

Silindirik Kabuk Formunda Piezoelektrik Seramik Dönüştürücülerin Asıltı Dökümü Üretimi, Karakterizasyonu ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Muhammet BOZ^{1,2}, Sedat ALKOY^{1,2}

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 41400 Gebze, Kocaeli

² ENS Piezoaygıtlar Ltd. Şti, 41480 Gebze, Kocaeli

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
Muhammet BOZ
mboz@gtu.edu.tr

Makale Bilgisi / Article Info
Sunulma / Received : 14.01.2021
Düzeltilme / Revised : 28.02.2021
Kabul / Accepted : 01.03.2021

Anahtar Kelimeler
Asıltı Dökümü
Dönüştürücü
Piezoseramik
Sonlu Elemanlar Analizi

Keywords
Finite Elements Analysis
Piezoceramic
Slip Casting
Transducer

ORCID 
Muhammet Boz
<https://orcid.org/0000-0001-7296-8860>
Sedat Alkoy
<https://orcid.org/0000-0002-4234-0228>

Özet

Piezoelektrik malzemeler, mekanik etki uygulandığında elektriksel sinyal üreten veya tersine, elektrik alan altında kaldıklarında da şekil değişimine uğrayan malzemelerdir. Kullanım alanı oldukça geniş olan bu malzeme grubunun, savunma sanayisinden medikal endüstriye kadar birçok uygulaması mevcuttur. Su altı görüntüleme sistemleri de bu uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır. Günümüzde su altında 50-100 kHz'in arasındaki frekanslarda çalışan dönüştürücülerin uygulamaları mevcuttur. Ancak bu dönüştürücülerin üretilmesi için kullanılan çözümler kendi içlerinde belirli zorluklara ve kısıtlamalara sahiptir. Bunlara alternatif olarak bu çalışmada, dönüştürücülerin silindirik kabuk formunda seramiklerden üretilmesi planlanmıştır. Silindirler kurşun zirkonat titanat (PZT) seramik tozu ile, asıltı döküm yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Numune boyutlarının rezonans frekansı üzerindeki etkisinin de incelenmesi amacıyla farklı boyutlarda silindirler üretilmiştir. Üretilen silindirlerin hava ortamında elektriksel ölçümleri alınarak rezonans özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda 15 mm yüksekliğe sahip olan silindirde 117 ve 38 kHz'de sırasıyla uzunluk ve radyal titreşim modları olduğu belirlenmiştir. Ayrıca gözlenen titreşim modları sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir ve tanımlanmıştır.

Fabrication and Characterization of Piezoelectric Ceramic Transducers with Cylindrical Shell Form Using Slip Casting Method and Their Analysis by Finite Elements Method

Abstract

Piezoelectric materials generate electrical signals when they are subjected to mechanical effects, and conversely, they generate a strain when they are under an electric field. These materials find a wide area of use from the defense industry to medical applications. Underwater imaging systems are also one of these application areas. Transducers operating underwater at frequencies between 50-100 kHz are currently being used for these applications. However, the solutions used to produce these transducers have certain difficulties and limitations in themselves. As an alternative, piezoceramic transducers with cylindrical shell form were developed in this study. The cylinders are fabricated from lead zirconate titanate (PZT) ceramic powder using the slip casting method. Cylinders with different sizes were fabricated in order to examine the effect of dimensions on the resonance frequency. The electrical measurements of the cylindrical transducers were taken in air and their resonance behavior were compared. As a result of the measurements, it was determined that the cylinder with a height of 15 mm had length and radial vibration modes at 117 and 38 kHz, respectively. Additionally, finite elements method was used to analyze and identify the vibration modes of the transducers.



