



Zil Tipi Piezoelektrik Dönüştürücü (Cymbal) Tasarımı Sonlu Elemanlar Modellemesi ve Su Altı Akustik Ölçümleri

Piezoelectric Cymbal Design Finite Element
Modeling and Underwater Acoustic Measurements)

Mert GÜL¹, Oğuz ÇOLAK²

¹ Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye
• mert.gul@eskisehir.edu.tr • ORCID > 0000-0001-8618-6261

² Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye
• oguzcolak@eskisehir.edu.tr • ORCID > 0000-0002-1777-9300

Makale Bilgisi/Article Information

Makale Türü/Article Type: Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 11 Ağustos/August 2026
Kabul Tarihi/Accepted: 21 Ekim/October 2026
Yıl/Year: 2026 | Cilt/Volume: 7 | Sayfa/Pages: 149-168

Atıf/Cite as: Gül, M., Çolak, A. "Zil Tipi Piezoelektrik Dönüştürücü (Cymbal) Tasarımı Sonlu Elemanlar Modellemesi ve Su Altı Akustik Ölçümleri" OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi, 7, 2026: 149-168.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mert GÜL

ZİL TİPİ PİEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜ (CYMBAL) TASARIMI SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ VE SU ALTI AKUSTİK ÖLÇÜMLERİ

ÖZET

Su altı akustik uygulamalarında vazgeçilmez elemanlardan olan piezoseramik malzemeler farklı tasarımlarla hem sinyal üretici projektör, hem de algılayıcı hidrofon olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada elektroakustik dönüştürücü verimi yüksek piezoelektrik esnek kompozit zil tipi dönüştürücü (cymbal) yapısı farklı çap ve kalınlık değerlerinde tasarlanarak analiz edilip, silindirik tip dönüştürücü ile karşılaştırılmıştır. PZT-5A tip kompozisyonlar kullanılarak piezoseramik pelet ve silindir üretilmiştir. Zil tipi dönüştürücüler 12,7 mm, 15,8 mm ve 25,4 mm çaplarında, 1 mm ve 2 mm kalınlıklarındaki piezoelektrik seramik peletler temel alınarak; silindirik tip hidrofon ise 7 mm dış çap, 5 mm iç çap ve 12,7 mm uzunlukta modellenmiş, sonlu elemanlar analizleri COMSOL programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Alış Voltaj Hassasiyeti-Receiving Voltage Sensitivity (RVS) grafikleri oluşturulmuştur. Üretilen hidrofon cihazlarından elde edilen RVS grafikleri oluşturulmuştur. 12,7 mm çap değerine sahip zil tipi dönüştürücüde 5 kHz değerine kadar lineer (-199 dB) RVS değeri elde edilmiştir. Kalınlık değeri arttıkça hassasiyet değerinin azalmakta olduğu görülmüştür. Silindirik tip hidrofonun da -202 dB hassasiyet gösterdiği, teorik ve deneysel sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar silindirik hidrofon ile yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Literatürde bahsedildiği üzere zil tipi hidrofonun düşük frekans uygulamaları için algılayıcı olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Hidrofon, Piezoseramik, Zil tipi dönüştürücü (cymbal), PZT-5A, Alış voltaj hassasiyeti (RVS)



PIEZOELECTRIC CYMBAL DESIGN FİNİTE ELEMENT MODELİNG AND UNDERWATER ACOUSTIC MEASUREMENTS

ABSTRACT

Piezoceramic materials, indispensable elements in underwater acoustic applications, are used in various designs as both signal-generating projectors and sensing hydrophones. In this study, a high-efficiency electroacoustic transducer, piezoelectric flexible composite cymbal-type transducer structure was designed

and analyzed with different diameter and thickness values, and compared with a cylindrical type transducer. Piezoceramic pellets and cylinders were produced using PZT-5A type compositions. Cymbal-type transducers were based on piezoelectric ceramic pellets with diameters of 12,7 mm, 15,8mm, and 25,4 mm, and thicknesses of 1 mm and 2 mm; the cylindrical type hydrophone was modeled with an outer diameter of 7 mm, an inner diameter of 5 mm, and a length of 12,7 mm. Finite element analyses were performed using the COMSOL program, and RVS graphs were generated. Receiving Voltage Sensitivity (RVS) graphs obtained from the produced hydrophone devices were also generated. A linear RVS (-199 dB) value up to 5 kHz was obtained with a bell-type transducer with a diameter of 12,7 mm. It was observed that the sensitivity decreased as the thickness increased. The cylindrical hydrophone also showed a sensitivity of -202 dB, and the theoretical and experimental results were consistent. The obtained results were compared with measurements made with the cylindrical hydrophone. As mentioned in the literature, it has been shown that the bell-type hydrophone can be used as a sensor for low-frequency applications.

Keywords: Hydrophone, Piezoceramic, Cymbal transducer, PZT-5A, Receiving voltage sensitivity (RVS)

Öne çıkanlar

- Esnek gerilmeli piezoelektrik zil tipi dönüştürücüler elektroakustik dönüşümün verimini artırmaktadır.
- Su altı akustik özellikler COMSOL Sonlu Elemanlar yazılımı kullanarak incelenmiştir.
- Üretilen hidrofonların gerçek su altı akustik ölçümleri karşılaştırılmıştır.



1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine, elektrik enerjisini ise mekanik enerjiye dönüştürmektedirler [1]. Düz piezoelektrik etki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme, ters piezoelektrik etki ise elektrikselsinyalleri mekanik enerjiye dönüştürme kabiliyetidir. Bu yapıları sayesinde uzay, havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma sistemlerinde özellikle su altı akustik sistemlerde fonksiyonel elektroakustik eleman olarak kullanılmaktadırlar [2]. Dönüştürücü olarak kullanımlarında sinyal oluşturan projektör, sinyal algılayan hidrofon veya her ikisi birden olabilmektedir. Hidrofon su altı algılayıcıları su altındaki herhangi bir hareket durumunda oluşan basınç

değişimlerini düz piezoelektrik etki sonucu algılayarak ve piezoseramiğin şekil değişimi sayesinde elektroakustik sinyallere çevirebilmektedirler. Ancak bu tür kullanımlarda piezoseramiklerin elektromekanik dönüşümleri kompozit yapılarla arttırılmaktadır. Elektroakustik algılayıcılarda bu dönüşümlere örnek olarak 1920'li yıllarda sis giderici olarak geliştirilen ve sonrasında tasarım tipleri sınıf VIII'e kadar yükselen esnek dönüştürücüler örnek verilebilir. Metal kabuk yapının mekanik empedans dönüştürücü olarak davrandığı belirtilmektedir. Yanal kuvvetleri dikey kuvvetlere çevirerek etkiyi artıran farklı kompozit tasarımlar da oluşturulmuştur. Bunlardan Ay tipi (Moonie) dönüştürücü özel şekillendirilmiş kapakçıklar arasında seramik olacak şekilde tasarlanmıştır. 500 mikron ve daha ince seramik kalınlığına sahip olması gereken Gökkuşuğu (Rainbow) tipi dönüştürücü indirgenmiş tabaka olarak kullanılacak karbon blok ile üretilmektedir. Yüksek yerdeğiştirme sunan bu tasarımın kullanımı tamamen seramiğe bağlı elektromekanik değerlerinin olmasından ve uzun dönem kararlılık çalışmalarında 107 döngüden sonra yerdeğiştirme özelliğinin %20 sini kaybediyor olmasından dolayı kısıtlı kalmaktadır. NASA Langley Araştırma Laboratuvarında geliştirilen ve ince fakat istenilen en ve boy oranına sahip olabilen Fırtına (Thunder) tip dönüştürücü yüksek ve düşük ısıl genleşme katsayısına sahip metal ve epoksi katmanları arasına yerleştirilmiş piezoseramiğin deplasmanı sayesinde elektromekanik etkiyi artırabilmektedir. Ancak uzun dönem kararlılığında %33 değerine varan düşüşler bulunmasından dolayı kullanımı kısıtlıdır [3]. Ay tipi (Moonie) dönüştürücüyü geliştiren ekip daha fazla aktif yüzey alanına sahip olan ve böylece 2 kat daha verimli sınıf V tip zil tipi dönüştürücü (cymbal) tasarımına gitmiştir [4].

