



**ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE PIEZOELEKTRİK MALZEMELERİN
KULLANIMI**

BETÜL BALCAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Aylin AKYILDIZ

2023

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN
KULLANIMI

BETÜL BALCAN

ORCID: 0000-0001-8072-0056

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Danışman: Doç. Dr. Aylin AKYILDIZ

ŞUBAT-2023

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN KULLANIMI

Betül BALCAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Aylin AKYILDIZ

Piezoelektrik malzemelerin, birçok farklı alanda kullanımının artmasıyla beraber daha kapsamlı bir şekilde araştırılıp incelenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Piezoelektrik malzemelere olan bu eğilim, dikkatleri inşaat mühendisliği alanına çevirmiştir. Piezoelektrik malzemelerin daha etkin kullanımını sağlamak için çimento esaslı piezoelektrik malzemelerin geliştirilmesi teşvik edilmektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen harç numunelerine baryum titanat eklenerek harçların başta dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilmesi ve yapı malzemesi alanının gelişimine katkı sağlaması hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın sonucunda yenilenebilir enerji konusunda önemli bir yere sahip olan piezoelektrik malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi ve maliyetlerinin azaltılması ile gelecek nesilde başta yapı malzemeleri olmak üzere birçok alanın hızla gelişmesi ve enerji ihtiyacı sorunlarına bir çözüm önerisi olarak sunulacaktır. Yapılan çalışma hem inşaat sektöründe yeni bir malzemenin kullanılması, çevre ve teknoloji kullanımı açılarından son derece önemli bir konuda ürün geliştirilmesi hem de ürünün kullanımı konularında faydalı olacaktır. Çalışmada harçlara çimento ağırlığınca yüzde olarak 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranlarında baryum titanat eklenerek numuneler üretilmiştir. Üretilen harç numunelerine ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, elektriksel direnç, elektromanyetik kalkanlama deneyleri ve SEM analizi yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerlerinin % 0.25 katkılı BT2 numunesine kadar arttığı ve sonrasında azaldığı görülmüştür. Baryum titanat kullanım oranlarının artması ile elektriksel öz direnç değerlerinde artış olduğu ve dolayısıyla iletkenliğini düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Baryum titanat, Harç, Çimento, Kompozit malzeme, Piezoelektrik, Yapı malzemesi.

ABSTRACT

USE OF PIEZOELECTRIC MATERIALS IN CEMENT BASED COMPOSITES

Betül BALCAN

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Assoc Prof. Dr. Aylin AKYILDIZ

With the increasing use of piezoelectric materials in many different fields, there is a need for more comprehensive research and examination. This trend towards piezoelectric materials has turned the attention to the field of civil engineering. The development of cement-based piezoelectric materials is encouraged to enable more efficient use of piezoelectric materials. By adding barium titanate to the mortar samples produced within the scope of this study, it is aimed to improve the strength and durability properties of the mortars and to contribute to the development of the building material field. In addition, as a result of this study, it will be presented as a solution proposal to the rapid development of many fields, especially building materials, and energy need problems in the next generation, by improving the properties of piezoelectric materials, which have an important place in renewable energy, and reducing their costs. The study will be beneficial both in the use of a new material in the construction sector, in the development of a product that is extremely important in terms of environment and technology use, and in the use of the product. In the study, samples were produced by adding 0.25, 0.5, 0.75 and 1 percent barium titanate to the mortars by weight of cement. Ultrasound transmission velocity, bending strength, compressive strength, water absorption, electrical resistance, electromagnetic shielding tests and SEM analysis were performed on the produced mortar samples. As a result of this study, it was observed that the flexural strength and ultrasound transmission velocity values increased up to the 0.25% doped BT2 sample and then decreased. According to the results of the water absorption test, barium titanate increased the water absorption capacity. It was concluded that with the increase in barium titanate usage rates, the electrical resistivity values increased and thus the conductivity decreased.

Keywords: Barium titanate, Mortar, Cement, Composite material, Piezoelectric, Building material.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
TEŞEKKÜR.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	8
2. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER.....	9
2.1 Piezoelektrik Nedir?.....	9
2.2 Piezoelektrik Davranışı Etkileyen Faktörler	10
2.3 Piezoelektriğin Kullanım Alanları	10
2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri	14
2.5 Piezoelektrik Malzemelerin Sınıflandırılması	15
2.5.1 Doğal piezoelektrikler.....	15
2.5.2 Piezoelektrik seramik malzemeler	16
2.5.3 Polimer piezoelektrikler	16
2.5.4 Kompozit piezoelektrikler	17
2.6 Piezoelektrik Malzemeler	17
2.6.1 Kuartz (SiO ₂)	18
2.6.2 Turmalin.....	18
2.6.3 PVDF (Poli-vinilidin-klorür)	18
2.6.4 Baryum titanat (BaTiO ₃).....	19
2.6.4.1 Baryum Titanatın (BT) Kullanım Alanları	20

2.7 Elektromanyetik Kalkanlama.....	21
3. MATERYAL VE METOT	24
3.1 Materyal	24
3.1.1 Piezoelektrik malzeme	24
3.1.2 Çimento.....	25
3.1.3 İnce Agrega.....	26
3.2 Metot	27
3.2.1 Karışımların Hazırlanması	27
3.2.2 Sertleşmesi Harç Deneyleri.....	28
3.2.2.1 <i>Ultrases Geçiş Hızı Deneyi</i>	28
3.2.2.2 <i>Eğilme Dayanımı Deneyi</i>	28
3.2.2.3 <i>Basınç Dayanımı Deneyi</i>	29
3.2.2.4 <i>Su emme deneyi</i>	30
3.2.2.5 <i>Elektromanyetik Kalkanlama Deneyi</i>	30
3.2.2.6 <i>Elektriksel direnç deneyi</i>	31
3.2.2.7 <i>İç yapı analizi</i>	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	33
4.1 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	33
4.2 Eğilme Dayanımı Deneyi.....	34
4.3 Basınç Deneyi	36
4.4 Su Emme Deneyi	37
4.5 Elektromanyetik Kalkanlama Deneyi	38
4.6 Elektriksel Direnç Deneyi.....	42
4.7 İç Yapı Analizi (SEM)	43
5. SONUÇLAR	46
KAYNAKLAR.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Baryum titanatın kimyasal bileşimi (Çelen ve Ulcay, 2018)	20
Çizelge 2.2. Baryum titanatın fiziksel özellikleri (Çelen ve Ulcay, 2018).....	20
Çizelge 2.3. Kaynakların yaydığı yaklaşık elektrik alan şiddetinin değerleri (Doğan vd., 2018)	22
Çizelge 2.3. Kaynakların yaydığı yaklaşık elektrik alan şiddetinin değerleri (Doğan vd., 2018) (devamı).....	22
Çizelge 3.1. Piezoelektrik malzemenin teknik özellikleri	24
Çizelge 3.2. Çimentonun kimyasal bileşimi ve fiziksel deney sonuçları	26
Çizelge 3.3. Rilem kumu granülometrisi.....	26
Çizelge 3.4. Harç karışım oranları.....	27
Çizelge 4.1. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki bağıntı (Neville, 1996)	34

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. a) Doğrudan piezoelektrik etki, b) Ters piezoelektrik etki.....	9
Şekil 2.2. Mini WASP UAV ve Akıllı Yapı (Avşar ve Şahin, 2012)	11
Şekil 2.3. Yapısal sağlık kontrolü sistemi (Avşar ve Şahin, 2012)	12
Şekil 2.4. Sonar sistemde piezoelektrik malzemelerin kullanımı (Durgun, 2020).....	12
Şekil 2.5. Sırt çantası için tasarlanan piezoelektrik enerji hasatı sistemi (Durgun, 2020)	13
Şekil 2.6. Karayollarındaki uygulamalar (Önal, 2016)	13
Şekil 2.7. Piezoelektrik malzemenin demiryollarındaki uygulamaları (Durgun, 2020).....	14
Şekil 2.8. Piezoelektrik etkiden yararlanarak rüzgardan elektrik üretimi görseli (Önal, 2016).....	14
Şekil 2.9. Provskit Kristalinin Şematik Görüntüsü (Türker, 2009).	16
Şekil 2.10. PVDF β yapısı (Aksüt, 2020)	17
Şekil 2.11. Doğal Piezoelektrik Malzeme Cevherleri (Akgün, 2018).....	18
Şekil 2.12. PVDF (Poli-vinilidin-klorür) (Kalpak, 2019)	19
Şekil 2.13. Baryum Titanat Kristali.....	20
Şekil 3.1. Piezoelektrik malzemenin sem görüntüsü.....	25
Şekil 3.2. Piezoelektrik malzemenin görüntüsü	25
Şekil 3.3. CEM 42.5R Portland Çimentosu.....	25
Şekil 3.4. Deneyde kullanılan rilem kumu	27
Şekil 3.5. Ultrases geçiş hızı deneyinin uygulanması	28
Şekil 3.6. Numunelere eğilme deneyinin uygulanması	29
Şekil 3.8. Su emme deneyi cihazı.....	30
Şekil 3.9. Elektromanyetik Kalkanlama	31
Şekil 3.10. Network Analyzer (ROHDE&SCHWARZ) cihazı.....	31
Şekil 3.11. Elektriksel direnç deneyi cihazı	32
Şekil 4.1. Ultrases hız sonuçları	33
Şekil 4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	35
Şekil 4.3. Beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı.....	36

Şekil 4.4. Beton numunelerin su emme oranları (%)	37
Şekil 4.5. Beton numunelerin boşluk oranları (%)	38
Şekil 4.6. BT0 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği.....	39
Şekil 4.7. BT1 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği.....	39
Şekil 4.8. BT2 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği.....	40
Şekil 4.9. BT3 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği.....	40
Şekil 4.10. BT4 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği.....	41
Şekil 4.11 Elektromanyetik kalkanlama deneyi sonuçları.....	41
Şekil 4.12. Elektriksel Direnç Deneyi Sonuçları	43
Şekil 4.13. Numunelerin SEM görüntüsü (a) katkısız numune, (b) %0.25 baryum titanat katkılı numune, (c) % 0.50 baryum titanat katkılı numune (d) %0.75 baryum titanat katkılı numune, (e) % 1 BaTiO ₃ katkılı numune	44

SİMGELER DİZİNİ

Å	Angström
Ba ⁺	Baryum iyonu
Ba ²⁺	Baryum iyonu
c	Çimento
Cd ²⁺	Kadmiyum iyonu
°C	Santigrat derece
d ₃₃	Piezoelektrik katsayısı
g	Piezoelektrik gerilim katsayısı
g _h	Yüksek voltaj sabiti
g ₃₃	Piezoelektrik Voltaj Katsayısı
Gd ³⁺	Gadolinyum iyonu
kΩ-m	Kilohm
km	Kilometre
kp	Düzlemsel Mod
kt	Kalınlık Modu
kV/mm	Kilovoltmilimetre
kWh/h	Kilowatsaat
°K	Kelvin
mm	Milimetre
Pb ²⁺	Kurşun iyonu
Qm	Mekanik Kalite Faktörü
Sm ³⁺	Samaryum iyonu
tan δ	Dielektrik kaybı
T _c	Curie sıcaklığı
T _g	Cam geçiş sıcaklığına
Ti	Titanyum
Ti ⁴⁺	Titanyum iyonu
V	Volt
w	Su
Y ³⁺	İtriyum
Z	Akustik empedans
%	Yüzde

α	alfa
β	beta
γ	gama
ϵ_r	Dielektrik sabiti



KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif Akım
BaCO ₃	Baryum Karbonat
BT	Baryum Titanat
BaTiO ₃	Baryum titanat
BZT	Baryum Zirkonat Titanat
CaSnO ₃	Kalsiyum kalay oksit
DKT	Dipotasyum tartarat
EDT	Etilen diamin tartarat
FA	Uçucu Kül
KDP	Amonyum ve potasyum tuzları
KHz	Kilohertz
LH	Lityum sülfat monohidrat
LiNbO ₃	Lityum niyobat
LiTaO ₃	Lityum tantalat
MEMS	Mikrofon ve mikro elektro mekanik sistem
MPa	Megapascal
NTCR	Negatif sıcaklık katsayılı direnç
Pb(Ni _{1/3} Nb _{2/3})O ₃	Kurşun nikel niobat
PbTiO ₃	Kurşun titanat
PbZrO ₃	Kurşun zirkonat
Pb(Zn _{1/3} Nb _{2/3})O ₃	Kurşun çinko niobat
Pb(ZrTi)O ₃	Kurşun zirkonat titanat
PC	Portland çimento
PTCR	Pozitif sıcaklık katsayılı direnç
PMN	Kurşun Magnezyum Niobat
PVDF	Poliviniliden florür
PZT	Kurşun Zirkonat Titanat
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO ₂	Kuartz
SrTiO ₃	Stronsiyum titanat
TiO ₂	Titanyum dioksitten
ZNO	Çinko oksit

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőması sűresince katkılarını esirgemeyen, bilgi birikimi ve tecrűbesi ile beni yűnlendiren, deęerli bilimsel uyarı ve űnerilerinden yararlandıęım sayın Doç. Dr. Aylin AKYILDIZ hocama teőekkűr ederim.

Her zaman yanımda olan, bana her tűrlű maddi ve manevi desteęini sunan annem, babam ve kardeőime sonsuz teőekkűr ederim.

Betűl BALCAN

İnőaat Műhendisi



1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişmekte olan akıllı yapılar; makine mühendisliği, yapısal mühendislik, elektrik mühendisliği, malzeme bilimi gibi birçok çalışma alanını kapsar. Her geçen gün akıllı yapılar alanındaki gelişmeler hızla artarak akıllı malzemeler şeklinde isimlendirilen bir malzeme grubunun ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Sevgi, 2009).

Çevresel etkilere kendiliğinden uyum sağlayan akıllı malzemeler; piezoelektrik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar, elektrostriktif malzemeler, magnetostriktif malzemeler, magnetoreolojik/elektroreolojik akışkanlar ve fiber optikler olarak altı sınıfta toplanmaktadır (Sevgi, 2009).

Piezoelektrik malzemeler bir etki karşısında tepki veren, mekanik gerilim ve titreşim enerjisini elektrik enerjisine çevirebilen malzemelerdir. Böylece, binalarda güç hasadı ve kendi kendini idame ettiren akıllı algılamayla yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kullanımına fırsat verir. En çok kullanılan ve bilinen yapı malzemesi olan, düz çimento hamuru piezoelektriklikten yoksundur ve bir bina sisteminin ortam titreşimlerinden elektrik enerjisinin toplanmasında verimli değildir. Son yıllarda, çimento esaslı kompozitin piezoelektrik kapasitesini geliştirmek için katkı maddesi ekleme ve fiziksel işlemler (örn. elektrik alan uygulaması) uygulanmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin sürdürülebilir bina gelişimini sağlamak amacıyla başarılı bir şekilde uygulanması, yalnızca çeşitli yapı bileşenlerinin piezoelektrik özelliklerinin mekanizmasının anlaşılmasına değil, aynı zamanda inşaat endüstrisindeki en son gelişmelere ve uygulamalara da bağlıdır (Chen vd., 2019).

Piezoelektrik malzemeler, uygulanan bir elektrik enerjisini mekanik gerilime dönüştürmek için mekanik gerilim enerjisini elektrik potansiyeline dönüştürme ve bunun tersini yapma kapasitesine sahiptir. Bu fiziksel davranış, inşaat mühendisliği alanında kullanım için yüksek potansiyele sahip malzemeler sunarak yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji performansına sahip akıllı binaların kurulmasına yardımcı olur. Piezoelektrik malzemenin bina yapılarında mekanikten elektriğe jeneratör olarak kullanılması, özellikle gösterge aydınlatması, su için elektrikli ısıtma ve havalandırma için kullanılan işletme enerjisinin bir kısmından tasarruf sağlayabilir. Yakıt yakan cihazlarla (örneğin mikro türbinler) karşılaştırıldığında, piezoelektrik malzemedeki enerji teknolojisinin kullanılması gürültü, egzoz ve güvenlikle ilgili sorunları çözebilir. Öte yandan, piezoelektrik malzeme tabanlı sensörler, akıllı bina yapılarının gerçek zamanlı ve çevrimiçi hasar tespiti yapma kapasitesine sahip olması için inşaat malzemesine

yerleştirilebilir. Akıllı algılama işlevi düşük maliyetlidir ve enerji tasarrufu sağlar ve bir bina yapısının kalan kullanım ömrünü tahmin eder (Chen vd., 2019).

Bu çalışma yapı endüstrisine yönelik yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji konsepti elde etme çabası içinde bina yapıları için piezoelektrik malzemelerin temelleri ve uygulamalarına genel bir bakış sunmaktadır. İnşaat malzemesinin piezoelektrik kapasitesinin iyileştirilmesi ve çeşitli uygulamalar için yapısal elemanlarda piezoelektrik malzemenin kullanılması incelenmiştir. Ardından malzeme sistemindeki piezoelektrik etkinin temelleri anlatılmıştır (Chen vd., 2019). Piezoelektrik malzemeler ve detaylarıyla ele alınmasının ardından piezoelektrik malzemelerin kullanım alanları örneklerle açıklanmıştır (Sevgi, 2009). Bu çalışmalar sonucunda her alanda kullanıldığı gibi yapı malzemesi alanında da piezoelektrik malzemelerin kullanımı ile beton yapısında ve bazı özelliklerinde iyileşmeler artarak inşaat mühendisliği alanında fayda sağlayabilmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Enerji kaynakları günümüzde neredeyse her alanda kullanılmakta ve büyük önem taşımaktadır. Enerji kaynaklarının rezervleri sınırlı olup giderek azalmaktadır. Dünyadaki bu enerji sorunundan dolayı yenilenebilir enerjiye yönelim artmıştır. Teknolojinin gelişmesi ile alternatif yenilenebilir enerji üreten sistemler tasarlanmaktadır. Piezoelektrik enerji de yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve her geçen gün gelişmeye devam etmektedir. Piezoelektrik özelliğe sahip malzemelere olan talep de günden güne artış göstermektedir. Piezoelektrik malzemeler üzerlerine etki eden statik ve dinamik kuvvetler karşısında elektrik üretebilme özelliğine sahiptir ve bu özellik sayesinde piezoelektrik malzemelerden elektrik enerjisi üretme ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Akgün, 2018).