1. GİRİŞ

Piezoelektrikler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine (düz etki) veya elektrik enerjisini mekanik enerjiye (ters etki) dönüştüren malzemelerdir. Bu çift yönlü enerji dönüşüm etkisi sayesinde mühendislik ve tıp uygulamalarındaki akıllı sistemlerin tasarlanmasına uygundur. Bu doğrultuda basınç algılayıcıları, enerji hasadı uygulamaları, ivme ölçerler, medikal görüntüleme cihazları ve su altı görüntüleme aygıtları gibi birçok uygulama alanı vardır.¹ Piezoelektrik seramikler genellikle dikdörtgenler prizması, disk, halka gibi basit geometrik şekillerde üretilmektedir. Ancak yüksek frekans, yüksek güç ve yüksek çözünürlük gerektiren bazı özel uygulamalarda geleneksel dönüştürücüler belirli kısıtlamalara sahiptir.² Kütleli seramiklerin şekil değiştirme kapasiteleri %0,1-0,2 ile sınırlıdır ve ayrıca düşük hidrostatik hassasiyete, yüksek akustik empedansa ve dar bir bant aralığına sahiptirler. Bundan dolayı bu gibi uygulamalarda bir yükseltici mekanizmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Esnek gerilmeli dönüştürücüler metalik kabuk etkisi ile bu yükseltici etkiyi sağlamaktadır.³ Ancak esnek gerilmeli dönüştürücülerde bu avantaja karşılık tasarımda karmaşıklık ve maliyet artışı da ortaya çıkmaktadır. Ayrıca uzun süreli kullanımlarda dayanıklılık sorunlarıyla da karşılaşmaktadır. Bunun yerine seramiklerin içsel bir yükseltici etki oluşturacak şekilde tasarlanarak üretilmesi daha ideal bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır.⁴ Küresel veya silindirik formda üretilen piezoseramikler, üzerine gelen gerilmeyi yayarak yükseltici etki oluşturmaktadırlar. Literatürde bu tasarımdaki dönüştürücüler üzerine birçok çalışma bulunmaktadır.^{4,5,6,7}

Silindirik piezoseramikler birkaç farklı formda kullanılmaktadır. Eksenel yönde kutuplanan silindirik piezoseramikler elektrik alan altında eksenel titreşim hareketi yaparlar ve bunlar hizalayıcı veya çevirici olarak tünel mikroskoplarında kullanılırlar. Radyal kutuplandığında ise radyal titreşimler oluşturarak iki boyutlu eksenel yayını gerçekleştirirler. Bunlar da akış kontrol ve akış ölçüm gibi uygulamalarda kullanılır.^{8,9} Bu titreşim modu düzlemsel çok yönlü titreşim olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca farklı frekans değerlerinde piezoseramiğin uzunluk yönünde titreşim modu da bulunur. Bu titreşim modunda da seramiğin dairesel kesiti, noktasal bir dalga kaynağı olacak şekilde davranış sergiler. Ayrıca parçalı elektrot kaplanarak dalga şekillendirme veya jiroskop uygulamaları da bulunmaktadır.¹ Disk, dikdörtgen prizma, halka gibi basit geometrilere sahip piezoseramikler genellikle kuru presleme tekniği ile üretilirler, fakat daha büyük veya karmaşık şekilli parçalar üretilmek istendiğinde ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, jel döküm gibi yeni geliştirilmiş bazı tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu yöntemler de kurulum maliyeti yüksek yöntemlerdir. Asıltı döküm yöntemi hem uygun maliyetli oluşu hem de karmaşık şekilli parçaların üretilmesi açısından avantajlı olduğu için tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.^{10,11} Bahsedilen avantajlarından dolayı bu çalışmada içi boş kabuk formunda dönüştürücülerin üretilmesi için asıltı döküm yöntemi tercih edilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı;

- İçi boş silindirik kabuk formundaki piezoseramiklerde parça geometrisinin rezonans frekansı üzerine etkisinin araştırılması,
- Halihazırda uygulaması olan, su altında 100 kHz'in altındaki frekanslarda çalışan dönüştürücülere alternatif olarak silindirik geometride bir tasarım sunulmasıdır.

2. YÖNTEM

Çalışmada silindirik seramik parçaların üretilmesi için asıltı döküm yöntemi kullanılmıştır. Asıltı döküm yöntemi hem ekonomik oluşu hem de uygulama kolaylığı açısından avantaja sahip olan, uzun yıllardır sadece geleneksel seramiklerin değil teknik seramiklerin de üretiminde tercih edilen bir yöntem olmuştur. Alçı kalıbın gözenekli yapısı sayesinde asıltı içerisindeki sıvı bileşenin kalıp tarafından çekilerek yüzeyde katı bileşenin birikimi esasına dayanır.^{10,11} Üretilmek istenen parçanın şeklinde bir boşluğa sahip olan alçı kalıp içerisine asıltı dökülür ve zamana bağlı olarak kalıp yüzeyinde biriken katı miktarı istenen kalınlığa ulaştığında kalıp içerisindeki fazla asıltı boşaltılarak döküm tamamlanmış olur. Ardından kurumaya bırakılan seramik parçalar, hacimsel çekmenin de etkisiyle kalıp içerisinden kolayca çıkarılır. Kurutulduktan sonra nihai yoğun seramik kütlelen elde edilmesi için yüksek sıcaklıkta sinterleme işlemi yapılır.

Asıltı döküm için gerekli alçı kalıpların hazırlanmasına öncelikle istenen formdaki seramik parçanın, çekme öncesi boyutlarında hazırlanan bir model üretilerek başlanmıştır. Üretilen model üzerine alçı dökümü yapılarak istenen boşluğa sahip alçı kalıplar hazırlanmıştır. Hazırlanan alçı kalıplar kurutulduktan sonra döküme hazır hale getirilmiştir.