Cymbal dönüştürücüler iki adet koniksel boşluğu olan özel şekillendirilmiş metal kapakçık arasına sıkıştırılmış piezoelektrik disk tasarımına sahiptir [5]. Bu tasarım Şekil 1'de verilmektedir. Metal kapakçıklar epoksi yardımıyla piezoelektrik diske yapıştırılmakta ve bu sayede bütüncül bir yapı oluşturulmaktadır. Bu yapıda koniksel boşluklar, dikey eksenel gerilimlerin yanal gerilimlere dönüşmesini sağlayarak mekanik dönüşümün verimini artırmaktadır [6]. Bu sayede ters işaretli olan hidrostatik piezoelektrik katsayısında artış sağlanmaktadır [7]. Bu etki tersinir olabildiği için cymbal tasarımı yanal gerilimi dikey harekete çevirmede de etkindir. Tasarımından kaynaklı hidrostatik basınç altında yönsüz olması sebebiyle uygulamaya bağlı olarak serbest alanlarda kolaylıkla kullanılabilir [8]. 2023 yılında yapılan bir çalışmada yönsüz hidrofonda vektör hidrofona yön kabiliyetini geliştirmek için de kullanılabilen tasarımlarda kullanılabilir [9]. Oluşan gerilim yönlerinin dönüştürme etkisinden dolayı piezoelektrik seramiklerle üretilen aktif eyleyici olarak kullanıldığı enerji hasadı uygulamalarının [10-11] yanı sıra medikal cihaz uygulamalarında da performans araştırması yapılmıştır [12-14]. 2025 yılında yapılan derialtı ilaç salınım çalışmasında 15mm çap ve 5 mm kalınlığa sahip zil tipi

dönüştürücü tasarımı ile başarılı bir şekilde uygulama gerçekleştirildiği belirtilmektedir [15]. Zil tipi dönüştürücü tasarımı farklı konfigürasyonlara da temel oluşturmakta [16, 17] ayrıca PVDF gibi farklı polimerik malzemelerin de elektromekanik katsayısını artırmakta kullanılmaktadır [18]. 2024 yılında sensör olarak 19 katlı katmanlı yapı oluşturulup elektromekanik performansını sonlu elemanlar metoduyla 2024 yılında yapılan çalışmada eşdeğer devre metodu kullanılarak 80 V uygulandığında 100 Hz frekans değerinde radyal şekil değişimi 2,82 mikron, eksenel şekil değişimi ise 77,7 mikron olarak hesaplanmıştır [19]. Su altı akustik otonom araçlarda kullanılabilen yanal dizin tasarımı için 2025 yılında yapılan bir çalışmada aktif dönüştürücü eleman olarak zil tipi dönüştürücü kullanılmıştır. Çalışmada 15,8 mm çapa sahip seramik kullanılarak zil tipi dönüştürücü yapı oluşturularak ilk rezonans modu 25,7 kHz, ikincil rezonans modu 48,7 kHz olarak hesaplanmıştır. Tekil dönüştürücünün eksenel mod ve radyal mod yönlülük analizleri 360 derece üzerinden çıkarılarak yöne bağlı hassasiyetinde düşük dalgalanma olduğu, bu sebeple algılama sistemlerinde kullanılabildiği belirtilmiştir. Elde edilen RVS değerleri 10-30 kHz frekans bandında (-193 dB) ve (-185 dB) aralığında hesaplanmıştır. Çoklu kullanımda ise tekil dönüştürücüleri konumlandırmanın önemli olduğundan bahsedilmiştir [20].

Zil tipi (cymbal) dönüştürücünün su altı akustik ortamdaki hareketini 1990'lı ve 2000'li yıllarda inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda cymbal dönüştürücünün ANSYS yazılımı kullanılarak su altı akustik karakteristiği çıkarılmıştır. Bu çalışmalarda farklı malzemeden yapılan kapakçıklar kullanılarak üretilen zil tipi dönüştürücüler, farklı parametrik katsayı çarpımları ile yapılan ölçümler gözlenmiştir [21]. Ancak gelişen teknolojik imkanlarla, matematiksel yaklaşımlarla ve bilgisayar bilimindeki gelişmeler odağında çalışmalar ilerletilmekle birlikte elektroakustik yayının kısmında tekil parametrik çalışma ve silindirik tip hidrofon cihazlarla karşılaştırma bulunmamaktadır. Bu çalışmada amaç cymbal dönüştürücünün su altı akustik kullanımdaki pasif elektroakustik özelliklerini COMSOL Sonlu elemanlar yazılımı kullanarak sistematik bir yaklaşımla incelemek, prototip üretimi yaparak su altı akustik testlerini gerçekleştirmektir. Ayrıca yapılan çalışmada 12,7 mm uzunluğunda silindirik tip hidrofon üretilerek bu hidrofonla karşılaştırma yapılmıştır. Bu sayede cymbal (zil tipi) hidrofonun özellikle düşük frekans su altı akustik uygulamalarındaki performansı ortaya konulmuştur. Bu çalışmada esnek zil tipi hidrofonun farklı boyutlardaki parametreleri sonlu elemanlar programı yardımıyla çalışılmıştır. Farklı formlarda standart boyutlara sahip seramikler kullanılarak her iki tipte hidrofon üretilip akustik havuzda alış hassasiyet değerleri ölçülerek karşılaştırılmıştır. Böylece su altı akustik hassasiyete sahip hidrofon cihazları üretilmiştir. Ölçekleme faktörü uygulanarak ve bu faktörün dışında seramik kalınlığının zil tipi dönüştürücünün pasif uygulamalarındaki özellikle dizin halinde üretililecek hidrofon cihazlarında ve pasif ortam dinlemesi yapılması

gerekebilecek elektroakustik algılayıcı cihazlarda kullanılabilen tasarımın ölçekleme performans kriterleri detaylı ve yeni analiz yöntemleriyle ortaya konmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1. PİEZOSERAMİKLERİN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada tüm dünyada yaygın olarak su altı akustik algılayıcılarda kullanılan PZT-5A kompozisyonu kullanılmıştır. Temin edilen kompozisyon tek eksenli hidrolik pres kullanılarak silindirik ve disk şeklinde 2 ton/cm² basınç altında ön şekillendirilmiş ve 130 MPa basınç altında izostatik olarak preslenmiştir. Preslenen ham seramikler 1250°C sıcaklıkta 2 saat boyunca sinterlenmiştir. Sinterlenen pelet şekilli seramiklerin yüzey işlemleri 600 numaralı SiC zımpara ile 1 mm kalınlığa getirilerek yapılmış, silindirik şekilli seramikler ise uygun yüzey işlemleri ile silindirik forma getirilmiştir. Pelet şekilli seramiklerin çapı 12,7 mm ve kalınlıkları ise 1 mm olarak hazırlanmıştır. Silindirik şekilli seramikler ise dış çapı 7 mm, et kalınlığı 1 mm ve uzunluğu ise 12,7 mm olacak şekilde hazırlanmışlardır. Yüzey işlemleri yapılan seramiklerin yüzeyleri gümüş elektrotla kaplanmış, 680°C'de 15 dk boyunca ısıtılarak gümüş elektrotun yüzeye tam tutunması sağlanmıştır. Daha sonra 2,4 kV/mm elektrik alan altında sıcak yağ banyosu içerisinde polarize edilmişlerdir.