Yaptıkları literatür çalışmalarına göre bu çalışmada, çimento esaslı malzemelerde piezoelektrik malzemelerin özelliklerini belirlemek ve piezoelektrik özelliğe sahip malzemeler hakkında bilgiler verilmiştir.

Literatür incelendiğinde piezoelektrik malzemelerin çimento esaslı malzemelerde kullanılması ve piezoelektrik özelliklerinin belirlenmesi amaçlı farklı çalışmalar yapılmıştır.

Chaipanich vd. (2007) yaptıkları çalışmada PZT içeren sıradan Portland çimentosu kompozitlerinin üretimi ve özelliklerini incelemiştirlerdir. Bu amaçla Kurşun zirkonat titanat (PZT) sıradan Portland çimentosu (PC) kompozitleri hacimce %40, %50 ve %60 PZT

kullanarak üretmişlerdir. Kompozitlerin dielektrik sabitleri sırasıyla %40, %50 ve %60 PZT içeren kompozitler için 139, 176 ve 290 olarak bulunmuştur. Kompozitlerin başarılı bir şekilde kutuplanması sağlandı ve kompozitlerin ölçülen piezoelektrik katsayısı (d_{33}), PZT içeriği ile arttı. PZT-çimento kompozitleri için çok yüksek d_{33} değerleri ile çok umut verici sonuçlardır. Ayrıca, bu fabrikasyon yöntemini kullanarak hacimce %50'den fazla PZT içeren PZT-PC kompozitleri üretmek mümkündür ve bu kompozitlerin yapısal uygulamalarda kullanım için iyi bir potansiyeli vardır (Chaipanich vd., 2007)

Xing vd. (2008) yaptıkları çalışmada çimento esaslı piezoelektrik seramik kompozitlerin piezoelektrik, dielektrik ve elastik özelliklerini içeren malzeme özelliklerini incelemişlerdir. Malzeme özelliklerini açıklamak için farklı türlerde difazlı kompozit modeller önermişlerdir. Kimyasal reaksiyonlu modifiye edilmiş küp modeli, kurşun zirkonat titanat (PZT) seramik partikülleri ile çimento taneleri arasında var olan kimyasal reaksiyon nedeniyle benimsendiğini belirtmişlerdir. Deneysel sonuçların modele çok iyi uyduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, PZT seramiğinin hacim fraksiyonunun kompozitlerin malzeme özellikleri üzerindeki etkisini de ayrıntılı olarak araştırmışlardır. Yapılan araştırma ve deney sonuçlarına göre çimento esaslı piezoelektrik seramik kompozitin malzeme özelliklerinin, yapı malzemelerinin, yani betonun gereksinimlerini karşılamak için uyumlu bir değere ayarlanabileceğini görmüşlerdir (Xing vd., 2008).

Li vd. (2009) yaptıkları çalışmada Nano-PZT tozu ile 0-3 çimento bazlı kompozitin üretimi ve piezoelektrikliğini incelemişlerdir. Çalışmada, metal alkoksitler kullanılarak sol-jel prosesi ile nano boyutlu PZT tozu hazırlanmıştır. Çimento bazlı 0-3 piezoelektrik kompozitler, beyaz çimento ve PZT tozlarının karışımının 100 MPa basınç altında disklerle preslenmesi ve ardından 60 °C'de 24 saat boyunca %100 bağıl nem ile kürlenmesiyle üretildi. PZT içeriğinin artmasıyla kompozitlerin piezoelektrik özelliklerinin arttığı bulunmuştur. Hacimce %80 PZT tozu içeren kompozit için en yüksek ϵ_r ve d_{33} değerleri elde edilmiştir. PZT nano-toz içeren kompozitin favori piezoelektrikliğinin, PZT tanelerinin iyi kristalliği ve PZT parçacıklarının çimentodaki ağ benzeri dağılımı nedeniyle önerildi (Li vd., 2009)

Xing vd. (2009) yaptıkları çalışmada çimento esaslı piezoelektrik seramik kompozitlerin gözenek yapısını ve malzeme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla kompozitten farklı seramik/çimento oranına sahip numuneler hazırlamışlardır. Çimento esaslı piezoelektrik seramik kompozit için, PZT partiküllerinin ve çimento tanelerinin yüzeyinde kimyasal reaksiyon mevcut olduğundan, mikroyapı ve gözenek yapısı daha karmaşık hale gelmiştir. Ve

kompozitin toplam gözenekliliğinin seramik/çimento oranıyla azaldığını görmüşlerdir. Saf çimento macunu için gözenekliliği %6,57 civarında bulmuşlardır; Hacimce %75 seramik parçacıklı kompozitlere kadar, %4'ün altına düşmüştür. Toplam intrüze gözenek hacmi ile kompozitlerin basınç mukavemetinde monotonik bir azalma bulmuşlardır. Kompozitin nispi dielektrik sabiti, gözenekliliğin artmasıyla azalmış ve eğilim, kompozitlerin toplam gözenek hacmine karşı basınç dayanımına oldukça benzer bulmuşlardır; bunun, kompozitin toplam gözenekliliği yükselirken yük depolama gücünün zayıfladığı anlamına geldiğini tespit etmişlerdir (Xing vd., 2009).

Rianyoi vd. (2011) yaptıkları çalışmada 0-3 baryum titanat-Portland çimento kompozitlerinin dielektrik, ferroelektrik ve piezoelektrik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla, karıştırma ve presleme yöntemi kullanarak hacimce %30, %50 ve %70 baryum titanat (BT) konsantrasyonlarında 0-3 bağlantılı baryum titanat (BT) ve çimento kompozitleri üretmişlerdir. Farklı BT konsantrasyonlarına sahip ferroelektrik BT-Portland çimento kompozitlerinin oda sıcaklığında ve çeşitli frekanslarda (0.1–20 kHz) dielektrik sabiti (ϵ_r) ve dielektrik kaybını ($\tan \delta$) araştırmışlardır. Yapılan araştırma ve deney sonuçlarına göre BT konsantrasyonu arttıkça BT-PC kompozitlerinin dielektrik sabitinin arttığını bulmuş ve ϵ_r için en yüksek değer (436'lık) %70'lik bir BT konsantrasyonu için elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Kompozitlerin dielektrik sabitinin artan frekansla azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca, kompozitlerin dielektrik kaybının artan frekansla keskin bir şekilde azaldığını belirlemişlerdir. Ek olarak, BT-PC kompozitlerinin dielektrik sabiti değerlerinin, BT'nin hacim yüzdesi artırıldığında arttığını görmüşlerdir. Piezoelektrik katsayısının kurşun bazlı çimento kompozitleri kadar yüksek olmasa da sonuçlarının yine de umut verici olduğunu görmüşlerdir (Rianyoi vd., 2011).

Potong vd. (2013) yaptıkları çalışmada 1-3 kurşunsuz baryum zirkonat titanat (BZT)-Portland çimentosu (PC) kompozitlerinin dielektrik ve piezoelektrik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla 1-3 kurşunsuz baryum zirkonat titanat-Portland çimento kompozitleri üretmişlerdir. SEM (taramalı elektron mikroskobu) mikrograflarında, kalsiyum silikat hidratların, kompozitleri birbirine bağlayan bağlayıcı görevini yaparak BZT ve PC malzemeleri arasında iyi bir bağ oluşturduğunu görmüşlerdir. 1-3 kompozitin dielektrik sabiti, piezoelektrik katsayısı ve piezoelektrik voltaj sabitinin paralel modelinkine en yakın olduğunu bulmuşlardır. Piezoelektrik katsayısını, %70 BZT kompozitleri için 133 pC/N'de en yüksek değer bulmuşlardır. Ayrıca, %30-50 BZT kompozitlerinde yeni 1-3 kurşunsuz kompozitlerinin,

beton yapı ile iyi bir uyumluluğa ve akıllı beton yapılarda kullanım için iyi bir potansiyele sahip olduğunu belirlemişlerdir (Potong vd., 2013).

Jaitanong vd. (2014) yaptıkları çalışmada çimento bazlı poliviniliden florür (PVDF) Kurşun zirkonat titanat (PZT) kompozitlerin piezoelektrik özelliklerini incelemişlerdir. Kurşun zirkonat titanat (PZT), poliviniliden florür (PVDF) ve Portland çimentosu (PC) kullanılarak yeni ve özgün çimento bazlı piezoelektrik kompozitler üretildi. Hacimce %50 PZT ve hacimce %1-20 PVDF içerikli PZT-PVDF-PC kompozitlerinin dielektrik sabiti (ϵ_r), piezoelektrik yük katsayısı (d_{33}) ve piezoelektrik voltaj katsayısı (g_{33}) araştırıldı. Sonuçlara göre, PVDF eklendiğinde piezoelektrik yük katsayısının (d_{33}) ve piezoelektrik voltaj katsayısının (g_{33}) yükseldiğini, üçüncü bir faz olarak PVDF'nin piezoelektrik özellikleri geliştirdiği bulmuşlardır. % 5 hacim. Ayrıca, 0-3 kompozitlere PVDF dahil edildiğinde kutuplama süresinde önemli bir azalma bulundu (Jaitanong vd., 2014).

Potong vd. (2017) yaptıkları çalışmada 0–3 bağlanabilirlik kurşunsuz baryum zirkonat titanat-Portland çimento kompozitlerinin termal genleşme davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan deney sonuçlarına göre 0–3 kompozitlerinin termal genleşmesinin, sıcaklık aralığında ($\approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ila $250 \text{ }^\circ\text{C}$) azaldığını görmüşlerdir. Yüksek sıcaklıkların, çimento matrisinden bir miktar nem ve su kaybı nedeniyle kompozitlerde büzölmeye neden olduğunu belirlemişlerdir. Böylece çimento matrisindeki hidratasyon ürününün fiziksel ve mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklarda değişmiştir. Soğutma sırasında, 0-3 BZT-PC kompozitleri, BZT seramiğin üç fazlı geçişini göstermiştir. BZT içerikli 0-3 kompozitlerin termal genleşme katsayısı değerlerinin beton ile eşleştirilebilir olduğunu ve sonuçlara göre kompozitlerde seramik ve Portland çimentosu arasında kimyasal reaksiyon olmadığını doğruladığını görmüşlerdir (Potong vd., 2017).

Chomyen vd. (2018) yaptıkları çalışmada 0-3 baryum zirkonat titanat seramik-portland çimentosu kompozitlerinin fiziksel özelliklerine, dielektrik özelliklerine ve piezoelektrik özelliklerine uçucu kül ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. SEM mikrografı ile BZT-çimento/FA kompozitlerinin mikroyapısı ile ilgili elde edilen sonuçlarda, BZT seramik partiküllerinin uçucu kül çimento matrisi ile iyi bağlandığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları araştırma ve deney sonuçlarına göre kompozitteki uçucu kül içeriği arttığında bu kompozitlerin dielektrik sabitinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca uçucu kül içeriği arttıkça kompozitlerin piezoelektrik katsayısının azaldığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, hacimce

%10 uçucu kül içeren BZT-PC kompozitinin piezoelektrik katsayısı (d_{33}) değerinin BZT-PC kompozitlerinininkine benzer olduğunu bulmuşlardır (Chomyen vd., 2018).

Pan vd. (2020) yaptıkları çalışmada piezoelektrik özellikleri geliştirmek için, %30-70 oranlarında kurşun zirkonat titanat (PZT) seramik içeren 0-3 tipi çimento esaslı kompozitler üzerinde %0 ile %20 arasında değişen su/çimento oranının (w/c) etkisini araştırmışlardır. Polarizasyonu kolaylaştıran basın faktörleri ve piezoelektrik özellikleri de tartışmışlardır. Yaptıkları deneyler ve araştırmalar sonucuna göre, daha yüksek w/c değerine sahip kompozitlerin daha yüksek gözeneklilik ve dielektrik kaybı değerlerine sahip olduğunu ve bunun da polarizasyon sırasında daha uzun tetikleme süreleriyle sonuçlandığını görmüşlerdir. Polarizasyonu kolaylaştırmak için, kompozitlerin dielektrik kaybının ve direncinin sırasıyla 0.75 ve 100 $k\Omega\cdot m$ 'den daha az olması gerektiğini belirlemişlerdir. Uygun bir w/c'ye sahip piezoelektrik çimentonun, piezoelektrik özelliklerini iyileştirebileceğini görmüşlerdir (Pan vd., 2020).

Santos vd. (2020) yaptıkları çalışmada empedans spektroskopisi ile portland çimentosu kürlenme işlemi ve 0-3 çimento esaslı kompozitlerin piezoelektrik özellikleri üzerine PZT eklemenin etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla 0-3 Çimento bazlı piezoelektrik kompozitler üretmişlerdir. Sadece kompozitlerin piezoelektrik özelliklerinin değil, aynı zamanda çimento hamuru kürlenme prosesinde piezoelektrik fazın etkisinin de olduğu doğrulamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda kompozitlerin nihai piezoelektrik ve dielektrik özelliklerinin esas olarak matris ve piezoelektrik ekleme arasındaki arayüzey mikro yapısına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Piezoelektrik özellikler, piezoelektrik faz daralmasını teşvik ederken aynı zamanda kararsız dipolleri teşvik eden çimento kürlenme işlemine atfedilen yaşlanma dalgalanmalarını göstermiştir (Santos vd., 2020).

Wittinanon vd. (2020) yaptıkları çalışmada baryum zirkonat titanat (BZT) içeren seramik kompozitlerin fiziksel özellikleri, mikro yapıları, mekanik özellikleri ve piezoelektrik özelliklerine poliviniliden florürün (PVDF) etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla hacimce %3-7 PVDF (PC'nin değiştirilmesi) ile bir Portland çimentosu (PC) fazı kullanmışlardır ve 0-3 kompozit üretmek için hacimce %40-60 BZT ile karıştırmışlardır. Bu kompozitler için Vickers sertlik testi, Knoop sertlik testi, elastik modül testi ve indentasyon tekniği ile kırılma tokluğu testi uygulamışlardır. Yapılan araştırma ve deney sonuçlarına göre PVDF'nin fiziksel, dielektrik ve piezoelektrik özelliklerini iyileştirebileceğini gözlemlemişlerdir. Kompozitteki PVDF içeriğini arttırdıklarında, sertlik ve elastik modül değerlerinde azalma gözlemlemişlerdir.

Ancak ilginç bir şekilde, daha yüksek PVDF içeriğine sahip kompozitlerin daha yüksek kırılma tokluğu değerleri olduğunu görmüşlerdir (Wittinanon vd., 2020).

Liu vd. (2021) yaptıkları çalışmada 3-3 tipi sıradan Portland çimento kompozitlerinin üretimi ve özelliklerini incelemişler. Yaptıkları çalışmada, gözenekli PZT seramikleri üretmek için partikül stabilize ıslak köpükler ve jel döküm işlemi kullanmış ve ardından Portland çimento hamurunu gözenekli seramiklere dökerek çimento bazlı piezoelektrik kompozitler üretmişlerdir. PZT bulamacının ilk kat yüklemesi değiştirerek, farklı gözeneklilik, açık gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımına sahip gözenekli PZT seramikleri hazırlamışlardır. Çimento esaslı piezoelektrik kompozitlerin dielektrik ve piezoelektrik özelliklerine gelince, ϵ_r ve d_{33} değeri PZT fazının fraksiyonu ile arttığını, g_{33} ters yönde değişen bir trend uyguladığını belirlemişlerdir. PZT hacim fraksiyonundaki artışla birlikte, PZT-çimento kompozitleri kademeli olarak sandviç yapıya dönüşerek elektromekanik işlem sırasında daha fazla enerji kaybına ve mekanik kalite faktörünün (Q_m) belirgin şekilde azalmasına neden olmuştur. Akustik empedansı (Z) çimento malzemelerinkine yakın bulmuşlardır, dolayısıyla bu tür kompozitlerin inşaat mühendisliğinde uygulama için uygun olduğunu belirlemişlerdir (Liu vd., 2021).

Wittinanon vd. (2021) yaptıkları çalışmada baryum titanat (BT) ve poliviniliden florür içeren çimento bazlı kompozitlerin elektromekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla BT içeren çimento bazlı kompozitleri üretmek için hacimce %40-60 baryum titanat (BT) piezoelektrik seramik partikülleri, Portland çimentosu ve poliviniliden florür (PVDF, hacimce %0-7) kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda artan BT içeriği ile kompozitlerin empedans değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Artan BT içeriği mekanik kalite faktörü (Q_m) değerinde düşüğe neden olmuştur. Kompozitte PVDF kullanıldığında, Q_m değerlerinin PVDF'siz olandan daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Genel olarak, kompozitte PVDF kullanılması kalınlık modu (k_t) ve düzlemsel mod (k_p) değerlerini artırdığı, ancak Q_m değerini düşürdüğü, bunun da yüksek bir elektromekanik aktarılabirlik sağladığını belirlemişlerdir (Wittinanon vd., 2021).

Piezoelektrik etkinin var olduğu geçmiş yıllardan beri bilinir ama son yıllarda kullanımı daha fazla yaygınlaşmıştır. Dünyada nüfusun artması ile enerjiye olan gereksinim de zamanla artış göstermektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle piezoelektrik malzemelerin yüksek verimli ve düşük maliyetli olması ilerleyen zamanlarda başta ulaşım sistemleri, aydınlatma gibi pek çok alanda kullanımının

artacağını düşündürmektedir. Hızlı tepki verme ve düşük enerji tüketimi gibi olumlu yanları, piezoelektrik malzemelerin eyleyici ve algılayıcı olarak tercih edilmelerini sağlamaktadır.

