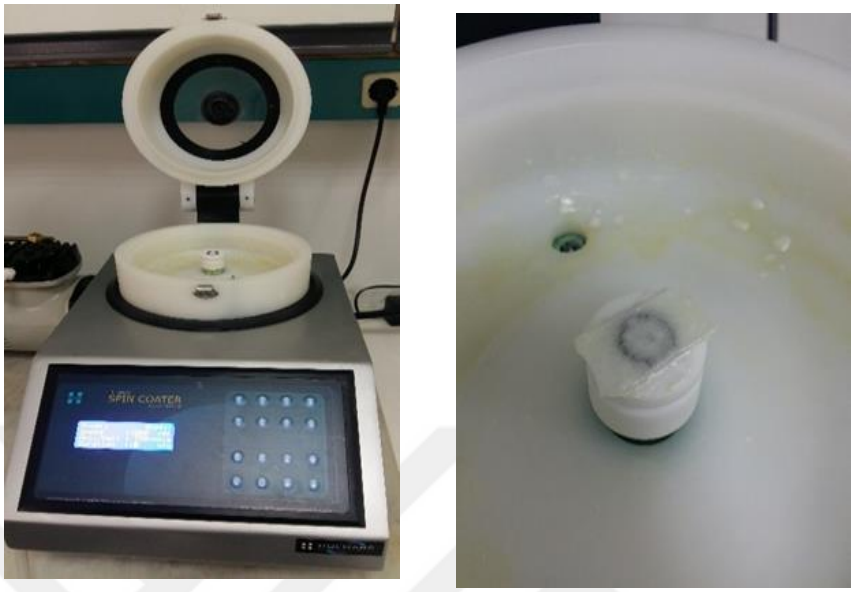
## 3.1. Sol-gel döndürmeli kaplama sistemi

Sol-gel yöntemi laboratuvar koşullarında kolay uygulanan bir ince film hazırlama yöntemidir. Hazırlanan bu tez çalışmasında, sol-gel yöntemiyle neme duyarlı ince filmler, su ve alkol gibi çözücüler kullanılarak farklı konsantrasyonlarda hazırlanan çözeltiler yardımıyla oluşturulmuştur. Şekil 3.1'de sol-gel yöntemi kullanılarak farklı çözücülerle hazırlanmış homojen çözeltiler gösterilmiştir.



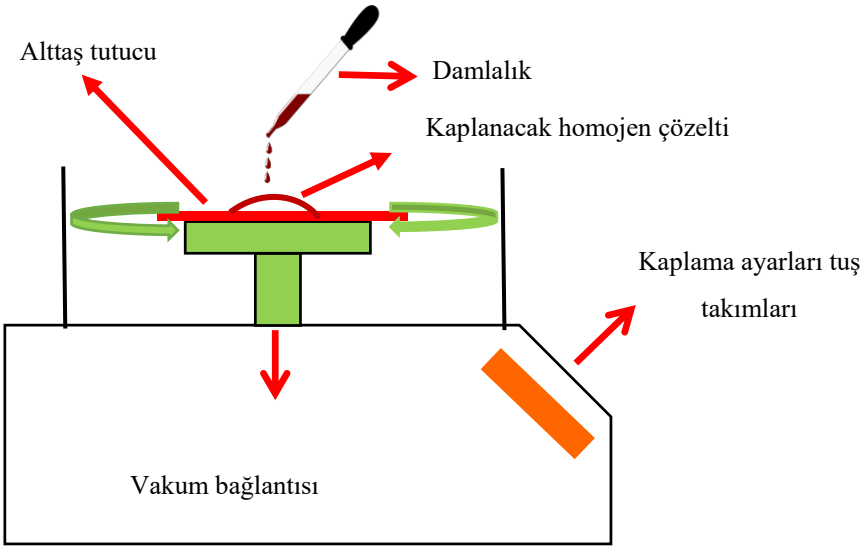
**Şekil 3.1. Sol-gel yöntemi kullanılarak farklı çözücülerle hazırlanmış homojen çözeltiler**

Bu tez çalışmasında sol-gel yöntemi ile ince film hazırlamada kullanılan döndürmeli kaplama cihazı ve kaplama işlemi sonunda üretilen nem sensörü Şekil 3.2'de görülmektedir.



**Şekil 3.2. Döndürmeli kaplama cihazı (Model HO-TH-05) ve kaplanan alttaş**

Döndürmeli kaplama cihazı HO-TH-05 modelindedir. Döndürme işlemi gerçekleştirilirken yatay eksen üzerine yerleştirilen alttaşın dönmenin etkisi ile fırlamaması için alttaş mekanik vakum pompası kullanılarak sabitlenir.

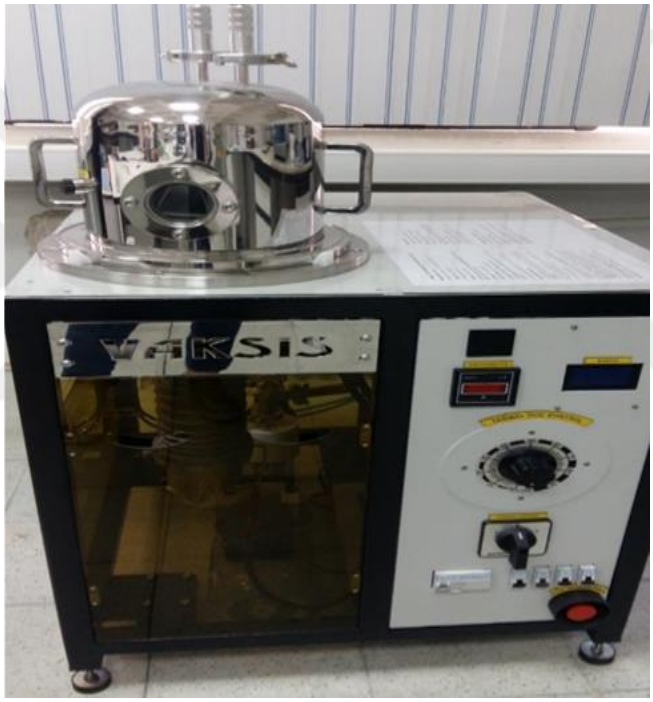



**Şekil 3.3. Döndürmeli kaplama yöntemi şeması**

Döndürmeli kaplama cihazı; teflon bir kâse blok, kilit, döndürme ve kaplama ayarları için LCD bir ekran, tuş takımı ve uygulama ayarları için beş farklı programdan oluşur. Uygulanan her program kendi içinde dokuz farklı adım içerir. Bu süreçte alttaşın dönme hızı 'rpm' olarak, alttaşın hızlanma / yavaşlama ivmesi rpm / dak, s, h olarak ifade edilir. Döndürmeli kaplama cihazının şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.

## 3.2. Isıl buharlaştırma sistemi

Hazırlanan ince filmden elektriksel kontak alabilmek için metal malzeme ısıl buharlaştırma yöntemi ile ince film yüzeyine kaplandı.




**Şekil 3.4. Isıl Buharlaştırma sistemi-Vaksis Ar-Ge ve mühendislik**

Elektriksel kontak alımı için ince film üzerine yapılan metal kaplamada kullanılan ısıl buharlaştırma sistemi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Isıl buharlaştırma sistemi çalıştırılırken ilk olarak K-VKV (Kazan vakum kırma vanası) açılarak pompalama hattı atmosferik basınca getirilir. Bu işlemin ardından vakum kazanı kulplarından tutularak kaldırılır ve pota üzerine kaplama yapılacak metal parçalar yerleştirilir. Sol-gel döndürmeli kaplama yöntemi uygulanarak hazırlanan nem sensörü Şekil 3.5'te gösterildiği gibi alttaş tutucuya yerleştirilir ve kabin içi partiküllerin nem sensörü

yüzeyine yapışmaması için alttaş kapatma perdesi kapatılarak metal buharlaştırma işlemine hazır konuma getirilir. Buharlaştırılacak metallerin ve nem sensörünün hazırlanma işlemleri tamamlandıktan sonra vakum kazanı tekrar yerine yerleştirilerek vakum işlemine başlanır. Uygulama için sırasıyla kaçak akım rölesi, CNT (Sistem kontrol anahtarı) sigortası ve soğutma suyu vanası açılır. Belli bir süre beklendikten sonra MP (Mekanik pompa) sigortası kaldırılır, bypass vana açılır ve paneldeki basınç göstergesi $5.10^{-1}$ Torr'dan düşük oluncaya kadar beklenir. Basınç istenen değere ulaştıktan sonra bypass vana kapatılarak difüzyon blok vanası açılır, DP (Difüzyon pompası) sigortası kaldırılır. 20 dk. beklendikten sonra kelebek vana açılarak vakum odasındaki basıncın $1.10^{-5}$ Torr olması beklenir.



**Şekil 3.5. Metal malzemelerin konulduğu pota ve alttaş tutucu ile tutturulan nem sensörü**

Termal buharlaştırma sigortası açılır ve termal kontrol buharlaştırma anahtarı kullanılarak kaynak seçilir. Termal güç ayar topuzu saat yönünde yavaş yavaş çevrilerek akım akışı sağlanır. Kabin penceresinden bakılarak kaplama için en uygun akım değeri tespit edilir. Bu işlemin ardından nem sensörü üzerinden elektriksel kontak alınabilmesi için gerekli olan metal kaplama işlemi tamamlanmış olur. Sistemi kapatmak için yukarıda uygulanan tüm basamaklar tersi yönde yapılarak sistem kapatılır.



**(a)**



**(b)**

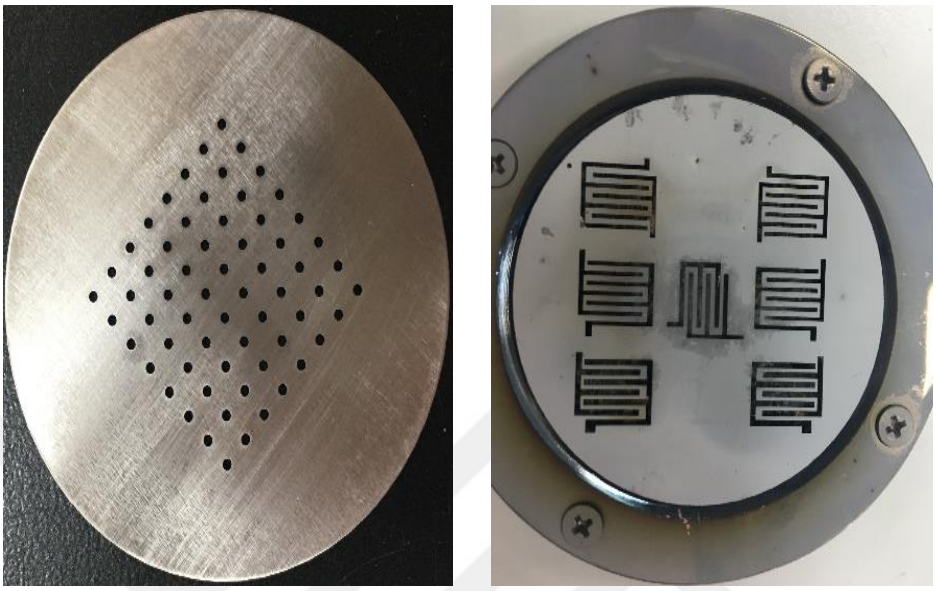
**Şekil 3.6. Metal Buharlaştırma Kaynakları (a). Tel tungsten sepet, b). Metal hazneli pota**

Yapılan tez çalışmasında elektriksel kontak alımı için kullanılan metal malzemelerin ısıl buharlaştırma işleminde Şekil 3.6'da belirtilen buharlaştırma potaları kullanıldı. Kaplama için kullanılan metal malzeme üzerinden uygun akım değeri geçirildiği anda ısıl buharlaştırma sistemi içinde Şekil 3.7'de gösterildiği gibi ışıma gerçekleşir.



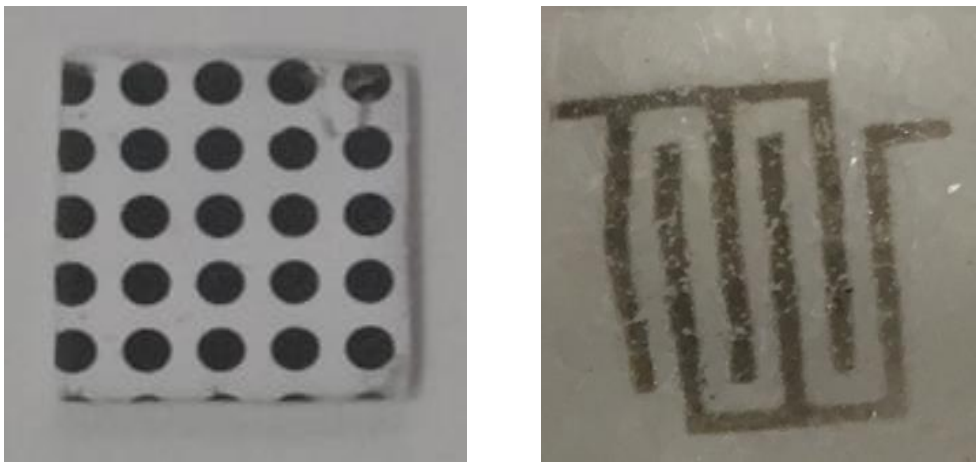
**Şekil 3.7. Isıl buharlaştırma sitemi içindeki ışıma**

Buharlaştırılan malzeme olarak Cu (Bakır 1357 K), AI (Alüminyum 933 K) gibi metaller kullanıldı. Buharlaştırılan metal, üzerine maske yerleştirilen ince film üzerine kaplanır ve alınan metal kontaklar yardımı ile neme karşı elektriksel özelliklerin değişimi incelenir.



**Şekil 3.8. Isıl buharlaştırma sisteminde elektriksel kontak almada kullanılan maskeler**

Şekil 3.8'de ısıl buharlaştırma sisteminde kontak almada kullanılan maskeler görsel olarak belirtilmiştir. Maske kullanılarak ısıl buharlaştırma sisteminde üzerine AI, Cu, Ag, vs. gibi metallerden kontak alınarak neme duyarlı ince filmler elektriksel ölçüme hazır hale getirildi.



**Şekil 3.9. Maske ile üzerine metal kontak alınan neme duyarlı ince filmler**

Hazırlanan nem sensörü üzerine elektriksel kontak için uygulanan metal kaplamalar Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ısıl buharlaştırma sisteminde vakum, mekanik pompa ve difüzyon pompası yardımı ile elde edilmektedir. Isıtıcının çalışmaya başlaması ile ısınan yağ buharı çanak şeklindeki yansıtıcıya hızla çarpar, çarpmanın etkisi ile daha da hızlanan yağ buharı küçük deliklerden süpersonik hızlarla aşağı doğru iner ve hava moleküllerini de beraberinde taşır. Aşağı inen hava molekülleri difüzyon pompasıyla eş zamanlı çalışan mekanik pompa tarafından emilerek dışarı atılır. Difüzyon pompasının çeperlerinde bulunan soğuk su pompaları ısınan yağ damlacıkları ile temasa geçerek faz değişimine sebep olur ve sıvılaşan yağ tekrar kaynatılmak üzere haznelere iletilir.

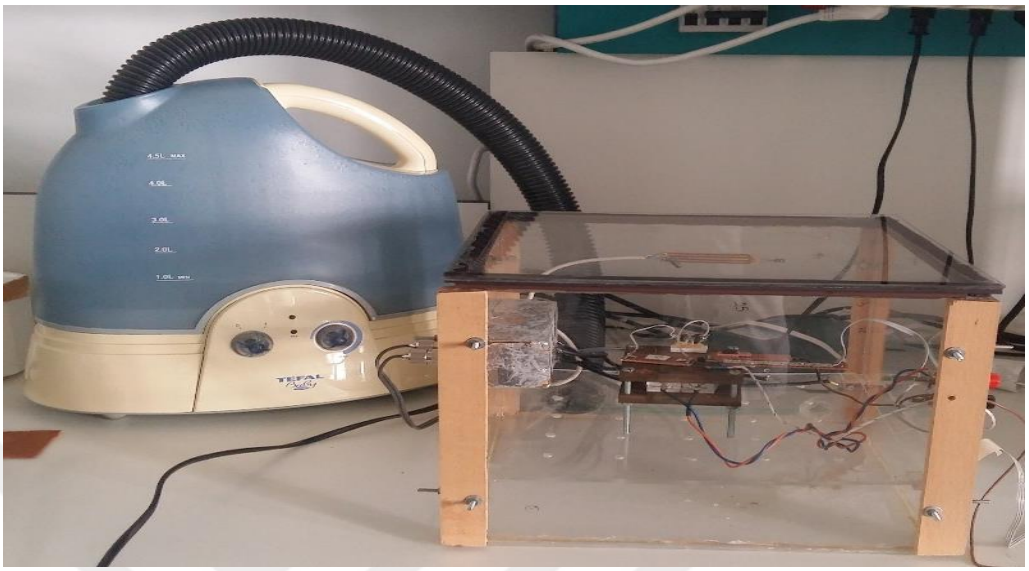
Sistemin oluşumunda var olan pompaların yanı sıra kelebek vana, kazan vakum kırma vanası ve bypass blok vanası (BP-BV) gibi mekanik parçalarda yer almaktadır. Vanalar, sistem de yer alan akışkanların akışını ve geçişini sağlayan, akışkanların yönünü, miktarını, basıncını ve sıcaklığını değiştiren mekanik cihazlardır.

Kelebek vana; açma, kapama ve debi ayarında kullanılan çok yönlü bir vana türüdür. Kelebek vanalarında 15° ile 75° arasında kontrol edilmesi gereken hareket sahaları vardır ve yüzeyi korozyona dayalı paslanmaz çelikten üretilmiştir. Kazan vakum kırma vanası ise, işlem odasında oluşan basıncı atmosferik basınç değerine getirerek kazanın rahatlıkla kaldırılmasını sağlar. Vakum kazanı kaldırılıp hazırlanan numune için ihtiyaç duyulan işlem yapıldıktan sonra kazan vakum kırma vanası kesinlikle tekrar kapatılmalıdır. Bypass-blok vanası, sistemde oluşacak yüksek vakumdan dolayı açılması zorlaşan kelebek vananın açılması işleminde rol alır. Bypass vana hattı üzerinde bulunan küçük çapa sahip sürgülü vana açılarak su akışı sağlanır böylece vananın her iki tarafındaki basınç farkı dengelenmiş ve kelebek vananın açılması kolaylaştırılmış olur.

