

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

ASILTI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
PIEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN
KARAKTERİZASYONU

Hakan YANIK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2003

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

ASILTI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
PİEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN
KARAKTERİZASYONU

Hakan YANIK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Sedat ALKOY

GEBZE
2003

ÖZET

Piezoelektrik seramik dönüştürücülerde seramik parçanın tasarımı, boyutları ve seçilen seramik bileşimi dönüştürücülerin çalışacağı frekans aralığı ve performansını belirleyen temel parametrelerdir. Plaka, disk, halka gibi basit şekilli PZT seramiklerini presleme ve şerit döküm yöntemleri ile üretmek mümkündür. Ancak bulk PZT seramikler düşük hidrostatik hassasiyete ve yüksek akustik empedansa sahiptirler. Bu durum, seramik-polimer kompozitleri yada içinde hava boşluğu bulunduran dönüştürücüler kullanılarak telafi edilebilmektedir. Piezoelektrik dönüştürücülerin özellikleri ve performansları dönüştürücülerin şekillerinden etkilenmektedir. Bu bağlamda ince duvar kalınlığına sahip seramik kabuklar, çeşitli kalınlıklardaki seramikler yada karmaşık şekiller kullanarak cihazın performansı artırılması mümkündür.

Bu çalışmada, asıltı döküm yöntemi ile içerisinde hava boşluğu içeren ince kabuklu değişik şekillerde piezoelektrik seramik dönüştürücülerin üretimi ve karakterizasyonları çalışılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, Lockheed Martin ve APC (American Piezo Ceramic, Ins) firmalarının ürettiği ticari PZT-5A tozları kullanılmıştır. Köpük giderici olarak Sulfynol 104E, plastikleştirici olarak Glycerol ve dağıtıcı olarak Darvan821A kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, viskozite ve pH ölçümleri ve sedimentasyon deneyleri ile hacimce %35 ve % 45 katı oranına sahip asıtlara ağırlıkça % 0.25 oranında, hacimce % 40 katı oranına sahip asıtlarda ise ağırlıkça % 0.5 oranında dağıtıcı (dispersant) Darvan821A ilavesi ile döküme uygun asıltı elde edilebileceği belirlenmiştir. Üretilecek şekiller için alçı kalıplar hazırlanmış, hacimce % 35 katı oranına sahip asıtlardan değişik şekillerde ince kabuklu, içi boş parçalar üretilmiştir. Parçalar kurumalarından sonra 1285 °C’de kurşun atmosferinde sinterlenmiştir. Sinterlenen parçaların taramalı elektron mikroskopunda mikro yapıları incelenmiş ve yoğun, gözeneksiz bir yapı elde edildiği belirlenmiştir. Üretilen parçalar elektrotlanmış ve parça kalınlıklarına göre uygun elektrik gerilim

altında kutupları yapılmıştır. Kutuplama öncesi ve sonrası kapasitans ölçümleri ile dielektrik özellikler belirlenmiştir. Kutuplama sonrası aktif hale gelen parçaların karakteristik titreşim rezonans ve antirezonans frekansları; frekans spektrumunda admitans ölçümleri ile belirlenmiştir.

SUMMARY

Dimension, shape and materials choice are the most basic characteristics of a piezoelectric ceramic transducer determining the device performance. PZT ceramics are usually fabricated in simple shapes, such as plates, disks and rings, using conventional die pressing and tape casting techniques. However, bulk PZT has a low hydrostatic sensitivity and high acoustic impedance. These can be alleviated by using piezoelectric ceramic-polymer composites, or introducing air backing into the transducer structure by using ceramic shapes with hollow spaces. Properties and performance of piezoelectric transducers are also affected from the shape of the transducer. In this regard, using ceramic shells with thin walls or ceramic with varying wall thickness or complex shapes may enhance the device performance. In this study, piezoelectric ceramics were fabricated in the form of thin shell hollow bodies and in various shapes by slip casting technique and fabricated parts were characterized for transducer applications.

Lead zirconate titanate ceramic powder, commercially known as PZT-5A, produced by Lockheed Martin and APC (American Piezo Ceramics, Inc) was used in this study. Sulfynol 104E was used as antifoaming agent, Glycerol was used as plasticizer and Davran 821A was used as dispersant.

The optimum dispersent content was determined through viscosity, pH measurements and sedimentation experiments. The best dispersion was obtained with 0.25 wt% Darvan821A addition for slips with 35 vol% and 45 vol% solid loading, and with 0.5 wt% Darvan821A addition for slips with 40 vol% solid loading. Gypsum molds and a slip containing 35% volume per cent solid were used to produce parts in the form of thin shells and with various shapes. After drying, parts were sintered at 1285 °C. Microstructural examinations of sintered parts with Scanning Electron Microscope (SEM) indicated a dense and pore-free microstructure. Produced parts were electroded and poled at 115 °C for 10 min under electric field of 2.5 kV/cm. Dielectric properties were determined before and after poling by measuring the capacitance and dielectric loss. Characteristic resonance and antiresonance frequencies of the parts, which become active after poling, were measured by admittance measurement in frequency spectrum.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında bilgilerini, tecrübelerini, desteklerini ve ilgilerini esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Sedat ALKOY Bey' ve çalışmanın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen Yrd.Doç. Dr. Cihangir DURAN Bey'e en içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma süresi boyunca manevi olarak desteklerini hep yanımda hissettiğim Ailem ve tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	IV
SUMMARY	VI
TEŞEKKÜR	VII
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1 Piezoelektriklik	3
1.1.1. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları	4
1.1.2. Piezoelektrik Malzemeler	4
1.1.3 Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri	11
1.1.3.1. Piezoelektrik Sabiti	11
1.1.3.2. Dielektrik Sabiti	12
1.1.3.3. Mekanik Bağlaşma Faktörü	12
1.1.3.4. Mekanik Kalite Faktörü	13
1.1.3.5. Curie Sıcaklığı	13
1.2. Asıltı Döküm	14
1.2.1. Elektriksel Çifte Katman Teorisi	16
1.2.2. Zeta Potansiyeli	17
1.2.3. Toplam Potansiyel Enerji Eğrisi	18
1.2.4. Koloidal Dengeleme Mekanizmaları	19
1.2.4.1. Elektrostatik Dengeleme	20
1.2.4.2. Polimerik (sterik) Dengeleme	21
1.2.5. Asıltı Döküm Mekanizması	22
1.2.6. Alçı Kalıplar	24
1.3. Sualtı Elektroakustik Dönüştürücüler	25
1.3.1. Düşük Frekans Enerji Dönüştürücüler	25
1.3.2. Boyuna Titreşim Dönüştürücüler	28
1.3.3. Şekillendirilmiş Seramik Dönüştürücüler	29

1.3.4. Piezoseramik-Polimer Kompozitleri	31
1.4. Çalışmanın Amacı	33
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
2.1. Deneysel Akım Şeması	37
2.2. Asıltının Hazırlanması	38
2.3. Tanecik Boyut Dağılımı Ölçümü	38
2.4. Viskozite Ölçümleri	39
2.5. pH Ölçümleri	39
2.6. Sedimentasyon Deneyleri	39
2.7. Kalıp Hazırlama	40
2.8. Asıltı Dökümün Uygulanması	40
2.9. Döküm Süresi Oluşan Kalınlık İlişkisi	41
2.10. Sinterleme	41
2.11. Çekilme Miktarı	42
2.12. Mikroyapı İncelemesi	42
2.13. Elektrotlama	42
2.14. Kapasitans Ölçümleri	43
2.15. Rezonans ve Antirezonans Frekanslarının Ölçülmesi	43
3. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ	44
3.1. Viskozite Ölçüm Sonuçları	44
3.2. Parçacık Boyut Dağılımı Analizi Sonuçları	45
3.3. pH Ölçümlerinin Sonuçları	46
3.4. Sedimentasyon Deneyleri Sonuçları	46
3.5. Kalınlık Oluşumu – Döküm Süresi Deneyi Sonuçları	48
3.6. Sinterleme Sonuçları	48
3.7. Çekilme Oranı Sonuçları	51
3.8. Taramalı Elektron Mikroskop Çalışması Sonuçları	51
3.9. Kapasitans Ölçüm Sonuçları	53
3.10. Rezonans ve Antirezonans Ölçüm sonuçları	54
3.11. Deneysel ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması	61
4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

PZT	Kurşun Zirkonyum Titanat
°C	Derece Santigrat
%	Yüzde
PbZrO ₃	Kurşun Zirkonyum Oksit
PbTiO ₃	Kurşun Titanyum Oksit
d _h	Piezoelektrik Yük Katsayısı
g _h	Piezoelektrik Voltaj Katsayısı
K	Dielektrik Sabiti
Z _a	Akustik Empedans
PVDF	Polyvinylide fluride
β	Beta
α	Alfa
D _j	Dielektrik Yer Değiştirme
d _{ij}	Piezoelektrik Katsayısı
T _j	Mekanik Gerilme
S	Gerinme
E	Elektrik Alan
k _p	Mekanik Bağlaşma Faktörü
Q _m	Mekanik Kalite Faktörü
ζ	Zeta Potansiyeli
mV	Milivolt
ien	İzoelektrik nokta
Pa.s	Paskal Saniye
Hz	Hertz
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
kV	Kilo Volt
S	Siemens
ε _o	Boşluğun Bağıl Geçirgenliği (8.85x 10 ⁻¹² F/m)
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
f _r ,f _a	Radyal Rezonans ve Antirezons Frekansı (Hz)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
1.1. Düz ve Ters Piezoelektrik Etkin	3
1.2. PZT’de Kutuplama Öncesi ve sonrası Atomik Düzen	6
1.3. Kutuplama ve Kutup Çiftlerinin Yönelimi	7
1.4. Kübik Perovskite Yapı	8
1.5. PbZrO_3 - PbTiO_3 Denge Diyagramı ve Morfotropik Faz Sınırı	9
1.6. Farklı PZT Kompozisyonlarında Piezoelektrik parametreler	10
1.7. Asıltı Döküm Yönteminin Şematik Gösterimi	15
1.8. Elektrostatik Çifte Katmanın Şematik Gösterimi	17
1.9. Zeta Potansiyeli – pH Diyagramı	18
1.10. Potansiyel Enerji – Partikül Ayırışma Grafiği	19
1.11. Elektrostatik Dengelemenin Şematik Gösterimi	21
1.12. Tanecik Üzerine Yapışmış Dağıtıcı Polimer Zincirinin Şematik Gösterimi	22
1.13. Asıltı Döküm Mekanizmasının Şematik Gösterimi	23
1.14. Dönüştürücülerin Akustik Frekans Aralıkları	25
1.15. Çift katmanlı Flexural Disk Dönüştürücü	26
1.16. İkili Çift Tabakalı dönüştürücü	26
1.17. Flexantional Bir Dönüştürücünün Şematik Gösterimi	27
1.18. Moonie ve Cymbal Tipi Dönüştürücülerin Şematik Gösterimi	27
1.19. Tonpilz Tipi Dönüştürücü	28
1.20. İnce Kabuklu Küresel Dönüştürücü	29
1.21. İçi Boş Silindir Dönüştürücü	29
1.22. Unimorph ve Bimorph Tip Dönüştürücüler	30
1.23. RAINBOW Tipi Dönüştürücü	30
1.24. Çeşitli polimer-Seramik Kompozitleri	31
2.1. Sinterleme Rejimi	42
3.1. Değişen Dağıtıcı Miktarına Bağlı Olarak Asıltıların Viskozitelerindeki Değişim	44
3.2. Asıltıların Gösterdikleri Pseudoplastic Davranış	45
3.3. Parçacık Boyut Dağılımı Grafiği	45
3.4. Asıltıların Sedimentasyonları	47

3.5.	Döküm Süresine Bağlı Olarak Oluşan Kalınlık	48
3.6.	APC-PZT-5A ile Üretilen Konik, Silindirik ve Yarım küresel Başlı Tüpler	49
3.7.	APC-5A ile Üretilen Yaş Halde, ve Sinterlenmiş, LM-PZT-5A ile Üretilmiş Küreler	49
3.8.	Üretilen Parçaların Şekilleri	50
3.9.	Numunenin Dış Yüzeyinin Mikroyapı görüntüsü	51
3.10	Numunenin İç Yüzeyinin Mikroyapı görüntüsü	52
3.11.	Numunenin Kırık Kesitinin Mikroyapı görüntüsü	52
3.12.	Numunenin Kırık Kesitinin Mikroyapı görüntüsü	53
3.13.	Konik Tüp 10 kHz-200 kHz Admitans Grafiği	54
3.14	Konik Tüp 200 kHz-5000 kHz Admitans Grafiği	54
3.15.	Tüp1 10 kHz-200 kHz Admitans Grafiği	55
3.16.	Tüp1 200 kHz-5000 kHz Admitans Grafiği	55
3.17.	Tüp2 10 kHz-200 kHz Admitans Grafiği	56
3.18.	Tüp2 200 kHz-5000 kHz Admitans Grafiği	56
3.19.	Tüp3 10 kHz-200 kHz Admitans Grafiği	57
3.20.	Tüp3 200 kHz-5000 kHz Admitans Grafiği	57
3.21.	Tüp4 10 kHz-200 kHz Admitans Grafiği	58
3.22.	Tüp4 200 kHz-5000 kHz Admitans Grafiği	58
3.23.	Silindir1 10 kHz–200 kHz Amitans grafiği	59
3.24.	Silindir1 200 kHz-5000 kHz Admitans Grafiği	59
3.25.	Silindir2 10 kHz-200 kHz Admitans Grafiği	60
3.26.	Silindir2 200 kHz-5000 kHz Aditans Grafiği	60
3.27.	Silindir 1’e Ait deneysel ve Modelleme Sonuçların Karşılaştırılması	61
3.28.	SEA ile Belirlenmiş Silindir1’e Ait Şekil Değişimi	61
3.29.	Tüp1’e Ait deneysel ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması	62
3.30.	SEA ile Belirlenmiş Tüp1’e Ait Şekil Değişimi	62

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
1.1. PZT Sistemlerinde Kullanılan Katkılar	11
3.1. Üretilen Parçaların Malzemesi ve Boyutları	50
3.2. Üretilen Parçaların Kapasitans Ölçüm Sonuçları	53

1.GİRİŞ

Akıllı malzemeler ve sistemler içinde bulundukları ortamda meydana gelen değişimleri, malzemenin fiziksel özelliklerine veya çevre ile etkileşiminde oluşan değişimlerden yola çıkarak algılayan ve buna uygun, kullanışlı bir tepki vererek çevrede değişim yaratabilen malzemeler ve cihazlardır[Newnham et al, 1991]. Piezoelektrik dönüştürücüler; basınç gibi mekanik etkileri elektriksel sinyallere dönüştürebilen ve elektriksel girdiyi şekil değişimi, titreşim gibi mekanik veya akustik bir çıktıya dönüştürebilen cihazlardır. Su altı sonar, tıbbi ultrason ve tahribatsız muayene gibi dönüştürücü cihaz uygulamalarında genellikle tercih edilen malzemeler piezoelektrik seramiklerdir. PZT kısaltması ile bilinen % 52-54 kurşun zirkonat (PbZrO_3) ve %48-46 kurşun titanat (PbTiO_3) katı erişimin türevleri de piezoelektrik seramikler arasında en yaygın kullanıma sahip olan bileşiklerdir.[Tressler.J.F. et al, 1998].

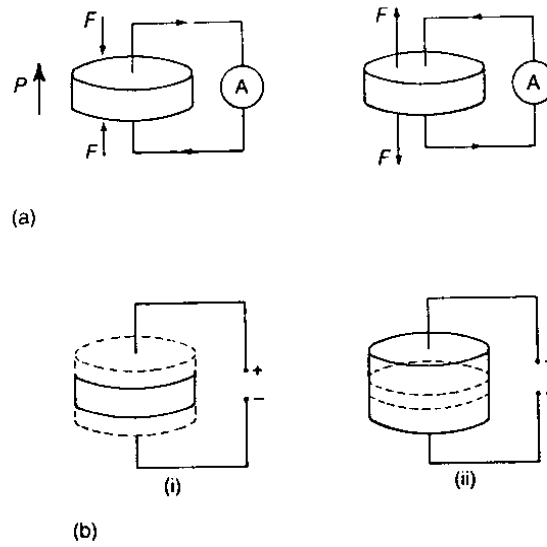
Bu uygulamalarda seramiğin hidrostatik basınç ortamında, sualtı akustik algılayıcıları olarak, seramikler düşük duyarlılık ve yüksek akustik direnç sahiptirler. Bunun nedenleri şöyle açıklanabilir; bir piezoelektrik seramiğin hidrostatik basınç altındaki piezoelektrik yük katsayısı ($d_h=2d_{31}+d_{33}$), PZT türevlerinde $2d_{31}$ ve d_{33} 'ün yaklaşık olarak birbirine eşit fakat zıt işaretli olması nedeniyle oldukça düşüktür. Ayrıca ($g_h = d_h/K\epsilon_0$) bağıntısı ile ifade edilen piezoelektrik voltaj katsayısı (g_h)'ta PZT türevi seramiklerin yüksek dielektrik sabitine ($K>1000$) sahip olması nedeniyle oldukça düşüktür. Bunun sonucunda dönüştürücünün yüzeyine etkiyen bir basınç dalgasının yaratacağı voltaj ve dolayısıyla akustik duyarlılık düşük olacaktır. Öte yandan, genelde seramiklerin ve özel olarak da kurşun içeren seramik bileşimlerinin yüksek yoğunluğa sahip olması bu malzemelerin su altı uygulamalarında, dönüştürücü (akustik empedans, $Z_a \approx 20\text{-}30 \text{ MRayl}$) ve su ($Z_a \approx 1.5 \text{ MRayl}$) arasında akustik uyumsuzluğa ve bunun sonucunda dönüştürücü ve su arasındaki enerji transferinde ciddi kayıplara yol açmaktadır [Smith, 1992]. Bu uygulamalarda seramik elektro akustik performansı, seramik üzerine düşen hidrostatik basınç en aza indirgenip basıncın sadece belirli yönlerden etkimesi ile artırılabilir. Bu da ancak seramiğin bir kısmını, hidrostatik basıncı belli

yönlerde emen bir polimer ile kaplayarak veya cihazın tasarımında hava boşluklarına yer vererek sağlanabilir[Tressler J.F. et al 1998].

Bu tez çalışması, genel bir seramik bazlı malzeme şekillendirme yöntemi olan asıltı döküm yöntemi kullanılarak içinde hava boşlukları içeren değişik şekillerdeki piezoelektrik dönüştürücülerin üretim koşullarının incelenmesi ve üretilen dönüştürücülerin karakterizasyonunu içermektedir.

1.1. Piezoelektriklik

Piezoelektriklik, simetri merkezi olmayan kristallerde uygulanan mekanik gerilme altında malzeme içerisinde kutuplaşma oluşmasıdır. Ters olarak da uygulanan elektrik alan altında malzemede şekil değişimi oluşmasıdır [Gallego J.A. ,1989]. Bütün kristalin malzemeler 32 kristal sınıfı içinde yer alırlar. Bunlardan 11 tanesinin simetri merkezi vardır ve nonpolardır. Bu kristallerde uygulanan mekanik gerilme sonucunda dipol momentinde net bir değişim olmaması sebebiyle iyonlar simetrik bir şekilde yerlerini (konumlarını) değiştirirler, bu sebeple piezoelektrik özellik göstermezler. Diğer 21 kristalin sınıfı simetri merkezi olmayan kristallerdir ve bunlardan 20 tanesi piezoelektrik etkiyi gösterir. Uygulanan mekanik gerilme altında malzeme içerisinde elektrik kutuplaşma oluşumu düz etki, uygulanan elektrik alan altında malzemedeki şekil değişimi ise ters etki olarak tanımlanır [Moulson A.J. and Herbert , 1990].



Şekil 1.1 (a) Düz etki (b) Ters etki

1.1.1. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları

Piezoelektriklik özellik Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından 1890 yılında keşfedilmesine rağmen, uzun bir süre bu etkinin pratik bir uygulaması yapılamamıştır. İlk önemli uygulama P. Langevin tarafından gerçekleştirilmiştir. P. Langevin quartz kristali kullanarak akustik ses dalgası oluşturan bir enerji dönüştürücü (transducer) geliştirmiştir. Geliştirilen bu enerji dönüştürücü Birinci Dünya Savaşında su altı dinleme cihazları olarak alman denizaltı gemilerinin saptanmasında kullanılmıştır [Mason WP, 1981]. Kolayca üretilen piezoelektriklerin performans karakteristikleri keşfedildikçe piezoelektrik cihaz araştırmaları hız kazanmıştır. Günümüzde bu tür malzemeler çok geniş kullanım alanlarına sahiptir.

Piezoelektrik malzemelerin bazı kullanım alanları şunlardır;

- Su altı sonar (Su altı görüntüleme, dinleme ve haberleşme)
- Tıbbi ultrason (Teşhis ve tedavi)
- Tahribatsız muayene (Hata ve süreksizlik saptama)
- Malzemede özellik saptama (Yoğunluk, viskozite, elastisite modülü)
- Sensörler (Gaz, basınç, nem)
- Gaz ateşleyiciler (Otomatik ateşleme sistemleri)
- Mekatronik (Eyleyiciler ve ultrasonik motor uygulamaları)
- Ultrasonik yıkama banyoları
- Transformatörler (Voltaj yükseltme uygulamaları)
- Akustik (mikrofon ve hoparlör uygulamaları)

1.1.2. Piezoelektrik Malzemeler

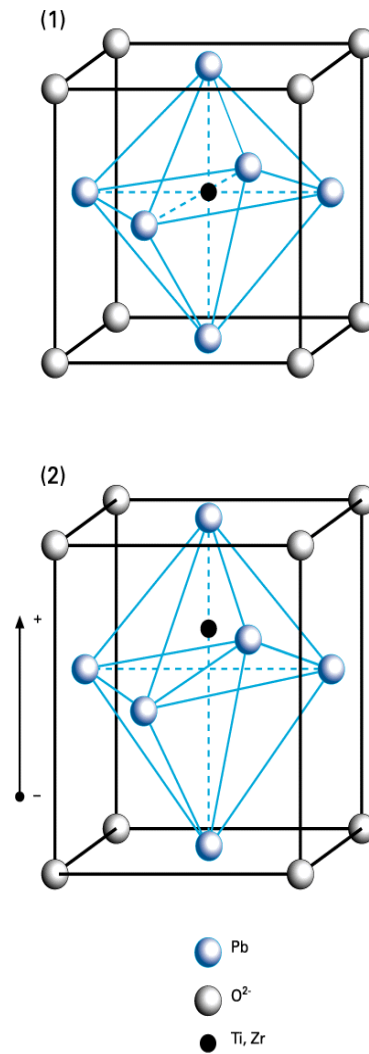
Piezoelektrik etki bazı doğal kristallerde (quartz, rochell tuzu), polimerlerde ve seramiklerde görülen bir etkidir [Tressler J.F, et al 1998]. En geniş kullanım alanına sahip piezoelektrik malzemeler seramik malzemelerdir. Ancak seramik malzemeler kırılgan, esnekliği olmayan ve büyük boyutlarda üretimi zor olan

malzemedir. Polimerler ise akıllı malzeme olarak nispeten yeni malzemelerdir [Jassim S, et al 2001].

Yarı kristalin polimerler polar kristalin faza sahiptirler. Bu polimerlerde morfoloji amorf faz içerisinde dağılmış kristalitler şeklindedir [Harrison J.S and Ounaies 2001]. En çok kullanılan piezoelektrik polimer polyvinylide floride (PVDF) ve PVDF-copolimerleridir [Jassim S, et al 2001]. PVDF polimeri; molekül ağırlığı yüksek ($\text{CH}_2\text{-CF}_2$) monomerlerinin tekrarı şeklinde oluşmuş yarı kristalin bir malzemedir. Polimerin zincir açılımı $\text{CH}_2\text{-CF}_2\text{-(CH}_2\text{-CF}_2\text{)}_n\text{-CH}_2\text{-CF}_2$ şeklindedir. Yarı kristallerin yapısı; polar olmayan α fazı ve yüksek derecede polar β fazından oluşur [Harrison J.S and Ounaies 2001]. Bu β fazı amorf α fazı içerisinde hacimce %50 oranında dağılmış şekilde bulunur [Jassim S, et al 2001]. β fazındaki hidrojen ve flor atomları birim hacimde maksimum dipol momenti verecek şekilde dizilmişlerdir. Ancak dizilim yönleri rasgeledir ve net polarizasyon sıfırdır. Malzeme üzerine gerilme ile birlikte uygulanan elektrik alan vasıtasıyla kristallerin yönelimi düzenlenir, böylelikle PVDF polimerinde net bir polarizasyon elde edilir [Twiney R.C, 1992]. PVDF polimerlerinin histerisiz döngüsü kristalin piezoelektrik malzemelerinkine çok benzerdir [Jassim S, 2001]. Co-polimerler triflureethylen’li (TrFe) polyvinylidene ve tetrafloureethylen’li (TFe) polyvinylidene’dir. P(VDF-TrFe) co-polimerleri PVDF’e göre daha fazla kristalin faz içerir. (%90’ın üzerinde) Bu sayede daha yüksek piezoelektrik etki gösterir [Harrison J.S and Ounaies 2001]. Diğer yarı kristalin polimerler ise polyamides, sıvı kristal polimerler, polyureas ve biopolimerlerdir [Jassim S, et al 2001].

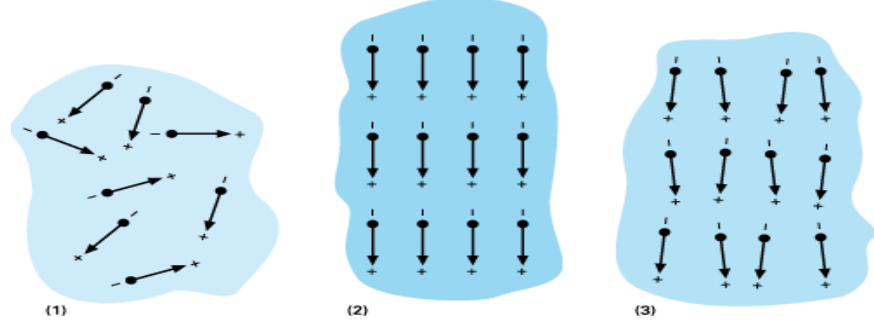
Piezoelektrik seramikler; elastik elektrik ve piezoelektrik sabitlerindeki çeşitlilik sebebi ile ultrasonik enerji dönüştürücü için en uygun özellikte malzemelerdir. Bu seramikler birkaç oksidin katı hal reaksiyonundan sonra yüksek sıcaklıkta sinterlenmesiyle oluşur. Piezoelektrik seramikler rasgele yönelmiş ferroelektrik kristalit kümelerinden oluşmuş malzemelerdir. Aynı yönelime sahip dipollerin oluşturduğu kristalit kümelerinden her birine domain adı verilir. Sinterlemeden sonra piezoelektrik seramikler domainlerin rasgele yönelimlerinden dolayı izotropiktir, bu nedenle piezoelektrik etki göstermezler.

Piezoelektrik seramik malzemeler kutuplama (poling) denilen işleme tabi tutularak piezoelektrik etkiyi gösterirler. Kutuplama işleminde malzeme üzerine seçilen bir yönde elektrik alan uygulanır, kutup çiftlerinin yönleri uygulanan elektrik alan doğrultusunda yönlenir.ve kristal yapı içerisinde atomik kaymalar olur.(Şekil 1.2.) Elektrik alan kaldırıldığında gergin durumdaki kutup çiftlerinin bir kısmı eski konumlarına dönerler ancak kutup çiftlerinin çoğu düzenli yönlenmeyi korurlar (Şekil 1.3.) Böylelikle seramik malzeme piezoelektrik etkiyi gösterebilir[Gallego J.A. ,1989].



Şekil 1.2. (1) PZT’de kutuplama öncesi atomik düzen

(2) PZT’de kutuplama sonrası atomik düzen



(1) Kutuplama öncesi (2) Kutuplama esnası (3) Kutuplama sonrası

Şekil 1.3. Kutuplama ve kutup çiftlerinin yönelimi

Piezoelektrik seramiklerde piezoelektrik özellikler aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$D_i = d_{ij} * T_j \quad (\text{Düz etki}) \quad [\text{Moulson A.J and Herbert ,1990}]$$

$$S_i = d_{ij} * E_j \quad (\text{Ters etki})$$

$D_j \rightarrow$ Dielektrik yerdeğiştirme

$d_{ij} \rightarrow$ Piezoelektrik katsayı

$T_j \rightarrow$ Mekanik gerilme

$S \rightarrow$ Gerinme

$E \rightarrow$ Elektrik alan

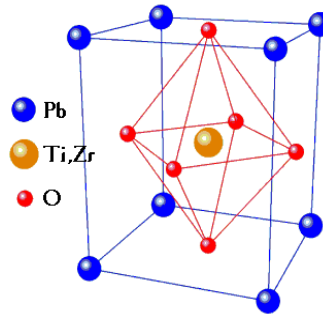
$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Kutuplanmış ∞m simetrisine sahip seramiklerde d_{13} , d_{33} , d_{15} piezoelektrik tensör katsayılarıdır. Uygulanan mekanik gerilimin yönü polarizasyon yönüne ile paralel ise bu d_{33} katsayısıdır. Uygulanan mekanik gerilimin yönü polarizasyon yönüne dik ise buna da d_{31} katsayısı denir. Uygulana mekanik gerilim malzeme

üzerinde kayma gerilmesi oluşturuyorsa yan yüzeylerde elektrik şarj oluşturur. Bu katsayıda d_{15} katsayısıdır [Tressler J.F, et al 1998].

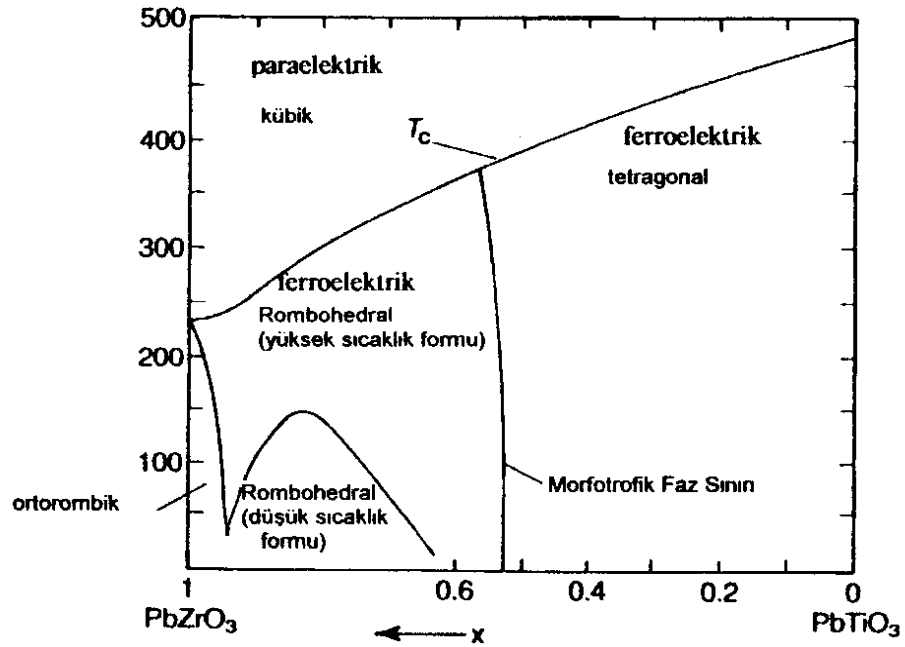
Piezoelektrik seramik malzemeleri çok değişik bileşimlerden çeşitli boyutlarda ve şekillerde üretmek mümkündür [Gallego J.A. ,1989]. Kurşun titanat (PbTiO_3), kalsiyum ve stronsiyum katkılı üretildiklerinde genelde hidrofon olarak kullanılır. Diğer bir ferroelektrik malzeme kompozisyonu baryum titanat (BaTiO_3) ve niobattır. (BaNb_2O_6). Baryum titanat ilk bilinen piezoelektrik seramiktir. Curie sıcaklığı çok düşüktür, ultrasonik enerji dönüştürücü olarak kullanılır. Başka bir piezoelektrik seramik türü sodyum- potasyum niobattır (NaKNb_2O_6). Yüksek bağlaşma faktörü ve düşük komplians sebebiyle yüksek frekans enerji dönüştürücülerde kullanılır. Diğer bir piezoseramik kuşun metaniobate (PbNb_2O_6)'dır. Curie sıcaklığı yüksektir. Tahribatsız muayene cihazlarında ve tıbbi teşhis cihazlarında kullanılır [Tressler J.F, et al 1998].

Günümüzde üzerinde çalışılan en yaygın kullanıma sahip piezoelektrik seramik malzeme kurşun zirkonat titanat (PZT) bileşiğidir. Normal kompozisyonu %52-54 mol kurşun zirkonat (PbZrO_3) ve %48-46 mol kurşun titanat (PbTiO_3) bileşiminden oluşur. PZT'ler currie sıcaklığının üzerinde kübik perovskite yapıdadır (Şekil1.4.). Kurşun atomları birim hücrenin köşelerinde oksijen ise birim hücrenin yüzeylerinde bulunur. Kurşun ve oksijen yüzey merkezli kübik yapı oluşturacak şekilde sıralanır. Titanyum ve zirkonyum atomları oksijen atomlarının oluşturduğu boşlukların, birim hücrenin merkezinde yerleşir.

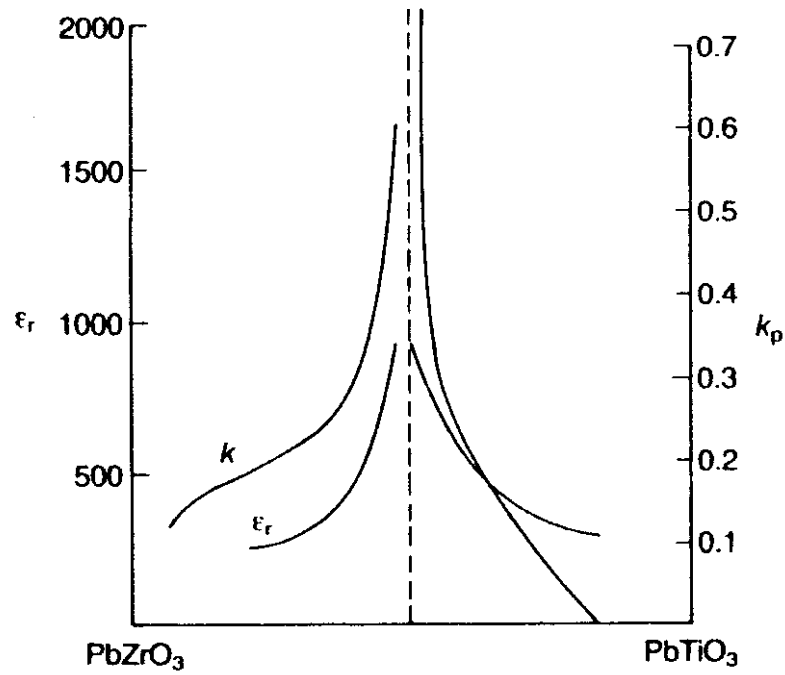


Şekil 1.4. Kübik perovskite yapı

Yüksek sıcaklıktan soğutma yapıldığında PZT'nin atomik yapısında atomik yer değiştirmeler olur. Titanyumca zengin kompozisyonlarda curie sıcaklığında nokta simetri kübik $m\bar{3}m$ 'den tetragonal $4mm$ 'e değişir. Curie sıcaklığındaki PZT perovskite yapısındaki elektrik olmayan (paraelektrik) durumdan curie sıcaklığının altındaki ferroelektrik faza dönüşür. Titanyumca zengin PZT sistemlerinde [001] doğrultusunda uzama ile tetragonal yapıda değişme olur ve aynı yönde büyük bir kutuplaşma oluşur. Zirkonyumca zengin kompozisyonlarda rombohedral ferroelektrik faza dönüşür. Kutuplaşma ve kayma [111] doğrultusundadır. Tetragonal yapıda 6, rombohedral yapıda ise 8 yönde kutuplama yapmak mümkündür. En iyi kutuplama rombohedral ve tetragonal ferroelektrik faz yapılarının arasında kalan morphotropic faz sınırına çok yakın noktalarda olur. (Şekil 1.5.) Bu noktada toplam 14 yönde kutuplama yapmak mümkündür. Dielektrik sabiti ve elektromekanik bağlaşma bu faz sınırında en yüksek değerine ulaşır (Şekil 1.6.) Bu sebeplerle oluşturulan kompozisyonların bu faz sınırına en yakın noktada olması istenir [Tressler J.F, et al 1998].



Şekil 1.5. PbZrO₃ - PbTiO₃ Denge diyagramı ve morfotropik faz Sınırı [1]



Şekil 1.6. Farklı PZT kompozisyonlarında piezoelektrik parametreler [1]

Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) bileşikleri genellikle "katkılı" kompozisyonlar halinde kullanılır. Bu uygulama PZT seramik malzemelerin elektrik özelliklerini iyi yönde geliştirmek içindir[Heartling G.H, et al 1986].

PZT'lere acceptör ilavesi yapıldığında kristal yapı içerisinde oksijen boşlukları oluşur. Katkı iyonu negatif, oksijen boşluğu da pozitif iyon gibi davranıp bir hata çifti oluştururlar. Kristal yapı içerisinde oksijen ile oksijen boşluğunun yer değiştirebilmesi bu hata çiftinin hareket edebilmesine neden olur [Uchino K. 2001]. Bu hata çiftleri hareket ederek domain duvarlarına taşınırlar ve kutuplama esnasında domain duvarlarının hareketini zorlaştırırlar. Bu tür PZT'lere "sert PZT" adı verilir [Cross L.E, 1995]. Bu tür PZT'lerin piezoelektrik katsayıları düşüktür, zor kutuplama yapırlar ancak zor depoling olurlar.

PZT'lere donör ilavesi yapıldığında kristal yapı içerisinde metal boşlukları oluşur. Bu metal boşlukları ve katkı atomları da hata çiftleri oluştururlar. Ancak

kurşun atomunun çevresi oksijen atomları ile sarılmış olduğundan hata çifti hareketli değildir ve kutuplama esnasında domain duvarlarının hareketini zorlaştırmaz. Bu tür PZT'lere "yumuşak PZT" adı verilir. Bu tür PZT'lerin piezoelektrik katsayıları yüksektir, kolay kutuplama yapılır ancak kolay depoling olurlar[Uchino K]. PZT sistemlerinde kullanılan katkıları Tablo 1.1'de verilmiştir

Tablo 1.1. PZT Sistemlerinde kullanılan katkıları

Pb yerine donör	La ⁺³ , Bi ⁺³ , Nd ⁺³ , Sb ⁺³ , Th ⁺⁴
Ti-Zr yerine donör	Nb ⁺⁵ , Ta ⁺⁵ , Sb ⁺⁵ , W ⁺⁶
Pb yerine acceptor	K ⁺¹ , Na ⁺¹ , Rb ⁺¹
Ti-Zr yerine acceptor	Fe ⁺³ , Al ⁺³ , Sc ⁺³ , In ⁺³ , Cr ⁺³ , Co ⁺³ , Ga ⁺³ , Mn ⁺³ , Mn ² , Mg ⁺² , Cu ⁺²

PZT'ler farklı katkılarıyla değişik ticari isimler alırlar. Örnek olarak; Fe katkılı olanlar PZT-4, Nb katkılı olanlar PZT-5, Cr katkılı olanlar PZT-6, La katkılı olanlar PZT-7 ticari isimleri ile bilinirler [Tressler J.F, et al 1998].

1.1.3. Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri

1.1.3.1. Piezoelektrik Sabiti (d)

Piezoelektrik sabiti (d), oluşan yük yoğunluğunun uygulanan mekanik gerilime veya oluşan gerininin uygulanan elektrik alana oranıdır.

$$d = \frac{\text{yük yoğunluğu}}{\text{uygulanan mekanik gerilim}} \quad d = \frac{\text{oluşan gerinim}}{\text{uygulanan elektrik alan}}$$

1.1.3.2 Dielektrik Sabiti (K)

Dielektrik sabiti, elektrodlanmış bir dielektrik malzemede depolanan elektrik yükünün, aynı boyutlara sahip bir vakum kapasitörünün depoladığı yüke oranıdır. Kapasitans ise birbirine d mesafesi kadar ayrı duran paralel iki levha arasındaki dielektrik malzemenin yük tutabilme kapasitesidir.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad K = \epsilon / \epsilon_0 \quad C = \epsilon_0 K \frac{A}{d}$$

C : Kapasitans (ohm)

K : Dielektrik sabiti (F/m)

A : Levha alanı (m²)

ε₀ : Vakumun geçirgenliği (8,85x10⁻¹²F/m)

D : Levhalar arası mesafe (m) **ε** : Geçirgenlik (F/m)

1.1.3.3. Mekanik Bağlaşma Faktörü (k_p)

Malzemeye uygulanan mekanik veya elektrik gücün dönüşüm verimini gösteren parametredir.

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\text{mekanik enerjinin elektrik enerjiye dönüşümü}}{\text{Uygulanan mekanik enerji}}$$

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\text{elektrik enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü}}{\text{Uygulanan elektrik enerji}}$$

1.1.3.4. Mekanik Kalite Faktörü (Q_m)

Mekanik kalite faktörü (Q_m) piezoelektrik malzemenin titreşim elemanı olarak kalitesini tanımlar. Birimsiz bir sabittir.

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi C Z_m f_r (f_a^2 - f_r^2)}$$

f_r, f_a : Rezonans ve anti rezonans frekansları (Hz)

Z_m : Rezonanstaki empedans (ohm)

C : Kapasitans (farad)

1.1.3.5. Curie Sıcaklığı

Piezoelektrik seramiklerin ısıtıldıklarında ferroelektrik özelliklerini kaybettikleri ve paraelektrik faza dönüştükleri sıcaklık değeri curie sıcaklığı olarak adlandırılır. Bu sıcaklık derecesinin üzerindeki sıcaklıklarda simetrik olmayan kristal yapı simetrik hale dönüşür.

1.2. Asıltı Döküm

Asıltı döküm, değişik boyutlarda karmaşık şekilli seramik bazlı malzeme üretiminde kullanılan ekonomik bir şekillendirme yöntemidir. Asıltı döküm yöntemi; seramik el sanatları, çini, pota, filtre, boru ve ısı motoru bileşenleri gibi malzemelerin üretiminde kullanılan çok geniş uygulama alanına sahip bir yöntemdir. Su ile hazırlanmış toz süspansiyona asıltı adı verilir. Hazırlanan asıltı önceden hazırlanan alçı kalıp içerisine dökülür veya pompalanır. Alçı kalıbın doğasından gelen kılcal emiş gücü, asıltı ortamındaki sıvının emilerek filtre edilmesine ve böylece toz partiküllerinin kalıp duvarına yoğun bir şekilde paketlenerek depolanmasına sebep olur [Schilling C. H and Aksay 1991]. İstenilen paketleme kalınlığına ulaşıldığında fazla asıltı kalıptan alınır. Kalıp içerisindeki döküm parçası kuruma esnasında çekilmeye uğrar, böylelikle kalıp içerisinden kolaylıkla çıkarılır. Kalıptan çıkarılan döküm parçası tamamen kurutulur ve sinterlenir [Fries R. and Rand 1996]. Bu tür asıltı döküm uygulamasına boşaltmalı asıltı döküm yöntemi adı verilir. Yöntem şekil 1.7’de şematik olarak gösterilmektedir. Boşaltmalı asıltı döküm yöntemi en yaygın kullanılan asıltı döküm yöntemidir. Uygulama gereksinimlerine bağlı olarak birkaç asıltı döküm yöntemi daha vardır [Schilling C. H, Aksay 1991].

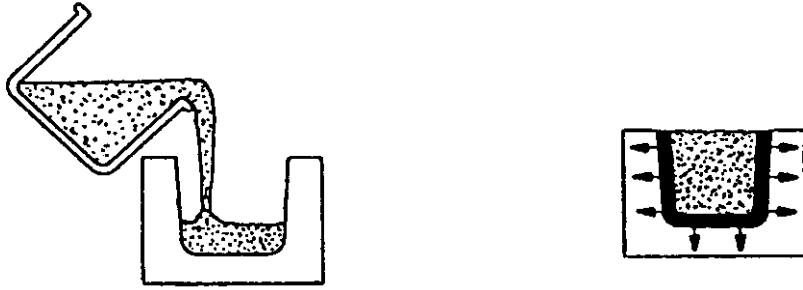
Diğer yaygın kullanılan asıltı döküm yöntemi kütle döküm yöntemidir. Bu yöntemde boşaltmalı asıltı döküm yöntemine çok benzerdir. Bu yöntemin boşaltmalı döküm yönteminden farkı, kütle halinde bir döküm elde edilene kadar döküm kalıbına sürekli olarak hazırlanan asıltının ilave edilmesidir [Schilling C. H and Aksay 1991].

Kullanılan diğer bir asıltı döküm yöntemi basınçlı döküm yöntemidir. Bu yöntemde kalıp içindeki sıvı emiş oranının artırılması için asıltı üzerine basınç uygulanır. Böylelikle döküm hızı artırılmış olur. Bu yöntemde alçı, gözenekli plastik yada her iki malzemenin birleşimi ile imal edilmiş kalıplar kullanılır [Schilling C. H, 1991].

Daha az yaygın kullanılan asıltı döküm yöntemi de vakumla döküm yöntemidir. Bu yöntemde kalıp duvarlarına vakum uygulanır. Uygulanan vakum sayesinde

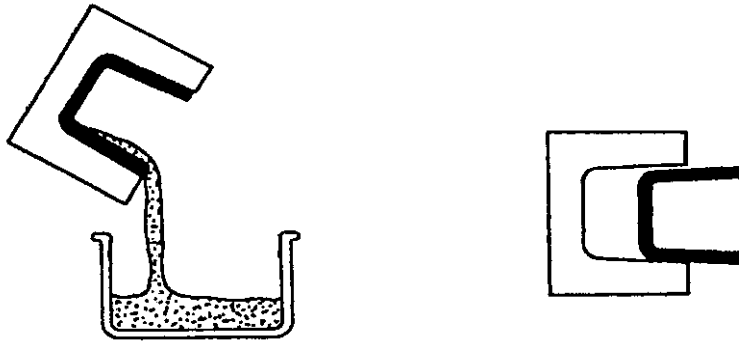
döküm hızı artırılmış olur. Vakumlu dökümün döküm hızı boşaltmalı ve kütle döküm yöntemininkinden daha yüksektir [Schilling C. H. And Aksay 1991].

