



Sesötesi Kabarcık Rezonansına Dayanan Elastomer Eyleyici

Program Kodu: 1001

Proje No: 111M597

**Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Barbaros Özdemirel**

**ŞUBAT 2015
ANKARA**



Önsöz

Bu proje kapsamındaki çalışmalar İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiş ve Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (ARDEB Proje No: 111M597). Yapılan çalışmalar, kabarcık rezonansına dayanan elastomer eyleyici yapılarının olabilirliğinin incelenmesi için bir ön araştırma niteliğindedir.

Proje çalışmaları iki ana hedefe yöneliktir. Birinci hedef optik yöntemlerle elastomer bir ortamda kabarcık hareketini gözlemek, ikinci hedef ise kabarcık rezonans hareketinin matematiksel bir modelini oluşturmaktır. Kabarcık hareketini gözleyebilmek için saydam kauçuk döküm malzemeleriyle elde edilen örnek kalıpları kullanılmıştır. Matematiksel modelleme amacıyla benzetim programları geliştirilmiş ve kullanılan kauçuk malzemelerin gerekli akustik özelliklerini belirlemek için ses hızı ve sönümü ölçümleri yapılmıştır.

Katıhal eyleyici yapılarına ve akustik araştırma yöntemlerine ek olarak sesötesi dönüştürücülerin, sürücü devrelerinin ve bazı temel optik donanımın yapımıyla ilgili bu raporda sunulan ayrıntılı bilgiler benzeri konularda yapılacak araştırmalar için yararlı olabilecektir.

İçindekiler

	<u>Sayfa</u>
Tablo Listesi	iv
Şekil Listesi	iv
1 Giriş	1
1.1 Proje İlerleyiş Özeti	2
2 Literatür Özeti	3
2.1 Katıhal Eyleyici Yapıları	3
2.2 Kabarcık Rezonansı	4
2.3 Kauçuk Malzemelerin Akustik Özellikleri	6
3 Gereç ve Yöntem	7
3.1 Sesötesi Dönüştürücüler	8
3.1.1 Sesötesi Dönüştürücü Sürücü Devresi	10
3.2 Ses Hızı ve Sönümü Ölçüm Düzeneği	15
3.3 Kabarcık Hareketi Gözlem Düzeneği	16
3.4 Kabarcıklı Kauçuk Örneklerinin Hazırlanması	18
3.5 Kabarcık Hareketi Benzetim Programı	21
3.5.1 Matematiksel Kabarcık Modeli	23
4 Bulgular	27
4.1 Ses Hızı ve Sönümü Bulguları	27
4.2 Akusto-optik Etkileşim	28
4.3 Kauçuk Örneklerle Ölçümler	30
4.4 Kabarcık Hareketi Modelleme Bulguları	34
5 Sonuç	40
5.1 İleriye Yönelik Öneriler	41
Kaynaklar	43

Tablo Listesi

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. Kauçuk malzemelerde ölçülen ses hızı ve sönüm değerleri.	27
Tablo 2. Yapılan ölçümlere ve modelleme sonuçlarına göre aynı rezonans frekansına karşılık gelen kabarcık yarıçapı değerleri.	40

Şekil Listesi

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1. Kabarcık hareketini gözleme düzeneğinin temel yapısı.	7
Şekil 2. Projenin birinci yılında kullanılan optik izleme düzeneği	8
Şekil 3. Odaklı sesötesi dönüştürücü resimleri	9
Şekil 4. Odaklı sesötesi dönüştürücü yapım aşamaları	10
Şekil 5. +12 V girişli ve +100 V doğru akım çıkışlı yükseltici dönüştürücü devresi.	10
Şekil 6. +12 V girişli ve -100 V doğru akım çıkışlı ters dönüştürücü devresi.	12
Şekil 7. Yüksek gerilim sürücü için DC bağlantılı güçlendirici devresi.	13
Şekil 8. Montajı yapıldıktan sonra regülatör ve güçlendirici devreleri.	13
Şekil 9. Güçlendirici devresi +/-80 V çıkış işaretleri.	14
Şekil 10. Akustik parametre ölçümü için hazırlanan kalıplar	15
Şekil 11. Akustik parametre ölçümü için hazırlanmış olan su tankı.	16
Şekil 12. Optik gözlem düzeneği parçaları.	17
Şekil 13. Su tankına monte edilmiş haliyle optik gözlem düzeneği.	17
Şekil 14. Silikon kauçuk örneği.	18
Şekil 15. Poliüretan kauçuk örneği.	19
Şekil 16. Kabarcık hareketi benzetim programı veri akış şeması.	22
Şekil 17. Silikon kauçukla 1 MHz'te alınan akustik ölçüm işaretleri.	28
Şekil 18. Kabarcıksız ortamda gözlenen akusto-optik etkileşim.	29
Şekil 19. Silikon kauçukta 390 KHz'te kabarcık rezonans hareketi.	30
Şekil 20. Silikon kauçukta 760 KHz'te kabarcık rezonans hareketi.	31

Şekil 21. Poliüretan kauçukta 330 KHz'te kabarcık rezonans hareketi.	32
Şekil 22. Poliüretan kauçukta 700 KHz'te kabarcık rezonans hareketi.	33
Şekil 23. Poliüretan kauçukta 1 MHz'te kabarcık rezonans hareketi.	34
Şekil 24. Kabarcık vuru yanıtı.	35
Şekil 25. Kabarcık rezonans frekansının kabarcık yarıçapı (R_{K0}) ve elastomer ortamın esneklik modülüne (E_E) bağlı olarak değişimi.	36
Şekil 26. Elastomer ortamın akışmazlığının (ν_E) değişik değerlerinde kabarcık frekans yanıtı.	36
Şekil 27. Sürekli basınç değişimi altında kabarcık hareketi.	38
Şekil 28. Ortamdaki basınç değişimlerinin farklı genlik değerlerinde kabarcık rezonans hareketinin frekans yanıtı.	39

Özet

Bu projenin ana hedefi, hareket aralığı kendi boyutlarıyla aynı ölçekte olan bir katıhal eyleyici yapısını araştırmaktır. Bir elastomer kalıp içerisine dağılmış olan çok sayıda küçük kabarcık dışarıdan uygulanan bir ses dalgasıyla rezonansa getirilebilir. Toplam kabarcık hacmindeki değişime bağlı olarak elastomer kalıp genişleyecek ve serbest bırakılan yüzeyleri hareket edecektir. Bu çalışmada kabarcık rezonansının benzetim modelleri geliştirilmiş ve saydam kauçuk döküm malzemeleri içinde kabarcık rezonans hareketi optik gözlem düzenekleri kullanılarak gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar önerilen eyleyici yapısının gerçekleştirilmesinde iki zorlayıcı etken ortaya çıkarmıştır. Birinci etken kauçuk malzemelerde ses sönümünün yüksek oluşu ve sonucunda rezonans hareketinin sınırlı kalmasıdır. İkinci etken ise bu çalışmada kullanılan kauçuk döküm malzemeleri içinde hedeflenen çapta ve rezonans frekansında kabarcıkların elde edilmesindeki zorluklardır. Özellikle, sertleşme sürelerinin saatler düzeyinde oluşu oda sıcaklığında tepkime veren kauçuk karışımlarıyla yapılan çalışmaları sınırlamıştır.

Anahtar Kelimeler: sesötesi, kabarcık rezonansı, kauçuk, elastomer, piezoelektrik eyleyici

Abstract

The main purpose of this project is to investigate a solid-state actuator structure that has a motion range in the same order of magnitude with its size. A large number of small bubbles placed in an elastomer block can be put into resonance by an externally applied sound wave. The elastomer block will expand depending on the changes in the total bubble volume, resulting in motion of the block surfaces that are free to move. In this study, simulation models of bubble resonance were developed, and bubble resonance motion in clear rubber molding materials is observed by using optical monitoring apparatus. The studies bring out two challenging factors in realization of the proposed actuator structure. The first factor is the limited resonance motion resulting from higher sound attenuation in rubber materials. The second factor is the difficulties in obtaining bubbles with the target diameter and resonance frequency in the rubber molding materials used in this study. Especially, the curing times in the order of hours restricted the studies performed on room temperature vulcanization rubber mixtures.

Keywords: ultrasound, bubble resonance, rubber, elastomer, piezoelectric actuator

1 GİRİŞ

Geleneksel elektromekanik ve su/hava basıncıyla çalışan eyleyicilerin yerini alabilecek elektrik enerjisini mekanik harekete dönüştüren yeni madde ya da bileşik yapılar otuz yılı aşkın bir süredir araştırılmaktadır. Bu araştırmaların ortak amacı basit, sürtünmesiz, dayanıklı ve denetlenebilir hareket düzenekleri elde etmektir. Kimi kaynaklarda katıhal eyleyiciler olarak sınıflandırılan bu tür eyleyici yapılarıyla hedeflenen, özellikle yapay kas, robot kolları, eyleyici dizileri gibi geometrik tasarım kısıtlamalarının olduğu uygulama alanlarıdır. Bellekli alaşımlar, piezoelektrik ya da manyetostriktif maddeler, dielektrik elastomerler ve benzeri elektroaktif polimerler ya sınırlı yetenekleri ya da seri üretimde ortaya çıkan zorluklar nedeniyle şimdiye kadar sınırlı uygulama alanları bulabilmiştir.

Piezoelektrik seramikler duyarlı hareket kontrolü uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu maddelerin pratikte sergilediği hareket aralığının boyutlarına oranı % 0.1 düzeyindedir. Bu nedenle, milimetre ölçeğinde eyleyici yapılarıyla piezoelektrik etki doğrudan kullanılarak elde edilebilecek hareket aralığı mikrometrelerle sınırlıdır. Daha geniş hareket aralıkları elde etmeyi amaçlayan bütün tasarımlar, hareket dönüşümünü sağlayabilmek için çok daha büyük geometrik yapılara gerek duymaktadır.

Bu projenin amacı, elastomer bir madde içinde sesötesi dalgalarla uyarılan kabarcık davranışının, özellikle kabarcık rezonans mekanizmasının gözlenmesi ve bu gözlemlerle desteklenen bir matematiksel model oluşturularak kabarcıklı elastomer yapısının bir eyleyici olarak kullanım potansiyelini değerlendirmektir. Önerilen eyleyici yapısının yeterince düşük maliyetle seri üretimi için gerekli teknoloji hali hazırda mevcuttur. Bu yeni eyleyici yapısıyla % 10'lar düzeyinde bir genleşme ve pratikte yararlı olabilecek bir kuvvet elde edildiğinde bir çok geleneksel hareket kontrol düzeneğinin yerini alabilecektir. Ayrıca milimetre ölçeğinde ve daha büyük ölçeklerde eyleyici tasarımları geometrik kısıtlamalarının olduğu uygulama alanlarında kullanılabilir.

1.1 Proje İlerleyiş Özeti

Proje çalışmalarına 15 Mart 2012 tarihinde başlanılmış ve iki yıllık bir sürede tamamlanması öngörülmüştür. Kauçuk malzemelerin yurtdışından sağlanmasındaki zorluklar ve projede görevlendirilecek yeterli düzeyde bursiyer bulunamayışı nedenleriyle projenin bitiş tarihi dokuz ay ertelenerek çalışmalar 15 Aralık 2014'e kadar sürdürülmüştür.



Projenin üçüncü ayında görevlendirilen ilk bursiyerin çalışmalardaki yetersizliği nedeniyle altı ay içinde görevi sonlandırılmıştır. Diğer bir bursiyer ise 2014 Ocak ayında projede çalışmaya başlamış ancak gerekli eğitimini tamamlamadan yurtdışında bir yüksek lisans programına geçmiştir. Proje kapsamında belirtilen bütün çalışmalar proje yürütücüsü Barbaros Özdemirel tarafından yerine getirilmiştir.

Projenin birinci yılında kabarcık hareketinin gözlenmesi için sesötesi dönüştürücüler silikon kauçuk örneklerine doğrudan değecek şekilde bir düzenek geliştirilmiştir. Projenin sonraki aşamalarında odaklı dönüştürücüler yapılarak poliüretan kauçuk örnekleri bir su tankı içinde gözlenmiştir. Matematiksel modellerde kullanılan ses hızı ve sönümüyle ilgili sabitler için önce literatürde var olan değerler kullanılmış, daha sonra ise hem hedeflenen sesötesi frekanslarda hem de projede kullanılan kauçuk malzemeler için sağlıklı değerler bulunamadığı için özel amaçlı kauçuk örnekler hazırlanarak gerekli ses hızı ve sönümü ölçümleri yapılmıştır.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Yapılan literatür taraması sonucunda elastomer maddeler içerisinde kabarcıkların akustik dalgalarla etkileşiminin şimdiye kadar araştırılmadığı görülmüştür. Bu proje konusuyla ilgili literatürde yer alan yayınlar, katıhal eyleyici türleri, kabarcık rezonansı ve kauçuk malzemelerin akustik özellikleri olmak üzere üç ana başlık altında incelenmiştir.

2.1 Katıhal Eyleyici Yapıları

Geleneksel ya da klasik diye sınıflandırılabilir elektromekanik ve su/hava basıncıyla çalışan eyleyicilere alternatif olarak öngörülen katıhal eyleyici teknolojileri aşağıda sıralanmıştır. Her eyleyici teknolojisinin avantajları ve yaygın kullanımına engel teşkil eden dezavantajları özetlenmiştir. Eyleyiciler değerlendirilirken doğal kas yapısı ya da benzeri kapasitede bir robot kolundan beklenen nitelikler referans olarak alınmıştır. Bu projede öngörülen çalışmalarla doğrudan ilgili olmasa da aynı amaca yönelik araştırmaları incelemek, hedeflenen eyleyici yapısından beklenen niteliklerin anlaşılması yönünden yararlı olacaktır.

Piezoelektrik maddeler tek başına kullanıldığında elde edilebilen hareket basıncı, enerji verimliliği ve hareket hızı üstün düzeydedir (Doğan ve Uzgur, 2008). Dayanıklılık ve seri üretim kolaylığı bakımından da avantajlı olan piezoelektrik eyleyicilerin sakıncası, toplam gerinim ya da hareket aralığının madde boyutlarına oranının % 0.1 düzeyinde kalmasıdır. Ticari olarak sağlanabilen, çok sayıda piezoelektrik seramik tabakanın üstüste yerleştirilmesiyle oluşturulmuş piezoelektrik eyleyicilerin doğrusal gerinim aralığı 100 mikronla sınırlıdır. Piezoelektrik seramik tabakaların metaller ya da başka piezoelektrik tabakalara yapıştırılmasıyla oluşturulan ve bükülme davranışı gösteren yapılarla daha geniş hareket aralıkları elde edilebilir. Ancak bu yapılarla çoğu uygulama için gerekli kuvvet ve paketleme yoğunluğu sağlanamaz.

Magnetostriktif maddeler hareket basıncı, gerinim ve enerji verimliliği açısından piezoelektrik maddelere benzer niteliktedir (Claeyssen vd., 2003). Magnetostriktif maddeler hareket hızı bakımından dezavantajlıdır. Ayrıca manyetik alanın elde edilmesi için gerekli donanım nedeniyle üretim kolaylığı ve fiziksel yapıları bakımından klasik elektromekanik eyleyicilerden çok da farklı değildir.

Bellekli alaşımlarla oluşturulan eyleyiciler verimlilik ve hareket hızı bakımından çoğu uygulamada yetersiz kalmaktadır ve uzun süreli kullanımda denetim ve tekrarlanabilirlik

bakımından belirsizlik gösterirler (Birman, 1997). Bu eyleyicileri harekete geçirmek için gereken sıcaklık değişimleri kullanım alanlarını sınırlayan diğer bir unsurdur.

İyonik polimer metal kompozit eyleyiciler polimer bir film içerisinde elektrik alanı altında iyonların yönlendirdiği su hareketiyle bükülme davranışı gösteren bileşik yapılardır (Cheng vd., 2008). Bu eyleyiciler hemen her bakımdan doğal kas yapısından beklenen nitelikleri sağlamaktadır. İyonik polimer metal kompozit eyleyicilerin bükülme davranışıyla kısıtlı kalması, içerdiği su nedeniyle kullanım ömrünün sınırlı olması ve pahalı üretim teknolojisi nedeniyle yaygın kullanımı sağlanamamıştır.

Dielektrik elastomerler son on yılda en çok dikkat çeken eyleyici teknolojisi olmuştur. İki iletken plaka arasına yerleştirilen dielektrik elastomer film uygulanan elektrik alanıyla ortaya çıkan Coulomb kuvveti nedeniyle sıkışır. Sıkışma sonucunda diğer yönlerde ortaya çıkan genişleme istenilen hareketi sağlar (Suo, 2010). Bu eyleyiciler her bakımdan doğal kas yapısından beklenen nitelikleri sağlamaktadır (Mascardo vd., 2008, Pelrine vd., 2002). Dielektrik elastomer eyleyicilerin üretimindeki zorluk, genişleyen elastomerle uyumlu hareket etmesi gereken elektrodların dayanıklılığını sağlamaktır. Ayrıca KV düzeyinde gerilimler kullanıldığından hem sürücü donanımı hem de elektriksel yalıtım gerekleri kullanımı zorlaştırmaktadır.

2.2 Kabarcık Rezonansı

Kabarcık rezonansı, sualtı akustiğiyle ilgili olarak kHz düzeyinde ve tıbbi ultrasonik görüntülemeyle ilgili olarak MHz düzeyinde ses frekanslarında incelenmiştir. Kaviteasyonla ortaya çıkan (negatif basınç altında yoktan varolan) kabarcıkların gemi pervanelerine verdiği zarar incelenmiştir (Rayleigh, 1917). Kabarcıkların daralması sırasında salınan enerjinin bir noktada yoğunlaşması sonucunda ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve şok dalgaları metalleri aşındırarak pervane ve pompalara zaman içinde zarar verebilmektedir (Brennen, 1995). Bir hava kabarcığının sudaki davranışı üzerine ilk matematiksel çözümleme daha sonra geliştirilerek Rayleigh-Plesset denklemi diye bilinen aşağıdaki denklem elde edilmiştir (Epstein ve Plesset 1950):

$$\frac{p_K(t) - p_{S\infty}(t)}{\rho_S} = R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\mu_S}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\sigma}{\rho_S R} \quad (1)$$

Bu denklemde R kabarcığın yarıçapı, p_K kabarcığın içindeki gaz basıncı, $p_{S\infty}$ kabarcıktan uzaktaki sıvı basıncı, ρ_S sıvının özkütlesi, μ_S sıvının akışmazlığı (viskozite) ve σ gazla sıvı arasındaki yüzey gerilimidir.

Rezonansa getirilmiş bir kabarcığın daralması sırasında ışık yaydığı 1989'da gözlenmesinden sonra sonoluminasans adı verilen bu olgu çok sayıda fizikçinin ilgisini çekmiştir (Brennen vd., 2002). Sonoluminasans sonucunda morötesi dalga boyunda ışık gözlenmesi kabarcık daralırken sıcaklığının onbinlerce dereceye ulaşabildiğini göstermektedir. Sonoluminesans olgusunu açıklamak için bir çok hipotez ortaya konmuş, ancak henüz kesin bir açıklama getirilememiştir. Kavitasyon ve sonoluminesans üzerine yapılan araştırmalar kabarcık rezonansına dayalı bir eyleyici içinde oluşabilecek zararları göstermesi açısından dikkate alınmalıdır.

Tıp alanında kabarcık rezonansına yönelik araştırmalar çoğunlukla mikrokabarcıkların ultrasonik görüntüleme kontrast madde olarak kullanılmasıyla ilgilidir. Rezonans frekansında sesötesi dalgalarla uyarılan mikrometre ölçeğinde kabarcıkların yol açtığı geri saçılım ultrasonik görüntüleme kolayca izlenebilecek şiddettedir. Tıp alanında öngörülen diğer bir uygulama da mikro-kabarcıklar aracılığıyla dokulara lokal olarak ilaç verilmesidir. Kan dolaşımıyla bütün vucuda yayılan ilaç taşıyıcı mikrokabarcıklar sesötesi dalgalarla uyarıldıkları yerde parçalanarak yalnızca uyarılan bölgeye ilaç iletimi sağlanabilir.

Mikro kabarcıkların tıp alanındaki olası uygulamaları nedeniyle kabarcık rezonansı çeşitli koşullar altında daha ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Dış basınçtaki değişikliklerin kabarcık rezonansı üzerine etkisi araştırılmıştır (Andersen ve Jensen, 2009). Rayleigh-Plesset denkleminde yola çıkılarak kabarcığı çevreleyen bir kabuğun varlığının kabarcık rezonansı üzerine etkisi modellenmiştir (Postema ve Schmitz 2007). Kabarcık rezonansının matematiksel olarak modellenmesi üzerine en detaylı çalışma, kabuklu kabarcık hareketinin viskoelastik bir ortamda araştırılmasıdır (Khismatullin, 2002, 2004).