### 3.3. Nem ölçüm odacığı

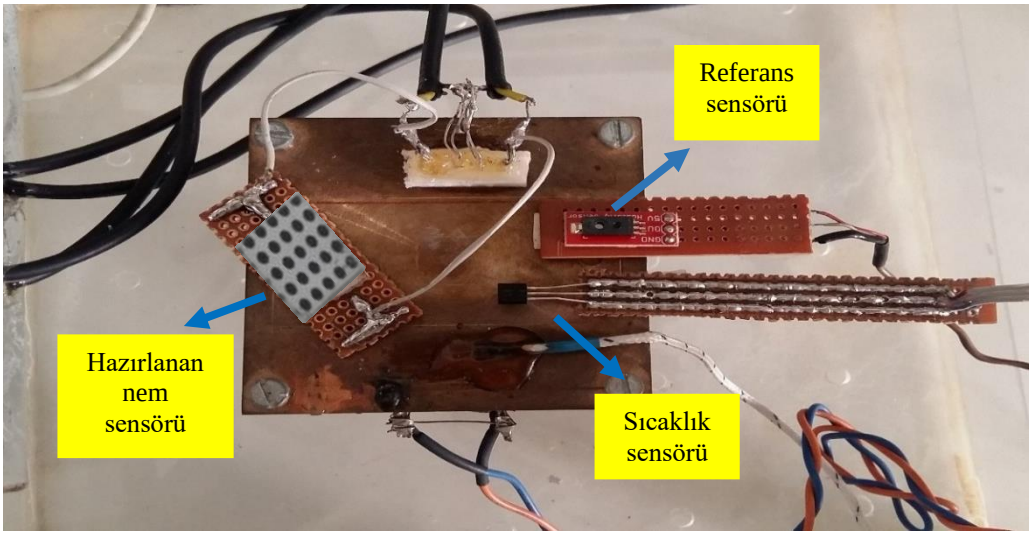
Deneysel çalışmalar sonunda hazırlanan ve elektriksel kontakları alınan nem sensörlerinin neme duyarlılıklarının tespiti için laboratuvar ortamında daha önce kurulumu gerçekleştirilmiş, tez çalışması kapsamında da geliştirilen nem ölçüm odacığı kullanıldı. Sıcaklığın ve nemin kontrol edilebildiği test odacığında ortamın

nemine bağlı olarak nem sensörünün elektriksel özelliklerindeki değişim incelendi. Elektriksel özellikte meydana gelen değişim incelenerek üretilen nem sensöründe kalibrasyon çalışması yapıldı.



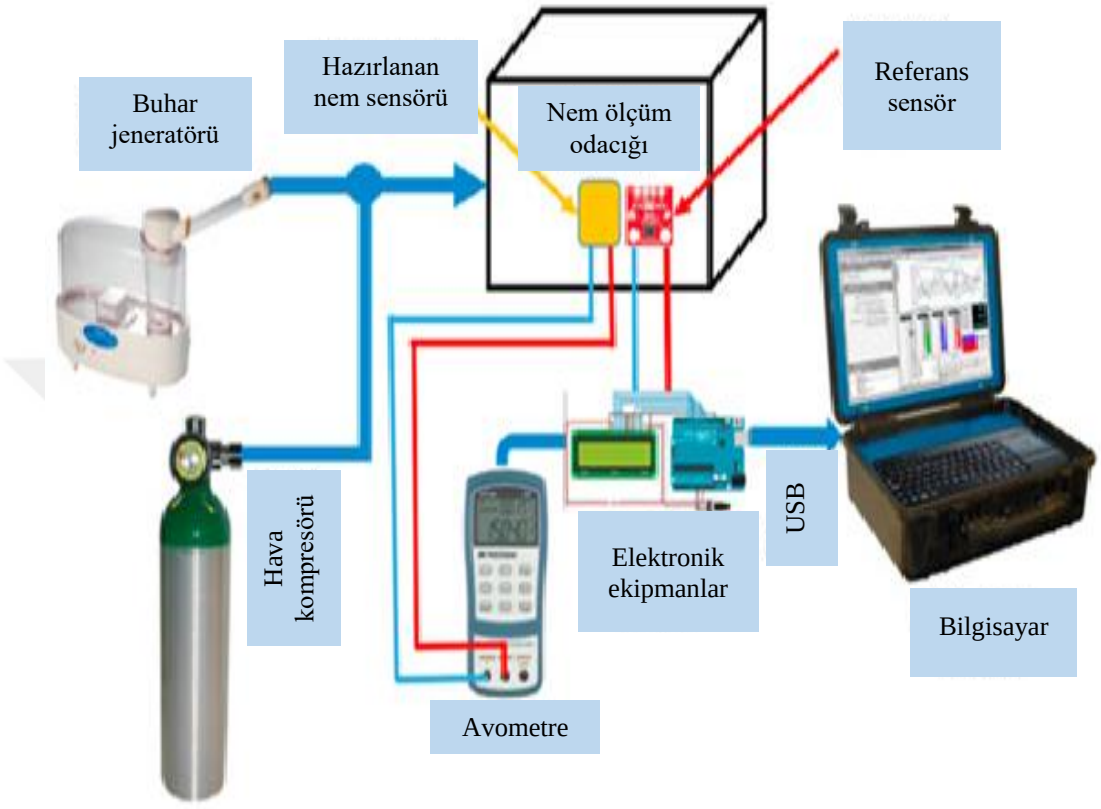
**Şekil 3.10. Nem ölçüm odacığında kullanılan buhar üreticisi ve kontrol odacığı**

Şekil 3.10'da nem sensörünün nem algılama özelliğini ölçmek için kullanılan sistem gösterilmektedir. Kontrol odacığına ticari olarak temin edilen, kalibrasyonu yapılan referans bir sensör ve ortamın nemine bağlı olarak direnci değişen sol-gel yöntemi kullanılarak hazırlanan nem sensörü Şekil 3.11'de olduğu gibi yerleştirildi.



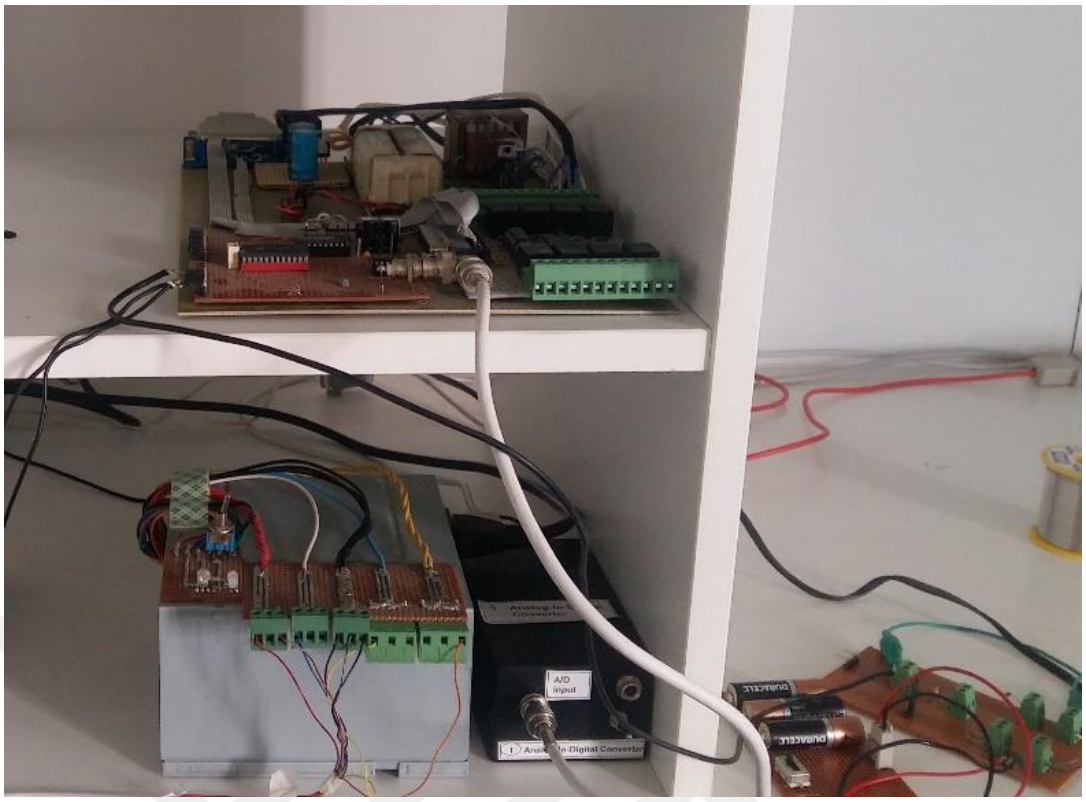

**Şekil 3.11. Kontrol odacığına yerleştirilen referans sensör ve hazırlanan ZnO-$SnO_2$ nem sensörü**

Su buharı, içerisinde akustik titreştirici bulunan bir buhar jeneratörü yardımıyla üretilir. Üretilen su buharı plastik hortumlar yardımıyla nem odacığına yönlendirilir. Nem odacığında biriken fazla buhar küçük bir hava kompresörü ile itilerek Şekil 3.12'de görseli verilen nem ölçüm odacığından uzaklaştırıldı.



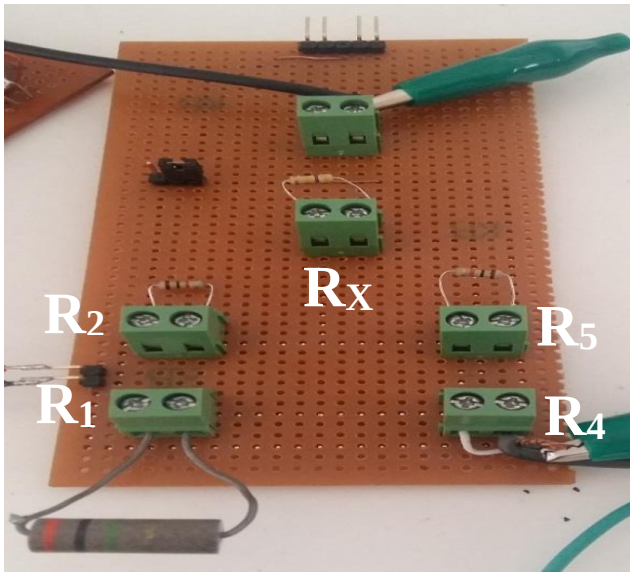

**Şekil 3.12. Nem kontrol odacığı ünitesi ve ekipmanlarının şematik gösterimi**

Buhar jeneratörü sayesinde ortamın nemi istenen düzeyde tutuldu. ZnO ve $SnO_2$ nem sensörleri üzerindeki elektriksel direnç değişimi Şekil 3.13'te verilen nem ölçüm sistemindeki kontrolcüler ve yazılımlar kullanılarak ölçülüp kaydedildi. Nem kontrol odacığında buhar üreticisi kullanılarak oluşturulan havadaki neme bağlı olarak üretilen sensörün direncindeki değişim incelenmiştir.



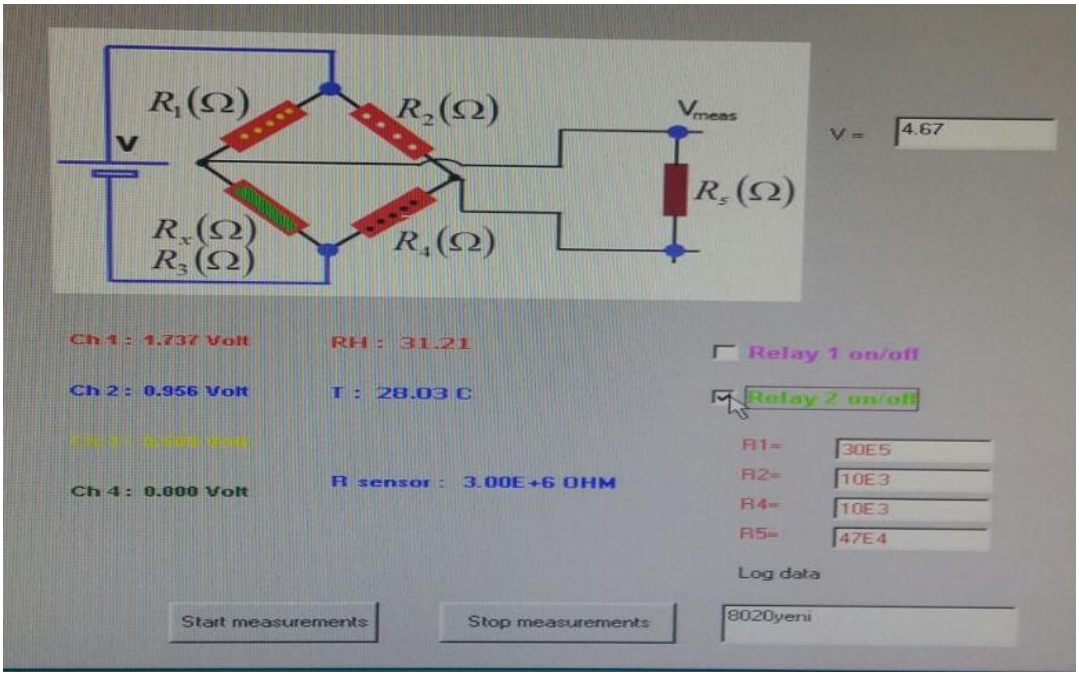

**Şekil 3.13. Nem ölçüm odacığında kullanılan elektronik ekipmanlar**

Üretilen sensörün direncini hesaplamak için Şekil 3.14'te belirtilen Wheatstone köprüsü kullanılmıştır. Wheatstone köprüsündeki DC dirençler $R_1$, $R_2$, $R_4$, $R_5$ ve hazırlanan ince film üzerindeki değişken direnç $R_X$ olarak tanımlandı.




**Şekil 3.14. Wheatstone köprüsü**

Bu çalışmada $R_1$ direnci $30.10^5\ \Omega$, $R_2$ direnci $10.10^3\ \Omega$, $R_4$ direnci $10.10^3\ \Omega$ ve $R_5$ direnci $47.10^4\ \Omega$ değerinde belirlenerek Şekil 3.15'te gösterildiği gibi Visual Basic de hazırlanan programa girdi olarak yazıldı. $R_X$ direncinin tespiti için bilgisayarda bir yazılım hazırlanmıştır. Üretilen nem sensörleri uygulanan neme karşılık logaritmik direnç değişimleri sergilemektedir. Nem sensörlerinin üzerine DC sabit gerilimi uygulanır. Dirençteki logaritmik değişim nedeniyle sensör üzerinden geçen akım şiddetide logaritmik değişim sergilemektedir. Akım şiddetindeki logaritmik değişimler ancak auto-range özelliğine sahip bir nano-ampermetre ile takip edilebilir. Bu direnç değişimindeki zorluğu aşmanın pratik yolu Wheatstone köprüsü kullanmaktır.




**Şekil 3.15. Test edilen nem sensörünün direncini ölçen ve kayıt eden yazılımın ekran görüntüsü**

Wheatstone köprüsüne bağlı değeri bilinmeyen $R_x$ direnci logaritmik değişim sergilese dahi köprü devresinin çıkışındaki gerilim değerleri lineer bir skala içinde kalabilir. Wheatstone köprüsü çözümlemek için kullanılan en etkili yöntem Kirchhoff kurallarını kullanmaktır. Bilinmeyen direnç değerlerinin bulunması için kullanılan bu devre 1848'de Wheatstone tarafından keşfedilmiştir.

Kirchhoff kurallına göre a, b ve d dallanma noktaları kullanılarak çözümlemeye başlanırken, wheatstone köprüsünde Şekil 3.16'da belirtildiği gibi dört dallanma

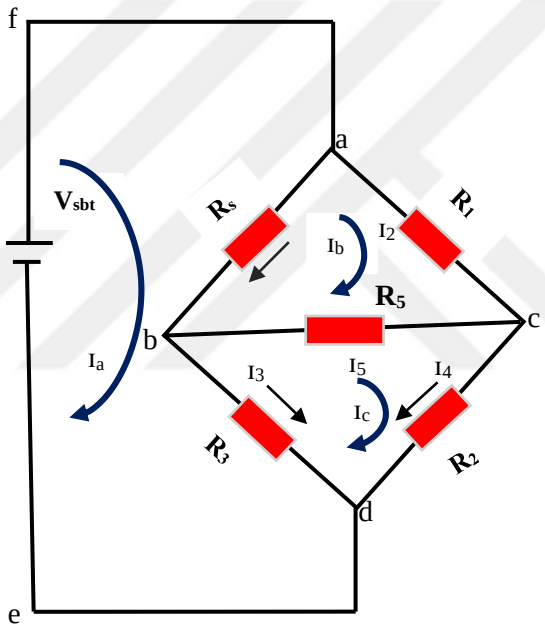
noktası olduğundan üç bağımsız akım denklemi yeterlidir ve c noktası için dördüncü bir denklem yazımına gerek yoktur.

Kirchhoff kuralları uygulandığında a, b ve d dallanma noktaları için yazılan denklemler aşağıda sırasıyla ifade edildi.

$$I - I_2 - I_1 = 0 \tag{3.1}$$

$$I_1 - I_3 + I_5 = 0 \tag{3.2}$$

$$I_3 - I_4 - I = 0 \tag{3.3}$$




**Şekil 3.16. Wheatstone köprüsünde akım akış yönü**

Kirchhoff kuralı abdefa, acba ve bcdb noktalarına uygulanırsa denklemler aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$-I_1R_1 - I_3R_3 + V = 0 \tag{3.4}$$

$$-I_2R_2 - I_5R_5 + I_1R_1 = 0 \tag{3.5}$$

$$I_5R_5 - I_4R_4 + I_3R_3 = 0 \tag{3.6}$$

3.1'den 3.6'ya kadar olan tüm denklemler düşünüldüğünde altı bilinmeyenli altı denklem olduğu görülür. Denklemlerin çözümü için determinant yöntemi uygulanabileceği gibi bu tip karışık devrelerin çözümü için çoğu kez ilmek akımlarının kullanılması ile sonuca gidilir. James Clerk Maxwell'in onurlandırılması için Maxwell kuralı olarak tanımlanan bu yöntem Kirchhoff kurallarının ikisini aynı anda uygulayıp denklemlerin sayısını azaltmayı sağlar. Akım yönleri Şekil 3.16'da olduğu gibi belirtilerek gerilim denklemleri her ilmek için yazılır.

$$V - R_1 (I_a - I_b) - R_3 (I_a - I_c) = 0 \tag{3.7}$$

$$- R_2 I_b - R_5 (I_b - I_c) + R_1 (I_a - I_b) = 0 \tag{3.8}$$

$$R_3 (I_c - I) + R_5 (I_c - I_b) + R_4 I_c = 0 \tag{3.9}$$

Denklemler çözümlenirken akım yönlerinin işaretlerine dikkat edilir.