Son zamanlarda geliştirilmiş yeni bir döküm yöntemi de savurma dökümdür. Bu yöntemde kalıp büyük bir hızla döndürülmektedir. Bu dönüş paketlenmeyi artırmakta ve döküm parçasının sağlamlığına katkıda bulunmaktadır. Bu yöntemde kullanılan kalıpların gözenekli olmasına gerek yoktur. Çeşitli metal ve plastiklerden üretilmektedir [Schilling C. H and Aksay 1991].



a) Asılının kalıba boşaltılması

b) Suyun emilimi ve döküm kalınlığının oluşumu



c) Fazla asılının kalıptan uzaklaştırılması

d) kurutma ve kalıptan çıkarma

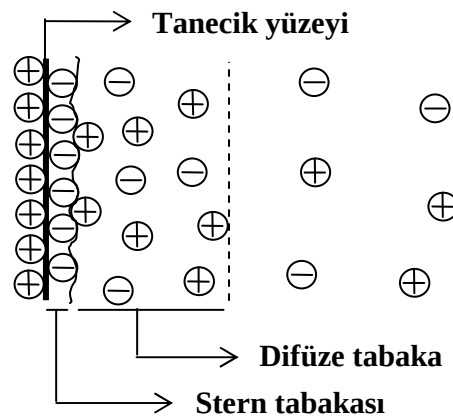
Şekil 1.7. Asıltı döküm yönteminin şematik gösterimi

Asıltı döküm yönteminde asıltı ve kalıp özellikleri istenilen parçanın üretilebilmesi için önemlidir. Reolojik özellikler, döküm hızı, kurutma özellikleri, kuruma çekilmesi, kalıptan çıkarma ve yaş mukavemet asıltı dökümünün önemli parametreleridir [Schilling C. H and Aksay1991]. Üretilen asıltı sonradan kolaylıkla tekrar üretilebilmelidir. Asıltı viskozitesi, asıltının kalıbı tamamen doldurmasına müsaade edecek kadar düşük ancak katı oranı yeterli döküm hızını ve yaş mukavemeti sağlayacak ölçüde olmalıdır. Optimum şartlar için deneysel metotlar kullanılır. Asıltı hava kabarcıklarından arındırılmış olmalıdır [Fries R. and Rand 1996]. Döküm parçası içinde kalan hava kabarcıkları sinterlenmiş parçada kritik kusurlara sebep olurlar [Schilling C. H Aksay 1991]. Döküm katmanındaki paketlenme yoğunluğunun en yüksek değerde olması, kurutma ve sinterleme esnasındaki çekilme miktarının en az seviyede olması için partikül boyut dağılımı çok önemlidir. Boyut dağılımı iyi yapılmamış asıltı dökümlerde mikroyapıda heterojenlik ve topaklanma görülür [Lewis J.A, 2000]. Örneğin küçük tanelerin sedimentasyonu veya büyük parçaların tabanda topaklanması döküm esnasında kalınlık ve yoğunluk farklılıklarına sebep olur. Yaş parçadaki bu ve benzeri kusurlar kuruma ve sinterleme aşamalarında kırılmalara neden olur [Schilling C. H and Aksay1991]. İyi bir asıltı döküm için asıltı içindeki partiküllerin birbirleri ile olan etkileşimleri dengelenmeli ve bu taneciklerin bir araya gelerek topaklanmaya sebep olmaları engellenmelidir [Tsetsekou A., et al 2000]. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra döküm parçası ile kalıp yüzeyi arasında yapışma olması halinde parça kalıptan çıkarılamayabilir veya hasara uğrayabilir. Kalıp ile parça arasındaki etkileşimi engellemek için kalıp duvarları silikon yağı, %5'lik alginate çözeltisi, zeytin yağı vb. yağlarla kaplanabilir. Ancak bu kaplama döküm hızını düşürür [Schilling C. H and Aksay 1991].

1.2.1. Elektriksel Çifte Katman Teorisi

Seramik tozlar polar bir sıvı ortamında dağıtıldıklarında yüzeylerinde elektrik yükleri oluşur. Bu yükler iyon çözülmesi, sulu ortam ile kimyasal reaksiyon ve iyon absorpsiyon mekanizmaları ile gerçekleşir. Seramik taneciklerin yüzeylerindeki yükler, polar sıvı ortamındaki yüzeye yakın olan iyonların dağılımını etkiler [Sigmund W.M, 2000]. Yüklü tanecik yüzeyi; sıvı ortamdaki zıt yüke sahip iyonları

çekerek ve aynı yüke sahip iyonları iter. Tanecik yüzeyine çekilen iyonlar tanecik yüzeyini sararlar. Yüzeyi saran bu iyonlar, yüzeye sıkıca bağlı, hareketsiz, ince bir iyon katmanı oluştururlar (stern tabakası). Bu katmanın hemen bitişiğinde daha gevşek bağlı iyonlardan oluşan bir iyon tabakası daha oluşur (difüze tabakası). Bu teoriye Stern'in elektrostatik çift katman teorisi adı verilir. Teoriye göre bu iki tabaka bir düzlem ile ayrılmış durumdadır. Bu düzleme ise Stern düzlemi adı verilir [Fries R. and Rand 1996]. Elektrostatik çift katmanın şematik gösterimi şekil 1.8' de görülmektedir.

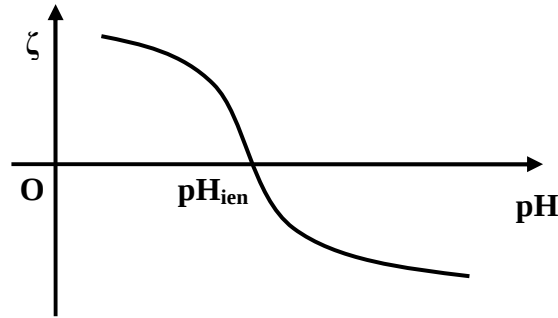


Şekil 1.8. Elektrostatik çift katmanın şematik gösterimi

1.2.2. Zeta Potansiyeli (ζ)

Bir asıltı içindeki yüklü tanecikler dışardan verilen elektriksel potansiyel farkına tepki gösterirler ve yüzey yükünün cinsine göre belli bir hız kazanırlar. Bu hıza elektroforetik hız adı verilir. Zeta potansiyeli, seyreltik bir çözelti içerisindeki partiküllerin uygulanan elektrik alan sebebiyle oluşan elektroforetik hareketliliklerinin ölçümünden, stern tabakası ile sıvı kütlesi arasındaki elektrik potansiyel farkın belirlenmesidir. Zeta potansiyeli asıltının pH'ına, elektrik geçirgenliğine sıvı yada toz haldeki tanecik konsantrasyonuna ve dağıtıcı miktarına bağlıdır. Değişen pH değerlerinde zeta potansiyeli ölçümü yapıldığında zeta potansiyeli - pH eğrisi elde edilir (Şekil 1.9.). Bu eğrinin sıfır voltaj eğrisini kestiği nokta izoelektrik nokta (ien) olarak adlandırılır [Fries R. and Rand 1996]. Bu nokta asıltının net yüzey yüklerinin sıfır olduğu (nötr) olduğu pH değerini gösterir. Bu noktada asıltı topaklanmaya uğrar. Toz taneciklerin kalıcı bir şekilde dağıtılmalarını

sağlamak için, asıltının pH değerinin izoelektrik noktadaki pH değerinden mümkün olduğunca uzak bir pH değerinde olması gerekir. Kural olarak uzun süreli bir dağıtma kararlılığı sağlamak için zeta potansiyeli en az $\pm 30\text{mV}$ olmalıdır. Zeta potansiyeli ölçümü ile asıltının uygun elektrostatik dengeleme şartları tespit edilir [Fries R. and Rand 1996].



Şekil 1.9. Zeta potansiyeli – pH diyagramı

1.2.3. Toplam Potansiyel Enerji Eğrisi

Asıltı döküm yönteminde, asıltı özellikleri asıltı içerisindeki tanecikler arasında oluşan kuvvetlerin düzenlenmesiyle kontrol edilir [Fries R. and Rand 1996]. Seramik toz partikülleri Van der Waals çekim kuvveti altındadır. Tanecikler ancak itme kuvveti oluşturularak asıltı içerisinde dağıtılabilir [Sigmund W.M, 2000]. Asıltı içerisindeki iki taneciğe etkiyen net kuvvet üç kuvvetin etkisi altında oluşur. Bu kuvvetler Van der Waals çekim kuvveti, elektrostatik itme kuvveti (elektiriksel çifte katman itme kuvveti), sterik (polimerik) itme kuvvetidir [Fries R. and rand1996].

$$V_{\text{Toplam}} = V_a + V_{r1} + V_{r2} \quad [\text{Fries R. 1996}]$$

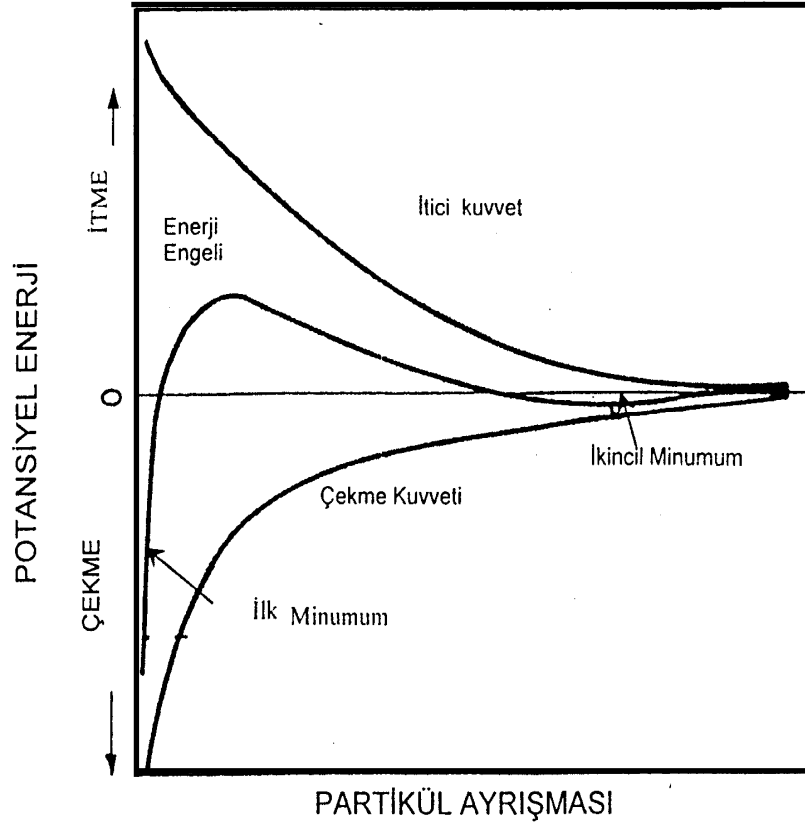
V_{Toplam} : Toplam potansiyel enerjisi

V_a : Van der Waals çekim potansiyeli

V_{r1} : Elektrostatik itme potansiyel enerjisi

V_{r2} : Sterik itme potansiyel enerjisi

Tanecikler aynı yarı çaplı iki küre olarak düşünülerek; tanecikler arasındaki net potansiyel enerjisi teorisi oluşturulmuştur [Fries R. and Rand 1996]. Bu teoriye göre oluşturulan potansiyel enerji – partikül ayrışması grafiği şekil 1.10.’ de gösterilmektedir



Şekil 1.10. Potansiyel enerji – Partikül ayrışma grafiği

Bu grafik; verilen bir tanecik - sıvı sistemi için V_r ' nin V_a 'yı aşarak topaklanmaya karşı bir enerji bariyeri oluşturan elektriksel çifte katman tabakasının bir kalınlık aralığının olduğunu gösterir [Schilling C. H, Aksay 1991].

1.2.4. Koloidal Dengeleme Mekanizmaları

Dengeleme mekanizmaları; asıltı reolojisi, döküm hızı ve mikro yapı üzerine önemli etkileri olan toz taneleri arası itme ve çekme kuvvetlerinin dengelenmesinden

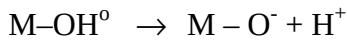
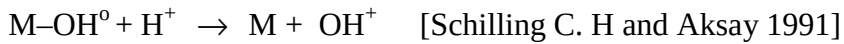
dolayı asıltı döküm yönteminde çok önemli bir faktördür [Schilling C. H, 1991]. Toz Toz taneleri, taneler arası Van der Waals çekim kuvveti sebebiyle topaklanma eğilimi içindedirler [Tsetsekou A., et al 2000]. Bu sebeple dengeleme mekanizmaları yüksek toz miktarı içeren düşük viskoziteli döküm asıltıları hazırlamada çok gereklidir. Asıltı hazırlamada düşük viskozite ($<1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) akışkanlık için, yüksek toz konsantrasyonu da döküm hızını ve yaş yoğunluğu artırmak için gereklidir.

[Schilling C. H, Aksay 1991]. tanecikler arası kuvvetlerin kontrol edilmesi ile iyi akıcılığa sahip homojen asıltılar hazırlamak mümkündür [Sigmund W.M, 2000]. Bu yüksek yoğunluklu, homojen, düşük viskoziteli asıltılar ile homojen olarak paketlenmiş döküm parçaları üretilebilir [Lewis J.A, 2000]. Seramik asıltı döküm sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan dengeleme mekanizmaları elektrostatik dengeleme ve polimerik dengeleme mekanizmalarıdır [Fries R. and Rand 1996].

1.2.4.1. Elektrostatik Dengeleme

Bir sıvı içerisinde seramik taneciklerin yüzeylerinde yüzey yükleri oluşur. Elektrostatik dengeleme, partikül yüzeylerini saran yüzey yüklerinin oluşturduğu elektriksel çifte katmanların çakışması sonucu oluşan elektrostatik itme kuvveti ile sağlanır [Schilling C. H, Aksay 1991]. Elektrostatik dengelemenin şematik bir gösterimi şekil 1.11 de verilmiştir.

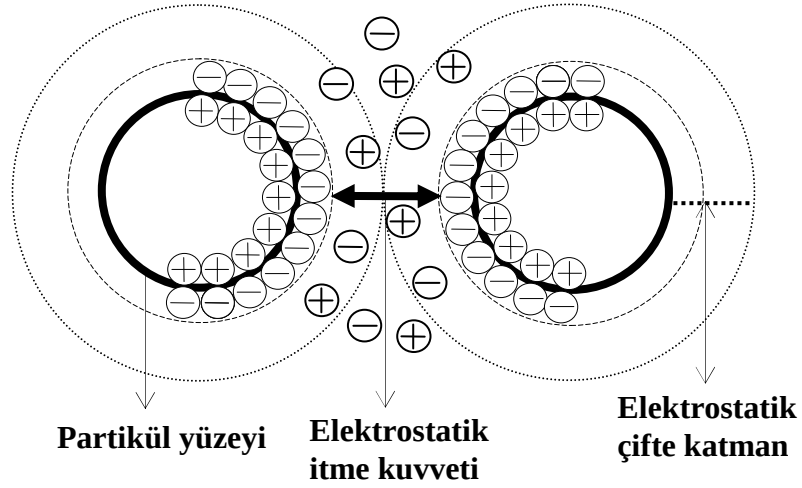
Çözeltideki karşıt iyonlarca dengelenmiş yüzey yükleri taşıyan partiküller, sıvı bir ortam içerisinde asılı kalırlar. Oksit malzemelerde oluşan yüzey yükü reaksiyonları şöyledir;



Denklemdaki M yüzey katyonunu ifade etmektedir.

Net yüzey yükleri, çözeltinin pH'ına (H^+ ve OH^- İyonu konsantrasyonuna) bağlıdır. Yukarıda belirtilen reaksiyonlarda düşük pH seviyelerinde pozitif yüzey yükleri oluşur. Yüksek pH seviyelerinde ise negatif yüzey yükleri oluşur. Net yüzey

yükünün sıfır olduğu noktadaki pH değerine izoelektrik nokta adı verilir. [Schilling C. H and Aksay 1991]

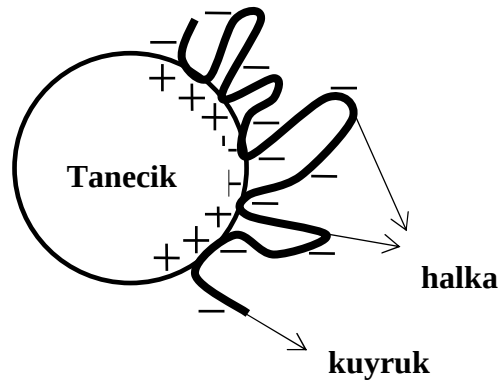


Şekil 1.11. Elektrostatik dengelemenin şematik gösterimi

1.2.4.2. Polimerik (Sterik) Dengeleme

Uygun bir polimerik dağıtıcı ilavesi ile kararlı koloidal süspansiyon oluşturma yaygın kullanılan bir yöntemdir. Polimerik dağıtıcı ilavesi, polimer tabakası ile kaplı iki taneciğin, polimer tabakalarının çakışması sonucu topaklanmayı önleyen partiküller arası itme kuvvetinin oluşumunu sağlar (sterik engel) [Sigmund W.M, 2000]. Polimerdeki yüklü moleküller hem elektrostatik hem de sterik itme kuvveti oluştururlar. Bu durum iki partikül arasındaki itme kuvvetini artırır [Schilling C. H and Aksay 1991]. Polimerik tabaka polimerin halka ve kuyruk kısımlarından oluşur. Partikül yüzeyi ile zıt yüklü polimer molekülleri tanecik yüzeyine yapışarak halka ve kuyruk kısımlarını oluştururlar. Polimer tabakasını oluşturan halka ve kuyruk kısımlarının şematik gösterimi şekil 1.12’ de verilmiştir. Absorblanmış polimer tabakasının kalınlığı süspansiyondaki polimer konsantrasyonuna, polimerin moleküler ağırlığına, polimerin dağıtma ortamındaki çözülebilirliğine bağlıdır [Fries R. and Rand 1996].

Asıltı içindeki taneciklerin iyi bir şekilde dağıtılabilmesi ve yüksek paketlenme yoğunluğunun sağlanabilmesi için kullanılan polimerin partikül yüzeyine çok iyi bir şekilde absorblanması, polimerin halka ve kuyruk kısımlarının sıvı ortamının içine doğru uzanması ve kaplanan polimer tabakasının yeterli kalınlıkta olması gereklidir [Fries R. and Rand 1996]. Polimerin dağıtıcı ortam içindeki çözünürlüğünün düşük olması, partikül yüzeyine absorblanan yüzeyle zıt yüklü polimer molekülü miktarın düşük olmasına ve bu sebeple yüzey yüklerinin nötr olmasına sebep olur [Lewis J.A,2000]. Polimerin sıvı içerisine doğru uzanması gereken halka ve kuyruk kısımları nötr yüzey yükleri sebebiyle partikül yüzeyinde birbirlerine sarılırlar. Bu durumda partiküller birbirine yaklaşır diğer taneciklerdeki polimerlerle bağlanır. Taneciklerin yüzeylerindeki polimerlerin birbirine bağlanması topaklanmaya (bridging flokulasyonu) sebep olur. Polimerin tamamen çözündüğü pH değerinde viskozite en düşük seviyededir. Buna ilave olarak pH değeri yükseldikçe flokülasyonu önlemek için gerekli olan polimerin yüzey absorpsiyonu miktarı azalır. Bunun sebebi molekül başına düşen yük miktarının artmasıdır. Asıltıdaki absorbe olmamış polimer miktarı arttıkça asıltının viskozitesi artar [Schilling C. H and Rand 1991].



Şekil 1.12. Tanecik üzerine yapışmış dağıtıcı polimer zincirinin şematik gösterimi

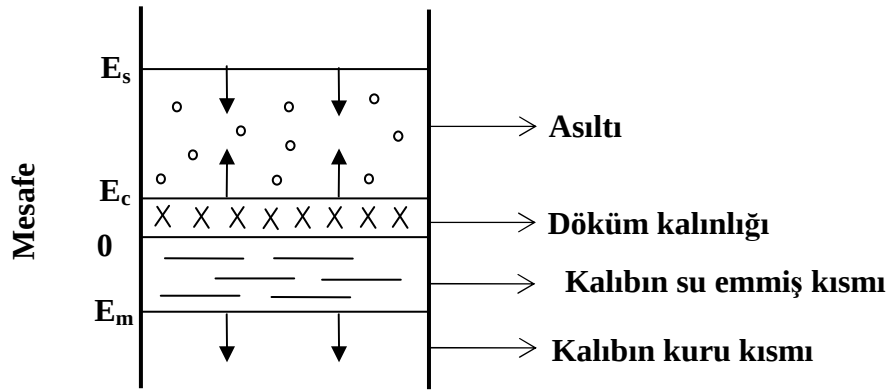
1.2.5. Asıltı Döküm Mekanizması

Kalıp içindeki asıltı ile kalıp yüzeyi arasındaki basınç yaklaşık olarak kılcal emme basıncına (P) eşittir.

$$P = S \sigma \cos \gamma \quad [\text{Schilling C. H and Aksay 1991}]$$

Bu denklemdeki; S kalıbın özgül yüzey alanı, σ suyun yüzey gerilimi, γ temas açısıdır.(kalıp yüzeyi ile su tamamen ıslatıldığından $\cos \gamma=1$)

Alçı kalıp içindeki suyun kılcal emme basıncı 0,03 ile 0,1 mPa nispetindedir. Asıltı döküm genellikle ince duvar kalınlığına (≈ 15 mm) sahip üretimlerle sınırlıdır. Bunun sebebi döküm asıltısı ile kalıp arasındaki hidrolik dirençten kaynaklanan döküm hızı üzerindeki sınırlamalardır. Proses parametrelerinin döküm hızına olan etkileri bir süzülme kinetik model kullanılarak açıklanabilir. Bu modelde, homojen bir kesit alanına sahip sıkıştırılamaz bir döküm kalınlığı temel alınmıştır. (Şekil 1.13)



Şekil 1.13. Asıltı döküm mekanizmasının şematik gösterimi

Bu modelde kalınlığın artış oranı zamanın parabolik bir fonksiyonudur. Bu fonksiyonun matematiksel ifadeleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [Schilling C. H and Aksay 1991].

$$E_c = \frac{E_s^0 - E_s}{n} = \frac{-\varepsilon_m E_m}{n} = \left[\frac{2pt}{n\eta\varepsilon_m(n\alpha_m + \alpha_c)} \right]^{1/2} n \frac{1-c-\varepsilon_c}{c}$$

Denklemlerdeki; E_c döküm tabakasının kalınlığı, t zaman, p süzmeyi etkileyen toplam basınç, E_s^0 $t=0$ 'da süspansiyon - hava ara yüzeyinin konumu, E_s Süzülme esnasındaki süspansiyon - hava ara yüzeyinin konumu, E_m Kalıp içindeki filtre hava ara yüzeyinin konumu, η asıltının viskozitesi, c asıltı içindeki katının hacimce oranı,

n kütle denge oranı, ε_m döküm kalıbının boşluk oranı, ε_c döküm katmanının boşluk oranı α_m döküm kalıbının özgül hidrolik direnci, α_m döküm katmanının özgül hidrolik direnci tanımlamaktadır. Yukarıdaki denklemlerde ε_m , ε_c ve α_c ' nin değerlerindeki azalma ve P ve c' ' nin değerlerindeki artış döküm hızını artırır [Schilling C. H and Aksay 1991].

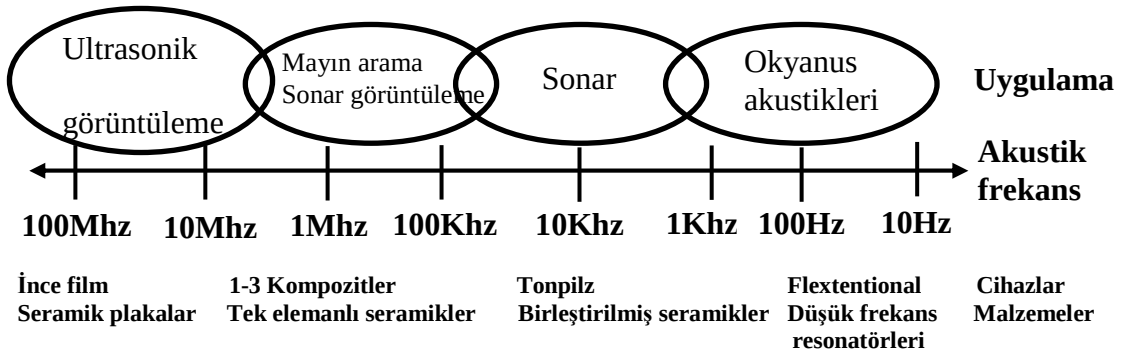
1.2.6. Alçı Kalıplar

Alçı kalıplar; asıltıdaki suyun, kalıbın gözenekli yapısından kaynaklanan kılcal emme basıncı sayesinde uzaklaştırarak döküm kalınlığının üretilmesi sebebiyle asıltı döküm yönteminin çok önemli bir parçasıdır. Alçı kalıplar çok değişik şekillerin üretiminde kullanılabilmeleri, maliyetlerinin düşük olması, su emme özelliklerinin iyi olması gibi avantajlarından dolayı kalıp malzemesi olarak tercih edilmektedir. Alçı kalıp üretilirken toz haldeki alçı ve su bir kapta karıştırılır ve son şekille aynı şekle sahip bir kalıp içerisine dökülür. Dökümden sonra alçı kimyasal hidrotasyona uğrayarak ($\text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$) sert yapıya geçer. Alçı sert yapıya geçtikten sonra oda şartlarında kurumaya bırakılır.

Alçı kalıp imal edilirken toz alçı ve su oranı önemli bir faktördür. Seramik üretiminde alçı kalıp hazırlamada kullanılan toz alçı - su oranı 1 / 1.5 dur. Alçı kalıp hazırlamada dikkat edilmesi gereken bir başka husus ise üretim esnasında kalıp duvarlarında hava kabarcığı kalmamasıdır. Alçı kalıplar üretilen parçanın şekline göre birden fazla parçadan oluşmuş kompleks kalıplar olarak imal edilebilir. Kalıplar kullanıldıktan sonra tekrar kullanımları için kurutma yapılırken 50 °C sıcaklığın üzerinde bırakılmamalıdır. Bunun sebebi bu sıcaklığın üzerinde alçının kalsinasyona uğramasıdır. [Schilling C. H and Aksay 1991]

1.3. SUALTI ELEKTROAKUSTİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Enerji dönüştürücüler; bir enerjiyi başka bir enerjiye dönüştüren cihazlardır. Elektroakustik enerji dönüştürücüler; elektrik enerjisini akustik enerjiye yada akustik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren enerji dönüştürücüleridir. Elektroakustik dönüştürücüler hava, su altı ve tıbbi teşhis uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Akustik enerji dönüştürücülerin birçok türü vardır. Bu türler çeşitli uygulamalarda gerekli olan frekans aralıkları, cihazlar ve malzeme olarak şekil 3.1’de görülmektedir [Hughes W. J, 1998]



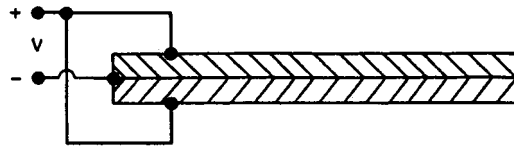
Şekil 1.14. Dönüştürücülerin akustik frekans aralıkları

1.3.1. Düşük Frekans Enerji Dönüştürücüler (10-5000 Hz)

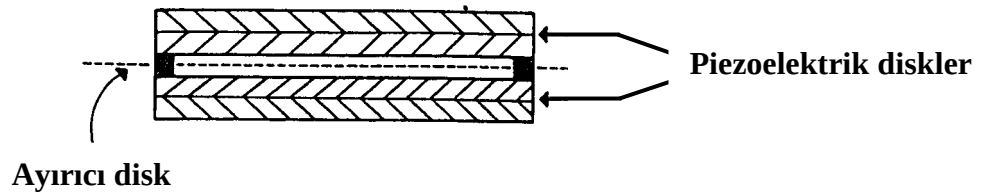
Enerji dönüştürücüler; düşük frekans aralığında ses dalgaları üretebilmeleri için büyük şekil değişimi oluşturulmasına ihtiyaç duyarlar. İlave olarak, dönüştürücüler makul boyutlarda üretilmeleri ve seramik titreşim elemanından daha esnek olmaları gerekmektedir. Bu durum mekanik etkinin artırılması ile sağlanır. Tamamıyla aynı boyutlardaki bir yapı için, düşük mekanik rezonans frekansına ve düşük esnekliğe sahip plakaların veya kabukların bükülme hareketleri kullanılarak mekanik etki artırılır. [Hughes W. J, 1998]

Bu tür dönüştürücülere bir örnek flexural disk dönüştürücülerdir.(Şekil 1.15.) Bu tür dönüştürücüler zıt yönlerde kutuplanmış iki piezoelektrik diskin birbirlerine yapıştırılması ile elde edilir. Elde edilmiş bu yapıya çift katmanlı yapı adı verilir.

Dönüştürücü üzerine elektrik alan uygulandığında seramik diskler üzerinde enine gerinimler oluşur. Seramik disklerin zıt yönlü kutuplanması sebebiyle oluşan gerinimler de zıt yönlüdür. Bu durum disklerin merkezine yakın bir noktada disklerin simetrik olarak bükülmesine sebep olur. Sonuç olarak piezoelektrik disklerin yapıştırılarak çift olarak kullanılması seramikteki küçük şekil değişimini daha büyük bir şekil değişimi haline dönüştürmüştür. Daha fazla etki yaratmak için bir diskle ayrılmış iki adet çift katmanlı dönüştürücüde kullanılabilir.(Şekil 1.16.)

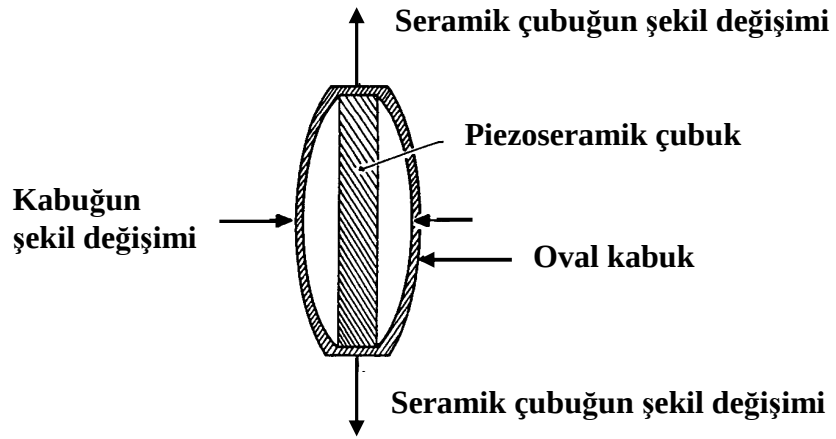


Şekil 1.15. Çift katmanlı flexural disk dönüştürücü



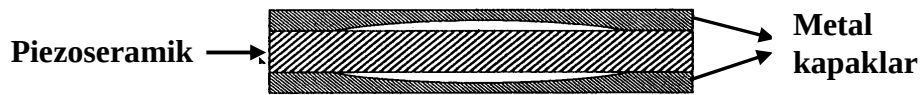
Şekil 1.16. İkili çift tabakalı dönüştürücü

Bükülme hareketi ile etki artırımı yaklaşımına diğer bir örnek flextensional dönüştürücülerdir. Bu cihazlarda seramikteki kalınlık modundaki titreşim mekanik kazanç ile daha büyük şekil değişimine dönüşür. Flextensional dönüştürücünün şematik bir gösterimi şekil 1.17'de görülmektedir. Bu cihazlarda titreşim oluşturan seramik, çevresini saran bir kabuk yapı ile birleştirilmiştir. Seramiğin titreşimi ile kabuk kısımda içeri ve dışarı yönlerde şekil değişimi oluşur. Oluşturulan bu yapı yüksek empedanstaki düşük seramik şekil değişimini düşük empedanstaki daha büyük bir şekil değişimine dönüştürür. Flextension enerji dönüştürücüler 300-3000 Hz frekans aralığındaki uygulamalar için üretilirler ve su altı sonar uygulamalarında kullanılırlar. [Hughes W. J, 1998].

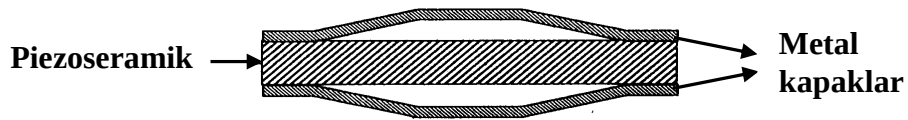


Şekil 1.17. Flexantional bir dönüştürücünün şematik gösterimi

Flextansional dönüştürücülerin iki uygulaması moonie ve cymbal tipi dönüştürücüleridir. (Şekil 1.18) Bu dönüştürücüler; iki yüzeyi tamamıyla elektrotlanmış, kutuplanmış bir piezoelektrik seramik bir disk ve diskin her iki yüzeyini kapatan iki metal kapaktan oluşur. Bu kapaklar diskin yüzeyinde hava boşluğu oluşturacak geometridedir. Moonie ve cymbal dönüştürücülerin çalışma frekansı 50 KHz'in altındadır [Hughes W. J, 1998].



(a) Moonie



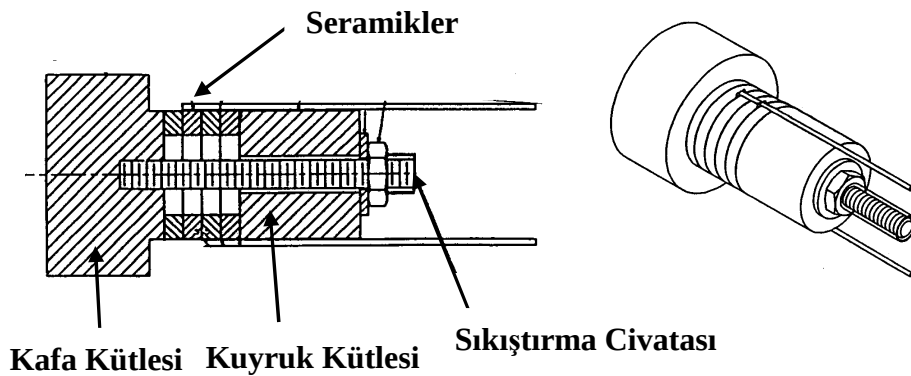
(b) Cymbal

Şekil 1.18. Moonie ve Cymbal tipi dönüştürücülerin şematik gösterimi

1.3.2. Boyuna Titreşim Dönüştürücüleri (3 kHz-100 MHz)

Boyuna titreşim modlu dönüştürücüler frekans aralığı 3 kHz – 100 MHz olan geniş bir frekans aralığında kullanılır. Frekans aralığı 5-50 Hz olan dönüştürücüler çeşitli silahlarda ve sonarlarda kullanılır. Frekans aralığı 50 – 600 Hz olan dönüştürücüler deniz dibi profili belirleme, mayın arama ve balık sürülerini bulma cihazlarında kullanılır. Frekans aralığı 600 kHz – 3 MHz olan dönüştürücüler ise yüksek çözünürlüklü deniz altı görüntüleme sistemlerinde kullanılır. Çalışma frekansı 3 MHz'in üzerinde olan dönüştürücüler ise tıbbi ultrasound görüntüleme ve tahribatsız muayene cihazlarında kullanılır. Ultrasonik mikrofonlar ise gigahertz mertebesinde frekanslarda çalışır. [Hughes W. J, 1998].

Boyuna titreşim modunda çalışan bir dönüştürücü türü tonpiliz adı verilen dönüştürücüdür. Tonpiliz'in Almanca anlamı "Çınlayan Mantar" dır. Bu isim dönüştürücünün şeklinin mantara benzemesinden kaynaklanmıştır. Tonpiliz dönüştürücünün şematik bir gösterimi şekil 1.19'da verilmiştir. Bu dönüştürücüler birbirine birleştirilmiş bir çok halka şeklinde seramik disklerden oluşmuştur. Bu seramik diskler kafa ve kuyruk kütleleri adı verilen iki kütle arasında sıkıştırılmış konumdadır. Tonpiliz dönüştürücüler genellikle 3 kHz – 100 kHz frekans aralığında kullanılır. Su ile aktif dönüştürücü malzemesi arasındaki empedansın iyileştirilmesi ve çıkış gücünün artırılması için yayılma yüzeyi alanı seramiğin alanından daha büyüktür [Hughes W. J, 1998]

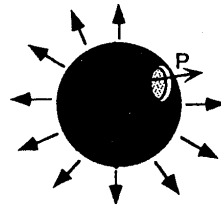


Şekil 1.19. Tonpiliz tipi dönüştürücü

1.3.3. Şekillendirilmiş Seramik Dönüştürücüler

Piezoelektrik seramik dönüştürücüler çeşitli uygulamalar için değişik şekil ve boyutta üretilebilirler.

Küresel dizaynlar her yönden algılama gerektiren uygulamalarda en çok kullanılan şekillerdir [Tressler J.F, et al 1992] (Şekil1.20). Bu dönüştürücülerin üretiminde en büyük zorluk üretilen kürenin iç yüzeyinin elektrotlanmasıdır. Bu sebeple iki yarım küre olarak üretilip birleştirilerek küresel şekil elde edilir. Üçgen şekilli piezoelektrik seramiklerin birleştirilmesi ile daha büyük çapta küreler üretmek mümkündür.



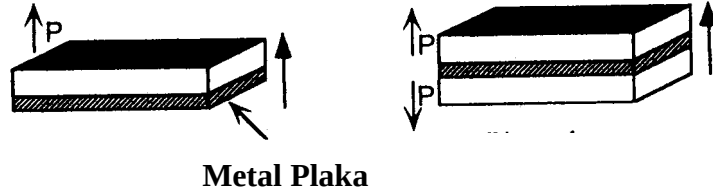
Şekil 1.20. İnce kabuklu küresel dönüştürücü

Diğer bir dizayn şekli içi boş silindirlerdir (şekil 1.21). Silindirin iç yüzeyi ve dış yüzeyi tamamen elektrotludur ve üç yönde kutuplama yapılabilmektedir. Bu yönler uzunluk yönü, kalınlık yönü, radyal yönüdür. Mekanik empedansı, aynı boyuttaki içi dolu silindirden daha düşük seviyededir [Hughes W. J, 1998].



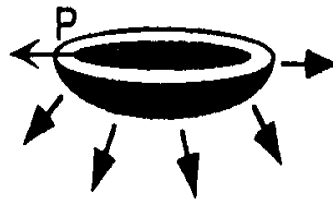
Şekil 1.21. İçi boş silindir dönüştürücü

Diğer bir dizayn şekli unimorph ve bimorph'lardır. (Şekil 1.22.) Unimorph dönüştürücüler ince piezoelektrik seramik plaka yüzeyine ince bir metal plaka yapıştırılarak üretilir. Bimorphlar ise zıt yönde kutuplanmış iki seramik plaka arasına ince bir metal plaka yerleştirilerek üretilir.



Şekil 1.22. Unimorph ve Bimorph tip dönüştürücüler

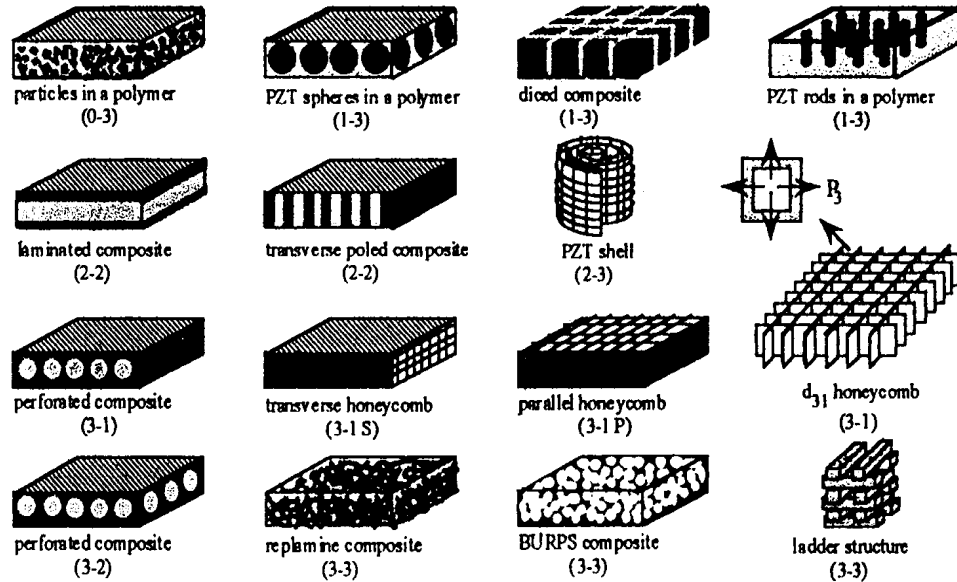
Yeni bir unimorph yaklaşımı RAINBOW'lardır (Şekil 1.23.). Kurşun esaslı bir piezoelektrik seramik; indirgenme reaksiyonu için karbon blok üzerinde yüksek sıcaklıkta ısıtılabilir. Seramik parçanın karbon blok ile temas ettiği tabakada indirgenme reaksiyonu olur. Bunun sonucunda karbon blok ile temas eden seramik yüzeyi deoksidasyona uğrar. İndirgenme reaksiyonun olduğu yüzey kurşunca zengindir ve elektriksel iletkenliği iyidir. Seramikte kurşunca zengin tabaka ile indirgenmemiş yüzeydeki ısı genleşme özellikleri farklıdır. İndirgenmemiş yüzeyin ısı genleşmesi kurşun tabakalı yüzeyin genleşmesinden daha zayıftır. Bu durum soğuma esnasında gerilim oluşmasına sebep olur. Gerilim tabakayı eğerek ve içbükey bir şekil oluşmasına sebep olur. Böylelikle bir yüzeyi metal bir yüzeyi seramik unimorph üretilmiş olur. Elektrik alan altında RAINBOW'lar seramiklere göre daha fazla şekil değişimi gösterirler [Furman E, 1995].



Şekil 1.23. RAINBOW tipi dönüştürücü

1.3.4. Piezoseramik-Polimer Kompozitler

Piezoelektrik seramiklerin su altı akustik sensör uygulamalarında hassasiyetleri düşüktür. Bunun sebebi kutuplama yönü haricindeki piezoseramik üzerine gelen hidrostatik gerilimin ters yönde elektrik şarj oluşturtmasıdır. Diğer bir sebep ise yüksek yoğunluklu seramik parçadan düşük yoğunluklu suya aktarılan akustik enerjideki yoğunluk farkından kaynaklanan enerji kaybıdır [Tressler J.F, et al, 1998]. Performansları geliştirici yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmuş, piezoseramik-polimerden oluşmuş kompozit sistemleri geliştirilmiştir. Polimer kullanımı ile sistemin yoğunluğu düşürülmekte akustik enerjideki kayıp azaltılmaktadır. Diğer yandan bileşimdeki polimer enine yönlerdeki hidrostatik gerilimin bir kısmını absorbe eder, böylelikle hidrostatik hassasiyet yükseltilmiş olur[Gallego J.A 1989]. Çeşitli seramik-polimer kompozit türleri şekil 1.24’de gösterilmiştir. Kompozit içindeki seramik ve polimer 10 farklı şekilde birleşim gösterebilir. Bu birleşim notasyonları 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 3-2 ve 3-3’dür. Notasyondaki birinci sayı aktif seramik fazın birleşim numarası ikinci numara ise pasif polimer fazın birleşim numarasıdır.



Şekil 1.24. Çeşitli polimer-seramik kompozitleri

Yeni bir kompozit enerji dönüştürücü türü seramik bal peteği yapısındaki dönüştürücülerdir (Şekil 1.24). Bu tür kompozitler yanal piezoelektrik (d_{31}) modunda çalışırlar. İki tür bal peteği dizaynı vardır. Bunlardan birincisi, bal peteği şeklindeki seramik iskeletin tamamen bir polimer içersine gömülmesi ile elde edilen yapıdır. Diğeri ise seramik iskeletin alt ve üst tabanının ince bir polimer tabakası ile kapatılması ile elde edilen yapılardır. Bu tür dizaynda bal peteği şeklindeki seramik iskeletin boşlukları hava ile doludur. Bal peteği dönüştürücülerde yapısından dolayı uzunluk yönündeki piezoelektrik hassasiyet yok edilmiştir ve kalınlık yönüne paralel yönde kutuplama işlemi uygulanır. Bu tür kompozitler; diğer piezoelektrik polimer kompozitlerin çoğundan daha yüksek bir piezoelektrik hidrostatik hassasiyet sağlarlar. [Zhang M.Q, et al, 1996]

1.4. Çalışmanın Amacı :

Piezoelektrik dönüştürücü cihazlarda seramik parçanın boyutları, şekli, malzemesi ve cihazın tasarımı cihazın çalışacağı frekans aralığı ve çalışma koşullarındaki performansını belirleyen temel etmenlerdir.

Yaygın olarak kullanılmakla birlikte piezoelektrik seramikler hidrostatik basınç ortamında su altı akustik sensörleri olarak giriş bölümünde belirtilen nedenlerden dolayı düşük duyarlılık ve yüksek akustik direnç sahiptirler. Bu sebeple piezoelektrik seramik dönüştürücülerin performanslarını artırıcı yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmuştur.

Düşük frekans aralığında çalışan piezoelektrik dönüştürücülerin düşük frekanslarda akustik dalga üretebilmeleri için yüksek gerinim oluşumuna ihtiyaçları vardır. Ancak seramiklerin kütsel piezoseramiklerde gerinim miktarı %0.1 ile sınırlıdır [Newnham et al, 1991]. Düşük frekans dönüştürücülerinde mekanik etkiyi artıran mekanizmalarla daha büyük boyutlarda gerinimler elde etmek mümkündür. Önceki bölümde belirtildiği gibi flexural dönüştürücüler, flexensional dönüştürücüler, boylamasına titreşim dönüştürücüleri ve RAINBOW tipi dönüştürücüler mekanik etkinin artırımı yaklaşımı ile dizayn edilmiş dönüştürücülerdir.

Performans artırma yaklaşımlarından biri piezoseramik polimer kompozitleri ve içinde hava boşlukları içeren dizaynlardır. Seramiğin performansı hidrostatik basıncın en aza indirgenip basıncın sadece belirli yönlerden etkimesi ile artırılabilir. Bu da seramiğin bir kısmını, hidrostatik basıncın bir kısmını emen, yumuşak bir polimer ile kaplayarak yada cihazın tasarımında hava boşluklarına yer vererek sağlanabilir. .[Tressler.J.F. et al, 1998] Ayrıca yüksek yoğunluğa sahip seramik ile birlikte cihazın bünyesinde yer alan ikinci faz (polimer veya hava) cihazın toplam yoğunluğunu ve bunun sonucunda akustik empedansını düşürmektedir Böylelikle dönüştürücü ile su arasındaki enerji kaybı önlenmektedir.

Bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedilen yaklaşımlardan yola çıkılarak genel bir seramik şekillendirme yöntemi olan asıltı döküm yöntemi kullanılarak içinde hava boşluğu içeren değişik şekillerde, ince kabuklu piezoelektrik seramik dönüştürücülerin tasarımı, üretimi ve karakterizasyonlarının yapılması amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda, yaygın olarak PZT-5A kodu ile bilinen , polyvinyl alcohol bağlayıcı ile püskürtmeli kurutucuda hazırlanmış ticari piezoelektrik tozları kullanılmıştır. Kullanılan PZT-5A tozları Lockheed Martin ve APC (American Piezo Ceramics, Inc.) isimli iki farklı firmadan tedarik edilmiştir. Tez içeriğinde Lockheed Martin firmasından alınan PZT-5A tozu LM-PZT-5A olarak, APC firmasından alınan ise APC-PZT-5A olarak isimlendirilmiştir. İlk asıltı döküm denemelerinde döküm parçalarının kalıba yapışması kalıptan çıkarılamamalarına sebep olmuştur. Bu olumsuz duruma tozlardaki mevcut bağlayıcının sebep olduğu düşünülmüş ve bundan sonraki denemelerde tozlar bağlayıcısı fırında uçurulmuş (binder burn-out) olarak kullanılmıştır. Kullanılan asıltı döküm sürecinde köpükleşmeyi önleyici olarak Sulfynol 104E, plastikleştirici olarak Glycerol ve dağıtıcı (dispersant) olarak Darvan821A kimyasalları kullanılmıştır.

Asıltı döküm sürecinde kararlı asıltı şartlarını belirlemek üzere hacimce %35, %40 ve %45 LM-PZT-5A ve APC-PZT-5A tozları içeren asıltılar hazırlanmıştır. Viskozite ölçümlerinde; her bir katı oranı için değişik dağıtıcı miktarları içeren 20ml'lik asıltılar, bilyalı değirmende 5 mm çaplı zirkonya bilyeler kullanılarak 20 saat karıştırma ile hazırlanmış ve bu asıltılar kullanılarak viskozite ölçümleri yapılmıştır. Böylece değişik miktarlarda ilave edilen dağıtıcının, değişik katı oranı içeren asıltıların viskoziteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hazırlanan değişik dağıtıcı miktarları içeren asıltıların pH'ları ölçülmüş ve pH şartları belirlenmiştir. Asıltıların kararlılıklarının gözlemlenebilmesi için, asıltılardan aynı miktarlarda cam tüplere konulmuş ve 10 gün beklenilerek sedimentasyonları yapılmıştır.

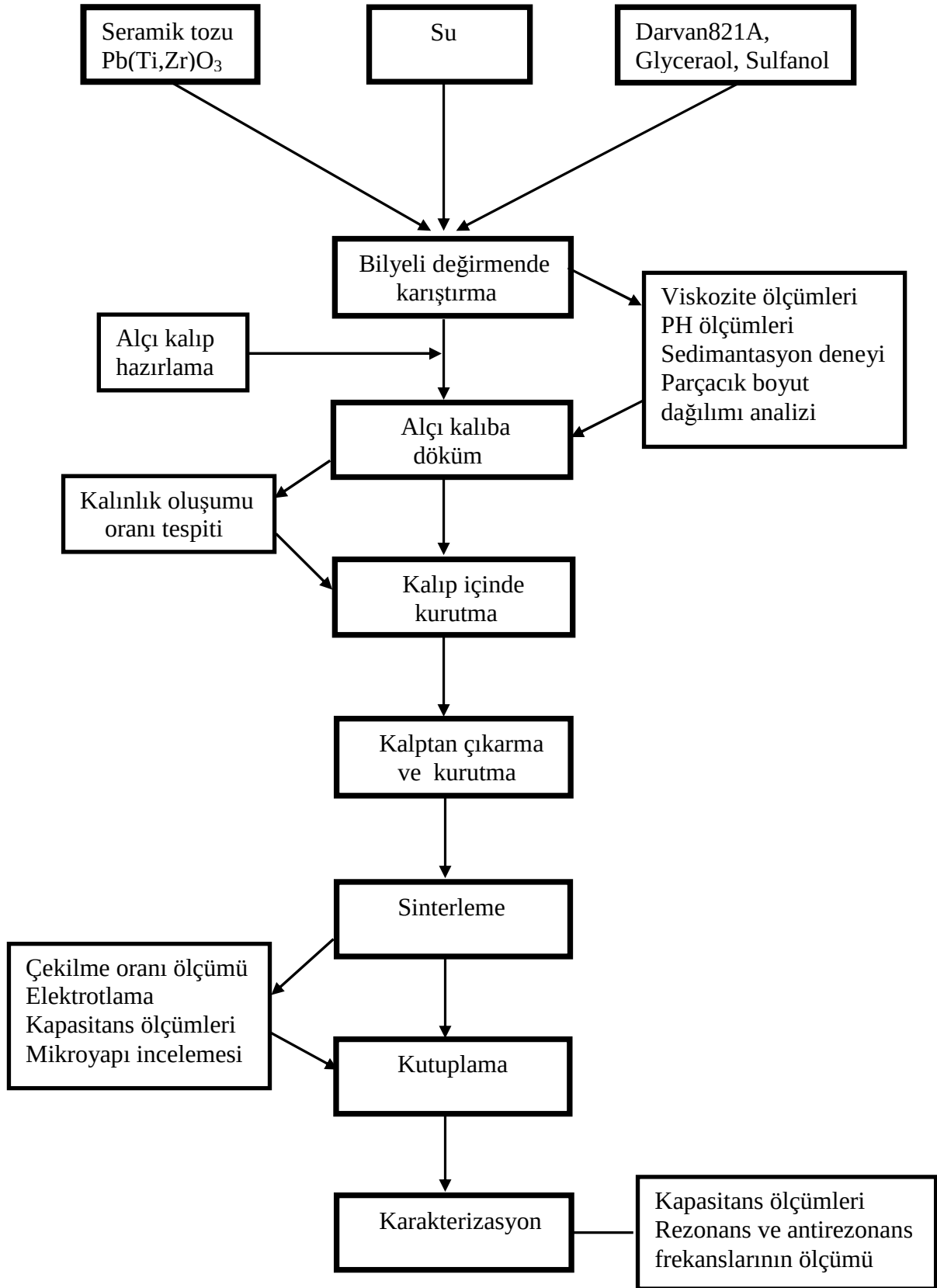
Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, alçı kalıplarda istenilen şekli verecek modeller kullanılarak, istenilen parça şeklini oluşturabilecek alçıdan kalıplar hazırlanmış ve bu kalıplara dökümler yapılmıştır. Asıltılar kalıp içerisinde farklı sürelerde bekletilerek değişik şekillerde ve farklı kalınlıklarda piezoelektrik seramik parçalar üretilmiştir. Asıltının kalıp içerisindeki farklı bekleme süreleri ile oluşan kalınlık artışı tespit edilmiştir. Üretilen yaş haldeki parçalar önce kalıplar içerisinde bir süre normal şartlar altında kurutulmuş daha sonra sonrada kalıplardan çıkarılarak

tümüyle kuruması sağlanmıştır. Kuruyan parçalar yüksek sıcaklıkta kurşunca zengin bir atmosferde sinterlenmiştir. Sinterlemeden sonra çekilme miktarları belirlenmiş, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinden mikroyapıları incelenmiştir.

Üretilen parçaların iç ve dış yüzeyleri gümüş elektrot ile kaplanarak 115 °C’de 10 dakika boyunca 2.5 kV/cm elektrik alan altında kutuplama işlemleri yapılmıştır. Kutuplama öncesi ve sonrası kapasitans değerleri ölçülmüştür. Son olarak da üretilen parçaların rezonans ve antirezonans frekanslarının ölçümleri yapılarak çalışma tamamlanmıştır.

Bu tezde yapılmış olan çalışmalar (akım şeması, asıltı hazırlama şartları, karakterizasyon ve diğer çalışmalar) ayrıntılı bir şekilde ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.

2.1. Deneysel Akım Şeması



2.2. Asıltının Hazırlanması

LM-PZT-5A ve APC-PZT-5A tozları kullanılarak asıltılar hazırlanmıştır. Yapılan ilk asıltı döküm denemelerinde dökümle oluşan parçalar kalıp duvarlarına yapışmakta ve kalıptan çıkırılmadığı gözlemlenmiştir. Bu olumsuz duruma tozlardaki mevcut bağlayıcının neden olabileceği düşünülmüştür. Tozlar fırında 600 °C' de 30 dakika tutularak bağlayıcılarından arındırılmış (binder-burnout) ve elde edilen tozlardan hazırlanan asıltılarla dökümler yapılmıştır. Oluşan döküm parçalarının kuruma sonrası kalıptan kolaylıkla çıkarıldığı gözlemlenmiş ve bu nedenle bundan sonraki tüm deneylerde kullanılan tozlar bağlayıcısı uçurulmuş halde kullanılmıştır.

Bağlayıcısı uçurulmuş LM-PZT-5A ve APC-PZT-5A tozları kullanılarak hacimce %35 toz oranına sahip asıltılar hazırlanmıştır. Bu asıltıların hazırlanmasında toplam hacmin %35'ini karşılayacak miktarda PZT-5A tozu, toplam hacmin %65'ini karşılayacak miktarda saf su, plastikleştirici olarak ağırlıkça %0.4 oranında glycerol, köpük giderici olarak ağırlıkça %0.065 oranında sulfynol 104E ve dağıtıcı (dispersant) olarak APC-PZT-5A ile hazırlanan asıltıya ağırlıkça % 0.5 oranında Darvan821A, LM-PZT-5A ile hazırlanan asıtlara ise ağırlıkça % 1 oranında Darvan821A kullanılmıştır. Asıltılar hazırlanırken katılan toz, toplam toz miktarının $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ ve $\frac{1}{8}$ 'i oranlarında ilave edilerek hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi için, ağırlıkça top-toz oranı 1/1 olacak şekilde 5mm çaplı zirkonya bilyeler kullanılarak 20 saat değirmende karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonunda içerisinde bilyeler olan asıltı süzgeçten geçirilerek bilyelerin asıltı içerisinden alınması sağlanmıştır.

2.3. Tanecik Boyut Dağılımı Ölçümü

PZT-5A tozunun parçacık boyut dağılımı analizi **Malvern Mastersizer 2000** cihazında yapılmıştır.

2.4. Viskozite Ölçümleri

Viskozite ölçümleri için; APC-PZT-5A tozları kullanılarak hacimce %35, %40, %45 katı ve ağırlıkça %0.4 glycerol ve ağırlıkça %0.065 sulfynol içeren değişik dağıtıcı miktarlarında 20ml'lik asıtlar hazırlanmıştır. Hazırlanan hacimce % 35 katı oranına sahip asıtlar; ağırlıkça % 0.05, 0.1, 0.14, 0.25, 0.50, 0.75, 1, ve 1.25 oranlarında dağıtıcı Darvan821A katılarak hazırlanmıştır. % 40 katı oranına sahip asıtlar; ağırlıkça % 0.1, 0.25, 0.50, 0.75, 1 ve 1.25 oranlarında dağıtıcı Darvan821A katılarak hazırlanmıştır. %45 katı oranına sahip asıtlar ise; ağırlıkça % 0.12, 0.15, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1 oranlarında dağıtıcı Darvan821A katılarak hazırlanmıştır. Asıtlar 5mm çaplı zirkonya bilyeler ile beraber bilyalı değirmende 20 saat karıştırılarak elde edilmiştir. Viskozite değerindeki değişim **Brookfield RVT** model viskozimetre cihazında 21 nolu spindel ile 0.5 / 1 / 2 / 2.5 / 4 / 5 / 10 / 20 / 50 / 100 RPM'lerde ölçülmüştür.

2.5. pH Ölçümleri

APC-PZT-5A tozları ile hazırlanan değişik dağıtıcı miktarındaki asıtların pH değerleri İmolab WTW model pHmetre cihazında ölçülmüştür.

2.6. Sedimentasyon Deneyleri

APC-PZT-5A tozları ile hazırlanan değişik katı ve dağıtıcı oranlarındaki asıtların kararlılıkların gözlenmesi için sedimentasyon deneyi yapılmıştır. Bu deneyde hazırlanan asıtlar aynı miktarlarda cam tüplere doldurulmuş ve yer çekimi etkisiyle çökelmeleri için 10 gün beklenilmiştir. Bekleme sonunda asıtlar kararlılıklarına göre çeşitli şekillerde çökelmiştir. Sediment, bulanık ve saydam kısımlarının yükseklik ölçümleri yapılmış ve asıtların oluşan sediment, bulanık ve saydam kısımları göz önüne alınarak asıtların hangi oranlardaki dağıtıcı miktarlarında en kararlı oldukları gözlemlenmiştir.

2.7. Kalıp Hazırlama

Değişik şekillerdeki parçaların üretilmesi için kalıp içerisinde oluşturulacak şekli veren modeller kullanılarak alçı kalıplar üretilmiştir. Parçaların kalıp içerisinde kurumaları tamamlandıktan sonra kalıptan çıkarılması esnasında hasara uğramalarının engellenmesi için kalıplar üretilen şekle göre 2 veya 3 bileşenli olarak üretilmiştir. Bu sayede döküm sonrası oluşan parçalar kalıp bileşenleri ayrılması vasıtası ile hasara uğramadan kalıptan kolaylıkla çıkarılmıştır. Alçı kalıbın bileşenlerinin farklı oranlarda alçı-su bileşiminden imal edilmesi durumunda bu kalıp bileşenlerinin su emme özellikleri farklı olacaktır. Bu durum döküm parçalarının duvar kalınlıklarının homojen olmamasına sebep olmaktadır.. Bu sebeple tüm parçalar için üretilen kalıpların bileşenlerinin tamamı toz alçı / su oranı 1.5 / 1 olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu şekilde bir ucu konik tüp, bir ucu yarım küresel tüp, iki ucu açık tüp ve içi boş ince cidarlı küre şekillerinde parçaların üretilmesi için gerekli kalıplar dizayn edilmiş ve üretilmiştir.

2.8. Asıltı Dökümün Uygulanması

LM-PZT-5A ve APC-PZT-5A ile hazırlanan hacimce % 35 toz oranına sahip asıltılar önceden hazırlanan alçı kalıplara dökülerek asıltı döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Asıltı kalıp içerisinde iken; asıltıya temas eden kalıp yüzeyleri sürekli olarak asıltı içerisindeki suyu emmektedir. Bu durumda kalıp içerisindeki asıltı seviyesi döküm süresi boyunca azalmaktadır. Asıltı seviyesinin azalması kalınlık oluşumunda homojensizliğe sebep olmaktadır. Bu durumun oluşmaması yani üretilen parçalarda homojen kalınlık elde edilebilmesi için asıltının kalıp içinde bekletildiği süre zarfında kalıp boşluğunun tamamı asıltı ile dolu olacak şekilde kalıp içerisindeki asıltı seviyesi düştükçe kalıp içerisine sürekli asıltı takviyesi yapılmıştır. Asıltılar önceden hazırlanan kalıplar içerisine dökülerek 1dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika bekletilerek farklı kalınlıklara sahip bir ucu konik tüp, bir ucu yarım küresel tüp, iki ucu açık tüp ve içi boş ince cidarlı küre şekillerinde parçalar üretilmiştir. Üretilen parçalardan konik tüp, tüp1 ve silindir1 LM-PZT-5A

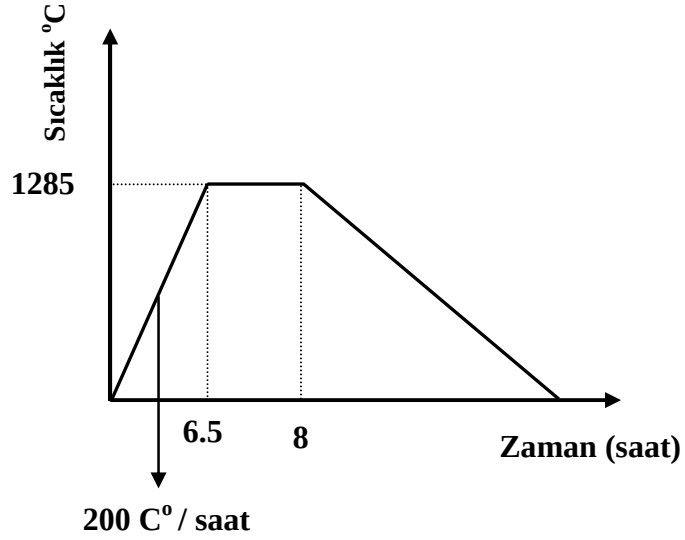
tozu, tüp2, tüp3, tüp4 ve silindir2 parçaları APC-PZT-5A tozu kullanılarak üretilmiştir. Üretilen parçalar sonuçlar ve irdelenmesi kısmında görülmektedir.

2.9. Döküm Süresi-Oluşan Kalınlık İlişkisi

Bu deneyde hacimce % 35 katı oranına sahip asıltı kullanılmış ve döküm süresi (asıltının kalıp içerisinde bekletildiği süre) arttırıldıkça oluşan kalınlığın arttığı gözlenmiştir. Asıltının kalıp içerisinde bekletilme zamanı ile oluşan kalınlık arasındaki değişimi incelemek için, aynı bileşimde hazırlanan (toz alçı / su oranı aynı) 4 alçı kalıp, hazırlanan asıltı ile doldurulmuş ve bekleme sürelerince asıltı seviyesi sabit tutulacak şekilde sürekli asıltı yüklemesi yapılmıştır. Birinci kalıp içerisindeki asıltı 1 dakika , ikinci kalıp içerisindeki asıltı 3 dakika, üçüncü kalıp içerisindeki asıltı 5 dakika, dördüncü kalıp içerisindeki asıltı 10 dakika kalıp içerisinde bekletilmiş ve bu zamanlar nispetinde kalınlıkların oluşumu sağlanmıştır. Parçalar kuruduktan sonra oluşan kalınlıklar ölçülmüş ve asıltının kalıp içinde bekleme süresi ile oluşan kalınlık miktarı ilişkilendirilmiştir

2.10. Sinterleme

Oda sıcaklığında kurumaları tamamlanan parçalar 1285 °C' sıcaklıkta 90 dakika sinterlenmişlerdir. Fırının ısıtma hızı 200 °C / saat olarak uygulanmıştır. Uygulanan sinterleme rejimi şekil 2.1. de görülmektedir. Sinterleme işlemlerinde **Nabertherm model elektrik ısıtmalı fırın** kullanılmıştır. Uygulanan sinterleme sıcaklığında yapıda bulunan kurşunun (Pb) bir kısmı difüzyon ile yapıyı terk etmektedir. Bu durum sinterlenen parçalarda kurşun eksikliğine neden olmaktadır. Bahsedilen olumsuz durumun oluşmaması için parçaların sinterleme işlemleri alümina potalar içerisinde 1,8 / 1 oranlarında Kurşunoksit-Zirkonyumoksit (PbO- ZrO₂) içeren toz karışımının yarattığı atmosferde yapılmıştır.



Şekil 2.1 Sinterleme rejimi

2.11. Çekilme Miktarları

Sinterleme öncesi çap ve kalınlıkları ölçülmüş parçaların, sinterleme sonrası tekrar çap ve kalınlıkları ölçülerek bu ölçümlerin farkları göz önüne alınarak sinterleme aşamasında meydana gelen çekilme miktarı belirlenmiştir.

2.12. Mikroyapı İncelemesi

Üretilen parçaların mikroyapıları Philips XL 30 S FEG Tarama Elektron Mikroskobu ile incelenmiştir.

2.13. Elektrotlama

Üretilen parçaların kutuplama işlemine tabi tutulabilmeleri için yüzeylerinin iletken hale getirilmeleri gerekmektedir. Bunun sebebi; parçaların kutuplama işlemine tabi tutulduklarında üzerlerinden bir elektrik gerilimin geçirilmesidir. Yüzeylerin tamamından elektrik alanın geçmesi parçanın tamamen kutuplanabilmesi

için çok önemlidir. Yüzeylerin iletken hale getirilmesi parçaların yüzeylerinin elektrotlanması ile sağlanır. Üretilen parçaların iç ve dış yüzeyleri hiç elektrotlanmamış bölge kalmayacak şekilde gümüş pasta ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi; gümüş pastanın katılan çok az miktar aseton ile incelilerek fırça ile parça yüzeylerine sürülmesi yoluyla yapılmıştır. Yüzeylerin tamamının kaplanabilmesi ve yeterli elektrot kalınlığına ulaşılabilmesi için gümüş pasta ile kaplama işlemi tüm parçalar için 3 kez tekrarlanmıştır. Kaplama tamamlandıktan sonra kaplanan tabaka kurumaya bırakılmıştır. Kuruma sonrası parçalar 600 °C’de 30 dakika fırınlanarak kaplanan yüzeylerin tamamının ince bir gümüş tabakası halinde elektrotlanması sağlanmıştır.

2.14. Kapasitans Ölçümleri

Elektrotlanmış parçaların kutuplama öncesi ve sonrası kapasitans ölçümleri HP 4194A, Impedance/Gain-Phase Analyzer cihazında 1kHz’de yapılmıştır.

2.15. Kutuplama

Elektrotlanmış parçaların kutuplama işlemi, 115 °C’ deki yağ ısıtma banyosunda 10 dakika boyunca 25 kV/cm elektrik alanı uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

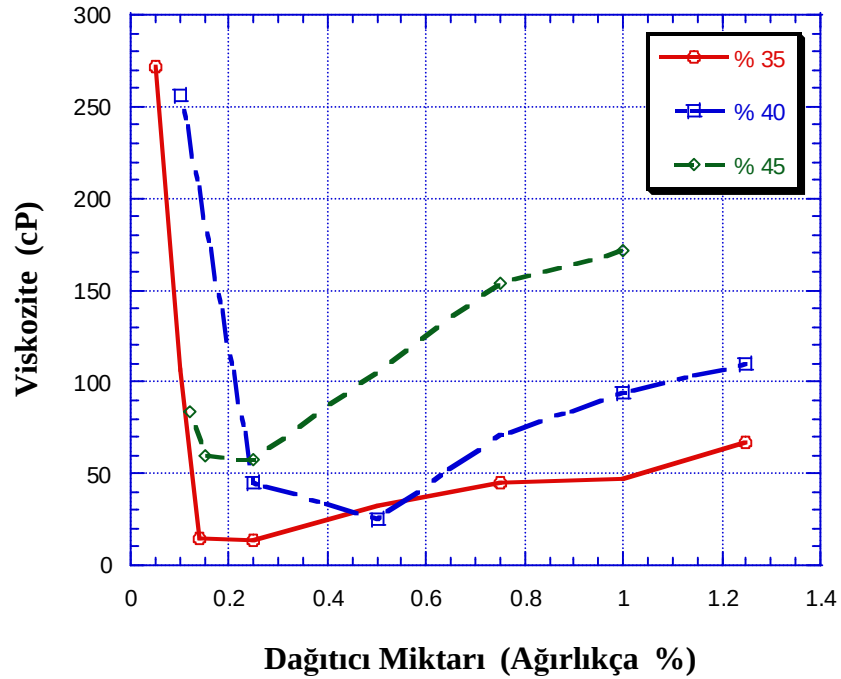
2.16. Rezonas ve Antirezonas Frekanslarının Ölçümü

Parçaların rezonans ve antirezonans frekanslarının ölçümleri HP 4194A, Impedance/Gain-Phase Analyzer cihazında yapılmıştır.