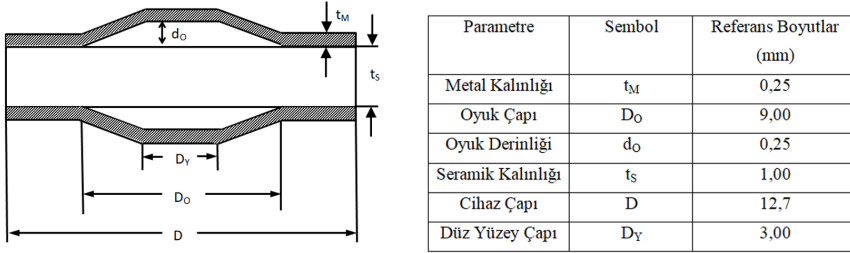
Tablo 1. PZT-5A seramiklerin elektrik özellikleri							
	d (g/cm ³)	d ₃₃ (pC/N)	g ₃₃ (mV/N)	k _{eff}	Q _m	K ^T	N _p
PZT-5A	7,6	450	22.1	0,65	70	2300	2100

2.2. CYMBAL KALIPLARIN HAZIRLANMASI VE MONTAJ

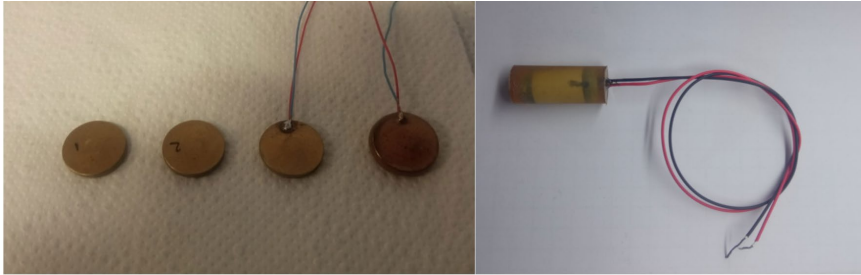
Zil tipi dönüştürücülerin kapakçıkları hidrolik pres ve kalıplar yardımıyla özel olarak şekillendirilmiştir. Bu şekil ve parametre bilgileri Şekil 1'de detaylı olarak verilmiştir.

Elde edilen pirinç kapakçıklar Eccobond Epoksi kullanılarak özel tasarım aparatlarla piezoseramikle bütünleştirilmiştir. Bütünleştirilen esnek tip dönüştürücüler poliüretan ile kaplanmış, böylece su sızdırmazlığı sağlanmıştır. Silindirik tip hidrofonun üretimi için ise tüp seramiğin altına ve üstüne cam fiber kapakçıklar epoksi kullanılarak yapıştırılmış, saydam bir kapsül içerisinde

poliüretan dökülerek su sızdırmazlığı sağlanmıştır. Silindirik tip hidrofon üretiminde yaygın olarak kullanılan bu kapak gibi sınırlayıcı malzemelerin de performans üzerinde olumsuz etkileri olabileceği belirtilmektedir [22]. Zil tipi dönüştürücünün performansını etkileyen piezoelektrik seramiğin elektromekanik değerleri, seramiğin yarıçapı, kalınlığı, kapakçıkların mekanik özellikleri, kapakçıkların tasarımı ve yapıştırma özellikleri gibi birçok etmen bulunduğu belirtilmektedir. Üretilen zil tipi ve silindirik hidrofonlar Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 1. Zil tipi dönüştürücü ve referans boyutları [4]



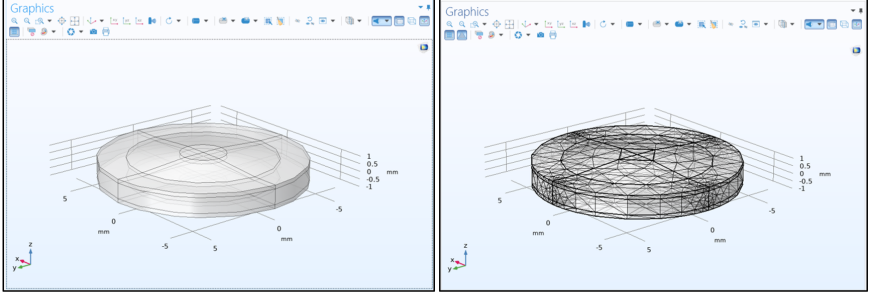
a) Üretilen zil tipi dönüştürücüler

b) Üretilen silindirik tip dönüştürücü

Şekil 2. Üretilen dönüştürücüler ve a) zil tipi b) silindirik tip dönüştürücü

2.3. MODELLEME VE SU ALTI AKUSTİK ÖLÇÜMLER

Modelleme çalışmaları COMSOL 5.6 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmalarında 1 m³ su hacmi kullanılarak RVS değerleri hesaplanmıştır. Zil tipi dönüştürücünün COMSOL modeli ve matematiksel modellemede kullanılan mesh örgüsü Şekil 3’te verilmektedir.

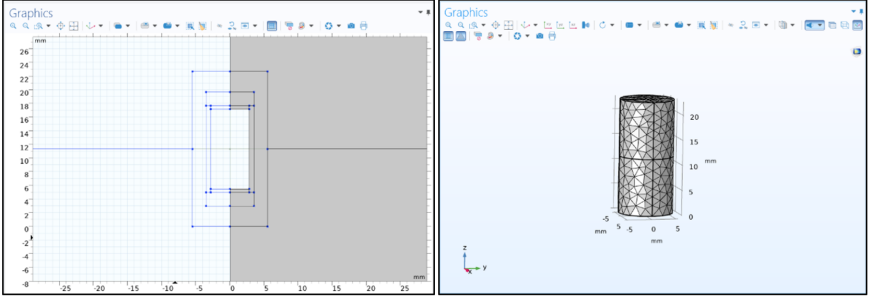


a) Zil tipi dönüştürücü COMSOL modeli

b) Zil tipi dönüştürücü mesh örgüsü

Şekil 3. Zil tipi dönüştürücü COMSOL modeli ve mesh örgüsü

Mesh örgüsü tetrahedra, prizma, üçgen, dörtlü (quads), kenar (edge) ve köşe (vertex) tip olmak üzere sırasıyla 20682, 3696, 2736, 140, 584 ve 66 adet olmak üzere toplam 24378 adet bileşen bulunmaktadır. Silindirik hidrofonların içerisindeki havayı tutmak için uç kapaklara ve su sızıntısını önlemek için kapsüllemeye ihtiyacı varken, küresel hidrofonların sadece kapsüllemeye ihtiyacı vardır. Silindirik tip hidrofon da benzer şekilde COMSOL yazılımı kullanılarak modellenmiş ve matematiksel hesaplamaların yapılabilmesi amacıyla mesh örgüsü tanımlanmıştır (Şekil 4).



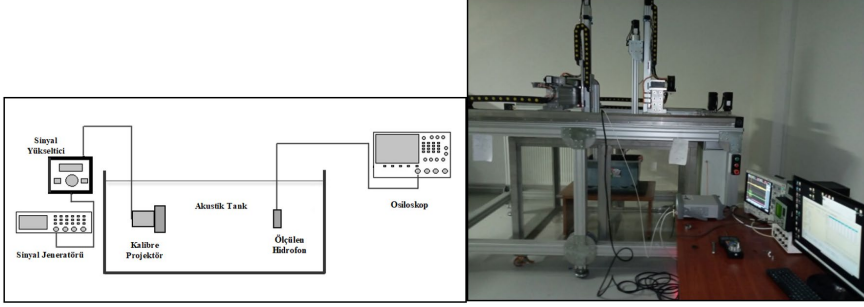
a) Silindirik tip dönüştürücü FEM Modeli

b) Silindirik tip dönüştürücü mesh örgüsü

Şekil 4. Silindirik tip dönüştürücü a) COMSOL FEM Modeli ve b) mesh örgüsü

Mesh örgüsü tetrahedra, prizma, üçgen, dörtlü (quads), kenar (edge) ve köşe (vertex) tip olmak üzere sırasıyla 74970, 5748, 6216, 120, 632 ve 52 adet olmak üzere toplam 80718 adet bileşen bulunmaktadır. Su altı akustik ölçümler için hazırlanan düzeneği; akustik tank, kalibre projektör, sinyal jeneratörü, sinyal yükseltici, osiloskop cihazlarından oluşmaktadır. Deneysel düzeneğin şematik ve gerçek görünümü Şekil 5'te verilmektedir. Sinyal jeneratöründen iletilen elektriksel sinyal, sinyal yükseltici yardımıyla yükseltilip projektöre iletilerek

akustik dalga oluşması sağlanır. Suyun içerisinde ilerleyen akustik dalga hidrofonu ulaşılarak, hidrofonun elektriksel sinyal oluşturmalarını sağlar. Elde edilen bu sinyal osiloskop ile ölçülerek kayıt altına alınır. Akustik havuzda referans ölçüm Bruel Kjaer 8104 tip hidrofon kullanılarak yapılmıştır.