Denklemler düzenlenirse,

$$- (R_1 + R_3) I_a + R_1 I_b + R_3 I_c = -V \tag{3.10}$$

$$R_1 I_a - (R_1 + R_2 + R_5) I_b + R_5 I_c = 0 \tag{3.11}$$

$$-R_3 I_a - R_5 I_b + (R_3 + R_4 + R_5) I_c = 0 \tag{3.12}$$

şeklinde bağıntılar elde edilir. 3.10, 3.11 ve 3.12 denklemlerinden $I_b$ akım değeri, determinant kullanarak çözülürse oranlar kurulur ve paydada akımların katsayılarından oluşan determinant, payda ise benzer bir determinant değeri yer alır. Bilinmeyen akımların katsayıları kullanılmaz, onların yerine eşitliklerin sağ tarafı yazılır. $I_b$ çözümü için aşağıdaki bağıntılar kurulur.

$$I_b = \frac{\begin{vmatrix} -(R_1+R_3) & -V & R_3 \\ R_1 & 0 & R_5 \\ -R_3 & 0 & R_3+R_4+R_5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -(R_1+R_3) & R_1 & R_3 \\ R_1 & -(R_1+R_2+R_5) & R_5 \\ R_3 & -R_5 & R_3+R_4+R_5 \end{vmatrix}} \tag{3.13}$$

$$I_b = \frac{V R_5 R_3 + V R_1 ( R_3 + R_4 + R_5 )}{\Delta} \quad (3.14)$$

Burada Δ paydadaki determinantın değerini gösterir. Aynı işlem basamakları $I_c$ akımını bulmak içinde uygulanabilir. $I_c$ için,

$$I_c = \frac{\begin{vmatrix} -(R_1 + R_3) & R_1 & -V \\ R_1 & -(R_1 + R_2 + R_3) & 0 \\ R_3 & -R_5 & 0 \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (3.15)$$

$$I_c = \frac{V R_1 R_5 + V R_3 (R_1 + R_2 + R_5)}{\Delta} \quad (3.16)$$

$I_5$ olarak Şekil 3.16'da ifade edilen $R_5$ akımı için,

$$I_5 = I_b - I_c \quad (3.17)$$

$$I_5 = \frac{V}{\Delta}(R_5 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_1 R_5 - R_1 R_5 - R_1 R_3 - R_2 R_3 - R_5 R_3) \quad (3.18)$$

$$I_5 = \frac{V}{\Delta}(R_1 R_4 - R_2 R_3) \quad (3.19)$$

Wheatstone köprüsünde,

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_1}{R_4} \quad (3.20)$$

dirençler arası bağıntı denklem 3.20'deki gibi ise $I_5$ akımı sıfır alınır ve uygulanan gerilimden bağımsız kabul edilir. Eğer Wheatstone köprüsündeki direnç oranları denklem 3.20'deki gibi dengede ise $R_1$, $R_2$, $R_3$ dirençleri biliniyor ve $I_5$ sıfır değerinde ise $R_4$'ün değeri denge şartı kullanılarak hemen hesaplanabilir. Wheatstone köprüsünde ayrıca $R_1$ ve $R_2$ dirençleri bir anahtarı $R_2$ / $R_1$ oranını onluk olarak verecek şekilde bağlanarak hesaplamalar yapılır. $R_3$ sürekli değişen bir direnç olup, $R_3$ ayarlanarak köprü dengesi sağlanırsa $R_4$'ün bilinmeyen ($R_2$ / $R_1$) değeri $R_3$ olarak

kabul edilir. $R_2$ / $R_1$'in değerleri $10^{-3}$, $10^{-2}$ ve $10^{-1}$'den 1, 10,$10^2$ ve $10^3$ arasında hesaplanabilir ve geniş bir bölgede direnç değeri ölçmeye fırsat sunar. $R_5$'in yerine akım gösteren bir aygıt bağlanarak dengeyi göstermesi sağlanır. Kullanılan aygıtın ayarlanmasına gerek duyulmaz, çünkü aygıt sadece dengeyi yani akımın sıfır olduğunu göstermesi için kullanıldı. Paydada yazılan determinant değeri aşağıda bağıntılarla verilmiştir.

$$\Delta = \begin{vmatrix} -(R_1 + R_3) & R_1 & R_3 \\ R_1 & -(R_1 + R_2 + R_5) & R_5 \\ -R_3 & -R_5 & R_3 + R_4 + R_5 \end{vmatrix} \quad (3.21)$$

$$\Delta = -(R_1 + R_3)[-(R_1 + R_2 + R_5)(R_3 + R_4 + R_5) + R_5^2] - R_1[R_1(R_3 + R_4 + R_5) + R_3R_5] + R_3\,[-R_1R_5 - R_3(R_1 + R_2 + R_5)] \quad (3.22)$$

$$\Delta = (R_1 + R_3)(R_1 + R_2 + R_5)(R_3 + R_4 + R_5) - R_5^2(R_1 + R_3) - R_1^2(R_3 + R_4 + R_5) - R_1R_3R_5 - R_1R_3R_5 - R_3^2(R_1 + R_2 + R_5) \quad (3.23)$$

$$\Delta = (R_1 + R_3)(R_1 + R_2 + R_5)(R_3 + R_4 + R_5) - R_5^2(R_1 + R_3) - R_1^2(R_3 + R_4 + R_5) - 2R_1R_3R_5 - R_3^2(R_1 + R_2 + R_5) \quad (3.24)$$

$$\Delta = (R_3 + R_4 + R_5)[(R_1 + R_3)(R_1 + R_2 + R_5) - R_1^2] - 2R_1R_3R_5 - R_5^2(R_1 + R_3) - R_3^2(R_1 + R_2 + R_5) \quad (3.25)$$

$$\Delta = (R_3 + R_4 + R_5)[R_1^2 + R_1R_2 + R_1R_5 + R_3R_1 + R_3R_2 + R_3R_5 - R_1^2] - 2R_1R_3R_5 - R_5^2(R_1 + R_3) - R_3^2(R_1 + R_2 + R_5) \quad (3.26)$$

$$\Delta = (R_3 + R_4 + R_5)[R_3(R_1 + R_2 + R_5) + R_1(R_2 + R_5)] - 2R_1R_3R_5 - R_5^2(R_1 + R_3) - R_3^2(R_1 + R_2 + R_5) \quad (3.27)$$

$$\Delta = (R_3 + R_4 + R_5)[R_1R_3 + (R_2 + R_5)(R_1 + R_3)] - 2RR_1R_3R_5 - R_5^2(R_1 + R_3) - R_3^2(R_1 + R_2 + R_5) \quad (3.28)$$

$$\Delta = R_1(R_2 + R_5)(R_3 + R_4 + R_5) + R_3(R_3 + R_4 + R_5)(R_1 + R_2 + R_5) - R_3^2(R_1 + R_2 + R_5) - 2R_1R_3R_5 - R_5^2(R_1 + R_3) \quad (3.29)$$

$$\Delta = (R_1 + R_2 + R_5)[R_3(R_3 + R_4 + R_5) - R_3^2] + R_1(R_2 + R_5)(R_3 + R_4 + R_5) - R_5^2(R_1 + R_3) - 2R_1R_3R_5 \quad (3.30)$$

$$\Delta = (R_1 + R_2 + R_3)[R_3^2 + R_3R_4 + R_3R_5 - R_3^2] + R_1(R_2 + R_5)(R_3 + R_4 + R_5) - R_5^2(R_1 + R_3) - 2R_1R_3R_5 \quad (3.31)$$

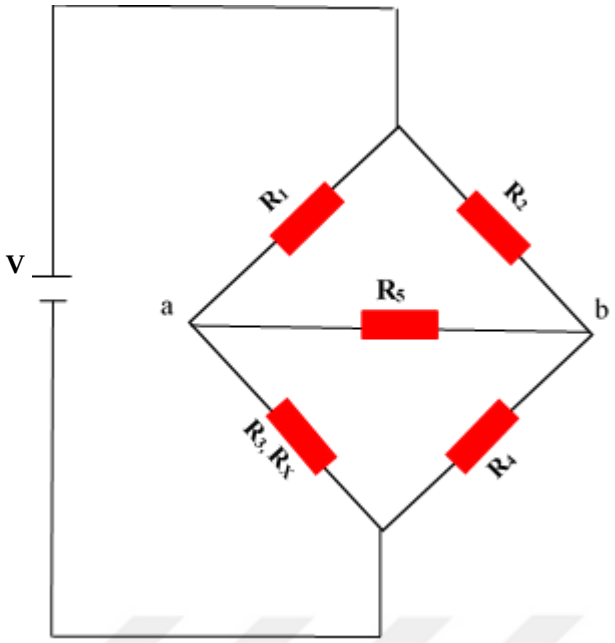
$$\Delta = (R_1 + R_2 + R_5)[R_3(R_4 + R_5)] + R_1(R_2 + R_5)(R_3 + R_4 + R_5) - R_5^2(R_1 + R_3) - 2R_1R_3R_5 \quad (3.32)$$

$$\Delta = R_3R_4R_1 + R_3R_4R_2 + R_3R_4R_5 + R_3R_5R_1 + R_3R_5R_2 + R_3R_5^2 + R_1R_2R_3 + R_1R_2R_4 + R_1R_2R_5 + R_1R_3R_5 + R_1R_4R_5 + R_1R_5^2 - R_3R_5^2 - R_1R_5^2 - 2R_1R_3R_5 \quad (3.33)$$

$$\Delta = R_3R_4(R_1 + R_2 + R_5) + R_1R_2(R_3 + R_4 + R_5) + R_5(R_1R_4 + R_2R_3) \quad (3.34)$$

$$\frac{\Delta}{R_5} = R_3R_4\left(\frac{R_1+R_2}{R_5} + 1\right) + R_1R_2\left(\frac{R_3+R_4}{R_5} + 1\right) + (R_1R_4 + R_2R_5) \quad (3.35)$$

$$\lim_{R_5} \frac{\Delta}{R_5} = R_3R_4 + R_1R_2 + R_1R_4 + R_2R_3 \quad (3.36)$$




**Şekil 3.17. Nem sensörü direncinin tespit edilmesi için kullanılan wheatstone köprüsü**

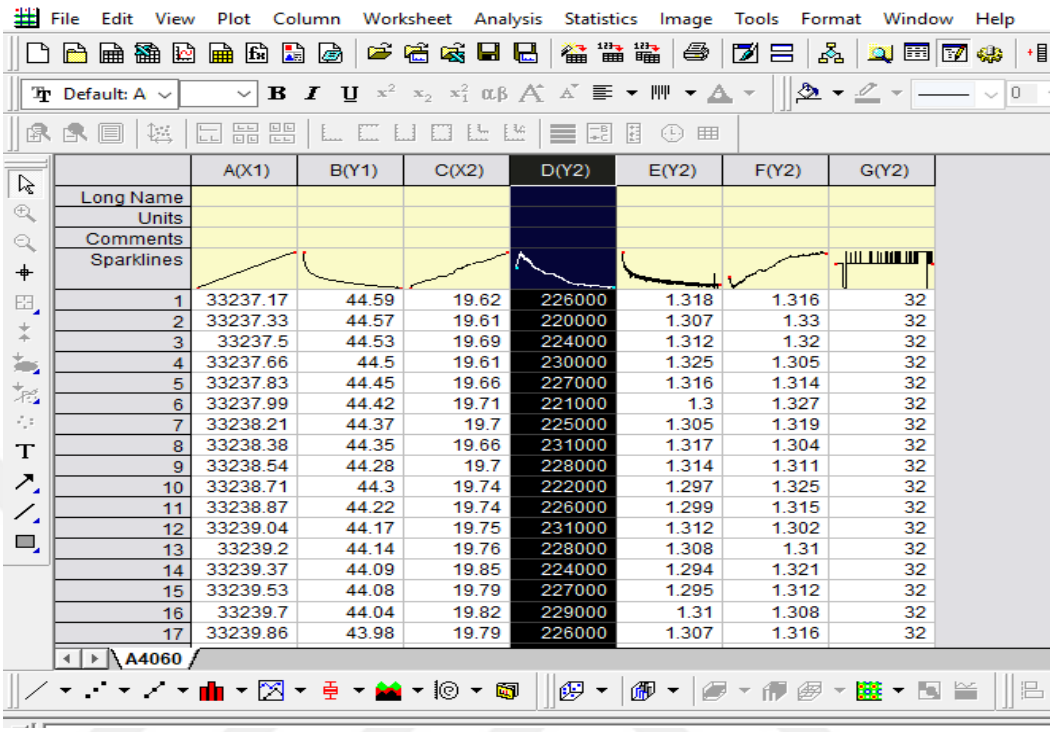
Sekil 3.17'deki $R_3$ direnci tez çalışmasında yer alan ve bilinmeyen sensör direncine ($R_x$) karşılık gelmektedir. Denklem 3.37'de verilen sensör direncinin $R_1$, $R_2$, $R_4$, $R_5$, $V_{ab}$ ve V'ye bağlı ifadesi verilmektedir.

$$\frac{V_{ab}}{V} = \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{R_3R_4\left(\frac{R_1+R_2}{R_5}+1\right)+R_1R_2\left(\frac{R_3+R_4}{R_5}+1\right)+R_1R_4+R_2R_5} \tag{3.37}$$

$$R_3 = \frac{R_1R_4 - \frac{V_{ab}}{V}\left[R_1R_4+R_1R_2\left(1+\frac{R_4}{R_5}\right)\right]}{\frac{V_{ab}}{V}\left[R_4\left(1+\frac{R_1+R_2}{R_5}\right)+\frac{R_1R_2}{R_5}+R_2\right]+R_2} \tag{3.38}$$

Sensörlerin tamamı test edilip verilerin kayıt altına alınmasından sonra origin grafik editörü kullanılarak grafik çizimi gerçekleştirildi. Origin pro-8, bilimsel verilerin istatistiki sonuçlarını almak için geliştirilen bir analiz ve grafik editörüdür. Hızlı ve

doğru analiz özellikleri sayesinde verilerin istatiki sonuçları alıp grafiğe dökebilir. Origin pro-8'in Graph veri analiz programına ait görsel Şekil 3.18'de verildi.




**Şekil 3.18. Origin pro-8 grafik editörünün bilgisayar ekranı görüntüsü**

# 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde sol–gel yöntemi kullanılarak ZnO (çinko oksit), $SnO_2$ (kalay oksit) veya bu malzemelerin karışımından oluşan malzemelerle neme duyarlı nem sensörleri üretilmesi hedeflendi. Yapılan çalışmada su ve alkol gibi çözücüler kullanılarak farklı konsantrasyonlarda hazırlanan çözeltiler, cam üzerine döndürmeli kaplama yöntemi kullanılarak kaplandı ve nem sensörleri üretildi.

Çalışma sonucu üretilen nem sensörlerinin ortamın nemine bağlı olarak elektriksel dirençlerinin geniş bir nem aralığında değişim göstermesi hedeflenmiştir. Ortamın nemine bağlı olarak gerçekleşen elektriksel değişimler kaydedilerek, elde edilen sonuçların analizi ve değerlendirilmesi yapıldı. Bu kısımda ilk olarak ince film hazırlama süreçleri ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

## 4.1. Alttaşların Hazırlanması

Bu çalışmada ince filmlerin üzerine büyütüleceği alttaş olarak 76 × 26 mm, 3 × 1 inch boyutlarında objekttrager cam kullanıldı. Alttaşların döndürmeli kaplama sistemine uygun şekilde yerleştirebilmesi için, camlar 1cm × 1cm boyutlarında kesilerek kullanıldı. Mikroskobik camı kesme işlemi elmas uçlu cam kesici ile gerçekleştirildi. Kesme işlemi sırasında elmas uçlu cam kesici mikroskobik cam üzerinde dik bir şekilde tutuldu ve bir miktar cam üzerine güç uygulanarak kesme işlemine başlandı. Kesilen camların düz bir görünüm kazanması için cetvel yardımı ile bir hat çizildi ve cam kesici ileri-geri hareket ettirilerek cetvel ile oluşturulan düz hat belirginleştirildi. Kolay şekilde koparılacağı kanaatine varıldıktan sonra cam üzerinde oluşturulan hat boyunca hafif basınç uygulayarak camın düz bir şekilde kesimi tamamlandı. Nem sensörlerinin üzerinde büyütüldüğü alttaş olarak kullanılan mikroskobik camlar Şekil 4.1'de verilmiştir.




**Şekil 4.1. Alttaş olarak kullanılan mikroskobik camlar (76 × 26 mm / 3 × 1 inch)**

## 4.2. Alttaşların Temizlenmesi

Üretilecek nem sensörlerinin alttaşa iyi tutunabilmesi ve yüzey homojenliği açısından alttaş temizliği oldukça önemlidir. Bu bölümde alttaş temizliğinde kullanılan sterilizasyon basamaklarından bahsedilecektir. İlk basamak olarak elmas cam kesici ile kesilen ve üzerinde kesme işlemine bağlı olarak biriken cam tozlarını, yağları yok etmek amacıyla alttaşlar deterjanla yıkandı, tortuların ve yağların tamamen gittiğinden emin oluncaya kadar sıcak suyla durulandı. 1cm × 1cm boyutlarında kesilen mikroskobik camlar ultrasonik temizleyici (LC 30 H markalı) içine konularak temizleme işlemi başlatıldı. Alttaşlar 30 dk. saf su, 30 dk. aseton ($C_3H_6O$), 30 dk. etanol ($C_2H_6O$) içinde ultrasonik temizleyicide temizlendi. Kullanılan diğer tüm malzemelerin temizliği alkol ya da saf su ile gerçekleştirildi. Malzemelerin temizlenmesi için kullanılan ultrasonik temizleyici Şekil 4.2'de görülmektedir. Ultrasonik temizleyici belli frekanslarda çalışır ve bu frekanslara bağlı olarak oluşan dalgalar solüsyonu sıkıştırır ve bırakır. Bu periyodik işlem ile sıvı yüzeyinde oluşan titreşim hareketi sonrasında alttaş yüzeyindeki partiküller temizlenmiş olur. Alttaşlar temizlendikten sonra cımbız yardımı ile tek tek temizleyici içinden alınarak kurumaya bırakılır. Temizlenen alttaşlar hemen kullanılacaksa desikatör içinde, hemen kullanılmayacaksa saf su ya da etanol dolu bir beher içinde bekletilir.



