



**Meme Kanserinin Tanısı ve İzlenmesi İçin Mikrodalga Uyarımlı Termoakustik
Görüntüleme**

Program Kodu: 1003

Proje No: 213E038

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Mustafa KARAMAN

Araştırmacı(lar):

Prof. Dr. Muhammet İrşadi AKSUN

Prof. Dr. Aydın DOĞAN

Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR

Doç. Dr. Serkan ŞİMŞEK

Doç. Dr. Banu UZUN

Doç. Dr. Metin YAZGI

Bursiyer(ler):

Utku Emre ALİ

Hazel BAYINTIR

Demet ELMAS

Mehmet Sait KILINÇ

Hüseyin Emre ÖZÜM

Betül SAMANCI

Ayşe Gül TOKTAŞ

EKİM 2017

İSTANBUL



ÖNSÖZ

Bu projede, meme kanserinin erken tanısı ve izlenmesi için bir mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntüleme (MUTAG) sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen MUTAG platformu, mikrodalga darbe üretici, güç amfisi, anten ve akustik transdüser alt elemanlarından oluşmaktadır. Yüksek güçlü mikrodalga darbe ünitesi ve literatürden farklı olarak su içinde çalışan bir anten tasarlanıp ulusal kaynaklarla üretilmiştir. Bilgisayarlı kontrollü deneysel xyz-yönlü konumlandırma-tarama ünitesi kullanılarak, farklı test fantomlarından deneysel termoakustik işaret toplama ve görüntü çıkarma çalışmaları yapılmış; üç boyutlu termoakustik ve standart darbe-eko ultrason görüntüleri elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında silindirik hazne tarama sistemi ve buna entegre edilecek çok elemanlı halka transduser dizisi hazırlanmıştır. Bu tarama sisteminin standart ultrason deneysel sınamaları yapılmış ve termoakustik görüntülme için bütünleştirilmesi tamamlanmıştır. Ayrıca termoakustik dalga denkleminin çok katmanlı silindirik ve düzlemsel doku yapıları için ileri ve ters analitik çözümleri elde edilmiş olup, çok katmanlı yapılar için sayısal olarak sınanmıştır. Öncelikli alanlar 1003 kapsamında hazırlanmış olan bu proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve çıktılar çağrı hedeflerine katkı sağlamıştır. Projenin deneysel kurulumu İstanbul Teknik Üniversitesinde bulunan Akustik Sinyal Algılama Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	iii
TABLULARIN LİSTESİ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR ÖZETİ	4
2. GEREÇ VE YÖNTEM	4
2.1 Mikrodalga Darbe Üreteci, Mikrodalga Güç Yükselteci, Anten Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi.....	5
2.1.1 Tasarım Denklemleri.....	5
2.1.2 HFFS Simulasyonları.....	6
2.2 Termoakustik Görüntüleme - KuramsalAltyapı.....	10
2.3 Transduser Geliştirilmesi.....	15
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	28
3.1 Kuramsal Çalışmaların Sayısal Benzetim Sonuçları.....	28
3.1.1 Düzlemsel Ortam İçin Simulasyon Sonuçları.....	28
3.1.2 Silindirik Ortam İçin Simulasyon Sonuçları.....	30
3.2 Sistem Entegrasyonu	32
3.2.1 Üretilen Antenin Deneysel Testleri.....	35
4. SONUÇ	46
KAYNAKÇA	48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 1. Dikdörtgen dalga kılavuzu yapısı.....	5
Şekil 2. HFSS ile oluşturulan anten modelleri ve su içindeki elektrik alan dağılımları.....	6
Şekil 3. Tasarlanan anten ve su ortamının HFSS modeli: (a) Yandan görünüm (b) Üsten görünüm.....	7
Şekil 4. Farklı boyutlardaki teflonun S11 parametresi.....	8
Şekil 5. 500 MHz ile 1 GHz arası antenin S11 değeri.....	8
Şekil 6. Mikrodalga uyarımda kullanılan antenin su ortamında elektrik alan genliğinin ($ E(x,y,z) $) lineer ve logaritmik dağılımı.....	9
Şekil 7. Fotoakustik etkinin şematik gösterimi.....	10
Şekil 8. Çok katmanlı düzlemsel ve silindirik geometri.....	11
Şekil 9. Üretilen Ultrasonik Transdüser.....	16
Şekil 10. Transduser Üretim Akım Şeması.....	18
Şekil 11. Üretilen Prototip Silindir Dizin Transdüser.....	20
Şekil 12. Ön ve Arka Polimer Katmanları Tamamlanmış Nihai Ürün (Sol taraf) ve Nihai Ürünün Son Hali (Sağ taraf).....	21
Şekil 13. Dairesel Dizin Transdüser Deney Düzeneği ve Düzeneği Şematik Gösterimi	21
Şekil 14. Arka Yansıma Sönümlleme Polimerinin İkinci Dolgu Aşaması.....	22
Şekil 15. Seramiklerin Veri Toplama Cihazına Uyumu İçin Soket Bağlantı Aşaması.....	23
Şekil 16. Üretimi Tamamlanmış Dairesel Dizin Transdüser	23
Şekil 17. Seramik-Polimer Kompozit yapısı.....	26
Şekil 18. 0,25 İnç Aktif Seramiklerden Üretilen Transdüserlerin Konumlama Aparatı.....	26
Şekil 19. 1,25 İnç Aktif Seramiklerden Üretilen Transdüserlerin Konumlama Aparatı.....	27
Şekil 20. Sayısal test fantomu, literatürde yer alan homojen ortam varsayımına dayanan ters çözüm ve katmanlı ortam varsayımına dayanan ters çözüm kullanılarak elde edilen lineer, logaritmik 20 dB ve 40 dB görüntüler.....	29
Şekil 21. En üstte sayısal test fantomu verilmiştir. Test fantomundan sonra gelen 1. ve 2 sütun sırasıyla homojen ters çözüm ve katmanlı ters çözüm simülasyonlarını göstermektedir.....	31
Şekil 22. (a) Deneysel veri toplama düzeneği ve (b) Mikrodalga darbe kaynağı ve amfisi.....	32
Şekil 23. Görüntüleme haznesindeki üç katmanlı dokunun HFSS modeli.....	33
Şekil 24. Mikrodalga uyarımda kullanılan antenin su ve üç katmanlı doku ortamında elektrik alan genliğinin ($ E(x,y,z) $) lineer ve logaritmik dağılımı.....	34
Şekil 25. Tasarlanan mikrodalga antenin çizimi ve gerçekleşmesi, hava için.....	35

Şekil 26. Su içerisinde çalışmaya uyumlu antenin (a) gerçekleşmiş hali (b) anten piminin şematiği	36
Şekil 27. Ölçüm düzeni ve gerçekleştirilen antenin yansıma katsayısı.....	37
Şekil 28. Mikrodalga darbe kaynağının testlerinden örnek bir darbe işareti ve spektrumu.....	38
Şekil 29. Adaptör antenden alınan termoakustik işaret genliğinin uzaklıkla değişimi ve üstel sönümlenme modeli.....	39
Şekil 30. Deney düzeneğinin modellemesi, düzeneğin tel ve anten kısmının görünüşleri ve alınan akustik ve termoakustik görüntüler.....	40
Şekil 31. Deney düzeneğinin modeli, düzeneğin tel ve anten kısmının fotoğrafı ve alınan termoakustik görüntü. Görüntü üzerinde yayı simgeleyen kırmızı çizgi, perspektif görünümü kolaylaştırması için yapay olarak eklenmiştir.....	41
Şekil 32. Doku (kas dokusu) örneği: (a) tam fotoğrafı, (b) kesit fotoğrafı ve (c) termoakustik deneysel kesit görüntü (-3dB). Kesitin yeri (a)'da kesik çizgi ile belirtilmiştir.....	42
Şekil 33. Sistemin Şematik Gösterimi.....	42
Şekil 34. Uygulanan darbe genişliğinin spektral etkisi.....	43
Şekil 35: Yüksek güçlü mikrodalga darbe üretici, darbe sıkıştırma sisteminin şeması ve elde edilen akustik sinyal.....	44



TABLULARIN LİSTESİ

Tablo 1. Anten parametreleri (su içindeki).....	6
Tablo 1. Darbe sıkıştırma sisteminin parametreleri.....	44



ÖZET

Termoakustik görüntüleme, iyonize etkisi olmayan, noktasal ve kontrast çözünürlüğü yüksek yeni bir hibrit görüntüleme modalitesi olup kanserinin erken tanısı ve izlenmesi için uygun bir tekniktir. Bu teknik bilimsel, teknolojik ve ticari potansiyeli olan henüz klinik bir araç haline gelmemiş bir güncel bir konudur. "Meme Kanserinin Tanısı ve İzlenmesi İçin Mikrodalga Uyarımlı Termoakustik Görüntüleme" adlı bu projede mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntüleme (MUTAG) sisteminin gelişmiş yerli alt yapısı oluşturulmuştur.

MUTAG sisteminde görüntülenmek istenen ortamı aydınlatması için mikrodalga darbe üretici-kuvvetlendirici ünitesi tamamlanmış ve karakterizasyon ölçümleri yapılmıştır. Standart mikrodalga antenin hava-su arasındaki empadans uyumsuzluğu problemi, literatürden farklı olarak tamamen su içinde çalışan mikrodalga anten tasarlanıp gerçekleştirilerek çözülmüştür. Bilgisayar kontrollü deneysel xyz- yönlü konumlandırma-tarama ünitesi tamamlanmış test edilmiştir. Alt üniteler birlikte kullanılarak, deneysel termoakustik işaret toplanmış ve böylece mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntü elde edilmiştir.

Termoakustik görüntüleme için yüksek görüntü çözünürlüğü veren, maliyeti düşük, katmanlı doku yapısı için yeni kuramsal ve sayısal çözümleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu amaçla, termoakustik dalga denkleminin çözümünde, meme dokusu katmanlı olarak modellenmiştir. Yansımasız ideal sınır koşulları yerine daha gerçekçi olan katmanlar üzerinde süreklilik sınır koşulları kullanılmıştır. Termoakustik dalga denkleminin çok katmanlı silindirik ve düzlemsel doku yapısı için ileri ve ters analitik çözümleri elde edilmiştir. Ayrıca, çok katmanlı yapılar için sayısal olarak benzetimi yapılmıştır.

Meme dokusunun kesit taramasında termoakustik sinyali alacak olan transduser geliştirmede ön empadans uyumlama ve arka yansıma sönümlendirme katmanları tasarım ve uygulama çalışmaları yürütülmüştür. Bunun sonucunda %60 oransal bant genişliğine sahip 1 MHz'lik bir biyomedikal transduser elemanı yapılarak, deneysel testleri tamamlanmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamında mevcut bilgisayar kontrollü deneysel konumlandırma- kesit tarama ünitesine ek olarak memenin içine sığabileceği silindirik hazne (açısal ve dikey) kullanılarak tarama sistemi tamamlanmıştır. Kesit tarama yapabilecek çok elemanlı halka transduser dizisi ve tarama sisteminin entegre edileceği platform ulusal kaynaklarla üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termoakustik görüntüleme, fotoakustik görüntüleme, meme kanseri tespiti.



ABSTRACT

Thermoacoustic imaging is a new hybrid imaging modality with no ionization effect, high point and contrast resolution and is a suitable technique for early detection and monitoring of cancer. This technique is an up-to-date issue that has not yet become a clinical tool with scientific, technological and commercial potential. "Microwave Induced Thermoacoustic Imaging for Breast Cancer Diagnosis and Follow-up " This project has developed a developed local infrastructure of microwave-induced thermoacoustic imaging (MUTAG) system.

The microwave pulse generator-amplifier unit was completed and characterization measurements were made to illuminate the desired environment in the MUTAG system. The problem of incompatibility of the standard microwave antenna between air and water has been solved by designing and realizing a microwave antenna completely working in water different from the literature. The computer-controlled experimental xyz-directional positioning-scanning unit has been tested for completeness. Using the sub units together, the experimental thermoacoustic signals was collected and thus a thermoacoustic image with microwave excitation was obtained.

New theoretical and numerical analysis techniques have been developed for low-cost, multi-layered tissue structure, which gives high image resolution for thermoacoustic imaging. For this purpose, in the solution of the thermoacoustic wave equation, the breast tissue is modeled as multi-layered. More realistic continuity boundary conditions on layers are used instead of ideal non-reflective boundary conditions. Forward and inverse analytical solutions have been obtained of the thermoacoustic wave equation for the multi-layered cylindrical and planar tissue structures. In addition, it is simulated numerically for multi-layer structures.

The transducer, which will receive the thermoacoustic signal during the cross-section scan of the breast tissue, has been carried out to design and implement pre-impedance alignment and backing reflection damping layers. This resulted in a 1 MHz biomedical transducer with a 60% proportional bandwidth, and the experimental tests were completed. Then, in addition to the computer-controlled experimental positioning-section scanning unit available in the laboratory environment, the scanning system is completed using a cylindrical chamber (angular and vertical) in which breast can fit. The multi-component ring transducer array, which can scan cross-sections, and the platform to integrate the scanning system are manufactured with national resources.

Keywords: Thermoacoustic imaging, photoacoustic imaging, breast cancer diagnosis.



1. GİRİŞ

Meme kanserinin tanı ve izlenmesinde günümüzde mamografi ve ultrason en yaygın kullanılan tıbbi görüntüleme yöntemleridir. Mamografide kullanılan x-ışınlarının iyonlaştırma özelliği nedeniyle kanseri tetikleyici ve arttırıcı yan etkisi bulunmaktadır. Aynı zamanda göğüste bulunan bazı beze dokularının mamografi ile görüntülenmesinde zorluk yaşanmaktadır (Kruiger vd., 1999; Beard, 2015). Zararsız bir teknik olan ultrasonik görüntülemenin noktasal çözünürlüğü yüksek ancak kontrast çözünürlüğü zayıftır.

Elektriksel iletkenliği olan (saf yalıtkan olmayan) nesnelere, yüksek güçlü elektromanyetik (RF, mikrodalga veya lazer) darbe ile uyarıldıklarında, nesnede soğurulan elektromanyetik enerji dürtüsel ısı artışı oluşturmakta ve bu ısı artışı nesnede darbesel genleşmeye (darbe bitişinde büzülme) neden olmaktadır. Bu değişim yüksek frekanslı akustik dalga üretmektedir. Bu fiziksel ilke foto akustik etki olarak adlandırılmaktadır (Ntziachristos vd., 2005). Görüntüleme derinliği, frekansla artan dalga sönümlenmesi nedeniyle sınırlanmaktadır. Bu nedenle fotoakustik etkiye dayalı meme görüntülemesi için mikrodalga bandında uyarım uygun bir seçenektir.

Ana konusu Biyomedikal ekipmanlarda yenilikçi ve rekabetçi kanser teşhisi teknolojileri geliştirmek olan SB0203 Kanser teşhis, planlama ve tedavi teknolojileri çağrısı kapsamında gerçekleştirilen bu projede mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntüleme sistemi/platformu (MUTAG) geliştirilmiştir. Bu sistem mikrodalga tomografinin kontrast avantajı ile ultrason görüntülemenin yüksek noktasal çözünürlük özelliklerini birleştiren bir tekniktir. Bu özelliklerinden dolayı meme kanserinin erken tanısı ve izlenmesi için cazip ve zararsız bir görüntüleme tekniğidir.

Termoakustik görüntüleme, fotoakustik etki ile üretilen akustik dalgaların ultrasonik alıcı sensörlerle (transduser) toplanarak geri-çatma (demetleme) tekniği ile oluşturulur. Termoakustik görüntü, ortamın elektromanyetik emme, ısı ve akustik parametreleri ile ilişkili bir eşlemedir. Bu özelliği ile termoakustik görüntüleme mevcut yöntemlerden farklı olarak tümleyici bilgi vermektedir. Mikrodalga tomografi, dokuların elektromanyetik parametrelerini; ultrason görüntüsü ise dokuların mekanik parametrelerini yansıtmaktadır (Wang vd., 1999).

Termoakustik görüntüleme sistemi, mikrodalga darbe üretici, güç yükseltici, anten ve akustik transduser alt elemanlarından oluşmaktadır. Bu projede veri toplama ve sistem mimarisinin tasarlanması, benzetimle işlevsel sınanması, kuramsal ve sayısal çözümlerin geliştirilmesi, mikrodalga uyarım yapısı ve anten geliştirilmesi, transduser dizisi geliştirilmesi, sistemin entegrasyonu ve sınanması ana başlıkları altında çalışmalar yürütülmüş olup, MUTAG sistemi geliştirilmiştir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Meme kanserinin tanı ve izlenmesinde günümüzde en yaygın olarak kullanılan görüntüleme yöntemlerinden olan mamografi, maliyeti düşük bir teknik olmakla birlikte kullanılan x-ışınının kanseri tetikleyici-arttırıcı (zararlı) yan etkisi vardır. Öte yandan, beze dokuları gibi bazı dokuların mamografi ile tanısında zorluklar vardır. Mamografiye kıyasla çok daha yüksek dozlarda x-ışını uygulanmasını gerektiren bilgisayarlı tomografi ise meme kanseri tespit amaçlı uygulamalarda kullanılmamaktadır. En yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem olan ultrasonik görüntüleme, zararlı yan etkisi olmayan düşük maliyetli bir görüntüleme tekniğidir. Ultrasonik görüntülemenin noktasal çözünürlüğü yüksek ancak kontrast çözünürlüğü zayıftır; bu bazı kanser türlerinin erken tanısını, iyi ve kötü huylu tümörlerin ayırt edilmesini zorlaştırmaktadır. Meme görüntülemesinde, kontrast ajanlı manyetik rezonans, kötü huylu kanserin tespitinde başarılı sonuçlar vermektedir, ancak bu görüntüleme tekniği göreceli olarak oldukça pahalı ve meme kanserinin görüntülenmesinde gerekli klinik uygulama protokolleri henüz standartlaşmamıştır. RF ve mikrodalga meme tomografisi, dokuların elektriksel özelliklerinin farklı olması ilkesine dayanan, yüksek kontrast çözünürlüğü potansiyeli olan ve iyonize edici (zararlı) yan etkisi bulunmayan, ancak noktasal çözünürlüğü zayıf olan yeni bir tekniktir. Mikrodalga görüntülemede doğrusal olmayan iteratif tomografik çözümler üzerinde araştırmalar sürdürülmektedir. Son yıllarda RF, mikrodalga ve lazer ile uyarılan dokuların ultrason üretme ilkesine (fotoakustik etkiye) dayalı fotoakustik/termoakustik görüntüleme yoğun araştırma konusu olmuştur. Mikrodalga tomografi dokuların elektromanyetik parametrelerini, ultrason dokuların mekanik parametrelerini, termoakustik görüntü ise dokuların elektromanyetik enerjiyi soğurma ve ısıl parametrelerini yansıtır. Görüntüleme derinliği, frekansla artan dalga sönümlenmesi nedeniyle sınırlanmaktadır, bu bakımdan fotoakustik etkiye dayalı meme görüntülemesi için mikrodalga bandında uyarım uygun bir seçenektir. MUTAG, mikrodalga tomografinin kontrast avantajı ile ultrason görüntülemenin yüksek noktasal çözünürlük özelliklerini birleştiren bir tekniktir. Bu yönüyle, meme kanserinin erken tanısı ve izlenmesi için cazip bir görüntüleme tekniğidir. Fotoakustik ve termoakustik görüntüleme, uluslararası düzeyde çeşitli gruplar tarafından özellikle görüntü kalitesinin ve görüntü derinliğinin artırılmasına yönelik olarak araştırmalar yürütülen bilimsel, teknolojik ve ticari potansiyeli olan henüz klinik bir araç haline gelmemiş bir güncel bir konudur.

Bu projede, meme kanserinin erken tanısı ve izlenmesi için yeni yöntem ve tekniklere dayalı bir mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntüleme (MUTAG) sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu projede veri toplama ve sistem mimarisinin tasarlanması, benzetimle işlevsel sınanması, kuramsal ve sayısal çözümlerin geliştirilmesi, mikrodalga uyarım yapısı ve anten geliştirilmesi, transduser dizisi geliştirilmesi ana başlıkları altında çalışmalar yürütülmüş

olup, MUTAG sistemi geliştirilmiştir. Standart mikrodalga antenin hava-su arasındaki empadans uyumsuzluğu problemi, literatürden farklı olarak tamamen su içinde çalışan mikrodalga anten tasarlanıp gerçekleştirilerek çözülmüştür. Bu antenin tasarım detayları ve uygulama sonuçları ilgili bölümlerde verilmiştir. Çok antenli doku uyarımı için gereken çok yüksek tepe gücüne sahip (40-400 kW) darbeyi, darbe-sıkıştırma tekniği ile düşük maliyetli ve yerli olarak üretmek termoakustik görüntüleme uygulamalarında yeni bir çözüm olacaktır. Bunun için bir test çalışması olarak, 1.3 GHz frekansında bir darbe-sıkıştırıcı RF kaynak ile çeşitli testler yapılmış olup, sonuçlar bulgular kısmında aktarılmıştır. Mikrodalga darbe sıkıştırıcılar parçacık hızlandırıcıları, radar, enerji transferi, radyasyon testi, elektronik harp gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılmakta olup çıkıştan alınabilen güç giriş gücününün 40 katına kadar çıkabilmektedir (Bossart vd., 2004; Yushkov vd., 2000; Farr vd., 2010). Darbe sıkıştırıcıda, çeşitli algılayıcılarla doğru bir zamanlama yapılarak çıkışa maximum güç aktarılabilir. Yüksek frekanslı kaynakla oluşturulan rezonans, manyetik alanla bozulur ve biriken güç çıkışa aktarılır. Çıkış darbesinin, giriş darbesine (1.5–10 μ s) göre çok kısa olması darbeleri mod için yüksek kazanç elde edilmesine neden olur. Girişteki 1.3 GHz frekansındaki kaynak, bir yükselteçle desteklenerek, anahtarlama bir yapıyla darbeleri üreteceye dönüştürülür. Böylece belirtilen çıkış darbe sürelerinde (15-200 ns) maximum 400 kW a kadar kademeli güç üretebilir. Üretilen yerli akustik transduserlar için su altı akustik testler tamamlanıp karakterizasyonu yapılmıştır. Literatürdeki örneklerinden farklı olarak, üretim dinamiği detaylı bir şekilde araştırılmıştır ve burda elde edilen sonuçlarla gelecekteki çalışmalara ışık tutulmuştur.