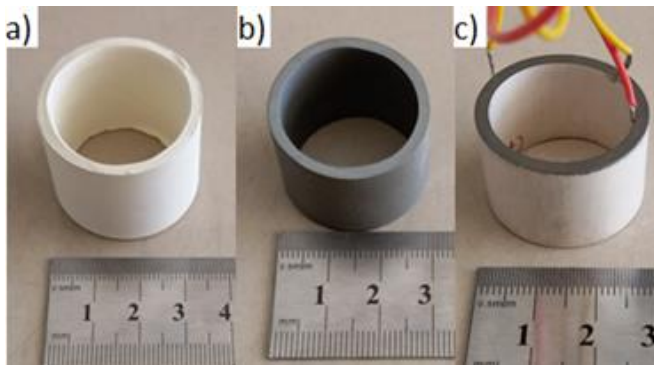
Asıltı dökümle üretim yönteminde, kararlı bir asıltı elde etmek ve döküm sonrası yaş bünyenin belirli bir yaş mukavemete sahip olması için asıltı içerisine polimerik katkıları eklenmiştir.^{10,11} Bunlar; seramik partiküllerinin sıvı faz içerisinde sterik etki ile askıda kalmasını sağlayan poliakrilik asit esaslı bir dağıtıcı (Darvan 821A, RT. Vanderbilt, ABD), kalıptan çıkarılan parçanın sinterlemeye kadar sağlam kalabilmesi için plastikleştirici (Glycerol, Merck KGaA, Almanya) ve asıltının elektrostatik olarak kararlılığını korumasını sağlamak amacıyla pH değerinin ayarlanması için amonyak olarak sıralanabilir. (Ammonia solution %25, Merck KGaA, Almanya). Bu katkıları belirli oranlarda eklenerek asıltı reçetesi oluşturulmuştur. Asıltı hazırlamada optimum asıltı reçetesinin belirlenmesi için bir dizi asıltı stabilizasyon çalışması yapılmış ve farklı parametrelere bağlı olarak sedimentasyon, viskozite ve zeta potansiyel ölçümleri alınmıştır. Kararlılığa sahip nihai asıltı reçetesi bu deneyler sonucu belirlenmiştir.

Belirlenen reçete doğrultusunda asıltının hazırlanması sürecinde öncelikle sıvı fazlar tartılarak karıştırılmıştır. 15 dk. süre ile bilyeli değirmende, zirkonyum oksit bilyeler ile yapılan bu karıştırma sonrasında uygun miktarda piezoelektrik seramik tozu ilave edilmiştir. Asıltı hazırlamada elektriksel olarak sert karakterde ticari PZT-4 (T&Partners Praha, Czech Republic) bileşimi kullanılmıştır. Yine 1 saat süre ile bilyeli değirmende karıştırılan asıltının son olarak pH ayarı yapılmış ve 24 saat süre ile karışmaya bırakılmıştır. Tüm bu sürecin sonunda asıltı, döküme hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan asıltı daha önceden üretilmiş ve kurutulmuş olan alçı kalıplar içerisine dökülerek üretim gerçekleştirilmiştir. İki ucu açık, silindirik formda üretilen piezoseramiklerde boyutların ve geometrinin rezonans karakteristiklerine etkisinin incelenmesi amacıyla aynı çapta fakat farklı uzunluklarda seramik silindirler üretilmiştir. Silindirlerin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Silindirik geometride farklı yüksekliklere sahip numunelerin boyutları.

Numune Kodu	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yükseklik (mm)
SA-15	29,3	2,7	15
SA-19	29,3	2,7	19
SA-23	29,3	2,7	23

Tüm numunelerin sinterleme işlemi çift alumina pota içerisinde kapalı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda buharlaşan kurşunun bileşik içerisinde kaybını telafi etmek için numune ağırlığının %20'si kadar atmosfer tozu ($PbO+ZrO_2$) numunelerle beraber pota içerisine koyulmuştur. $1260^{\circ}C$ 'de 4 saat süre ile sinterleme yapılmıştır. Sinterleme sonrası zımpara ile düzeltmeleri yapılan silindirin iç ve dış yüzeyleri gümüş elektrotla kaplanmış (Silver conductor paste, 9910-C, ESL Electroscience, ABD), kaplamanın yüzeye tutunması için $600^{\circ}C$ 'de elektrot pişirme yapılmıştır. Daha sonra lehimle kablo bağlantıları yapılmıştır. Şekil 1'de kalıptan çıkarılmış yaş bünye, sinterleme sonrası yoğunlaşmış piezoseramik ve elektrotlama işlemi sonrası kablo bağlantıları yapılmış piezoelektrik dönüştürücünün görüntüleri verilmiştir.