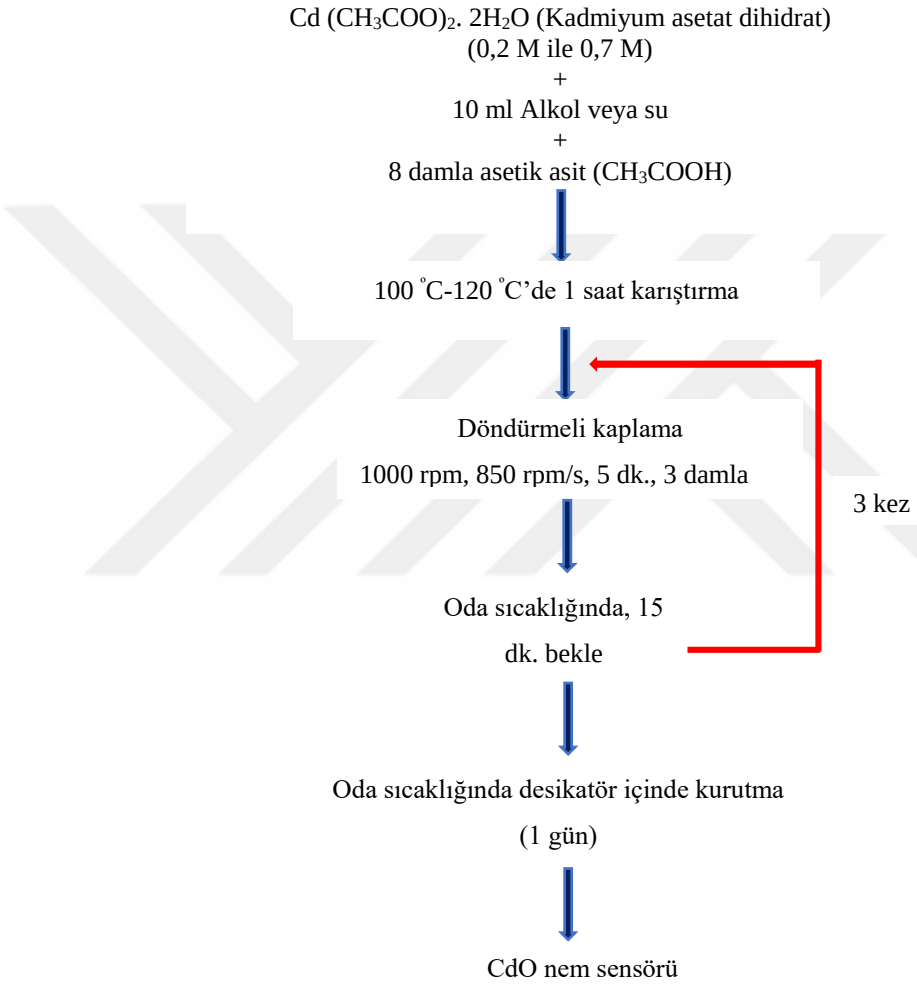

**Şekil 4.2. Ultrasonik temizleyici (LC 30 H)**

## 4.3. Sol-gel Yöntemi ve İnce Film Hazırlığı

Öncelikle alttaş üzerine kaplaması gerçekleştirilecek olan farklı konsantrasyonlarda çözelti hazırlanması ile çalışmalara başlanıldı. Çözelti hazırlanırken, çözünen ve çözücüden farklı oranlarda katılarak molarite değerleri saptandı. Bir maddenin başka bir madde içinde molekülleri veya iyonları şeklinde dağılması sonucu çözelti dediğimiz homojen karışımlar oluşur. İyon ya da molekül şeklinde çözelti içinde dağılan maddeye çözünen, maddeyi çözen diğer yapıya da çözücü denir. Çözeltideki çözünmüş olan maddenin miktarını belirlemek için konsantrasyon terimi kullanılır ve bu değer molarite olarak ifade edilir. Bu çalışmada sol-gel yöntemi ile çözelti hazırlanırken çözünen olarak Cd $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ (Kadmiyum asetat dihidrat), $SnCI_2$. $2H_2O$ (Kalay II klorür dihidrat) ve Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ (Çinko asetat dihidrat) gibi kimyasallar, çözücü olarak da su ve alkol kullanılarak farklı konsantrasyonlar elde edildi. CdO, $SnO_2$, ZnO nem sensörü üretimi yapıldı ve nem algılama performansları incelendi.

### 4.3.1. CdO nem sensörlerinin hazırlanması

İlk olarak CdO nem sensörü üretimi yapıldı. Farklı konsantrasyonlarda (0,2 M ile 0,7 M arası, 0,1 M'lık adımlarla) Cd $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ kullanılarak sol-gel homojen çözeltisi hazırlandı. Kaplama parametreleri Şekil 4.3'te verildiği gibi sabit tutulup sadece çözücü değişimi (alkol veya su) yapılarak belirtilen konsantrasyonlarda iki seri olacak şekilde CdO nem sensörleri üretildi.




**Şekil 4.3. CdO nem sensörü kaplama parametreleri**

CdO nem sensörü üretimi aşamasında kullanılan malzemelerin temizliği çok önemlidir. Tüm nem sensörü hazırlama işlemlerinde beher, damlalık, metal kaşık, cımbız, balık taşı ve mikroskobik cam kullanıldı. Uygulamanın gerçekleştiği her basamaktan önce kullanılan tüm malzemeler için sterilizasyon işlemi uygulandı.

Nem sensörü üretim aşamasında kimyasallar tartılırken hassas ölçüm imkânı sunan Şekil 4.4'te verilen elektronik ölçüm cihazı (Shimadzu electronic balence, type BL-220H) kullanıldı.




**Şekil 4.4. Elektronik ölçüm cihazı (Shimadzu electronic balence, type BL-220 H)**

CdO nem sensörü üretimi sol-gel döndürmeli kaplama işleminde alttaş üzerinde büyütme imkânı veren neme duyarlı homojen çözelti hazırlığı aşamalarıyla Şekil 4.5'te verilmiştir.



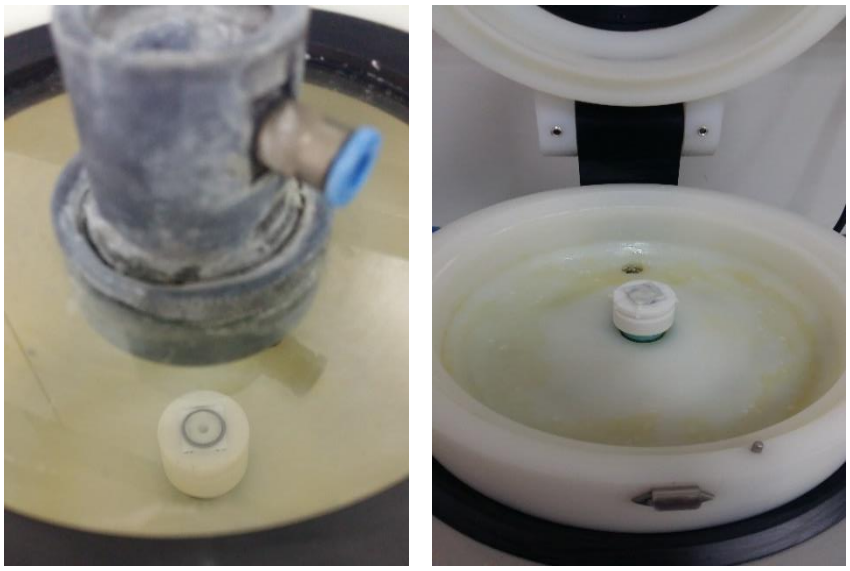
**Şekil 4.5. Sol-gel uygulaması için çözelti hazırlama aşamaları**

Çözelti oluşum aşamasında jelin tanecik boyutunun oluşumunda etkili olan ve katalizör olarak kullanılan asetik asit ($CH_3COOH$)'ten 8 damla damlatılarak Şekil 4.6'daki gibi manyetik karıştırıcıda (Hot & Stir, MS-300), 100 $^{\circ}$C - 120 $^{\circ}$C arasındaki bir sıcaklık değerinde 1 saat karıştırılmaya bırakıldı ve karıştırıldıktan sonra çözeltinin oda sıcaklığına gelmesi beklendi.




**Şekil 4.6. Manyetik karıştırıcı (Hot & Stir, MS-300)**

Neme duyarlı çözelti hazırlığı sol-gel yöntemi ile tamamlandıktan sonra alttaş, üzerine kaplanması için Şekil 4.7'de görseli verilen döndürmeli kaplama cihazına yerleştirildi. Döndürmeli kaplama cihazında alttaşın dönme hızı 1000 rpm, hızlanma / yavaşlama ivmesi 850 rpm/s olarak belirlendi. Dönme süresi 5 dk. olacak şekilde ayarlama yapılarak süreç (1.aşama 5 dk., 2.aşama 5dk., 3.aşama 5 dk.) üç aşamada ve 3'er damla damlatılarak kaplama işlemi gerçekleşti. Her bir aşamanın ardından kaplanan yüzeyin kurutulması için oda sıcaklığında 15 dk. beklendi.



**Şekil 4.7. Alttaşın döndürmeli kaplama sistemine yerleştirilmesi ve kaplama sonrası görünümü**

Tüm hazırlıkların tamamlanmasının ardından çözücüsü alkol kullanılarak hazırlanan birinci seri CdO nem sensörü üretimi yapıldı. Kaplama sonrası incelendiğinde çözeltinin alttaş yüzeyine Şekil 4.8'de gösterildiği gibi tam olarak kaplanmadığı ve kaplamanın gerçekleştiği kısımlarda da kurumaya bağlı kabarmalar olduğu gözlendi.



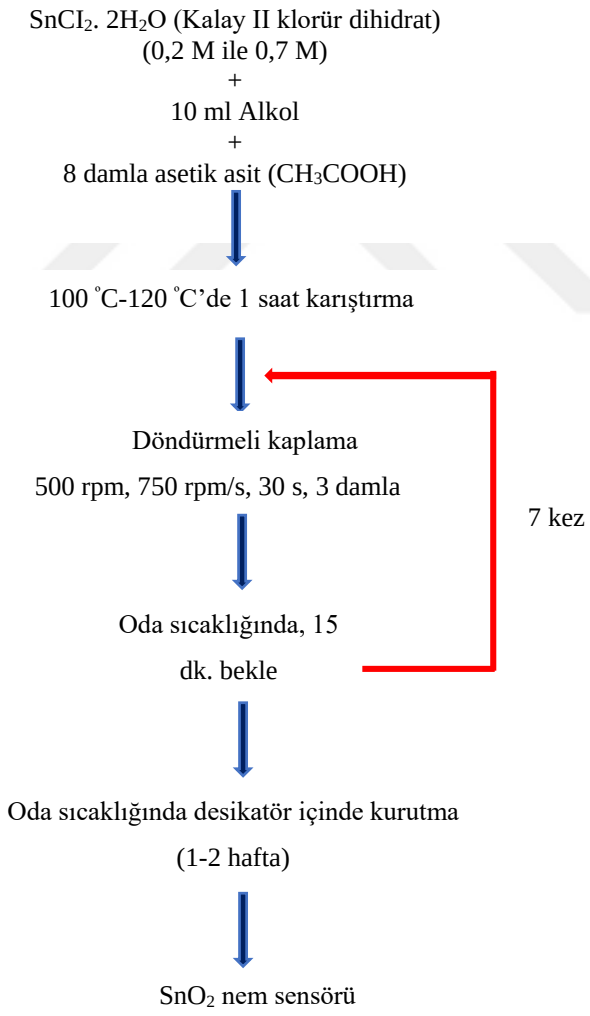
**Şekil 4.8. Alttaşa tam kaplanamayan CdO nem sensörleri**

Çözücüsü alkol kullanılarak hazırlanan CdO nem sensörü üretimine son verilerek çözücüsü su olan ikinci seri CdO nem sensörü üretimine geçildi. Sol-gel kaplama parametreleri sabit tutulmasına karşın, hazırlanan bu ikinci serideki nem sensörlerinin de istenen homojenlikte olmadığı saptandı. Çözücüsü su olan Cd $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ kimyasalı kullanılarak hazırlanan çözeltinin karıştırma sonrası tam olarak jelleşme göstermediği ve alttaş yüzeyine tam olarak tutunamadığı gözlendi. Üretilen bu iki seride istenen nem değişim özellikleri ve nem sensör yüzey homojenliği tam olarak sağlanamadığı için CdO sensör üretimi sonlandırıldı. Optimizasyon çalışmaları

kapsamında kaplama parametreleri ve kullanılan kimyasal malzeme değiştirilerek yeni nem sensörü üretilmesine karar verildi.

### 4.3.2. $SnO_2$ nem sensörünün hazırlanışı

İkinci uygulama için $SnCI_2$. $2H_2O$ (Kalay II klorür dihidrat) kullanılarak neme duyarlı $SnO_2$ nem sensörü üretimine geçildi. Kaplama parametreleri CdO nem sensörü üretimi gerçekleştirilirken ortaya çıkan olumsuzlukları gidermek amacıyla optimize edildi. Başlangıç serisinde çözücü olarak alkol kullanıldı ve Şekil 4.9'da belirtilen kaplama parametreleri takip edilerek (0,2 M ile 0,7 M arası, 0,1 M adımlarla) $SnO_2$ nem sensörü üretildi.



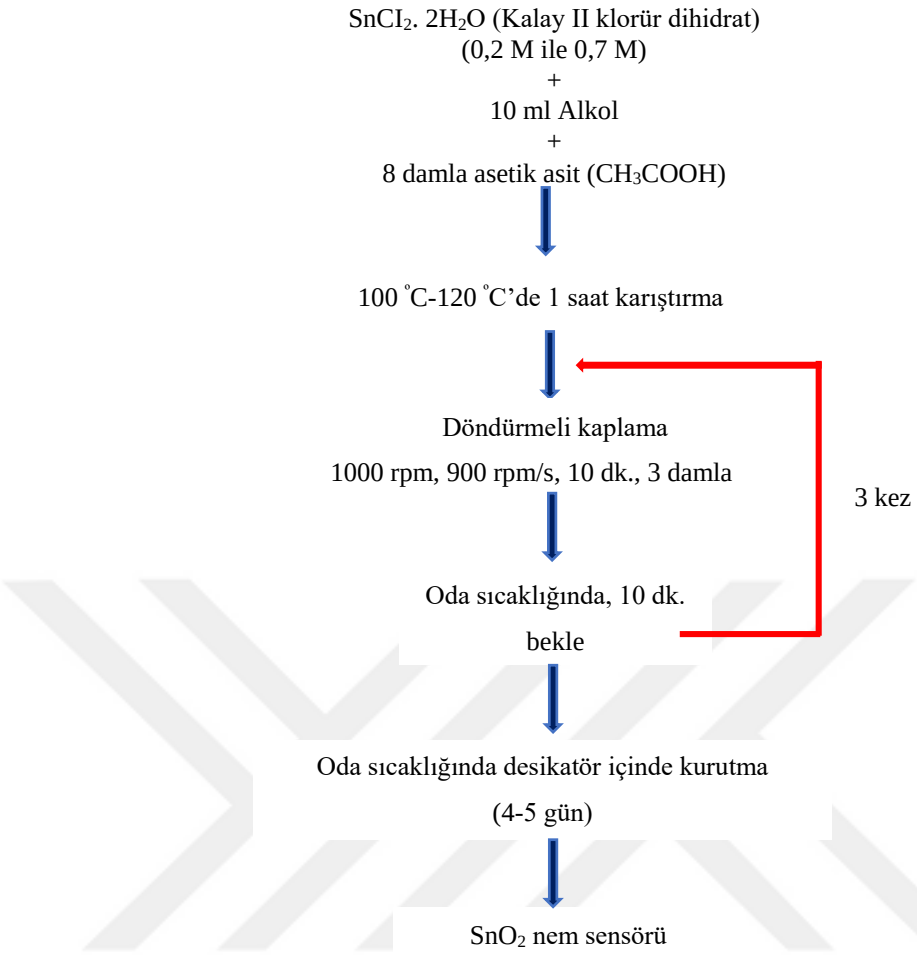

**Şekil 4.9. $SnO_2$ nem sensörü kaplama parametreleri**

Kaplama adımları takip edilerek tamamlanıp kurutma işlemi gerçekleştirildikten sonra hazırlanan çözeltinin alttaş yüzeyinde kalın bir tabaka oluşturduğu ve kurutma süresine bağlı olarak nem değişim aralığında daralma olduğu gözlendi. Kurutma süresine bağlı olarak kaplanan nem sensörü yüzeyinde çatlamalar ve dökülmeler oldu. Döndürmeli kaplama cihazı üzerindeki parametreler ve kaplama sonrası oluşan $SnO_2$ nem sensörü görseli Şekil 4.10'da verilmiştir. Sonuçlar göz önüne alınarak farklı uygulamaların önünü açması için bu seri sonlandırıldı.




**Şekil 4.10. Sol-gel döndürmeli kaplama yöntemi ile hazırlanan $SnO_2$ nem sensörü ve kaplama parametreleri**

$SnCI_2$. $2H_2O$ neme duyarlı olduğundan çözünen ve çözücü (alkol) sabit tutulmak suretiyle kaplama parametreleri değiştirilerek yeni seri üretimine karar verildi. Kaplama parametreleri Şekil 4.11'de olduğu gibi değiştirilerek $SnO_2$ nem sensörü üretimi için ikinci seriye başlandı.




**Şekil 4.11. $SnO_2$ nem sensörü kaplama parametreleri**

Döndürmeli kaplama koşulları iyileştirilerek hazırlanan ikinci seri sonrası nem sensör yüzeyindeki kaplamanın birinci seriye göre daha homojen ve ince kaplanabilmesi sebebiyle elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi için hazırlanan Şekil 4.12'deki nem sensörleri üzerine AI metali buharlaştırıldı.