Farklı türde kabarcık etkileşimine dayanan eyleyiciler mevcuttur (Broek 2008). En yaygın olarak bilinen örnek, ani ısınma sonucunda oluşan buhar kabarcıklarının yarattığı basınçla sıvı pompalanması prensibini kullanan "BubbleJet" yazıcılarıdır. Diğer örnekler arasında kabarcık difüzyon pompası ve elektrolizle oluşturulan kabarcıkların kullanıldığı basınçlı sistemler yer alır. İlginç bir diğer örnek, bir ucu kapalı ince bir tüp içerisinde rezonansa getirilen kabarcığın yarattığı itme kuvvetidir (Dijkink vd., 2006) Kabarcık daraldığında tüpe sıvı girişi her açıdan olurken kabarcık genişlediğinde yaratılan jet akışı, sıvı çıkışını tek bir doğrultuya yönlendirir. Sıvı ortamda çalışmak üzere tasarlanan bu sistemde sıvı girişi ve çıkışı arasındaki açısal farklılık net bir itme kuvvetiyle sonuçlanır.

2.3 Kauçuk Malzemelerin Akustik Özellikleri

Kauçuk malzemeler temelde katı olmalarına rağmen sıkışma ses dalgalarının (*İng. compressional wave*) yayılımı söz konusu olduğunda daha çok vizkoelastik sıvı gibi davranan maddelerdir. Kabarcık rezonansının matematiksel modellenmesi yönünden önemli olan akustik özellikler, ses hızı, ses sönümü ve bu değerlere bağlı olarak esneme/sıkışma modülü ve akışmazlık (*İng. viscosity*) değerleridir.

Kauçuk malzemeler, ana elastomer bileşenlerine bağlı olduğu kadar elde edilme yöntemleri ve uygulamaya yönelik katkı maddeleri bakımından da çeşitlilik göstermektedir. Ayrıca, kauçuk malzemeler üzerine yapılan çoğu araştırma sonuçları kHz düzeyinde ses frekanslarıyla sınırlıdır ve mekanik kayıpların ölçümünde kullanılan reometreler yine düşük frekanslarda kullanılabilir (Mott vd, 2002). Bu projede kullanılan MHz'e yakın frekanslarda elastomerlerin akustik özellikleri tıbbi görüntüleme amaçlı dönüştürücü yapımında akustik mercek malzemesi olarak araştırılmıştır (Hosono vd., 2007) ve metal oksit tanecikler eklenerek silikon kauçuk içinde ses sönümü azaltılmaya çalışılmıştır.

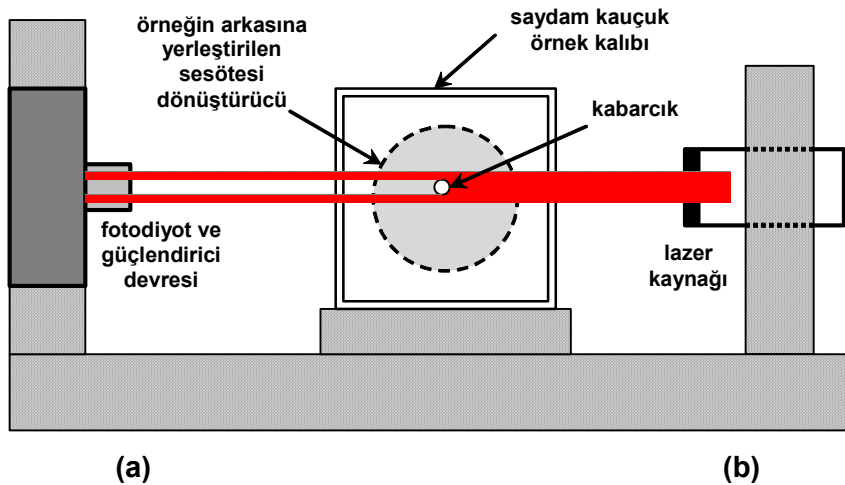
Bu projede optik yöntemlerle kabarcık hareketini gözleyebilmek için saydam kauçuk döküm malzemeleri kullanılmıştır. Bu malzemelerin asıl işlevi kuyumculukta hassas döküm amaçlı kalıp hazırlanması olduğu için akustik özelliklerinin nicel değerlerini literatürde bulmak mümkün değildir. Ses hızı ve sönümü değerleri özel olarak hazırlanan bir düzenek ve kauçuk örnekleri kullanılarak belirlenmiştir. İlgili ayrıntılar sonraki bölümlerde verilmiştir.

3 GEREÇ ve YÖNTEM

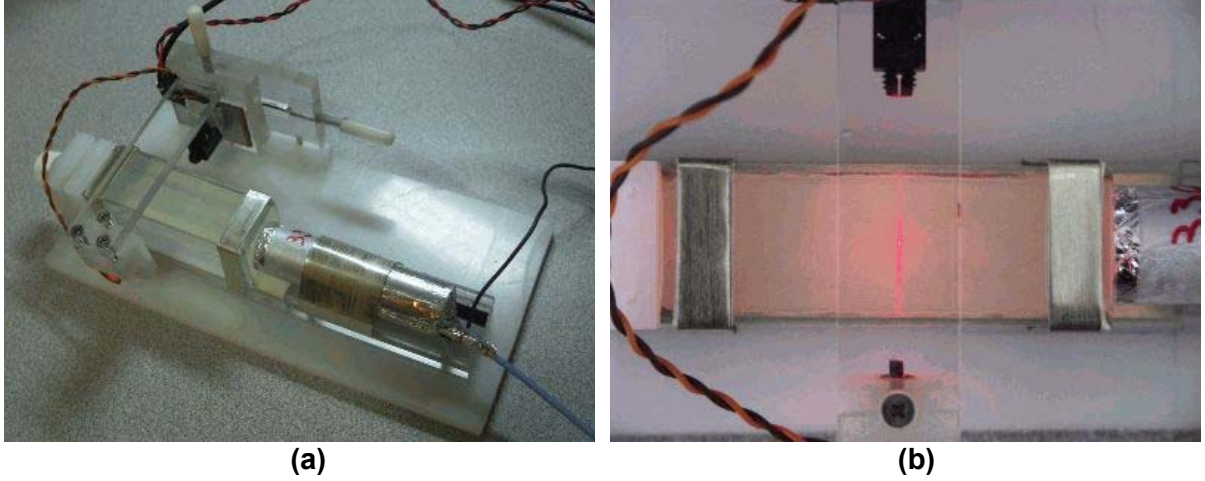
Kabarcık büyüklüğündeki değişimleri izlemek amacıyla hazırlanan düzeneğin temel yapısı Şekil 1'deki çizimde gösterilmiştir. Saydam kauçuk örneği, bir katihal kırmızı lazer kaynağı ile bir fotodiyot arasına yerleştirdiğinde fotodiyot tarafından algılanan ışık şiddeti kabarcık büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Ses dalgasının yayılma yönü lazer ışınına dik olacak şekilde sesötesi dönüştürücü kauçuk örneğinin arkasına yerleştirilmiştir. Sinyal etkileşimlerini engellemek için fotodiyot güçlendirici devresinin fotodiyotun yanına yerleştirilmesi gerekir.

Saydam akrilik bloklar frezede işlenerek iki boyutlu hassas yerleştirme düzenekleri yapılmıştır. Blokların birbirlerine göre hareketi 0.5 mm diş aralığı olan 3 mm çapında vidalar döndürülerek sağlanır. Düzeneğin hareket aralığı kısa ekseninde 20 mm, uzun ekseninde 50 mm'dir ve hassasiyeti yaklaşık 10 μ m'dir. Yerleştirme düzenekleriyle kauçuk örneğin konumu ya da lazer kaynağı ve fotodiyotun konumu ayarlanabilmektedir.

Projenin birinci yılında kullanılan optik izleme düzeneğinde sesötesi dönüştürücüler silikon kauçuk örneklerle doğrudan temas halindedir. Bu aşamada kullanılan düzenek ve lazer ışını altında görüntülenen kabarcık resimleri Şekil 2'de verilmiştir. Projenin ileriki aşamalarında silikon yerine poliüretan kauçuk malzemeler kullanılmış ve kabarcıklar üzerinde daha yüksek dalga genişliği elde edebilmek için odaklı sesötesi dönüştürücüler yapılmıştır. Kauçuk örnekleri odak uzaklığına rahatlıkla yerleştirebilmek için su tankında ölçümler yapılması tercih edilmiştir.



Şekil 1. Kabarcık hareketini gözleme düzeneğinin temel yapısı.



Şekil 2. Projenin birinci yılında kullanılan optik izleme düzeneği (a) Düzeneğin genel görünüşü. (b) Lazer ışını altında görüntülenen kabarcık.

Proje çalışmalarında kullanılmak üzere akrilik tabakalar frezede işlenerek çok amaçlı bir su tankı yapılmıştır. Sesötesi dönüştürücüler su tankının altında ya da yanlarında açılmış deliklerde ileri geri hareket ettirilerek merkeze uzaklıkları ayarlanabilir. Dönüştürücüler çevresinde su sızdırmazlığı lastik halkalarla (*İng: o-ring*) sağlanmıştır.

3.1 Sesötesi Dönüştürücüler

Sesötesi dönüştürücülerin arka destek tabakalarının (*İng: backing layer*) yapımı için kalıp malzemesi olarak döküm epoksisi (Dost Kimya, BOND-350D) pirinç metal tozu ile karıştırılmıştır. Karıştırma oranı 1.0 g epoksi karışım için 2.0 g pirinç tozudur. Düzgün bir silindir elde etmek için 20 ml'lik plastik enjektörler kalıp olarak kullanılmış ve 45 °C sıcaklıkta 2 saat fırınlanarak tam katılaşma için 24 saat bekletilmiştir. Kalıplama işlemiyle elde edilen ~21 mm çapında ve ~65 mm boyunda silindirler tornada işlenerek dönüştürücülerin arka destek tabakası olarak kullanılan 20.0 mm çapında ve 60.0 mm boyunda silindirler elde edilmiştir. 16 mm çapında, 1 MHz, 0.67 MHz ve 0.33 MHz rezonans frekansında piezoelektrik seramikler, elektrot yüzeylere kabloların lehimlenmesinden sonra arka destek tabakalarına yapıştırılmıştır. RG174 standardında bağlantı kabloları arka tabakalar üzerinde frezede açılan oluklara gömülerek sağlamlaştırılmıştır. İlk yapılan sesötesi dönüştürücüler doğrudan kauçuk örneklerle temas edecek şekilde planlanmış ve epoksi döküm malzemesiyle uyum tabakaları (*İng: matching layer*) elde edilerek zımparayla gereken kalınlığa indirilmiştir. Projenin ikinci yılında aşağıda anlatıldığı gibi yeni bir odaklı dönüştürücü seti yapılmıştır.

Ses dalgasının odaklanması piezoelektrik diskin önünde epoksi döküm malzemesiyle oluşturulan bir mercekle sağlanır. Ses hızı suda yaklaşık 1500 m/s, silikon kauçukta 1000-1100 m/s, poliüretan kauçukta 1500-1600 m/s ve epoksi döküm malzemelerinde 2800-3000 m/s'dir. Epoksizde ses hızı daha yüksek olduğu için odaklama amaçlı bir mercek içbükey ya da kalın kenarlı olmalıdır.

Kauçuk örneklerinin büyüklüğü göz önüne alındığında odak uzaklığının ~3-4 cm olması hedeflenmiştir. Piezoelektrik diskin montajından sonra sesötesi dönüştürücü üzerine bir silindir kalıp geçirilerek kalın bir epoksi tabakası dökülmüştür. Epoksi katılaştıktan sonra tornada işlenerek içbükey küresel mercek şekli verilmiştir. Odaklı sesötesi dönüştürücünün katı kauçuk örnekleriyle doğrudan bağlantısı gerektiğinde mercek boşluğuna kauçuk döküm malzemesiyle dolgu yapılarak düz bir yüzey oluşturulabilir. Su tankında yapılan ölçümlerde böyle bir kauçuk dolguya gerek kalmamıştır. Son aşamada, dönüştürücülerin SMB tipi bir konnektöre bağlantısı yapılarak diğer duyarlı devre elemanlarıyla elektromanyetik etkileşimi engellemek için kalkan görevi gören alüminyum silindir içine yerleştirilir. Odaklı sesötesi dönüştürücü resimleri Şekil 3'te verilmiş ve dönüştürücülerin yapım aşamaları Şekil 4'te gösterilmiştir.

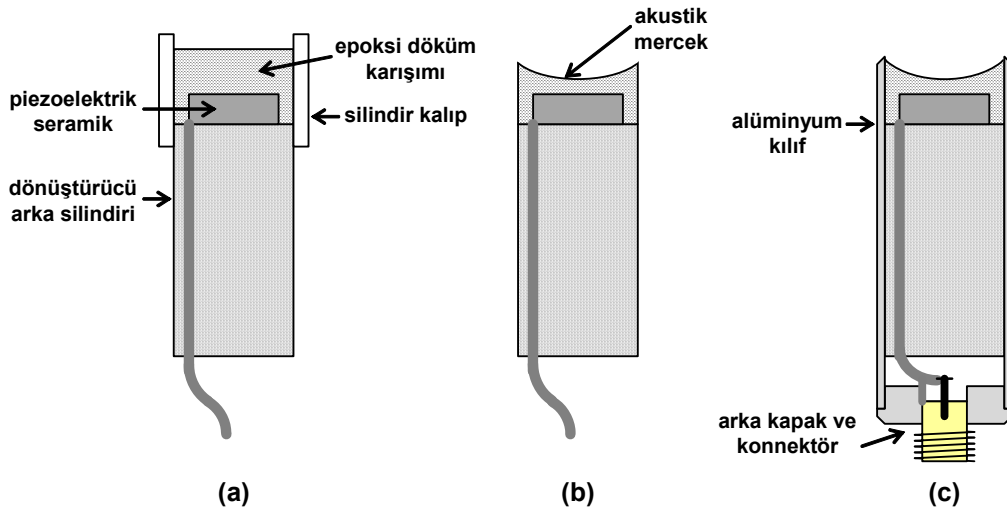


(a)



(b)

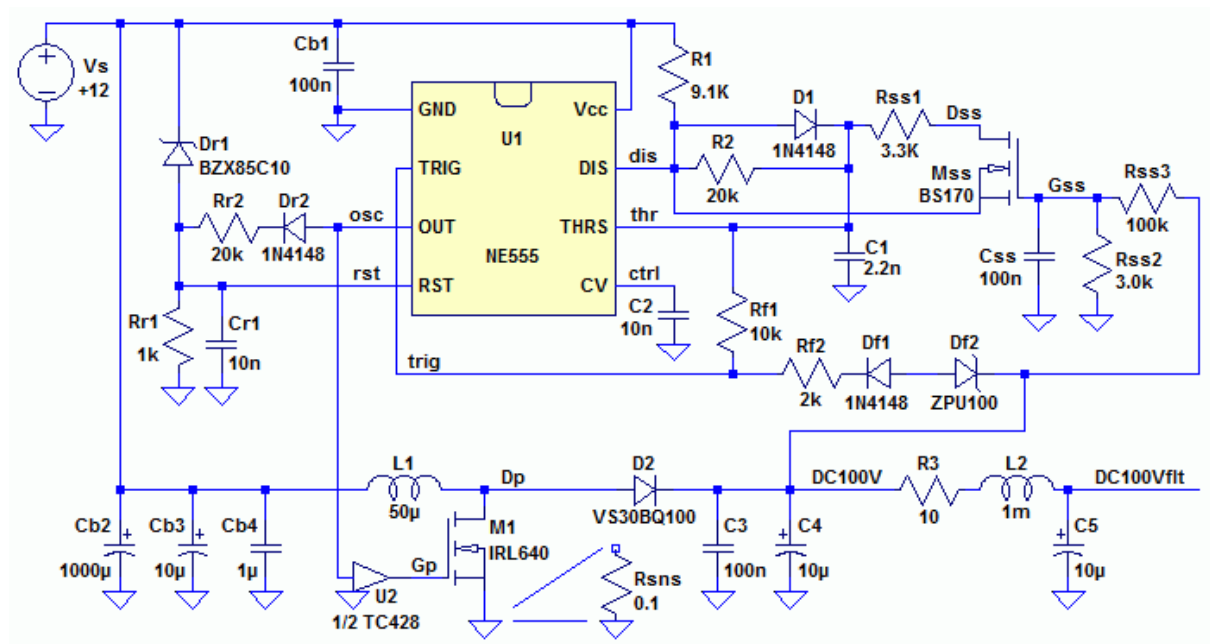
Şekil 3. Odaklı sesötesi dönüştürücü resimleri. **a)** Dönüştürücü montajı. **b)** Tamamlanmış dönüştürücüler.



Şekil 4. Odaklı sesötesi dönüştürücü yapım aşamaları. **a)** Dönüştürücü üzerine bir silindir kalıp geçirilerek kalın bir epoksi tabakası dökülür. **b)** Epoksi katılaştıktan sonra tornada işlenerek mercek şekillendirilir. **c)** Dönüştürücünün konnektör bağlantısı yapılarak alüminyum silindir içine yerleştirilir.

3.1.1 Sesötesi Dönüştürücü Sürücü Devresi

Yüksek gerilim güçlendirici devresi için öncelikle +100 V ve -100 V doğru akım kaynakları yapılmıştır. Güçlendiricinin tek bir 12 V DC adaptörle beslenmesi hedeflenmiştir. Aşağıda Şekil 5'teki devre şemasında 12 V girişli ve +100 V doğru akım çıkışlı anahtarlamalı regülatör devresi verilmiştir.



Şekil 5. +12 V girişli ve +100 V doğru akım çıkışlı yükseltici dönüştürücü devresi.

İstenilen yüksek gerilim düzeylerinde çalışan anahtarlama güç dönüştürücü bir tümleşik devre olmadığı için gereken güç dönüştürücü işlevi NE555 zamanlama entegresi kullanılarak yerine getirilmiştir. Şekil 5'teki devrede kullanılan tasarım yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

Güç anahtarlama devresi: Devre şemasının alt tarafında yer alan **L1**, **M1**, ve **D2** yükseltici dönüştürücü (boost converter) yapısında bağlanmış olan güç anahtarlama elemanlarıdır. Deneme aşamasında **M1** ile toprak arasına yerleştirilen **R_{sns}** üzerinde gerektiğinde **M1** MOSFET akımı izlenebilir. +100 V ve -100 V doğru akım kaynaklarında MOSFET sürücü devresi olarak TC428 kullanılmıştır. Çıkış gerilimini düzenlemek için 10 µF elektrolitik ve 100 nF seramik 250 V kondansatörler kullanılmıştır. Anahtarlama gürültüsünün güçlendiriciyi etkilememesi için **L2** ve **C5**'ten oluşan ikinci bir çıkış filtresi eklenmiştir.

Başlatma (reset) devresi: **R_{r1}** ve **D_{r1}** 10 V zener diyot 12 V kaynak gerilimi uygun düzeye erişinceye kadar güç çeviricinin çalışmasına izin vermez. Bir kez çalışmaya başladıktan sonra güç çeviricinin kaynak gerilimindeki anlık düşüşlerden etkilenmemesi için **R_{r2}** ve **D_{r2}** kullanılmıştır.

Zamanlama ve yumuşak başlatma (İng: soft start) devresi: Devreye ilk güç verildiğinde **R1**, **R2** ve **C1** NE555'in anahtarlama zamanını belirler. **C1** kondansatörü **R1** ve **D1** üzerinden dolarken **M1** kapalı olacağı için **L1** akımı artar. **R1** ve **C1** değerleri **M1** transistör akımını **5 A**'le sınırlayacak şekilde **L1** bobininin değerine bağlı olarak belirlenmiştir. Başlangıçta çıkış gerilimi düşükken her anahtarlama çevriminde **L1** akımının sıfıra düşmesi için **M1**'in açık olduğu süre kapalı olduğu sürenin yaklaşık iki katı olacak şekilde **R2** değeri belirlenir. Eğer çevrim sonunda sıfırlanmazsa, **L1** ve **M1** akımı her çevrimde artarak belirlenen **5 A** sınırının kat kat üstüne çıkar ve **M1** transistörü yanabilir. Çıkış gerilimi yükseldiğinde **M_{ss}** devreye girerek **C1**'in **R_{ss1}** üzerinden daha hızlı boşalmasını ve anahtarlama frekansının tam performans verebilecek düzeye çıkmasını sağlar.