Baryum titanat ($BaTiO_3$) esaslı seramiklerin ileri teknoloji seramikler içinde önemli bir yeri bulunmaktadır. Farklı katkı maddelerinin ikame edilmesiyle elektriksel özelliklerinde değişimler yapılarak farklı uygulamalar için farklı kompozisyonlar şeklinde kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler, aynı alanlarda kullanılan ve diğerlerine oranla daha yüksek özelliklere sahip olan kurşun içerikli malzemelere göre çok daha çevreci ve sağlığa zararsızdır (Ersoy, 2010). Piezoelektriksel etki sergileyen malzemelerin çeşitleri ve etkileri hala araştırılmaya devam edilmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, çimento bağlayıcılı kompozitlerde piezoelektrik malzemeler kullanarak daha yüksek dayanım ve dayanıklılık elde etmek, çimento bağlayıcılı piezoelektrik kompozit malzemelerin katkı oranlarını, elektromanyetik kalkanlama ve elektriksel direnç özelliklerini belirlemek ve yüksek özelliklere sahip malzemeler geliştirmektir. Çalışmada elde edilen bilgi birikimi inşaat sektörüne hizmet edeceği gibi malzeme ve teknoloji kullanımı açılarından son derece önemli bir konuda ürün geliştirilmesi ve ürünün kullanımı konularında faydalı olacaktır. Bu çalışma kapsamında, piezoelektrik malzeme kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozitlerin özelliklerinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

Önerilen projenin amaç ve hedefleri aşağıdaki gibidir:

- Piezoelektrik malzemeler kullanılarak üretilen harçların özelliklerinin geliştirilmesi,
- Enerji ihtiyacı sorunlarına bir çözüm önerisi sunulması,
- Çalışma kapsamında uygulanacak karışım oranlarından hangisinin daha dayanımı yüksek ve dayanıklı harç üretimi sağladığının tespiti,
- Elektromanyetik kalkanlama ve elektriksel direnç değerlerini belirlemek,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarına bir alternatif getirilebilmesi,
- Üretilen çimento harcının piezoelektrik özellikleri belirlenerek inşaat yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği ortaya konulacaktır.

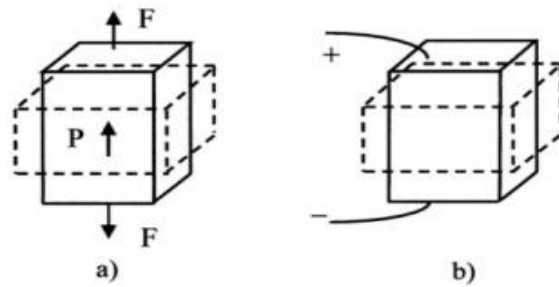
2. PİZOELEKTRİK MALZEMELER

2.1 Piezoelektrik Nedir?

Piezo, Yunanca'dan türetilmiş bir kelime olup basınç uygulamak anlamına gelmektedir. Elektrik ise Yunancada amber (kehribar) demektir ve amber bir elektrik yük kaynağıdır (Durgun, 2020). Piezoelektrik, kristal yapıdaki cisimlere dışarıdan basınç uygulanması ve uygulanan basınçla orantılı şekilde elektrik üretme yeteneğidir (Kalpak, 2019). Diğer bir ifadeyle piezoelektrik özellik, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürebilme yeteneğidir. (Sevgi, 2009).

Piezoelektrik etki ilk olarak turmalin kristali olarak adlandırılan farklı renklere sahip şeffaf taşlarda fark edilip sonraları birçok bilim insanı tarafından incelenmiş olsa da Curie kardeşlerin yapmış olduğu deneysel çalışmalarla keşfedilmiştir. Piezoelektrik etkinin tersinirlik özelliği de kullanım alanlarını artıran bir etken olmuştur (Sevgi, 2009).

Piezoelektrik etki doğrudan ve ters piezoelektrik etki olarak iki sınıfta incelenir. Doğrudan piezoelektrik etki piezoelektrik özelliği bulunan malzemeye uygulanan kuvvetle orantılı olarak ölçülebilecek küçüklükte bir elektrik farkı oluşturmasıdır. Ters piezoelektrik etki ise, elektrik yüküne maruz kalan piezoelektrik malzemenin gerinim oluşturmasıdır. Doğrudan piezoelektrik etki altındaki piezoelektrik malzemeler yapısal saptamada ve algılayıcı tasarımında kullanılmaktadırlar. Ters piezoelektrik etki altındaki piezoelektrik malzemeler ise akıllı yapıların titreşim kontrolünde ve eyleyici tasarımında kullanılmaktadırlar. Şekil 2.1'de yapının doğrudan ve ters piezoelektrik etki altında davranışı gösterilmiştir (Sevgi, 2009).



Şekil 2.1. a) Doğrudan piezoelektrik etki, b) Ters piezoelektrik etki

2.2 Piezoelektrik Davranışı Etkileyen Faktörler

Piezoelektrik malzemeler sahip oldukları özelliklerin sınırları içerisinde ve uygun koşullar altında en iyi şekilde çalışırlar. Piezoelektrik bir malzemeyi bu sınırlar dışında çalıştırmaya çalışmak malzemenin istenen performansı göstermemesi ve fonksiyonunu yitirmesine neden olabilir. Bu da kısmen ya da tamamen piezoelektrik malzemenin polarizasyonunun ortadan kalkmasına ve bununla birlikte ilerleyen zamanlarda piezoelektrik malzeme özelliklerini belirleyen piezoelektrik sabitlerde kayıp oluşmasına neden olabilmektedir. Piezoelektrik seramik bir malzemenin birçok özelliği polarizasyondan sonrasında zamanla logaritmik olarak azalır (Aydos, 2009).

Piezoelektrik malzemelerin maksimum kullanımı genelde curie sıcaklığının yarısı ($\sim 1/2T_c$) ile sınırlandırılmıştır. Piezoelektrik malzemeler yüksek sıcaklık etkisiyle rastgele yönelme eğiliminde olduklarından dolayı kutuplaşma kaybı yaşarlar. Buna termal bozulma denir. Termal bozulma dış etkilere ilgilidir (Barstuğan, 2019).

Yaşlanma harici stres ve sabit sıcaklık etkisinde olan bir malzemenin özelliğinin kendiliğinden zamanla değişimidir. Bir sistemin denge dışı bir durumdan denge durumuna ulaşması olarak da tanımlanabilir. Yaşlanma malzemenin cinsine, işleme ve kutuplanma durumuna bağlıdır (Barstuğan, 2019).

Piezoelektrik malzeme üzerine mekanik gerilim uygulanması, malzemenin polarizasyonunu bozup mekanik depolarizasyona sebep olur. Buna mekanik bozulma denir. Malzeme polarizasyon ile piezoelektrik özellik kazanmışsa depolarize olması ile piezoelektrik özelliğinin tamamını veya bir kısmını kaybeder. Bir piezoelektrik malzemenin mekanik bozulma yaşayabilmesi için gereken güvenlik sınırları malzeme türüne göre değişir.

Polarize edilmiş bir piezoelektrik malzeme polarizasyonun ters yönüne uygulanan güçlü bir elektrik alana maruz kalırsa depolarize olur ve bunun sonucunda piezoelektrik özelliğini kaybeder. Piezoelektrik özelliğin kaybedilmesi sıcaklığa, ters elektrik alanın uygulandığı süreye ve diğer etkenlere bağlıdır (Barstuğan, 2019).

2.3 Piezoelektriğin Kullanım Alanları

Piezoelektrik malzemeler biyoteknoloji, medikal, makine mühendisliği gibi alanlarda kullanılır. Doğrudan piezoelektrik etkiyle kullanım mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ve ses dalgalarını elektrik enerjisine dönüştürebilen dönüştürücüler olarak iki grupta sınıflandırılabilir.

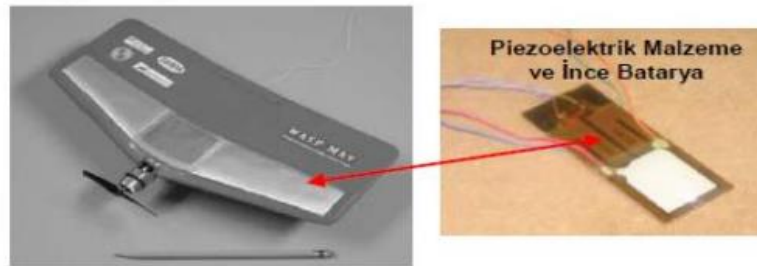
Yapılan uygulamalara örnek olarak hızlanma ve basınç sensörleri, otomotiv alanında dönen makine parçaları ve çarpma dedektörlerini tespit eden titreşim toplayıcıları, ateşleme elemanları, piezo klavyeleri, üreteçler, pasif sönümlenme elemanları, ses ve ultrason alıcıları, gürültü analizi cihazları verilebilir. Ters piezoelektrik etki de mikro ve nano konumlandırma cihazları, lazer ayarlama cihazları, titreşim sönümlenme cihazları, mikro pompalar, pnömomatik valfler, sinyal üreteçleri, yüksek gerilim kaynakları, transformatörler, yüksek güçlü ultrasonik üreteçlerde kullanılabilir (Koçak, 2019).

Piezoelektrik malzemelerin başlıca kullanım alanlarından bir tanesi kişisel enerji üreteçleridir. Piezoelektrik malzemeler telefonlara, MP3 oynatıcılara yetecek kadar enerji üretebilmektedir. Ayakkabının tabanı piezoelektrik maddelerden üretilir ve atılan adımlarla elektrik üretimi yapılabilir. Böylece kişisel elektronik cihazlarda kullanılması için bataryalarda depolanabilir ya da doğrudan kullanılabilir (Durgun, 2020).

Radyo vericilerinin frekans kontrolleri, telefon iletişimi uygulamalarındaki dalga filtrelerinde kullanılmaktadır (Durgun, 2020).

Sesin yankılanmasıyla ortaya çıkan titreşimlerin piezoelektrik malzemeler yardımıyla sese dönüştürülmesi sağlanarak ses elektriğe dönüştürülebilmektedir (Durgun, 2020).

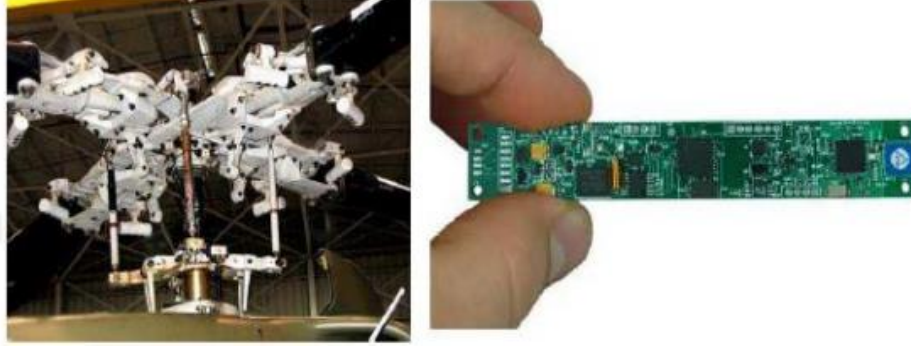
Günümüzdeki teknoloji ile büyük boyutlardaki hava araçlarının enerji ihtiyacı karşılanamasa da küçük boyutlardaki araçlarda enerji ihtiyacı bu akıllı yapılar ile karşılanabilir. ABD'deki bir proje içerisinde tasarlanmış olan "WASP Mini UAV" buna örnek gösterilebilir. Bu araçlar kanatlarındaki piezoelektrik malzemeler ve ince bataryalar sayesinde gerekli enerjiyi sağlamaktadır (Şekil 2.2) (Avşar ve Şahin, 2012).



Şekil 2.2. Mini WASP UAV ve Akıllı Yapı (Avşar ve Şahin, 2012)

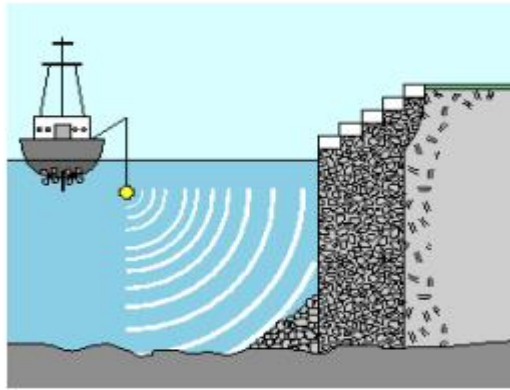
Bunun dışında yapısal sağlık kontrolü amacıyla kullanılan sensörlerin enerji ihtiyacı da piezoelektrik malzemeler kullanılarak sağlanabilir. Bu sensörlerin uygulandıkları yerlerden sebebiyle kablo kullanılmamakta ve enerji ihtiyaçları piller tarafından karşılanmaktadır. Bu

pillerin dönem dönem kontrol edilip, sistemin düzgün bir biçimde çalışması için değiştirilmesi gerekmektedir. Bu piller ile beraber piezoelektrik enerji hasatı sistemleri de kullanılırsa, yapısal sağlık kontrolü için kullanılan sistemin güvenilirliği ve devamlılığı da sağlanmış olur. Helikopterin ana motoruna yerleştirilmiş yapısal sağlık kontrolü sisteminin enerjisinin piezoelektrik enerji hasatı (Şekil 2.3) ile karşılanması buna örnek verilebilir (Avşar ve Şahin, 2012).



Şekil 2.3. Yapısal sağlık kontrolü sistemi (Avşar ve Şahin, 2012)

Gemilerde hedef bulmaya ve derinlik ölçmeye yarayan, titreşim hareket yapan ve sonar cihazlarda kullanılan piezoelektrik maddeler, sıvı içinde boşluklar oluşturur. Bir cisimden yansıyan dalganın, gidiş ve dönüş için aldığı zaman, o cismin konumunu bulmada kullanılmaktadır (Şekil 2.4) (Önal, 2016).



Şekil 2.4. Sonar sistemde piezoelektrik malzemelerin kullanımı (Durgun, 2020)

Piezoelektrik enerji hasatı sistemleri havacılık, denizcilik gibi yapılarda değil tüm sivil ve askeri yapılarda, enerji ihtiyacı duyan ve titreşim üreten yapılarda kullanılmaktadır. Örneğin, askeri sırt çantası için tasarlanmış bir piezoelektrik enerji hasatı sistemi (Şekil 2.5) ile operasyon

sırasında meydana gelen titreşimler sayesinde enerji sağlanabilir ve bu enerji telsizin pilini şarj etmek için kullanılabilir (Durgun, 2020).



Şekil 2.5. Sırt çantası için tasarlanan piezoelektrik enerji hasatı sistemi (Durgun, 2020)

Yüksek voltaja sahip elektrik türbinlerinin gerilim üretmek amacıyla rotor sargılarının sarıldığı metallerde kullanılır. Asfalt ile kaplı yolların altında bulunan beton zemin üzerine eklenen piezo jeneratörlerin üzeri bitümlü tabakayla kaplanarak üzeri asfalt ile kaplanır ve 30 yıla kadar uzanan jeneratör ömrü sağlanır. Elde edilen elektriğin bataryalarda depolanması veya şebekeye verilmesi mümkün olmaktadır (Şekil 2.6) (Önal, 2016).



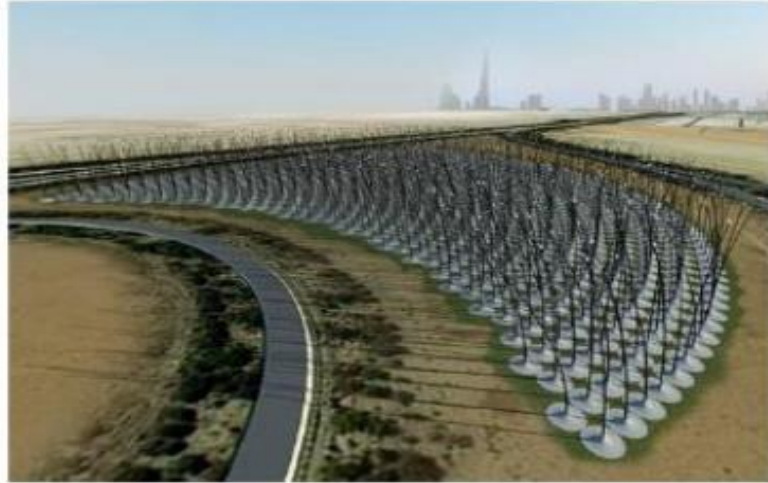
Şekil 2.6. Karayollarındaki uygulamalar (Önal, 2016)

Demiryolu traverslerinde yalnızca titreşim izolasyonu yapmak amacıyla eklenmiş lastik tamponların değişimi ile elektrik üretimi ve trenlerin aktif yük-hız-yer takibi yapılabilmektedir (Şekil 2.7) (Durgun, 2020).



Şekil 2.7. Piezoelektrik malzemenin demiryollarındaki uygulamaları (Durgun, 2020)

Rüzgâr türbinlerine alternatif olarak Şekil 2.8’de tasarlanan sistemin amacı, bitki sapını andıran devasa büyüklükteki sapların rüzgârda salınım hareketi yapmasıyla elektrik enerjisi üretilmesidir. Bu sistemin temeli ise piezoelektrik prensibine dayanmaktadır. Bu sapların tepesine yerleştirilen LED’lerin parlaklığı rüzgârın hızına göre değişmektedir (Önal, 2016).