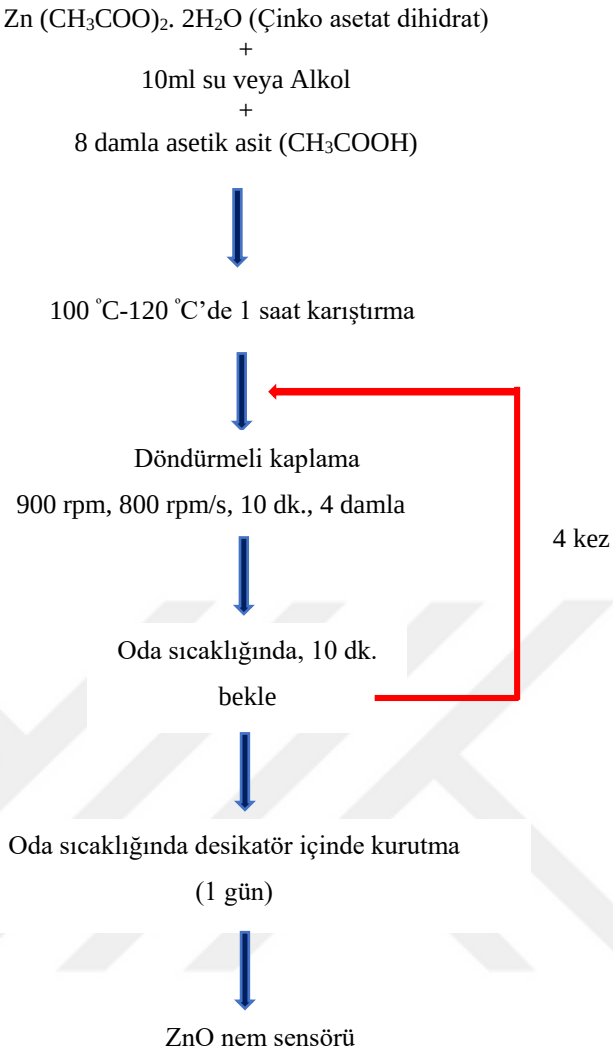
**Şekil 4.12. Isıl buharlaştırma yöntemi ile üzerine ızgara maske kullanılarak AI metali kaplı nem sensörü**

Bu aşamaya kadar yapılan çalışmalar ışığında $SnO_2$ sensörlerinin neme duyarlı olduğu ancak sensörlerin uzun süre kurutulmasının ardından nem algılama özelliğinin zayıfladığı gözlenmiştir. Yapılan çalışma sonrası elde edilen veriler göz önünde bulundurularak bu seriye son verildi.

### 4.3.3. ZnO nem sensörünün hazırlanması

Geniş ve istikrarlı nem değişim aralığına sahip nem sensörü üretimi doğrultusunda yapılan literatür çalışması sonrasında neme duyarlı kimyasal malzeme olan $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ kullanımı ile iki yeni seri üretimine karar verildi. Yeni hazırlanacak serilerde çözünen malzeme olarak $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$, çözücü olarak su ve alkol kullanıldı. Çözücüsü su kullanılarak hazırlanan ilk seride kaplama parametreleri daha önceki serilerdeki problemlerin yaşanmaması adına iyileştirildi. Kaplama için uygulanan tüm adımlar Şekil 4.13'te belirtilmiştir. Hazırlanan serideki ZnO nem sensörü örnekleri oda koşullarında 1 gün kurumaya bırakıldı ve kurutma evresi tamamlandıktan sonra neme duyarlılığı tespit edildi. Yapılan gözlemler sonrası çözeltinin yüzeye tam olarak kaplanamadığı, kurutma ve ölçüm arasında geçen süre uzadıkça sensörlerin nem duyarlılıklarının zayıfladığı gözlenerek bu seri sonlandırıldı.

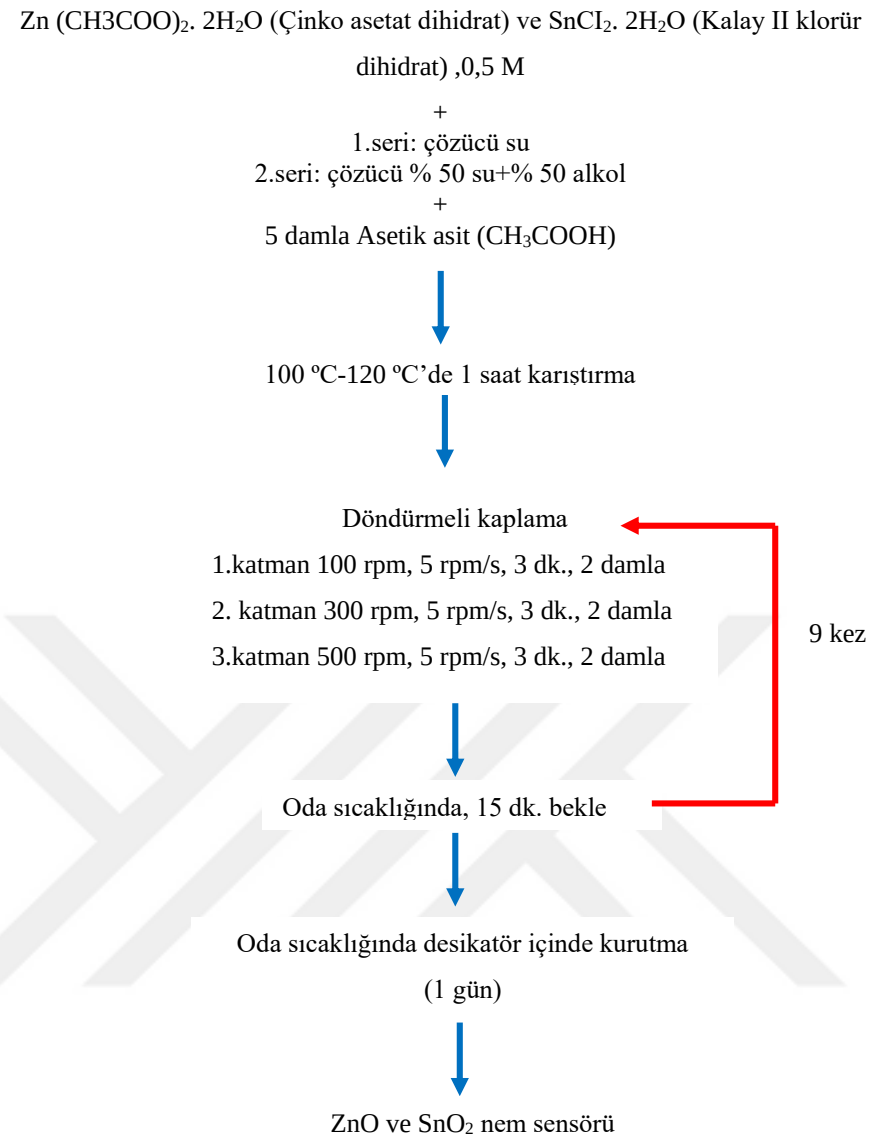
ZnO nem sensörü üretimi için kaplama parametreleri sabit tutulup sadece çözücü (alkol) değiştirilerek ikinci seri hazırlığına başlandı. Kaplama için gerekli tüm parametreler uygulanıp $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ kullanılarak hazırlanan bu seride 1 saatlik karıştırmanın ardından jelleşme olmadığı ve beher içinde çökelmelerin olduğu belirlendi. Bu seride de kaplama tam olarak yüzeye yayılmadığı için üretim aşaması durduruldu. Kaplama sonrası oluşan sorunların giderilmesi için optimizasyon çalışmalarının yapılmasına karar verildi.




**Şekil 4.13. ZnO nem sensörü kaplama parametreleri**

### 4.3.4. ZnO ve $SnO_2$ nem sensörü hazırlanışı

Yapılan çalışmalar sonunda elde edilen veriler değerlendirildi. Tüm uygulamalarda neme duyarlılık gösteren ancak yüzeyde tutunamama ve zamanla nem duyarlılığını kaybeden örneklerin optimize edilmesine karar verildi. Bu sebeple neme duyarlılık gösteren ve yüzeye iyi tutunma sergileyen kaplamaların hazırlanması için $Zn\ (CH_3COO)_2.\ 2H_2O$ ve $SnCI_2.\ 2H_2O$ kimyasal maddelerinin molariteleri ve hazırlama koşulları analiz edilerek $Zn\ (CH_3COO)_2.\ 2H_2O$ ve $SnCI_2.\ 2H_2O$ karışımından oluşan nem sensörleri üretimine geçildi.



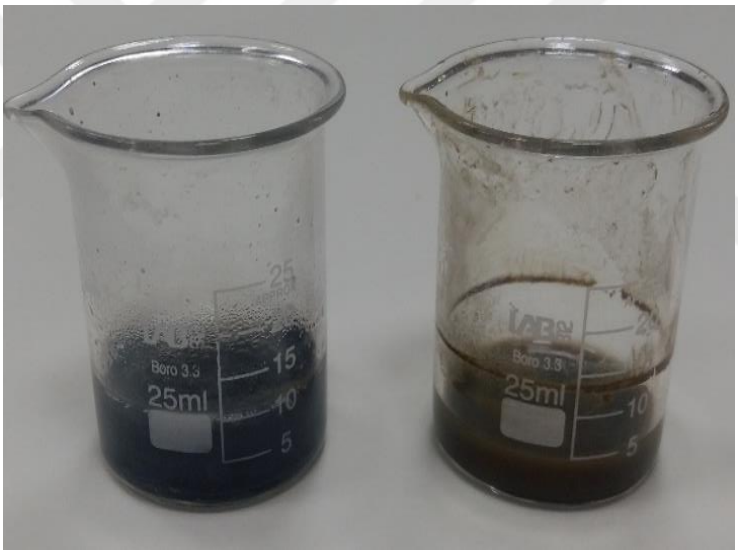

**Şekil 4.14. ZnO ve $SnO_2$ nem sensörü (1.seri ve 2.seri için) kaplama parametreleri**

Kaplama koşulları optimize edilerek çözücüsü su olan ve çözücüsü % 50 su, % 50 alkol içeren 0,5 M'lık iki ayrı seri üretildi. İki seri ZnO - $SnO_2$ nem sensörü üretimi içinde Şekil 4.14'teki kaplama parametreleri uygulandı. Her iki nem sensörü üretimi için gerçekleştirilecek seride sol-gel çözelti oluşumu için belirlenen yüzde (%) karışım oranları Çizelge 4.1'de belirtilmiştir.

**Çizelge 4.1. Sol-gel çözelti oluşumu için hazırlanan yüzde (%) miktarları**

| | ZnO yüzdesi (%) | $SnO_2$ yüzdesi (%) |
|---|---|---|
| 1. çözelti | % 40 | % 60 |
| 2. çözelti | % 50 | % 50 |
| 3. çözelti | % 60 | % 40 |
| 4. çözelti | % 70 | % 30 |
| 5. çözelti | % 80 | % 20 |

Çözücüsü su olan ilk seri çözeltiler ve çözücüsü % 50 su, % 50 alkol olan ikinci seri çözeltiler hazırlanım aşamasından sonra incelendiğinde farklı fiziksel özellikler sergiledikleri saptandı. Su ile hazırlanan çözeltiler lacivert bir görünüm kazanırken, çözücüsü su ve alkol kullanılarak hazırlanan karışımlar kahverengi bir görününüm aldı. Farklı renklere sahip çözeltiler Şekil 4.15'te verilmiştir.



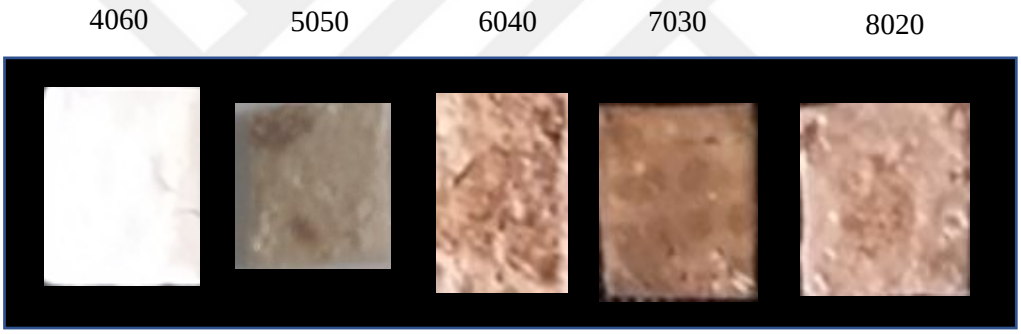

**Şekil 4.15. Su ve alkol kullanılarak hazırlanan Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ ve $SnCI_2$. $2H_2O$ karışımı çözeltiler**

Hazırlanan ilk seri çözelti (çözücüsü su) döndürmeli kaplama yöntemi ile alttaş üzerine kaplandı ve Şekil 4.16'da verilen nem sensörleri oda sıcaklığında desikatör içinde kurumaya bırakıldı.



**Şekil 4.16. Döndürmeli kaplama yöntemi ile kaplanan lacivert görünümlü nem sensörleri**

Hazırlanan lacivert görünümlü ilk serideki nem sensör yüzeylerinin pürüzsüz ve homojen olarak kaplandığı ancak kaplanan malzemenin 1 aylık bekleme / kurutma süresine rağmen kurumadığı tespit edildi. Ardından çözücüsü % 50 su, % 50 alkol olan kahverengi görünümlü çözeltiler Çizelge 4.1'de verilen yüzdelerde karıştırılarak Şekil 4.17'de görseli verilen ikinci seri nem sensörleri üretildi.




**Şekil 4.17. ZnO ve $SnO_2$ sol-gel çözeltisi ile hazırlanan ikinci seri nem sensörleri ve kodları**

Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ ve $SnCI_2$. $2H_2O$ malzemelerinin karışımı ile hazırlanan ikinci seri nem sensörleri oda sıcaklığında 1 gün desikatör içinde kurumaya bırakıldı ve kuruma işleminin ardından üzerlerine bakır metali ve maske kullanılarak elektriksel kontaklar alındı. Bakır parçaları Şekil 4.18'de gösterildiği gibi 6 - 7 parça olacak şekilde bütün bir bakır bloğundan kesildi. Hazırlanan nem sensörleri elektriksel direncin ve neme duyarlılıklarının tespiti için sırasıyla nem ölçüm odasına alındı. Yapılan uzun optimizasyon çalışmaları sonucunda çözücü olarak % 50 su, % 50 alkol kullanımı ile hazırlanan Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ ve $SnCI_2$. $2H_2O$ malzemelerinin farklı yüzdelerde karıştırılması ile elde edilen çözeltilerden üretilen nem sensörlerinin en iyi sonuçları sergilediği tespit edildi.



**Şekil 4.18. Isıl buharlaştırma işleminde kullanılan Cu blok ve delikli maske**

Kaplamaların nem sensörü yüzeyine iyi tutunduğu, nem ölçüm odacığında gerçekleştirilen ölçümler sonrasında neme duyarlılıklarının yüksek olduğu ve zamana bağlı olarak nem duyarlılıklarının değişmediği gözlendi.

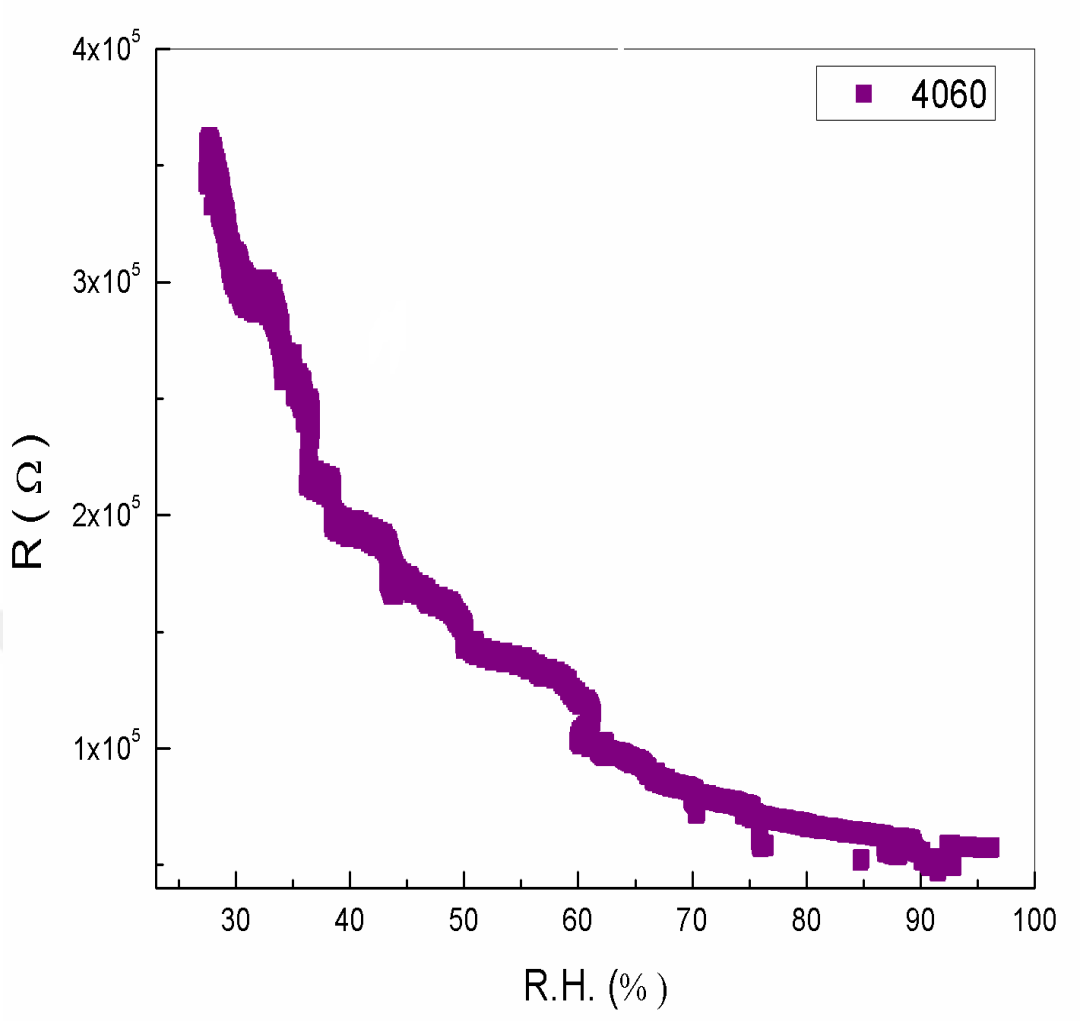
Ek A'da deney sürecinde kullanılan kimyasalların bazı özellikleri verilmiştir.