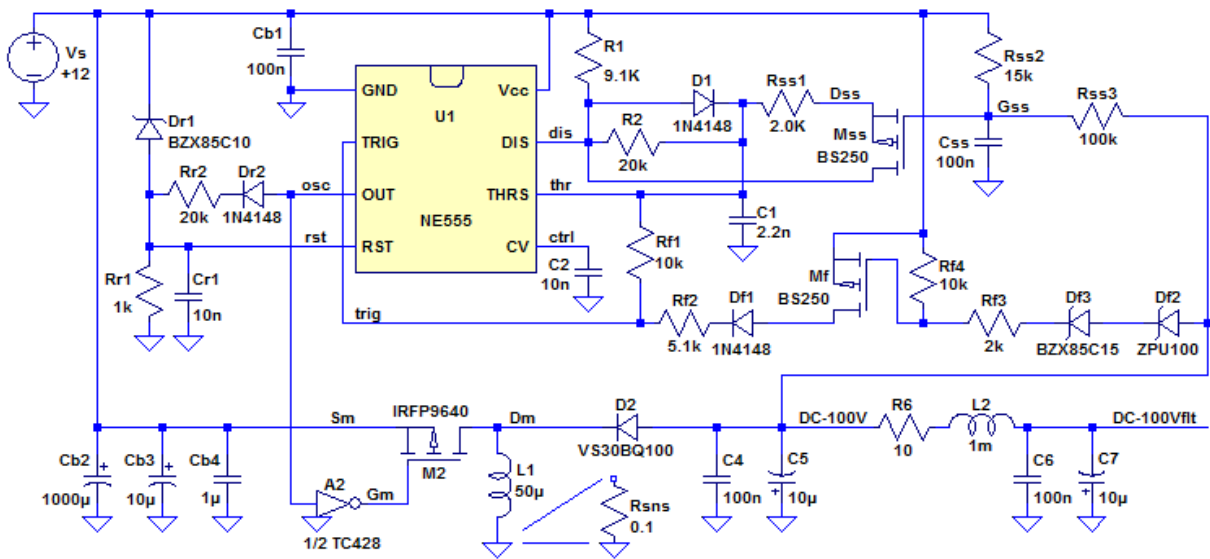
Gerilim düzenleme devresi: Çıkış gerilimi anahtarlama frekansı değiştirilerek düzenlenir. Çıkış gerilimi +100 V'a ulaştığında **D_{f2}** 100 V zener diyot devreye girerek NE555'in tetikleme girişini yükseltir ve çıkış gerilimi yeniden +100 V'un altına düşüncüye kadar anahtarlama geciktirir. Başlangıç aşamasında anahtarlama devresinin uzun süreli kapalı kalmasını engellemek ve yüksek akım elemanlarını korumak için **D_{f2}** ile seri olarak **D_{f1}** kullanılmıştır.

-100 V doğru akım kaynağı için tasarlanan devre şeması Şekil 6'da verilmiştir. Bu devrede N-kanal yerine P-kanal MOSFET'ler kullanılarak benzeri tasarım yöntemleri uygulanmıştır. Çıkış geriliminin -100 V'ta ayarlanması için gerilim düzenleme devresinde

100 V ve 15 V iki zener diyot seri olarak bağlanmış ve NE555'in tetikleme girişi bir P-kanal MOSFET evirgeç üzerinden denetlenmiştir. Gerekliğinde çıkış gerilimini -120 V'a değiştirmek için 100 V ve 15 V zener diyotlar yerine 130 V'luk tek bir zener diyot kullanılmıştır.

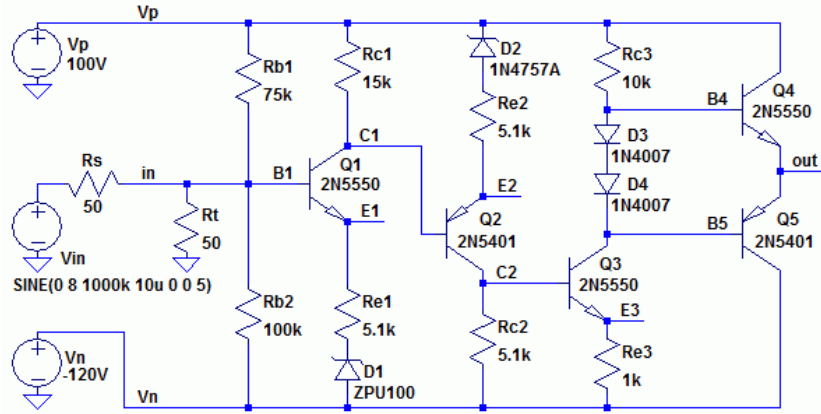
Yüksek gerilim güçlendirici için gereken sürekli kaynak akımı en çok 100 mA olarak belirlenmiştir. Yüksek frekanslarda güçlendiriciye gereken anlık ~1 A akım kısa süreli olacağı için regülatör çıkış kondansatörleri tarafından karşılanabilir. Doğru akım kaynaklarının ölçülen yük regülasyonu 1.2V/100 mA'dir. Anahtarlama kullanılan güç bobinlerinin yüksek frekans kayıpları (özellikle çekirdek kayıpları) regülatörlerin güç verimliliği yönünden çok önemlidir. Anahtarlama frekansı 50 kHz'in altında olsa da bobin üzerinden çıkış kondansatörlerine yük aktarımı yalnızca 2-3 μ s sürmektedir. Uygun bobin elde edebilmek için piyasada bulunan muhtelif toroid bobinler satın alınmış ve yeniden elle sarılarak anahtarlama devresinde denenmiştir. Halen elde edilen güç verimliliği %60 ile %75 arasındadır.

Sesötesi dönüştürücülerin sürücü devrelerinin MHz düzeyinde yüksek frekanslarda 100 V düzeyinde gerilim sağlaması gereklidir. Dönüştürücülerin eşdeğer kapasitif yükleme etkisi bu güçlendirici tasarımını zorlaştırmaktadır. Örnek olarak, 1 nF kapasitif yükü +/-100 V 1 MHz bir işaretle sürebilmek için güçlendiricinin akım çıkışı yaklaşık 1 A olmalıdır. Bu da güçlendiricinin 1 MHz bant genişliğinde yaklaşık 100 W anlık güç taleplerini karşılamasını gerektirir.



Şekil 6. +12 V giriqli ve -100 V doğru akım çıkışlı ters dönüştürücü regülatör devresi.

Yüksek gerilim sürücü devresi olarak Şekil 7'de şeması verilmiş olan DC bağlantılı bir güçlendirici yapısı kullanılmıştır. Çıkışta istenilen gerilim aralığını elde etmek ve kazanç kaybına yol açmadan çalışma akımlarını düşük tutmak için DC bağlantılı güçlendiricinin giriş katlarında D1 (100 V) ve D2 (51 V) zener diyotlar kullanılmıştır. Çıkış işaretinin doğrusallığını korumak için eksi kaynak gerilimi -100 V yerine -120 V'a değiştirilmiştir. Bütün DC bağlantılı güçlendiricilerde olduğu gibi giriş katlarında ortaya çıkan sessizlik değerlerindeki sıcaklığa bağlı sapmalar bu devrede de sorundur. Zener diyotların ve transistörlerin çalışma değerlerindeki sapmalar gittikçe güçlenerek çıkış gerilimini etkiler. Bu soruna çözüm olarak 100 Hz'ten düşük frekanslarda geri besleme sağlayan bir devre eklenerek DC çıkış gerilimi sabitlenmiştir. Montajı tamamlanmış haliyle regülatör ve güçlendirici devrelerinin bir resmi Şekil 8'de verilmiştir.

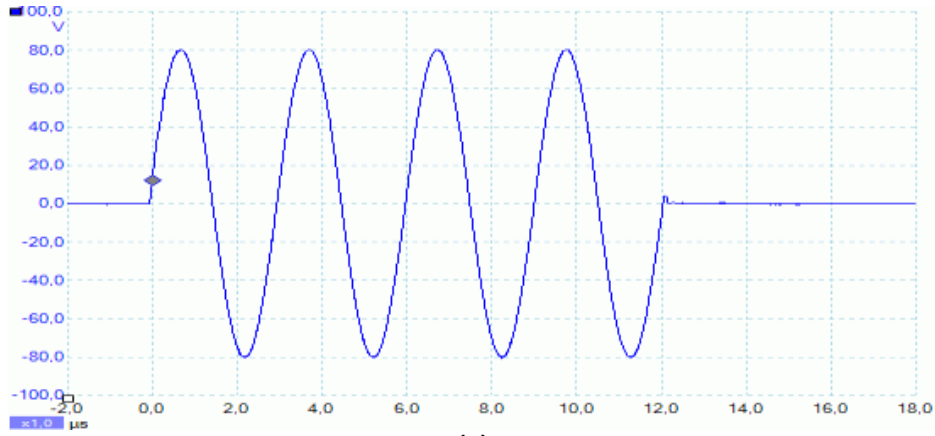


Şekil 7. Yüksek gerilim sürücü için DC bağlantılı güçlendirici devresi.

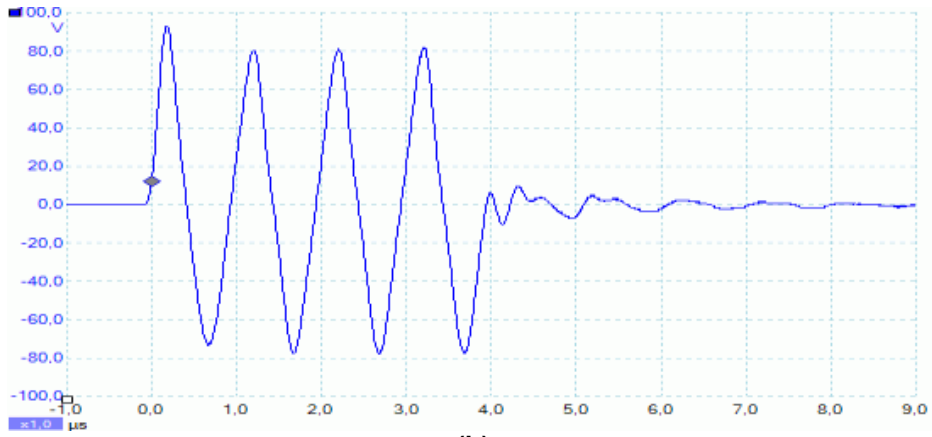


Şekil 8. Montajı yapıldıktan sonra regülatör ve güçlendirici devreleri.

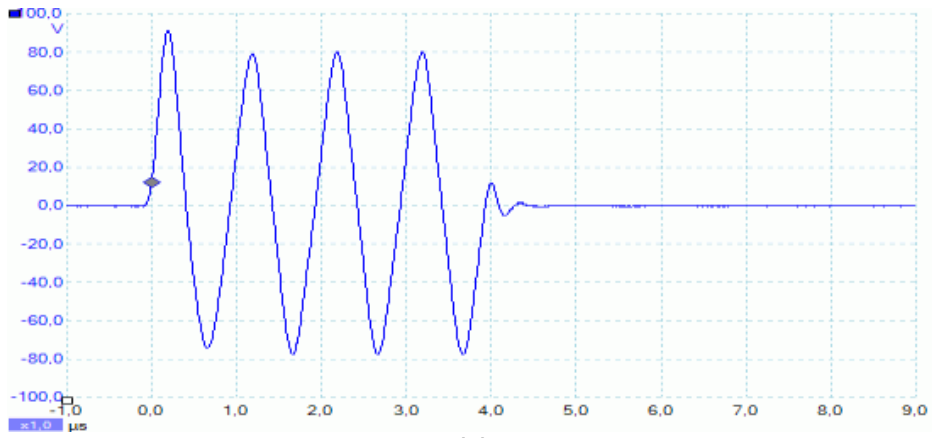
Regülatör ve güçlendirici devreleri delikli plaket üzerine monte edilerek elektromanyetik etkileşimleri engellemek için metal kutuya yerleştirilmiştir. 330 kHz ve 1 MHz sesötesi dönüştürücüler üzerinde kaydedilen +/-80 V genliğinde sinyaller Şekil 9 (a) ve (b)'de verilmiştir. Güçlendirici devresinin kapasitif yük altında nasıl çalıştığını görmek için paralel bağlanmış 500 Ω ve 1 nF yükü kaydedilen 1 MHz çıkış sinyali de Şekil 9 (c)'de verilmiştir.



(a)



(b)



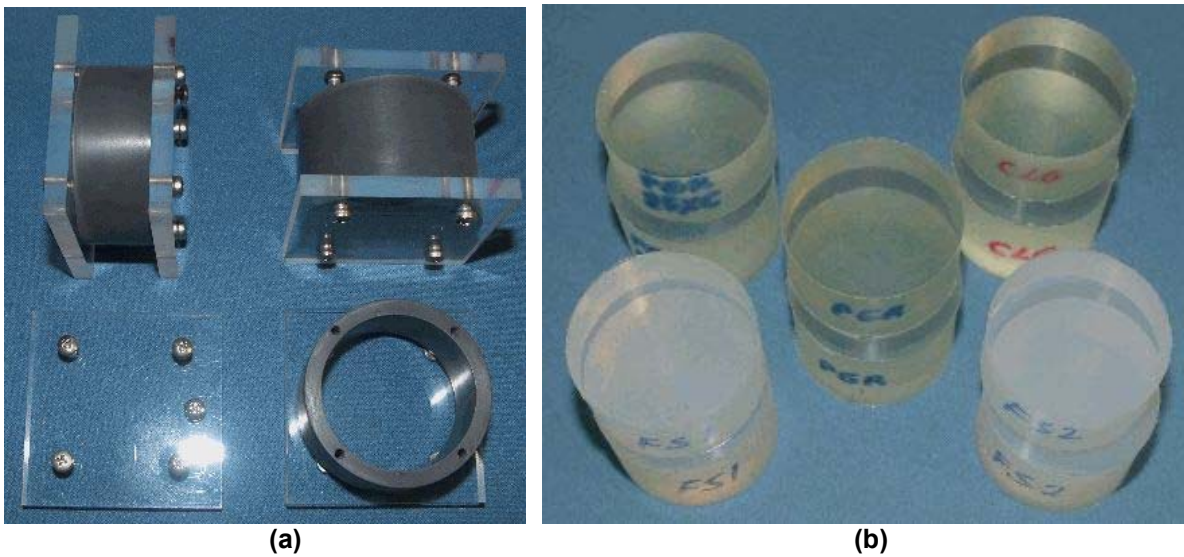
(c)

Şekil 9. Güçlendirici devresi +/-80 V çıkış işaretleri. a) 330 kHz sesötesi dönüştürücü üzerindeki gerilim. b) 1 MHz sesötesi dönüştürücü üzerindeki gerilim. c) Paralel bağlanmış 500 Ω ve 1 nF yükü kaydedilen 1 MHz çıkış gerilimi.

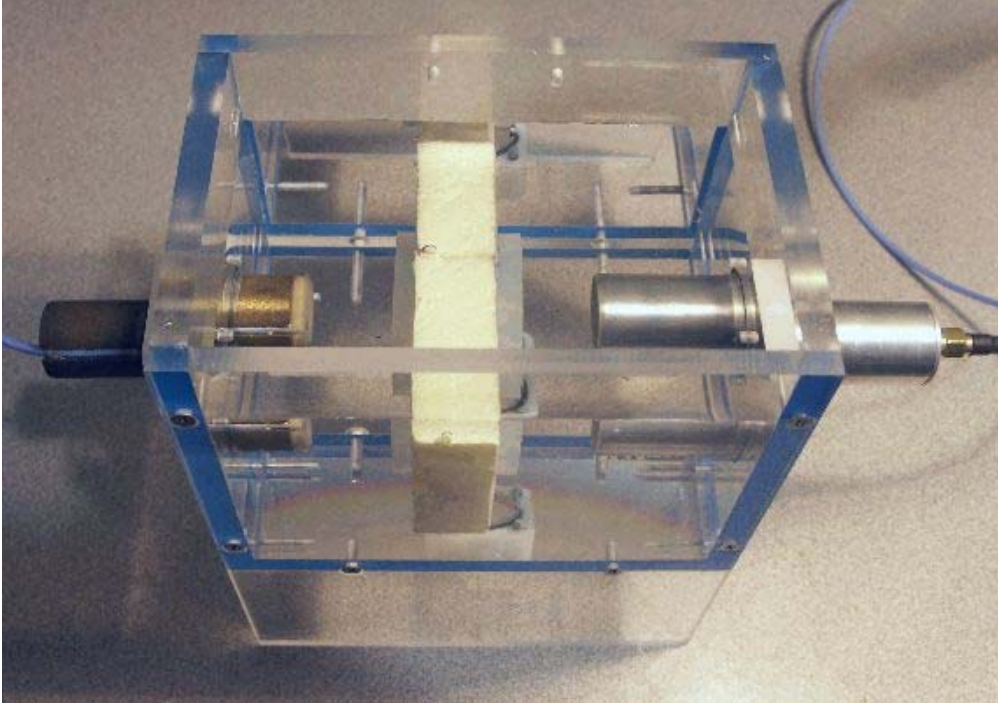
3.2 Ses Hızı ve Sönümü Ölçüm Düzeneği

Kullanılan kauçuk malzemelerin ses hızı ve sönümünün ölçülmesi için Şekil 10'da görülen örnekler hazırlanmıştır. PVC boru parçaları tornada işlenerek 4 cm çapında, 2 cm ve 3 cm kalınlığında silindir kalıplar yapılmıştır. Silindir kalıpların işleme hassasiyeti 0.1 mm'den daha iyidir. Her kauçuk malzeme için iki farklı kalınlıkta silindir hazırlanmasının nedeni ortam değişikliklerinde ses dalgasının yansımalarının neden olacağı hataları ortadan kaldırmaktır. Kauçuk örnekler su tankına karşılıklı yerleştirilen sesötesi dönüştürücüler arasına yerleştirilerek bir dönüştürücüden diğerine iletilen üç farklı frekansta ses dalgaları kaydedilmiştir. Akustik parametre ölçümü için kullanıldığı haliyle su tankının görünümü Şekil 11'de verilmiştir. Ses dalgalarının dağıtılma etkisini azaltmak için ölçümlerde gönderici olarak odaklı dönüştürücüler alıcı olarak da düz dönüştürücüler kullanılmıştır.

Sayısal osiloskopa kaydedilen sinyallerin örnekleme hızı 250 MS/s'dir. Sabit diske kaydedilen sinyaller daha sonra LabView'de geliştirilen bir programla okunarak analiz edilmiştir. Bu programda kaydedilen sinyallerin işlenecek kısımları kullanıcı tarafından zaman ekseninde belirlenir. Program 2 cm ve 3 cm kalınlığında silindirler üzerinden alınan sinyallerin korelasyonunu ve korelasyon sonucunun en büyük değeri aldığı noktaya bakarak aradaki zaman farkını hesaplar. Bu zaman farkına bağlı olarak ve sudaki ses hızı 1480 m/s referans alınarak kauçuk malzeme içindeki ses hızı belirlenir. Yine aradaki zaman farkına göre iki sinyalden alınan dalga kesitleri hizalanarak dalga şeklinin mutlak değerleri oranlanarak 1 cm'lik kauçukta ses sönümü hesaplanır.



Şekil 10. Akustik parametre ölçümü için hazırlanan kalıplar. **a)** Tornada işlenmiş silindir kalıplar. **b)** Hazırlanan 2 cm ve 3 cm kalınlığında silindir kauçuk örnekler.

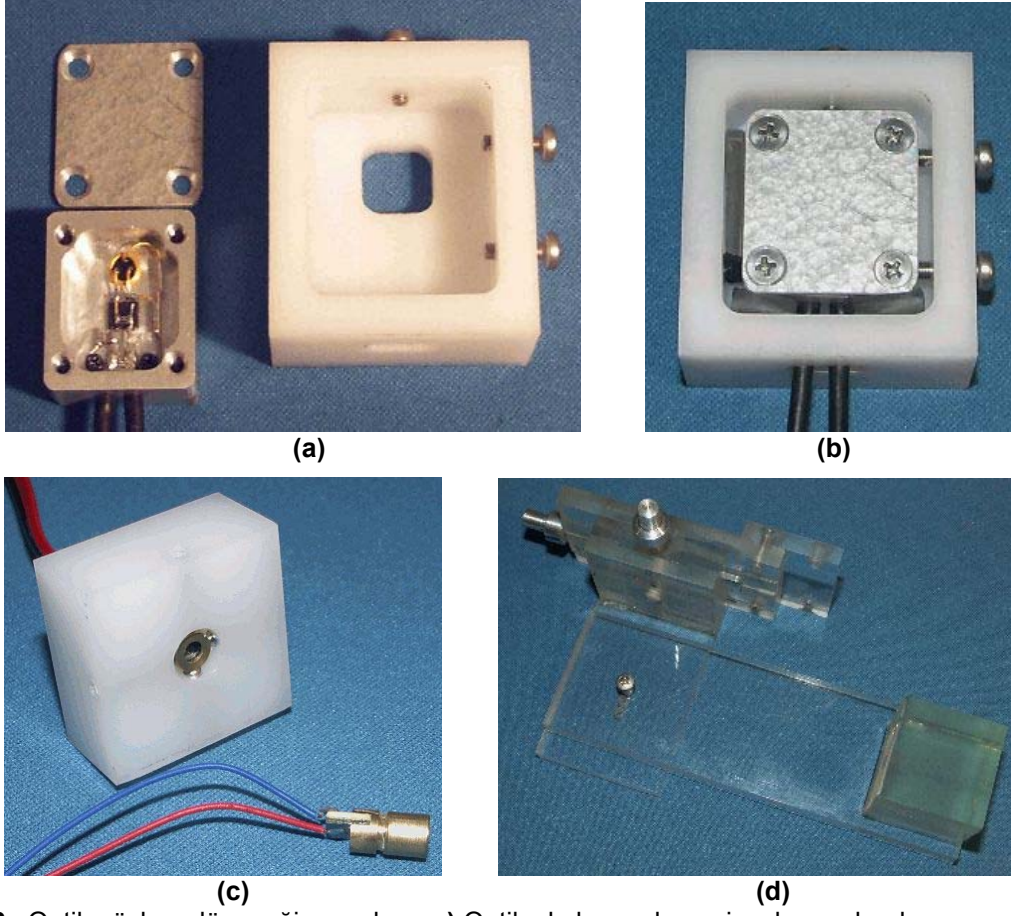


Şekil 11. Akustik parametre ölçümü için hazırlanmış olan su tankı.