Şekil 2.8. Piezoelektrik etkiden yararlanarak rüzgardan elektrik üretimi görseli (Önal, 2016)

2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri

Çeşitli alanlarda piezoelektrik malzemelerin kullanımının artmasıyla daha geniş kapsamlı incelenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Piezoelektrik malzemeler anizotropik yapıdadır ve bu sebeple mekanik, elektriksel davranışları ve elektriksel tepkileri, uygulanan elektrik alanının uygulama eksenine göre değişir. Bundan dolayı piezoelektrik malzemenin konumunun tasarım esnasında dikkatle belirlenmesi gerekmektedir (Sevgi, 2009). Piezoelektrik özellik gösteren seramiklerin farklı uygulamalarda kullanılması için şekil ve boyut olarak uygun bir hale getirilmesi gerekmektedir (Önal, 2016).

Doğrusal davranış gösteren piezoelektrik malzemeleri dinamik uygulamalarda kullanmak daha avantajlıdır. Piezoelektrik malzemelerin kullanımı, titreşim ve şekil kontrolü, makine parçalarının üretimi gibi mühendislik uygulamalarında da avantajlı olduğundan tercih edilmektedirler (Sevgi, 2009).

Piezoelektrik malzemeler, küçük boyutlarda ve hafif bir yapıda olup esas yapıda önemli bir kütle artışına sebep olmayacağından yapının özelliklerini değiştirmeden algılayıcı ve eyleyici olarak kullanılabilirler (Sevgi, 2009). Yapılarında bulunan kristallerin üzerine uygulanan mekanik yükün etkisiyle elektrik potansiyeli oluşmaktadır. Mekanik gerilim/uzama davranışları ile elektriksel kutuplaşma arasında bağlantı vardır. Bir kuvvetin uygulanması sonucunda malzemede bozulma olduğu anda elektriksel yük gözlemlenebilir. Bu kullanıma algılayıcı adı verilir. Bunun zıttı bir etki de elektrik alan uygulandığında piezoelektrik malzemelerde mekanik gerilim/uzama oluşumudur. Bu kullanıma ise eyleyici adı verilir (Önal, 2016).

Piezoelektrik malzemeler, elverişsiz çalışma şartlarında da oldukça dayanıklıdır. Uzayda güneş ışınımına uzun yıllar dayanabilmeleri buna örnek verilebilir (Sevgi, 2009)

2.5 Piezoelektrik Malzemelerin Sınıflandırılması

Piezoelektrik malzemeler 4 ana sınıfta değerlendirilebilir. Bunlar; doğal piezoelektrikler, piezoelektrik seramikler, polimer piezoelektrikler ve kompozit piezoelektriklerdir (Aksüt, 2020).

2.5.1 Doğal piezoelektrikler

Doğal piezoelektrik malzemelerin, en verimli piezoelektrik davranışını elde etmek için mevcut kristallerin kristalografik doğrultularını dikkate alarak, kesmek ve şekillendirmek gerekmektedir (Onay, 2011).

Kuars, doğal piezoseramikler arasında en çok kullanılanıdır. Günümüzde Kuvars kristali az da olsa hızlandırıcılarda kullanılmaktadır. Ancak kuvars kristalinin elektromekanik çift katsayısının düşük olması, kuvarsın elektromekanik enerji dönüşümünün esas olduğu uygulamalarda kullanılmamasına sebep olmaktadır (Onay, 2011).

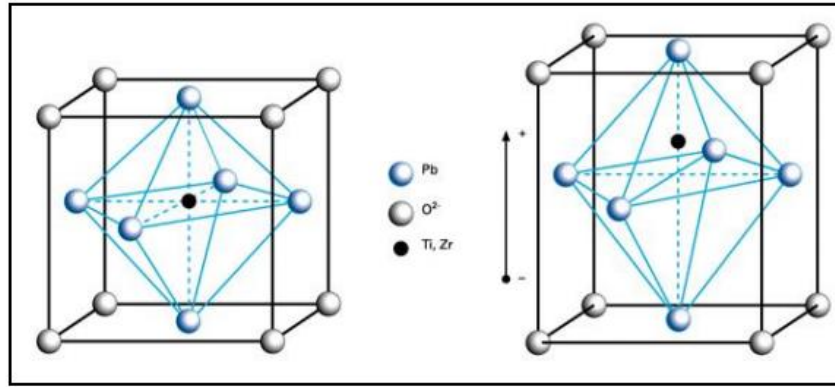
Yüksek voltaj sabitlerinden (g_h) dolayı lityum sülfat ve turmalin ticari hidrofonda kullanılan iki kristal piezoelektrik malzemedir. Bu kristaller şok ve hava akımı ölçümleri için de kullanılmışlardır (Türker, 2009).

Lityum niyobat (LiNbO_3) ve lityum tantalat (LiTaO_3), $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar yüksek hassasiyetlerine korumalarından dolayı yüksek sıcaklık akustik sensörlerinde kullanılmaktadırlar (Onay, 2011).

Doğal kristaller, kararlı yapılarından dolayı sensör uygulamalarında kullanılabilirler. Özelliklerinin çok kararlı olması, sistemde kullanılan sensörün daha uzun kullanım ömürlü olmasını sağlar (Onay, 2011).

2.5.2 Piezoelektrik seramik malzemeler

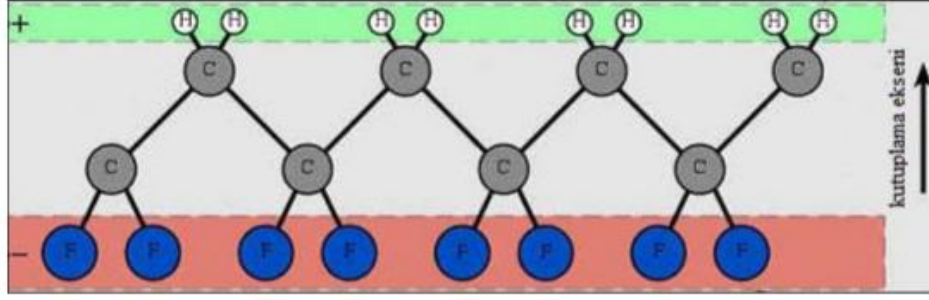
Piezoelektrik seramikler, perovskit kristal yapıdadırlar. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi perovskit kristalleri, genelde geniş bir kafese dizilmiş kurşun veya baryum ve oksijen iyonları gibi divalent metal iyonları arasında, küçük titanyum veya zirkonyum gibi tetravalent metal iyonları içerirler. Kristallerde, tetragonel veya rombohedral simetriyi oluşturan şartlar altında her bir kristal dipol momente sahiptir (Şekil 2.9) (Türker, 2009).



Şekil 2.9. Provskit Kristalinin Şematik Görüntüsü (Türker, 2009).

2.5.3 Polimer piezoelektrikler

Polimer piezoelektriklerin büyük bir kısmı florokarbon temellidir. En çok kullanılan piezoelektrik polimer PVDF'dir. PVDF, yüksek miktarda kristal yapıdadır. PVDF'nin yapısındaki %50-70 arasında değişen yüksek kristallığın nedeni yapıda bulunabilen α , β , γ fazlarıdır. Bu 3 farklı faz yapısı fiziksel veya kimyasal işlemlerle birbirlerine dönüştürülebilir. β ve γ formlarında olan, moleküle dik yöndeki çift kutuplar malzemenin kutuplu yapıya sahip olmasına neden olur ve malzeme piezoelektrik özellik davranışına sahip olur. β fazının yapısı diğer faz yapılarından daha baskın piezoelektrik özellik gösterir. β fazının yapısı Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Aksüt, 2020).



Şekil 2.10. PVDF β yapısı (Aksüt, 2020)

Polimer tabanlı PVDF'ler ve piezoseramikler mekanik yüklemelere dayanıklı, üstün esnek yapıya sahip ve üretim kolaylığına sahiptir. PVDF'nin en önemli dezavantajı zor kutuplanmasıdır. Örneğin PVDF kutuplanması için 120 kV/mm değerlerinde büyük elektrik alanlar gerekir (Aksüt, 2020).

2.5.4 Kompozit piezoelektrikler

Piezoelektrik seramik malzemenin pasif bir polimer ile bir araya getirilmesiyle kompozit piezoelektrik malzemeler elde edilir. Kompozit piezoelektrik malzemelerin başlıca tercih edilme sebeplerinden biri yüksek mekanik esnekliğe sahip olmasıdır. Bunun dışında akustik empedansları oldukça düşüktür (Durmuş, 2021).

2.6 Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik, 1880 yılında ilk olarak Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Daha sonra pek çok piezoelektrik özellik gösteren malzeme geliştirilmiştir. Kuvars keşfedilen ilk piezoelektrik kristal malzemedir. II. Dünya Savaşı esnasında yaklaşık olarak yetmiş beş milyon kuvars levhası üretilmiştir. Doğal kaliteli hammadde temini azalınca, sentetik kristaller üretilmeye başlanmıştır. J. Valasek 1920' lerde rochelle tuzunun ferroelektrik etkisini keşfetmiştir. Yapay piezoelektrik kristal üretimi ise ilk olarak 1935'te başlamıştır. Amonyum ve potasyum tuzları (KDP), etilen diamin tartarat (EDT), dipotasyum tartarat (DKT) ve lityum sülfat monohidrat (LH) geliştirilmiştir. Kuvars hariç, piezoelektrik cihazlarda lityum niyobat ve alüminyum fosfat kristalleri tercih edilir. Ferroelektrik seramik, güçlü piezoelektrik özelliğiyle piezoelektrik uygulamalarında kullanılan önemli bir maddedir. Baryum titanat, kurşun zirkanat titanat Elektrik ve mekanik olarak üstün özelliklere sahiptir ve bu sentetik piezoelektrik maddelerin keşfedilmesiyle piezoelektrik malzemelerin uygulanması için yeni alanlar oluşmuştur. Piezoelektrik özellik kuvars, rochelle tuzu gibi tek kristal yapıları

malzemelerde, baryum titanat (BT), kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi tek seramik, iki veya üç bileşenli seramik malzemelerde, poliviniliden diflorür (PVDF) gibi polimerlerde veya kompozit malzemelerde bulunabilir (Akgün, 2018).

2.6.1 Kuartz (SiO₂)

Kuars minerali piezoelektrik ve piroelektrik özellikler gösterir Formülü SiO₂ 'dir ve saf halde % 46.5 Si ve % 53.3 O₂ içerir. Mohs cetvelinde sertliği 7, özgül ağırlığı 2,65 g/cm³, ergime sıcaklığı 1785 °C olan ve yer kabuğunda oldukça sık görülebilen minerallerdendir. Doğal kuvarsın içinde katı eriyik şeklinde bulunan en temel elementler; Li, Na, Al, Ti ve Mg'dur. Genelde renksizdir fakat farklı renklerde de olabilmektedir. Kuvars minerali erimez, yalnızca hidroflorik asitte çözünür (Koçak, 2019).

2.6.2 Turmalin

Borosilikat mineraline turmalin denir. "Turmalin" ismi Sri Lanka (Seylan)'nın resmi dili olan Singhalese dilinde "renkli taş" anlamındaki "turamali" kelimesinden gelmektedir. Siyah, menekşe, yeşil ve pembe renklerde bulunur ve süs taşı olarak da kullanılır. Kristal yapıdaki turmalinin piezoelektrik gerilim katsayısı (g) yüksektir ve basınç ölçen cihazlarda, radyo dalgalarının yayılmasında frekansı kontrol etmek için kullanılır. Isı etkisine maruz bırakıldığında elektrik yükü üretebildiğinden piroelektrik alanda da kullanılır (Şekil 2.11) (Akgün, 2018).



Şekil 2.11. Doğal Piezoelektrik Malzeme Cevherleri (Akgün, 2018)

2.6.3 PVDF (Poli-vinilidin-klorür)

Poli-vinilidin-klorür (PVDF), yaklaşık olarak -35 °C'lik bir cam geçiş sıcaklığına (T_g) sahiptir ve tipik olarak % 50-60 kristal şeklindedir. Malzemeye piezoelektrik özellikleri vermek için, moleküler zincirlerinin yönlendirilmesi gerekir ve bu amaçla mekanik olarak gerilir ve

daha sonra gerilim altında kutuplanır. Şekil 2.12’de Poli-vinilidin-klorür (PVDF) görülmektedir (Kalpak, 2019).

PVDF, yarı kristalin fluoropolimer sınıfına aittir. Yüksek ısıya, kimyasal ve mor ötesi ortamlarda fluoropolimerlerin sahip olduğu karakteristik kararlılığı gösterirler. Dokunmaya karşı duyarlı dizilimlerde, az maliyetli gerinim ölçerlerde ve hafif ses dönüştürücülerde kullanılması bu polimerin piezoelektrik özelliğinden kaynaklanır. Yangına, aşınmaya, radyasyona karşı dirençlidir ve mor ötesi ışıklardan etkilenmez (Koçak, 2019).



Şekil 2.12. PVDF (Poli-vinilidin-klorür) (Kalpak, 2019)

2.6.4 Baryum titanat ($BaTiO_3$)

Baryum titanatın ($BaTiO_3$), rengi beyazdan griye değişir. Kimyasal formülü ABO_3 tür ve perovskit ailesine bağlı inorganik bir bileşiktir (Çelen ve Ulcay, 2018). Baryum ve titanyumdan oluşan bir oksittir. Suda çözünmez, seyreltik asitler ve konsantre asitlerde çözünür. Baryum titanyum oksit veya baryum titanyum trioksit de denir (Akgün, 2018).

Baryum titanat, elektriksel özelliklerinin bileşime çok duyarlı olması sebebiyle, farklı uygulamalarda kullanılabilen seramik esaslı bir malzemedir. İlk keşfedilen piezoelektrik seramik malzeme olma özelliğine sahiptir. Baryum titanat, saf halde yalıtkandır. Az miktarda metallerin dop edilmesi ile yarı iletken hale gelmektedir. Ferroelektrik özelliğe sahiptir, mükemmel bir fotorefraktif malzemedir ve piroelektriktir (Ertuğ, 2008). Yüksek dielektrik sabiti ($25\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1350-1600), piezoelektrik, piroelektrik ve ferroelektrik özelliklerinden dolayı elektronik sanayinde kullanılır. Erime sıcaklığı $1618\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir (Şekil 2.13). Curie sıcaklığı yaklaşık olarak $120\text{ }^\circ\text{C}$ verilmiştir (Ersoy, 2010). Baryum titanatın kimyasal bileşimi Çizelge 2.1' de, Baryum titanatın fiziksel bileşimi Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Baryum titanatın kimyasal bileşimi (Çelen ve Ulcay, 2018)

Element	İçerik (%)
Baryum	58.9
Titanyum	20.5
Oksijen	20.6

Çizelge 2.2. Baryum titanatın fiziksel özellikleri (Çelen ve Ulcay, 2018)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	6.02
Erime Sıcaklığı (°C)	1650
Young Modülü (GPa)	67
Sertlik (Mohs)	5

Baryum titanat kübik, tetragonal ve hekzagonal olarak üç kristal formda olabilir (Öksüz, 2018).



Şekil 2.13. Baryum Titanat Kristali

2.6.4.1 Baryum Titanatın (BT) Kullanım Alanları

Çimento bazlı piezoelektrik kompozitler, inşaat mühendisliğinde kullanılan en popüler inşaat malzemeleriyle (çimento ve beton) iyi uyumlarının yanı sıra çok hassas iletim özelliklerine sahiptir ve dolayısıyla geleneksel dönüştürücü malzemelerin eksikliklerinin giderilmesinde etkilidirler (Wang vd., 2014). Çimento bazlı piezoelektrik kompozitler, farklı yapılarda kullanılan malzemelerle daha iyi uyumluluğa sahip oldukları için yapısal sağlık izleme uygulamalarında etkili olarak kabul edilir (Kumar vd., 2018). Son yirmi yıldır beton yapıların sağlığını izlemek için alternatif piezoelektrik sensörler olarak geliştirilmiş ve

kullanılmıştır. Kurşun zirkonat titanat (PZT) seramik, baryum titanat (BaTiO) gibi diğer piezoelektrik malzemelerle karşılaştırıldığında etkili piezoelektrik özellikleri nedeniyle çimento bazlı piezoelektrik kompozitlerde inklüzyon malzemesi olarak kullanılmaktadır (Pan vd., 2020).

BaTiO₃ (kurşun zirkonyum titanat) ve Pb(ZrTi)O₃ (PZT) gibi metal oksitler, ferroelektrik, piyroelektrik ve piezoelektrik özelliklere sahip olmaları sebebiyle genel olarak farklı elektronik uygulamalarda kullanılabilirler. PZT seramikler, kurşun ve kurşun oksit içeriğine sahiptir. Bu da çevre ve insan sağlığını olumsuz etkiler. Bu sebepten dolayı biyoyumlu ve çevre dostu malzeme kullanımına ilgi artmıştır. Baryum titanat, kurşun içermeyen alternatiflerden birisidir. Baryum titanat pek çok alanda kullanılabilen önemli ferro elektrik ve piezoelektrik özellikli malzemelerdendir (Çelen ve Ulcay 2018).

Baryum titanat ilginç özelliklere sahip olması sebebiyle, ikinci dünya savaşı sırasında keşfedilip yaklaşık 70 yıldan fazla zamandır bilimsel ve teknolojik alanlarda yoğun ilgi görmüştür. Kimyasal ve mekanik olarak çok kararlı yapıda olması, oda sıcaklığı ve üzerinde ferroelektrik özellik göstermesi, kolay üretilerek çok kristalli seramik örnek formunda kullanılabilmesi bu ilginin başlıca sebeplerindendir. Yüksek dielektrik sabite sahip olması ve düşük dielektrik kayıp sebebiyle, seramik kondansatörlerin, termistörlerin, transdüserlerin ve elektro-optik cihazların üretiminde kullanılır. Piezoelektrik ve pyroelektrik özellikler gösteren baryum titanat biyokompozitler için de uygun bir malzemedir. Ayrıca Curie sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda direncinin sıcaklık ile artmasından dolayı sıcaklık kontrolü ve sıcaklık algılama ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaya, 2018).