# 5. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan bu tez çalışmasında sol-gel yöntemi ile nem sensörleri üretilmiştir. Su ve alkol gibi çözücüler kullanılarak farklı molaritelerde hazırlanan çözeltilerle cam alttaşlar üzerine CdO, ZnO ve $SnO_2$ nem sensörleri farklı hazırlama koşullarında üretilerek optimizasyon çalışmaları yapıldı. Bu çalışmalardaki hedefler; hazırlanan nem sensörünün alttaşa iyi yapışması, kaplamanın homojen olması ve en önemlisi de hazırlanan sensörün geniş bir nem aralığında neme duyarlılık göstermesidir. Yapılan uzun optimizasyon çalışmaları sonucunda çözücü olarak % 50 su ve % 50 alkol kullanımı ile hazırlanan Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ ve $SnCI_2$. $2H_2O$ kimyasal malzemelerin farklı yüzdelerde karıştırılması ile elde edilen çözeltilerden üretilen nem sensörlerinin en iyi sonuçları sergilediği tespit edilmiştir.

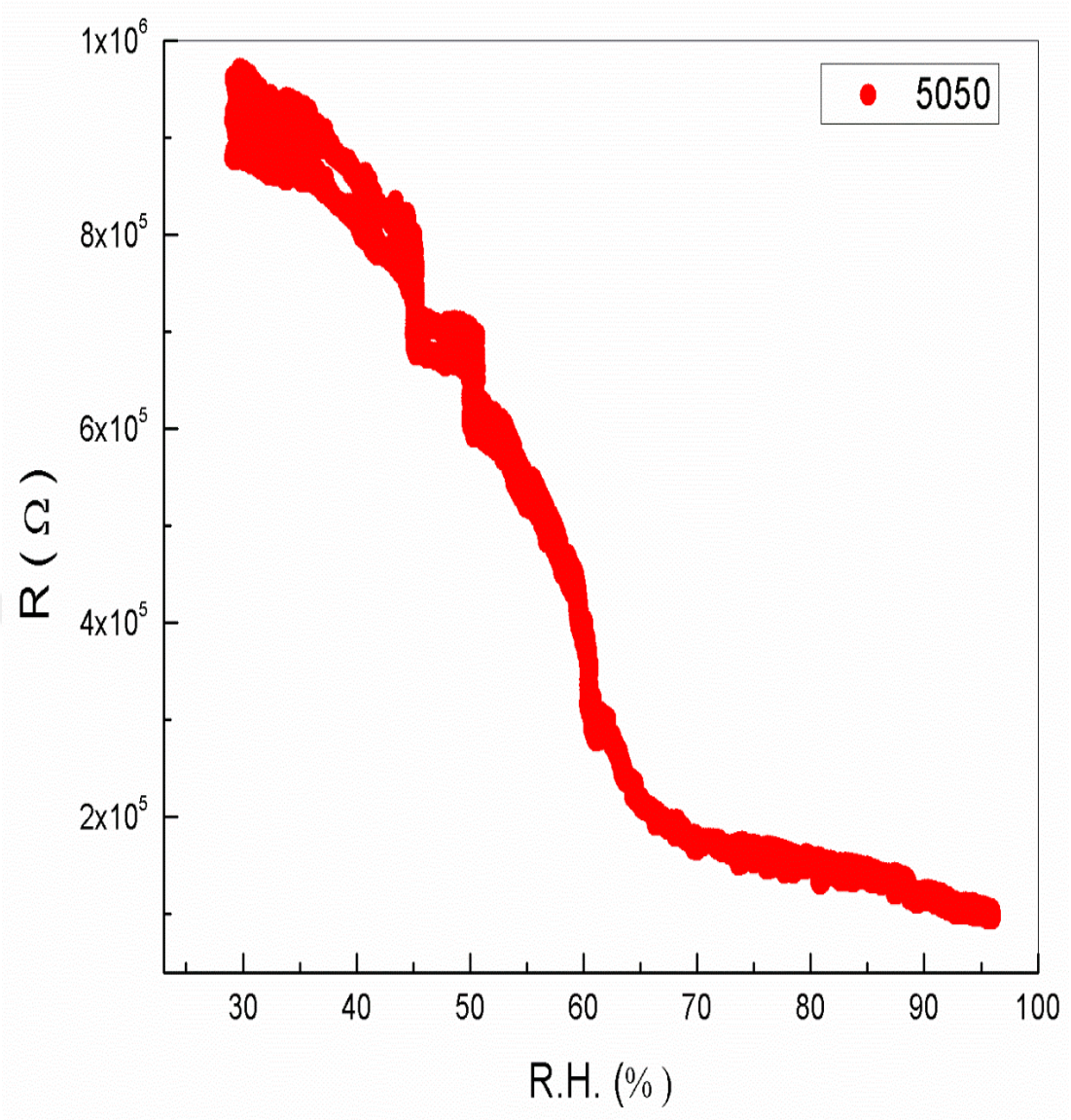
Hazırlanan nem sensörleri üzerinde yapılan elektriksel direnç-göreli nem değişimi incelendi. İncelenen bütün sensörlerde ortamın göreli nemi yükseldikçe direnç değerinde düşme meydana geldiği gözlenmiştir. Hazırlanan tüm nem sensörleri 0,5 M'lık Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ ve 0,5 M'lık $SnCI_2$. $2H_2O$ çözeltilerinin değişen yüzde oranlarında karıştırılması ile elde edilen çözeltiler yardımıyla hazırlanmıştır. Şekiller üzerindeki nem sensörü kodlarının ilk iki rakamı toplam karışımdaki Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ yüzde oranını, diğer rakamlar ise $SnCI_2$. $2H_2O$ oranını belirtmektedir.

Şekil 5.1'de ilk olarak toplam çözeltinin % 40'ı 0,5 M'lık Zn $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ ve % 60'ı 0,5 M'lık $SnCI_2$. $2H_2O$ çözeltisinden oluşan karışım ile hazırlanan nem sensörüne ait göreli nem – direnç değişimi görülmektedir. % 27 göreli nem değerinde sensörün direnci $3{,}6.10^5$ Ω değerine sahipken % 95 göreli nem değerinde $5{,}5.10^4$ Ω değerine düşmektedir. Görüldüğü gibi ölçüm yapılan nem aralığında sensörün direnç değeri eksponansiyel bir azalma göstererek yaklaşık olarak bir mertebelik düşüş gözlenmektedir. 4060 kodlu nem sensörü bütün nem ölçüm aralıklarında neme duyarlılık göstermektedir.



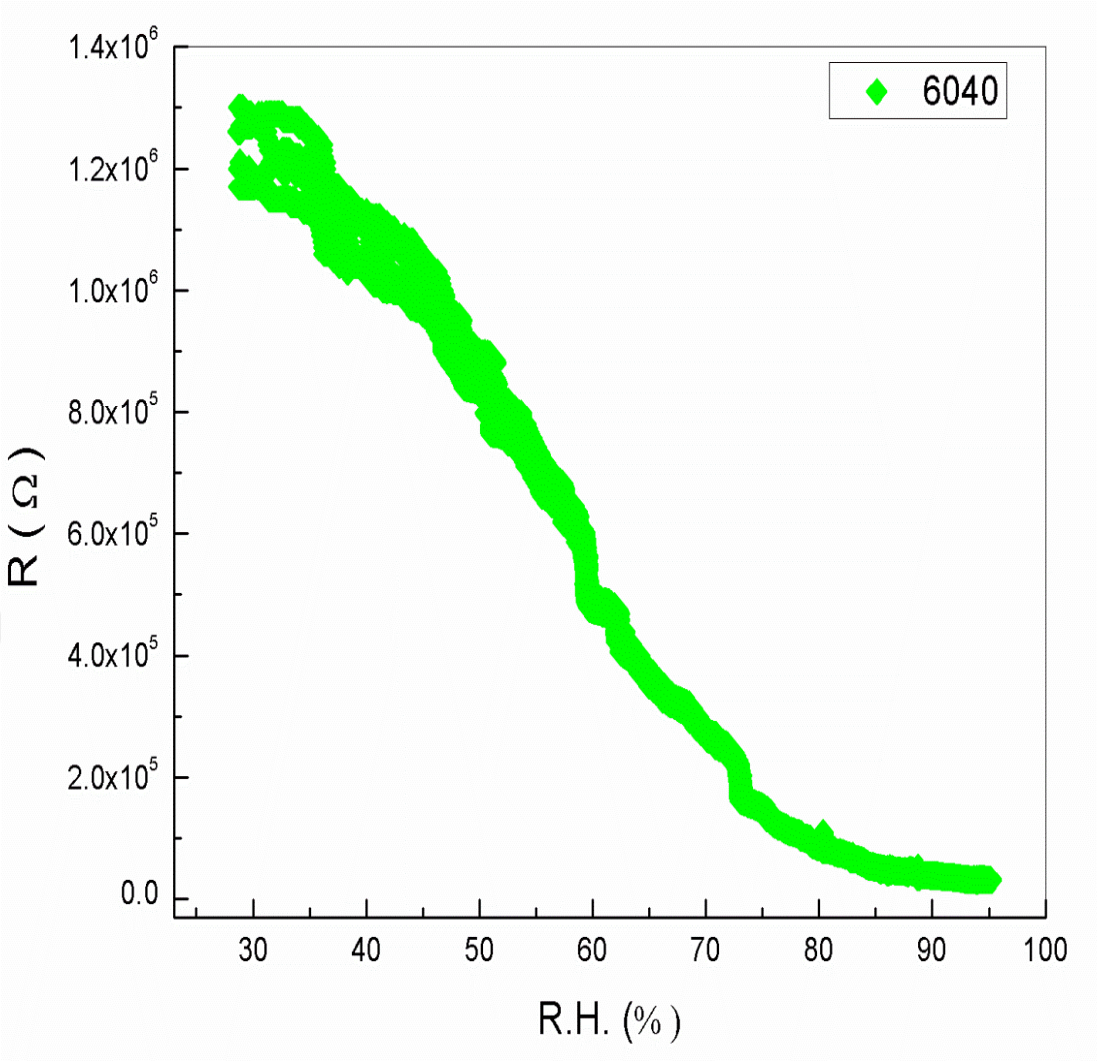

**Şekil 5.1. 4060 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği**

Şekil 5.2'de 5050 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem değişimi verilmektedir. % 29 göreli nem değerinde $9{,}7.10^5$ Ω değerine sahip olan direnç değeri, % 95 göreli nem değerinde $9{,}7.10^4$ Ω değerine kadar düşmektedir. % 29 - % 65 aralığında sensör direnci keskin bir değişime sahipken, % 65 - % 95 nem aralığında direnç değeri sadece $1.10^5$ Ω luk zayıf bir değişim sergilemektedir. % 65 üstündeki bağıl nem aralıklarında neme duyarlılığının zayıfladığı gözlenmiştir.



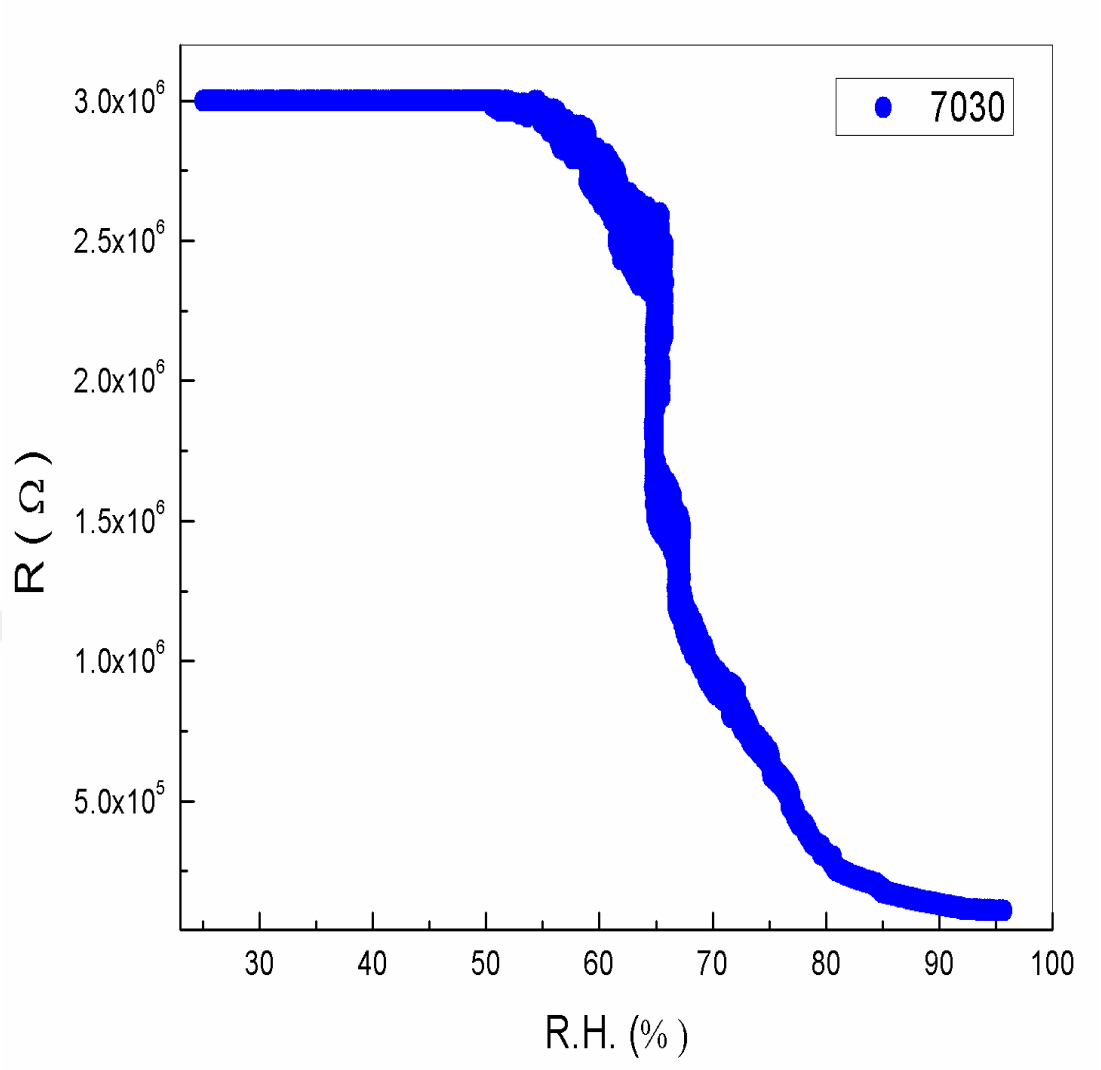

**Şekil 5.2. 5050 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği.**

Şekil 5.3'te 6040 kodlu nem sensörünün direnç - göreli nem değişimi verilmektedir. Bu sensör de 5050 kodlu sensörle aynı direnç aralığında değişim gösterse de 5050 sensörüne göre daha geniş bir aralıkta neme duyarlılık (% 25-80) sergilemektedir. % 80 göreli nem değerinden yüksek değerlerde neme duyarlılık göstermemektedir.



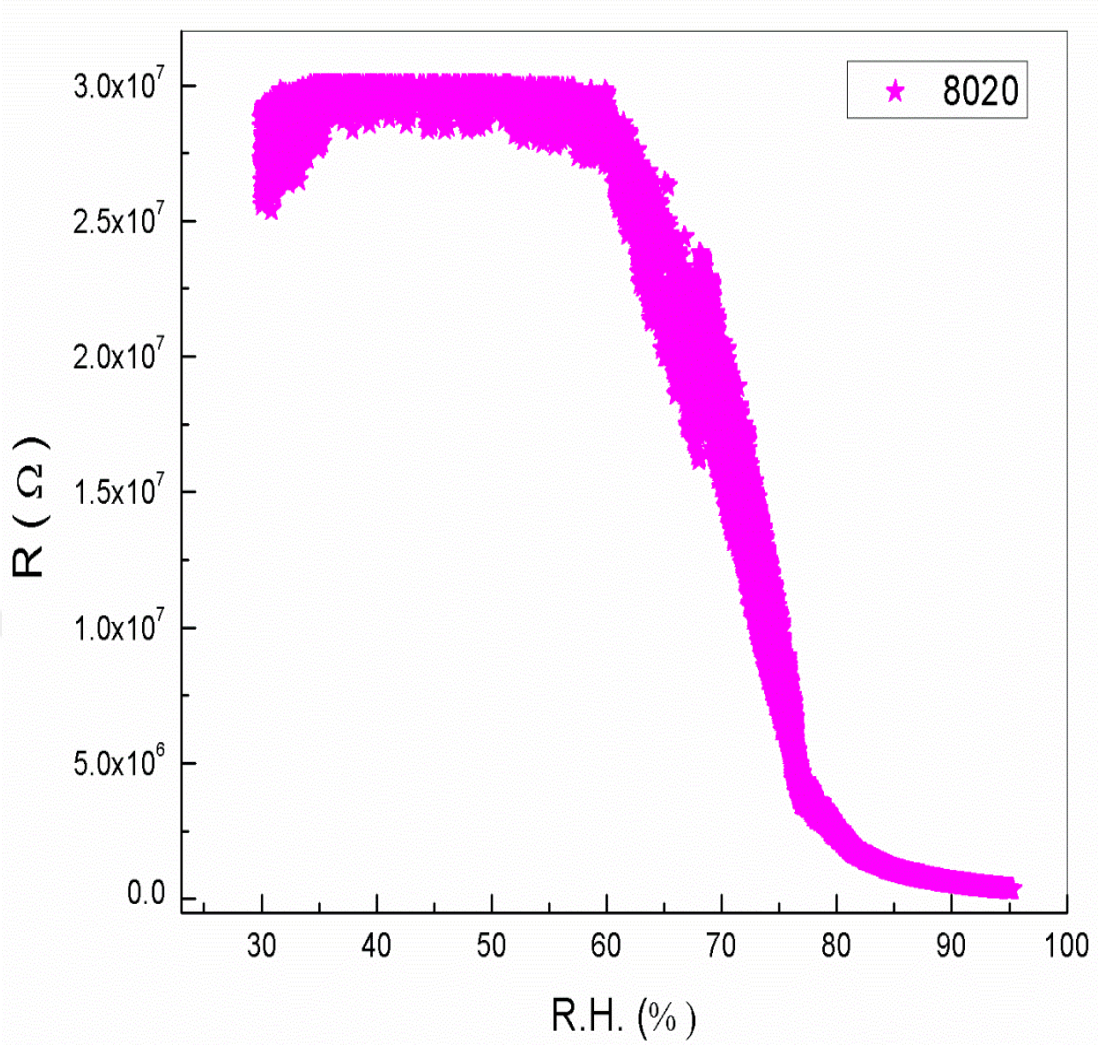

**Şekil 5.3. 6040 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği.**

Şekil 5.4'te ise 7030 kodlu nem sensörünün ortamın göreli nemine göre direnç - göreli nem değişim karakteristiği görülmektedir. Bu sensörün sadece % 55-85 göreli nem aralığında neme duyarlı olduğu, % 55'ten düşük bağıl nem aralıklarında neme duyarlılık göstermediği, % 85 üstü bağıl nem aralıklarında nem duyarlılığının zayıfladığı gözlenmiştir. Özel uygulamalar için kullanılabilir.