a) Şematik görünüm

b) Gerçek görünüm

Şekil 5. Akustik Tank şematik ve gerçek görünümü

Şekil 5'te görünümü verilen sistemde hidrofon ve projektörden elde edilen sinyal değerleri formülde yerine konularak akustik birim olan dB cinsinden değere dönüştürülür. TVR (Transmitting Voltage Response-Voltaj İletim değeri) kalibre projektöre verilen sinyalin değeridir. Elektroakustik hesaplamalarda kullanılan eşitlikler aşağıda verilmektedir [23].

$$TVR = 20 \log r + 20 \log V_{ref} - 20 \log Me_{ref} - 20 \log V \quad (1)$$

20 log r : projektör ve hidrofon arası mesafe (m)

20 log V_{ref} : Kalibre hidrofondan ölçülen voltaj (V)

20 log Me_{ref} : Kalibre hidrofon RVS değeri (dB/V/ μ Pa)

20 log V : Projektöre verilen voltaj değeri (V)

Alış Voltaj Hassasiyeti olarak tanımlanan ve hidrofon cihazının etkinliğini göstermekte olan RVS değeri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$RVS = 20 \log V_h - TVR - 20 \log V + 20 \log r \quad (2)$$

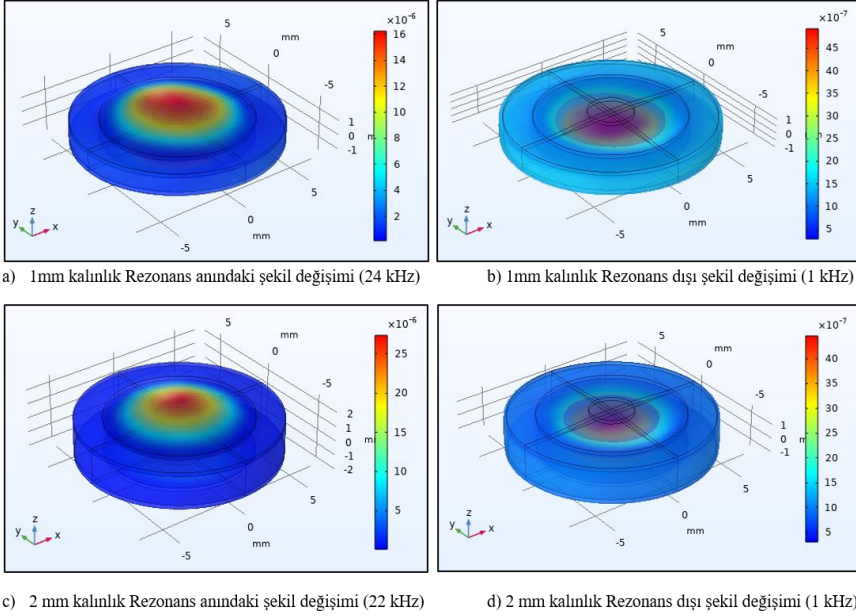
20 log V_h : Ölçülen hidrofondan elde edilen voltaj (V)

20 log V : Projektöre verilen voltaj (V)

20 log r : projektör ve hidrofon arası mesafe (m)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

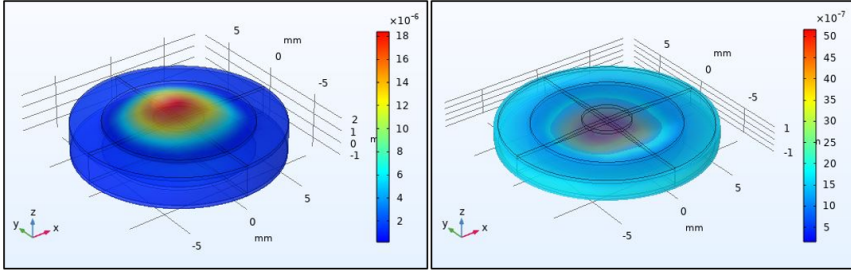
Yapılan COMSOL analizlerinde değişen seramik kalınlığına ve ölçekleme faktörüne bağlı olarak değişen seramik çap değerlerinde şekil değişimi grafikleri elde edilmiştir. 12,7 mm çapında, 1 mm ve 2 mm kalınlık değerine sahip olan zil tipi dönüştürücünün rezonans anındaki ve rezonans dışı şekil değişimi grafikleri verilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. 12,7 mm çapa sahip zil tipi dönüştürücü şekil değişimi grafikleri a) 1 mm kalınlığa sahip Rezonans anındaki şekil değişimi (24 kHz) b) Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz) c) 2 mm kalınlığa sahip seramiğin rezonans anındaki şekil değişimi (22 kHz) d) 2 mm kalınlığa sahip seramiğin Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz)

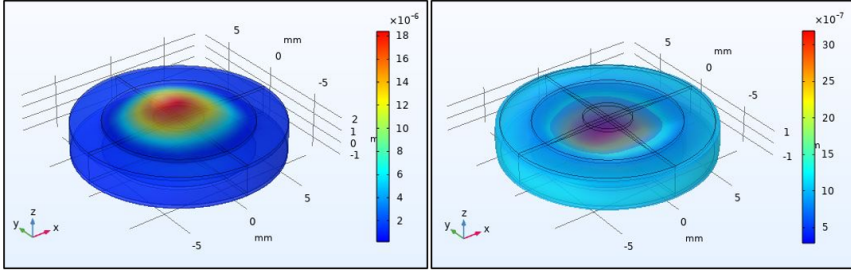
Şekil 6’da görüldüğü üzere 12,7 mm çapa sahip zil tipi dönüştürücüde rezonans anındaki şekil değişimi beklendiği üzere en fazla zil tipi dönüştürücünün konik boşluğunun üzerinde gerçekleşmektedir ve bu değerler 10-6 mm mertebelerindedir. Ancak rezonans dışı gerilmeler incelendiğinde bu değerlerin 10-7 mm mertebelerinde olduğu görülmektedir.

Çap değeri 15,8 mm olduğunda 1 mm ve 2 mm kalınlık değerine sahip olan zil tipi dönüştürücünün rezonans anındaki ve rezonans dışı şekil değişimi grafikleri Şekil 7’de verilmektedir.



a) 1 mm kalınlık Rezonans anındaki şekil değişimi (21 kHz)

b) 1 mm kalınlık Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz)



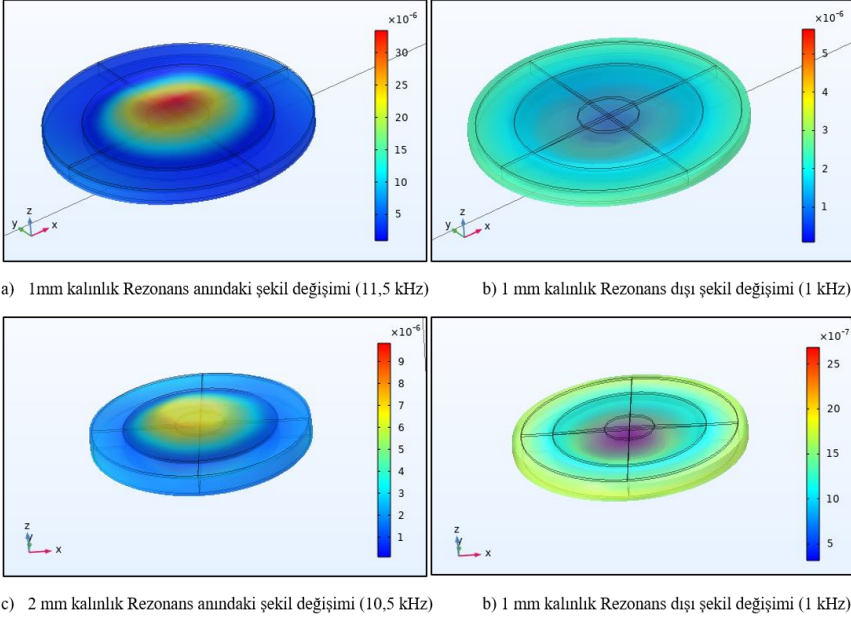
c) 2 mm kalınlık Rezonans anındaki şekil değişimi (20,5 kHz)

d) 2 mm kalınlık Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz)

Şekil 7. 15,8 mm çapa sahip zil tipi dönüştürücü şekil değişimi grafikleri a) 1 mm kalınlığa sahip Rezonans anındaki şekil değişimi (21 kHz) b) Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz) c) 2 mm kalınlığa sahip seramiğin rezonans anındaki şekil değişimi (20,5 kHz) d) 2 mm kalınlığa sahip seramiğin Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz)

Şekil 7'de görüldüğü üzere 15,8 mm çapa sahip zil tipi dönüştürücüde rezonans anındaki şekil değişimi beklendiği üzere en fazla zil tipi dönüştürücünün konik boşluğunun üzerinde gerçekleşmektedir ve bu değerler 18×10^{-6} mm mertebelerindedir. Ancak rezonans dışı gerilmeler incelendiğinde bu değerlerin 10^{-7} mm mertebelerinde olduğu görülmektedir.

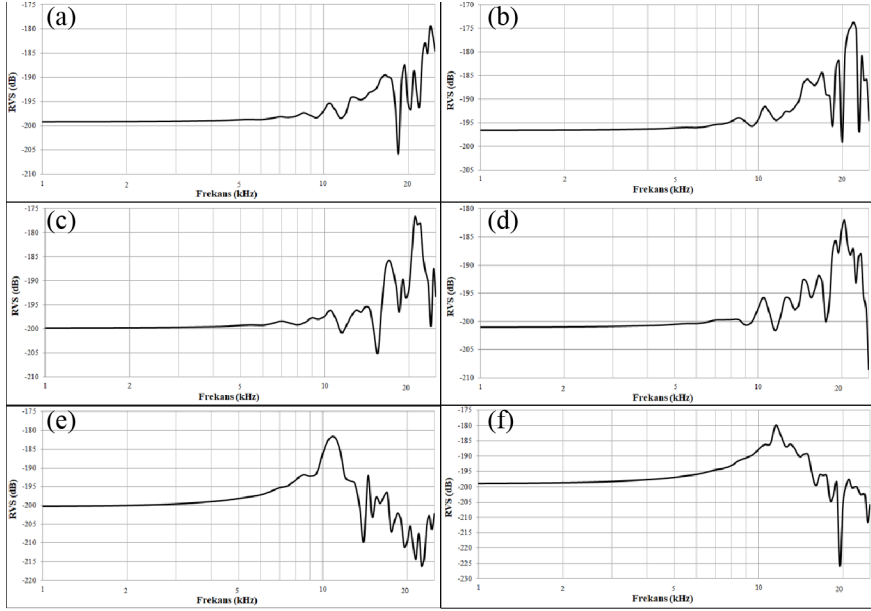
Ölçekleme faktörü 2 yapıldığında; çap değeri 25,4 mm olduğunda 1 mm ve 2 mm kalınlık değerine sahip olan zil tipi dönüştürücünün rezonans anındaki ve rezonans dışı şekil değişimi grafikleri de elde edilmiştir (**Şekil 8**).



Şekil 8. 25,4 mm çapa sahip zil tipi dönüştürücü şekil değişimi grafikleri a) 1 mm kalınlığa sahip Rezonans anındaki şekil değişimi (11,5 kHz) b) Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz) c) 2 mm kalınlığa sahip seramiğin rezonans anındaki şekil değişimi (10,5 kHz) d) 2 mm kalınlığa sahip seramiğin Rezonans dışı şekil değişimi (1 kHz)

Şekil 8’de görüldüğü üzere ölçekleme faktörü 2 olarak kapakçıklara uygulandığında 25,4 mm çapa sahip zil tipi dönüştürücüde rezonans anındaki şekil değişimi, tasarımdan kaynaklı olarak en fazla zil tipi dönüştürücünün konik boşluğunun üzerinde gerçekleşmektedir ve bu değerler 7×10^{-6} mm mertebelerindedir. Rezonans dışı gerilmelerin ise çok daha düşük (17×10^{-7} mm) mertebelerde olduğu görülmektedir.

1 kHz-25 kHz arasında frekansa bağlı olarak elde edilen RVS grafikleri COMSOL simülasyon sonuçları Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Farklı çap ve kalınlığa sahip zil tipi dönüştürücülerin 1-25 kHz frekans aralığındaki RVS değerleri COMSOL sonuçları a) 12,7 mm çap ve 1 mm kalınlığa sahip piezoseramikle üretilen zil tipi dönüştürücü b) 12,7 mm çap ve 2 mm kalınlığa sahip piezoseramikle üretilen zil tipi dönüştürücü c) 15,8 mm çap ve 1 mm kalınlığa sahip piezoseramikle üretilen zil tipi dönüştürücü d) 15,8 mm çap ve 2 mm kalınlığa sahip piezoseramikle üretilen zil tipi dönüştürücü e) 25,4 mm çap ve 1 mm kalınlığa sahip piezoseramikle üretilen zil tipi dönüştürücü f) 25,4 mm çap ve 2 mm kalınlığa sahip piezoseramikle üretilen zil tipi dönüştürücü

Hidrofon aygıtları su altındaki hareket seviyesini stabil bir şekilde algılamak amacıyla genel olarak rezonans altında kalan bölgelerde (rezonans-dışı) verimli şekilde çalıştırılırlar. O sebeple frekansa bağlı RVS eğrilerinin lineer olarak seyrettiği bölgelerde sinyal verimliliği yüksek olarak değerlendirilebilmektedir. Düşük-orta frekans bandında yer alan zil tipi dönüştürücüler 20 kHz altında lineer ve lineere yakın bir eğri göstermektedirler. Cymbal dönüştürücünün 10 kHz değerinin altında olan düşük frekans çalışmalarında verimli olduğu belirtilmektedir [24-25]. Grafikten görüldüğü üzere 6 kHz seviyelerine kadar lineerliğini korumaktadır. 12,7 mm çapa ve 1 mm kalınlığa sahip olan dönüştürücünün -199 dB seviyelerinde alış hassasiyeti gösterdiği görülmektedir. Seramik kalınlığı 2 mm olarak tasarlanınca -197 dB seviyesinin de altına doğru arttığı görülmektedir. Hidrofon aygıtlarında ne kadar düşük dB değerinde olursa o kadar hassasiyeti ve performansı artmış olmaktadır. Bu sebeple hassasiyet değerinin düştüğü görülmektedir. Seramik kalınlığı arttıkça alış hassasiyet seviyeleri tüm çap değerlerinde pozitif değere doğru artış görülmektedir. Pirinç kapakçıklar, oluşan akustik dalga sebebiyle şekil değişimi seviyeleri arttığında

piezoseramiğin de yanal gerinim değerini arttırmaktadırlar [26]. Piezoseramik malzemelerin hidrostatik basınç voltaj katsayısı tüm yönlerden elde edilen voltaj değerinin toplamıdır.

$$d_h = d_{33} + d_{32} + d_{31} \quad (3)$$

d_{31} ve d_{32} katsayıları birbirine eşit ve negatif değerdedir. Ancak zil tipi dönüştürücü uygulamalarında koniksel boşlukların, eksenel gerilimlerin yanal gerinimlere dönüşümünü de sağlayarak elektromekanik etkiyi artırmakta olduğu belirtilmektedir [21].

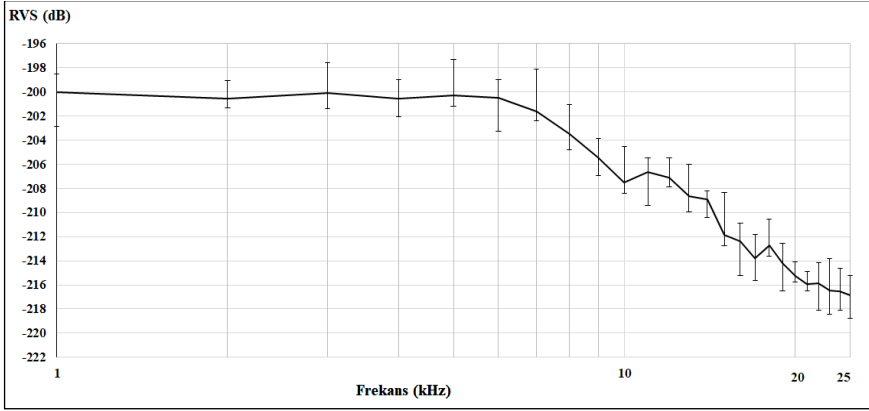
$$d_h = d_{33} + 2d_{31} \quad (4)$$

Zil tipi dönüştürücü yapısındaki koniksel boşluklar, dikey eksenel gerilimlerin yanal gerilimlere dönüşmesini sağlayarak mekanik dönüşümün verimini artırmakta, bu etki tersinir olabildiği için cymbal tasarımı yanal gerilimi dikey harekete çevirmede de etkindir. Tasarımından kaynaklı hidrostatik basınç altında çok yönlü olması sebebiyle uygulamaya bağlı olarak serbest alanlarda kolaylıkla kullanılabilir [9]. Çok yönlü olarak kullanılan bir diğer tasarım küresel tip hidrofonlarda performansın boyuta ve kabuk kalınlığına bağlı olarak değiştiği ayrıca bu tip hidrofonlarda piezoseramiğin üretimi ve su altı kullanımında akustik basınç dayanımında mekanik dayanım değerlerinin önemli olduğuna dikkat edilmesi gerektiği belirtilmektedir [27]. Mekanik dayanımın önemli olduğu bir diğer çeşit hidrofon olan vektör hidrofonlar da hassas sinyalleri algılama kabiliyetlerinden dolayı kullanılmaktadır. Ancak elektroakustik bileşenlerin gürültüleri de algılamasından dolayı filtreleme ve ön yükseltici elektronik devreler içermek durumundadır. Ayrıca yön kazandırabilmek adına farklı yönlerde elemanlar eklenerek yön kazandırılabilir ancak tasarımın karmaşık hale gelmesine neden olduğundan ve bunun dezavantajlarından bahsedilmektedir [28].

Piezoseramiğin kalınlığının arttıkça hassasiyetinin düşme sebebinin; piezoseramik kalınlığı arttıkça piezoelektrik seramiğin daha fazla rijit olması, pirinç kapakçıkların piezoelektrik seramiğin yanal şekil değişimini sağlayamaması ve böylece gerinim değerinin düşmesi olduğu düşünülmektedir. Seramik rijitliği arttıkça piezoseramiğin şekil değişimine uğraması için kapakçıklara uygulanması gereken kuvvetin daha fazla olması gerekmektedir. Aynı derinlik değerinde kapakçık yüzeyine aynı hidrostatik basınç uygulanacaktır. Kapakçıklara etkiyen kuvvet miktarı değişmediğinden ötürü aynı derinlik değerinde piezoseramik daha az şekil değişimine uğramakta ve daha az voltaj elde edilmektedir. Seramik kalınlığı arttıkça pik frekans değerlerinde düşme görülmektedir. Frekans bandında daralma olasılığı artmaktadır. 15,8 mm çapa ve 1 mm kalınlığa sahip zil tipi dönüştürücü -201 dB alış hassasiyeti göstermektedir. Zil tipi dönüştürücü çapı

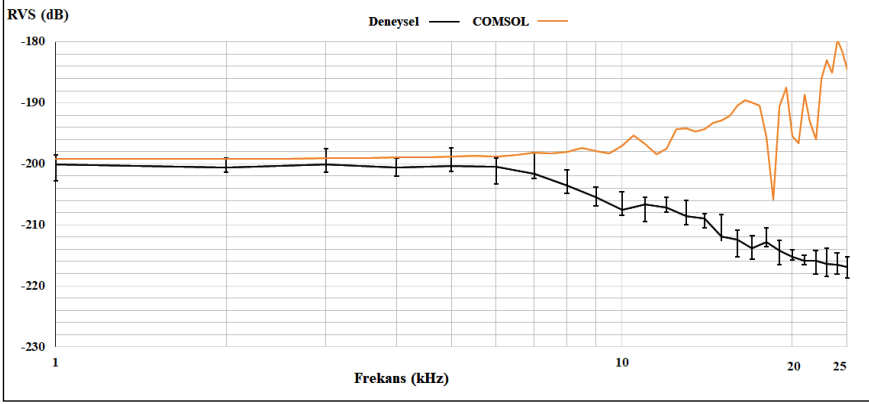
arttığında RVS değerlerinde bir artış meydana geldiği görülmektedir. Ancak frekans bandının ise düştüğü görülmektedir. 25,4 mm çapındaki zil tipi hidrofonun yaklaşık 10-11 kHz civarında rezonans gösterdiği görülmektedir. Lineerliğini koruduğu bölge ise 4 kHz değerine kadar düşmektedir.

Sonuçlardan görüldüğü üzere boyut arttıkça zil tipi dönüştürücünün RVS değeri düşmektedir. Gerçek elektroakustik performansını görmek üzere Piezoseramik kalınlığı 1 mm iken 12,7 mm çapa sahip dönüştürücünün maksimum RVS değeri deneysel olarak akustik havuzda ölçülmüştür (Şekil 10).



Şekil 10. Zil tipi hidrofon RVS deneysel ölçüm sonuçları

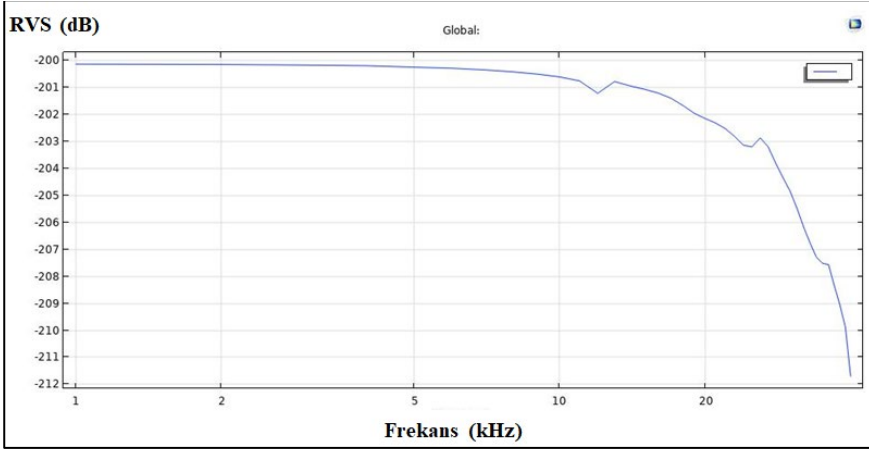
Grafikten görüldüğü üzere zil tipi dönüştürücü deneysel ölçümlerinde lineerliğini 6 kHz değerine kadar korumaktadır. Ayrıca -200 dB seviyelerinde alışı hassasiyeti göstermekte olduğu görülmektedir. Ek olarak 6 kHz seviyesinden sonra ise alışı hassasiyeti değerlerinin -218 dB seviyesine kadar negatif yönde arttığı görülmektedir. Üretilen dönüştürücülerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması Şekil 11'de verilmektedir.



Şekil 11. PZT-5A zil tipi hidrofon COMSOL FEA ve deneysel sonuçlar karşılaştırması

Şekil 11'den görüldüğü üzere deneysel sonuçların sonlu elemanlar analizlerine göre negatif yönde daha yüksek olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlar negatif yönde daha yüksek olmasına rağmen teorik sonuçlarla 6 kHz seviyesine kadar benzer lineer davranış göstermektedir. Ancak deneysel ve teorik sonuçlar 6 kHz frekansından sonra farklı yönlerde artış göstermektedir. Akustik elastik dalgalar havuzun içerisinde yüzeyden ve tank çevresindeki yüzeylerden yansıyarak ölçüm sonuçlarında değişikliklere yol açmaktadır [29-30]. Bu frekanslar kullanılarak yapılan ölçümlerin genellikle daha derin ve yalıtılmış akustik havuz, göl veya denizlerde gerçekleştirildiği bilinmektedir. Ayrıca zil tipi hidrofonun yönlülük analizleri incelendiğinde tüm yönlerden sinyal alabilecek bir tasarıma sahip olduğu ve bu nedenle çok yönlü olduğu görülmektedir [25]. 6 kHz değerinden sonraki su yüzeyinden ve çeperlerden gelen tüm yönlerden gelen yansımaları algılayıp bu değerden sonra karmaşık sinyaller oluşturduğu ve ölçümdeki farklılıkların akustik havuzdaki yansılardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

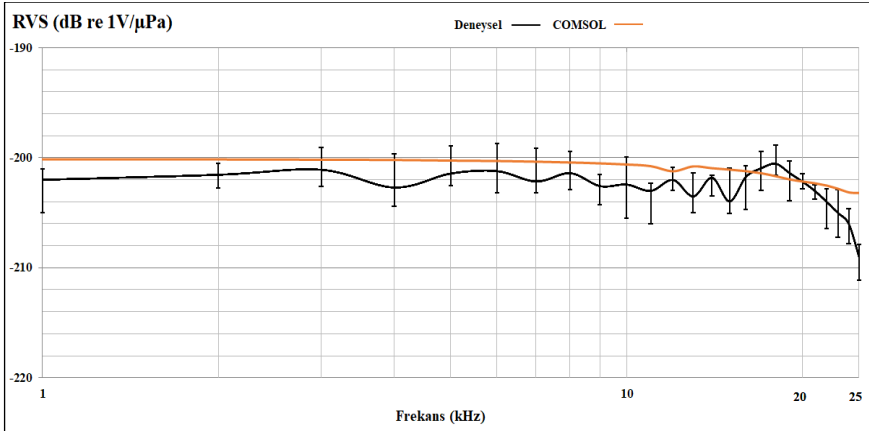
Silindirik tip hidrofonun 1-25 kHz frekans değerleri arasındaki COMSOL sonlu elemanlar analiz sonuçları ise Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Silindirik tip hidrofon COMSOL Sonlu Eleman Analizi sonucu

Grafikten görüldüğü üzere PZT-5A kullanılarak üretilen silindirik tip hidrofon da zil tipi hidrofonta benzer şekilde 1-6 kHz aralığında lineer hassasiyet değerine sahiptir. Bu aralıkta -200 dB değerinden negatif yönde daha yüksek olduğu görülmektedir. 6 kHz değerinden sonra ise COMSOL sonlu elemanlar analizi sonuçlarında da lineerliğin bozulduğu görülmektedir.

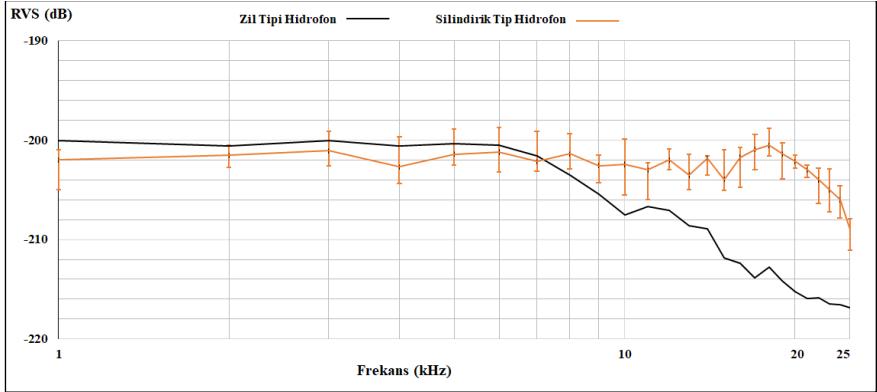
Silindirik tip hidrofonun teorik ve deneysel ölçüm karşılaştırması Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 13. Silindirik tip hidrofonun teorik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırması

COMSOL sonlu elemanlar analizi programı kullanılarak yapılan analizden çıkan teorik sonuçlarda silindirik tip hidrofonun yaklaşık 12 kHz frekans değerine kadar lineer bir grafik oluşturduğu, 12 kHz değerinden sonra ise dalgalanmaların ve RVS değerinde düşüşün meydana geldiği görülmektedir. DeneySEL sonuçlarda da bazı dalgalanmalar olmasına rağmen lineerlik korunmuş, 10 kHz değerine kadar silindirik hidrofon kullanarak ölçümlerin gerçekleştirilebileceği gözlenmiştir. Yöne bağlı ölçümler gerçekleştirilmemiştir. Silindirik tip hidrofon yönlü hidrofon olduğu için su yüzeyinden ve tank çeperlerinden gelen yansımaların tümünü algılamamıştır. Su altı akustik test altyapısı silindirik tip hidrofon ölçümlerinde 12 kHz değerine kadar ölçümlerin gerçekleştirebilmesine olanak sağlamıştır.

Zil tipi hidrofon ve silindirik tip hidrofonların deneySEL verilerinin karşılaştırması ise Şekil 14'te verilmektedir.



Şekil 14. Silindirik ve zil tipi hidrofonların RVS değerleri karşılaştırması

Grafikten görüldüğü üzere 12,7 mm boyut ölçüsü temel alınan her iki tipte hidrofon cihazı da 1-6 kHz düşük frekans bölgesinde lineer bir ölçüm aralığına sahiptir. Silindirik tip hidrofonun ölçüm aralığı 10 kHz mertebesine ulaşmış olsa da, alışı hassasiyeti (-201dB)-(-202dB) aralığındadır. Zil tipi hidrofonun ise alışı hassasiyetinin 2 dB daha yüksek olduğu görülmektedir. Silindirik tip hidrofonlarda performans parametrelerinin seramiğin malzemesi, dış çapı, uzunluğu, et kalınlığı gibi seramiğin üretim özelliklerine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu tip hidrofonlarda bulunan temel problemlerin piezoelektrik seramiğin homojen üretilmesinde yaşanan problemlerle ve seramiğin elektromekanik özellikleriyle ilgili olduğu ve yöne bağlı olarak özelliklerinin değiştiği belirtilmektedir [31].

4. SONUÇLAR

- Bu çalışmada parametrik olarak zil tipi dönüştürücü ve silindirik tip hidrofonlar üretilerek akustik ölçümleri alınmıştır.
- Zil tipi hidrofon tasarımında seramik kalınlığı ve aygıt çapı farklılaştırılarak sonlu elemanlar analizleriyle parametrik olarak incelenmiştir. Seramik kalınlığı arttıkça seramiğin rijitliğinin arttığı bu sebeple 1 mm kalınlığa sahip seramiklerin negatif yönde en yüksek RVS değerine ulaştığı görülmektedir. Dönüştürücü çapı arttığında ise RVS değerleri artıyor olmasına rağmen, frekans bandının daraldığı görülmüştür.
- Düşük frekans uygulamaları için algılayıcı olarak kullanılabileceği görülmektedir.
- Zil tipi hidrofon yapısı kullanılarak -201 dB değerlerinde voltaj alım hassasiyeti değerleri elde edilmiştir. Ayrıca bu yapılar kullanarak dizinler oluşturulabilmektedir. Silindirik yapıdan elde edilen sonuçlar da -202 dB değerlerini sağlamıştır. Bu şekilde hidrofon cihazları prototip olarak üretilebilmiş ve ölçüm sonuçları, sonlu elemanlar analizleri sonuçlarıyla nispi olarak tutarlılık göstermiştir.
- Akustik havuzda zil tipi dönüştürücüler için 6 kHz, silindirik tip hidrofonlar için 12 kHz bandına kadar ölçümlerin yapılabildiği gözlenmiştir. Bu durumun sebebinin zil tipi dönüştürücünün (çok yönlü) yöne bağlı kalmaksızın, su yüzeyinden ve akustik havuz çeperlerinden yansıyan tüm sinyalleri algılaması olabileceği düşünülmektedir.
- Hidrofon cihazlarının yöne bağlı olarak değerlerinin belirlendiği yönlülük analizlerinin farklı bir çalışma olarak yapılması planlanmaktadır.
- Bu çalışmada ölçekleme faktörü uygulanarak ve bu faktörün dışında seramik kalınlığının zil tipi dönüştürücünün pasif uygulamalarındaki performansları detaylı ve COMSOL gibi yeni analiz programıyla belirlenmiştir. Ayrıca enerji hasadı ve medikal alanda yüksek güç uygulamalarında aktif kullanıma sunulabilecek veriler de ortaya konmuştur.

Teşekkür ve Finansman Bilgileri

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 118C548 nolu “Piezoelektrik Seramiklerle Hidrofon Geliştirilmesi” başlıklı 2218 doktora sonrası araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir. Prof. Dr. Aydın Doğan ve Nazif Akdere’ye prototip aşamasındaki, Nebahat Bıyıklı ve Ali Bıyıklı’ya piezoseramikleri hazırlama aşamasındaki, Ö. Can Bayram’a ölçümlerdeki yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

Yazar Katkı Beyanı – CRediT

M.G.: Kavramsallaştırma, Veri Yönetimi, Araştırma, Yöntem geliştirme, Yazım - ilk taslak, Yazım- gözden geçirme ve düzenleme. O.Ç.: Kaynak Sağlama, Biçimsel analiz, Yazılım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından finanse edilmiştir. M.G. ve O.Ç. herhangi bir ek çıkar çatışması bulunmadığını beyan eder.

Veri Erişilebilirliği Beyanı

Bu çalışmanın bulgularını destekleyen veriler, makul bir talep üzerine sorumlu yazardan temin edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] B. Jaffe, W.R. Jr. Cook, H. Jaffe, 1971. *Piezoelectric Ceramics*, 1. Baskı, New York, NY, ABD, Academic Press.
- [2] L.E. Cross, 1996. “Ferroelectric Materials for Electromechanical Transducer Applications” *Materials Chemistry and Physics*, 43, 108-115, [https://doi.org/10.1016/0254-0584\(95\)01617-4](https://doi.org/10.1016/0254-0584(95)01617-4)
- [3] A. Safari, E.K. Akdoğan, 2008. *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications* 2. Baskı. New York, NY. ABD: Springer.
- [4] A. Dogan, K. Uchino, R. E. Newnham, 1997. “Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps “cymbal” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 44(3), 597-605. <https://doi.org/10.1109/58.658312>
- [5] A. Dogan, J.F. Tressler, R.E. Newnham, 2001. “Solid-State Ceramic Actuator Designs,” *AIAA Journal*, 39, 1354-1362. <https://doi.org/10.2514/2.1454>
- [6] J.F. Fernández, A. Dogan, J.T. Fielding, K. Uchino, R.E. Newnham, 1998. “Tailoring the performance of ceramic-metal piezocomposite actuators, “cymbals”,” *Sensors and Actuators A: Physical*, 65(2-3), 228-237. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01668-3](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01668-3)
- [7] Z. Li, A. Huang, G. Luan, J. Zhang, 2006. “Finite element analyzing of underwater receiving sensitivity of PMN-0.33PT single crystal cymbal hydrophone,” *Ultrasonics*, 44, 759-762, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.089>
- [8] D. Kim, Y. Roh, 2024. “Development of a high-performance cymbal vector hydrophone” *Sensors and Actuators: A. Physical*, 365, 114928, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114928>
- [9] D. Kim, Y. Roh, 2023. “Design and Fabrication of a High-Sensitivity and Wideband Cymbal Hydrophone,” *Sensors*, 23 (22), 9086, <https://doi.org/10.3390/s23229086>

- [10] H. Gaber, M. AbdelRaheem, 2025. "Piezoelectric Energy Harvesting from Roadways: Challenges, Advances, and Future Directions," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2679 (12), 760-779. <https://doi.org/10.1177/03611981251353705>
- [11] D. Feng et al., "A Multi-Field Coupled Cymbal Energy Harvester for Self-Powered NV-Center Quantum Sensors," 2026 7th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM), Guangzhou, China, 2026, pp. 602-605, doi: 10.1109/ICMTIM69588.2026.11526635.
- [12] F. A. Boroujeni, P. Prentice, A. Feeney, 2026. "A Cymbal Transducer as a Single-Element Device for Enhanced Cavitation Generation," in *IEEE Transactions on Ultrasonics*, 73(5), 561-573, <https://doi.org/10.1109/TUSON.2026.3675507>
- [13] F. Bejarano, A. Feeney, M. Lucas. "A cymbal transducer for power ultrasonics applications," *Sensors and Actuators A*, c. 210, ss. 182-189, 2014.
- [14] F. Bejarano, A. Feeney, R.Wallace, H.Simpson, M. Lucas, 2016. "An ultrasonic orthopaedic surgical device based on a cymbal transducer" *Ultrasonics*, 72, 24-33, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.07.004>.
- [15] Z. Chen, K.Ye, H. Wu, L. Peng, Z. Chen, 2025. "Thumb-sized 3D-Printed cymbal microneedle array (CyMA) for enhanced transdermal drug delivery," *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 207,114629, <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2025.114629>.
- [16] Min, Z.; Hou, C.; Sui, G.; Shan, X.; Xie, T. Simulation and Experimental Study of a Piezoelectric Stack Energy Harvester for Railway Track Vibrations. *Micromachines*, 2023, 14, 892. <https://doi.org/10.3390/mi14040892>
- [17] X. Li, Y. Wang, K.H. Lam,2026."Dynamic optimisation of class V flextensional transducers with wagon wheel end-cap designs," *Results in Engineering*, 32,112820, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.112820>.
- [18] T. Seecharan, C. Kiffmeyer, N. Voiles, K. Enríchman, A. Hankins, P. Zhao, 2025. "Experimental and Machine Learning Study of a Modified Cymbal Piezoelectric Energy Harvester," *Micromachines*, 16 (12), 1342, <https://doi.org/10.3390/mi16121342>.
- [19] Z. Gong, Y. Zheng, S. Yao, X. Liu, N. Hu, H. Hu, 2024. "Equivalent Circuit of a Stacked Piezoelectric Cymbal Vibrator," *Micromachines*, c.15, s. 10, ss. 1205.
- [20] Y. Zhang and Y. Sang, "Design of Conformal Cymbal Array with High Source Level," *OCEANS 2025 Brest, BREST, France*, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/OCEANS58557.2025.11104693.
- [21] A.E. Üzgür. Zil Tipi Piezokompozit Transdüser Tasarımları Ve Akustik Uygulamaları, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2006.
- [22] D. Teng, Y. Li, H. Yang "Comparison between 31-mode and 33-mode Thin-walled Piezoelectric Tube Hydrophones" *Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast*. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF38699.2020.9389084>
- [23] J.L. Butler, C.H. Sherman. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, 2nd Ed, Springer Cham, İsviçre. 2016.
- [24] R. E. Newnham, J. Zhang and R. Meyer, "Cymbal transducers: a review," *ISAF 2000. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IEEE Cat. No.00CH37076)*, Honolulu, HI, USA, 2000. 1, 29-32, <https://doi.org/10.1109/ISAF.2000.941506>
- [25] J. F. Tressler, R.E. Newnham, W. J. Hughes, 1999."Capped ceramic underwater sound projectors: The 'cymbal' transducer" *J. Acoust. Soc. Am.* 105, 591-600 <https://doi.org/10.1121/1.426249>
- [26] R.J. Meyer, W.J. Hughes, , T.C. Montgomery, 2002. "Design of and Fabrication Improvements to the Cymbal Transducer Aided by Finite Element Analysis" *Journal of Electroceramics* 8, 163-174, <https://doi.org/10.1023/A:1020512231158>
- [27] D. Teng, H. Yang, G. Zhu, Design and test about high sensitivity thin shell piezoelectric hollow sphere hydrophone, in: *OCEANS 2017-Anchorage, IEEE: Anchorage, AK, USA*, 2017, pp. 1-6.
- [28] Q. Zeng, H. Liu, H. Mao and Y. Yao, "Progress in Sensing Mechanisms and Integration for Hydrophones: A Review," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 26, no. 11, pp. 16515-16537, 1 June1, 2026, doi: 10.1109/JSEN.2026.3685792.
- [29] W.Kuperman, P. Roux,, 2007. *Underwater Acoustics*. In: Rossing, T. (eds) *Springer Handbook of Acoustics*. Springer Handbooks. New York, NY. ABD: Springer,
- [30] L. Bjørnø, 2017. *Applied Underwater Acoustics*, 2. Baskı, Amsterdam, Hollanda: Elsevier Radarweg.
- [31] L. Huang, Z. He, J. Zhou, X. Zhong, "Finite Element Analysis and Structural Optimization of a Tubular Piezoelectric Ceramic Hydrophone" 2026 6th International Conference on Sensors and Information Technology (ICSI), 155-163. <https://doi.org/10.1109/ICSI70302.2026.11544859>