2.7 Elektromanyetik Kalkanlama

Elektronik cihazların kullanılması teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak günlük hayatımızda yaygınlaşmıştır. Bu elektronik cihazların kullanımı çevrelerine çeşitli frekans aralıklarında enerji yayılmasına neden olmaktadır. Çeşitli frekans aralıklarındaki ışınımın canlıları olumsuz etkileyebilmektedir. Elektro manyetik (EM) alanın insanlar üzerinde kısa zamanda stres, uykusuzluk, migren, hafıza kaybı etkiler gösterebilmektedir. Uzun vadede ise moleküller ve kimyasal bağları, hücre yapısını, vücut koruma sistemini etkileyebilir. Bu etkilerin sonucunda lösemi, beyin tümörü, kalp rahatsızlıkları, Parkinson, Alzheimer, kanser gibi sebep olduğu bilimsel araştırmalar ile kanıtlanmıştır (Yılmaz, 2014).

Yaşamımızın her alanında kullandığımız, hayatımızı kolaylaştıran bu cihazlar aynı zamanda elektromanyetik çevre kirliliğine de sebep olmaktadır. Elektromanyetik yayınının sebep olduğu bu zararların azaltılması önemli hale gelmiştir. Elektromanyetik kalkanlamada etkin olarak kullanılan metal ürünlerinin pahalı ve ağır olması, ısıl genleşme ve esnek olmaması gibi özelliklere sahip olmasından dolayı her yerde kullanıma uygun değildir (Yılmaz, 2014).

Elektromanyetik alanın neden olduğu zararların azaltılması amacıyla elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip olan malzemelere ihtiyaç artmıştır. Elektromanyetik kalkanlamayla, canlıların maruz kalacağı radyasyon dozunu minimuma indirmek amaçlanmaktadır (Çelen ve Ulcay, 2018).

Elektromanyetik dalga, birbirine dik elektrik ve manyetik alanların etkisiyle enerjinin dalgalar halinde taşınımıdır. Bu dalgalar ışık hızı ile yayılırlar. Elektromanyetik dalgaların frekans (f), periyod (t) ve dalga boyu (λ) olmak üzere 3 önemli karakteristikleri vardır. Dalganın bir periyodunda kat ettiği yol, dalga boyunu (λ) verir ve birimi metredir ($m.c= \lambda.f$ ve $\lambda= c / f$). Yapay kaynaklardan yayılan bu elektromanyetik alanlar günlük hayatımızın bir parçası olmuştur. Çizelge 2.3'te bu kaynakların yaydığı yaklaşık elektrik alan şiddetinin değerleri verilmektedir (Doğan vd., 2018).

Çizelge 2.3. Kaynakların yaydığı yaklaşık elektrik alan şiddetinin değerleri (Doğan vd., 2018)

Elektromanyetik Alan Kaynakları	Elektrik Alan Şiddeti (V/m)
Elektrikli battaniye	250
Mikrodalga fırın	250
Su ısıtıcı	130
Dizüstü Bilgisayar	100
Müzik seti	15.7
Buzdolabı	60
Ütü	60
Mikser	50
Ekmek kızartma makinesi	40

Çizelge 2.3. Kaynakların yaydığı yaklaşık elektrik alan şiddetinin değerleri (Doğan vd., 2018) (devamı)

Saç kurutma makinesi	40
----------------------	----

Televizyon	30
Kahve makinesi	30
Elektrikli süpürge	16
Kablosuz modem	5-10
Baz istasyonu	10
Ampul	5

Çalışma gerilimi = (110-220) V, Çalışma frekansı = 60 Hz, Mesafe= 30 cm, Cihaz elektrik alan = (V / m)

Genel olarak, kalkanlama etkinliği zayıflatma düzeyleri bakımından sınıflandırıldığında: 0-10 dB arasında çok düşük, 10-30 dB arasında etkili bir kalkanlama için en düşük aralık, 30-60 dB arasında ortalama, 60-90 dB arasında iyi ve kalkanlama etkinliğinin 90 dB'nin üzerinde olanlar için çok iyi olarak sınıflandırılmaktadır (Kutlu vd, 2004).

Standart betonun da elektromanyetik radyasyona karşı korunmak için önemli bir yeteneği olmamasına rağmen, yeterli bir katkı maddesi eklenerek, elektromanyetik radyasyona karşı koruma geliştirilebilir.

Bu çalışmada 0 GHz-3 GHz arasındaki elektromanyetik dalganın üretilen 160x160 5 mm kalınlıklı baryum titanat katkılı çimento harç numunelerinin kalkanlama özellikleri ölçülmüştür.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

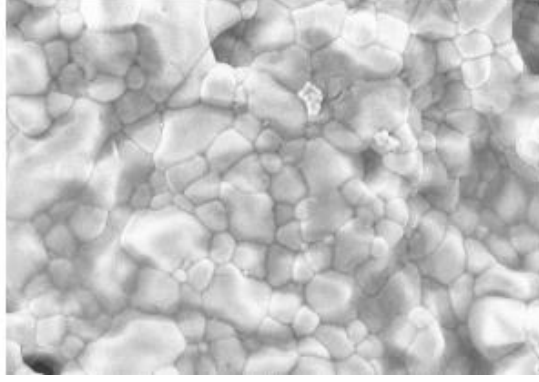
Piezoelektrik malzemeler kullanarak üretilen harçların dayanım, dayanıklılık, elektromanyetik kalkanlama ve elektriksel özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada ilk olarak piezoelektrik malzemelerinin bazı fiziksel ve yapısal özellikleri verilmiştir. Ardından, farklı karışım oranları kullanarak hazırlanmış olduğumuz numunelerde, dayanım, dayanıklılık, elektromanyetik kalkanlama ve elektriksel iletkenlik deneyleri yapılarak piezoelektrik malzeme faktörünün etkinliği incelenmiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının desteklenmesi amacı ile SEM (taramalı elektron mikroskopu) analizi yapılmıştır.

3.1.1 Piezoelektrik malzeme

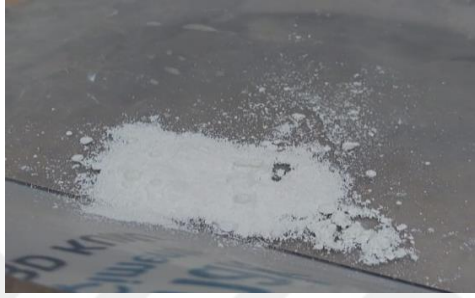
Çalışmada piezoelektrik malzeme olarak kullanılan baryum titanat piezoelektrik malzeme Nanografi Nanoteknoloji A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Üretimde kullanılan piezoelektrik malzemenin teknik özellikleri Çizelge 3.1’de, Şekil 3.1’de numunenin SEM görüntüsü ve Şekil 3.2’de kullanılan piezoelektrik malzeme görülmektedir.

Çizelge 3.1. Piezoelektrik malzemenin teknik özellikleri

Safılık (%)	99.95					
Renk	Beyaz					
Ortalama Tane Boyutu (nm)	90					
Özgül Yüzey Alanı (m²/g)	10.5					
Gerçek Yoğunluk (g/cm³)	5.9					
Element Analizi (%)	Na	Ca	Fe	K	Mg	Sr
	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.019



Şekil 3.1. Piezoelektrik malzemenin sem görüntüsü



Şekil 3.2. Piezoelektrik malzemenin görüntüsü

3.1.2 Çimento

Deneysel çalışmalarda İstanbul Büyükçekmece Çimento Fabrikası'nın (AKÇANSA) ürettiği TS EN 197-1 (2012) standartlı CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun şekli, XRF analiziyle fiziki özellikler deneylerinin sonuçları sırası ile Şekil 3.3 ile Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3. CEM 42.5R Portland Çimentosu

Çizelge 3.2. Çimentonun kimyasal bileşimi ve fiziksel deney sonuçları

	Kimyasal Bileşim, %	CEM I 42.5 R
Kimyasal Özellikler	SiO ₂	16.80
	Al ₂ O ₃	4.81
	Fe ₂ O ₃	3.55
	CaO	63.90
	MgO	1.94
	Na ₂ O	0.74
	K ₂ O	1.24
	SO ₃	3.02
	MnO	0.12
	Kükürt (S)	-
	Cl ⁻	0.01
	Kızdırma Kaybı	1.24
	Çözünmeyen Kalıntı	0.44
	Serbest Kireç	1.90
Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık	3.15
	Özgül Yüzey, cm ² /gr	3320

3.1.3 İnce Agrega

Harç karışımında “Standart Rilem” kumu kullanılmıştır. Kumun birim ağırlığı 1.352 kg/dm³, özgül ağırlığıysa 2.563 kg/dm³tür. Rilem kumunun granülometrisi Çizelge 3.3’te ve şekli Şekil 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Rilem kumu granülometrisi

Elek Boyutları (mm)	2.00	1.60	0.5	1	0.16	0.08
Kümülatif Elekte Kalan (%)	0	7±2	67±2	33±2	87±2	99±1



Şekil 3.4. Deneyde kullanılan rilem kumu

3.2 Metot

Çimento bağlayıcılı kompozitlerde piezoelektrik katkı oranlarını belirlemek ve yüksek özelliklere sahip malzemeleri geliştirmek amacıyla katkılı yapı malzemesi üretilmiş ve üretilen numunelerin 28 günlük kür süresinden sonra aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

3.2.1 Karışımların Hazırlanması

Deneylerde kullanılmak üzere harç numuneleri hazırlanmıştır. İlk önce TS EN 196-1 standardına uygun harç üretilmiştir. Harcın karışımı ağırlık açısından 1 miktar çimento, 3 miktar kumla 1/2 kısım sudan oluşmaktadır. Karışımın su/çimento oranı 0.50'dir. Harç numuneleri karışım oranları Çizelge 3.4'te verilmiştir. Öncelikle suya çimento ilave edilip, karıştırıldı, sonra piezoelektrik malzeme harç mikserine konulup daha sonra 30 s karıştırıldı. Standart rilem kumu ilave edilerek 60 s daha karıştırıldı. Daha sonra hazırlanan harç karışımı 40x40x160 mm boyutundaki kalıplara yerleştirilmiştir. 1 gün sonra numuneler kalıptan çıkarılıp ve daha sonra 20 ± 2 °C sıcaklıkta kirece doymuş su içerisinde bekletilmiştir. 28 gün sonra numuneler kürden çıkarılıp, deneyler yapılmıştır.

Çizelge 3.4. Harç karışım oranları

Karışım Kodu	Katkı Oranı (%)	Çimento (g)	Piezoelektrik Malzeme (g)	Kum (g)	Su (g)	Bağlayıcı / Su (%)
BT0	0	450	0.000	1350	225	0.5
BT1	0.25	450	1.125	1350	225	0.5
BT2	0.50	450	2.250	1350	225	0.5
BT3	0.75	450	3.750	1350	225	0.5
BT4	1.00	450	4.500	1350	225	0.5

3.2.2 Sertleşmesi Harç Deneyleri

3.2.2.1 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

TS EN 12504-4 standardına göre yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının değerlendirilmesinde mikro saniye (μs) olarak okunan ultrases hızı geçiş süresi değerleri Denklem (3.1) bağıntısı ile hesaplanarak ultrases hızı km/s cinsinden bulunmuştur. Ultrases geçiş hızı deneyinin uygulanması Şekil 3.5' te gösterilmiştir.

$$V=L/t \quad (3.1)$$

V : Ultrases hızı, km/s

L : Numune boyu, km

t : Ultrases geçiş süresi, s



Şekil 3.5. Ultrases geçiş hızı deneyinin uygulanması

3.2.2.2 Eğilme Dayanımı Deneyi

Üretimden 28 gün sonra eğilme deneyi $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki prizmatik numunelere uygulandı. Numunelerin eğilme dayanımı değerleri elde edildi. Eğilme dayanımı (3.2) bağıntısına göre hesaplanmıştır (TS EN 12390-5).

$$R_f = \frac{1.5F_f \ell}{b^3} \quad (3.2)$$

Bağıntıda R_f eğilme dayanımını, N/mm^2 , F_f en büyük yükü, N, ℓ mesnet silindireleri arasındaki açıklığı, mm, b prizmanın bir kenarını, mm ifade etmektedir.



Şekil 3.6. Numunelere eğilme deneyinin uygulanması

3.2.2.3 Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyinden sonra iki parçaya ayrılmış olan yarım prizmaların yarım parçası, plâkaları arasına merkezlenerek uzunlamasına yerleştirilmiştir. Yük düzgün şekilde, prizma kırılana kadar arttırılmıştır. Basınç dayanımı (3.3) bağıntısına göre hesaplanmıştır (TS EN 196-1). Numunelere basınç deneyinin uygulanması Şekil 3.7' de gösterilmiştir.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.3)$$

R_c : Basınç dayanımı, MPa

F_c : Kırılmadaki en büyük yük, N

1600: Plakalarının (40x40 mm) alanı, mm²



Şekil 3.7. Numunelere basınç deneyinin uygulanması

3.2.2.4 Su emme deneyi

Cismin kuru ağırlığı (P_0), etüvde 105°C 'de numuneyi değişmez ağırlığa gelene kadar kurutularak bulunmuştur. Daha sonra numune, oda sıcaklığındaki suda 48 saat süreyle bekletilmiştir. Cismin sudaki ağırlığı ölçülmüştür. Bulunan P_1 değeridir. Cisim sudan çıkarılıp, yüzeyi bezle kurutularak tartıldı. Bulunan P_2 değeridir. Ağırlıktaki artış; (P_2-P_0) taşın içine giren suyun miktarıdır. Su emme miktarı (3.4) bağıntısına göre hesaplanmıştır. Su emme deneyi cihazı Şekil 3.8' de gösterilmiştir.

$$\omega(\%) = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \quad (3.4)$$



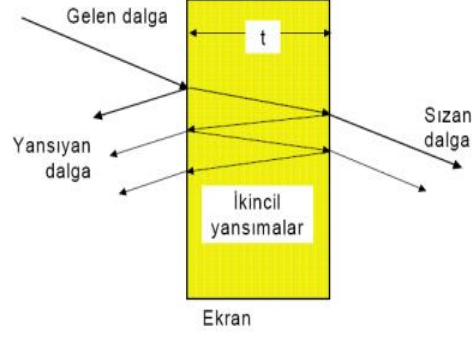
Şekil 3.8. Su emme deneyi cihazı

Boşluk oranını hesaplamak için ağırlıktaki artış; (P_2-P_0) değeri ve cismin sudan çıkarılıp, yüzeyi bezle kurutularak ölçülen ağırlığı ve sudaki ağırlığı farkı (P_2-P_1) değeri kullanılır. Boşluk oranı (3.5) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

$$e(\%) = (P_2 - P_0) / (P_2 - P_1) \quad (3.5)$$

3.2.2.5 Elektromanyetik Kalkanlama Deneyi

Elektromanyetik dalgalar üç şekilde zayıflatılmaktadır. Birincisi duvardan yansımalar, ikincisi duvar içindeki zayıflamalar (yutulma) ve üçüncüsü ise duvar içerisindeki ardışık yansıma kayıplarıdır. Ekranlama bir cihazdan içeri (veya dışarı) doğru giren (çıkan) kaçak alanların azaltılması için kullanılmaktadır. SE (shielding efficiency) ekranlamanın ne derece etkili olduğunu gösteren bir parametre olup, desibel (dB) olarak ifade edilmektedir.



$$SE = A + R + B \quad [dB]$$

A : Yutulma kaybı, R : Yansıma kaybı, B : İkincil yansıma etkileri

Şekil 3.9. Elektromanyetik Kalkanlama

Elektromanyetik kalkanlama etkisi Network Analyzer (ROHDE&SCHWARZ) cihazında ölçülmüştür (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Network Analyzer (ROHDE&SCHWARZ) cihazı

3.2.2.6 Elektriksel direnç deneyi

Etüv kurusu duruma getirilmiş harç numuneler üzerinde ASTM C 1760 standardına uygun şekilde direnç ölçer (ohm-metre) ile iki plaka yöntemine göre elektriksel direnç değeri (R) ölçülmüştür. Her seriden üç tekrarlı ölçüm yapılarak aritmetik ortalama değerleri alınmıştır. Direnç değerleri (R) ölçülen harçların elektriksel özdirenç değerleri de aşağıda verilen denklem (3.6) ile belirlenmiştir. Elektriksel direnç deneyi cihazı Şekil 3.11’de verilmiştir.

$$\delta = R \frac{A}{L} \quad (3.6)$$

δ : elektriksel özdirenç, kohm.m

R : direnç, kohm

A : numune yüzey alanı, m² ve

L : plakalar arası mesafeyi, m simgelemektedir.



Şekil 3.11. Elektriksel direnç deneyi cihazı

3.2.2.7 İç yapı analizi

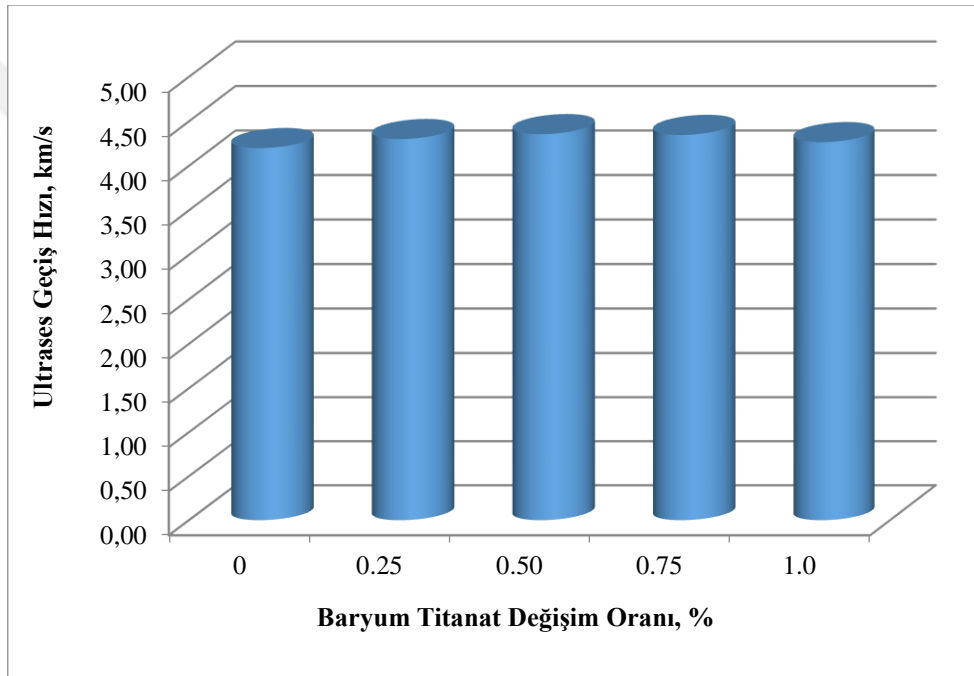
Numunelerin mikro yapı ve kompozisyonları, SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan inceleme Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı NABİLTEM'de gerçekleştirilmiştir. Cihazın markası FEİ modeli ise QUANTA FEG 250 dir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Piezoelektrik malzeme kullanılarak üretilmiş harçların ultrases geçiş hızı, dayanım, dayanıklılık, elektromanyetik kalkanlama, elektriksel direnç, içyapı analizi özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada, yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.1 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Katkısız, % 0.25, % 0.50, % 0.75, % 1 baryum titanat katkılı harç numunelere 28 gün sonunda eğilme deneyinden önce ultrases geçiş süresi deneyi yapılmıştır. Prizma numuneler üzerinde yapılan ultrases geçiş süresi deneyine ait sonuçlar Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Ultrases hız sonuçları

Şekil 4.1 incelendiğinde, % 0.25 baryum titanat katkılı numunelerin referans numuneye göre artış oranı % 2.38, % 0.5 baryum titanat katkılı numunelerin artış oranı % 3.8, % 0.75 baryum titanat katkılı numunelerin artış oranı % 3.57 ve % 1 baryum titanat katkılı numunelerin artış oranı ise % 1.67 olarak belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarına göre ses geçiş hızı % 0.5 baryum titanat katkılı numuneye kadar artmakta ve sonrasında azalmaktadır. Baryum titanat katkılı harç numunelerin referans numuneye kıyasla sesi daha hızlı iletildiği, numunenin bir tarafından diğer tarafına gönderilen ses dalgasını daha kısa sürede iletildiği gözlenmiştir. Bunun başlıca nedeni, sesin daha kısa sürede geçmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, harç içerisinde baryum titanat kullanım oranına bağlı olarak boşluk oranının azaldığı

anlaşmaktadır. Ancak Şekil 4.5’te boşluk oranı değerleri de incelendiğinde % 1 baryum titanat katkıli BT4 numunesinin bu ifadeye uymadığı görülmektedir.

Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesinin değerlendirilmesi ve basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılmasında kullanılabilir (Neville, 1996). Ultrases geçiş hızının bilinmesi durumunda beton kalitesinin muhtemel sınırları Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

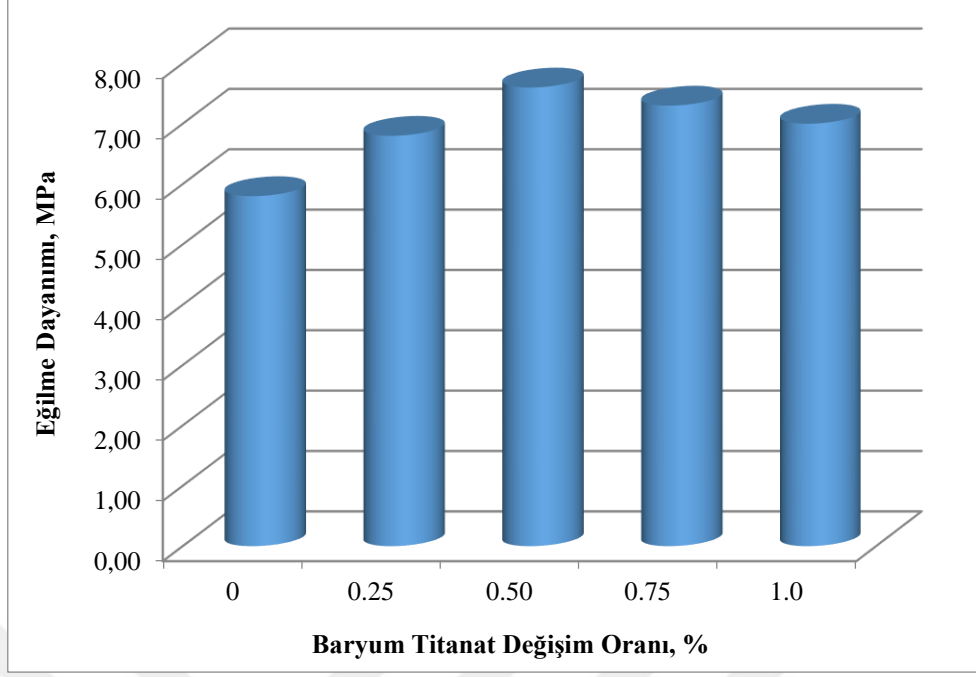
Çizelge 4.1. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki bağıntı (Neville, 1996)

Ultrases Geçiş Hızı, km/s	Beton Kalite Sınıflandırılması
>4.5	Mükemmel
3.5 - 4.5	İyi
3.0 - 3.5	Orta
2.0 - 3.0	Zayıf
<2.0	Çok kötü

Çizelge 4.1’de verilen bağıntıya göre ultrases geçiş hızı ile beton kalitesini değerlendirmek gerekirse numunelerin ‘iyi’ kalite sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki bağıntı ile basınç dayanım değerlerine bakacak olursak, Şekil 4.3’te verilen basınç dayanımı sonuçlarını desteklediği görülmektedir.

4.2 Eğilme Dayanımı Deneyi

Hazırlanan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numunelerin eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Şekil 4.2 incelendiğinde, 28 günlük katkısız numunenin eğilme dayanımı değerleri 5.8-7.6 MPa arasında belirlenmiştir. Baryum Titanat katkısı 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde sırasıyla % 17, % 31, % 26 ve % 21 artış tespit edilmiştir.

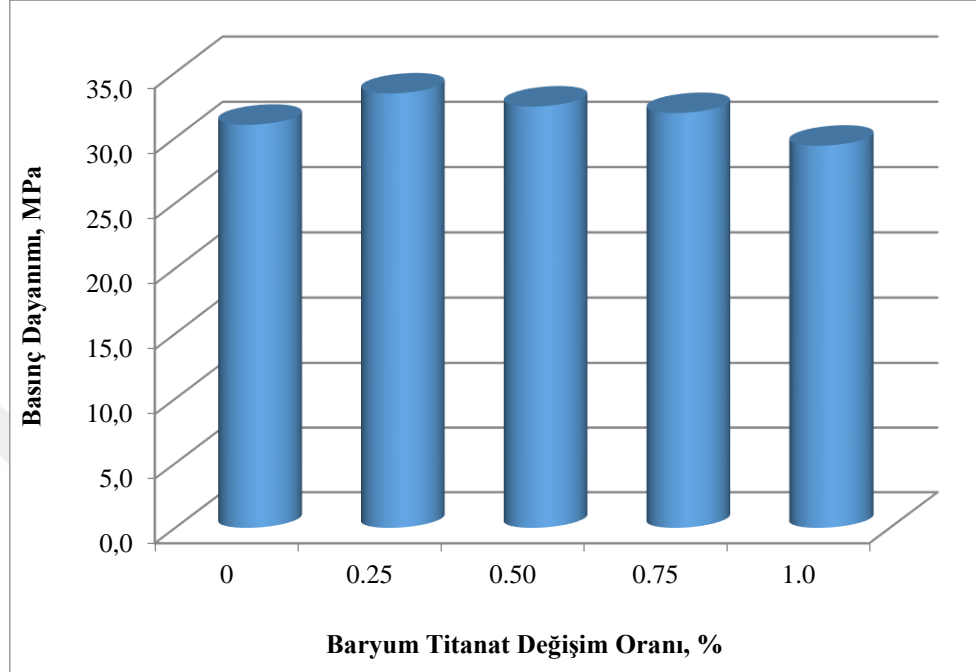
Eğilme deneyi sonuçlarına göre numuneler arasında referans numunesi en düşük eğilme dayanımına sahiptir. % 0.5 baryum titanat katkılı BT2 numunesinde en yüksek eğilme dayanımı değeri elde edilmiştir. Baryum titanat ilaveli harç numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldığında en düşük eğilme dayanım değeri ise BT1 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu çalışmada çimento harçlarına baryum titanat ilavesi eğilme dayanımı değerlerinde artış sağlamıştır. Bu nedenle baryum titanat eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Irmak (2022) yaptığı çalışmada harçlara çimento ağırlığınca yüzde olarak 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranlarında tungsten karbür ekleyerek numuneler üretmiştir. Yaptığı deney sonuçlarına göre % 1 tungsten karbür katkılı numunede referans numuneye göre %17.6 artış göstermesi sonucu en yüksek eğilme dayanımı değeri elde etmiştir.

Li vd. (2004) yaptıkları çalışmalarda, çimento ağırlığına göre %3, %5 ve %10 oranlarında nano SiO₂ ve nano Fe₂O₃ ilave ederek numuneler hazırlamışlardır. Deney sonuçlarına göre nanomalzeme ilaveli harçların eğilme dayanımı değerleri referans numunelere göre daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

4.3 Basınç Deneyi

Üretilen harç numunelerinin 28. günde yapılan basınç deneyi sonucunda belirlenen basınç dayanımları Şekil 4.3'te verilmiştir.

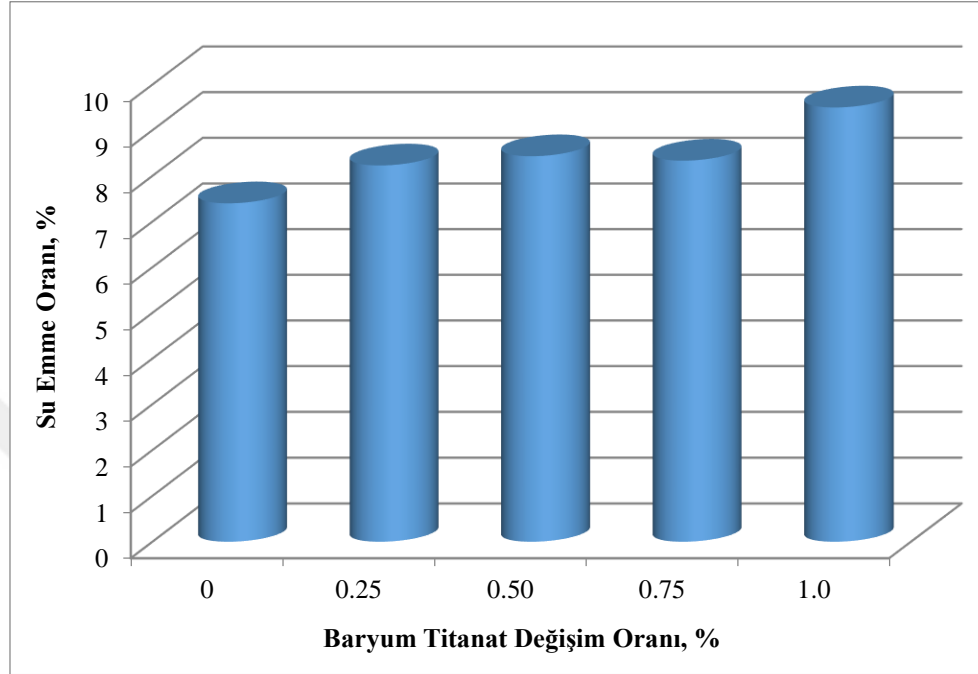


Şekil 4.3. Beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı

Deney sonuçlarına göre baryum titanat ilavesinin artmasıyla referans numuneye kıyasla % 1 baryum titanat katkıli BT4 numunesi dışında basınç dayanımını artmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı değeri % 0.25 baryum titanat katkıli BT1 numunesinde görülmüştür. En düşük basınç dayanımına sahip olan ve referans numunesinin altında kalan değere ise % 1 baryum titanat katkıli BT4 numunesi sahiptir. Üretilen harç numunelerinde en düşük dayanım değerine sahip olan BT4 numunesi referans numunesi ile kıyaslandığında % 5.16 oranında azalma gözlenmiştir. En yüksek dayanım değerine sahip olan BT1 numunesi referans numunesi ile kıyaslandığında % 7.74 oranında artış gözlenmiştir. Gavrish vd. (2021) yaptıkları çalışmada çimento ağırlığınca %1, %2, %3 ve %4 oranlarında Tungsten karbür (WC) ve Titanyum Karbür (TiC) içeren beton numuneleri üretmişlerdir. Deney sonuçlarına göre her iki türdeki karışımlarda katkı ilavelerin basınç dayanımını arttırdığını görmüşlerdir.

4.4 Su Emme Deneyi

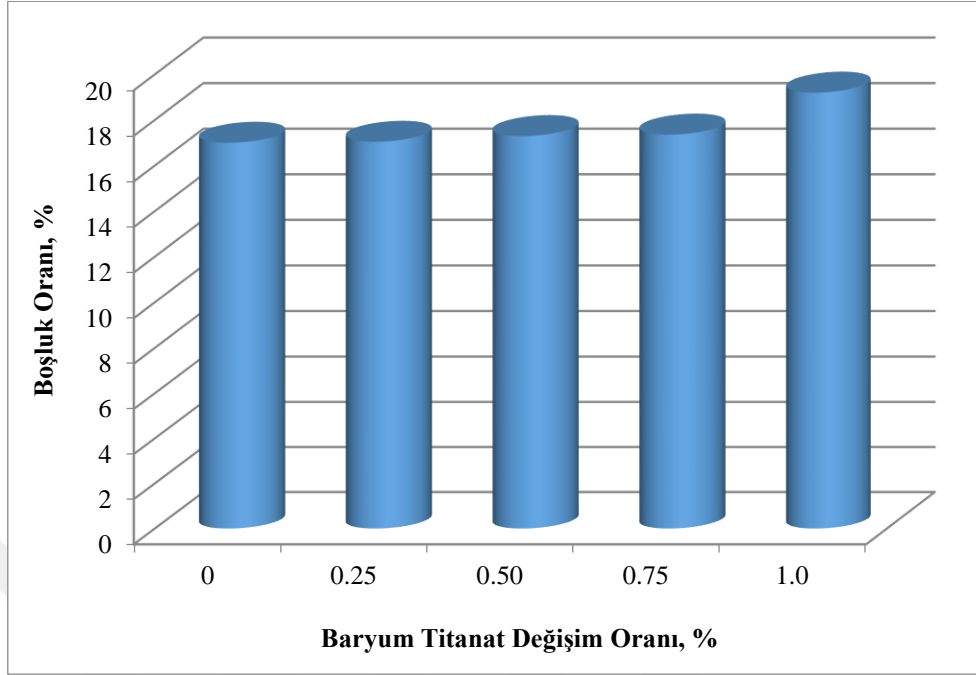
Sertleşmiş harç numunelerinde su emme oranı ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonuçları, Şekil 4.4’de, harç numunelerin boşluk oranı değerleri Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.4. Beton numunelerin su emme oranları (%)

Su emme deneyi sonuçları incelendiğinde harç numunelerine %0 ile %1 katkı oranları arasında baryum titanat ilave edilmesi ile birlikte su emme oranının %7.4 ile %9.5 arasında arttığı görülmektedir. Deney sonuçlarına göre en iyi su emme oranına referans numunesi sahipken, en yüksek su emme oranına % 1 baryum titanat katkı BT4 numunesi sahiptir. Baryum titanat katkı numunelerde kontrol numunesine en yakın sonucu veren BT1 numunesi yani %0.25 katkı oranlı numunelerdir. BT4 numunesi kontrol numunesine göre % 28.3 bir artma görülmüştür. Baryum titanat katkı oranının artışı numunedeki numunenin su emme kapasitesindeki artışa neden olmaktadır.

Irmak (2022), yaptığı çalışmada harçlara çimento ağırlığınca yüzde olarak 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranlarında tungsten karbür ekleyerek numuneler üretmiştir. Yaptığı deney sonuçlarına göre en iyi su emme oranına referans numunesi sahipken, en yüksek su emme oranına % 1 tungsten karbür katkı TK4 numunesi sahiptir. Tungsten karbür katkı numunelerde kontrol numunesine en yakın sonucu veren TK1 numunesi yani % 0.25 katkı oranlı numunelerdir. TK4 numunesi kontrol numunesine göre % 37.83 bir artma görmüştür.