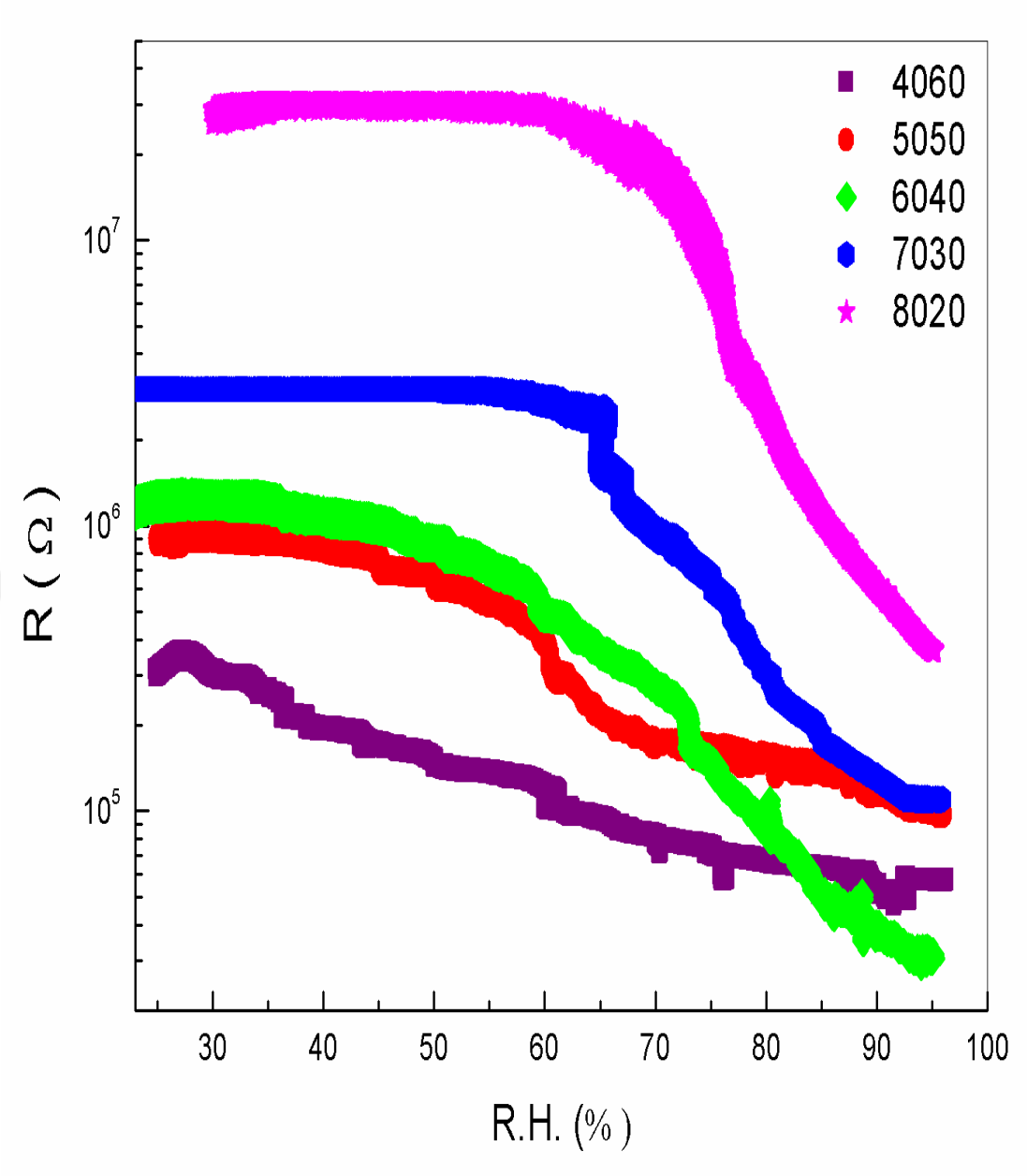

**Şekil 5.4. 7030 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği**

Şekil 5.5'te karakteristiği verilen 8020 kodlu nem sensörünün direnç değerlerinin önceki sensörlere göre 1 - 2 mertebe daha fazla olduğu, neme duyarlılığının ise % 60- 80 nem aralığında keskin bir değişim sergilediği görülmektedir. % 60 altındaki bağıl nem aralıklarında neme duyarlılık göstermezken, % 80 üstündeki bağıl nem aralıklarında neme duyarlılığının azaldığı gözlendi.




**Şekil 5.5. 8020 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği.**

Şekil 5.6'da elektriksel karakteristikleri incelenen nem sensörleri toplu olarak görülmektedir. Başlangıç çözeltisinin içindeki $SnCI_2$. $2H_2O$ miktarı azaldıkça sensör yüzeyinin beyazdan kahverengiye doğru renk aldığı, yüzeye kaplanan sensör malzemesinin alttaşa daha iyi yapıştığı ve gözenekliliğinin azalarak daha parlak jel görünümü aldığı, neme duyarlılık aralığı azalırken neme karşı gösterilen direnç değişiminin arttığı gözlenmiştir.




**Şekil 5.6. Elektriksel karakterleri incelenen nem sensörleri**

# 6. SONUÇLAR

Enerji çağlar boyunca insanların, ülkelerin ekonomik ve sosyal yaşamlarını etkileyen gereksinimlerinden biri olmuştur. Üretilen ve kullanılan enerji miktarı ülkelerin ekonomik, bilimsel ve kültürel seviyelerinin göstergesi niteliğindedir. Enerji ve özellikle elektrik enerjisi ülkelerin en önemli sorunlarının başında gelmiştir. Enerji kaynaklarının kısıtlı olduğu ülkemizde ulusal ve uluslararası yapılacak her türlü çözüme etkin katılım sağlanmalı çevre dostu, enerji tasarrufu sağlayacak tüm yenilikler desteklenmelidir. Enerji sektörü hızlı gelişim gösterir ve teknolojik tüm yenilikler çok boyutlu olarak ele alınır. Eski, hantal, verimsiz enerji kaynakları yerine maliyet düşürücü yeniliklere önem verilmelidir. Enerjiyi tasarruflu kullanabilmenin tek yolu tüketicilerin kullandıkları tesisatın enerji kullanımını ölçmesine ve denetlemesine imkân sunmaktır. Sensör teknolojisindeki hızlı gelişmeler insanların enerjiyi verimli kullanabilmesi yönünde atılan önemli bir adım olmuştur. Cihazların çalışması sırasında meydana gelen her türlü değişim sensörler tarafından algılanır ve görüntülenir. Bu sayede kontrol edilen cihaz çalışma koşulları, cihazın tükettiği enerjiyi azaltacaktır. Ortamdaki nemin ölçülmesi, kontrol edilmesi insan yaşamı ve üretim teknolojileri için oldukça önemlidir. Bu kapsamda nem sensörleri sağlık, kuru gıda sektörü, tarım, elektrikli ev aletleri ve hayvan yetiştiriciliği gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Enerji verimliliği ile ilgili çalışmalara katkıda bulunabilmek amacıyla bu tez çalışmasında düşük maliyetli bir yöntem olan sol-gel yöntemi ile üretilen nem sensörlerinin üretimi ve optimizasyonu yapılacaktır. Yapılacak olan bu çalışma ile ülkemizin sensör teknolojileri konusundaki çalışmalarına katkı sağlayarak, ulusal ve uluslararası bilimsel toplantılarda sunulacaktır.

Kolay fabrikasyon, kontrol edilebilir büyütme hızı, yüzey morfolojisi ve kimyasal kararlılıkları sebebiyle nem sensörlerinde genellikle metal oksit yarıiletkenler kullanılmaktadır. Bu kapsamda bu tez çalışmasında kadmiyum asetat dihidrat, kalay II klorür dihidrat ve çinko asetat dihidrat başlangıç çözeltileri kullanılarak farklı hazırlama koşullarında döndürmeli kaplama yöntemi ile nem sensörleri üretilmiştir.

Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan çözeltilerden elde edilen nem sensörlerinin ortamın bağıl nemine bağlı olarak direnç - göreli nem değişimi incelenmiştir. Hazırlanan nem sensörlerinde aranan başlıca özellikler, yapılan kaplamanın homojen olması ve nem sensörünün geniş bir aralıkta neme duyarlılık göstermesidir. Bu anlamda üretilen nem sensörlerinde çözücü, molarite değerleri ve kaplama parametreleri optimize edilmiştir.

Bu çalışmada kadmiyum asetat dihidrat, kalay II klorür dihidrat ve çinko asetat dihidrat malzemeleri kullanılarak hazırlanan çözeltiler ile CdO, ZnO, $SnO_2$ nem sensörü üretimi yapıldı ve nem algılama performansları incelendi.

CdO nem sensörleri hazırlanırken sol-gel döndürmeli kaplama için gerekli tüm parametreler sabit tutulup sadece çözücü değişimi (alkol veya su) yapılarak farklı konsantrasyonlarda iki seri üretim gerçekleştirildi. Çözücüsü alkol kullanılarak hazırlanan birinci seri kaplama sonrası incelendiğinde çözeltinin alttaş yüzeyine tam olarak kaplanamadığı ve kaplamanın gerçekleştiği kısımlarda da kurumaya bağlı kabarmalar olduğu gözlendi. Çözücü olarak su kullanıldığında ise çözeltinin tam olarak jelleşme göstermediği ve alttaş yüzeyine tam olarak tutunamadığı tespit edildi.

Optimizasyon çalışmaları kapsamında kalay II klorür dihidrat ve alkol kullanılarak $SnO_2$ nem sensörleri üretildi. Hazırlanan çözeltinin alttaş yüzeyinde kalın bir tabaka oluşturduğu ve kurutma süresine bağlı olarak nem duyarlılıklarında zayıflama olduğu gözlendi. Kaplama parametrelerinin optimize edilmesi ile hazırlanan $SnO_2$ nem sensörlerinin alttaş yüzeyine göre daha homojen olarak kaplandığı ve ancak kurutma/bekleme süresine bağlı olarak nem değişim aralığının değiştiği belirlenmiştir. Bu seride hazırlanan nem sensörlerinin nem algılama özelliklerinin kurutma süresi ile ters orantılı olarak değiştiği gözlendi.

Çinko asetat dihidrat başlangıç çözeltisi kullanılarak hazırlanan nem sensörlerinde çözücü olarak su ve alkol kullanıldı. Çözücüsü su kullanılarak hazırlanan ilk seride ZnO nem sensörleri üzerinde yapılan testlerde zamana bağlı olarak nem duyarlılığında azalma gözlendi. Çözücüsü alkol olan ikinci seri üretiminde ise çözeltide çökelmelerin olduğu ve jelleşme olmadığı gözlendi.

Yapılan çalışmalar sonunda elde edilen veriler değerlendirilerek tüm uygulamalarda neme duyarlılık gösteren ancak yüzeyde tutunamama ve zamanla nem duyarlılığını kaybeden örnekler optimize edildi. Bu sebeple en iyi neme duyarlılık gösteren ve

yüzeye en iyi tutunma sergileyen $SnO_2$ ve ZnO nem sensörlerinin molariteleri ve hazırlama koşulları analiz edilerek kalay II klorür dihidrat ve çinko asetat dihidrat başlangıç çözeltileri kullanılarak yeni sensörler üretildi. Sözü edilen çözeltilerin karıştırılması ile üretilen nem sensörlerinde çözücü olarak su kullanıldığında sensörlerin yüzeylerinin pürüzsüz olduğu ve homojen olarak kaplandığı ancak kaplanan malzemenin bir ay gibi süren bir kurutma/bekleme süresine rağmen kurumadığı belirlendi. Çözücü olarak % 50 su ve % 50 alkol kullanılarak hazırlanan kalay II klorür dihidrat ve çinko asetat dihidrat çözeltilerinin belirli yüzdelerle birbiri ile karıştırılması ile elde edilen başlangıç çözeltileri ile hazırlanan nem sensörlerinde yüzeye en iyi homojen kaplama ve nem duyarlılığı sonuçları elde edildi.

Bu sensörler üzerinde yapılan elektriksel ölçümlerde, 4060 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği, % 25 ile % 95 nem aralığında neme duyarlılığın yüksek olduğunu ve nem artışına bağlı olarak direnç değerinde azalma olduğunu ortaya koymaktadır.

5050 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği incelendiğinde, sensörün % 29 ile % 65 bağıl nem aralığında neme duyarlılık gösterdiği, bu değerin üstünde ise nem duyarlılığının olmadığı görülmüştür.

6040 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği incelendiğinde nem duyarlılık aralığının % 25 ile % 80 aralığında olduğu saptandı. 5050 kodlu nem sensörü ile aynı direnç değişimi göstersede neme duyarlılık aralığının daha geniş olduğu gözlendi.

7030 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği incelendiğinde neme duyarlılık aralığının % 55 ile % 85 aralığında olduğu belirlendi. % 55'in altındaki bağıl nem değişimleri ile % 85'in üstündeki bağıl nem değerlerinde neme duyarlılık göstermediği saptandı. Nem duyarlılık aralığı dar bir aralıkta olsa da nem sensörünün bu aralıktaki nem değişimlerine, geniş bir aralıkta direnç değişimi ile cevap verdiği görülmektedir.

8020 kodlu nem sensörünün direnç-göreli nem karakteristiği incelendiğinde % 60'tan düşük, % 80'den yüksek bağıl nem aralıklarında nem duyarlılık göstermediği ve diğer örneklere göre yüksek direnç değerleri sergilediği tespit edilmiştir.

Başlangıç çözeltisinin içindeki kalay II klorür dihidrat miktarı azaldıkça yüzeye kaplanan sensör malzemesinin alttaşa daha iyi yapıştığı ve gözenekliliğinin azalarak

daha parlak jel görünümü aldığı gözlenmiştir. Farklı kodlara sahip bu örnekler farklı bağıl nem aralığında duyarlılık göstermektedirler. Başlangıç çözeltisi içindeki kalay II klorür dihidrat yüzdesi azaldıkça sensörün neme duyarlı olduğu aralık daralmakta ve sensör direnci artmaktadır. Üretilen tüm sensörler neme duyarlılık göstermektedir. Her bir sensör özel uygulama alanlarında kullanılıp kalibre edilebilir özellik taşımaktadır.

Yapılan bu tez çalışması ile ulusal ve uluslararası düzeyde sensör çalışmalarına katkıda bulunup, enerjinin verimli kullanılmasına olanak tanıyan teknolojilerin geliştirilmesine destek olunmaktadır.

# KAYNAKLAR


Alberty, R. A. (1987) "Physical Chemistry" John Wiley and Sons, New York.

Alberty, R. A. (1987) "Physical Chemistry", John Wiley and Sons, New York.

Atılgan, İ. (2000) Türkiye Enerji Potansiyeline Bakış, *Gazi Ünv. Müh. Mim. Fak. Der*, 15: 31-47.

Alberti, G. ve Casciole, M. (2001) Solid state protonic conductors, present main applications and future prospects, Laboratory of Chemical Inorganics, Chemical Department, Perugia University, via Elce Stto, 10, 06123 Perugia, Italy, 14.

Alanoly, Y. (2008) Vaisa Humidity 101-humidity theory, terms & definitions, *Vaisala Application Engineer*.

Anonim, (2018a) Nem ölçerin mucidi Da Vinci'ye teşekkürler, http://www.rst-elektronik.com/blog/nem-olcerin-mucidi-da-vinciye-tesekkur, Erişim tarihi: 14.02.2018.

Anonim, (2018b) Mikrodalga fırın nedir? http://www.nedirturk.com/etiket/magnetron, Erişim tarihi: 17.12.2018.

Anonim, (2018c) *Mikrodalga Kullanım Kılavuzu*, Arçelik A.Ş., http://download.beko.com/Download.UsageManualsBeko/md-1610-solo-mikrodalga-firin-kullanim-kilavuzu-tr_TR_20160129105764_User-20Manual-20-20Filetur-A.pdf, Erişim tarihi: 28.03.2018.

Anonim, (2018d), DHT11 sıcaklık nem sensörü modülü, https://www.roboshop.com.tr/dht11-sensoru-modulu, Erişim tarihi: 25.01.2018.

Anonim, (2018e), LDR Sıcaklık ve nem sensörü, https://www.alibaba.com/product-detail/20mm-LDR-photoconductive-sensor-factory-directe_1100416244.html, Erişim tarihi: 13.01.2018.

Anonim, (2018) *Havadaki Nemin Ölçümü*, Jumo Ölçü Sistemleri ve Otomasyon San.ve Tic. Ltc.Şti.,file:///C:/Users/Nalan/Desktop/literatürler%20şubat%202018/literatür%20giriş/Anonim%20nem%20ve%20çeşitlerit90.7000tr%20(2).pdf, Erişim tarihi: 03.02.2018.

Ayazlı, S. K, (2016) *Bazı İletken Polimerik Nanokompozit Modifiye Elektrotların Hazırlanması ve DNA Baz Tayininde Kullanabilirliğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi İnönü Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Ana Bilim Dalı, Malatya, 112.

Bozkurt, Y. ve Kantayı, R. (1990) Ağaç Malzemenin Kurutulması, *İstanbul Ünv., Orman Fak., Dergisi*, 40 18.

Brinker, C. J. ve Scherer, G. W. (1990) *The physics and Chehlmann, mistry of sol-gel processing,* Academic Press, New York.

Bunshah, R. F. (1994) *Handbook of deposıtıon tecnologies for films and coatings, noyes Publications,* Park Ridge-New Jersey – U.S.A. 157-159, 192.

Banaz, E. (2009) *Sol-jel yöntemi ile katkılı ve katkısız titanyum dioksit tozlarının sentezlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malz. Mühendisliği, İstanbul, 124.

Bülbül, F. ve Jafarpour, S. (2015) Vakum pompaları, *Ordu Ünv. Bil. Tek. Derg.*, 5: 42-55.