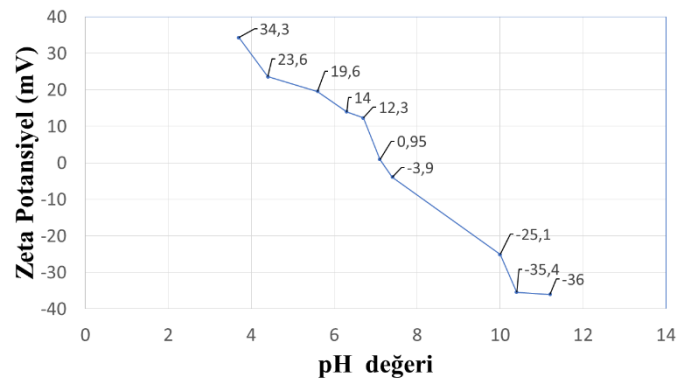
Şekil 1. Numunenin (a) kalıptan çıkardıktan sonra, (b) sinterlendikten sonra ve (c) gümüş elektrot kaplandıktan sonraki görüntüleri.

Elektriksel kutuplama işlemi 22 kV/cm DC elektrik alan altında, $120^{\circ}C$ 'de silikon yağı içerisinde, 15 dk. süreyle yapılmıştır. Elektrik alan Trek 610D model yükseltici ile sağlanmıştır. Kutuplamanın ardından 24 saat bekletilen numunelerin hava ortamında elektriksel ölçümleri alınarak rezonans karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Böylece seramik boyutlarının rezonans frekansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Numunelerin dielektrik ve frekansa bağlı admitans ölçümleri LCR metre (3532-50 Hioko, Japan) ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada üretilen dönüştürücülerin ön tasarımları ve titreşim modlarının analizi ticari bir sonlu elemanlar analiz programı (ATILA v.6.0.2 ve GiD v.10.0.9) ile yapılmıştır. Sonuçlar kısmında modelleme ile gerçek sonuçlar birbiri ile kıyaslanmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

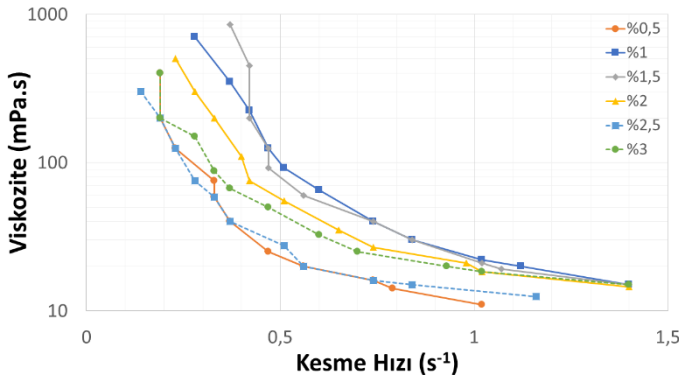
Asıltıların elektrostatik olarak kararlı olacağı pH aralığının belirlenmesi için pH'a bağlı olarak asıltının zeta potansiyeli ölçümü alınmıştır. Ölçümler Zetasizer Nano-ZS ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Hazırlanan asıltıdan alınan 50 ml.'lik numuneler farklı miktarlarda hidroklorik asit ve amonyak ilave edilerek farklı pH değerlerine ayarlanmış ve her bir değer için zeta potansiyel ölçümü yapılmıştır. Parçacıkların asıltı içerisinde kararlı bir şekilde askıda kalması için zeta potansiyel değerinin 30 mV 'un üzerinde veya -30 mV 'un altında olması gerekmektedir. Aksi halde parçacıklar van der Waals kuvvetleri etkisi ile bir araya gelerek topraklanmaya ve çökmeye sebep olmaktadır.¹²

Yapılan zeta potansiyel ölçüm sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. Çalışmada pH ayarı için amonyak bileşiği kullanılacağından dolayı bazik asıltı hazırlamaya karar verilmiştir. -30 mV 'un altında bir zeta potansiyel değerine ulaşmak için asıltı pH'ının 10'un üzerinde bir değerde olması gerektiği görülmüştür.



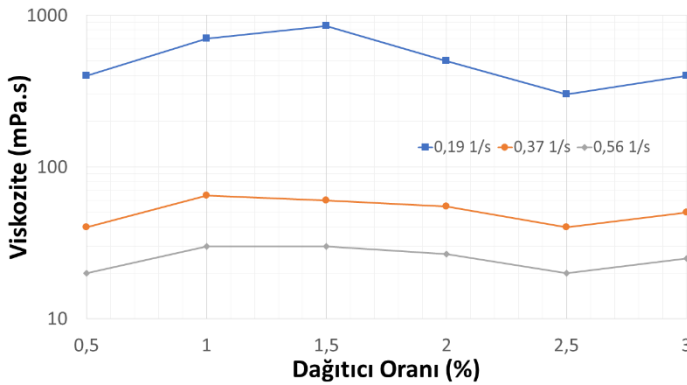
Şekil 2. pH değerine bağlı zeta potansiyel ölçüm sonuçları.

Asıltı döküm ile şekillendirme işlemlerinde asıltının yüksek oranda katı (seramik tozu) içermesi ve viskozitesinin 1 Pa.s değerinden küçük olması tercih edilmektedir.¹⁰ Kalıp içerisine dökülen asıltının düşük viskoziteli olması, kalıbın kusursuz bir şekilde doldurulması ve içerisinde gözenek barındırmaması açısından önemlidir. Katı oranının yüksek olması ise döküm sırasında parçanın hızlı bir şekilde kalınlık almasını sağlamaktadır. Düşük viskozite ve yüksek katı oranları ise ancak iyi dağıtılmış kararlı bir asıltı eldesi ile mümkündür. Bu amaçla dağıtıcı ilavesi yoluyla asıltının sterik olarak da kararlı hale getirilmesi planlanmış ve dağıtıcı oranına göre viskozitenin değişimi incelenmiştir. Viskozite ölçümü, asıltı içerisindeki dağıtıcı oranı ve toz oranı olmak üzere iki farklı parametre üzerinden yapılmıştır. Ölçümler Brookfield RVT viskozimetre cihazıyla 21 numaralı mil aparatı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3'te hacimce %32,5 PZT tozu içeren ve farklı dağıtıcı içerikleri ile hazırlanmış asıltıların kesme hızına bağlı olarak ölçülen viskozite değerlerinin grafiği verilmiştir. Grafiklerde noktaları birleştiren çizgiler eğilimi gösterme açısından kılavuzluk etmesi amacıyla eklenmiştir. Bu katı oranıyla tüm dağıtıcı oranlarında asıltının hedeflendiği gibi 1000 mPa.s 'nin altında bir viskoziteye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca asıltının psödoplastik davranış gösterdiği görülmektedir.



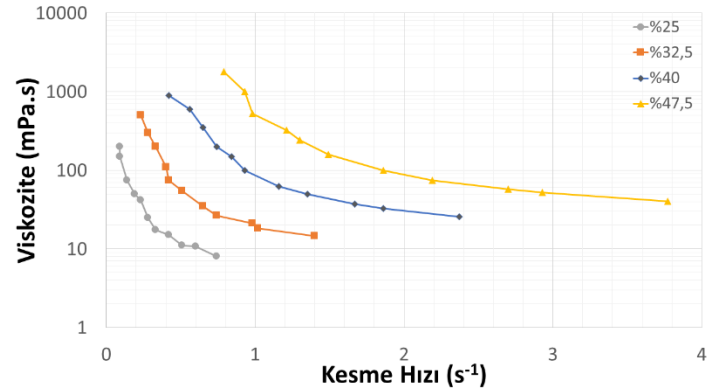
Şekil 3. Hacimce %32,5 katı ve farklı oranda dağıtıcı içeren asıltıların kesme oranına göre viskozite davranışı.

Asıltıdaki en uygun dağıtıcı miktarının belirlenmesi için %32,5 katı ve farklı oranda dağıtıcı içeren asıltılar hazırlanmış ve bu asıtlardan farklı kesme oranlarında viskozite ölçümleri alınmıştır. Şekil 4'te viskozitenin değişimi dağıtıcı oranına göre çizilmiştir. Buradan, en düşük viskozitenin ağırlıkça %2,5 dağıtıcı içeren asıltıda elde edildiği, dolayısıyla en uygun dağıtıcı miktarının ağırlıkça %2,5 olduğu görülmektedir.



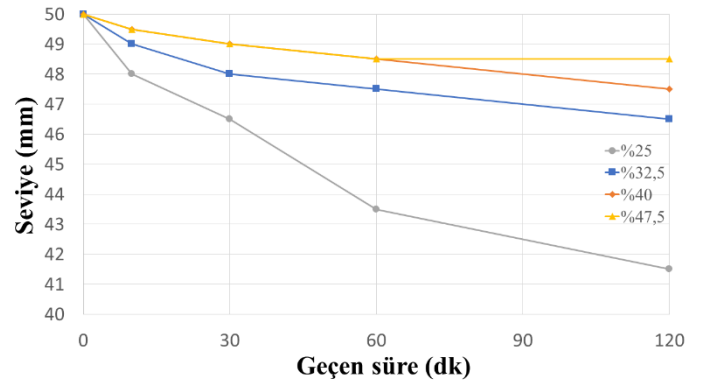
Şekil 4. Ağırlıkça %32,5 katı içeren asıltının dağıtıcı miktarına göre farklı kesme hızlarındaki viskozite davranışı.

Viskozite ölçümleri sonucu dağıtıcı oranının ağırlıkça %2,5 olarak optimize edilmesinden sonra asıltının katı oranının artırılması durumunda viskozitenin nasıl değişeceği de incelenmiştir. Bu amaçla hacimce %25 ile %47,5 arasında değişen miktarlarda seramik toz içeren asıtlar hazırlanmıştır. Şekil 5'te asıtların viskozite davranışı görülmektedir. Katı oranı %40'ı geçtiğinde, düşük kesme oranlarında asıltı viskozitesinin 1000 mPa.s değerini geçtiği görülmektedir. Viskozitenin 1000 mPa.s'nin altında kaldığı en yüksek katı oranı hacimce %40'tır. Bu nedenle asıltı dökümü en uygun reçetenin hacimce %40 katı oranı ile hazırlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

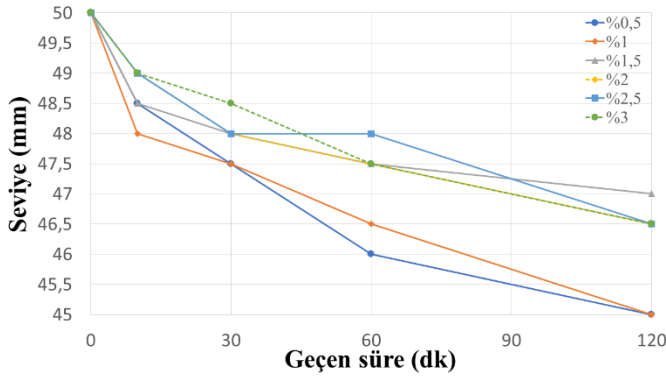


Şekil 5. Ağırlıkça %2,5 dağıtıcı ve farklı miktarlarda seramik toz içeren asıtların viskozitelerinin kesme oranına göre değişimi.

Asıltı döküm işleminde parçanın kalınlık alması belirli bir zaman gerektirmektedir. Duvar kalınlığının artışı alçı kalıbın gözenek ve kuruluk durumuna ve asıltının reolojik karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu süre, bu çalışmada hedeflenen kalınlık için yaklaşık olarak 60 dakika kadardır. Hazırlanan asıtların bu süre boyunca kararlılığını koruması ve döküm sırasında çökmemesi gerekmektedir. Asıtların süreye bağlı olarak kararlılığı sedimentasyon testleri ile belirlenmektedir.⁵ Zamana bağlı olarak çökme hızının belirlendiği sedimentasyon testleri, asıltı içerisindeki seramik toz oranı ve dağıtıcı oranı olmak üzere iki farklı parametreye göre yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7'de grafik olarak verilmiştir. 60 dk'lık döküm süresinde kararlılığı en yüksek asıtlar hacimce %40 katı ve ağırlıkça %2,5 dağıtıcı içeren asıtlardır. Dolayısıyla çalışmanın bir sonraki aşaması için piezoelektrik seramik dönüştürücüler, belirtilen şartlarda hazırlanan asıtlar kullanılarak üretilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi asıltı dökümü ile iki ucu açık olarak, farklı uzunluklarda üretilen silindirik kabuklar sinterlendikten sonra taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapısal karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 8(a)'da kırık yüzeyden alınan mikrografta da görüldüğü gibi büyüklükleri 1-3 µm arasında değişen gözenekler dışında yapı genel olarak yoğundur. Basıncısız, asıltı dökümü temel alan bir üretim yönteminde söz konusu gözenekler beklenen bir durumdur. Şekil 8(b)'de ise kırık yüzeyin zımparalanıp parlatılması ve ısı olarak dağlanması sonrasında alınan mikrografta seramiklerin 5 µm'den daha küçük tane boyutuna sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Ağırlıkça %2,5 dağıtıcı ve farklı miktarlarda seramik toz içeren asıtların sedimentasyon test sonuçları.

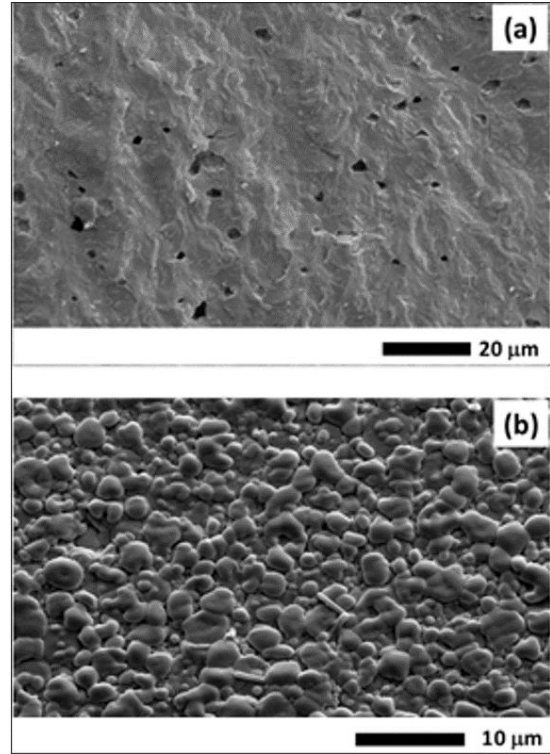


Şekil 7. Hacimce %32,5 katı ve farklı oranda dağıtıcı içeren asıltıların sedimentasyon davranışı.

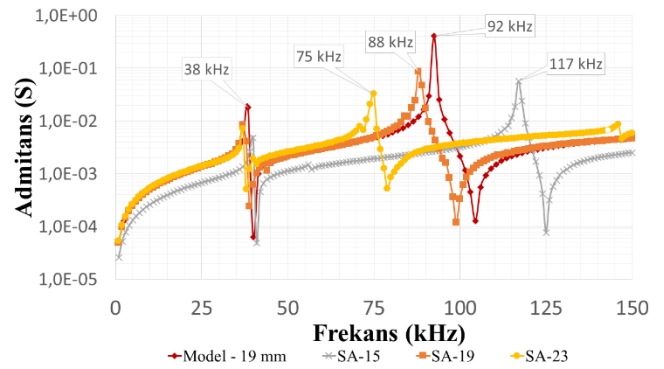
Silindirik kabuk formundaki piezoelektrik seramikler sinterleme sonrasında elektrotlanmış ve son olarak DC elektrik alan altında kutuplanmıştır. Kutuplanan seramiklerin frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile 19 mm uzunluktaki silindirik dönüştürücü de analiz edilmiş ve sonucu kıyaslama amaçlı olarak Şekil 9'da verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi yapılan modelleme ile gerçek numune ölçüm sonuçlarının birbiri ile nispeten uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Modelleme ile gerçek ölçüm sonuçlarında rezonans frekansı ve şiddetindeki küçük farklılıkların sebebinin program veri tabanına preslenmiş numunelerle elde edilen özellik matrisinin girilmiş olması ve bu çalışmada kullanılan asıltı döküm yönteminde preslemeyle elde edilen yoğunluklara ulaşamamasından kaynaklıdır. Silindirik dönüştürücülerin iki temel titreşim modu vardır. Bu modların ne tür bir şekil değişimine karşılık geldiği de yine sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve Şekil 10'da silindirin kesitinin sadece yarısı üzerinden sonuçlar verilmiştir. Bu şekillerde kesikli olarak gösterilen numunenin statik durumunu, düz çizgiler ile gösterilen ise numunenin rezonans frekansındaki en yüksek genlikte şekil değiştirmiş durumunu göstermektedir. Düşük frekanstaki rezonansın radyal titreşim moduna, yani silindirin çapının artması ve azalmasına ait olduğu görülmektedir. Yüksek frekanstaki ikinci rezonansın ise silindirin boyuna uzama moduna ait olduğu görülmektedir. Bu analizin ışığında Şekil 9'daki sonuçlar değerlendirildiğinde, Tablo 2'de verildiği gibi numunelerin çapı eşit olduğundan radyal titreşim modu 38 kHz'de gözlenmiştir. Numunenin uzunluğu azaldıkça boyuna uzama titreşim modu beklendiği şekilde yüksek frekanslara kaymıştır. 19 ve 23 mm uzunluktaki silindirik dönüştürücülerde boyuna uzama titreşim modunun rezonans frekansı, çalışmanın başında hedeflendiği şekilde, 50-100 kHz aralığındaki değerlerde elde edilmiştir.

Tablo 2. Piezoelektrik silindirik dönüştürücülerin titreşim modları.

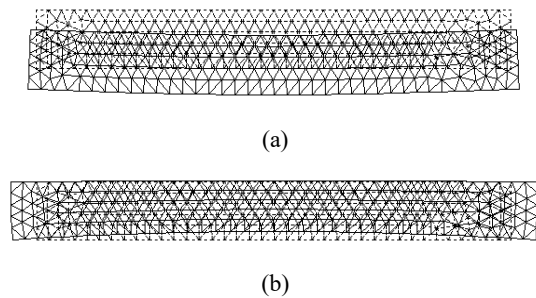
Numune Kodu	Boyuna Uzama Modu (kHz)	Radyal Genleşme modu (kHz)
SA-15	117	38
SA-19	88	38
SA-23	75	38
Model	92	38



Şekil 8. Asıltı döküm ile üretilmiş piezoelektrik seramiklerin (a) kırık yüzeyden ve (b) parlatılmış ve ısı olarak dağıtılmış yüzeyden taramalı elektron mikroskobu ile alınan mikroyapı görüntüleri.



Şekil 9. İki ucu açık silindirik formdaki piezoelektrik dönüştürücülerin frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları.



Şekil 10. Silindirik dönüştürücülerin sonlu elemanlar analizi ile elde edilen titreşim modları (a) radyal ve (b) boyuna titreşim.

4. SONUÇ

Bu çalışma, silindirik kabuk formunda piezoelektrik seramik dönüştürücülerin asıltı döküm yöntemiyle üretim koşullarının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda en uygun döküm koşullarını sağlayan asıltı reçetesi hacimce %40 seramik tozu, ağırlıkça %2,5 dağıtıcı ve %2,5 plastikleştirici ile oluşturulmuş ve bu reçete kullanılarak düzgün kesitte sahip, görece yoğun seramik bünyeler elde edilmiştir. Sinterleme sonrası elektrotlanan ve kutuplanan silindirik piezoelektrik seramik dönüştürücülerin frekansa bağlı admitans ölçümleri ile rezonans davranışı incelenmiştir. İki temel titreşim modu saptanmış ve sonlu elemanlar analizi ile söz konusu titreşim modları radyal genişleme ve boyuna uzama modları olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmanın sonunda;

- Piezoelektrik seramiklerin alçı kalıba asıltı döküm koşulları belirlenmiş,
- Belirlenen koşullarda hazırlanan asıltılar ile içi boş silindirik kabuk formunda seramikler üretilmiş,
- Piezoelektrik silindirik dönüştürücülerin elektriksel karakteristikleri ölçülerek rezonans davranışı belirlenmiş,
- Sonlu elemanlar analizi ile titreşim modları tanımlanmıştır.

Kaynakça

- [1] M. S. Vijaya, *Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*. CRC Press, 57-123 (2012).
- [2] J. Wang and L. Weijie, “A new piezoelectric hollow cylindrical transducer with multiple concentric annular metal fillers.” *Materials Research Express* **6** (5), 055701 (2019).
- [3] C. H. Sherman, J. L. Butler, “Introduction”, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer Publishing Company, Incorporated, Verlag New York, 1-30 (2007).
- [4] S. Alkoy, R.J. Meyer Jr, W.J. Hughes, J.K. Cochran Jr and R.E. Newnham, “Design, performance and modeling of piezoceramic hollow - sphere microprobe hydrophones.” *Measurement Science and Technology*, **20** (9), 095204 (2009).
- [5] S. Alkoy, “Fabrication and properties of thin-shell monolithic piezoelectric ceramic transducers.” *Journal of Materials Science*, **42** (16), 6742-6748 (2007).
- [6] L. Shuyu and W. Shuaijun, “Radially composite piezoelectric ceramic tubular transducer in radial vibration.” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **58** (11), 2492-2498 (2011).
- [7] M.T. Cui, S. Xue, R.-B. Guo, M. Su, Y.-C. Li, M. Qian, “Design and fabrication of cylindrical transducer based on 2–2 piezoelectric composite.” *2015 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA)*, 277-281 (2015).
- [8] J.O. Kim and J.G. Lee. “Dynamic characteristics of piezoelectric cylindrical transducers with radial polarization.” *Journal of Sound and Vibration*, **300** (1-2), 241-249 (2007).
- [9] J.O. Kim, K.K. Hwang and H.G. Jeong, “Radial vibration characteristics of piezoelectric cylindrical transducers.” *Journal of Sound and Vibration*, **276** (3-5), 1135-1144 (2004).
- [10] C.H. Schilling, “Colloid Casting” in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 1314-1319 (2001).
- [11] R. Gadow and F. Kern, “Advanced Manufacturing of Hard Ceramics”, in *Comprehensive Hard Materials*, **2**, 207-230 (2014).
- [12] E. Joseph and G. Singhvi. “Multifunctional nanocrystals for cancer therapy: a potential nanocarrier.” *Nanomaterials for Drug Delivery and Therapy*. William Andrew Publishing, 91-116 (2019).