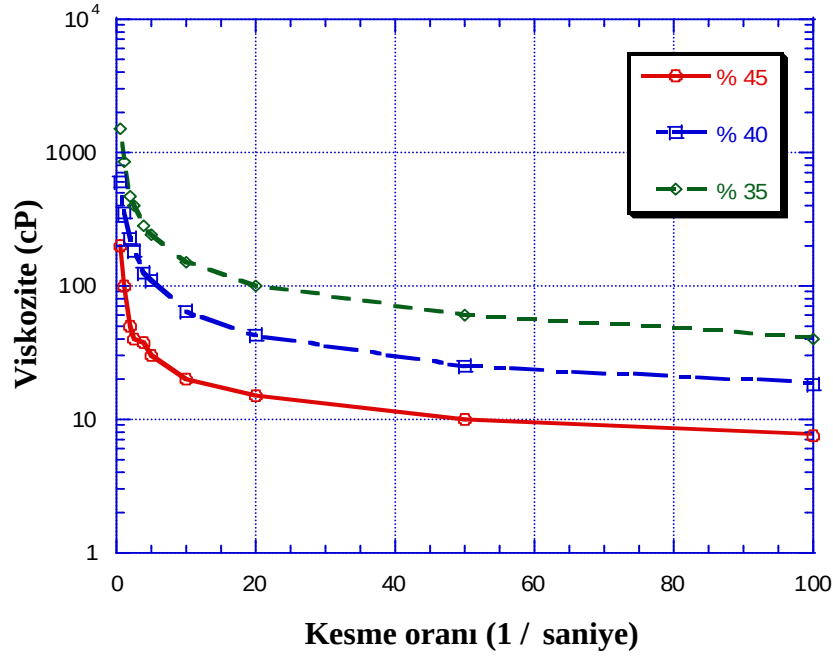
3. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

3.1. Viskozite Ölçümü Sonuçları

Asıltı döküm yönteminde asıltıların kalıbın tamamını doldurabilmeleri için viskozite değerlerinin yeterince düşük olması gerekmektedir. APC-PZT-5A toz kullanılarak hacimce %35, %40, %45 toz içeren asıltılar hazırlanmış ve bu asıltılara ilave edilmesi gereken dağıtıcı (dispersant) Darvan821A miktarının belirlenmesi için viskozite ölçümleri yapılmıştır. Değişik katı oranlarındaki asıltıların 50 Rpm’de alınan viskozite değerlerinin ilave edilen Darvan821A miktarı ile değişimi şekil 3.1’de görülmektedir. Şekil 3.1 de verilen ölçüm sonuçlarına göre hacimce %35 ve %45 toz oranına sahip asıltılarda toplam asıltı ağırlığının % 0.25’i, hacimce % 40 toz içeren asıltılarda toplam ağırlığın % 0.5’i oranında dağıtıcı yeterli bulunmuştur. Ayrıca şekil 3.2 de verilen ölçüm sonucuna göre bu asıltıların pseudoplastic davranış [artan kesme oranına (shear rate) karşın viskozitenin azalması] gösterdiği belirlenmiştir.



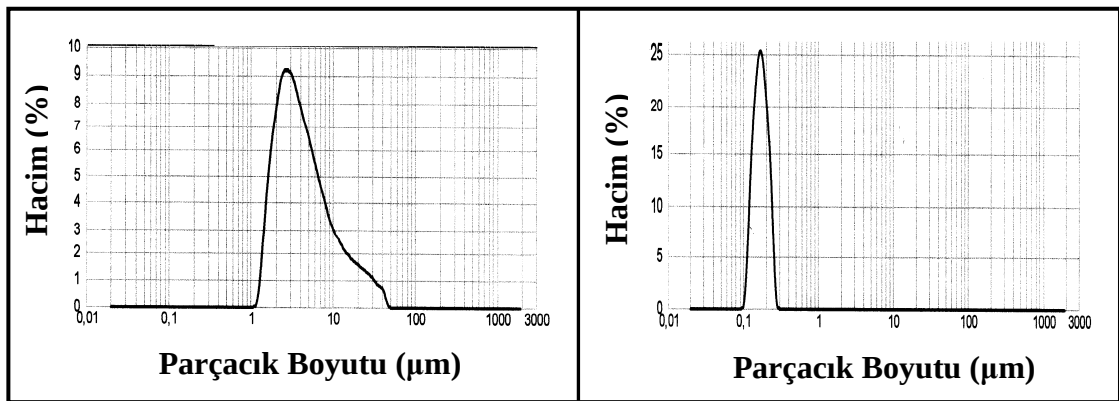
Şekil 3.1. Değişen dağıtıcı miktarına bağlı olarak asıltıların viskozitelerindeki değişim



Şekil 3.2. Asıtların gösterdikleri pseudoplastic davranış

3.2 Parçacık Boyut Dağılımı Analizi Sonuçları

APC-PZT-5A tozuna ait parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil 3.3.'de gösterilmektedir. Başlangıç tozlarının boyut dağılımının uniform olduğu ve karıştırma işlemi sonrası asıltı içerisindeki tozların boyut dağılımının düştüğü grafiklerde görülmektedir.



(a) Başlangıç

(b) Karıştırma Sonrası

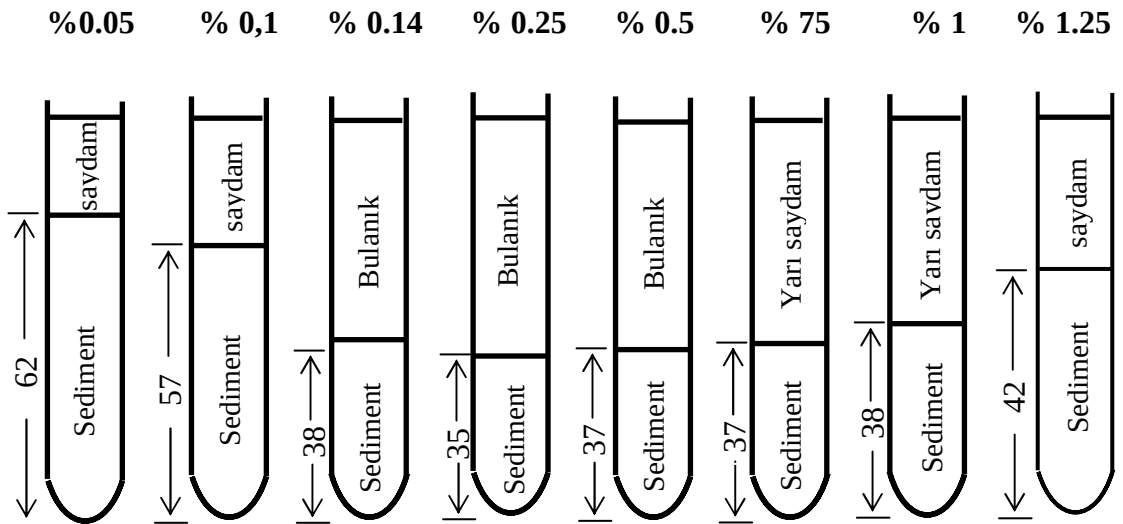
Şekil 3.3. Kullanılan APC-PZT-5A tozuna ait parçacık boyut dağılım grafiği

3.3. pH Ölçümlerinin Sonuçları

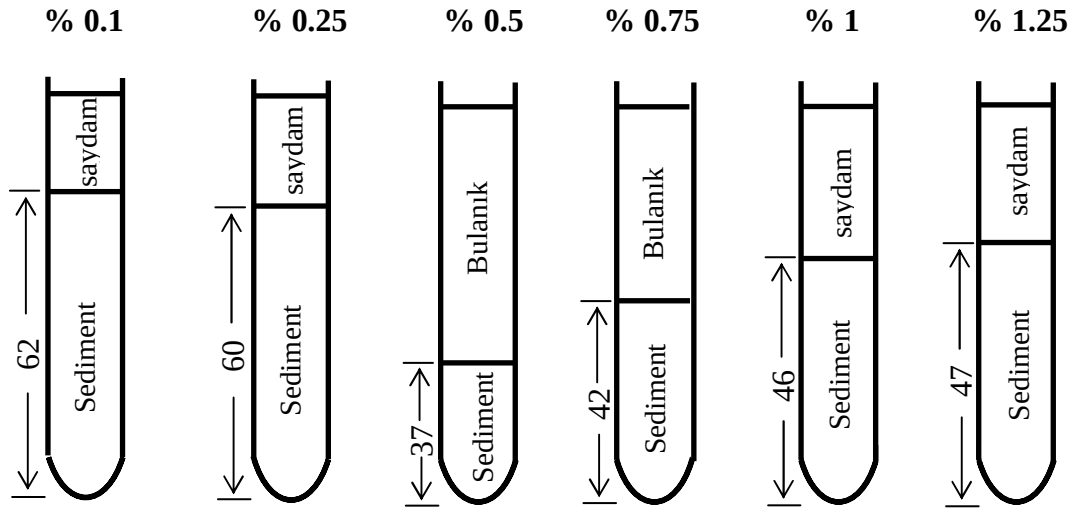
Literatürde; zeta potansiyeli ve pH ölçüm sonuçlarına göre PZT tozlarıyla hazırlanacak asıtların bazik şartlarda hazırlanması gerektiği belirtilmektedir [Abonoz D. et al 2002]. Hazırlanan hacimce %35, %40 ve %45 toz oranına sahip asıtların en karalı dağılım gösterdikleri dağıtıcı miktarlarında ölçülen pH değerlerinin tümünün 8.8 den büyük değerlerde olduğu ölçümlerle belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatürde belirtilen sonuçla uyum sağlamaktadır. Ayrıca asıtların kararlı dağılımlarını uzun süre devam ettirmeleri sebebiyle bu pH değerlerinin yeterli bazik şartlar olduğu sonucuna varılmıştır.

3.4. Sedimentasyon Deneyleri Sonuçları

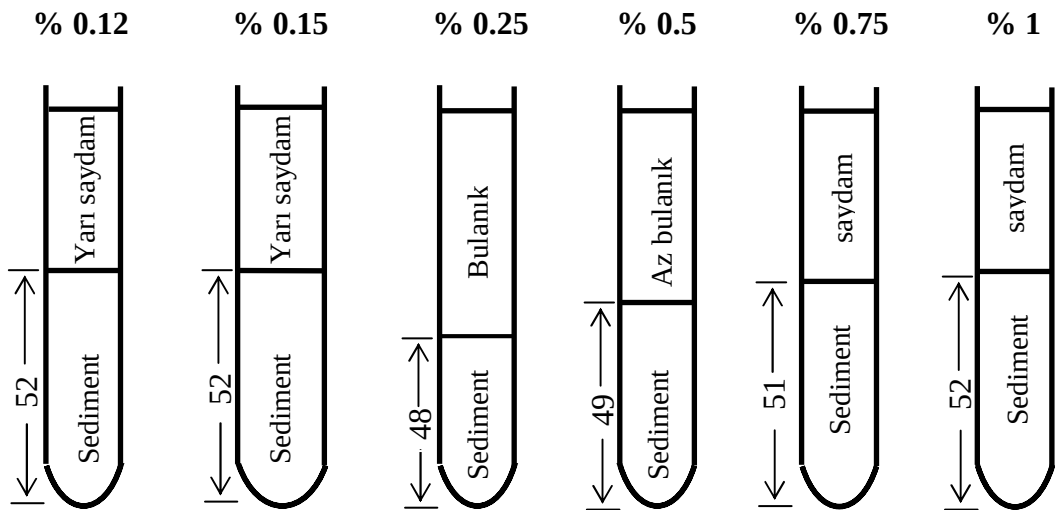
Değişik oranlarda dağıtıcı içeren asıtlarının, cam tüpler içerisinde 10 günlük sedimentasyon süresi sonunda kararlılık durumları aşağıdaki şekillerdeki gibi gözlenmiştir. Her tüpteki asıtlı miktarı (yüksekliği) 68 mm ve verilen asıtlı yükseklikleri mm cinsindendir.



Hacimce % 35'lik değişik dağıtıcı miktarlarındaki asıtların sedimentasyonu



Hacimce % 40'lık değişik dağıtıcı miktarlarındaki asıtların sedimantasyonu



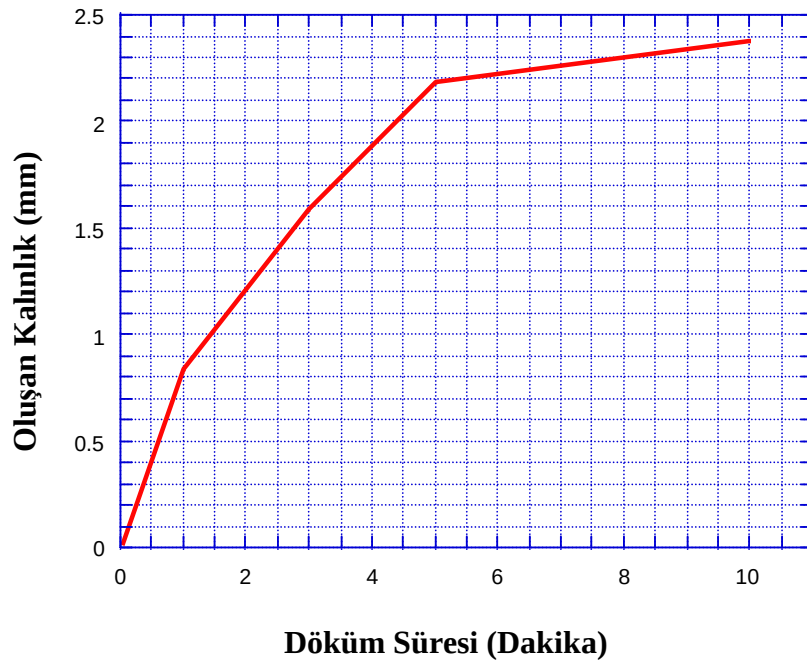
Hacimce % 45'lik değişik dağıtıcı miktarlarındaki asıtların sedimantasyonu

Şekil 3.4. Asıtların sedimantasyonları

Yapılan viskozite ve sedimantasyon deneyleri sonucunda; hacimce % 35 ve % 45 oranlarına sahip asıltı hazırlamada toplam asıltı ağırlığının % 0.25'i oranında, hacimce % 40 toz içeren asıtlılarda ise toplam asıltı ağırlığının % 0.5' i oranında dağıtıcı Darvan821A ilavesi yeterli bulunmuştur.

3.5. Kalınlık Oluşumu-Döküm Süresi Sonuçları

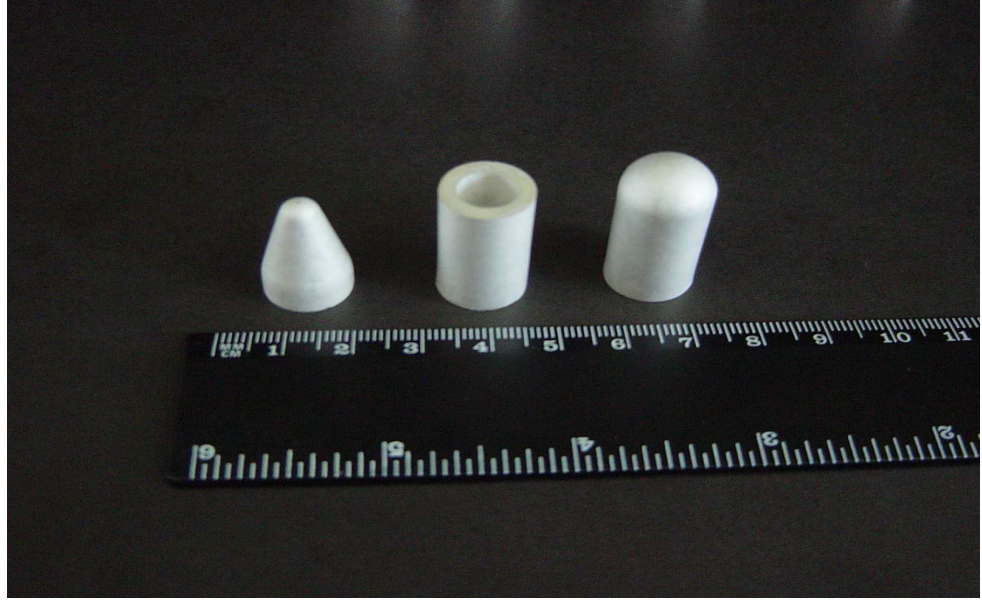
Hazırlanan hacimce % 35 toz oranına sahip asıltı, döküm süreleri 1 dakika, 3 dakika, 5 dakika, 10 dakika olacak şekilde kalıplar içerisinde bekletilmiş oluşan kalınlıklar ölçülerek döküm süresi – oluşan kalınlık ilişkisi Şekil 3.5’deki gibi belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Döküm süresine bağlı olarak oluşan kalınlık

3.6. Sinterleme

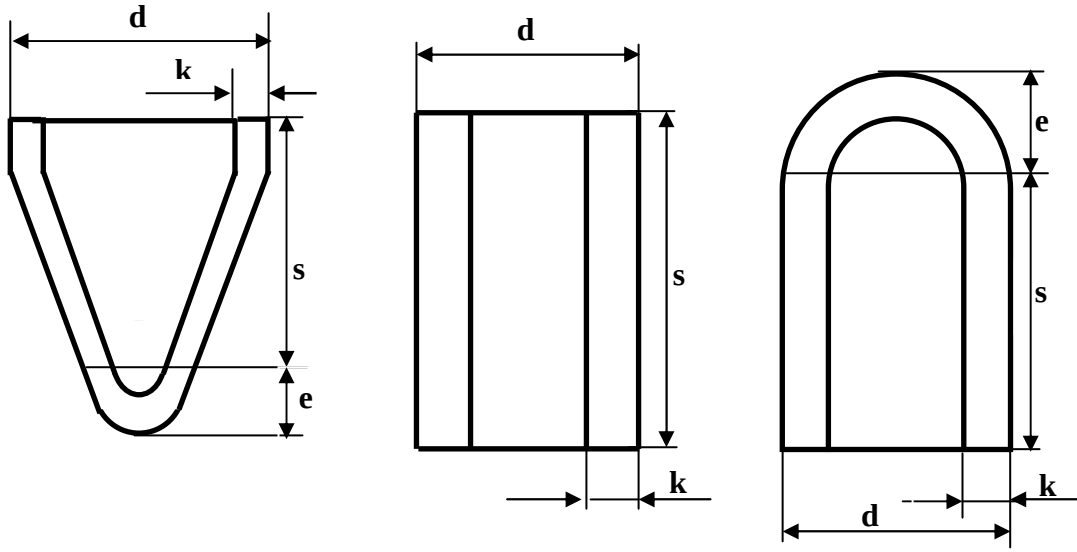
Oda şartlarında kurutulan döküm parçaları, 200°C / saat ısıtma hızıyla 1285 °C'ye çıkılarak bu sıcaklıkta 90 dakika kurşun atmosferinde sinterlenmiştir. Soğuma sonrası sinterlenen parçaların şekillerini tamamen muhafaza ettikleri ve sinterlemeden kaynaklanan herhangi bir kusur, şekil değişimi veya çarpılma oluşmadığı görülmüştür. Sinterlenmiş ve elektrotlanmış parçalar Şekil 3.6. ve Şekil 3.7. de görülmektedir. Ayrıca Üretilen parçaların şekilleri, boyutları ve kullanılan malzeme olarak Şekil 3.8 ve Tablo 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.6. APC-5A ile üretilen konik, silindirik ve yarım küresel başlı tüpler



Şekil 3.7. APC-5A ile üretilen yaş halde (solda) ve sinterlenmiş (ortada),
LM-PZT-5A ile üretilen (sağda) içi boş küreler.



Şekil 3.8. Üretilen parçaların şekilleri

Tablo 3.1. Üretilen parçaların malzemesi ve boyutları

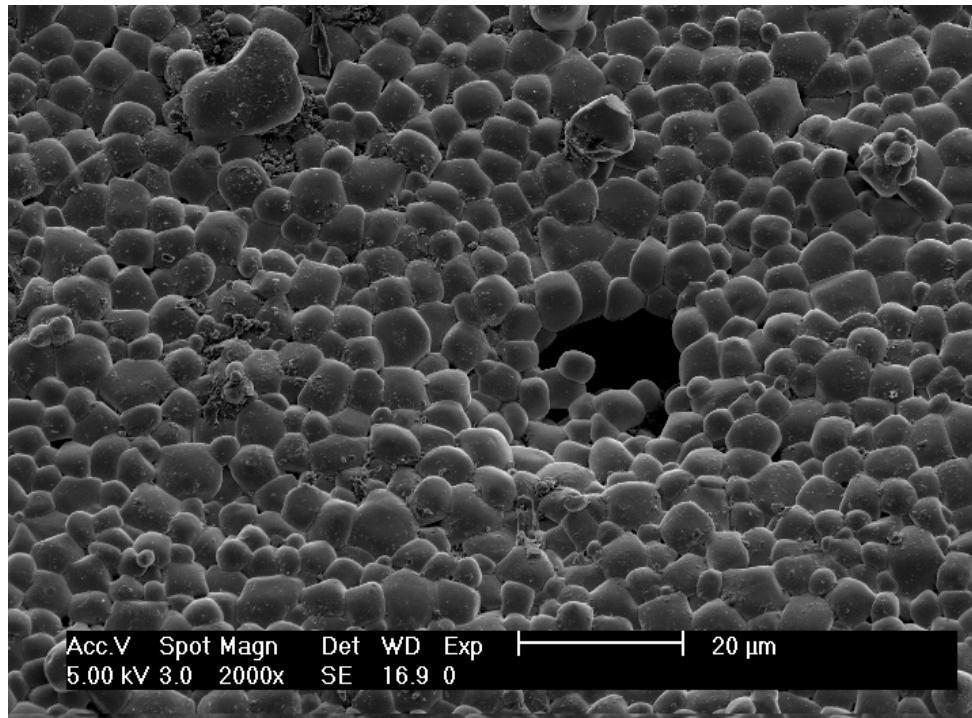
Parça	Malzeme	d (mm)	s (mm)	e (mm)	k (mm)
Konik	LM-PZT-5A	13.86	23.20	3.49	1.68
Tüp 1	LM-PZT-5A	11.87	22.63	4.22	1.87
Tüp 2	APC-PZT-5A	13.90	24.05	5.22	1.14
Tüp 3	APC-PZT-5A	13.92	24.05	5.23	1.88
Tüp 4	APC-PZT-5A	13.94	24.00	5.22	2.34
Silindir 1	LM-PZT-5A	11.01	18.27	-	1.82
Silindir 2	APC-PZT-5A	13.64	24.02	-	2.33

3.7. Çekilme Oranı Deneyi Sonuçları

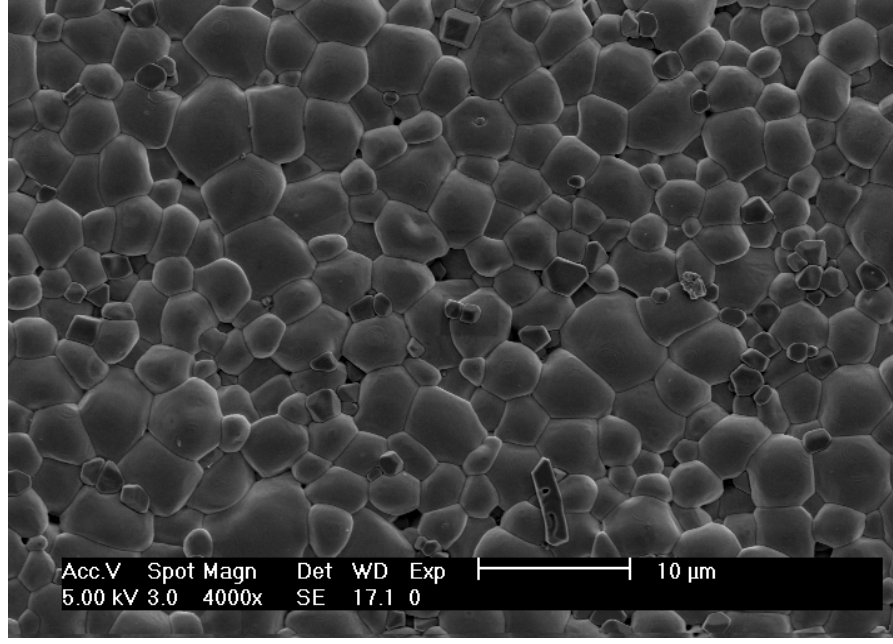
Çekilme miktarının hesaplanabilmesi üretilen parçaların sinterleme öncesi ve sonrası boyutları ölçülerek sinterlemeden kaynaklanan çekilme miktarı hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlere göre parçaların sinterleme aşamasında % 13 oranında çekilmeye uğradıkları belirlenmiştir.