Boz, İ. (2016) *Fotovoltaik uygulamalar için saydam iletken oksit film üretimi ve karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 55.

Chopra, K. (1969) Thin film Phenomena, McGraw Hill Book Company, New York.

Chen, Z. ve Lu, C. (2005) Humidity sensors: a Rewiew of materials and mechanisms, *Department of Electrical and Computer Engineering and Center for Nanoscale Science and Engineering, University of Kentucky,* Lexington, Kentucky 40506, USA, 3: 3, 274-295.

Carlsson, J. O. ve Martin, P. M. (2010*), Handbook of deposition tecnologies for films and coating (Third Edition),* Chemical Vapor Depositions, Science Applications and Technologh, 314-369.

Celep, F. ve Özcan, H. (2011) *Siyah Çayın Nem Kontrolü*, Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Ünv. Mühendislik Fak., Trabzon, 62.

Ciğer, M. (2010) *Bilgisayar kontrollü, internet destekli sera otomasyonu,* Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Ana Bilim Dalı, Adana, 134.

Çarbaş, B. B. (2016) İletken Polimerler ve Enerji Uygulamaları, *Küresel Müh. Çalışmaları Dergisi*, 3: 46-60.

Coşkun, M. (2003) Coğrafya Öğretiminde Nem Konusundaki Kavram Yanlışlıkları ve Giderilmesine Yönelik Öneriler, *Gazi Ünv. Gazi Eğitim Fak. Dergisi*, 23: 147-158.

Cukierman, S. (2005) Et-tu, Grotthuss! and other unfinished storis, *Department of Physiolgy, Stritch School of Medicine, Loyola Unıversity,* Chicago, 2160 South First Avenue, Maywood, IL 60153, USA, 876-885, 10.

Dislich, H. ve Hınz, P. (1982) *History and principles of the sol-gel process, and some new multicomponent oxide coatings,* Journal of Non-Crystalline Solids, 48, 11-16.

Decoursey, T. E. (2002) *Voltage-gated proton channels and other proton transfer pathways,* Department of Moleculer Biophysics and Physiolgy Rush Presbyterian St. Luke's Medical Center, Chicago, Illinois, 83: 475-579, 105.

Dinç, Ş. (2013) *Bazı Polimerlerin ve Organik/İnorganik Hibrit Filmlerin Sensör Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 153.

Evans, R. ve Bergman, J. (2003) Relationships between cropping sequences and Irrigation systems in the Northern Great Plains (Ngp). USDA Annual Report, Project Number:5436-13210-003-02. June 11, December 31.

Evcin, A. (2006) *Kaplam Teknikleri Ders Notları*, Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 12.

Ertek, Ö. (2011) *Spin kaplam yöntemiyle üretilmiş ZnO ince filmlerin sıcaklığa bağlı optik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisana Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 130.

Ertürk, S. (2012) *Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile volfram çekirdekli bor fiber üretiminde sistem tasarımı,* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı, İstanbul, 104.

Fontes, J. (2005) *Sensor technology handbook*, Humidity sensors, Senior Applications Engineer Honeywell Sensing and Control, 271-284.

Fraden, J. (2010) Handbook of modern sensors, Springer New York, N. Y. pp: 445-459

Farahani, *H.*, Wagiran, R. ve Hamidon, M. N. (2014), Humidity Sensors Principle Mechanism and Fabrication Tecnologies A Comprehensive Rewiew, www.mdpi.com/journal/sensors, 7881-7939.

Grotthuss, C. J. T. (1806) Sur la decomposition de I'eau et des corps quells tient en dissolution a I'aide de I 'electricite galvanique, Ann. Chim. LVIII, 54-74.

George, J. (1992) Preparation of thin films, Marcel Dekker, Inc., New York.

Gök, V. (2007) Gıda paketleme sanayinde akıllı paketleme teknolojisi, *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1) 45-58, Derleme.

Gültekin, M. (1997) *Silika jellerde sıcaklığın ve su oranının fiziksel özelliklere etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gür, E. (2007) *Çinko Oksit Yara İletkeninin Yapısal, Optik Ve Elektriksel Karakterizasyon Teknikleri İle İncelenmesi*, Doktora Tezi, Atatürk Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 138.

Harsha, K. S. S. (2006) Principles of physical vapor depositions of thin films, Elsevier, Great Britain, pp: 400.

Kundt, (1888) Ueber-die brechungsexponenten der metalla (About the refractive indices of metals), Ann. Phys. 270-469.

Kavasoğlu, N. (2001) *Fonksiyonel Seramik Nem Dedektörleri*, Yüksek Lisans, Muğla Ünv. Fen Fak. Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 94.

Khromushin, I.V., Aksenova, T.I. ve Zhotabaev, Zh. R. (2002) *Mechanism of gas-solid exchange processes for some perovskites*, Institute of Nuclear Physics, National Nuclear Center of RK, Almaty 480082, Kazakhstan, 37-40, 4.

Kavasoğlu, N., Kavasoğlu, A. S. ve Bayhan, M. (2005) *Comparative study of $ZnCr_2O_4$-$K_2CrO_4$ ceramic Humidity sensor using computer controlled humidity measurement set-up*, Department of Physics, Muğla University, Kötekli, 48000 Muğla, 355-361, 7.

Kerry, J. P., Hogan, S. A. ve O'Grady, M. N. (2006) Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging system for meat and muscle-based products: A Review, Meat Science, 74: 113-130.

Hasançelebi, Ö. (2006) *Sol-gel yöntemiyle hazırlanan bakı oksit ince filmlerin elektriksel, yapısal ve optiksel özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 55.

Karaçalı, İ. (2010) *Spin kaplama yöntemi ile benzocyclobutene (BCB 4022-35) polimer ince filmlerin üretimi ve karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 65.

Kaya, V. (2010) *Spin Kaplama Yöntemiyle Üretilmiş AI Katkılı ZnO İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 62.

Kaplan, M., Çelik, Ö. ve Budak, S. (2011) Co Katkılarının ZnO 'in Mikro Yapı ve İletkenlik Özelliklerine Etkileri, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elâzığ, 195.

Karataşlı, M., Özer, T. ve Varinlioğlu, A. (2016) *Enerji ve Çevre,* İstanbul Aydın Ünv. Dergisi, 30:103-124.

McCafferty, E. ve Zettlemoyer, A. C. (1971) Adsorption of vater vapor on α-$Fe_2O_3$, Disc. Faraday Soc., 230-255.

Mucuk, M. ve Uysal, D. (2009) Türkiye Ekonomisinde Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme, *Maliye Dergisi, 157, 115.*

Miyake, T. ve Rolandi, M. (2016) *Grotthuss mechanisms: from proton transport in proton wires to bioprotonic devices,* J. Phys., Condens. Matter, 28 023001, 12.

Nagle, J. F., Mille, M. and Morowitz, H. J. (1979) Theory of hydrogen-bonded chains in bienegetics, Biophys. J., 25 48.

Nenov, T. G. ve Yordanov, S. t. (1996) *Ceramic sensors: Technology and Applications,* ISBN: 1-56676-309-6, USA.

Nalçacıgil, Z. (2011) *Perylene türevi organik yarıiletken ince filmlerin optik özelliklerinin incelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 77.

Nijem, J. (2016) *Sulfonated poly (vinyl alcohol)-mordenite mixed matrix membran for direct methanol fuel cells,* Bahçeşehir University, İstanbul, 70.

Oktay, G. (2007) *Katodik ark fbb yöntemi ile Ti6Al4V altlık malzemesi üzerine kaplanmış magnezyum morfolojisine bias geriliminin etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislikte İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, 69.

Özbey, E. P. (2004*) Sol-gel yöntemiyle hazırlanan $SiO_2$-$TiO_2$ esaslı yansıtmayıcı kaplamalar,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 54.

Öztop, E. (2006) *Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan polimer malzemelerin özellikleri,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Anabilim Dalı, İstanbul, 118.

Patissier, B. (1999) *Humidity sensors for automotive,* Appliances and Consumer Applications, 231-234.

Poyraz, M. (2008) *Müzelerde Isı, Işık, Nem,* Yüksek Lisans Tezi, Adana, 78.

Roy, R. (1956) *Aids in hydrothermal experimantation: II methods of making mixtures for both "Dry" and "Wet"phase equilibrium studies,* Journal of The American Ceramic Society, 52, 344.

Resch, R., Ehn, R., Tichy, H. ve Friedbacher, G. (1997) *In-situ investigation of humidity-induced changes on human hair and antennae of the honey bee afis mellifera L. by scanning force microscopy*, Institute Of Analytical Chemistry Vienna University Technologh, Appl. Phys 607-611.

Resch, R., Kulwicki, W., Shimizu, T. ve Friedbacher, G. (1998) Appl. Phys., A 66, 607.

Rittersma, Z. M. (2002) Recent achievements in miniaturised humidity sensors-a rewiew of transduction techniques, Sensors and Actuators B 96 1-2:196-210.

Stuhlmann, O. (1917) The preparetion of metalic mirrors, semitransparent and transparent metallic films and prisms by distillations, *Journal of the Optical Society of America*, 1 (2), 78.

Sata, N., Yugami, H., Akiyama, Y., Sone, H., Kitamura, N., Hattori, T. ve Ishigame, M. (1999) Proton conduction in mixed perovskite-type oxides, Research Institute for Scintific Measurements, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-857, Japan, 383-387, 5.

Schmitz, M. ve Sourell, H. (2000) Varibility in soil moisture measure ments. Irrigation Sci., 19:147-151.

Seelan, S. K., Laguette, S., Casady, G. M. ve Seielstad, G. A. (2003) Remote sensing App. For Precision agriculture: A Learning Community Appoach. Remote Sensing of Environment, 88, 157-169.

Stephen, S. ve Larson, K. (2004) Activity recognition in the home using simple and ubiquitons sensors, İn Pervasive, 158-175.

Sorar, İ. (2008) *Katkılı ve Katkısız Çinko oksit (ZnO) İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 145.

Sorar, İ. ve Tepehan, F.Z. (2009) ZnO İnce Filmlerin Optik ve Yapısal Özelliklerine Isıl İşlem Sıcaklığının Etkisi, *İTÜ Dergisi*/C, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Müh. Enstitüsü, İstanbul, 7:21-26.

Saçak, M. (2010) Polimer kimyası, *Gazi Kitapevi.*

Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akın, S. (2012) İnce film oluşturma teknikleri, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Konya, ISSN: 10112-2354, 28 (5): 389-401

Şam, E. D. (2001) *Camların sol-jel yöntemiyle silika ($SiO_2$) kaplanması,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 96.

Şahin, M., Mısırlı, C. ve Dinç, M. (2010) Physical vapour decomposition method, *International Scientific Conference*, Trakya University Faculty of Eng. and Arch. Dept. Eng., 22180, Edirne.

Tavşanoğlu, V. (2006) *Beyaz eşyada (fırın ve buzdolaplarında) sensör uygulamaları,* Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 179.

Thompson, R. B., Gallardo, M., Agüera, T., Valdez, L. C. ve Fernandez, M. D. (2006) Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops, Irrigation Sci., 24:185-202.

Tombak, A. (2012) *AI: ZnO ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerine gama ışınlarının etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 72.

Toygun, Ş., Köneçoğlu, G. ve Kalpaklı, Y. (2013) *General principles of sol-gel, Journal of engineering and natural sciences,* Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya- Metalurji Fakültesi, İstanbul, 21.

Tozlu, N. (2011) *ZnO tabanlı yarıiletkenlerde metal kontak özelliklerinin araştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 88.

Temel, S., Nebi, M. ve Peker, D. (2017) Sol-Gel Döndürerek Kaplama Tekniği İle Saydan İletken ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu, *Gazi Ünv. Fen Bilimleri Dergisi*, 51-59.

Qu, W. ve Meyer, J. U. (1997) *Thick-film humidity sensor based on porous $MnWO_4$ material,* Meas. Sci. Technol. 593-600, 9.

Wright, J. D. ve Sommerdijk, N. A. J. M. (2001) *Sol-gel materials chemistry and appli*cations, CRC Press: Bota Raton, FL.

Wills, A. W. (2011) Synthesis of doped semiconductor nanocrystals and conductive coatings, Graduate School of The University of Minnesota by, 122.

Yamagchi, S., Nakamura, K., Higuchi, T., Shin, S. ve Iguchi, Y. (2000) Basicity and hydroxyl capacity of proton-conducting perovskites, Department of Meterials Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Showa, Nagoya 466-8555, Japan, 191-195, 5.

Yuk, J. ve Troczynski, T. (2003) Sol-gel $BaTiO_3$ thin film for Humidity sensors, Deperment of Electrical Engineering, Yuhan College, 185-34 Gwen –dong, Sosa-gu, Bucheon 422-749, South Korea, Depertmen of Materials, University of British Columbia, 309-6350 Stores RD., Vancouver, BC, Canada, V6T IZ4.

Yam, K. L., Takhistov, P. T. ve Miltz, J. (2005) Intelligent packaging: Concepts and Applications, Journal of Food Science, 70, 1-10.

Yezza, I. A. (2008) Active / Intelligent Packaging: Concept, Applications and Innovations, 2008 Technical Symposium, New Packaging Tecnologies to Improve and Maintain Food Safety, September 18-19, Toronto.

Yanar, R. ve Kerimoğlu, G. (2011) Türkiye'de Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme Ve Cari Açık İlişkisi, *Ekonomi Bilimleri Dergisi,* 3: ISSN. 1309-8020. 201.

Yazal, A. (2014) *Sol-jel metodu ile hazırlanan Dy / AI-katkılı ZnO filmlerin spin coating (döndürmeli kaplama) ile kaplanması,* Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 61.

Zarzycki, R. (1984) *Processing of gel glasses in: glass science and technology 2,* Uhlmann, D. R. and Kreidl, N.J., Academic Press, New York, pp, 209-249.

# EKLER

## EK A. Tez çalışmasında kullanılan kimyasalların özellikleri

**Çizelge 6.1 Asetik asitin bazı özellikleri**

| | |
|---|---|
| Ürün adı | Asetik asit |
| Kimyasal formül | $C_2H_4O_2$ |
| CAS no | 64-19-7 |
| Molar kütle | 60.05 g / mol |
| Ergime noktası | 17 ºC |
| Kaynama noktası | 116-118 ºC |
| Suda çözünürlük | 1000 g / l (20 ºC) |
| pH | 2.5 |
| Buhar basıncı | 15.4 hPa |
| Alev alma sıcaklığı | 485 ºC |
| Yoğunluk | 1.05 g / $cm^3$ |

**Çizelge 6.2. Etanol özellikleri**

| | |
|---|---|
| Ürün adı | Etanol |
| Kimyasal formül | $C_2H_6O$ |
| CAS no | 64-17-5 |
| Molar kütle | 46.07 g / mol |
| Ergime noktası | -114.5 ºC |
| Kaynama noktası | 78.3 ºC |
| Suda çözünürlük | 20ºC |
| pH | 7 |
| Buhar basıncı | 59 hPa |
| Alev alma sıcaklığı | 425 ºC |
| Yoğunluk | 0.790-0.793 g / $cm^3$ |

**Çizelge 6.3. Çinko oksit özellikleri**

| | |
|---|---|
| Ürün adı | Çinko oksit |
| Kimyasal formül | ZnO |
| CAS no | 1314-13-2 |
| Molar kütle | 81.408 g / mol |
| Ergime noktası | 1975 ºC |
| Kaynama noktası | 2360 ºC |
| Örgü yapısı | Hegzagonal wurtzit |
| Yoğunluk | 5.606 g / $cm^3$ |

**Çizelge 6.4. Kalay oksit özellikleri**

| | |
|---|---|
| Ürün adı | Kalay oksit |
| Kimyasal formül | $SnO_2$ |
| CAS no | 18282-10-5 |
| Molar kütle | 150.71 g / mol |
| Ergime noktası | 1630 ºC |
| Kaynama noktası | 1800 ºC-1900 ºC |
| Örgü yapısı | Tetragonal) |
| pH | 7-11 |
| Yoğunluk | 6.95 g / $cm^3$ |

**Çizelge 6.5. Çinko asetat dihidrat özellikleri**

| | |
|---|---|
| **Ürün adı** | **Çinko asetat dihidrat** |
| **Kimyasal formül** | **$Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$** |
| **CAS no** | **5970-45-6** |
| **Molar kütle** | **219.5 g / mol** |
| **Ergime noktası** | **237 ºC** |
| **Suda çözünürlük** | **43 g / 100 ml (20 ºC)** |
| **pH** | **6-7** |
| **Yoğunluk** | **1.735 g / $cm^3$** |

**Çizelge 6.6. Kalay II klorür dihidrat**

| | |
|---|---|
| Ürün adı | Kalay II klorür dihidrat |
| Kimyasal formül | $SnCI_2$. $2H_2O$ |
| CAS no | 10025-69-1 |
| Molar kütle | 225.63 g / mol |
| Ergime noktası | 38 ºC |
| Kaynama noktası | 623 ºC |
| Suda çözünürlük | 118.7 g / l |
| pH | 1-2 |
| Yoğunluk | 2.71 g / $cm^3$ |

**Çizelge 6.7. Kadmiyum asetat dihidrat**

| | |
|---|---|
| Ürün adı | Kadmiyum asetat dihidrat |
| Kimyasal formül | Cd $(CH_3COO)_2$. $2H_2O$ |
| CAS no | 5743-04-4 |
| Molar kütle | 266.52 g / mol |
| Ergime noktası | 256 ºC |
| Suda çözünürlük | 20 ºC' de çözünür |
| pH | Yaklaşık 7 |
| Yoğunluk | 2.01 g / $cm^3$ |

# ÖZGEÇMİŞ

**Kişisel Bilgiler**


Adı Soyadı : Nalan İPKİN
Uyruk : T.C
Doğum yeri ve Tarihi : 17/12/1981
Medeni Hali : Evli
Telefon : (0505) 727 18 42
E-Posta : nalanipkin@hotmail.com


**Eğitim**

| **Alınan Derece** | **Üniversite** | **Mezuniyet Yılı** |
|---|---|---|
| Lise | Aksu Anadolu Öğretmen Lisesi | 2000 |
| Lisans | Ondokuz Mayıs Üniversitesi Üniversitesi | 2004 |
| Yüksek Lisans | Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi | 2018 |

**İş Tecrübesi**

| **Yıl** | **Yer** | **Pozisyon/görev** |
|---|---|---|
| 2005-2006 | Antalya | Öğretmen |
| 2009-2012 | Bandırma/Balıkesir | Öğretmen |