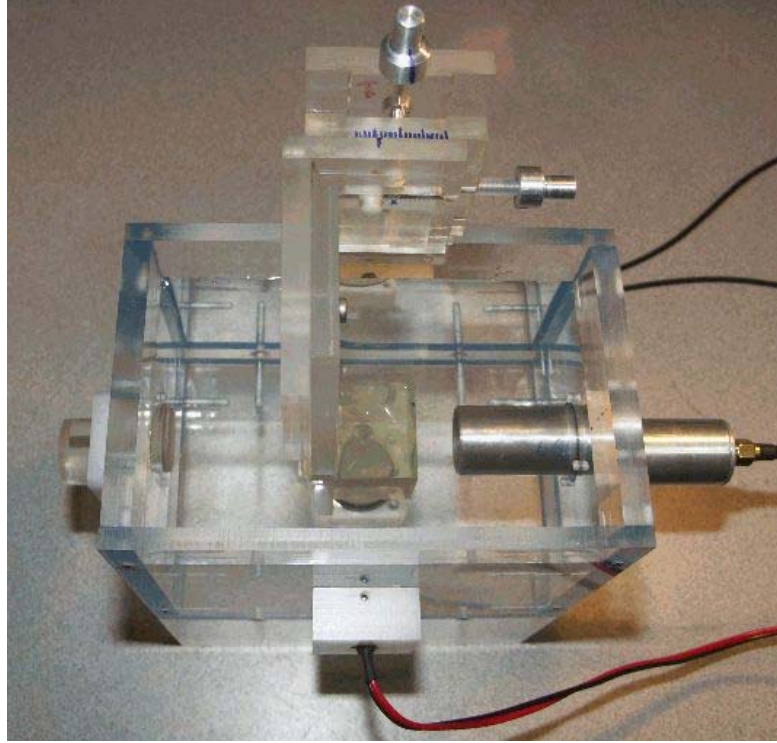
3.3 Kabarcık Hareketi Gözlem Düzeneği

Daha önce yapılmış olan optik algılayıcı devresinde plastik kılıflı bir fotodiyot kullanılmıştır. Her ne kadar fotodiyot yakınına yerleştirilen güçlendirici devre elemanları metal bir kalkanla çevrelenmiş olsa da sesötesi dönüştürücülere uygulanan sürücü işaretlerinin açıkta kalan fotodiyotla doğrudan etkileşimi yapılan ölçümleri sınırlamıştır. Bu sorunu çözmek için yeniden bir fotodiyot güçlendirici devresi yapılmıştır. Şekil 12 (a)'da görüldüğü gibi metal kılıflı bir fotodiyot kullanılmış ve devrenin tamamı frezede işlenmiş alüminyum bir kutu içine yerleştirilmiştir. Devrenin bütün besleme ve sinyal bağlantıları blendajlı kablolar üzerinden sağlanmıştır. Fotodiyot üzerine düşen ışın kesitini belirlemek için metal kutuda 1.5 mm çapında bir görüş açıklığı (*İng: aperture*) bırakılarak devrenin dışarıyla elektromanyetik etkileşimi en aza indirilmiştir.

Hassas bir şekilde fotodiyotun konumunu ayarlayabilmek için Şekil 12 (b)'de görüldüğü gibi metal kutu yine frezede işlenmiş bir plastik çerçeveye yerleştirilmiştir. Lazer kaynağı için de benzeri bir konum ayar çerçevesi (Şekil 12 (c)) yapılmıştır. Lazer ışınını kauçuk örneklerdeki kabarcıkların üzerinde gezdirebilmek için Şekil 12 (d)'de görülen iki boyutlu konumlandırma sistemi geliştirilmiştir. Su tankına monte edilmiş haliyle bütün optik gözlem düzeneği Şekil 13'te görülebilir.



Şekil 12. Optik gözlem düzeneği parçaları. **a)** Optik algılayıcı devresi ve konumlandırma çerçevesi. **b)** Optik algılayıcı montajı yapıldıktan sonra. **c)** Lazer diyot modülü. **d)** Kauçuk örnek konumlandırma sistemi.



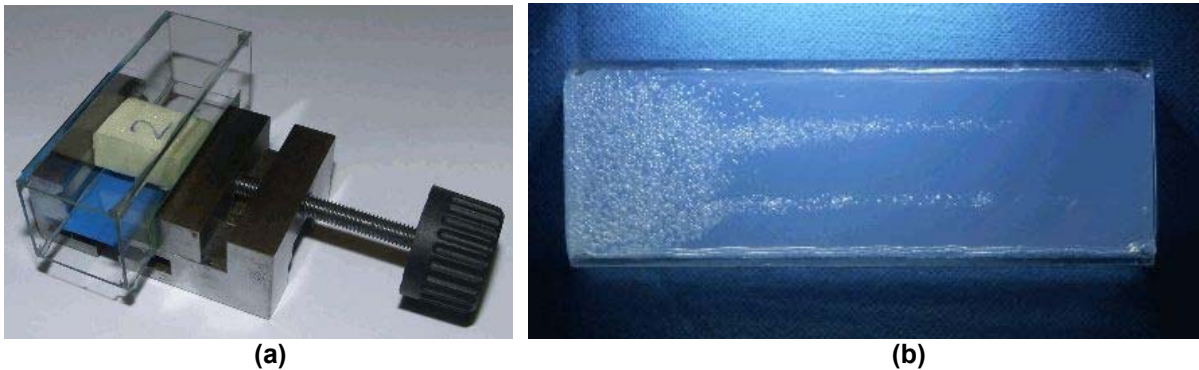
Şekil 13. Su tankına monte edilmiş haliyle optik gözlem düzeneği.

Optik gözlem düzeneğinde lazer kaynağı ve fotodiyot çerçeveleri su tankının karşılıklı yüzlerine monte edilmiştir. Ayar vidaları kullanılarak ilk önce lazer ışını fotodiyot görüş açıklığına hedeflenir sonra da daha hassas bir şekilde fotodiyotun konumu ayarlanır. Kauçuk örnek yerleştirildikten sonra sesötesi dönüştürücü kaydırılarak kabarcıklar odak uzaklığına getirilir. Bu aşamadan sonra iki boyutlu konumlandırma sistemiyle kauçuk örneği hareket ettirilerek istenilen kabarcıklar hedeflenebilir.

3.4 Kabarcıklı Kauçuk Örneklerinin Hazırlanması

Projenin birinci yılında kullanılan optik izleme düzeneğinde silikon kauçukla (Freeman, Jewel-Sil) yapılan örnekler mikroskop lamaları birbirine yapıştırılarak elde edilen kalıplara dökülmüştür (Şekil 14). Projenin ileriki aşamalarında silikon yerine daha düşük gaz geçirgenliği olan poliüretan kauçuk malzemeler (Castaldo, LiquaGlass ve Polytek, GlassRub) kullanılmıştır. Odaklı sesötesi dönüştürücülerle daha yüksek dalga genliği elde edebilmek ve odak uzaklığını ayarlayabilmek için poliüretan kauçuk örnekler su içinde kullanılmıştır. Poliüretan kauçuğun ses hızı ve kütle yoğunluğu suyunkine çok yakın olduğu için suya yerleştirilen örneklerden önemli bir yansıma olmayacaktır.

Poliüretan kauçuk endüstride sünger yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çapraz bağlama (*Ing: cross-linking*) kimyasal sürecinde poliüretan karışıma su eklendiğinde karbondioksit gazı açığa çıkarak kabarcıklı sünger yapısı oluşmaktadır. Bu projede kullanılan oda sıcaklığında katılaştıran poliüretan kauçuk malzemeler için de aynı yöntem denenmiş ancak olumlu bir sonuç alınamamıştır. Hem elde edilen kabarcıkların çoğu saatler süren katılaşma sürecinde kaybolmuş hem de poliüretan karışım saydamlığını yitirmiştir.



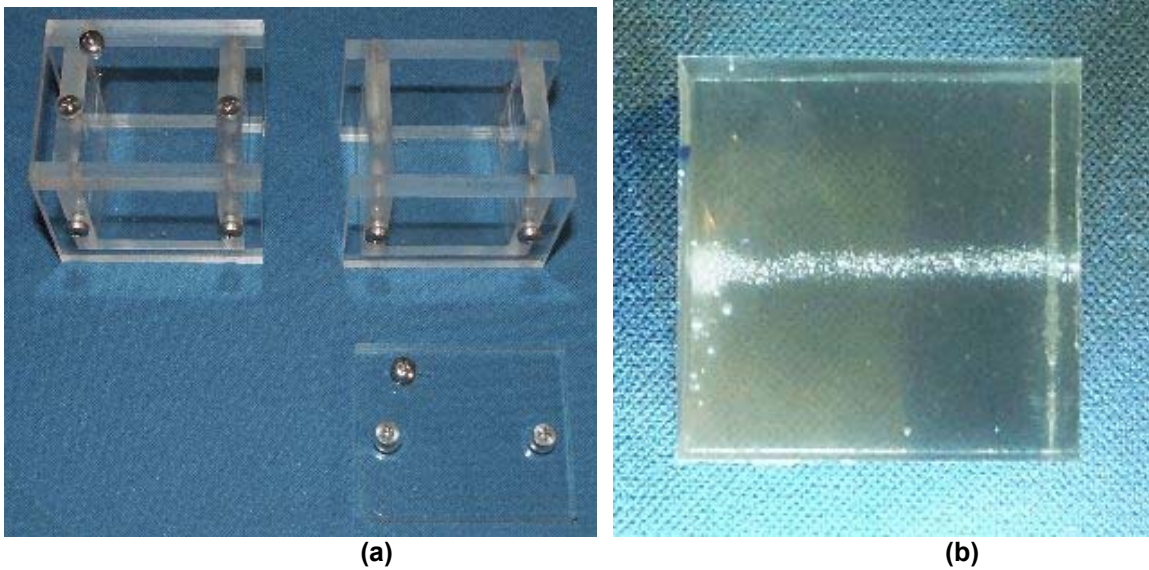
Şekil 14. Silikon kauçuk örneği. Kauçuk örnekler mikroskop lamaları birbirine yapıştırılarak elde edilen kalıplara dökülmüştür. **a)** Kalıp hazırlanması. **b)** Kabarcıklı kauçuk örneği.

Lazer ışınıyla kabarcık hareketinin gözlenmesi için çok sayıda şeffaf kauçuk örneği hazırlanmış ancak çeşitli zorluklarla karşılaşılmıştır. Başlangıçta kullanılması planlanan şeffaf kauçuk döküm malzemesi (Castaldo LiquaGlass) yurtiçi temsilci firmaların elinde olmadığı için alternatif olarak Freeman Jewel-Sil şeffaf silikon kauçuk kullanılmıştır. Kullanılan silikon kauçuğun yüksek gaz geçirgenliği, düşük esneme oranı ve karıştırma sırasında çok kıvamlı oluşu istenmeyen niteliklerdir. Kauçuk örneklerinin hazırlanma adımları aşağıda özetlenmiştir.

1. Kalıpların hazırlanması: Silikon kauçuk kalıpları mikroskop lamaları birbirine yapıştırılarak elde edilir. Yapıştırma işlemi iki bileşenli akrilik yapıştırıcı (Penloc GTI) ve hassas freze mengenesi kullanılarak üç aşamada gerçekleştirilir. Elde edilen kare prizmanın dış boyutları 26x26x75 mm'dir. Cam kapların sağlam ve sızdırmaz olması için yapıştırılacak kenarlar önceden zımparalanır. Döküm sırasında kare prizmanın bir ucu, başka bir lam parçası yapışkan bantla tutturularak geçici olarak kapatılır.

Poliüretan kauçuk örnekleri hazırlamak için akrilik plakalar frezede işlenerek Şekil 15'te görülen kalıplar yapılmıştır. Kauçuk malzeme katılaştıktan sonra akrilik kalıp ayrılarak örnekleri çıkarmak ve kalıpları yeniden kullanmak mümkün olabilmektedir.

2. Kauçuk karışımının hazırlanması: Yeterli miktarda ana kauçuk bileşeni karıştırma kabına aktarıldıktan sonra oluşan kabarcıklar küçük bir şırıngayla emilerek temizlenir. Eklenecek katalizör miktarı tartılarak belirlenir ve ana bileşenin içine şırınga edilir. İstenmeyen kabarcıkların oluşmasını engellemek için özel olarak yapılmış bir karıştırıcı daima karışım yüzeyinin altında tutularak ve vakum yaratmayacak kadar yavaş döndürülerek karıştırma işlemi tamamlanır.



Şekil 15. Poliüretan kauçuk örneği. **a)** Akrilik plakalar frezede işlenerek yapılmış olan kauçuk örnek kalıpları. **b)** Kalıptan çıkarılmış kauçuk örneği.

3. Karışımın kalıba dökülmesi: Hazırlanan karışımın bir kısmı kalıba döküldükten sonra döküm sırasında oluşan iri kabarcıklar yine küçük bir şırıngayla temizlenir ve yüksek basınç altında küçük kabarcıkların çözünerek yok olması sağlanır. Geriye kalan karışım motorlu bir karıştırıcı kullanılarak ya da vakumlanarak içinde çok sayıda kabarcık oluşturulur. Kabarcıklı karışım, kalıbın içinde istenilen yerlere şırınga edilerek çeşitli boyda kabarcık örnekleri elde edilir. Daha sonra gözlem aşamasında istenilen boyda kabarcıklar mikroskop altında seçilerek hedeflenir.

4. Katılma süreci: Hazırlanan kalıp basınçlı bir kavanoza yerleştirilir. Sıcak hava üfleme bir ısıtıcıyla basınçlı kavanoz sıcaklığı 43°C ile 45°C arasında sabit tutulur. Bu sıcaklıkta katılma zamanı yaklaşık iki saattir. Katılma süreci boyunca kabarcık örnekleri gözlenerek kavanoz basıncı 0.2 bar'la 0.4 bar arasında ayarlanır.

Yukarıda özetlenen adımlar çeşitli denemeler sonucunda belirlenmiştir. İlk denemelerde katılma sürecinde 45°C'de ve basınç denetimi yapılmadığında kabarcıkların büyüdüğü gözlenmiştir. Sıcaklık 45°C'ye yükseltildiğinde karışımın içinde çözünmüş olan hava kabarcıklarının içine dolmaya başlamıştır. Sonraki denemede istenmeyen kabarcık oluşumunu engellemek için silikon kauçuk bileşenleri karıştırma öncesinde vakumlanarak havası alınmıştır. Bu denemede ise kalıp içindeki kabarcıklar katılma sürecinde küçülmüş ve büyük bir kısmı yok olmuştur. Kabarcıklar içinde yer alan hava, havası alınmış olan silikon içinde tamamıyla çözünerek kaybolmuştur. İstenilen boyda kabarcıklar ancak hassas ve düzenli basınç denetimiyle elde edilebilmiştir. Sonuç olarak, kauçuk içinde çözünmüş olan gaz basıncıyla kabarcık içindeki gaz basıncını dengede tutmak gereklidir.

İstenilen büyüklükte kabarcık elde edilmesini zorlaştıran başka bir önemli etken de döküm malzemesinin yüzey gerilimidir. Kabarcık yarıçapı R_k ve çevreleyen maddenin yüzey gerilimi σ olduğunda kabarcığa etkiyen basınç, P_{yg} , aşağıdaki formülle bulunur.

$$P_{yg} = \frac{2 \sigma}{R_k} \quad (2)$$

Kabarcıklar küçüldükçe yarıçapla ters orantılı olarak yüzey geriliminin neden olduğu basınç artmaktadır. Silikon kauçuk yüzey gerilimi yaklaşık olarak suyun yüzey gerilimine ($\sigma = 0,072 \text{ N/m}$) eşit olduğu için, yarıçapı 50 μm olan bir kabarcıkta $P_{yg} = 2900 \text{ Pa}$ ya da 0.029 bar olacaktır. Kabarcık yarıçapı 10 μm 'ye düştüğünde $P_{yg} = 14400 \text{ Pa}$ ya da 0.144 bar'a yükselecektir. Kabarcık içindeki toplam gaz basıncı, dışarıdan uygulanan basınca ek olarak yüzey geriliminin neden olduğu basıncı daima dengelemek zorundadır. Bu nedenle, katılma sürecinde sabit basınç altında küçülmeye başlayan bir kabarcık gittikçe artan bir hızda küçülmeye devam edecek ve büyük bir olasılıkla yok olacaktır.

Yukarıda anlatılan nedenlerle kabarcık örneklerinin yapımı verimli olmamıştır. Modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre rezonans ölçümlerinin yapılabileceği kabarcık yarıçapı yaklaşık olarak 10 μm ile 30 μm arasında değişmektedir. Bu büyüklükte kabarcıklar elde edebilmek için kalıp içine yüzlerce kabarcık yerleştirilmesi gereklidir. Örnek olarak, döküm sırasında oluşturulan 200 kabarcığın yaklaşık yarısı katılma sürecinde yok olmaktadır. Geriye kalan 100 kabarcığın ise ancak 5-10 tanesi istenilen büyüklükte olmaktadır.

Kabarcık örneklerinin yapımında karşılaşılan zorlukların kökeninde yatan neden kauçuk malzemenin yüksek gaz geçirgenliğidir. Bu nedenle kabarcık büyüklüğünü denetim altında tutmak zordur. Silikon kauçukların gaz geçirgenliği poliüretan kauçuklara göre 20-30 kat, bütül kauçuklara göre 200-400 kat daha büyüktür. Poliüretan tabanlı saydam kauçuk döküm malzemeleriyle kabarcıklı örneklerin yapımı kolaylaşmış ancak dengeli basınç ve sıcaklık denetimi zorunluluk olarak kalmıştır.

Elastomer malzemeler içinde $\sim 10 \mu\text{m}$ düzeyinde kabarcıklar oluşturmak konusunda doğrudan ilgili bir bilgiye literatürde rastlanmamıştır. Farklı polimerlerle baloncuk yapımının (Zimmerman, vd., 2008) ve micro kabarcıklı köpük yapımının (Fujii, vd., 2013) anlatıldığı patent dosyalarına erişilmiştir. Ancak, elde olan kauçuk malzeme ve laboratuvar olanaklarıyla bu patentlerde anlatılan yöntemlerin uygulanması mümkün değildir.

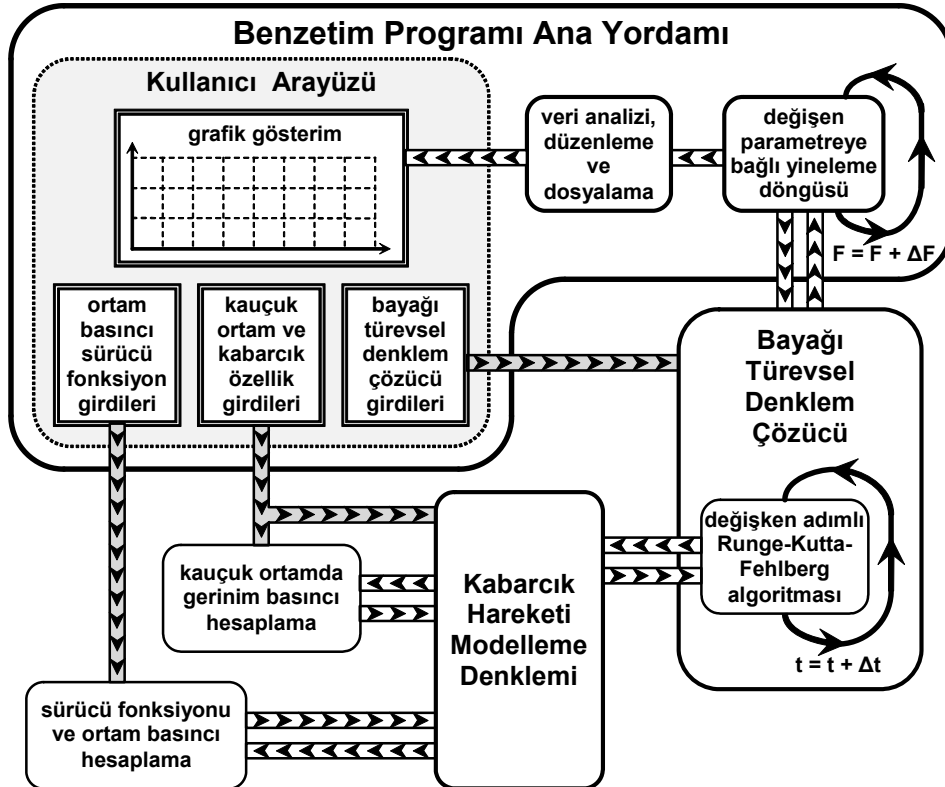
3.5 Kabarcık Hareketi Benzetim Programı

Kabarcık hareketinin modellenmesi için Free Software Foundation (FSF) tarafından ücretsiz sağlanan **Code::Blocks** tümleşik geliştirme ortamı, **GNU GCC** derleyici ve **GNUPLOT** çizim destek yazılımı kullanılmıştır. Projenin son aşamalarında LabVIEW geliştirme ortamı (National Instruments) sağlandıktan sonra ana yordam ve sonuçların grafik gösterimi bu ortama taşınmıştır. Benzetim programının yeterince hızlı çalışması ve tamamıyla denetim altında tutulabilmesi için bütün yazılım C programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir.