3.8. Taramalı Elektron Mikroskop Çalışması Sonuçları

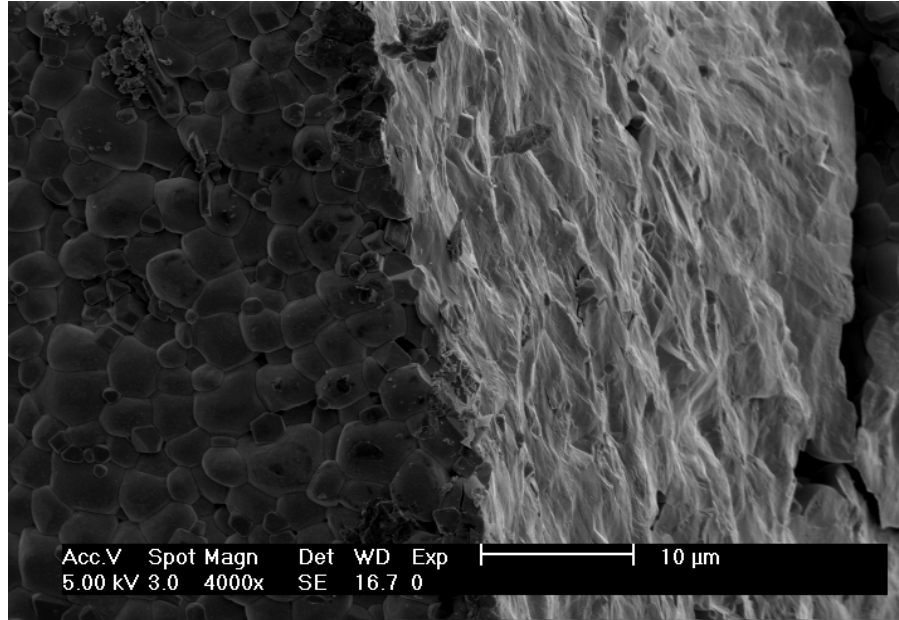
Sinterlenen parçaların elektron mikroskobu ile mikroyapılarını içeren görüntüler incelenmiş, bu parçalarda yoğun ve gözeneksiz bir yapının elde edildiği belirlenmiştir.



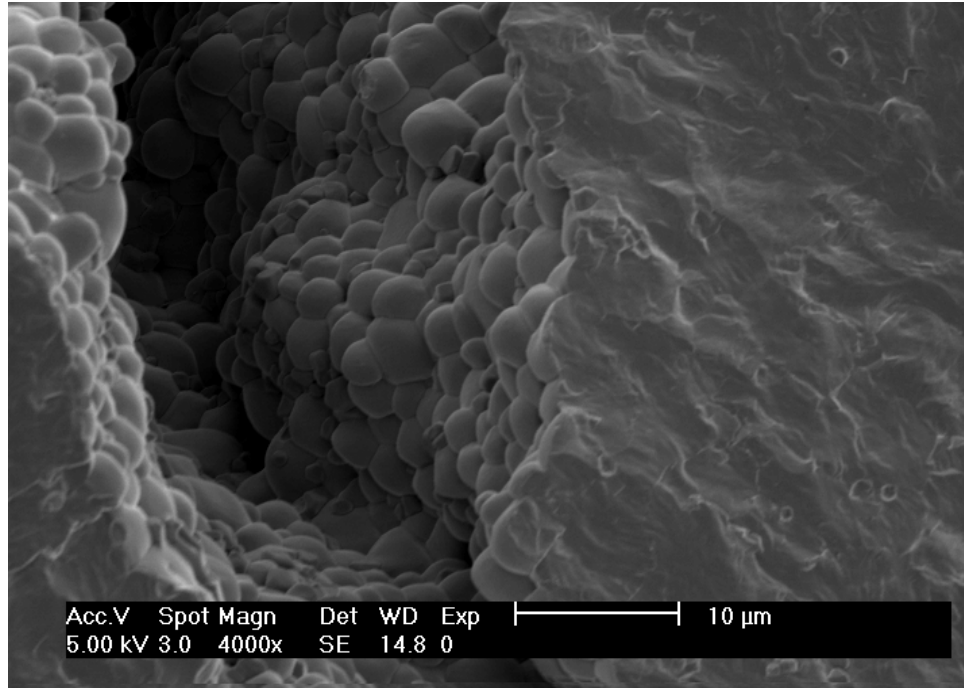
Şekil 3.9. Numunenin dış yüzeyinin mikroyapı görüntüsü



Şekil 3.10. Numunenin iç yüzeyinin mikroyapı görüntüsü



Şekil 3.11 Numunenin kırık kesitinin mikroyapı görüntüsü



Şekil 3.12 Numunenin kırık yüzeyinin mikroyapı görüntüsü

3.9. Kapasitans Ölçüm Sonuçları

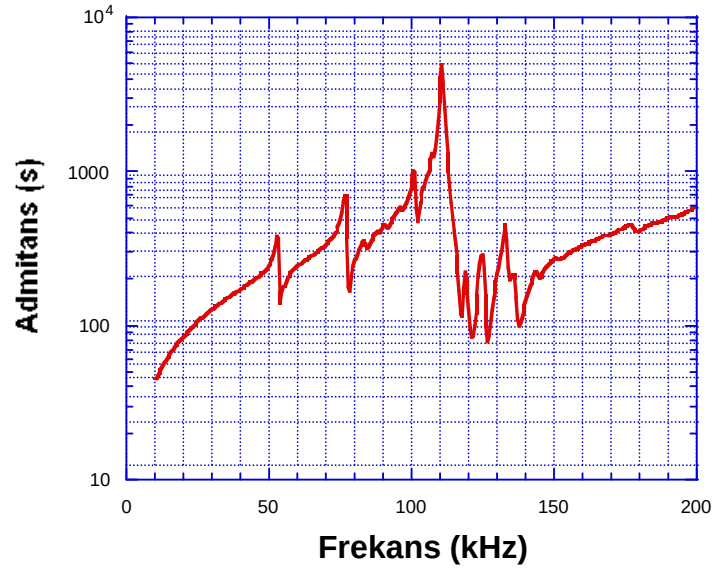
Parçaların, kutuplama öncesi ve sonrası yapılan kapasitans ölçümü sonuçları aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.2. Üretilen Parçaların Kapasitans Ölçüm Sonuçları

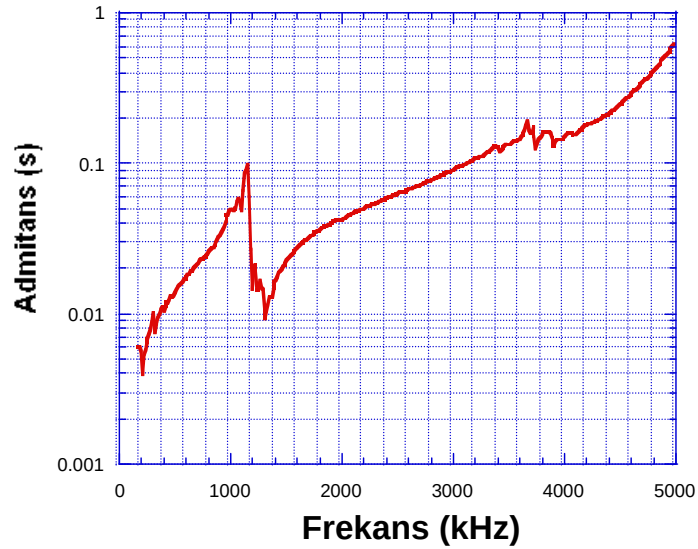
	Kutuplama Öncesi		Kapasitans (nF)	
Parça	1 Khz	10 Khz	Kutuplama Sonrası	Kapasitans (nF)
Konik	4,71	4,55	6,46	6,3
Tüp1	4,63	4,5	5,75	5,65
Tüp2	11,39	11		
Tüp3	6,89	6,70	9,99	9,85
Tüp4	4,65	4,53	6,72	6,62
Silindir1	3,3	3,2	4,13	4,05
Silindir2	3,92	3,81	5,65	5,56

3.10. Rezonans ve Antirezonans Frekansları

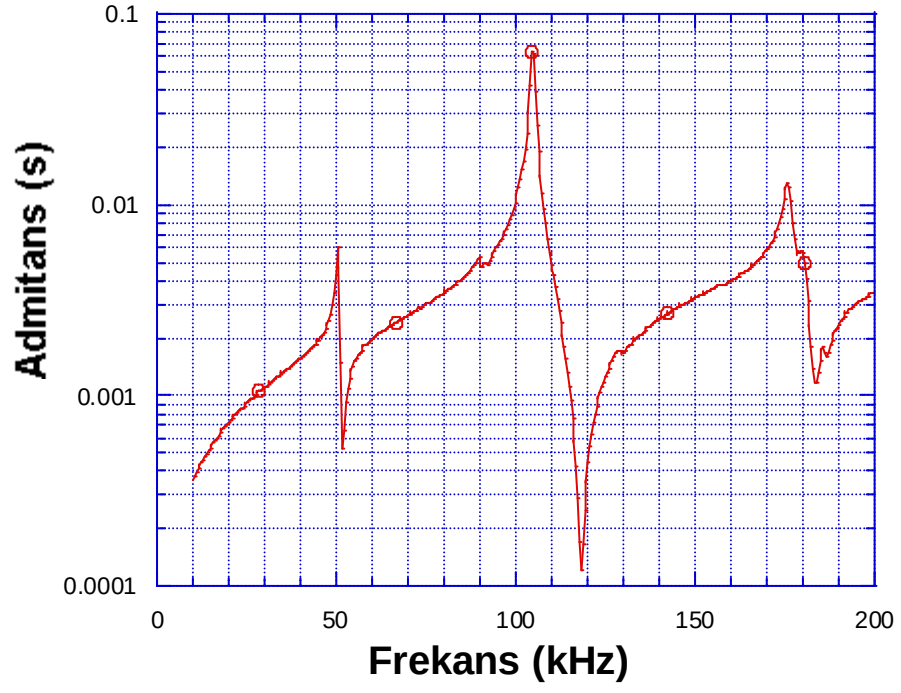
Kutuplama sonrası parçaların rezonans ve antirezonans frekansları frekans spektrumunda admitans ölçümleri ile aşağıdaki grafiklerdeki gibi belirlenmiştir.



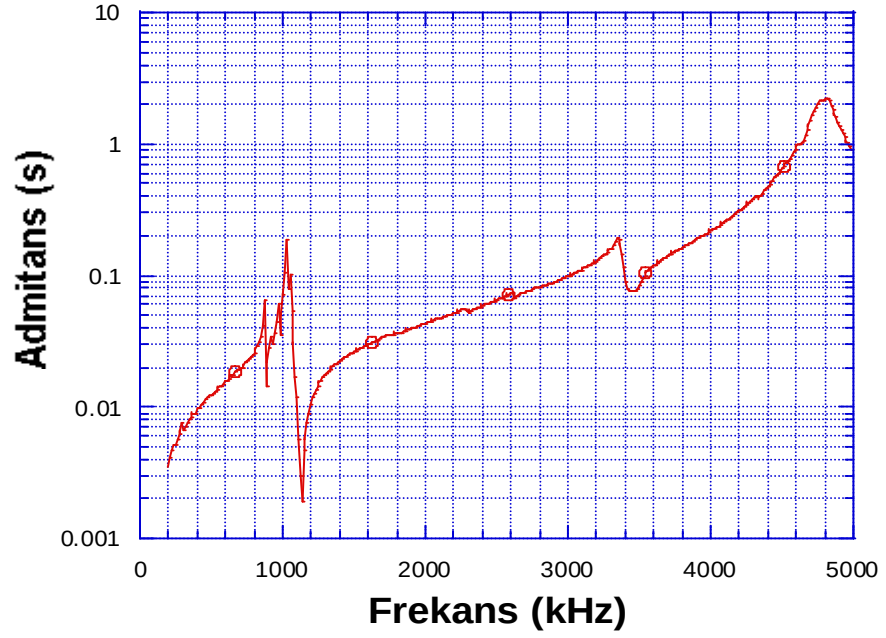
Şekil 3.13. Konik tüp 10 kHz-200 kHz admitans grafiği



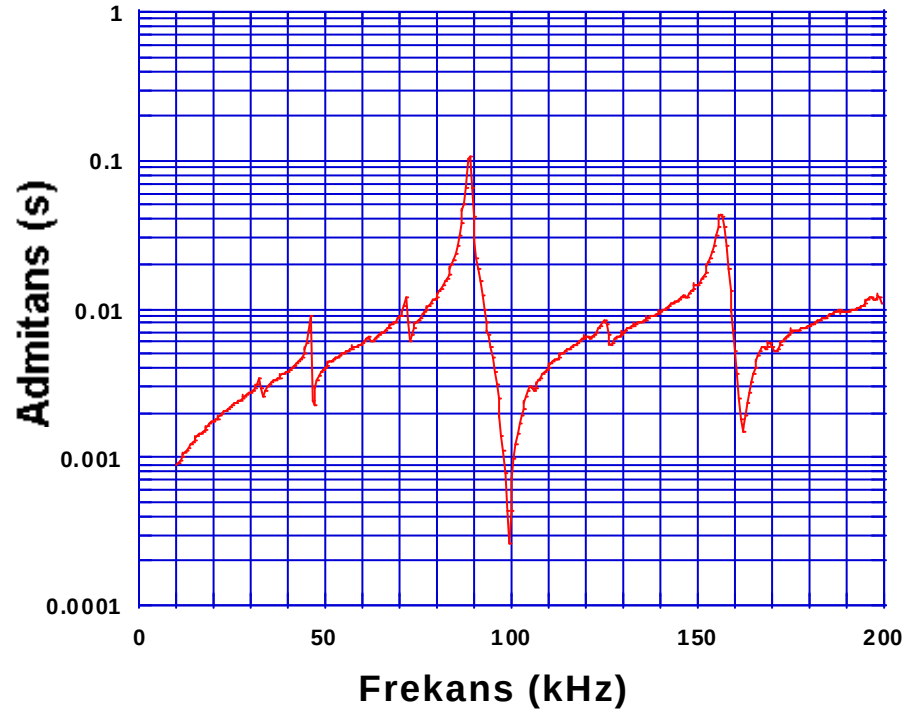
Şekil 3.14. Konik tüp 200 kHz-5000 kHz admitans grafiği



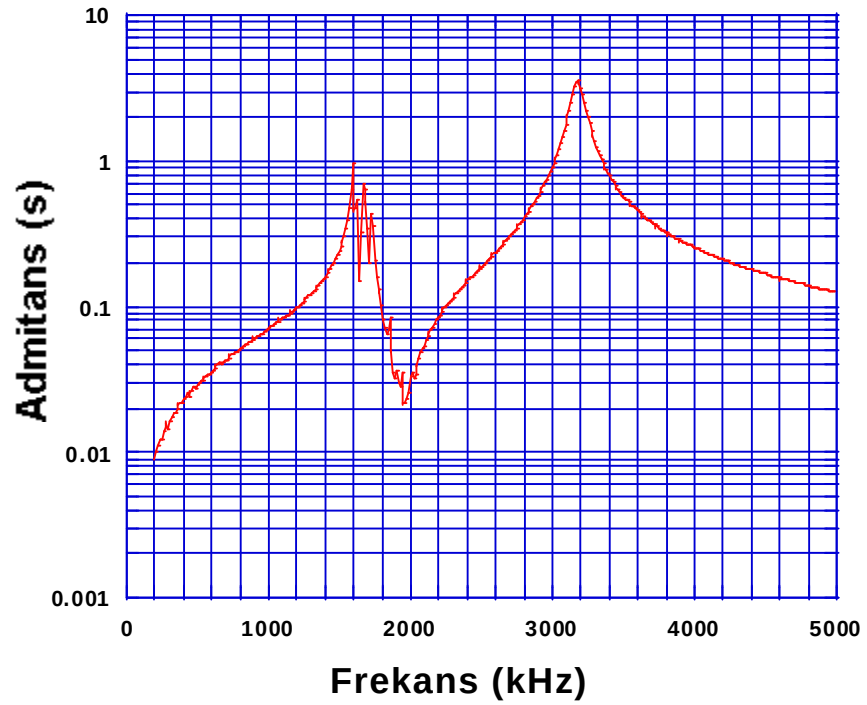
Şekil 3.15. Tüp1 10 kHz-200 kHz admitans grafiği



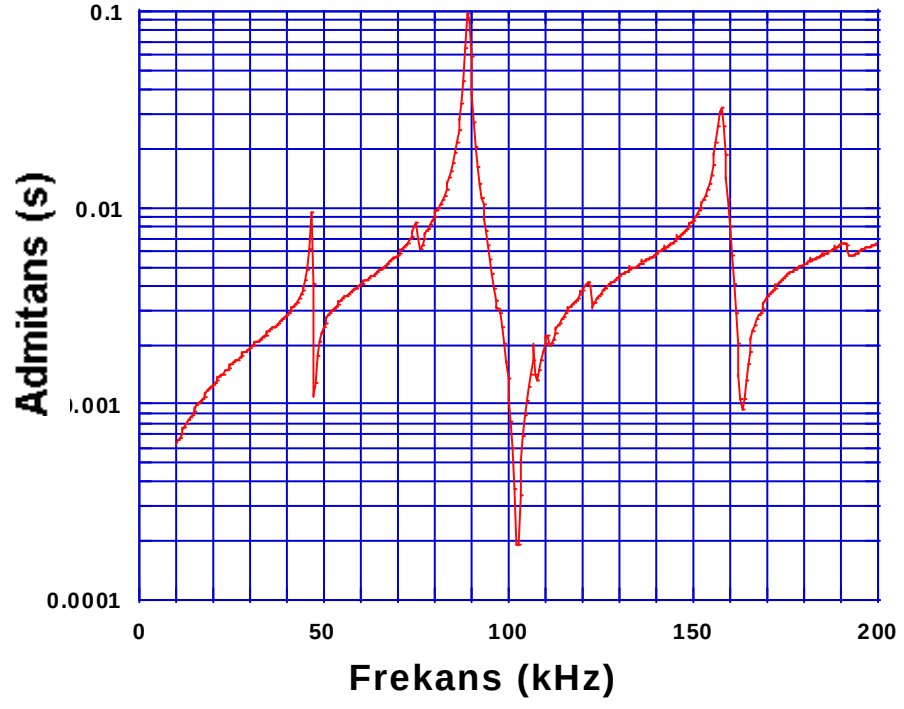
Şekil 3.16. Tüp1 200 kHz-5000 kHz admitans grafiği



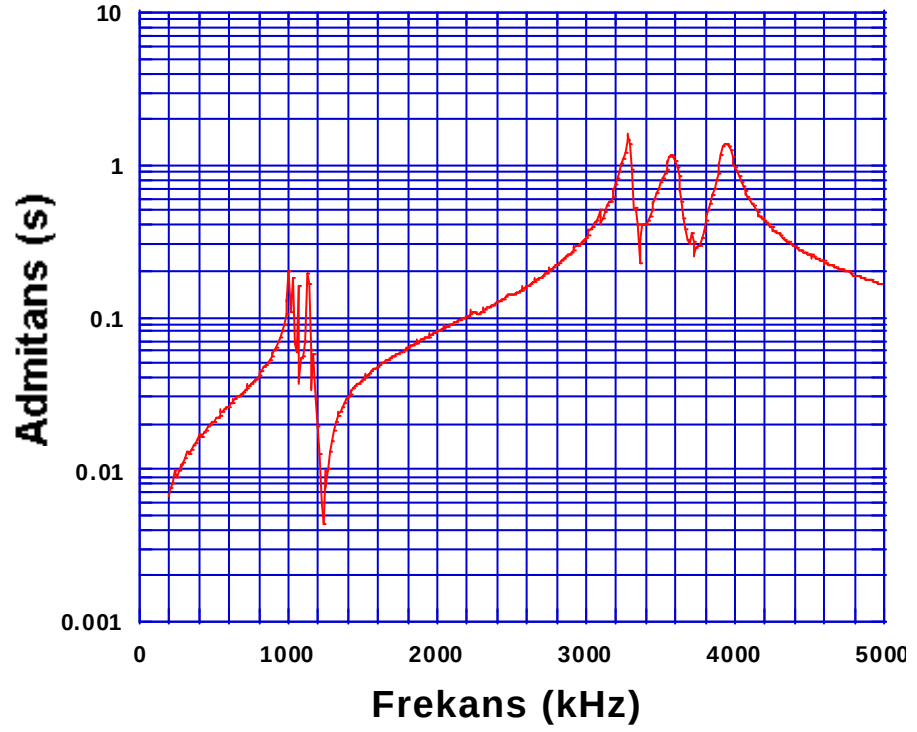
Şekil 3.17. Tüp2 10 kHz-200 kHz admitans grafiği



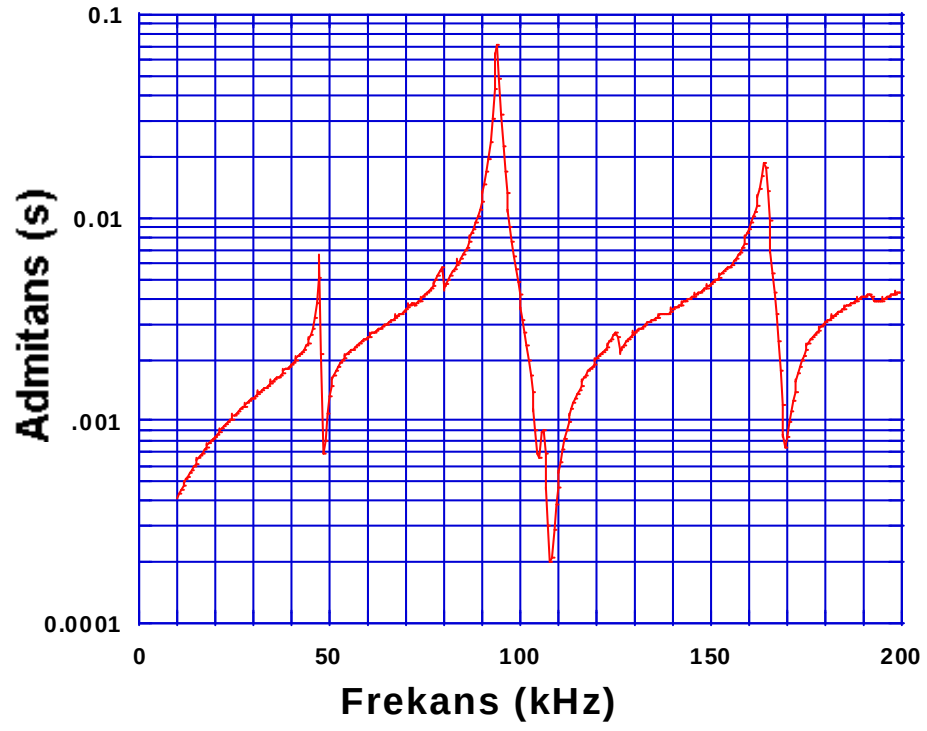
Şekil 3.18. Tüp2 200 kHz- 5000 kHz admitans grafiği



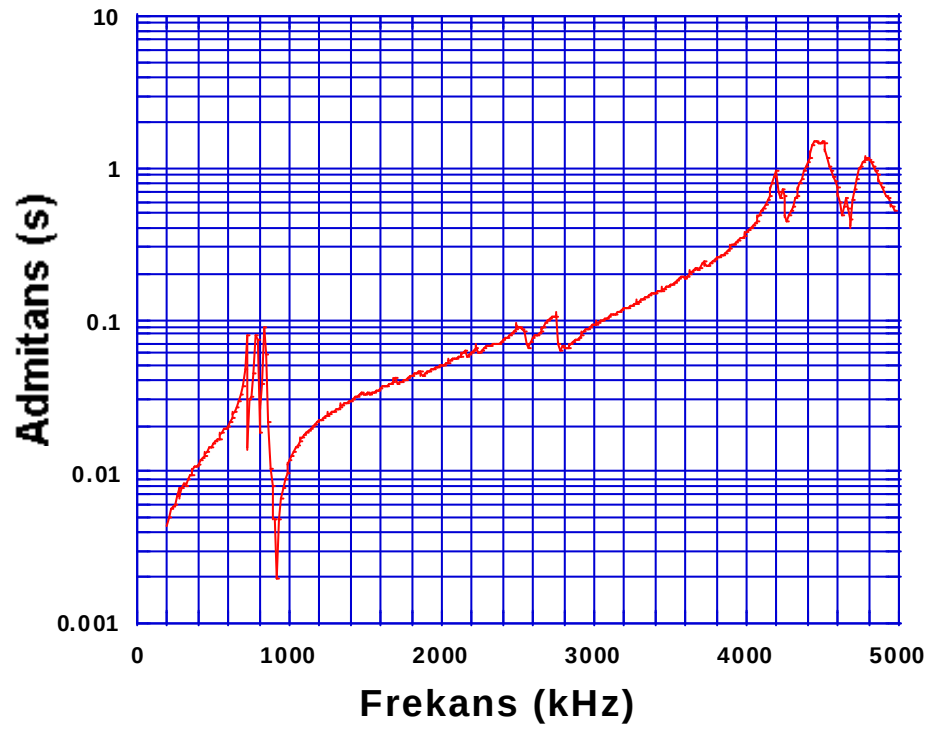
Şekil 3.19. Tüp3 10 kHz-200 kHz admitans grafiği



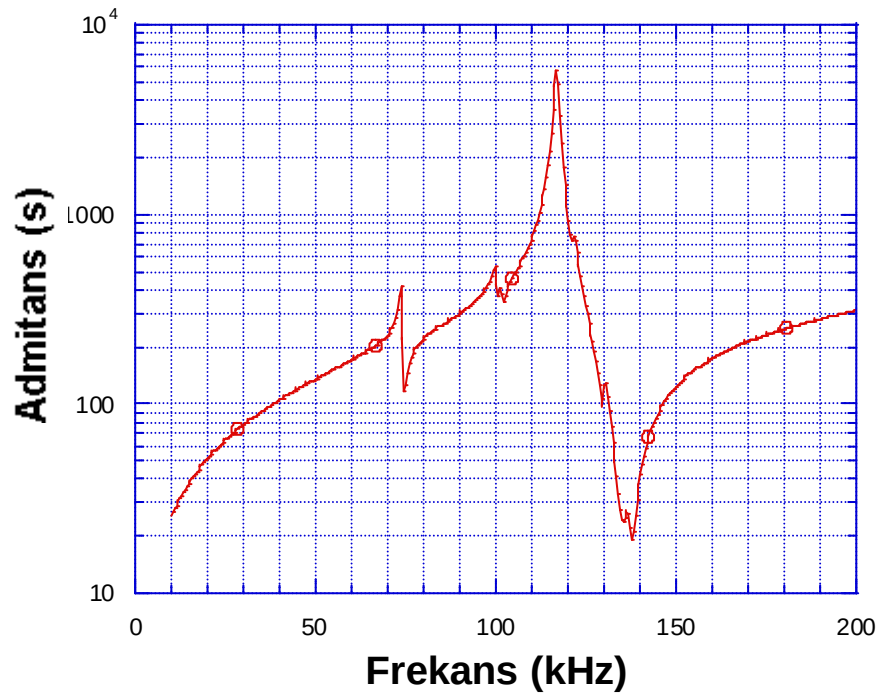
Şekil 3.20. Tüp3 200 kHz-5000 kHz admitans grafiği



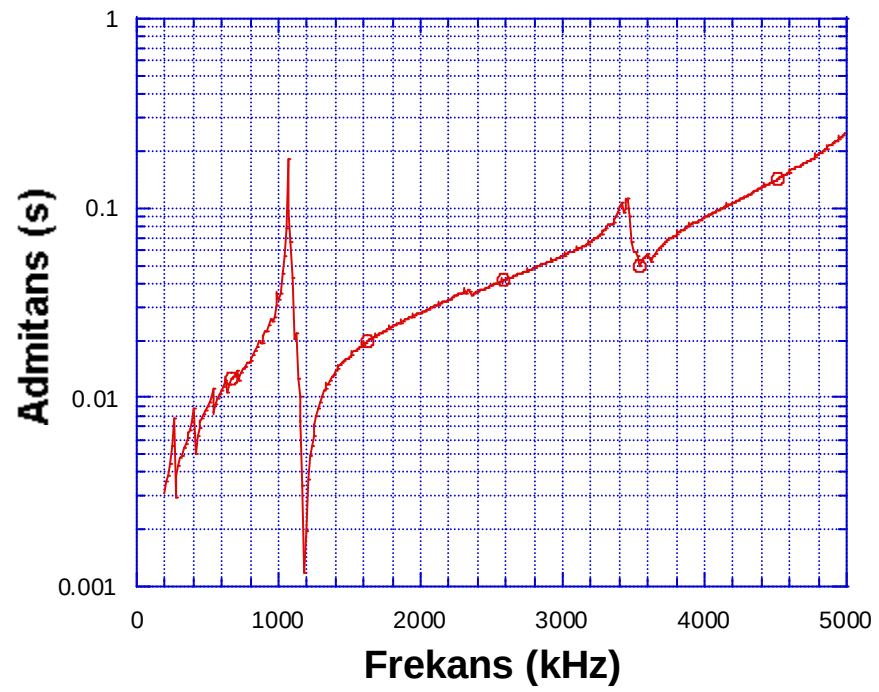
Şekil 3.21. Tüp4 10 kHz-200 kHz admitans grafiği



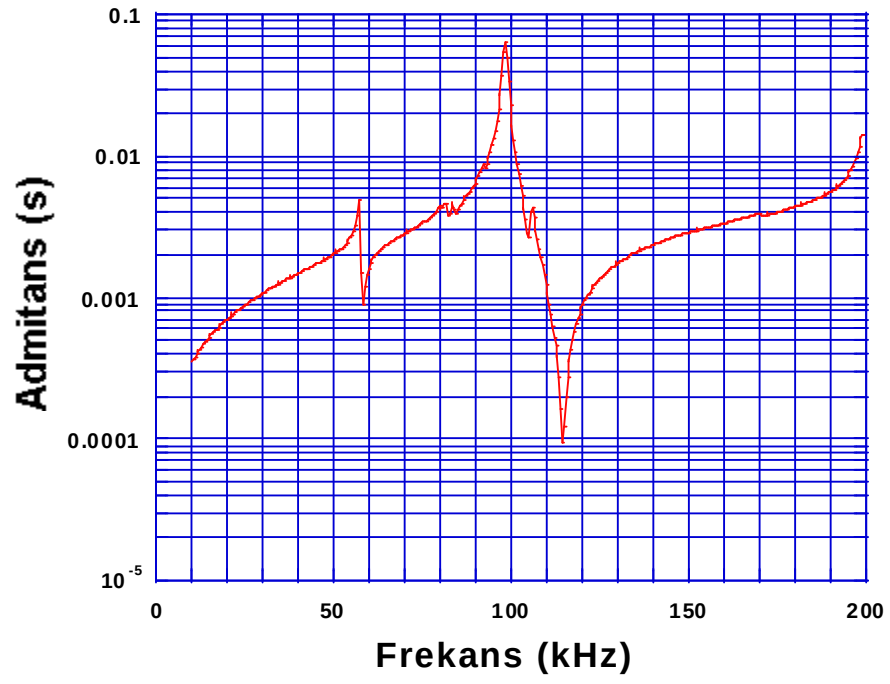
Şekil 3.22. Tüp4 200 kHz-5000 kHz admitans grafiği



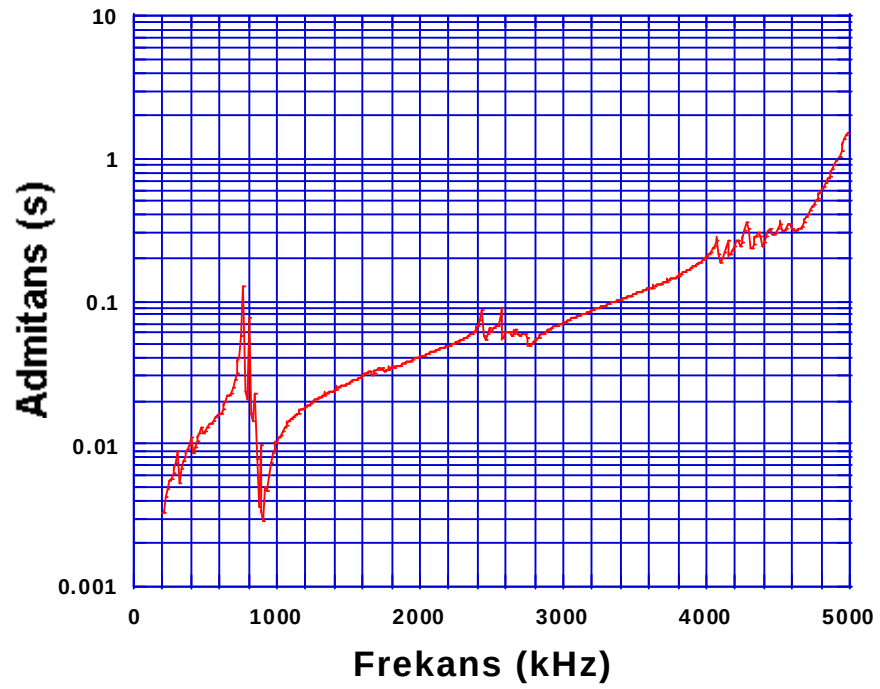
Şekil 3.23. Silindir1 10 kHz–200 kHz admitans grafiği



Şekil 3.24. Silindir1 200 kHz–5000 kHz admitans grafiği



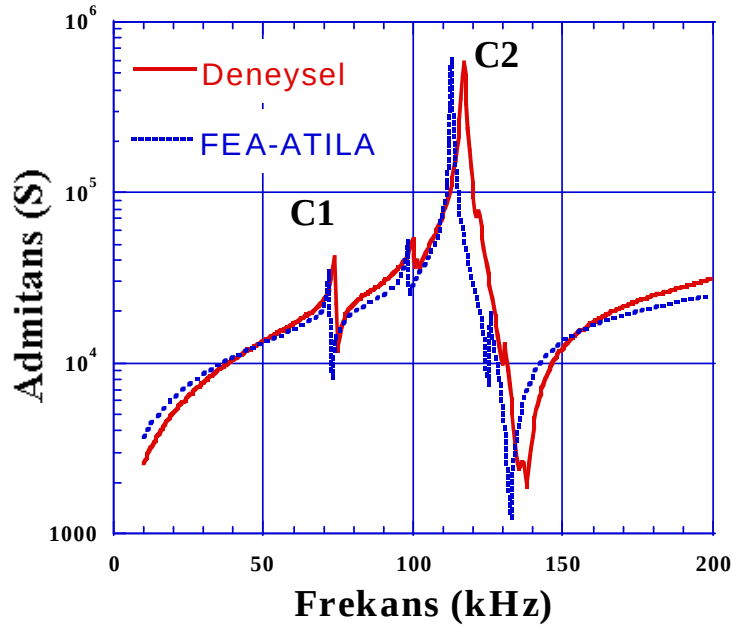
Şekil 3.25. Silindir2 10 kHz-200 kHz admitans grafiği



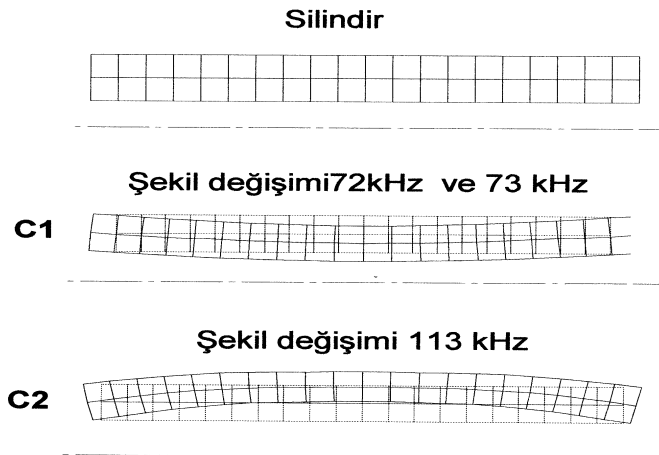
Şekil 3.26. Silindir2 200 kHz-5000 kHz admitans grafiği

3.11 Deneysel Ve Modelleme Sonuçların Karşılaştırılması

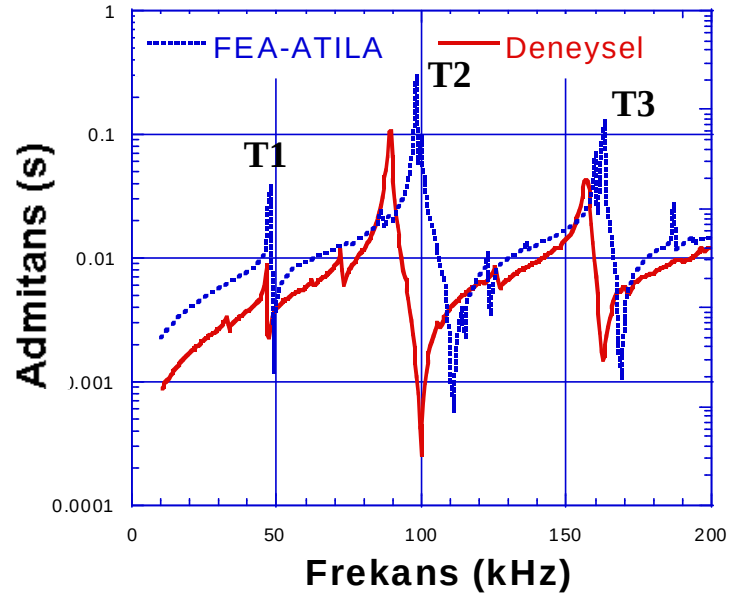
ATILA Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) programı kullanılarak Silindir1 ve Tüp1'e ait rezonans ve antirezonans frekans değerleri ve bu parçaların elektrik alan altındaki teorik şekil değişimleri (Şekil 3.28. ve Şekil 3.30.) hesaplanmıştır. Modelleme ve deneysel rezonans ve antirezonans frekans değerlerinin birbirleri ile örtüştüğü gözlenmiştir.(Şekil 3.27 ve Şekil 3.29)



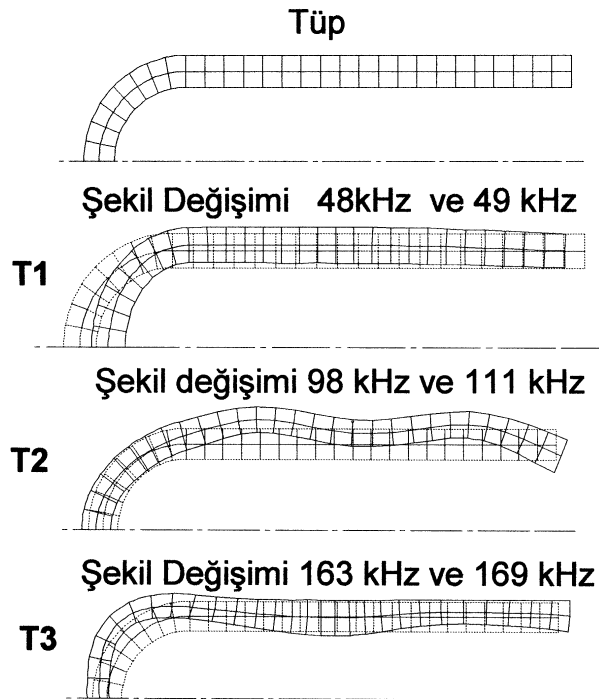
Şekil 3.27 . Silindir1'e ait deneysel ve modelleme sonuçların karşılaştırılması



Şekil 3.28. SEA ile belirlenmiş silindir1'e ait şekil değişimi



Şekil 3.29 . Tüp1'e ait deneysel ve modelleme sonuçların karşılaştırılması



Şekil 3.30. SEA ile belirlenmiş tüp1'e ait şekil değişimi

4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) esaslı piezoelektrik seramiklerin sualtı sonar uygulamalarına dönük olarak, alçı kalıba asıltı döküm yöntemi kullanılarak, içi boş geometrilerde, ince kabuk formunda üretim koşullarının belirlenmesi, elde edilen ürünlerin mikro yapısal ve elektriksel karakterizasyonu üzerine çalışılmıştır.

Bu amaçla, öncelikle alçı kalıba döküm yapılabilecek bir seramik asıltının hazırlanması için gerekli koşullar pH, viskozite ölçümleri ve sedimentasyon deneyleri ile belirlenmiştir. Ön asıltı döküm denemelerinde seramik tozların bünyesindeki polyvinylyalcohol (PVA) esaslı bağlayıcının parçaların kalıptan ayrılmasında problemlere neden olması nedeniyle sonraki deneylerde bağlayıcısı uçurulmuş tozlar kullanılmıştır. Hazırlanan tüm asıltıların bazik karakterde olduğu ($\text{pH} > 8.8$) ve pseudoplastik davranış gösterdiği gözlenmiştir. Hacimce %35 ve %45 PZT içeren asıltıların ağırlıkça % 0.25, hacimce %40 PZT içeren asıltıların ise ağırlıkça %0.5 Darvan821A dağıtıcı ilavesi ile ideal viskozite ve döküm koşullarına ulaştığı saptanmıştır.

Alçı kalıba dökülen ve kurutulan parçalar $1285\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 90 dakika süre ile PbO açısından zengin bir atmosferde sinterlenmiş ve pişirme sonrası parçaların % 13 oranında boyutsal çekilmeye uğradığı saptanmıştır. Sinterlenmiş seramiklerin taramalı elektron mikroskobu incelemeleri sonucunda yoğun ve gözeneksiz bir mikroyapıya sahip olduğu gözlenmiştir.

Frekans spektrumunda admitans ölçümleri sonucunda, düşük frekanslarda (10-200 kHz) silindir numunelerde boy uzaması ve çap artması ile bağlantılı iki rezonans modu ($f_r \sim 50\text{ kHz}$ ve $f_r \sim 100\text{ kHz}$ civarında), tüp numunelerde bu iki moda ek olarak kubbe rezonans modu ($f_r > 150\text{ kHz}$) gözlenmiştir. Konik numunede ise değişken bir çapa sahip olması nedeniyle çap ve kubbe modlarının karışımı olan çok sayıda rezonans frekansı elde edilmiştir. Yüksek frekanslarda ise (200kHz-5 MHz) ince kabukların duvar kalınlığına ait tek bir titreşim modu elde edilmiştir. Artan kalınlık ve boyutlara bağlı olarak rezonans frekanslarında düşme gözlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda, çeşitli geometrilerde ve boyutlarda piezoelektrik seramikler alçı kalıba asıltı döküm yöntemi ile ince kabuk formunda başarıyla üretilmiş ve ön karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında çalışmanın ilerleyen aşamalarında parça boyut aralığının genişletilmesi, çoklu rezonans modlarına sahip (elipsoid vb.) daha karmaşık geometrilerde kabukların üretilmesi hedeflenmektedir. Elde edilen seramik kabuklardan üretilcek piezoelektrik seramik dönüştürücülerin elektroakustik karakterizasyonu çalışmanın tamamlanmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abanoz D., H. Yanık, A. Çapoğlu & S. Alkoy, “Pb(Zr,Ti)O₃ Esaslı Piezoelektrik Seramiklerin Jel döküm Yöntemiyle Şekillendirilmesi”, 11. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, p. 804-810, İstanbul, 5-9 Haziran 2002.

Cross L.E, “Ferroelectric Materials for Electromechanical Transducer Applications” Japanese Journal of Applied Physics Vol:34, sf 2525-2532, (1995)

Damjanovic D. and Mewnham R.E. “Electrostrictive and Piezoelectric Materials for Actuator Applications”, Journal of Intelligent Materials and Structures, vol.3, sf 190-208 (1992)

Dekker M. “ Piezoelektrik And Electrooptic Ceramic”, Piezoelectric Materials for Elektronik: Processing, Propeties and Aplication , sf 139-165 (1986)

Fries R.and Rand B. “Slip Casting and Filter-Pressing”, Materials Science and Technology Processing of Ceramics, Part1, vol: 17A Sf 155-187 (1996)

Furman E., Li G. Haertling G. H. “Electromechanical Properties of Rainbow Devices” I.E.E.E. sf 146-149 (1995)

Gallego J.A. “Piezoelektrik ceramics and ultrasonic transducers”, sf 804-815, (1989)

Harrison J.S and Ounaies Z. “Piezoelektrik Polymer” ICASE NASA Langley Research Center Technical Reports, ICASE Report No: 2001-43, (2001)

Hughes W. J. ”Transducers, Underwater Acustics” Encyclopedia of Applied Physics, vol. 22 (1998)

Jassim S., Al-Jumail A. M., Easteal A. J. , Dodd D., Crofts D.” Piezoelektrik Polymer wiyh some optical characteristics”, Polymer Testing, vol.21, sf 519-522, (2002)

Lewis J.A. “Colloidal Processing of ceramics”, Journal American Ceramic Society, Vol. 83, No. 10, sf 2341-2359 (2000)

Lopez M. C. B., Rand B. And Riley F.L.” Polymeric Stabilisation of Aqueous Suspension of Barium Titanate. Part 2: Effect of Polyelectrolyte concentrantion”, Journal of European Ceramic Society, Vol.20 sf 1587-1594,b (2000)

Mason W. P. “Piezoelectricity, it’s History and Aplication” Journal American Soc. Sf 1561-1566, (1981)

Moulson A.J., Herbert J.M., “Elektroceramics Metarials Properties Aplication” , sf 265-317, (1990)

Naito M., Fukuda Y, Yoshikawa N., Kamiya H. & Tsubaki J. “ Optimization of Suspension Characteristics for Shaping Processes” , Journal of European Ceramic Society, Vol17., sf 251-257, (1997)

Newnham R.E. “Functional Composites for Sensor and Actuators:Smart Materials”, The Era of Materials, sf 159-275 (1998)

Newnham R.E. & Ruschau, “ Smart Electroceramics”, Journal American Ceramic Society vol.74, no.3, sf 463-480, (1991)

Olhera S. M. And Ferreira J. M. F. “ Particle Segregation Phenomena Occuring During the Slip Casting”, Ceramics International, Vol.28 , sf 377-386, (2002)

Schilling C. H and Aksay Í.A. “Slip Casting”, Engineering Materials Handbook, Volume 4, sf 153-159, (1991)

Sigmund W.M., Bell N. S. and Bergström L. "Novel Powder-Processing Methods for Advance Ceramics", Journal American Ceramic Society Vol.83 No. 7 , sf 1557-1574, (2000)

Tressler F. J. , Alkoy S. & Newnham R.E. "Piezoelectric Sensors and Metarials", Journal of Elektroceramics, sf 257-272, (1998)

Tsetsekou Athena, Agrafiotis C. and Milias A. " Optimization of the Rheological Propeties of Alumina Slurries for Ceramic Processing Aplication ,Part 1 Slip Casting", Journal of European Ceramic Society , Vol 21, sf 363-373, (2001)

Twiney R. C. ,"Novel Piezoelectric Materials", Advanced Materials No.12 Vol:4 sf 819-822, 1992

Uchino K. " Ferroelectric Devices" sf 61-63, (2001)

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul’da doğdu. İlk Orta ve Lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 1995 yılında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı ve 1999 yılında tamamladı. 1999 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. 2000 yılından beri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.