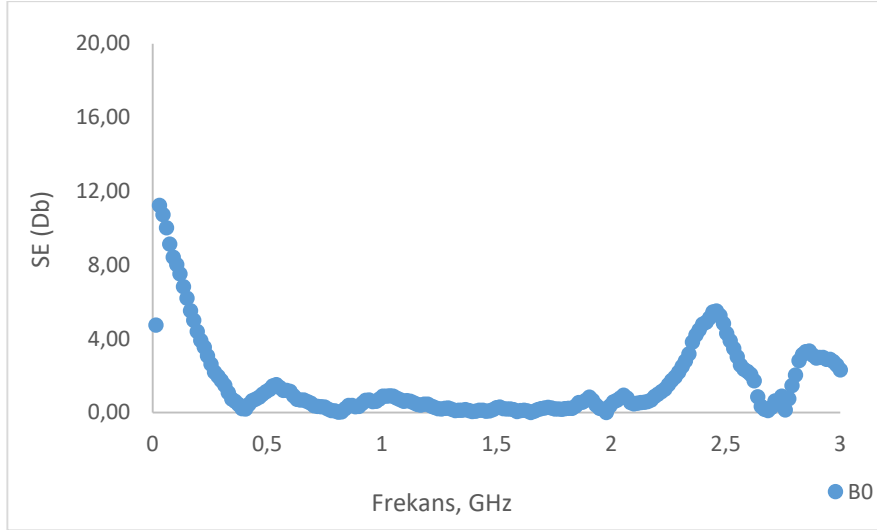


Şekil 4.5. Beton numunelerin boşluk oranları (%)

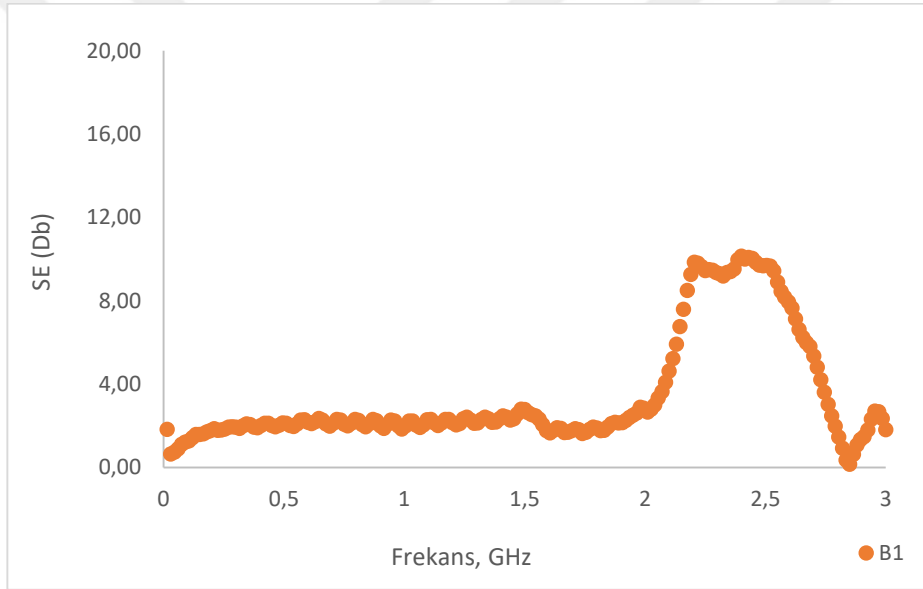
Boşluk oranı değerleri incelendiğinde harç numunelerine baryum titanat ilavesi ile birlikte boşluk oranının % 17-%19.2 arasında arttığı görülmektedir. En yüksek boşluk oranı değerini % 1 baryum titanat katkı BT4 numunesi vermiştir. Baryum titanat katkı numunelerde kontrol numunesine en yakın sonucu veren BT1 numunesi yani % 0.25 katkı oranlı numunelerdir. Baryum titanat katkı oranının artışı numunedeki boşluk oranını arttırmakta, buna bağlı olarak numunenin su emme kapasitesindeki artışa neden olmaktadır.

4.5 Elektromanyetik Kalkanlama Deneyi

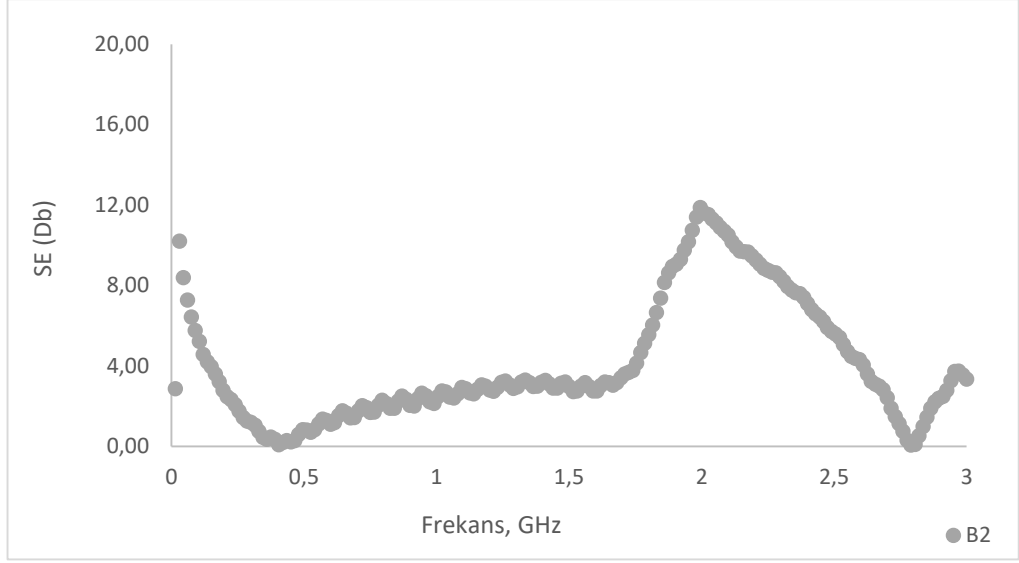
Elektromanyetik kalkanlama etkinliği ölçümünde farklı oranlarda baryum titanat ile üretilen numunelerin kalkanlamadaki etkisini belirlemek için ölçüm yapılmıştır. Bu çalışmada 0- 3 GHz arasındaki elektromanyetik dalganın üretilen 160x160x5 mm tungsten karbür katkı çimento harç numunelerinin kalkanlama özellikleri ölçüldü. Deney sonuçları Şekil 4.6-4.11'de verilmiştir.



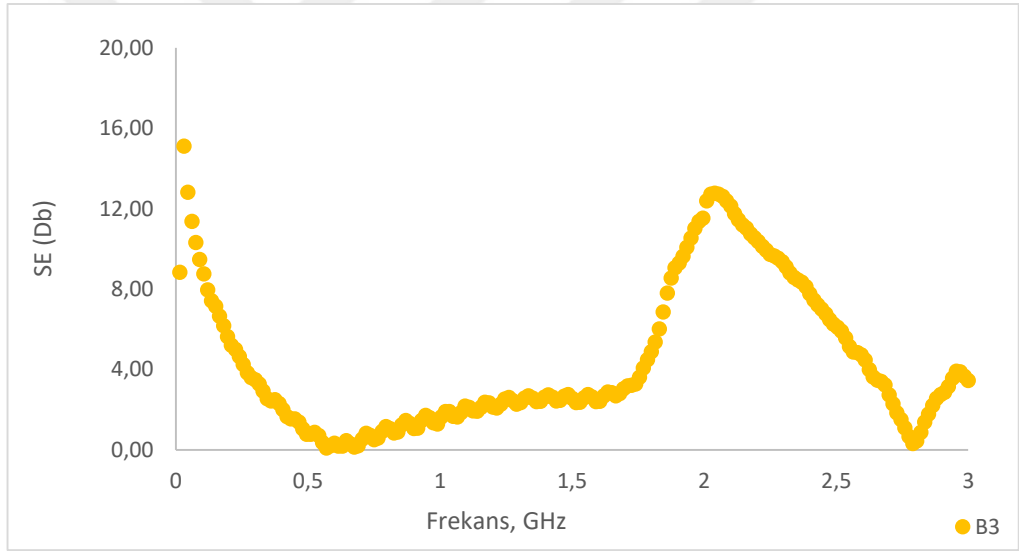
Şekil 4.6.BT0 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği



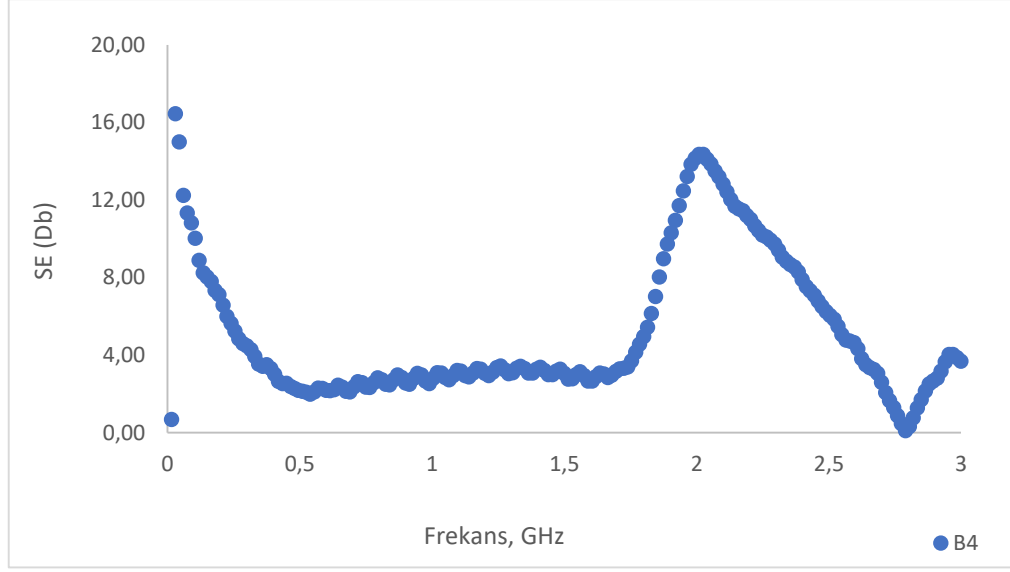
Şekil 4.7. BT1 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği



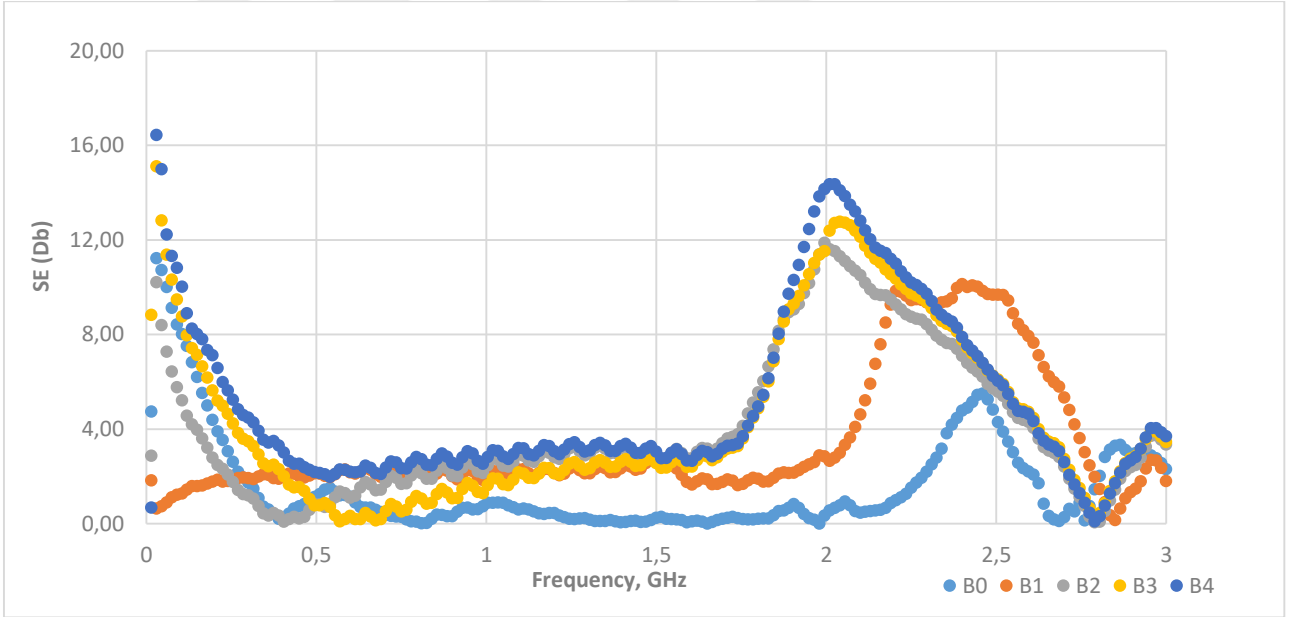
Şekil 4.8. BT2 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği



Şekil 4.9. BT3 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği



Şekil 4.10. BT4 Numunelerin elektromanyetik kalkanlama grafiği



Şekil 4.11 Elektromanyetik kalkanlama deneyi sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde, BT2 numunesi en düşük iletimi sergilemesine rağmen baryum titanat katkılı numuneler arasındaki farkın çok az olduğu görülmüştür. Elektromanyetik kalkanlama değerlerinin frekans aralığına göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. 0 – 3 GHz frekans aralığında baryum titanat katkılı numunelerin katkısız numunelere kıyasla daha iyi kalkanlama değerleri verdiği belirlenmiştir.

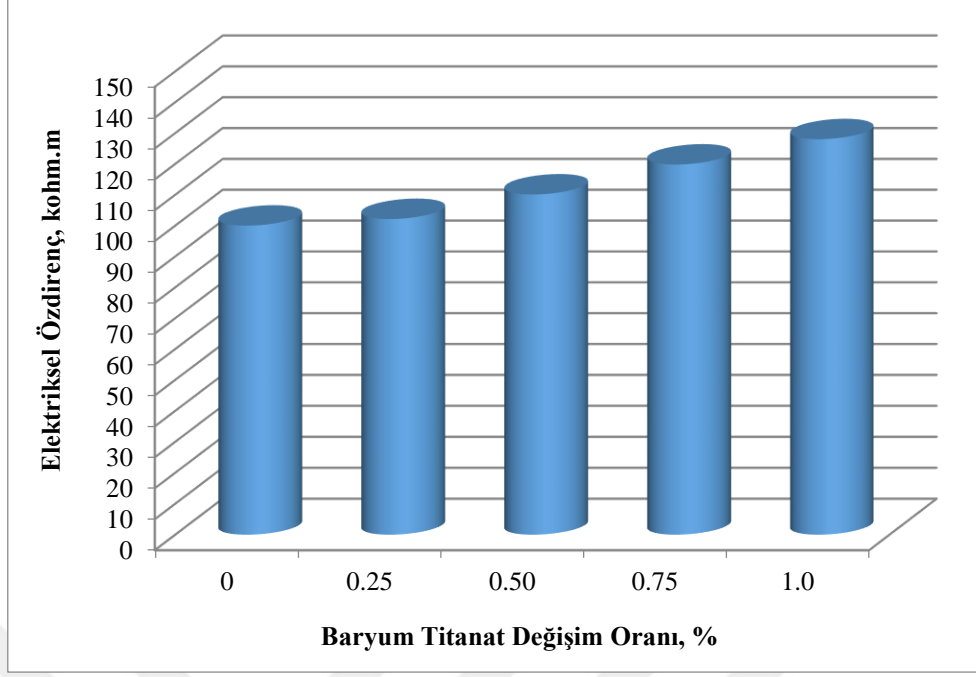
Baryum titanat katkılı numunelerin kalkanlama değerleri incelendiğinde, frekans değerinin artmasıyla birlikte kalkanlama değerlerinin 0.015 – 0.52 GHz frekans aralıklarında azaldığı, daha sonra 0.52 – 2.0 GHz frekans aralıklarında tekrar artma eğilimi göstermiştir. Baryum titanat katkılı numuneler kendi arasında kıyaslandığında ise BT4 numunesinin daha yüksek elektromanyetik kalkanlama etkinliğine sahip olduğu görülmüştür.

Analog telefonlar 0.8-0.9 GHz arasındaki frekanslarda çalışırken, dijital telefonlar 1.850-1.990 GHz arasındaki frekanslarda çalışmaktadır (Akyıldız ve Durmaz, 2022). Analog telefonların ve dijital telefonların çalıştığı frekans aralıklarında en iyi kalkanlamayı BT4 numunesi elde etmiştir. Ayrıca evlerde, işyerlerinde vs. birçok yerde internetten faydalanabilmek için 2.450 GHz frekansa sahip olan wireless (wifi) ağları kullanılmaktadır (Durmaz, 2022). Wireless ağlarının kullanıldığı frekans aralıklarında en iyi kalkanlamayı BT4 numunesi vermiştir

Yılmaz (2014) yaptığı çalışmada, elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip malzemelerin iyi elektrik iletkenliğine ve yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması gerektiğini söylemiştir. Bu çalışmada ise Şekil 4.12 incelendiğinde elektriksel direncin doğrusal olarak arttığı ve buna bağlı olarak da elektrik iletkenliğinin azaldığı, Şekil 4.11 incelendiğinde ise elektromanyetik kalkanlamanın katkı oranları arttıkça arttığı görülmektedir. Bu alandaki çalışmalar sınırlıdır.

4.6 Elektriksel Direnç Deneyi

Etüv kurusu duruma getirilmiş harç numuneler üzerinde ASTM C 1760 standardına uygun olarak direnç ölçer (ohm-metre) ile iki plaka yöntemine göre elektriksel direnç değeri (R) ölçülmüştür. Her seriden üç tekrarlı ölçüm yapılarak aritmetik ortalama değerleri alınmıştır. Direnç değerleri (R) ölçülen harçların elektriksel özdirenç değerleri de Bölüm 3.2.2.4' te verilen denklem (3.5) ile belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Elektriksel Direnç Deneyi Sonuçları

Şekil 4.12 incelendiğinde, 28 günlük katkısız numunelerin elektriksel özdirenç değerleri 100 kohm.m olurken artarak %1 baryum katkılı numunelerin elektriksel özdirenç değerleri 128.0184 olmuştur. Baryum titanat katkısı 28 günlük numunelerin elektriksel özdirenç değerlerini % 2.14 ile % 28.01 oranı arasında arttırmıştır. Harç numunelerinde baryum titanat eklenmesi ile birlikte özdirenç değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

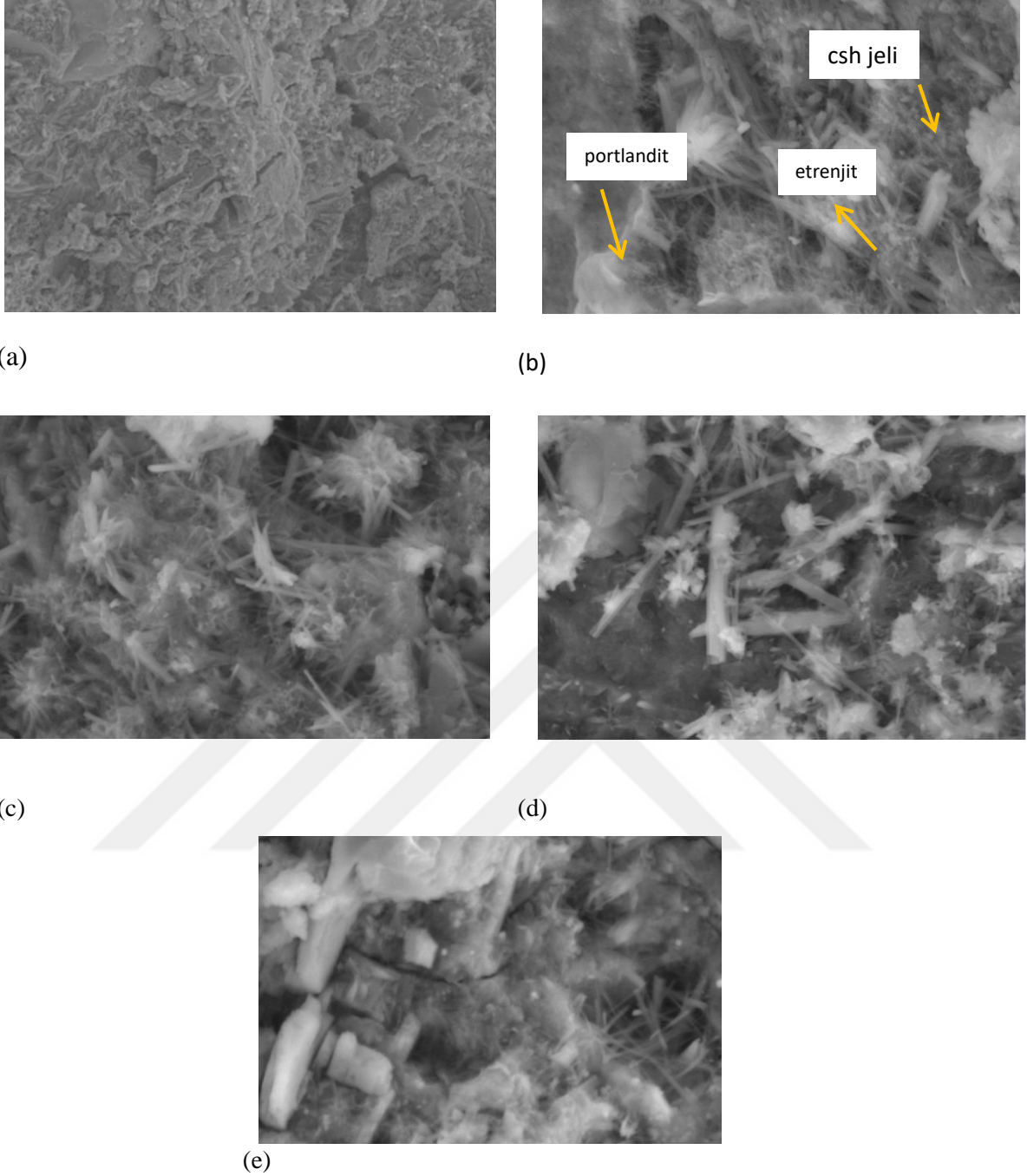
Çeven vd. (2021) yaptıkları çalışma kapsamında baryum titanat kullanılarak poliester film üretimi amaçlamış ve elektriksel özdirencini ölçtüklerinde yüksek özdirenç ve düşük iletkenlik sağladığını tespit etmişlerdir. Çalışmamızda bu çalışmaya uygunluk göstermektedir.

Elektriksel özdirenç ölçümleri farklı mühendislik dallarında ihtiyaç duyulan bilgilerin bir kısmının sağlanması için oldukça fayda sağlamaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde genel olarak baryum titanat kullanım oranlarının artması ile elektriksel özdirenç değerlerinde artış olduğu sonucuna varılmıştır.

4.7 İç Yapı Analizi (SEM)

Şekil 4.13' de katkısız ve baryum titanat katkılı numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.13. Numunelerin SEM görüntüsü (a) katkısız numune, (b) %0.25 baryum titanat katkılı numune, (c) % 0.50 baryum titanat katkılı numune (d) %0.75 baryum titanat katkılı numune, (e) %1 BaTiO₃ katkılı numune

Şekil 4.13'te, % 0.25 katkılı BT1 numunesinde portlandit, C-S-H jeli ve etrenjit yapısal şekilleri gösterilmiştir. Numunelere ait SEM görüntülerinde pürüzsüz, düz yüzey gibi görünen yapılar portlandit, iğne gibi kıl şeklinde görünen yapılar etrenjit geri kalan diğer yapılar ise C-S-H jelidir. Portlandit, tipik olarak mineral sınıfına dâhil edilen hidroksit içeren bir mineraldir. Suda az çözünen bir fazdır ve betonun içerisindeki kılcal boşluklardan yüzeye taşınır. Çimento ve betonda C-S-H jeli bağlayıcı son ürün olduğu için önemli bir bileşendir ve bunun sonucu

olarak dayanıma en büyük katkıyı sağlamaktadır. Etrenjit ise C_3A 'nın hidrate olması sonucu oluşan reaksiyon ürünüdür. SEM görüntüleri incelendiğinde pürüzsüz yüzey dokularının arttığı yani portlandit oluşumunun arttığı görülmektedir. Portlandit yoğunluğu en az BT0 referans numunesinde, en fazla BT4 numunesindedir. Etrenjit yoğunluğu ise en az BT0 referans numunesinde, en fazla BT2 numunesindedir.



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, baryum titanat (BT) nano malzemesinin çimentolu kompozitlerde kullanılabilirliği incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında üretilen numunelere ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, elektriksel direnç, elektromanyetik kalkanlama deneyleri ve sem analizi yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

1. Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarına göre ses geçiş hızı % 0.5 baryum titanat katkılı BT2 numunesine kadar artmakta ve sonrasında azalmaktadır. Baryum titanat katkılı harç numunelerin referans numuneye kıyasla sesi daha hızlı ilettiği, numunenin bir tarafından diğer tarafına gönderilen ses dalgasını daha kısa sürede iletiği gözlenmiştir.

2. Eğilme dayanımı sonucuna göre, BT2 numunesine kadar baryum titanat oranı arttıkça eğilme dayanımı değerleri artmış, sonrasında azalış göstermiştir. Baryum titanat katkılı numunelerin tümünün değerleri referans numunesinden yüksektir. Baryum titanat ilavesi ile dayanım değerlerinde BT2 numunesi maksimum değer göstererek %31 oranında artış elde edilmiştir. Çimento harçlarına baryum titanat ilavesi eğilme dayanımı değerlerinde artış sağlamıştır.

3. Basınç deneyi sonuçlarına göre baryum titanat ilavesi referans numuneye kıyasla % 1 baryum titanat katkılı numune dışında basınç dayanımını arttırmıştır. Üretilen tüm numuneler arasında en yüksek basınç dayanımına sahip % 0.25 baryum titanat katkılı BT1 numunesi, en düşük basınç dayanımına sahip numune ve referans numunesinin atında kalan değere ise % 1 baryum titanat katkılı BT4 numunesi sahiptir.

4. Su emme deneyi sonuçları incelendiğinde harç numunelerine baryum titanat ilavesi ile birlikte su emme oranının arttığı görülmektedir. Üretilen harç numunelerinde baryum titanat katkılı harç numuneleri arasında BT4 numunesi en büyük su emme oranına, BT1 numunesi ise en küçük su emme oranına sahiptir. Su emme deneyi sonuçlarına göre baryum titanat karbür katkısının yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

5. Elektromanyetik kalkanlama deneyi sonuçları incelendiğinde baryum titanat katkılı numunelerin katkısız numunelerle kıyasla daha yüksek elektromanyetik kalkanlama değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir. Baryum titanat katkılı numuneler kendi arasında kıyaslandığında ise BT4 numunesinin daha yüksek elektromanyetik kalkanlama etkinliğine sahip olduğu görülmüştür.

6. Elektriksel direnç deneyi sonuçları incelendiğinde harç numunelerinde baryum titanat eklenmesi ile birlikte özdirenç değerlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek değeri %1 katkılı BT4 numunesi vermiştir. En düşük sonucu referans numunesi vermiştir.

7. SEM analizi görüntülerinin incelenmesi sonucu numunelerin yüzey dokusunun pürüzlü olduğu görülmektedir. Portlandit yoğunluğu en az BT0 referans numunesinde, en fazla BT4 numunesindedir. Etrenjit yoğunluğu ise en az BT0 referans numunesinde, en fazla BT2 numunesindedir.

8. Bu çalışmada yapılan deneyler en iyi sonuçları; ultrases geçiş hızı ve eğilme dayanımı deneyinde BT2 numunesi, basınç dayanımı deneyinde BT1 numunesi, su emme dayanımı ve elektromanyetik kalkanlama deneyinde BT4 numunesi, elektriksel direnç deneyinde BT1 numunesi vermiştir.

9. Çimentolu harçlarda katkı maddesi olarak baryum titanat etkisini inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu sebeple çimento esaslı malzemelerde baryum titanatın harç özelliklerine etkisinin araştırılmasına ihtiyaç vardır. Bunun nedeni literatüre göre, baryum titanat nano katkısının çimento harçlarının özelliklerini iyileştirmesidir. Elde edilen sonuçların gelecekteki çalışmalarda çimentolu kompozitlerin geliştirilmesi konusunda zemin hazırlayarak fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akgün M. (2018). *Piezoelektrik Özellikli, Polimer Nano Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Titreşim Sensörü Olarak Kullanılabilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Aksüt H. (2020). *Piezoelektrik kompozitlerin elektromekanik özelliklerinin analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akyıldız A. ve Durmaz, O. (2022). Investigating Electromagnetic Shielding Properties of Building Materials Doped with Carbon Nanomaterials, *Buildings*, 12(3), 361. <https://doi.org/10.3390/buildings12030361>.
- Avşar A. L. ve Şahin M., (2012). Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Enerji Hasatı, Savunma Teknolojileri Kongresi, Ankara, Türkiye, Erişim adresi: <https://hdl.handle.net/11511/86408>
- Aydos O. (2009). *Akıllı Çubukların Tasarım ve Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Barstuğan R. (2019). *Piezoelektrik polibenzoksazol fiberlerin üretimi, karakterizasyonu ve elektrik devresinde uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Chaipanich A., Jaitanong N. and Tunkasiri T. (2007). Fabrication and properties of PZT-ordinary Portland cement composites. *Materials Letters*, 61(30), 5206-5208.
- Chen J., Qiu Q., Han Y. and Lau D. (2019). Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 14-25.
- Chomyen P., Potong R., Rianyo R., Ngamjarurojana A., Chindaprasirt, P. and Chaipanich, A. (2018). Microstructure, dielectric and piezoelectric properties of 0–3 lead free barium zirconate titanate ceramic-Portland fly ash cement composites. *Ceramics International*, 44(1), 76-82.
- Çelen, R. ve Ulcay, Y. (2018). Baryum Titanatın Tekstilde Elektromanyetik Kalkanlama Uygulamalarında Kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 29-44.
- Durgun E. (2020). *Piezoelektrik malzeme kullanarak deniz dalgası enerjisinden elektrik üretebilen sistemin tasarımı ve imalatı*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta
- Durmaz, Ö (2022). Elektromanyetik Kalkanlama Özellikli Nano Malzeme Katkılı Yapı Malzemelerinin Üretimi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ
- Durmuş A. C. (2021). *Bir Piezoelektrik Rüzgâr Enerjisi Hasatçısı Tasarımı ve Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Teknoloji Enstitüsü, Ankara.
- Doğan, S., Kayacan, O. ve Gören, A. (2018). Elektromanyetik Kalkanlama Özellikli Polimer Kompozit Yapıların Geliştirilmesi. *Tekstil Ve Mühendis*, 25(109), 44-52.

- Ersoy S. (2010). *Baryum titanat esaslı seramiklerin üretilmesi ve karakterizasyonları*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ertuğ B. (2008). Baryum titanat esaslı seramiklerin nemli ortamdaki elektriksel özelliklerine boşluk oluşturan bazı katkıların etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gavriş, V., Chayka, T., Baranov, G., Oleynik, A. Y. and Shagova, Y. O. (2021). Investigation of the influence of tungsten carbide nanopowder WC and the mixture of tungsten carbides and titanium carbides (WC, TiC) on the change of concrete performance properties. *In Journal of Physics: Conference Series* Vol. 1866, No. 1, p. 012008.
- Irmak M. E. (2022). Çimentolu kompozitlerde nano katkıların kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Jaitanong N., Yimnirun R., Zeng H. R., Li G. R., Yin Q. R., and Chaipanich A. (2014). Piezoelectric properties of cement based/PVDF/PZT composites. *Materials Letters*, 130, 146-149.
- Kalpak E. (2019). Piezoelektrik İle Yenilenebilir Enerji Üretimi. 24 Kasım 2019, Erişim adresi https://www.researchgate.net/publication/337486101_Piezoelektrik_ile_Yenilenebilir_Enerji_Uretimi_Emre_KALPAK
- Kaya A. (2018). *Oksit Yapılı Nanokompozit Seramiklerin Sentezi ve Dielektrik Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Koçak B. (2019). *Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Enerji Hasadı ve Batarya Şarjı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Kumar A., Chauhan V. S., Kumar R. and Prasad K. (2018). Detection of deformation induced electromagnetic radiation from cement-barium titanate composite under impact loading. *Ceramics International*, 44(10), 11711-11717.
- Kutlu, Y., Ünal, E. ve Gökçen, A. (2004). İzotropik Medya Üzerine Yerleştirilmiş Periyodik Kare Ve Dairesel Halka Yapıların 0.1-2.5 Ghz Frekans Aralığında Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliği. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 138-150.
- Li, H., Xiao, H. G., Yuan, J. and Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano particles. *Composites part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
- Li Z., Gong H. and Zhang, Y. (2009). Fabrication and piezoelectricity of 0-3 cement based composite with nano-PZT powder. *Current Applied Physics*, 9(3), 588-591.
- Liu W., Zhang L., Cao Y., Wang J., Bai P., Xi X. and Yang J. (2021). Fabrication and properties of 3-3 type PZT-ordinary Portland cement composites. *Construction and Building Materials*, 305, 124815.
- Onay M. (2011). *Sensör ve aktuatör uygulamaları için polimer/PZT kompozitlerin geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Öksüz K. E. (2018). *BaTiO₃ esaslı seramiklere çeşitli oksit ilavelerinin elektriksel özellikler üzerine etkisi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Önal A. T. (2016). *Fonksiyonel derecelendirilmiş eğri eksenli piezoelektrik kırılgarın mekanik ve elektriksel davranışları*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya
- Pan H. H., Wang C. K., Tia M. and Su Y. M. (2020). Influence of water-to-cement ratio on piezoelectric properties of cement-based composites containing PZT particles. *Construction and Building Materials*, 239, 117858.
- Potong R., Rianoyi R., Ngamjarurojana A. and Chaipanich A. (2013). Dielectric and piezoelectric properties of 1–3 non-lead barium zirconate titanate-Portland cement composites. *Ceramics International*, 39, 53-57.
- Potong R., Rianoyi R., Ngamjarurojana A., Yimnirun R., Guo R., Bhalla A. S. and Chaipanich A. (2017). Thermal expansion behaviors of 0–3 connectivity lead-free barium zirconate titanate-Portland cement composites. *Ceramics International*, 43, 129-135.
- Rianoyi R., Potong R., Jaitanong, N., Yimnirun R. and Chaipanich A. (2011). Dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of 0-3 barium titanate–Portland cement composites. *Applied Physics A*, 104(2), 661-666.
- Santos J. A., Sanches A. O., Akasaki J. L., Tashima M. M., Longo E. and Malmonge J. A. (2020). Influence of PZT insertion on Portland cement curing process and piezoelectric properties of 0–3 cement-based composites by impedance spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 238, 117675.
- Sevgi H.E. (2009). *Piezoelektrik Yamalı Katmanlı Kompozit Bir Kirişin Titreşim Analizi ve Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Türker Ö. (2009) *Pzt/Polimer Esaslı Aktif Titreşim Kontrolüne Uygun Akıllı Kiriş Tasarımı ve İmalatı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wang Z., Jin X. Y., Chen W. Q., Zhang C., Fu C. Q. and Gong H. Y. (2014). Micro-scaled size-dependence of the effective properties of 0–3 PZT–cement composites: Experiments and modeling. *Composites Science and Technology*, 105, 183-189.
- Wittinanon T., Rianoyi R. and Chaipanich A. (2020). Effect of polyvinylidene fluoride on the fracture microstructure characteristics and piezoelectric and mechanical properties of 0-3 barium zirconate titanate ceramic-cement composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(14), 4886-4893.
- Wittinanon T., Rianoyi R. and Chaipanich A. (2021). Electromechanical properties of barium titanate-polyvinylidene fluoride cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 299, 123908.
- Xing F., Dong B. and Li Z. (2008). Dielectric, Piezoelectric, and Elastic Properties of Cement-Based Piezoelectric Ceramic Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(9), 2886-2891.

Xing F., Dong B. and Li Z. (2009). The study of pore structure and its influence on material properties of cement-based piezoelectric ceramic composites. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1374-1377.

Yılmaz, R. (2014). Elektromanyetik kalkanlama özelliği olan malzemeler. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 4(1), 136-150.