Geliştirilen benzetim programı ana yordamının birinci işlevi kullanıcı tarafından girilen benzetim parametrelerinin ilgili altyordamlara iletilmesidir. Ana yordamın ikinci işlevi, değişen ortam özelliklerine ve sürücü fonksiyon parametrelerine bağlı olarak kabarcık rezonans frekansının belirlenmesi ve kabarcık hareketinin analiz edilmesi için türevsel denklem çözücü altyordamın ürettiği sonuçları otomatik olarak değerlendirmektir. Sürücü frekansı ya da ortamın akışmazlık değeri gibi seçilen bir benzetim parametresinin belli bir aralıkta değişen değerleri için benzetim işleminin bir döngü içinde yinelenmesi sağlanmıştır. Ana yordam

ayrıca, elde edilen benzetim sonuçlarının grafik olarak görüntülenmesi ve dosyalama işlemlerini yerine getirmektedir. Benzetim programının temel veri akış şeması Şekil 16'da verilmiştir ve ana bölümleri aşağıda anlatılmıştır.

1. Bayağı türevsel denklem çözücü (*İng: ordinary differential equation solver*): Sabit adımlı dördüncü derece Runge-Kutta ve değişken adımlı Runge-Kutta-Fehlberg algoritmalarını uygulayan bir altyordam yazılmıştır. Kabarcık hareketini modelleyen denklem bileşenleri rezonans sırasında çok büyük değişimler göstermektedir. Örneğin, kabarcık yarıçapı onda birine düştüğünde kabarcık içindeki gaz basıncı bin kat artacaktır. Bu düzeyde değişimler olurken denklem çözücü algoritmanın kararlılığını korumak için büyük hataların oluşmasına hiç izin vermeden değişken zaman adımlarını ayarlamak gereklidir. Denklem çözücü altyordamın güvenilirliği birinci ve ikinci derece basit elektronik devre modelleri üzerinde denenerek ve elde edilen sonuçlar beklenen fonksiyon değerleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.



Şekil 16. Kabarcık hareketi benzetim programı veri akış şeması. Kullanıcı tarafından girilen benzetim parametrelerinin ilgili altyordamlara akışı gri yollarla, diğer matematiksel işlem sonuçlarının akışı ise beyaz yollarla gösterilmiştir.

2. Kabarcık hareketi modelleme denklemi: Kabarcık hareketinin modellenmesi için Rayleigh-Plesset denkleminden yola çıkılarak bütün basınç bileşenlerini ve diferansiyel denklem çözücünün gerektirdiği türev değerlerini hesaplayan bir altyordam geliştirilmiştir. Bu altyordamda kullanılan denklem aşağıda ayrıntılı olarak anlatılacaktır. İstenildiğinde kabarcık yarıçapına ek olarak kabarcık hacmi ve basınç bileşenlerinin çıktısını alarak zamana bağlı olarak görüntülemek mümkün olmaktadır.

3. Kauçuk gerinim basıncına eğri uydurma: Kabarcık yarıçapı değiştiğinde kauçuk ortamdaki gerinimin neden olduğu basıncı bulmak için bir fonksiyon tümlevinin her zaman adımında defalarca hesaplanması gereklidir. Çok fazla işlemci zamanı alan bu hesaplama yerine eğri uydurma (*İng: curve fitting*) yoluyla elde edilen bir fonksiyon kullanılmıştır.

4. Sürücü fonksiyonu: Dış ortam basıncında zamana bağlı değişimlerin uygulanmasını sağlayan bir altyordam hazırlanmıştır. Belirlenen genlik, frekans, yükseliş/düşüş süresi ve benzeri fonksiyon parametreleriyle istenilen dalga şeklinde dış ortam basıncı değiştirilebilir.

3.5.1 Matematiksel Kabarcık Modeli

Bir hava kabarcığının yarıçapındaki değişimler, içinde bulunduğu ortamdaki basınç değişimlerine bağlı olarak Rayleigh-Plesset denklemiyle çözümlenebilir. Elastomer bir ortam söz konusu olduğunda, elastomerdeki gerinimin neden olduğu basınç değişimi de hesaba katılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{p_G - p_S - p_E}{\rho_E} = R_K \frac{d^2 R_K}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_K}{dt} \right)^2 + \frac{4 \nu_E}{R_K} \frac{dR_K}{dt} + \frac{2 \sigma_{EG}}{\rho_E R_K} \quad (3)$$

Bu denklemde kullanılan değişken ve sabitler aşağıda tanımlanmıştır:

R_K : kabarcığın yarıçapı, R_{K0} : kabarcığın yarıçapının ilk değeri,

p_G : kabarcıktaki gaz basıncı, p_{G0} : kabarcıktaki gaz basıncının ilk değeri,

p_S : ortamda görülen basınç değişimi, p_{S0} : ortamtaki sabit basınç değeri,

p_E : elastomerdeki gerinimin neden olduğu basınç değişimi

ρ_E : elastomer ortamın özkütlesi

ν_E : elastomer ortamın kinematik akışmazlığı (*İng: kinematic viscosity*)

σ_{EG} : kabarcıktaki gazla elastomer ortam arasındaki yüzey gerilimi

Yukarıdaki (3) eşitliği türevsel denklem çözücü altyordamın gerektirdiği şekilde yeniden düzenlendiğinde kabarcık yarıçapının ikinci türevinin hesaplanması için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{d^2 R_K}{dt^2} = \frac{1}{R_K} \left[\frac{p_G - p_S - p_E - p_{YG}}{\rho_E} - \frac{3}{2} \left(\frac{dR_K}{dt} \right)^2 - \frac{4 \nu_E}{R_K} \frac{dR_K}{dt} \right] \quad (4)$$

Modelleme programında kullanılan (4) eşitliğinde elastomer ortamın özellikleriyle ilgili sabit değerleri ve basınç bileşenlerinin hesaplama yöntemleri aşağıda anlatılmıştır.

Elastomer ortamın özkütlesi (ρ_E) : Hazırlanan kauçuk örnekler hassas terazide tartılarak ve net hacmi hesaplanarak bulunmuştur.

Elastomer ortamın kinematik akışmazlığı (ν_E) : Akışmazlık, bir ortamdaki akustik değişimlerin sönümünü belirleyen etkidir. Bu nedenle kabarcık rezonansı söz konusu olduğunda, rezonans frekansının bant genişliği üzerinde belirleyici olan parametre kinematik akışmazlıktır. Kullanılan silikon kauçuğun sesötesi frekanslarda geçerli olan kinematik akışmazlığını belirlemek için kabarcık hareketinde frekansa bağlı olarak gözlenen değişimler, farklı ν_E değerleriyle elde edilen modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla kullanılan modelleme sonuçları Bulgular bölümünde verilmiştir.

Dış ortam basıncı (p_S) : Ortamdaki basınç, sabit atmosfer basıncına ($p_{S0} = 100 \text{ kPa}$) ek olarak sesötesi dalganın neden olduğu basınç değişimlerinden oluşmaktadır. Zamana bağlı p_S değerlerini hesaplarken, bu amaçla hazırlanan sürücü fonksiyonu altyordamı kullanılmıştır. İleriki aşamalarda eyleyici yapıları modellenirken dış ortam basıncını belirleyen diğer etkenler çevredeki kabarcıkların yaydığı ses dalgaları ve eyleyici üzerindeki mekanik yük olacaktır.

Yüzey gerilimi basıncı (p_{YG}) : Kabarcığı çevreleyen elastomer ortamın yüzey geriliminin neden olduğu basınç kabarcık yarıçapına bağlı olarak aşağıdaki ifadeyle hesaplanır:

$$p_{YG} = \frac{2 \sigma_{EG}}{R_K} \quad (5)$$

Bu eşitlikte σ_{EG} kabarcıktaki gazla elastomer ortam arasındaki yüzey gerilimidir. Kauçuk malzemeden yapılan ince bir tüp suya daldırıldığında tüp içindeki su seviyesinde bir yükselme ya da alçalma görülmediği için σ_{EG} 'nin suyun yüzey gerilimine eşit olduğu ($\sigma_{EG} = 0.072 \text{ N/m}$) kabul edilmiştir. Bu sonuç başka silikon kauçuk malzemeler için verilen yüzey gerilimi değerleriyle uyumludur. Kabarcık hacmindeki değişimlerin ve elastomerdeki gerinimin yol açtığı basınç değişimleri yüzey gerilimi basıncından en az on kat fazladır. Bu nedenle yüzey gerilimi kabarcık hareketi üzerinde belirleyici değildir.

Kabarcık içindeki gaz basıncı (p_G) : Gaz basıncı kabarcık hacmiyle ters orantılı olarak değişecektir:

$$p_G = p_{G0} \left(\frac{R_{K0}}{R_K} \right)^{3\gamma} \quad (6)$$

Bu eşitlikte adiabatik indeks γ , kabarcık içindeki hava için **1.4** olarak belirlenmiştir. Kabarcık içindeki gazla çevreleyen ortam arasında ısı alışverişi olmadığı kabul edilmiştir. Gaz basıncının ilk değeri olan p_{G0} , ortamdaki sabit basınca ek olarak kabarcığın başlangıçtaki yarıçapıyla belirlenen yüzey gerilimi basıncını dengelemek zorundadır:

$$p_{G0} = p_{S0} + \frac{2 \sigma_{EG}}{R_{K0}} \quad (7)$$

Elastomerdeki gerinimin neden olduğu basınç değişimi (p_E) : Literatürde kabarcığı çevreleyen bir kabuk tabakasının kabarcık hareketine etkisini inceleyen makaleler kabarcık yarıçapındaki göreceli değişimin küçük olduğunu ve gerinim-gerilim ilişkisinin doğrusal olduğunu kabul etmektedir. Bu iki varsayım da elastomer eyleyici yapısı için geçerli değildir. Kabarcık yarıçapındaki değişimlerin ilk yarıçapla karşılaştırılabilir düzeyde olması beklenmektedir ve büyük gerinim oranları sözkonusu olduğunda elastomer malzemelerin gerinim-gerilim ilişkisi doğrusal değildir.

Kabarcık yarıçapı değiştiğinde ortaya çıkan basınç, kabarcığı çevreleyen bütün elastomer ortamdan kaynaklanacaktır. Toplam basıncı bulmak için kabarcığı çevreleyen elastomerin ince küresel katmanlardan oluştuğu düşünülebilir. Başlangıçta, kabarcığın neden olduğu bir gerinim yokken merkezden R_0 uzaklıkta ve dR_0 kalınlığında olan küresel bir katmanın toplam basınca katkısı ince duvarlı küre için basınç ifadesiyle bulunabilir:

$$dp_E = \frac{4 E_E \epsilon_R dR_0}{R} \quad (8)$$

Bu ifadede E_E elastomerin esneme modülü (*İng: elasticity modulus*), R elastomer katmanının kabarcık hareketiyle değişmiş olan yarıçapı ve ϵ_R merkezden R uzaklıktaki tek boyutlu gerinimdir. ϵ_R gerinim değeri elastomer katmanın merkezden uzaklığına bağlı olarak değişir. Kabarcık yüzeyindeki yarıçap R_{K0} 'dan R_K 'ya değiştiğinde başlangıçta merkezden R_0 uzaklıkta olan katmanın yarıçapı R olur. Elastomer ortamın sıkıştırılmaz ve genişletilemez olduğu varsayılırsa, merkezden R_{K0} ve R_0 uzaklıktaki hacim değişiklikleri eşit olmalıdır. Buradan yola çıkılarak kabarcık yüzeyindeki gerinime bağlı olarak merkezden R uzaklıktaki gerinim bulunabilir:

$$R_K^3 - R_{K0}^3 = R^3 - R_0^3, \quad R = \sqrt[3]{R_0^3 + R_K^3 - R_{K0}^3} \quad (9)$$

$$\epsilon_R = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (10)$$

Kauçuk ortamdaki gerinimin neden olduğu toplam basınç kabarcığı çevreleyen bütün kauçuk ortam için (8) eşitliğiyle verilen ifadenin tümleviyle hesaplanır:

$$p_E = \int_{R_{K0}}^{\infty} \frac{4 E_E \epsilon_R}{R} dR_0 \quad (11)$$

Büyük gerinim oranlarında elastomerdeki gerinim-gerilim ilişkisi doğrusal olmadığı için E_E değeri gerinime bağlı olarak değişir. E_E değişimi kauçuk örnekler üzerinde yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. (11) eşitliğiyle verilen tümlev değerinin doğrudan matematiksel yolla hesaplanması mümkün değildir. Bayağı türevsel denklem çözücü çalışırken her bir zaman adımında defalarca bu tümlev değerinin sayısal olarak hesaplanması gereklidir. Modelleme programının hızlandırılması için R_K/R_{K0} oranına göre toplam gerinim basıncını yaklaşık olarak veren bir fonksiyon kullanılmıştır. Benzeri tümlev formüllerinden yola çıkılarak gözlemsel yöntemlerle belirlenen bu fonksiyonun yapısı aşağıda verilmiştir.

$$p_E = A \arctan\left(\frac{B (R_K/R_{K0} - 1)}{1 + C (R_K/R_{K0})^{-1/2}}\right) \quad (12)$$

Bu eşitlikte yer alan **A**, **B** ve **C** çarpanları için hata oranını en aza indiren değerler eğri uydurma altyordamı kullanılarak bulunmuştur. R_K/R_{K0} oranı 1.0 ile 4.0 arasında değişirken hesaplanan toplam gerinim basıncındaki hata % 1'den azdır. **A**, **B** ve **C** çarpanları herhangi bir elastomer malzeme için bir kez belirlendikten sonra kabarcık yarıçapından bağımsız olarak bütün modelleme işlemleri için kullanılabilir.

5 BULGULAR

Proje süresince elde edilen önemli bulgular aşağıda ana başlıklar altında özetlenmiştir. Kabarcık hareketi gözleme düzeneğinin hazırlanmasında ve ölçümlerde kullanılan önemli aygıtların listesi aşağıda verilmiştir.

- AA-Tech AWG-1020 20 MHz fonksiyon jeneratörü (sesötesi sürücü işareti).
- LeCroy DDA125 4-kanal 1 GHz osiloskop (anlık gözlem ve ölçümler)
- PicoScope 3205B 2-kanal 100 MHz osiloskop (bilgisayarda işaret kaydı)
- Tektronix PS2521G doğru akım güç kaynağı (lazer diyot ve güçlendirici devre besleme)
- Reichert Stereo Zoom mikroskop (kabarcık hedefleme ve konum ayarı)

4.1 Ses Hızı ve Sönümü Bulguları

Kullanılan saydam kauçuk malzemelerde üç farklı frekansta ölçülen ses hızı ve sönüm değerleriyle bu malzemelerin kütle yoğunlukları Tablo 1'de özetlenmiştir. Sayısal osiloskop aracılığıyla silikon kauçuk kalıpları üzerinden 1 MHz'te alınan işaretler Şekil 17'de görülebilir.

Tablo 1. Kauçuk malzemelerde ölçülen ses hızı ve sönüm değerleri.

Freeman Silikon Kauçuk:

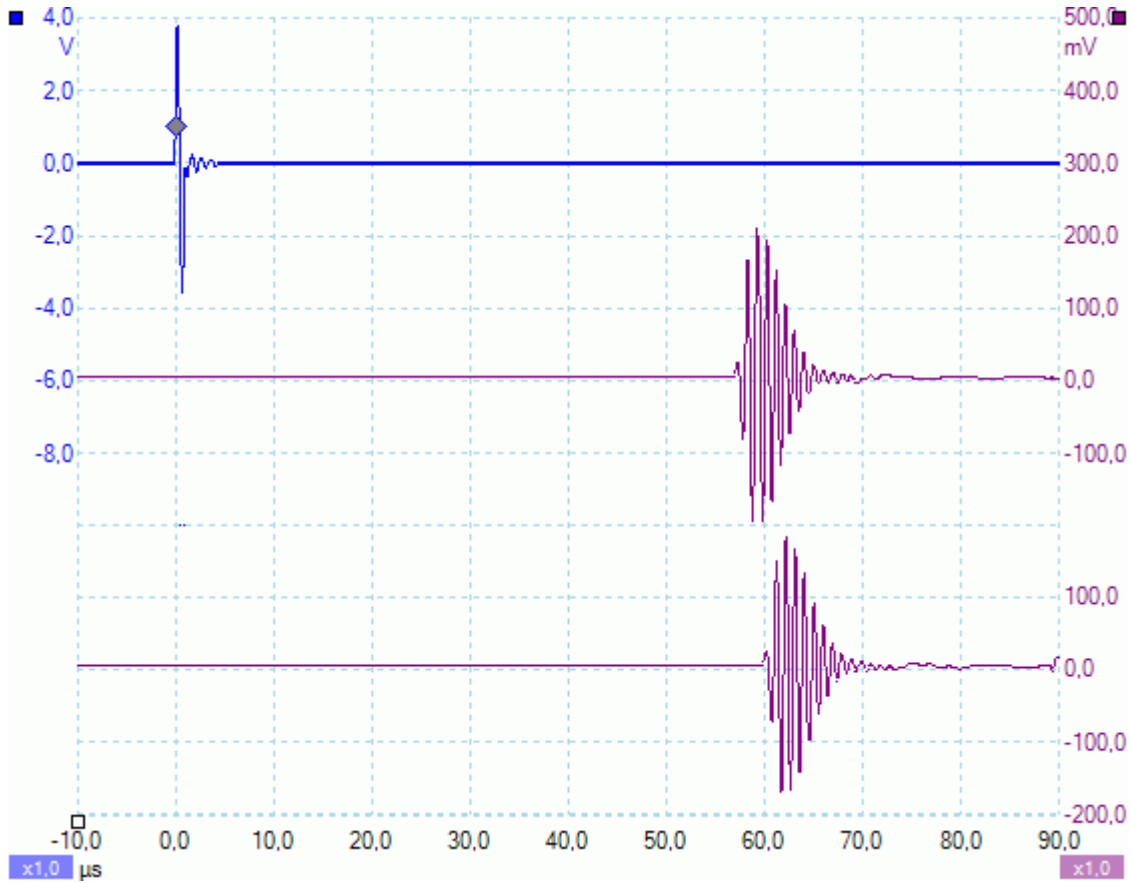
f (kHz):	330	660	1000
α (neper/m):	1.32	3.98	9.94
c (m/s):	1034.9	1036.6	1041.8
ρ (kg/m³):	1098		

Castaldo LiquaGlass Poliüretan Kauçuk:

f (kHz):	330	660	1000
α (neper/m):	6.76	17.2	38.9
c (m/s):	1495.5	1479.6	1500.9
ρ (kg/m³):	1024		

Polytek GlassRub Poliüretan Kauçuk:

f (kHz):	330	660	1000
α (neper/m):	5.63	21.0	38.1
c (m/s):	1488.4	1493.7	1502.7
ρ (kg/m³):	1029		

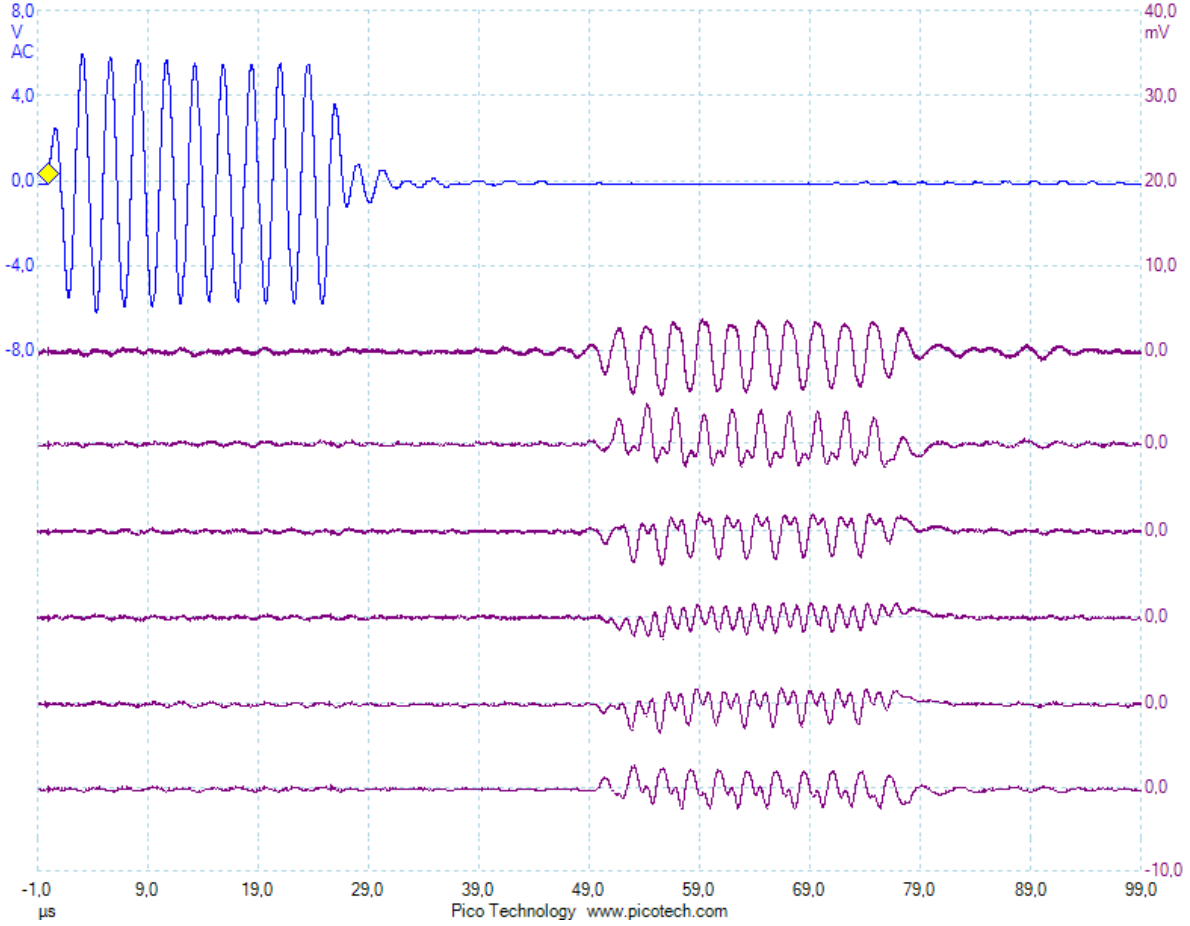


Şekil 17. Silikon kauçukla 1 MHz'te alınan akustik ölçüm işaretleri. Mavi işaret gönderilen dalgayı, mor işaretler sırasıyla 2 cm ve 3 cm kalınlığında örnekler üzerinden alınan ses dalgalarını gösterir.