Bu projede kuramsal kısım için literatürde termoakustik dalga denkleminin homojen ortamlar için analitik çözümleri (Wang vd., 1999; İdemen ve Akumru, 2012) bulunmakla birlikte, homojenlik varsayımı katmanlı yapıya sahip doku yapısının modellenmesinde oldukça eksik kalmaktadır. Proje ekibinde termoakustik görüntüleme için yüksek görüntü çözünürlüğü veren, gerçekleştirim maliyeti düşük yeni kuramsal ve sayısal çözümler geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni kuramsal termoakustik dalga denkleminin çözümlerinde meme katmanlı olarak modellenerek, yansız sınır koşulları yerine daha gerçekçi olan katmanlar üzerinde süreklilik sınır koşulları kullanılarak analitik ters çözüm elde edilmiş ve gerçek doku parametreleri alınarak sayısal benzetimleri yapılmıştır.

2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1 Mikrodalga Darbe Üretici, Mikrodalga Güç Yükselteci, Anten Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

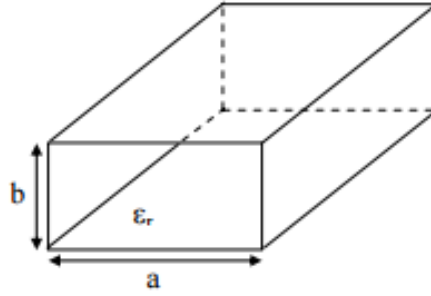
Termoakustik görüntülemeye, görüntü kalitesini temel olarak mikrodalga uyarım ve akustik veri toplama işlemleri belirlemektedir. Mikrodalga uyarım için uygun anten yapısı kritik öneme sahiptir. Bu bölümde ilk olarak mikrodalga uyarım sistemi ve projede geliştirilen anten yapısı verilmiştir. Genel olarak, mikrodalga frekansı 400 MHz ile 3 GHz arasında seçilebilir. Bu çalışmada, MUTAG sisteminde kullanılacak mikrodalga antenin frekansı penetrasyon ve gerçekleştirme maliyetleri dikkate alınarak 850 MHz olarak seçilmiş ve mikrodalga darbe kaynağı 850 MHz frekansında, 10 kW tepe gücüne sahip ve 50 ns ile 600 ns aralığında darbe üretebilen katı-hal elektronik bileşenlerden ulusal olanaklarla tasarlanmış ve üretilmiş ve bulgular ve tartışma bölümünde görsel olarak verilmiştir. Bu ünite su soğutmalı olup çıkış tepe gücü 1 kW ile 10 kW arasında seçilebilir özelliktedir.

Literatürdeki uygulamalarda, görüntüleme ortamı, içi hava dolu bir anten ile dışarıdan aydınlatılmaktadır (Wang vd., 1999). Burada hava-doku sınırında meydana gelen yansıma empedans uyumlama ile azaltılmaktadır.

Bu proje sürecinde öncelikle, hava ortam parametreleri esas alınarak 35cm×17.5cm×8cm boyutunda bir anten tasarlanıp üretilmiştir. Ancak bu antenin yaydığı EM dalganın hava ortamından su içinde olan görüntü ortamına geçerken çok yüksek oranda yansımaya maruz kalması nedeniyle görüntü ortamına yeterli EM güç aktarımamadığı deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir. Bu problemin çözümü olarak genelde empadans eşleme (uyumlama) ara katman malzemesi kullanılmaktadır. Ancak anten ebadının çok büyük olması ve antenin dışarda olmasını zorunlu kılan bir neden olmaması dikkate alınarak alternatif çözümler aranmış ve tamamen su içinde çalışacak anten kullanımı çözümü geliştirilmiştir. Bu amaçla, projede tamamı suyun içinde çalışan yeni bir mikrodalga anten tasarlanmış, HFSS (High Frequency Simulation Software) simülasyonlarıyla analiz edilmiş ve nihai tasarım üretilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Bu anten kullanılarak deneysel termoakustik işaret alınması başarılı ve ilk deneysel termoakustik görüntü elde edilebilmiştir.

2.1.1 Tasarım Denklemleri

Tasarlanacak olan antenin 850 MHz frekansında ışınım yapması istenmektedir. Ortamın tamamı su olup ϵ_r ortamın bağıl dielektrik sabiti havada 1 iken, suda saflığa bağlı olarak 76 ila 81 arasındadır. Bu amaçla ilk olarak tasarlanacak olan antenin boyutları merkez frekansına ilişkin dalga boyu cinsinden ve ortamın bağıl dielektrik sabitine bağlı olarak belirlenmiştir. Dikdörtgen dalga klavuzunun yapısı Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Dikdörtgen dalga klavuzu yapısı.

Dikdörtgen dalga klavuzunun kesim frekansı çeşitli modlar için aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$f_{c_{n,m}} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

Burada $m, n = 0, 1, 2, \dots$; a, b = dalga klavuzunun boyutları; $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$: dielektrik sabiti; ve $\mu = \mu_0\mu_r$: manyetik geçirgenlik sabitidir. Kesim frekansını minimum 600 MHz seçilerek hesaplama yapılırsa ($m=1, n=0, \text{TE}_{10}$)

$$600 * 10^6 \geq \frac{3*10^8}{2*\sqrt{\epsilon_r}*a}, \quad a \geq \frac{1}{4\epsilon_r}, \quad (2)$$

$\epsilon_r = 81$ için $a \geq 27.7 \text{ mm}$ ve $\epsilon_r = 76$ için $a \geq 28.7 \text{ mm}$ olur. Bu hesaplamalar kullanılarak $a = 30 \text{ mm}$, $b = a/2 = 15 \text{ mm}$ olarak seçildi. Dalga klavuzu içerisindeki dalga boyu λ_g ifadesi şudur:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = \frac{c/f\sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}, \quad v_o = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad \lambda_o = \frac{v_o}{f} \quad (3)$$

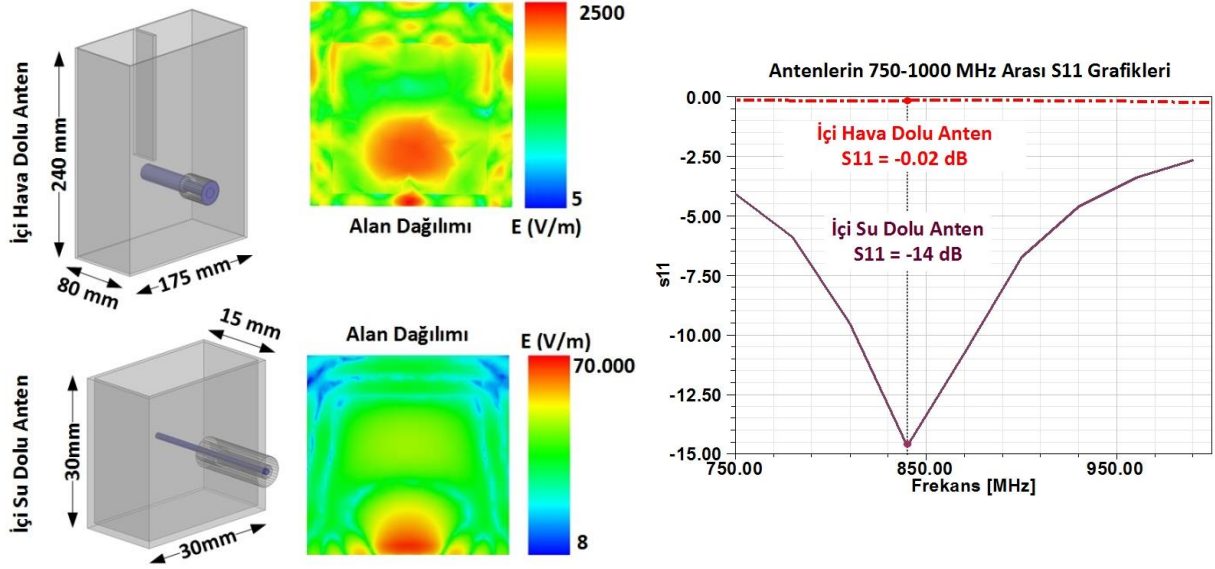
Burada, λ_0 : Serbest uzaydaki dalga boyu; f_c : Kesim frekansı; f : Çalışma frekansdır (Hz).

Tablo 1: Anten parametreleri (su içindeki)

Dalga kılavuzunda a (uzun kenar)	30 mm
Dalga kılavuzunda b (kısa kenar)	15 mm
Suyun bağıl dielektrik sabiti, ϵ_r	81
Çalışma frekansı	850 MHz
Kesim frekansı (f_c) ($a=27\text{cm}$, $b=13.5\text{cm}$, $\epsilon_r = 1$ için)	555 MHz
Kılavuz içi dalga boyu (λ_g)	51.78 mm
Serbest uzayda dalga boyu (λ_o)	39.22 mm

2.1.2 HFFS Simulasyonları

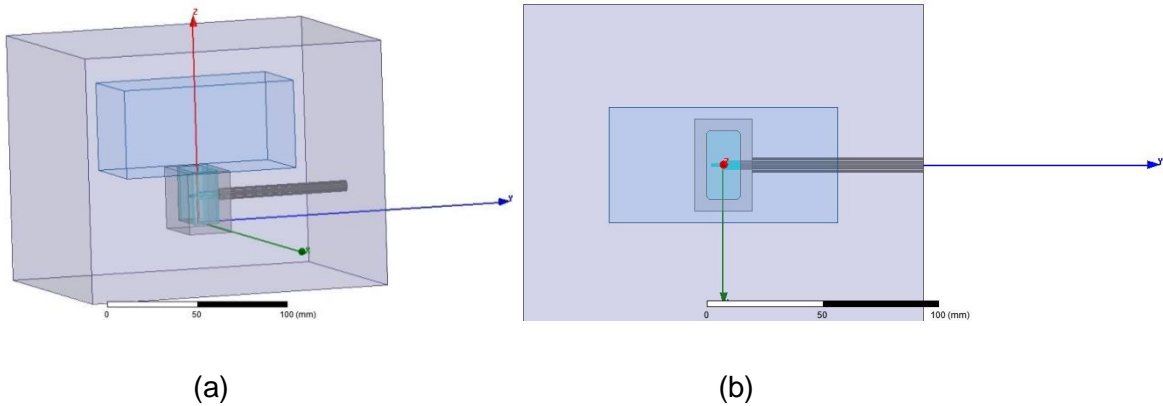
HFFS analizinde öncelikle 850 MHz'de çalışan $24 \text{ cm} \times 17.5 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ ebadında içi hava dolu bir antenin ve yine aynı frekansta çalışan $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ (dalga klavuzunun et kalınlığı ile birlikte) ebadında içi su dolu bir antenin su içindeki doku ortamına yaptıkları yayılım incelenmiştir. HFSS ile oluşturulan modeller ve programdan elde edilen su içindeki elektrik alan dağılımları Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. HFSS ile oluşturulan anten modelleri ve su içindeki elektrik alan dağılımları.

HFSS sonuçlarının içi hava dolu antenin hava ile su sınırındaki yüksek yansıma nedeniyle 850 MHz'de verimsiz bir yayılım performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, içi su dolu antenin 850 MHz'de yaklaşık -14 dB yansıma katsayısı ile verimli şekilde çalıştığı görülmüştür.

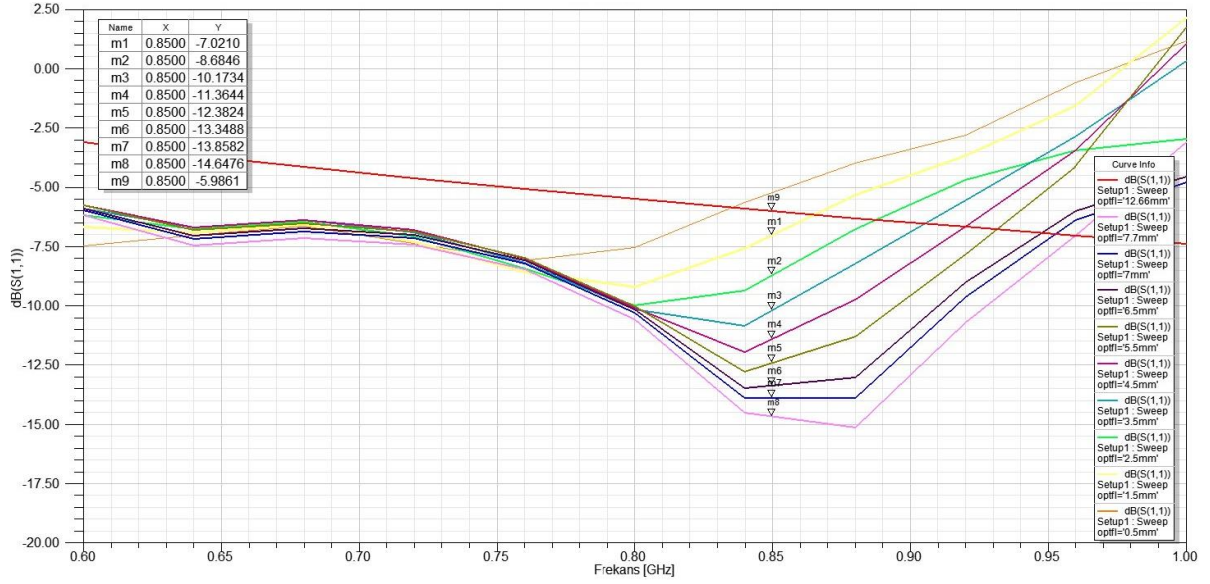
Dalga kılavuzunun eni 40mm, yüksekliği 25 mm, uzunluğu 35 mm ve aydınlatılacak ortamdaki et kalınlığı 5 mm alındığında HFSS simülasyonu modeli Şekil 3' te verilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan anten ve su ortamının HFSS modeli: (a) Yandan görünüm (b) Üstten görünüm.

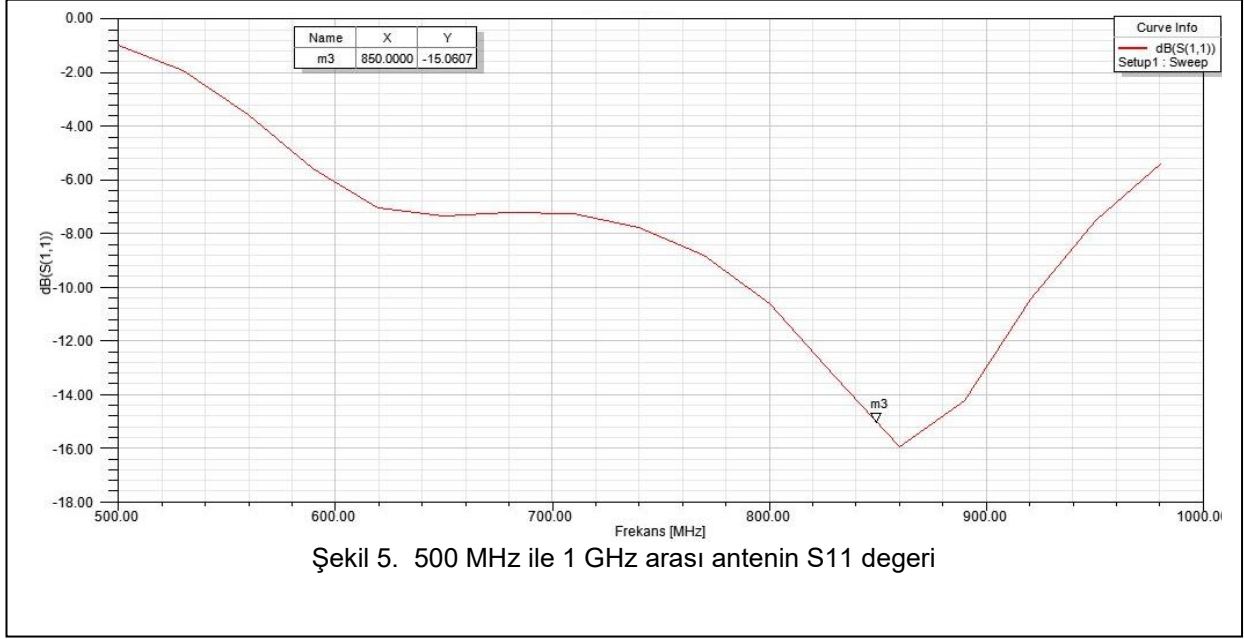
Simülasyonlarda antene ilişkin ilk incelenen yansıma katsayısı olan S11 parametresidir. Önceki büyük antenimizi 1/9 oranında küçültülerek istenilen S11 değeri elde edilememiştir.

Antenin besleme kısmına teflon ($\epsilon_r= 2.02$) malzeme ile kaplamanın sorunu çözeceği düşünülmüştür. Şekil-2’de verilen HFSS sonuçları, antenin teflon kaplı kısmının uzunluğu arttıkça S11 parametresinin küçüldüğünü açıkça göstermiştir. Şekil 4’ te 850 MHz’ de anten 0.5 mm teflon kaplı iken S11 değerini m1 ölçüm noktası gösterirken, teflon boyutu 1 mm lik aralıklarla artırılarak m8 ölçüm noktasında kaplama kalınlığı 7.5 mm ye kadar uzatılmıştır. Burada m1 ölçümünde -7 dB, m3 ölçümünde (3.5 mm teflon kaplı iken) -10 dB, m8 ölçümünde ise -14 dB elde edilmiştir. 7.7 mm ye kadar S11 parametresinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

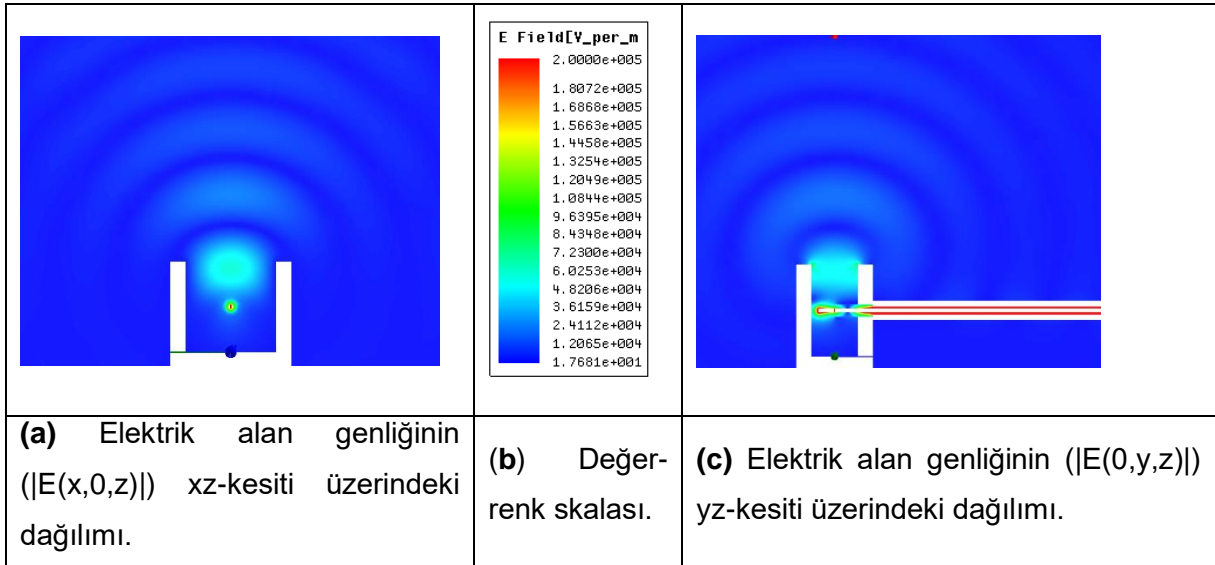


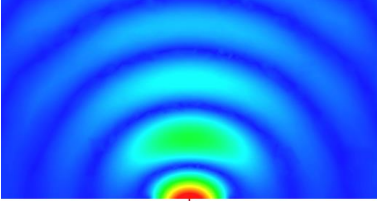
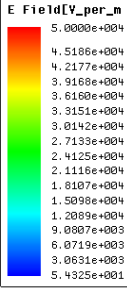
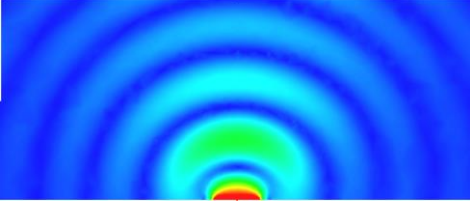
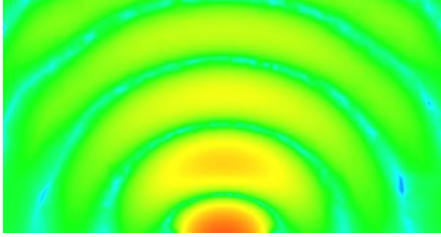
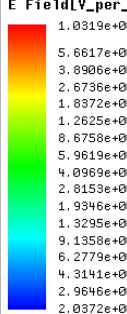
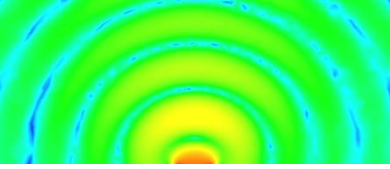
Şekil 4. Farklı boyutlardaki teflonun S11 parametresi

Şekil 5’ te en uygun teflon kaplama işleminin sonraki antene ilişkin S11 değerleri verilmiştir. 850 MHz’ de S11 değeri -15 dB olarak okunur. S11 değerinin -12 dB duruma karşılık düşen frekans aralığı antenin band genişliği olup yaklaşık olarak 100 MHz’ dir.



Şekil 6' da ortamda sadece bir anten ve içi su dolu ortam olarak ayarlanmıştır. Antenin ortamdaki aydınlatmasını bakıldığında, elektrik alan dağılımı beklendiği gibi hava ortamından suya geçerken yaşanan sorunların çözüldüğü gözlemlenmiş ve tekdüze bir dağılım oluşmuştur.



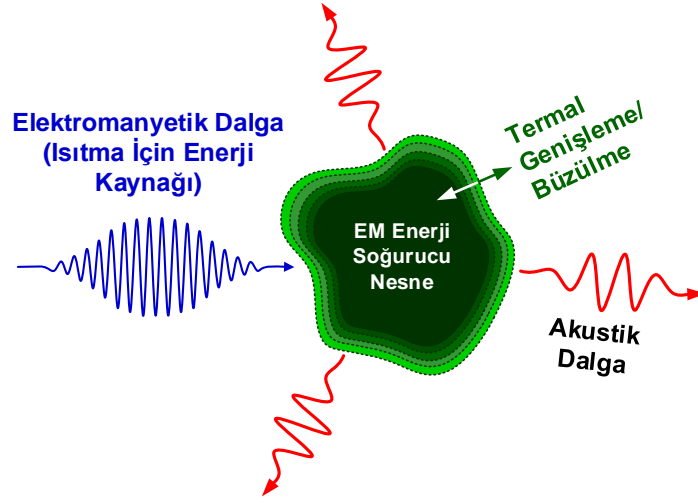
		
<p>(d) Elektrik alan genliğinin ($E(x,0,z)$) xz-kesiti üzerindeki dağılımı: Görüntüleme haznesi bölgesi maskelenmiş ve büyütülmüş.</p>	<p>(e) Değer- renk skalası.</p>	<p>(f) Elektrik alan genliğinin ($E(0,y,z)$) yz-kesiti üzerindeki dağılımı: Görüntüleme haznesi bölgesi maskelenmiş ve büyütülmüş.</p>
		
<p>(g) Elektrik alan genliğinin ($E(x,0,z)$) xz-kesiti üzerindeki logaritmik dağılımı: Görüntüleme haznesi bölgesi maskelenmiş ve büyütülmüş.</p>	<p>(h) Değer- renk skalası.</p>	<p>(i) Elektrik alan genliğinin ($E(0,y,z)$) yz-kesiti üzerindeki logaritmik dağılımı: Görüntüleme haznesi bölgesi maskelenmiş ve büyütülmüş.</p>

Şekil 6. Mikrodalga uyarımda kullanılan antenin su ortamında elektrik alan genliğinin ($|E(x,y,z)|$) lineer ve logaritmik dağılımı

2.2 Termoakustik Görüntüleme - Kuramsal Altyapı

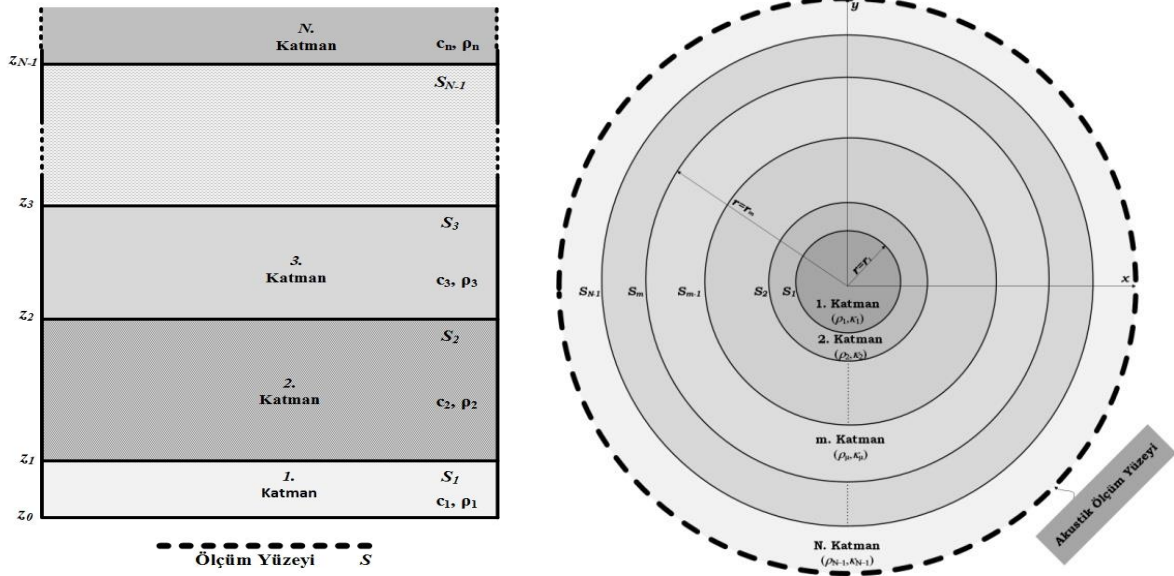
Termoakustik görüntülemelerde, meme dokusu mikro dalga ile termal olarak uyarılarak üretilen ultrason dalgalarının transduserlerle alınıp işlenmesiyle görüntüye dönüştürülmektedir. Mikrodalga ile ısıtılan elektromanyetik dalga soğuran nesnelere (örneğin biyolojik dokular)

soğurdukları enerji ile ısınmakta, enerji kesildiğinde tekrar normal büyüklüğüne geri dönmektedir.



Şekil 7. Fotoakustik etkinin şematik gösterimi

Bu ısınma-soğuma, nesnenin genişleşip büzülmesine neden olmakta ve dolayısıyla akustik dalga üretilmesini sağlamaktadır (Şekil 7). Diğer bir deyişle, elektromanyetik enerji ile ısıtılan doku, akustik dalga kaynağı olarak işlev kazanmaktadır. Literatürde termoakustik dalga denkleminin homojen ortamlar için analitik çözümleri (Wang vd., 1999; İdemen ve Akumru, 2012) bulunmakla birlikte, homojenlik varsayımı katmanlı yapıya sahip doku yapısının modellenmesinde oldukça eksik kalmaktadır. Bu çalışmada, uluslararası literatürde var olan homojen ortam termoakustik dalga denkleminde yola çıkılarak homojen olmayan doku yapısı katmanlı olarak modellenip analitik ters çözüm ifade edilmiştir. Modelleme silindirik koordinatlarda ve Kartezyen koordinatlarda Şekil 8' deki gibi yapılmıştır.



Şekil 8. Çok katmanlı düzlemsel ve silindirik geometri

Silindirik görüntüleme hazne yapısı kullanılması, az sayıda transduser elemanlı halka dizi ile kesit tarama yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu tarama yapısında meme kesiti polar koordinatlarda dairesel katmanlı biçimindedir. Deri altı yakın alan görüntülemeye ise transduser yüzeyi altındaki kesit, kartezyen katmanlı modele uygundur. Sonuç olarak, burada ele alınan polar ve kartezyen katmanlı doku yapıları gerçekçi modellerdir. Termoakustik görüntüleme ters kaynak bulma problemi olarak adlandırılır ve aşağıdaki termoakustik dalga denkleminin ters çözümüne dayanır:

$$\Delta p(r, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = -\Gamma A_0(r) \delta'(t) \quad \leftrightarrow \quad \Delta P(r, \omega) + k^2 P(r, \omega) = -i\omega p_0(r) \quad (4)$$

Burada $p(r, t)$: akustik basınç alanı; r : konum; t : zaman değişkeni; c : akustik dalganın ortamdaki yayılım hızı $A_0(r)$: uzaysal soğurma işlevi (termoakustik kaynak dağılımı); $\delta(t)$: elektromanyetik aydınlatma işlevi (aydınlatma işlevi anlık dürtü olarak Dirac delta fonksiyonu ile ifade edilir); Γ : Grenüsen parametresi; $\Gamma A_0(r) = p_0(r)$ dir.

Homojen ortam için literatürde var olan çözüm (Wang vd., 1999; İdemen ve Akumru, 2012)

$$p_0(r) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(r, \omega) \frac{G_h^{in}(r', r, \omega)}{\partial n} dS d\omega \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $G_h^{in}(r', r, \omega)$: serbest ortam için bilinen Green fonksiyonudur; $P(r, \omega)$: ölçme yüzeyinden ölçülmüş akustik dalganın zamansal frekans uzayındaki hali;

S : ölçüm yüzeyidir. Yukarıda ifade ettiğimiz (5) numaralı denklemle ifade edilen homojen ortam varsayımına dayalı çözümden yola çıkarak aşağıda verilen katman üzerinde süreklilik koşulları, başlangıç koşulu ve radyasyon koşulları altında homojen olmayan ortam katmanlı silindirik ve düzlemsel olarak modellenmiş, her katmanda kaynak olduğu varsayımı altında ters çözüm analitik olarak ifade edilmiştir.

- Radyasyon koşulu:

$$P(r, \omega) = O\left(\frac{1}{|r|}\right) \text{ as } |r| \rightarrow \infty \quad (6)$$

$$\frac{\partial P(r, \omega)}{\partial |r|} - ikP(r, \omega) = O\left(\frac{1}{|r|}\right) \text{ as } |r| \rightarrow \infty \quad (7)$$

- Başlangıç koşulu:

$$p(r, t = 0) = p_0(r) \quad (8)$$

- Katmanlar üzerinde süreklilik koşulu:

$$\lim_{r \rightarrow z_m^-} P(r, \omega) = \lim_{r \rightarrow z_m^+} P(r, \omega) \quad (9)$$

$$\lim_{r \rightarrow z_m^-} \frac{1}{\rho_{m+1}} \frac{\partial P(r, \omega)}{\partial n} = \lim_{r \rightarrow z_m^+} \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P(r, \omega)}{\partial n} \quad (10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ρ_m , m . katmanın yoğunluğunu ifade etmektedir. Katmanlı ortam için termoakustik dalga denkleminin ters çözümünün elde edilmesinde katmanlı Green fonksiyonlarından faydalanılır. İçten dışa doğru yayılan dalgayı ifade eden katmanlı Green fonksiyonu, r : ölçüm yeri ve r' : kaynak yeri olmak üzere $G_m^{out}(r, r';, \omega) = G_m^{out}(x, y, z; x', y', z', \omega)$, katmanlı düzlemsel ortam için ($m \leq N$) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x(x-x')-ik_y(y-y')} (C_1 e^{k_z^{(1)}z} + C_2 e^{-k_z^{(1)}z}) dk_x dk_y, & z < z_1 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x(x-x')-ik_y(y-y')} (C_3 e^{k_z^{(2)}z} + C_4 e^{-k_z^{(2)}z}) dk_x dk_y, & z_1 < z < z_2 \\ \vdots & \vdots \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x(x-x')-ik_y(y-y')} (C_{2m-1} e^{k_z^{(m)}z} + C_{2m} e^{-k_z^{(m)}z}) dk_x dk_y, & z_{m-1} < z' < z < z_m \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x(x-x')-ik_y(y-y')} (C_{2m+1} e^{k_z^{(m)}z} + C_{2m+2} e^{-k_z^{(m)}z}) dk_x dk_y, & z_{m-1} < z < z' < z_m \\ \vdots & \vdots \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x(x-x')-ik_y(y-y')} (C_{2N+1} e^{k_z^{(N)}z} + C_{2N+2} e^{-k_z^{(N)}z}) dk_x dk_y, & z > z_{N-1}. \end{array} \right. \quad (11)$$

$$k_z^{(m)} = \begin{cases} -i \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_m}\right)^2 - (k_x^2 + k_y^2)}, & \left|\frac{\omega}{c_m}\right| > \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \\ \sqrt{(k_x^2 + k_y^2) - \left(\frac{\omega}{c_m}\right)^2}, & \sqrt{k_x^2 + k_y^2} > \left|\frac{\omega}{c_m}\right| \end{cases} \quad (12)$$

dir. Burada k_x , k_y ve k_z uzaysal frekanslardır ve c_m ise m . katmandaki akustik dalganın yayılım hızıdır. Katmanlı silindirik ortam için, r : ölçüm yeri; r' : kaynak yeri olmak üzere $G_m^{out}(r, r';, \omega) = G_m^{out}(r, \phi, z; r', \phi', z', \omega)$ ($m \leq N$) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_z z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{n1}J_n(k_1 r) + A_{n2}Y_n(k_1 r))e^{in\phi} dk_z & r < r_1 \\
 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_z z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{n3}J_n(k_2 r) + A_{n4}Y_n(k_2 r))e^{in\phi} dk_z & r_1 < r < r_2 \\
 \vdots & \vdots \\
 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_z z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{n(2m-1)}J_n(k_m r) + A_{n(2m)}Y_n(k_m r))e^{in\phi} dk_z & r_{m-1} < r' < r < r_m \\
 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_z z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{n(2m+1)}J_n(k_m r) + A_{n(2m+2)}Y_n(k_m r))e^{in\phi} dk_z & r_{m-1} < r < r' < r_m \\
 \vdots & \vdots \\
 \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_z z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{n(2N+1)}J_n(k_N r) + A_{n(2N+2)}Y_n(k_N r))e^{in\phi} dk_z & r_{N-1} < r
 \end{array} \right. \quad (13)$$

Her iki geometri için (4) numaralı termoakustik denkleminin düz çözümü olarak ifade edilen ölçüm yerinden ölçülen akustik basınç fonksiyonu N –katmanlı yapılar için

$$P(r, \omega) = i\omega \int_{V'} G(r; r', \omega)^{out} p_0(r') dr' \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada V' kaynağın bulunduğu bölgenin hacmini ifade etmektedir.

N – katmanlı düzlemsel ve silindirik yapılar için ρ : ortam yoğunluğu; r' : kaynağın bulunduğu yer; r : ölçüm yeri; S : ölçüm yüzeyi olmak üzere; termoakustik denklemin ters çözümü ise

$$p_0(r') = \frac{\rho(r')}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_S P(r, \omega) \frac{1}{\rho(r)} \frac{\partial G^{in}(r', r)}{\partial n} dS d\omega \quad (15)$$

analitik olarak elde edilmiştir. Elde edilişteki bütünlüğü bozmamak için frekans uzayında, $\omega < 0$ için $P(r, \omega)^* = P(r, -\omega)$ olarak alınmış, “out” ve “in” sırasıyla içten dışa ve dıştan içe doğru yayılan dalgayı ifade etmektedir ve $P(r, -\omega)^{in} = (P(r, \omega)^{out})^*$ eşitliği geçerlidir.

2.3 Transduser Geliştirilmesi

Bu projede, termoakustik görüntüleme üzerine çalışıldığı için, piezoelektrik seramiklerin ters etki özelliğinden yararlanılmıştır. Piezoelektrik malzemeler algılayıcı görevinde olacaklardır. Meme, mikrodalga anten ile ısıtılarak uyarılacaktır. Yakınca döşenmiş olan piezoseramik yapısı aktif görev alıp yayılan sinyalleri ölçecektir. Ölçülen sinyaller ile görüntüleme işlemi gerçekleştirilecektir. Bu proje kapsamında piezoelektrik toz kompozisyonları üretilmiştir ve üretilen toz kompozisyonlarından yığın seramik elde edilip gerekli fiziksel işlemlerden sonra elektriksel ölçümler alınmaktadır. Elektriksel test sonuçlarına göre bu üretim basamakları, iyileştirme yapmak için proje ilerleyişine göre aşama aşama devamlı yapılmıştır.

1.Aşama

Piezoseramiğin Su Altındaki Ultrason Karakteristiğinin incelenmesi: Yüksek frekans değerlerinde istenilen ses dalgaları piezoelektrik seramiklerin ters etkisinden yararlanılarak üretilebilirler ya da doğru etkisinden yararlanılarak ses dalgaları ölçülebilirler. Yüksek frekanslı dalgalar farklı dokularda farklı hızlarda hareket ederler ve organa ve dokuya göre frekans aralıkları da değiştiğinden, ilk yapılan denemeler, farklı dalga boyu katlarına sahip (5λ , 7λ , 10λ) seramikler üzerinde gerçekleştirilmiştir ve malzemelerin su altında akustik ölçümleri yapılırken su tankı, darbe sinyal jeneratörü (pulser reciver), ultrason frekanslarını algılayabilen osiloskop, iğne tipi hidrofona (needle type), su içerisindeki konumlarını ayarlamak için motorlar ve motor kontrol üniteleri kullanılmıştır. Ancak piezoseramik malzeme bant genişliği frekanslarında titreştirilebilmiştir. Oluşan titreşim frekansları bant genişliği çok büyük olan iğne tipi hidrofona ve osiloskop yardımıyla ölçülmüştür. Osiloskoptan alınan ham bilgiler Matlab Programı ile işlenerek piezoseramik malzemenin bant genişliği ve voltaj tepkisi gibi özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Ölçümler sonucunda teoride rastlanan bilgilerin uygulamada sonuçları görülmüştür. Bilgilere göre üretilen seramiklerin merkez frekansları istenildiği gibi 2 MHz'e yakındır. Ancak bant genişlikleri -3 dB hassasiyetine göre istenilen seviyede değildir. Bu değerlerin artırılması için matching, backing ve akustik lens gibi polimerik malzemeler ve piezoseramik toz kompozisyon çalışmaları yapılmıştır.

2. Aşama

Transdüserlerde Uyum (Matching) ve Arka Yansıma Sönümlenme (Backing) Katmanları'nın Akustik Etkisi: Piezoelektrik malzemelerin akustik empedansı yaklaşık olarak 25-30 MRayl iken dokunun akustik empedansı yaklaşık 1,5 MRayl'dir. Bu farklılık ultrasound sinyallerin iki yönlü de aktarımını zorlaştırmaktadır. Ultrasonik transdüser yapımında, Arka Yansıma Sönümlenme

(Backing) Katmanı piezoelektrik malzemenin arkasına konular ve sinyallerin şiddetini düşürmek için kullanılmaktadır. Ölçülmek istenen noktadan piezoseramiğe gelen akustik sinyaller piezoda voltaj oluşturur ve piezonun arkasında yol almaya devam eder. Bu sinyallerin eko yaratarak tekrar piezomalzemeye dönüp voltaj oluşturması ölçümü bozabilecektir. Bu sebeple piezomalzemenin arkasına akustik empedansı yüksek (sinyal düşürücü özellikte) polimerik malzeme yerleştirilir. Literatür araştırmalarında kullanılmış olan backing malzemelerin içerisinde Al_2O_3 , cam kürecik ve Tungsten gibi sinyal bozucu özellikte (akustik empedansı (MRayl) yüksek) malzemeler ilave edilmektedir. Matching ve backing katmanı olarak literatür incelendiğinde araştırmacıların bir çoğunun EPOTEK 301 ve 301-2 epoksisini kullandıkları görülmüştür. Bu malzemelerin elimizde bulunmaması sebebiyle, akustik empedansları benzer olan EcoBond epoksi malzemesiyle ilk denemeler yapılmıştır. Laboratuvarda üretimi gerçekleştirilen ultrasonik transdüser Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 9. Üretilen Ultrasonik Transdüser

Matching layer kullanılarak ve kullanılmadan üretimi gerçekleştirilen transdüserler aynı şartlar altında ölçülmüşlerdir. Backing malzemesi kullanılmayan transdüser yapısının -3 dB hassasiyetinde bant genişliğinin %13 olduğu görülmüştür. Önceki çalışmada, matching katmanı kullanılmadan piezoseramiklerin bant genişliğinin bu değerde olduğu bilinmektedir. Optimum olmamasına rağmen matching katmanı kullanılan seramiklerde -3 dB hassasiyette bant genişliği %17'ye, -6 dB hassasiyette ise %25'e çıktığı görülmektedir.

3. Aşama

Transdüser Aktif Elemanının (Piezoseramik) Akustik Davranışa Etkisi: Biyomedikal alanda kullanılan ultrasonik transdüserlerden beklenen önemli bir özellik, çalışma frekans aralığının

geniş olmasıdır. Piezoseramiklerin kompozisyonuna bağlı olarak çalışma bant aralıklarının farklı olacağı bilinmektedir ve deneysel süreç ile görülmek istenmektedir. Bunun için sert, yumuşak ve tek kristalli piezoseramikler olmak üzere 3 adet birbirinden farklı transdüserler üretilmiştir. Bu tasarımda sadece kullanılan piezoelektrik seramik malzeme farklıdır, diğer kullanılan polimerik malzemelerin kullanım miktarları, yükseklikleri ve oranları aynıdır. Transdüserdeki piezoseramik farkı incelendiğinde beklenildiği üzere sert piezoseramik diğerlerine göre dar bant aralığına sahiptir ve tek kristalde ise bant aralığı en geniş olandır, çünkü içerisinde bulunan tek tanenin neredeyse tüm domainleri elektrik alanla aynı yöne bakmaktadır. Sert piezoseramik de görülen bant aralığı genişliği %21, çoklu kristal 'de %27 iken tek kristalde ise %53'e kadar çıkmaktadır. Bu üretimde kullanılan matching katmanı daha uygun bir katmandır.

4. Aşama

Matching ve Backing Katmanı İyileştirme Çalışmaları: Çalışma frekans aralığı %13-25 gibi değerlerden mümkün olduğunca yukarı taşınmak istenmektedir. Literatürde yer alan bilgiler ışığında en çok kullanılan Epotek A, Epotek B ve Epotek C epoksileri temin edilmiştir. Elde edilen bilgilere göre bu epoksilerin doğrudan kullanımı ile uyum katmanı olarak ya da içerisinde tungsten toz, SiO₂ ve içi boş cam kürecikler ve Ecobond epoksi ilave edilerek arka yansıma söndürme katmanı olarak kullanılmaları uygundur. Transdüserlerin üretim akış şeması Şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 10. Transdüser Üretim Akım Şeması

Üretilen her transdüserin aynı koşullarda ölçümleri akustik transdüser karakterizasyon ekipmanı ile gerçekleştirilmiştir. Koşullar belirlenmiş akustik test ölçüm prosedürü oluşturulmuştur. Ölçüm prosedürü şu şekildedir.

- Transdüser tarayıcının sabit koluna yerleştirilmiştir.

- Hidrofon transdüserin karşısına en uygun tepkiyi verecek şekilde konumlandırılmıştır.
- Sinyal kaynağından 10 Vpp genliğinde 3 MHz'te tek döngülük bir darbe uygulanmıştır. Bu yeterince geniş bantlı bir uyarı oluşturmaktadır.
- Sinyal kaynağı, sinüsoidal kaynağa ve Burst moduna getirilip 15 döngülük sinüsoidal sinyaller uygulanmaya başlanmıştır.
- 1-4 MHz aralığında 100 kHz aralıklı tarama gerçekleştirilerek hidrofon ile alınan veriler kaydedilmiştir.
- Bu esnada gönderici olarak kullanılan transdüserin terminallerinden, sinyal kaynağının uyguladığı voltaj da ölçülerek kaydedilmiştir.
- Elde edilen veriler MATLAB ile işlenmiştir. Her frekans uyarısı için hidrofonun aynı frekansta aldığı sinyalin genliği frekansa göre çizdirilmiştir.

Tüm transdüserlerin karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda uyum katmanı polimeri üzerinde gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları ile çalışma frekans aralığının %32 değerine ulaşmıştır.

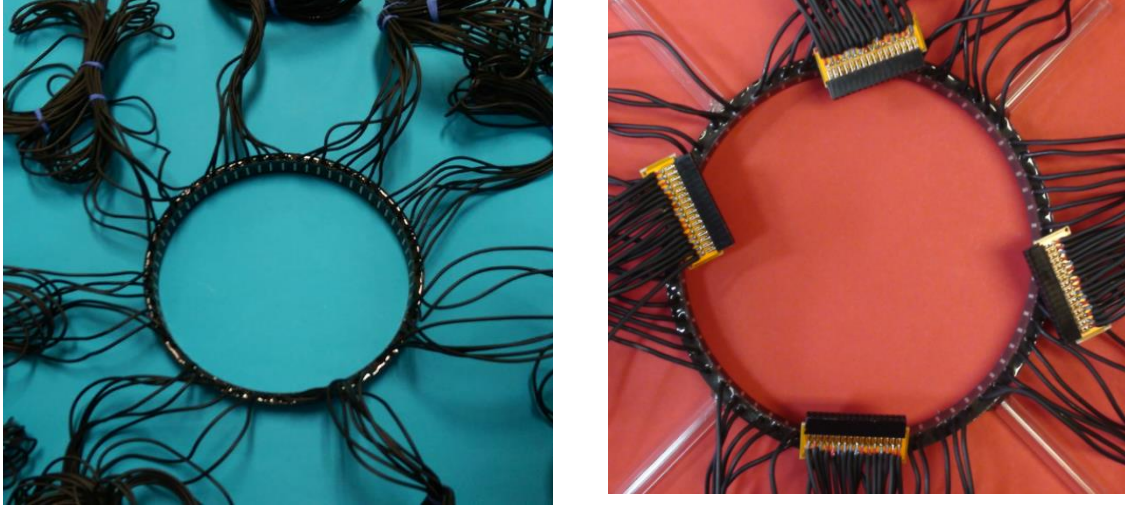
5. Aşama

Çok Kristal Seramikler ile Silindir Dizin Transdüser Üretimi: Tekli transdüser üzerinde gerçekleştirilmiş olan uyum ve arka yansıma sönümlenme polimerleri iyileştirme çalışmalarının ardından çok elemanlı dizin transdüser üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilmesi amaçlanmış nihai ürün 16 cm çapında 64 elemanlı silindir dizin transdüserdir. Nihai ürün üretiminde aktif eleman sayısının fazla olması ve büyük çapta olmasından ötürü ilk çalışmaların 3 cm çapında sekiz elemanlı prototip silindir dizin transdüser üzerinde olmasına karar verilmiştir. Prototipin son hali Şekil 11' de verilmiştir. Öncelikle istenenden ufak boyutlardaki prototip üretimi ile üretim basamakları kontrol edilmiştir. Burada elde edilen kazanımlar ile nihai ürün üretimine geçilmiştir.



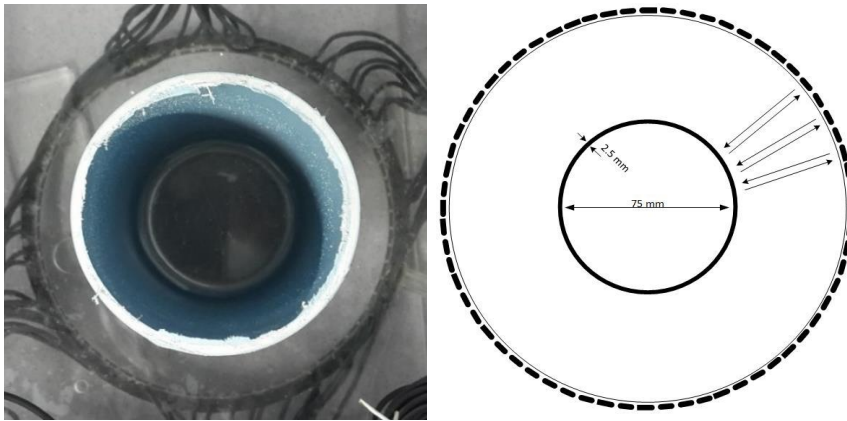
Şekil 11. Üretilen Prototip Silindir Dizin Transdüser

Nihai Ürün Üretimi: 16 cm çapında 64 elamanlı silindir dizin transdüser üretim basamakları, prototip üretiminde denenerek başarılı olunan basamaklar ile aynı tutulmuştur. Yeni metal ve teflon kalıplar üretilmiştir. 16 cm çapındaki silindirin çevresi 50,27 cm' dir. En az 50 cm uzunluğunda ve 0,4 mm kalınlığında metal sacın tamamen düz olduğuna güvenilmemiştir. Bu yüzden 64 eleman, tek bir metal yuva yerine birbirine geçmeli sekiz metal yuva ile hizalanmıştır. Boyutlar hesaplanarak sekiz metal sac, lazer ile işlenmiş, üretimi tamamlanmıştır. Metal kalıplar birbirine bağlanarak aktif seramik elemanlar yuvalara yerleştirilmiştir. Üzerinde seramiklerin hizalı bir şekilde dizili olduğu bant kalıba sarılmıştır. Ardından arka yansıma sönümlenme katmanı yarım doldurulmuştur. Arka yansıma sönümlenme katmanının ilk aşaması ile sabitleştirilen seramiklerin lehim aşamasına geçilmiştir. Prototip çalışmasında olduğu gibi nihai üründe de seramiklerin birer kutupları birbirlerine bağlanmıştır. Piezoelektrik seramik ünitelerden elektriksel çıktının alınması için koaksiyel kablo kullanılmıştır. Her bir aktif elemanın bağlantısının yapılması ile birlikte arka yansıma sönümlenme katmanının geri kalan yarısı kalıp içerisine dökülerek katman tamamlanmıştır. Kalıp tekrar işlenerek çapı düşürülmüş, dizindeki bant çıkarılarak temizlenmiş ve uyum katmanı dökülmüştür.



Şekil 12. Ön ve Arka Polimer Katmanları Tamamlanmış Nihai Ürün (Sol taraf) ve Nihai Ürünün Son Hali (Sağ taraf)

64 elemanlı silindir dizin transdüserde uyum ve arka yansıma sönümlenme katmanlarının tamamlanması ile birlikte numunenin ölçüm alınacak sisteme dahil edilmesi için çalışmalar başlamıştır. Silindir dizin transdüserin ölçüm düzeneğinde konumlandırılması için epoksi cam çubuklar kullanılmıştır. Ayrıca dizindeki her bir seramikten alınması planlanan elektriksel çıktılarının, bilgi toplama cihazına bağlantısı için cihaza uyumlu soket tedarik edilmiştir. Her bir kablo sokette ilgili yere bağlanmış ve nihai ürün üretimi tamamlanmıştır. Son hale gelen nihai ürün Şekil 12’de verilmiştir. Dizin, ölçümlerinin alınması için Akustik Algılama Laboratuvarı’na (AKAL) ulaştırılmıştır. 64 Kanallı Dairesel Dizin Transdüserin merkezine yansıtıcılığı kullanılmak üzere 75 mm çapında boru yerleştirilmiştir. Oluşturulan düzeneğin fotoğrafı ve şematik olarak Şekil 43’de verilmiştir.



Şekil 13. Dairesel Dizin Transdüser Deney Düzeneği ve Düzeneği Şematik Gösterimi

Her kanaldan sinyal gönderilip borudan yansıyan sinyal yine aynı kanaldan geri alınarak darbe-eko sinyalleri toplanmıştır. Dizindeki seramik sensörlerin merkez frekansları, oransal bant genişlikleri ve voltaj tepkileri arasında değişkenlikler gözlemlenmiştir. Nihai hedef dizindeki her bir sensör elemanının benzer çıktıları sağlaması yönündedir. Bu sonuçlara ulaşmak için üretim aşamasının iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca dizin karakterizasyon sonuçlarındaki oransal bant genişliklerinin yükseltilmesi yönünde çalışmalar da yapılmıştır. Bu değerlerin artırılması için tek kristal piezoelektrik seramik ünitelerin kullanılmasının uygun olduğu düşünülmüştür. Önceki dönemlerde gerçekleştirilen çalışmalarda tek kristal seramiğin oransal bant genişliği ve voltaj tepkilerinde daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. Bu yüzden tek kristal seramik sensörler kullanılarak dairesel dizin transdüser üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu aşama, çalışmaların sınıflandırılması sırasında A aşaması olarak adlandırılmıştır.

6. Aşama

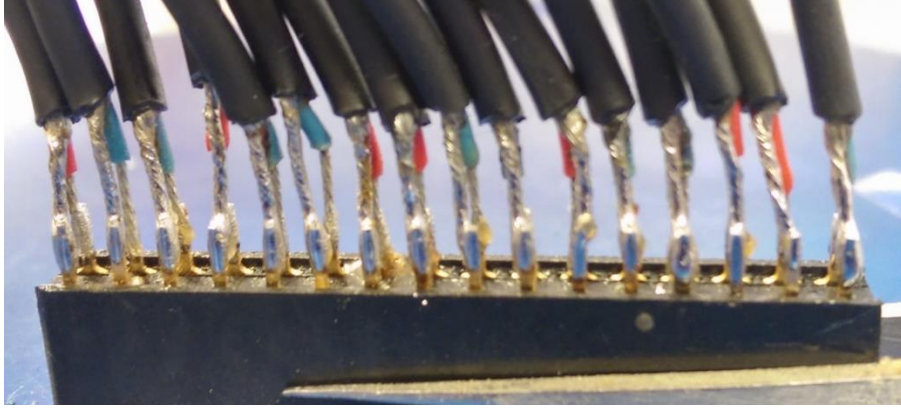
Tek kristal seramikler ile silindir dizin transdüser üretimi gerçekleştirilmiştir. Seramik sensörlerin uzunluğu 15 mm dir. Teflon kalıptaki arka yansıma sönümlenme polimeri enjekte edilecek yuvanın yüksekliği ise 20 mm dir. Seramiklerin toplam yapının tam ortasında, başlangıç ve bitişinde 2,5 mm polimer dolgusu sağlanmıştır. Arka yansıma sönümlenme polimerinin ikinci dolgu aşaması Şekil 14' te verilmiştir.



Şekil 14. Arka Yansıma Sönümlenme Polimerinin İkinci Dolgu Aşaması

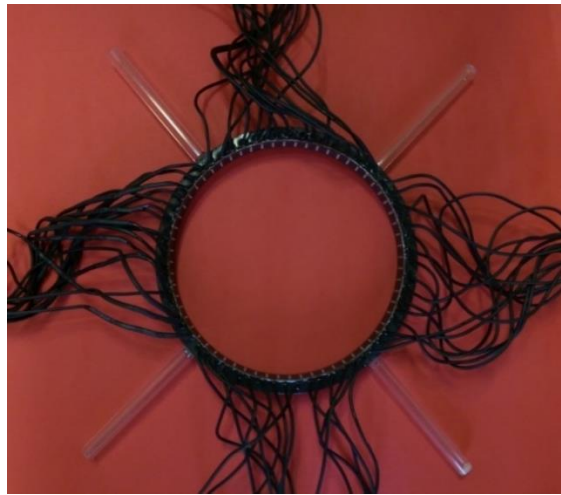
Uyum katman kalınlığı literatür bilgilerine göre piezoelektrik sensör kalınlığının yarısı olmalıdır. Hazırlanan uyum katmanı, ince uçlu olmasından ötürü, insülin şırıngaları yardımı ile kalıp ile seramiklerin arasında kalan boşluğa enjekte edilmiş ve yine oda sıcaklığında bir gün kürlenmeye bırakılmıştır.

Tek kristal piezoelektrik sensör ünitelerin kablo bağlantıları tamamlanmış, ön ve arka yüzeylerine uyum ve arka yansıma sönümlenme polimer katmanı enjeksiyon aşaması geçirilmiştir. Her bir sensör elemanından çıkan kablolar toparlanmış ve uçları, ölçüm sırasında kullanılacak veri toplama cihazına (data logger) bağlanması için 16' lık soketlere lehimlenmiştir. Soketlerin oluşturulması Şekil 15' te verilmiştir.



Şekil 15. Seramiklerin Veri Toplama Cihazına Uyumu İçin Soket Bağlantı Aşaması.

Seramik ünitelerin seçim aşamasındaki ölçümleri ile su altında mikrodalga uyarım altında elde edilen sonuçları karşılaştırılarak çıkarım yapılmıştır. Ayrıca seramiklerin, dairesel dizin transdüser haline getirilmesi sırasında uygulanan işlemler ile birlikte değişim karakteristiklerinin çıkarılması için her bir ünitenin tekrar ölçümü alınmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları da karşılaştırmalara dahil edilmek istenmektedir. Sonuç olarak üretimi tamamlanmış olan, aktif tek kristal piezoelektrik sensörlere sahip dairesel dizin transdüser Şekil 16' da verilmiştir.



Şekil 16. Üretimi Tamamlanmış Dairesel Dizin Transdüser

Tek kristal aktif sensörler ile üretilmiş dairesel dizin transdüserin karakterizasyon işlemi için AKAL laboratuvarına gönderilmiştir. Elde edilen sonuçlar sonuçlarıyla beraber ayrıntılı bir şekilde Ek-1'de verilmektedir. Tek kristal sensörlerin kullanımı ile birlikte band genişlikleri ve voltaj çıktılarında yükselmeler beklenmekteyken çok fazla yükselişin olmadığı karakterizasyon ile görülmüştür. Ön tarafta kullanılan uyum katmanı ve aktif seramik ünitenin arkasında kullanılan arka sönümlenme katmanları iyileştirmeleri için tek transdüserler üzerinde denemeler hazırlanmış ve sonuçlarına göre yeni üretim ve denemelere geçilmiştir.

7. Aşama

Arka Yansıma Katmanı İyileştirmesi : Bu aşamada arka sönümlenme katmanının kürlenme koşulları ve epoksi hazırlama koşulları değiştirilerek üretilmiş olan transdüserlerin sonuçları kıyaslanmak istenmiştir. Ayrıca tek transdüser yapısında kullanılan aktif piezoelektrik malzeme disk formunda, dairesel dizin transdüser yapısında kullanılan piezoelektrik seramik malzeme ise dikdörtgen prizma formundadır. Tek transdüser yapısında elde edilen bilgilerin, form farklılığından ötürü, dairesel transdüser için bilgi olarak alınmasında sorun olup olmayacağını görmek için üretim matrisine dikdörtgen ve kare formunda aktif piezoelektrik seramikler de eklenmiştir. Bu doğrultuda yola çıkılarak transdüser üretimleri yapılmıştır. Üretimlerin tamamlanmasıyla birlikte transdüserlerin su altı karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Numunelerin bant genişliklerine, hassasiyet değerlerine ve çekirdek yönelimlerine bakılmıştır. Transdüserlerin band genişliklerini görebileceğimiz hidrofondan elde edilen basınç değerinin düşük miktarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun band genişliklerine etkisi olduğu düşünülmektedir. Ancak peak noktasındaki değerlerin düşük olması durumunda, transdüserin yayacağı toplam enerjinin bandı genişleterek yayılma ihtimalinin olduğu düşünülmektedir. Bu ek bilgiler dahilinde transdüser kıyaslamaları gerçekleştirilmiştir. Bu kıyaslamalar sonucunda yüksek sıcaklıklarda bant genişlikleri azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla sonraki süreçte arka yansıma sönümlenme katmanlarının oda sıcaklığında kürlenmesine karar verilmiştir.

8. Aşama

Seramik Kristal Yapısı Farkı: B aşamasında Çoklu kristal seramik kullanılarak üretilen tek transdüserde oransal olarak %57 lik band genişliği yapılan numunelerde sağlanmıştır. Bu aşamada benzer konfigürasyonlar ile tek kristal kullanılarak üretilen transdüser yapısının sonuçları görülmek istenmiştir. Üretim sırasında iki farklı firmadan temin edilen tek kristal piezoelektrik seramik üniteler kullanılmıştır. Kristallerin çapları önceki aşamadan farklı olarak

0,5 inch boyutundadır. Bir önceki aşamada elde edilen değerlerin tekrarlanabildiğinin görülmesi için üretim matrisine çok kristal seramik ünite içeren transdüser de eklenmiştir. Her bir konfigürasyondan ikişer tane olmak üzere 6 transdüserin üretimi gerçekleştirilmiştir.

9. Aşama

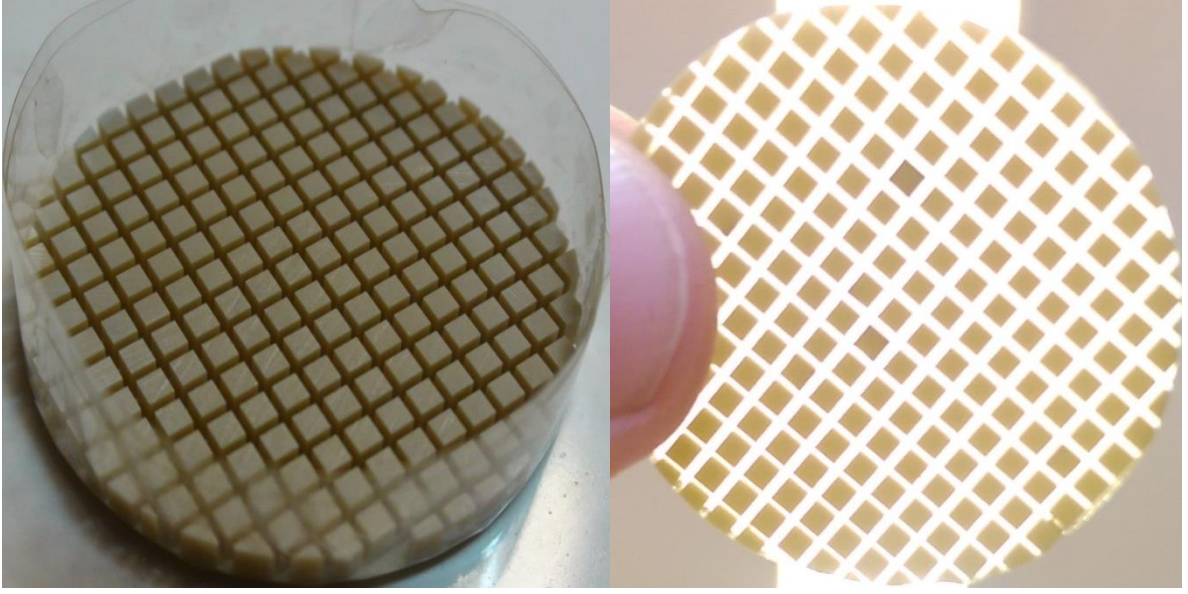
Eşleştirme Katman İyileştirmesi: Bu aşamada aktif piezoelektrik seramik ünite boyutu 7. aşamadaki değerine (0,25 inch) düşürülmüştür. Sırası ile ikinci katmandaki alumina katkısı arttıkça band genişliğinin de arttığı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca hidrofona çıktılarına bakıldığında B aşamasındaki gibi düşük değerler yerine daha yüksek basınç değerleri görülmektedir. Bu durum hassasiyetin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

10. Aşama

Akustik Empedans Ölçümleri ve Polimer İyileştirmesi: Bu aşamada literatürde transdüser üretiminde kaynak olarak alınan KLM ve desilet modellemelerine uygun üretim gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Üretim sürecinde kullanılma ihtimali olan seramiklerin, uyum ve arka yansıma sönümlenme polimerlerinin akustik hızları ölçülmüş, ölçüme göre akustik empedansları hesaplanmıştır. Hazırlanan seramiklerin akustik empedansları ve eklenen malzeme farklılıklarına göre polimerlerin akustik empedansları Ek-1'de verilmiştir. KLM ve Desilet modelleri transdüser üretiminde polimer seramik uyumu için geliştirilmiş yöntemlerdir. Modeller ile tek ve çift katmanlı uyum katmanları için akustik empedans değerleri hesaplanmaktadır. Bu transdüserlerin birbirleri aralarındaki kıyaslamalar ile hem arka sönümlenme katmanının akustik empedans farkı tekrar gözlemlenmek istenmiş hem de iki katmanlı uyum katmanının etkisi gözlemlenmek istenmiştir. Ancak arka sönümlenme katmanı için çökme oluşmasından ötürü fark görülemediği. Uyum katmanı değerlendirmesinde ise çok kristal piezoelektrik seramik üniteler için ulaşılabilecek en yüksek değerlere ulaşılmış olabileceği düşünülmektedir.

11. Aşama – Tek Kristal Aktif Piezoelektrik Seramik Kullanımı: Gerçekleştirilmiş olan çalışmalarda çok kristal piezoelektrik seramik kullanılarak üretilen transdüserlerde -3 dB hassasiyetinde %57 bant genişliğine ulaşılmıştır. Bu değer artırılması için Akustik uyum polimerlerinde ve aktif piezoelektrik seramiklerde iyileştirilme sürecine devam edilmiştir. Uyum polimeri konusunda literatür araştırmaları sonunda, aktif seramik ünite yerine seramik-polimer kompozit yapısının kullanılmasına karar verilmiştir. Seramiklerin akustik empedansları 35-37 MRayl aralığında iken polimer ile kompozit yapı oluşturulduğunda bu değer 15-20 MRayl seviyelerine indiği görülmüştür. (Tung vd., 2014) Seramiğin akustik empedansının düşük olması uyum polimeri ile arasındaki uyumu artırmaktadır. Bu yüzden deneme çalışmalarına

dahil edilmiştir. Üretilen kompozit yapı Şekil 17’ de verilmiştir. Seramik konusunda ise temin edilen tek kristal piezoelektrik seramik ünitenin denenmesi yönündedir.

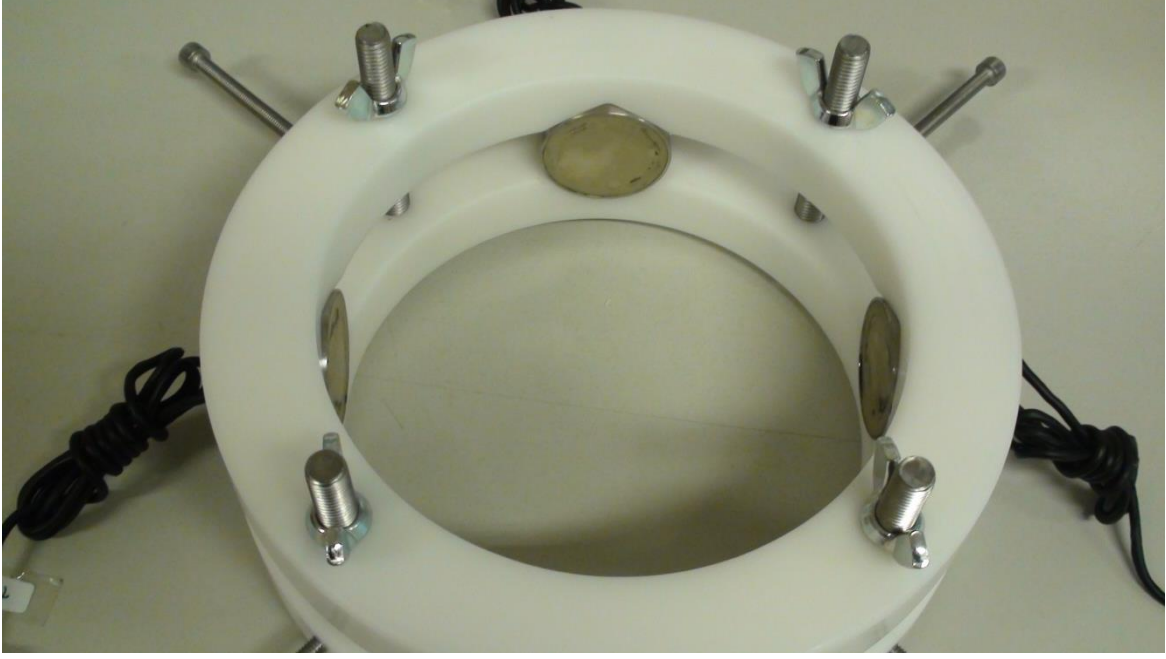


Şekil 17. Seramik-Polimer Kompozit yapısı

Ayrıca proje ortakları ile, ısıyla uyarılan dokulardan sinyal alımı konusunda bazı endişelerin olduğu, bu yüzden daha hassas sinyalleri sezebilecek transdüserler üretimi konusunda çalışmaların başlatılması görüşülmüştür. Bu yüzden çapı daha büyük, düşük sinyalleri algılamaya elverişli, transdüser üretmek için çalışmalara başlanmıştır.



Şekil 18. 0,25 İnç Aktif Seramiklerden Üretilen Transdüserlerin Konumlama Aparatı



Şekil 19. 1,25 İnç Aktif Seramiklerden Üretilen Transdüserlerin Konumlama Aparatı

Üretilen transdüserlerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İyi sonuçlar alınan T70 transdüser üzerinde yoğunlaşmıştır (Ek-1). Bu transdüserin su altı ölçüm sonuçları Ek-1’de verilmiştir.

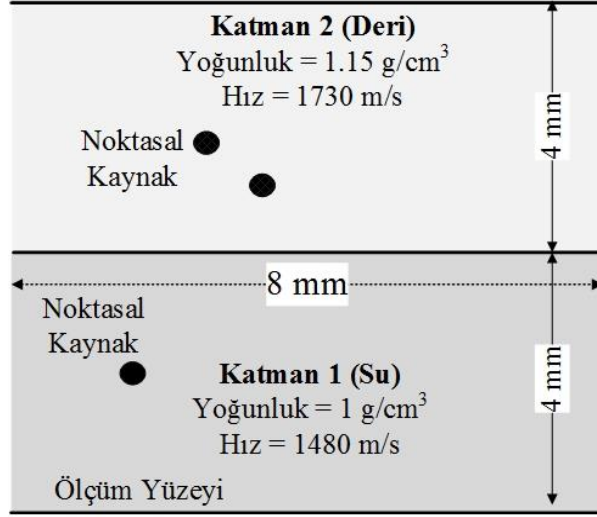
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Kuramsal Çalışmaların Sayısal Benzetim Sonuçları

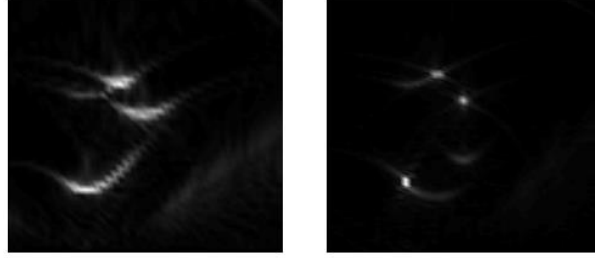
Düzlemsel Ortam İçin Simulasyon Sonuçları

Çok katmanlı düzlemsel model için elde ettiğimiz analitik çözümü test etmek ve literatürde var olan homojen ortam varsayımı altında elde edilen çözüm ile karşılaştırmak için hesaplamadaki zaman sınırlamalarından dolayı her bir katmanın üçüncü boyutta sonsuza gittiği varsayılarak iki boyutlu ve iki katmanlı düzlemsel bir yapı ele alındı (Şekil 20). Su ve deri tabakaları için sırasıyla yoğunluklar 1 g/cm^3 ve 1.15 g/cm^3 ve akustik hızlar sırasıyla 1480 m/s ve 1730 m/s olarak alındı. Düzlemsel test fantomunun boyutu $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ve üst katmanda iki ve alt katmanda bir noktasal kaynak alınıp ilk olarak termoakustik dalga denkleminin katmanlı ortam için bulunan düz problem çözümü kullanılarak ölçüm yüzeyinden ölçülen yapay veri (akustik dalga) üretildi. Daha sonra bu veri ile literatürde yer alan homojen ters çözüm [1] ve elde ettiğimiz katmanlı ters çözüm kullanılarak kaynak dağılım fonksiyonu oluşturuldu. Hesaplamalarımız iş istasyonu bilgisayarlarda MATLAB kullanılarak yapıldı. Hesaplamalarda 10 MHz bant genişliği kullanılıp merkez frekans 5 MHz ve 200% lük oransal bant genişliği ($f_0 = 5 \text{ MHz}$, $BW = 10 \text{ MHz}$) alındı. Zamansal frekans bandı $\Delta f = 20 \text{ kHz}$ adımlarla örneklendi. Akustik dalganın ölçümü için fantomun alt kısmına $\lambda_0/4$ uzunluğunda aralıklarla 50 noktali transdüser yerleştirildi ve ölçüm yapıldı. Homojen ve katmanlı ters çözümde dıştan içe doğru dağılan dalga fonksiyonu olarak sırasıyla homojen Green fonksiyonları ve katmanlı Green fonksiyonları kullanıldı. Şekil 20' de sunulan homojen ve katmanlı ters çözümle elde edilen görüntüler incelendiğinde lineer olarak hesaplanıp elde edilen görüntü ve farklı genlik skalasındaki logaritmik olarak elde edilen görüntüler vardır. Burda da görüldüğü üzere genlik skalası arttıkça homojen çözümde noktasal kaynakların bulunduğu yerdeki analog genişliği ve yanloblardaki genişlik ve saçılmalarının, analitik olarak elde edilen ters çözümdeki analog genişlikleri ve yan loblardaki genişlik ve saçılmalarından göreceli olarak çok daha fazla olduğu gözlemlendi. Bunlara ek olarak katmanlı ters çözümde noktasal kaynakların koordinatları doğru çıkarken, homojen ters çözümde noktasal kaynakların koordinatlarının doğru çıkmadığı tespit edildi.

Sayısal Test Fantomu



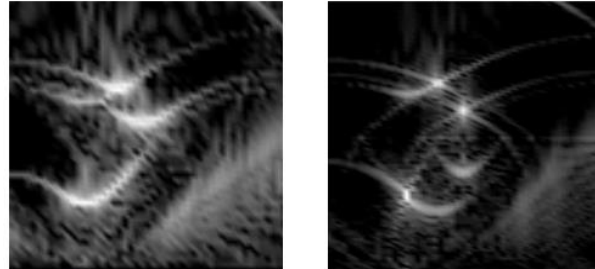
Lineer



Genlik Ölçeklemesi: 20 dB Logaritmik



Genlik Ölçeklemesi: 40 dB Logaritmik



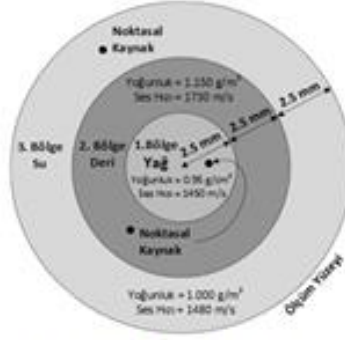
Homojen Ters
Çözüm

Katmanlı Ters
Çözüm

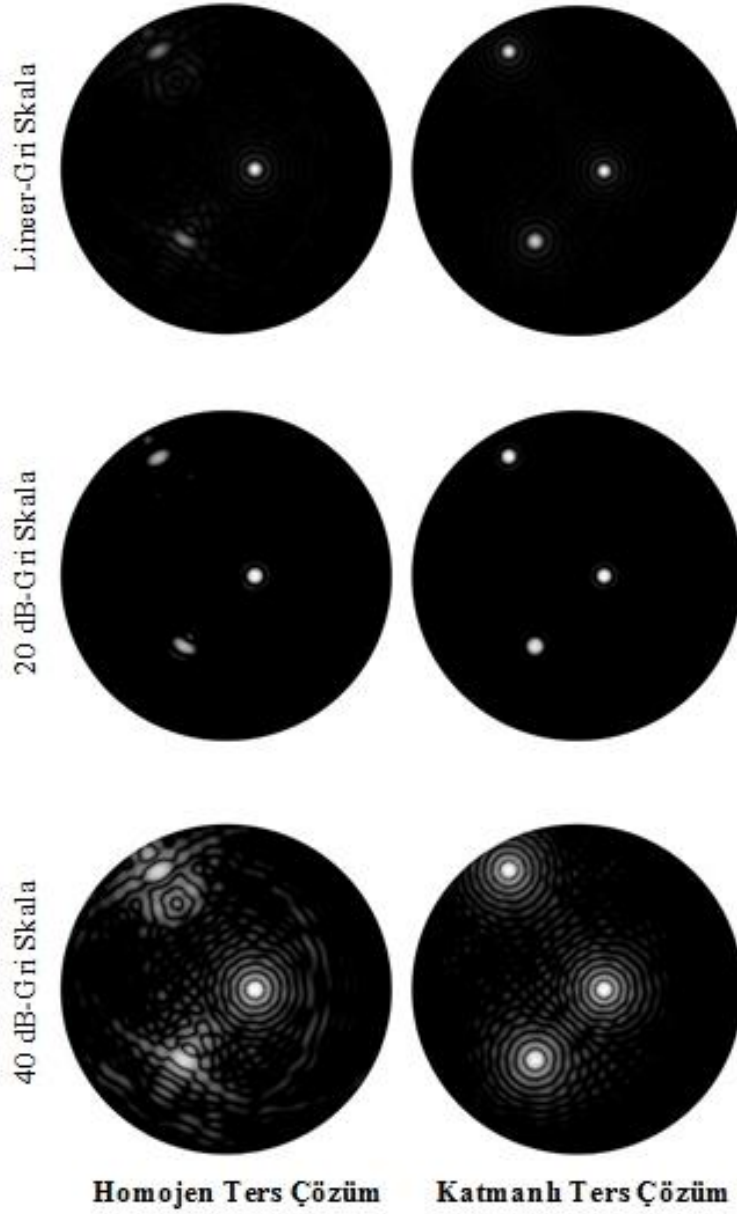
Şekil 20. Sayısal test fantomu, literatürde yer alan homojen ortam varsayımına dayanan ters çözüm ve katmanlı ortam varsayımına dayanan ters çözüm kullanılarak elde edilen lineer, logaritmik 20 dB ve 40 dB görüntüler.

3.1.2 Silindirik Ortam İçin Simulasyon Sonuçları

Çok katmanlı ortam örneği olarak Şekil 21' de verilen 3 katmanlı model ele alınarak numerik simulasyonlar gerçekleştirildi. Numerik hesaplamalarda karşılaşılan işlem zamanı uzunluğu sebebiyle numerik hesaplamalar 3 boyutlu bölgenin z-kesiti üzerinde yapıldı. Dairesel transduser üzerinde düz problem çözümünden yararlanarak sentetik data elde edildi. Bu data ters problem için bulunan analitik çözümlerin numerik olarak hesaplanmasında kullanıldı. Ters problem çözümünün numerik simulasyonunda, mukayese amaçlı, ölçüm datası ile çarpılması gereken Green fonksiyonu olarak sırasıyla literatürde olan homojen ortama ait serbest uzay Green fonksiyonu ve katmanlı modele ait olan Green fonksiyonu kullanıldı. Homojen ters çözümde ortam parametreleri olan yoğunluk ve ses hızı, 3 katmanlı ortamın ortam parametrelerinin ortalaması alındı. Şekil 21' de, her katmanda farklı ortam özelliklerine sahip (ortamdaki akustik dalga hızı, ortamın yoğunluğu) 3 katmanlı fantom modelinden elde edilen simulasyon sonuçları verildi. Frekans aralığı [-4 Mhz +4 Mhz] olarak alındı. Şekil 21' de verilen simülasyon sonuçlarında, homojen ters çözümün noktasal kaynakların yerinde ortam parametrelerine bağlı olarak sapmaya sebep olduğu, geniş, ana lob ve ciddi yan loblar içeren zayıf nokta dağılım fonksiyonu ürettiği; katmanlı ters çözümün ise noktasal kaynakların yerini doğru bulduğu, daha dar ana loba ve daha düşük yan loblara sahip nokta dağılım fonksiyonu ürettiği görülmektedir.



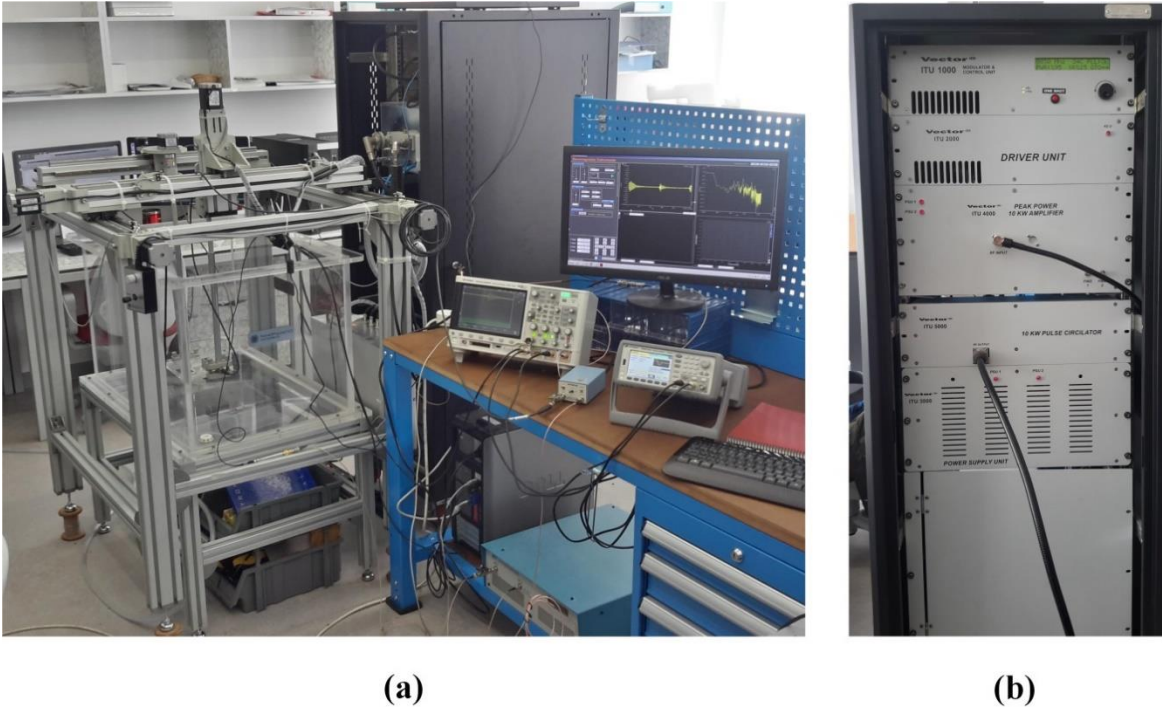
Sayısal Test Fantomu



Şekil 21. En üstte sayısal test fantomu verilmiştir. Test fantomundan sonra gelen 1. ve 2. sütun sırasıyla homojen ters çözüm ve katmanlı ters çözüm simülasyonlarını göstermektedir.

3.2 Sistem Entegrasyonu

Termoakustik görüntüleme sistemi, mikrodalga darbe üretici, güç amfisi, anten ve akustik transdüser alt elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 22). Mikrodalga darbe kaynağı 850 MHz frekansında, 10 kW tepe gücüne sahip ve 50 ns ile 600 ns aralığında darbe üretebilen katı-hal elektronik bileşenlerden ulusal olanaklarla tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu ünite su soğutmalı olup çıkış tepe gücü 1 kW ile 10 kW arasında seçilebilir özelliktedir.

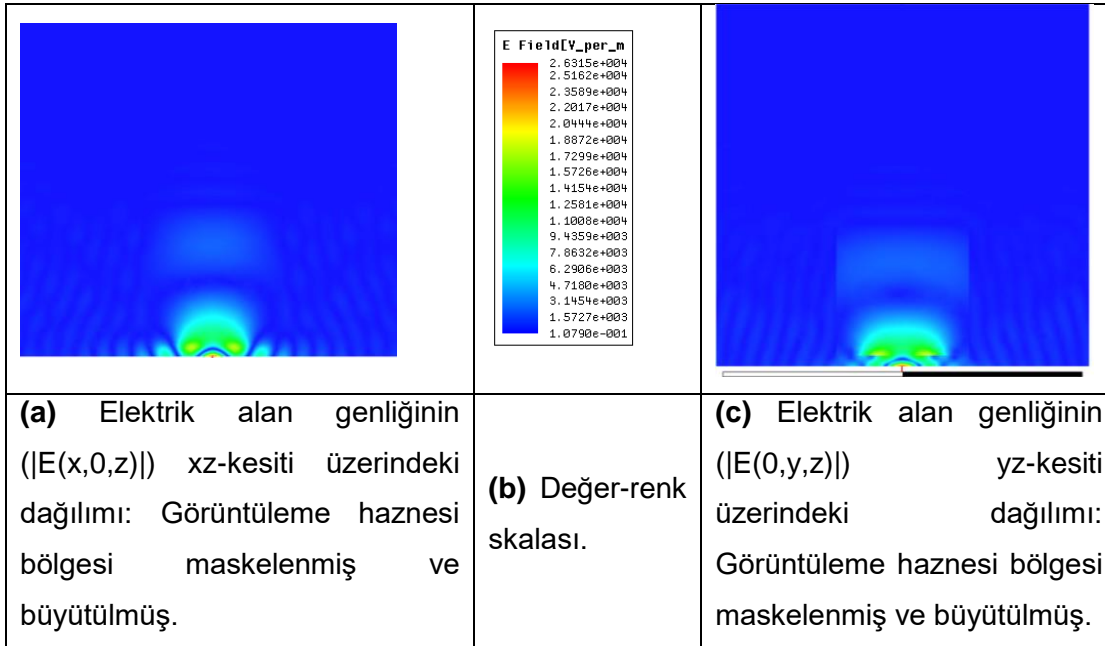
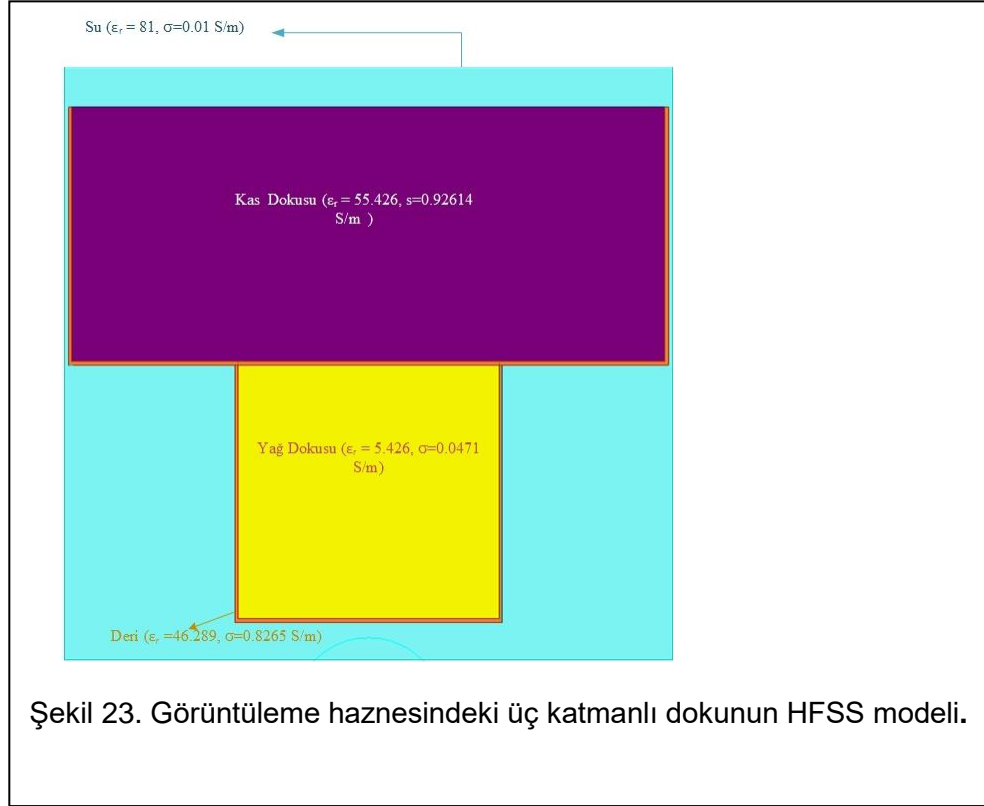


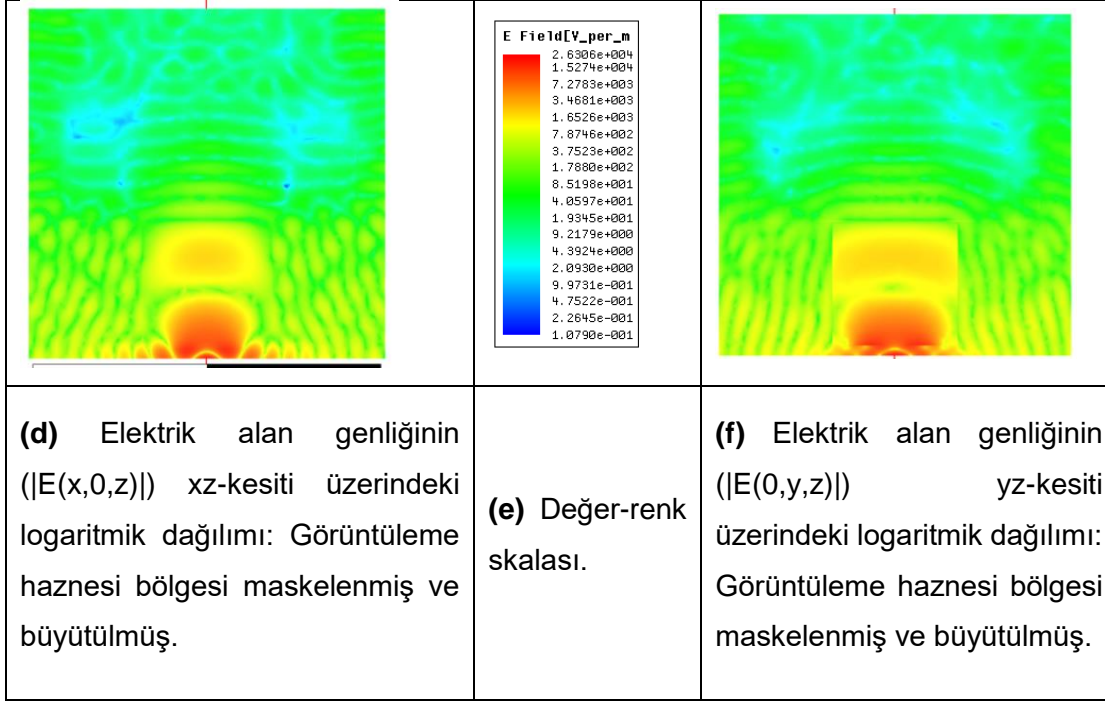
Şekil 22. (a) Deneysel veri toplama düzeneği ve (b) Mikrodalga darbe kaynağı ve amfisi.

Mikrodalga darbe kaynağından ölçülen deneysel bir darbe örneği Şekil 2'de verilmiştir. Bilgisayar kontrollü XYZ-konumlandırıcı tabanlı deneysel tarama ünitesi kullanılarak, farklı test fantomlarından ve doku örneklerinden deneysel işaret toplama ve görüntü çıkarma çalışmaları yapılmıştır. Deneylerde 90 mikron çaplı bir nikel tel, üç boyutlu nesne olarak bir yay ve doku örneği (dana kas dokusu) kullanılmıştır. Veri toplama işleminde 1 MHz merkez bantlı, %60 oransal bant genişliğine sahip tek elemanlı, odaklı bir transdüser kullanılmıştır.

Veri toplamada, yaklaşık 60 dB'lik bir ön kuvvetlendirici ve işaret-gürültü oranını artırmak için işaretlerin ortalaması alınmıştır. Toplanan veriler, bilgisayarda yazılan MATLAB kodları ile işlenerek görüntüler çıkarılmıştır. Burada, deneysel kurulumun en önemli parçalarından biri olan su içindeki antenin benzetimi ve gerçekleştirilmesinden bahsedilecektir. Antenin önüne Şekil 9'daki doku modeli konularak simülasyonlar yapıldı. Suyun içine doku yerleştirince alanın

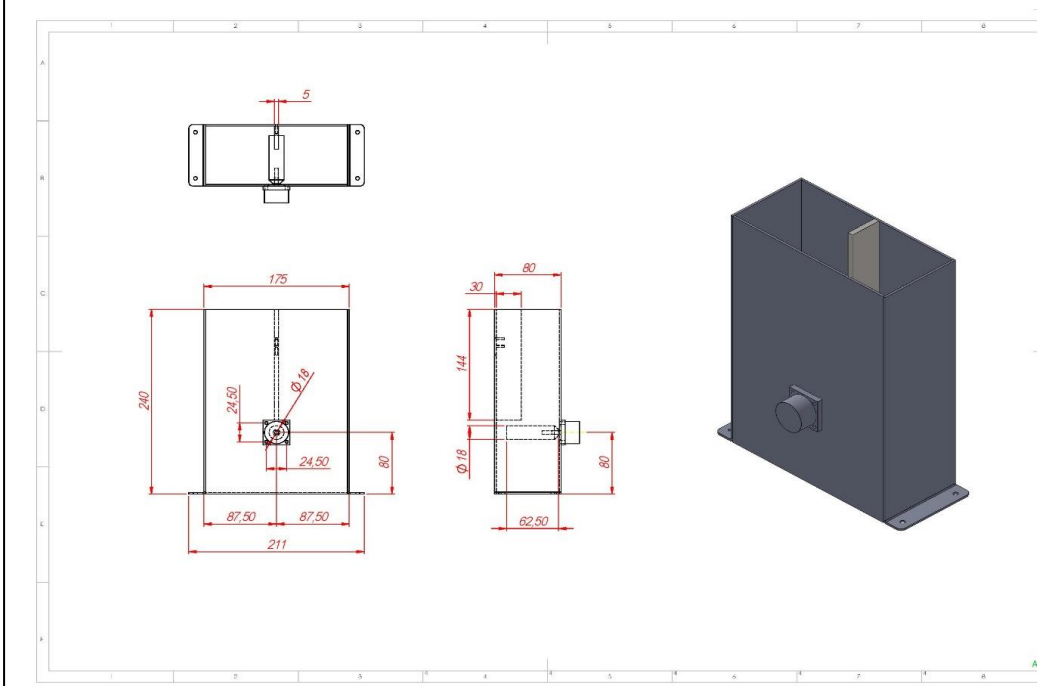
en az -5 dB soğurulduğu gözlemlenmiştir. Şekil 24' te verilen sonuçlar genlik skalası ile birlikte incelendiğinde, antenden verilen gücün doku içine aktarılması ve yayılım dağılımının makul şekilde düzgün olduğu gözlemlenmektedir.





Şekil 24. Mikrodalga uyarımda kullanılan antenin su ve üç katmanlı doku ortamında elektrik alan genliğinin ($|E(x,y,z)|$) lineer ve logaritmik dağılımı

3.2.1 Üretilen Antenin Deneysel Testleri

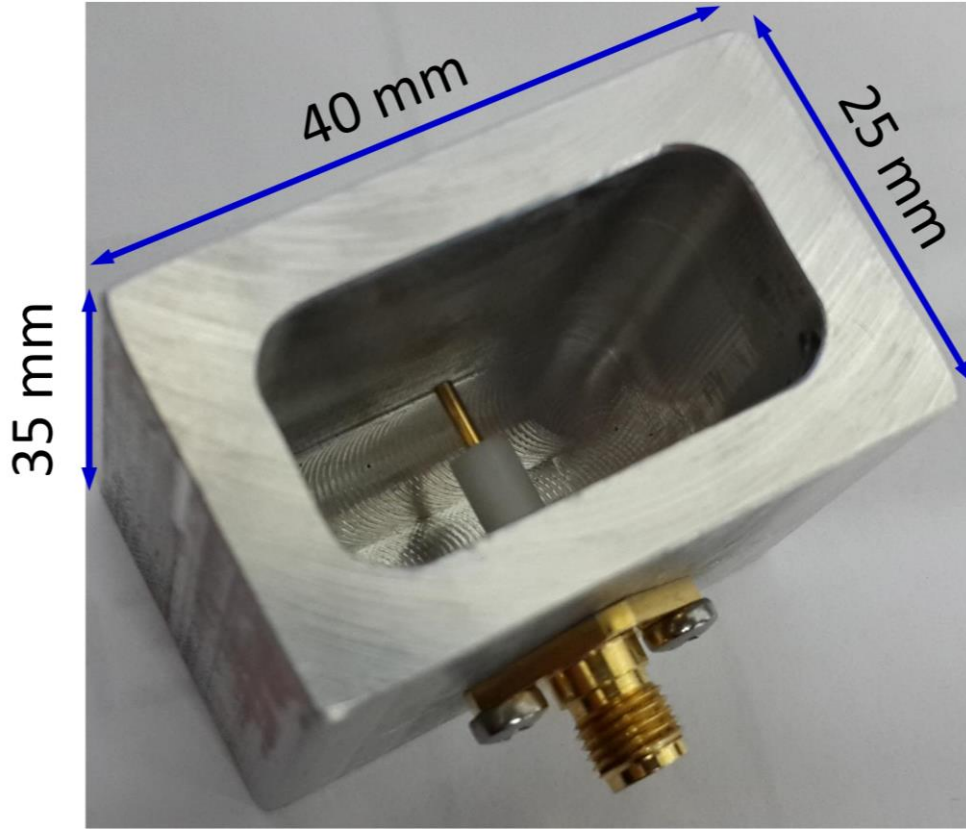


(a)

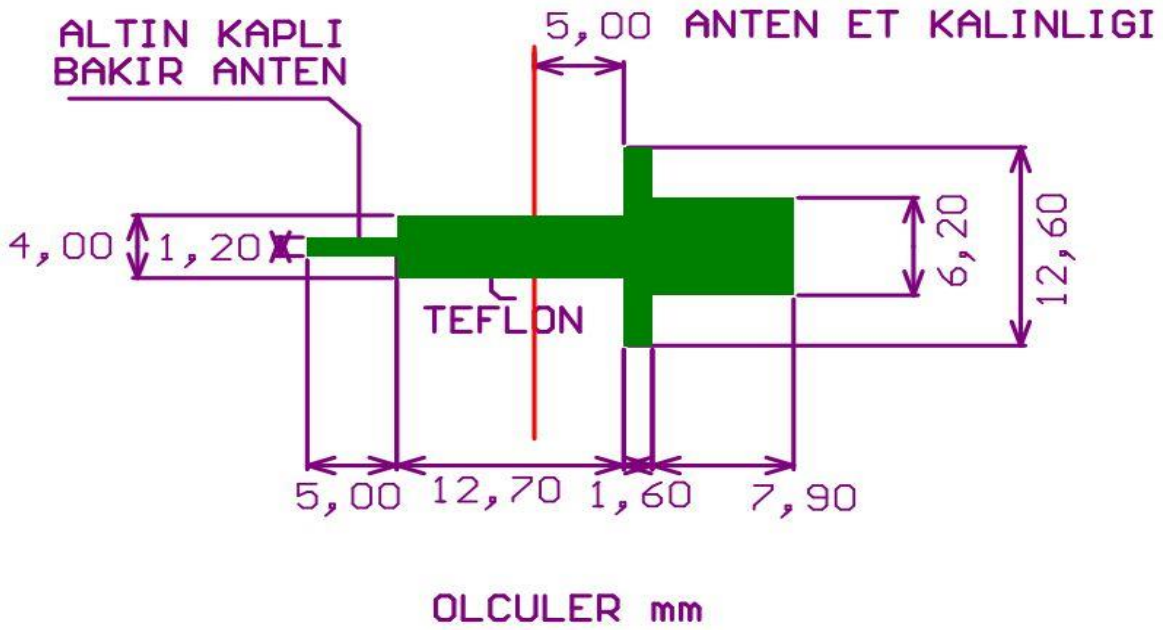


(b)

Şekil 26. Tasarlanan mikrodalga antenin çizimi ve gerçekleştirilmesi, hava için.



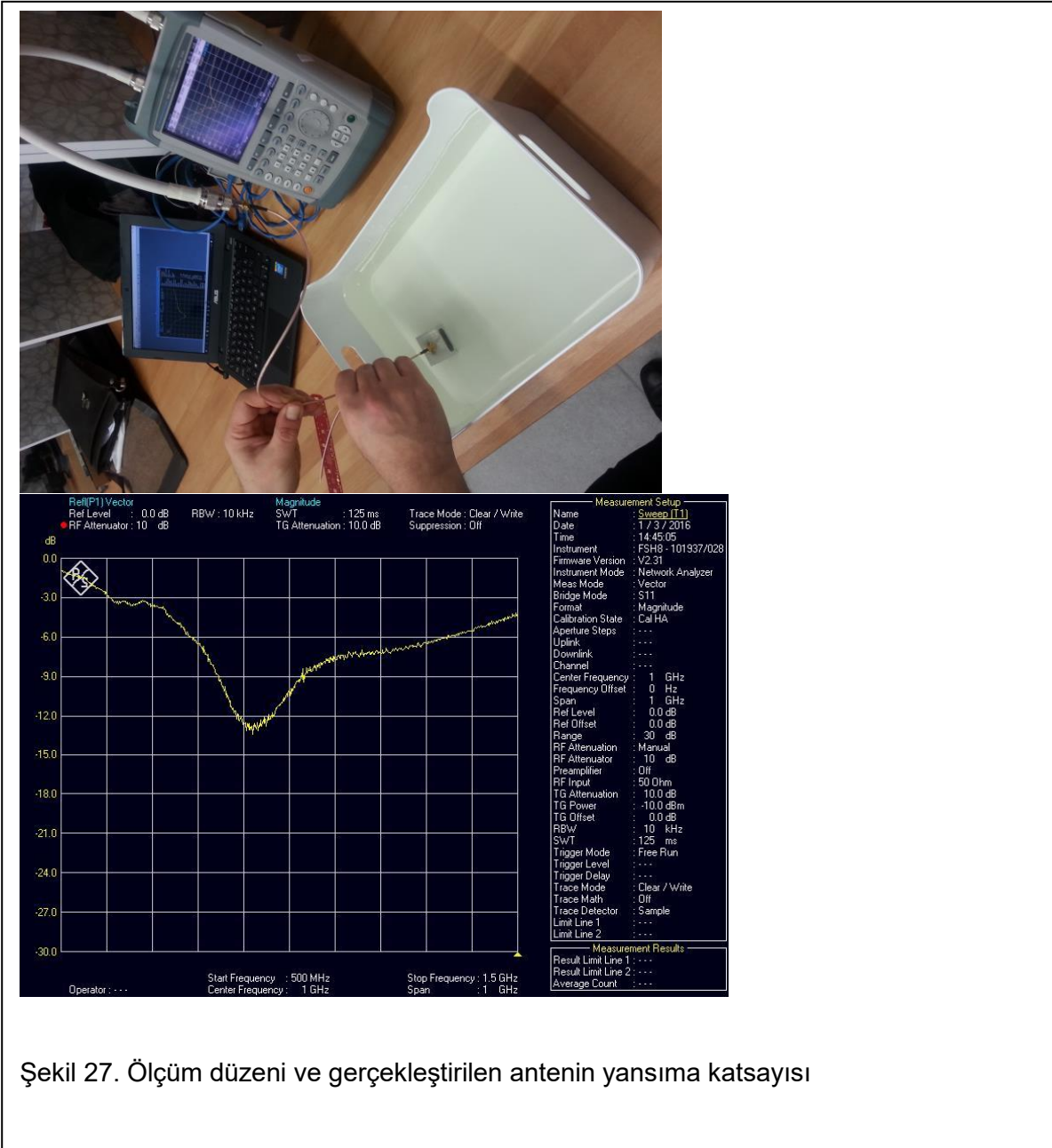
(a)



(b)

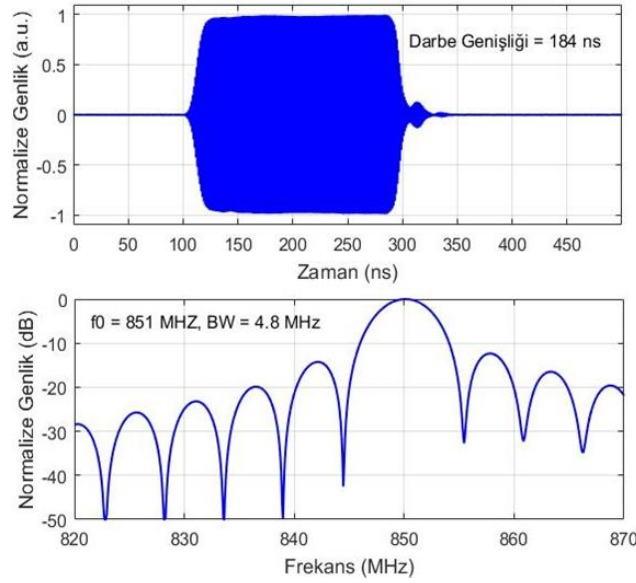
Şekil 26. Su içerisinde çalışmaya uyumlu antenin (a) gerçekleştirilmiş hali (b) anten piminin şematiği.

Simülasyon ve tasarım çalışmalarından sonra üretilen antenin deneysel olarak test edildi. Bu testlere örnek olarak S11 ölçümü aşağıda verilmiştir. Antenin 850 MHz civarında (aktif bant içinde) S11 parametresinin değeri -12 dB in üstünde ölçülmüştür (bkz. Şekil 27). Simülasyonlarda -15 dB olarak gözlemlenen S11 değeri ölçümde yaklaşık 3 dB yüksek çıkmıştır, bu fark gerçek ortamda makul bir farktır. Bu anten ilk deneysel termoakustik görüntüleme için işaret toplamada kullanılmıştır.

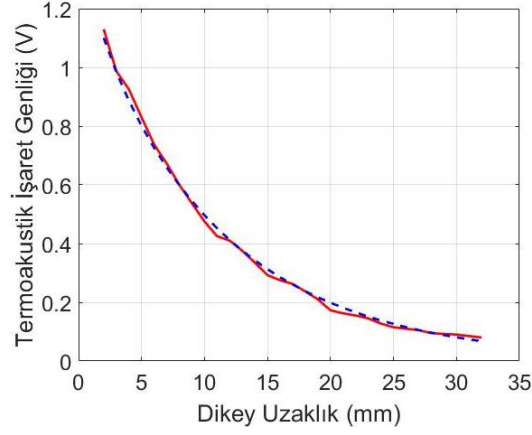


Şekil 27. Ölçüm düzeni ve gerçekleştirilen antenin yansımaya katsayısı

Daha etkili mikrodalga uyarım amacıyla mevcut dalga kılavuzu adaptör (dikdörtgen prizma) antenden farklı olarak su içinde çalışacak horn yapısında yeni bir anten tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Horn anten beklenildiği gibi daha yönlü olmakla birlikte, içindeki sudaki dielektrik kaybın yönlülükle elde edilen kazanımdan daha fazla olduğu deneysel verilerden görülmüştür. Bu sebeple termoakustik deneyler dikdörtgen prizma dalga klavuzu ile yapılmıştır. İlk deneysel test olarak, mikrodalga darbe üretici-kuvvetlendirici ünitesinin karakterizasyonuna yönelik deneysel çalışmalar yapılmış; termoakustik işaretin genliğinin antenden uzaklıkla değişimi ölçülmüş (Şekil 29); genlik azalmasında e^{-ar} şeklinde olan üstel emilim kaybının, $(1/r)$ şeklinde olan dağılım kaybindan daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, dielektrik kaybın mikrodalga uyarım derinliğini sınırlayıcı temel etken olduğunu doğrulamaktadır. Bu yüzden, yüksek tepe güçlerine çıkılması gerektiği belirlenmiştir.

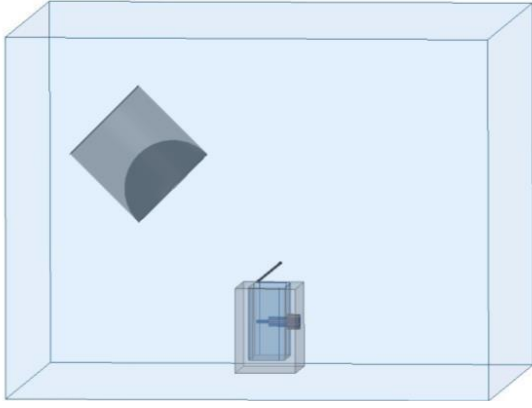


Şekil 28. Mikrodalga darbe kaynağının testlerinden örnek bir darbe işareti ve spektrumu.

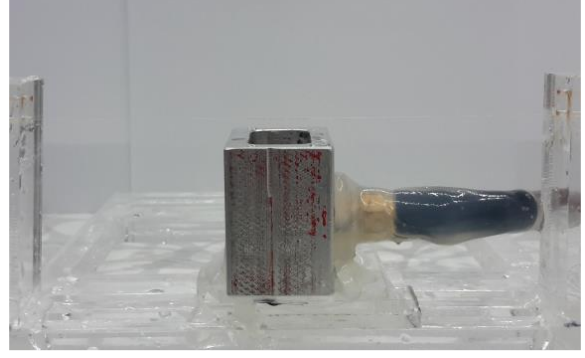


Şekil 29. Adaptör antenden alınan termoakustik işaret genliğinin uzaklıkla değişimi ve üstel sönümlenme modeli.

Noktasal çözünürlüğü ve noktasal dağılımı irdelemek amacıyla, 90 mikron çaplı nikel telden toplanan verilerden çıkarılan deneysel görüntüler Şekil 30' da verilmiştir. 3-Boyutlu görüntü gösteriminde MATLAB programının yüzey render tekniği kullanılarak uygun bir eşik değeri ile oluşturulmuştur. Bu taramalarda dikey yönde 18 mm, yanal yönde 40 mm ve derinlik yönünde 20 mm'lik tarama yapılmıştır. Tel fantomun termoakustik ve akustik görüntüsü üzerinde yapılan ölçümlerde, telin kalınlığı yaklaşık olarak 2 mm olarak ölçülmüştür, bu ise kullanılan 1 MHz'lik transduserin noktasal çözünürlüğüne karşılık gelmektedir. Tel fantomun eko ultrason görüntüsü, termoakustik görüntüsünden daha yüksek SNR değerine sahip verilerden oluşturulduğu için termoakustik görüntüye göre net görülmektedir. Yay fantomdan toplanan verilerden çıkarılan deneysel görüntü Şekil 31'de verilmiştir. Yay fantom görüntüsü termoakustik deneylerimizin 3-boyutlu bir nesne görüntüsü olarak işlevsel doğrulama değerine sahiptir. Veri toplamada, dikey yönde 18 mm, yanal yönde 40 mm ve derinlik yönünde 10 mm'lik tarama yapılmıştır. Bu fantomun termoakustik görüntüsü, beklenildiği üzere, telin transduserine bakan yüzeylerinden güçlü sinyal alındığını, yayın yatay ve dikey kısımlarından alınan işaretlerin aynı genlik ölçeğinde gösterilemeyecek derecede düşük olduğunu yansıtmaktadır.



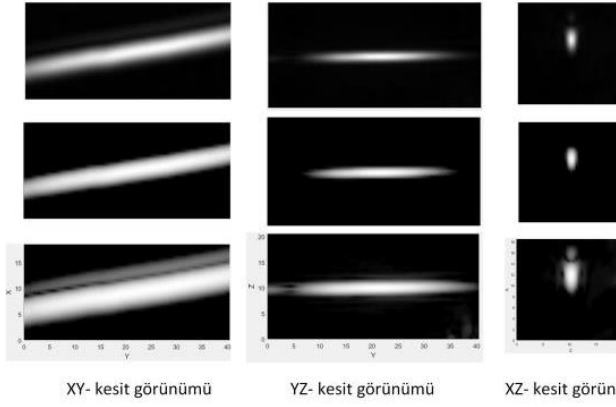
Deney sisteminin modellenmesi



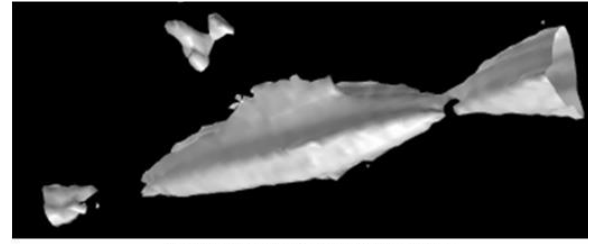
Deney düzeneğinin tel ve anten kısmının fotoğrafı



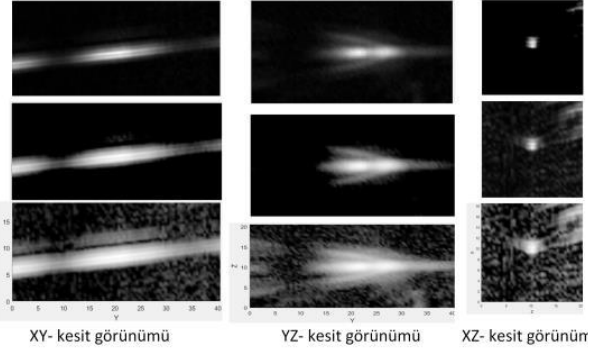
Telin akustik taramasının 3 boyutlu görüntüsü



Standart eko-ultrason

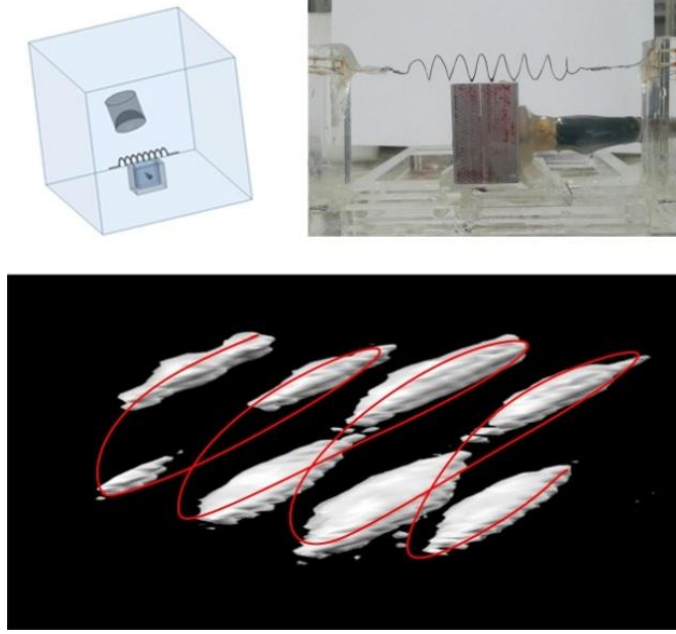


Telin termoakustik 3 boyutlu görüntüsü



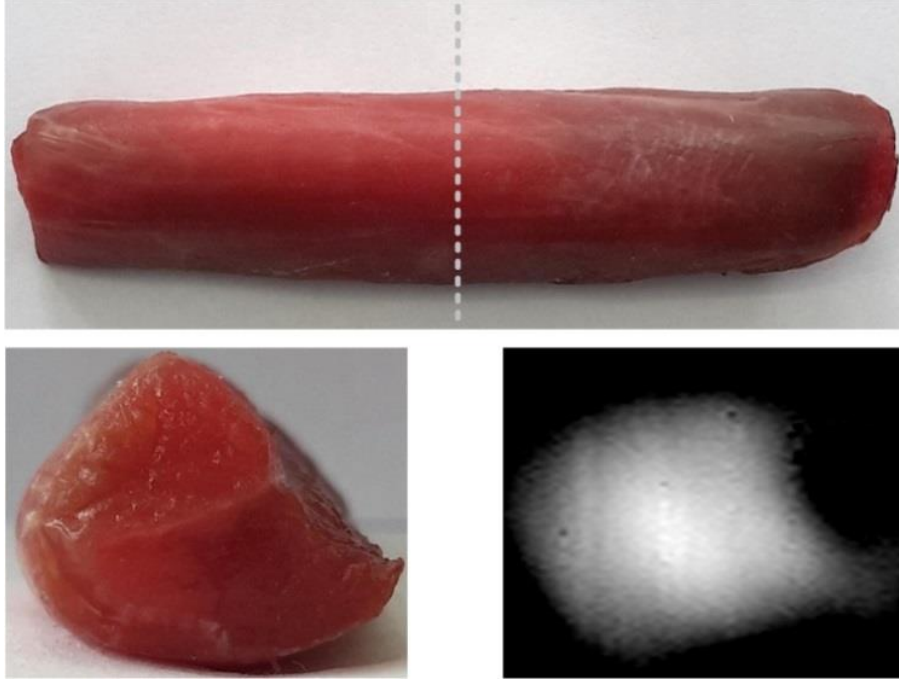
Termoakustik

Şekil 30. Deney düzeneğinin modellenmesi, düzeneğin tel ve anten kısmının görüntüleri ve alınan akustik ve termoakustik görüntüler.

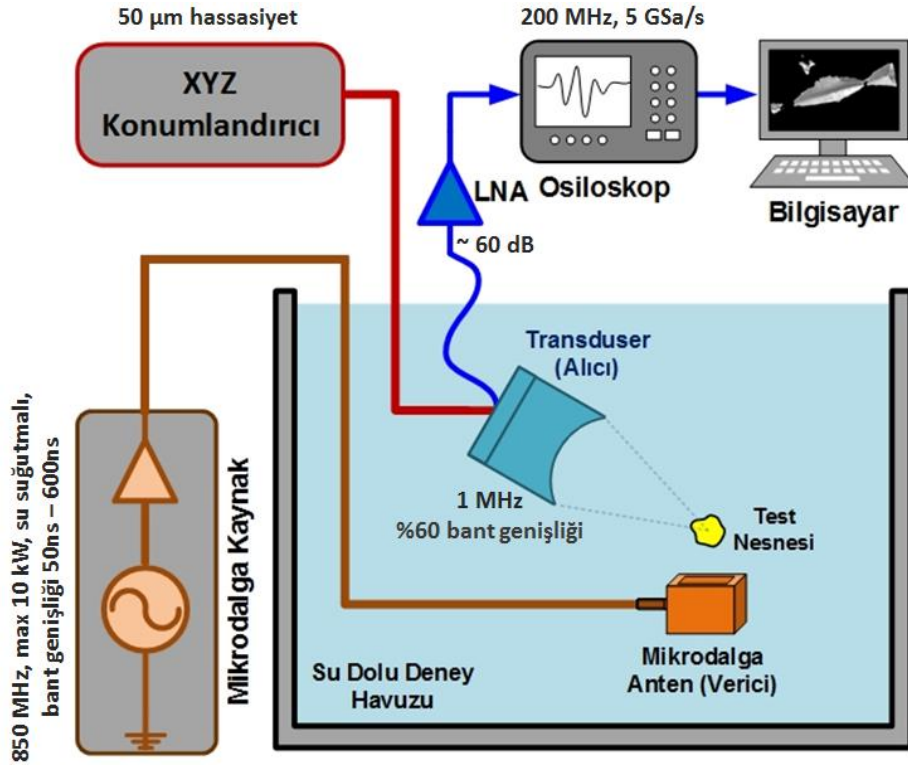


Şekil 31. Deneysel düzenek, düzenek tel ve anten kısmının fotoğrafı ve alınan termoaustik görüntü. Görüntü üzerinde yayı simgeleyen kırmızı çizgi, perspektif görünümü kolaylaştırması için yapay olarak eklenmiştir.

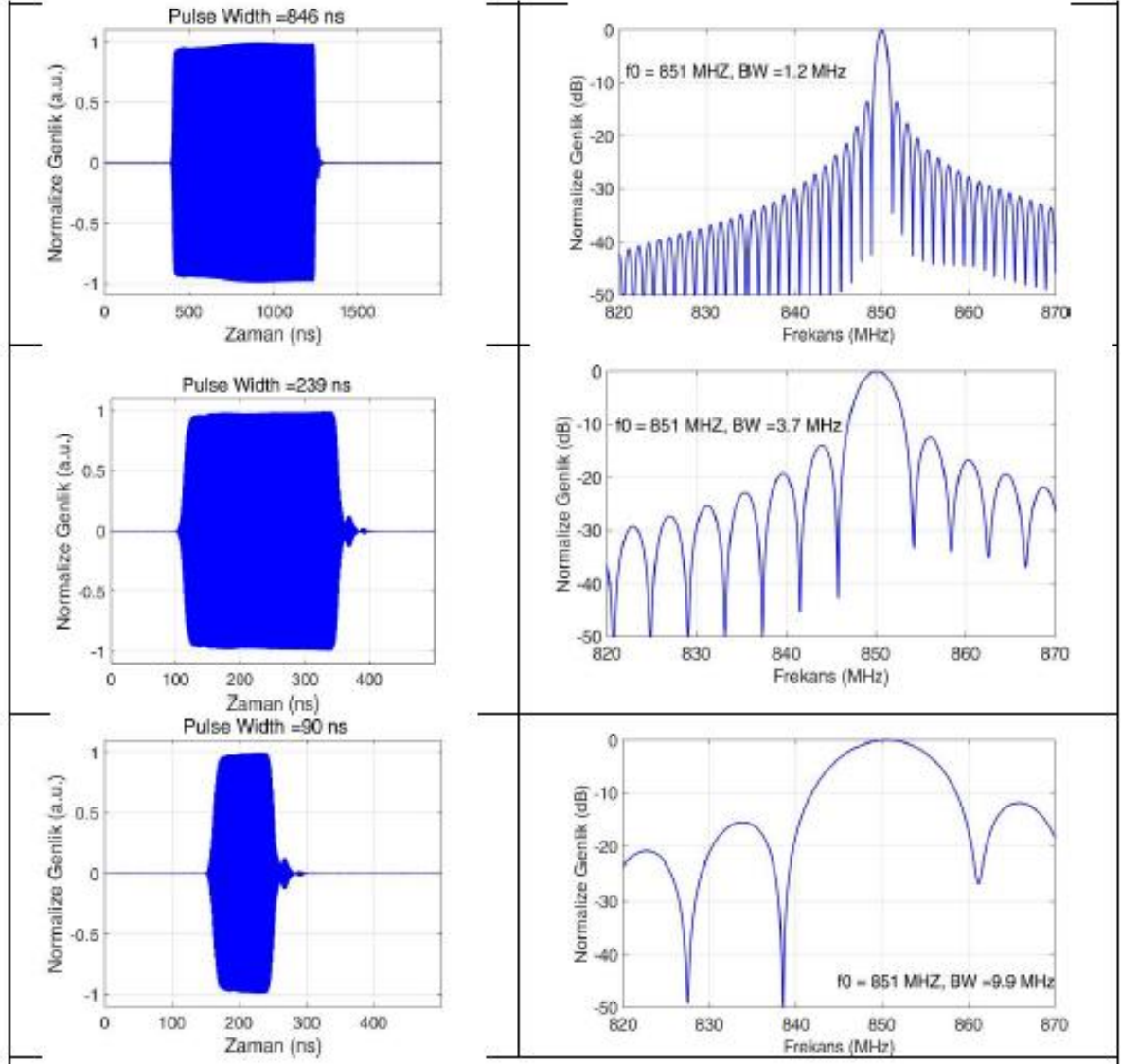
Doku örneği (dana kas dokusu) ile yapılan deneylerde toplanan verilerden çıkarılan görüntü kullanılan örneğin fotoğrafları ile birlikte Şekil 22’de verilmiştir. Bu örnekte işaret toplanmasında dikey yönde 15 mm ve derinlik yönünde 40 mm’lik tarama yapılmıştır. Doku örneğinin kesit görüntüsünden 3 dB sınırları esas alınarak 15 mm × 12 mm olarak ölçülmüş olup kesitin gerçek ölçüleriyle aynıdır.



Şekil 32. Doku (kas dokusu) örneği: (a) tam fotoğrafı, (b) kesit fotoğrafı ve (c) termoakustik deneysel kesit görüntü (-3dB). Kesitin yeri (a)'da kesik çizgi ile belirtilmiştir.

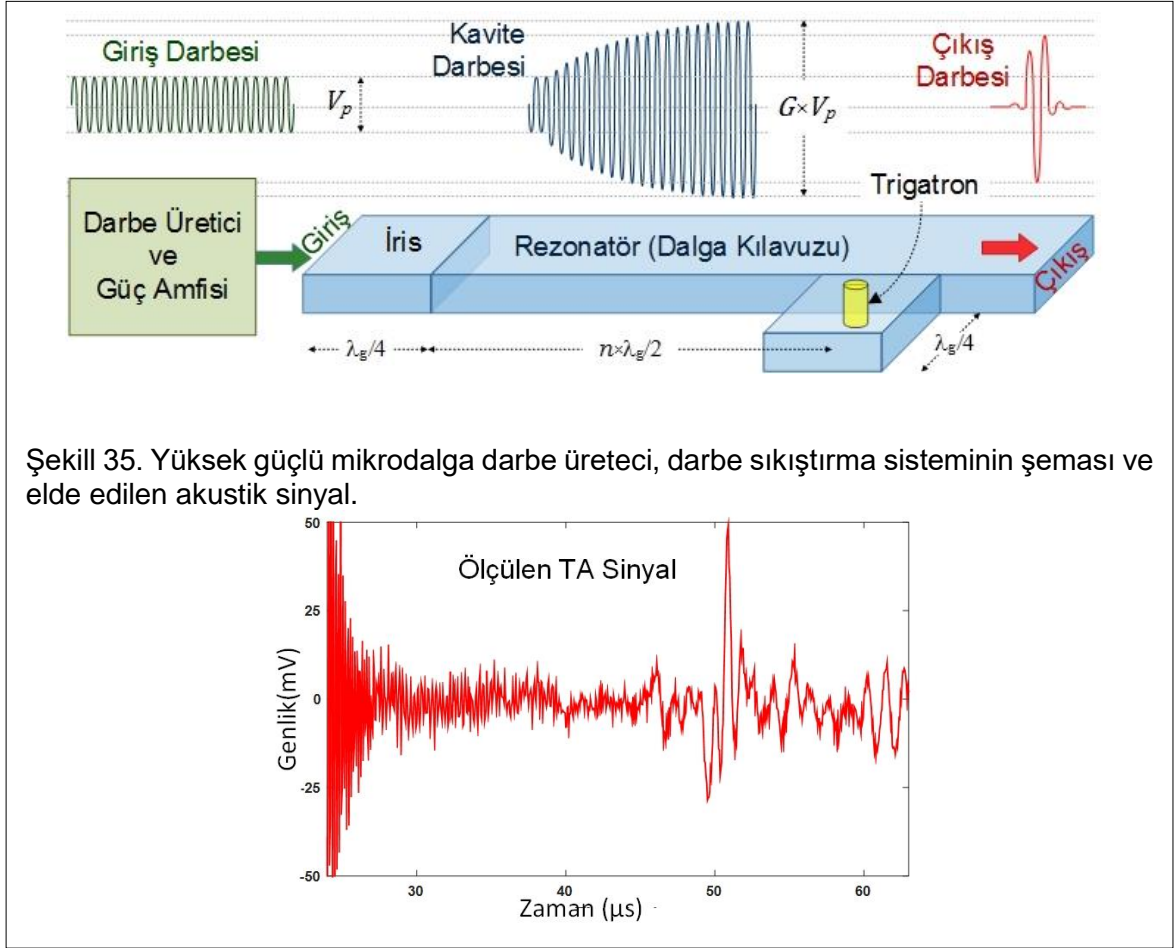


Şekil 33. Sistemin Şematik Gösterimi



Şekil 34. Uygulanan darbe genişliğinin spektral etkisi.

Bir test çalışması olarak, 1.3 GHz darbe sıkıştırıcının 105 ns çıkış darbe süresi ve yaklaşık 45 kW değerindeki çıkış tepe gücüyle oluşturduğu termoakustik dalganın 1 MHz'lik transduser yardımıyla, tel örneği için alınan sinyal Şekil 35' te görülmektedir.

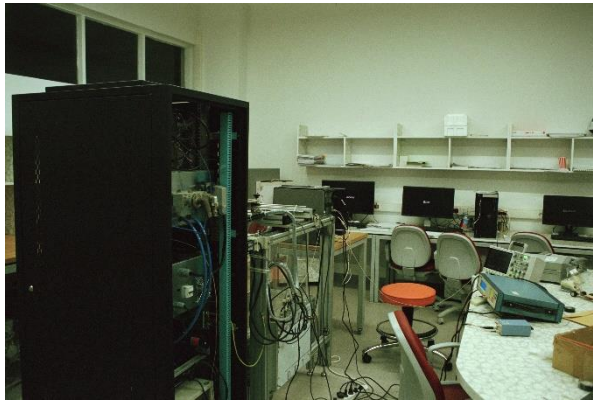


Tablo 2. Darbe sıkıştırma sisteminin parametreleri

Çalışma frekansı (f_0)	1.3 GHz
Giriş gücü (P_0)	~1 kW
Giriş darbe süresi (t_i)	6-15 μ s
Darbe tekrarlama frekansı	1 Hz-10kHz
Güç kazancı (k)	10-20 dB
Tepe çıkış gücü ($P_{out}=kP_0$)	10-20 kW
Çıkış darbe süresi (t_f)	~15-100 ns

İTÜ Bünyesindeki Akustik Algılama Laboratuvarı (AKAL) Fotoğrafları

Projenin deneysel kurulumu İstanbul Teknik Üniversitesinde bulunan Akustik Sinyal Algılama Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuvarın kurulumu, donanım ve yazılımların edinilmesi İTÜ Rektörlüğünce desteklenmiştir. Böyle bir laboratuvarın üniversitemize zorlu bir süreçten sonra kazandırılması gelecek projeler ve öğrenciler için önemli bir alt yapı oluşturmuştur.



Başarım

İP No	İş Paketi Hedefi	Başarı Ölçütü (% , sayı, ifade, vb.)	Gerçekleşme Oranı (%)
1	Veri toplama ve sistem mimarisinin tasarlanması ve benzetimle işlevsel sınanması	Mikrodalga anten kullanan veri toplama ve genel sistem yapısının kavramsal tasarımı ve sayısal sinama sonuçlarının çıkarılması	100
2	Kuramsal ve sayısal çözümlerin geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi	Maliyet/doğruluk bakımından mevcut çözümlere göre daha verimli/doğru sonuçlar veren yansımali sınır koşullarına dayalı analitik bir çözümün geliştirilmesi. Güncel bir bilgisayarda en çok bir kaç saat içinde bir görüntü çıkarabilen sayısal gerçekleştirim yazılımının hazırlanması.	100
3	Mikrodalga Uyarım Yapısı ve Anten Geliştirilmesi	Bu iş paketinde öngörülen çalışmalar önceki rapor dönemlerinde tamamlanmış olup, bu dönemde eniyileme amaçlı olarak daha etkili mikrodalga uyarım amacıyla mevcut dalga kılavuzu adaptör (dikdörtgen prizma) antenden farklı olarak su içinde çalışacak horn yapısında yeni bir anten tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Horn anten beklenildiği gibi daha yönlü olmakla birlikte, içindeki sudaki dielektrik kaybın yönlülükle elde edilen kazanımdan daha fazla olduğu deneysel verilerden görülmüştür. Bu sonuç, dielektrik kaybın mikrodalga uyarım derinliğini sınırlayıcı temel etken olduğunu göstermiştir.	100

4	Transduser ve transduser dizisi geliştirilmesi	Tek kristal piezoelektrik seramik tedariği ile birlikte tekli transduserde ve halka transdüser dizisinin bant genişliğinin artırılması. 64 elemanlı tek kristal seramik ve daha iyileştirilmiş polimerler ile birlikte yeni halka transdüser dizisi üretimi. 128-elemanlı halka transduser dizisi tasarım ve üretimi. Çalışmaların dokümantasyonu.	85
5	Sistemin entegrasyonu ve sınanması	Silindirik tarama sisteminin test edilmesi. Entegre sistemin farklı test fantomları kullanarak noktasal ve kontrast çözünürlüğü, SNR testlerinin yapılması. Sistemin görüntü kalitesinin klinik açıdan (danışmanlar yardımıyla) test sonuçları kullanılarak irdelenmesi. Proje çalışmaları nihai proje raporu olarak dokümente edilmesi.	90

4. ve 5. İş paketlerinin gerçekleştirme oranlarının %100 olmamasının nedeni mikrodalga güç kaynaklarının yeteri kadar ortamı uyarılamamasıdır. Buradaki asıl sorun yüksek güçlü (>100 kW) RF kaynaklarının oldukça pahalı olmasıdır. Bu yüzden projede kullanılan mikrodalga güç kaynağının bütçesine ek olarak İTÜ Rektörlüğü 130.000 TL destek vermiştir. Yapılan deneyler sonucunda daha fazla güce ihtiyaç olduğu ortaya çıktı. Bu problemin çözümü olan yüksek güçte RF kaynakların yurt dışından ithal edilmesi için çok yüksek maliyetler (milyon TL) karşılanamaz bulundu. Ayrıca, elektromanyetik uyarmanın ve akustik tepkinin en optimal senkronizasyonu konusunda çalışma yapılabilmesi için yüksek güçlü RF kaynağa ihtiyaç vardır.



4. SONUÇ

“Meme Kanserinin Tanısı ve İzlenmesi İçin Mikrodalga Uyarımlı Termoakustik Görüntüleme” adlı bu projede mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntüleme (MUTAG) sisteminin gelişmiş ulusal alt yapısı oluşturulmuştur. Bu araştırmada, tamamen yerli olarak tasarlanmış mikrodalga ünitesi üretilmiş ve kalibrasyon ölçümleri yapılmıştır. Elektromanyetik uygulamalardaki hava-su arasındaki optimal güç aktarım sorunsalı, daha önce uygulanmamış yeni bir yöntem olarak tamamıyla su içinde tasarlanan ve gerçekleştirilen mikrodalga anten yardımıyla çözülmüştür. Üretilen yerli akustik transduserlar yardımıyla, akustik algıçların üretim ve çalışma mekanizması (ön empadans uyumlama ve arka yansıma sönümlendirme) ayrıntılı bir şekilde araştırılarak, entegre sistemin tasarım parametreleri güncellenip uyumlaştırma sağlanmıştır. Bilgisayar kontrollü deneysel xyz- yönlü konumlandırma-tarama ünitesi kullanılarak, akustik veriler alınarak mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntüler elde edilmiştir. Ayrıca, tarama ve konumlandırma amaçlı, memenin içine sığabileceği silindirik hazne (açısal ve dikey) üretilmiştir. Kesit tarama yapabilecek çok elemanlı halka transduser dizisi ve tarama sisteminin entegre edileceği platform ulusal kaynaklarla üretilmiştir. Tel ve doku örnekleri için deneysel termoakustik görüntüler elde edilmiştir.

Çok katmanlı düzlemsel ve silindirik yapı için yansımasız ideal sınır koşulları yerine daha gerçekçi olan katmanlar üzerinde süreklilik sınır koşulları altında; ters kaynak probleminin elde edilen analitik çözümü ve homojen ortam için var olan çözümü sayısal benzetim yoluyla karşılaştırılmıştır. Bu çözüm, kartezyen koordinatlarda katmanlı düzlemsel bölge modellemesine uygun deri, meme ve karın bölgesi görüntülemesi; silindirik koordinatlarda ise beyin ve meme kesit görüntülemesi algoritmalarının geliştirilmesinde yararlı olacaktır.

Mevcut projede karşılaşılan mikrodalga yayılımındaki penetrasyon sorunu ve mevcut elektromanyetik güç kaynağı ile elde edilen akustik sinyalin aktif bant içindeki enerjisinin düşüklüğü probleminin; mikrodalga kaynağın gücünün artırılarak çözülmesi beklenmektedir. Bunun içinde, yüksek güçte RF kaynakların yurt dışından ithal edilmesi için çok yüksek maliyetler (milyon TL) ortaya çıkmaktadır. Bu problemi aşmak için, “Çoklu mikrodalga anten ile bölgesel uyarımlı termoakustik görüntüleme sistemi geliştirilmesi” başlıklı yeni 1003 projesi önerilmiştir. Önerilen bu proje kapsamında ulusal kaynaklarla yüksek güçte RF kaynağın üretilmesi ve mevcut projenin sonuçlarının yaygın etkisinin artırılması bağlamında ex vivo ve in vivo deneysel çalışmaların yapılması hedeflenmektedir. Ayrıca bu muhtemel projeyle, şimdiki proje süresince kazanılan insan gücü ve bilgi birikiminin devamlılığı çok önemli ölçüde sağlanacaktır.



Projeden Çıkan Yayınlar:

Ulusal Bildiriler

- 1) Demet Elmas, Banu Uzun, Mithat İdemem, Mustafa Karaman, "Meme ve beyin kesit görüntülemesi için termoakustik dalga denkleminin dairesel katmanlı ortam modeline dayanan ters çözümü," *VIII. URSI-Türkiye 2016 Bilimsel Kongresi ve Ulusal genel Kurul Toplantısı*, 1-3 Eylül 2016, ODTÜ, Ankara.
- 2) Betül Samancı, Ali Temel Hacıhamzaoğlu, Metin Yazgı, Selçuk Paker, Mustafa Karaman, "Mikrodalga Uyarımlı Termoakustik Görüntüleme Sisteminin Geliştirilmesi," *VIII. URSI-Türkiye 2016 Bilimsel Kongresi ve Ulusal genel Kurul Toplantısı*, 1-3 Eylül 2016, ODTÜ, Ankara.
- 3) Hazel Bayındır, Banu Uzun, Mithat İdemem, Mustafa Karaman, "Termoakustik Ters Kaynak Probleminin Katmanlı Düzlemsel Ortam Modeli Kullanılarak Çözümü," *VIII. URSI-Türkiye 2016 Bilimsel Kongresi ve Ulusal genel Kurul Toplantısı*, 1-3 Eylül 2016, ODTÜ, Ankara.
- 4) Demet Elmas, Banu Uzun, Mithat İdemem, Mustafa Karaman, "Çok Katmanlı Silindirik Yapılar İçin Termoakustik Dalga Denkleminin Ters Çözümü," *25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU)*, Antalya, 2017.
- 5) M. Sait Kılınc, Betül Samancı, Ali T. Hacıhamzaoğlu, Metin Yazgı, Selçuk Paker, Aydın Doğan, Fatih Ahıska, Mustafa Karaman, "Termoakustik Görüntüleme Sisteminin Geliştirilmesi: İlk Deneysel Sonuçlar", *25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU)*, Antalya, 2017.
- 6) Hazel Bayındır, Banu Uzun, Mithat İdemem, Mustafa Karaman, "Çok Katmanlı Düzlemsel Ortam İçin Termoakustik Dalga Denkleminin Ters Çözümü," *25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU)*, Antalya, 2017.

Uluslararası Bildiri

- 1) Hazel Bayındır, Demet Elmas, Banu Uzun, Mithat İdemem, Mustafa Karaman "Thermoacoustic image reconstruction based on layered tissue model," *SPIE Medical Imaging*, Orlando, Florida, ABD, 11 - 16 February 2017.
- 2) Demet Elmas, Banu Uzun, Mithat İdemem, Mustafa Karaman "Cross-Sectional Thermoacoustic Imaging Using Multi-Layer Cylindrical Medial," *URSI 2017 GASS*, Montreal, Kanada, 19 - 26 August 2017.

EKLER

Ek-1: Transduser Geliştirilmesi

Ek-2: Niyet Mektupları



5. KAYNAKÇA

- [1] Beard, P. "Review: Biomedical photoacoustic imaging", *Interface Focus*, s.1-29, 2015.
- [2] Bossart, R., P. Brown, J. Mourier, I. V. Syratchev, and L. Tanner, 2004. "High-power microwave pulse compression of klystrons by phase modulation of high-Q storage cavities," *CERN CLIC-Notes*, No. 592.
- [3] Farr, E. G., Bowen, L. H., Prather, W. D., and Baum, C. E., 'Microwave pulse compression experiments at low and high power', *Circuit and Electromagnetic System Design Notes*, No. 63, 2010.
- [4] İdemen M., Alkumru A., "On an inverse source problem connected with photo-acoustic and thermo-acoustic tomographies", *Wave Motion*, 46, 6, s. 595-604, 2012.
- [5] Kruger, R. A., *et. al.*, "Thermoacoustic CT with radiowaves: A medical imaging paradigm, *Radiology*", 211, s. 275-278, 1999.
- [6] Ntziachristos, N., *et. al.*, "Looking and listening to light: the evolution of whole-body photonic imaging", *Nature Biotechnology*, 23, 3, 313-320, (2005).
- [7] Tung Manh, Anh-Tuan Thai Nguyen, Tonni F. Johansen, Lars Hoff 'Microfabrication of stacks of acoustic matching layers for 15 MHz ultrasonic transducers' T. Manh et al. / *Ultrasonics* 54 (2014) 614–620
- [8] Wang, L.V., *et. al.*, "Microwave-induced acoustic imaging of biological tissues", *Review of Scientific Instruments*, 70 (9), s. 3744-3748, 1999.
- [9] Xu M., Wang, L. V., "Universal back-projection algorithm for photoacoustic computed tomography", *Phys. Rev. E*, 71, 016706, 1-7, 2005.
- [10] Yushkov, Y. G., N. N. Badulin, A. P. Batsula, A. I. Mel'nikov, S. A. Novikov, S. V. Razin, and E. L. Shoshin, 2000. "A nanosecond pulse-compression microwave radar," *Telecommunications and Radio Eng.*, Vol. 54, No. 2, 92-98.



TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. MUSTAFA KARAMAN
Proje No:	213E038
Proje Başlığı:	Meme Kanserinin Tanısı ve İzlenmesi İçin Mikrodalga Uyarımlı Termoakustik Görüntüleme
Proje Türü:	1003 - Öncelikli Alanlar (2. Aşama)
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	BANU UZUN, ÖZGÜR ÖZDEMİR, METİN YAZGI, SERKAN ŞİMŞEK, AYDIN DOĞAN, MUHAMMET İRŞADI AKSUN
Danışmanlar:	ALİ YAPAR, MUSTAFA TUNAYA KALKAN, MEHMET MİTHAT İDEMEN, TÜRKAN İKİZCELİ
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İSTANBUL TEKNİK Ü. ELEKTRİK-ELEKTRONİK F. ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2014 - 01/09/2017
Onaylanan Bütçe:	2156533.0
Harcanan Bütçe:	2035847.12
Öz:	<p>Termoakustik görüntüleme, iyonize etkisi olmayan, noktasal ve kontrast çözünürlüğü yüksek yeni bir hibrit görüntüleme modalitesi olup kanserinin erken tanısı ve izlenmesi için uygun bir tekniktir. Bu teknik bilimsel, teknolojik ve ticari potansiyeli olan henüz klinik bir araç haline gelmemiş bir güncel bir konudur. ??Meme Kanserinin Tanısı ve İzlenmesi İçin Mikrodalga Uyarımlı Termoakustik Görüntüleme?? adlı bu projede mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntüleme (MUTAG) sisteminin gelişmiş yerli alt yapısı oluşturulmuştur.</p> <p>MUTAG sisteminde görüntülenmek istenen ortamı aydınlatması için mikrodalga darbe üretici-kuvvetlendirici ünitesi tamamlanmış ve karakterizasyon ölçümleri yapılmıştır. Standart mikrodalga antenin hava-su arasındaki empedans uyumsuzluğu problemi, literatürden farklı olarak tamamen su içinde çalışan mikrodalga anten tasarlanıp gerçekleştirilerek çözülmüştür. Bilgisayar kontrollü deneysel xyz- yönlü konumlandırma-tarama ünitesi tamamlanmış test edilmiştir. Alt üniteler birlikte kullanılarak, deneysel termoakustik işaret toplanmış ve böylece mikrodalga uyarımlı termoakustik görüntü elde edilmiştir.</p> <p>Termoakustik görüntüleme için yüksek görüntü çözünürlüğü veren, maliyeti düşük, katmanlı doku yapısı için yeni kuramsal ve sayısal çözümleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu amaçla, termoakustik dalga denkleminin çözümünde, meme dokusu katmanlı olarak modellenmiştir. Yansımaz ideal sınır koşulları yerine daha gerçekçi olan katmanlar üzerinde süreklilik sınır koşulları kullanılmıştır. Termoakustik dalga denkleminin çok katmanlı silindirik ve düzlemsel doku yapısı için ileri ve ters analitik çözümleri elde edilmiştir. Ayrıca, çok katmanlı yapılar için sayısal olarak benzetimi yapılmıştır.</p> <p>Meme dokusunun kesit taramasında termoakustik sinyali alacak olan transduser geliştirmede ön empedans uyumlama ve arka yansıma sönümlendirme katmanları tasarım ve uygulama çalışmaları yürütülmüştür. Bunun sonucunda %60 oransal bant genişliğine sahip 1 MHz'lik bir biyomedikal transduser elemanı yapılarak, deneysel testleri tamamlanmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamında mevcut bilgisayar kontrollü deneysel konumlandırma- kesit tarama ünitesine ek olarak memenin içine sığabileceği silindirik hazne (açısal ve dikey) kullanılarak tarama sistemi tamamlanmıştır. Kesit tarama yapabilecek çok elemanlı halka transduser dizisi ve tarama sisteminin entegre edileceği platform ulusal kaynaklarla üretilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Termoakustik görüntüleme, fotoakustik görüntüleme, meme kanseri tespiti.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır