

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KRİSTALLOGRAFİK OLARAK YÖNLENDİRİLMİŞ ANİZOMETRİK TEK**  
**KRİSTAL PİEZOELEKTRİK PARÇACIKLARA SAHİP**  
**PIEZOKOMPOZİTLERİ TEMEL ALAN YÜKSEK HASSASİYETLİ**  
**DOKUNSALE SENSÖRLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**HÜSEYİN ALPTEKİN SARI**

**DOKTORA TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. SEDAY ALKOY**

**NİSAN 2025**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KRİSTALLOGRAFİK OLARAK YÖNLENDİRİLMİŞ ANİZOMETRİK TEK**  
**KRİSTAL PİEZOELEKTRİK PARÇACIKLARA SAHİP**  
**PIEZOKOMPOZİTLERİ TEMEL ALAN YÜKSEK HASSASİYETLİ**  
**DOKUNSALE SENSÖRLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**HÜSEYİN ALPTEKİN SARI**

**DOKTORA TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. SEDAT ALKOY**

**NİSAN 2025**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL**

**DEVELOPMENT OF HIGH SENSITIVITY TACTILE  
SENSORS BASED ON PIEZOCOMPOSITES WITH  
CRYSTALLOGRAPHICALLY ORIENTED ANISOMETRIC  
SINGLE CRYSTAL PIEZOELECTRIC PARTICLES**

**HÜSEYİN ALPTEKİN SARI**

**A THESIS OF DOCTORATE  
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND  
ENGINEERING**

**ADVISOR: PROF. DR. SEDAT ALKOY**

**APRIL 2025**

## **DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 14/04/2025 tarih ve 2025/22 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 18/04/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hüseyin Alptekin SARI'nın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

### **JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Sedat ALKOY

ÜYE

: Prof. Dr. Koray ÖZTÜRK

ÜYE

: Prof. Dr. Ümit İŞÇİ

ÜYE

: Doç. Dr. İlke ANAÇ ŞAKIR

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yunus KAYA

### **ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Bu çalışmanın amacı dokunsal sensör uygulamalarında kullanılmak üzere dokulu 0 – 3 piezokompozitlerin dielektrik ve piezoelektrik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla tek kristal ve iğnesel morfolojideki potasyum stronsiyum niyobat KSN –  $\text{KSn}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  şablon parçacıklarının sentezi, yapısal karakterizasyonu, dielektroforesis yöntemi kullanılarak şablon parçacıklarının tercihli yönlenmelerini incelemek ve yönlenme ile piezokompozitin elektriksel özellikleri ve sensör performansı arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Tek kristal KSN şablon parçacıklarının üretimi için ergiyik tuz sentezi yöntemi tercih edilmiştir. Ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak üretilen KSN şablon parçacıklarının morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi kullanılarak tek kristal özellikleri ise geçirimli elektron mikroskobu yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Dielektroforesis yöntemi ile KSN şablon parçacıklarının yönlenmesine ait bilgiler ise X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Lotgering faktörü hesaplamaları ile tetragonal yapıdaki KSN şablon parçacıklarının c eksen boyunca yönlendiği teyit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek Lotgering faktörü değeri 200 Hz frekansta 2 kV/mm’lik elektrik alan uygulanan hacimce %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerde 0.83 olarak hesaplanmıştır. Üretilen piezokompozitlerin elektriksel özellikleri ile KSN şablon parçacıklarının yönlenmesi arasında kuvvetli bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin dielektrik, ferroelektrik ve piezoelektrik özelliklerinin dielektroforesis yöntemi ve herhangi bir elektrik alan uygulanmadan üretilen ve iğnesel morfolojideki KSN şablon parçacıklarının rastgele yönelime sahip olan piezokompozitlere göre daha yüksek özelliklere sahip oldukları belirlenmiştir. Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin dokunsal sensör uygulamalarında kullanılmak amacı ile yapılan ölçümlerin sonucunda 0 – 3 piezokompozitlerin üretmiş oldukları çıkış voltaj değerlerinin tek kristal KSN şablon parçacıklarının uygulanan elektrik alan sonucunda yönlenmesine bağlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda tek kristal KSN şablon parçacıklarına sahip dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen 0 – 3 piezokompozitlerin dokunsal sensör uygulamalarında tercih edilebilecek malzemelerden oldukları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Piezokompozit, Dielektroforesis, Dokunsal Sensör, KSN, Tek Kristal

## ABSTRACT

The aim of this study is to synthesize single crystalline potassium strontium niobate KSN –  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  template particles with needle morphology in order to improve the dielectric and piezoelectric properties of textured 0 – 3 piezocomposites to be used in tactile sensor applications, to characterize the structural features of the particles, investigate the preferred orientation of the template particles using the dielectrophoresis method, and to establish a correlation between the particle orientation and electrical properties and sensor performance of the piezocomposites. The molten salt synthesis method was preferred for the production of single crystal KSN template particles. The morphology of the KSN template particles produced using the molten salt synthesis method was determined using the scanning electron microscope (SEM) method and their single crystal properties were determined using the transmission electron microscope method. The information regarding the orientation of the KSN template particles with the dielectrophoresis method was obtained using the X-ray diffraction (XRD) method and the Lotgering factor calculations determined that the tetragonal structured KSN template particles were oriented along the c axis. As a result of the experimental studies, the highest Lotgering factor value was calculated as 0.83 in piezocomposites containing 5% KSN template particles by volume oriented under an AC electric field of 2 kV/mm with a frequency of 200 Hz. It was determined that there was a strong relationship between the electrical properties of the produced piezocomposites and the orientation of the KSN template particles. It was determined that the dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of the piezocomposites produced using the dielectrophoresis method had higher properties than the piezocomposites produced without applying any electric field and with random orientation of the needle-shaped KSN template particles. As a result of the measurements made for the purpose of using the piezocomposites produced using the dielectrophoresis method in tactile sensor applications, it was determined that the output voltage values produced by 0-3 piezocomposites increased depending on the orientation of the single crystal KSN template particles as a result of the applied electric field. As a result of this study, it was determined that 0-3 piezocomposites produced using the dielectrophoresis method with single crystal KSN template particles are among the materials that can be preferred in tactile sensor applications.

**Keywords: Piezocomposite, Dielectrophoresis, Tactile Sensor, KSN, Single Crystal**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana bilgi ve desteğini esirgemeyen ve her zaman tecrübelerini aktaran danışmanım Prof. Dr. Sedat ALKOY'a, ve ayrıca doktora tez izleme jüri üyeleri Prof. Dr. Koray Öztürk, ve Prof. Dr. Ümit İŞCİ'ye, teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana desteklerini esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Ayşe Berksoy-Yavuz, Dr. Öğretim Üyesi Gamze Baş Berkem'e teşekkür ederim.

Hem tez çalışmam hem de tez çalışmamın haricinde bana hem abilik hem de mentor olarak destek olan Dr. Öğretim Üyesi Mustafa Yunus Kaya ve Dr. Ali Sabri Berkem'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bana her zaman destek olan her zaman benim yanımda bulunan arkadaşlarım Dr. Osman Yağız Akduman, Dr. Tuba Yıldız Kaplan, Dr. Mustafa Ünsal Ünver, Dr. Selin Sarıyer, Arş. Görevlisi Vala Can Aşkan, Arş. Görevlisi Mehmet Emre Aköz, Arş. Görevlisi Hatice Öner Akduman, Arş. Görevlisi Fatmanur Kocaman Kabil, Arş. Görevlisi Bahar Şölen Akdemir, İlhan Oğul, Murat Yılmaz'a çok teşekkür ederim ve iyi ki varsınız.

Ekip Arkadaşlarım Öğretim Görevlisi Dr. Namık Kemal Gözüa ık, Arş. Görevlisi Ezgi Yalçın, doktorant Muhammet Boz ve Maral Kervancı'ya teşekkür ederim.

X-ışınları kırınımı analizlerini gerçekleştiren Uzman Adem Şen ve taramalı elektron mikroskobu analizlerini gerçekleştiren Öğretim Görevlisi Ahmet Nazım'a teşekkür ederim.

Bana tüm hayatım boyunca destek olan her zaman bana sevgilerini gösteren büyüten ve bugünlere gelmeme sebep olan en büyük zenginliğim aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim. İyi ki varsınız.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                            | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                                       | v                   |
| ABSTRACT                                                                   | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                                                   | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                                                | viii                |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                             | x                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                            | xii                 |
| TABLolar DİZİNİ                                                            | xvii                |
| <br>                                                                       |                     |
| 1. GİRİŞ                                                                   | 1                   |
| 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği                                       | 1                   |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ                                                         | 3                   |
| 2.1. Dielektrik özellikler                                                 | 3                   |
| 2.2. Piezoelektrik Özellik                                                 | 5                   |
| 2.3. Ferroelektrik Özellik                                                 | 9                   |
| 2.4. Tungsten Bronz Kristal Yapısı                                         | 12                  |
| 2.5. Ergiyik Tuz Sentezi                                                   | 18                  |
| 2.6. Piezokompozitler                                                      | 22                  |
| 2.7. Dielektroforesis Yöntemi                                              | 25                  |
| 2.8. Dokunsal Sensörler                                                    | 29                  |
| 2.8.1. Kapasitif Dokunsal Sensörler                                        | 30                  |
| 2.8.2. Piezorezistif Dokunsal Sensörler                                    | 31                  |
| 2.8.3. Piezoelektrik Dokunsal Sensörler                                    | 33                  |
| 2.8.4. Optik Dokunsal Sensörler                                            | 35                  |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR                                                     | 38                  |
| 3.1. Ergiyik Tuz Sentezi Yöntemi ile KSN Şablon Parçacıklarının Üretilmesi | 38                  |
| 3.2. Dielektroforesis Yöntemi ile Piezokompozit Üretimi                    | 40                  |
| 3.3. X-Işınları Karakterizasyonu                                           | 42                  |
| 3.4. Morfolojik Analizler                                                  | 42                  |
| 3.5. Dielektrik Karakterizasyon                                            | 42                  |
| 3.6. Ferroelektrik Karakterizasyon                                         | 43                  |
| 3.7. Piezokompozitlerin Kutuplanması                                       | 43                  |
| 4. SONUÇLAR ve YORUMLAR                                                    | 44                  |
| 4.1. SN ve KSN Tozlarının XRD Sonuçları                                    | 44                  |
| 4.2. KSN Şablon Parçacıklarının Oluşumu ve Morfolojik Analizi              | 46                  |
| 4.3. Dielektroforesis Yöntemi ile Üretilen Kompozitlerin XRD Analizleri    | 51                  |
| 4.4. Piezokompozitlerin SEM Görüntüleri                                    | 56                  |
| 4.5. Piezokompozitlerin Kutuplama Öncesi Dielektrik Ölçüm Sonuçları        | 63                  |
| 4.6. Piezokompozitlerin Ferroelektrik Ölçüm Sonuçları                      | 69                  |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.7. Piezokompozitlerin Ferroelektrik Ölçüm Sonrası $d_{33}$ ve $g_{33}$ Katsayılarının Hesaplanması | 75  |
| 4.8. Piezokompozitlerin Kutuplama Sonrasındaki Dielektrik Ölçümleri                                  | 81  |
| 4.9. Kutuplama Sonrası Piezokompozitlerin $d_{33}$ ve $g_{33}$ Katsayılarının Hesaplanması           | 87  |
| 4.10. Piezokompozitlerin Sensör Ölçüm Sonuçları                                                      | 96  |
| 5. SONUÇLAR                                                                                          | 120 |
| 6. ÖNERİLER                                                                                          | 123 |
| KAYNAKLAR                                                                                            | 125 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                                             | 135 |
| TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR                                                            | 136 |



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

|                                                  |                                                                                                     |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| %                                                | : Yüzde                                                                                             |
| °                                                | : Derece                                                                                            |
| $\epsilon$                                       | : Dielektrik geçirgenlik                                                                            |
| $\epsilon_0$                                     | : Vakumun dielektrik geçirgenliği                                                                   |
| $\epsilon_r$                                     | : Göreceli dielektrik geçirgenlik                                                                   |
| $\pi$                                            | : Pi sayısı                                                                                         |
| $\rho$                                           | : Yoğunluk                                                                                          |
| $\sigma$                                         | : İletkenlik                                                                                        |
| $\Phi$                                           | : Hacimce dolgu malzemesi miktarı                                                                   |
| $\chi$                                           | : Duygunluk                                                                                         |
| A                                                | : Yüzey alanı                                                                                       |
| ABO <sub>3</sub>                                 | : Perovskit yapının genel formülü                                                                   |
| AC                                               | : Alternatif akım                                                                                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | : Alüminyum oksit                                                                                   |
| ATM                                              | : Atmosfer                                                                                          |
| BaTiO <sub>3</sub>                               | : Baryum titanat                                                                                    |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | : Bizmut oksit                                                                                      |
| Bi <sub>4</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>12</sub>  | : Bizmut titanat                                                                                    |
| BNN                                              | : Bizmut sodyum niyobat                                                                             |
| BSKNN-1                                          | : Ba <sub>2-x</sub> Sr <sub>x</sub> K <sub>1-y</sub> N <sub>y</sub> Nb <sub>5</sub> O <sub>15</sub> |
| BSKNN-2                                          | : Ba <sub>2-x</sub> Sr <sub>x</sub> K <sub>1-y</sub> N <sub>y</sub> Nb <sub>5</sub> O <sub>15</sub> |
| BSKNN-3                                          | : Ba <sub>2-x</sub> Sr <sub>x</sub> K <sub>1-y</sub> N <sub>y</sub> Nb <sub>5</sub> O <sub>15</sub> |
| BSTN                                             | : (Ba,Sr) <sub>6</sub> Ti <sub>2</sub> Nb <sub>8</sub> O <sub>30</sub>                              |
| BT                                               | : Baryum titanat                                                                                    |
| Cm                                               | : Santimetre                                                                                        |
| D                                                | : Elektriksel yer değiştirme                                                                        |
| D                                                | : Dielektrik kayıp                                                                                  |
| DC                                               | : Doğru akım                                                                                        |
| E                                                | : Elektrik alan                                                                                     |
| F                                                | : Farad                                                                                             |
| f <sub>0</sub>                                   | : Rezonans frekansı                                                                                 |
| FOM                                              | : Figür of merit – mükemmelliyet katsayısı                                                          |
| g                                                | : Piezoelektrik voltaj katsayısı                                                                    |
| H <sub>2</sub> O                                 | : Su                                                                                                |
| K                                                | : Dielektrik sabiti                                                                                 |
| K <sup>+</sup>                                   | : Potasyum iyonu                                                                                    |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                   | : Potasyum karbonat                                                                                 |
| K <sub>2</sub> NbO <sub>3</sub>                  | : Potasyum niyobat                                                                                  |
| KCl                                              | : Potasyum klorür                                                                                   |
| KLN                                              | : Potasyum lityum niyobat                                                                           |
| KSN                                              | : Potasyum stronsiyum niyobat                                                                       |
| KSr <sub>2</sub> Nb <sub>5</sub> O <sub>15</sub> | : Potasyum stronsiyum niyobatin kimyasal formülü                                                    |
| kV                                               | : Kilovolt                                                                                          |
| La <sup>+</sup>                                  | : Lantanum iyonu                                                                                    |
| Li <sup>+</sup>                                  | : Lityum iyonu                                                                                      |
| Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                  | : Lityum karbonat                                                                                   |
| LiCl                                             | : Lityum klorür                                                                                     |

|                           |                                                           |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------|
| $\text{LiFe}_5\text{O}_8$ | : Lityum demir oksit                                      |
| $\text{LiNbO}_3$          | : Lityum niyobat                                          |
| m                         | : Metre                                                   |
| $\text{m}^2$              | : Metre kare                                              |
| $\text{Na}^+$             | : Sodyum iyonu                                            |
| $\text{NaCl}$             | : Sodyum klorür                                           |
| $\text{Nb}^+$             | : Niyobyum iyonu                                          |
| $\text{Nb}_2\text{O}_5$   | : Nyobyum oksit                                           |
| PA                        | : Poliamit                                                |
| PBN60                     | : Potasyum niyobat                                        |
| PC                        | : Polikarbonat                                            |
| PDMS                      | : Polidimetil siloksan                                    |
| PI                        | : Poliimit                                                |
| PMMA                      | : Polimetil metakrilat                                    |
| $P_p$                     | : Maksimum polarizasyon                                   |
| $P_r$                     | : Kalıcı polarizasyon                                     |
| $P_s$                     | : Doyma polarizasyonu                                     |
| PS                        | : Polistren                                               |
| PU                        | : Poliüretan                                              |
| PVC                       | : Polivinil klorür                                        |
| PVDF                      | : Polivindilin di florür                                  |
| PZT                       | : Kurşun zirkonat titanat                                 |
| R                         | : Gaz sabiti                                              |
| R                         | : Direnç                                                  |
| SBN50                     | : $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$   |
| SBN60                     | : $\text{Sr}_{0.60}\text{Ba}_{0.40}\text{Nb}_2\text{O}_6$ |
| SBN75                     | : $\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$ |
| SCNN                      | : $\text{Sr}_{2-x}\text{Ca}_x\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  |
| SEM                       | : Taramalı elektron mikroskobu                            |
| $\text{Sr}^+$             | : Stronsiyum iyonu                                        |
| $\text{SrCO}_3$           | : Stronsiyum karbonat                                     |
| $\text{SrNb}_2\text{O}_6$ | : Stronsiyum niyobat                                      |
| T                         | : Sıcaklık                                                |
| $\text{Ta}^+$             | : Tantalum iyonu                                          |
| TB                        | : Tungsten bronz                                          |
| Tc                        | : Curie sıcaklığı                                         |
| TEM                       | : Geçirimli elektron mikroskobu                           |
| $\text{Ti}^+$             | : Titanyum iyonu                                          |
| $\text{TiO}_2$            | : Titanyum dioksit                                        |
| TTB                       | : Tetragonal tungsten bronz                               |
| V                         | : Volt                                                    |
| $\text{W}^+$              | : Wolfram iyonu                                           |
| X                         | : Gerilim                                                 |
| x                         | : Gerinim                                                 |
| XRD                       | : X-Işınları kırınımı                                     |
| Yc                        | : Seramiğin Young modülü                                  |
| Ym                        | : Matrisin Young modülü                                   |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                   | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Şekil 2.1:</b> Dielektrik malzemelerin frekansa bağlı polarizasyon mekanizmaları                                                                               | 5            |
| <b>Şekil 2.2:</b> Piezoelektrik özelliğin şematik olarak gösterimi                                                                                                | 6            |
| <b>Şekil 2.3:</b> Nokta grupları ve nokta gruplarına bağlı olarak sergilemiş oldukları fiziksel özellikler                                                        | 7            |
| <b>Şekil 2.4:</b> Heckmann Diyagramı                                                                                                                              | 8            |
| <b>Şekil 2.5:</b> Ferroelektrik bir malzemenin histerisiz eğrisi                                                                                                  | 10           |
| <b>Şekil 2.6:</b> Ferroelektrik bir malzemenin kutuplanma işlemi                                                                                                  | 12           |
| <b>Şekil 2.7:</b> Perovskit yapının üç boyuttaki gösterimi                                                                                                        | 13           |
| <b>Şekil 2.8:</b> TTB kristal yapısının üç boyuttaki gösterimi                                                                                                    | 14           |
| <b>Şekil 2.9:</b> Tungsten bronz ailesi                                                                                                                           | 14           |
| <b>Şekil 2.10:</b> $\text{KNbO}_3 - \text{SrNb}_2\text{O}_6$ 'ya ait faz diyagramı                                                                                | 17           |
| <b>Şekil 2.11:</b> Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile seramik toz üretimine atı akış diyagramı                                                                       | 21           |
| <b>Şekil 2.12:</b> Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilebilen seramik tozlarının morfolojileri                                                                  | 22           |
| <b>Şekil 2.13:</b> Piezoelektrik kompozitlerin üç boyuttaki bağlanabilirlikleri                                                                                   | 23           |
| <b>Şekil 2.14:</b> Elektroforesis ve dielektroforesis arasındaki farklar                                                                                          | 26           |
| <b>Şekil 2.15:</b> Bowen modellemesine göre dielektroforesis ile parçacık yönleneşi                                                                               | 28           |
| <b>Şekil 2.16:</b> Kapasitif dokunsal sensör                                                                                                                      | 31           |
| <b>Şekil 2.17:</b> Piezorezistif dokunsal sensör                                                                                                                  | 33           |
| <b>Şekil 2.18:</b> Piezoelektrik dokunsal sensörün uygulama alanı                                                                                                 | 35           |
| <b>Şekil 3.1:</b> Ergiyik tuz sentezi ile tek kristal KSN şablon parçacıklarının üretimine ait akış diyagramı                                                     | 39           |
| <b>Şekil 3.2:</b> Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin deney düzeneği                                                                | 41           |
| <b>Şekil 4.1:</b> SN öncül fazının XRD deseni                                                                                                                     | 44           |
| <b>Şekil 4.2:</b> Farklı soğutma rejimine sahip KSN şablon parçacıklarının XRD deseni                                                                             | 46           |
| <b>Şekil 4.3:</b> Farklı soğutma rejimindeki KSN şablon parçacıklarının SEM görüntüsü, a) 1°/dakika, b) 3°/dakika ve c) 5°/dakika                                 | 47           |
| <b>Şekil 4.4:</b> Basamaklı yüzey morfolojisi                                                                                                                     | 49           |
| <b>Şekil 4.5:</b> İğnesel morfolojide büyüme davranışı gösteren KSN şablon parçacıklarının TEM görüntüsü ve [010] doğrultusundan alınmış elektron kırınım deseni. | 50           |
| <b>Şekil 4.6:</b> KSN şablon parçacıklarının elementel analizi                                                                                                    | 51           |
| <b>Şekil 4.7:</b> %5 KSN şablon parçacıklarına sahip kompozitlerin XRD desenleri                                                                                  | 53           |
| <b>Şekil 4.8:</b> %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin XRD deseni                                                                                           | 54           |
| <b>Şekil 4.9:</b> %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin XRD deseni                                                                                           | 54           |
| <b>Şekil 4.10:</b> Hacimce %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 125x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz                       | 57           |

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.11:</b> Hacimce %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 500x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz                                        | 57 |
| <b>Şekil 4.12:</b> Hacimce %10 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 125x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz                                       | 59 |
| <b>Şekil 4.13:</b> Hacimce %10 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 500x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz                                       | 59 |
| <b>Şekil 4.14:</b> Hacimce %15 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 125x görüntüsü a) 200 Hz, b) 400 Hz, c) 600 Hz                                                    | 60 |
| <b>Şekil 4.15:</b> Hacimce %15 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 500x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz                                       | 61 |
| <b>Şekil 4.16:</b> Yönlenmeye bağlı olarak piezokompozitlerin SEM görüntüsü. Sırası ile a ve b %15 KSN 200 ve 400 Hz, c ve d %10 KSN 200 ve 400 Hz ve e ve f %5 KSN 200 ve 400 Hz. | 62 |
| <b>Şekil 4.17:</b> %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik sabiti – frekans grafiği                                                                  | 64 |
| <b>Şekil 4.18:</b> %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik sabiti – frekans grafikleri                                                              | 65 |
| <b>Şekil 4.19:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik sabiti                                                                                            | 66 |
| <b>Şekil 4.20:</b> %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik kayıpları                                                                                 | 67 |
| <b>Şekil 4.21:</b> %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik kayıpları                                                                                | 68 |
| <b>Şekil 4.22:</b> %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik kayıpları                                                                                | 68 |
| <b>Şekil 4.23:</b> %5 KSN içeren piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan grafiği                                                                                           | 70 |
| <b>Şekil 4.24:</b> %10 KSN içeren piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan grafiği                                                                                          | 71 |
| <b>Şekil 4.25:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan grafiği                                                                                          | 72 |
| <b>Şekil 4.26:</b> Yönlenmeye bağlı olarak ölçülen polarizasyon – elektrik alan grafiği                                                                                            | 73 |
| <b>Şekil 4.27:</b> %5 KSN içerikli kompozitlerin ferroelektrik ölçüm sonrası $d_{33}$ grafiği                                                                                      | 74 |
| <b>Şekil 4.28:</b> 200 Hz frekansa göre ferroelektrik ölçüm sonuçları                                                                                                              | 75 |
| <b>Şekil 4.29:</b> 400 Hz frekansa göre ferroelektrik ölçüm sonuçları                                                                                                              | 76 |
| <b>Şekil 4.30:</b> %5 KSN içeren piezokompozitlerin 1 kHz frekansındaki dielektrik sabiti                                                                                          | 77 |
| <b>Şekil 4.31:</b> %5 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik voltaj katsayısı – frekans grafiği                                                                               | 78 |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.32:</b> %10 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği                                | 78 |
| <b>Şekil 4.33:</b> %10 KSN içeren piezokompozitlerin 1 kHz frekansındaki dielektrik sabiti                                        | 79 |
| <b>Şekil 4.34:</b> %10 KSN içeren piezokompozitlerin ferroelektrik ölçüm sonrası piezoelektrik voltaj katsayısı – frekans grafiği | 79 |
| <b>Şekil 4.35:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği                                | 80 |
| <b>Şekil 4.36:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin 1 kHz frekansındaki dielektrik sabiti                                        | 80 |
| <b>Şekil 4.37:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik voltaj katsayısı – frekans grafiği                             | 81 |
| <b>Şekil 4.38:</b> %5 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik sabiti – frekans grafiği                         | 82 |
| <b>Şekil 4.39:</b> %10 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik sabiti – frekans grafiği                        | 83 |
| <b>Şekil 4.40:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik sabiti – frekans grafiği                        | 84 |
| <b>Şekil 4.41:</b> %5 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik kayıp – frekans grafiği                          | 85 |
| <b>Şekil 4.42:</b> %10 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik kayıp – frekans grafiği                         | 85 |
| <b>Şekil 4.43:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik kayıp – frekans grafiği                         | 86 |
| <b>Şekil 4.44:</b> %5 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği               | 87 |
| <b>Şekil 4.45:</b> %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası 1 kHz dielektrik sabiti grafiği                    | 89 |
| <b>Şekil 4.46:</b> %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası $g_{33}$ grafiği                                   | 89 |
| <b>Şekil 4.47:</b> %10 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği              | 90 |
| <b>Şekil 4.48:</b> %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası 1 kHz dielektrik sabiti grafiği                   | 91 |
| <b>Şekil 4.49:</b> %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası $g_{33}$ grafiği                                  | 92 |
| <b>Şekil 4.50:</b> %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği              | 93 |
| <b>Şekil 4.51:</b> %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası 1 kHz dielektrik sabiti grafiği                   | 93 |
| <b>Şekil 4.52:</b> %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası $g_{33}$ grafiği                                  | 94 |
| <b>Şekil 4.53:</b> Piezokompozitlerin sensör ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneği                                                | 97 |

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.54:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 98  |
| <b>Şekil 4.55:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 99  |
| <b>Şekil 4.56:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 100 |
| <b>Şekil 4.57:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 101 |
| <b>Şekil 4.58:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 101 |
| <b>Şekil 4.59:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 102 |
| <b>Şekil 4.60:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 102 |
| <b>Şekil 4.61:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 103 |
| <b>Şekil 4.62:</b> %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği  | 103 |
| <b>Şekil 4.63:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 104 |
| <b>Şekil 4.64:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 104 |
| <b>Şekil 4.65:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 105 |
| <b>Şekil 4.66:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 105 |
| <b>Şekil 4.67:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 106 |
| <b>Şekil 4.68:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 106 |
| <b>Şekil 4.69:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 107 |
| <b>Şekil 4.70:</b> %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 107 |
| <b>Şekil 4.71:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 108 |
| <b>Şekil 4.72:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 108 |
| <b>Şekil 4.73:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 109 |
| <b>Şekil 4.74:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 109 |
| <b>Şekil 4.75:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 110 |

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.76:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 110 |
| <b>Şekil 4.77:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 111 |
| <b>Şekil 4.78:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 111 |
| <b>Şekil 4.79:</b> %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği | 112 |
| <b>Şekil 4.80:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 113 |
| <b>Şekil 4.81:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 113 |
| <b>Şekil 4.82:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 114 |
| <b>Şekil 4.83:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 115 |
| <b>Şekil 4.84:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 20 gr ağırlık ve 40 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 115 |
| <b>Şekil 4.85:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 116 |
| <b>Şekil 4.86:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 117 |
| <b>Şekil 4.87:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 15 gr ağırlık ve 40 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 117 |
| <b>Şekil 4.88:</b> Yönlenmeye bağlı olarak 15 gr ağırlık ve 35 Hz frekanstaki sensör ölçümleri                      | 118 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                         | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Tablo 2.1:</b> Tungsten bronz yapısındaki bileşikler.                                | 18                  |
| <b>Tablo 2.2:</b> Dokunsal sensör türlerinin karşılaştırılması.                         | 36                  |
| <b>Tablo 2.3:</b> Dokunsal sensörlerde kullanılan malzemelerin karşılaştırılması.       | 37                  |
| <b>Tablo 3.1:</b> KSN şablon parçacıklarının üretimi için başlangıç tozları.            | 39                  |
| <b>Tablo 3.2:</b> Polimer matris fazına ait bilgiler.                                   | 40                  |
| <b>Tablo 4.1:</b> Piezokompozitlerin Lotgering faktörü değerleri.                       | 56                  |
| <b>Tablo 4.2:</b> Piezokompozitlerin elektriksel özellikleri ve yönlenme miktarları     | 96                  |
| <b>Tablo 5.1:</b> 0-3 Piezokompozitlerin piezoelektrik özelliklerinin karşılaştırılması | 122                 |

# 1. GİRİŞ

## Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu tez çalışması kapsamında, anizometrik (bir boyutu diğer iki boyutundan çok daha büyük veya küçük olan) iğnesel morfolojideki tek kristal piezoelektrik parçacıkların prepolimer bir matris içerisinde dağıtılması, dielektroforesis yöntemi kullanılarak tek kristal parçacıkların elektrik alan doğrultusunda tercihli olarak yönlendirilmesi ve prepolimerin polimerleşmesi sırasında yönlenmenin sabitlenmesi sayesinde özellikleri anizotropik (yöne bağlı olarak değişen), 0-3 bağlantıya sahip piezokompozitlerin üretilmesi yoluyla daha hassas dokusal sensörlerin üretilmesi amaçlanmıştır. Dielektroforesis yöntemi ile üretilen piezokompozitler 0-3 ve 1-3 bağlanabilirliğindeki piezokompozitlerin arasında kalan bir sınıfa dahil olmaktadır. Bu ara sınıf tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu tip piezokompozitlerin tercih edilmesinin sebebi; 0-3 kompozitler her ne kadar esnek özelliklere sahip olsalar da dolgu malzemesi olarak kullanılan inorganik piezoelektrik fazın genellikle birbirinden ayrık ve rastgele bir dağılıma sahip olması nedeniyle daha düşük piezoelektrik davranışlar sergilemektedirler. Bir diğer yandan 1-3 bağlanabilirliğinde piezokompozitler ise çubuk şeklinde polimer matris fazı içerisine yerleştirilmelerinin sonucunda esnekliklerini kısmen kaybetmektedirler. Bu tarz dezavantajlara sahip olmalarından kaynaklı olarak dielektroforesis yöntemi tercih edilmiştir. Piezokompozitlerin üretimi için tercih edilen dolgu malzemesinin tek kristal şablon parçacıklarından oluşması ise tek kristal malzemelerin bir doğrultuda çok kristalli malzemelere göre daha yüksek özellikler sergilemesi ile açıklanabilir. KSN şablon parçacıkları, hem anizometrik olarak iğnesel morfolojide büyüyeabilmeleri, hem de genel olarak biyomalzemeler olarak kullanılan dokusal sensörlerin uygulamalarında kullanılan toksik kurşunlu piezoelektriklere kıyasla kurşun içermeyen bir piezoelektrik malzeme olması nedeniyle tercih edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında iğnesel morfolojideki anizometrik KSN şablon parçacıklarının üretimi için ergiyik tuz sentezi yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin tercih edilmesi tek kristal malzemelerin diğer üretim yöntemlerine göre daha ucuz ve daha kolay olması ve ayrıca anizometrik morfolojide tek kristal büyümesine olanak

sağlaması nedeniyledir. Piezokompozitlerin üretimi hakkında ise daha detaylı bilgi tez çalışmasının ilerleyen kısmında açıklanmıştır.

Yapılan bu çalışma ile dokunsal sensörlerin üretiminde farklı bir morfolojiye sahip dolgu malzemesinin tercih edilmesi, piezokompozitlerin dielektroforesis yöntemi ile üretilirken tek kristal dolgu malzemesinin tercih edilmesi ve tek kristallerin özelliklerinin literatürdeki çalışmalarda kullanılan çok kristalli malzemelere göre yaratabileceği farklılıklar gibi nedenlerden dolayı literatüre önemli katkıda bulunulması amaçlanmıştır.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1. Dielektrik Özellikler

Dielektrikler, yalıtkan veya çok düşük elektrik iletkenliğe sahip malzemelerdir. Mükemmel bir dielektrik malzemeye elektrik alan uygulanmasının sonucunda doğrudan bir akım geçişi ve buna bağlı elektronik bir iletkenlik söz konusu olmaz. Bu durumun temel sebebi dielektrik malzemelerin metallerde olduğu gibi serbest elektronlara sahip olmamasıdır. Dielektrik malzemelerde elektrik iletkenliği yerine elektriksel yüklerin kısıtlı bir yer değiştirmesine bağlı olarak polarizasyon meydana gelmektedir. Elektriksel polarizasyon dielektrik bir malzemeye elektrik alan uygulanmasının sonucunda pozitif yüklerin uygulanan elektrik alan doğrultusunda, negatif yüklerin ise elektrik alan doğrultusuna ters yönde olacak şekilde yük merkezlerinin ayrışması sonucunda oluşan olgudur [Gregersen, 2025].

Bir malzemenin temel dielektrik özelliklerinden biri dielektrik sabiti ile belirlenmektedir. Dielektrik sabiti bir malzemenin yük depolayabilme kabiliyetini ifade etmektedir. Dielektrik sabiti “K” ile ifade edilmektedir. Dielektrik bir malzemenin özelliklerini skaler bir büyüklük olarak ifadesinde 2.1’deki temel bağıntı kullanılmaktadır:

$$D = \epsilon E \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’deki D: elektriksel yer değiştirmeyi ifade etmektedir ve birimi C/m<sup>2</sup>’dir.  $\epsilon$ : dielektrik geçirgenliktir birimi F/m’dir. E: elektrik alanı ifade etmektedir ve birimi V/m’dir. Dielektrik sabiti ise eşitlik 2.2’deki gibidir.

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

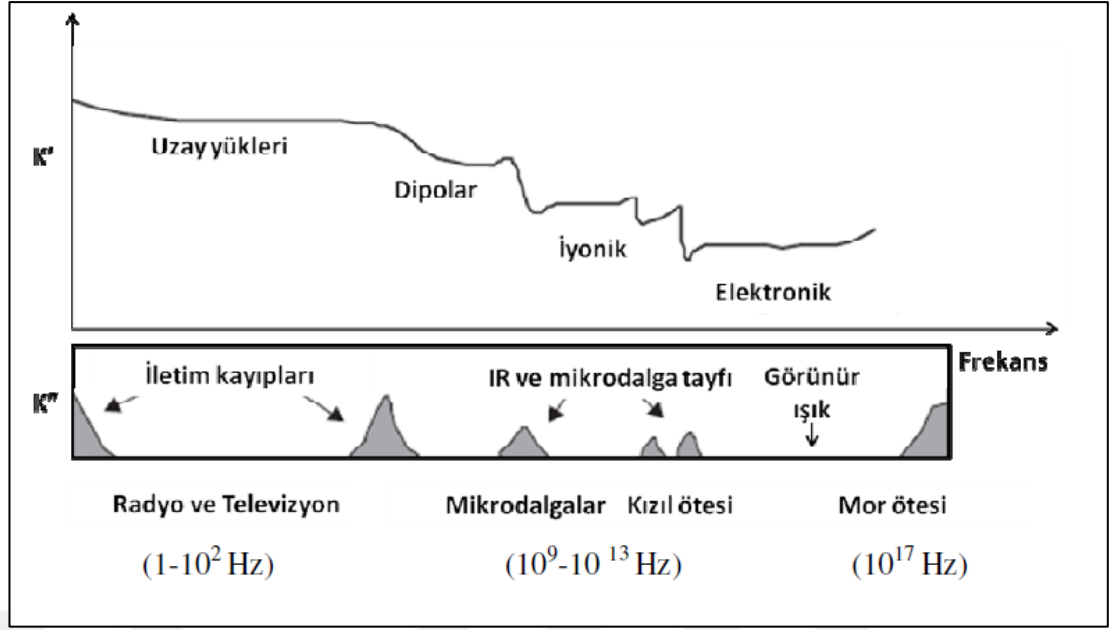
Eşitlik 2.2’deki  $\epsilon_0$ : Vakumun dielektrik geçirgenliğini ifade etmektedir.  $\epsilon_0$  sayısal olarak  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m’dir. Elektriksel yer değiştirme (D) ise elektrot yüzündeki yükler ile polarizasyonun (P, C/m<sup>2</sup>) toplamına eşittir ve eşitlik 2.3 ile ifade edilmiştir.

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.1 ve 2.3'ün kullanılması ile

$$P = (K - 1)\varepsilon_0 E = \chi \varepsilon_0 E \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'teki,  $\chi$ , dielektrik duygunluk olarak ifade edilmektedir. Dielektrik duygunluk yük ile serbest yüklerin birbirlerine oranlanmasının ölçüsüdür. Bir dielektrik malzemenin dielektrik duygunluğu fazla ise malzemenin yük depolayabilme kabiliyeti o kadar artmaktadır [Carter ve Norton, 2007], [Newnham, 2005]. Dielektrik sabitinin değeri yalıtkan malzemelerde geniş bir aralıkta değişiklikler göstermektedir. Bu durum dielektrik malzemelerin yoğunlukları, polarizasyon mekanizmaları ve malzemeyi oluşturan atomların kutuplanabilirliği ile ilgilidir. Bir örnek ile açıklamak gerekirse gazların yoğunluklarının düşük olması sebebi ile dielektrik sabiti düşüktür. Normal şartlar altında (1 atm basınç) havanın dielektrik sabiti değeri 1'den çok az yüksektir ( $\sim 1.0006$ ). Genellikle bilinen birçok seramik ve polimer malzemenin dielektrik sabiti değerleri 2 – 10 arasında değişmektedir. Örnek olarak polietilen polimerinin dielektrik sabiti 2.3 iken silika camının sahip olduğu dielektrik sabiti 3.8'dir. Polietilen ve silika camı büyük oranda kovalent bağa sahip düşük yoğunluklu dielektrik malzemeler sınıfına girmektedirler ve temel olarak elektronik (atomik) polarizasyon mekanizması geçerlidir. İyonik bağlı bileşiklerden örnek vermek gerekirse NaCl ve  $Al_2O_3$  gibi iyonik karakterli bileşikler elektronik polarizasyon mekanizmasına ek olarak iyonik polarizasyon mekanizmasına da sahiptir ve bu nedenle polietilen ve silika camı gibi dielektrik malzemelere göre biraz daha yüksek dielektrik sabiti değerine sahiptirler. NaCl ve  $Al_2O_3$  iyonik bileşiklerinin dielektrik sabitleri  $\sim 6 - 10$  arasındadır. Dielektrik sabiti yüksek olan malzemelere örnek vermek gerekirse su ( $H_2O$ ,  $K \sim 80$ ) ve baryum titanat ( $BaTiO_3$ ,  $K \sim 1000$ ) en güzel örneklerden olmaktadır. Su ve baryum titanat gibi yüksek dielektrik sabitine sahip olan malzemelerde dipollerin dönmesi ve ferroelektrik faz dönüşümü gibi farklı polarizasyon mekanizmaları bulunmaktadır [Newnham, 2005]. Dielektrik malzemelerdeki polarizasyon mekanizmalarının dielektrik sabiti ve frekansa bağlı şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir.

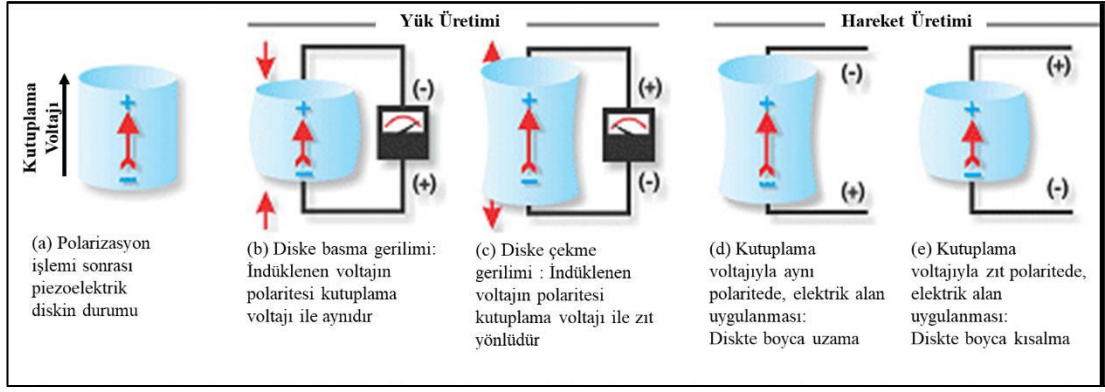


**Şekil 2.1:** Dielektrik malzemelerin frekansa bağlı polarizasyon mekanizmaları [Akça, 2010].

Dielektrik sabiti değerleri düşük frekanslarda yüksek frekanslara göre daha yüksek olmaktadır. Bu durumun nedeni düşük frekanslardaki polarizasyon mekanizmalarının malzemenin dielektrik sabitine etki pozitif yönde etki ettiği **Şekil 2.1**'den anlaşılmaktadır.

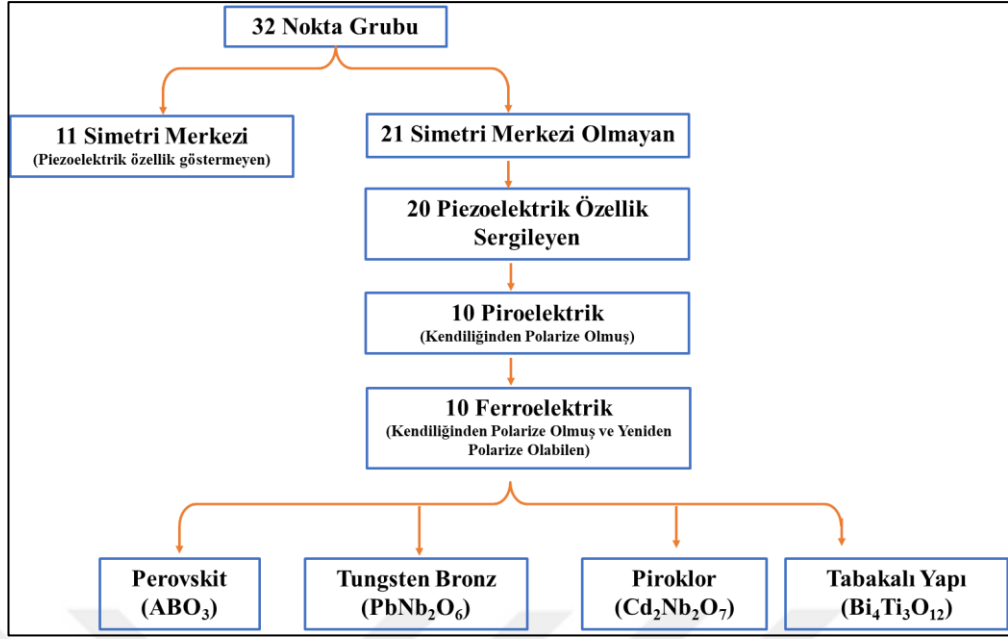
## 2.2. Piezoelektrik Özellik

Piezoelektrik özellik Pierre ve Jack Curie kardeşler tarafından 1880 yılında keşfedilmiştir. Curie kardeşlerin bazı malzemeler (Quartz, çinko sülfür, turmaline, vs.) üzerinde yaptıkları çalışmaların sonucunda üzerlerine basınç uygulanması sonucunda elektriksel yüklerin oluşabileceğini belirtmişlerdir. Piezoelektrik kelimesinin kökenine bakıldığında “Piezo” kelimesi Yunanca basınç anlamına gelmektedir ve bu yüzden piezoelektriklik uygulanan mekanik kuvvetin sonucunda üretilen elektrik anlamına gelmektedir [Heartling, 1999]. İki farklı tip piezoelektrik etki bulunmaktadır. Dışarıdan etki eden mekanik uyarılara (gerilme, basınç, ses, titreşim, vb.) bağlı olarak elektriksel yüklerin açığa çıkması “düz piezoelektrik” etki olarak tanımlanırken, uygulanan elektrik alan sonucunda malzemede mekanik bir tepkinin (şekil değişimi, titreşim, ses, vb) gerçekleşmesi ise “ters piezoelektrik” etki olarak tanımlanmaktadır [Newnham, 2005]. Piezoelektrik etkinin şematik gösterimi **Şekil 2.2**'de verilmiştir.



**Şekil 2.2:** Piezoelektrik özelliğin şematik olarak gösterimi [Kaya, 2018].

Piezoelektrik etkinin daha iyi anlaşılabilmesi için ilk önce malzemenin iç yapısı ile başlanılması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda bir tek kristalin iç yapısı dikkate alınmalıdır. Tek kristaller atomların sabit pozisyonlara yerleşerek ve belirli bir düzen içerisinde kendilerini tekrar etmeleri sonucunda oluşmaktadırlar. Kendilerini tekrar ettikleri en küçük yapıya ise birim hücre (latis) adı verilmektedir. Birim hücrenin kendisine özgü sahip olduğu simetri o kristalin piezoelektrik özellik gösterip göstermeyeceğini belirler. Neumann ilkelerine göre kristalin iç yapısının sahip olduğu simetri dış özelliklerinin simetrisini yansıtmaktadır [Heartling, 1999]. Başka bir şekilde ifade edilmek istenirse kristalin sahip olduğu fiziksel özellik simetrisi kristalin nokta grubu simetrisini de göstermesi gerekmektedir [Newnham, 2005]. Elementlerin simetrilerini belirtmek için kristalografaların simetri operatörlerini belirttikleri isimlendirmeler tercih edilmektedir. Bu notasyona göre (1) simetri merkezi, (2) eksen dönüşümü, (3) ayna düzlemleri ve (4) bahsedilmiş olan notasyonların kombinasyonu şeklinde 4 farklı şekilde sıralanmaktadır. Bütün kristaller 32 adet nokta grubuna ayrılmıştır. 32 adet nokta grubundan 21 tanesi simetri merkezini içermemektedir. Simetri merkezinin bulunmaması piezoelektrik etkinin oluşabilmesi için gerekli olan şartlardan bir tanesidir. Simetri merkezine sahip olmayan kristallerden 20 tanesinde piezoelektrik etki gözlemlenmektedir [Heartling, 1999]. 32 nokta grubunun sergilemiş olduğu davranışlar Şekil 2.3'te belirtilmiştir.



**Şekil 2.3:** Nokta grupları ve nokta gruplarına bağlı olarak sergilemiş oldukları fiziksel özellikler [Heartling, 1999].

Bütün dielektrik malzemeler elektrostriktif davranış sergilemektedir. Elektrostriktif malzemeye elektrik alan uygulanması sonucunda elektriksel yüklerin yer değiştirmesi sonucunda malzeme polarize olur ve bu polarizasyonun ve dipollerin oluşmasına bağlı olarak da malzemede bir deformasyon (şekil değişimi) meydana gelmektedir. Elektrik alanın karesi ile orantılı olan bu şekil değişimi elektrostriktif etki olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 2.5'e göre dielektriklerin bir alt sınıfı olan piezoelektrik malzemelerin tanımı ise bu alt bölümün başlangıç kısmında verilmiştir. Piezoelektrik etkinin yöne bağımlılığı ve simetriden nasıl etkilendiğini anlamak, koordinat sistemlerindeki dönüşümün piezoelektrik katsayılarının üzerindeki etkisini belirlemek önemlidir. Tensör notasyonu olarak piezoelektrik etki eşitlik 2.5 ile ifade edilmiştir.

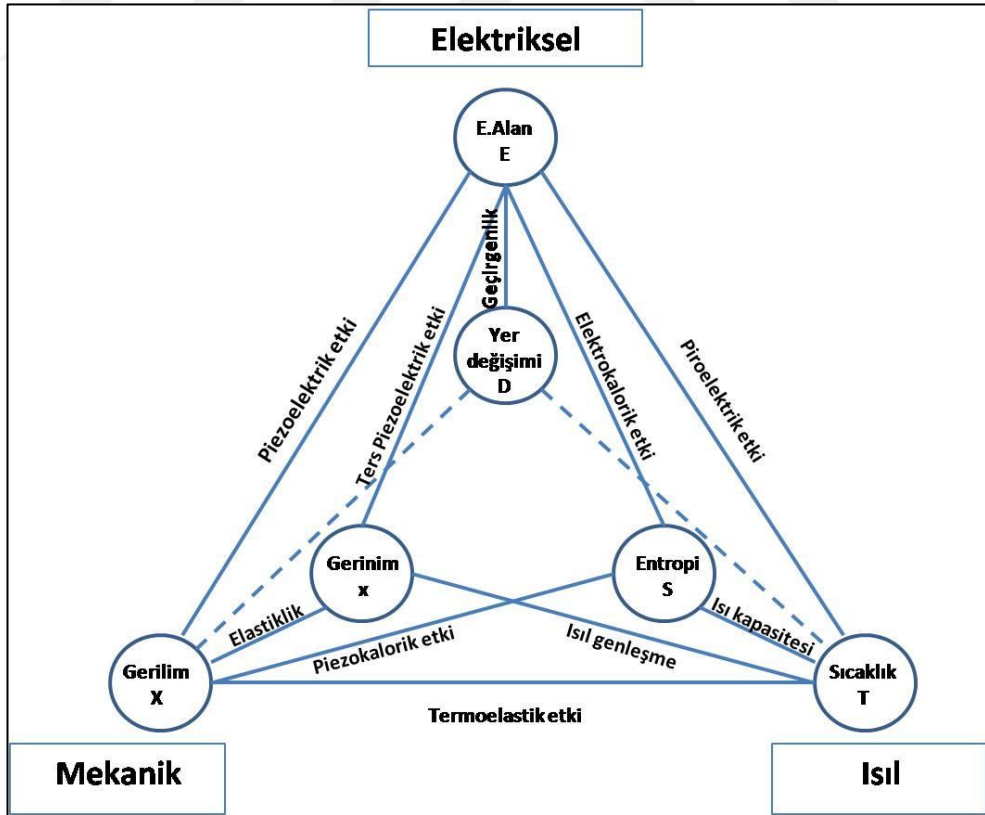
$$P_i = d_{ijk}X_{jk} \quad (2.5)$$

Eşitlikteki  $P_i$ , birinci derece tensör olan polarizasyonu ifade ederken  $X_{jk}$  ikinci dereceden tensör olan gerilmeyi ve  $d_{ijk}$  üçüncü dereceden olan piezoelektrik yük katsayısını ifade etmektedir. Eşitlik 2.5 düz piezoelektrik etkinin tensör notasyonunu göstermektedir. Ters piezoelektrik etki de aynı düz piezoelektrik etkide olduğu üzere tensör notasyonu olarak eşitlik 2.6'da gösterilmiştir.

$$\chi_{ij} = d_{ijk} E_k \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6'ya göre  $\chi$ , mekanik şekil değişimini tanımlamaktadır. Mekanik şekil değişimi aynı düz piezoelektrik etkinin tensör notasyonunda gösterilmiş olan mekanik gerilme gibi ikinci dereceden bir tensördür. E, elektrik alanı ifade ederken birinci dereceden bir tensördür. Sonuç olarak ters piezoelektrik etkinin de tensör notasyonunda piezoelektrik katsayının üçüncü dereceden bir tensör olduğu anlaşılmaktadır [Newnham, 2005].

Piezoelektrik malzemeler birçok uygulama alanına sahiptir. Bu uygulama alanları; piezoelektrik dönüştürücüler, algılayıcılar, eyleyiciler vs. şeklinde örneklenebilir [Shahinpoor, 2020]. Piezoelektrik özellik tanımlanırken elektriksel ve elastik özellikler arasında termodinamik ilişkilerden de bahsedilmesi gerekmektedir çünkü piezoelektrik malzemeler tersinir özelliğe sahiplerdir. Bu tersinir özellikleri en net şekilde belirten diyagrama Heckmann diyagramı adı verilmektedir. Heckmann diyagramı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Heckmann Diyagramı [Akça, 2010].

Heckmann diyagramına göre piezoelektrik etki ile elastik özellikler arasındaki ilişki şu şekilde olmaktadır.

$$D_i = d_{ijk}X_{jk} + \varepsilon_{ij}^T E_j \quad (2.7)$$

$$x_{ij} = d_{ijk}E_k + s_{ijkl}^E X_{kl} \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.7 ve 2.8’de belirtilen  $\varepsilon^T$ , sabit sıcaklık altındaki dielektrik sabitinin tensör formunu ve  $s_{ijkl}^E$ , elastik uyumun tensör formunu tanımlamaktadır.

### 2.3. Ferroelektrik Özellik

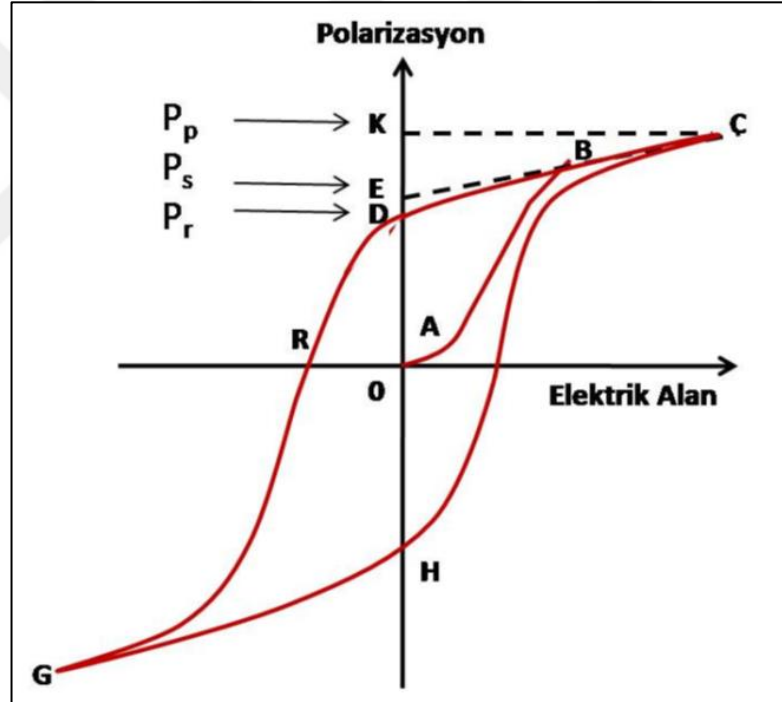
Ferroelektrik malzemeler aynı piroelektrik malzemelerde olduğu gibi kendiliğinden polarizasyona sahiplerdir fakat sahip oldukları kendiliğinden polarizasyon tersinirdir. Dolayısıyla ferroelektrik malzemeler genel tanım olarak; elektrik alan altında yeniden yönlendirilebilir kendiliğinden polarizasyona sahip malzemelerdir ve bu nedenle piroelektrik malzemelerin altında sınıflandırılmaktadır. Dolayısıyla ferroelektrik malzemeler hem piroelektrik etki hem de piezoelektrik etki göstermektedir. Ferroelektrik özelliğe sahip piroelektrik ve piezoelektrik malzemeler daha hassas özellikler göstermektedir. Bu yüzden birçok piroelektrik ve piezoelektrik cihazlar ferroelektrik malzemelerden yapılmaktadır. Ferroelektriklerin karakteristik özellikleri şu şekildedir [Vijaya, 2013].

- Ferroelektrik histerezis
- Kendiliğinden polarizasyon
- Tersinir polarizasyon
- Ferroelektrik geçiş sıcaklığı

Ferroelektriklerdeki polarizasyon ile uygulanan elektrik alan arasında doğrusal olmayan ilişki söz konusudur. Ferroelektriklik bazı fiziksel koşullarda yok olabilmektedir. Bu koşullardan en önemlisi sıcaklıktır. Ferroelektrikler belirli bir sıcaklığa kadar bu özelliklerini koruyabilirken bu sıcaklığın üstünde ise özelliklerini kaybetmektedir. Bahsedilmekte olan bu kritik sıcaklık Curie sıcaklığı olarak ifade edilmektedir. Curie sıcaklığı “ $T_c$ ” ile sembolize edilmektedir. Curie sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ferroelektrik özelliğini yitiren bir malzeme normal bir

dielektrik malzeme gibi davranış sergilemektedir. Fakat Curie sıcaklığının altında ve Curie sıcaklığına yakın sıcaklıklarda ise bir ferroelektrik malzeme çok yüksek dielektrik sabiti değerine sahip olmaktadır [Kao, 2004].

Ferroelektrik özelliğin tanımında bahsedilmiş olan kendiliğinden polarizasyon durumu irdelendiğinde; elektrik alan uygulanmadan önce malzemenin bünyesindeki dipol momentleri rastgele bir yönelime sahipken, elektrik alan uygulanınca tercihli bir şekilde elektrik alan doğrultusunda yönelen dipollerden bir kısmı elektrik alan kaldırıldıktan sonra da bu yönelimi korur ve ferroelektrik malzeme kalıntı bir polarizasyon ( $P_r$ ) sergiler. Ferroelektriklerin en temel tanımlayıcı özelliği polarizasyonun ( $P$ ) elektrik alana bağlı olarak değişiminde gözlenen histerisiz döngüsüdür. Standart bir ferroelektrik histerisiz eğrisi Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5: Ferroelektrik bir malzemenin histerisiz eğrisi [Akça, 2010].

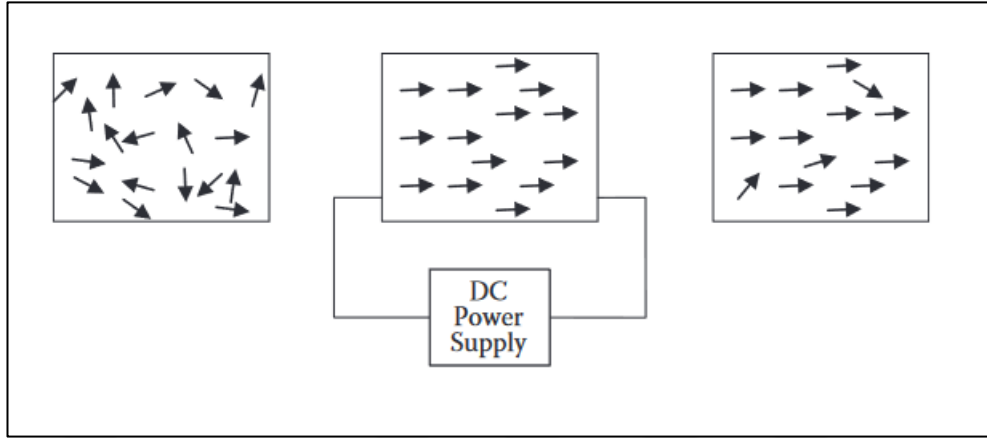
Şekildeki histerisiz döngüsü incelendiğinde düşük elektrik alan uygulanması sonucunda doğrusal bir artış gözlemlenmektedir (0 – A aralığı). Doğrusal artış, uygulanan elektrik alanın şiddetinin düşük olmasından ve domainlerin yönelmesini sağlayamadığından, doğrusal dielektrik malzemelerde gözlenen ve elektrik alan uygulanmasından kaynaklanan standart davranıştır. Elektrik alan şiddeti arttırıldığında domainlerin yönelmesinin sonucunda polarizasyonun doğrusallıktan uzaklaştığı

görülmektedir (A-B aralığı). Malzemeye uygulanan elektrik alan şiddetinin daha da artırılmasının sonucunda domainlerin elektrik alan doğrultusunda yönlenmeleri de artış gösterecektir ve bu artış doyum noktasına kadar devam edecektir (B-C kısmı). Bu noktadan itibaren elektrik alan şiddetinin azalması sonucunda polarizasyon geldiği yolu izlememektedir. Histerisiz eğrisinde elektrik alanın sıfıra indirilmesi sonrasında kendiliğinden polarizasyonun elektrik alan altında sahip olduğu tercihli yönlenmeyi kısmen korumasından kaynaklı bir kalıntı polarizasyon gözlenmektedir. Elektrik alan negatif yönde arttırılmaya başlandığında ise polarizasyon sıfıra doğru inmeye başlamaktadır. Polarizasyon değerinin sıfır olduğu değere Zorlayıcı Elektrik Alan ( $E_c$ ) adı verilmektedir ve bu noktanın ötesinde elektrik alan şiddeti negatif yönde arttırılmaya devam edildiğinde pozitif elektrik alan uygulanması sonucunda oluşan dipol yönlenmesi kaybolmaya ve dipollerin ters yönde dönmeye bağlı olarak gerçekleşen domain dönüşü sonucu yeni polarizasyon negatif yönde oluşmaya başlayacaktır. Elektrik alan şiddetinin pozitif ve negatif yönde çevrim halinde uygulanması sonucunda ise histerisiz eğrisi tamamlanacaktır [Kao, 2004].

Ferroelektrik malzemelerdeki önemli olgulardan bir tanesi de kutuplama işlemidir. Kutuplama işlemi kendiliğinden polarizasyona sahip malzemeye yüksek şiddetlerdeki bir DC elektrik alan uygulanması sonucunda kendiliğinden polarizasyonun kalıcı polarizasyon haline gelmesi durumudur. Ferroelektrik malzemenin kutuplanma işlemi sırasında malzemenin sıcaklığı arttırılıp faz geçiş sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta sabit tutulması sonucunda kutuplama işleminin etkisi artmaktadır. Ferroelektrik bir malzemenin kutuplama işlemi şu şekilde gerçekleştirilmektedir.

1. Ferroelektrik malzeme ferroelektrik faz geçişi sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır.
2. Sıcaklığı arttırılmış ferroelektrik malzemeye yüksek şiddetteki elektrik alan bütün domainlerin elektrik alan doğrultusunda yönlenmesine kadar uygulanır ve ferroelektrik malzeme doyunluğa ulaştırılır.
3. Malzeme elektrik alan kesilmeden oda sıcaklığına kadar soğutulur ve bunun sonucunda elektrik alan doğrultusunda yönlenmiş olan domainler kararlı hale getirilir.
4. Son olarak malzemeye uygulanan elektrik alan kaldırılır ve malzeme maksimum polarizasyon durumuna geçirilmiş olur.

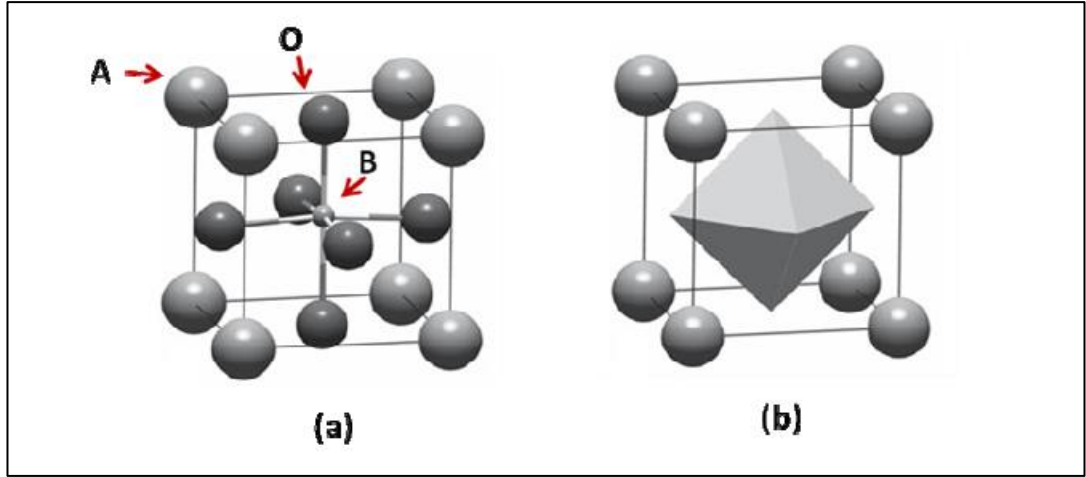
Ferroelektrik bir malzemeye ait kutuplama işlemi **Şekil 2.6**'da verilmiştir [Vijaya,2013].



**Şekil 2.6:** Ferroelektrik bir malzemenin kutuplanma işlemi [Vijaya, 2013].

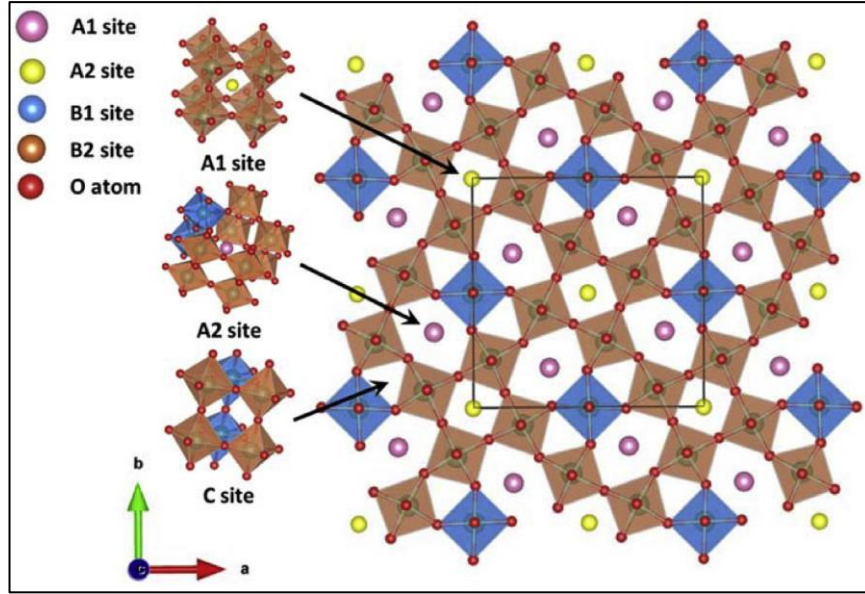
## 2.4. Tungsten Bronz Kristal Yapısı

BaTiO<sub>3</sub> bileşiğinin sergilemiş olduğu doğrusal olmayan dielektrik özelliklerinin yapılan araştırmalar sonucunda keşfedilmesi ile bu doğrusal olmayan ilişkilerden biri olan ferroelektrik özellik bilim insanlarının ilgisini çekmiştir. Bu yüzden bilim insanları BaTiO<sub>3</sub> ile aynı kristal yapıya sahip olan veya farklı kristal yapılarda olan birçok bileşiğin dielektrik, piezoelektrik ve ferroelektrik özellikleri cihaz uygulamaları için inceleyen birçok çalışma yapmışlardır [Parida, 2012]. 20. Yüzyılın ortalarına gelindiğinde ise Goodman tarafından kurşun esaslı Tungsten Bronz (TB) kristal yapısına sahip kurşun niyobat'ın (PbNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) ferroelektrik davranış sergilediği literatüre kazandırılmıştır [Goodman, 1953]. TB kristal yapısı, ferroelektrik özellik sergileyen BT'nin kristal yapısı olan perovskit yapıya göre çok daha karmaşıktır. Perovskit yapının genel olarak gösterimi ABO<sub>3</sub> şeklindedir. Perovskit yapıdaki A ve B ile gösterilen elementler katyonlar olup, perovskit kristal yapı içerisinde köşelere ve kristal yapının merkezine yerleşmektedirler [Bhalla vd., 2000].



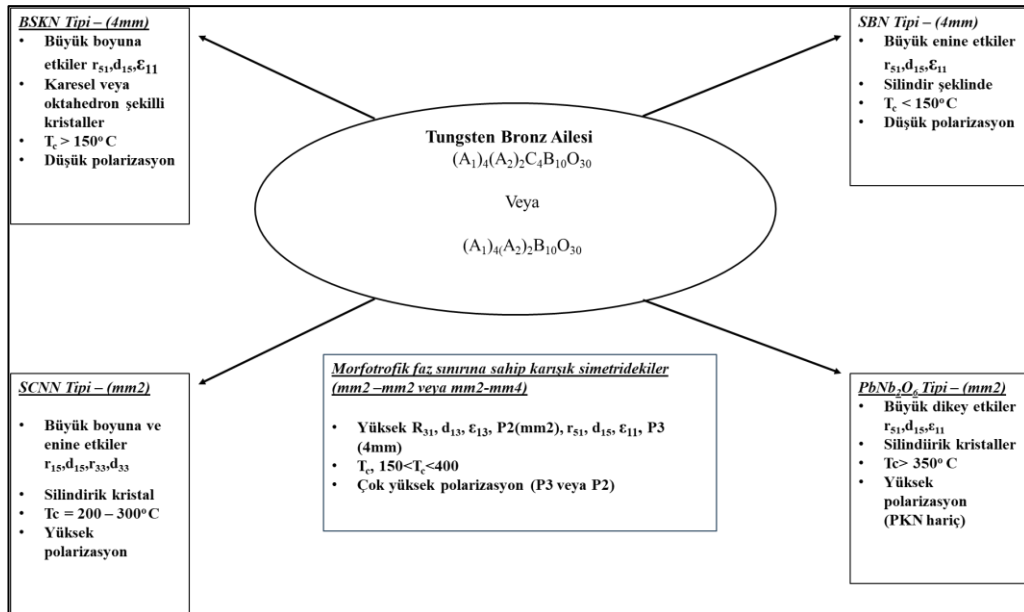
**Şekil 2.7:** Perovskit yapının üç boyuttaki gösterimi.

TB kristal yapısı ise  $(A_1)_4(A_2)_2C_4B_{10}O_{30}$  genel formülü ile gösterilir. TB kristal yapısının kimyasal formülünde belirtilmiş olan A, B ve C harfleri katyon bölgelerini temsil etmektedir. Bu katyon bölgeleri birbirlerinden farklı koordinasyonlara sahiptirler.  $A_1$  katyonları 12'li,  $A_2$  katyonları 15'li, C katyonları 9'lu ve B katyonları ise iki farklı 6'lı koordinasyonlarına sahiptir. A ile gösterilmiş katyon bölgelerine genellikle +1 değerlikli potasyum (K), sodyum (Na) gibi katyonlar, +2 değerlikli olarak stronsiyum (Sr) veya +3 değerlikli olarak lantanum (La) gibi katyonlar yerleşmektedir. B konumlarında ise A konumlarına yerleşen katyonlara göre daha yüksek değerlik sayısına sahip niyobyum (Nb), tantalum (Ta), tungsten (W), titanyum (Ti) gibi katyonlar yerleşmektedir. C bölgesi ise bileşiğe göre boş kalabilir veya lityum (Li) gibi küçük iyonlar yerleşmektedir [Neurgaonkar vd, 1994].



Şekil 2.8: TTB kristal yapısının üç boyuttaki gösterimi [Chen vd., 2022].

TTB kristal yapısına sahip kristaller 4/mmm nokta grubu simetrisi göstermektedir. Ferroelektrik faz geçişi durumlarında 4/mmm simetri grubu 4mm (tetragonal-tetragonal geçişi) veya 4/mmm simetri grubundan mm2 (tetragonal-ortorombik) simetri grubuna dönüşümler gerçekleşmektedir. TB yapısında büyüme gösteren tek kristal malzemeler optik ve ferroelektrik özellikleri dikkate alındığında dört alt grubu ayrılmaktadır [Neurgaonkar vd., 1993].



Şekil 2.9: Tungsten bronz ailesinin sınıflandırılması [Neurgaonkar vd., 1994].

Tetragonal 4mm simetri grubunda kristalleşen  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ ,  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ba}_6\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$  gibi bileşiklerin kutuplama doğrultusu  $\langle 001 \rangle$  ile gösterilmektedir. Belirtilen simetri ve kutuplama doğrultusuna sahip malzemelerin genel olarak dielektrik, elektro-optik ve piezoelektrik özellikler açısından yüksek özellik göstermektedirler. Ayrıca bu malzemelerin Curie sıcaklıkları (Curie Temperature,  $T_c$ )  $150^\circ\text{C}$ 'ye yakın veya daha düşük sıcaklıklardır.

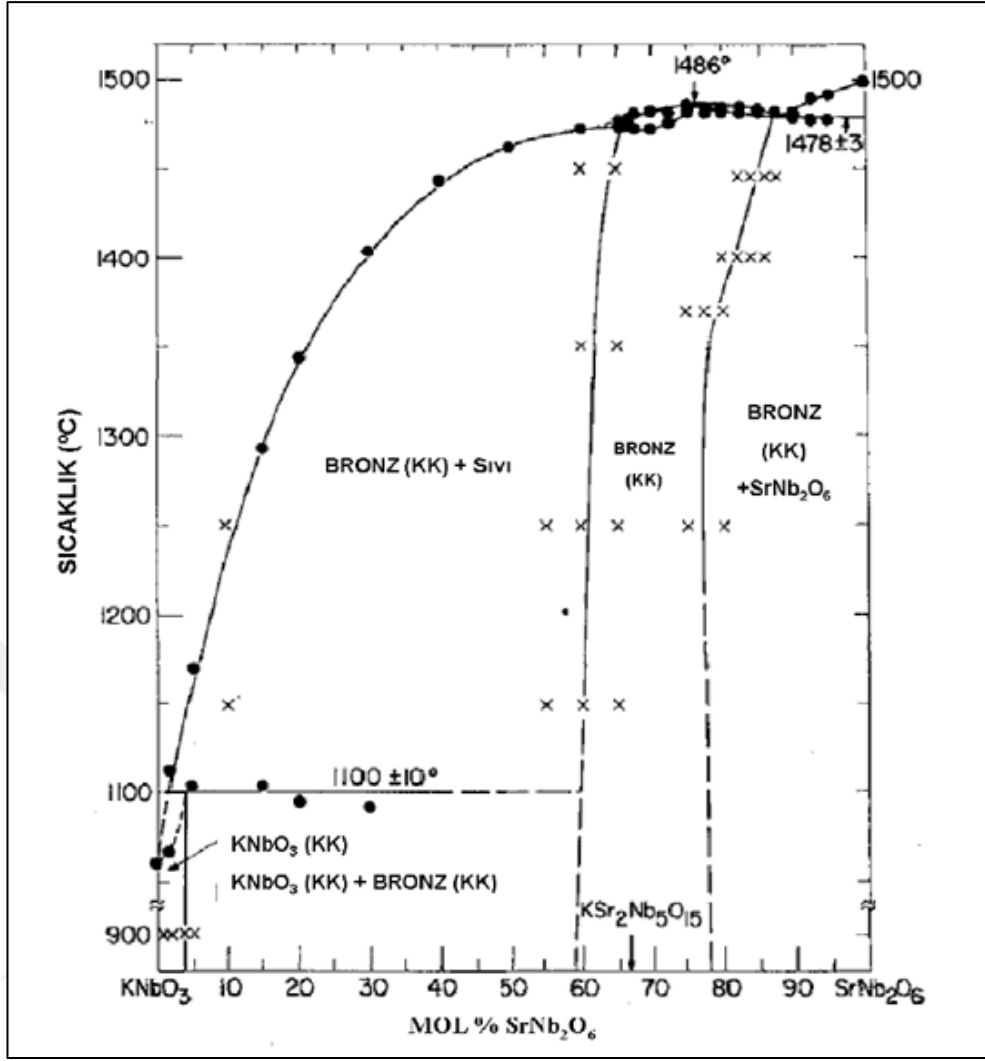
$\text{Ba}_{2-x}\text{Sr}_x\text{K}_{1-y}\text{Na}_y\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ ,  $\text{K}_3\text{Li}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  gibi bileşikler de aynı  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ ,  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ba}_6\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$  bileşikler ile aynı simetri grubu ve kutuplama doğrultusuna sahiplerdir.  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ ,  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ba}_6\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$  göre bazı fiziksel özellikler bakımından farklılıklar gösterirler.

Bir başka TB kristal yapısına sahip bileşik ise mm2 ortorombik nokta grubu simetrisine sahip  $\text{Sr}_{2-x}\text{Ca}_x\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  bileşiği ve türevleridir. Bu bileşiklerde  $\langle 001 \rangle$  kutuplama doğrultusuna sahiplerdir.  $R_{15}$ ,  $r_{33}$ ,  $d_{15}$  ve  $d_{33}$  gibi özellikleri göstermektedirler. Bu bileşikler silindirik şekle sahipken Curie sıcaklıkları  $200 - 300^\circ\text{C}$  olarak değişmekle beraber yüksek polarizasyon değerlerine sahiplerdir.

Başka bir TB kristal grubu ise kurşunlu bileşikler olan  $\text{Pb}_2\text{KNb}_5\text{O}_{15}$ ,  $\text{Pb}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$  bileşiklerdir. Bu bileşikler de ortorombik mm2 nokta grubu simetrisine sahiplerdir. Diğer TB kristal ailesinden farklı olarak bu grup içerisindeki bileşikler  $\langle 001 \rangle$  ve  $\langle 010 \rangle$  gibi birden fazla kutuplama doğrultusuna sahiplerdir. Bu bileşiklerin  $r_{51}$ ,  $K_{11}$ ,  $d_{15}$  ve  $d_{33}$  gibi fiziksel, dielektrik ve piezoelektrik özelliklere sahiplerdir. Bu bileşiklerin Curie sıcaklıkları  $350^\circ\text{C}$  üzerinde ve polarizasyon değerleri ise yüksektir.

Bu tez çalışması kapsamında ( $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ - KSN) bileşiği tercih edilmiştir. Bu bileşiğin tercih edilmesinde polar eksenlerinin  $[001]$  doğrultusunda olması ve iki adet polarizasyon yönü olmasının sonucunda anizotropiye bağlı olarak yüksek ferroelektrik ve piezoelektrik özellik sergilemesinden kaynaklıdır [Neurgaonkar 1994], [Duran 2006]. TTB kristal yapısına sahip potasyum stronsiyum niyobat bileşiği ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilmiştir. KSN bileşiği potasyum niyobat ( $\text{KNbO}_3$ ) ve stronsiyum niyobat ( $\text{SrNb}_2\text{O}_6$ ) katı çözeltilisinden oluşmaktadır. KSN'nin kristal yapısındaki A1 bölgesine  $\text{Sr}^{+2}$  iyonları yerleşirken A2 bölgelerine ise eşit miktarlardaki  $\text{K}^+$  ve  $\text{Sr}^{+2}$  iyonları yerleşmektedir. TB kristal yapısındaki KSN seramiğinin birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir. KSN'nin elektriksel özellikleri  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$  ile benzer özellikler sergilemektedir [Chen vd., 2019],

[Tribotte vd., 1999], [Bourfrou vd., 1991], [Giess vd., 1967]. Elektro-optik performans açısından ise lityum niyobat ( $\text{LiNbO}_3$ )'tan yedi kat daha fazladır. Aynı zamanda yüksek dielektrik sabitine sahip olmasından kaynaklı sıcaklık kompanse kapasitörler ve osilatörler için uygun bir aday haline gelmektedir.  $\text{KNbO}_3$ - $\text{SrNb}_2\text{O}_6$  katı çözeltisinin ikili faz diyagramı **Şekil 2.10**'da verilmiştir.  $\text{KNbO}_3$ - $\text{SrNb}_2\text{O}_6$  katı çözeltisinin faz diyagramına göre TB kristal yapısındaki katı çözeltiler  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığı için molce %59  $\text{SrNb}_2\text{O}_6$  içeriğine sahipken sıcaklığın  $1478\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılması ile molce %87 civarında  $\text{SrNb}_2\text{O}_6$ 'ya kadar artmaktadır. Katı çözeltideki  $\text{SrNb}_2\text{O}_6$  miktarı molce %67'den daha az olduğu için  $\text{K}^+$  ve  $\text{Sr}^{+2}$  iyonları daha büyük olan  $\text{A}_2$  bölgelerine yerleşmektedir. Aynı zamanda  $\text{Sr}^{+2}$  iyonları kristal yapıdaki  $\text{A}_1$  konumlarına da yerleşmektedir. Fakat  $\text{K}^+$  iyonunun atomik çapı  $\text{A}_1$  atomik bölgesinin çapından daha büyüktür.  $\text{A}_1$  konumuna yerleşecek olan  $\text{Sr}^{+2}$  iyonu bu atomik bölgeye zorlanarak yerleşecektir ve bu durumun sonucunda KSN fazının elde edilebilmesi veya oluşabilmesi için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır [Dursun, 2010], [Wei vd., 2008], [Scott vd., 1970].



Şekil 2.10:  $\text{KNbO}_3 - \text{SrNb}_2\text{O}_6$ 'ya ait faz diyagramı [Neurgaonkar vd., 1994].

Tungsten bronz kristal yapısındaki kristallerin  $T_c$ , piezoelektrik yük katsayısı ve göreceli dielektrik sabitlerine ait özellikleri **Tablo 2.1**'de verilmiştir.

**Tablo 2.1:** Tungsten bronz yapısındaki kristaller [Neurgaonkar, 1994].

| Kompozisyon                                                                  | Tc  | Piezoelektrik katsayı (pC/N) | $\epsilon_r$                   |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------|--------------------------------|
| $\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN75)              | 56  | $d_{33}=670$                 | $K_{33}=3000$                  |
| $\text{Sr}_{0.60}\text{Ba}_{0.40}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN60)              | 75  | $d_{33}=180$                 | $K_{33}=1000$                  |
| $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN50)                | 128 | $d_{33}=110$                 | $K_{33}=450$                   |
| $\text{Ba}_{2-x}\text{Sr}_x\text{K}_{1-y}\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ (BSKNN-1) | 209 | $d_{33}=80$                  | $K_{11}=370$                   |
| $\text{Ba}_{2-x}\text{Sr}_x\text{K}_{1-y}\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ (BSKNN-2) | 178 | $d_{33}=80$<br>$d_{15}=200$  | $K_{11}=690$<br>$K_{33}=190$   |
| $\text{Ba}_{2-x}\text{Sr}_x\text{K}_{1-y}\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ (BSKNN-3) | 180 | $d_{15}=93$                  | $K_{11}=750$                   |
| $\text{Sr}_{2-x}\text{Ca}_x\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (SCNN)                | 270 | $d_{33}=270$<br>$d_{15}=248$ | $K_{33}=1740$<br>$K_{11}=1700$ |
| $\text{Pb}_{0.60}\text{Ba}_{0.40}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (PBN60)              | 300 | $d_{15}=300$                 | $K_{33}=1900$                  |
| $\text{K}_3\text{Li}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ (KLN)                        | 405 | $d_{15}=147$                 | $K_{11}=350$                   |
| $\text{Sr}_2\text{KNb}_5\text{O}_{15}$ (SKN)                                 | 157 | $d_{33}=95$                  | $K_{33}=1100$                  |
| $(\text{Ba},\text{Sr})_6\text{Ti}_2\text{Nb}_8\text{O}_{30}$ (BSTN)          | 114 | $d_{33}=125$                 | $K_{33}=345$                   |
| $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (BNN)                                | 560 | $d_{33}=20$<br>$d_{15}=45$   | $K_{33}=47$<br>$K_{11}=240$    |

## 2.5. Ergiyik Tuz Sentezi

Ergiyik tuz sentezi yöntemi seramik toz üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile kullanılan tuzun sıvı faz oluşturma ile karmaşık yapıdaki seramik oksitler ve karbonatlar gibi bileşenleri kullanarak seramik toz sentezlemek mümkün hale gelmektedir. Seramik tozları katı, sıvı ve gaz fazlarından çeşitli yöntemler kullanılarak üretilmektedir [Rahaman, 2003]. Yüksek miktarlardaki ticari seramik ürünleri genellikle katı fazdan geleneksel katı hal tepkime toz sentez yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Ergiyik tuz sentezi yöntemi ise geleneksel toz metalurjisi yönteminin bir modifikasyonudur. Bu üretim yönteminde kullanılan tuz reaksiyona girecek olan başlangıç tozlarına eklenerek tuzun ergime sıcaklığına kadar ısıtılmaya başlanır ve tuz sıvı faza geçerek çözücü olarak davranış sergilemektedir. Ergimiş haldeki tuzlar uzun zamandan beri katı hal reaksiyonlarının hızını arttırmak amacı ile katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Kullanılacak olan tuzun miktarı genellikle toplam ağırlığın yüzde küçük bir miktarı kadardır. Öte yandan ergiyik tuz sentezi yönteminde ise ürün olarak kullanılacak olan tozların özelliklerini (boyut, şekil vs.) kontrol edebilmek amacı ile yüksek miktarlarda tuz kullanılmaktadır. Bu bağlamda bu yöntemde kullanılan tuzun amacı reaksiyon hızını arttırmak amacıyla katkı maddesi olarak kullanılan tuzdan farklıdır. Ergiyik tuz sentezi yönteminde kullanılan tuzlara örnek olarak genellikle

klorür ve sülfatlar gösterilmektedir. Genellikle ergiyik tuz sentezi yönteminde kullanılan tuzların ötektik karışımları tercih edilmektedir. Bu durumun temel sebebi sıvı oluşması için gerekli olan sıcaklığın ötektik kompozisyonlarda daha düşük olmasıdır. NaCl ve KCl tuzlarının ergime noktaları sırası ile 801° C ile 770° C arasında bulunmaktadır. 0.5NaCl ve 0.5KCl tuz karışımının ise ergime sıcaklığı 650° C'dir. Örnek vermek gerekirse 0.635Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–0.365Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sülfatlar dikkate alındığında en çok kullanılan sülfat tuzudur. Bunun en temel sebebi ergime sıcaklığının 594° C olmasıdır. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tuzunun ergime sıcaklığı ise 823° C'dir. Birçok durumda reaksiyonun meydana gelebilmesi için ortamda katı partiküllerin bulunması gerekmektedir. Bu yüzden ergiyik haldeki tuz tepkimeye giren tüm parçacıkları çözen ve ürün olarak oluşacak parçacıkların homojen sıvı bir fazdan çökeldiği sıradan çözücülerden farklıdır. Karmaşık parçacıkların ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilmesinde şu adımlar izlenmektedir. Reaksiyona girecek olan tozlar ile tuz karışımı tuzun ergime sıcaklığına kadar ısıtılır. Ergime sıcaklığına kadar ısıtılan tuz sıvı faza geçer ve ürün olarak kullanılacak parçacıklar oluşmaya başlar. Ürün olarak elde edilmek isten parçacıkların karakteristik özelliklerinin kontrol edilmesi seçilen sıcaklığa ve ısıtma zamanına bağlıdır. Isıl işlemi tamamlanmış olan tuz ve toz karışımı oda sıcaklığına kadar soğutulur ve uygun bir çözücü (genellikle su) ile yıkanarak tuzun karışımdan ayrıştırılması sağlanmaktadır. Karışımın yıkama işlemi sonrasında kompleks oksit tozu kurutulma işlemi ile elde edilmektedir. İşlem, geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle aynıdır ve büyük miktarda malzemenin üretimi için kolaylıkla ölçeklendirilebilir. Ergiyik tuz sentezi yöntemi tek kristal parçacıkların çözeltiden büyütülmesi için en sık kullanılan yöntemdir [Scheell, 1975]. Bu yöntem ile reaksiyona giren maddeler tamamen çözünerek homojen sıvı elde edilir. Soğutma işlemi sırasında katı parçacıklar homojen olarak çekirdeklenmeye başlamaktadırlar. Soğutma işlemi sırasında oluşacak olan çekirdeklerin sayısının sınırlandırılması ile büyük boyutu tek kristaller üretilmektedir. Bu yüzden reaksiyona giren başlangıç malzemelerinin çözünürlüğünün yüksek olduğu bir tuza ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumun yanı sıra birkaç mikrondan on mikrona kadar parçacık boyutuna sahip olan ürünlerin elde edilebilmesi için çekirdek sayısının fazla olması gerekmektedir. Reaksiyona giren parçacıkların çekirdeklenmeleri tepkimeye giren parçacıklarının yüzeylerinde gerçekleşir. Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse ürün parçacıkları tepkimeye giren parçacıkların yüzeylerinde heterojen olarak çekirdeklenir. Bu yüzden reaksiyona giren tüm katkı maddelerinin yüksek çözünürlüğe sahip olmaları

gerekmektedir. Bu yöntemde tek kristal büyütülmek istendiğinde soğutma hızı çok önemli bir rol üstlenmektedir. Çünkü soğutma hızı üretilmek istenen tek kristal için çekirdeklenme sayısını ve tek kristalin boyutunu belirlemektedir. Bu işlemde ergiyik tuzun amacını maddeler halinde sıralamak gerekirse;

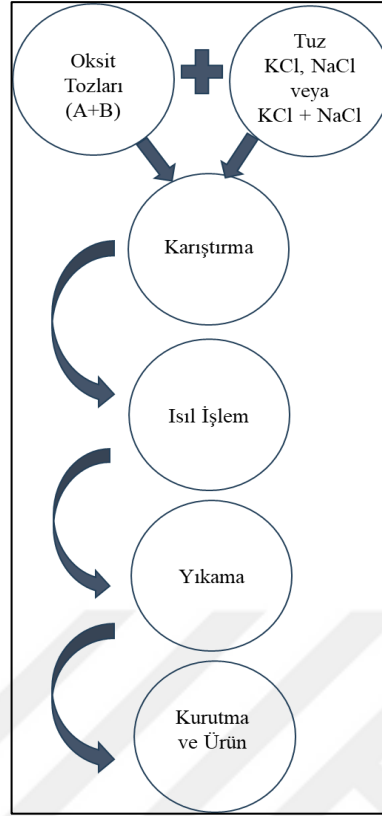
1. Reaksiyon hızını arttırırken aynı zamanda reaksiyon sıcaklığını düşürmektedir.
2. Homojenlik seviyesini arttırır (katı çözeltideki bileşenlerin dağılımı)
3. Parçacık boyutunun kontrolü
4. Parçacık şekli ve topaklanmanın kontrolü

şeklindedir. Bu işlemin tercih edilmesinin temel amaçları ise

1. Sinterleme işlemi için toz üretimi
2. Anizometrik parçacıkların üretimi

şeklindedir.

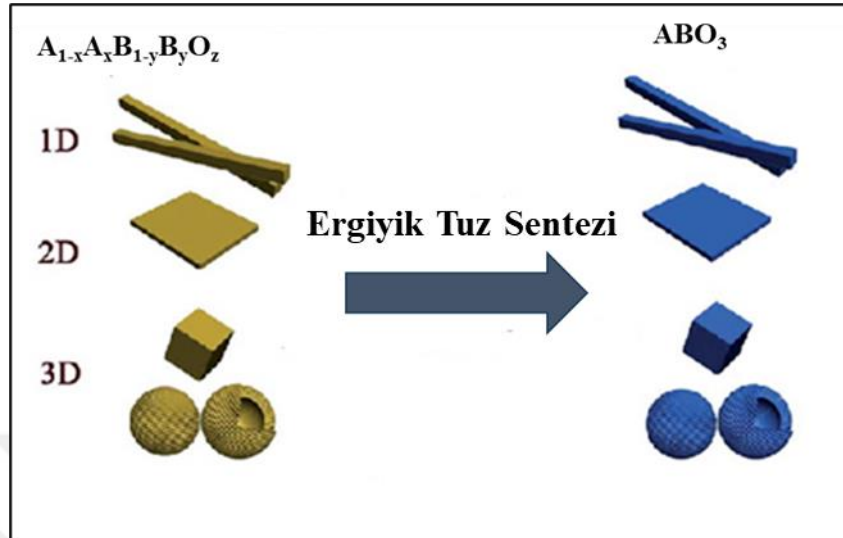
Sinterleme işleminin ideal bir şekilde gerçekleşmesi için mikron altı tanelere ve düşük topaklanma gerekmektedir [Rahaman, 2003]. Ergiyik tuz sentezi yönteminde kullanılacak olan tuzun bazı özelliklere sahip olması gereklidir. Öncelikle tuz kararlılığını (stabilite) korumalıdır, kolay bulunabilir, su ile kolayca çözünebilir olmalıdır. Genellikle ergime sıcaklığı düşük tuzlar, ötektik kompozisyonlar ve likidüs sıcaklığının en düşük olduğu kompozisyonlar tercih edilmektedir. Diğer gereksinimler ise ısı işlemin gerçekleşeceği sıcaklıklarda düşük buhar basıncına sahip olmalıdır, reaksiyona giren başlangıç tozları veya ürün olarak reaksiyon sonucunda oluşacak tozlarla herhangi bir şekilde reaksiyona girmemelidir [Sikalidis, 2011]. Örnek vermek gerekirse  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$  üretimi için tercih edilen  $\text{LiCl}$  tuzu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (demir oksit) ile  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (lityum karbonat) arasındaki reaksiyonu hızlandırarak  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$  üretilmesine yardımcı olurken reaksiyonun gerçekleştiği sıcaklıkta hem nem tutucu hem de uçucu hale gelmektedir. Ayrıca hidrolize uğrayarak  $\text{Li}_2\text{O}$ 'ya dönüşür ve bu bileşik  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$  ile reaksiyona girerek  $\text{LiFeO}_2$  bileşiğinin oluşmasına neden olur. Ergiyik tuz sentezine ait akış diyagramı Şekil 2.11'de verilmiştir.



**Şekil 2.11:** Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile seramik toz üretimine atı akış diyagramı.

**Şekil 2.11**'e göre reaksiyona girecek olan oksit tozları stokiyometriktir. Örnek olarak 1 mol  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 'nin üretilmesi için 2 mol  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ile 3 mol  $\text{TiO}_2$  gerekmektedir. Reaksiyonun gerçekleşmesini sağlayacak olan tuzun miktarı ise genellikle reaksiyona girecek olan oksit tozlarının toplam ağırlığının %80 – 120'si arasında değişkenlik gösterir. Tuz miktarı bazı sistemlerde ürünlerin parçacık boyutu üzerinde ciddi etkilere sahiptir [Yoon vd., 1998]. Tuzun miktarı az gelirse sıvı fazın ürünlerin oluşmasındaki etkinliği azalmaktadır, aynı zamanda gereğinden fazla tuz eklendiği durumlarda ise oksit tozlarının tuz içerisindeki ayrışması ve reaksiyon hızının azalması olarak iki problem meydana gelmektedir. Isıl işlem aşamasında ise genellikle platin, zirkonya veya alüminadan yapılmış potlar içerisinde potların ağzı kapalı olacak şekilde gerçekleştirilir. Isıl işlem sıcaklığı ürün olarak elde edilmek isten tozun karakteristiğine göre belirlenmektedir. Isıl işlem sıcaklığı genel olarak 800 °C – 1000 °C ve ısıtma süresi de 30 dakika – 60 dakika arasında seçilmektedir. Isıl işlem sırasında partiküllerin oluşması iki aşamada gerçekleşir. Ürünü oluşturacak olan parçacıkların ergimiş tuz içerisinde ayrışması ve partiküllerin büyümesi şeklindedir. Isıl işlem süresi sona erdikten sonra tuzun giderilmesi işlemi yapıldıktan sonra son ürün olarak istenilen toz elde edilir [Kimura, 2011].

Bu yöntem ile farklı morfolojideki parçacıkların üretiminin gerçekleştiğinden daha önce bahsedilmiştir. Bu morfolojilere ait birkaç örnek Şekil 2.12’de verilmiştir.

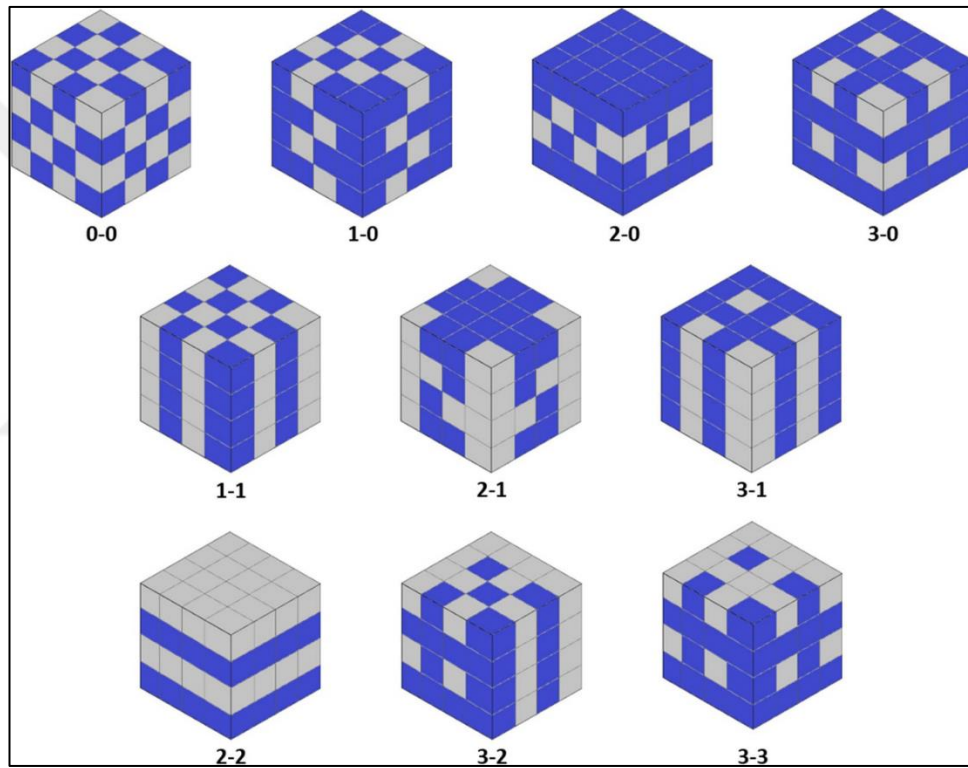


Şekil 2.12: Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilebilen seramik tozlarının morfolojileri [Li vd., 2016].

## 2.6. Piezokompozitler

Piezoelektrik özellik gösteren malzemeler genel olarak seramik, polimer ve kompozit olmak üzere üç şekilde sınıflandırılmaktadır [Eltouby vd., 2019]. Piezoelektrik malzemelerin (polimer, seramik ve kompozit) birbirlerinden farklı özelliklere sahip olmaları farklı uygulama alanları için bu malzemeleri daha uygun hale getirmektedir. Örnek olarak kurşun zirkonat titanat (PZT) seramiği yüksek dielektrik sabiti, yüksek piezoelektrik gerinim katsayısı, yüksek Curie sıcaklığı, düşük piezoelektrik voltaj katsayısı ve düşük dielektrik kayıp gibi özelliklere sahiptir. Aynı zamanda su ve insan dokusu ile uyumsuz olan yüksek akustik empedansa da sahiptir ve yüksek yoğunluk ve sertlik gibi özelliklere sahip olmalarının sonucunda kırılgenlardır. Yüksek akustik empendas ve düşük esneklikten dolayı uygulama alanları kısıtlanmaktadır [Newnham vd., 1978], [Gehring vd., 2001], [Zhang vd., 2001], [Mao vd., 2010], [Wada vd., 2003]. Diğer yandan polimer malzemelerden PVDF (polivinildin florür), PVC (polivinil klorür), PU (poliüretan) gibi malzemeler düşük piezoelektrik özellik sergilemektelerdir. Polimer malzemeler düşük dielektrik sabiti, düşük piezoelektrik gerinim katsayısı, yüksek piezoelektrik voltaj katsayısı, düşük akustik empedans ve yüksek esneklik gibi özelliklere sahiptirler. Piezoelektrik seramikler ve polimerlerin

kendilerine özgü dezavantajlarını elimine etmek amacı ile piezoelektrik seramikler ve polimerlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler farklı özelliklerdeki cihaz uygulamalarında tercih edilmeye başlanmıştır [Sampathkumar vd., 2013]. Piezoelektrik kompozit malzemeler veya kısaca piezokompozitler sınıflandırılırken bağlanabilirliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bağlanabilirlik kavramı Newnham vd. geliştirilmiştir. Piezokompozitler için 10 farklı bağlanabilirlik durumu söz konusudur. Bağlanabilirlik 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 1-3, 2-2, 2-3 ve 3-3 şeklindedir [Newnham vd., 1978]. Piezoelektrik kompozitlerin bağlanabilirlikleri şematik olarak Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13: Piezoelektrik kompozitlerin üç boyuttaki bağlanabilirlikleri [Habib vd., 2022].

Piezokompozitlerin bağlanabilirlikleri için kullanılan ikili notasyonlarda verilen ilk rakam aktif olarak kullanılacak piezoelektrik fazı belirtirken ikinci olarak verilen rakam ise pasif fazı ifade etmektedir. Ayrıca 1,2,3 şeklindeki belirtilmiş olan rakamlar her bir fazın üç boyuttaki sürekliliğini ifade etmektedir [Jain, 2015]. Literatürde piezokompozitlerin üretiminde kesme doldurma, enjeksiyon kalıplama, kayıp kalıplama (lost mold), şerit laminasyon, kopyalama (relic veya replika) üretimi ve dielektroforesis gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır [Jain, 2015]. Piezokompozit

malzemeler üzerindeki çalışmalar genellikle üretimi daha basit ve kolay olan 0-3, 1-3, 2-2, 3-3 bağlanabilirliğindeki piezokompozitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. [Sampathkumar vd., 2013].

Piezokompozit malzemelerin tercih edilmesinin temelinde kütleli şekilde üretilen seramikler ile polimer malzemelerin dezavantajlarının ortadan kaldırılması olduğundan daha önce bahsedilmiştir. Piezoelektrik malzemelerin cihaz uygulamaları kapsamında bazı önemli parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerden bazıları piezoelektrik yük katsayısı (d) ve piezoelektrik voltaj katsayısı (g)'dır veya bir diğer adıyla mükemmellik katsayısı (Figure of Merit - FOM) diye ifade edilmektedir. 0-3 bağlanabilirliğe sahip olan piezokompozitler genel olarak üç boyutta bağlanan polimer fazın içerisine piezoelektrik parçacıkların birbirleri ile temas etmeyecek şekilde dağıtılması ile oluşturulmaktadır. Bu tip kompozitlerin dielektrik sabiti, piezoelektrik yük katsayıları ve piezoelektrik voltaj katsayılarının teorik olarak hesaplanmaları için farklı modeller veya analitik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller piezokompozitlerin dolgu malzemesi olarak kullanılan partiküllerin morfolojilerine göre değişiklik göstermektedir. 0-3 bağlanabilirliğe sahip küresel partiküller kullanılarak üretilen piezokompozit malzemeler için dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ), piezoelektrik yük katsayısı ( $d_{33}$ ) ve piezoelektrik voltaj katsayısı ( $g_{33}$ ) hesaplamalarında Yamada modeli tercih edilmektedir. Yamada modeline göre:

$$\epsilon_r = \epsilon_m \left( 1 + \frac{n\phi(\epsilon_c - \epsilon_r)}{n\epsilon_m + (\epsilon_c - \epsilon_m)(1 - \phi)} \right) \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9'a göre  $\epsilon_r$ : dielektrik sabiti, alt indis olarak belirtilen c ve m sırası ile seramik ve polimeri,  $\Phi$ : dolgu malzemesinin hacimce oranını ifade etmektedir.

0-3 bağlanabilirliğe sahip piezokompozitlerin  $d_{33}$  değerinin Yamada modellemesine göre teorik olarak hesaplanması eşitlik 2.10'da verilmiştir.

$$d_{33r} = \frac{\phi \alpha n \epsilon_r d_{33c}}{n \epsilon_r + \epsilon_c - \epsilon_r} \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.10'daki  $\alpha$ : seramik parçacıkların kutuplanma oranını ifade ederken, n: depolarizasyon faktörünün tersini ifade etmektedir. 1-3 tipi piezokompozitler ise üç boyutlu polimer matris içerisinde birbirlerine paralel şekilde yönelmiş olan çubukların polimer içerisine gömülmesi ile oluşturulan yapılardır. Bu tip

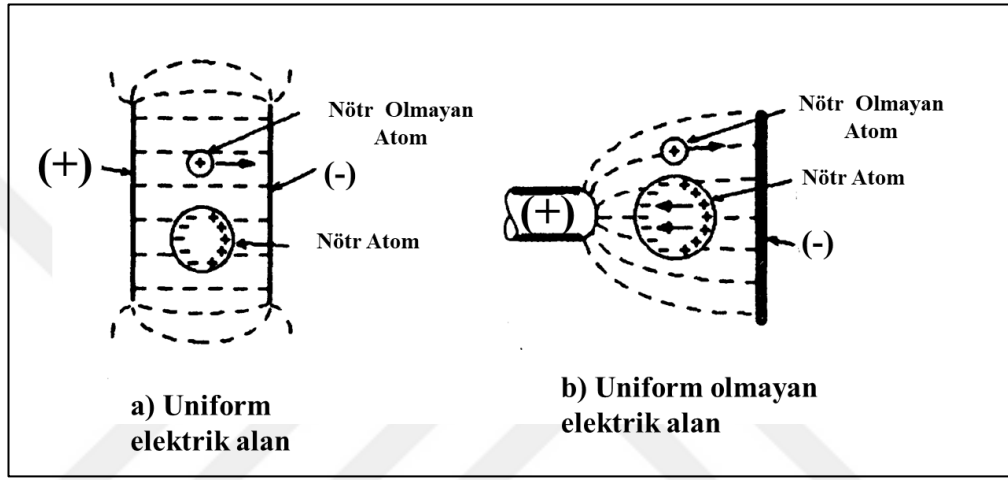
piezokompozitler üstün piezoelektrik bağlaşma faktörü ve düşük akustik empedansa sahiplerdir. Aynı zamanda insan organları ve su ile uyumludur. 1-3 tipi kompozitler anizotropik özellikler sergilerler. Bu tip kompozitler genel olarak medikal ultrasonik görüntüleme, enerji hasadı, hidrofon ve sualtı akustik görüntüleme sistemleri gibi uygulama alanlarında tercih edilmektedir. 1-3 piezokompozitler genel olarak kesme kalıplama, laminasyon, enjeksiyon kalıplama, yumuşak kalıplama yöntemleri ile üretilmektedir. 1-3 tip bağlantıya sahip piezokompozitler, özel olarak tasarlanmış ve ayarlanabilir akustik empedansı sayesinde en yüksek elektro-mekanik bağlaşma katsayısına, hidrostatik voltaj katsayısına sahiplerdir. 1-3 piezokompozitler sıkça dönüştürücü ve eyleyici uygulamalarında tercih edilmektedir. 1-3 piezokompozitler sert ve ekstrem hava koşullarına karşı dayanıklıdır. Hidrostatik elektro-mekanik bağlaşma katsayısı, hidrostatik yük katsayısı ve yüksek hidrostatik performanslarına sahip olmalarından kaynaklı hidrofon ve sualtı uygulamalarında [Smith, 1990], [Kumar vd., 2017], titreşim sönümleme uygulamalarında [Sarangi ve Ray, 2010], [Sarangi ve Ray, 2011], tahribatsız hasar analizi [Fleury, 2003] ve çevre kontrolü [Williams vd., 2002] gibi uygulamalarda tercih edilmektedir [Pramanik ve Arockiarajan, 2019].

## 2.7. Dielektroforesis Yöntemi

Dielektroforesis düzgün olmayan elektrik alan kullanılarak nötr bir maddenin polarize olması sonucunda yaptığı öteleme hareketi olarak tanımlanmaktadır [H.A. Pohl, 1951]. Dielektroforesis, yüklü bir cismin elektrik alan uygulanması sonucunda hareket etmesi olarak tanımlanan elektroforesis ile farklılıklar göstermektedir. Dielektroforesis yöntemi ile elektroforesis yöntemi arasındaki farklar şu şekilde sıralanmaktadır.

1. Dielektroforesis etkinin oluşabilmesi için düzgün olmayan elektrik alana ihtiyaç duyulurken, elektroforesis düzgün ve düzgün olmayan elektrik alanların her ikisinin uygulanması sonucu ortaya çıkmaktadır.
2. Dielektroforetik etki için yüksek şiddetteki elektrik alanların uygulanması gerekmektedir. Dielektroforetik kuvvet kullanılan parçacıkların ve parçacıkların dağıtıldığı ortamın dielektrik sabitleri ile doğrudan ilişkilidir. Düşük dielektrik sabitine sahip akışkanlar için yüksek elektrik alan şiddeti gerekmektedir. Elektroforetik etki ise düşük elektrik alan şiddetlerinde meydana gelmektedir.

3. Dielektroforetik etkide uygulanan elektrik alanın yönü parçacıkların yönlenmesi üzerinde etki göstermemektedir. Elektroforetik etkide ise yüklü parçacıklar kullanıldığı için parçacığın yükü ve uygulanan elektrik alanın yönü etki etmektedir. Bu yüzden uygulanan elektrik alanın yönü değiştirildiğinde parçacığın hareket yönü de değişmektedir.
4. Dielektroforetik etki parçacık boyutu ve hacmi ile orantılı şekilde etkilenirken elektroforetik etki parçacık boyutundan bağımsızdır.



**Şekil 2.14:** AC elektrik alan ve DC elektrik alanının şematik gösterimi [Bowen, 1995].

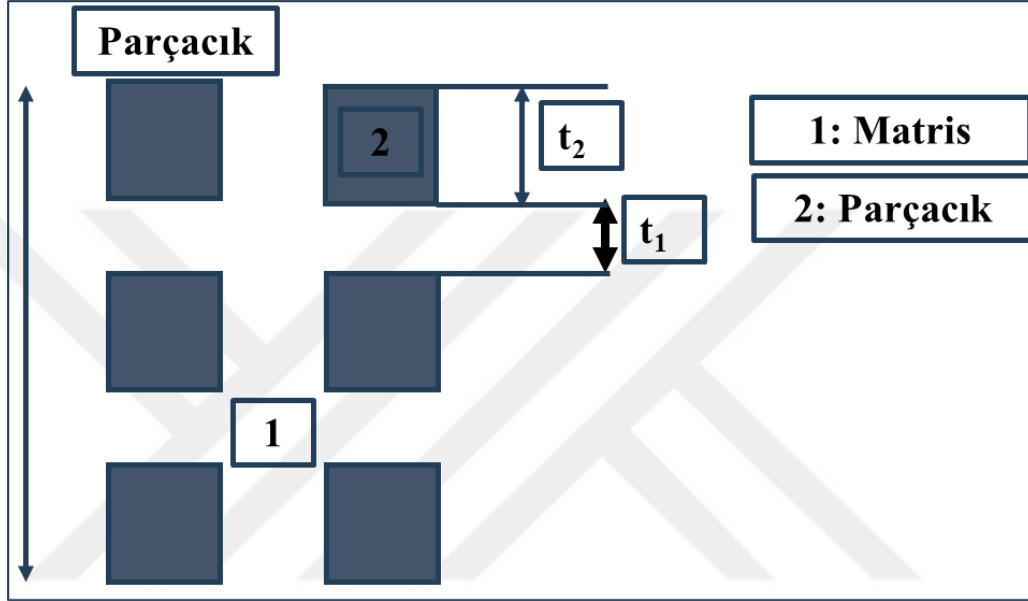
Dielektroforesis yöntemi kullanılarak piezokompozit üretimine ait başlıca çalışmalardan biri Randall tarafından nano boyuttaki  $\text{BaTiO}_3$  tozlarının silikon elastomer matris fazı içerisinde dağıtılarak alternatif akım uygulanması ile üretilmiştir [Randall, 1992]. Randall bu çalışmasında silikon elastomer ve  $\text{BaTiO}_3$  karışımına 40 Hz. Frekansa sahip 1 kV/cm'lik elektrik alan uygulanmıştır. Randall'ın yapmış olduğu deneysel çalışmalarının sonucunda nano boyuttaki  $\text{BaTiO}_3$  tozlarının süreksiz halde zincir gibi bir araya gelerek lifli bir yapı oluşturduğunu gözlemlemiştir. Üretilen kompozitin dielektrik özellikleri incelendiğinde piezokompozitin üretimi için uygulanan elektrik alana paralel ve elektrik alana dik doğrultuda yapılan ölçümlerin birbirlerinden farklı oldukları belirlenmiştir. Randall yaptığı çalışmanın sonucunda dielektroforesis yöntemi kullanılarak piezokompozit üretimi ile ilgili bazı parametreleri belirlemiştir. Bu parametreler:

1. Matris malzemesi olarak kullanılacak polimerin dolgu malzemesinden daha düşük dielektrik geçirgenliğe ve daha düşük dielektrik kayba sahip olması gereklidir.
2. Matris malzemesi olarak kullanılacak polimerin hızlı olacak şekilde polimerizasyonunu tamamlaması veya polimer matrisin dolgu malzemesinin yönlenmesini engellemeyecek viskoziteye sahip olması gereklidir.
3. Polimer matris yüksek dielektrik bozunma mukavemetine (dielectric breakdown strength) sahip olması gereklidir. Dolgu malzemesinin seçilmesinde iletkenlik sınırlayıcı bir parametredir. Şayet iletken veya yarı-iletken bir dolgu malzemesi tercih edilirse elektrotlar arasında oluşacak zincir yapısı iletken bir yol oluşturacak ve bunun sonucunda polarizasyon etkisi ortadan kalkacaktır.
4. Parçacıklar arasındaki boşlukta polimer matris taba şeklinde kalırsa polimer matris fazının kürlenme süresinde artış gerçekleşecektir.

Dielektroforesis yöntemi ile piezokompozit üretimi sırasında polimer/seramik karışımına elektrik alan uygulanması sonucunda hem elektroforesis hem de dielektrofresis meydana gelmektedir. Elektroforesis sonucunda seramik dolgu malzemesinin elektrotlara taşınmasının önüne geçilebilmesi için alternatif akım kullanılması literatürde yapılan çalışmaların sonucunda belirlenmiştir.

Dielektroforesis yöntemi kullanılarak piezokompozit malzemelerin üretimi sırasında piezokompozitin dolgu malzemesi olarak kullanılacak tozlar sıvı haldeki polimer matris fazının içerisinde rastgele olacak şekilde dağıtılır, daha sonra polimer matris fazının katılma süresi boyunca elektrik alan uygulanarak sıvı polimer içerisindeki tozların elektrik alan doğrultusun yönlenmeleri sağlanmaktadır. Bu işlemin sonucunda dolgu malzemesi olarak kullanılan tozlar zincir şeklinde bir konfigürasyon oluşturarak 1-3 bağlanabilirliğindeki piezokompozitlere benzer bir yapı oluşturmaktadır. 1-3 piezokompozit benzerliğine sahip bu yapı kısmi 1-3 (quasi 1-3) adlandırılmaktadır [Bowen, 1994], [Wilson 1999]. Yönlendirilmiş piezokompozitler 0-3 bağlanabilirliğe sahip piezokompozitlere göre farklı davranışlar sergilemektelerdir. Zincir içerisindeki parçacıklar sıkıca paketlenmiş şekilde bulunarak parçacıklarının yönlenme doğrultusunda da güçlü etkileşim göstermektelerdir. Bu tip piezokompozitlerin dielektrik sabiti, piezoelektrik yük katsayısının hesaplanmasında farklı analitik modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin geliştirilmesinde Yamada'nın 0-3

piezokompozitler için geliştirdiği modelleme referans olarak alınmıştır. Yönlendirilmiş piezokompozitler için geliştirilen ve literatürde en çok tercih edilen modellerden ilki Bowen'ın geliştirmiş olduğu modeldir. Bu modele göre zincir konfigürasyonunun oluşmasını sağlayan parçacıkların kübik morfolojide oldukları ve mükemmel şekilde hizalanmış oldukları dikkate alınmaktadır. Bowen'ın modeline ait şematik gösterim **şekil 2.15**'te verilmiştir.



**şekil 2.15:** Bowen modeline göre dielektroforesis ile parçacık yönleneşmesi.

**şekil 2.15**'e göre kübik şeklindeki parçacıklarının elektrik alan doğrultusunda yönleneşmesi ile zincir yapısının oluşması görölmektedir. Zincir yapısı dikkate alındığında kübik parçacıkların temas etmelerini engelleyen polimer matris fazının bulunduğu görölmektedir. Bu durum Bowen'ın modelinde önemli bir etken olmaktadır. Bowen'ın yapmış olduğu bu çalışmanın sonucunda yönlendirilmiş piezokompozitler için geliştirmiş olduğu bağıntılar eşitlik 2.11'de verilmiştir.

$$\epsilon_r = \phi_c \left( \frac{R\epsilon_c\epsilon_r}{\epsilon + R\epsilon_c} \right) + (1 - \phi_c)\epsilon_m \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11'deki R, zincir yapısını oluşturan tozların parçacık boyutunun, parçacıklar arasındaki mesafeye oranını ifade etmektedir. Yönlendirilmiş piezoelektrik kompozitlerin piezoelektrik yük katsayısının analitik olarak hesaplanması için Van den Ende'nin [**Van den Ende vd., 2012**] geliştirdiği model tercih edilmektedir. Bu

modelde piezokompoziti oluşturan bileşenlerin hem elektriksel hem de mekanik davranışları dikkate alınmaktadır. Matris fazının içerisindeki zinciri oluşturan parçacıklar elektriksel olarak seri bağlı kapasitöre, mekanik olarak incelendiğinde ise seri bağlı yaylara eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. Bu duruma göre modelleme için piezoelektrik yük katsayısının hesaplanmasında eşitlik 2.12 kullanılmaktadır.

$$d_{33} = \frac{(1 + R)^2 \epsilon_m \phi_c d_{33c} Y_c}{\epsilon_c + R \epsilon_m [(1 + R \phi_c) Y_c + (1 - \phi_c) R Y_m]} \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.12’te verilen  $Y_c$  ve  $Y_m$  sırası ile piezokompoziti üretirken dolgu malzemesi olarak kullanılan seramiğin elastik modülünü ifade ederken ikinci verilen ifade ise polimerin elastik modülünü tanımlamaktadır.

## 2.8. Dokunsal Sensörler

İnsanlar görme, dokunma, tatma, koklama ve duyma gibi duyu organları yardımıyla etrafını saran çevre ile etkileşime girmektedir. Bu duyu organlarından bir veya birkaçını kullanarak etkileşimde olduğumuz bir maddenin farklı özellikleri hakkında bilgi edinilebilmektedir. Dokunsal sensörler malzemenin sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, titreşim, sertliği veya yumuşaklığı, şekli vs. gibi özellikleri hakkında bilgi edinilmesini sağlamaktadır. Dokunsal sensörler bu özelliklerden bir veya birkaçının aynı anda ölçülmesine olanak sağlamaktadırlar. Dokunsal sensörler ile ilgili bilinmesi gereken bir diğer durum ise basınç ve tork gibi fiziksel özellikler dokunsal tanımlamaya dahil edilmeseler de bu iki fiziksel özellik dokunma ile edinilmelerinden kaynaklı dokunsal parametreler arasına dahil edilmektedir. Dokunsal sensörler üzerinde ilk çalışmaları yapan araştırmacılardan olan Harmon dokunsal sensörlerin robotik uygulamalar üzerindeki potansiyelini ilk fark eden kişilerden olmuştur [Mohsin vd., 2012], [Harmon, 1982], [Harmon, 1984]. Aynı zamanda Harmon dokunsal sensörlerin üretimi konusundaki teknik sıkıntılar ve düşük miktardaki yatırım getirisi nedeni ile bu tip sensörlerin tarım ve tıp alanları için uygun olmadıklarını düşünmesi ilginç bir durum olarak düşünülmektedir [Lee, 2000]. Harmon’un düşüncelerinin yanı sıra Nevins ve Whitney gibi araştırmacılar ise pasif görüntüleme yöntemlerinin dokunsal algılamalara olan ihtiyacı ortadan kaldıracığını düşünmektelerdir [Nevins, 1977]. 21. Yüzyılın başlarında ise dokunsal sensör teknolojisinin akıllı ürün ve sistemlerin geliştirilmesine katkıda bulunarak insanın

yaşam kalitesinin artmasını sağlayacak büyük bir potansiyel olarak görülmeye başlanmıştır [Lee, 2000], [Lee, 1996]. İnsanın yaşam kalitesini arttıracak düşünülen uygulamaların en tepesinde ise medikal robotik uygulamaları ile endüstriyel otomasyon yer almaktadır. Dokunsal sensörler yapılan çalışmalar sonucunda farklı şeklide sınıflandırılmışlardır. Bu sınıflardan bazıları kapasitif, piezorezistif, termorezistif, piezoelektrik, manyetik ve optik şeklindedir. Genel olarak sınıflandırması yapılan dokunsal sensörlerden kapasitif, piezorezistif, piezoelektrik ve optik dokunsal sensörler daha üstün performans sergilemelerinin yanı sıra daha kullanışlı oldukları için sensör tasarımı üzerinde çalışmalar yapan araştırmacıların sıklıkla tercih ettikleri dokunsal sensörlerdir.

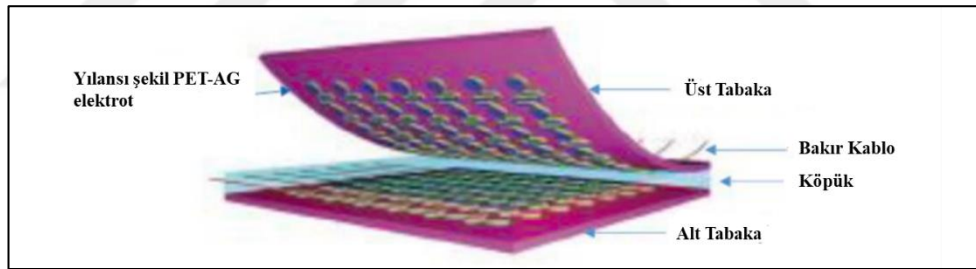
### 2.8.1. Kapasitif Dokunsal Sensörler

Kapasitif sensörler genele olarak iki iletken metal plakanın arasına dielektrik bir malzeme konulması ile elde edilmektedirler. Paralel levha kullanılarak üretilen kapasitörler için kapasitans hesaplamaları için eşitlik 2.13 Kullanılmaktadır.

$$C = \left( \frac{A \epsilon_0 \epsilon_r}{d} \right) \quad (2.13)$$

Eşitlikteki C: kapasitans, A: iletken metal plakaların yüzey alanı,  $\epsilon_0$ : vakumun dielektrik geçirgenliği,  $\epsilon_r$ : plakalar arasına yerleştirilen dielektrik malzemenin bağlı dielektrik geçirgenliği ve son olarak d: plakalar arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Kapasitif dokunsal sensörler genel olarak piezorezistif sensörlere göre daha gerinilebilir sensörler olmalarının yanı sıra tipik olarak sert yüzeylerin üzerine göre tasarlanmaktadır. Aynı zamanda kapasitif dokunsal sensörler sıcaklık değişimlerini ölçme konusunda daha zayıflardır. Bu tip sensörlerin sıkça tercih edilmelerinin sebebi kullanılan plakalarının alanının değişimine ve elektrotların aralıklarının değişimine bağlı kapasitans değerinde değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu iki tip dokunsal sensörlerin arasından en çok tercih edileni ise elektrot aralıklı sensördür. Her ne kadar elektrot aralıklı dokunsal sensör alan değişimine bağlı sensörlere göre daha geniş bir basınç aralığına sahip olmaları ve hassasiyetleri düşük olmalarına rağmen alan değişimine bağlı sensörlere göre çok daha dayanıklıdır. **Şekil 2.16**'da kapasitif dokunsal sensör uygulamasına ait bir örnek verilmiştir.

Kapasitif dokunsal sensör yapıları oluşturulurken farklı sınıflandırmalardaki malzemeler kullanılmaktadır. Kapasitif dokunsal sensörler paralel plaka elektrot yapıları kullanıldığı için plakalar arasına yerleştirilecek malzemenin mekanik özelliklerinin iyi olması gerekmektedir. Polisilikonlar kapasitif dokunsal sensörler için ideal malzemelerden biridir [Wolffenbuttel ve Regtien, 2003], [Cu vd., 1996], [Ko vd., 2008], [Muhammad vd., 2011]. Polimer malzemeler sınıfından ise özellikle polidimetilsiloksan (PDMS) popüler hale gelmiştir [Lee vd., 2006], [Cheng vd., 2010], [Manssfeld vd., 2010]. Polimer malzemelerin bu tip dokunsal sensörler için popüler hale gelmelerinde kimyasal kararlılıkları ve elastik özellikleri önemli derecede etkili olmaktadır. Ayrıca polimer malzemeler açık saha esnek dokunsal sensör uygulamaları için de kullanılabilirler [Lee vd., 2008], [Lee vd., 2006], [Cheng vd., 2010], [Manssfeld vd., 2010]. Polimer malzeme kullanılarak üretilen esnek kapasitif dokunsal sensörler de polimer malzeme dielektrik ara tabaka olarak [Manssfeld vd., 2010], hareketli plakalar veya üç boyutlu (3D) temaslar için de kullanılmaktadır [Schmidt vd., 2006], [Lee vd., 2008], [Lee vd., 2006], [Cheng vd., 2010].



Şekil 2.16: Kapasitif dokunsal sensör [Hasegawa, 2004].

## 2.8.2. Piezorezitif Dokunsal Sensörler

Piezorezistif tip dokunsal sensörler genellikle üzerine kuvvet uygulanması sonucunda direnç değişimine sebep olan basınca duyarlı bir elemandan oluşmaktadır.

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\sigma + \pi E)\chi \quad (2.14)$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.15)$$

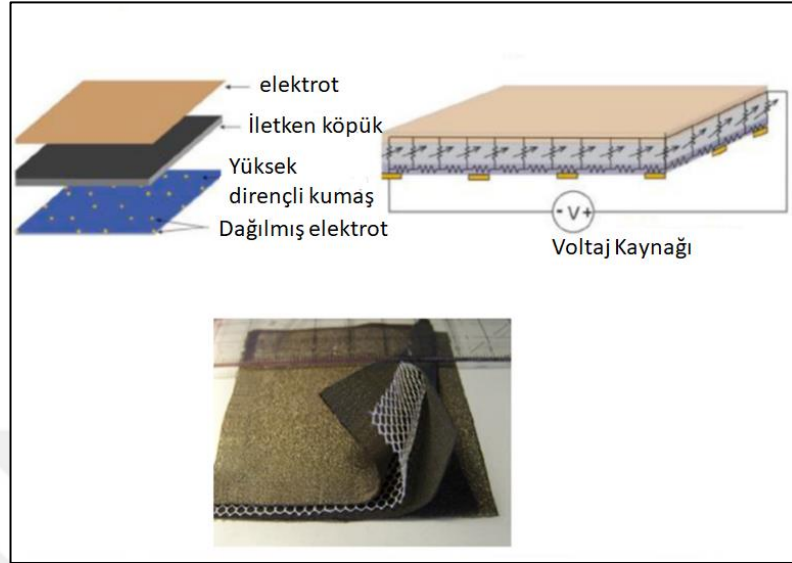
$$\pi = \frac{\Delta\rho}{\rho}T \quad (2.16)$$

$$E = \frac{T}{\chi} \quad (2.17)$$

Eşitlikteki R, iletken yapının direnci,  $\Delta R$ , uygulanan gerinimden kaynaklı direnç değişimi,  $\sigma$ : sensör elemanı olarak kullanılan malzemenin Poisson oranı,  $\pi$ : piezorezistif katsayı, E: malzemenin Young modülü,  $\chi$ : malzemedeki gerinimi ifade etmektedir. Eşitlik 2.15'te malzemenin direnci verilmiştir. Eşitlik 2.16'da kristal yönlenmesine bağlı olarak piezorezistif katsayısının hesaplanması verilmiştir. Sonuncu eşitlikte ise gerilim ile gerinim arasındaki ilişki verilmiştir. Piezorezistif sensörler gürültüye karşı dayanıklı oldukları için dizi şeklinde üretimi yapılacak olan dokunsal sensörler için daha uygun hale gelmektedir [Zou, 2017], [Tiwana vd., 2012], [Puangmali vd., 2008]. Sınırlamalara gelince, piezo-dirençli algılama histerisizden büyük ölçüde etkilenir ve bu da daha düşük bir frekans tepkisine yol açar ve yalnızca sınırlı mekansal çözünürlüğe sahip dinamik ölçümler için kullanılabilir [Tiwana vd., 2012]. Piezorezistif sensörlerin efektif olarak ölçüm yapılabilmesi için kontak bağlantısının bütün sensörü kaplaması gerekmektedir. Mekanik olarak gerilimi ve yansıtmayı arttırarak piezorezistif sensörün etkinliği arttırılabilir, mekanik gerilmeyi ve yansıtmayı arttırmak için genellikle diafram (hoparlör) veya manivela tercih edilmektedir [Shikida vd., 2003], [Hasegawa, 2004], [Frank vd., 2014], [Tu vd., 2017]. Piezorezistif sensör ölçümleri için basit bir doğru akım (DC) besleme Weston Bridge sistemi kullanılmaktadır.

Piezorezistif dokunsal sensör yapıları oluşturulurken elektriksel direnç ve mekanik elastiklik hayati önem taşımaktadır. Elektriksel direnç ve mekanik elastiklik metaller, yarı iletkenler ve bazı polimer malzemelerin sahip olduğu en temel özelliklerdendir. Bu yüzden metaller, yarı iletkenler ve polimerler bu tip dokunsal sensörler için uygun hale gelmektedirler. Piezorezistif dokunsal sensörlerde eski zamanlarda tek kristal silisyum veya polisilisyum [Shikida vd., 2003], [Hasegawa, 2004], [Frank vd., 2014], [Tu vd., 2017] tercih edilirken günümüzde bu malzemelerin yerine piezorezistif özellik sergileyen çok katlı karbon nanotüp ve grafen ve türevlerinin olduğu malzemeler kullanılmaktadır [Luo vd., 2017], [Park vd., 2013], [Tung vd., 2016]. Karbon malzemeler kullanılarak üretilen piezorezistif dokunsal sensörler için

genellikle destekleyici polistiren, poliüretan ve PDMS gibi polimerler kullanılmaktadır.



Şekil 2.17: Piezorezistif dokunsal sensör [Meribout vd., 2024].

### 2.8.3. Piezoelektrik Dokunsal Sensörler

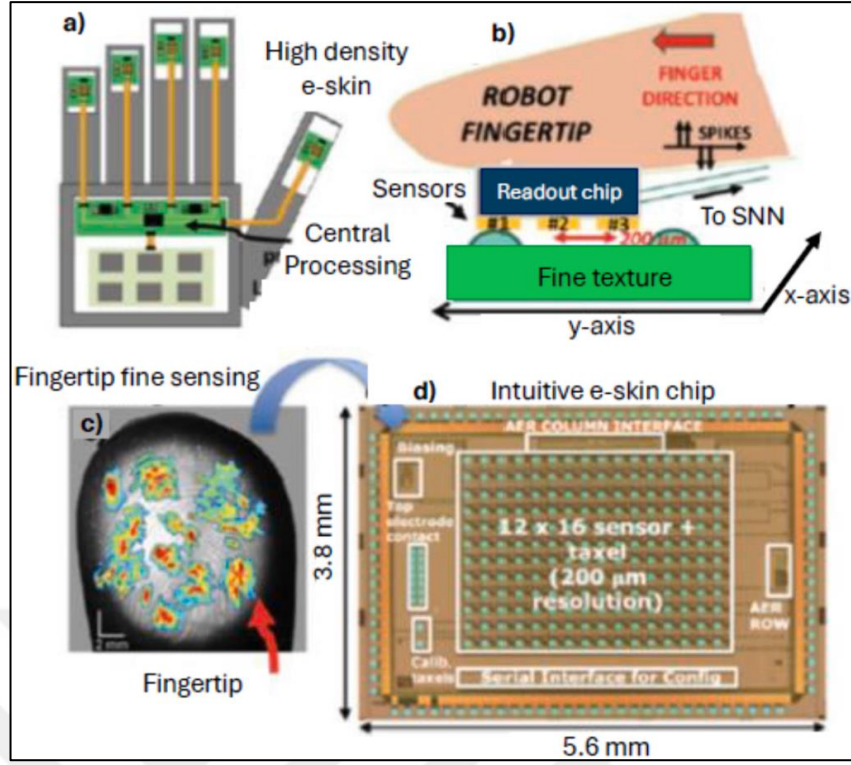
Piezoelektrik dokunsal sensörler için aktif ve pasif ölçüm olmak üzere iki tip ölçüm şekli bulunmaktadır. Düz piezoelektrik etki kullanılarak yapılan sensör ölçümleri pasif ölçüm olarak literatürde bulunmaktadır [Damjanovic, 1998]. Aktif sensör ölçümleri için ise ters piezoelektrik etki kullanılmaktadır. Aktif olarak kullanılacak olan piezoelektrik dokunsal sensörler için kurulan ölçüm yapıları elektrik alan uygulanması sonucunda birinci derece rezonans frekansında çalışmaktadırlar. Piezoelektrik dokunsal sensöre dışarıdan mekanik bir gerilim uygulanması ile uygulanan gerilme bağlı olarak rezonans frekansında kayma oluşmaktadır. Rezonans frekansı ise eşitlik 2.18 ile hesaplanmaktadır.

$$f_0 = \frac{1}{2Z} \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (2.18)$$

Eşitlikteki Z: Piezoelektrik malzemenin kalınlığı, K: Malzemenin elastik sıklık sabiti ve  $\rho$ : Malzemenin yoğunluğunu ifade etmektedir. Rezonans frekansı uygulanan gerilim ile doğrudan ilişkilidir [Krishna ve Rajanna, 2004]. Piezoelektrik dokunsal

sensörler çok yüksek frekanslarda bile tepki verebildiklerinden dinamik olarak sinyal ölçümleri için en iyi tercih olmaktadır **[Tiwana vd., 2012]**. Piezoelektrik dokunsal sensör yapıları genel olarak basittir. Kapasitif dokunsal sensörler ile benzer yapılara sahiplerdir. İki iletken elektrot arasına sandviç şeklindeki piezoelektrik tabakaların yerleştirilmesi sonucu oluşturulmaktadır. Piezoelektrik dokunsal sensörler için plakasal yapıların haricinde küresel veya plato şeklindeki piezoelektrik malzemeler de kullanılmaktadır **[Li vd., 2008]**, **[Qasaimeh vd., 2009]**. Literatürde piezoelektrik dokunsal sensör kullanılarak ölçülen en yüksek basınç değişimi 100 MPa'dır **[Bao vd., 2015]**.

Piezoelektrik dokunsal sensör yapılarının üretilmesinde kullanılacak olan malzemelerin piezoelektrik özellik göstermelerine olan bağımlılıktan kaynaklı tercih edilebilecek malzeme sayısı sınırlı bir hal almaktadır. Genel olarak kuartz **[Damjanovic, 1998]**, çinko oksit **[Krishna vd., 2004]**, **[Wu vd., 2013]**, kurşun zirkonat titanat (PZT) **[Krishna vd., 2004]**, **[Omata ve Terunuma, 1992]**, **[Dargahi, 2000a]**, **[Dargahi vd., 2000b]**, **[Choi vd., 2009]** en çok tercih edilen piezoelektrik malzemelerdir. Günümüzde esnek özelliklerinin de etkili olmasından kaynaklı polivinildin diflorür (PVDF)' de piezoelektrik dokunsal sensör uygulamalarında tercih edilmeye başlanmıştır **[Liv d., 2008]**, **[Qasaimeh vd., 2009]**, **[Dahiya vd., 2013]**, **[Dargahi, 2000a]**, **[Takashima vd., 2008]**, **[Wang vd., 2011]**, **[Seminara vd., 2013]**, **[Khan vd., 2014]**.



Şekil 2.18: Piezoelektrik dokunsal sensörün uygulama alanı.

#### 2.8.4. Optik Dokunsal Sensör

Elektromanyetik radyasyondaki dalga boyu, faz, polarizasyon veya radyasyonun yoğunluğu gibi parametrelerin bir araya getirilmesi sonucu oluşturulan dokunsal sensörlerdir. Optik dokunsal sensörler elektronik gürültüye dayanıklıdır. Bu tip sensörler yüksek konumsal çözünürlüğe sahip ve aynı zamanda yüksek dinamik tepkiye sahiplerdir. Yüzey pürüzlülüğü [Windecker ve Tiziani, 1999], compliance [Xie vd., 2013], kayma ve dikey şekildeki gerilmelerin ölçülmesinde bu tip sensörler kullanılmaktadır [Ohka vd., 2005], [Missinne vd., 2011], [Ahmadi vd., 2012]. Literatüre göre yüzey pürüzlülüğü konusunda yapılan ölçümlerin sonucunda en yüksek çözünürlüğün 100 nm mertebelerine kadar ulaştığı rapor edilmiştir [Windecker ve Tiziani, 1999]. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için oluşturulacak ölçüm yapısının en önemli kriteri ölçüm için kullanılacak olan optik fiberlerin ölçüm yapılacak yüzeye dik olarak yerleştirilmesidir [Xie vd., 2013], [Windecker ve Tiziani, 1999]. Optik dokunsal sensörler esneklik ve taşınabilirlik ihtiyacı gereken uygulamalar için büyük potansiyel göstermektedirler [Konstantinova vd., 2015], [Noh vd., 2014]. Optik fiberlerin diğer sensör uygulamaları ile uyumluluk sağlamaları, sistemin performansını

arttırmaları ve elektromanyetik dalgalanmaları karşı ölçüm sisteminin dayanıklılığını arttırması en önemli tercih sebeplerindendir.

Optik dokunsal sensörlerin üretimindeki en önemli parametre kullanılacak malzemenin optik özellikleridir. 1970’lerde çinko klorür ( $ZnCl_2$ ) gibi malzemeler fiber malzemesi olarak kullanılmaktaydı. Daha sonralarında ise silika esaslı malzemeler, polimetilmetakrilat (PMMA), polistiren (PS), polikarbonat (PC), poliüretan (PU) ve epoksiler gibi geleneksel polimerler fiber olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yeni trend olarak döteryumlanmış ve halojenleşmiş poliakrilatlar (PA), florlaştırılmış poliimitle (PI) gibi polimerler tercih edilmektedir.

Dokunsal sensörlerin çalışma prensipleri ve uygulama alanları ile ilgili özetlenmiş bilgiler **Tablo 2.2**’de verilmiştir. Dokunsal sensörlerin üretiminde kullanılan malzemelerin karşılaştırılması ise **Tablo 2.3**’te verilmiştir

**Tablo 2.2:** Dokunsal sensör türlerinin karşılaştırılması [Zhou vd., 2017].

| Sensör Türü   | Ölçüm Özellikleri                                                                                                              | Kullanım Şekli                                                                              |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kapatif       | Yüksek hassasiyet ve çözünürlük<br>Yüksek dinamik ölçüm mesafesi<br>Durağan ve hareketli ölçüm<br>Gürültüden kolayca etkilenme | Yüksek entegrasyon edilebilirlik<br>Karmaşık ortamlar<br>Taşınabilirlik                     |
| Piezorezistif | Yüksek hassasiyet ve çözünürlük<br>Gürültüye karşı hassasiyet<br>Histerisize karşı duyarlılık                                  | Yüksek entegrasyon<br>Düşük karmaşıklık<br>Düşük taşınabilirlik                             |
| Piezoelektrik | Yüksek hassasiyet<br>Yüksek dinamik ölçüm mesafesi<br>Yüksek frekans tepkisi<br>Düşük üç boyutlu çözünürlük                    | Yüksek entegrasyon<br>Orta karmaşık yapı<br>Orta taşınabilirlik ve az kütleli olarak üretim |
| Optik         | Yüksek hassasiyet<br>Yüksek dinamik mesafe<br>Yüksek frekans tepkisi<br>Yüksek üç boyutlu görüntü                              | Yüksek entegrasyon<br>Orta karmaşık yapı<br>Orta taşınabilirlik                             |

**Tablo 2.3:** Dokunsal sensörlerde kullanılan malzemelerin karşılaştırılması [Zhou vd., 2017].

| Malzeme Türü      | Patern                                                                             |                                                        | Özellikler                                                                                                                           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | Üretim                                                                             | Etch                                                   |                                                                                                                                      |
| Silisyum içerikli | Yüksek sıcaklık<br>Yüksek vakum ihtiyacı<br>Karmaşık ekipman<br>Düşük hız          | Tehlikeli kimyasal içerme<br><br>Karmaşık ekipman      | İyi mekanik özellikler<br>Tunable elektrik iletkenliği<br>İyi termal iletkenlik<br>İyi optik özellikler<br>Yüksek kimyasal stabilite |
| Metalik içerik    | Esnek sıcaklık<br>Esnek vakum gerekliliği<br>Orta ekipman karmaşıklığı<br>Orta hız | Esnek ve basit dağlama yöntemi<br><br>Basit ekipmanlar | İyi elektrik iletkenliği<br>İyi termal iletkenlik<br>Orta kimyasal stabilite                                                         |
| Polimer içerik    | Düşük sıcaklık<br>Düşük vakum<br>Basit ekipmanlar<br>Yüksek hız                    | Güvenli kimyasal<br><br>Yüksek Hız                     | İyi optik özellikler<br>Düşük kimyasal stabilite ve oksitlenme eğilimi                                                               |

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında yüksek hassasiyete sahip dokunsal sensör olarak kullanılacak piezokompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Yüksek hassasiyete sahip kompozitlerin dolgu malzemesi olarak kurşunsuz piezoelektrik olan potasyum stronsiyum niyobat ( $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  - KSN) bileşiği tercih edilmesinden daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Dolgu malzemesi olarak kullanılacak KSN bileşiğinin üretim yöntemi olarak ergiyik tuz sentezi yöntemi tercih edilmiştir. Dokunsal sensör olarak kullanılacak piezokompozitlerin üretimi için dielektroforesis yöntemi tercih edilmiştir. Dielektroforesis yöntemi ile alternatif akım kullanılarak elektrik alan uygulanması sonucunda sıvı polimer matris fazı içerisinde rastgele ve homojen bir şekilde dağıtılmış olan şablon parçacıklarının elektrik alan doğrultusunda yönelmesi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Piezokompozitlerin yapısal karakterizasyonları için X-ışınları kırınımı yöntemi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Şablon parçacıklarının kristalografik analizi için XRD yöntemi ve morfolojik analizleri kapsamında taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılmıştır. Kompozitlerin dielektrik karakterizasyonu için indüktans-kapasitans-rezistans (LCR) cihazı kullanılmıştır. Piezokompozitlerin ferroelektrik karakterizasyonu için Ferroelektrik test sistemi kullanılmıştır. Numunelerin soğuk silikon yağı banyosu içerisinde kutuplanmıştır. Sensör ölçümleri için ise LDS cihazı tercih edilmiştir.

#### 3.1. Ergiyik Tuz Sentezi Yöntemi ile KSN Şablon Parçacıklarının Üretilmesi

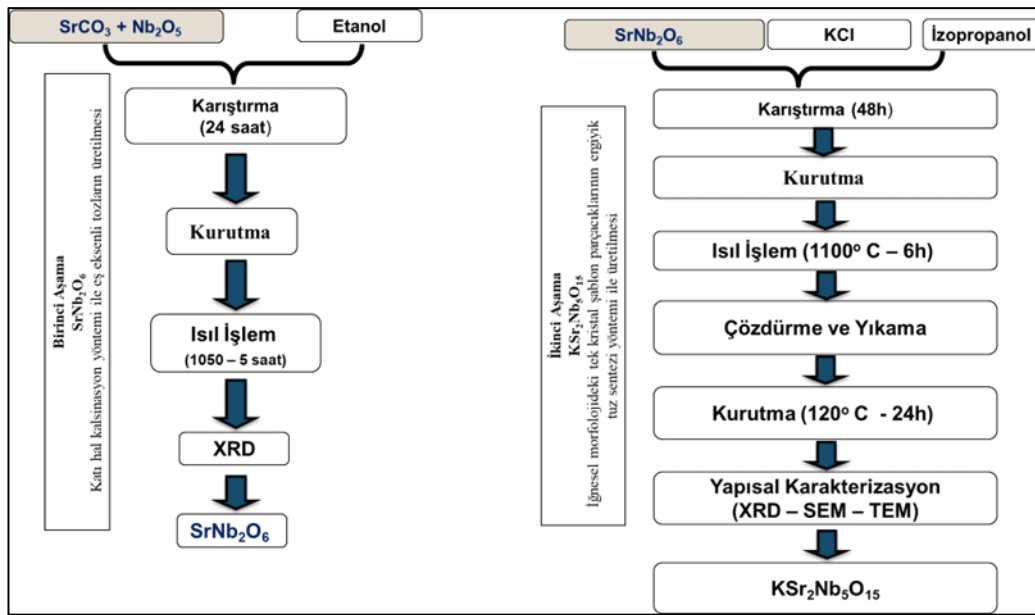
Literatürde iğnesel morfolojideki tek kristal KSN şablon parçacıklarının ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak üretilmesinde iki farklı yöntem tercih edilmektedir. Bu yöntemlerden ilkinde  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  tozları kullanılarak KSN parçacıkları üretilmektedir. Bu yöntemle üretilen KSN parçacıklarının özellikle monolitik seramiklerin dokulandırılmasında yeterli olmadığı Yang vd., (2007) tarafından belirtilmiştir [Yang vd., 2007]. Ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak KSN şablon parçacıklarının üretiminde kullanılan bir diğer yöntem ise öncül faz oluşturulması ve oluşturulan öncül fazın tuz ile karıştırılması sonucunda iğnesel morfolojideki tek

kristal KSN şablon parçacıklarının üretilmesi şeklindedir. Bu çalışmada KSN şablon parçacıklarının üretilmesi için bahsedilmiş olan ikinci yöntem kullanılmıştır. Başlangıç tozlarına ait bilgiler **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** KSN şablon parçacıklarının üretimi için başlangıç tozları.

| BAŞLANGIÇ TOZLARI       | SAFLIK | ÜRETİCİ FİRMA |
|-------------------------|--------|---------------|
| $\text{SrCO}_3$         | %99.5  | Alfa Aesar    |
| $\text{Nb}_2\text{O}_5$ | %99.5  | Alfa Aesar    |
| KCl                     | %99.5  | Merck         |

İlk önce öncül fazın oluşturulması için başlangıç olarak  $\text{SrCO}_3$  ve  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  tozları kullanılarak katı hal kalsinasyon yöntemi ile  $\text{SrNb}_2\text{O}_6$  (SN) öncül fazı üretilmiştir.  $\text{SrCO}_3$  ve  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  tozları stokiyometrik oranlar dikkate alınarak tartılmıştır. Tartma işlemi yapıldıktan sonra farklı çaplara sahip zirkonya bilyeler kullanılarak etanol içerisinde bilyalı değirmen kullanılarak homojen şekilde karıştırılmıştır. Karıştırılan toz ısıtıcılı manyetik karıştırıcı yardımıyla kurutulmuştur. Kurutulan tozun ısıl işlemi alümina pota içerisinde kapalı olarak gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem uygulanan tozun yapısal analizi X - ışınları kırınımı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İğnesel morfolojideki tek kristal KSN şablon parçacıklarının üretimine ait akış diyagramı **Şekil 3.1**'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1:** Ergiyik tuz sentezi ile tek kristal KSN şablon parçacıklarının üretimine ait akış diyagramı.

İğnesel morfolojideki KSN şablon parçacıklarının üretilmesinde tuz miktarının şablon parçacıkları üzerindeki etkisi bilinmektedir. Bu çalışmada Dursun ve ark. yaptığı çalışma dikkate alınarak tuz/toz oranı 2 olarak alınmıştır. Tuz/toz oranı ağırlık olarak seçilmiştir [Dursun, 2011]. SN ve KCl ilk önce havan ve tokmak kullanılarak 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra toz ve tuz karışımı izopropanol ortamında bilyeli değirmende karıştırılmıştır. Tuz ve toz karışımı öncül fazda olduğu gibi ısıtıcı manyetik karıştırıcı kullanılarak izopropanolün buharlaştırılması sonucunda kurutulmuştur. Kurutuma işleminden sonra alümina pota içerisine alınarak potanın ağzı kapatılmıştır. Karışımın ısıtılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Isıtılma işlemi sonrasında yapıda kalan fazla miktardaki KCl tuzunu ve reaksiyon dışında kalmış olan Cl<sup>-</sup> iyonlarını gidermek için bir hafta boyunca sıcak saf su kullanılarak çözündürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözündürme işlemi sırasında tamamen giderilemeyen artık maddeleri de gidermek için ultrasonik titreştirici kullanılarak 7 defa sıcak saf su ile yıkanmıştır. Temizleme işleminden sonra 24 saat boyunca kurutma işlemi etüv içerisinde gerçekleştirilmiştir. Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilmiş olan iğnesel morfolojideki KSN şablon parçacıklarının hem kristalografik hem de morfolojik analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 3.2. Dielektroforesis Yöntemi ile Piezokompozit Üretimi

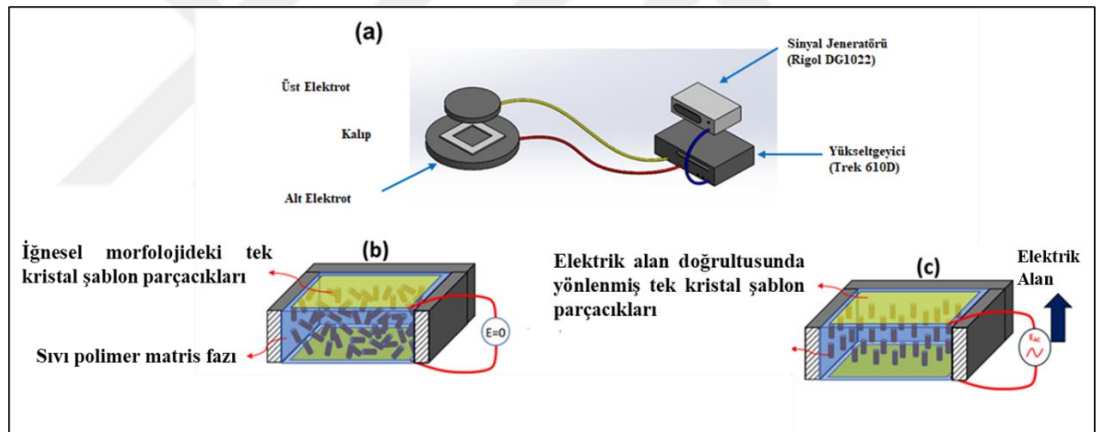
Bu tez çalışması kapsamında kurşunsuz iğnesel morfolojideki tek kristal piezoelektrik şablon parçacıklarına sahip piezokompozitler dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Piezokompozitlerin üretiminde hacimce farklı miktarlardaki KSN şablon parçacıkları kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin matris fazı için iki bileşenden oluşan ticari poliürea polimer kullanılmıştır. Kompozitlerin üretimi sırasında sırası ile matris fazını oluşturacak olan bileşenler homojen olacak şekilde karıştırılmışlardır. Kullanılan polimer matris fazına ait bilgiler **Tablo 3.2**'de verilmiştir.

**Tablo 3.2:** Polimer matris fazına ait bilgiler.

| Bileşenler    | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Üretici Firma |
|---------------|-------------------------------|---------------|
| KROL PAE 2420 | 1                             | Kemropol A.Ş. |
| KROL PAE 2720 | 1                             | Kemropol A.Ş. |
| HDT LV2       | 1.041                         | Vencorex      |
| XFLO 100      | 1.131                         | Vencorex      |

Homojen olarak karıştırılan matris fazı bileşenleri içerisinde hacimce %5 – 15 aralığında tek kristal KSN şablon parçacıkları matris fazı içerisinde dağıtılmıştır. Matris fazının kürlenmesi için çapraz bağların oluşmasını sağlamak amacıyla kürleyici bileşenler eklendikten sonra polimer seramik karışımı desikatör içerisinde alınarak hava kabarcıklarının giderilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Hava kabarcığı giderme işleminden sonra karışım dielektroforesis işlemi için kalıba alınmıştır. Bakır folyolardan oluşan alt ve üst elektrotlar karışımın döküldüğü kalıbın üzerine kapatılmıştır.

Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin deney düzeneği Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.2’den de anlaşıldığı üzere dielektroforesis yöntemi için gerekli olan alternatif akım elektrik alanının yükseltgeyicinin giriş kanalına bağlanması ve kullanılan yükseltgeyicinin çıkış kanalına alt ve üst elektrotların bağlantılarının yapıldığı görülmektedir.



**Şekil 3.2:** Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin deney düzeneği.

Dielektroforesis işlemi için alternatif akım kullanılarak sinyal üretici ve yükseltgeyici yardımıyla farklı şiddetlerde ve farklı frekanslarda elektrik alan polimerin kürlenme süresi boyunca uygulanarak tek kristal KSN şablon parçacıklarının elektrik alan doğrultusunda yönelmesini sağlamaktadır. Elektrik alan doğrultusunda yönlendirilmiş KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin yapısal karakterizasyonları yapılmıştır. Kompozitlerin elektriksel karakterizasyonlarının yapılabilmesi için kompozitin her iki yüzeyine homojen olacak şekilde gümüş pasta kullanılarak elektrotlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elektrotlama işleminden sonra

kompozitlerin kutuplama, ferroelektrik davranış ve dielektrik davranışları analiz edilmiştir.

### 3.3. X-Işınları Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında üretilen tozların ve tek kristal şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin kristalografik analizleri için “Bruker D8 Advance” X-ışınları kırınımı cihazı kullanılmıştır. SN öncül tozu için XRD analizi 20° – 60° aralığı 1°/dakika tarama hızında olacak şekilde yapılmıştır. KSN şablon parçacıkları ve piezokompozitler için ise XRD analizi 20° – 50° aralığı 1°/dakika tarama hızında yapılmıştır.

### 3.4. Morfolojik Analizler

Ergiyik tuz sentezi kullanılarak üretilen KSN şablon parçacıklarının morfolojik analizi için hem de dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilmiş olan piezoelektrik kompozitlerin içerisindeki dolgu malzemesi olan KSN tek kristal şablon parçacıklarının elektrik alan doğrultusundaki yönelmelerini belirlemek için “Philips FEİ XL30 SFEG” modelindeki taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak üretilen KSN şablon parçacıklarının tek kristal özelliklerinin incelenmesi için “JEOL ARM 200 CFEG) geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılmıştır.

### 3.5. Dielektrik Karakterizasyon

Üretilen tüm piezokompozitlerin dielektrik karakterizasyonları için Hioki-3520-50 indüktans kapasitans rezistans (LCR) metre ölçüm cihazı kullanılmıştır. Dielektrik ölçümlerinde 1 kHz – 1 MHz frekans aralığında numunelerin seri ve paralel bağlı kapasitans ( $C_s$  ve  $C_p$ ), dielektrik kayıp ( $D$ ) parametreleri ölçülmüştür. 1 kHz – 1 MHz frekansları aralığında yapılan ölçümler sonucunda denklem 3.5’te verilmiş olan formül yardımı ile tüm numunelerin dielektrik sabitleri hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (3.1)$$

Denklem 3.5'teki C: kapasitans, d: numunelerin kalınlığı,  $\epsilon_0$ : vakumun geçirgenliği, A: numunelerin yüzey alanı ve K: dielektrik sabitini ifade etmektedir.

### **3.6. Ferroelektrik Karakterizasyon**

Tek kristal şablon parçacıklarına sahip dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin elektrik alan – polarizasyon (P-E) histerisiz ölçümlerinin yapılması için Presicion LC Radiant Tech. Ferroelektrik test istasyonu kullanılmıştır.

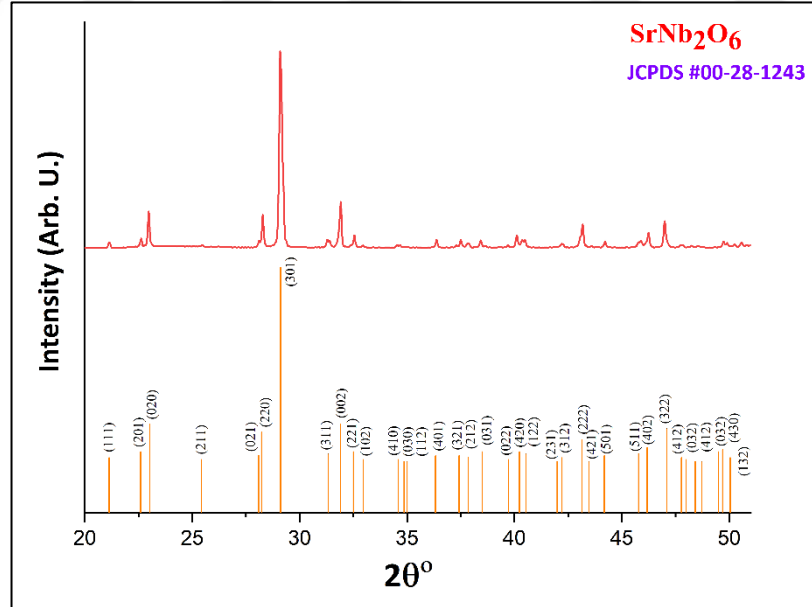
### **3.7. Piezokompozitlerin Kutuplanması**

Yönlendirilmiş tek kristal şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin kutuplama işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kutuplama işlemi için numuneler Julabo Innovative Technology yağ banyosu içerisine yerleştirildikten sonra GWInstek-2200 Marka doğru akım (DC) güç kaynağı ve Trek voltaj yükseltgeyici kullanılarak 100 kV/cm'lik elektrik uygulanarak 1 saat boyunca kutuplanmışlardır.

## 4. SONUÇLAR VE YORUMLAR

### 4.1. SN ve KSN Tozlarının XRD Sonuçları

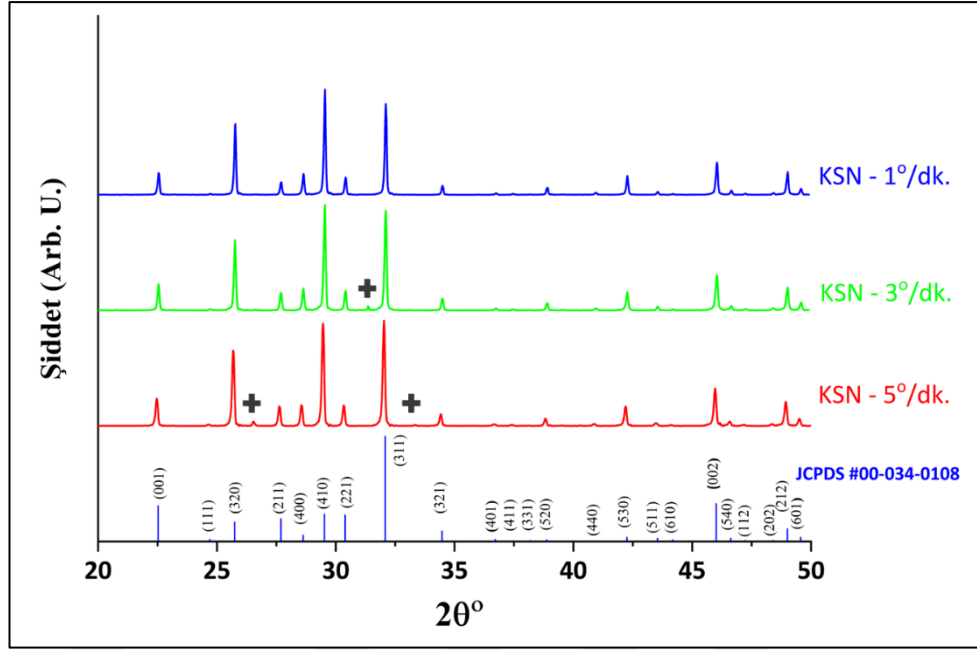
Deneysel çalışmalar kapsamında ilk önce ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak KSN şablon parçacıklarının üretimi yapılmıştır. Ergiyik tuz sentezi yönteminin tercih edilmesinin en temel sebebi geleneksel katı hal kalsinasyon yöntemi kullanılarak üretilen KSN seramiğinin neredeyse tamamına yakınının izotropik parçacıklardan oluştuğunun literatürde yapılan çalışmalarda belirtilmiş olmasıdır [Tanaka vd., 2007], [Alkoy 2012]. Bu yüzden KSN üretiminde ergiyik tuz sentezi yöntemi tercih edilmiştir. KSN şablon parçacıklarının üretimi için ilk önce SN öncül fazı üretilmiştir. Katı hal kalsinasyon yöntemi kullanılarak üretilen SN öncül fazının kristalografik analizi için XRD karakterizasyonu yapılmıştır. SN'a ait XRD deseni Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: SN öncül fazının XRD deseni.

Şekil 4.1'e göre şablon parçacıklarının üretiminde kullanılacak olan öncül SN tozunun ikincil faz içermediği ve oluşan bütün piklerin öncül faza ait oldu belirlenmiştir. SN öncül fazının pik şiddetleri ise referans XRD datasındaki pik şiddetleri ile uyushmaktadır.

Saf olarak üretimi gerçekleştirilen SN öncül fazı KCl tuzu ile ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak iğnesel morfolojideki tek kristal KSN şablon parçacıklarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Ergiyik tuz sentezi yöntemi için SN + KCl karışımının bilyeli değirmende daha homojen şekilde karışması için öncül faz ve tuz ilk önce agat havanda öğütülmüştür. Havanda öğütülen toz ve tuz karışımı daha sonra **Şekil 3.1**'de gösterilmiş olan adımlar izlenerek ergiyik tuz sentezi yöntemi ile iğnesel morfolojideki KSN şablon parçacıkları üretilmiştir. Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilen KSN şablon parçacıklarının kristalografik analizinde de XRD yöntemi kullanılmıştır. Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile şablon parçacıkları üretiminde üç farklı soğutma rejimi kullanılmıştır. Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilmiş olan KSN şablon parçacıklarına ait XRD deseni **Şekil 4.2**'de verilmiştir. **Şekil 4.2**'den de görüldüğü üzere tungsten bronz kristal yapısındaki KSN'nin tüm piklerinin oluştuğu gözlemlenmektedir. Şablon parçacıklarının referans XRD pikleri ile yapılan karşılaştırma sonucunda 3 tane pikin şiddetlerinin referans piklerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni XRD numunesi hazırlanırken şablon parçacıklarının istiflenmesi sonucu pik şiddetlerindeki farklılık meydana gelmesidir. XRD deseninden elde edilen bir başka sonuç ise ergiyik tuz sentezi yöntemi için uygulanan ısı işlemin farklı soğutma rejimlerine göre ikincil faz oluşumun soğutma hızının azaltılması ile azaldığı anlaşılmaktadır. Farklı soğutma rejimine sahip ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak üretilen KSN şablon parçacıklarının XRD deseni **Şekil 4.2**'de verilmiştir. Şekle göre hızlı soğutma rejimi tercih edilen KSN şablon parçacıklarının KSN'ye ait pikleri içermelerinin yanı sıra perovkit yapısındaki tabakalı  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  bileşiğine ait olan piklerinde varlığı belirlenmiştir. Bu durumun tuz miktarı ile ilgili olduğu literatürde rapor edilmiştir [Brahmaroute vd., 1999].  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  bileşiğinin üzerinde yapılan farklı çalışmaların sonucunda ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak KSN şablon parçacık üretiminde her zaman bu fazın olacağı belirtilmiştir, fakat Dursun ve ark. yaptığı çalışmanın sonucunda şablon parçacıklarının üretiminde tuz/toz oranı: 10/1 olduğu zaman  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  bileşiğinin oluşmadığını ve ayrıca tuz/toz oranı: 2/1 olduğu zaman içinse  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  bileşiğinin en düşük pik şiddetine sahip olduğunu rapor etmiştir [Dursun, 2010].



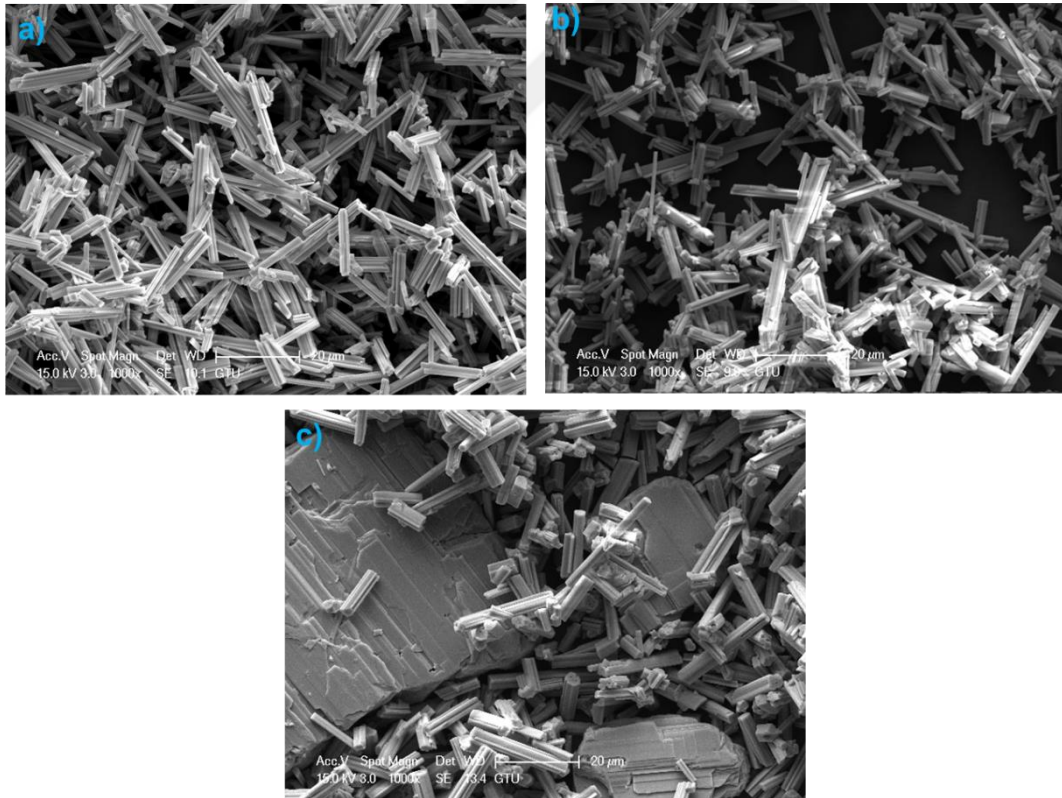
**Şekil 4.2:** Farklı soğutma rejimine sahip KSN şablon parçacıklarının XRD deseni.

Şekil 4.2’de ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilen KSN şablon parçacıklarının farklı soğuma hızlarında meydana gelen kristal yapısına ait X-ışınları kırınımı deseni verilmiştir. Sırası ile 1°/dakika, 3°/dakika ve 5°/dakika ile soğutma rejimi uygulanmıştır. Soğutma rejimi ne kadar yavaş olursa plakasal morfolojideki  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  kompozisyonuna ait pik şiddetlerinin azaldığı saptanmıştır ve daha da yavaş soğutma hızında ise  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  kompozisyonuna ait herhangi bir pik gözlemlenmemiştir. Bu durum SEM görüntüleri ile de desteklenmektedir.

## 4.2. KSN Şablon Parçacıklarının Oluşumu ve Morfolojik Analizi

KSN şablon parçacıklarının ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilmesinin sonucunda iğnesel şekilde oluşan morfoloji taramalı elektron mikroskobu kullanılarak belirlenmiştir. Farklı soğutma hızları kullanılarak üretilen şablon parçacıklarına ait farklı büyütmelelerde SEM görüntüleri Şekil 4.3’te verilmiştir. Şekil 4.3’e göre şablon parçacıklarının iğnesel morfolojide büyüme gösterdikleri anlaşılmaktadır. Fakat iğnesel morfolojideki şablon parçacıklarının tek bir iğnecik şeklinde olmadığı birden fazla iğneciğin bir araya gelerek birbirlerinin üzerinde büyüdüğü gözlemlenmektedir. Bu durumun temel sebebi ergiyik tuz sentezi yöntemi ile iğnesel şablon parçacıklarının üretimi için tercih edilen yöntemden kaynaklanmaktadır. SN –

KCl sisteminde KCl tuzu SN tozuna göre daha düşük ergime sıcaklığına sahiptir, bu yüzden sistemin kapalı pota içerisindeki ısıtma işlemi sırasında ilk önce KCl tuzu eriyerek sıvı faz haline geçmektedir. Sıvı faza geçen KCl tuzu SN tozlarını sararak SN tozlarının yeniden düzenlenmesine olanak sağlamaktadır. Sıvı faza geçmiş olan KCl tuzu tarafından çevrelenen SN öncül fazı çekirdekleyici ajan olarak davranacağı ve bu yüzden KSN iğnelerinin birbirleri üzerinde büyüyeceği literatürde rapor edilmiştir. Ayrıca eriyik haldeki KCl tuzunun sahip olduğu  $K^+$  iyonu hem sıvı haldeki KCl’de hem de KSN şablon parçacıklarının ana bileşeni olarak KSN’nin oluşmasında katkı sağlamaktadır. Çekirdekleyici ajan görevi gören SN üzerinden birden fazla iğne şeklindeki KSN büyümesi gerçekleştiği için elde edilen KSN şablon parçacıkları tek bir iğne şeklinde olmamaktadır. Bu durum literatürde basamaklı yüzey morfolojisi (stepwise surface morphology – SSM veya BYM) olarak bilinmektedir [Zhao vd., 2005]. Basamaklı yüzey morfolojisinin şematik olarak gösterimi Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



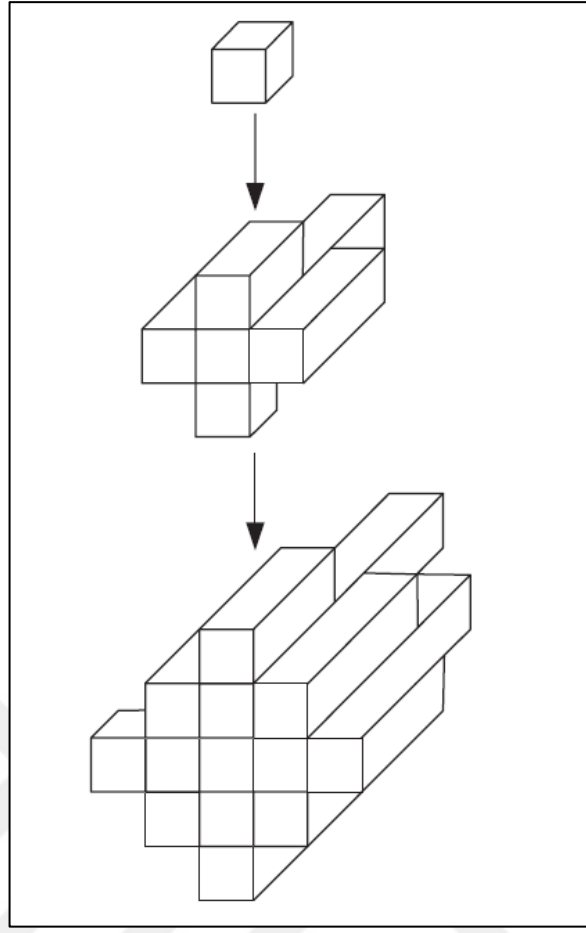
**Şekil 4.3:** Farklı soğutma rejimindeki KSN şablon parçacıklarının SEM görüntüsü, a) 1°/dakika, b) 3°/dakika ve c) 5°/dakika.

BYM'nin daha iyi anlaşılabilmesi için ilk önce KSN şablon parçacıklarının büyüme kinetiğinden bahsedilmesi gerekmektedir. Ergiyik tuz sentezi yöntemi tek kristal tane büyütme işlemi olduğu bilinmektedir. Bu yöntem iki aşamalıdır. İlk aşamada sıvı faz içerisinde çekirdeklenme işlemi daha sonra tane büyümesi gerçekleşmektedir. Tane büyümesi işlemi genel olarak Ostwald Ripening olarak literatürden bilinmektedir. Ostwald Ripening büyük tanelerin daha küçük taneleri tüketerek büyümesi işlemidir ve Ostwald-Freundlich eşitliği ile ifade edilmektedir. Bu eşitlik 4.1'de verilmiştir.

$$S = S_0 \exp \frac{4\gamma_{SL}V_m}{RTd} \quad (4.1)$$

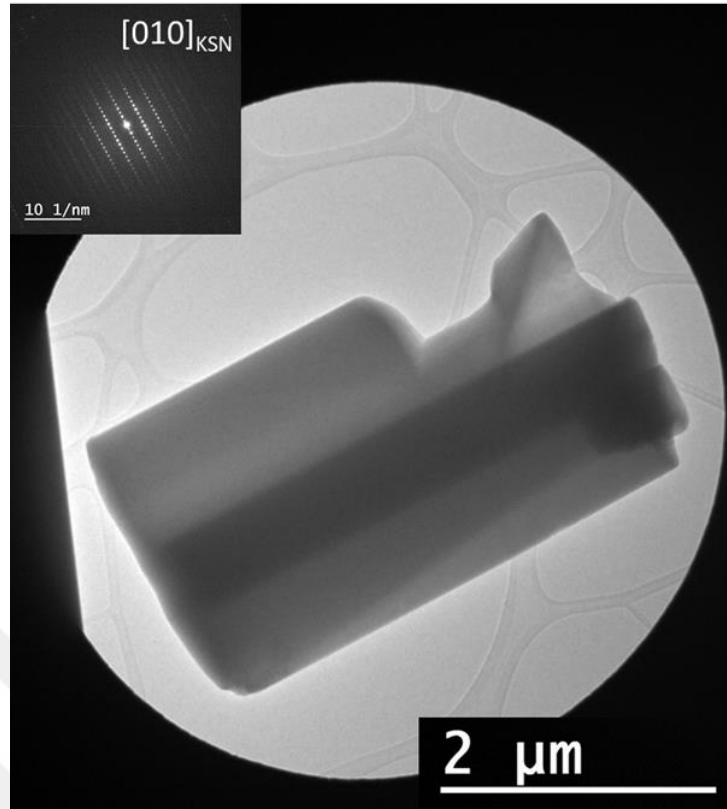
Çekirdeklenme işlemi boyunca boyutu  $d$  olan partikülün çözünürlüğü, sıvı ile katının arayüzeyinin enerjisi ( $\gamma_{sl}$ ) ile orantılıdır.  $V_m$  katı hacimini,  $S$  düz(flat) yüzeyin çözünürlüğünü,  $R$  ve  $T$  ise gaz sabiti ve sıcaklığı tanımlayan ifadelerdir. Ergiyik tuz sentezi yönteminde katı hal kalsinasyon yöntemine göre iyonların hareketliliği çok daha fazladır. İyon hareketliliğinin fazla olmasının sonucunda şablon parçacıklarının büyümesi çok hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. KSN şablon parçacıklarının katı hal kalsinasyon yöntemi yerine ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilmesinin temel sebebi bu durumdur [Roy vd., 2008], [Zhao vd., 2005]. KSN'nin iğnesel morfolojide büyüme eğilimi sergilemesi ise TTB kristal yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde Czochralski yöntemi ile bu kristal yapıdaki tek kristallerin birçoğunun  $c$  eksenindeki büyüme hızının diğer eksenlerdeki büyüme hızlarına göre daha fazla olduğu ve bu durumun sonucunda TTB kristal yapısındaki tek kristallerin iğnesel olarak büyüdüğü belirtilmiştir [Neurgaonkar, 1993].

Ayrıca Şekil 4.3c'den görüldüğü üzere ergiyik tuz sentezi yönteminde kullanılan fırının soğutma hızının 5 derece/dakika olduğu zaman tabakalı perovskit yapıdaki veya plaka şeklindeki  $Sr_2Nb_2O_7$  bileşiğinin oluştuğu görülmektedir. Soğutma hızının azaltılması ile plakasal yapıdaki ikincil faz  $Sr_2Nb_2O_7$ 'nin oluşmadığı da SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.4:** Basamaklı yüzey morfolojisi [Zhao,2005].

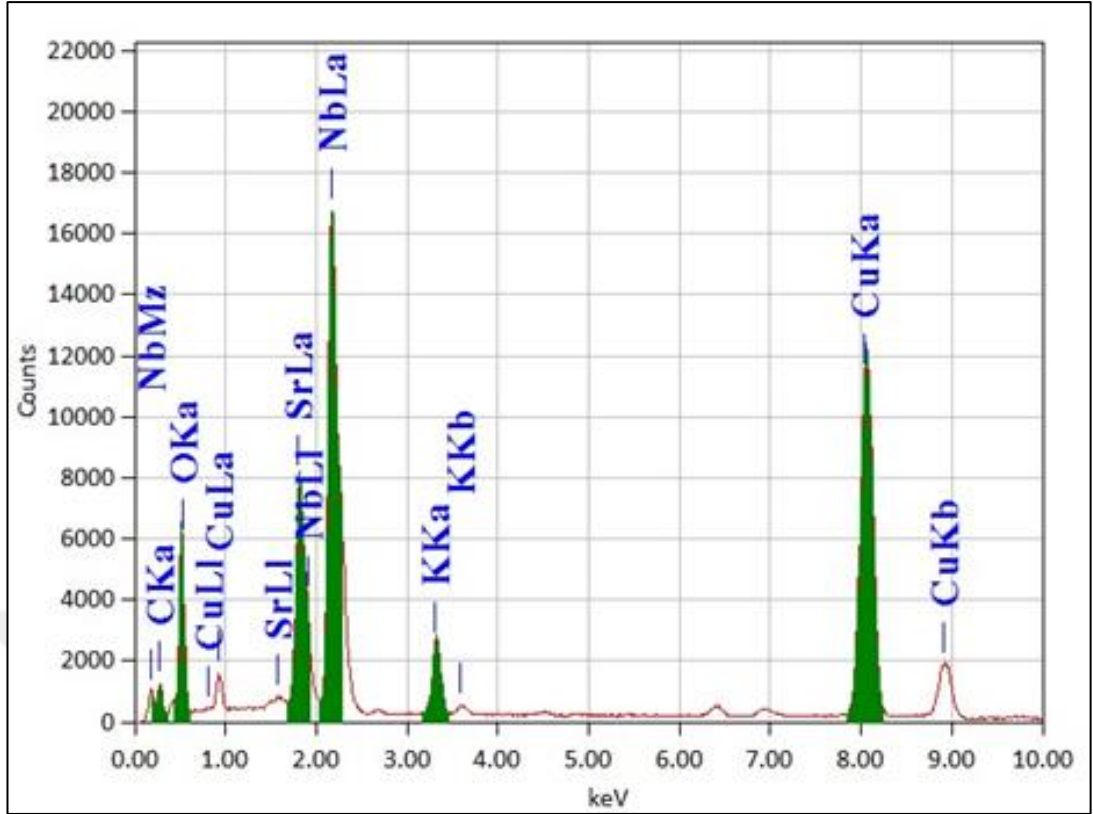
Ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak üretilen şablon parçacıklarının tek kristal olarak büyüme davranışı sergilediğinin belirlenmesinde geçirimli elektron mikroskobu TEM analizinin kullanıldığı daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Yapılan TEM analizi sonucunda elde edilen görüntüler **Şekil 4.5**'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.5:** İğnesel morfolojide büyüme davranışı gösteren KSN şablon parçacıklarının TEM görüntüsü ve [010] doğrultusundan alınmış elektron kırınım deseni.

Şekil 4.5'te verilmiş olan ve ayrıca [010] doğrultusundan alınmış elektron kırınım deseninden de anlaşılacağı üzere ergiyik tuz sentezi yöntemi kullanılarak üretilen iğnesel morfolojideki KSN şablon parçacıklarının tek kristal yapısında olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.3'te verilen SEM görüntülerinden KSN şablon parçacıklarının c-eksenine paralel şekilde BYM ile büyüdükleri belirlenmiş olmalarının yanı sıra yapılan TEM analizlerinin sonucunda elde edilen bir başka veri ise iğnesel KSN şablon parçacıklarının birbirleri üzerinde büyüdükleri anlaşılmaktadır.

KSN şablon parçacıklarının oluşmasına neden olan katyonların homojen bir dağılıma sahip oldukları Şekil 4.6'da verilen EDS analizinin sonucunda belirlenmiştir. Yapılan EDS analizinin sonucunda yaklaşık 0.9 keV yakınlarındaki düşük şiddetteki piklerin ve 8-9 keV yakınlarındaki yüksek şiddetteki piklerin TEM'de kullanılan numune tutucuya ait olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.6: KSN şablon parçacıklarının elementel analizi

### 4.3. Dielektroforesis Yöntemi ile Üretilen Kompozitlerin XRD Analizleri

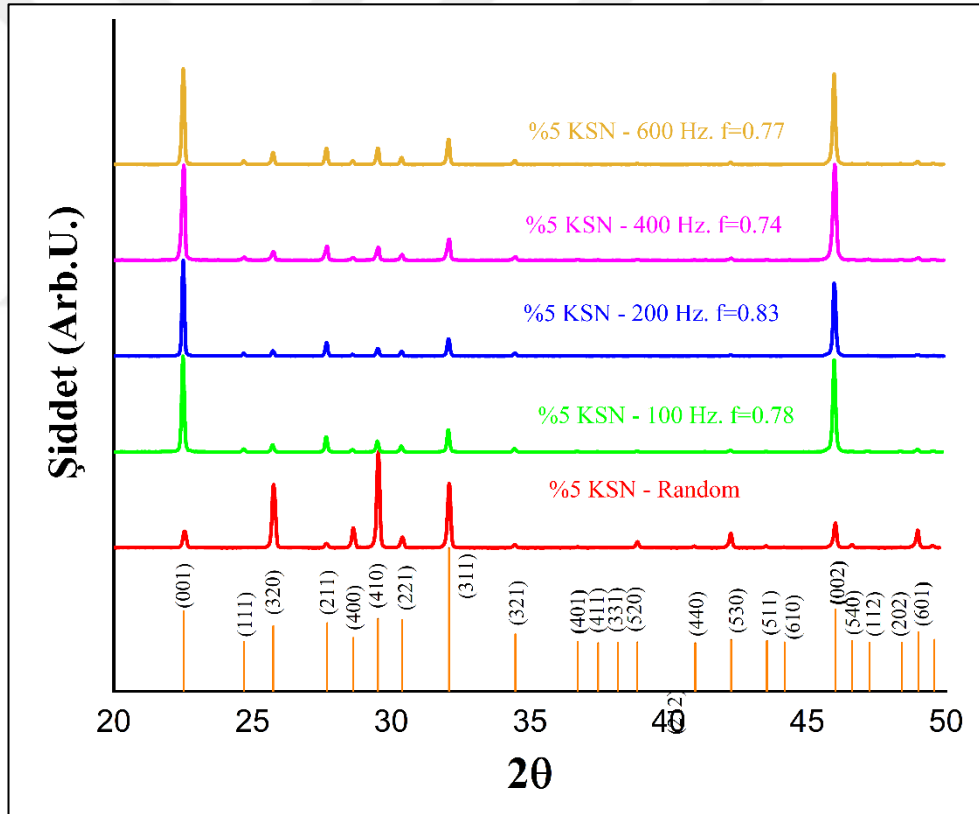
Tek kristal KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitler 2 kV/mm'lik alternatif akım kullanılarak oluşturulan elektrik alan uygulanmasının sonucunda üretilmiştir. Uygulanan elektrik alan 100, 200, 400 ve 600 Hz frekanslarına sahiptir. Piezokompozitlerin dolgu malzemesi olarak kullanılan tek kristal şablon parçacıkların anizometrik olmalarından kaynaklı olarak şablon parçacıklarının elektrik alan doğrultusunda, sıvı polimer matrisin içerisindeki şablon parçacıklarının polar eksenleri doğrultusunda yönlenmeleri beklenmektedir. Ayrıca KSN şablon parçacıklarının hem tek kristal olması hem de anizometrik morfolojiye sahip olmasının sonucunda polar eksenleri doğrultusunda yönlenmesi için farklı etkenlerde bulunmaktadır. Bu etkenlerden bir tanesi de tek kristal KSN şablon parçacıklarının dielektrik uygunluğudur. KSN şablon parçacıklarının dielektrik uygunluğunun anizotropik olmasından kaynaklı uygulanacak olan elektrik alana KSN şablon parçacıklarının dielektrik olarak verecekleri tepkinin yöne bağlı olacağı yönündedir. Tek kristal KSN şablon parçacıklarının dielektrik sabitinin dielektrik uygunlukla doğrudan ilişkili

olması sonucunda c-eksenindeki dielektrik sabitinin a-eksenine göre daha yüksek olacağı bilinmektedir. Bu anizotropi kristal yapıdaki dipollerin ve ferroelektrik domainlerin yönlenmesinden kaynaklanmaktadır **[Giess vd., 1967]**. Dielektrik anizotropinin derecesi c eksenindeki dielektrik sabitinin a eksenindeki dielektrik sabitine oranı ile ifade edilir ve bu oran sıcaklık, kristalin bileşimi ve uygulanan elektrik alanın şiddetine göre değişim gösterebilmektedir **[Neurgaonkar vd., 1984]**. Fakat KSN ve SBN gibi TB yapısındaki malzemeler için bu oranın 1'den çok daha büyük olduğu literatürde belirtilmiştir. Bu anizotropinin malzemenin kristal eksenlerinin oryantasyonuna bağlı olarak uygulanan elektrik alana farklı şekilde cevap vereceği sonucu elde edilmektedir. Ayrıca anizometrik parçacıklar kullanıldığı taktirde polarizasyon dielektrik duyunluğun daha yüksek olduğu yönde yüksek olacaktır. Bu durum polarizasyonun unipolar olduğu TTB kristal yapısındaki ferroelektrik malzemeler içinde geçerli olmaktadır **[Sarı vd., 2025]**.

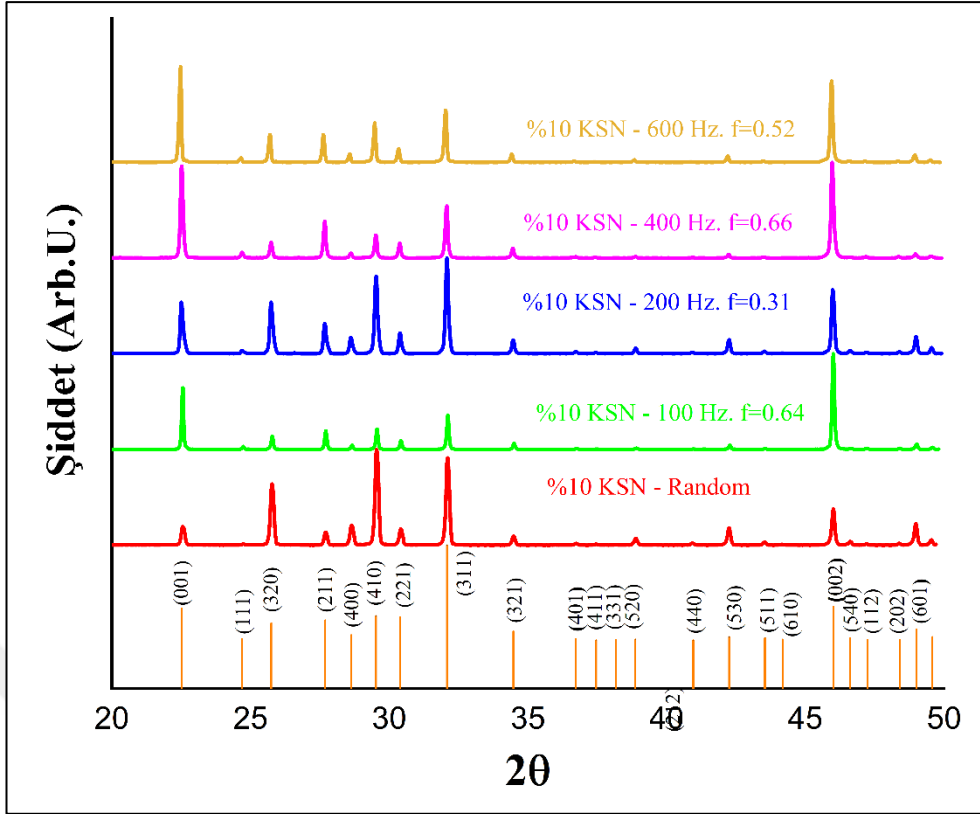
Literatürde dielektroforesis yöntemi ile üretilen piezoelektrik kompozit malzemelerde dolgu malzemesi olarak kullanılan farklı morfolojilerdeki kübik, küresel **[Randall, 1992]**, **[Bowen vd., 1994]**, **[Van den Ende vd., 2012]**, **[Deutz vd., 2017]**, **[Gao vd., 2022]**, **[Macarenhas, 2015]** partiküllerin alternatif akım kullanılarak uygulanan elektrik alan doğrultusunda yönlenmesiyle oluşan yapının zincir yapısı olarak tanımlandığından daha önceden bahsedilmiştir. Ancak söz konusu çalışmalarda kullanılan partiküller eşeksenli morfolojide ve polikristalin yapıda olduğu için elektrik alana maruz kaldıklarında tercihli bir yönlenmeye sahip olmaları söz konusu olmamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilen iğnesel morfolojideki tek kristal şablon parçacıklarının kullanılmasının başlıca nedenleri tek kristal olarak büyüyen şablon parçacıklarının büyüme doğrultusunda diğer doğrultularına göre daha yüksek ferroelektrik ve piezoelektrik özellik gösteriyor olması ve elektrik alan uygulanması sonucunda polar eksenleri (büyüme doğrultusu) boyunca yönlenme eğilimi gösterecek olmalarından kaynaklı olarak eş eksenli partiküllerin (küresel, kübik) kullanılması sonucunda üretilen quasi 1 – 3 piezokompozitlere göre daha yüksek ferroelektrik ve piezoelektrik özellik sergileyeceklerinin öngörülmesinden kaynaklanmaktadır.

Üretilen piezokompozitlerin yapısal karakterizasyonlarına XRD yöntemi kullanılarak başlanmıştır. XRD yönteminde tek kristal şablon parçacıkları kullanılarak üretilen kompozitlerin şablon parçacıklarının yönlenmesi sonucunda XRD desenindeki bazı

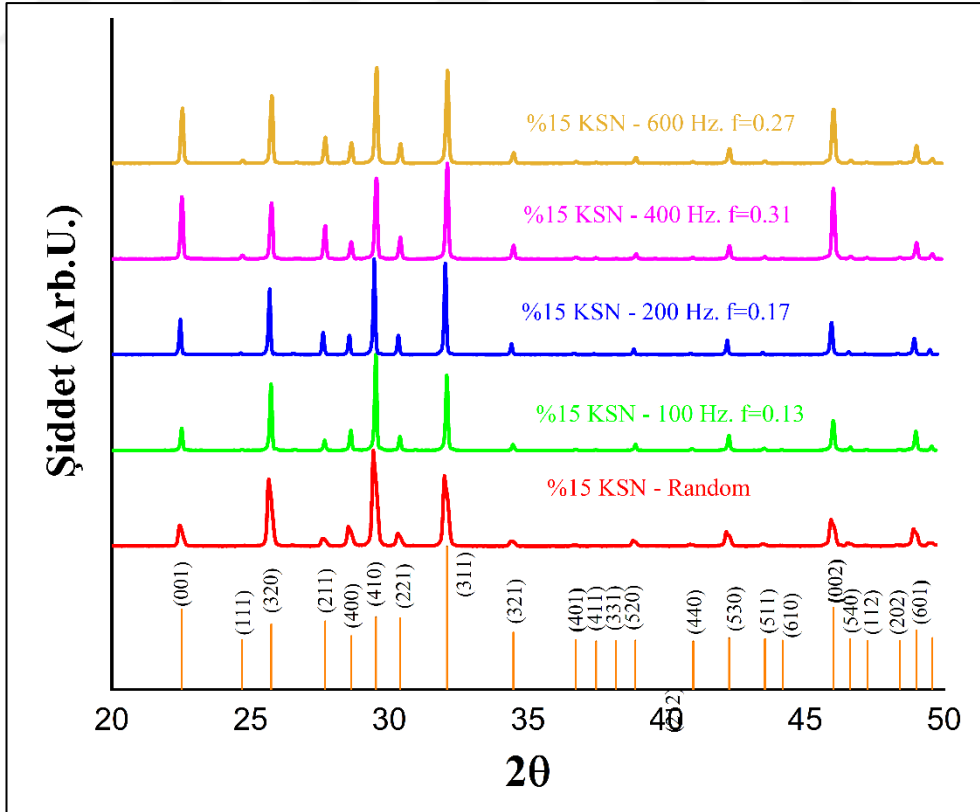
piklerin diğer piklere göre daha şiddetli olması beklenmektedir. Bu durum monolitik piezoelektrik seramiklerin şablon parçacıkları kullanılarak doku kazandırılmaları ile aynı davranıştır. Nasıl ki doku kazandırılmış perovskit yapılı piezoelektrik seramiklerde belirli düzlemlerdeki [(100)/(200)] pik şiddetlerinde artış gözlemlenmesi sonucunda piezoelektrik özelliklerde artış gözlemleniyorsa KSN şablon parçacıklarının elektrik alan doğrultusunda yönlenmesi sonucunda üretilen piezokompozitler doku kazandırılmış olmaktadır. **Şekil 4.7**'de hem dielektroforesis yöntemi ile üretilen hacimce %5 KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin hem de aynı hacim miktarına sahip ancak elektrik alan uygulanmadan üretildiği için rastgele yönlenmiş KSN şablon parçacıkları ile üretilmiş olan piezokompozitlerin XRD desenleri verilmiştir.



**Şekil 4.7:** %5 KSN şablon parçacıklarına sahip kompozitlerin XRD desenleri.



Şekil 4.8: %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin XRD deseni.



Şekil 4.9: %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin XRD deseni.

**Şekil 4.7**'de hacimle %5 KSN dolgu malzemesine sahip olan piezokompozitlerin XRD deseni verilmiştir. XRD desenine göre dielektroforesis yöntemi ile üretilen piezokompozitlerin (001) ve (002) düzlemlerindeki pik şiddetlerinin diğer pik şiddetlerine göre daha yüksek oldukları belirlenmiştir. Dielektroforesis yöntemi ile üretilmiş olan kompozitlerin (001) ve (002) düzlemlerine ait piklerin haricinde pik bulunması KSN şablon parçacıklarının tamamen yönlenmediğinin kanıtıdır. KSN şablon parçacıklarının yönlenme miktarının bulunması için Lotgering faktörü [Lotgering, 1959] hesaplamaları kullanılmıştır. Lotgering faktörü kullanılarak yönlenme miktarı şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$f_{(00l)} = \frac{P_{(00l)} - P_0}{1 - P_0} \quad (4.2)$$

$$P_{(00l)} = \frac{\sum I_{(00l)}}{\sum I_{(hkl)}} \quad (4.3)$$

$$P_0 = \frac{\sum I_{0(00l)}}{\sum I_{0(hkl)}} \quad (4.4)$$

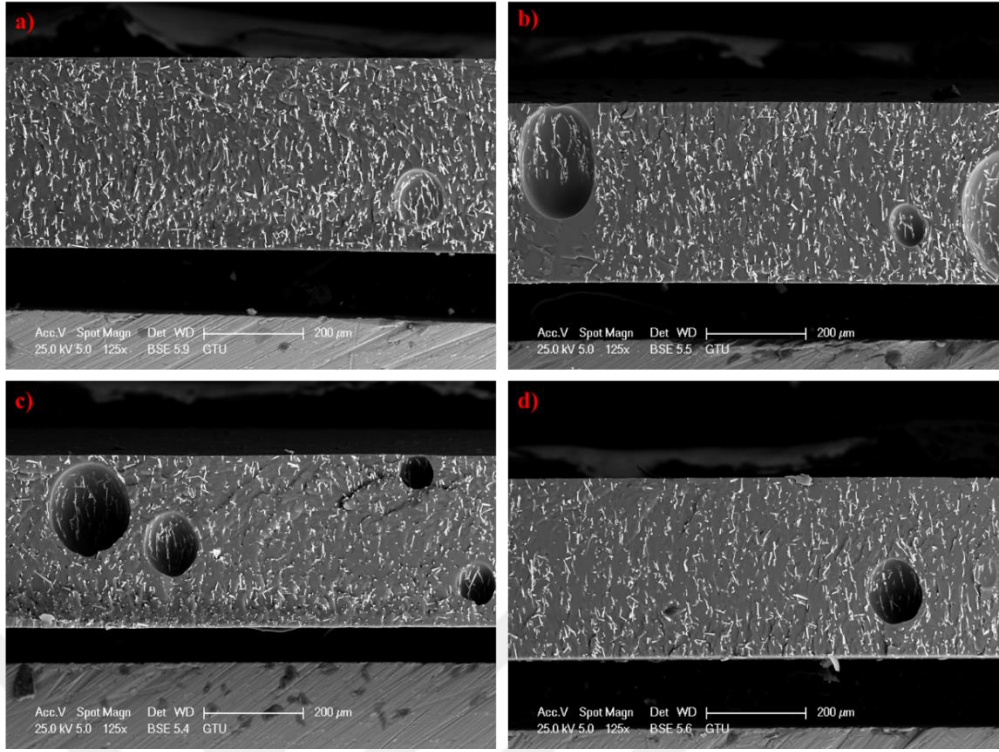
Denklem 4.2'deki  $f$  yönlenme oranını belirtmektedir. Rastgele (random) şeklindeki yönlenme için bu ifade sıfır değerini almaktadır. Yönlenmenin %100 olduğu durumda ise  $f$  ifadesi 1 değerini almaktadır. Eşitlikteki  $I$  düzlemlerin pik şiddetlerini belirtmektedir. KSN şablon parçacıklarının karakteristik piklerinin  $20^\circ - 50^\circ$  aralığında olduğu bilinmektedir. Hacimce %5 – 20 aralığında KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitler 100,200,400 ve 600 Hz frekansları kullanılarak üretilmiştir ve her bir numunenin ayrı ayrı Lotgering faktörü hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaların sonucunda numunelerin Lotgering faktörü değerleri tablo 4.1'de verilmiştir. XRD analizlerinin sonucunda KSN şablon parçacıklarının hacimce artış göstermesi ile şablon parçacıklarının polimer matris içerisindeki yönlenmelerinin azalmakta olduğu hem piezokompozitlerin XRD desenindeki (001) ve (002) pik şiddetlerinin azalmasından hem de analitik olarak yapılan Lotgering faktörü hesaplamalarının sonucunda elde edilmiştir. Bu durumun başlıca nedenleri piezokompozitlerin bir diğer yapısal karakterizasyon yöntemi olan SEM analizlerinin anlatıldığı bölümde detaylıca yorumlanmış ve tartışılmıştır.

**Tablo 4.1:** Piezokompozitlerin Lotgering faktörü değerleri.

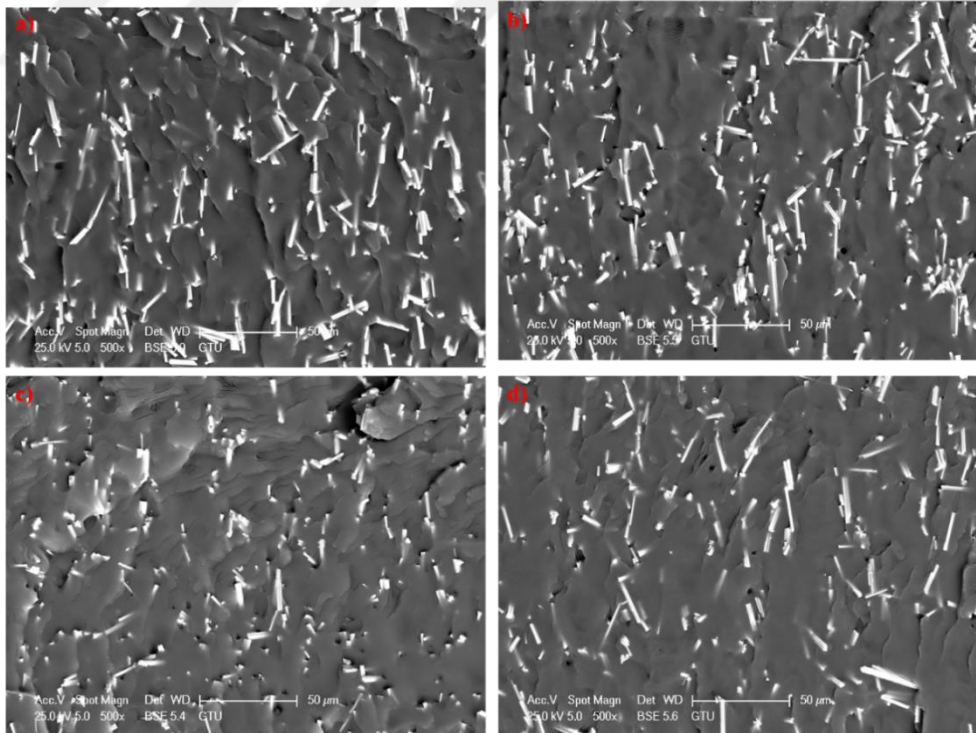
| <b>KSN miktarı</b> | <b>Frekans (Hz)</b> | <b>Lotgering Faktörü</b> |
|--------------------|---------------------|--------------------------|
| <b>5%</b>          | 100                 | 0.78                     |
|                    | 200                 | 0.83                     |
|                    | 400                 | 0.74                     |
|                    | 600                 | 0.77                     |
| <b>10%</b>         | 100                 | 0.64                     |
|                    | 200                 | 0.31                     |
|                    | 400                 | 0.66                     |
|                    | 600                 | 0.52                     |
| <b>15%</b>         | 100                 | 0.13                     |
|                    | 200                 | 0.17                     |
|                    | 400                 | 0.31                     |
|                    | 600                 | 0.27                     |

#### **4.4. Piezokompozitlerin SEM Görüntüleri**

Piezokompozitlerin XRD yöntemi kullanılarak yapılan karakterizasyonlarından sonra her bir kompozitin kesit yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Kompozitlerin üretimi için tercih edilen matris fazının polimer malzeme olmasının sonucunda numunelerin kesitlerinden SEM görüntüsü alınabilmesi için piezokompozitler sıvı azot kullanılarak kırılmıştır. Sıvı azot yardımıyla kırılan kompozitlerin matris fazı olan polimerin deformasyona uğramayacak olması dolgu malzemesi olarak kullanılan şablon parçacıklarının uygulanan elektrik alan doğrultusundaki yönlenmeleri hakkında alınacak SEM görüntülerinin daha belirleyici olmasını sağlamaktadır. SEM görüntülerinin alınması sırasında polimer matris fazı ile şablon parçacıklarının arasındaki kontrast farkını daha belirgin hale getirmek amacıyla geri saçınım elektron (back scatter electron - BSE) dedektörü kullanılarak piezokompozitlerin kesit görüntüleri alınmıştır.

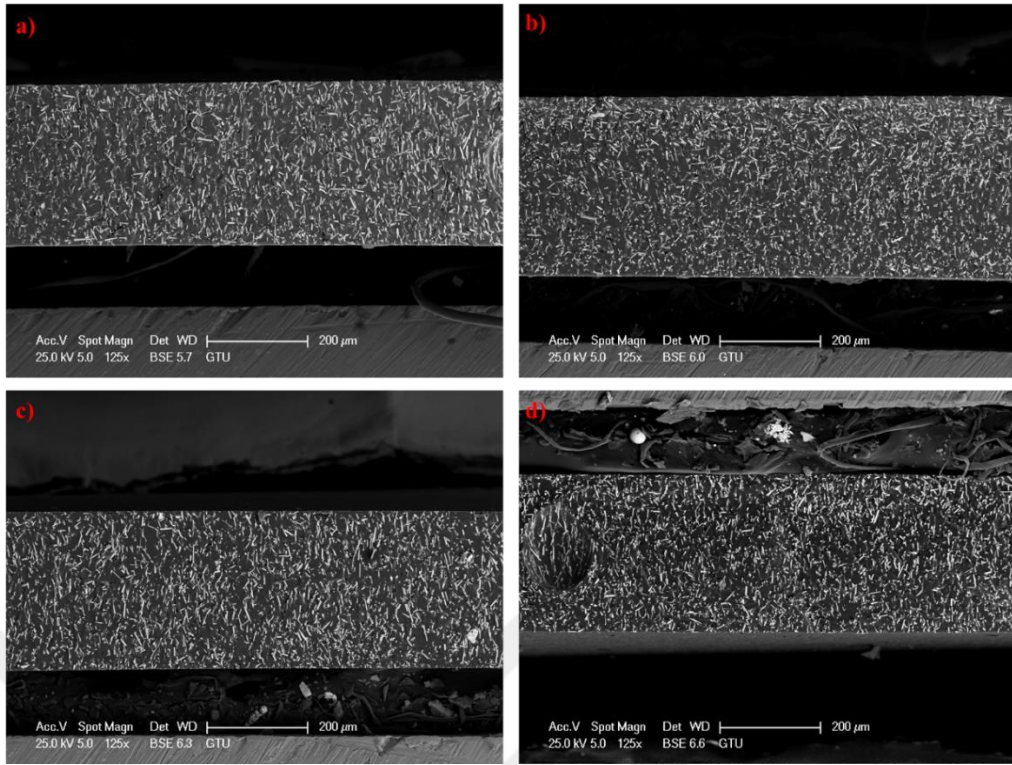


**Şekil 4.10:** Hacimce %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 125x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz.

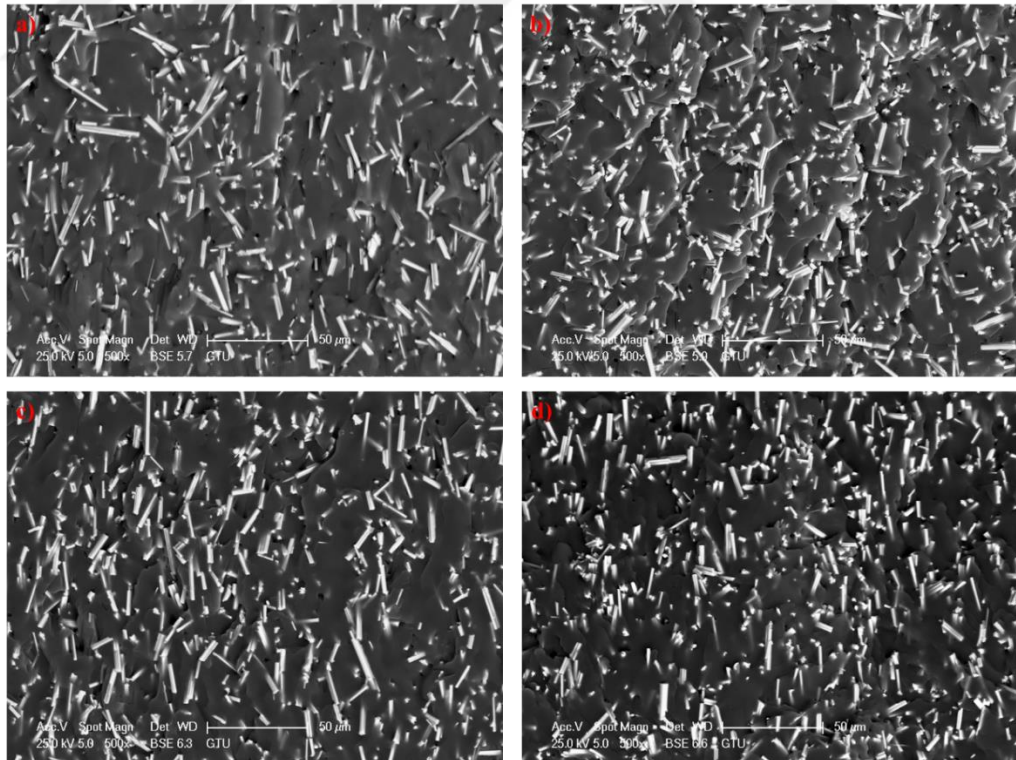


**Şekil 4.11:** Hacimce %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 500x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz.

**Şekil 4.10** ve **Şekil 4.11** hacimce %5 KSN şablon parçacığı içeren piezokompozitlerin farklı büyütme ölçeklerindeki kesit görüntülerini içermektedir. SEM görüntülerine göre kullanılan iğnesel morfolojideki şablon parçacıklarının polimer matris fazı içerisinde homojen şekilde dağılmış oldukları görülmektedir, aynı zamanda yapı içerisinde hava kabarcıklarının olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalar sırasında tercih edilen polimer matris fazının kürlenme süresinin kısa olmasının sonucu olarak vakuma alma işleminin kısa tutulmasına neden olduğu için yapı içerisindeki hava kabarcıkları tamamen elimine edilememiştir. Yapının içerisinde kabarcıklarının bulunması elektrik alan kullanılarak yönlendirme işlemi sırasında sıvı haldeki polimer matris fazında dielektrik bozunmaya yol açtığı deneysel çalışmalar sırasında gözlemlenmiştir ve yapı içerisinde kalan bu hava kabarcıkları tercih edilen bir durum değildir. Fakat literatürdeki yapılan çalışmalar sonucunda boşluklu şekilde üretilen piezokompozitlerin dielektrik sabitini azalacağı hakkında Khanbareh tarafından rapor edilmiştir. Dielektrik sabitinin azalması sonucunda piezokompozitlerin  $g_{33}$  değerlerinde artış olduğu da yine Khanbareh tarafından raporlanmıştır [**Khanbareh vd., 2017**]. SEM görüntülerinden de anlaşıldığı üzere tek kristal KSN şablon parçacıklarının uygulanan elektrik alanına bağlı olarak elektrik alan yönünde yönlendikleri görülmektedir. Şablon parçacıklarının yönlendirilmesinde polimer matris fazının viskozitesinin öneminden daha önce bahsedilmiştir. Viskozitenin yanı sıra bir diğer parametrede dolgu malzemesinin parçacık boyutudur. KSN şablon parçacıklarının parçacık boyutu literatürde kullanılan dolgu malzemelerinden daha fazladır, bu durum homojen şekilde dağılmış olan şablon parçacıklarının sıvı polimer matris içerisinde yönlendirilmesi üzerinde etki etmektedir. **Şekil 4.10**'daki yüksek büyütme ölçeklerindeki SEM görüntülerinden de anlaşılabileceği üzere hacimce düşük miktarda KSN şablon parçacıklarının kullanılmasında bile parçacık boyutunun fazla olmasından kaynaklı şablon parçacıkları birbirleriyle etkileşime girmektedirler.

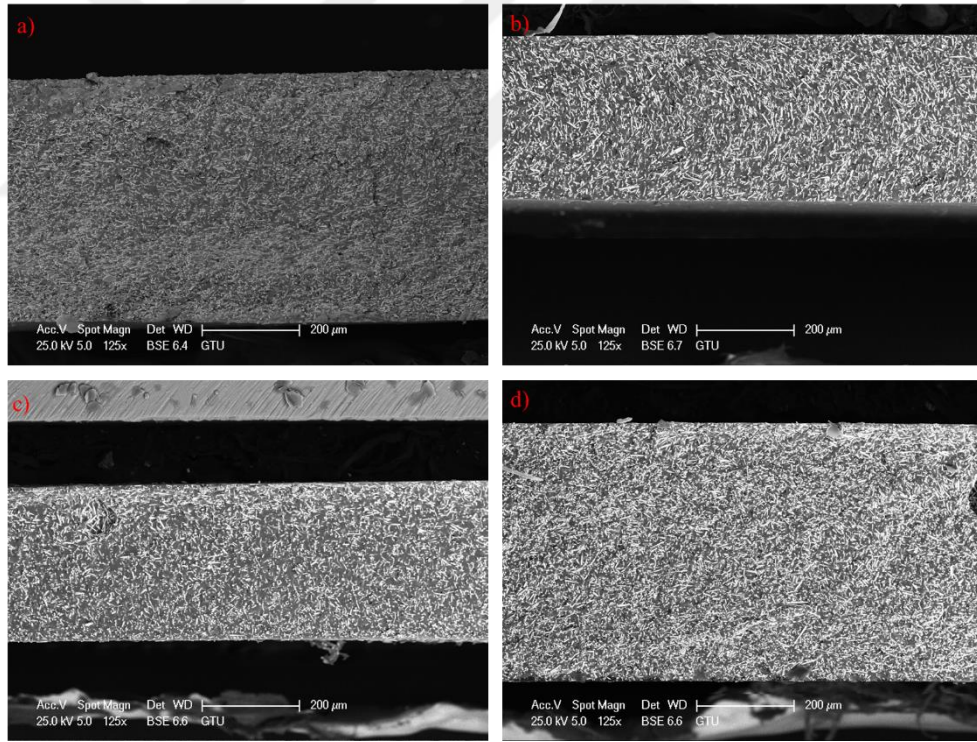


**Şekil 4.12:** Hacimce %10 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 125x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz.

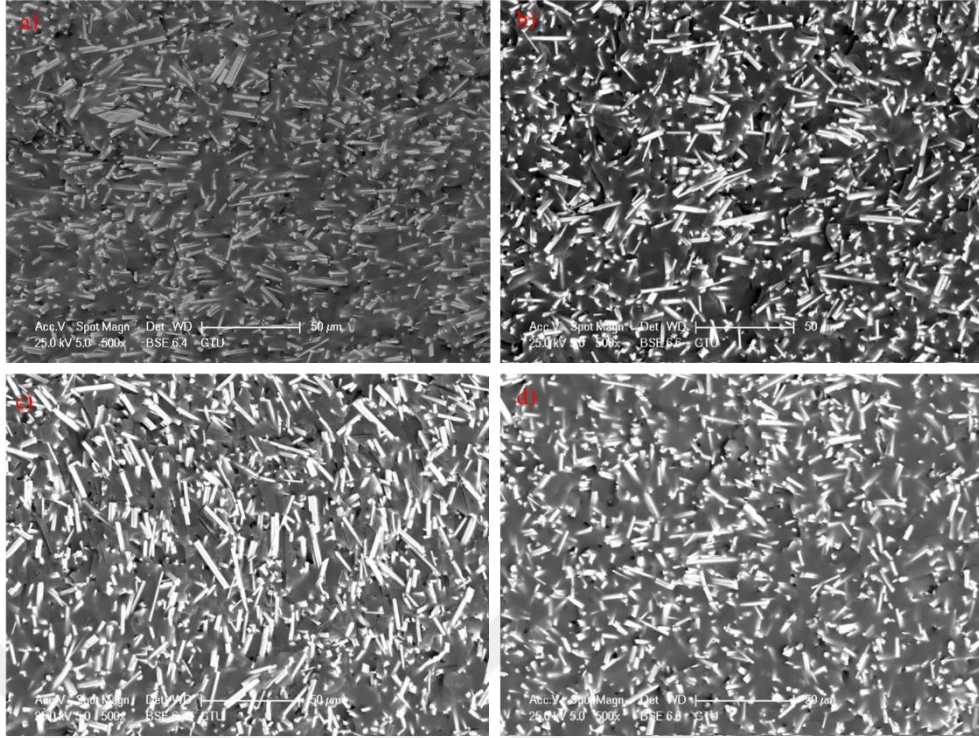


**Şekil 4.13:** Hacimce %10 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 500x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz.

**Şekil 4.12'**de %10 KSN şablon parçacığı içeren piezokompozitlerin 125x'teki görüntüsü verilmiştir. KSN şablon parçacıklarının polimer matris fazı içerisinde homojen şekilde dağılım gösterdiği SEM görüntüsünden anlaşılmaktadır. Hacimce %10'luk piezokompozitlerde 600 Hz. Frekans kullanılarak üretilen piezokompozit haricinde hava kabarcığının olmadığı gözlemlenmektedir. **Şekil 4.13'**teki yüksek büyütmelerdeki SEM görüntülerinden anlaşılabacağı üzere hacimce KSN miktarı arttıkça şablon parçacıkları yönlendirme işlemi sırasında birbirleri ile etkileşime girerek iğnesel morfolojideki şablon parçacıklarının yönlenmelerini azaltıcı yönde etkilemektedir. Şablon parçacıklarının miktarının artırılmasının bir diğer sonucu da polimer matris fazının viskozitesinin artmasıdır ve viskozite artışı da yönlenmenin üzerindeki önemli parametrelerdendir. XRD analizleri sonucunda yapılan Lotgering faktöründeki azalmanın sebepleri arasında şablon parçacıklarının birbirleri ile etkileşime girmeleri ve şablon parçacıklarının miktarının artmasının sonucunda viskozitelerinin artması olmaktadır.

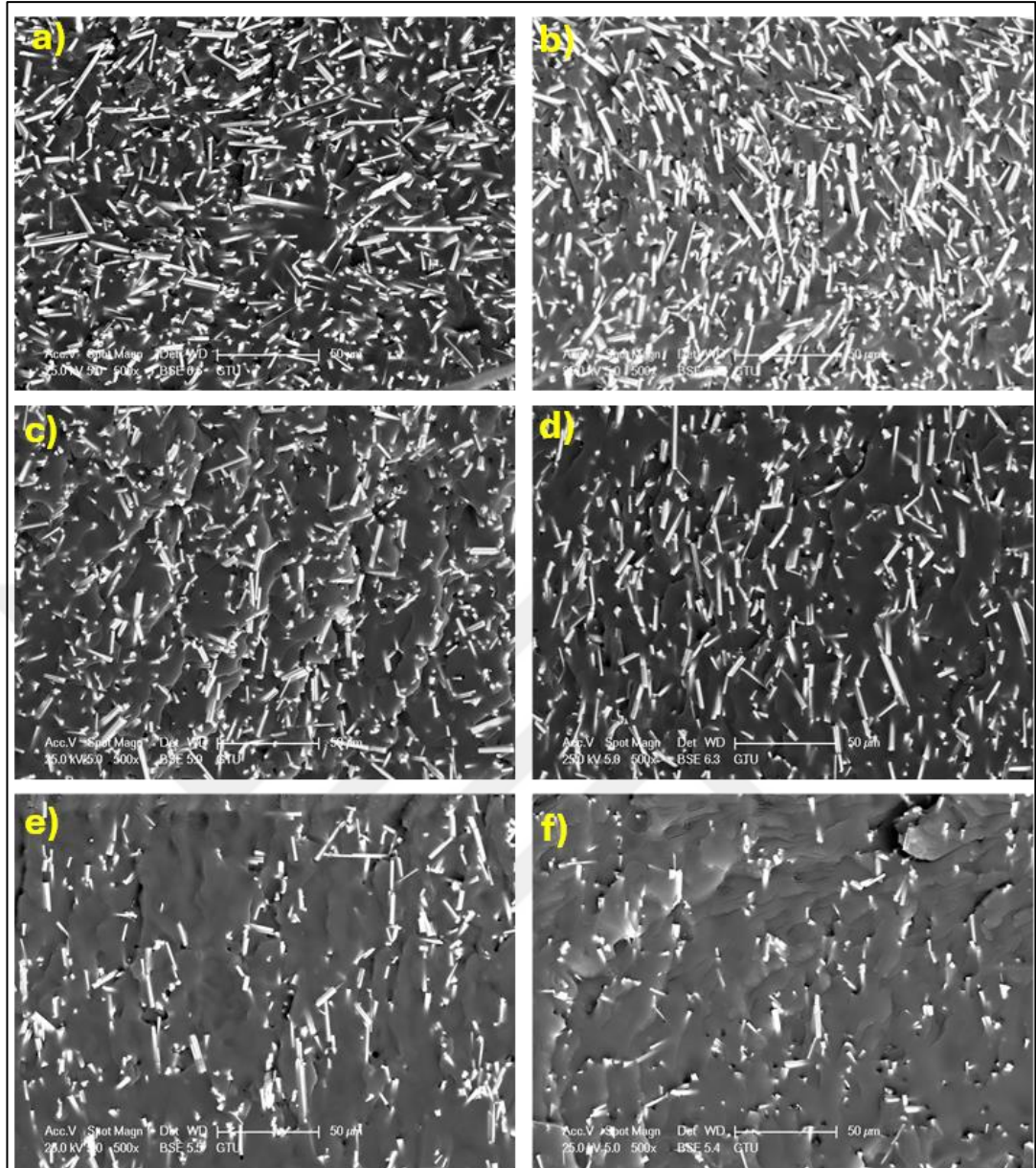


**Şekil 4.14:** Hacimce %15 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin genel görüntüsü a) 200 Hz, b) 400 Hz, c) 600 Hz.



**Şekil 4.15:** Hacimce %15 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin 500x görüntüsü a) 100 Hz, b) 200 Hz, c) 400 Hz ve d) 600 Hz.

Şekil 4.14'te ve Şekil 4.15'te hacimce %15 KSN şablon parçacıkları kullanılarak üretilmiş olan piezokompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şablon parçacıkları %5 ve %10 şablon parçacıkları içeren kompozitlerde olduğu gibi matris içerisinde homojen şekilde dağılım göstermişlerdir. Her ne kadar şablon parçacıkları matris içerisinde homojen şekilde dağılmış olsalar da KSN miktarı %15 seviyelerine arttırıldığında şablon parçacıklarının polimer matris fazı içerisindeki yoğunlukları iyice arttığı için hem viskozite hem de şablon parçacıklarının birbirleri ile olan etkileşimlerinin artmakta olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bu durumun sonucunda şablon parçacıklarının yönlenmesini olumsuz yönde etkilemektedir. KSN şablon parçacıklarının unipolar ferroelektrik malzeme olmasından dolayı yönlenme miktarının azalması sonucunda hem  $d_{33}$  değerleri hem de  $g_{33}$  değerleri azalacaktır. Dielektrik sabiti şablon parçacıklarının miktarı ile doğrudan ilişkilidir.



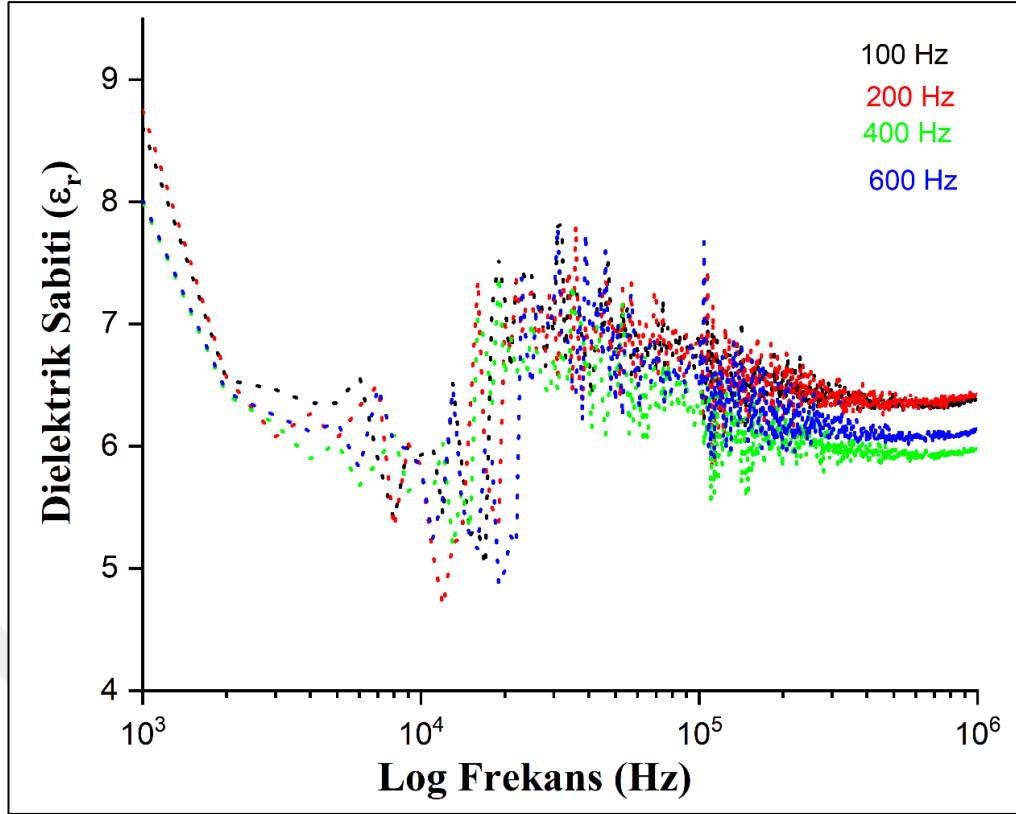
**Şekil 4.16:** Yönlenmeye bağlı olarak piezokompozitlerin SEM görüntüsü. Sırası ile a ve b %15 KSN 200 ve 400 Hz, c ve d %10 KSN 200 ve 400 Hz ve e ve f %5 KSN 200 ve 400 Hz.

Şekil 4.16’da yönlenmenin en yüksek olduğu piezokompozitler ve piezokompozitlerin üretimi sırasında kullanılan frekanslara ait SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.16’ya göre KSN şablon parçacıklarının miktarının artması ile şablon parçacıklarının birbirleri ile etkileşime girdikleri ve yönlenmenin azaldığı görülmektedir. Hem hacimce KSN miktarının azalması hem de frekans değerlerinin azalması ile KSN şablon parçacıklarının yönlenme miktarının arttığı yapılan Lotgering faktörü analizlerini desteklemektedir. Hacimce daha az miktardaki KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin daha yüksek yönlenmeye sahip olmasının nedenlerinden biri

de sıvı haldeki polimer matris fazı içerisinde dağılmış olan KSN şablon parçacıklarının birbirleriyle daha az etkileşime girmesini sağlayacak olan bölgelerin daha fazla bulunmasıdır. Sonuç olarak farklı miktardaki şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin SEM analizleri sonucunda şablon parçacıklarının polimer matris fazı içerisinde homojen şekilde dağılıma sahip oldukları, hacimce şablon parçacıklarının miktarının arttıkça yönelmenin azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durumun temel sebepleri arasında şablon parçacıklarının miktarının artması sonucunda viskozitenin artması, kullanılan şablon parçacıklarının literatürde tercih edilen kübik veya küresel dolgu malzemelerine göre daha büyük parçacık boyutuna sahip olmasının sonucunda şablon parçacıklarının birbirleri ile etkileşime girmeleri ve yönlendirme işlemi sırasında birbirlerinin yönelmelerini azaltacak şekilde davrandıkları anlaşılmaktadır. Ergiyik tuz sentezi ile üretilen KSN şablon parçacıkları basamaklı yüzey morfolojisi nedeniyle birden fazla şablonun üst üste büyüdüğü önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu duruma göre polimer matris fazındaki şablon parçacıklarının yönelmesini negatif yönde etkileyebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

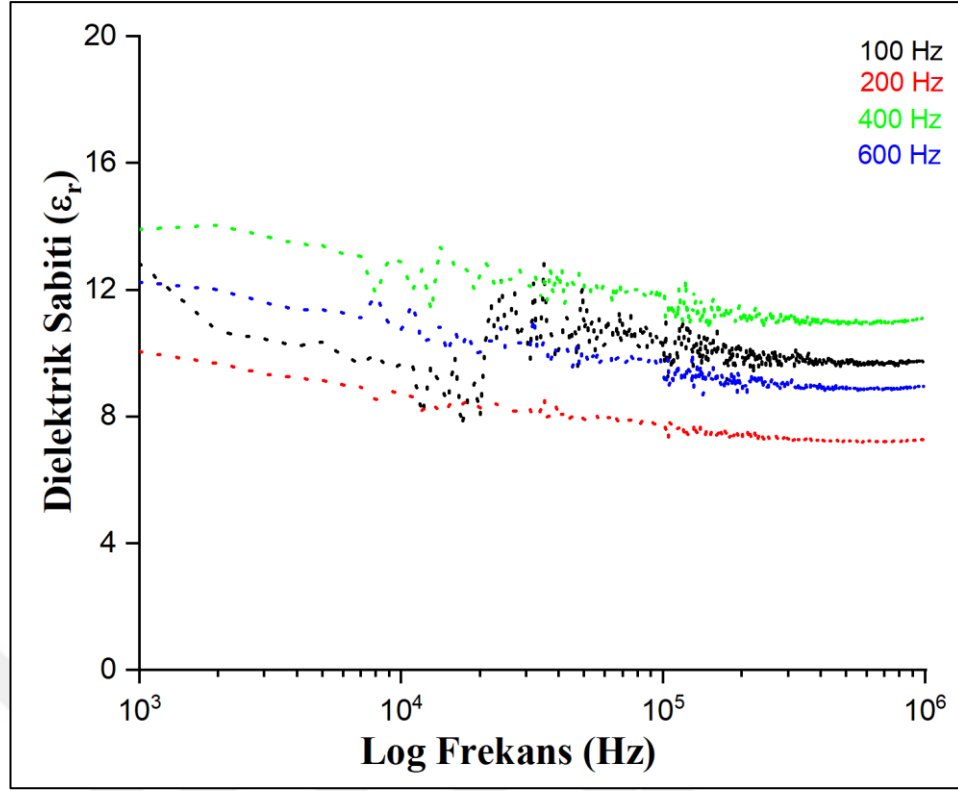
#### **4.5. Piezokompozitlerin Kutuplama Öncesi Dielektrik Ölçüm Sonuçları**

Piezokompozitlerin yapısal karakterizasyonları tamamlandıktan sonra elektriksel karakterizasyonları için ilk önce dielektrik ölçümlerinin yapılması tercih edilmiştir. Piezokompozitlerin dielektrik ölçümleri için Hioki 3520-50 LCR metre kullanılarak 1 kHz – 1 MHz frekans aralığında ve oda sıcaklığında ölçümleri yapıldığından bir önceki bölümde bahsedilmiştir. Bu bölümde ölçüm sonuçları verilmiştir.



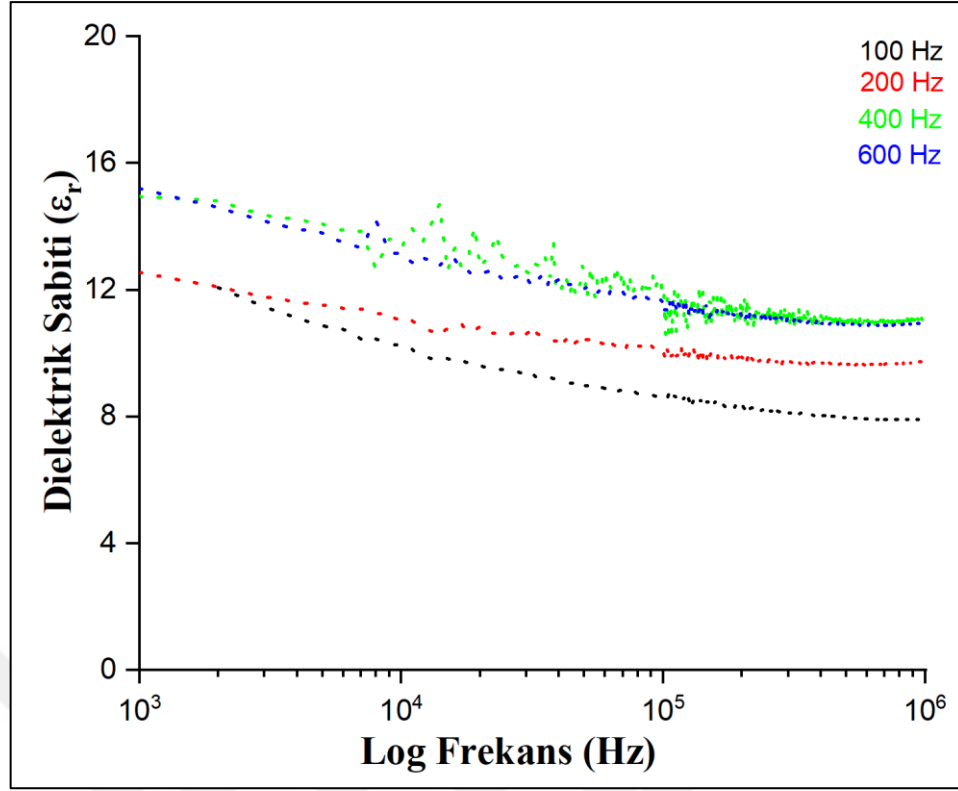
**Şekil 4.17:** %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik sabiti – frekans grafiği.

**Şekil 4.17'**de hacimce %5 KSN şablon parçacığı içeren piezokompozitlerin kutuplama öncesi frekansa bağlı dielektrik sabiti grafiği verilmiştir. Grafiğe göre düşük frekanslardaki dielektrik sabitlerinde önemli miktarda değişimler bulunmaktadır. Frekans değeri artmaya başladığında ise dielektrik sabiti değerinin stabil hale geldiği görülmektedir. Bu durumun nedeni frekansın arttırılması ile bazı polarizasyon mekanizmalarının ortadan kalkmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda dielektrik sabitinin yönelmenin daha yüksek olduğu piezokompozitlerde daha yüksek olduğu görülmektedir. Hacimce %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerdeki dielektrik sabiti değerlerinin arasında çok büyük farklar oluşmadığı yine **Şekil 4.17'**den anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.18:** %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik sabiti – frekans grafikleri.

Hacimce %10 KSN şablon parçacığına sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi **Şekil 4.18**'de verilmiştir. Şablon parçacıklarının piezokompozit içerisindeki miktarının artması ile yönelme miktarının dielektrik sabiti üzerindeki etkisi de görülmektedir. Yönelme miktarının artması ile dielektrik sabiti değerlerinde de artış gözlemlenmektedir. Literatürdeki çalışmalarda da kübik ve küresel dolgu malzemeleri kullanılarak dielektroforesis yöntemi ile üretilmiş piezokompozitlerde de dielektrik sabitindeki değişim rastgele yönelmiş olan dolgu malzemesine sahip piezokompozitlere göre daha yüksek olduğu rapor edilmiştir [D'Ambrogio, 2024], [Li vd., 2023]. KSN şablon parçacıkları kullanılarak üretilen piezokompozitlerde de yönelmenin artması ile dielektrik sabitinde artış olmuştur (Bknz. **Şekil 4.17-4.19**)

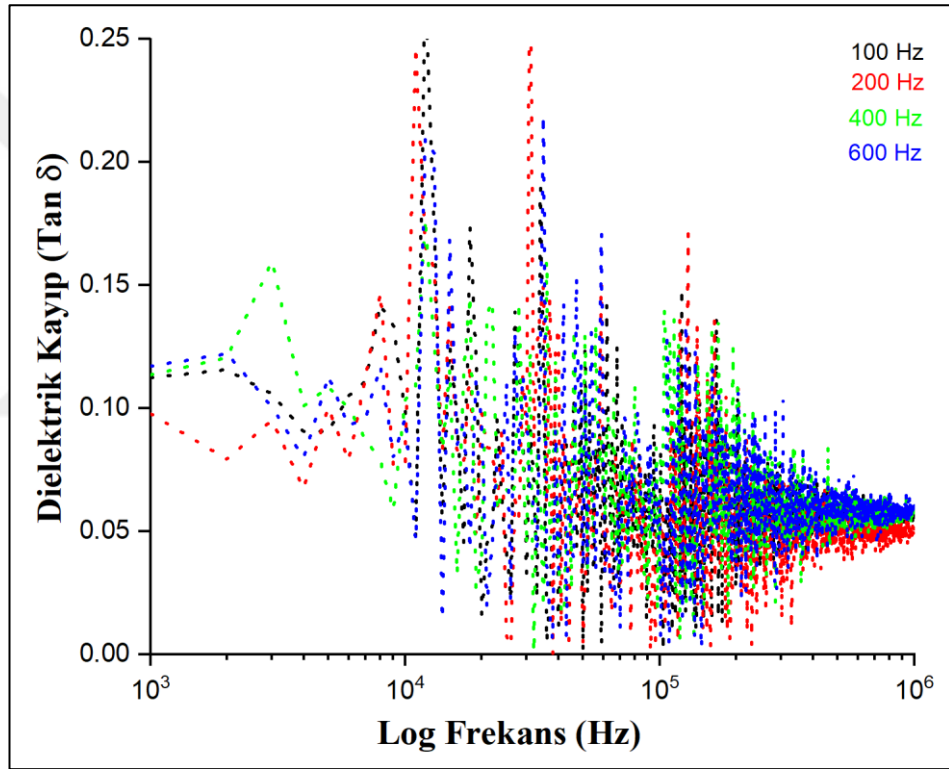


**Şekil 4.19** %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik sabiti.

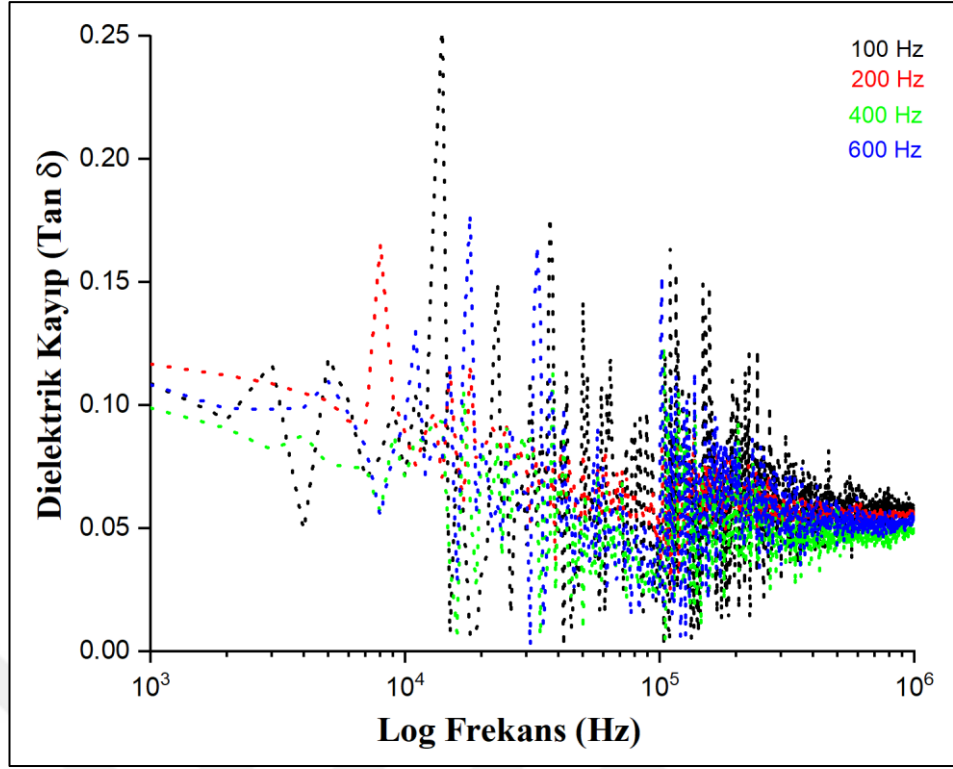
Hacimce %15 şablon parçacığı içeren piezokompozitlerin kutuplama öncesine ait dielektrik sabiti frekansa bağlı grafiği **Şekil 4.19**'da verilmiştir. 400 Hz ve 600 Hz frekansları uygulanarak üretilen piezokompozitlerin en yüksek dielektrik sabiti değerine sahip oldukları görülmektedir. Bu piezokompozitlerin yönlenme miktarlarının birbirlerine çok yakın oldukları lotgering faktörünün hesaplanması ile belirlenmiştir. Yönlenme miktarının dielektrik özellikler üzerindeki etkisi yapılan çalışmalarda bahsedilmiştir [D'ambrogio, 2024]. KSN şablon parçacıklarının miktarının aynı olmasına rağmen kutuplama öncesi dielektrik sabiti değerlerinde oluşan fark bu durumdan kaynaklanmaktadır.

Piezokompozitlerin cihaz uygulamalarında tercih edilmelerin nedeni monolitik seramiklerin sahip olduğu yüksek akustik empedans ve düşük piezoelektrik voltaj katsayısına sahip olmamalarıdır. Dolgu malzemesi miktarının artması sonucunda piezokompozitlerin dielektrik sabitlerinde artış gözlemlenmektedir. Dolgu malzemesi olarak seramik şablon parçacıklarının dielektrik sabiti polimer matris fazının dielektrik sabitinden daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu yüzden polimer matrisli kompozitlerin dielektrik sabiti değeri kullanılan dolgu malzemesinin miktarı ile doğrudan ilişkilidir (Bknz. **Şekil 4.17-19**, **Şekil 4.36-38**) [Kunnamkuzhakkal ve

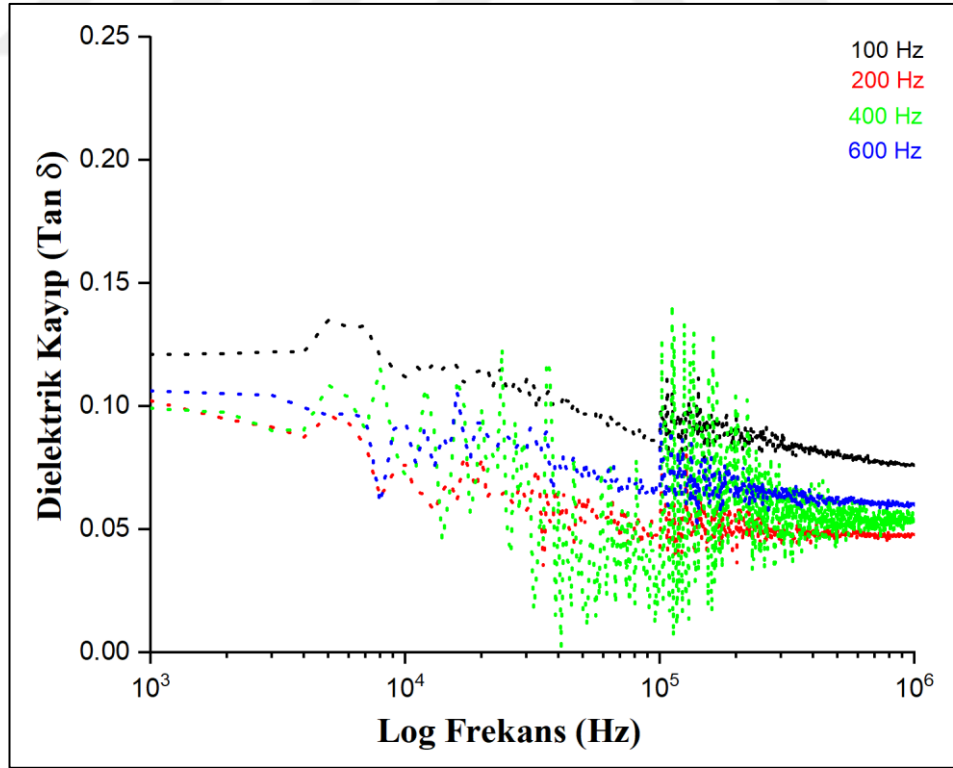
**Groen, 2013].** Ayrıca bu çalışma kapsamında üretilen piezokompozitler dolgu malzemesi olarak tek kristal şablon parçacıklarına sahip oldukları için elektrik alan doğrultusunda yönlendirilmelerinin sonucunda dielektrik sabitlerinin yönlenmeye göre de artış gösterdikleri yapılan ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır. Yönlenmeye göre dielektrik sabitindeki artış literatürdeki çalışmalarda da belirtilmiştir [**Tomer vd., 2008].** Hacimce %5 KSN şablon parçacıkları kullanılarak üretilen piezokompozitlerin dielektrik sabiti değerleri arasında önemli farklılıklar olmadığı yapılan ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır. Dolgu malzemesinin miktarının artış gösterdiği durumlarda ise dielektrik sabitini değerlerinin farklılık gösterdiği anlaşılmıştır.



**Şekil 4.20:** %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik kayıpları.



**Şekil 4.21:** %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik kayıpları.

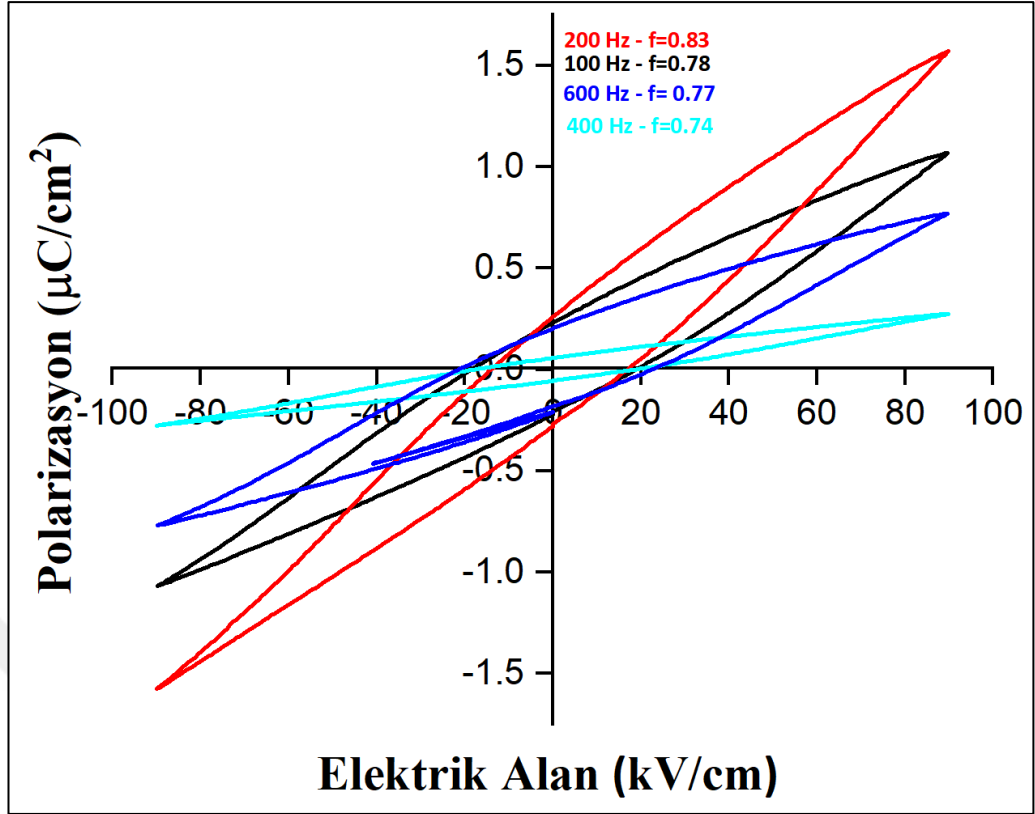


**Şekil 4.22:** %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama öncesi dielektrik kayıpları.

**Şekil 4.20 – 4.22**'de verilen eğrilerde de görüldüğü gibi kutuplama öncesindeki dielektrik kayıp – frekans grafiklerine göre düşük frekanslardaki dielektrik kayıp değerleri geniş bir aralıkta olmasına ve frekans arttıkça kararlı bir seviyeye gelmekle birlikte yine de düşük seviyelerde oldukları belirlenmiştir.

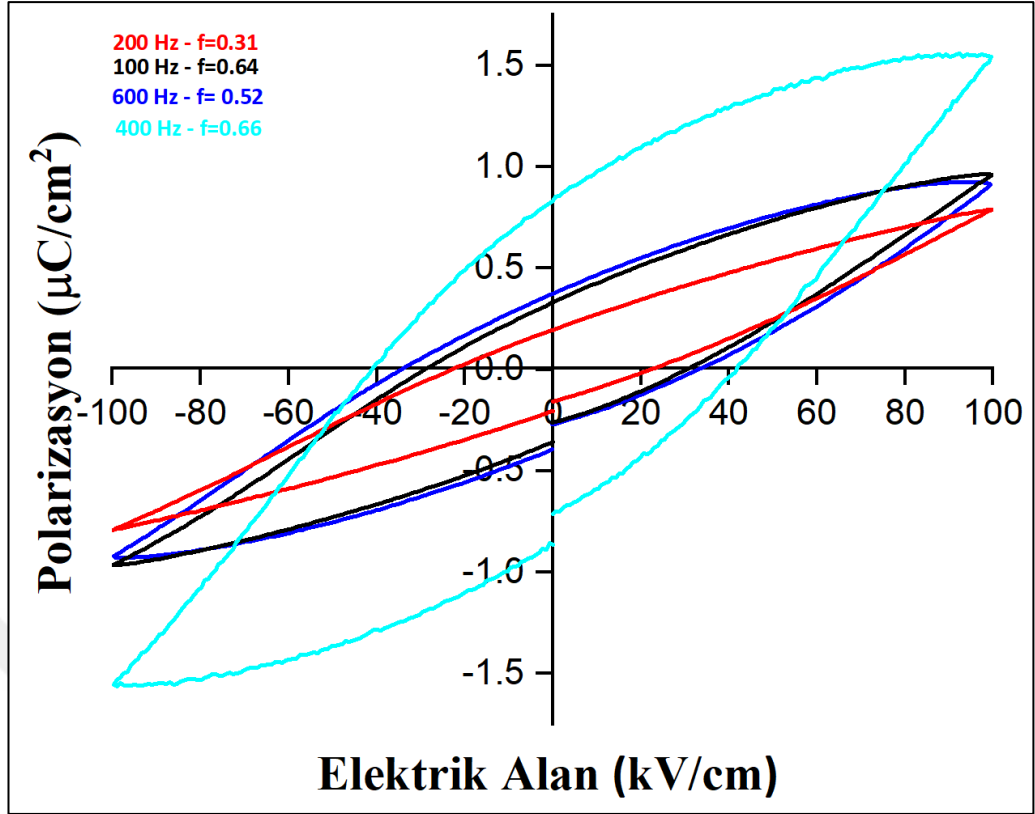
#### 4.6. Piezokompozitlerin Ferroelektrik Ölçüm Sonuçları

Dielektroforesis yöntemi kullanılarak farklı frekans değerlerindeki elektrik alan uygulanması sonucunda üretilmiş olan piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan ölçümleri yapılmıştır. Polarizasyon – elektrik alan ölçümleri 10 kV/cm – 100 kV/cm'lik elektrik alan şiddetlerinde alınmıştır. **Şekil 4.23**'te de görüldüğü gibi, %5 KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerden alınan ferroelektrik ölçüm sonuçlarına göre en yüksek max. Polarizasyon ( $P_{max}$ ) değeri en yüksek 200 Hz frekans uygulanarak üretilmiş olan ve en yüksek Lotgering faktörü değerine sahip piezokompozit malzemeye aittir. Dielektroforesis yöntemi ile KSN şablon parçacıklarının elektrik alan doğrultusunda yönlenmesiyle 1-3 bağlanabilirliğine benzer bir yapı oluşmasına rağmen ferroelektrik özellikler bakımından bu tip piezokompozitlere göre oldukça düşük değerlerde maksimum polarizasyon ve kalıcı polarizasyon değerlerine sahiptir. Bu durumun temelinde 1-3 piezokompozitlerde aktif piezoelektrik seramik çubukların alt ve üst elektrotlara temas etmesinden kaynaklanmaktadır veya bir başka ifadeyle piezoelektrik seramik parçacıkları ile polimer matris fazı arasındaki uyumsuzluktan (mismatch) kaynaklanmaktadır [Van den Ende, 2012]. Bir diğer dezavantajı ise 1-3 piezokompozitlere göre daha yüksek zorlayıcı elektrik alan değerlerine sahip oldukları için kutuplama işlemlerinin 1-3 piezokompozitlere göre çok daha yüksek elektrik alanlarda yapılmak zorunda olunmasıdır. Yönlendirilmiş piezokompozitlerin 1-3 piezokompozitlere göre avantajı ise daha esnek olmasıdır. Bu durumun sonucu olarak sensör olarak 1-3 piezokompozitlere göre tercih edilmektedir.



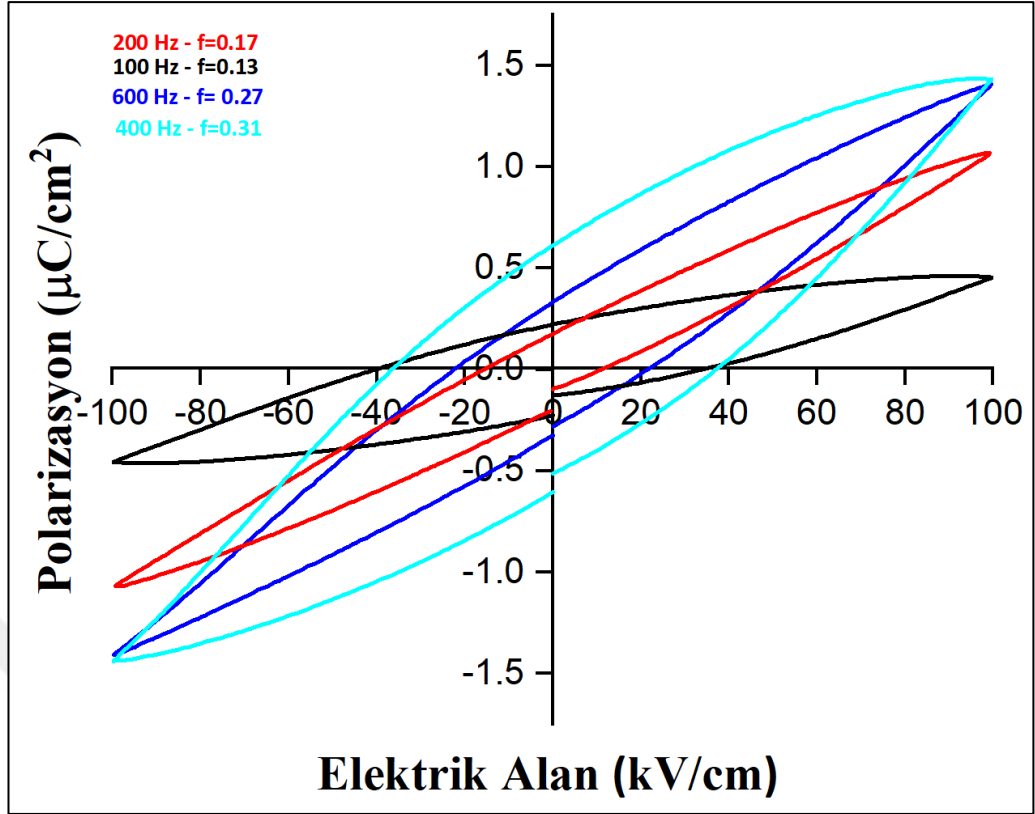
Şekil 4.23: %5 KSN içeren piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan grafiği.

Şekil 4.23'te hacimce %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlere ait polarizasyon – elektrik alan grafiği verilmiştir. Polarizasyon – elektrik alan grafiğinin şekli ferroelektrik özellik gösteren monolitik bir seramiğe göre farklıdır. Bu durum piezokompozitlerin 0-3 bağlanabilirlikleri ile açıklanabilir. Zorlayıcı elektrik alan değerlerinin yaklaşık olarak 20 kV/cm'lik elektrik alana denk gelmektedir. %5 KSN içeriğine sahip olan piezokompozitlerin kalıntı polarizasyon ( $P_r$ ) değerleri ise tane yönlendirme elektrik alan frekansından ve dolayısıyla yönlenme miktarından bağımsız olarak birbirine yakın değerlerde ve  $0.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 'nin altındadır.



Şekil 4.24: %10 KSN içeren piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan grafiği.

Şekil 4.24'te hacimce %10 şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan grafiği verilmiştir. En yüksek yönlenmenin olduğu piezokompozitin (400 Hz) aynı hacimce %5'lik piezokompozitlerde olduğu gibi en yüksek polarizasyon ve en yüksek kalıcı polarizasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. 400 Hz frekansındaki piezokompozitin histerezis eğrisi diğerlerine göre daha şişkin haldedir. Bu durumun sonucunda zorlayıcı elektrik alan değerleri arasında hacimce %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlere göre daha yüksek bir değere sahip olmaktadır.

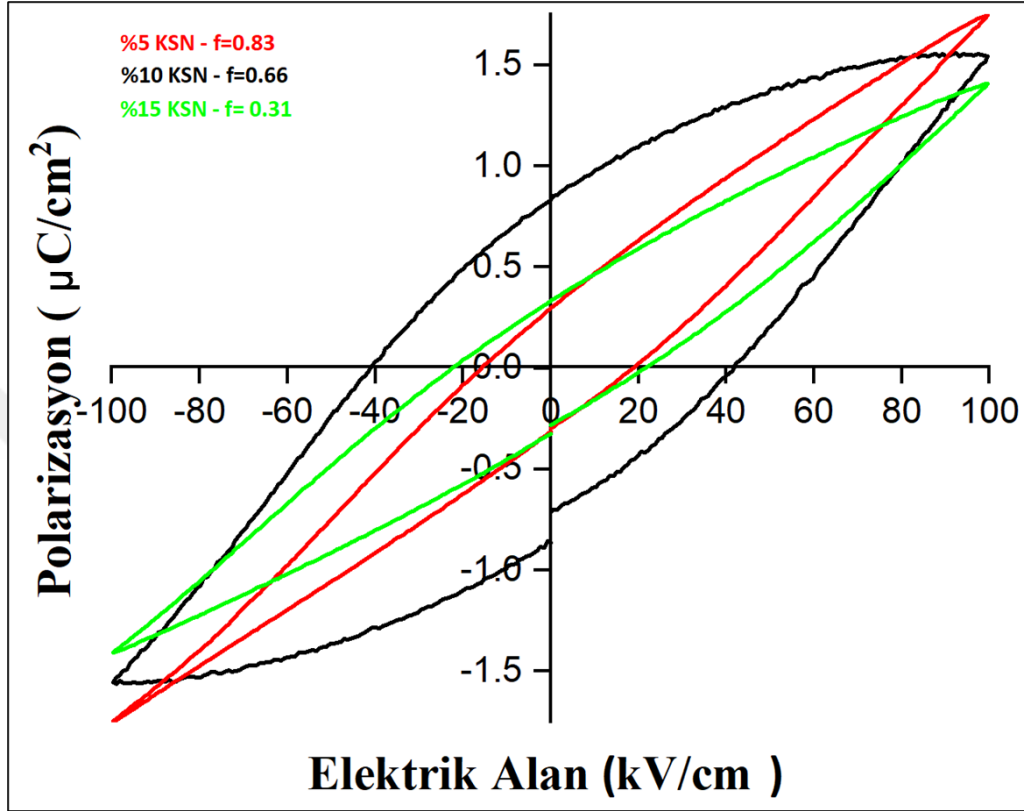


**Şekil 4.25:** %15 KSN içeren piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan grafiği.

Hacimce %15 KSN şablon parçacığı içeren piezokompozitin polarizasyon-elektrik alan grafiği **Şekil 4.25**'te verilmiştir. Maksimum polarizasyon değeri en yüksek yönlenmeye sahip olan 400 Hz frekanstaki piezokompozitte görülmektedir. Fakat %15 şablon parçacığına sahip piezokompozitlerin Lotgering faktörü değerleri 400 Hz ve 600 Hz frekanslarında birbirlerine çok yakın olmalarının sonucunda maksimum polarizasyon değerleri arasında çok fazla fark oluşmamıştır. Kalıcı polarizasyon değerlerinde ise 400 Hz ve 600 Hz arasında belirli bir fark oluşmaktadır.

Yönlendirilmiş piezokompozitlerin polarizasyon – elektrik alan ölçümleri sonucunda yönlenme miktarının özellikle maksimum polarizasyonu önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu durum Van den ENDE'nin yapmış olduğu çalışma ile de örtüşmektedir [**Van den Ende, 2010**]. En yüksek polarizasyon değerinin en düşük şablon parçacığına sahip ve en yüksek Lotgering faktörü değerine sahip olan piezokompozitte olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun temel sebebi olarak kullanılan şablon parçacıklarının unipolar ferroelektrik malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Tetragonal tungsten bronz kristal yapısında oluşan KSN şablon parçacıklarının polarizasyon doğrultusu iğnesel morfolojide büyüdüğü doğrultuyla aynıdır.

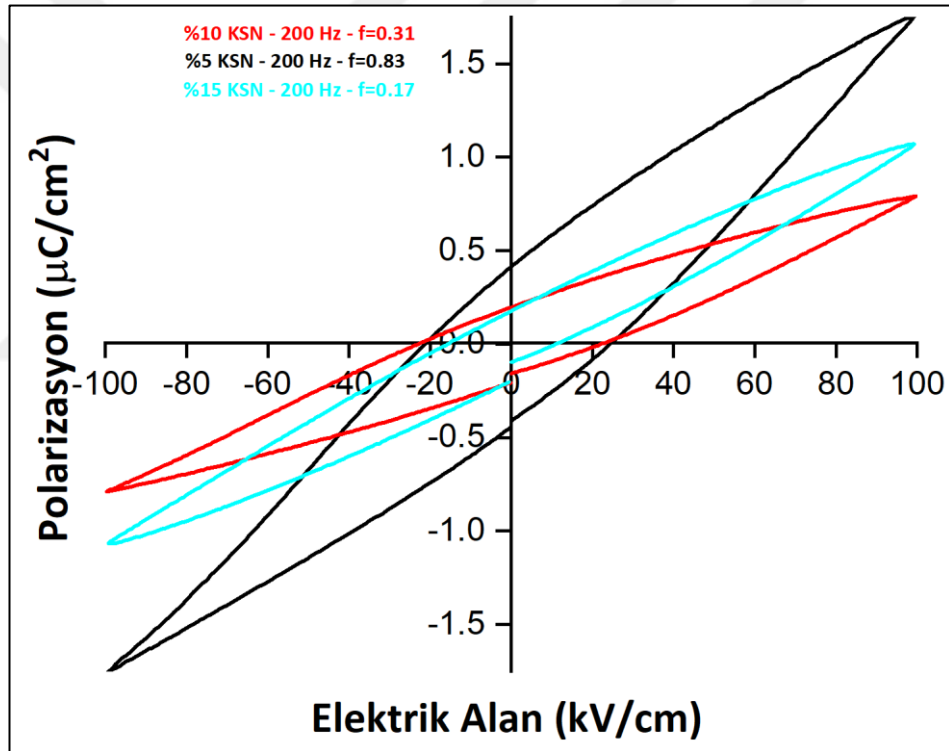
Piezokompozitlerin üretimi sırasında uygulanan alternatif elektrik alan ile KSN şablon parçacıkları polar eksenini doğrultusunda yönelmiş olduğundan en yüksek polarizasyon değerine sahiptir.



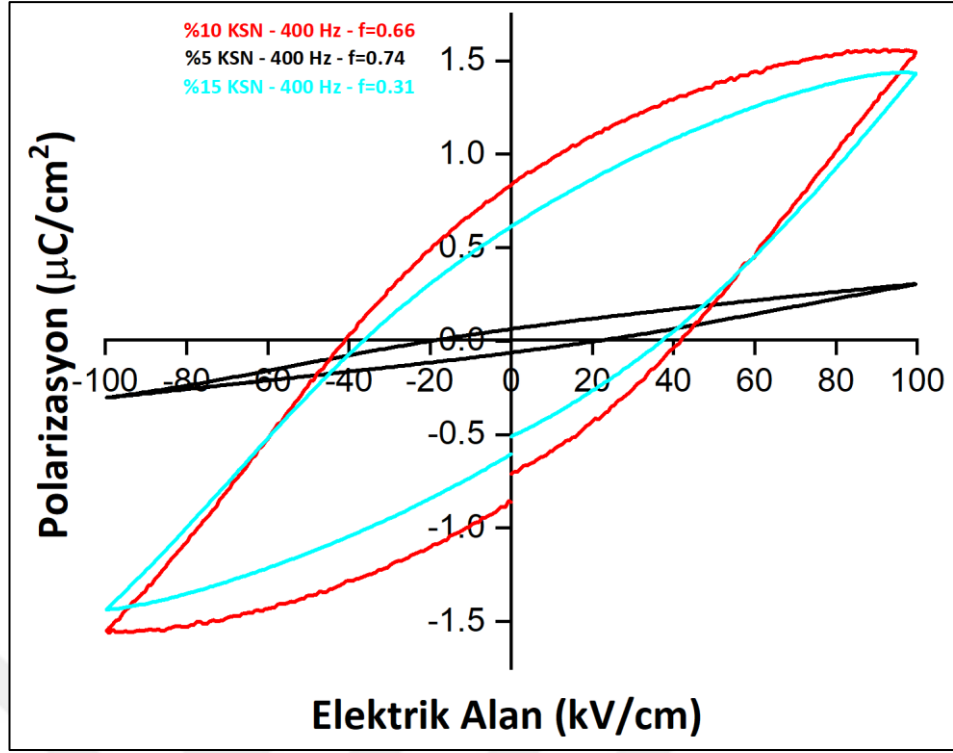
**Şekil 4.26:** Yönlenebilir polarizasyon – elektrik alan grafiği.

Yönlenebilir polarizasyon – elektrik alan grafiği Şekil 4.26’da verilmiştir. Hacimce %5 KSN şablon parçacıklarına sahip olan piezokompozitin Lotgering faktörünün en yüksek olmasından ( $f=0.83$ ) dolayı en yüksek maksimum polarizasyona sahip olmaktadır. %10 KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerde ise kalıntı polarizasyon Lotgering faktörü daha düşük olmasına rağmen ( $f=0.66$ ) KSN miktarının fazla olmasının sonucunda daha yüksektir. Piezokompozitlerdeki KSN miktarının artması ile adet olarak KSN iğneciklerinin miktarının artmasının sonucunda bile polarizasyon miktarları arasındaki farkı dengelemeye yeterli olmamaktadır. Bu durumun sonucu olarak yönelmenin polarizasyon üzerinde daha baskın olduğu sonucuna varılabilmektedir. Başka bir ifade ile Lotgering faktörü pik şiddetlerine bağlı olarak yapılan bir analiz olmasının sonucunda yarı-nicel olan tahmini bir değer verir ve kristal yönelmesi hakkında net bir fikir sahip olunmasına olanak sağlamamaktadır [Borosnan vd., 2006]. KSN miktarının %15 olduğu piezokompozitlerde ise Lotgering

faktörü çok düşük ( $f=0.31$ ) olmasından kaynaklı olarak polarizasyon miktarları arasındaki fark telafi edilememektedir. Bahsedildiği üzere yönelmiş tanecik sayısının hacimce KSN miktarının artması ile artış göstermesi piezokompozitlerin maksimum polarizasyonu üzerinde yönelme miktarının etkisinden daha azdır. Bu durum piezokompozitlerde kullanılan dolgu malzemesi KSN'nin unipolar ferroelektrik malzeme olması ve doğal polar anizotropiye sahip olmasının sonucudur. Tek kristal KSN şablon parçacıkları sadece tetragonal kristal yapılarındaki c-ekseni boyunca yönelmesi ile hem kalıntı polarizasyona hem de maksimum polarizasyona daha çok katkıda bulunmaktadır. En yüksek yönelmeye sahip olan KSN içerikli piezokompozitlerin yönelmeye bağlı olarak (200 Hz ve 400 Hz) frekansları için yapılan ferroelektrik ölçüm sonuçları Şekil 4.27-4.28'de verilmiştir.



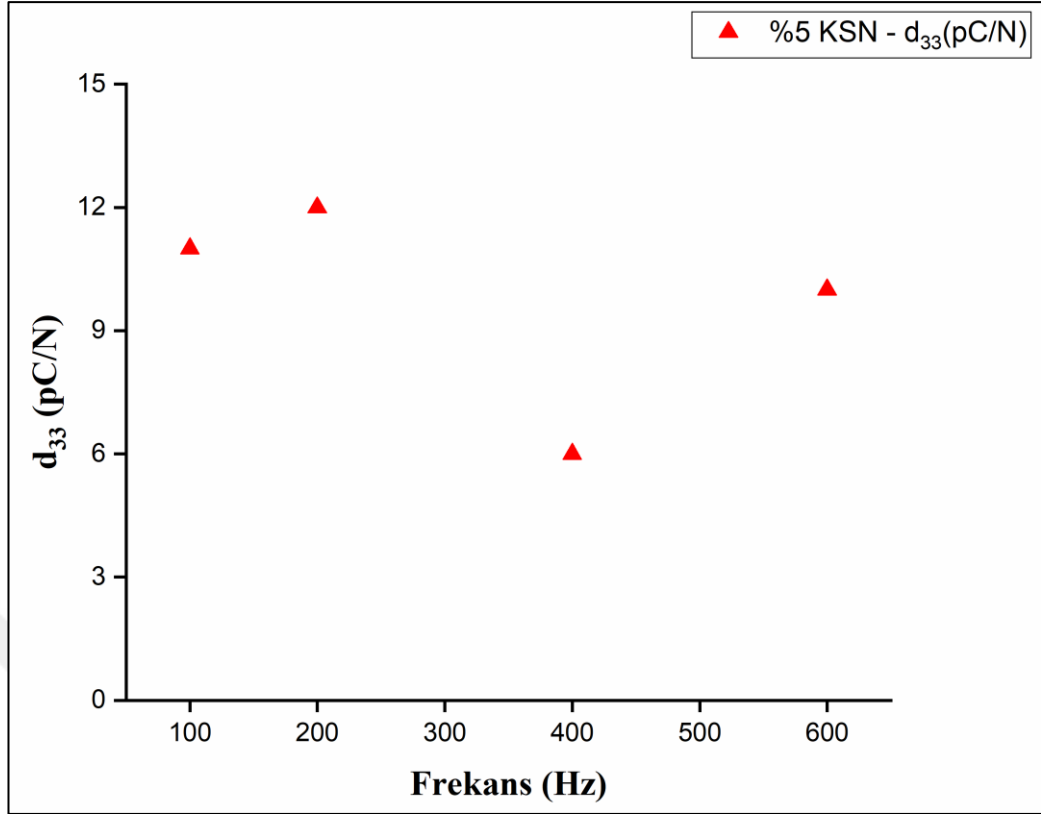
Şekil 4.27: 200 Hz frekansa göre ferroelektrik ölçüm sonuçları



Şekil 4.28: 400 Hz frekansa göre ferroelektrik ölçüm sonuçları

#### 4.7. Piezokompozitlerin Ferroelektrik Ölçüm Sonrası $d_{33}$ ve $g_{33}$ Katsayılarının Hesaplanması

Piezokompozitlerin histerisiz eğrilerinin elde edilmesini sağlayan ferroelektrik ölçümler sırasında numunelere kısa sürelerde de olsa bir elektrik alan uygulanacağı için numuneler polarize olacaktır. Bu durumun sonucunda yapılacak  $d_{33}$  ölçümleri ve  $g_{33}$  hesaplamaları kutuplama sonrasındaki piezoelektrik özellikler hakkında bilgi verecektir. Bir başka durum ise ferroelektrik ölçümler sırasında histerisiz eğrilerinin oluşmasını sağlayan elektrik alan alternatif akım kullanılarak oluşturulmaktadır. Kutuplama için ise doğru akım kullanılarak elektrik alan oluşturulduğu için numunelerin kutuplanmasında uygulanan farklı türlerdeki elektrik alanların etkileri hakkında bir inceleme yapılabilir. Bahsedilen bu gibi nedenlerden kaynaklı piezokompozitlerin ferroelektrik ölçüm sonrası  $d_{33}$  ve  $g_{33}$  hesaplamaları yapılmıştır.



**Şekil 4.29:** %5 KSN içerikli kompozitlerin ferroelektrik ölçüm sonrası d<sub>33</sub> grafiği.

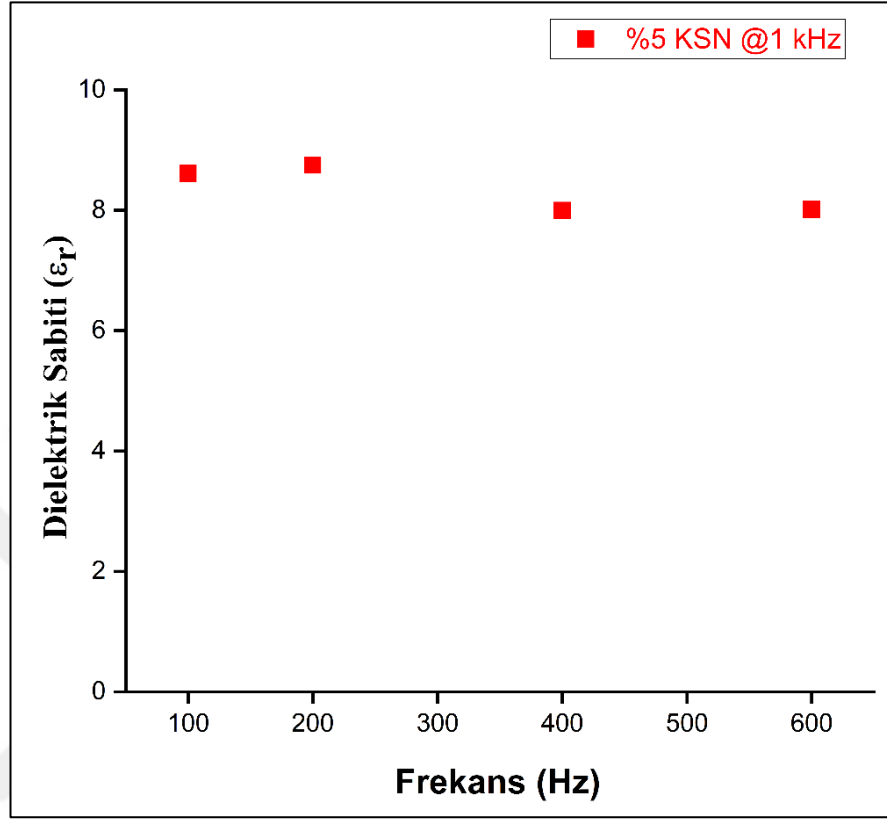
Şekil 4.29’da hacimce %5 KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin ferroelektrik ölçüm sonrasındaki d<sub>33</sub> değerlerine ait grafik verilmiştir. Lotgering faktörü değerinin en yüksek olduğu 200 Hz frekansındaki numunenin d<sub>33</sub> değerinin en yüksek olduğu şekilden anlaşılmaktadır. Şekilden anlaşıldığı üzere d<sub>33</sub> değerleri şablon parçacıklarının yönlenme miktarı ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir.

Piezokompozitlerin piezoelektrik voltaj katsayısı – g<sub>33</sub> değeri bulunurken direkt bir ölçüm yapılamamaktadır. Bu katsayı ölçümler sonucu elde edilen dielektrik geçirgenlik ve piezoelektrik yük katsayısına bağlı olarak yapılan bir hesaplama sonucu elde edilmektedir. Piezoelektrik voltaj katsayısının hesaplanmasında eşitlik 4.5 kullanılmaktadır.

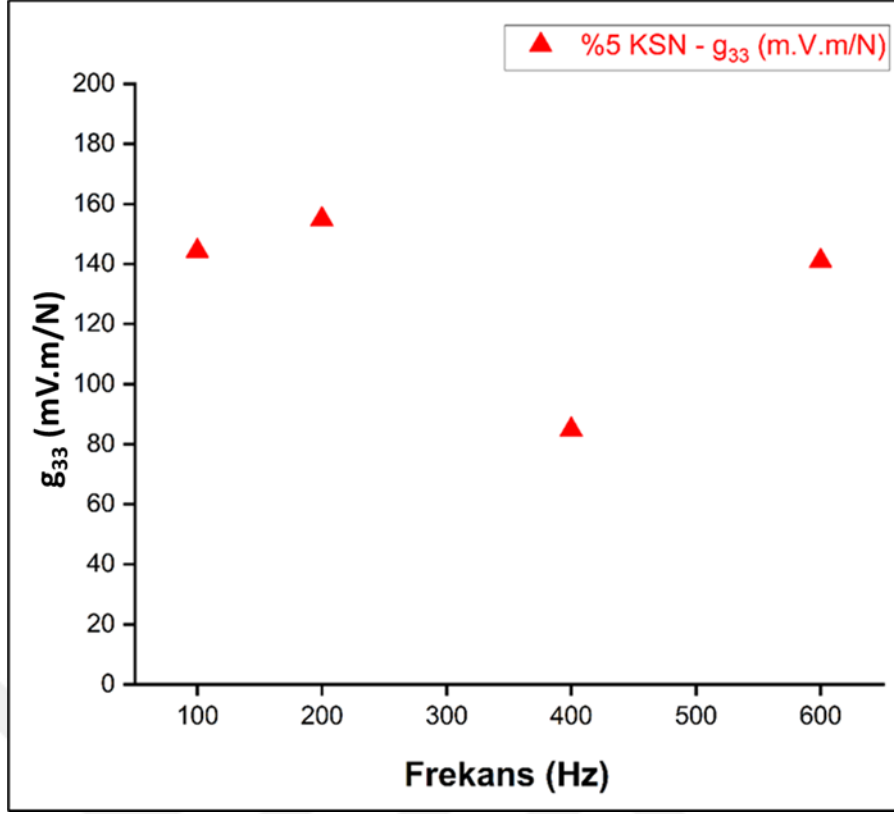
$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (4.5)$$

Piezoelektrik voltaj katsayısının hesaplanmasında kullanılan d<sub>33</sub> değeri neredeyse quasi statik bir ölçümdür yani düşük frekanslarda gerçekleştirilmiştir. Bu duruma bağlı olarak  $\epsilon_r$  değerinin de düşük frekanslarda olması gerekmektedir. Bu yüzden

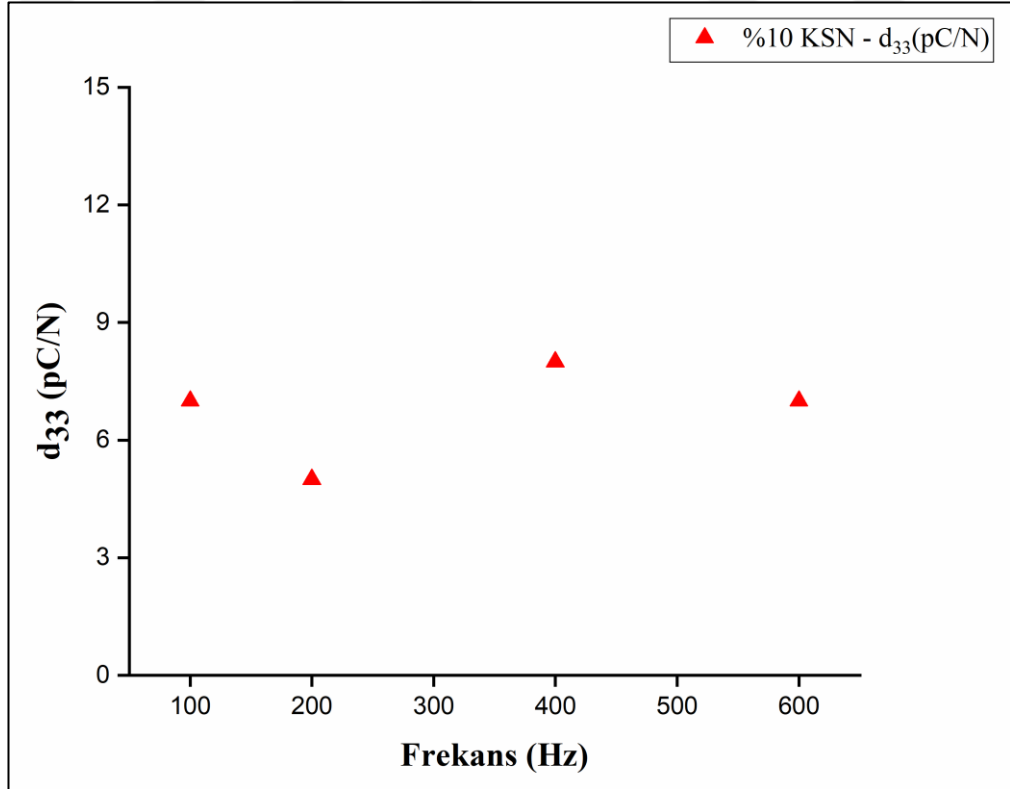
piezokompozit numunelerin kullanılan LCR metre ile alınabilecek en düşük frekans değeri olan 1 kHz frekanstaki dielektrik sabiti değerleri tercih edilmiştir.



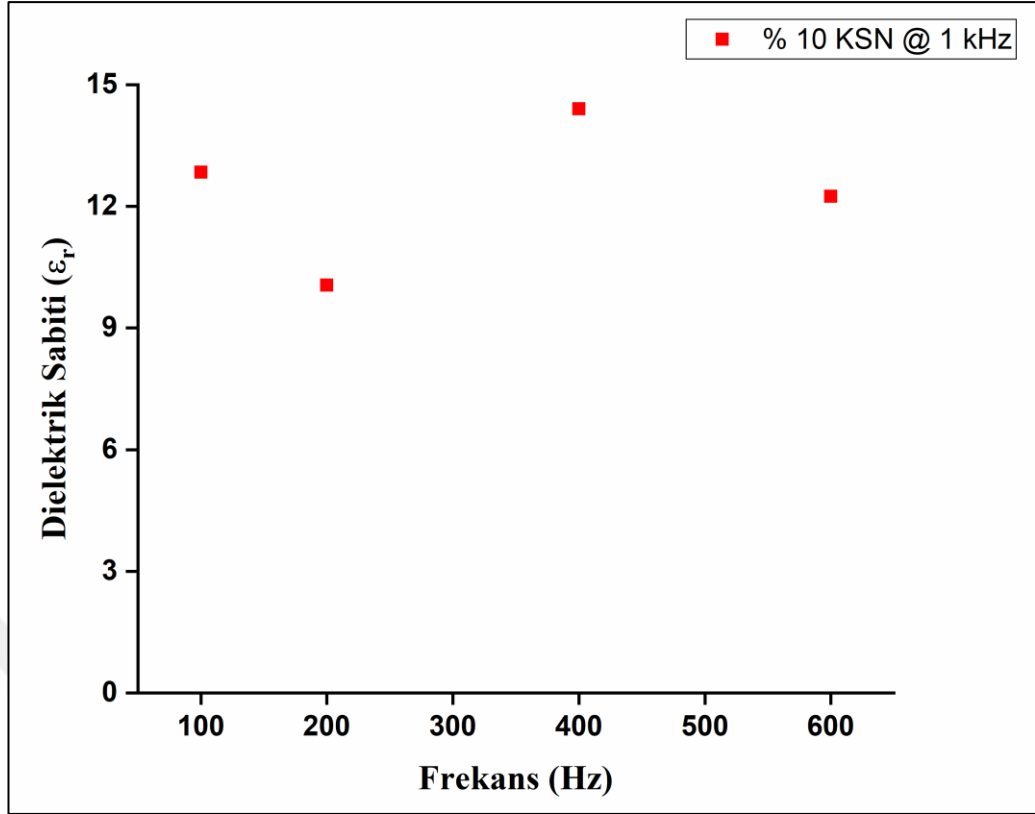
Şekil 4.30: %5 KSN içeren piezokompozitlerin 1 kHz frekansındaki dielektrik sabiti.



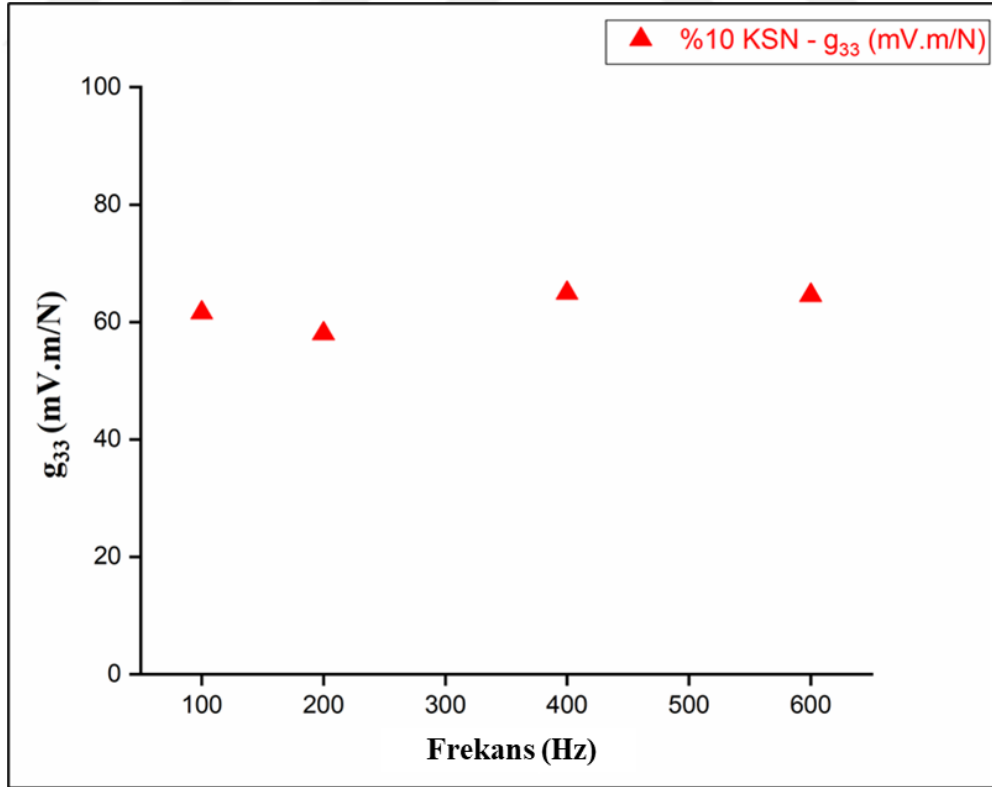
Şekil 4.31: %5 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik voltaj katsayısı – frekans grafiği.



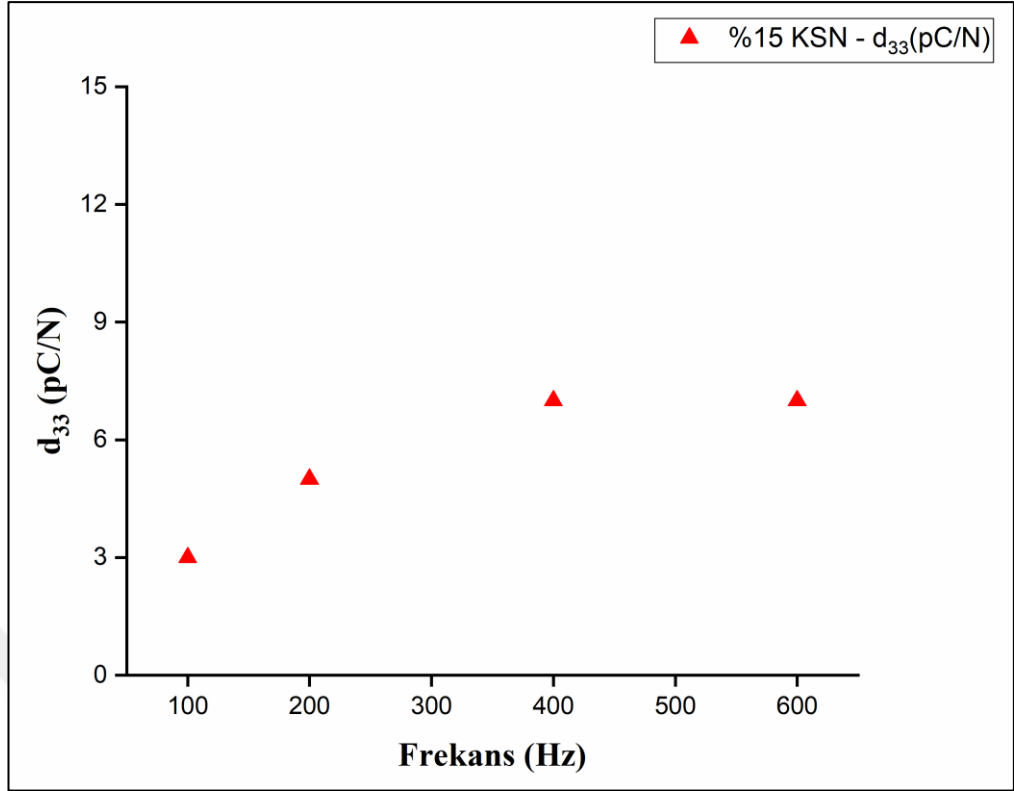
Şekil 4.32: %10 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği.



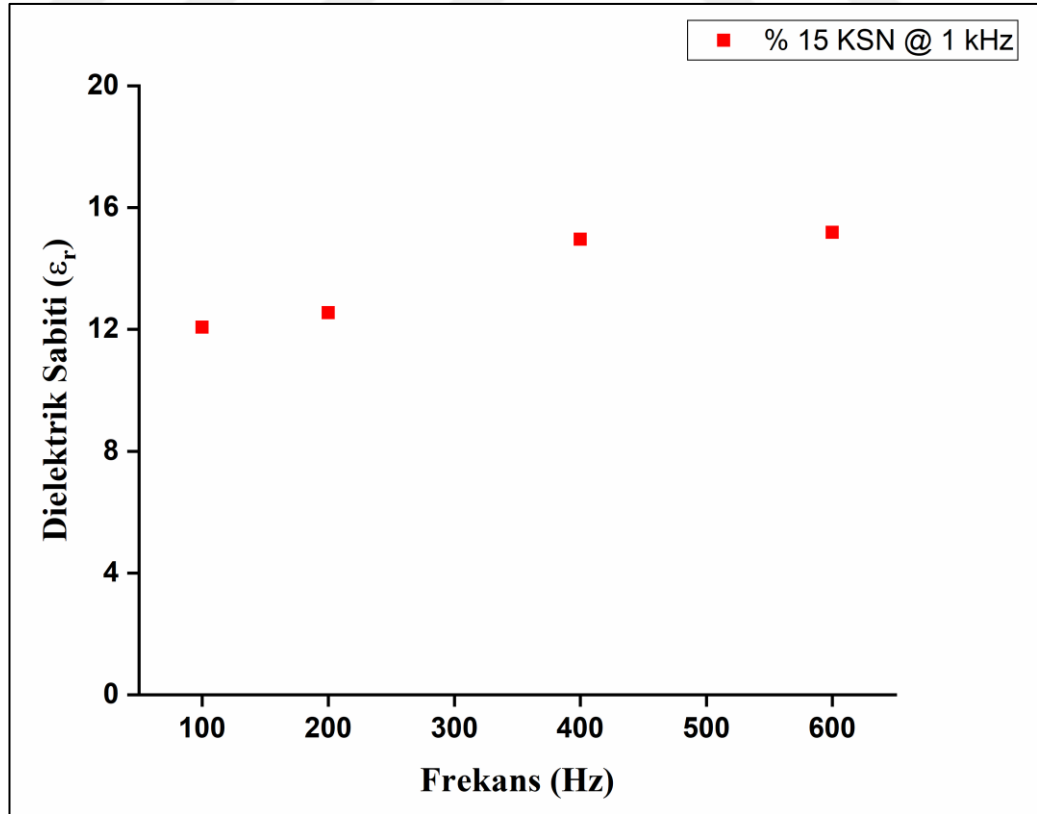
Şekil 4.33: %10 KSN içeren piezokompozitlerin 1 kHz frekansındaki dielektrik sabiti.



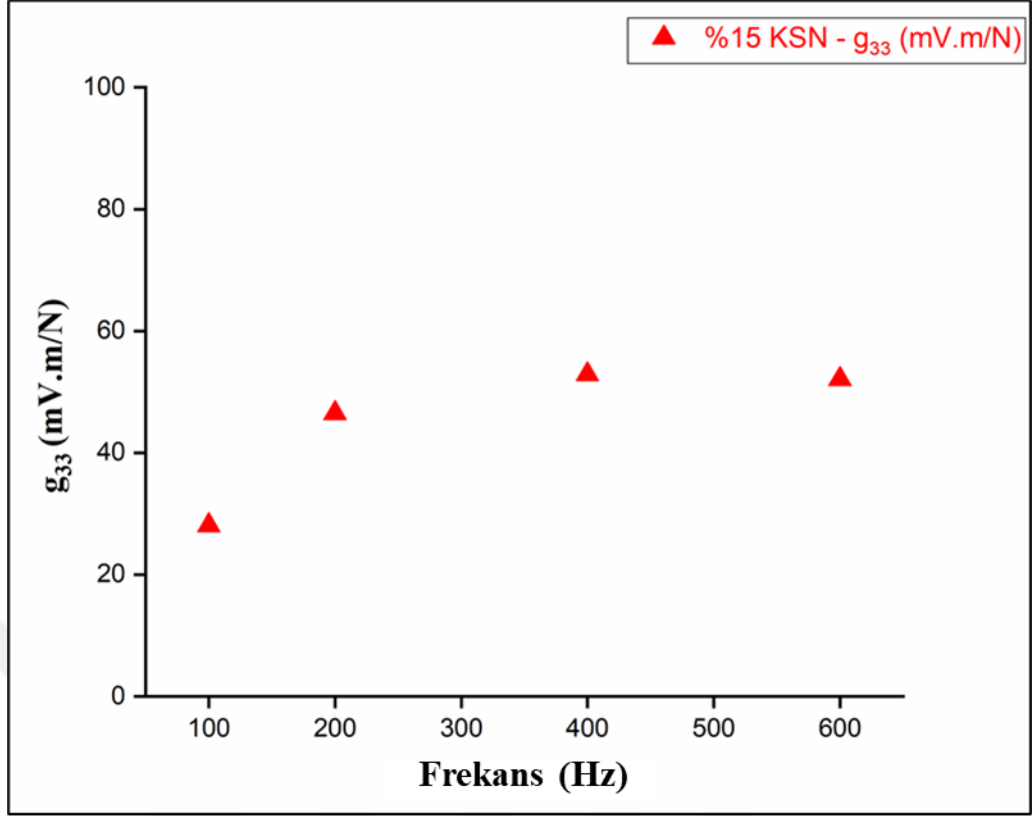
Şekil 4.34: %10 KSN içeren piezokompozitlerin ferroelektrik ölçüm sonrası piezoelektrik voltaj katsayısı – frekans grafiği.



Şekil 4.35: %15 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği.



Şekil 4.36: %15 KSN içeren piezokompozitlerin 1 kHz frekansındaki dielektrik sabiti.



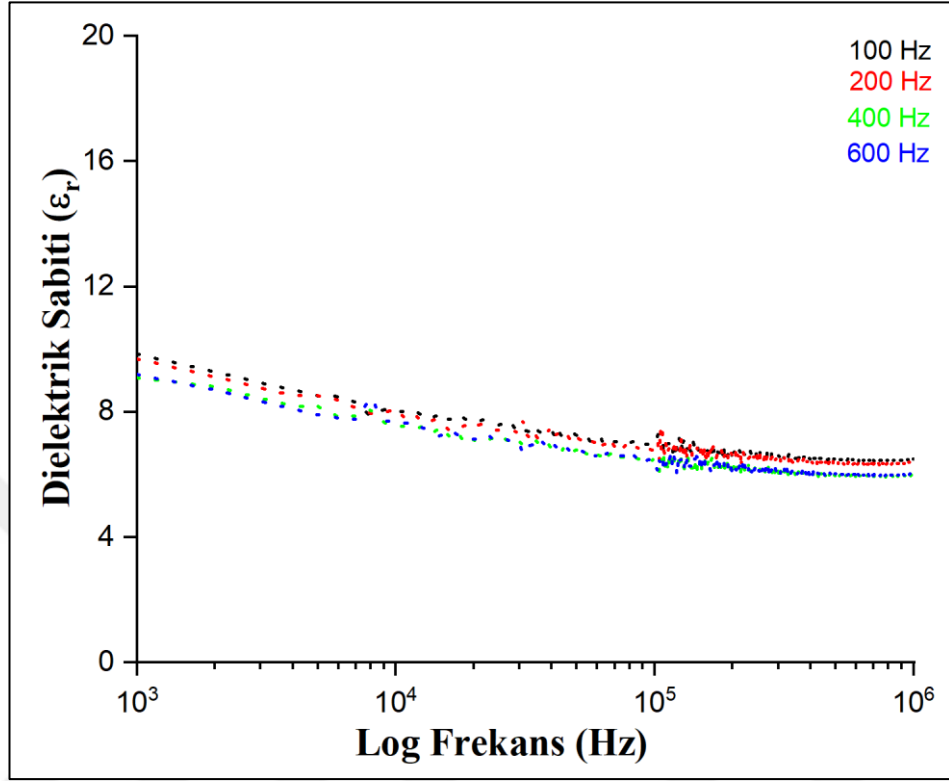
**Şekil 4.37:** %15 KSN içeren piezokompozitlerin piezoelektrik voltaj katsayısı – frekans grafiği.

Ferroelektrik ölçüm sonrası yapılan  $d_{33}$  ölçümleri ve buna bağlı olarak yapılan  $g_{33}$  hesaplamalarının sonucunda artan KSN miktarı ile hem Lotgering faktörü hem de SEM görüntülerinin dikkate alınması sonucunda  $d_{33}$  değerleri azalmaktadır, aynı zamanda her ne kadar yönlenme miktarının azalması artan KSN miktarı ile artarken KSN'nin aynı zamanda bir dielektrik malzeme olmasının sonucunda piezokompozitlerin dielektrik sabiti değerleri artış gösterecektir. Eşitlik 4.5'ten yapılan  $g_{33}$  hesaplamalarına göre  $g_{33}$  değerlerinde de azalma gözlemlenmektedir. Piezoelektrik voltaj katsayıları KSN miktarının sabit tutulduğu durumlarda incelenirse 1 kHz frekanstaki dielektrik sabiti değeri yönlenmeye bağlı olarak artış gösterecektir lakin yönlenmeye bağlı olarak artan  $d_{33}$  değeri  $g_{33}$  üzerinde dielektrik sabitine göre daha baskın bir davranış sergilemektedir.

#### 4.8. Piezokompozitlerin Kutuplama Sonrasındaki Dielektrik Ölçümleri

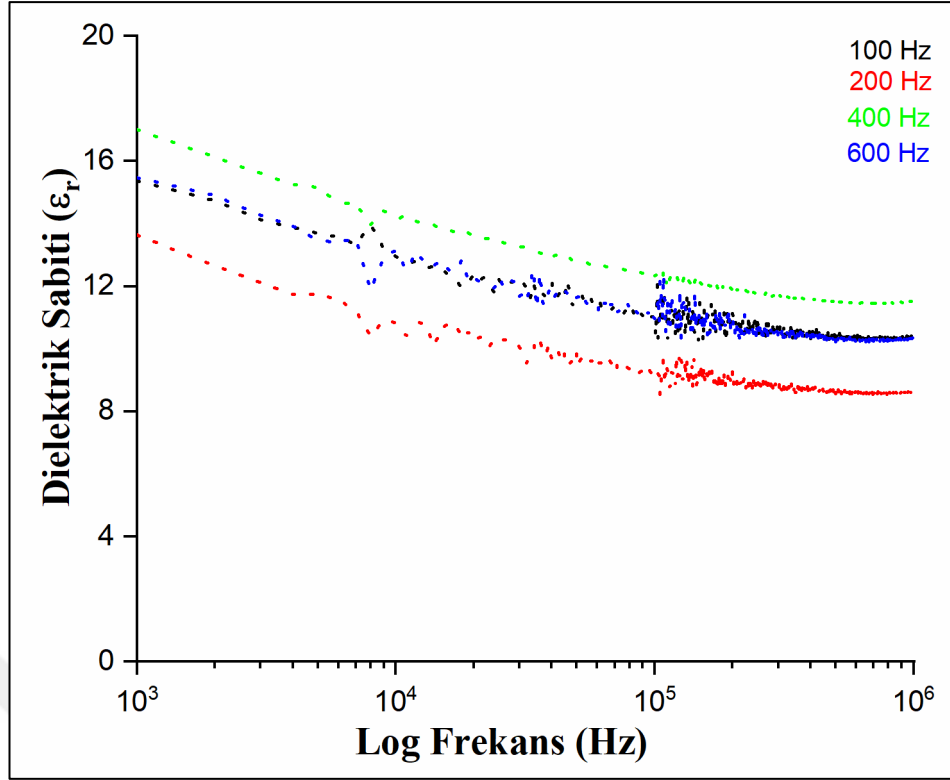
100 kV/cm'lik doğru akım kullanılarak oluşturulan elektrik alan ile kutuplanan piezokompozitlerin 1 kHz – 1 MHz frekans aralığındaki dielektrik ölçümleri

yapılmıştır. %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi **Şekil 4.38**'de verilmiştir.



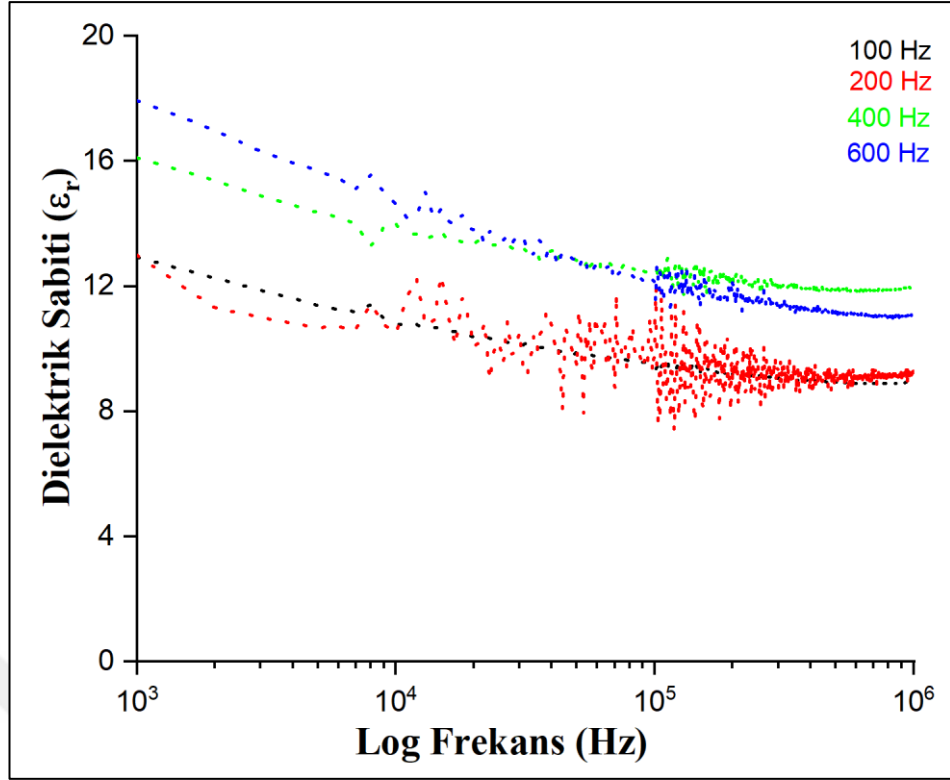
**Şekil 4.38:** %5 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik sabiti – frekans grafiği.

Kutuplama sonrasındaki dielektrik sabiti değerlerine bakıldığında en yüksek yönlenmeye sahip piezokompozitin en yüksek dielektrik sabitine sahip olmadığı görülmektedir. Dielektroforesis yöntemi ile üretilen piezokompozitlerin yönlenmeye göre dolgu malzemesinin formasyonu değişeceği için dielektrik sabiti değerinin artacağı bilinmektedir [Van den Ende, 2010] ve aynı zamanda polimer matris fazındaki boşlukların da dielektrik sabitinin azaltacağı bilinmektedir [Khanbareh, 2017]. Bu yüzden 200 Hz frekansındaki piezokompozitin dielektrik sabitinin 100 Hz'den daha az olması olağan bir durumdur.



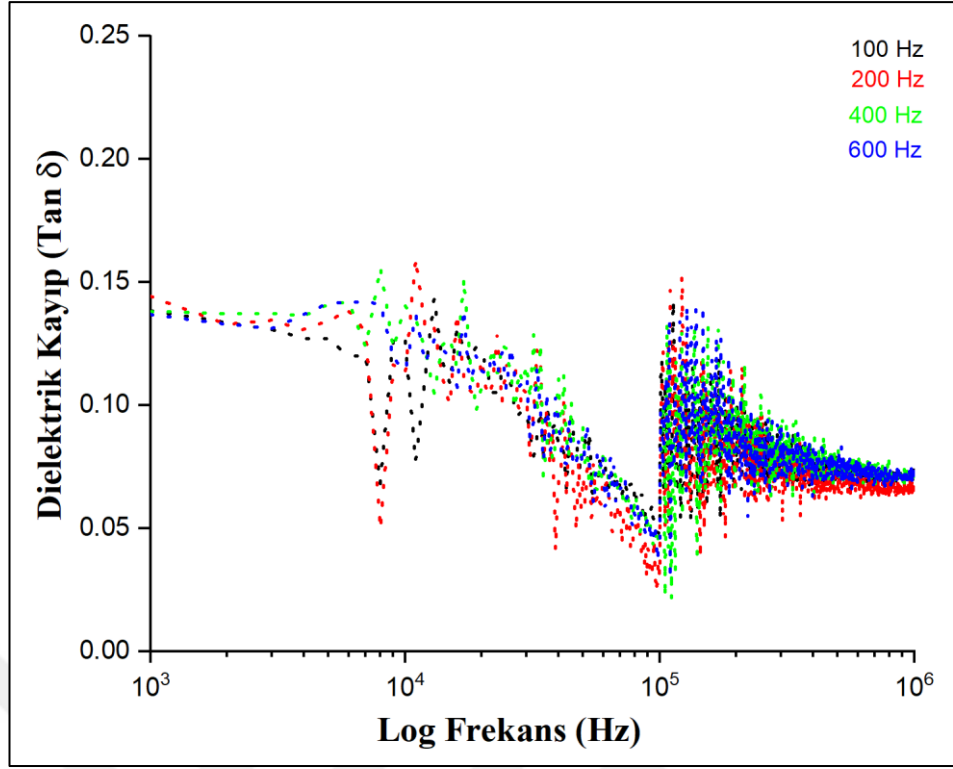
**Şekil 4.39:** %10 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik sabiti – frekans grafiği.

Şekil 4.39’da hacimce %10 KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin dielektrik sabiti – frekans ölçümleri verilmiştir. Şekle göre en yüksek dielektrik sabiti değerine yönelmenin en yüksek olduğu 400 Hz frekans ile üretilmiş piezokompozitin sahip olduğu görülmektedir.

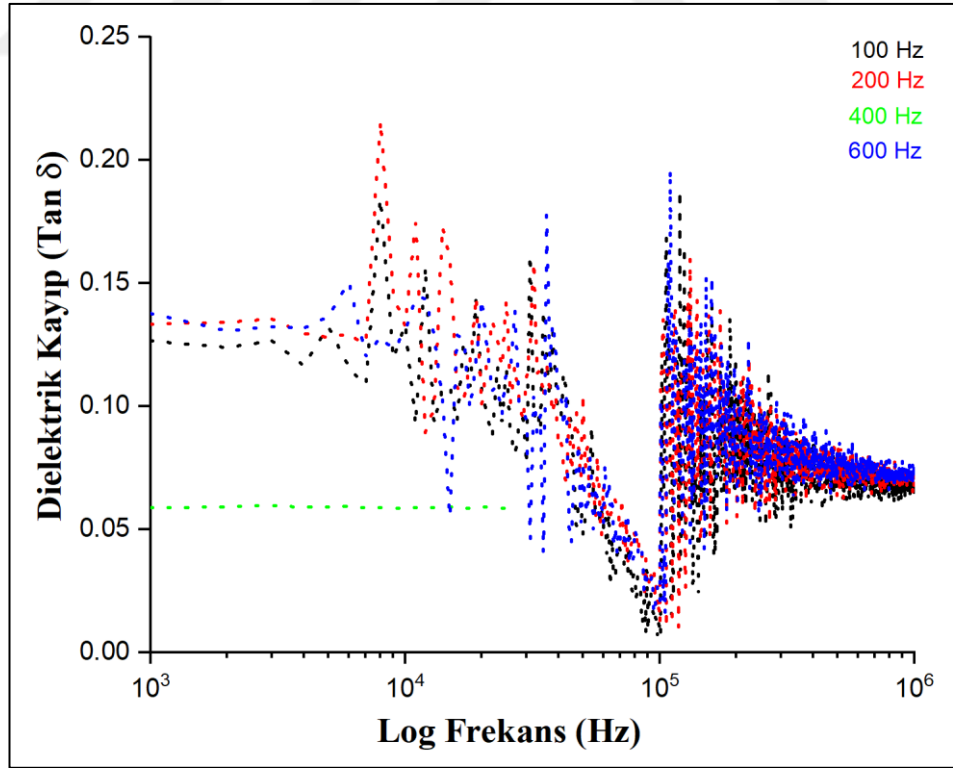


**Şekil 4.40:** %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik sabiti – frekans grafiği.

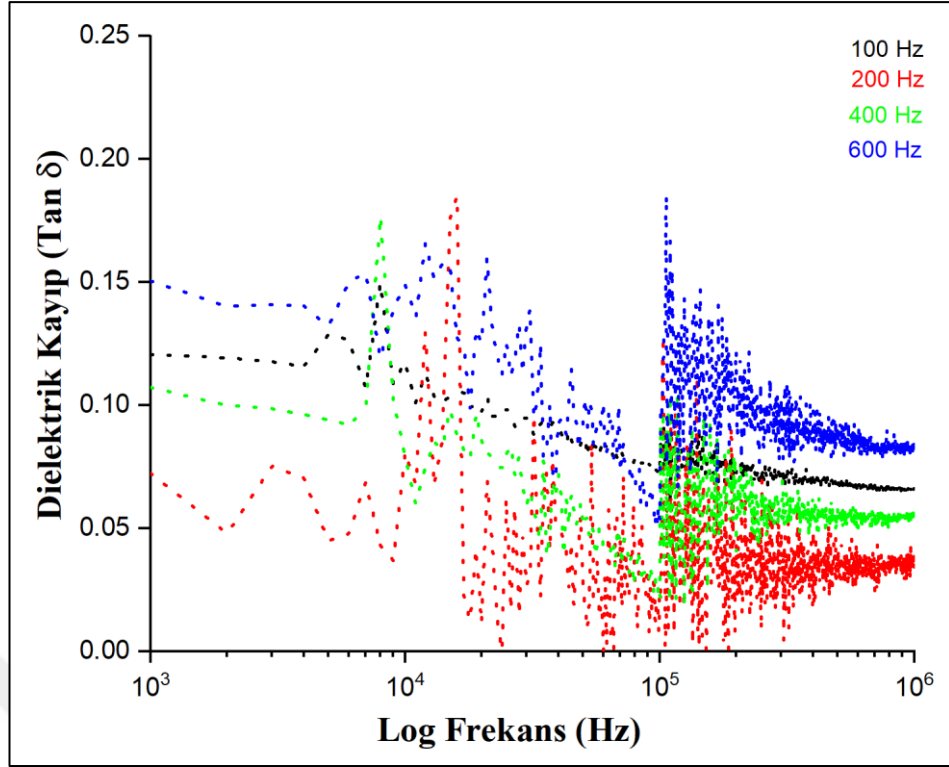
Kutuplama sonrası yapılan dielektrik ölçümlere göre dielektrik sabitinin yönlenmeye bağlı olarak değişimi konusunda en beklenen davranışı hacimce %15 KSN şablon parçacıklarına sahip olan piezokompozitler sergilemiştir. Yönlenmeye bağlı olarak dielektrik sabiti yüksek frekanslara çıkıldığında artış göstermektedir. 100 Hz ve 200 Hz frekansları kullanılarak üretilen piezokompozitlerde ise hem Lotgering faktörü değerlerinin birbirlerine yakın olması hem de Lotgering faktörü analizinin yarı-nicel bir analiz olması da dikkate alınarak kristal yönlenmeleri arasında çok büyük farklar olmadığı ve bu durumun dielektrik sabiti üzerinde büyük değişikliklere yol açmadığı gözlemlenmektedir.



**Şekil 4.41:** %5 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik kayıp – frekans grafiği.



**Şekil 4.42:** %10 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik kayıp – frekans grafiği.



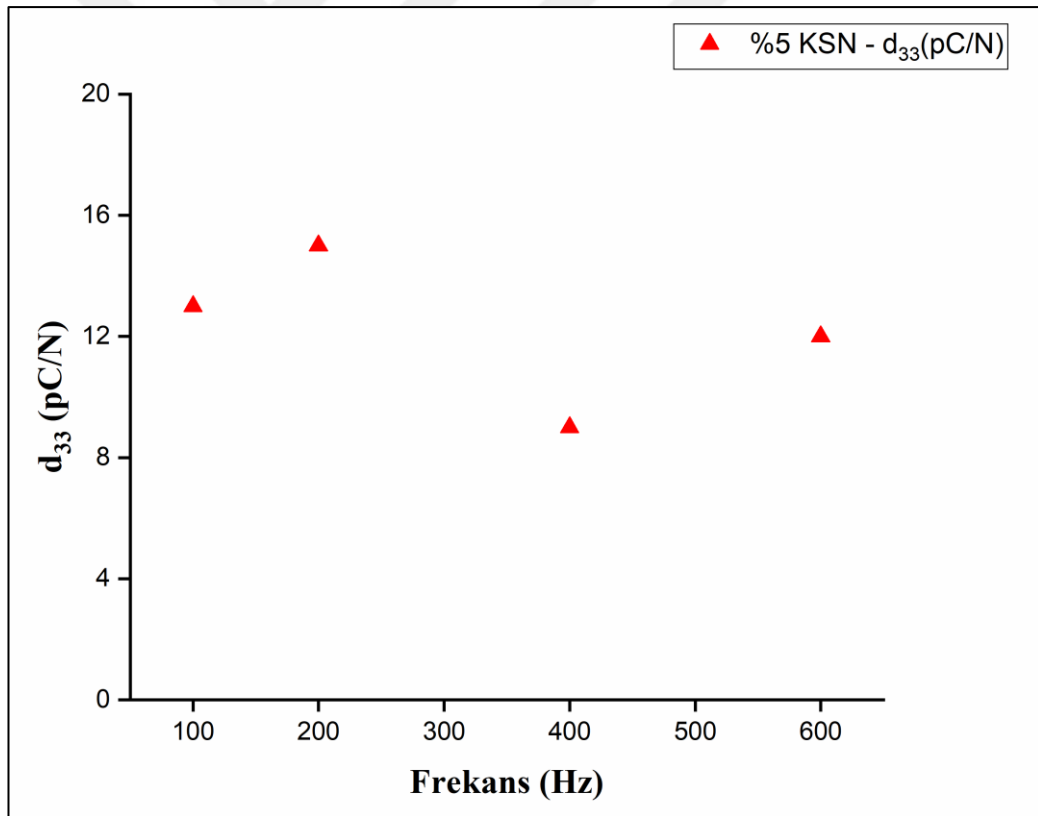
**Şekil 4.43:** %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası dielektrik kayıp – frekans grafiği.

Piezokompozitlerin dielektrik kayıpları dikkate alındığında (Bkz. **Şekil 4.41 – 4.43**) hacimce KSN miktarının artması ile dielektrik kayıpların artış gösterdiği görülmektedir. Düşük frekanslarda dielektrik kayıp değerlerinin frekansa bağlı olarak büyük değişikliklere neden olduğu görülmektedir. Dielektrik sabitinin ve dielektrik kayıp değerlerinin düşük frekanslarda çok fazla değişim gerçekleşmesinin bir diğer sebebi piezokompozitleri kutuplamak için uygulanan elektrik alan şiddetinin yeterli gelmemesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Literatürdeki çalışmalara göre her ne kadar polimer matris olarak tercih edilen malzeme farklı olmasına rağmen kutuplama işlemi için uygulanan elektrik alan şiddetinin bu tez çalışmasında uygulanan elektrik alan şiddetine göre çok daha yüksek olduğu literatürdeki çalışmalar da rapor edilmiştir **[D’ambrogio vd., 2021b], [Khanbareh vd., 2017b], [Pessia vd., 2020], [Wang vd., 2021]**. Bu çalışmada ise tercih edilen 100 kV/cm’lik elektrik alan hem ferroelektrik ölçüm sonrası histerisiz eğrilerinden elde edilen zorlayıcı elektrik alan değerleri hem de polimer matris fazının dayanabildiği maksimum elektrik alan olmasından dolayı tercih edilmiştir. Kutuplanmanın yeterince efektif olmadığı savı üzerinde ise yine literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında ve monolitik seramik malzemelerin kutuplanmaları dikkate alındığında kutuplama için kullanılan silikon yağının

sıcaklığının kutuplama üzerindeki etkisi de belirleyici olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan poliürea polimer matris fazının sıcaklık artışı ile bozunmaya uğrayabileceği için kutuplama işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

#### 4.9. Kutuplama Sonrası Piezokompozitlerin $d_{33}$ ve $g_{33}$ Katsayılarının Hesaplanması

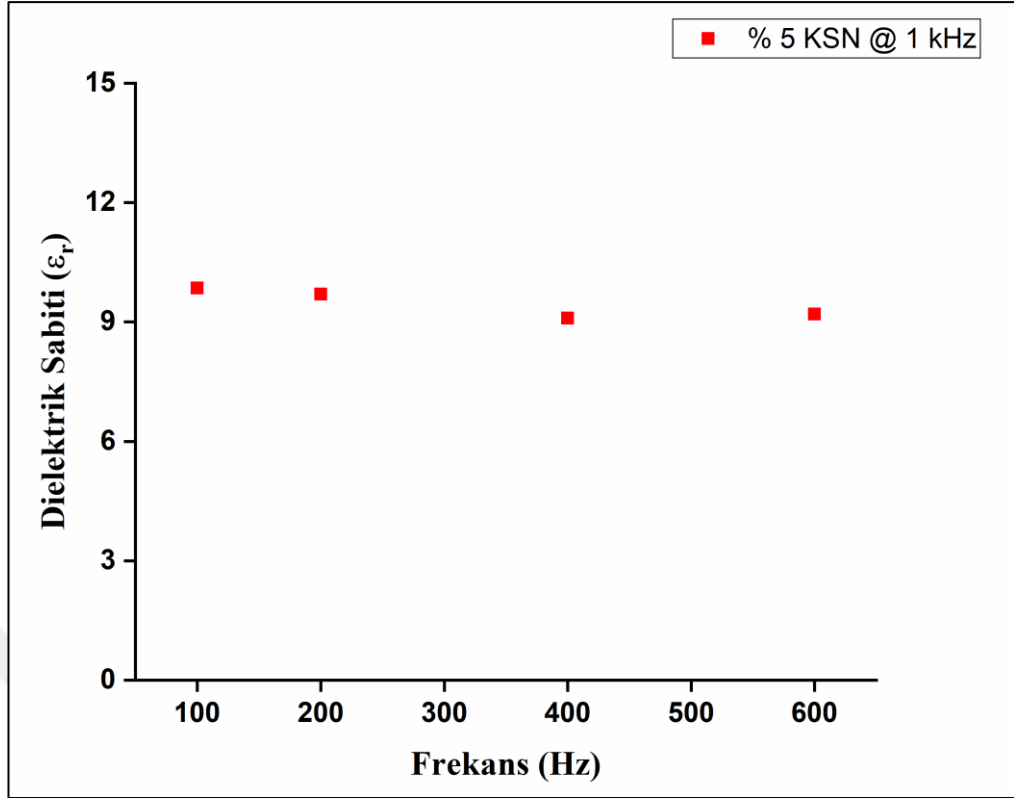
Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin elektriksel karakterizasyonun yapılabilmesi için ilk önce kutuplama işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bu sebeple deneysel kısımda piezokompozitlerin nasıl ve hangi koşullarda kutuplama işlemlerinin yapılmış olduğundan önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu kısımda ise kutuplama işlemi sonrası yapılan  $d_{33}$  ve dielektrik ölçüm sonuçlarının yardımıyla  $g_{33}$  sonuçlarının üzerinde tartışmalar yapılacaktır.



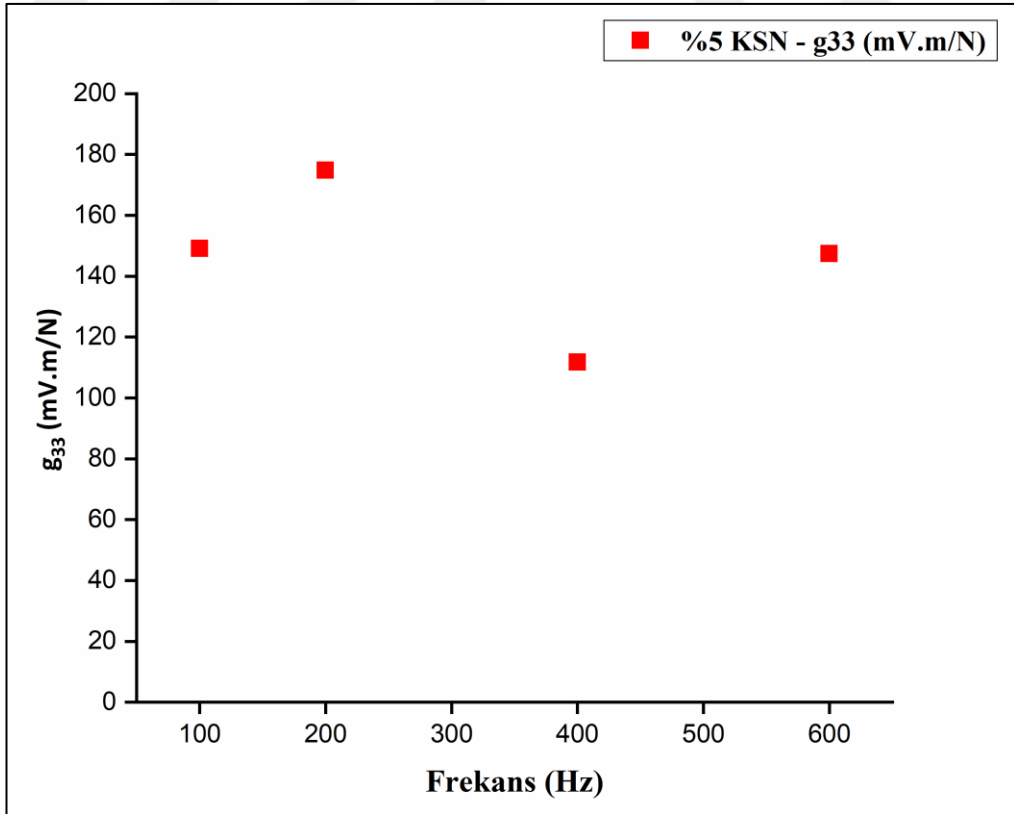
Şekil 4.44: %5 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği.

Şekil 4.44'te hacimce %5 KSN şablon parçacıkları kullanılan piezokompozitlerin kutuplama sonrasındaki  $d_{33}$  değerlerine ait grafik verilmiştir. Şekle göre doğru akım uygulanarak yapılan kutuplama sonrasında piezokompozitlerin ferroelektrik ölçüm

sonrasına göre  $d_{33}$  değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler sonrasında literatürde yapılan çalışmalar ile yapılan karşılaştırmalara göre hacimce %5 KSN içerikli piezokompozitlerin  $d_{33}$  değerlerinde önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir. Önceki bölümlerde, literatürde yapılan çalışmalardaki kompozitlerin genellikle eş eksenli parçacıklar kullanılarak üretildiklerinden bahsedilmiştir. Eş eksenli parçacıklar kullanılarak üretilen piezokompozitlerin kutuplama işlemlerinden sonra yapılan  $d_{33}$  ölçümlerinin sonucunda hacimce %5 dolgu malzemesine sahip kompozitlerin  $d_{33}$  değerlerinin yaklaşık olarak 5 pC/N'luk değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında olduğu gibi iğnesel morfolojideki dolgu malzemelerin kullanıldığı çalışmalar dikkate alındıklarında ise eş eksenli parçacıklara göre farklılıklar olduğu rapor edilmiştir [D'ambrogio vd., 2022]. D'ambrogio'nun hidrotermal yöntem ile üretmiş olduğu iğnesel morfolojideki  $\text{NaNbO}_3$  mikro-fiberlerin kullanılarak üretildiği piezokompozitlerde ise hacimce %5 oranındaki dolgu malzemesinin kutuplama sonrasındaki  $d_{33}$  değeri yaklaşık olarak 10 pC/N değerinin elde edildiği raporlanmıştır. KSN şablon parçacıklarının kullanıldığı ve tek kristal özelliklere sahip olan bu çalışmada ise yönlenmeye bağlı olarak en yüksek  $d_{33}$  değeri 15 pC/N değerine ulaşılmıştır. Bu verilerin ışığında hem D'ambrogio'nun yaptığı çalışma hem de bu çalışmadaki iğnesel morfolojide üretilmiş olan dolgu malzemelerinin literatürdeki eş eksenli partiküllere göre daha yüksek  $d_{33}$  değerinin elde edilebileceği belirlenmektedir. KSN şablon parçacıklarının hem tek kristal olması hem de  $\text{NaNbO}_3$  mikro-fiberlerinden daha büyük parçacık boyutuna sahip olmasının  $d_{33}$  değerini daha fazla arttıracak yapıları yapılan deneysel çalışma sonucunda belirlenmiştir.

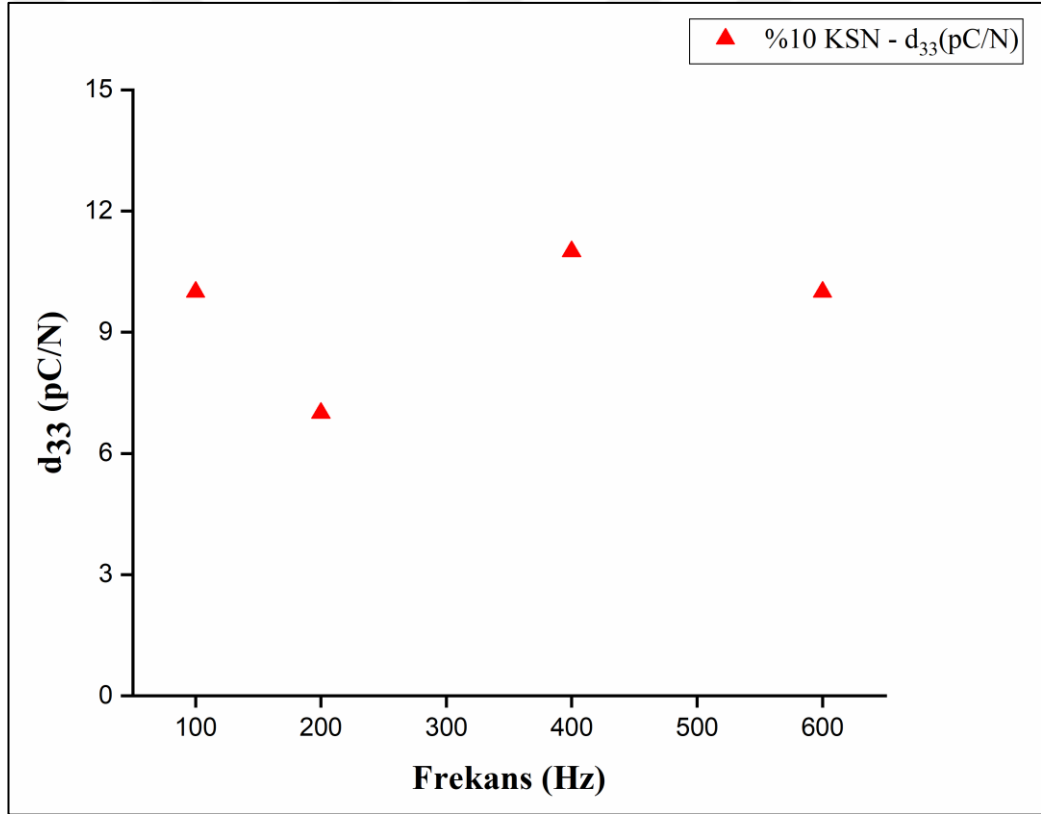


Şekil 4.45: %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası 1 kHz dielektrik sabiti grafiği.



Şekil 4.46: %5 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası  $g_{33}$  grafiği.

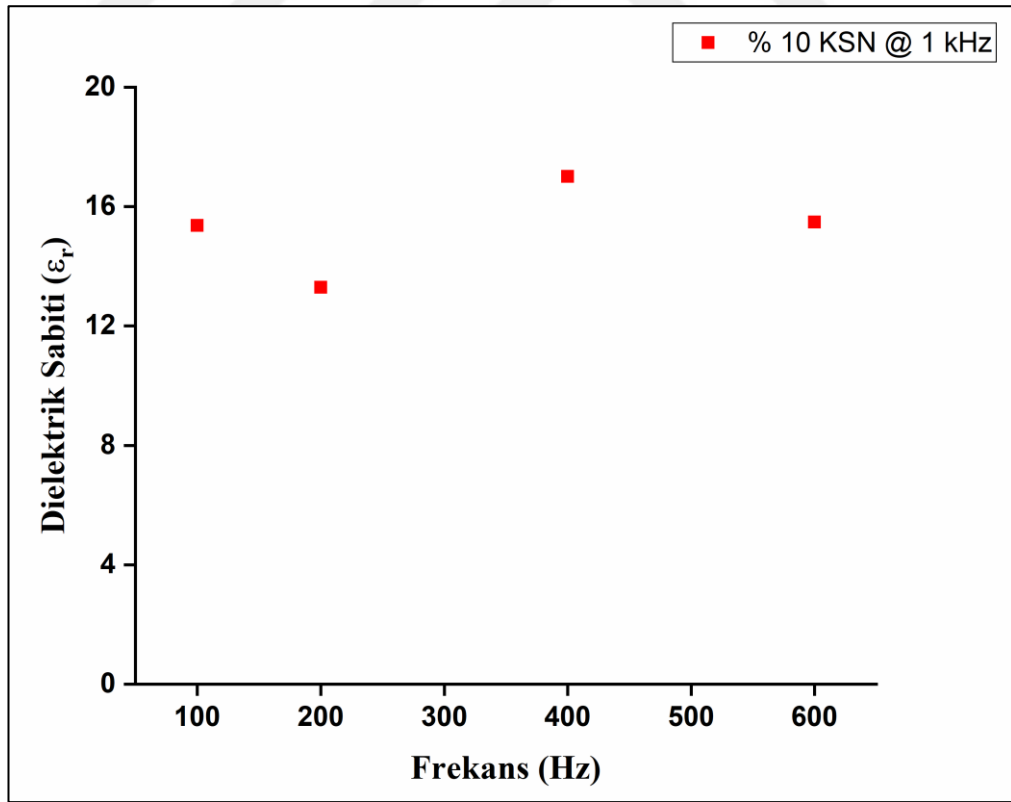
**Şekil 4.46**'da verilen frekansa bağlı  $g_{33}$  grafiği hacimce %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlere aittir. Şekildeki verilere göre elde edilen  $g_{33}$  değerleri hem D'ambrogio'nun  $\text{NaNbO}_3$  mikro-fiberlerinin kullanarak ürettiği hem de eş eksenli parçacıkların kullanılması sonucunda elde edilen  $g_{33}$  değerlerinden daha yüksek değerler ulaşılmıştır. KSN şablon parçacıklarının kullanılması sonucunda elde edilen en yüksek  $g_{33}$  değeri 174 mV.m/N değeri olmuştur. Aynı miktardaki farklı şablon parçacıklarının kullanılması sonucunda elde edilen değerlerden bu değere en yakın olanı D'ambrogio'nun 148 mV.m/N'luk  $\text{NaNbO}_3$  mikro-fiber kullandığı çalışmaya aittir [D'ambrogio vd., 2022]. Sonuç olarak tek kristal KSN şablon parçacıklarının hem  $d_{33}$  değerlerini hem de  $g_{33}$  değerlerini arttırdığı belirlenmiştir.



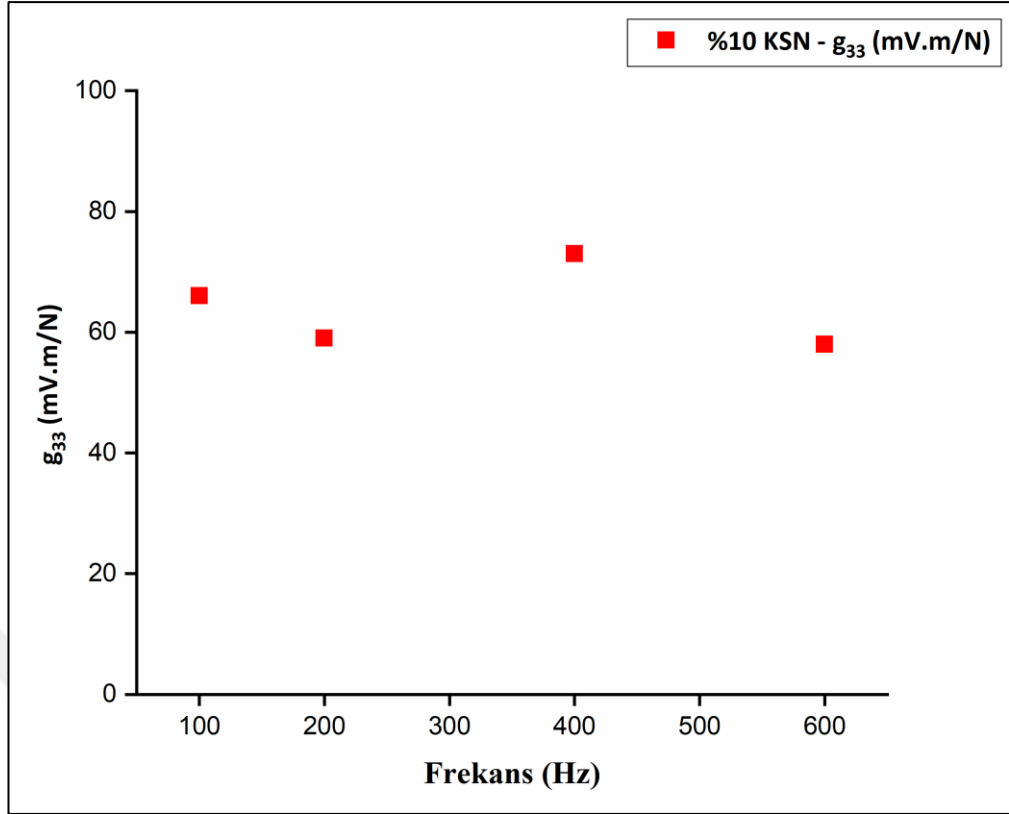
**Şekil 4.47:** %10 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği.

**Şekil 4.47** %10 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası  $d_{33}$  değerlerine aittir. Kutuplama sonrası yapılan  $d_{33}$  ölçümlerinin sonucunda hacimce %10'luk KSN içeren şablon parçacıklarının yönlenme miktarının literatürdeki çalışmalara göre daha düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir

[Khanbareh vd., 2014], [Khanabareh vd., 2017a], [Khanabareh vd., 2017b], [Khanabareh vd., 2017c], [Khaliq vd., 2017], [Gao vd., 2022], [Armen vd., 2022], [Tu vd., 2016], [Zahaf vd., 2022]. Yönlendirme miktarının hacimce %5 KSN içeren piezokompozitlere göre daha düşük olmasına rağmen literatürdeki çalışmalarla benzer  $d_{33}$  değerlerine sahip olması tek kristal şablon parçacıklarının özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.49’da ise %10 KSN şablon parçacıklarının kullanıldığı piezokompozitlere ait  $g_{33}$  değerleri verilmiştir. Yapılan  $g_{33}$  hesaplamalarının sonucunda her ne kadar literatüre göre benzer  $d_{33}$  değerlerine sahip olsa da 1 kHz frekanstaki dielektrik sabiti değeri bu çalışmada tercih edilen piezokompozite göre daha düşük olduğu için  $g_{33}$  değerlerinde literatüre göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Literatürdeki çalışmalarda belirtilen en yüksek değerler hacimce %10 dolgu malzemesi kullanılan çalışmalarda rapor edilmiştir. D’ambrogio’nun  $\text{NaNbO}_3$  mikro-fiber çalışmasında sadece hacimce %5’e kadar  $\text{NaNbO}_3$  mikro-fiberleri kullanıldığı için bu çalışmadaki %10 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitler eş eksenli dolgu malzemeleri kullanılarak yapılan çalışmalara göre değerlendirilmiştir.

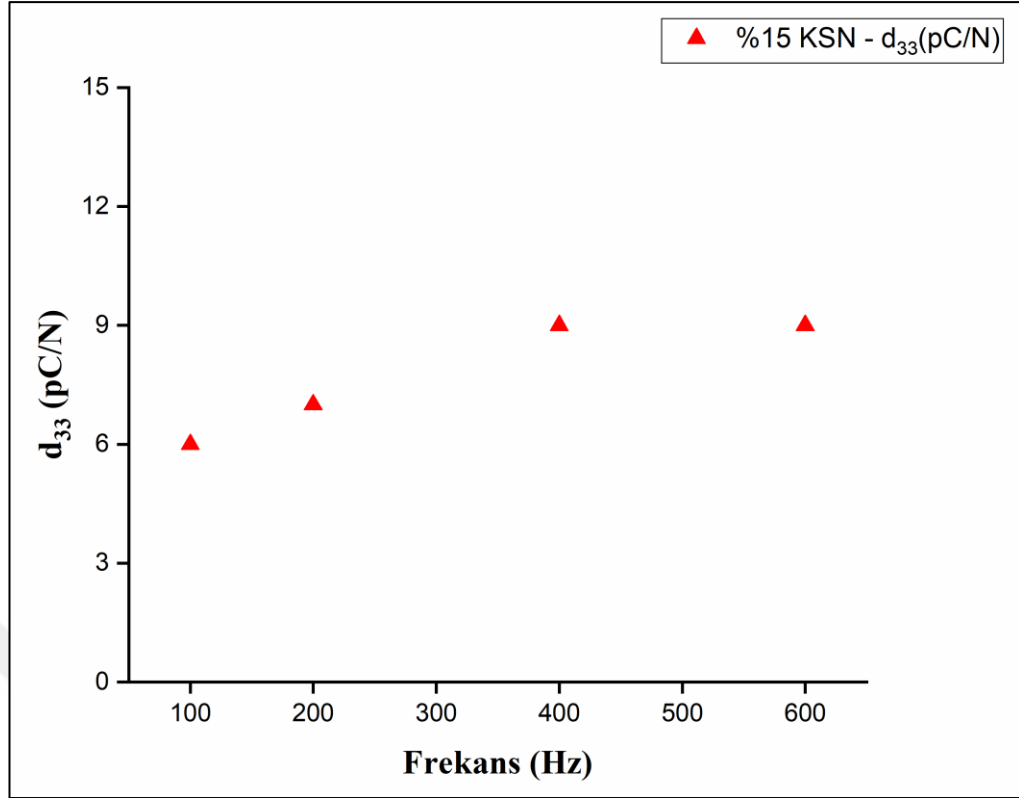


Şekil 4.48: %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası 1 kHz dielektrik sabiti grafiği.

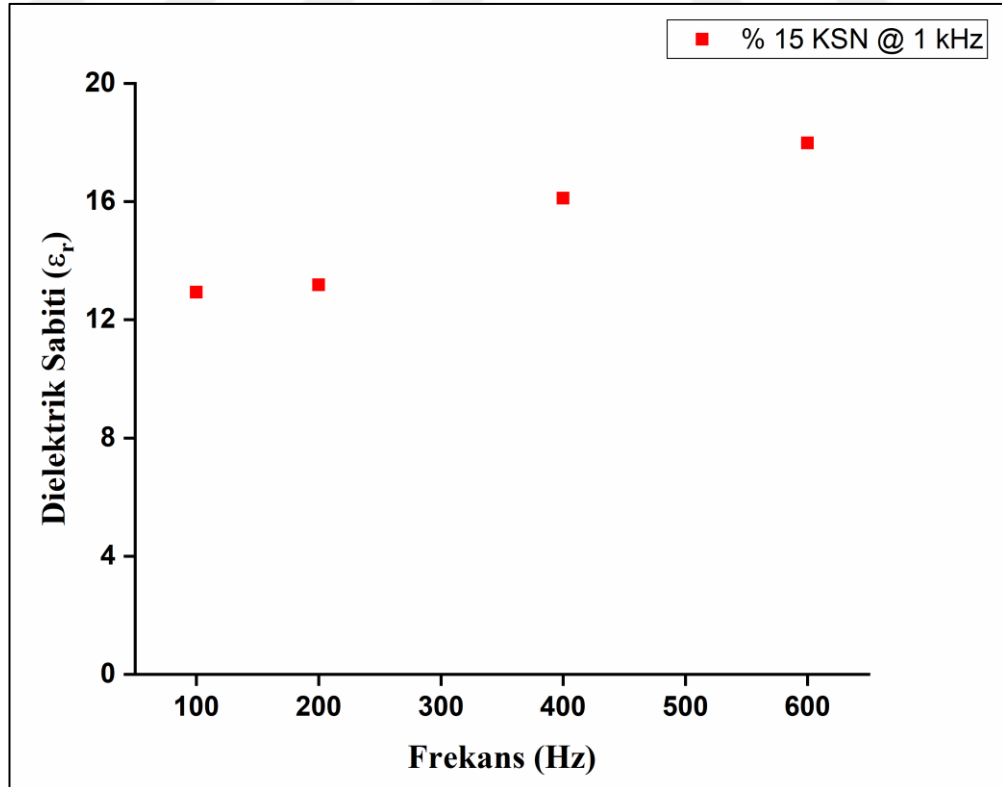


**Şekil 4.49:** %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası  $g_{33}$  grafiği.

**Şekil 4.50'**de %15 KSN şablon parçacıkları kullanılarak üretilen piezokompozitlerin  $d_{33}$  değerleri verilmiştir. Yapılan  $d_{33}$  ölçümleri sonucunda elde edilen  $d_{33}$  değerleri yönlenmeye bağlı olarak yaklaşık olarak 5-10 pC/N arasında bulunmuştur. Yönlenmenin azalması hem de KSN şablon parçacıklarının unipolar ferroelektrik malzeme olmasının sonucu olarak  $d_{33}$  değerleri literatüre göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda eş eksenli piezoelektrik dolgu malzemelerinin kullanılması dielektroforesis sonucunda yönlenme eğilimi göstermeseler bile piezokompozitlerin  $d_{33}$  değerlerinde artışa sebep olacaktır. Bu nedenle KSN şablon parçacıklarının yönlenmesindeki azalmanın sonucunda  $d_{33}$  değerlerinin azalması olağan bir durumdur.

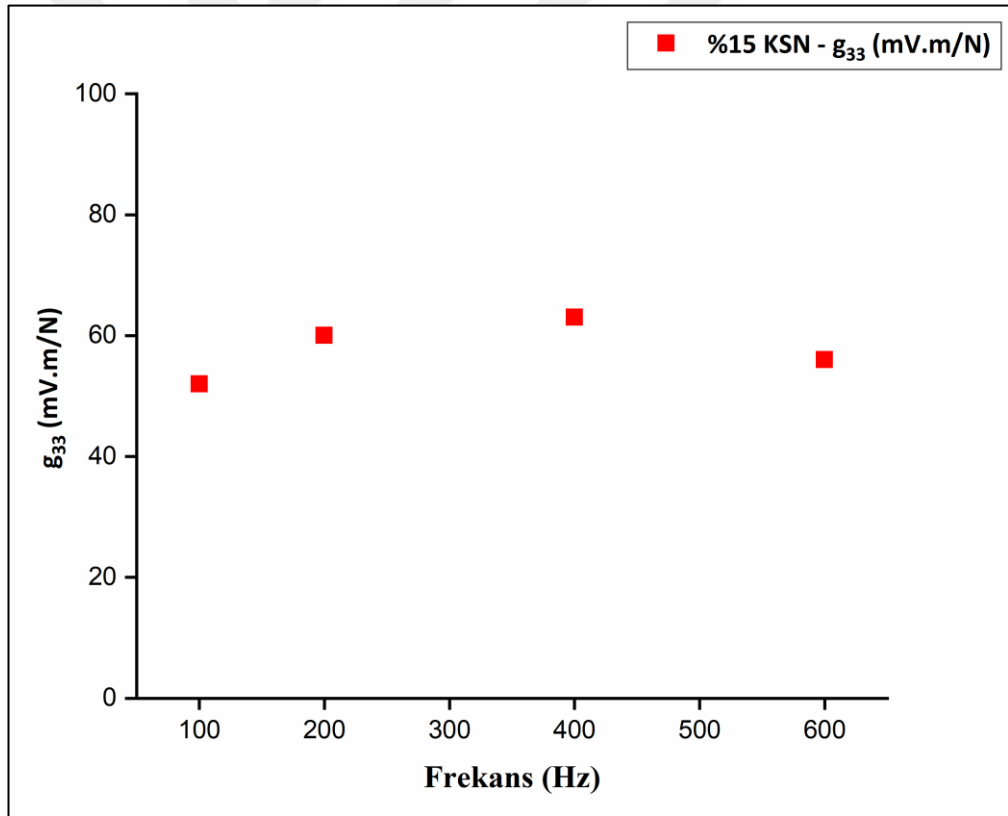


**Şekil 4.50:** %15 KSN içeren piezokompozitlerin kutuplama sonrası piezoelektrik yük katsayısı – frekans grafiği.



**Şekil 4.51:** %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası 1 kHz dielektrik sabiti grafiği.

%15 KSN şablon parçacıklarının kullanılması sonucunda hesaplamaları yapılan  $g_{33}$  değerleri **Şekil 4.52**'de verilmiştir. KSN şablon parçacıklarının hem yönlenme miktarlarının azalması hem de KSN şablon parçacıklarının seramik malzeme olmasından kaynaklı 1 kHz'deki dielektrik sabiti değerlerinin artış göstermesi sonucunda  $g_{33}$  değerlerinde %5 ve %10 KSN içeren piezokompozitlere göre önemli ölçüde düşüşler belirlenmiştir. Bu durum literatürdeki çalışmalara göre değerlendirildiğinde benzer özellikler sergilemektedir. Literatürdeki çalışmalarda her ne kadar hacimce dolgu malzemesinin artmasının sonucunda  $d_{33}$  değerlerinde artış olmasının yanı sıra hem zincir yapısının oluşması hem de zincir yapısının oluşmasında katkıda bulunmayan eş eksenli partiküllerin 1 kHz'deki dielektrik sabitlerinde artışa neden olmalarından kaynaklı olarak  $g_{33}$  değerleri literatürdeki çalışmalarda da azalmaktadır.



**Şekil 4.52:** %15 KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin kutuplama sonrası  $g_{33}$  grafiği.

Piezoelektrik yük katsayısı –  $d_{33}$  ve piezoelektrik voltaj katsayısı –  $g_{33}$  analizlerinin ve hesaplamalarının sonucunda KSN şablon parçacıklarının hacimce miktar olarak azalmalarının sonucunda elde edilen  $d_{33}$  ve  $g_{33}$  değerlerinin artış gösterdiği

belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara göre en yüksek  $g_{33}$  değerleri en yüksek hacimce %10 dolgu malzemesi içeren piezokompozitlerde elde edilmiştir. Bu çalışmada ise %5 KSN şablon parçacıkları içeren piezokompozitler hem  $d_{33}$  hem de  $g_{33}$  değerlerinde en yüksek değerlere sahiplerdir. Yönlendirilen  $d_{33}$  değeri üzerindeki etkisinin dolgu malzemesi KSN'nin miktarından daha baskın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan tek kristal KSN şablon parçacıklarının kullanılması sonucunda üretilen piezokompozitlerin  $d_{33}$  katsayısı değerleri aynı yöntem kullanılarak üretilen ve dolgu malzemesi olarak PZT kullanılan piezokompozitler ile karşılaştırıldığında bazı durumlarda daha üstün özellikler göstermektedir. Ayrıca daha az malzeme kullanılarak daha yüksek  $d_{33}$  ve  $g_{33}$  değerlerinin elde edilmesi literatüre yapılacak olan önemli bir katkıdır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan KSN şablon parçacıkları kurşunsuz piezoelektrik malzemeler grubu içerisinde oldukları için özellikle literatürdeki kurşun içerikli PZT gibi dolgu malzemelerinin kullanıldığı çalışmalara göre toksisite açısından zararsızdır. Dokunsal sensörlerin en önemli uygulama alanlarından bir tanesi olan biyomalzemeler için de bu durum önemli bir avantaj sağlamaktadır. KSN şablon parçacıklarının Sr ve Nb gibi ağır metaller içermesi ise en önemli dezavantajlarından biridir fakat kullanılan KSN şablon parçacık miktarı düşük seviyelerde oldukları için içerdiği  $Sr^{+}$  ve  $Nb^{+5}$  gibi ağır metallerin dezavantajlarını dengeleme konusunda önemli bir avantaj da sağlayacağı düşünülmelidir.

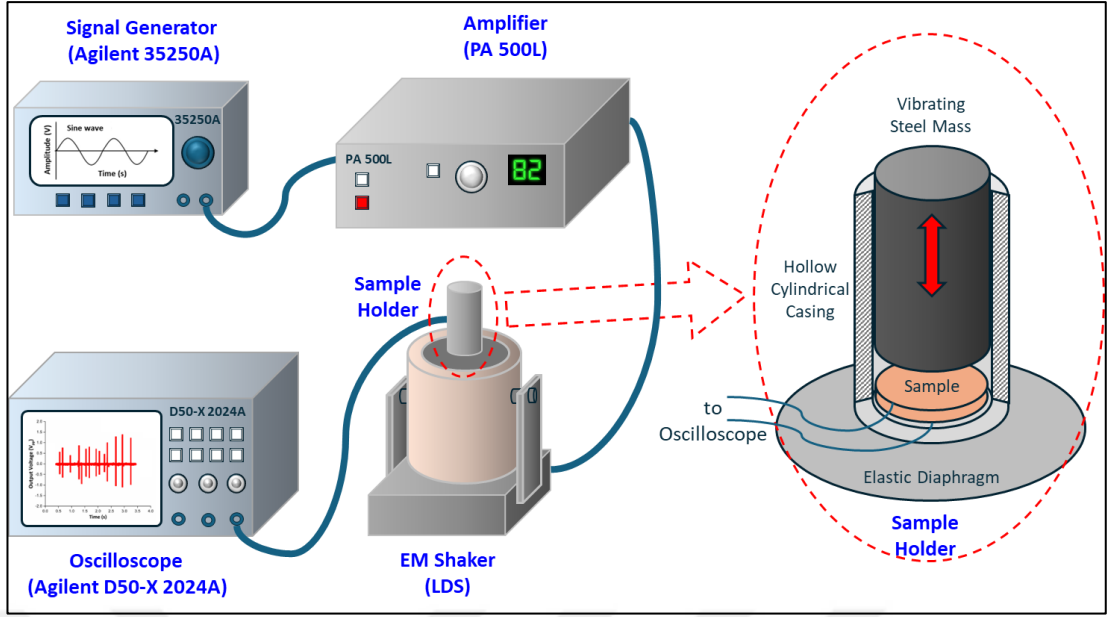
Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin yapısal ve elektriksel karakterizasyonları sonucunda elde edilen veriler **Tablo 4.2**'de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Piezokompozitlerin elektriksel özellikleri ve yönlenme miktarları

| % Vol KSN | E.A | $P_r$<br>( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) | $P_{\max}$<br>( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) | $d_{33}$<br>(pC/N) | $g_{33}$<br>(mV.m/N) | K<br>1 MHZ | $f$  |
|-----------|-----|----------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|----------------------|------------|------|
| 5-R*      | -   | 0.01                                   | 0.14                                        | < 5                | -                    | 5          | 0    |
| 5%        | 100 | 0.2                                    | 0.97                                        | 13                 | 149                  | 6.49       | 0.78 |
|           | 200 | 0.21                                   | 1.37                                        | 15                 | 174                  | 6.39       | 0.83 |
|           | 400 | 0.04                                   | 0.24                                        | 9                  | 111                  | 5.9        | 0.74 |
|           | 600 | 0.17                                   | 0.68                                        | 12                 | 147                  | 6.01       | 0.77 |
| 10-R*     | -   | 0.05                                   | 0.34                                        | < 5                | -                    | 6          | 0    |
| 10        | 100 | 0.3                                    | 0.75                                        | 9                  | 66                   | 10.43      | 0.64 |
|           | 200 | 0.14                                   | 0.61                                        | 7                  | 59                   | 8.62       | 0.31 |
|           | 400 | 0.61                                   | 1.24                                        | 11                 | 73                   | 11.53      | 0.66 |
|           | 600 | 0.31                                   | 0.7                                         | 8                  | 58                   | 10.35      | 0.52 |
| 15-R*     | -   | 0.04                                   | 0.45                                        | < 5                | -                    | 8          | 0    |
| 15        | 100 | 0.16                                   | 0.34                                        | 6                  | 52                   | 8.96       | 0.13 |
|           | 200 | 0.15                                   | 0.73                                        | 7                  | 60                   | 9.19       | 0.17 |
|           | 400 | 0.42                                   | 1.11                                        | 9                  | 63                   | 11.90      | 0.31 |
|           | 600 | 0.14                                   | 1.09                                        | 9                  | 56                   | 11.08      | 0.27 |

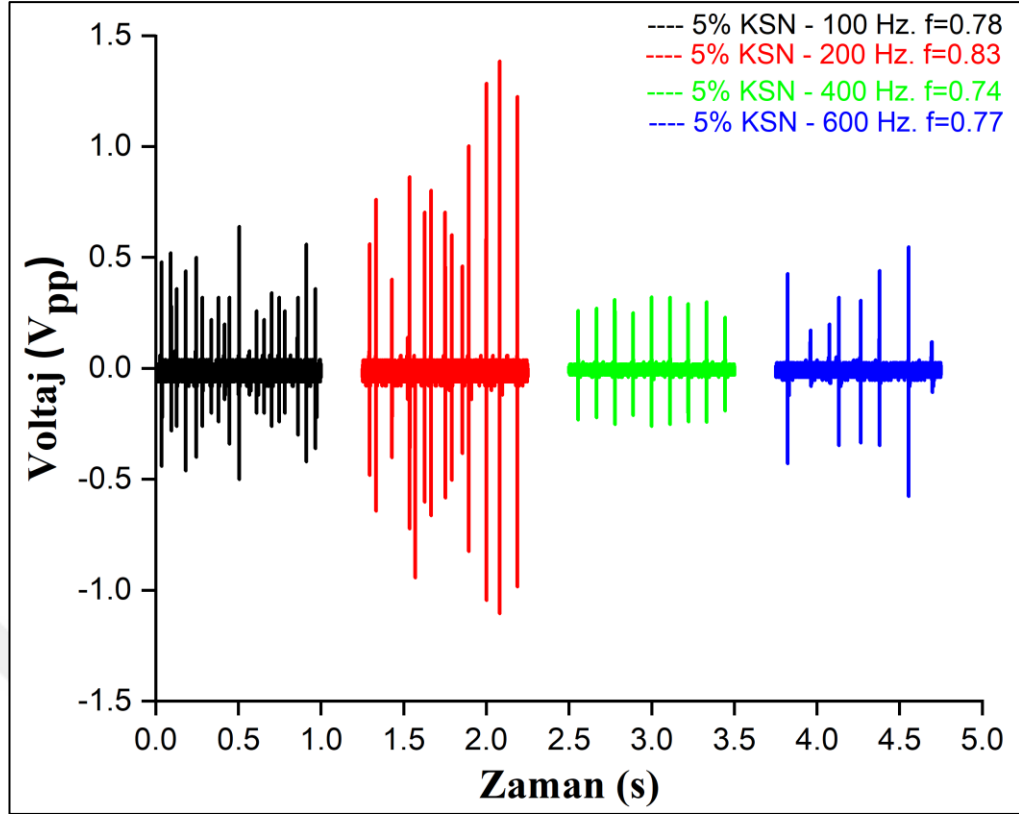
#### 4.10. Piezokompozitlerin Sensör Ölçüm Sonuçları

Dielektroforesis yöntemi kullanılarak üretilen piezokompozitlerin sensör ölçümünün gerçekleştirildiği deneysel düzenek **Şekil 4.53**'te verilmiştir. **Şekil 4.53**'te gösterildiği üzere kutuplaması yapılan piezokompozitlerin her iki yüzeylerine devreyi tamamlaması için gümüş epoksi yardımıyla bakır plakalar yapıştırılmıştır. Piezokompozitlere yapıştırılan bakır plakaların diğer uçlarına iletken teller ile lehim yapılarak osiloskop bağlantısı sağlanmıştır. Voltaj oluşmasını sağlamak için sinyal jeneratörü yükseltgeyici ara elemana ve yükseltgeyici ara elemanda piezokompozitlerin voltaj üretimini sağlayacak olan elektromanyetik titreştirici hazneye bağlanmıştır. Sensör ölçümleri sırasında sinyal jeneratörü yardımıyla farklı frekanslardaki elektromanyetik titreşim sonucunda osiloskop yardımıyla piezokompozitlerin ürettikleri voltaj değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada sensör ölçümleri sırasında uygulanan frekans 25 – 45 Hz frekans piezoelektrik etkinin oluşması için ise 10 – 25 gram aralığında çelik ağırlıklar kullanılmıştır.



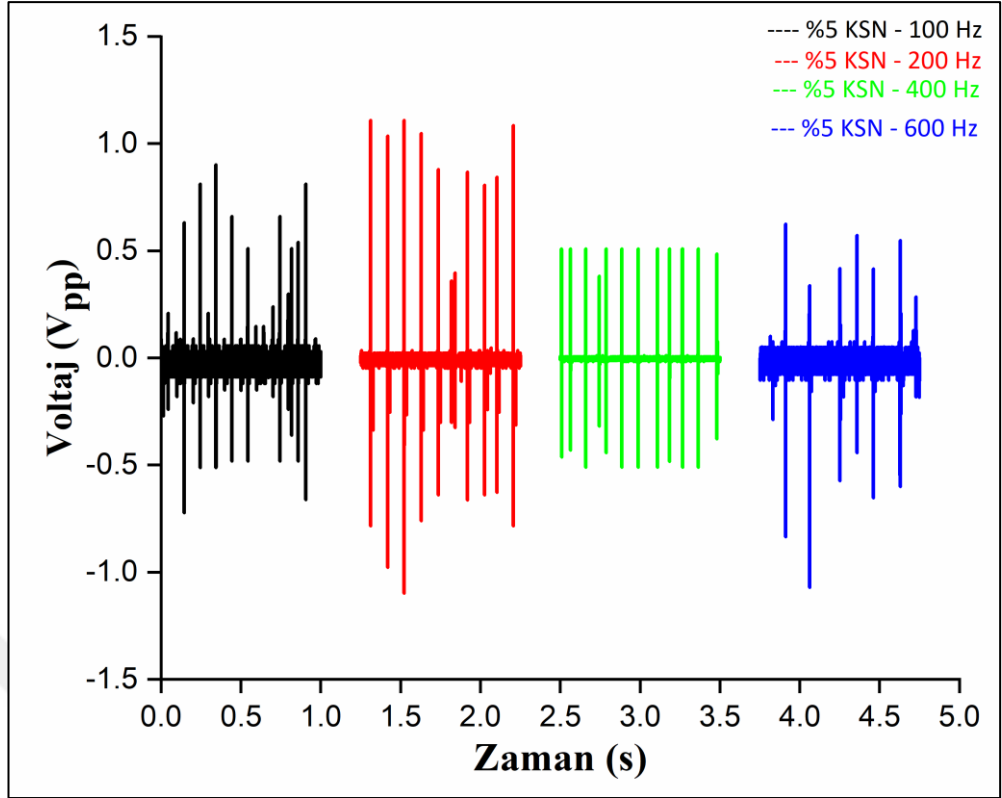
**Şekil 4.53:** Piezokompozitlerin sensör ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneği.

Piezokompozitlerin sensör ölçümlerinin sonucunda yönlenmeye bağlı olarak çıkış voltaj değerlerinin artış göstermekte olduğu belirlenmiştir. Piezokompozitlerin ürettiği voltajın değerleri en yüksek değerlere 200 Hz frekansı kullanılarak üretilen piezokompozitlerde ulaştığı yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Yönlenmenin sensör ölçümleri ne yapmış olduğu etki aynı elektriksel özelliklerde olduğu gibi yapılan ölçüm sonuçlarına göre daha baskındır çünkü kullanılan KSN'nin daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi unipolar ferroelektrik malzeme olması ve artan madde miktarının polar olmayan eksenlerin istatistiksel olarak baskın gelmesi ile bu durum ifade edilebilir. Piezokompozitlerin çıkış voltajlarının üzerindeki bir diğer önemli etki ise sinyal üretici tarafından elektromanyetik titreştiriciye gönderilen frekans değeridir. Sensör ölçümlerinde kullanılan piezokompozitlerin üzerine yerleştirilmiş olan ağırlığın sabit tutulmasının sonucunda frekans değerlerinin 45 Hz'den – 25 Hz frekansına doğru azaltılmasının sonucunda çıkış voltaj değerlerinde azalma gözlemlenmektedir. Bu durum hacimce %5 KSN içeren piezokompozitlerin çıkış voltajı değerlerinin verildiği grafik **Şekil 4.54**'te gösterilmiştir.



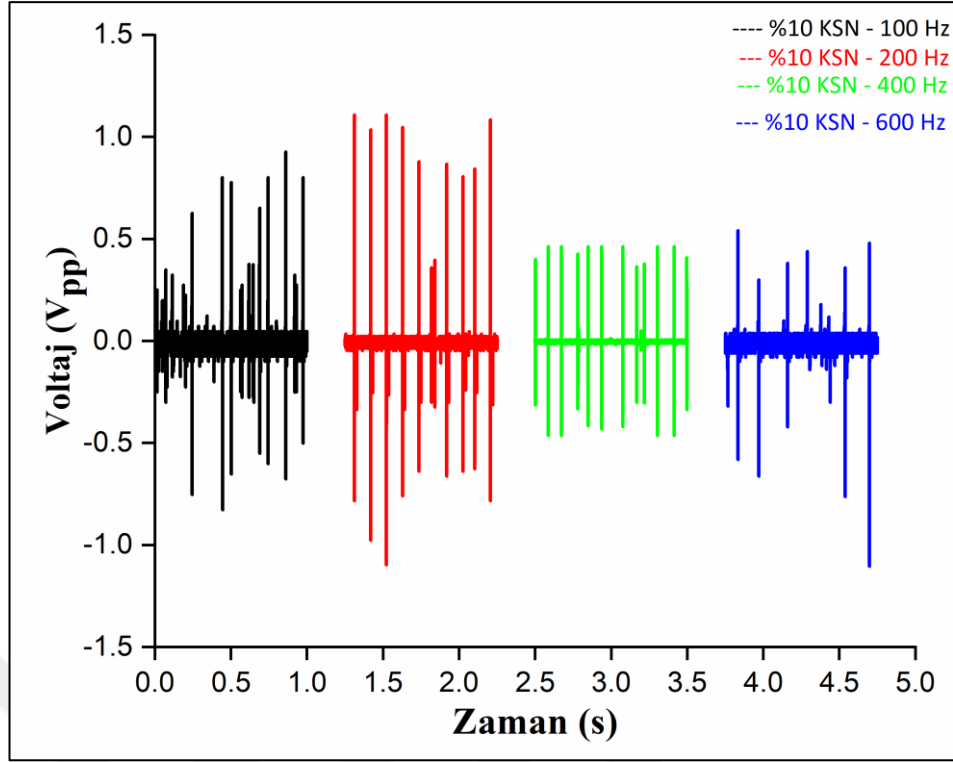
**Şekil 4.54:** %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği.

Şekil 4.54'e göre yönlenmeye bağlı olarak çıkış voltaj değerleri arasındaki farklılıklar açıkça görülmektedir. Şekil 4.54'te çıkış voltaj değerlerinin ölçülmesi için 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekans tercih edilmiştir. Yönlenmeye bağlı olarak çıkış voltaj değerlerinde ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Aynı zamanda elde edilen çıkış voltaj değerlerine ve grafiğe bakıldığında 45 Hz frekans kullanılarak uygulanan ağırlığın numunenin üzerine periyodik olarak vurmadığı görülmektedir. Bu farklılığın nedeni piezokompozit malzemenin sensör ölçümü için yerleştirildiği hazne ile ağırlık olarak kullanılan çelik malzemenin birebir uyumlu olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kullanılan ağırlığı ve piezokompozitlerin yerleştirildiği polietilen haznenin yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı elektromanyetik titreştiricinin titreşim hareketini yapması ile sürtünmeden kaynaklı ağırlığın periyodik olarak piezokompozitin üzerine etki etmesini engellemektedir.



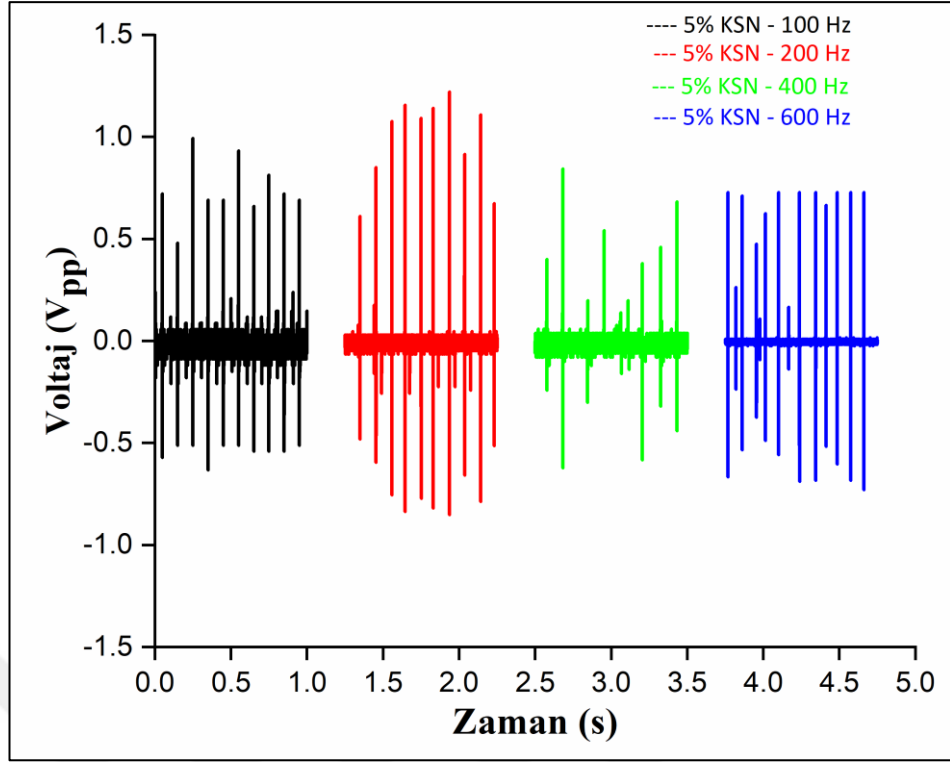
**Şekil 4.55:** %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği.

Sensör karakterizasyonu için kullanılan frekansın 40 Hz'e düşürülmesinin sonucunda oluşan grafik **Şekil 4.55**'te verilmiştir. Yönlenmeye bağlı olarak çıkış voltajları yönlenmenin yüksek olması ile artış göstermektedir. Aynı zamanda en büyük farklılık 400 ve 600 Hz frekansları kullanılarak üretilen piezokompozitlerin vermiş olduğu sinyallerin daha periyodik oldukları gözlenmektedir.

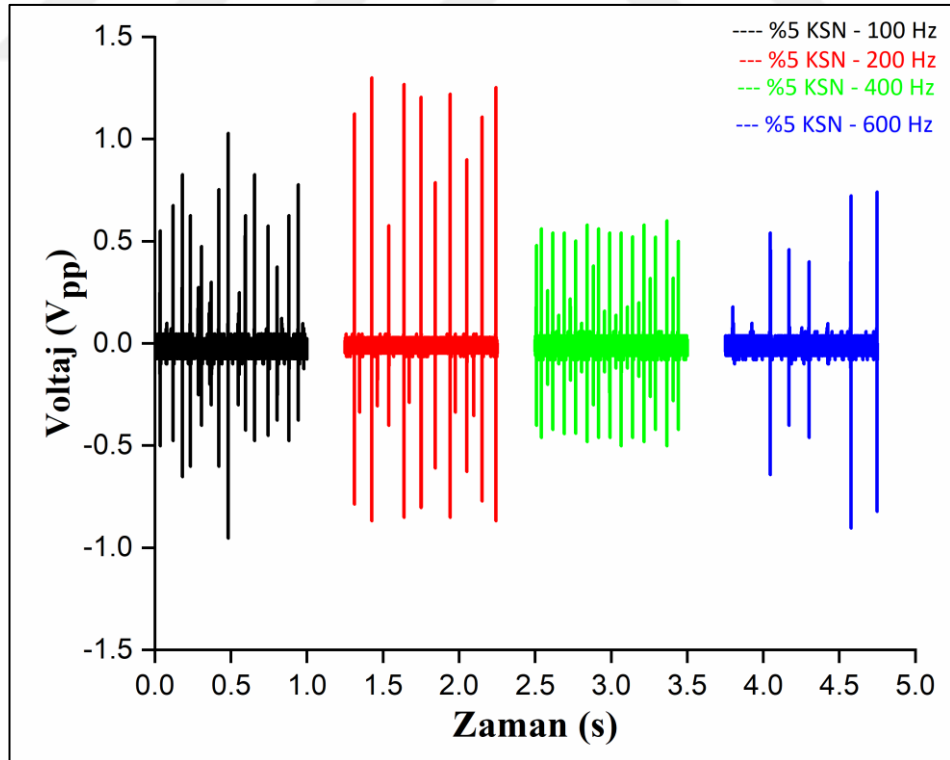


**Şekil 4.56:** %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği.

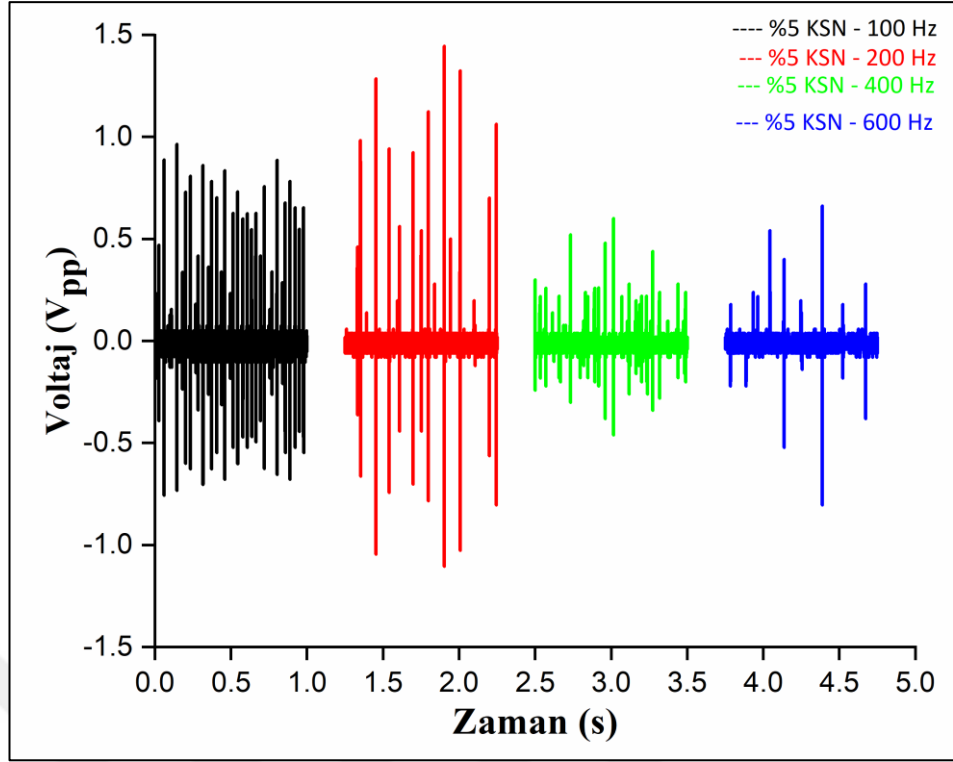
Sensör ölçümleri için ağırlığın sabit tutularak frekans değerlerinin değişmesi sonucunda yönlenmenin yüksek olduğu piezokompozitlerin çıkış voltaj değerleri arasında çok büyük farklılıklar olmadığı gözlemlenirken daha düşük yönlenmeye sahip olan piezokompozitlerin voltaj değerlerinde belirli bir miktar artışın olduğu da grafiklerden anlaşılmaktadır. 25 gram ağırlığın tercih edildiği ölçümlerde elde edilen sinyallerin genel olarak periyodik olmadıkları görülmektedir. Bu durumun düşük yönlenmeye sahip piezokompozitlerin çıkış voltajları üzerinde de etki yaratabileceği dikkate alınmalıdır.



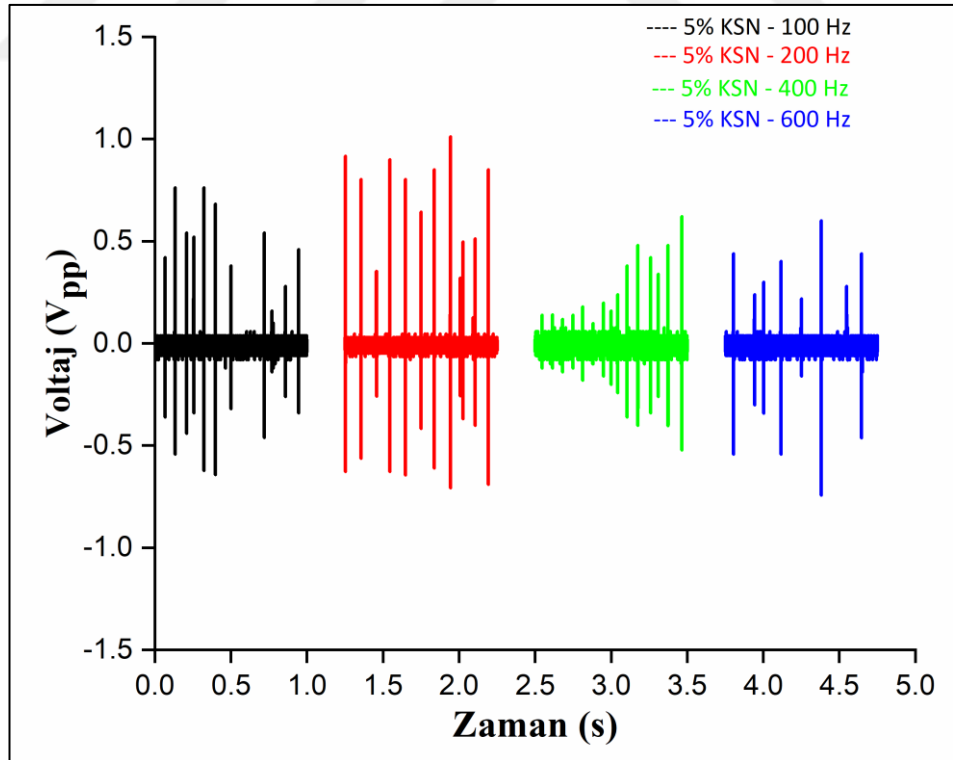
Şekil 4.57: %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



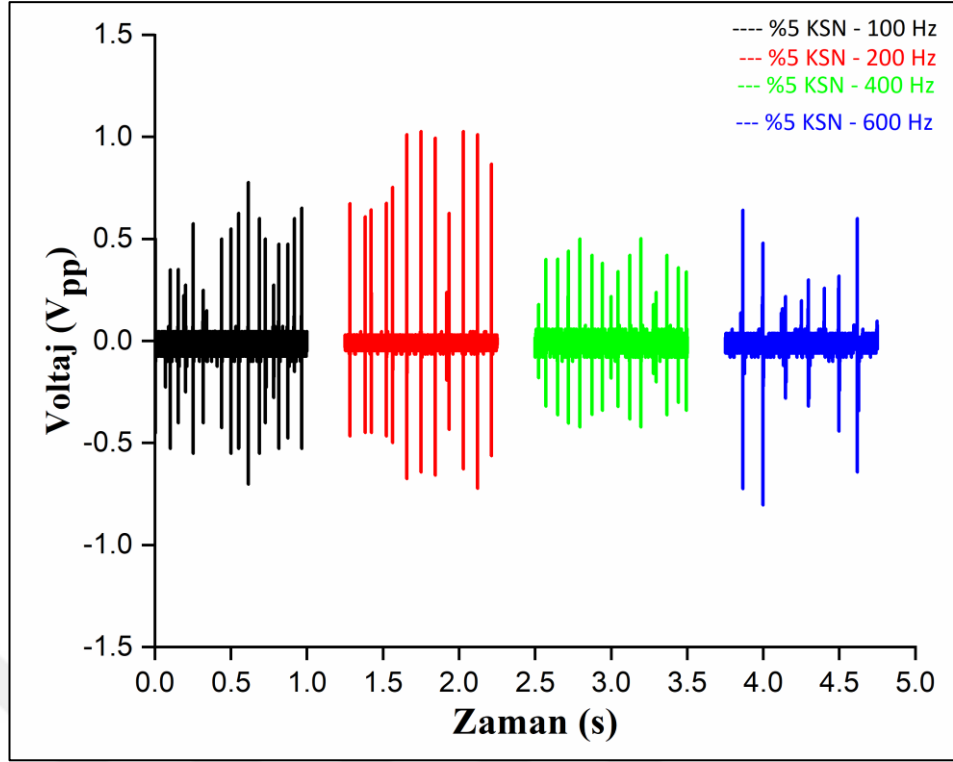
Şekil 4.58: %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



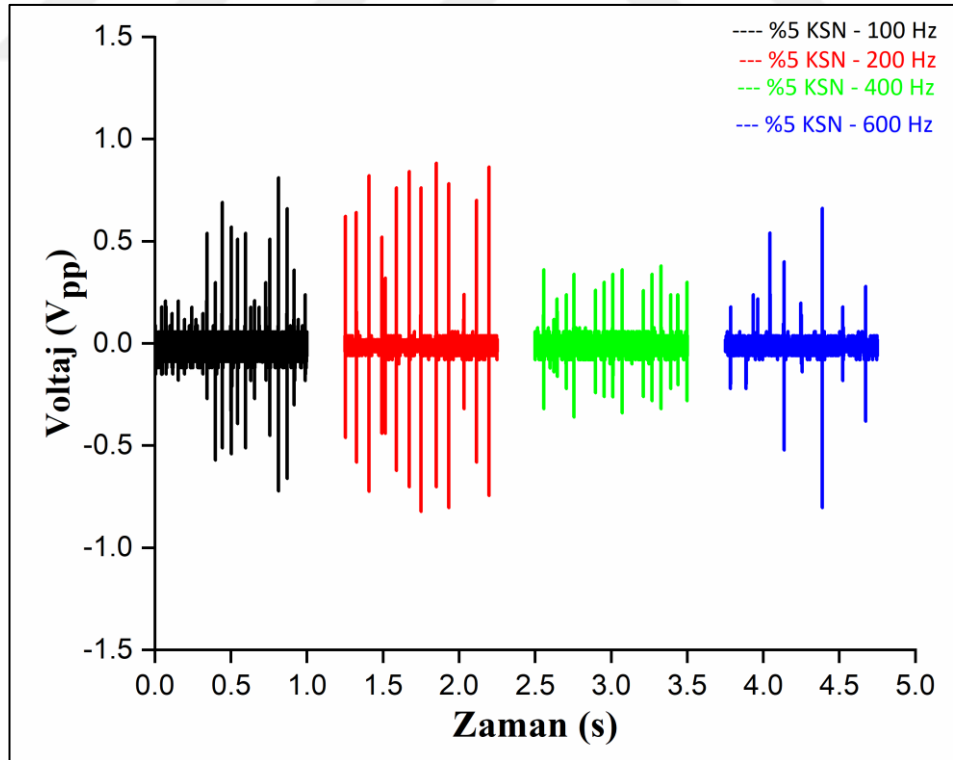
**Şekil 4.59:** %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği.



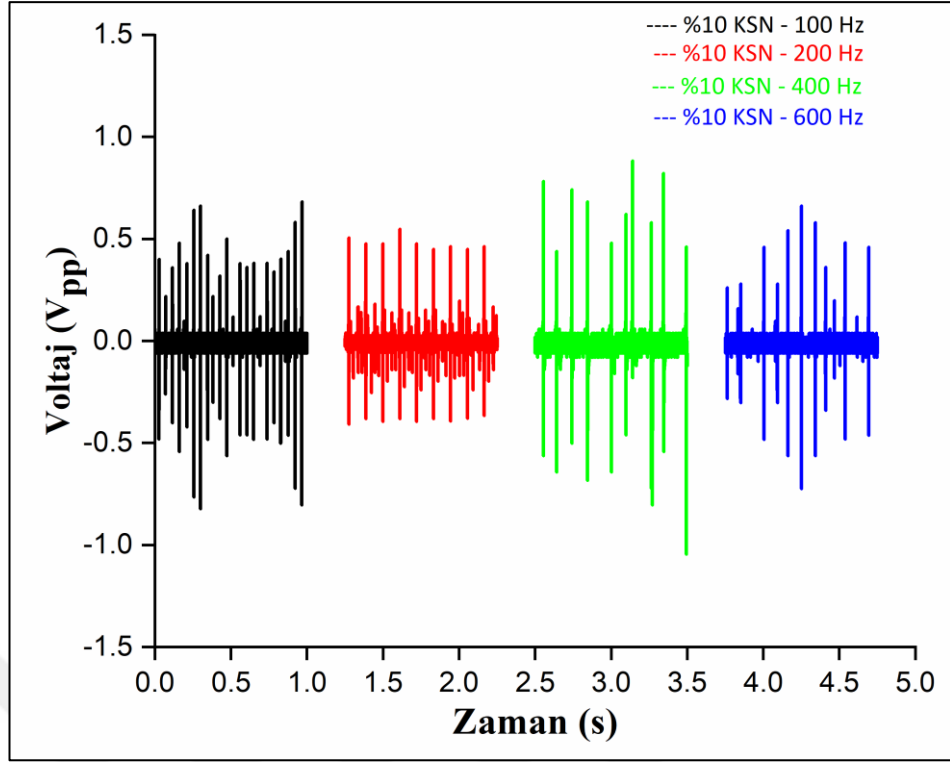
**Şekil 4.60:** %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği.



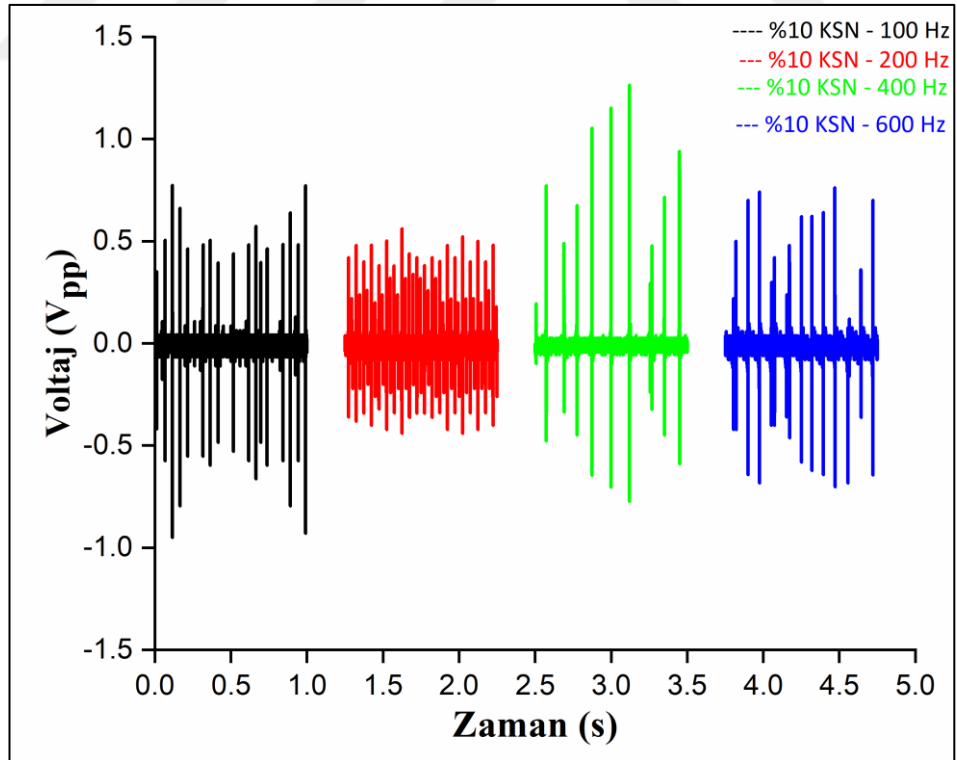
Şekil 4.61: %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği.



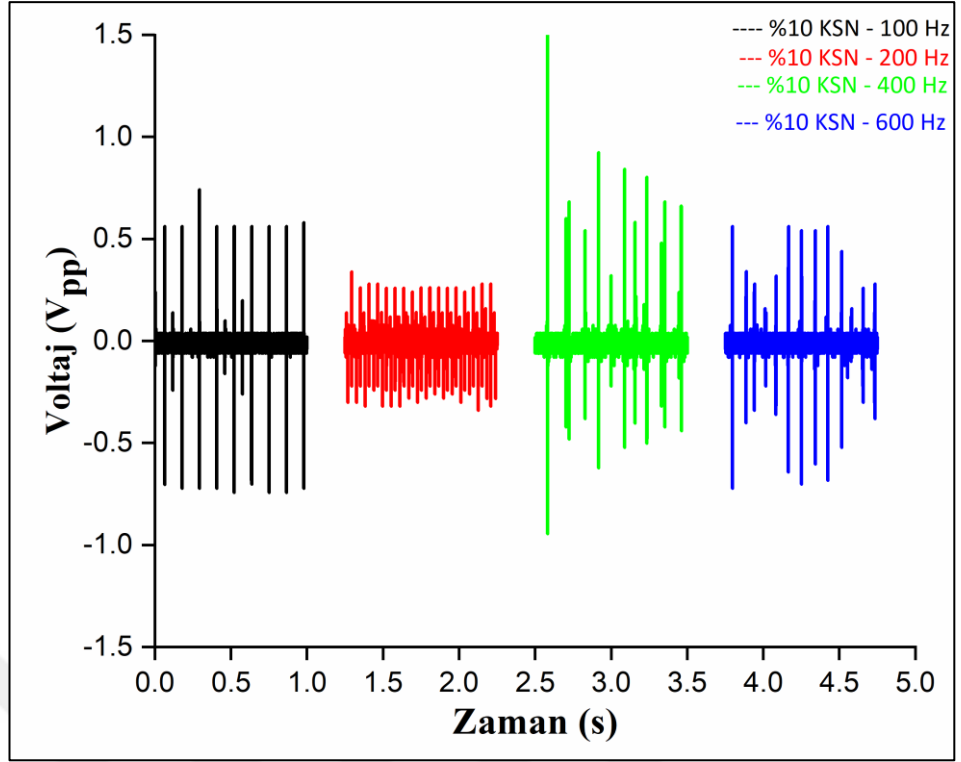
Şekil 4.62: %5 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



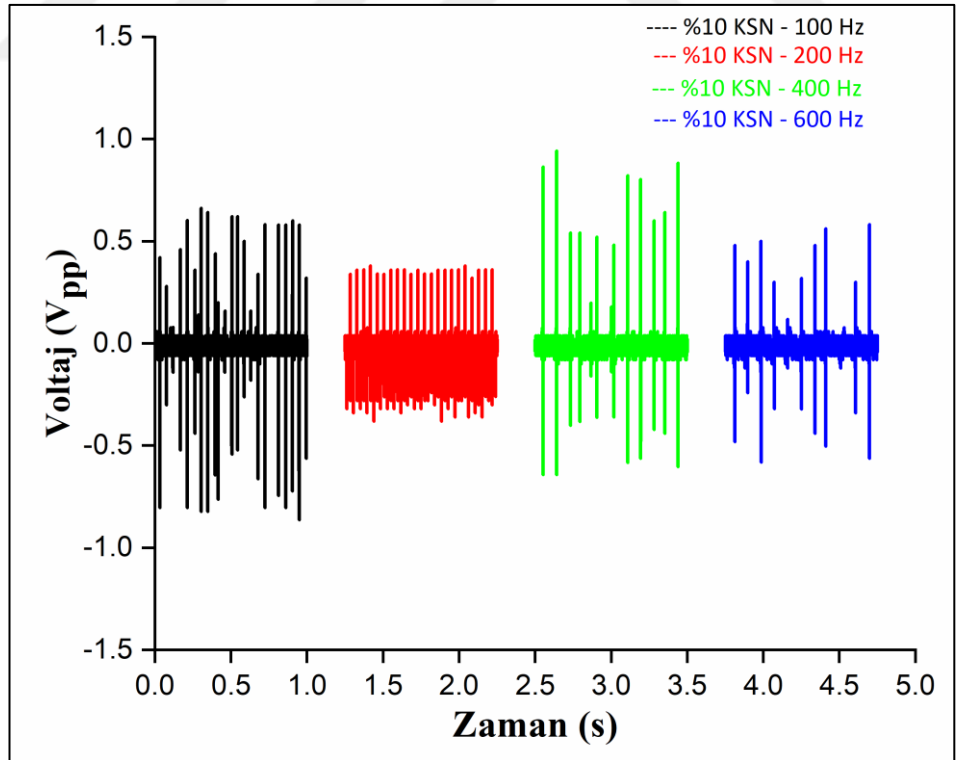
**Şekil 4.63:** %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



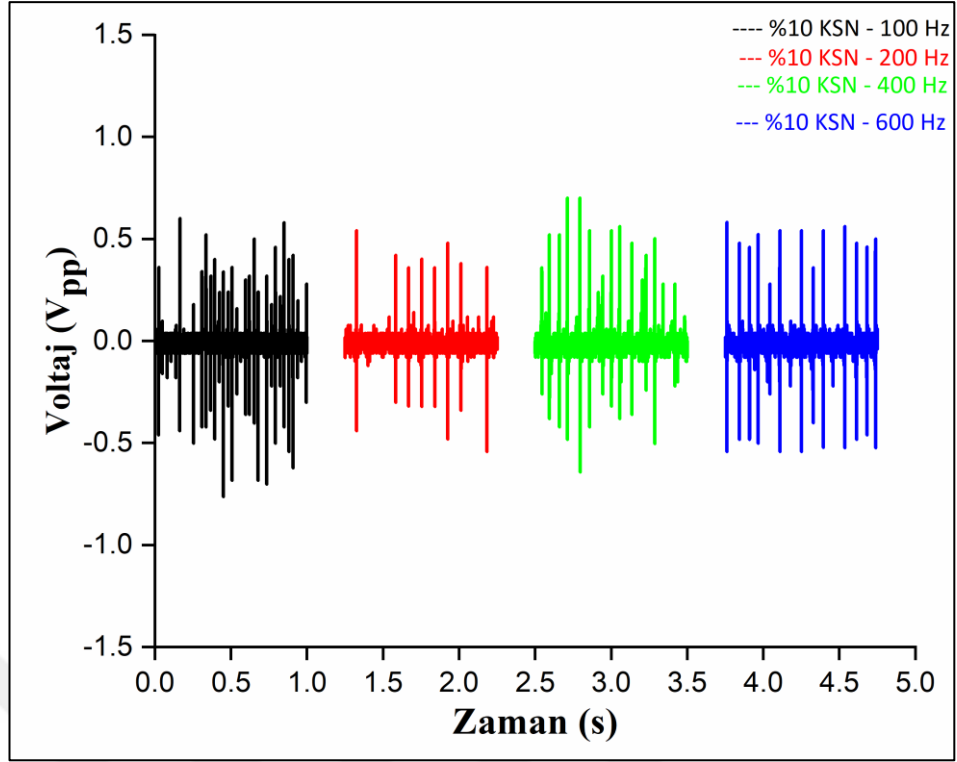
**Şekil 4.64:** %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



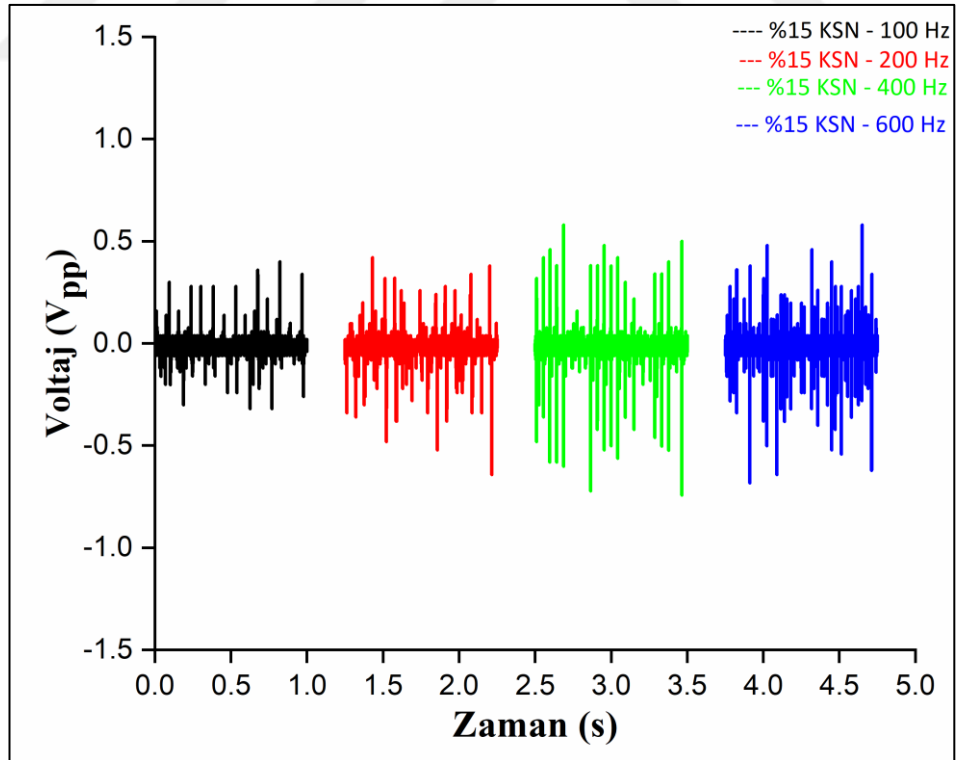
Şekil 4.65: %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



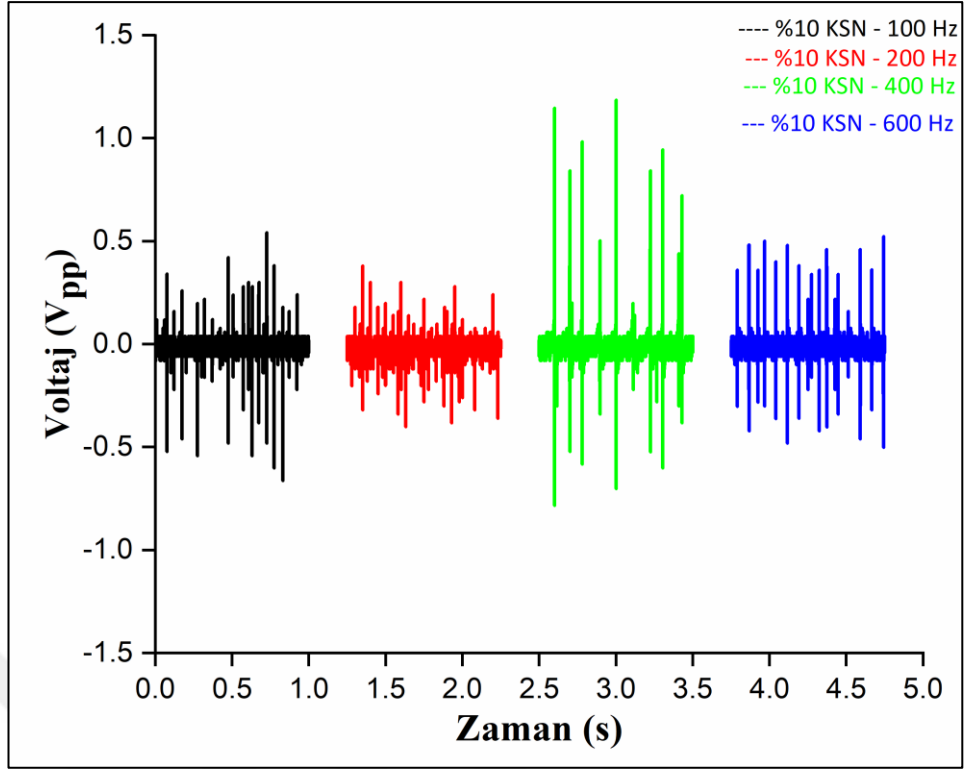
Şekil 4.66: %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



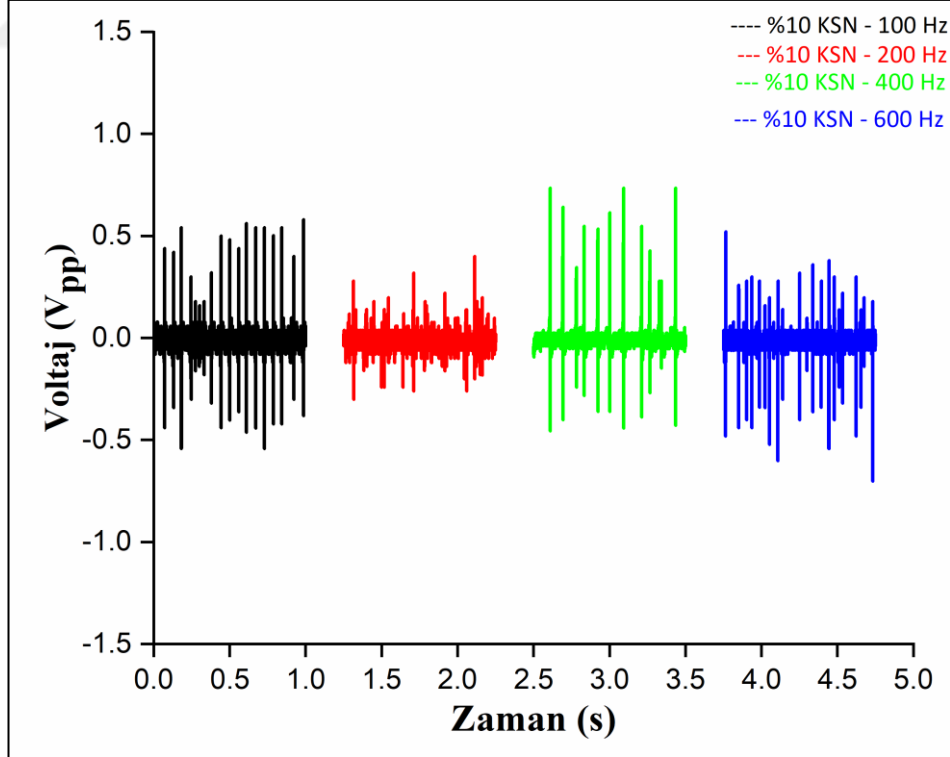
**Şekil 4.67:** %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



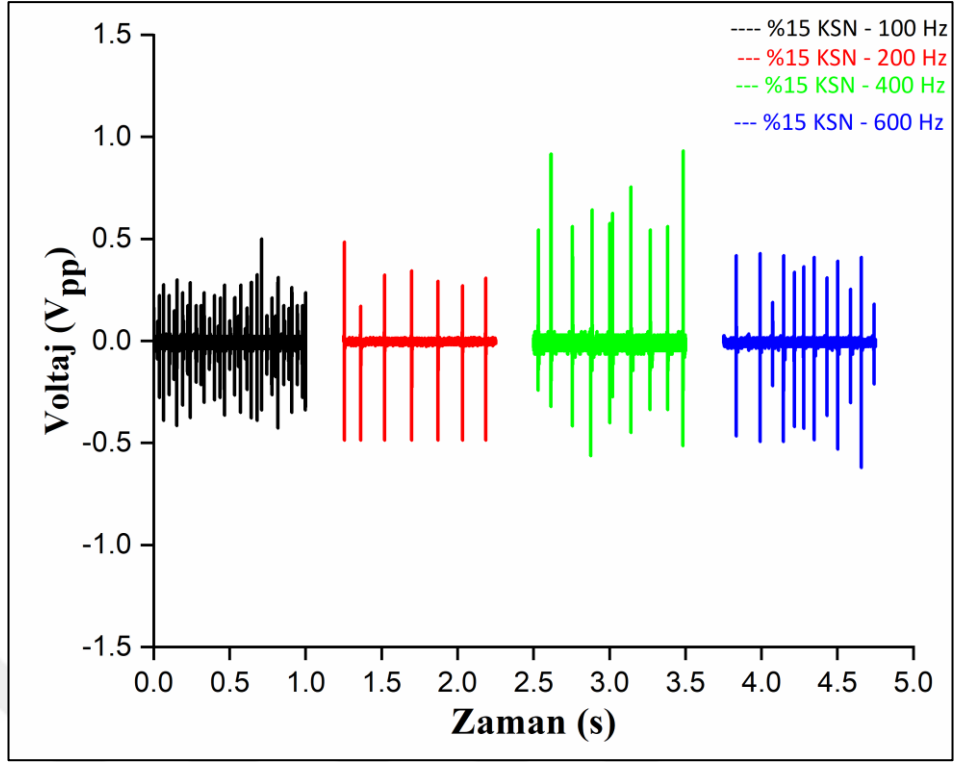
**Şekil 4.68:** %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



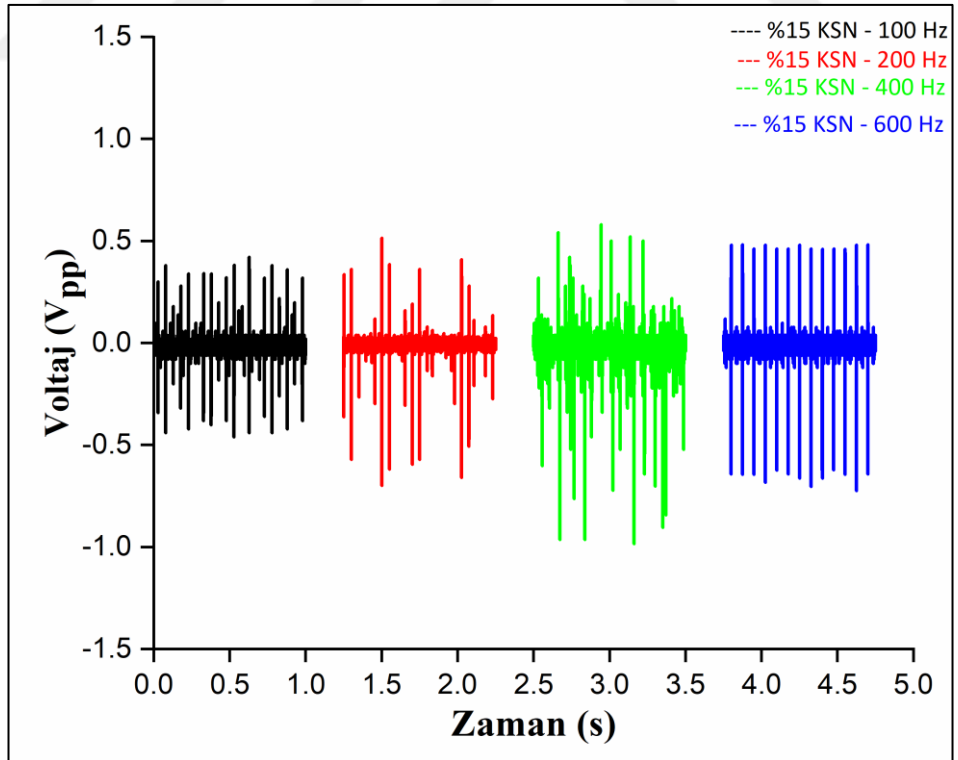
**Şekil 4.69:** %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



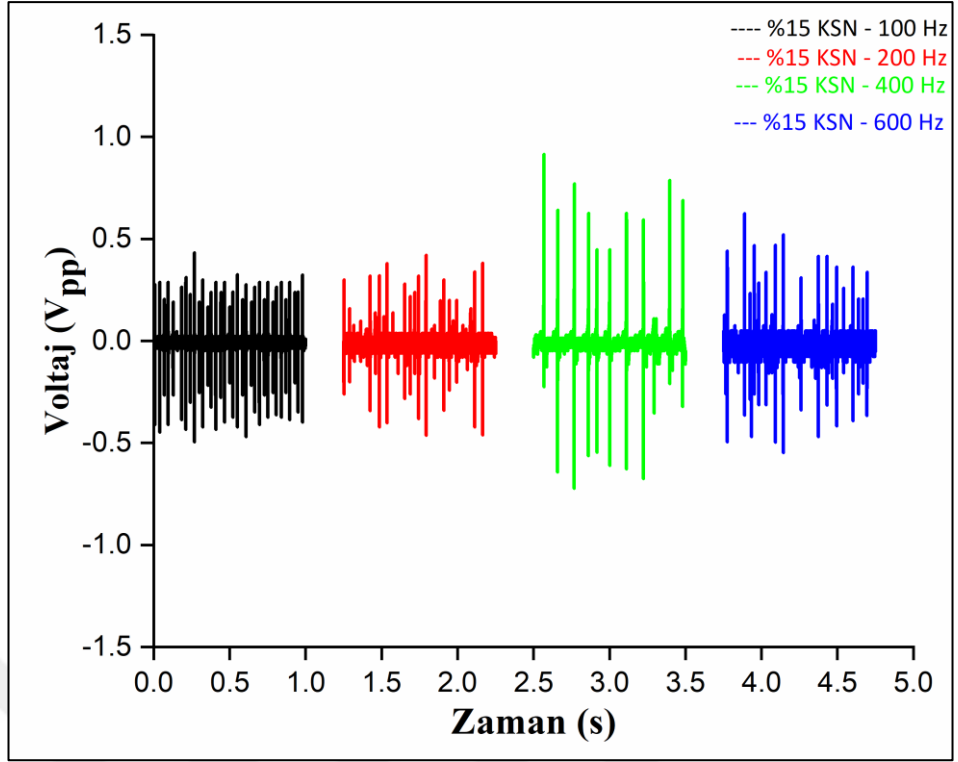
**Şekil 4.70:** %10 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



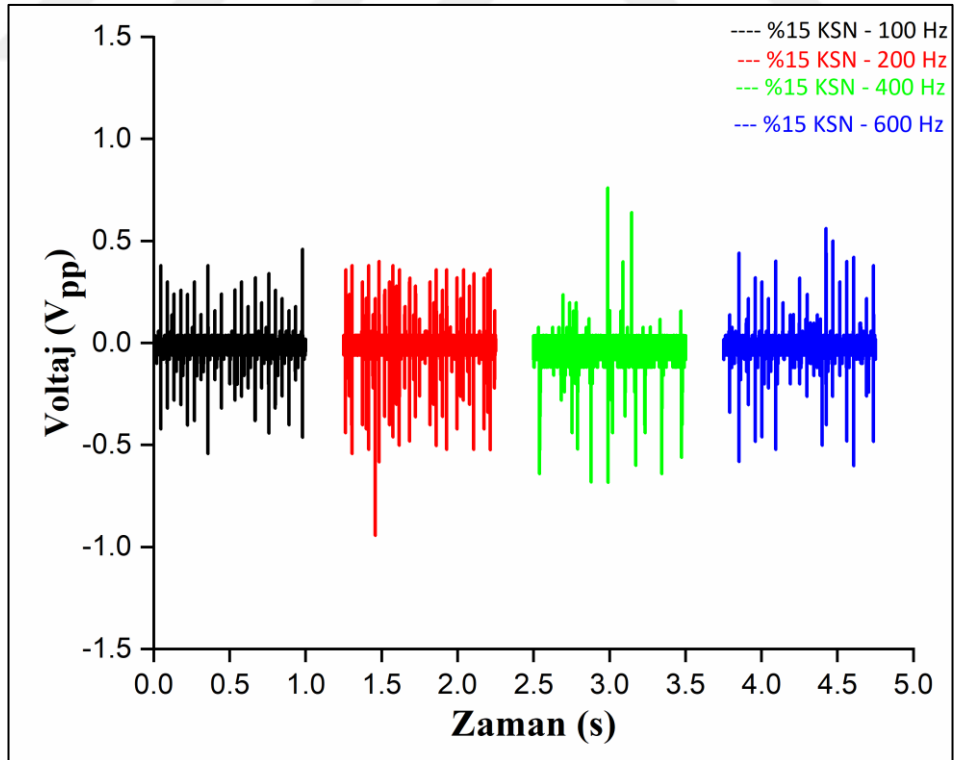
**Şekil 4.71:** %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



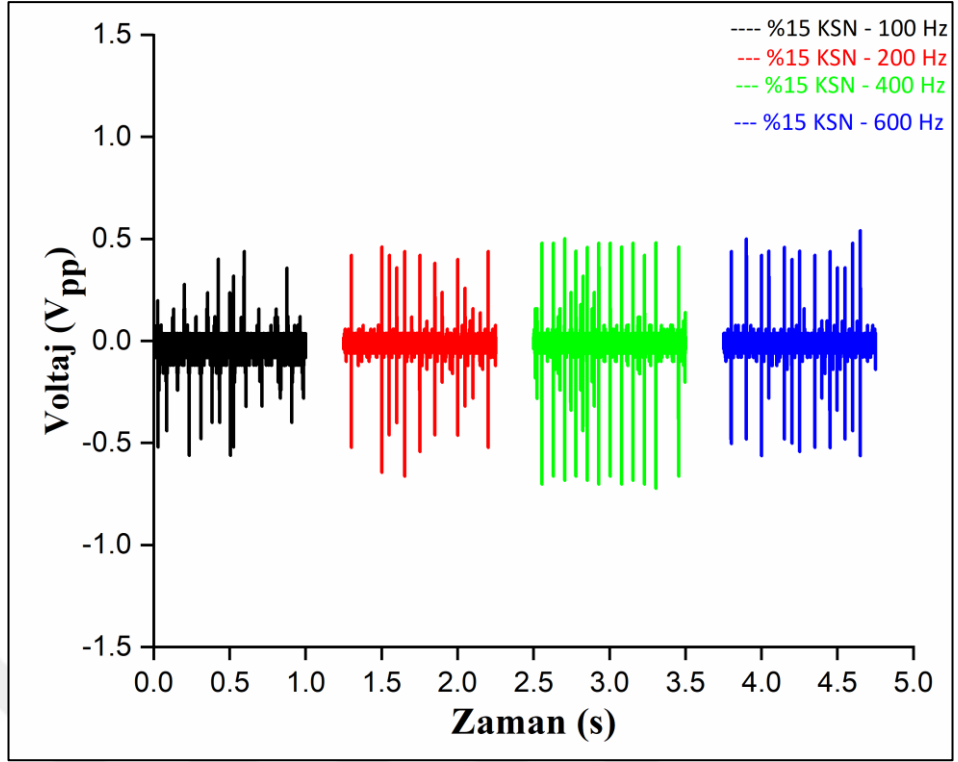
**Şekil 4.72:** %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



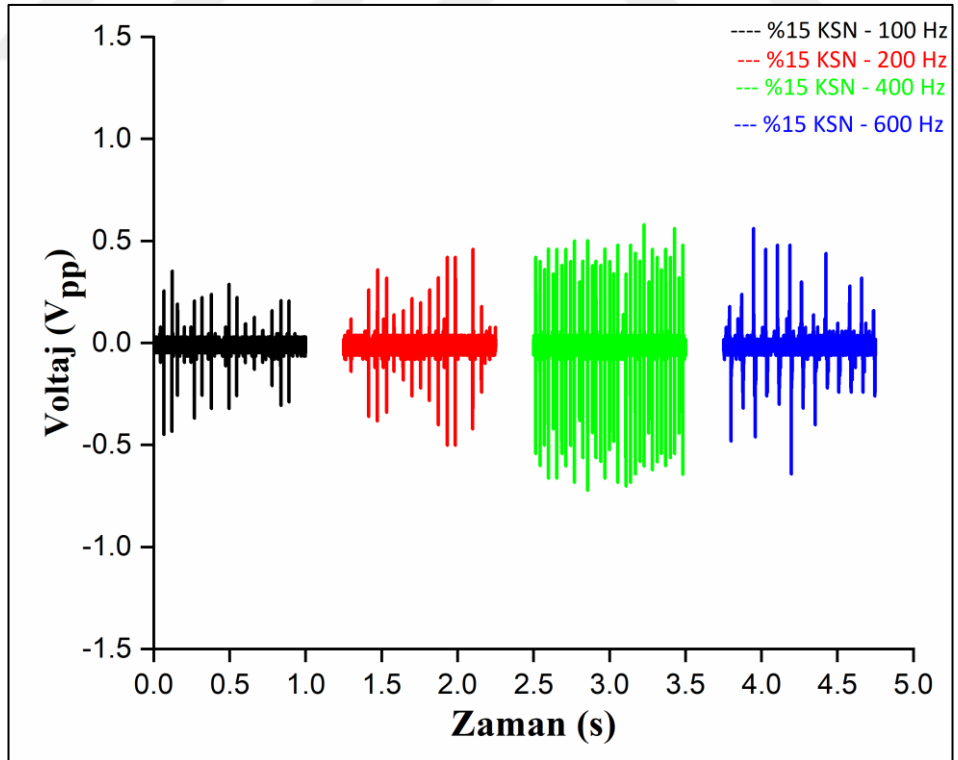
Şekil 4.73: %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



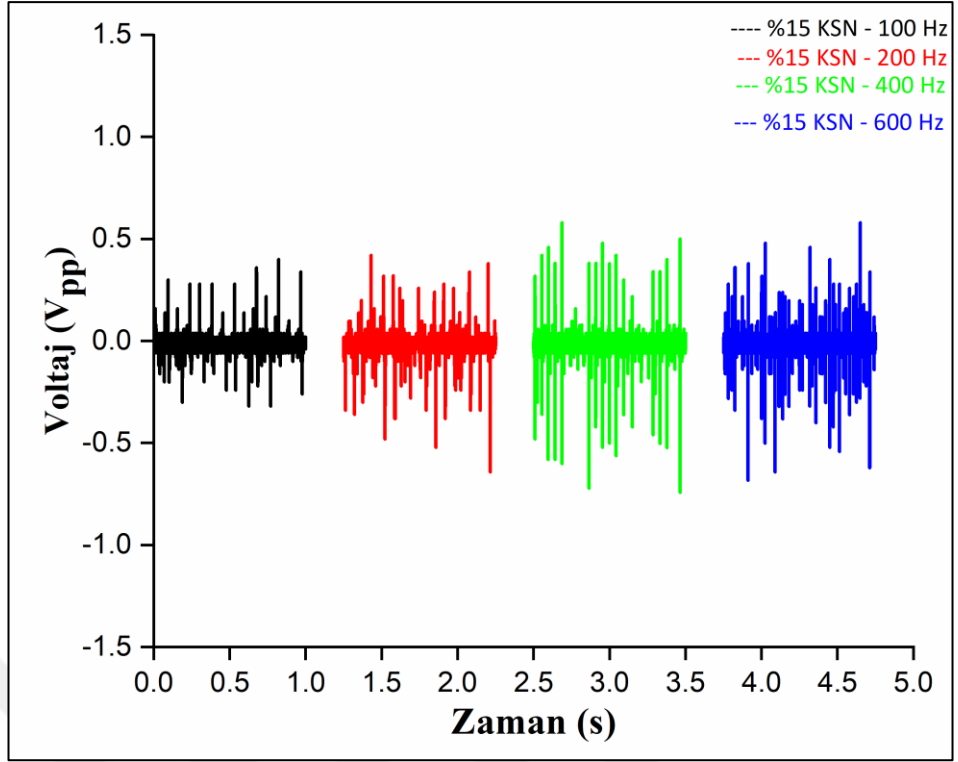
Şekil 4.74: %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



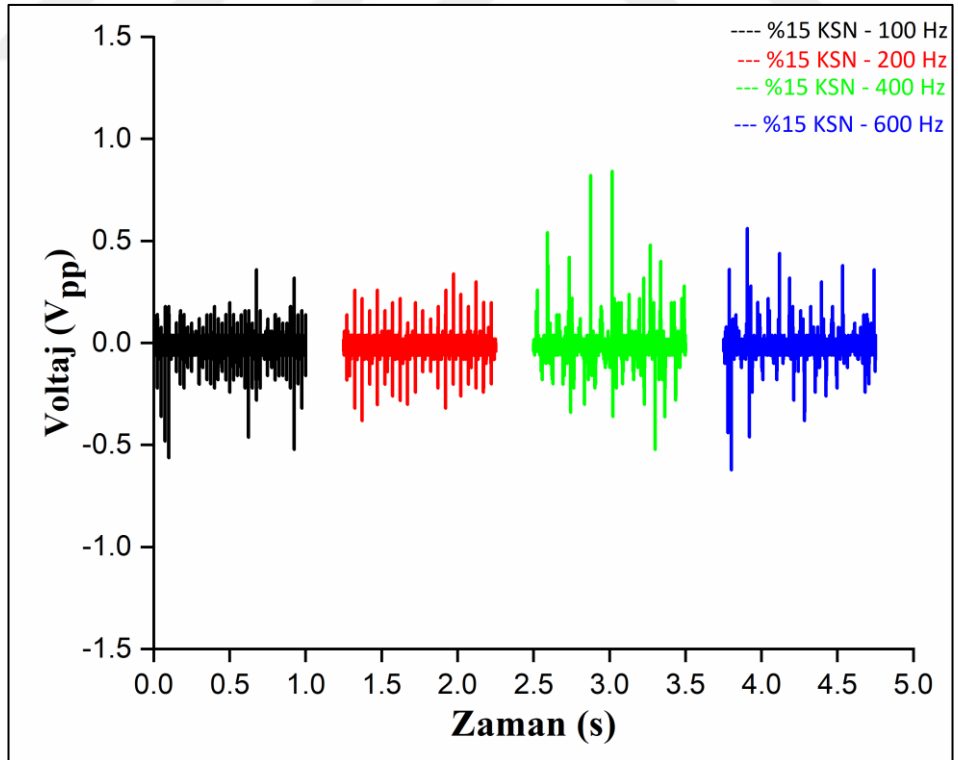
Şekil 4.75: %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



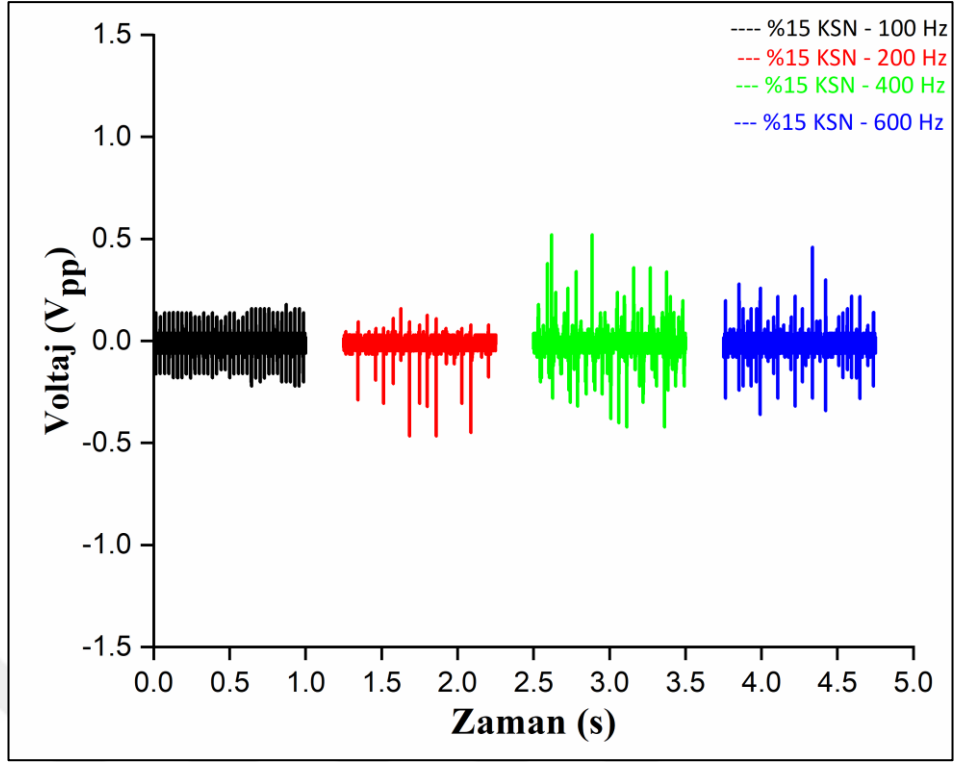
Şekil 4.76: %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği



Şekil 4.77: %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği

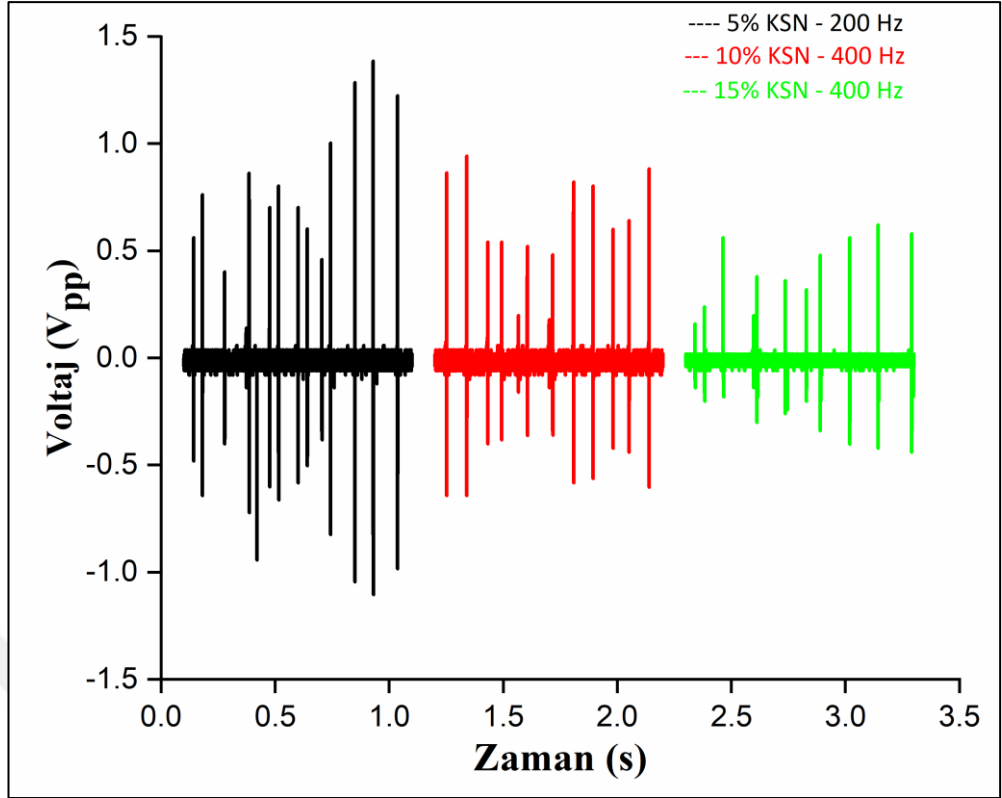


Şekil 4.78: %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 40 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği

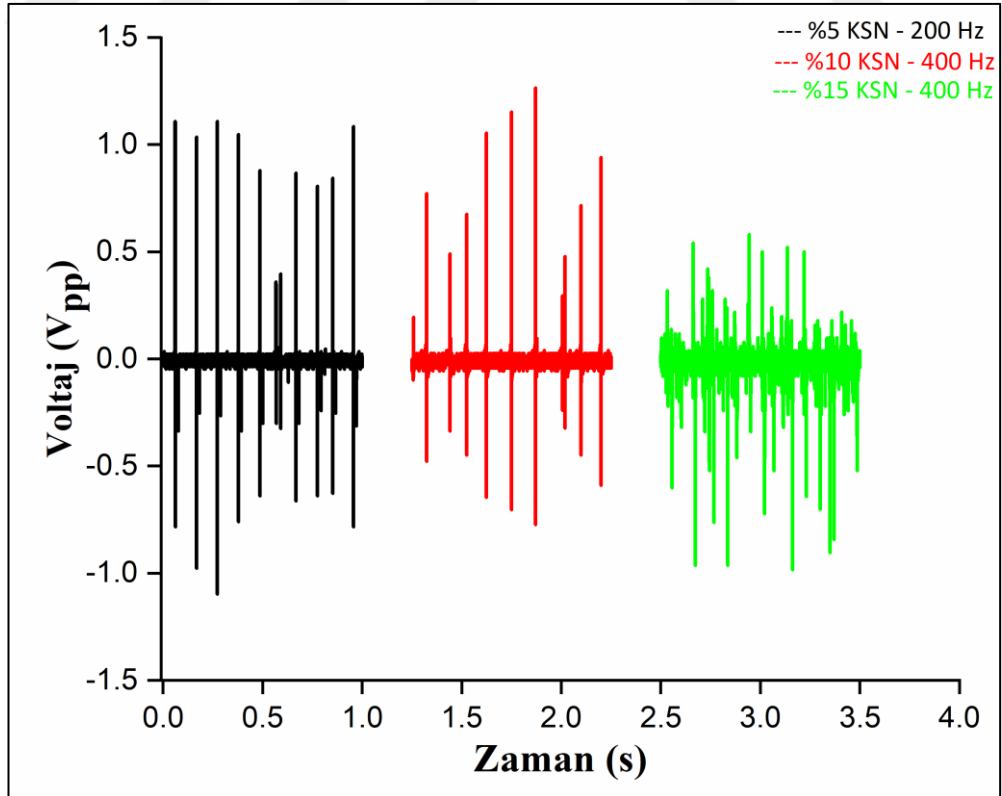


**Şekil 4.79:** %15 KSN içerikli piezokompozitlerin 15 gr ağırlık ve 35 Hz frekansa bağlı voltaj – zaman grafiği

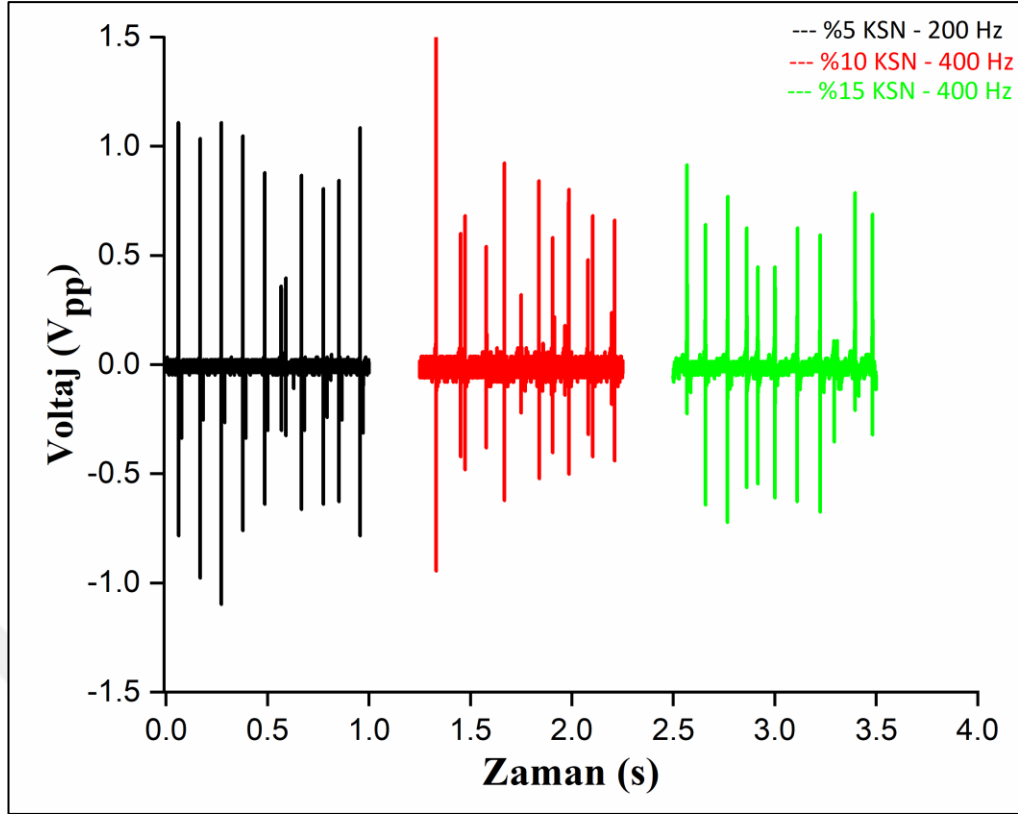
Hacimce aynı miktarda KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin sensör ölçümleri sonucunda yönlenmenin en yüksek olduğu piezokompozitin çıkış voltaj değerlerinin en yüksek olduğu uygulanan ağırlık ve frekansa bağlı olarak belirlenmiştir. Farklı miktardaki KSN şablon parçacıklarının yönlenmeye göre sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ile elde edilecek sonuçlar yönlenmenin çıkış voltaj değerleri üzerindeki etkisini destekleyecektir. KSN şablon miktarının artması ile her ne kadar yönlenme miktarının azalması söz konusu olsa bile yönlenmiş olan KSN iğneciklerinin sayısı farklı olacaktır. Bu duruma göre özellikle ferroelektrik ölçümler dikkate alındığında yönlenmiş KSN iğneciğinin sayısından çok yönlenme miktarının polarizasyon üzerinde daha etkili olduğu yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. %5 KSN içerikli kompozitlerin ağırlık ve frekansa bağlı grafikleri **Şekil 4.54 – 4.62** arasında verilmiştir. %10 KSN içerikli kompozitlerin ağırlık ve frekansa bağlı grafikleri **Şekil 4.63 – 4.70** arasında verilmiştir. %15 KSN içerikli kompozitlerin ağırlık ve frekansa bağlı grafikleri **Şekil 4.71 – 4.79** arasında verilmiştir. Hacimce farklı miktarlarda KSN içeriğine sahip piezokompozitlerin frekans ve ağırlığa göre değişimleri verilen grafiklerde gösterilmiştir.



**Şekil 4.80:** Yönlenmeye bağlı olarak 25 gr ağırlık ve 45 Hz frekanstaki sensör ölçümleri

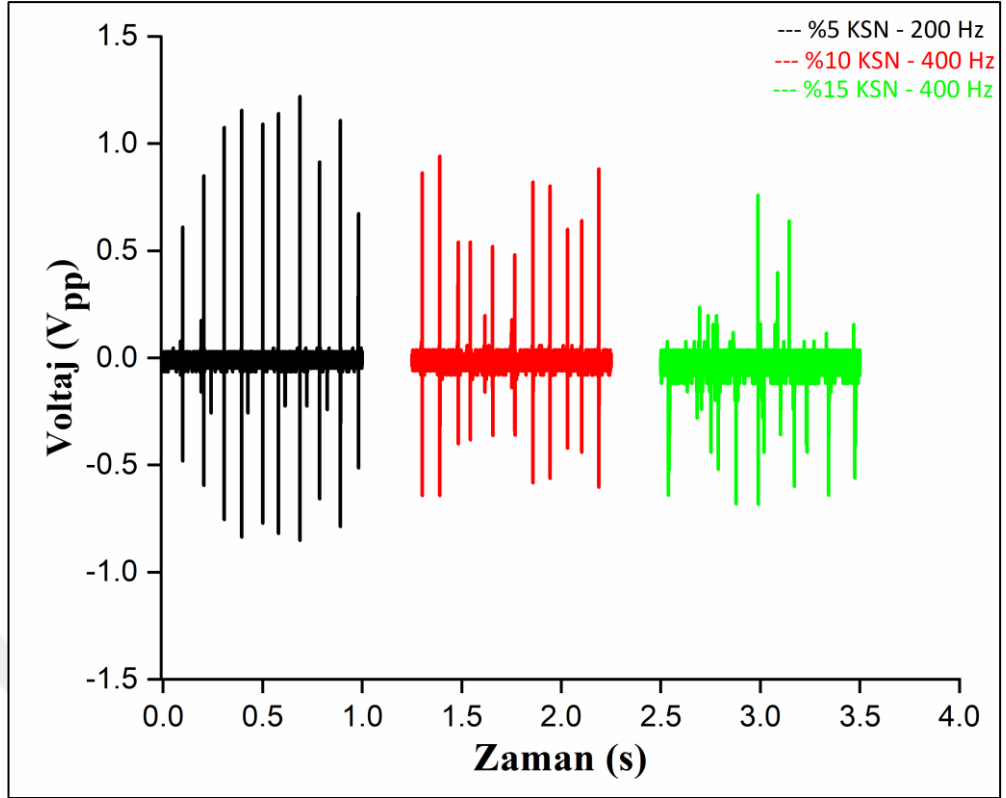


**Şekil 4.81:** Yönlenmeye bağlı olarak 25 gr ağırlık ve 40 Hz frekanstaki sensör ölçümleri

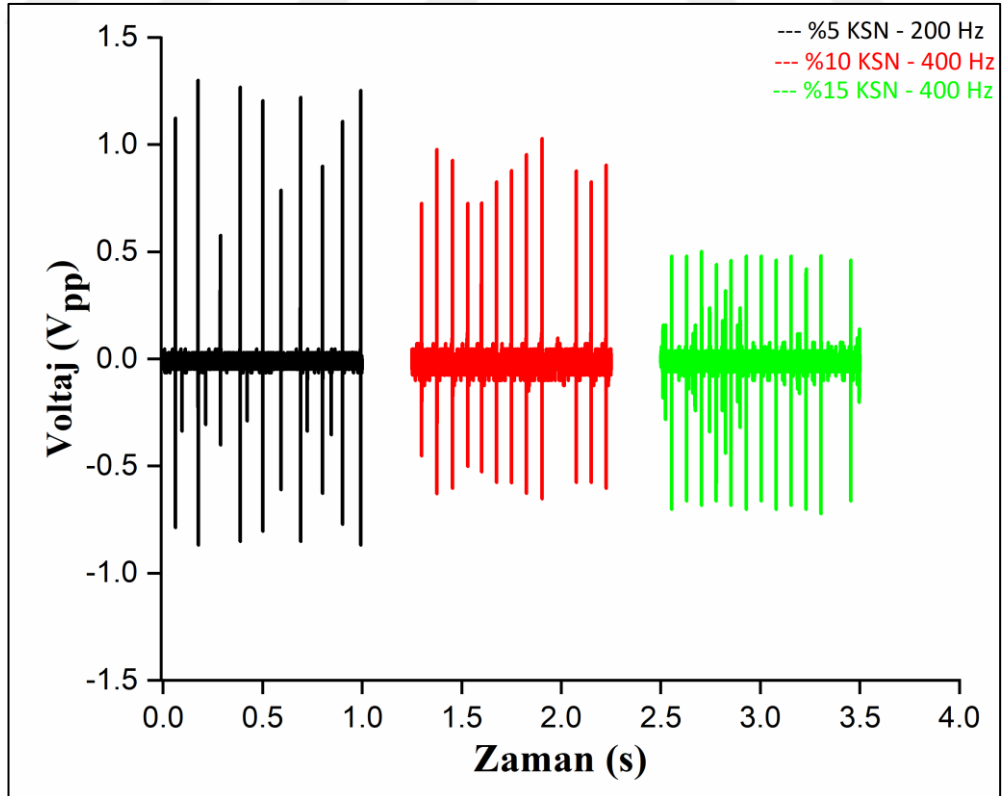


**Şekil 4.82:** Yönlenmeye bağlı olarak 25 gr ağırlık ve 35 Hz frekanstaki sensör ölçümleri

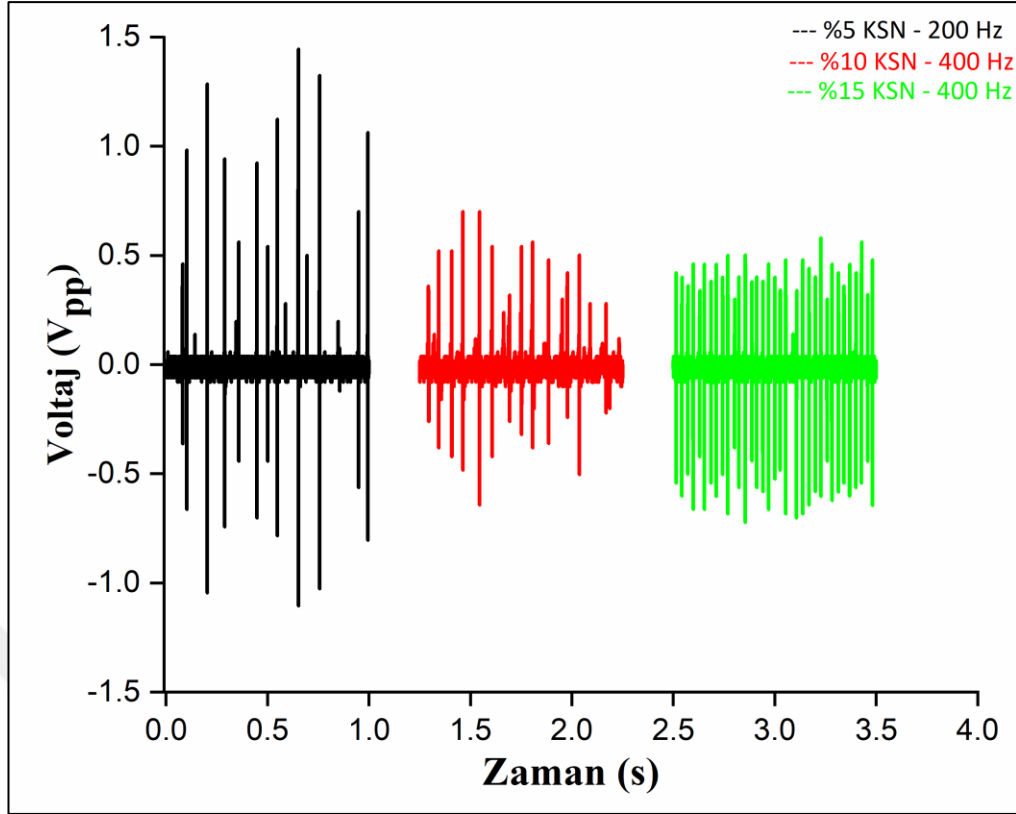
Yönlenmeye bağlı olarak sensör ölçümlerine bakıldığında 25gr ağırlık ve 45 – 35 Hz aralığında azalan frekans değerlerine göre çıkış voltaj değerlerinde azalmanın hacimce %5 ve % 10 KSN içerikli piezokompozitlerde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda %10 KSN içeren piezokompozite istisnai bir voltaj çıkışı da söz konusudur. Bu durumun nedeni ölçüm sisteminden kaynaklanmaktadır.



**Şekil 4.83:** Yönlenmeye bağlı olarak 20 gr ağırlık ve 45 Hz frekanstaki sensör ölçümleri

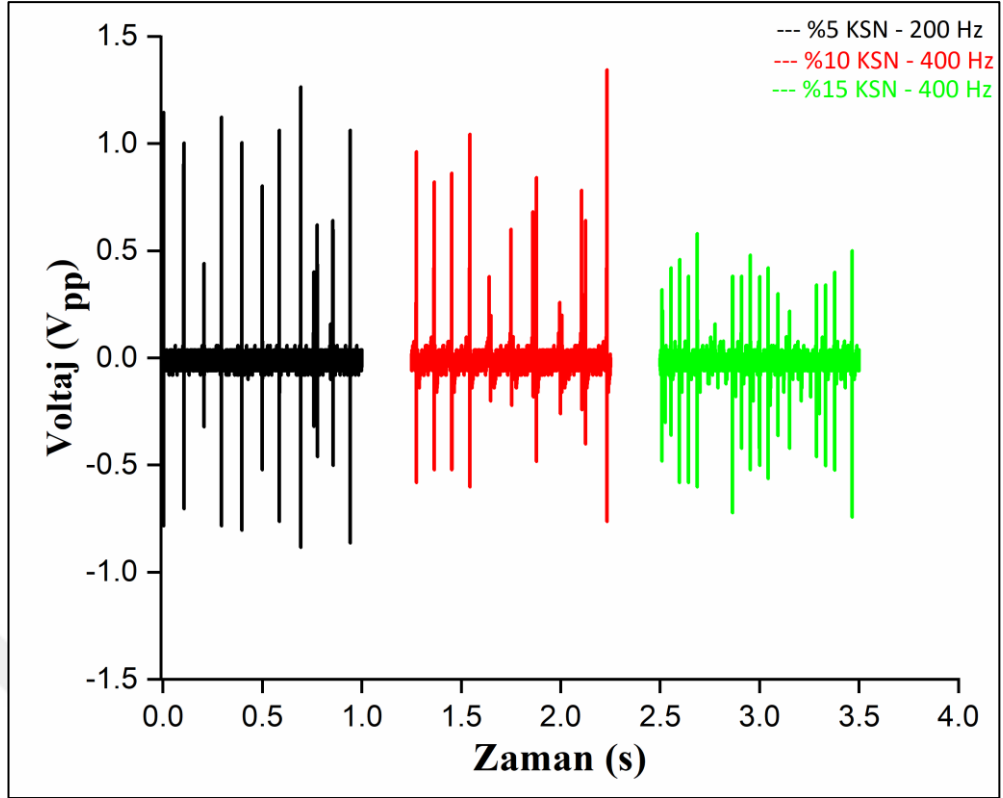


**Şekil 4.84:** Yönlenmeye bağlı olarak 20 gr ağırlık ve 40 Hz frekanstaki sensör ölçümleri

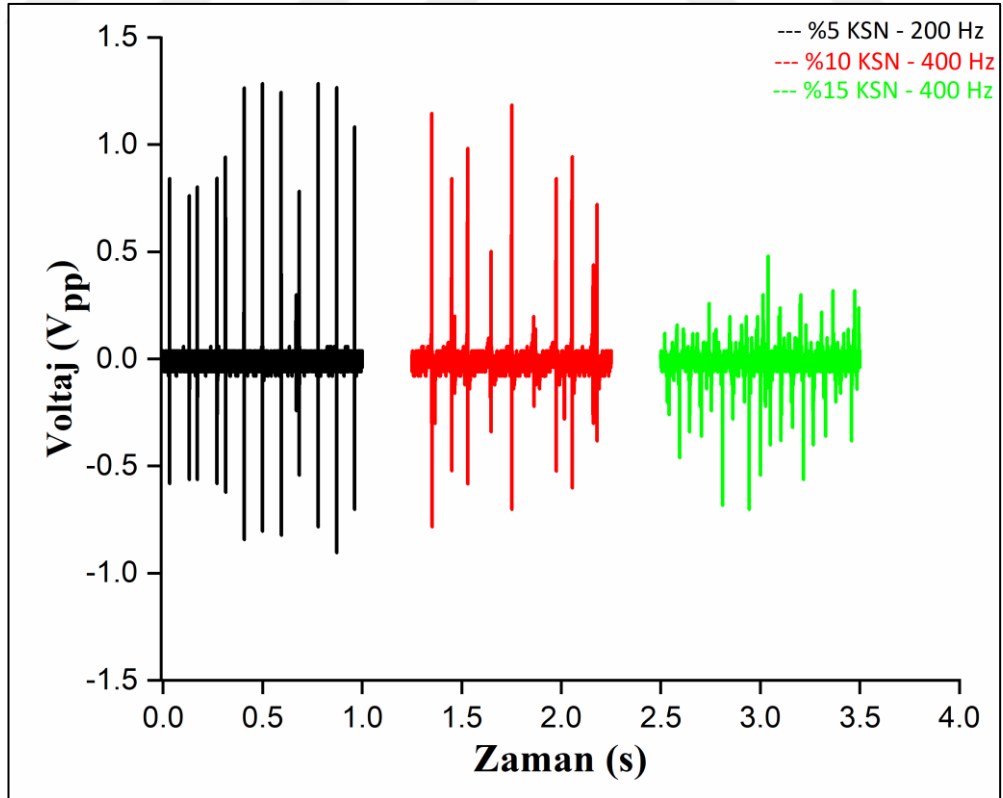


**Şekil 4.85:** Yönlenmeye bağlı olarak 20 gr ağırlık ve 35 Hz frekanstaki sensör ölçümleri

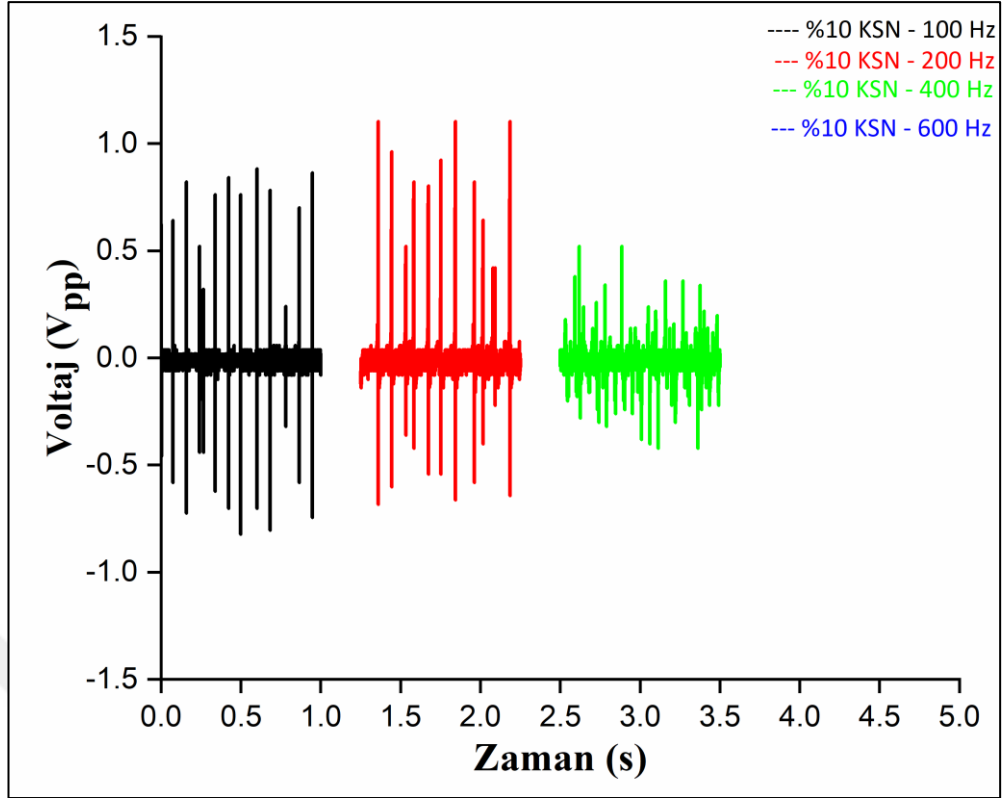
Ağırlığın 20 gr'a düşürülmesi ile frekansa bağlı olarak çıkış voltaj grafiklerine bakıldığında en büyük etkilenmenin %10 KSN içeren piezokompozitlerde olduğu görülmektedir. %5 ve %15 KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerin ağırlığın azaltılması ile birlikte %10 KSN içerikli piezokompozitlere göre çıkış voltaj değerlerinin daha az etkilendiği görülmektedir.



**Şekil 4.86:** Yönlenmeye bağlı olarak 15 gr ağırlık ve 45 Hz frekanstaki sensör ölçümleri



**Şekil 4.87:** Yönlenmeye bağlı olarak 15 gr. ağırlık ve 40 Hz frekanstaki sensör ölçümleri



**Şekil 4.88:** Yönlenmeye bağlı olarak 15 gr. ağırlık ve 35 Hz frekanstaki sensör ölçümleri

Sensör ölçümü için kullanılan ağırlığın 15 gr'a azaltılmasının sonucunda voltaj değerleri %5 ve %15 KSN için azalma eğilimi sergilerken %10 KSN içeriğine sahip piezokompozitler için bu durum tam tersi etki yaratmaktadır. Yönlenmeye bağlı olarak ağırlık ve frekanslara bağlı olarak sensör grafikleri **Şekil 4.80 – 4.88** arasında verilmiştir.

Piezokompozitlerin üzerine uygulanan ağırlık ve frekansın değiştirilmesi ile çıkış voltaj değerlerinde önemli ölçüde azalmalar görülmektedir. Bu durum için yapılabilecek değerlendirme ise piezokompozit malzemelerin kutuplanması için uygulanan elektrik alanın efektif olarak kullanmayı sağlayamamasından kaynaklanmaktadır. Efektif olarak kutuplanmanın gerçekleşmediği sonucuna varılmasının temel sebebi frekansa bağlı dielektrik sabiti ölçümlerindeki düşük frekanslardaki lineer olmayan sapmalardan kaynaklanmaktadır. Bu durum dielektrik özellikler bölümünde farklı polarizasyon mekanizmalarının devrede olmasından kaynaklandığı şekilde yapılan açıklamaya ek olarak literatürdeki bazı çalışmalara bakıldığında da bu öneriyi destekler şekilde olmaktadır. Özellikle kullanılan polimer matris fazının PDMS olarak tercih edildiği çalışmalarda kutuplama için uygulanan

voltaj değerlerinin 300 kV/cm'ye kadar artabildiği rapor edilmiştir [D'ambrogio 2022]. Dielektrik özelliklerde yüksek frekanslarda literatüre göre benzerlikler sergilemesinin düşük frekanslarda ise dielektrik sabitindeki ve dielektrik kayıptaki sapmaların bir başka nedeni olarak ifade edilebilir. Bu durumun sonucunda da piezokompozitlerin sensör ölçümlerindeki frekans ve ağırlığın değiştirilmesi sonucu çıkış voltajlarındaki azalmanın sebebi olarak ifade edilebilir. Çıkış voltajlarındaki periyodik olmama durumuna ait bir başka değerlendirme ise piezokompozit malzemelerin boyutuyla alakalı olmaktadır. Kullanılan piezokompozitler yerleştirildiği hazneye göre birebir uyumluluğa sahip değildir. Uygulanan frekansa bağlı olarak ağırlığın hazne ile sürtünmesinin bir sonucu olarak numune yüzeyine ağırlık efektif olarak etki etmeyebilir.

Her ne kadar %5 KSN içeriğine sahip olan piezokompozitlerin  $d_{33}$  ve  $g_{33}$  değerleri literatüre göre yüksek olmasına rağmen sensör ölçümü için kullanılan ağırlık ve frekansın değiştirilmesi ile çıkış voltaj değerlerinde bahsedilmiş olan nedenlerden kaynaklı olarak azalma görülmektedir. Çıkış voltaj değerlerindeki azalmanın nedeni olarak bir başka değerlendirme ise sensör ölçümleri için kullanılan düzeneğin bu tür ölçümler için uygun olmaması şeklindedir. Bu tip sensörler genel olarak biyomalzemeler uygulamalarında tercih edildiği için ve kullanım olarak genellikle kan akış hızı ve kalp ritmi gibi ölçümler için tercih edilmesi gibi piezokompozit üzerinde sürekli olarak bir gerilim yaratılmasından da kaynaklanmaktadır. Yapılan sensör ölçümlerinin sonuçlarına göre %5 KSN şablon parçacığı içeren 200 Hz frekans uygulanarak üretilen piezokompozitin en stabil sensör olduğu belirlenmiştir. %10 ve %15 KSN şablon parçacıklarının kullanıldığı piezokompozitlerde ise bu durumdan bahsetmek çok doğru bir yaklaşım olamamaktadır. Bu durum için yönelmenin en büyük etken olduğundan bahsedilebilir ve ayrıca KSN şablon parçacıklarının daha önceden bahsedilmiş olduğu unipolar ferroelektrik malzeme olmasının da bu tutarsızlıklar üzerinde etki yarattığı düşünülebilir.

## 5. SONUÇLAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında üretimi gerçekleştirilen KSN şablon parçacıklarının yapısal karakterizasyonu, dielektroforesis yöntemi ile üretilen piezokompozitlerin yapısal, elektriksel ve sensor karakterizasyonlarına ait sonuçları değerlendirilecektir.

- Ergitiyk tuz sentezi yöntemi kullanılarak iğnesel morfolojide anizometrik şablon parçacıklarının üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sentez sırasında uygulanan soğutma hızının ikincil faz oluşumunda kritik bir öneme sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Dielektroforesis yöntemi ile dolgu fazının tercihli olarak yönlendiği anizotropik piezokompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir.
- Piezokompozitlerin uygulanan elektrik alan sonucunda yönlenme miktarları hesaplanmıştır.
- SEM görüntüleri dikkate alındığında iğnesel morfolojideki KSN şablon parçacıklarına sahip piezokompozitlerde yönlenme miktarının hacimce KSN şablon parçacıklarının artması sonucunda azaldığı gözlemlenmiştir. Bu duruma sebep olan en önemli etkinin kullanılan şablon parçacıklarının eş eksenli veya kübik gibi diğer morfolojideki şablon parçacıklarına oranla daha yüksek parçacık boyutuna sahip olmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha düşük parçacık boyutuna sahip dolgu malzemelerinin sıvı polimer matris içerisinde yönlenmeleri KSN şablon parçacıklarına göre daha kolay olmaktadır. Hacimce dolgu miktarının artması sonucunda sıvı polimer fazın viskozitesinin artış göstermesi de elektrik alan doğrultusunda yönlenmenin üzerinde negatif olarak büyük etki göstermektedir. Dolgu malzemesinin artması sonucunda yönlenmenin azalmasının başka bir sebebi ise dolgu malzemesinin üretiminde kullanılan ergiyik tuz sentezi yöntemi olduğu düşünülmektedir. Bu yöntem kullanılarak üretilen şablon parçacıkları tek bir KSN iğneciği şeklinde olmadığı için uygulanan elektrik alanının sonucunda yönlenmeyi azalttığı düşünülmektedir.

- Dielektroforesis işlemi sırasında uygulanan AC elektrik alanının frekansının yönlenme üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Lotgering faktör hesaplamaları sonucunda hacimce %5 şablon parçacığına sahip olan piezokompozitlerde en yüksek yönlenme miktarının 200 Hz frekansında olduğu belirlenmiştir. %10 ve %15 dolgu malzemesine sahip piezokompozitlerde ise yönlenme miktarının 400 Hz frekansa sahip elektrik alan uygulanması sonucunda elde edildiği belirlenmiştir. Bu durum literatürde yapılan çalışmalara göre farklılık oluşturmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda elektrik alanının sabit tutulduğu frekans değerlerinin ise değişiklik gösterdiği çalışmalarda yönlenmenin düşük frekanslarda daha iyi olduğu rapor edilmiştir. Tek kristal şablon parçacıklarının kullanılmasında ise frekans değerinin yönlenme üzerinde etkisinin değişkenlik gösterdiği fakat yönlenme üzerinde ana etken olmadığı hakkında yorum yapılabilir. Yapılan bu tez çalışmasının sonucunda yönlenme üzerindeki en büyük etkilerin şablon parçacıklarının boyutu, dolgu malzemesinin viskozitesi ve uygulanan elektrik alan olduğu belirlenmiştir.
- Piezokompozitlerin dielektrik özelliklerinin yönlenmeye bağlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir.
- Piezoelektrik yük kat sayısı ve piezoelektrik voltaj katsayısının yönlenmeye bağlı olarak artış gösterdiği hem deneysel hem de deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler kullanılarak analitik olarak hesaplanmalarının sonucunda belirlenmiştir.
- Hacimce şablon parçacık miktarının azalması sonucunda efektif olarak yönlenmenin daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Hacimce şablon parçacıklarının artması sonucunda ise piezoelektrik yük katsayısı ve piezoelektrik voltaj katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum kullanılan şablon parçacıklarının unipolar ferroelektrik olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde kullanılan dolgu malzemeleri hacimce miktarın artmasına bağlı olarak polikristalin özelliklerinden kaynaklı elektrik alan uygulanması sonucunda yönlenme olmasa bile piezoelektrik yük katsayısı üzerinde pozitif yönde etki edecektir. Fakat bu durum KSN şablon parçacıkları için çok etki etmeyecektir.

- Sensör karakterizasyonların sonucunda üretilen piezokompozitlerin yönlenmeye bağlı olarak daha stabil olarak çalıştıkları belirlenmiştir.
- Hem dielektroforesis yöntemi kullanılarak hem de herhangi bir elektrik alan uygulanmadan üretilen piezokompozitlere ait yapısal ve elektriksel özelliklere ait bilgiler tablo 4.2’de verilmiştir.
- Tablo 5.1’de KSN şablon parçacıkları ve farklı morfolojideki dolgu malzemeleri kullanılarak üretilen piezokompozitlerin karşılaştırılması verilmiştir.

**Tablo 5.1:** 0-3 Piezokompozitlerin piezoelektrik özelliklerinin karşılaştırılması [Sarı vd., 2025]

| Dolgu malzemesi    | Matris Fazı | Morfoloji | Max. $d_{33}$ (pC/N) (%vol.) | Max. $g_{33}$ (mV.m/N) |
|--------------------|-------------|-----------|------------------------------|------------------------|
| KSN                | Poliürea    | İğnesel   | 15(5)                        | 174 (5)                |
| PZT                | Epoksi      | Küresel   | ~16 (50)                     | ~ 150 (10)             |
| PT                 | PEI         | Kübik     | ~8 (30)                      | ~110 (20)              |
| PZT                | Epoksi      | Küresel   | ~10 (50)                     | ~65 (10)               |
| PZT                | PDMS        | Küresel   | ~12 (24)                     | ~83 (24)               |
| PZT                | Epoksi      | Küresel   | ~14 (40)                     | ~80 (10)               |
| KNLN               | Epoksi      | Küboid    | ~19 (10)                     | ~180 (10)              |
| BCZT               | PDMS        | Polihedra | ~12 (18)                     | ~103 (8)               |
| PZT                | Epoksi      | Küresel   | ~20 (60)                     | ~ 75 (10)              |
| KNLN               | PDMS        | Kübik     | ~18 (20)                     | 220 (10)               |
| NaNbO <sub>3</sub> | PDMS        | İğnesel   | ~10 (5)                      | 148 (5)                |

## 6. ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler dikkate alındığında çalışmanın ileri aşamalara ilerleyebilmesi için deneysel çalışmalar hususunda bazı modifikasyonların yapılması gerekmektedir. Bu gereklilikler:

- İğnesel morfolojide büyüyen başka ferroelektrik özellik gösteren dolgu malzemeleri kullanılabilir (ör.  $\text{NaNbO}_3$ ,  $\text{ZnO}$  vs.)
- Kullanılan polimer malzemenin detaylı karakterizasyonun yapılması önemli bir parametre olarak değerlendirilebilir
- Piezokompozitlerin üretimi sırasındaki KSN şablon parçacıklarının ve polimer matris fazının karıştırılması için elle karıştırma yöntemi yerine daha efektif karıştırmayı sağlayacak olan cihazlar, örneğin speed mixer tercih edilmelidir.
- KSN şablon parçacıkları ve polimer matris fazının karıştırılma işleminden sonra vakuma alma işlemi için daha uzun süreler ve/veya daha iyi vakuma alabilecek olan cihazlar kullanılabilir.
- Dielektroforesis yöntemi uygulanırken bu çalışma kapsamında tercih edilen deney düzeneğinin yeteri kadar elverişli olmamasının sonucunda uygulanan elektrik alan değerleri daha yüksek seviyelere çıkamamaktadır. Bu yüzden deney düzeneğinin yeniden tasarlanması önemli bir parametre olmaktadır.
- Piezokompzotlerin alternatif akım kullanılarak kutuplama işleminin aynı doğru akım kullanılarak yapılan kutuplama işleminde olduğu gibi uzun süreli yapılabilmesi elektriksel özellikler üzerinde etki yaratabileceği için alternatif akım kullanılarak kutuplama yapılması gerekebilir.
- Bu çalışmada tercih edilen polimer matris fazının yapısı gereği kutuplama işleminin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesi ve bu yüzden kutuplamanın efektifliği üzerinde etki yarabilecek olmasının sonucunda daha yüksek sıcaklıklarda da kararlılığını koruyabilen bir polimer matris fazı kullanılarak sıcaklığa bağlı olarak kutuplama işlemi yapılması değerlendirilmelidir.
- Sensör karakterizasyonu için tercih edilmiş olan sistemin sensör uygulamaları açısından verimliliği yeterli gelmediği için sensör karakterizasyonu için tercih edilen deney düzeneğinin yeniden tasarlanması gerekmektedir. Darbeli bir

ölçüm düzeneğinin yanında dokunmayı simüle edecek bir test düzeneğinin de geliştirilmesi gerekmektedir.

- Piezokompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde çalışmalar yapılması sensör ölçümlerini etkileyeceği için gerekli analizlerin yapılması gerekmektedir.
- Piezokompozit malzemelerin ısııl özellikleri hakkında gerekli analizlerin yapılması gerekli olabilir.
- DTA analizi kullanılarak faz oluşumu takibi yapılabilir.
- Ergiyik tuz sentezi yöntemi ile üretilen KSN şablon parçacıklarının ısııl işlem süresi değiştirilebilir.



## KAYNAKLAR

Ahmadi R., Packirisamy M., Dargahi J., & Cecere, R., (2011). Discretely loaded beam-type optical fiber tactile sensor for tissue manipulation and palpation in minimally invasive robotic surgery. *IEEE Sensors Journal*, 12(1), 22-32.

Akça E. (2010). “Kurşun esaslı elektroseramik tozların sentezlenmesi, seramiklerin üretilmesi ve karakterizasyonları” Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Alkoy S., Dursun S., (2012). Processing and properties of textured potassium strontium niobate ( $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ ) ceramic fiber-texture development. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(3), 937-945.

Bao R., Wang C., Dong L., Yu R., Zhao K., Wang Z. L., Pan C., (2015). Flexible and controllable piezo-phototronic pressure mapping sensor matrix by ZnO NW/p-polymer LED array. *Advanced Functional Materials*, 25(19), 2884-2891.

Bhalla, A. S., Guo, R., & Roy, R. (2000). The perovskite structure—a review of its role in ceramic science and technology. *Materials research innovations*, 4(1), 3-26.

Boufrou B., Desgardin G., Raveau B., (1991). Tetragonal tungsten bronze niobate,  $\text{K}_{0.2}\text{Sr}_{0.4}\text{NbO}_3$ : a new material for capacitors with flat dielectric curves. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(11), 2809-2814.

Bowen C.P., Bhalla A.S., Newnham R.E., Randall C.A., (1994). An investigation of the assembly conditions of dielectric particles in uncured thermoset polymers. *Journal of Materials Research*, 9, 781–788.

Bowen C.P., Shrout T.R., Newnham R.E., Randall C.A. (1995). Tunable electric field processing of composite materials, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 6(2), 159-168.

Brosnan K. H., Messing G. L., Meyer Jr R. J., Vaudin M. D., (2006). Texture measurements in  $\langle 001 \rangle$  fiber-oriented PMN–PT. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(6), 1965-1971.

Chen Q., Cao S., Song W., Xie Y., Yan Z., Xu J., Gao F., (2023). Comparing investigation of the anisotropic thermoelectric properties of textured  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  ceramics. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 175, 111204.

Chen Q., Gao F., Xu J., Wu C., Cao S., Guo Y., Cheng G., (2020). Effect of cation vacancies on the optical and dielectric properties of  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ : A first-principles study. *Journal of the American Ceramic Society*, 103(3), 1912-1926.

Cheng M. Y., Lin C. L., Lai Y. T., Yang Y. J., (2010). A polymer-based capacitive sensing array for normal and shear force measurement. *Sensors*, 10(11), 10211-10225.

Chu Z., Sarro P. M., Middelhoek S., (1996). Silicon three-axial tactile sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 54(1-3), 505-510.

D'ambrogio G., (2022), "Multiphysics Coupling for Cardiovascular Surgery Application", P.hD. Thesis, INSA de Lyon.

D'Ambrogio G., Zahhaf O., Le M.Q., Capsal J.F. and Cottinet P.J., (2021b). Dielectrophoresis structurization of PZT/PDMS micro-composite for elastronic function: towards dielectric and piezoelectric enhancement, *Materials*, 14, 4071.

D'Ambrogio Giulia, Zahhaf O., Le M.Q., Bordet M., Lermusiaux P., Schiava N.D., Liang R., Cottinet P.J., Capsal J.F., (2022). Piezoelectric biosensor for smart cardiovascular grafts based on  $\text{NaNbO}_3$  fibers/PDMS structured composite. *Materials and Design* 223:111195.

Dahiya R. S., Adami A., Collini C., Lorenzelli L., (2013). POSFET tactile sensing arrays using CMOS technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 202, 226-232.

Damjanovic D., (1998). Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. *Reports on progress in physics*, 61(9), 1267.

Dargahi J., (2000). A piezoelectric tactile sensor with three sensing elements for robotic, endoscopic and prosthetic applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 80(1), 23-30.

Dargahi J., Parameswaran M., Payandeh S., (2000). A micromachined piezoelectric tactile sensor for an endoscopic grasper-theory, fabrication and experiments. *Journal of microelectromechanical systems*, 9(3), 329-335.

Deutz D.B., Mascarenhas N.T., Schelen J.B.J., de Leeuw D.M., van der Zwaag S., and Groen P., (2017). Flexible piezoelectric touch sensor by alignment of lead-free alkaline niobate microcubes in PDMS. *Advanced Functional Materials*, 1700728.

Duran C., (2006). Processing and ferroelectric behavior of textured  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  ceramics. *Journal of Materials Science*, 41, 7620–7627.

Dursun S., Alkoy S., (2011). Electrical properties of 1–3 piezocomposites prepared from textured  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  (KSN) ceramic fibers. *Ferroelectrics*, 420 (1), 12-18.

Dursun S., (2010). Kurşun içermeyen tungsten bronz yapıları ferroelektrik seramik fiberlerde doku oluşumu ve 1-3 piezokompozitlerin elektriksel karakterizasyonu, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Eltouby P., Shyha I., Li C., Khaliq J., (2021). Factors affecting the piezoelectric performance of ceramic-polymer composites: A comprehensive review. *Ceramics International*, 47(13), 17813-17825.

Fleury G., de Lima D. M., Hynynen K., Berriet R., Le Baron O., Huguenin B., (2003). New piezocomposite transducers for therapeutic ultrasound. In *Thermal Treatment of Tissue: Energy Delivery and Assessment II*, 227-236. SPIE, San Jose, CA, USA, 10 June.

Frank T., Doering L., Heinrich G., Thronicke N., Löbner C., Völlmeke S., Reich S., (2014). Silicon cantilevers with piezo-resistive measuring bridge for tactile line measurement. *Microsystem technologies*, 20, 927-931.

Gao X., Zheng M., Lv H., Zhang Y., Zhu M., Hou Y., (2022). Ultrahigh sensitive flexible sensor based on textured piezoelectric composites for preventing sports injuries. *Composites Science and Technology*, 229, 109693.

Gehring P. M., Wakimoto S., Ye Z. G., Shirane G., (2001). Soft mode dynamics above and below the Burns temperature in the relaxor  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ . *Physical review letters*, 87(27), 277601.

Giess E. A., Burns G., O'kane D. F., Smith A. W., (1967). Ferroelectric and optical properties of  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ . *Applied Physics Letters*, 11(7), 233-234.

Goodman G., (1953). Ferroelectric properties of lead metaniobate. *Journal of the American Ceramic Society*, 36(11), 368-372.

Gregersen E., <https://www-britannica-com.translate.goog/science/dielectric>, (Erişim Tarihi: 07/03/2025).

Habib M., Lantgios I., Hornbostel K., (2022). A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(42), 423002.

Haertling G. H., (1999). Ferroelectric ceramics: history and technology. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(4), 797-818.

Harmon L. D., (1982). Automated tactile sensing. *The International Journal of Robotics Research*, 1(2), 3-32.

Hasegawa Y., Shikida M., Shimizu T., Miyaji T., Sasaki H., Sato K., Itoigawa K., (2004). Micromachined active tactile sensor for hardness detection. *Sensors and Actuators A: physical*, 114(2-3), 141-146.

Jain A., KJ P., Sharma A. K., Jain A., Pn R., (2015). Dielectric and piezoelectric properties of PVDF/PZT composites: A review. *Polymer Engineering & Science*, 55(7), 1589-1616.

Kao K. C. (2004). "Dielectric phenomena in solids", 1st Edition, Elsevier.

Kaya M.Y., (2018), “Esnek Gerilmeli Dönüştürücü Tasarımı, Üretimi, Karakterizasyonu ve Uygulamaları”, Doktora Tezi, Gebze teknik Üniversitesi.

Khaliq J., Deutz D.B., Frescas J.A.C., Vollenberg P, Hoeks T, van der Zwaag S., Groen P., (2017). Effect of the piezoelectric ceramic filler dielectric constant on the piezoelectric properties of PZT-Epoxy omposites. *Ceramics International*, 43(2), 2774–79.

Khan S., Tinku S., Lorenzelli L., Dahiya R. S., (2014). Flexible tactile sensors using screen-printed P(VDF-TrFE) and MWCNT/PDMS composites. *IEEE sensors Journal*, 15(6), 3146-3155.

Khanbareh H., van der Zwaag S. and Groen W.A., (2017). In-situ poling and structurization of piezoelectric particulate composites. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28 (18), 2467–2472.

Khanbareh H., K. de Boom B. Schelen R. B. N. Scharff C. C. L. Wang, van der Zwaag S., Groen P., (2017a). Large area and flexible micro-porous piezoelectric materials for soft robotic skin.” *Sensors and Actuators, A: Physical*, 263, 554–62.

Khanbareh H., Hegde M., Bijleveld J. C., van der Zwaag S., Groen P., (2017b). Functionally graded ferroelectric polyetherimide composites for high temperature sensing.” *Journal of Materials Chemistry C*, 5(36), 9389–97.

Khanbareh H., van der Zwaag S., Groen W. A., (2014). Effect of sielectrophoretic atructuring on piezoelectric and pyroelectric properties of lead titanate-epoxy composites. *Smart Materials and Structures*, 23(10), 0–3.

Khanbareh H., van der Zwaag S., and Groen W. A.. 2017v. In-Situ poling and structurization of piezoelectric particulate composites. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(18):2467–72.

Ko C. T., Tseng S. H., L, M. S. C., (2006). A CMOS micromachined capacitive tactile sensor with high-frequency output. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15(6), 1708-1714.

Konstantinova J., Stilli A., Althoefer K. (2015), Force and proximity fingertip sensor to enhance grasping perception. International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2118-2123, Hamburg, Germany, 28 September - 02 October.

Krishna, G. M., Rajanna, K., (2004). Tactile sensor based on piezoelectric resonance. *IEEE sensors journal*, 4(5), 691-697.

Kumar A., Ali S. F., Arockiarajan A., (2017). Energy harvesting from crystalline and conductive polymer composites. *Smart Polymer Nanocomposites: Energy Harvesting, Self-Healing and Shape Memory Applications*, 43-75.

Kunnamkuzhakkal N., Groen W.A., (2013). Piezoelectric and mechanical properties of structured PZT – Epoxy composites. *Journal of Materials Research*, 28(4), 635–41.

Kimura T., (2011). “Molten Salt Synthesis of Ceramic Powders”. In: C. Sikalidis, Editor, “Advances in Ceramics-Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications Book” Intech Open.

Lee H. K., Chang S. I., Yoon E., (2006). A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment. *Journal of microelectromechanical systems*, 15(6), 1681-1686.

Lee H. K., Chung J., Chang S. I., Yoon E., (2008). Normal and shear force measurement using a flexible polymer tactile sensor with embedded multiple capacitors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17(4), 934-942.

Lee M. H., Nicholls H. R., (1999). Review article tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey. *Mechatronics*, 9(1), 1-31.

Lee M. H., (2000). Tactile sensing: new directions, new challenges. *The International journal of robotics research*, 19(7), 636-643.

Li C., Wu P. M., Lee S., Gorton A., Schulz M. J., Ahn C. H., (2008). Flexible dome and bump shape piezoelectric tactile sensors using PVDF-TrFE copolymer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17(2), 334-341.

Li L., Deng J., Chen J., Xing X., (2016). Topochemical molten salt synthesis for functional perovskite compounds. *Chemical science*, 7(2), 855-865.

Li Z., Junjie Z., Jian W., Zhonghui S., Baowen L., Xin Z., Ce W.N., (2023). Anisotropic reinforcement in polymer nanocomposites using dielectric-magnetic difunctional fibers. *Composites Science and Technology* 242, 110209.

Lotgering F., (1959). Topotactical reactions with ferrimagnetic oxides having hexagonal crystal structures-I. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 9, (2).

Luo Y., Xiao Q., Li B., (2017). A stretchable pressure-sensitive array based on polymer matrix. *Sensors*, 17(7), 1571.

Mannsfeld S. C., Tee B. C., Stoltenberg R. M., Chen C. V. H., Barman S., Muir B. V., Ba, Z., (2010). Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature Materials*, 9(10), 859-864.

Mao Y. P., Mao S. Y., Ye Z. G., Xie Z. X., Zheng L. S., (2010). Size-dependences of the dielectric and ferroelectric properties of BaTiO<sub>3</sub>/polyvinylidene fluoride nanocomposites. *Journal of Applied Physics*, 108(1).

Mascarenhas, N. T., (2015), “Highly Flexible Lead-Free Piezoelectric Composites” M.Sc. Thesis, Delft University of Technology.

Meribout M., Takele N. A., Derege O., Rifiki N., El Khalil M., Tiwari V., Zhong J. (2024). Tactile sensors: A review. *Measurement*, 238, 115332.

Messing G.L., Trolier-McKinstry S., Sabolsky E.M., Duran C., Kwon S., Brahmaroutu B., Park P., Yilmaz H., Rehrig P.W., Eitel K.B., Suvaci E., Seabaugh M., Oh K.S. (2004). Templated grain growth of textured piezoelectric ceramics”, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29 (2), 45-96.

Missinne J., Bosman E., Van Hoe B., Van Steenberge G., Kalathimekkad S., Van Daele P., Vanfleteren J., (2011). Flexible shear sensor based on embedded optoelectronic components. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(12), 771-773.

Muhammad H. B., Oddo C. M., Beccai L., Recchiuto C., Anthony C. J., Adams M. J., Ward M. C., (2011). Development of a bioinspired MEMS based capacitive tactile sensor for a robotic finger. *Sensors and Actuators A: Physical*, 165(2), 221-229.

Najarian S., Dargahi J., Mehrizi A. A., (2009). Artificial tactile sensing in biomedical engineering. 5th edition, McGraw-Hill.

Neurgaonkar R. R., Cory W. K., Oliver J. R., Sharp E. J., Wood G. L., Salamo G. J., (1993). Growth and optical properties of ferroelectric tungsten bronze crystals. *Ferroelectrics*, 142(1), 167-188.

Neurgaonkar R. R., Oliver J. R., Cory W. K., Cross L. E., Viehland D., (1994). Piezoelectricity in tungsten bronze crystals. *Ferroelectrics*, 160(1), 265-276.

Nevins J. L., Whitney D. E., (1977). Research on advanced assembly automation. *Computer*, 10(12), 24-38.

Newnham R. E. (2005). *Properties of materials: anisotropy, symmetry, structure*. 1st Edition, Oxford university press.

Newnham R. E., Skinner D. P., Cross L. E., (1978). Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Materials Research Bulletin*, 13(5), 525-536.

Noh Y., Secco E. L., Sareh S., Würdemann H., Faragasso A., Back J., Althoefer K. (2014). “A continuum body force sensor designed for flexible surgical robotics devices”, 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 3711-3714, Chicago, IL, USA, 26-30 August.

Ohka M., Mitsuya Y., Higashioka I., Kabeshita H., (2005). An experimental optical three-axis tactile sensor for micro-robots. *Robotica*, 23(4), 457-465.

Omata S., Terunuma Y., (1992). New tactile sensor like the human hand and its applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 35(1), 9-15.

Parida B. N., Das P. R., Padhee R., Choudhary R. N. P., (2012). Phase transition and conduction mechanism of rare earth based tungsten-bronze compounds. *Journal of alloys and compounds*, 540, 267-274.

Park S. H., Kim S. Y., Kim J. H., Kang I., (2013). “Carbon nano artificial neuron system for flexible tactile sensing”. In 2013 10th International Conference on

Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 728-729, Jeju Korea, 30 October – 2 November.

Pessia Z. R., Cunningham C.A., Krech E. D., Friis E. A., (2020). Power amplification via compliant layer interdigitation and power amplification via compliant layer interdigitation and dielectrophoretic structuring of PZT particle composites. *Smart Materials and Structures*, 29(7), 75004.

Pohl H., (1978). Dielectrophoresis. *Cambridge University Press*, 2, 15-19.

Pramanik R., Arockiarajan A., (2019). Effective properties and nonlinearities in 1-3 piezocomposites: a comprehensive review. *Smart Materials and Structures*, 28(10), 103001.

Puangmali P., Althoefer K., Seneviratne L. D., Murphy D., Dasgupta P., (2008). State-of-the-art in force and tactile sensing for minimally invasive surgery. *IEEE sensors Journal*, 8(4), 371-381.

Qasaimeh M. A., Sokhanvar S., Dargahi J., Kahrizi M., (2008). PVDF-based microfabricated tactile sensor for minimally invasive surgery. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(1), 195-207.

Rahaman, M. N., (2003). Ceramic processing and sintering. 1st Edition, CRC press.

Randall C.A., Miyazaki S., More K.L., Bhalla A.S. and Newnham R.E., (1992). Structural-property relationships in dielectrophoretically assembled BaTiO<sub>3</sub> nanocomposites. *Materials Letters*, 15 (1–2), 26-30.

Roy B., Ahrenkiel S. P., Fuierer A., (2008). Controlling the size and morphology of TiO<sub>2</sub> powder by molten and solid salt synthesis. *Journal of American Ceramic Society*, 91(8), 2455-63.

Sampathkumar P., Gowdhaman P., Sundaram S., Annamalai V., (2013). A review on PZT-polymer composites: dielectric and piezoelectric properties. *Nano Vision*, 3(3), 223-230.

Sampathkumar P., Gowdhaman P., Sundaram S., Annamalai V., (2013). A review on PZT-polymer composites: dielectric and piezoelectric properties. *Nano Vision*, 3(3), 223-230.

Sarangi S. K., Ray, M. C., (2010). Smart damping of geometrically nonlinear vibrations of laminated composite beams using vertically reinforced 1–3 piezoelectric composites. *Smart materials and structures*, 19(7), 075020.

Sarangi S. K., Ray M. C., (2011). Active damping of geometrically nonlinear vibrations of doubly curved laminated composite shells. *Composite Structures*, 93(12), 3216-3228.

Schmidt P. A., Maël E., Würtz R. P., (2006). A sensor for dynamic tactile information with applications in human–robot interaction and object exploration. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(12), 1005-1014.

Scott B. A., Giess E. A., O'kane D. F., Burns G., (1970). Phase equilibria in the  $\text{KNbO}_3\text{-SrNb}_2\text{O}_6$  and  $\text{KNbO}_3\text{-BaNb}_2\text{O}_6$  systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 53(2), 106-109.

Seminara L., Pinna L., Valle M., Basiricò L., Loi A., Cosseddu P., Metta G., (2013). Piezoelectric polymer transducer arrays for flexible tactile sensors. *IEEE Sensors Journal*, 13(10), 4022-4029.

Shahinpoor, M., (2020). “Fundamentals of Smart Materials”, 1st Edition, Royal Society of Chemistry.

Shikida M., Shimizu T., Sato K., Itoigawa K., (2003). Active tactile sensor for detecting contact force and hardness of an object. *Sensors and Actuators A: physical*, 103(1-2), 213-218.

Smith W. A., (1990). “The application of 1-3 piezocomposites in acoustic transducers”, 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 145-152, Urbana-Champaign, IL, USA, 06-08 June 1990.

Takashima K., Horie S., Mukai T., Ishida K., Matsushige K., (2008). Piezoelectric properties of vinylidene fluoride oligomer for use in medical tactile sensor applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 144(1), 90-96.

Tanaka S., Makiya A., Okada T., Kawase T., Kato Z., Uematsu K., (2007). C-axis orientation of  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  using a rotating magnetic field. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(11), 3503-3506.

Tiwana M. I., Redmond S. J., Lovell N. H., (2012). A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A: physical*, 179, 17-31.

Tomer V., C. A. Randall, Polizos G., Kostelnick J., Manias E., (2008). High- and low-field dielectric characteristics of dielectrophoretically aligned ceramic/polymer nanocomposites. *Journal of Applied Physics* 103(3):0–7.

Tribotte B., Haussonne J. M., Desgardin G., (1999).  $\text{K}_2\text{Sr}_4\text{Nb}_{10}\text{O}_{30}$ -based dielectric ceramics having the tetragonal tungsten bronze structure and temperature-stable high permittivity. *Journal of the European Ceramic Society*, 19(6-7), 1105-1109.

Tu S. Y., Lai W. C., Fang W., (2017). “Vertical integration of capacitive and piezo-resistive sensing units to enlarge the sensing range of CMOS-MEMS tactile sensor”, 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 1048-1051, Las Vegas, NV, USA, 22-26 January.

Tung T. T., Robert C., Castro M., Feller J. F., Kim T. Y., Suh K. S., (2016). Enhancing the sensitivity of graphene/polyurethane nanocomposite flexible piezo-resistive pressure sensors with magnetite nano-spacers. *Carbon*, 108, 450-460.

van den Ende D.A., van Kempen S.E., Wu X., Groen W.A., Randall C.A. and van der Zwaag S., (2012). Dielectrophoretically structured piezoelectric composites with high aspect ratio piezoelectric particles inclusions. *Journal of Applied Physics*, 111, 124107.

Van Den Ende D. A., Bory B. F., Groen W. A., van der Zwaag S., (2010). Properties of quasi 1-3 piezoelectric PZT-Epoxy composites obtained by dielectrophoresis. *Integrated Ferroelectrics*, 114(1), 108–18.

Vijaya, M. S. (2012). “Piezoelectric materials and devices: applications in engineering and medical sciences”, 1st Edition, CRC press.

Wada S., Yasuno H., Hoshina T., Nam S. M., Kakemoto H., Tsurumi T., (2003). Preparation of nm-sized barium titanate fine particles and their powder dielectric properties. *Japanese journal of applied physics*, 42(9S), 6188.

Wang C., Gao X., Zheng M., Zhu M., Hou Y., (2021). Two-step regulation strategy improving stress transfer and poling efficiency boosts piezoelectric performance of 0-3 piezocomposites. *ACS Applied Materials and Interfaces* 13(35), 41735–43.

Wang Y. R., Zheng J. M., Ren G. Y., Zhang P. H., Xu C., (2011). A flexible piezoelectric force sensor based on PVDF fabrics. *Smart Materials and Structures*, 20(4), 045009.

Wei L., Yang Z., Chang Y., Gu R., (2008). Effect of seeding  $\text{Sr}_2\text{KNb}_5\text{O}_{15}$  on the phase formation and microstructural development in reactive sintering of  $\text{Sr}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(4), 1077-1082.

Williams, R. B., Park, G., Inman, D. J., Wilkie, W. K. (2002). An overview of composite actuators with piezoceramic fibers. Proceeding of IMAC XX, 47, 130, Los Angeles, CA, USA, 4-7 February.

Wilson S.A. (1999). “Electric-field Structuring of Piezoelectric Composite Materials”, *Ph.D. Thesis*, Cranfield University.

Windecker R., Tiziani H. J., (1999). Optical roughness measurements using extended white-light interferometry. *Optical Engineering*, 38(6), 1081-1087.

Wolffenbuttel M. R., Regtien P. P. L., (1991). Polysilicon bridges for the realization of tactile sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 26(1-3), 257-264.

Wu W., Wen X., Wang Z. L., (2013). Taxel-addressable matrix of vertical-nanowire piezotronic transistors for active and adaptive tactile imaging. *Science*, 340(6135), 952-957.

Xie H., Liu H., Luo S., Seneviratne L. D., Althoefer K., (2013). Fiber optics tactile array probe for tissue palpation during minimally invasive surgery. International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2539-2544, Tokyo, Japan, 03-07 November.

Yang Z., Wei L., Chang Y. (2007). Preparation and morphology of anisometric  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  particles. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(1), 567-272.

Yildirim A., Grant J. C., Es-haghi S. S., Lee W., Maruthamuthu M.K., Verma M., Sutherland J.W., Cakmak M., (2020). Roll-to-Roll (R2R) production of large-area high-performance piezoelectric films based on vertically aligned nanocolumn forests.” *Advanced Materials Technologies*, 5(11), 1–16.

Yoon K. H., Cho Y. S., Kang D. H., (1998). Molten salt synthesis of lead-based relaxors. *Journal of materials science*, 33, 2977-2984.

Zahhaf O., D’Ambrogio G., Giunta A., Le M.Q., Rival G., Cottinet P.J., Capsal J.F., (2022). Molten-state dielectrophoretic alignment of EVA/BaTiO<sub>3</sub> thermoplastic composites: enhancement of piezo-smart sensor for medical application. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24).

Zhang R., Jiang B., Cao W., (2001). Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of multidomain  $0.67\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – $0.33\text{PbTiO}_3$  single crystals. *Journal of Applied Physics*, 90(7), 3471-3475.

Zhao L., Gao F., Zhang C., Zhao M., Tian C., (2005). Molten salt synthesis of anisometric  $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  particles. *Journal of crystal growth*, 276(3-4), 446-452.

Zou L., Ge C., Wang Z. J., Cretu E., Li X., (2017). Novel tactile sensor technology and smart tactile sensing systems: A review. *Sensors*, 17(11), 2653.



## ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Alptekin SARI, İlköğretim ve orta öğretimini İstanbul’da tamamlamıştır. 2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünü kazanmış olup 2016 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2016 – 2019 yılları arasında Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamlayıp 2019 yılı şubat ayında doktora eğitimine başlamıştır. Yüksek lisans ve doktor eğitimi kapsamında 116M2016 kodlu TÜBİTAK projesinde bursiyer olarak çalışmış doktora eğitimine başladığında ise 2019 – 2023 yılları arasında YÖK 100/2000 öncelikli alanlar doktora bursunu almaya hak kazanmıştır.



## TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Sarı H. A., Birdoğan S., Dural S., Camadanlı S., Gülgün M. A., Alkoy S., (2025). 0-3 piezocomposites with anisometric single-crystalline filler particles crystallographically oriented by dielectrophoretic alignment method. *Smart Materials and Structures*, 34, 035031.