4.2 Akusto-optik Etkileşim

Kabarcık hareketinin gözlenmesini engelleyen bir etken ses dalgasının kauçuk ortamda yarattığı akusto-optik değişimlerdir. Ses dalgası ortamda yayılırken oluşan basınç ve yoğunluk değişimleri ışığın kırılma ve kırınım özelliklerini etkilemektedir. Fotodiyotun algıladığı ışık, mikroskop altında lazer ışınına etkileyen hiç bir kabarcık görülmediğinde bile ses dalgası nedeniyle değişmektedir. Fotodiyotla kaydedilen 32 sinyalin ortalaması alınarak silikon kauçuk örnekleriyle elde edilen akusto-optik dalga şekillerinin farklı evreleri Şekil 18'de gösterilmiştir. Poliüretan kauçuk örnekleriyle de benzeri etkileşimler görülmüştür.

Gözlenen akusto-optik değişimlerin kaynağı devreler arasında doğrudan elektriksel bir etkileşim değildir, çünkü dalga şekillerinin ortaya çıkışı ses dalgasının lazer ışınına ulaştığı zamana denk gelmektedir. Henüz kesin olarak belirlenememiş olan çevresel etkenlerle akusto-optik dalga şekilleri sürekli olarak değişmektedir. Saniyeler, bazen dakikalar alan bir süreçte, ses dalgasıyla aynı frekanstaki işaret kaybolurken yerini ikinci harmoniğe bırakmaktadır.



Şekil 18. Kabarcıksız ortamda gözlenen akusto-optik etkileşim. Mavi kayıt, fonksiyon jeneratörü çıkışında sesötesi dönüştürücüye uygulanan 390 KHz'lik sinyaldir. Mor kayıtlar, ses dalgasının kauçuk ortamda yarattığı akusto-optik değişimlerin farklı evreleridir.

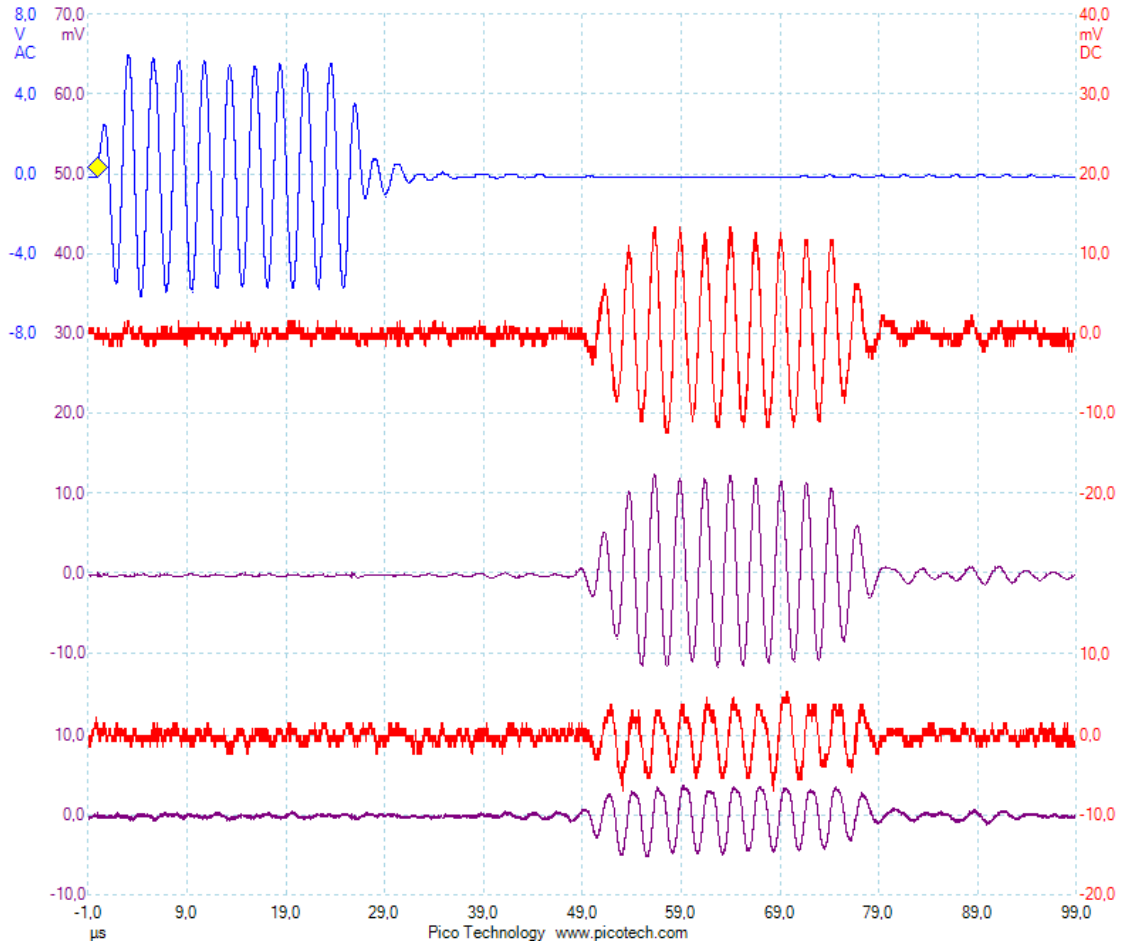
Şekil 19'da görüldüğü gibi akusto-optik değişimler kabarcık hareketinin neden olduğu sinyallerle aynı zamana denk geldiği için yapılan ölçümleri etkilemektedir. Lazer ışınının bir kabarcık üzerinden ve doğrudan fotodiyota ulaştığı durumlarda elde edilen sinyallerin farkını hesaplayarak kabarcık etkisini ayırt etmeye çalışmak doğru bir yaklaşım değildir. Çünkü, lazer ışını kabarcık tarafından engellendiğinde sessizlik sinyalinde oluşan değişim ses dalgasının yol açtığı akusto-optik değişime de yansiyacaktır.

Kauçuk malzemenin saflık ve saydamlık derecesinin akusto-optik etkileşim üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kauçuk döküm bileşenleri karıştırma öncesinde vakumlanarak hiç kabarcık içermeyen bir örnek hazırlanmıştır. Bu örnek üzerinde yapılan deneylerde lazer ışınının kalınlığı ve geliş açısından bağımsız olarak benzer akusto-optik etkileşim işaretleri gözlenmiştir. Gözlenen etkileşim, kauçuk örneklerin şekliyle ve kullanılan düzeneğin mekanik yapısıyla da ilgili olabilir. Farklı bir uzmanlık alanında başlı başına bir araştırma konusu olabilecek bu etkileşimler proje hedefleriyle doğrudan ilgili olmadığı için bu aşamada göz ardı edilerek diğer çalışmalara odaklanılması uygun görülmüştür.

4.3 Kauçuk Örneklerle Ölçümler

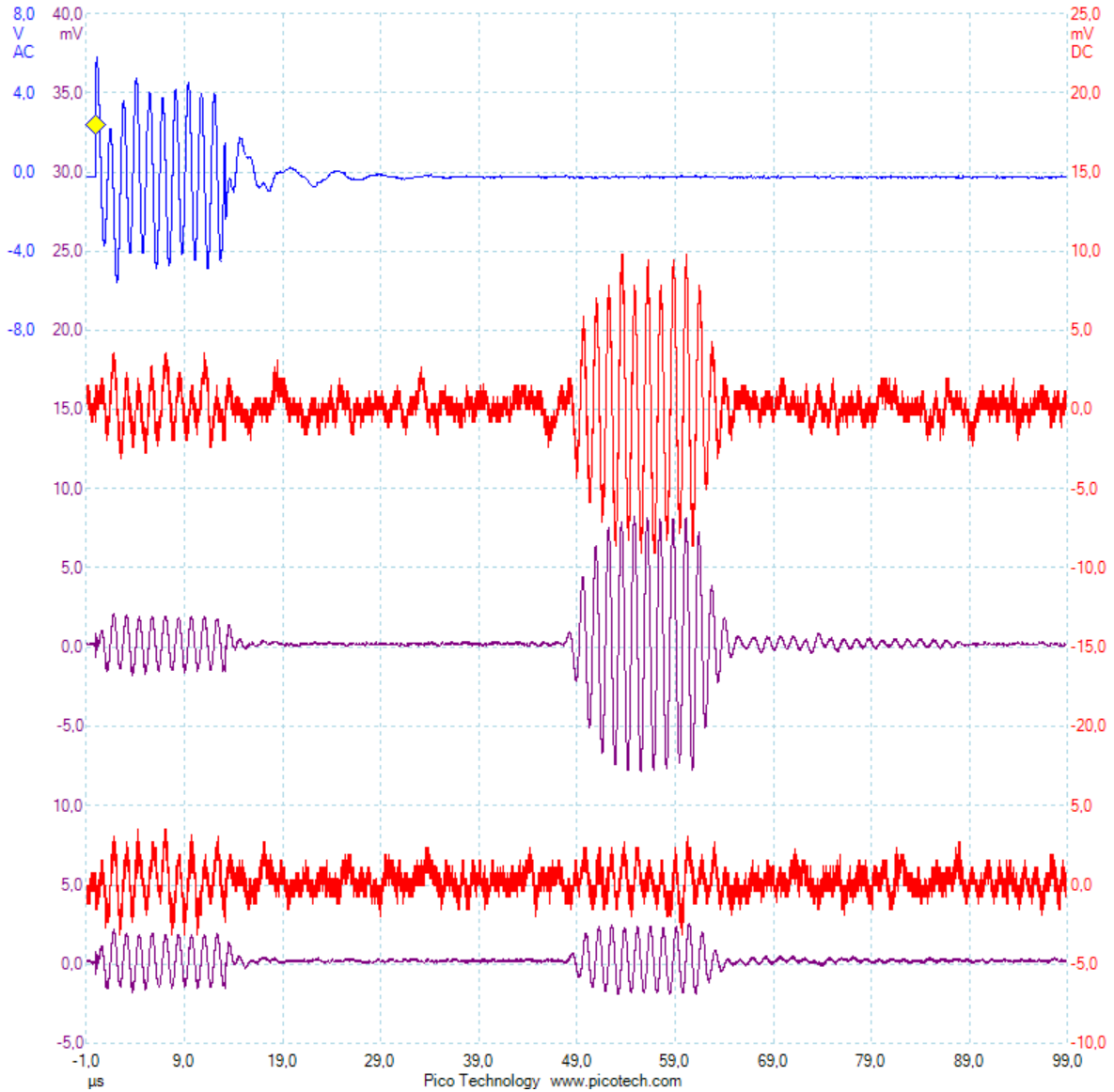
Kabarcık örnekleri üzerinde yapılan deneylerde kabarcıklar önce mikroskop altında lazer ışınıyla hedeflenmiştir. Hedeflenen kabarcıklar kauçuk örneklerinin ortasında ve sesötesi dönüştürücülerin uzak alanında (*İng: far field*) seçilmiştir. Sesötesi sürücü frekansı taranarak fotodiyot üzerinde en büyük ışık değişimin görüldüğü kabarcık rezonans frekansı belirlenmiştir.

Şekil 19'da silikon kauçuk içinde ve dönüştürücü yüzeyinden 47 mm uzaklıkta, rezonans frekansı 390 KHz olan bir kabarcıktan alınan işaret gösterilmiştir. Hesaplanan kabarcık yarıçapı 27 μm 'dir. En üstteki mavi kayıt, kabarcık rezonans frekansı olan 390 KHz'te sesötesi dönüştürücüye uygulanan sinyaldir. Kırmızı kayıtlar tek bir sinyal kaydını, mor kayıtlar ise 32 sinyal kaydının ortalamasını göstermektedir.



Şekil 19. Silikon kauçukta 390 KHz'te kabarcık rezonans hareketi. En üstteki mavi kayıt, fonksiyon jeneratörü çıkışında sesötesi dönüştürücüye uygulanan 390 KHz'lik sinyaldir. Kırmızı kayıtlar tek bir sinyal kaydını, mor kayıtlar ise 32 sinyal kaydının ortalamasını göstermektedir. Yukarıdaki kırmızı ve mor kayıtlar lazer ışını kabarcık üzerinden geçerken, aşağıdaki kayıtlar ise lazer ışını etkileyen hiç bir kabarcık olmadığı zaman alınmıştır.

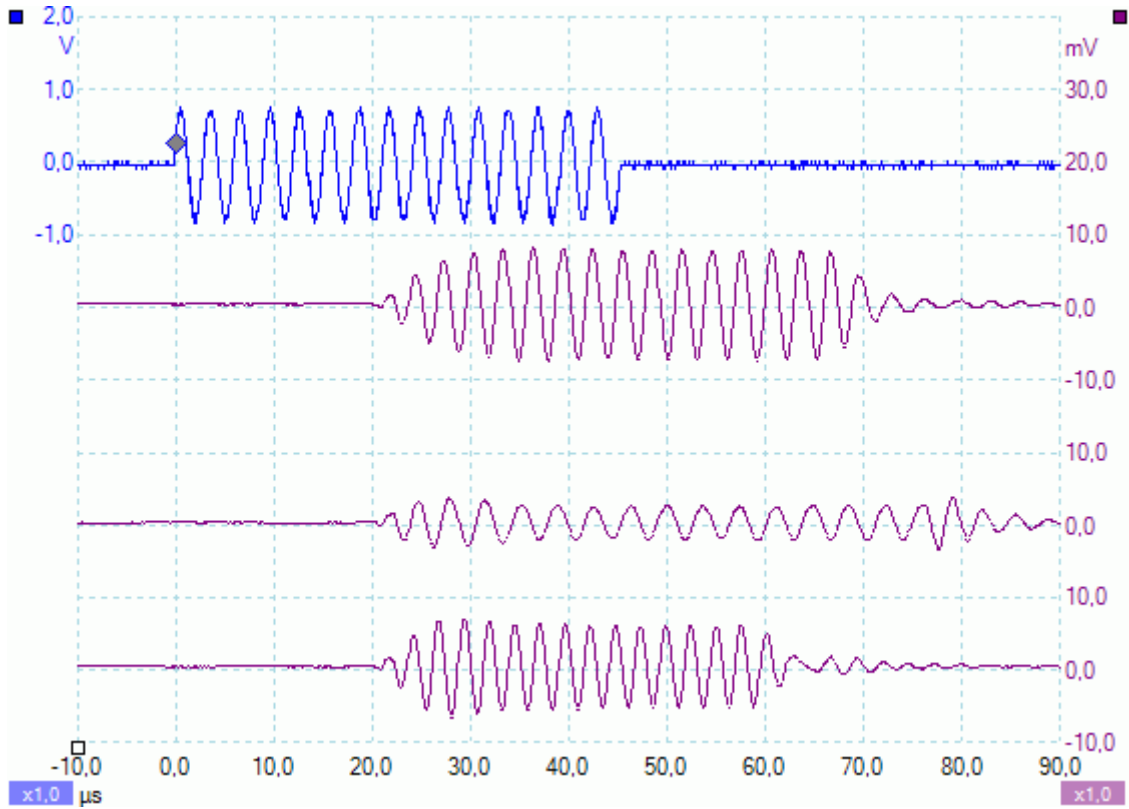
Lazer ışını etkileyen hiç bir kabarcık olmadığı zaman alınan akusto-optik değişim işaretleri karşılaştırma amacıyla altta gösterilmiştir. Kabarcık hareketiyle oluşan işaret değişimi ± 12 mV olduğunda buna karşılık gelen kabarcık kesit alanı değişimi $\pm 231 \mu\text{m}^2$ ve yarıçap değişimi $\pm 1.2 \mu\text{m}$ 'dir. Şekil 20'de dönüştürücüden 50 mm uzaklıkta, rezonans frekansı 760 KHz olan bir kabarcıktan benzeri şekilde alınan işaretler gösterilmiştir. Hesaplanan kabarcık yarıçapı $15 \mu\text{m}$ ve ses dalgası etkisiyle yarıçap değişimi $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 20. Silikon kauçukta 760 KHz'te kabarcık rezonans hareketi. Mavi kayıt, fonksiyon jeneratörü çıkışında sesötesi dönüştürücüye uygulanan 760 KHz'lik sinyaldir. Kırmızı kayıtlar tek bir sinyal kaydını, mor kayıtlar ise 32 sinyal kaydının ortalamasını göstermektedir. Yukarıdaki kırmızı ve mor kayıtlar lazer ışını kabarcık üzerinden geçerken, aşağıdaki kayıtlar ise lazer ışını etkileyen hiç bir kabarcık olmadığı zaman alınmıştır.

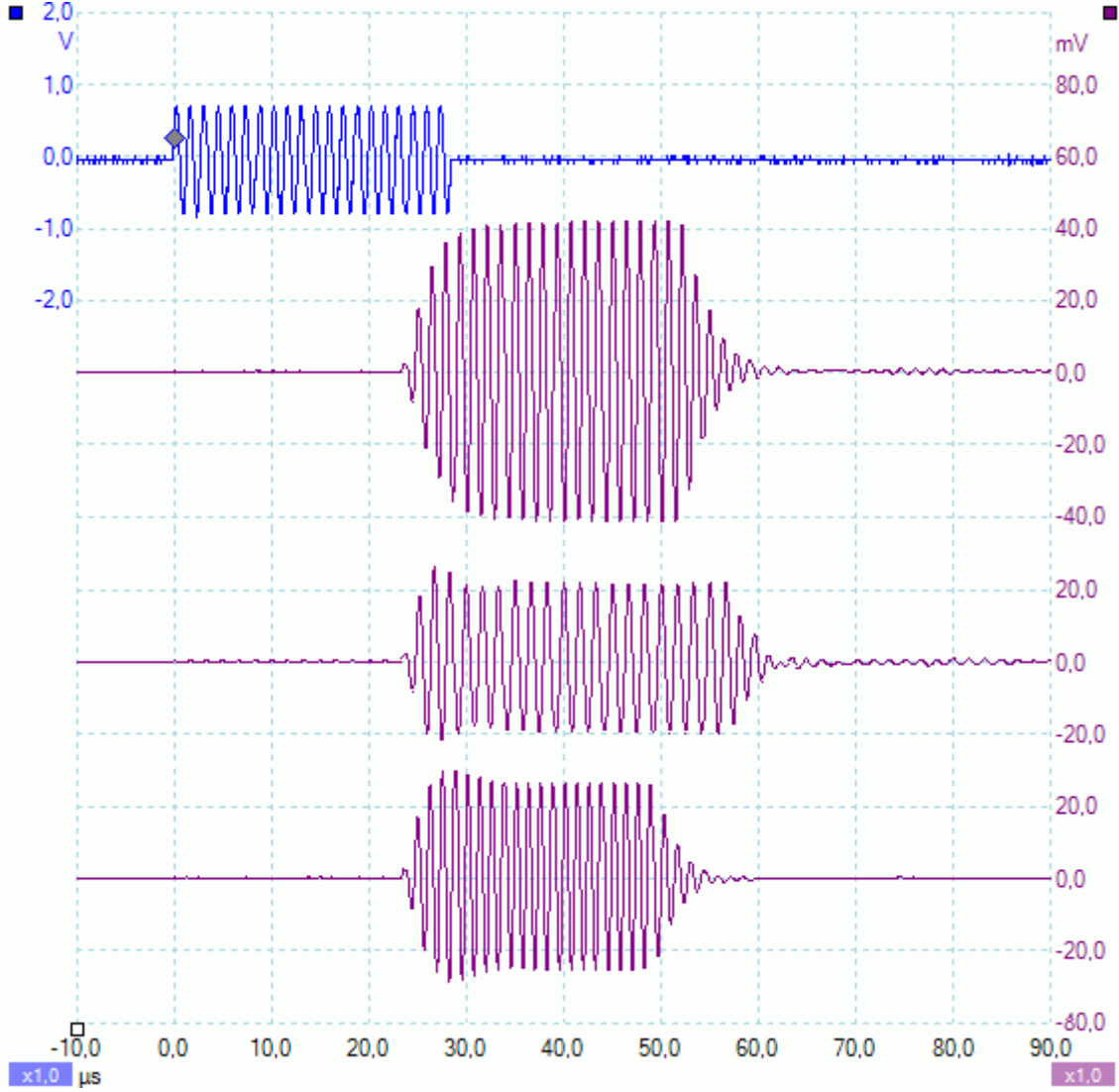
Odaklı sesötesi dönüştürücülerle poliüretan kauçuk örnekler üzerinde yapılan deneylerde silikon kauçuk örnekler ve düz dönüştürücülerle karşılaştırıldığında daha büyük bir kabarcık hareketi gözlenebilmiştir. Yeniden yapılan fotodiyot güçlendirici devresi ve elektromanyetik kalkan görevi gören alüminyum kılıflı dönüştürücüler sayesinde yüksek gerilimli sürücü sinyallerinden fotodiyot güçlendirici devresine etkileşim büyük ölçüde engellenmiştir.

Poliüretan kauçuk örneklerde 320 kHz, 700 kHz ve 1 MHz olmak üzere üç farklı rezonans frekansında alınmış sayısal osiloskop kayıtları sırasıyla Şekil 21, Şekil 22 ve Şekil 23'te verilmiştir. Bu kayıtlarda mavi işaret rezonans frekansında gönderilen dalgayı mor kayıtlar ise ortalaması alınmış 32 fotodiyot işaretini göstermektedir. Birinci mor kayıt rezonans frekansında, ikinci mor kayıt daha düşük bir frekansta, son mor kayıt ise daha yüksek bir frekansta alınmıştır.

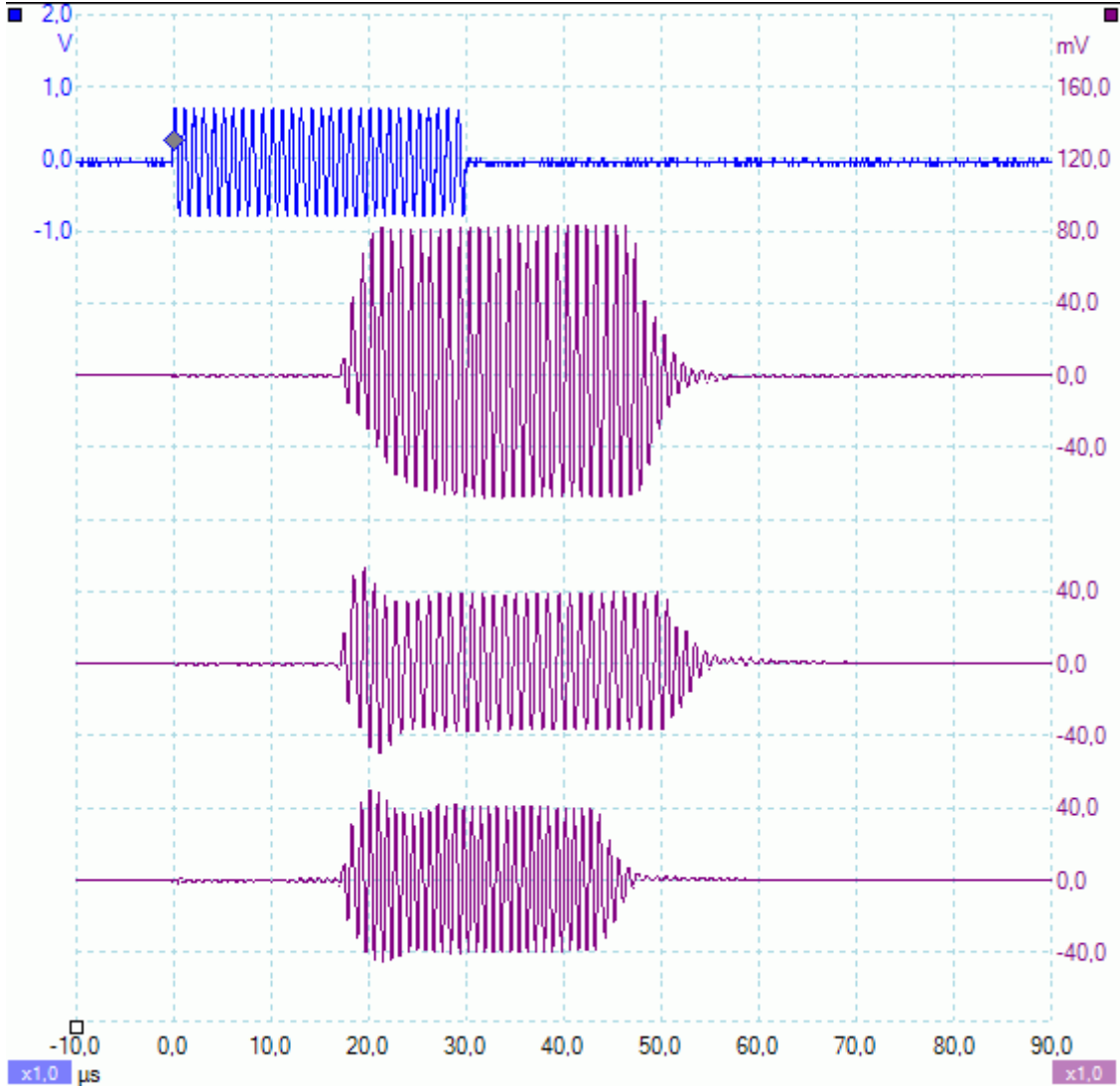


Şekil 21. Poliüretan kauçukta 320 KHz'te kabarcık rezonans hareketi. Mavi kayıt, fonksiyon jeneratörü çıkışında sesötesi dönüştürücüye uygulanan 320 KHz'lik sinyaldir. Mor kayıtlar 32 fotodiyot sinyal kaydının ortalamasıdır. En üstteki mor kayıt 320 KHz'te, ikinci mor kayıt 260 KHz'te, son mor kayıt 380 KHz'te kaydedilmiştir.

Düşük ses frekansında kabarcık hareketinin genliği de azalmıştır. Bunun farklılığın nedeni büyük ölçüde düşük frekanslı sesötesi dönüştürücünün odaklama yeteneğinin diğer dönüştürücülere göre daha kötü oluşudur.



Şekil 22. Poliüretan kauçukta 700 KHz'te kabarcık rezonans hareketi. Mavi kayıt, fonksiyon jeneratörü çıkışında sesötesi dönüştürücüye uygulanan 700 KHz'lik sinyaldir. Mor kayıtlar 32 fotodiyot sinyalinin ortalamasıdır. En üstteki mor kayıt 700 KHz'te, ikinci mor kayıt 600 KHz'te, son mor kayıt 800 KHz'te kaydedilmiştir.



Şekil 23. Poliüretan kauçukta 1 MHz'te kabarcık rezonans hareketi. Mavi kayıt, fonksiyon jeneratörü çıkışında sesötesi dönüştürücüye uygulanan 1 MHz'lik sinyaldir. Mor kayıtlar 32 fotodiyot sinyal kaydının ortalamasıdır. En üstteki mor kayıt 1 MHz'te, ikinci mor kayıt 0.9 MHz'te, son mor kayıt 1.1 MHz'te kaydedilmiştir.

4.4 Kabarcık Hareketi Modelleme Bulguları

Kabarcık rezonans frekansının belirlenmesi:

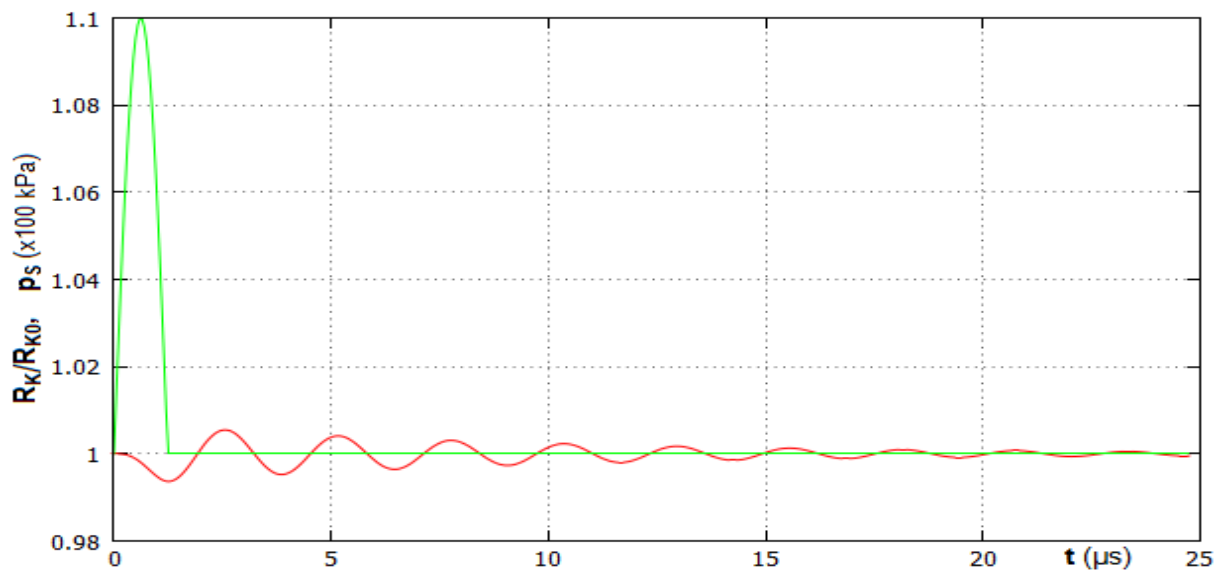
Elastomer ortamdaki bir kabarcığın rezonans frekansı, kabarcığın vuru yanıtı (*Ing: impulse response*) incelenerek belirlenebilir. Sesötesi dönüştürücülerin sınırlı frekans bandı nedeniyle bu yöntem gerçek kabarcık örnekleri üzerinde uygulanamaz. Bilgisayar ortamında böyle bir sınırlama olmadığı için kolayca elde edilen kabarcık vuru yanıtının bir örneği aşağıda, Şekil 24'te verilmiştir. Ortama uygulanan basınç değişimi yarım sinüs dalgası

şeklinde. Bu kısa basınç değişiminden sonra kabarcık kendi haline bırakıldığında kabarcık yarıçapında rezonans salınımı görülür. Modelleme programı salınımların sürelerini analiz ederek rezonans frekansını belirleyebilmektedir. Şekil 24'te verilen örnekte 19 μm yarıçapında bir kabarcık için hesaplanan rezonans frekansı 385 kHz'dir.

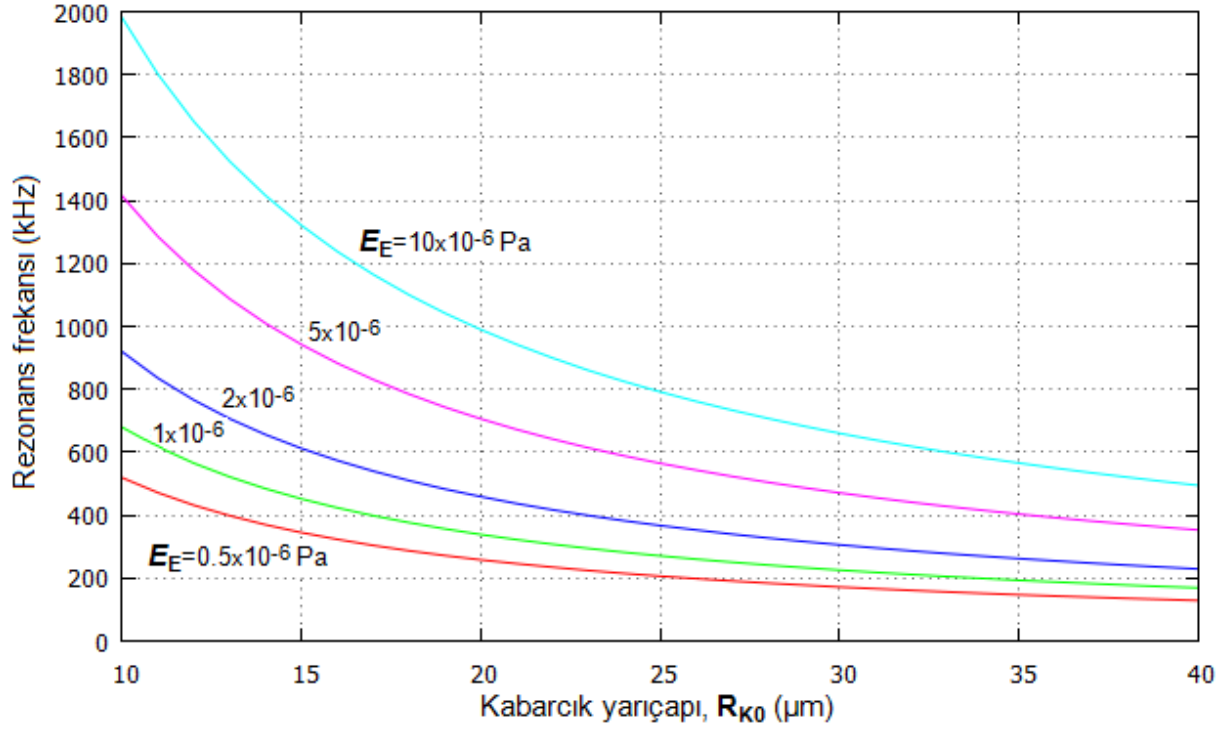
Rezonans frekansı üzerinde belirleyici olan iki önemli parametre, kabarcık yarıçapı ve elastomer ortamın esneklik modülüdür. Kabarcık vuru yanıtı analiz edilerek hesaplanan rezonans frekansları Şekil 25'te kabarcık yarıçapı ve esneklik modülüne bağlı olarak gösterilmiştir. Rezonans frekansı, yaklaşık olarak kabarcık yarıçapıyla ters orantılı ve esneklik modülünün kareköküyle doğru orantılıdır. Rezonans frekansını belirleyen başka bir parametre de ortamın özkütlesidir. Ancak, diğer iki parametrede olduğu gibi kauçuk malzemelerin özkütleleri arasında büyük farklılıklar söz konusu değildir.

Kabarcık frekans yanıtının kinematik viskoziteye bağlı değişimi:

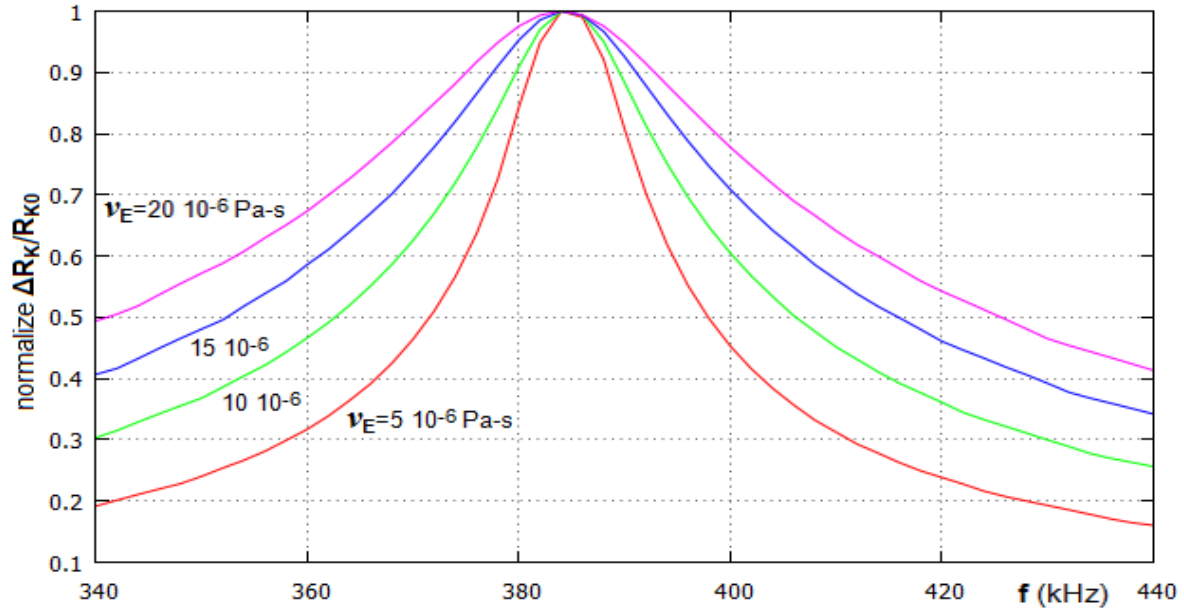
Farklı kinematik viskozite değerleri kullanılarak elde edilmiş frekans yanıtı grafikleri Şekil 26'da verilmiştir. Sürekli bir sinüsoidal basınç değişimi altında kabarcık yarıçapındaki değişimlerin ulaştığı en büyük göreceli değerler frekansa bağlı olarak gösterilmiştir. Bu grafikler elde edilirken doğrusal olmayan etkenlerden kaçınmak için küçük bir sinüsoidal basınç genliği (0.01 kPa) kullanılmıştır. Rezonans bant genişliğinin ayırd edilebilmesi için her grafik tepe değeriyle bölünerek normalize edilmiştir. Normalize edilmemiş $\Delta R_K/R_{K0}$ tepe değerleri, kinematik viskozitenin 5×10^{-6} , 10×10^{-6} , 15×10^{-6} ve 20×10^{-6} Pa-s olduğu grafiklerde sırasıyla 0.034, 0.019, 0.013 ve 0.010'dur.



Şekil 24. Kabarcık vuru yanıtı (*İng: impulse response*). Yeşil işaret uygulanan sürücü basınç değişimini (p_s), kırmızı işaret kabarcık yarıçapındaki değişimi göstermektedir.



Şekil 25. Kabarcık rezonans frekansının kabarcık yarıçapı (R_{K0}) ve elastomer ortamın esneklik modülüne (E_E) bağlı olarak değişimi: Rezonans frekansı kabarcık vuru yanıtı analiz edilerek hesaplanmıştır.



Şekil 26. Elastomer ortamın akışmazlığının (ν_E) değişik değerlerinde kabarcık frekans yanıtı: Kabarcık yarıçapındaki değişimin (ΔR_K) başlangıç yarıçapına ($R_{K0}=19 \mu m$) oranı normalize edilmiş haliyle gösterilmiştir.

Diğer modelleme hesaplarında kullanılan kinematik viskozite değeri, silikon kauçuk örneklerde gözlenen frekansa bağlı değişimler Şekil 26'da görülen frekans yanıtı grafikleriyle karşılaştırılarak 12×10^{-6} Pa-s olarak belirlenmiştir. Poliüretan kauçuk için de kinematik viskozite değeri 50×10^{-6} Pa-s olarak belirlenmiştir.

Sürekli basınç değişimi altında kabarcık hareketi:

Sürekli basınç değişimi altında kabarcık hareketini modellemek için kullanılan dış ortam basınç fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

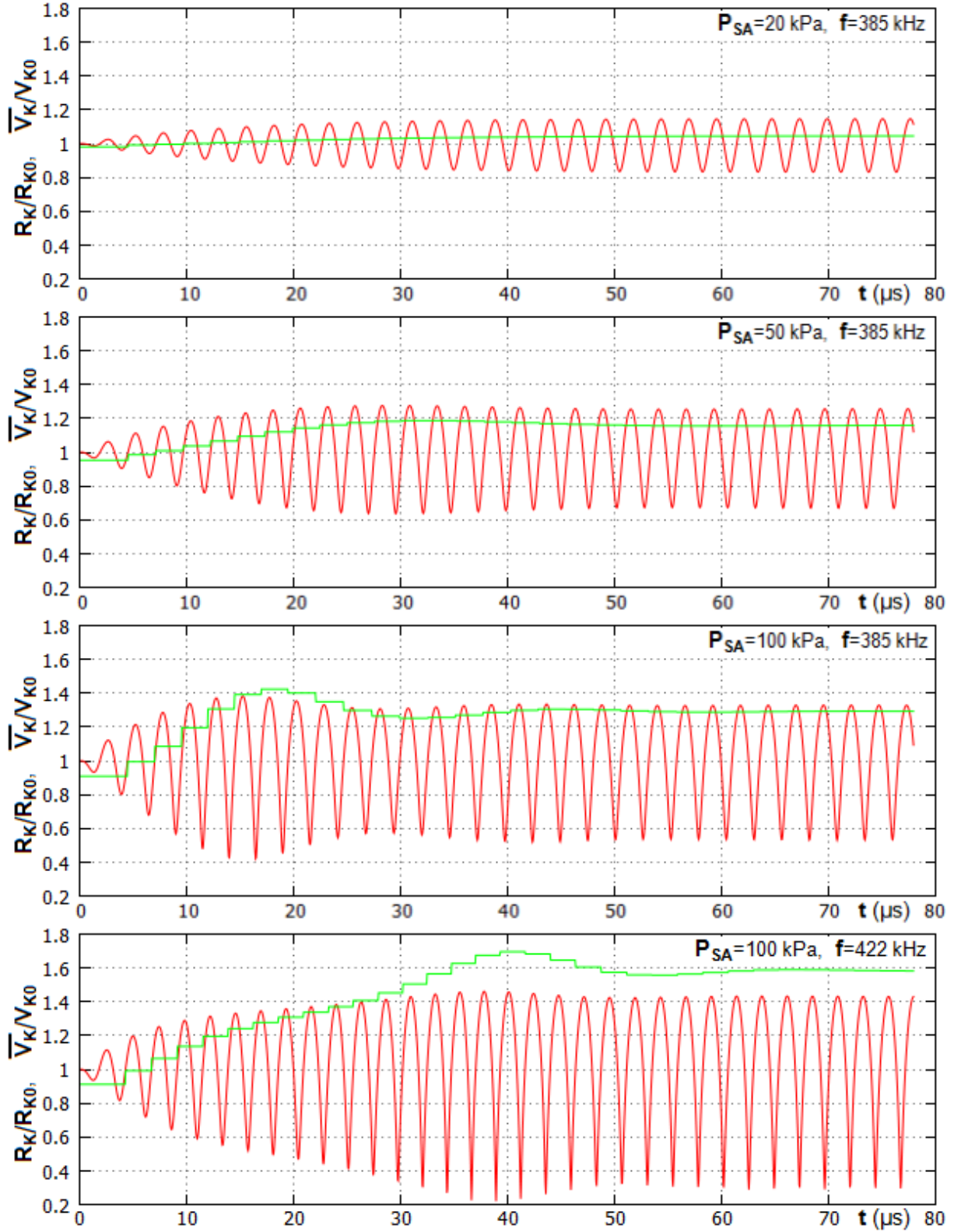
$$p_s = p_{s0} + P_{SA} \sin(2\pi f t) \quad (13)$$

Bütün hesaplamalarda sabit dış ortam basıncı, $p_{s0} = 100$ kPa (1 bar) olarak belirlenmiştir. Rezonans frekansında ($f = 385$ kHz) üç farklı basınç genliği için ($P_{SA} = 20, 50$ ve 100 kPa) kabarcık yarıçapındaki göreceli değişimler Şekil 27'de zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Kabarcık hareketinin her bir devri boyunca zamanda ortalaması alınan kabarcık hacminin başlangıçtaki kabarcık hacmine oranı (V_K/V_{K0}) yeşil çizgilerle gösterilmiştir. Bu grafikler elde edilirken kullanılan diğer önemli parametreler şunlardır:

- Kabarcığın başlangıçtaki yarıçapı: $R_{K0} = 19 \mu\text{m}$
- Elastomer ortamın özkütlesi: $\rho_E = 1067 \text{ kg/m}^3$
- Elastomerin doğrusal esneklik modülü: $E_E = 1.2 \times 10^6 \text{ Pa}$
- Elastomer ortamın kinematik akışmazlığı: $\nu_E = 12 \times 10^{-6} \text{ Pa-s}$
- Elastomer ortamın yüzey gerilimi: $\sigma_{EG} = 0.072 \text{ N/m}$

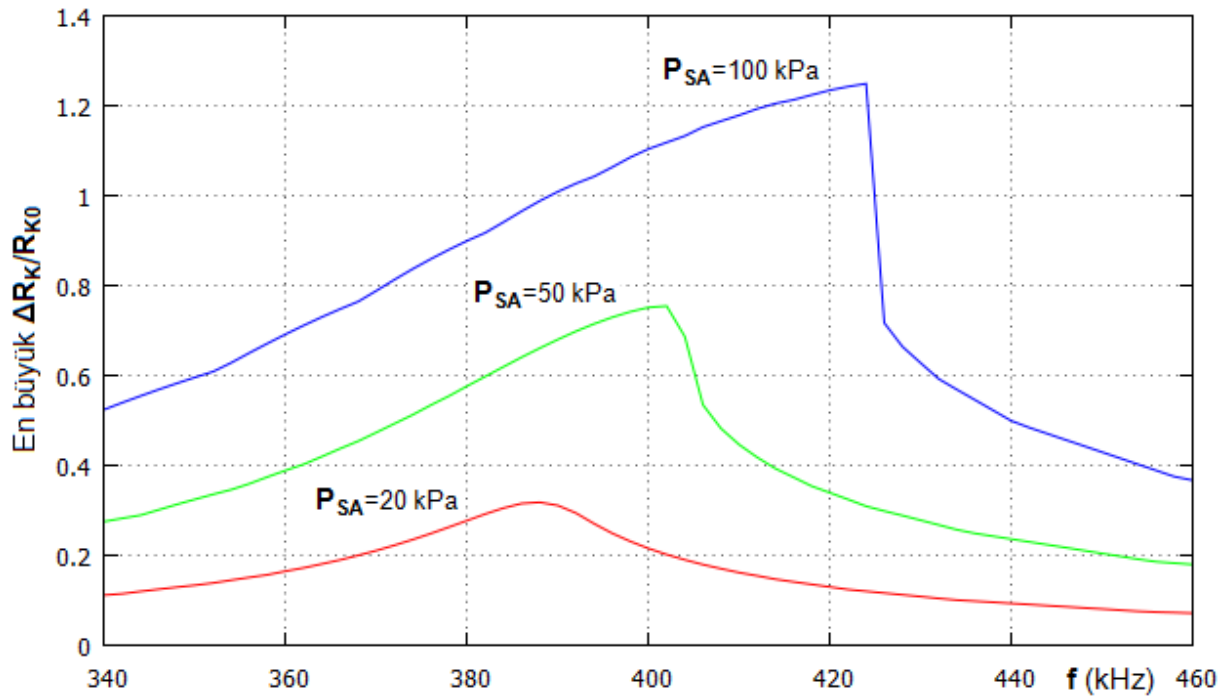
Şekil 27'de görüldüğü gibi P_{SA} basınç genliği arttıkça kabarcık yarıçapındaki salınımlarla birlikte ortalama kabarcık hacmi de artmaktadır. Salınımlar büyüdükçe R_K/R_{K0} oranının birden büyük olduğu sürenin toplam salınım perioduna oranı da artmaktadır. Bu nedenle ortalama kabarcık hacmindeki artış beklenenden büyük olmaktadır.

Şekil 27'de en altta verilen dördüncü grafikte basınç değişimlerinin genliği üçüncü grafikte olduğu gibi yine 100 kPa'dır. Üçüncü grafikten farklı olarak basınç değişimlerinin frekansı 385 kHz yerine 422 kHz'tir. Bu frekansta daha büyük bir salınım görülmesinin nedeni kabarcık davranışının doğrusal olmayışıdır. Kabarcık yarıçapındaki salınımlar büyüdükçe ortaya çıkan yüksek basınç değişimleri, rezonansı belirleyen gerilim etkilerinin güçlenmesine ve dolayısıyla rezonans frekansının kaymasına neden olmaktadır.



Şekil 27. Sürekli basınç değişimi altında kabarcık hareketi. Yarıçapı $19 \mu m$ olan bir kabarcığın rezonans frekansında modellenen hareketi: Kırmızı çizgiler kabarcık yarıçapındaki göreceli değişimleri, yeşil çizgiler zamanda ortalaması alınan kabarcık hacminin başlangıçtaki kabarcık hacmine oranını gösterir. İlk üç grafikte ortamdaki basınç değişimlerinin frekansı kabarcık rezonans frekansına (385 KHz) eşittir ve genliği sırasıyla $P_{SA} = 20, 50$ ve 100 kPa 'dır. En alttaki grafikte basınç değişimlerinin genliği yine 100 kPa 'dır ve frekansı 422 KHz 'tir.

Ortamın değişen basınç genliğine bağlı olarak rezonans frekansında görülen kayma Şekil 28'de verilen frekans yanıtı grafiklerinde gösterilmiştir. Her frekans değerinde kabarcık hareketi Şekil 27'de gösterildiği gibi 80 μ s süreyle hesaplanarak bu süre içindeki en büyük yarıçap değişimi kaydedilmiştir. Basınç genliği 100 kPa olduğunda, 425 KHz'e kadar kabarcık rezonansa girebilmektedir. Daha yüksek frekanslarda rezonans etkisi tam olarak görülmediği için 425 KHz'ten sonra frekans yanıtında ani bir düşüş olmaktadır. Bu sonuçlara göre eğer ortama gönderilen ses dalgasının frekansı kabarcığın rezonans frekansında başlatılıp gittikçe artırılırsa daha büyük salınımlar görmek mümkün olacaktır.



Şekil 28. Ortamdaki basınç değişimlerinin farklı genlik değerlerinde kabarcık rezonans hareketinin frekans yanıtı. Sürekli sinüsoidal basınç değişimi ($P_{SA} = 20, 50$ ve 100 kPa) altında kabarcık yarıçapında görülen en büyük göreceli değişim frekansa bağlı olarak gösterilmiştir.

5 SONUÇ

Kabarcık rezonansının modelleme sonuçlarıyla yapılan ölçümler karşılaştırıldığında her iki durumda da rezonans frekansının kabarcık yarıçapıyla yaklaşık olarak ters orantılı olduğu gözlenmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi aynı rezonans frekansına karşılık gelen kabarcık yarıçapı farklıdır. Bu farklılığın nedeni kabarcık yarıçapı ölçülürken, kauçuk esneklik modülü belirlenirken ya da modelleme programında elastomer ortamdaki gerinimin neden olduğu basınç hesaplanırken yapılan hatalar olabilir.

Tablo 2. Yapılan ölçümlere ve modelleme sonuçlarına göre aynı rezonans frekansına karşılık gelen kabarcık yarıçapı değerleri.

Kauçuk Malzeme	Rezonans Frekansı	Ölçüm sonucu kabarcık yarıçapı	Modelleme sonucu kabarcık yarıçapı
Silikon	385 kHz	27 µm	19 µm
Silikon	760 kHz	15 µm	11 µm
Poliüretan	330 kHz	35 µm	29 µm
Poliüretan	700 kHz	22 µm	17 µm
Poliüretan	1000 kHz	15 µm	12 µm

Kabarcık rezonans mekanizmasının güç verimliliği üzerinde belirleyici etken, kabarcığı çevreleyen ortamın akışmazlığıdır. Newtonian diye sınıflandırılan suya benzer sıvılar için ses sönümü ve ortamın akışmazlığı arasındaki bağıntı Stokes'un ses sönümü kanunuyla belirlenir (Morse ve Ingard, 1987):

$$\alpha = \frac{2 (\eta + \frac{3}{4} \eta^v) \omega^2}{3 \rho c^3} \quad (14)$$

Bu denklemdeki parametreler ve saf su için 20 °C sıcaklıkta belirlenmiş olan değerleri aşağıda verilmiştir:

α : sönüm katsayısı (saf su için 0.025 Neper/m)

ω : ses frekansı (rad/s)

ρ : kütle yoğunluğu (saf su için 1000 kg/m³)

c : ses hızı (saf su için 1482 m/s)

η : dinamik akışmazlık katsayısı (saf su için ~0.001 Pa-s)

η^v : hacim (*İng: bulk*) akışmazlık katsayısı (saf su için ~0.0031 Pa-s)

Eğer bir elastomer ortamda kabarcık hareketinin sudakine benzer olduğu kabul edilirse sönüm değerlerine, ses hızına ve kütle yoğunluğuna bağlı olarak akışmazlık katsayıları oranlanabilir. Tablo 1'de verilen değerlere göre, kullanılan kauçuk malzemelerin dinamik akışmazlık katsayılarının suyunkine göre yaklaşık 1000 kat büyük olması beklenmelidir. Matematiksel kabarcık hareketi modelinde bu büyüklükte akışmazlık katsayıları girildiğinde rezonans davranışı tamamıyla yok olmaktadır. Öte yandan, kauçuk örnekler üzerinde çok etkili olmasa da rezonans davranışı gözlemlenebilmiştir. Buradan çıkarılacak sonuç matematiksel modelde akışmazlık etkisinin olması gerekenden çok daha baskın olduğu ya da başka esneklik faktörlerinin modele eklenmesi gerektiğidir.

Yapılan ölçümlerde görülen rezonans hareket genliğinin düşük oluşu, bu projede kullanılan kauçuk malzemelerle elde edilebilecek kabarcık rezonansına dayalı eyleyici yapılarının 100 kHz-1 MHz frekans aralığında verimli olmayacağını göstermiştir. Odaklı sesötesi dönüştürücülerle çok daha yüksek genlikte rezonans hareketi elde edilmiş olsa da, pratikte kullanılacak eyleyici yapıları söz konusu olduğunda aynı düzeyde ses şiddeti elde etmek mümkün olmayacaktır. Bu nedenle kabarcıklı eyleyici yapısının ya farklı malzemelerle ya da daha düşük frekanslarla tasarlanması gerekecektir.

5.1 İleriye Yönelik Öneriler

Başlangıçta bu projeye hedeflenen milimetre ölçeğinde eyleyici yapıları olduğu için 330 kHz-1 MHz aralığında sesötesi dönüştürücüler kullanılmış ve gereken kabarcık boyutları bu frekans aralığına göre belirlenmiştir. Halen var olan araştırma olanaklarıyla sürdürülecek olan çalışmalarda öncelikle 1 kHz-40 kHz frekans aralığında dönüştürücülerle daha büyük eyleyici yapılarının olabilirliği incelenecektir. Genelde ses sönümü frekansın karesiyle orantılı olduğu için düşük frekanslarda kabarcık rezonans hareketinin daha etkin olması beklenmektedir. Ayrıca 1 kHz-40 kHz frekans aralığında rezonans için gerekli boyda kabarcık örneklerinin hazırlanması çok daha kolay olacaktır.

Projede kullanılan kauçuk örnekleri hem saydam olması hem de oda sıcaklığında kalıplanabilmesi gerektiği için üç tür silikon ve poliüretan kauçuk döküm malzemesiyle sınırlı kalınmıştır. Ses sönümünün daha düşük olduğu bir elastomerle daha etkin bir kabarcık



rezonans hareketi elde edilebilir. Örnek olarak poliüretan kauçukla karşılaştırıldığında yaklaşık 20'de bir ses sönümü gösteren farklı bir elastomer (Ginzel ve Ginzel 1996) kullanılabilir. Düşük ses sönümü olan elastomerlere alternatif olarak kompozit malzemeler kullanılarak da eyleyici yapıları tasarlanabilir. Örnek olarak, esnek bir malzemeyle yapılan mikro baloncuklar düşük sönüm katsayısına sahip su ya da benzeri bir ortama yerleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Andersen, K. S. ve Jensen, J. A. 2009. "Ambient Pressure Sensitivity of Microbubbles Investigated Through a Parameter Study", J. Acoust. Soc. Am. Cilt 126 (6), Sayfa 3350-3358.
- Birman, V. 1997. "Review of Mechanics of Shape Memory Alloy Structures", Appl. Mech. Rev. Cilt 50 (11), Sayfa 629-645
- Brennen, C. E. 1995. Cavitation and Bubble Dynamics, Sayfa 47-77, New York: Oxford University Press.
- Brenner, M. P., Hilgenfeldt, S. ve Lohse D. 2002. "Single-bubble sonoluminescence", Rev. Mod. Phys., Cilt 74 (2), Sayfa 425-484.
- Broek, D. 2008, Explosive Microbubble Actuator, (doktora tezi), The Netherlands: University of Twente, Enschede.
- Cheng, Z., Zhang, Q., Su, J. ve Tahchi, M. E. 2008. "Electropolymers for Mechatronics and Artificial Muscles" Sayfa 131-159, Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications, Springer Series in Materials Science, Cilt 114, Editörler: Safari, A., ve Akdoğan, E. K. New York: Springer.
- Claeyssen, F., Lhermet, N. ve Maillard, T. 2003. "Magnetostrictive actuators compared to piezoelectric actuators", Proceedings of the SPIE, Cilt 4763, Sayfa 94-200
- Dijkink, R. J., Dennen, J.P., Ohl C. D. ve Prosperetti A. 2006. "The 'Acoustic Scallop': a Bubble-Powered Actuator", J. Micromech. Microeng. Cilt 16, Sayfa 1653-1659.
- Doğan, A. ve Uzgur, E. 2008. "Piezoelectric Actuator Designs" Sayfa 341-371. Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications, Springer Series in Materials Science, Cilt 114, Editörler: Safari, A., ve Akdoğan, E. K. New York: Springer.
- Epstein, P. S., ve Plesset, M. S. 1950. "On The Stability of Gas Bubbles in Liquid-Gas Solutions," J. Chem. Phys. Cilt 18 (11), Sayfa 1505-1509.
- Fujii, H., Kato, K., Hatanaka, I. 2013. "Foam waterproofing material with a micro cell structure", United States Patent No: 8,501,310.

Ginzel, E. A. ve Ginzel, R. K. 1996. "Ultrasonic properties of a new low attenuation dry couplant elastomer", Nondestructive Testing (NDT) database

Internet adresi: www.ndt.net/article/ginzel/ginzel.htm

Son erişim tarihi: 15 Ocak 2015.

Hosono, Y., Yamashita, Y., ve Itsumi, K. 2007. "Effects of Fine Metal Oxide Particle Dopant on the Acoustic Properties of Silicone Rubber Lens for Medical Array Probe", IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectrics and Freq. Control, Cilt 54 (8), Sayfa 1589-1595.

Khismatullin, D. B. ve Nadim, A. 2002. "Radial Oscillations of Encapsulated Microbubbles In Viscoelastic Liquids", Physics of Fluids, Cilt 14 (10), Sayfa 3534-3557.

Khismatullin, D. B. 2004. "Resonance Frequency of Microbubbles: Effect of Viscosity", J. Acoust. Soc. Am. Cilt 116 (3), Sayfa 1463-1473.

Morse, P. M. ve Ingard, K. U. 1987. Theoretical Acoustics, Princeton University Press.

Mascardo, M., Zhao, X., Suo, Z. ve Lapusta, Y. 2008. "On Designing Dielectric Elastomer Actuators", Journal of Applied Physics, Cilt 104 (9), 093503, Sayfa 1-7.

Mott, P. H., Roland, C. M. ve Corsaro, R. D. 2002 "Acoustic and dynamic mechanical properties of a polyurethane rubber", J. Acoust. Soc. Am., Cilt 111 (4), Sayfa 1782-1790.

Pelrine, R. vd. 2002. "Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion", Proceedings of SPIE, Cilt 4695, Sayfa 126-137.

Postema, M. ve Schmitz, G. 2007. "Ultrasonic Bubbles in Medicine: Influence of The Shell", Ultrasonics Sonochemistry, Cilt 14, Sayfa 438-444.

Rayleigh, Lord 1917. "On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity", Philosophical Magazine Series 6, Cilt 34 (200), Sayfa 94-98.

Suo, Z. 2010. "Theory of Dielectric Elastomers", Acta Mechanica Solida Sinica, Cilt 23 (6), Sayfa 549-578.

Zimmerman, W. B., Tesai, V, Butler, S. ve Bandulasena, H. 2008, "Microbubble Generation", Recent Patents on Engineering, Cilt 2 (1), Sayfa 1-8.

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. BARBAROS ÖZDEMİREL
Proje No:	111M597
Proje Başlığı:	Sesötesi Kabarcık Rezonansına Dayanan Elastomer Eyleyici
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENS. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2012 - 15/12/2014
Onaylanan Bütçe:	92010.0
Harcanan Bütçe:	49897.42
Öz:	<p>Bu projenin ana hedefi, hareket aralığı kendi boyutlarıyla aynı ölçekte olan bir katıhal eyleyici yapısını araştırmaktır. Bir elastomer kalıp içerisine dağılmış olan çok sayıda küçük kabarcık dışarıdan uygulanan bir ses dalgasıyla rezonansa getirilebilir. Toplam kabarcık hacmindeki değişime bağlı olarak elastomer kalıp genişleyecek ve serbest bırakılan yüzeyleri hareket edecektir. Bu çalışmada kabarcık rezonansının benzetim modelleri geliştirilmiş ve saydam kauçuk döküm malzemeleri içinde kabarcık rezonans hareketi optik gözlem düzenekleri kullanılarak gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar önerilen eyleyici yapısının gerçekleştirilmesinde iki zorlayıcı etken ortaya çıkarmıştır. Birinci etken kauçuk malzemelerde ses sönümünün yüksek oluşu ve sonucunda rezonans hareketinin sınırlı kalmasıdır. İkinci etken ise bu çalışmada kullanılan kauçuk döküm malzemeleri içinde hedeflenen çapta ve rezonans frekansında kabarcıkların elde edilmesindeki zorluklardır. Özellikle, sertleşme sürelerinin saatler düzeyinde oluşu oda sıcaklığında tepkime veren kauçuk karışımlarıyla yapılan çalışmaları sınırlamıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	sesötesi, kabarcık rezonansı, kauçuk, elastomer, piezoelektrik eyleyici
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır