

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PIEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN GEOMETRİLERİNE
VE FREKANSLARINA GÖRE ULTRASONİK ALAN
ETKİLERİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ**

MİTHAT ÖZDİNGİŞ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ




PIEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN GEOMETRİLERİNE
ve FREKANSLARINA GÖRE ULTRASONİK ALAN
ETKİLERİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ

MİTHAT ÖZDİNGİŞ

Prof.Dr. Yunus Emre ERDEMLİ
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Osman EROĞUL
Jüri Üyesi, TOBB Üniv.

Prof.Dr. Ali TANGEL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, tedavi ve tanı amaçlı olarak kullanılabilen PZT dönüştürücülerin geometrileri ile ultrasonik frekans bölgelerine göre akustik alan etkilerinin incelenmesi amacıyla prob üretmek ve üretilen problemlerin ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda desteklerini gördüğüm, çalışmalarına yön veren danışmanım Prof. Dr. Yunus Emre EMRELİ'ye, tez çalışmamı başlatmam için işyerimde gerekli kolaylığı sağlayan, kritik anlarda yardımlarını esirgemeyen ve çalışmamı yön veren işyeri danışmanım Dr. Baki KARABÖCE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Akademik gelişimi destekleyen, çalışanlarını bu yönde motive eden, gerekli kolaylığı sağlayan ve bünyesinde bulunmaktan gurur duyduğum TÜBİTAK Başkanlığı'na, TÜBİTAK UME Enstitü Müdürü Dr. Mustafa ÇETİNTAŞ'a ve Fizik Grubu Teknik Müdür Yardımcısı Doç. Dr. Ramiz HAMİD'e teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenciliğimin ilgili süreçlerinde, gerekli kolaylığı sağlayan ve yardımcı olan Fen Bilimleri Enstitüsü öğrenci işleri başta olmak üzere tüm enstitü çalışanlarına teşekkür ederim.

Babam Tayyar ve annem Feriz'e teşekkür ederim.

Eşim Hediye ile kızlarım Ayşenur ve Saliha'ya çalışmam süresince sağladıkları olanak ve kendilerinden esirgediklerime gösterdikleri sabır nedeniyle teşekkür ederim.

Bütün hayatı boyunca bana yön veren büyükbabamı rahmetle anıyorum ve bu yüksek lisans çalışmamı, ona, eşime ve kızlarıma adıyorum.

Temmuz – 2019

Mithat ÖZDİNGİŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ	1
1. AKUSTİK DALGA VE PİEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLER	4
1.1. Akustik Dalga	4
1.2. Akustik Alan Etkisi.....	7
1.3. Piezoelektrik Malzemeler ve Dönüştürücüler.....	11
1.4. Piezoelektrik Dönüştürücülerin Elektriksel Modeli.....	12
2. ULTRASONİK PROB TASARIMI VE ÜRETİMİ.....	15
2.1. Ultrasonik Prob	15
2.1.1. Prob tasarımı ve teknik çizimler	15
2.1.2. Prob üretimi.....	22
2.1.3. Empedans uyumlaştırma devresi tasarımı ve üretimi	28
3. ULTRASONİK PROB ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	45
3.1. Ölçüm Sistemi.....	45
3.2. Ölçümlerin Alınması.....	47
3.3. Basınç Alanı Ölçüm Sonuçları.....	53
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	106
EKLER.....	111
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	114
ÖZGEÇMİŞ	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Mekanik sistemlerin elektriksel eşleniği	5
Şekil 1.2.	Akustik yakın ve uzak alan	8
Şekil 1.3.	Ters kare yasası	8
Şekil 1.4.	Akustik dipolün yayılma karakteristiği	10
Şekil 1.5.	Kuvars kristal yapısı.....	11
Şekil 1.6.	Butterworth-Van Dyke modeli.....	14
Şekil 2.1.	Dikdörtgen ve eşkenar dörtgen PZT'ler	16
Şekil 2.2.	Buhler IsoMet 1000 seramik kesme.....	17
Şekil 2.3.	Kesilen dönüştürücülerin boyutları	17
Şekil 2.4.	Ultrasonik probun parçaları.....	18
Şekil 2.5.	Ultrasonik probun montaj sırasına göre parçaları	18
Şekil 2.6.	Eşkenar dörtgen ve dikdörtgen 1 MHz PZT yuvaları	19
Şekil 2.7.	Ultrasonik probun arka gövdesi	20
Şekil 2.8.	Vidalama aparatı	21
Şekil 2.9.	Kablo sabitleyici.....	21
Şekil 2.10.	Probu tasarlanan görünüşleri.....	22
Şekil 2.11.	Kesilmiş dikdörtgen ve eşkenar dörtgen PZT'ler	23
Şekil 2.12.	PZT yuvasının pürüzlü iç yüzeyi	24
Şekil 2.13.	PZT yuvasına yerleştirilmiş dönüştürücü.....	24
Şekil 2.14.	Destekleme malzemeleri	25
Şekil 2.15.	Hazırlanmış destek malzemesi	25
Şekil 2.16.	Santrifüj cihazı	26
Şekil 2.17.	Destekleme malzemesi yapışmış ve temizlenmiş PZT yuvası.....	26
Şekil 2.18.	Su yalıtımı yapılmış PZT yuvası.....	27
Şekil 2.19.	Arka gövdeye su yalıtımı işlemi.....	27
Şekil 2.20.	Ultrasonik prob.....	28
Şekil 2.21.	L tipi empedans uyumlaştırma devresi.....	29
Şekil 2.22.	L tipi empedans uyumlaştırma devreleri.....	29
Şekil 2.23.	Agilent 4395A eşdeğer devre ölçüm ekranı	31
Şekil 2.24.	Agilent 4395A kaydedilmiş ölçüm ekranı	31
Şekil 2.25.	Kablolu CR1 (a) faz açısı ve (b) empedans ölçümleri	35
Şekil 2.26.	Kablolu CR1 (a) rezistif direnç ve (b) reaktans ölçümleri	36
Şekil 2.27.	Uyumlaştırmalı CR1 (a) faz açısı ve (b) empedans ölçümleri	37
Şekil 2.28.	Uyumlaştırmalı CR1 (a) rezistif direnç ve (b) reaktans ölçümleri.....	38
Şekil 2.29.	Hava tipi indüktans.....	39
Şekil 2.30.	Empedans uyumlaştırma devresi.....	41
Şekil 2.31.	RC2 model probun empedans parametrelerinin birlikte gösterimi	43
Şekil 2.32.	RC1 model probun empedans parametrelerinin birlikte gösterimi	44
Şekil 3.1.	Ultrasonik basınç alanı ölçüm sistemi.....	45
Şekil 3.2.	İğne uçlu HIFU hidrofön.....	46
Şekil 3.3.	X, Y ve Z eksenleri	48
Şekil 3.4.	Basınç alanı ölçüm yazılımı ara yüzleri	49

Şekil 3.5. RC1 probunun X eksenini basınç alanı ölçümü	49
Şekil 3.6. RC1 probunun Y eksenini basınç alanı ölçümü	50
Şekil 3.7. RC1 probu için Z eksenini basınç alanı ölçümü.....	51
Şekil 3.8. Odak noktasında X eksenini ölçümleri (1 MHz problemler)	54
Şekil 3.9. Odak noktasında X eksenini ölçümleri (2 MHz problemler).....	55
Şekil 3.10. Odak noktasında Y eksenini ölçümleri (1 MHz problemler).....	55
Şekil 3.11. Odak noktasında Y eksenini ölçümleri (2 MHz problemler).....	56
Şekil 3.12. Odak noktasında Z eksenini ölçümleri (1 MHz problemler)	57
Şekil 3.13. Odak noktasında Z eksenini ölçümleri (2 MHz problemler)	58
Şekil 3.14. Dikdörtgen dönüştürücülü probun XY ölçümü (1 MHz).....	60
Şekil 3.15. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü probun XY ölçümü (1 MHz).....	61
Şekil 3.16. RH1 probunun Z ekseninde farklı noktalarda XY ölçümleri.....	62
Şekil 3.17. Dairesel dönüştürücülü 1 MHz probun XY ölçümü	63
Şekil 3.18. CR1 probunun Z ekseninde odakta ± 3 mm'de XY ölçümü.....	64
Şekil 3.19. CR1 probunun Z ekseninde odakta $\pm 1,5$ mm'de XY ölçümü.....	65
Şekil 3.20. Dairesel dönüştürücülü 2 MHz probun XY ölçümü	66
Şekil 3.21. RC2 probunun Z ekseninde odak ± 3 mm'de XY ölçümleri	67
Şekil 3.22. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü 2 MHz probun XY ölçümü.....	68
Şekil 3.23. RH2 probunun Z ekseninde farklı noktalarda XY ölçümleri.....	69
Şekil 3.24. Dairesel dönüştürücülü 2 MHz probun XY ölçümü	70
Şekil 3.25. CR1 model probun Z ekseninde odak $\pm 1,5$ mm XY ölçümü.....	71
Şekil 3.26. CR2 model probun Z ekseninde odak ± 3 mm XY ölçümü.....	72
Şekil 3.27. Problemlerin birleştirilmiş XY düzlemi ölçümleri (2 MHz).....	73
Şekil 3.28. Dikdörtgen dönüştürücülü 1 MHz probun XZ ölçümü.....	73
Şekil 3.29. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü 1 MHz probun XZ ölçümü.....	74
Şekil 3.30. Dikdörtgen dönüştürücülü 2 MHz probun XZ ölçümü.....	75
Şekil 3.31. Dairesel dönüştürücülü 1 MHz probun XZ ölçümü.....	76
Şekil 3.32. Dairesel dönüştürücülü 2 MHz probun XZ ölçümü.....	77
Şekil 3.33. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü 2 MHz probun XZ ölçümü	78
Şekil 3.34. RC1 probunun X ekseninde odakta YZ ölçümü	78
Şekil 3.35. RC1 probunun $X < 1$ mm mesafede YZ ölçümü	79
Şekil 3.36. RC1 probunun $X = 202$ mm mesafede YZ ölçümü	80
Şekil 3.37. RC1 probunun $X = 22$ mm mesafede YZ ölçümü	80
Şekil 3.38. RC1 probunun $X = 40$ mm mesafede YZ ölçümü	81
Şekil 3.39. RH1 probunun X odakta YZ ölçümü	81
Şekil 3.40. RH1 probunun $X = -14$ mm mesafede YZ ölçümü	82
Şekil 3.41. RH1 probunun $X = 7$ mm mesafede YZ ölçümü	83
Şekil 3.42. RH1 probunun $X = 22$ mm mesafede YZ ölçümü	84
Şekil 3.43. RH1 probunun $X = 29$ mm mesafede YZ ölçümü	84
Şekil 3.44. CR1 probunun X odak mesafede YZ ölçümü	85
Şekil 3.45. CR1 probunun $X < 2$ mm mesafede YZ ölçümü	86
Şekil 3.46. CR1 probunun $X = 170$ mm mesafede YZ ölçümü	86
Şekil 3.47. CR1 probunun $X = 22$ mm mesafede YZ ölçümü	87
Şekil 3.48. CR1 probunun $X = 40$ mm mesafede YZ ölçümü	88
Şekil 3.49. CR1 probunun $X = 45$ mm mesafede YZ ölçümü	88
Şekil 3.50. CR1 probunun $X = 7$ mm mesafede YZ ölçümü	89
Şekil 3.51. RC2 probunun X odak mesafede YZ ölçümü	90
Şekil 3.52. RC2 probunun $X < 1$ mm mesafede YZ ölçümü	91

Şekil 3.53. RC2 probunun X=52 mm mesafede YZ ölçümü	91
Şekil 3.54. RC2 probunun X=89 mm mesafede YZ ölçümü	92
Şekil 3.55. RC2 probunun X=241 mm mesafede YZ ölçümü	93
Şekil 3.56. RH2 probunun X odak mesafede YZ ölçümü	93
Şekil 3.57. RH2 probunun X=20 mm mesafede YZ ölçümü	94
Şekil 3.58. RH2 probunun X=25 mm mesafede YZ ölçümü	94
Şekil 3.59. RH2 probunun X=44 mm mesafede YZ ölçümü	95
Şekil 3.60. RH2 probunun X=49 mm mesafede YZ ölçümü	96
Şekil 3.61. CR2 probunun X odak mesafede YZ ölçümü	96
Şekil 3.62. CR2 probunun X=291 mm mesafede YZ ölçümü	97
Şekil 3.63. CR2 probunun X=106 mm mesafede YZ ölçümü	98
Şekil 3.64. CR2 probunun X=111 mm mesafede YZ ölçümü	98
Şekil 3.65. CR2 probunun X=129 mm mesafede YZ ölçümü	99
Şekil 3.66. CR2 probunun X=134 mm mesafede YZ ölçümü	100
Şekil 3.67. CR2 probunun X<1 mm mesafede YZ ölçümü	100
Şekil 3.68. RH1 probunun 2. harmonik XY ölçümü	101
Şekil 3.69. RC1 probunun 2. harmonik XY ölçümü	101
Şekil 3.70. RH1 probunun harmoniklerinin XY ölçümü	102

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Dikdörtgen 1 MHz PZT'lerin eşdeğer devre değerleri	32
Tablo 2.2. Dikdörtgen 2 MHz PZT'lerin eşdeğer devre değerleri	32
Tablo 2.3. Probların hesaplanan ve ölçülen empedans değerleri	34
Tablo 2.4. Uyumlaştırma devresi elemanlarının tasarlanan değerleri	40
Tablo 2.5. Probların hesaplanan ve gerçekleştirilen empedans değerleri.....	41
Tablo 2.6. Ultrasonik problemlerin ölçülen faz açısı değerleri	42
Tablo 3.1. Odak noktası tarama aralıkları (1 MHz)	52
Tablo 3.2. Odak noktası tarama aralıkları (2 MHz)	52
Tablo 3.3. Probların taraması için eksen değerleri (1 MHz)	53
Tablo 3.4. Probların taraması için eksen değerleri (2 MHz)	53

PIEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN GEOMETRİLERİNE VE FREKANSLARINA GÖRE ULTRASONİK ALAN ETKİLERİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, tedavi ve teşhis amaçlı olarak kullanılan ultrasonik sinyallerin üretiminde kullanılan piezoelektrik dönüştürücülerin geometrilerinin ve frekanslarının üretilen sinyale bağlı olarak oluşturduğu akustik alan etkisinin incelenmesidir. Öncelikle, çalışmada kullanılacak ultrasonik problar üretilmiştir. Bu problemlerin üretim aşamaları açıklanmıştır. Mekanik üretimleri tamamlanan problemlerin elektriksel empedans uyumlaştırma devreleri tasarlanmıştır. Tasarlanan uyumlaştırma devreleri üretilerek ultrasonik problar çalışmada kullanılabilir şekilde getirilmiştir. Ölçüm sistemi, ölçüm sistemindeki manuel ve otomatik kontrol özellikleri ile hazırlanmıştır. Farklı geometrilerde ve frekanslarda üretilen ultrasonik problar tek tek sisteme yerleştirilerek bilgisayardaki özel bir yazılımla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Alınan ölçümler kaydedilmiştir. Yapılan bu çalışma ile teşhis ve tedavi amaçlı ultrasonik problemlerin geometri ve frekans parametreleri ile akustik alan etkileri karşılaştırılmıştır. Literatürdeki teorik model ve ölçüm sonuçları arasındaki ilişki incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akustik Alan Etkisi, Elektriksel Emepedans Uyumlaştırma, Piezoelektrik Dönüştürücüler, Ultrasonik Prob Üretimi.

CHARACTERIZATION OF ULTRASONIC FIELD EFFECTS DEPENDING ON THE GEOMETRIES AND FREQUENCIES OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the acoustic field effect of the piezoelectric transducers used in the production of ultrasonic signals used for treatment and diagnostic purposes and the frequency of the generated signals depending on the generated signal. First of all, ultrasonic probes to be used in the operation have been produced. The production stages of these probes are explained. Matching circuits were designed for completed probes. Matching circuits are produced and ultrasonic probes can be used for working. Measuring system is prepared with manual and automatic control features in the measuring system. Ultrasonic probes produced in different geometries and frequencies were placed in a single system and measurements were taken from the computer with a special software. Received measurements were recorded. In this study, the geometry and frequency parameters of ultrasound probes for diagnostic purposes and acoustic field effects were compared. The relationship between the theoretical model and the measurement results was investigated.

Keywords: Acoustic Field Effect, Electrical Impedance Matching, Piezoelectric Transducers, Ultrasonic Probe Production.

GİRİŞ

Bu tez ile medikal alanda teşhis ve tedavi amaçlı olarak kullanılan piezoelektrik dönüştürücülerin geometrileri ve frekanslarına göre akustik alan etkilerinin karakterizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla; 1 MHz ve 2 MHz merkez frekanslarına sahip medikal dönüştürücülerden dikdörtgen, eşkenar dörtgen ve dairesel geometrilerde kesilerek üretilen problemlerden su ortamında ölçümler alınmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu bölümde, tez konusu hakkında kısa bir literatür özeti verilmekte ve tez bölümleri tanıtılmaktadır.

Piezoelektrik fikri 20.yy başlarında Pierre ve Jacque Currie kardeşler tarafından bulunmuştur [1]. Currie kardeşler, Fransa Sorbone Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmalarında kristal yapı malzemelerde ısının kristal yapıyı değiştirerek elektriklenmeye sebep olduğunu gördüler ve buna piro-elektrik özellik adını verdiler. Buradan yola çıkarak dış etkenlerin kristal malzeme üzerindeki etkilerini araştıran Currie kardeşler, basınç değişimlerinin de aynı etkiyi sağladığını ve tersine uygulamada ise elektriğin kristal malzemelerde büzülme ve genişmeye sebep olduğunu buldular. Piezoelektrik adını verdikleri kristal malzemelerin bu özelliği akustik basınç etkisi olarak bilinmektedir ve su altı radarları, medikal tedavi ve görüntüleme ile tahribatsız muayeneye kadar farklı alanlardaki çalışmalarda kullanılmaktadır.

Sesin üretimi, iletimi ve etkilerini inceleyen bilim dalı akustiktir. Ses sadece işitebildiğimiz bölgeyi kapsamamaktadır. İşitme bölgesinin altındaki frekanslara infrason ve üstüne ise ultrason adı verilmektedir. Akustik alan etkisini ses dalgaları oluşturmaktadır ve sesin bir dalga olduğu fikri ise su dalgalarının gözlemlenmesi ile ortaya çıkmıştır. Yunan ve Roma filozofları ile başlayan bu fikir yüzyıllar boyunca olgunlaşarak gelişmiş ve 17.yy.da akustiğin babası olarak bilinen Fransız müzisyen Mersenne'in duyulabilir ses tonunu kesin olarak tanımlayan fikriyle pekiştirilmiştir [2].

Su dalgalarıyla karşılaştırılan ses dalgalarının havada sabit bir hızla ilerlediği fikri yanında sesin köşelerde büküldüğü ve yayıldığı fikri su dalgalarının gözlemlenmesiyle ortaya atılmıştır. Bununla birlikte, Robert Boyle tarafından yapılan deneyle sesin iletimi için havanın gerekliliği ortaya çıkarılmıştır [3]. Mersenne'in çağdaşı Gassendi tarafından ise, sesin hızını atomların hızının meydana getirdiği ve birim zamanda yayılan atom sayısının sesin frekansı olduğu fikri ortaya atılmıştır.

Işın ve dalga teorileri optik ve akustik bilimlerinde büyük rol oynamışlardır. Dalga teorileriyle ilgili karmaşık bazı durumlara, Reynolds [4] ve Rayleigh [5, 6] tarafından optik ve matematiksel yaklaşımlarla ya doğrudan veya dolaylı olarak kabul görmüş çözümler üretilmiştir.

Sesin yayıldığı ortamdaki parçacıklara basınç uygulayarak yayılmasıyla ilgili matematiksel teori Isaac Newton tarafından ileri sürülmüştür [7]. Ancak, matematiksel ve fiziksel açıdan daha güçlü kavramlarla oluşturulan sesin yayılımı teorisi Euler, Lagrange ve d'Alembert tarafından 18.yy.da geliştirilmiş olup [8], kütlelerin korunumu, akışkanlarda hareket, basınç ve yoğunluk arasındaki ilişkilere ait modeller ve teoriler günümüze kadar gelmektedir.

Ses, titreşebilir bir kaynak vasıtasıyla üretilen esneme özelliğine sahip bir ortamdaki (hava, su, katı v.b.) osilasyonlar ve basınç farklarının sonucu oluşarak boyuna yayılan dalgalardır. Ses dalgalarını tanımlamak için parametreler vardır. Bu parametrelerden öne çıkanlar; genlik, frekans, dalgaboyu, hız, alan etkileri (serbest alan, yakın alan, uzak alan, doğrudan alan, reverberant alan), ses gücü ve yoğunluğu ile ses basıncı seviyesidir.

Akustik basınç alan etkisini üretmek için kullanılan malzemeler dönüştürücü olarak adlandırılmıştır [9, 10]. Günümüzde, dönüştürücüler ile medikal alanda yenilikçi tedavi ve teşhis amaçlı çalışmalar yapılmakta ve bu çalışmalarda uygulanacak doz ve ölçüm standartları konuları öne çıkmaktadır [9, 11]. Son otuz yıl içerisinde yapılan çalışmalarda; dönüştürücü geometrileri, uygulanan güç ve frekans parametreleri ile akustik alan etkisi arasındaki ilişkiler belirlenmiş ve böylece ilgili standartların oluşması için önemli mesafe alınmıştır [12-20].

Akustik kaynaktan alınan sinyallerin, genlik ve geometrileri arasındaki ilişkiyi incelerken boyutların da etkisinin değerlendirilmeye alınması gerektiği, özellikle dikdörtgen dönüştürücülerin alan etkilerinin modellenmesinin zorluğu ortaya çıkmaktadır [12]. Farklı geometrilere (kare, daire, dikdörtgen, küresel ve halka şekilli) sahip dönüştürücüler ve uygulanan sinyallerin sürekli veya darbeli olmasının akustik basınç alanı karakterizasyonu üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalarda; yakın-uzak alan etkileri ve yanal saçılmalar arasındaki farklılıklar [13-16], görüntü kalitesi ve harmonikler arasındaki ilişki [17, 18], dönüştürücü dizilerinde geometri, boyut ve frekans parametrelerinin ilişkisi [19], odaklanmış bölgedeki doğrusal olmayan dalga etkileri incelenmiştir [20]. Bu çalışmalarda, geometriye bağlı olarak farklı teorik, sayısal ve deneysel modelleme yöntemleri kullanılmıştır [12-23].

Bu tez kapsamında, iki farklı frekans (1 MHz, 2 MHz) ve üç ayrı geometride (dikdörtgen, eşkenar dörtgen, dairesel) toplamda altı adet piezoelektrik dönüştürücüden, tekli dönüştürüye sahip özgün problemler tasarlandı ve üretildi. Ayrıca, bu problemlerin deneysel ölçümlerinde kullanılmak üzere, yeni empedans uyumlaştırma devreleri tasarlandı ve üretildi. Özel olarak; eşkenar dörtgen (romboid) geometrili dönüştürücünün üretimi ve ilgili teoriyle de uyumlu deneysel ölçüm sonuçları, bu tez çalışması ile literatüre kazandırılmıştır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen problemlerin akustik basınç alanı karakterizasyonu için ilgili ölçümler, TÜBİTAK UME Medikal Metroloji Laboratuvarı'ndaki ölçüm sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, piezoelektrik dönüştürücüler ve akustik dalga teorisi hakkında genel bilgilendirme yapılmaktadır. Bölüm 2'de problemlerin tasarım ve üretim süreçlerine yer verilmektedir. Bölüm 3'te geliştirilen problemlerin ölçüm sonuçları ile akustik basınç alanı karakterizasyonu değerlendirilmektedir. Tez çalışmasının sonuçları, katkıları ve sonraki çalışmalarla ilgili öneriler son bölümde sunulmaktadır.

1. AKUSTİK DALGA VE PİEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

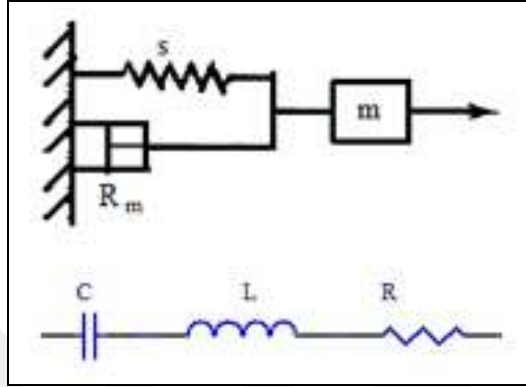
Bu bölümde, akustik dalga hakkında genel bilgiler, temel denklemler, akustik dalga dönüştürücü piezoelektrik malzemelerin yapısı ve bu dönüştürücülerin elektriksel modeli hakkında sunulan bilgiler [32] referansından derlenmiştir.

1.1. Akustik Dalga

Esnek akışkan bir ortamda basınç değişimleriyle ilerleyen akustik dalgalar işitebildiğimiz ses bölgesinde mekanik dalgalardır. Yetişkin bir insan için 20 Hz – 20 kHz aralığındaki frekans bölgesi işitilebilir ses bölgesidir. 20 kHz'in üzerindeki bölge ultrasonik ve 20 Hz altındaki bölge ise infrasonik bölge olarak isimlendirilmektedir. Akustik ile ilgili titreşimler temelde sinüzoidal dalgalardır. Eğer yaya bağlı sıkıştırılmış bir kütle serbest bırakılırsa titreyecektir. Bu titreşimlerin zamanda değişimi ölçüldüğünde sinüzoidal olduğu görülür. Bu tip sinüzoidal titreşimler basit harmonik titreşimler olarak adlandırılmaktadır. Akustik dalgalar basit osilatörler olarak modellenabilir.

Mekanik reaktansın yok edildiği açılmal frekansa mekanik rezonans frekansı denilir. Bu frekansta mekanik empedans en az değerindedir ve mekanik empedansın gerçek kısmına eşittir. Güç değeri ise rezonans frekansında en yüksek seviyesindedir. Farklı frekans çeşitlerindeki periyodik kuvvetlerle hareket ettirilebilen mekanik sistemler, periyodik kuvvetlerle sürülme şekillerine bağlı olarak farklı sınıflarla ifade edilirler. Sistem bazı durumlarda yalnız merkez frekansında çalıştırılmak istenebilir. Bu durumda osilatörün mekanik direnci küçükse diğer frekanslarda görece olarak yüksek bir empedans olacağından sistem yalnızca rezonans frekansı yakınında güçlü bir şekilde tepki verecektir. Başka bir kullanım şekli ise sistemin geniş bir frekans aralığına az çok aynı şekilde cevap vermesini gerektirir. Mikrofon, hoparlör, hidrofön ve bazı sonar dönüştürücüleri gibi elektro-akustik dönüştürücülerin vibratör elemanlarını buna örnek olarak verebiliriz.

Mekanik sistemler, elektriksel olarak Şekil 1.1’de görüldüğü gibi modellenebilirler. Elektriksel sistemlerdeki parametrelerden akım, elektriksel yük ve uygulanan gerilimin mekanik sistemlerdeki karşılıkları sırasıyla hız, yer değiştirme miktarı ve kuvvettir. Mekanik sistemlerin elektriksel empedans eşlenikleri oluşturulmak istediğinde, mekanik direnç (R_m) ile elektriksel direnç (R), kütle (m) ile elektriksel indüktans (L) ve mekanik sertlik (s) ile elektriksel kapasitans (C) eşleşebilir.



Şekil 1.1. Mekanik sistemlerin elektriksel eşleniği

Ses dalgası, viskoz olmayan sıvı ortamda boyuna dalga şeklinde yayılır. Moleküller geriden ileriye doğru dalganın ilerlediği yönde hareket ederek sıkışma ve gevşeme şeklinde dalgayı oluşturur. Bu şekilde enerji transferi sağlanır. Enerji kinetik veya potansiyel enerji şeklinde taşınır. Sıvı parçacıklarının taşınması kinetik enerji iken sıvının sıkışması potansiyel enerjidir. Akustik enerji anlık ve ortalama enerji yoğunluğu şeklinde ifade edilir. Herhangi bir zamanda sıvının her yerinde eşit olmayan, parçacığın hızına ve akustik basıncına bağlı fonksiyona anlık enerji yoğunluğu denir ve birimi J/m^3 tür. Ses dalgasının ilerlediği doğrultudaki ortalama enerji akışına ise akustik yoğunluk denir ve birimi W/m^2 ’dir.

Ortamdaki akustik basıncın parçacık hızıyla ilişkisine akustik empedans adı (z) verilmektedir. MKS birim sisteminde akustik empedansın birimi $Pa \cdot s/m$ ’dir. Bunun yanında akustik empedansın birimi olarak, akustik ölçümlerin öncülerden Baron Rayleigh’e saygıdan rayl de kullanılmaktadır. $1 \text{ rayl} = 1 \text{ Pa} \cdot s/m$ ’dir.

$$z = \frac{p}{u} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de görüldüğü üzere, akustik basıncın parçacık hızına oranı akustik empedanstır. Bu denklemde; p akustik basıncı ve u parçacık hızını temsil etmektedir. Akustik empedansın büyümesi parçacık hızının azalmasına bağlıdır. Bu sebeple, akustik empedans, ortamın akustik dalğanın ilerlemesine karşı gösterdiği dirençtir. Akustik empedansın, ortam yoğunluğu (ρ_0) ve dalga hızı (c) ile ilişkisi Denklem (1.2)'de verilmiştir.

$$z = \rho_0 c \quad (1.2)$$

Akustik empedans, ilerleyen düzlemsel dalgalar için ortamın gerçek bileşenidir. Ancak duran düzlem dalgaları veya ayırık yönlü dalgalar için Denklem (1.3)'de verildiği gibi karmaşık bileşene de sahip olmaktadır. Denklemdeki; r akustik direnç ve x ise akustik reaktans olarak adlandırılır.

$$z = r + jx \quad (1.3)$$

Yoğunluk ve dalga hızı ortama göre farklılık gösterir. 1 atmosfer basınç (101325 Pa) altında 20 °C'deki distile su içerisinde sesin hızı 1482,3 m/s ve ortamın yoğunluğu 998,2 kg/m³'tür. Bu durumda karakteristik empedans 1,48×10⁶ Pa·s/m'dir.

Düzlemsel dalgalar için verilen yukarıdaki denklemler küresel dalgalar için farklılık göstermektedir ve Denklem (1.4)'te verilmiştir.

$$z = \rho_0 c \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} + j\rho_0 c \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} \quad (1.4)$$

Denklemin gerçel kısmı akustik direnç ve sanal kısmı ise akustik reaktans olarak adlandırılır. Denklem (1.4)'deki r akustik empedansın reel kısmını, k ise dalga sayısını ifade etmektedir.

Ses basıncı ve yoğunluğunu tanımlamak için kullanılan ses seviyeleri logaritmiktir. Bunun sebebi, çevremizde karşılaştığımız geniş banttaki ses basıncı ve yoğunlukları ile insanın ses şiddetini iki sesin görece oranı olarak algılamasından kaynaklanmaktadır. Denklem (1.5)'de verilen IL yoğunluk seviyesini gösterirken, ses yoğunluğu I ve referans yoğunluk ise I_{ref} 'dir.

$$IL = 10\log(I/I_{ref}) \quad (1.5)$$

Ayrıca ses basınç seviyesi ise Denklem (1.6)'da verilmiştir. Denklemdaki SPL ses basıncı seviyesini gösterirken, ölçülen etkin ses basıncı P_e ve referans etkin basınç ise P_{ref} 'dir.

$$SPL = 20\log(P_e/P_{ref}) \quad (1.6)$$

Ses basıncı ile ses yoğunluğu arasındaki ilişki ise Denklem (1.7)'de verilmiştir.

$$I = P_e^2 / (\rho_0) \quad (1.7)$$

Referans ses basıncı (P_{ref}) olarak, hava ortamında $20 \mu\text{Pa}$ ve su ortamında $10^5 \mu\text{Pa}$ değerleri kullanılmaktadır. Akustik ölçümlerde kullanılan mikrofon ve hidrofondaki gibi referans cihazların çıkışları basınçla orantılı olarak değişen gerilim değerleridir. Bu sebeple akustik ölçüm sonuçlarını ifade etmekte ses basıncı değerleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sesin ilerlediği ortamın özelliklerinden dolayı akustik enerjide kayıplar meydana gelir. Ortamdan kaynaklanan kayıpları viskozite, sıcaklık ve parçacıkların hareketinden meydana gelen sürtünme kayıpları şeklinde gruplayabiliriz. Akustik enerji ilerlediği ortamda tamamen yutulmuş ısıya dönüşürken bir kısmı ise saçılmaya veya dağılmaya uğrayarak kayıplara uğrayarak zayıflar. Akustik enerjinin zayıflamasının en temel sebebi, sıvı ortamdaki hava kabarcıklarıdır. Ayrıca bu baloncuklar ortamın yoğunluğunu bozarak akustik hızı dolayısıyla akustik empedansı da değiştirir.

1.2. Akustik Alan Etkisi

Akustik alanı tanımlamak için kullanılan temel terimler; yakın alan, uzak alan, serbest alan ve dağınık alandır. Yakın alan ve uzak alan terimleri ses kaynağına olan fiziksel uzaklıkları belirtmektedir. Akustik enerjinin uzaklığa bağlı olarak etkinliği değişeceğinden bu alanların mümkün olduğunca iyi belirlenmesi gerekmektedir. Akustik kaynağına yakın alanda basınç alanı karmaşıklık gösterir. Kaynağına yakın olan bölgede genliği sönen dalgalar mevcuttur. Kaynaktan iki dalga boyu mesafeye kadar

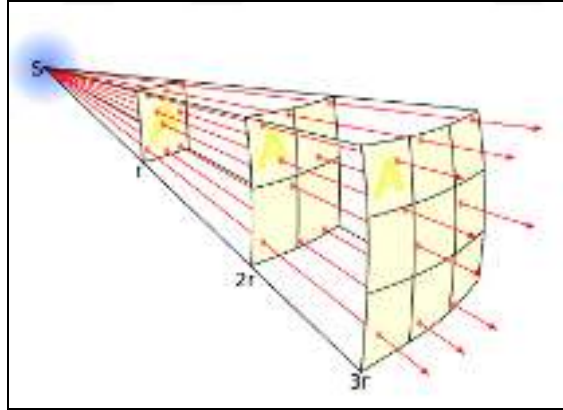
bu durum devam eder ve bu noktadan sonra yayılım düzenli hale gelir. Bu sebeple yakın alanda ölçüm yapmak oldukça zor ve karmaşıktır.

Akustik uzak alan, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi ses kaynağından 2 dalga boyu (λ) uzakta başlar ve sonsuza doğru gider ve uzak alanda ses basıncı seviyesi, ters kare yasası ile açıklanır.



Şekil 1.2. Akustik yakın ve uzak alan

Ters kare yasası, ses yoğunluğu miktarının, ses kaynağına olan mesafenin karesi ile ters orantılı olduğunu ifade eder ve üç boyutlu uzayda nokta kaynaklı radyasyona karşılık gelen geometri Şekil 1.3’te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Ters kare yasası

Bir kaynaktan çıkan akustik dalga sadece bir eksen boyunca doğrusal olarak ilerlemez. İlerlediği farklı eksenlerde karşılaştığı engellerden yansıma, saçılma v.b. durumlar sonucunda doğrudan ses kaynağından gelen sese yanal sesler de eklenmiş olur. Bu şekilde oluşan alanlar ise serbest alan ve dağınık alandır. Bu sebeple akustik basınç alanları ölçümünde serbest alan ve dağınık alan etkileri dikkate alınarak ortam uygun şekilde oluşturulmalıdır.

Akustik alan fiziksel etkenlerden dolayı ikiye ayrılarak doğrusal ve doğrusal olmayan alanlar olarak incelenmektedir. Doğrusal akustik alan hesaplamalarında; akustik dalganın ilerlediği ortamdaki faz hızı sabit ve ortamdaki moleküllerin akustik dalgayı iletirken meydana gelen etkileşimlerinden kaynaklanan sıcaklık değeri kullanılmaktadır. Doğrusal akustik çalışmalarda ortam etkilerinden gelebilecek bozulma ve zayıflatma parametrelerini en aza indirebilmek için doğrusal ortamlar tercih edilmektedir. Bu sebeple, doğrusal akustik çalışmaları ideal esneklik özelliğine sahip sıcaklık ve yoğunluk etkileşimlerinin en az olduğu sıvı ortamlarda yapılmaktadır [32, 33].

Maddenin, sıcaklık, basınç, hacim, yoğunluk v.b. fiziksel koşullarla ilişkisini belirten denklemlere durum denklemi adı verilir. Akustik basınç değişimi hesaplamalarında kullanılan durum denklemi, sıvılar ve gazlar için geçerlidir [33].

Akustik basınç alanı hesaplamalarında durum denklemine ek olarak, sıvıda ilerleyen dalga ile basınç ilişkisini veren süreklilik denklemi ve sıvının hızı ile basınç ve yoğunluk ilişkisini veren Euler denklemi de kullanılmaktadır [24, 32, 33]. Distile su için suyun yoğunluğu, basınç ve sıcaklık ilişkisini göstermektedir [34].

Küçük genlikli akustik dalgalar için kullanılabilen doğrusal denklemler, büyük genlikli ve ortam yoğunluk değişiminin büyük olduğu durumlarda kullanılmamaktadır [33].

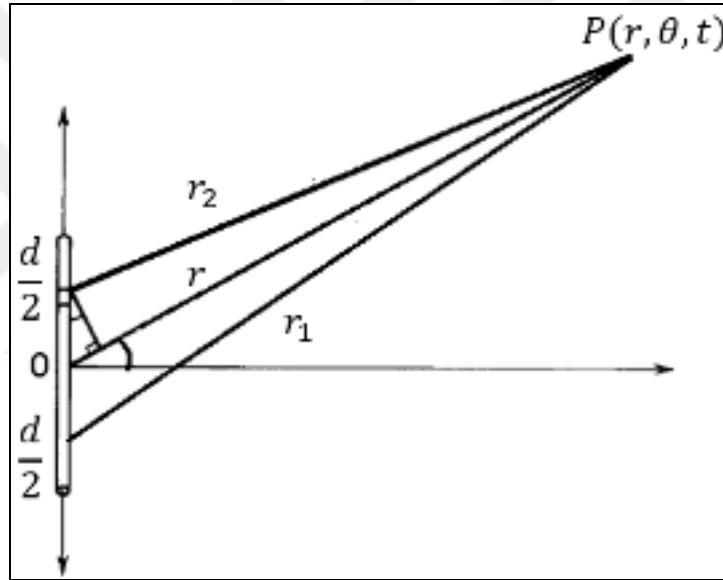
Bjørnø, biyolojik malzemelerin karakterize edilmesinde kullanılan ve 5 ila 11 arasında değişen doğrusal olmama durumunun belirleyici parametrelerinden B/A değerini ve biyomedikal alanda kullanılan ultrasonik yoğunluğun eksenel ve yanal değişimlerini odak bölgesinde incelediği çalışmasında, ultrasonik dalgaların doğrusal olmayan etkilerle nasıl bozulacağını göstermiştir [24].

Bjørnø bir başka çalışmasında ise, maddenin doğrusal olmamasından kaynaklanan özelliklerinin B/A oranına yansıdığını savunmuş ve biyolojik ortamda yaptığı deneylerle bunu göstermiştir [25]. Varray vd. ise B/A oranının görüntülemeye olan etkileri üzerine çalışmışlar ve doğrusal olmayan ortamlarda görüntüleme sinyallerinin kırılmaya uğradığını ortaya koymuşlardır [26]. Chandra vd. ise B/A

oranına bağılı olarak dokuların karakterizasyonunun yapılabileceği sonucuna ulaşmışlardır [27].

Doğrusal olmayan akustik alanın temel denklemleri akışkanlar mekaniğinin süreklilik, hareket ve enerji denklemlerinden türetilmiştir.

Bir ortamdaki ultrasonik kaynakların ürettiği dalgalar sebebiyle bir noktada oluşan basınç alanı, o noktaya etkiyen kaynakların basınçlarının toplamıdır. Bu durumu temsilen iki noktasal kaynaktan oluşan dipol yapısı Şekil 1.4'te görülmektedir. Aralarında faz farkı bulunan aynı frekanstaki iki kaynağın ürettiği sinyallerden oluşan doğrusal olmayan alanın toplam basınç alanı Denklem (1.8)'de verilmektedir.



Şekil 1.4. Akustik dipolün yayılma karakteristiği

Şekil 1.4'te görülen kaynaklar arasındaki d mesafesi ile ölçüm (gözlem) noktası arasında $r \gg d$ ilişkisi varsa uzak alan yaklaşımı kullanılarak, P noktasındaki basınç alanı Denklem (1.8)'de verildiği şekilde elde edilecektir.

$$P(r, \theta, t) = -j \frac{2A}{r} \sin\left(\frac{1}{2} k d \sin\theta\right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.8)$$

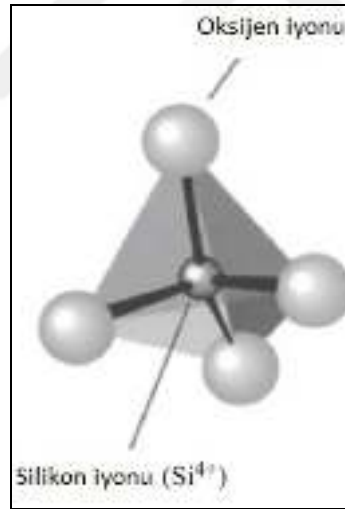
Bu basınç alanına akustik dipol radyasyonu adı verilir. Farklı geometrilerdeki dönüştürücülerin belirli bir alanda oluşturacağı toplam akustik basınç değeri bu temel denklem kullanılarak elde edilebilir.

Bu tez çalışmasında, akustik kaynak olarak farklı geometrilerdeki düzlemsel dönüştürücü ile üretilen prob yapıları kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen ölçümlerde, yakın alan-uzak alan sınırını belirleyen mesafe için, kaynağın ölçüm noktasına olan en az ve en fazla uzaklıkları farkının minimum $\lambda/2$ şartını sağlaması öngörülmüştür.

1.3. Piezoelektrik Malzemeler ve Dönüştürücüler

Piezoelektrik etkisi, kristal yapılı malzemelerin ısı ve elektrikle olan ilişkileri incelenirken ortaya çıkarılmıştır. Piezoelektrik özellik simetri merkezi olmayan kristal yapılı malzemelerde vardır.

Piezoelektrik malzemeleri doğal veya üretilmiş olarak iki gruba ayırabiliriz. Doğal olarak bulunan piezoelektrik malzemelere örnek olarak kristal kuvars, Rochelle tuzu ve benzerlerini verebiliriz. Silikon atomu etrafında tetrahedron olarak oluşturulmuş bir kafesin, belirli atomik yapısına sahip olan kuvars birim hücresi Şekil 1.5'te gösterilmiştir [28].



Şekil 1.5. Kuvars kristal yapısı

Kristal yapılı üretilmiş insan yapımı seramiklere örnek olarak: Baryum titanat, kurşun titanat, kurşun zirkanat titanat, potasyum niobat, lityum niobat, lityum tantalat ve benzeri kurşunsuz piezo seramikleri verebiliriz.

Piezoelektrik seramikler hazırlanırken, metal oksit bileşenlerin tozları belirli oranlarda karıştırılarak ısıtma ve soğutma işlemi uygulanır. Isıtma işleminde Currie

noktasına dikkat edilir. Yüksek elektrik alan uygulanarak kristal malzemede dipol momenti oluşturulduktan sonra elektrik alan kaldırılır. Dipoller kolayca eski hallerine dönemediklerinden dolayı, kalıcı bir polarizasyona sahip, mekanik kuvvetlere ve elektriksel alanlara tepki verecek şekilde bir kristal malzeme oluşmaktadır. Bu malzeme, rastgele çift kutup olamayacak şekilde kutuplanmış bir malzemedir. Daha sonra elektriksel kontak için elektrotlar uygulanan seramik malzeme, istenen geometrilerde ve boyutlarda kesilir [28, 29].

Genel olarak dönüştürücüler, bir enerji formunu diğer bir enerji formuna dönüştürmektedirler. Piezoelektrik dönüştürücüler de mekanik elastikiyet ve elektriksel olmak üzere her iki yönde birbirine dönüşümünü yapmaktadır.

1.4. Piezoelektrik Dönüştürücülerin Elektriksel Modeli

Kuvars özelliklere sahip piezoelektrik malzemeler ferro elektrik özellik göstermezler. Anizotropik bu malzemeler elektriksel bağlanmayla oluşmuş olup dielektrik malzemelerdir. Dielektrik malzemeler serbest elektrik yüklerine sahip olmayıp elektrik alana maruz kaldığında elektrik dipolleri oluşturur. Pozitif ve negatif yüklerin merkezleri aynı konumda değilse elektriksel dipol momenti oluşur.

Elektrik alanı uygulanmadığında genellikle rastgele yönlendirilmiş olan polar moleküller uygulanan elektrik alanla birlikte dipol momentlerine zıt olarak polarize olacaktır. Aynı şekilde, dielektrik bir malzeme yüklü plakalar arasına yerleştirilirse bir elektrik alan üretilir. Sentrosimetrik yapıya sahip bir piezoelektrik malzeme mekanik stres altında geometrisi değişeceğinden dolayı dipol momenti oluşturur.

Ultrasonik dönüştürücüler, verici olarak kullanılacaksa verimliliği, alıcı olarak kullanılacaksa hassasiyeti dikkate alınarak uygun kuplaj faktörüne sahip piezoelektrik malzemelerden seçilir. Piezoelektrik malzemelerin kuplaj faktörü (k), mevcut enerjinin kaynak enerjisine oranının karekökünü gösterir. Ayrıca, Q ve Q_E dielektrik kayıp faktörleri bant genişliği için önemlidir. Akustik gücün yüke en az kayıpla aktarılması piezoelektrik malzemenin akustik empedansı ile ilgilidir. Dönüştürücülerin karakteristik özelliklerinin zamana göre sabit kalması uygulamalar için önemlidir.

Ultrasonik dönüştürücüler için daha uygun özelliklere sahip olmaları sebebiyle seramik piezoelektrik malzemeler dönüştürücü üretiminde tercih edilir. Günümüzde en yaygın olan piezoelektrik dönüştürücüler, kurşun-zirkanat-titanat dönüştürücülerdir (PZT). Kurşun titanat dönüştürücüler, güçlü piezoelektrik özellikleri sebebiyle hidrofonlar, tıbbi tanılama ve tahribatsız kontrol gibi alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Kurşun titanat malzemelerin konsantrasyonunda kristal simetrisinin daha fazla bulunması sebebiyle piezoelektrik özellikleri en yüksek oranda sağlamaktadır. Kurşun titanat malzemelerin kırılma katsayısının yüksek olması sebebiyle bu malzemelerin daha dayanıklı kompozit şekillerini üretim çalışmalarına devam edilmektedir.

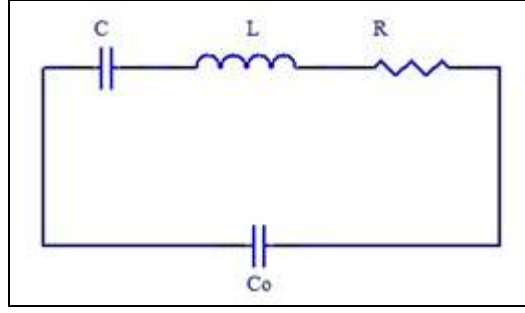
PZT'lerin pratik kullanımında kutuplarına montajı sağlayacak elektrotlara ihtiyaç vardır. Metal film bir tabakayla elektrotlar PZT'lere eklenir.

PZT'ler, ultrasonik enerji üretmek için kullanılır ve rezonans frekansında veya rezonans frekansına yakın bir frekansta uyarılırsa, maksimum genlikte titreterek verimli bir enerji dönüşümü elde edilir.

Ultrasonun ilerlediği farklı fiziksel ortamların empedanslarına bağlı olarak rezonans frekansında kaymalar olur. Örneğin, tedavi veya tanılama amaçlı uygulanan tıbbi ultrason, farklı organlar yani farklı empedanslarla karşılaşır. Bunun sonucu olarak kaynak ile yük uyumsuzluğu güç kayıplarına bağlı olarak akustik enerji yayılımı azalır [30].

Piezoelektrik dönüştürücüler (PZT) için farklı elektriksel modeller ile modellenip analiz yapılabilir. Elektriksel olarak model seçilirken olabildiğince sade ve kolay çözülebilir olmasına dikkat edilir. Çünkü artan parametreler ile modele daha çok yaklaşıldıkça devrenin çözülmesi karmaşıklaşır.

Piezoelektrik malzemelerin dönüştürücü uygulamalarında empedans modellemeleri yapılırken kullanılan Butterworth ve Cady olmak üzere iki yöntem vardır [31]. Piezoelektrik dönüştürücünün modeli olarak IEEE standardı tarafından da tavsiye edilen Van Dyke modeli Şekil 1.6'da gösterilmektedir [31].



Şekil 1.6. Butterworth-Van Dyke modeli

Tezde, tümleşik model olarak Butterworth-Van Dyke (BVD) modeli tercih edildi. Empedans uyumlaştırma yapılırken bu devrenin seri ve paralel rezonans durumları ayrıca incelendi.

2. ULTRASONİK PROB TASARIMI VE ÜRETİMİ

Akustik alan karakterizasyonu için TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Medikal Metroloji Laboratuvarı'nda bulunan ölçüm sistemi kullanılmıştır. Ölçüm sistemi PXI sinyal üretici, RF güçlendirici, Labview 6.0 ile oluşturulmuş ölçüm yazılımı, üç eksen hareketli su havuzu, iğne uçlu (needle) hidrofona probu, empedans uyumlaştırma devresi ve bu tez çalışmasında gerçekleştirilen farklı geometrilerdeki ultrasonik problemlerden oluşmaktadır. Bu bölümde, ölçüm sisteminin alt bileşenleri tanıtılmaktadır.

2.1. Ultrasonik Prob

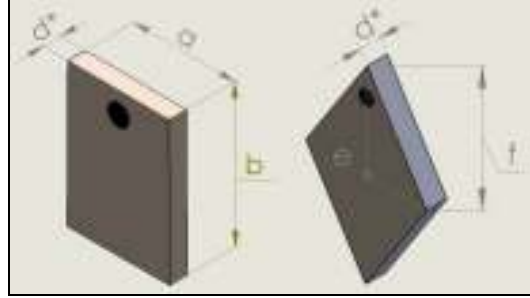
Bu tez çalışmasında, farklı geometrilerde dönüştürücülerden problemlerin, farklı merkez frekanslarında çalışacak şekilde üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Prob; Piezoelektrik dönüştürücü (PZT), PZT yuvası, arka gövde, halka, su sızdırmazlık sıkıştırıcısı, kablo sabitleyici, koaksiyel kablo, sızdırmazlık malzemesi, sonlandırıcı, o-ring olmak üzere on temel parça ile destekleme malzemesinden oluşacak şekilde tasarlandı ve üretildi. Piezokeramika firmasının medikal uygulamalar için ürettiği APC 850 D20 serisinden üçer adet (1MHz ve 2 MHz için) olmak üzere altı adet PZT dönüştürücü, ilgili problemlerin üretiminde kullanıldı. Literatürde belirtilen değerlere göre, seçilen PZT'lerin boyutları için hesaplamalar yapıldı ve tezin konusu olan geometrilerde kesildi. Problemlerin tasarımında SolidWorks teknik çizim programı kullanıldı.

2.1.1. Prob tasarımı ve teknik çizimler

Gerçeklenen ultrasonik probun ana elemanı PZT'dir. Farklı merkez frekanslarında (1 MHz ve 2 MHz) çalışacak 20 mm çapındaki 4 adet PZT'den, literatürde belirtilen oransal boyutlarda dikdörtgen ve eşkenar dörtgen geometrilerde dönüştürücüler kesildi[12,17].

Eşkenar dörtgen için e/f oranı $3/5$ ve dikdörtgen dönüştürücünün a/b oranı ise $2/3$ olarak belirlendi. Eşkenar dörtgenin köşegen uzunluklarına $e=6$ mm ve $f=10$ mm olarak, dikdörtgen dönüştürücünün boyutlarına ise $a=10$ mm ve $b=15$ mm olarak karar verildi.



Şekil 2.1. Dikdörtgen ve eşkenar dörtgen PZT'ler

Prob tasarımına, mekanik ve elektriksel yönlerden dikkat edildi. Probun temel bileşeni olan PZT dönüştürücünün çalışabilmesi için sinüzoidal bir fonksiyon üreticisiyle kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple PZT dönüştürücünün iki adet kontak noktasına fonksiyon üreticisini bağlamamız gerekmektedir. PZT'nin kontak noktalarından biri, iletken yüzeylerden birine kablo lehimleyerek diğer kontak noktasını ise PZT'nin iletken olan diğer yüzünü probun kasasına değdirerek elde edilecek şekilde tasarlandı. Bu durumda kasa olarak metal bir malzeme seçilmesi gerekmektedir. Bu malzemenin hem elektriksel iletkenliğinin olması hem de çalışma su içinde olacağından paslanmaz olması gerekmektedir. Seçilen malzeme ile ilgili diğer bir önemli parametre ise üretim kolaylığı sağlaması gerekmektedir. Bu sebeple prob üretiminde; Temin zorluğu olmayan, üretimi görece olarak kolay, elektriksel iletkenliği ve suda paslanmaz özelliğe sahip olan pirinç malzeme tercih edildi.

Prob tasarımında ölçülerin belirlenebilmesi için öncelikle PZT'lerin kesilmiş olması gerekmektedir. Kesim işleminde kolaylık sağlaması amacıyla Microsoft Word ile dikdörtgen ve eşkenar dörtgen şekiller çizildi. Çizilen kılavuzlar PZT'nin yüzeyine kâğıt yapıştırıcı ile yapıştırıldı.

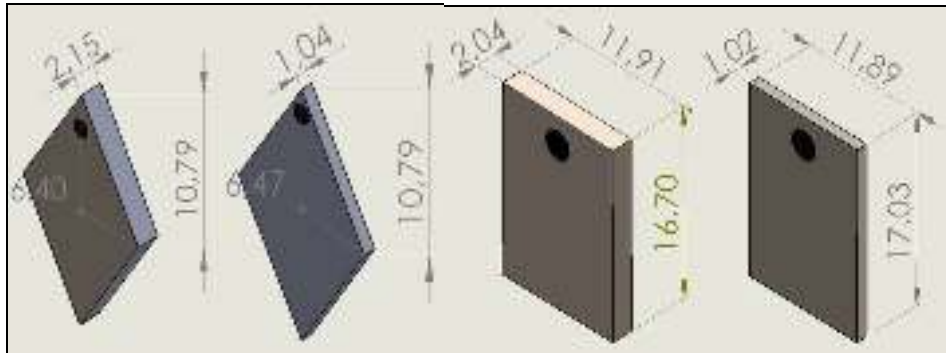
Kesim işlemi için Şekil 2.2'de görülen Buhler firmasının IsoMet 1000 model seramik kesme aleti kullanıldı. Bu alet motorlu ve devri ayarlanabilen disk şeklinde bir kesiciye sahiptir. Seramiği aşındırma yöntemiyle kesmektedir. Yanda bulunan

kola PZT sıkıştırıldıktan sonra kolun arkasında bulunan ağırlığın yeri değiştirilerek diske uygulanacak yük miktarı ayarlanır.



Şekil 2.2. Buhler IsoMet 1000 seramik kesme aleti

Seramik kesme aleti en düşük devrine ayarlandı. PZT diske yaklaştırılıp çalıştırıldıktan sonra kol üzerinde bulunan ağırlığın yeri değiştirilerek diskin PZT'nin üzerine uygulayacağı kuvvet kontrol edildi. Diskin PZT'de yaptığı aşındırma sonucunda ortaya çıkan seramik tozu gözle kontrol edilerek en uygun ayar yapıldı. 20 mm çaplı PZT'den kesilebilecek en büyük boyutlarda dikdörtgen ve eşkenar dörtgen geometrilere PZT kesildi.

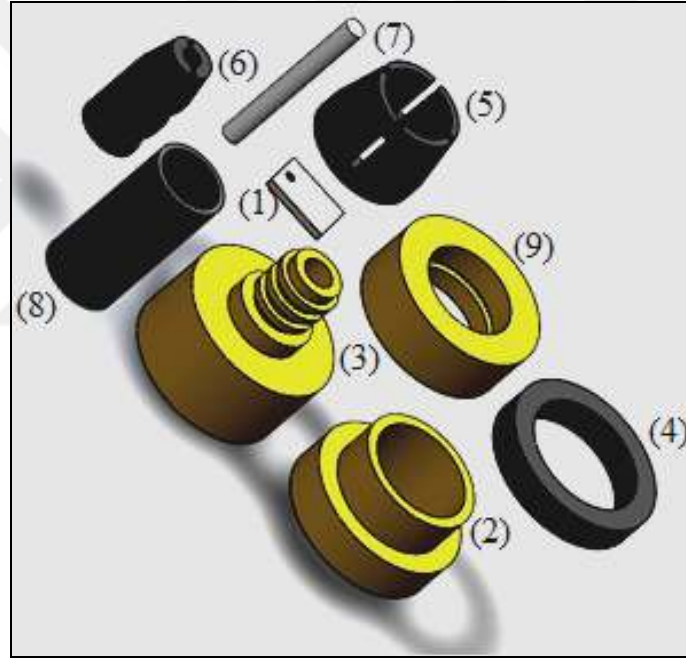


Şekil 2.3. Kesilen dönüştürücülerin boyutları

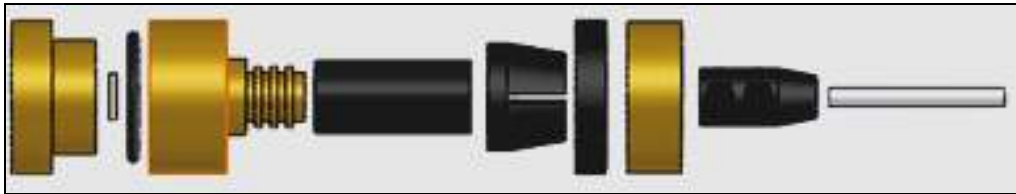
PZT'ler çalışma frekanslarına göre farklı kalınlıklarda olmaktadır. Bu sebeple, 1 MHz PZT'ler (2 mm kalınlık), 2 MHz PZT'lerden (1 mm kalınlık) daha rahat bir şekilde kesildi. 2 MHz PZT'ler kesilirken kolun disk üzerine uygulayacağı kuvveti azaltmak ve kırılmadan kontrollü kesim yapabilmek için kola alttan elle destek yapıldı. Ayrıca kesim kolaylığı açısından, dikdörtgen PZT eşkenar dörtgen

geometriye göre daha kolay kesildi. Çünkü eşkenar dörtgen PZT kola sıkıştırıldığı zaman daha küçük bir yüzeyle tutunmaktadır. Disk PZT'yi keserken, tutunduğu küçük yüzeyden kolaylıkla kırılmaktadır.

Kesim işlemleri sonunda ortaya çıkan PZT'lerin boyutları hassas dijital kumpas ile ölçüldü. PZT'lerin boyutlarına göre SolidWorks çizim programı kullanılarak mekanik parça çizimleri yapıldı. Probun on temel bileşeni Şekil 2.4 ve 2.5'de gösterildi. Bunlar; PZT (1), PZT yuvası (2), arka gövde (3), halka (4), su sızdırmazlık sıkıştırıcısı (5), kablo sabitleyici (6), 50 Ω koaksiyel kablo (7), sızdırmazlık malzemesi (8), sonlandırıcı (9), o-ringdir. Probun temel bileşenleri yanında, PZT yuvasının içine PZT'yi sabitlemek için destekleme işlemi uygulandı.



Şekil 2.4. Ultrasonik probun parçaları

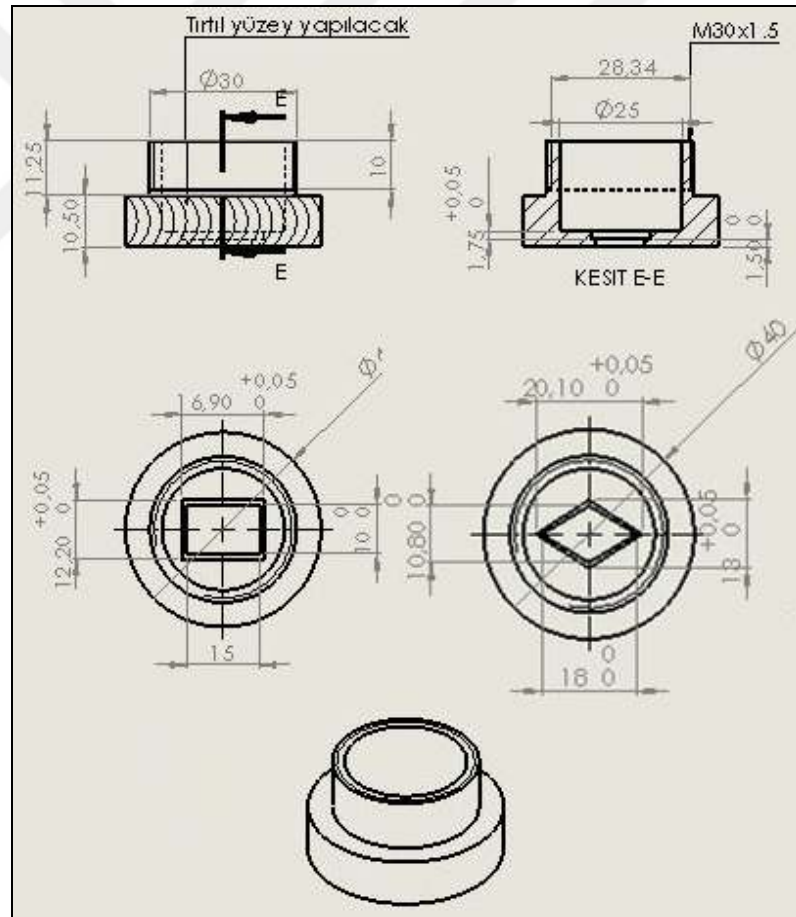


Şekil 2.5. Ultrasonik probun montaj sırasına göre parçaları

PZT'nin içine yerleştirileceği PZT yuvası parçasının teknik çizimi Şekil 2.6'da görülmektedir. Çizimde metrik ölçümlendirme olarak milimetre birimi kullanıldı. Bu

parçanın ön yüzünde, dikdörtgen dönüştürücü için a/b ve eşkenar dönüştürücü için e/f oranlarını sağlayacak şekilde, dönüştürücülerin ölçüsü kadar boşluk bırakıldı. İç yüzleri ise PZT'nin içine yerleştikten sonra sabit kalmasını sağlamak için faturalı şekilde tasarlandı. Faturanın derinliği PZT'nin kalınlığından 0,25 mm daha az tasarlandı. Böylelikle PZT'nin ön ve arka yüz iletkenlerinin kısa devre olması engellendi.

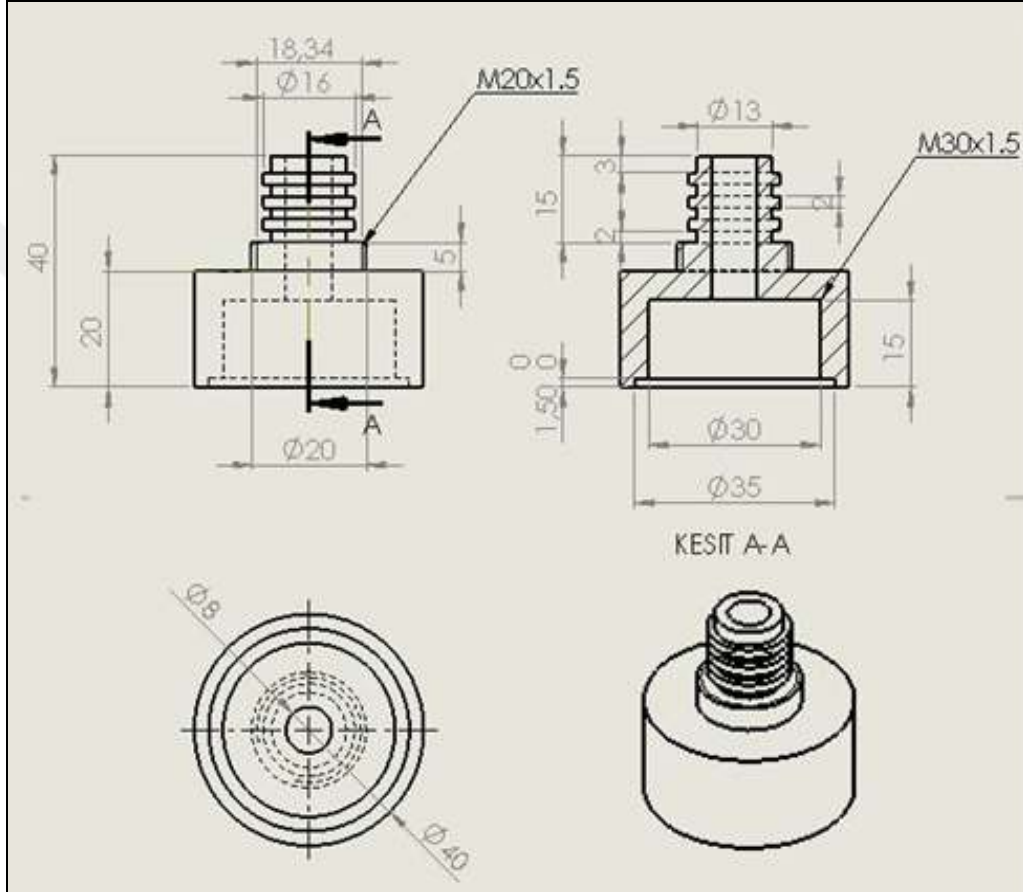
PZT yuvasının boyun kısmı, M30x1,5 diş olacak şekilde tasarlandı. Diş çekilen bu kısım ile PZT yuvası arka gövdeye vida ile birleştirildi. Bu diş adımları üretimde en kolay yapılan diş adımlarındandır. Üretimlerde +0,05 mm tolerans verildi. Kesilen PZT'lerin PZT yuvasına büyük gelmesini engellemek için üretim aşamasında negatif (-) toleransa müsaade edilmedi.



Şekil 2.6. Eşkenar dörtgen ve dikdörtgen 1 MHz PZT yuvaları

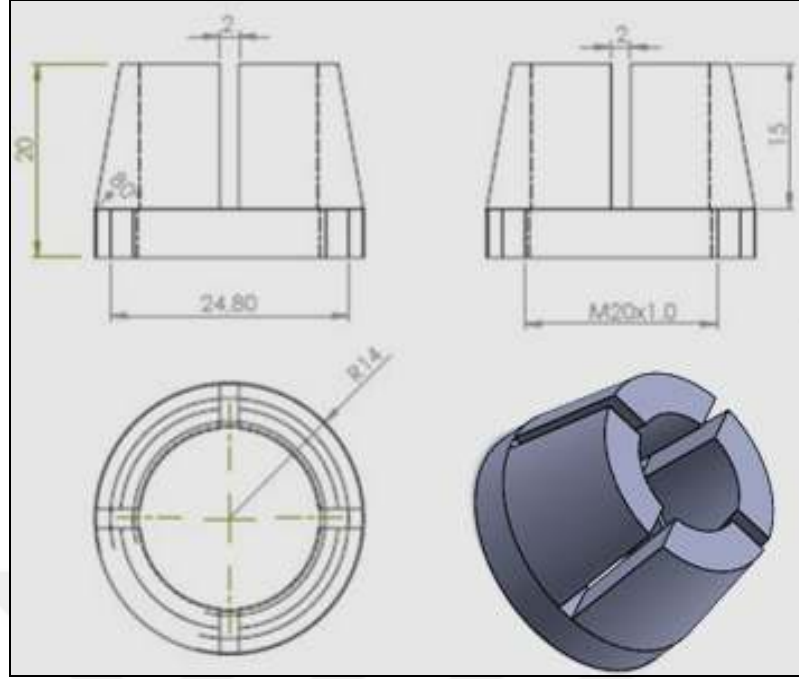
Proben arka gövdesi Şekil 2.7'de görülmektedir. Çizimde metrik ölçümlendirme olarak milimetre birimi kullanıldı. Gövdenin iç kısmında boşluk bırakıldı ve bu

boşluğun yüzeylerinde PZT yuvasının vidalanarak birleşmesini sağlayacak şekilde dişler tasarlandı. Gövdenin arka kısmında koaksiyel kablonun kalınlığına yakın genişlikte bir delik bırakıldı. Bu kısmın dış yüzeyi ise musluk ağız şeklinde, yüzeyine gelecek olan su sızdırmazlık malzemesinin yüzeyden kaymasını engelleyecek şekilde tasarlandı. Musluk ağzın dip kısmına tasarlanan dişler ile su sızdırmazlık malzemesini sıkıştırarak vidalama aparatı vidalandı.



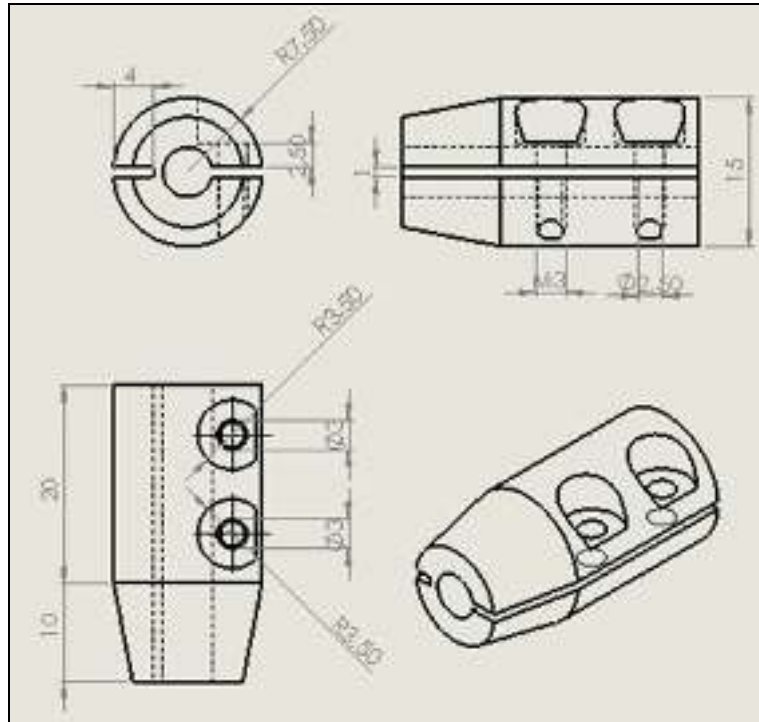
Şekil 2.7. Ultrasonik probun arka gövdesi

Su sızdırmazlık malzemesi ısıyla daralan içi reçine, dışı siyah plastiktir. Genellikle, su içindeki elektrik kablolarının kontak noktalarını yalıtım amacıyla kullanılmaktadır. Vidalama aparatının geniş olan ağız kısmına diş tasarlandı ve bu noktadan arka gövdeye vidalandı. Yarıkların bulunduğu kısımdan ise su sızdırmazlık malzemesi yerleştirildi. Arka gövdeye vidalama yapıldıkça su sızdırmaz malzeme sıkıştırıldı.



Şekil 2.8. Vidalama aparatı

Konik olan vidalama aparatının arkasına Şekil 2.9’da görülen kablo sabitleyici parça tasarlandı. Bu parça ile kablunun probun arka kısmında dik durması sağlandı ve böylelikle hareket ederek yıpranması engellendi.



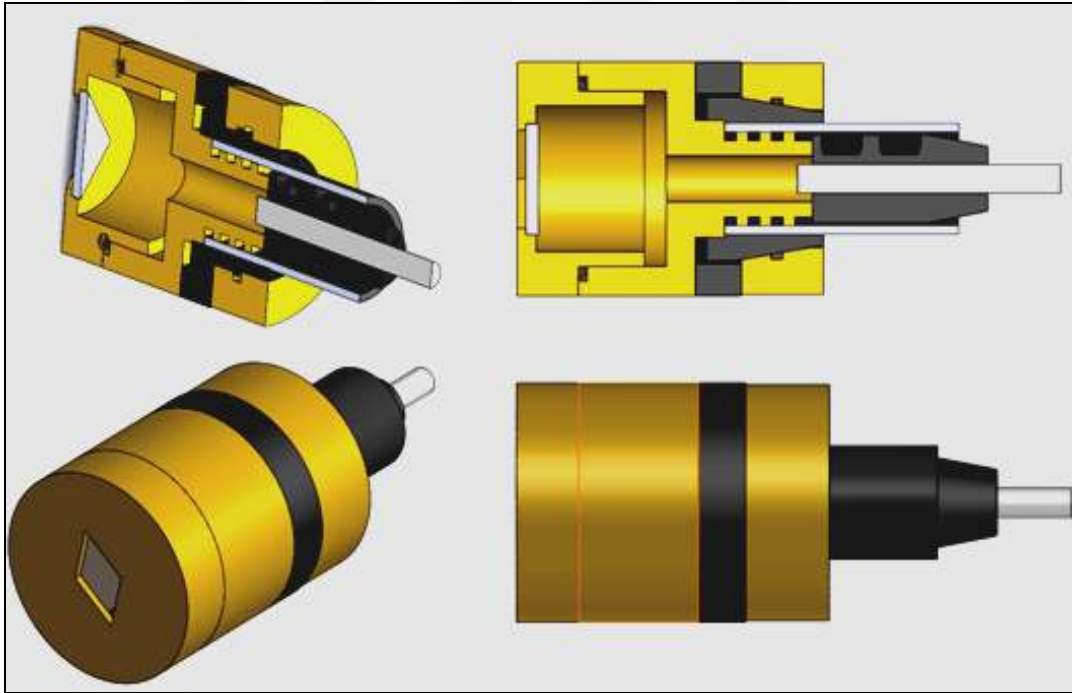
Şekil 2.9. Kablo sabitleyici

Çıkış empedansı 50 Ω olan güçlendiriciyle bağlantı için probda RG58 PVC tip 50 Ω koaksiyel kablo ve güçlendiricinin çıkış noktasına bağlantıyı sağlamak için 50 Ω erkek BNC konektör kullanıldı.

Probun bütün parçalarının sonuna sonlandırıcı parça tasarlandı ve bu parçanın yüzeyi tırtıl olarak tabir edilen pürüzlü yüzey şeklinde üretildi. Böylelikle kolay tutulması ve sıkıştırma işleminde kuvvetli kavranması sağlandı. Tırtıl yüzey aynı amaçla, PZT yuvası parçasının yüzeyine de uygulandı.

PZT yuvasının boyun kısmına o-ring takıldıktan sonra arka gövdeyle birleştirildi. Böylelikle iki parçanın birleşme noktasından su girmesi ve elektriksel kısa devreye sebep olması engellendi.

Tasarımı yapılan probun kesit, perspektif ve yandan görünüşleri Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10. Probun tasarlanan görünüşleri

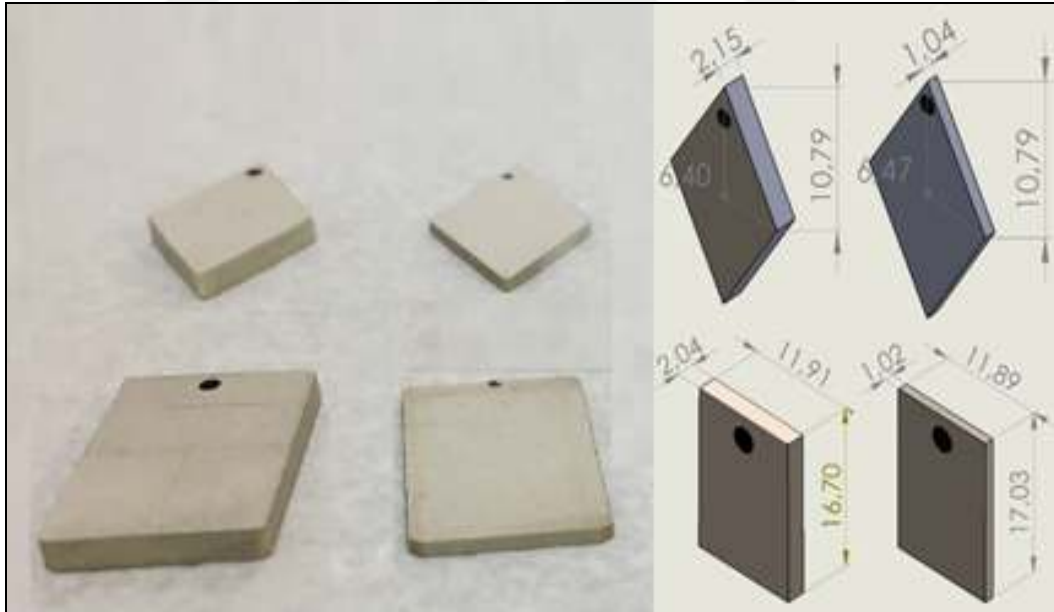
2.1.2. Prob üretimi

Teknik çizimleri yapılan altı adet proba ait toplam elli dört parça, Hedef Makine firması tarafından yaklaşık dört günde üretildi. Probun; üç parçası pirinç, üç parçası

derlin malzemeden tasarlandı. Sızdırmazlık amacıyla kullanılan o-ring ve su sızdırmazlık malzemesi satın alındı. Parçalar, prob üretiminin aşamalarına dikkat edilerek birleştirildi ve birleştirme işlemi sonunda ultrasonik problemlerin üretimi tamamlandı [35].

Üretimi tamamlanan problemlere, geometrileri ve çalışma frekanslarına göre model ve seri numaraları verildi. Dikdörtgen problemlere RC1 ve RC2, eşkenar dörtgen problemlere RH1 ve RH2, dairesel problemlere ise CR1 ve CR2 olarak model numaraları verildi. Model numaralarında bulunan rakamlar ile problemlerin merkez çalışma frekansları olan 1 MHz ve 2 MHz frekansları tanımlandı.

Prob üretimine, PZT'lerin Şekil 2.11'de görülen geometrilerde kesilmesiyle başlandı. Kesilen PZT'lerin bir yüzüne kablo lehimlendi ve elektriksel kontaklardan biri elde edildi. PZT'ler daha sonra alkol ile temizlendi, destekleme işlemi için kullanılan kimyasalların yüzeye tutunması artırıldı.



Şekil 2.11. Kesilmiş dikdörtgen ve eşkenar dörtgen PZT'ler

Destekleme malzemesinin iç yüzeylere tutunmasını arttırmak için PZT yuvası parçasının iç yüzeyi pürüzlü yüzey yapıldı. Bu amaçla şarjlı matkaba takılan freze ucuyla iç yüzeyde rastgele hareketlerle pürüzlü yüzey oluşturuldu. İç yüzeyin görüntüsü Şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.12. PZT yuvasının pürüzlü iç yüzeyi

Üretilen PZT yuvası parçasının içine PZT dönüştürücü Şekil 2.13’de görüldüğü gibi yerleştirildikten sonra destekleme malzemesi dolduruldu.



Şekil 2.13. PZT yuvasına yerleştirilmiş dönüştürücü

Destekleme malzemesi, Şekil 2.14’te görülen Araldite marka Hardener HV 953 U BD reçine, Araldite AW 106 yapıştırıcı ve Aldrich marka tungsten malzemelerin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edildi [36].



Şekil 2.14. Destekleme malzemeleri

Destekleme malzemesi hazırlandı ve kablolu PZT'nin içinde bulunduğu PZT yuvası parçasına dolduruldu. Destekleme malzemesi Şekil 2.15'te görülmektedir.



Şekil 2.15. Hazırlanmış destek malzemesi

Destekleme malzemesi doldurulduktan sonra PZT yuvası parçası Electromag firmasına ait M815 model santrifüj cihazına yerleştirildi. Santrifüj cihazı Şekil 2.16'da görülmektedir. Destekleme malzemesi sertleşene kadar 1500 rpm devirde döndürülerek destekleme malzemesinin PZT dönüştürücünün yüzeyine yapışması sağlandı. Cihazın en uzun çalışma süresi 99 dakika olduğu için cihaz her işlem periyodu sonunda durduğunda, sertleşme durumu kontrol edildi ve ihtiyaca göre yeniden çalıştırıldı.



Şekil 2.16. Santrifüj cihazı

Electromag M815A model santrifüj cihazı yüksek devirle çalışmaktadır. Bu sebeple, akıcı olan destekleme malzemesi sertleşene kadar parçanın ve PZT'nin yüzeyine bulaşarak istenmeyen bir durumun ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Şekil 2.17'de görüldüğü gibi karşılaşılan böyle bir durumda, santrifüj cihazından çıkarılan parçalar alkol, aseton ve maket bıçağı ile hassas bir şekilde temizlendi.



Şekil 2.17. Destekleme malzemesi yapışmış ve temizlenmiş PZT yuvası

Destekleme işlemi tamamlandıktan sonra kablo lehimlendi. Lehimlenecek kablonun ucundan belli bir kısım sıyrıldı ve PZT'den gelen uçlara lehimlendi. PZT yuvasının boyun kısmına su yalıtımı için o-ring geçirildi. Ayrıca, lehim yapılan bölgeye ise elektrik ile su temasını engellemek amacıyla DOWSIL 744 silikon yapıştırıcı uygulandı. Kablo lehimlenen PZT yuvasının son görünümü Şekil 2.18'de görülmektedir.



Şekil 2.18. Su yalıtımı yapılmış PZT yuvası

Arka gövde ile PZT yuvası birbirine vidalandıktan sonra arka gövdeden koaksiyel kablunun çıktığı deliğe silikon ile Şekil 2.19'da görüldüğü gibi dolgu işlemi uygulandı.



Şekil 2.19. Arka gövdeye su yalıtımı işlemi

Daha sonra su sızdırmaz malzeme sıkıştırma parçası, su sızdırmaz malzeme, halka ve sonlandırma parçalarının montajı yapıldı. Isı tabancası kullanılarak su sızdırmaz malzemenin içindeki reçine eritildi, pirinç gövde sıkıştırıldı ve Şekil 2.20'de görüldüğü gibi problemin üretim işlemi tamamlandı.



Şekil 2.20. Ultrasonik prob

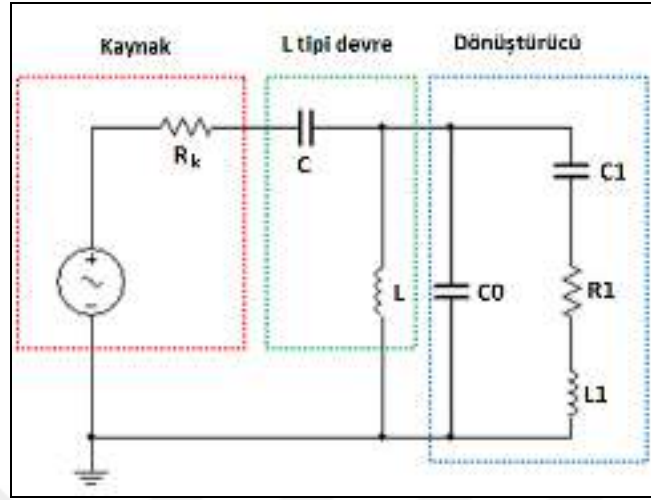
2.1.3. Empedans uyumlaştırma devresi tasarımı ve üretimi

DC akıma karşı gösterilen zorluk direnç olarak ifade edilir. Frekansa bağlı olarak değişen AC akımda ise, akıma karşı gösterilen zorluğu ifade ederken omik direnç yanında görünmeyen ve vektörel olarak ifade edilen reaktif elemanlar devreye girer. Rezistif ve reaktif elemanların etkisiyle oluşan empedans, AC akıma karşı gösterilen zorluktur ve Denklem (2.1)'de gösterilmiştir.

$$z = r + jx \quad (2.1)$$

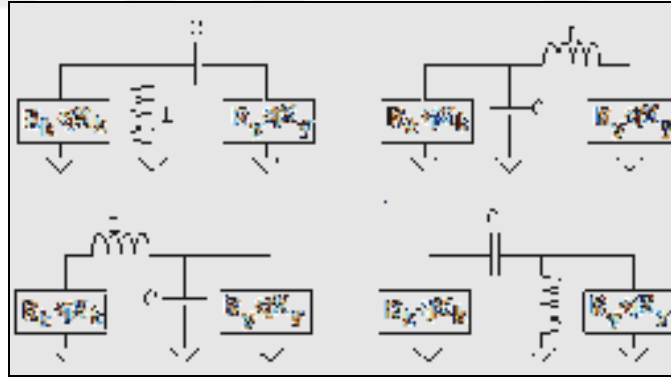
Empedans uyumlaştırma devrelerinin amacı, frekansa bağlı değişen yükler (reaktif yük) ile kaynak arasındaki empedans farkını azaltarak, kaynaktan yüke güç aktarımının en yüksek seviyede olmasını sağlamaktır. Bu devreler, kullanım amacına göre değişik modellerde üretilebilir. Tez kapsamında üretilen ultrasonik proplar için az elemanla üretim kolaylığı sağladığı için Şekil 2.21'de görülen L tipi devre tercih edildi. Şekilde görülen devre, R_k 'nin yük (piezoelektrik dönüştürücü) direncinden küçük olduğu durumda kullanılabilir. R_k 'nin dönüştürücü direncinden büyük olduğu

durumda, C elemanının yeri dönüştürücüye yakın olacak şekilde değiştirilir. L tipi empedans uyumlaştırma devresi örnekleri Şekil 2.22’de görülmektedir.



Şekil 2.21. L tipi empedans uyumlaştırma devresi

Şekil 2.21’de görülen, C0, C1, R1 ve L1 parametreleri PZT’nin elektriksel modeli, Rk ise kaynak iç direncidir. L ve C ise empedans uyumlaştırma devresinde kullanılan devre elemanlarıdır.



Şekil 2.22. L tipi empedans uyumlaştırma devreleri

PZT’nin elektriksel modelinde bulunan kapasitör ve direnç frekansa bağlı olarak değişen elemanlardır. Bu değişimlerin gerçek zamanlı takipleri yapılarak güç harcamaları elde edilebilir. Ancak bu şekilde bir çalışma her şart altında mümkün olmaması yanında hedeflenen fakat üretilemeyen, aynı zamanda etkin kullanılmayan bir güç üretimine sebep olacaktır. Bu durumda, sağlık alanındaki uygulamalarda, üretilen gücün az olması doz eksikliğine sebep olurken çok olması durumunda ise dokular üzerinde istenmeyen sonuçları olabilecektir. Bu gibi

sorunların önüne geçebilmek amacıyla bir noktada veya dinamik olarak, geniş frekans bölgelerinde çalışabilecek empedans uyumlaştırma devreleri tasarımı çalışmaları yapılmaktadır [37-49].

Karmaşık sayı olan empedans değerinin hesaplanabilmesi için empedansın gerçek ve sanal kısımlarına ait değerler bilinmelidir veya hesaplanmalıdır. PZT'nin elektriksel parametreleri ölçülerek empedansı hesaplanabilir. Sanal ve gerçek kısımlarını doğrudan ölçerek de empedans değeri elde edilebilir.

Ölçüm amacıyla empedans analizör cihazları kullanılmaktadır. Günümüzde empedans ölçme cihazları, empedansın sanal ve gerçek kısımlarını ölçerek empedans değerini hesapladıktan sonra empedansla ilişkili admitans, kondüktans, suseptans, faz açısı, kalite faktörü Q ve D değerlerini hesaplayarak sonuçlarını vermektedir. Empedansla ilişkili değerler Denklem (2.2)'de verilmiştir. Ayrıca bu cihazlar, yüke ait eşdeğer devre elemanlarının değerlerini de ölçebilmektedirler.

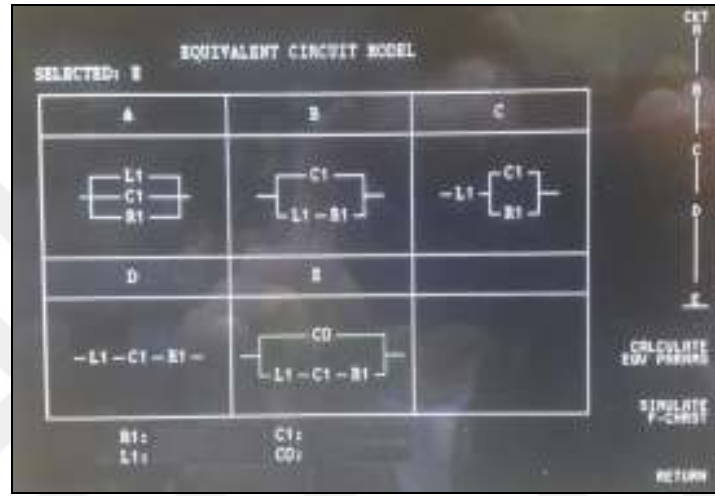
$$1/Z = 1/(R + jX) = Y = G + j \quad (2.2)$$

Ölçümü yapılan bir değer tanımlarken, ideal veya nominal değer, gerçek değer ve ölçülen değer şeklinde ifade edilmektedir. İdeal değer, saf reaktans ve saf direnç değerlerini ifade ederken gerçek değer ise rezistif ve reaktif elemanların cebirsel toplamını açıklar. Ölçülen değer ise hata değerlerini de bulunduran ölçüm cihazından elde edilen değerlerdir.

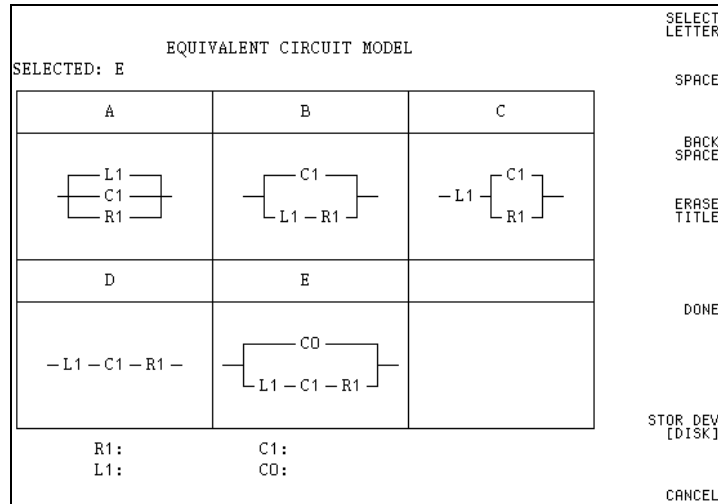
Empedansı belirlerken kullanılan temel parametrelerden direnç ve reaktansı tanımlayan değerler tam olarak saf değerler değildir. Bu değerler ölçüm koşullarına bağlı olarak etkilenirler. Ölçüm değerlerine etki eden koşulları, frekans, test ölçüm seviyesi, DC bias, sıcaklık ve diğer etkenler olarak gruplayabiliriz.

Tez kapsamında üretilen ultrasonik probların empedans uyumlaştırma devrelerinin üretim aşamalarında empedanslarını ölçmek için TÜBİTAK UME Medikal Metroloji laboratuvarında bulunan, Agilent firması tarafından üretilmiş 4395A model empedans analizör cihazı kullanıldı. Bu cihazla, ultrasonik probun empedansı, empedansın gerçek ve sanal kısımları, admitans, kondüktans, suseptans ve faz açısı değerleri ölçüldü.

4395A empedans analizör cihazı, ölçülmek istenen malzemenin temel özelliği cihaza tanımlanırsa, eşdeğer modelini oluşturan parametrelerin değerlerini de ekranında çıktı olarak vermektedir. Cihazın bu özelliği kullanılarak, ultrasonik problemlerin üretim aşamalarında elektriksel parametrelerinin değerleri ölçüldü. Cihazın eşdeğer devre değerlerini ölçtüğü ekran görüntüsü modu Şekil 2.23'te görülmektedir. Eğer bu ekran görüntüsü kaydedilmek istenirse Şekil 2.24'de görülen kayıt elde edilir. PZT rezonatör olduğu için E modunda ölçüm alındı.



Şekil 2.23. Agilent 4395A eşdeğer devre ölçüm ekranı



Şekil 2.24. Agilent 4395A kaydedilmiş ölçüm ekranı

Ultrasonik problemlerin dört farklı aşamada empedans ölçümleri yapıldı. Dönüştürücünün kesim sonrası, destekleme işlemi sonrası, probun üretimi tamamlandıktan sonra ve empedans uyumlaştırma devresi eklendikten sonra

empedans ölçümleri yapıldı ve değerler kaydedildi. Gerçekleştirilen işlemler sonrasında 4395A cihazının parametre değerlerini ölçme özelliği kullanılarak ölçülen eşdeğer devre parametrelerine ait ölçülen değerler Tablo 2.1 ve 2.2’de verildi.

Tablo 2.1. Dikdörtgen 1 MHz PZT’lerin eşdeğer devre değerleri

İşlem	Model	Eşdeğer parametreler				
		Rezonans frekansı (MHz)	R1 (Ω)	L1 (μ H)	C1 (pF)	C0 (pF)
Kesim	RC1	1,004	33,06	215,51	116,67	542,14
Destekleme		1,047	98,43	132,41	185,32	769,73
Kablolama		1,000	64,42	55,35	543,42	2927,8
Uyumlaştırma		1,000	49,68	458,09	513,83	541,49
Kesim	RH1	1,032	38,76	508,16	46,83	348,8
Destekleme		1,047	211,01	158,96	154,82	520,3
Kablolama		1,000	148,79	1,49	2334,2	152,78
Uyumlaştırma		1,000	49,12	48,81	534,83	554,90
Kesim	CR1	1,067	4,81	126,68	195,94	889,14
Destekleme		1,058	80,44	696,95	364,22	1259,4
Kablolama		1,000	111,18	69,98	356,73	1252,6
Uyumlaştırma		1,000	38,41	34,45	657,13	1449,9

Tablo 2.2. Dikdörtgen 2 MHz PZT’lerin eşdeğer devre değerleri

İşlem	Model	Eşdeğer parametreler				
		Rezonans frekansı (MHz)	R1 (Ω)	L1 (μ H)	C1 (pF)	C0 (pF)
Kesim	RC2	2,013	0,71	22,23	281,15	0,0012
Destekleme		2,000	24,88	12,19	505,95	1,84
Kablolama		2,000	18,07	7,05	974,03	3396,6
Uyumlaştırma		2000	48,03	15,42	372,02	-81,19
Kesim	RH2	2,013	2,27	33,03	189,04	829,34
Destekleme		2,000	49,88	19,61	306,21	1,16
Kablolama		2,000	33,07	7,95	964,03	2096,6
Uyumlaştırma		2,000	49,33	16,14	382,02	-86,19
Kesim	CR2	2,004	1,13	14,63	431,07	1,78
Destekleme		2,105	20,64	9,48	684,15	2398,0
Kablolama		2,000	17,07	694,54	964,03	3,10
Uyumlaştırma		2,000	53,33	16,14	382,02	-86,19

Tablo 2.1 ve 2.2’de görülen kesim ve destekleme işlemleri sonrasında ölçülen rezonans frekansı değerleri, yapılan işlemler sonrasında oluşan doğal rezonans frekanslarıdır. Kablolama işlemi yapıldıktan sonra ultrasonik problemlerin eşdeğer devre

parametreleri ayrıca merkez çalışma frekansında tekrar ölçüldü. Kablolama işlemindeki empedans değerine göre uyumlaştırma devresi yapıldı. Uyumlaştırma devresiyle ölçülen prob değerleri uyumlaştırma satırında verildi.

Eşdeğer devre değerleri ölçüldükten sonra empedans değerleri hesaplandı. Hesaplanan empedans değerleriyle karşılaştırma yapmak amacıyla empedans analizör cihazıyla empedansın sanal ve gerçek kısımları ölçüldü. Yapılan ölçümler ve hesaplamalara ait sonuçlar Tablo 2.3'te verildi ve bu değerler empedans uyumlaştırma devresindeki indüktans ve kapasitans değerlerinin belirlenmesinde kullanıldı.

Empedans uyumlaştırma devresi, yük empedansı ile kaynak empedansını eşit yapmak için kullanılır. Üretilen ultrasonik prob, işaret üreticinin çıkışında bulunan yükseltece bağlandı. Yükselteç cihazının çıkış empedansı üretici kataloğunda 50 Ω olarak verilmiştir. Bu sebeple, hem empedans uyumlaştırma devresi hem de devreyle yükselteç cihazını birbirine bağlayan koaksiyel kablo 50 Ω olarak seçildi.

Hesaplama işlemini yaparken, devre elamanlarının birbirleriyle olan seri ve paralel durumları ile kaynak iç direncinin değeri gözönünde bulunduruldu ve Denklem (2.3) ile (2.4) elde edildi. Bu iki denklemin ortak çözümünden hesaplanan indüktans ve kapasitans değerleri Tablo 2.4'te verildi.

$$(R_m - 50)X_L^2 + 100X_m X_L - 50(R_m^2 + X_m^2) = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{-j(X_m X_L^2 - (X_m^2 + R_m^2)X_L)}{R_m^2 + (X_L - X_m)^2} = jX_{UN} \quad (2.4)$$

Denklem (2.3) ve (2.4) denklemleri $R_k < R_L$ içindir. Üretilen ultrasonik problemlerin empedans değerleri kaynak iç direncinden büyük olduğundan, $R_k > R_L$ durumu için bir denklem çıkarılmadı. Tablolarda, işlem basamaklarına göre empedans değerlerinin karşılaştırmasını göstermek amacıyla yapılan hesaplamalarda San Diego Üniversitesi'nin sitesinde bulunan hesaplama aracı kullanıldı [50].

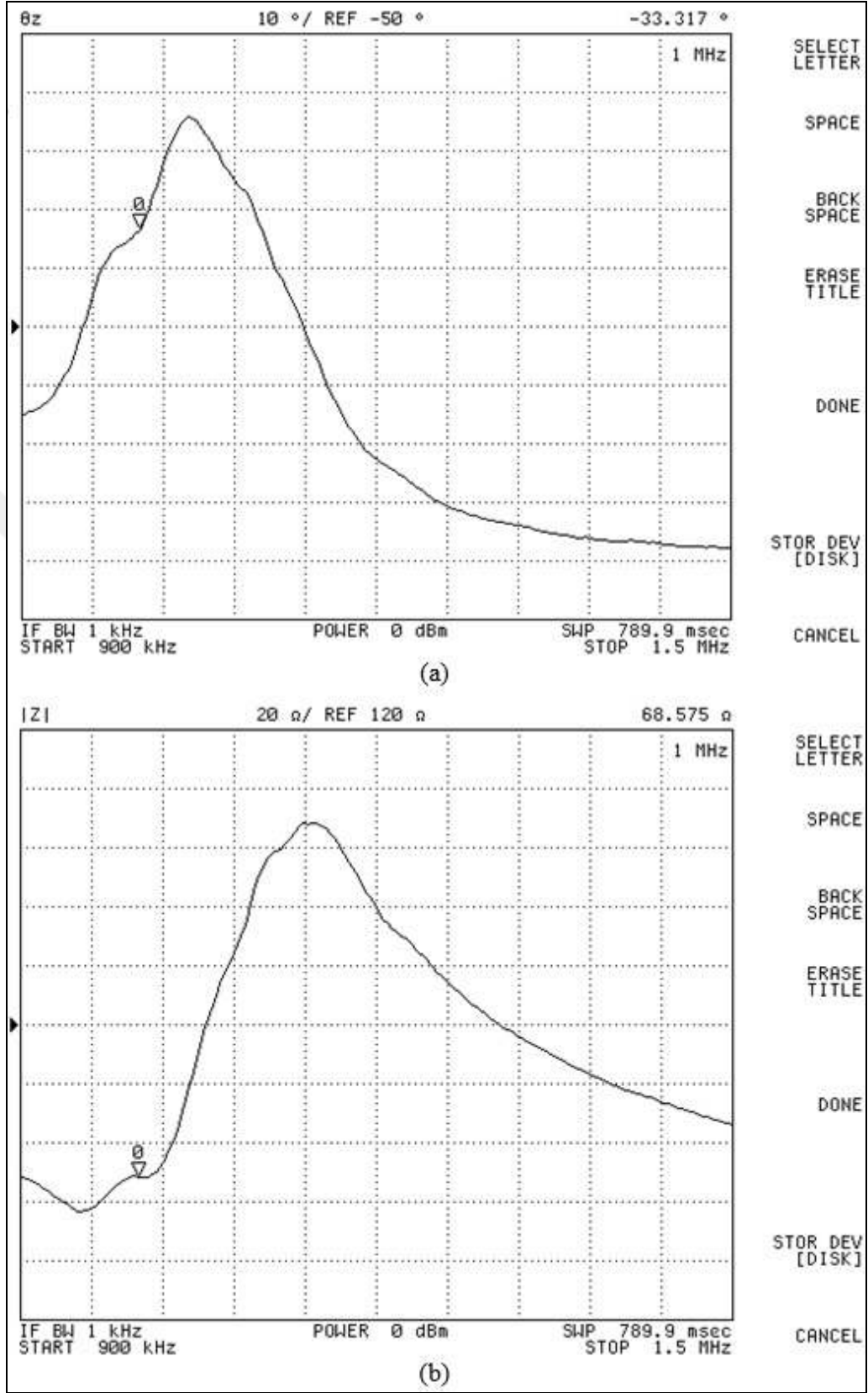
Ultrasonik problemlerin empedans ölçümlerine ait örnek ekran görüntüleri Şekil 2.25, 2.26, 2.27 ve 2.28'de görülmektedir.

Şekil 2.25 ve 2.27 sırasıyla probun kablo montajı ve uyumlaştırma işlemi yapıldıktan sonraki, (a) faz açısı ve (b) empedans ölçümleridir. Şekil 2.26 ve 2.28 ise sırasıyla probun kablo montajı ve uyumlaştırma işlemi yapıldıktan sonraki, (a) rezistif direnç ve (b) reaktans ölçümlerine ait empedans analizör cihazının ekran görüntüleridir.

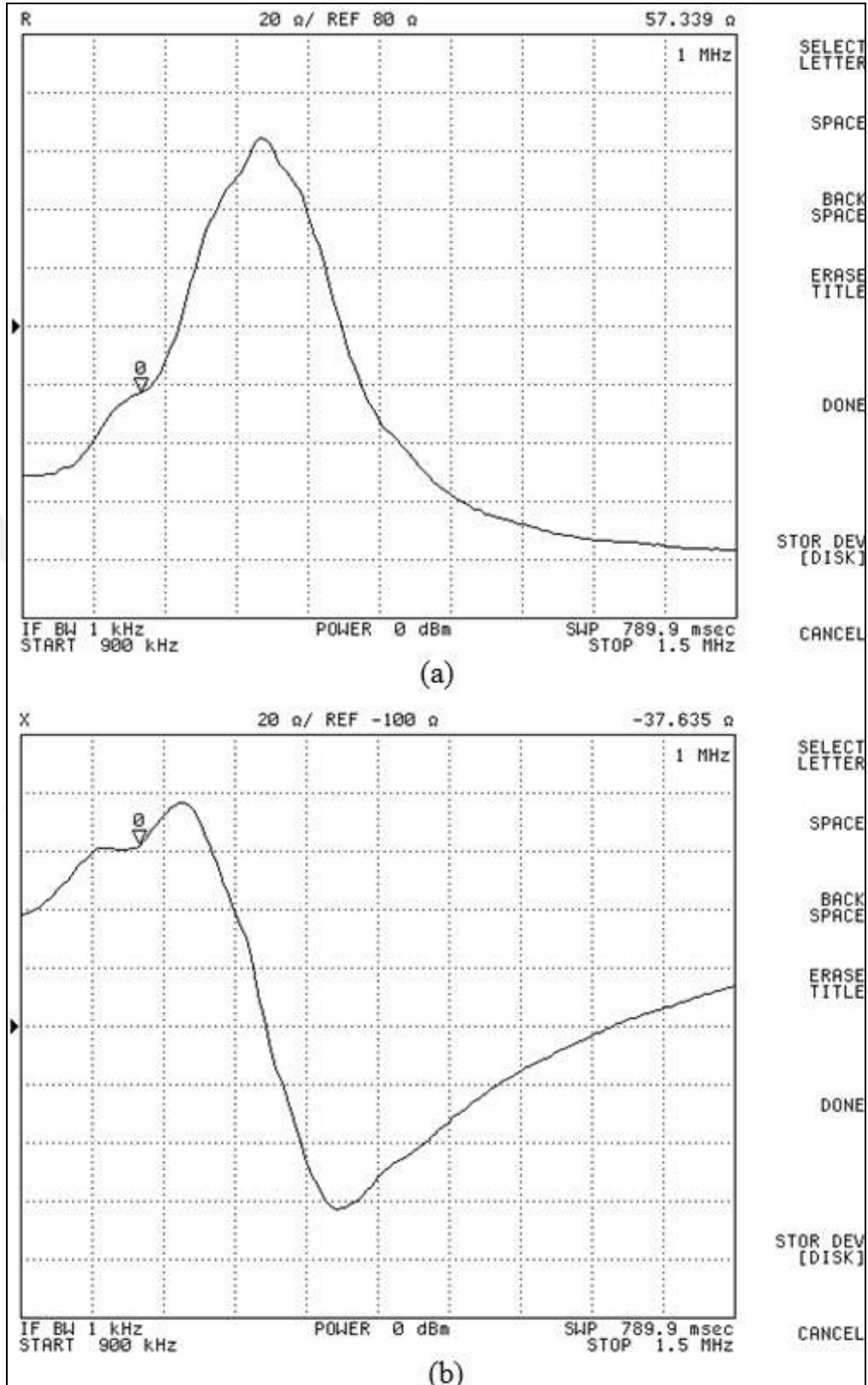
Tablo 2.3. Probların hesaplanan ve ölçülen empedans değerleri

İşlem	Model	Ölçülen		Hesaplanan	
		Kompleks (Ω)	Eşdeğer (Ω)	Kompleks (Ω)	Eşdeğer (Ω)
Kesim	RC1	19,67-0,26i	21,83	32,68-3,71i	32,89
Destekleme		130,31-0,03i	130,34	122,21-14,41i	123,06
Kablolama		63,27+41,51i	75,68	45,94-54,76i	71,48
Uyumlaştırma		49,66+0,38i	49,273	41,99-26,99i	49,92
Kesim	RH1	36,46-33,98i	36,582	38,84-1,47i	38,87
Destekleme		200,31-50,60i	206,55	186,37-90,5i	207,19
Kablolama		103,43-123,32i	160,76	130,92-73,36i	150,07
Uyumlaştırma		48,98-4,75i	49,22	50,8+0,41i	50,80
Kesim	CR1	192-12,56i	186,11	21,14+183,33i	184,54
Destekleme		117,62-24,18i	119,65	101,77-31,70i	106,59
Kablolama		59,76-59,98i	84,73	59,5-55,65i	81,47
Uyumlaştırma		47,45-3,25i	47,45	36,63-26,36i	45,13
Kesim	RC2	2,41-0,04i	2,42	0,04-103,06i	103,06
Destekleme		16,65-11,69i	20,37	16,26-12,30i	20,39
Kablolama		15,42-12,52i	19,87	16,43-8,31i	18,41
Uyumlaştırma		49,13-10,83i	50,30	49,94-18,02i	53,09
Kesim	RH2	4,44-1,61i	4,44	2,33+1,16i	2,60
Destekleme		25,57-27,00i	37,20	25,41-26,73i	36,88
Kablolama		22,61-25,93i	33,80	31,371-18,37i	36,35
Uyumlaştırma		49,56-3,71i	49,82	49,7782-2,86i	49,86
Kesim	CR2	1,06-0,03i	1,06	1,13+0,07i	1,13
Destekleme		29,63-7,16i	30,46	29,05-7,99i	30,13
Kablolama		16,89-4,19i	17,41	15,48-6,75i	16,89
Uyumlaştırma		46,76+1,29i	46,79	53,79-2,41i	53,84

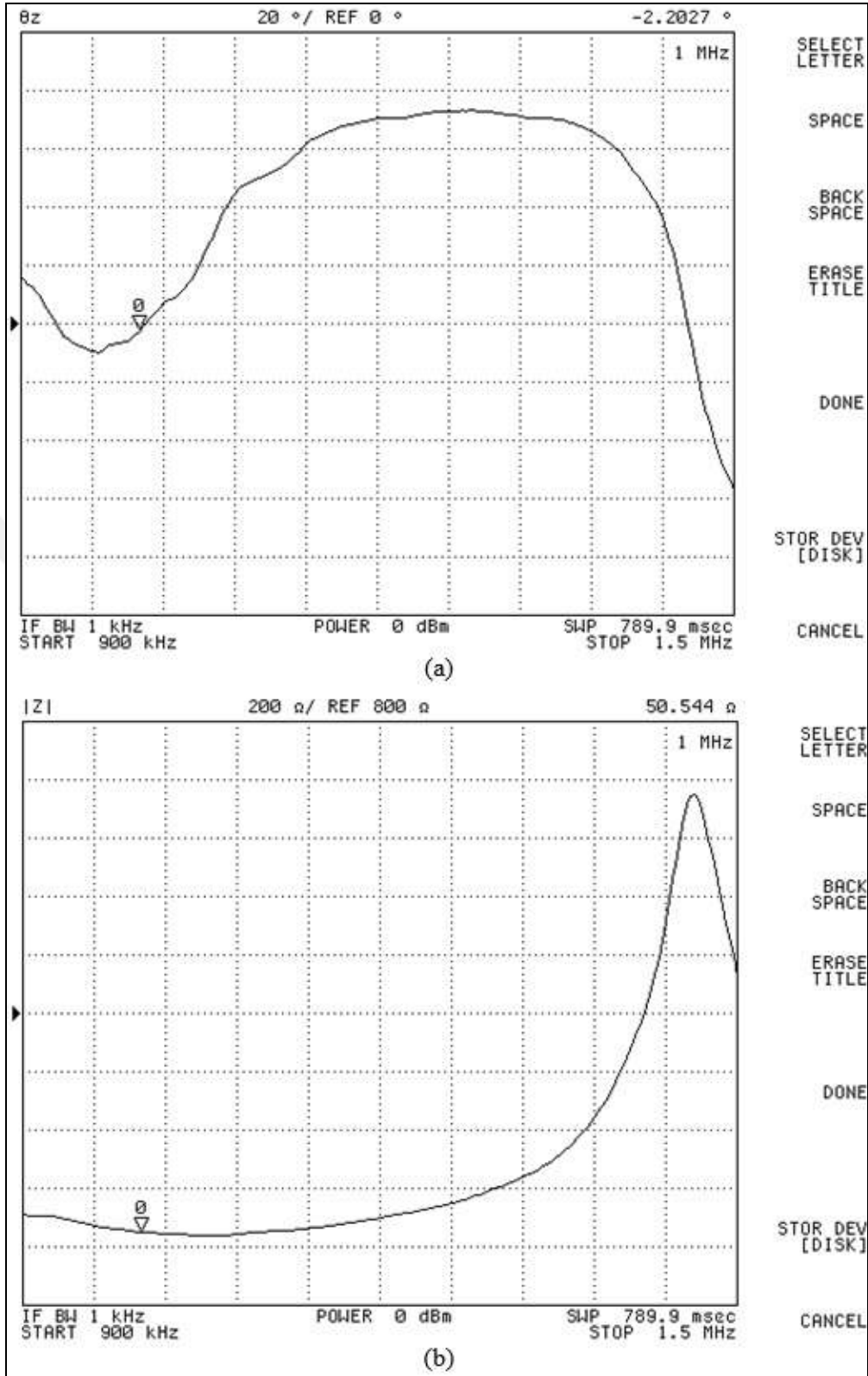
Ekran görüntüleri anlık değerleri göstermektedir. Tablo 2.3'deki ölçüm sonuçları ise yapılan on adet ölçümün aritmetik ortalamasıdır.



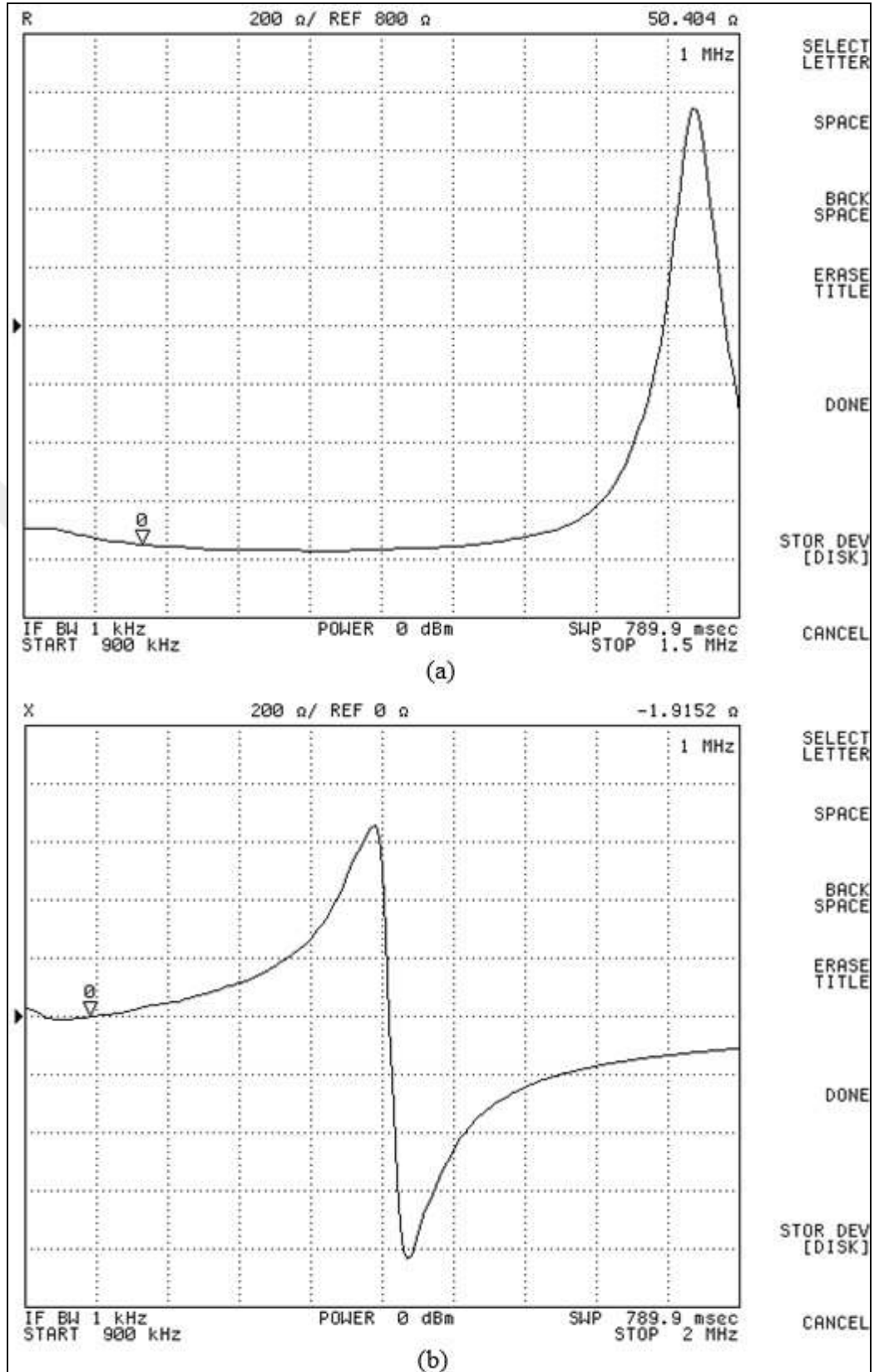
Şekil 2.25. Kablolü CR1 (a) faz açısı ve (b) empedans ölçümleri



Şekil 2.26. Kablolu CR1 (a) rezistif direnç ve (b) reaktans ölçümleri



Şekil 2.27. Uyumlaştırılmalı CR1 (a) faz açısı ve (b) empedans ölçümleri



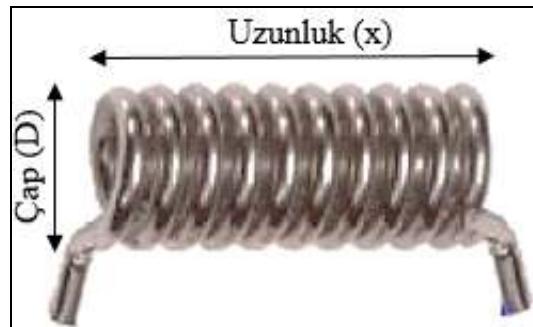
Şekil 2.28. Uyumlaştırmalı CR1 (a) rezistif direnç ve (b) reaktans ölçümleri

Empedans analizör cihazıyla ölçümler yapılmadan önce cihaza ait bir işlem dizisini (prosedür) gerçekleştirmek gerekmektedir. Eğer bu işlem dizisi gerçekleştirilmezse ölçüm sonuçları hatalı olacaktır. Cihazın uygulattığı işlem dizisinin sırası şu şekildedir: Kalibrasyon moduna geçirilecek, açık devre ölçümü yapıldıktan sonra ekranda görülen uyarı mesajına dikkat edilerek kısa devre ölçümü yapılacaktır. Bu ölçümün sonunda ekranda görülecek uyarı mesajına göre beklenecek ve ardından cihaza ait 50 Ω yüküyle ölçümler tamamlanacaktır. Ölçüm sonunda “DONE” tuşuna basılarak kalibrasyon işlem dizisi tamamlanacaktır. Ancak bu işlem dizisi ölçümlerin doğru olması için tek başına yeterli değildir. Çevresel etkenlere karşı en güvenilir ölçümü alabilmek için “Fixture COMPEN” ismi verilen ikincil bir işlem dizisinin uygulanması gerekmektedir. Kalibrasyon ve çevresel etkenleri azaltacak olan “Fixture COMPEN” işlem dizisi üretici firmanın kullanıcı rehberinde bulunmaktadır.

Uyumlaştırma devresinde kullanılan hava tipi indüktanslar üretildi. Kapasitörler ise satın alındı. Kullanmış olduğum kapasitörler NPO model yüksek doğruluklu özel kapasitörlerdir. Hava tipi indüktansların ortası hava olmaktadır. Örnek hava tipi indüktans Şekil 2.29’da görülmektedir. Hava tipi indüktanslar, melamin kaplı bakır teller plastik su borusuna sarılarak üretildi. Bakır tel ile su borusunun çapları, Denklem (2.5)’e göre yapılan hesapla belirlendi.

$$L = \frac{D^2 N^2}{45 \cdot D + 100 \cdot x} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5) ile hesaplanan indüktansın birimi μH ’dir. Üretilen indüktansın çapı (D) ve boyunun (x) birimleri santimetre (cm)’dir. Denklemdeki N ise sarım sayısıdır.



Şekil 2.29. Hava tipi indüktans

Ölçümler ve hesaplamalar sonucunda bulunan empedans değerleri ile yapılacak empedans uyumlaştırma devresinde kullanılacak indüktans ve kapasitans değerleri Tablo 2.4'te verildi. Bu tabloda görülen empedans değerleri kablolama işlemi sonrasında, uyumlaştırma devresi olmadan yapılan ölçümlere ait değerlerdir.

Tablo 2.4. Uyumlaştırma devresi elemanlarının tasarlanan değerleri

İşlem	Model	L1 (μ H)	C1 (nF)	Z karmaşık	Z eşlenik (Ω)
Kesim	RC1	10,99	7,64	32,82–2,92i	32,95
Destekleme		14,12	2,50	122,23–14,45i	123,08
Kablolama		9,26	3,54	45,94–54,76i	71,48
Kesim	RH1	14,84	8,23	38,84–1,47i	40,24
Destekleme		14,68	1,60	186,37–90,50i	207,19
Kablolama		49,21	1,59	130,92–73,36i	150,07
Kesim	CR1	17,70	1,77	21,14+183,33i	184,54
Destekleme		18,85	2,50	101,77–31,69i	106,59
Kablolama		8,73	2,69	59,5–55,65i	81,47
Kesim	RC2	15,94	0,05	0,04–103,06i	103,06
Destekleme		5,52	14,31	16,26–12,3i	20,39
Kablolama		1,43	10,49	16,43–8,31i	18,41
Kesim	RH2	1,23	5,55	2,33+1,16i	2,60
Destekleme		4,07	1,53	25,41–26,73i	36,88
Kablolama		3,62	1,57	31,37–18,37i	36,35
Kesim	CR2	58,30	11,01	1,13+0,07i	1,13
Destekleme		0,46	2,38	29,05–7,99i	30,13
Kablolama		2,84	2,86	15,48–6,75i	16,89

Uyumlaştırma devresinde kullanılacak elemanların değerleri belirlendikten sonra SolidWorks programı kullanılarak silindirik şekilde bir kutu üretildi. Devre kutusu, lehimleme ve kutulama işlemleri sırasında gerekli müdahaleler için iki yarım silindir olarak tasarlandı.

Ultrasonik probdan gelen kablo ucunda ve güçlendirici cihazın giriş konektörüyle bağlantıyı sağlayacak kabloların erkek BNC olması sebebiyle uyumlaştırma

devresinin bağlantı noktaları dişi BNC olarak tasarlandı. RC1 model ultrasonik prob için Şekil 2.30’da görülen uyumlaştırma devresi üretildi.



Şekil 2.30. Empedans uyumlaştırma devresi

Agilent 4395A cihazıyla ölçülen eşdeğer devre parametreleri kullanılarak empedans değerleri hesaplandı. Aynı cihazla empedansın karmaşık ve bileşke değerleri ayrıca ölçüldü. Hesaplanan ve ölçülen empedansın karmaşık ve eş değer sonuçları Tablo 2.5’te verildi. İşlem basamaklarının sırasına göre hesaplanmış ve ölçülmüş değerlerin birbirleriyle uyumlu oldukları görüldü.

Tablo 2.5. Probların hesaplanan ve gerçekleştirilen empedans değerleri

Geometri	Frekans (MHz)	Hesaplanan		Gerçekleştirilen	
		Kompleks (Ω)	Eşdeğer (Ω)	Kompleks (Ω)	Eşdeğer (Ω)
Dikdörtgen	1	41,99-26,99i	49,92	49,66+0,38i	49,27
Eşkenar dörtgen		50,8+0,41i	50,80	48,98-4,75i	49,22
Daire		36,65-26,36i	45,13	47,29-3,25i	47,45
Dikdörtgen	2	49,94-18,02i	53,09	49,13-10,83i	50,30
Eşkenar dörtgen		49,78-2,86i	49,86	49,56-3,71i	49,82
Daire		53,79-2,41i	53,84	46,76+1,29i	46,79

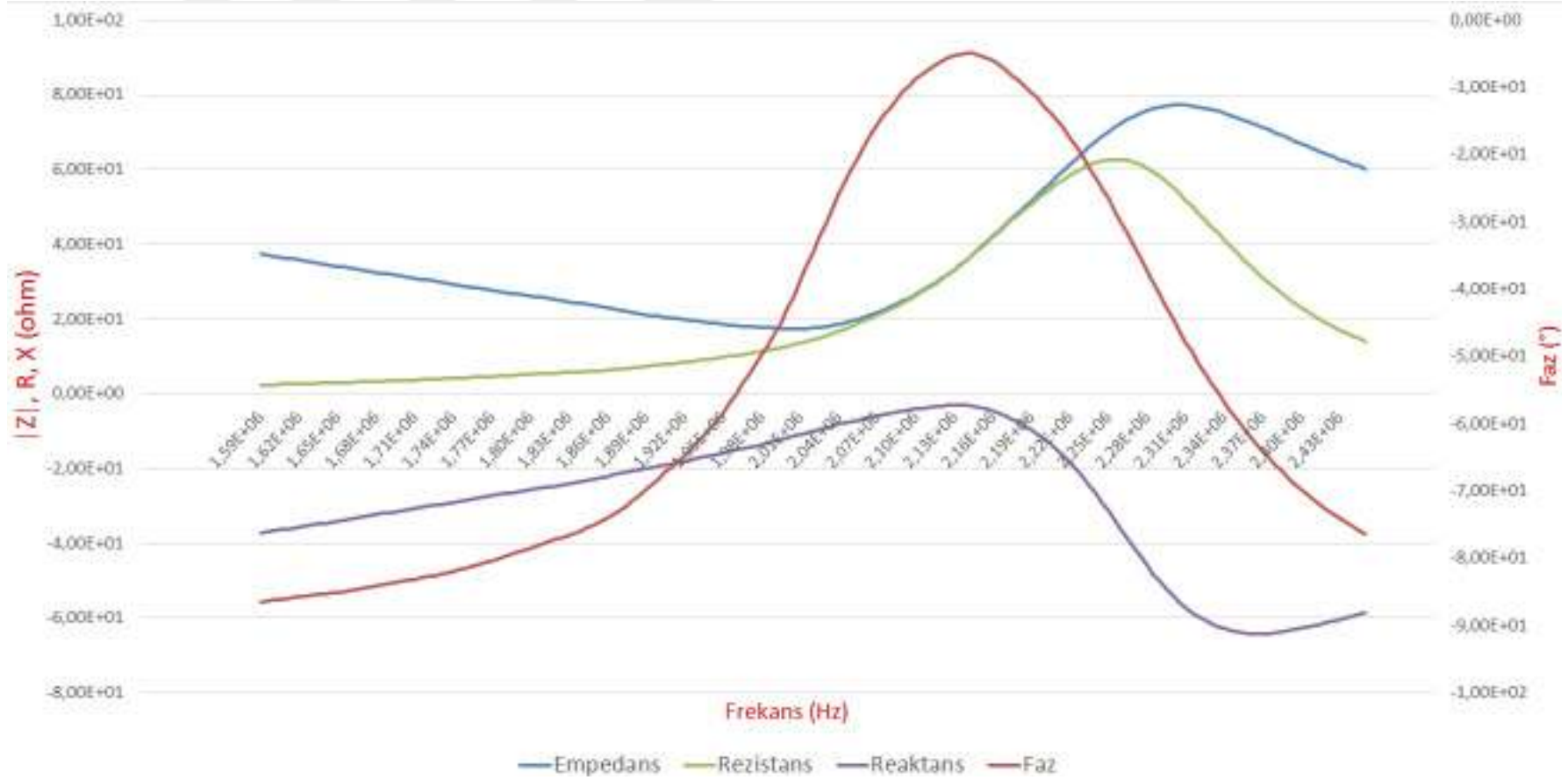
Tasarlanan ve gerçekleştirilen empedans uyumlaştırma devrelerinin etkin olduğu, Tablo 2.4, 2.5 ve 2.6’daki ölçüm sonuçları ile görüldü. Tablo 2.4’teki empedans değerleri ile Tablo 2.5’deki hesaplanan ve gerçekleştirme sonrasında ölçülen empedans değerleri incelendiğinde kaynak iç direncine yakın empedans değerlerinin gerçekleştirildiği görülmektedir.

Faz açılarının ölçüm sonuçları Tablo 2.6’da verildi. Bu sonuçlara göre, empedans uyumlaştırma devrelerinin etkin olduğu görüldü. Uyumlaştırma devreleri sonrasında, ölçülen faz açıları değerlerinin 0°’ye yaklaştırıldığı görülmektedir.

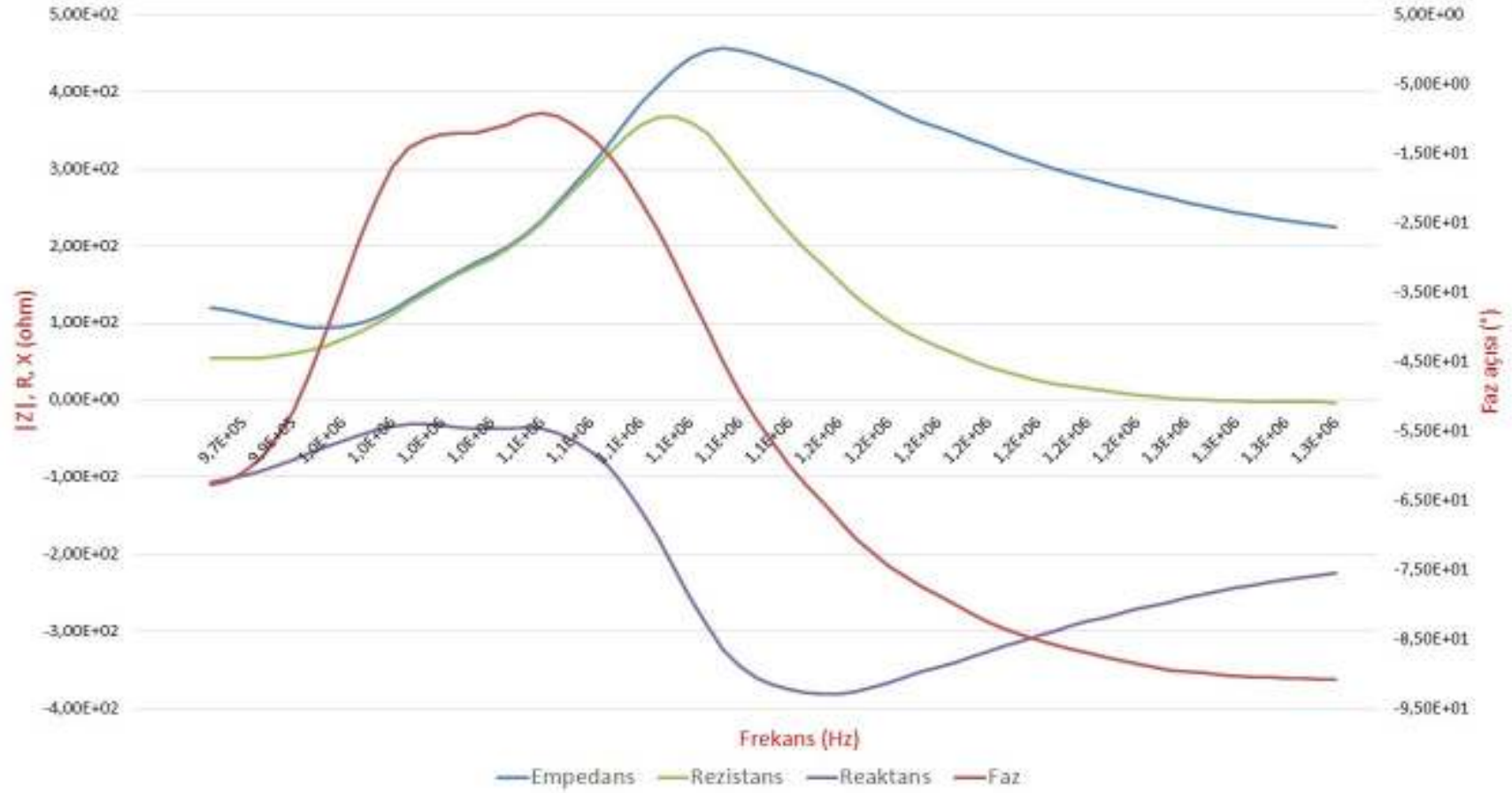
Tablo 2.6. Ultrasonik problemlerin ölçülen faz açısı değerleri

İşlem	Geometri-Model	Frekans	Ölçülen Faz açısı
Kablolama	Dikdörtgen-RC1	1 MHz	-33,3°
Uyumlaştırma		1 MHz	-4,8 m°
Kablolama	Eşkenar dörtgen-RH1	1 MHz	-50,0°
Uyumlaştırma		1 MHz	-4,7°
Kablolama	Daire-CR1	1 MHz	-42,8°
Uyumlaştırma		1 MHz	-3,9 m°
Kablolama	Dikdörtgen-RC2	2 MHz	-39,1°
Uyumlaştırma		2 MHz	-12,4°
Kablolama	Eşkenar dörtgen-RH2	2 MHz	-48,8°
Uyumlaştırma		2 MHz	-4,28°
Kablolama	Daire-CR2	2 MHz	-13,8°
Uyumlaştırma		2 MHz	1,52°

Agilent 4395A cihazı ile frekans spektrumunun taranması ile elde edilen değerler kullanılarak birleşik grafik çizdirildi. Merkez frekansında, Şekil 2.31 ve 2.32 incelendiğinde, faz ve reaktans değerlerinin “0”a yaklaştığı görüldü. Ayrıca, empedans değerinin rezistif değerine yaklaşık olarak eşit olduğu görüldü.



Şekil 2.31. RC2 model probun empedans parametrelerinin birlikte gösterimi



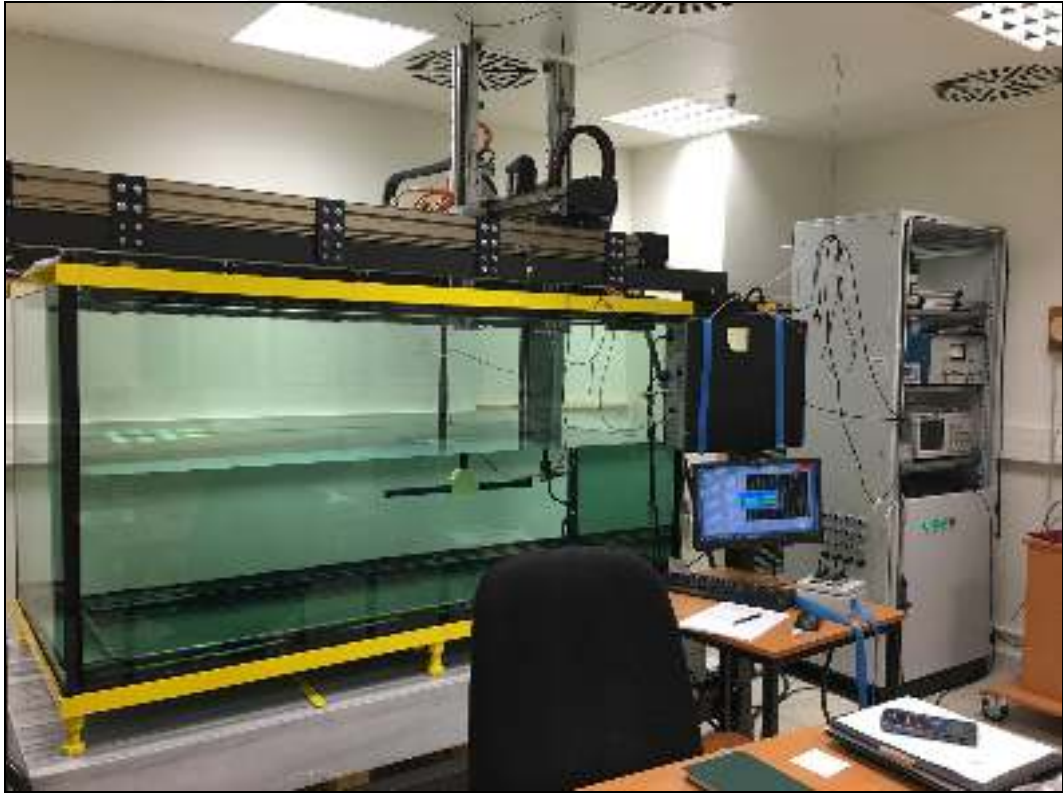
Şekil 2.32. RC1 model probun empedans parametrelerinin birlikte gösterimi

3. ULTRASONİK PROB ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu bölümde, ultrasonik basınç alanı ölçüm sistemi tanıtılacak ve ölçüm sonuçları verilecektir.

3.1. Ölçüm Sistemi

Ölçümlerin yapıldığı sistem TÜBİTAK UME Medikal Metroloji laboratuvarında bulunmaktadır. Sistem; su tankı, üç eksen hareket sistemi, hidrofona, sinyal üretici kart, güçlendirici ve yazılımdan oluşmaktadır. Ölçüm sistemi Şekil 3.1’de görülmektedir.

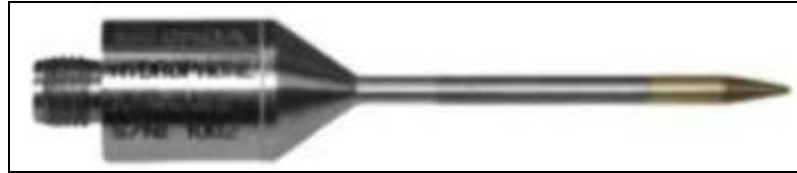


Şekil 3.1. Ultrasonik basınç alanı ölçüm sistemi

Su havuzu daha önce aynı laboratuvarında doktora tezi kapsamında, üç eksenli ölçüm yapılan bir çalışma neticesinde üretilmiş ve kullanıma alınmıştır [51].

Su havuzunun boyutları, 200 cm (uzunluk), 100 cm (yükseklik) ve 100 cm (derinlik) olarak yaklaşık 2 m³ hacme sahiptir. Yan yüzeyler ve taban üç katlı lamine camdır. Alt yüzün altında mermer bir blok su havuzunun ağırlığını taşımaktadır. Ayrıca üç eksen hareket ve konumlandırıcı sistemi taşımak için Şekil 3.1’de görüldüğü gibi profil bir kasaya sahiptir. Ölçümler yapılırken havuzda kullanılan su degaze, deiyonize ve distile sudur. Bu su, şebekeden gelen hatta bağlanmış olan bir cihaz yardımıyla elde edilmektedir. Ölçümler için su havuzunun 2/3’ünün doldurulması ve ölçümde kullanılacak problemlerin, doldurulmuş havuzun dikeyde (Z ekseninde) ortasına gelmesi yeterli olmaktadır.

Ölçümler için kullanılan ultrasonik problemler iki adettir. Bunlardan biri karakterizasyonu yapılacak olan ve tez kapsamında üretilen verici durumda olan ultrasonik problemdir. Diğer problem ise, alıcı olarak kullanılan iğne uçlu hidrofondur. Hidrofon, yüksek basınçlı ölçümlerde kullanılan Şekil 3.2’de görülmekte olan, ONDA firması tarafından üretilmiş (ONDA Corp. Sunnyvale, CA, ABD) HNA-0400 model problemdir. İğne uçlu bu problem, ölçüm sırasında oluşan yansımalarından gelen hataları ortadan kaldırmaktadır. Nominal hassasiyeti 70 nV/Pa olan problem, 1 MHz ile 20 MHz frekans bandında çalışmaktadır.



Şekil 3.2. İğne uçlu HIFU hidrofon

İğne uçlu hidrofon, yazılım yardımıyla havuz içinde üç eksen hareket ederek karakterizasyonu yapılan problemin ürettiği sinyalleri ölçer. Üç eksen hareket ve konumlandırma sistemi, kontrol ünitesi ve hareket ünitesinden oluşmaktadır. Kontrol ünitesi, verici ve alıcı (hidrofon) problemler için üç eksen on yönde hareket olanağı sağlamaktadır. Ultrasonik verici problem; aşağı-yukarı (Z2) ve kendi çevresinde sağa-sola (W) olmak üzere dört yönde hareket yapar. Hidrofon ise; aşağı-yukarı (Z1), ileri-geri (X) ve sağa-sola (Y) olmak üzere üç eksen altı yönde hareket yapar.

Ölçümlerde kullanılan sinyal kaynağı, National Instruments firması tarafından üretilmiş NI PCI-5412PXI veri toplama ve sinyal üretici kartıdır. Karttan üretilen

sinyaller, Electronic Navigation Industries Inc. firması tarafından üretilmiş olan ENI 3100L model RF güç yükseltici cihazına uygulanır. RF güç yükselticinin çıkışı, empedans uyumlaştırma devresi üzerinden karakterize edilecek olan verici durumundaki ultrasonik proba uygulanır.

Ölçümlerin gerçekleştirilmesi ve üç eksen hareket kontrolünün yapılması amacıyla daha önce LabView ile hazırlanmış olan bir program kullanılmaktadır [51]. Program ile ultrasonik problemlerin konumlandırılmaları yapıldıktan sonra set edilen bu konuma göre probun ultrasonik alan ölçümleri üç ekseninde yapılmaktadır. Set değeri yeni bağlanan her prob için yeniden yapıldıktan sonra aksenel ölçümlerine geçilmektedir.

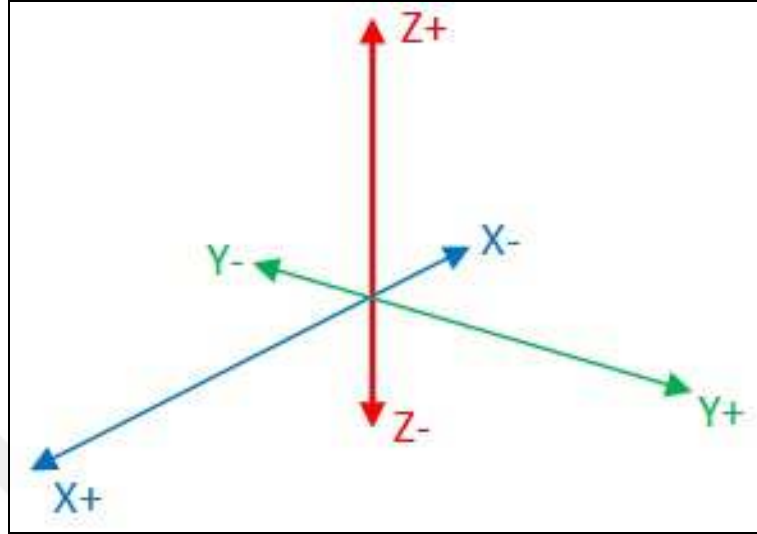
Ultrasonik problemlerin pozisyonları dışında hidrofona sertifikasındaki yapılandırma ve düzeltme katsayısı değeri yazılıma kaydedilmektedir. Böylelikle ölçüm sonuçlarının doğruluğu sağlanmaktadır. Yazılım, ölçümleri parçalara ayırarak farklı zamanlarda ölçüm yapabilme olanağı sağlamakta ve ölçüm sonuçlarının grafiksel çıktısını verebilmektedir. Ancak ölçüm verilerinin yüksek boyutlarda olması sebebiyle LabView ile hazırlanan yazılım iki boyutlu ölçümlerin grafiklerini veremediğinden dolayı ölçümler tamamlandıktan sonra elde edilen veriler, MATLAB programında yazılan kod ile grafik gösterim haline getirildi.

Hidrofona ve ultrasonik problemler ölçüm sistemine fiber malzemedan üretilmiş prob tutucular ile eklenmektedir. Üç eksen kumanda ile suya indirilen problemler göz ile yaklaşık olarak hizalanarak, hidrofona, ultrasonik problemlerin merkezine gelecek şekilde hizalanana kadar kumanda ile pozisyonu ayarlanmaktadır. Havuzdaki su kabarcıkları da temizlendikten sonra sistem ölçümlere hazır hale gelmektedir.

3.2. Ölçümlerin Alınması

Ölçümleri alınacak verici problemler (ultrasonik problemler) ile alıcı prob (hidrofona) üç eksen sistemine yerleştirildikten sonra suya daldırıldı. Ölçümler için ultrasonik problemlerin konumu X, Y ve Z eksenlerinde doğru bir şekilde bulundu. Bunun için hidrofona ultrasonik problemlerin merkezine göz yardımıyla hizaladıktan sonra odak noktasını doğru belirleyebilmek için X, Y ve Z eksenlerinde ölçümler yaparak

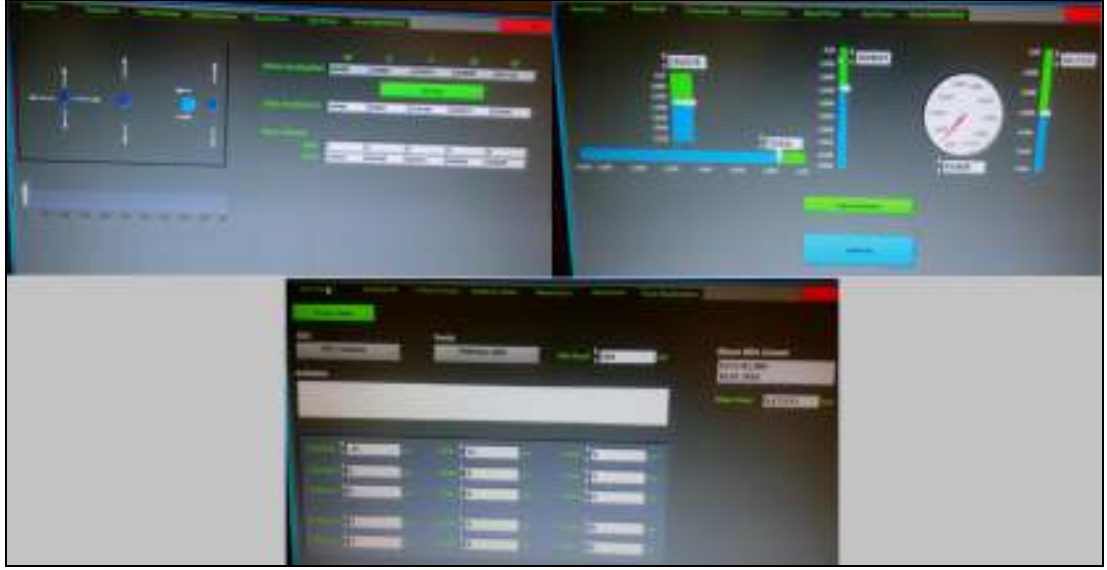
hidrofon ve ultrasonik probun eksen pozisyonu ayarlandı. Sistemde tanımlanan X, Y ve Z eksenleri Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. X, Y ve Z eksenleri

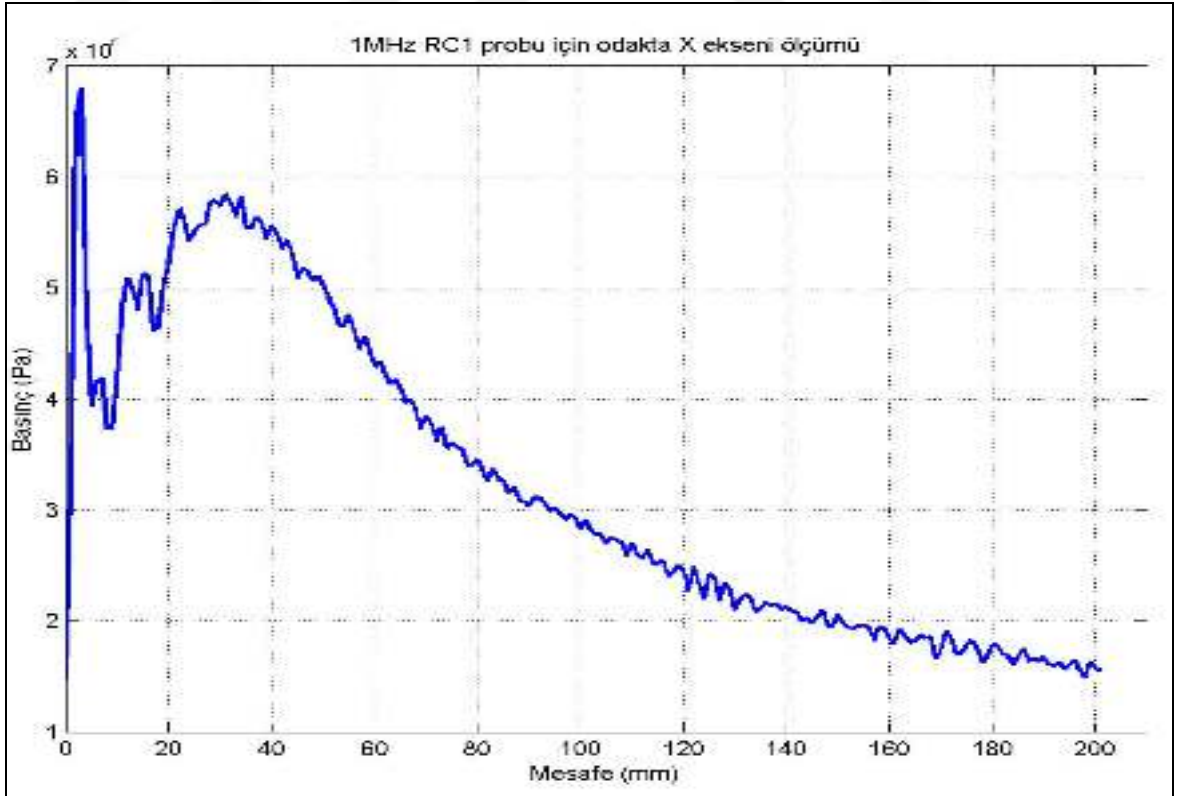
Ölçümlerin yapılmasında kullanılan yazılım sekiz adet ara yüze sahiptir. Bu ara yüzler; “Eksen Kontrol”, “Koordinata Git”, “Frekans Taraması”, “Alıcı&Verici Param.”, “Manuel Ölçüm”, “Uzay Ölçümü” ve “Ölçüm Değerlendirme” menülerinde bulunmaktadır. “Eksen Kontrol” ara yüzü ile problemlerin suya daldırılıp çıkarılma işlemleri ile ayarlanan yeni koordinatların değerleri set edilir. “Koordinata Git” ile alıcı probun eksen değerleri eksenlerde yapılan ölçüm sonuçlarına göre ayarlanır. “Alıcı&Verici Param.” ile hidrofonun kalibrasyon sertifikasındaki düzeltme katsayısı değeri girilir. “Uzay ölçümü” ile hidrofonun ölçüm yapacağı eksenler, eksenlerdeki konumu ve adım sayıları set edilir. “Ölçüm Değerlendirme” ile ölçüm sonucunda elde edilen değerlerin grafiksel gösterimi çıktı olarak alınır. Ölçümler boyunca en sık olarak, “Eksen kontrol”, “Koordinata Git” ve “Uzay Ölçümü” arayüz menüleri kullanıldı. Bu arayüz menüleri Şekil 3.4’te gösterildi.

Suya indirilen problemlerin X eksenini ölçümleri için öncelikle X ekseninde hidrofon, ultrasonik probun yüzeyine yaklaştırılarak bu pozisyon set edildi. Daha sonra X başlangıç 0, bitiş 170 ve adım 2 olarak ayarlandı ve ölçüm başlatıldı. Bir adım, 1mm mesafeye karşılık gelmektedir. Ölçüm sonucunda X eksenindeki verilerin grafiksel gösterimi incelendi. Yapılan incelemeye göre, genlik değerlerinin en yüksek olduğu aralık belirlenerek bu aralıkta yeniden 1 mm adımlarla ölçüm yapıldı.



Şekil 3.4. Basınç alanı ölçüm yazılımı ara yüzleri

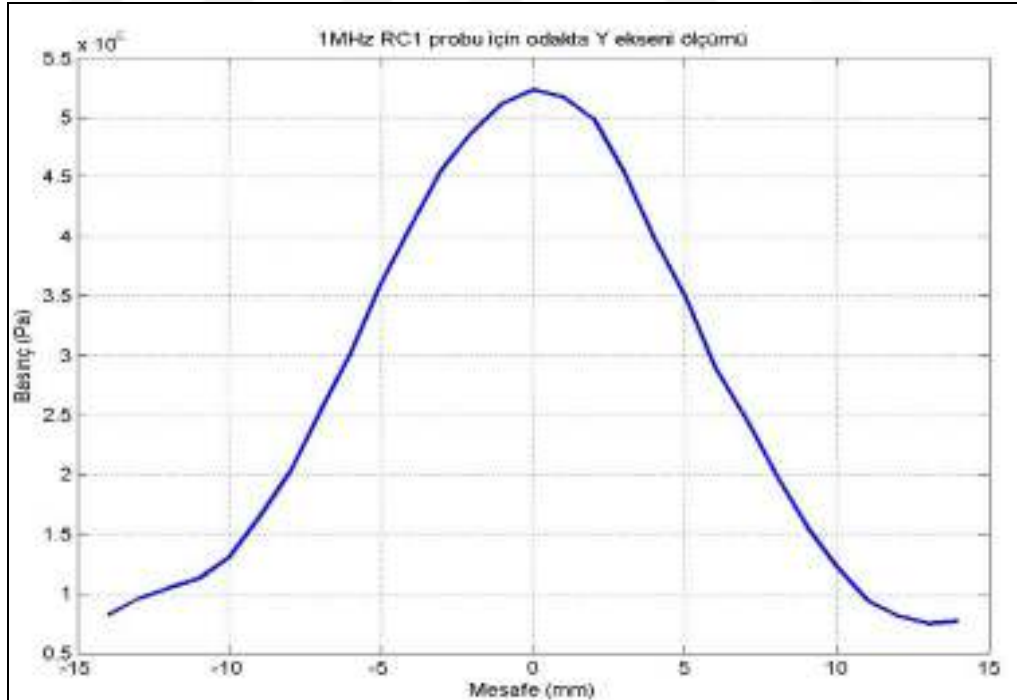
RC1 model probun X ekseninde yapılan ölçümlerine ait örnek grafik Şekil 3.5'te gösterildi. Şekil incelendiğinde, X ekseninde 30-40 arasındaki noktaların aradığımız yaklaşık odak noktası olduğu anlaşıldı. Bu bölge, 1 adımla (1 mm) tekrar taratıldı ve odak noktası bulundu.



Şekil 3.5. RC1 probunun X eksen basıç alanı ölçümü

Ön ölçümlerle bulunan bu nokta, ultrasonik probun X ekseninde odak noktasıdır ve yazılımın ilgili menüsünden X ekseninde odak noktası olarak set edildi. Bu noktanın Y ve Z eksenlerinde de odak noktası olduğunun doğrulanması gerekmektedir. Bu amaçla, Y ekseninde yapılacak ölçümler için X ve Z eksenleri için başlangıç, bitiş ve adım değerleri 0 olarak set edildi. Y eksenini için “başlangıç”, “bitiş” ve “adım” değerleri ayarlandı ve Y ile Z eksenlerinde ölçümler yapıldı.

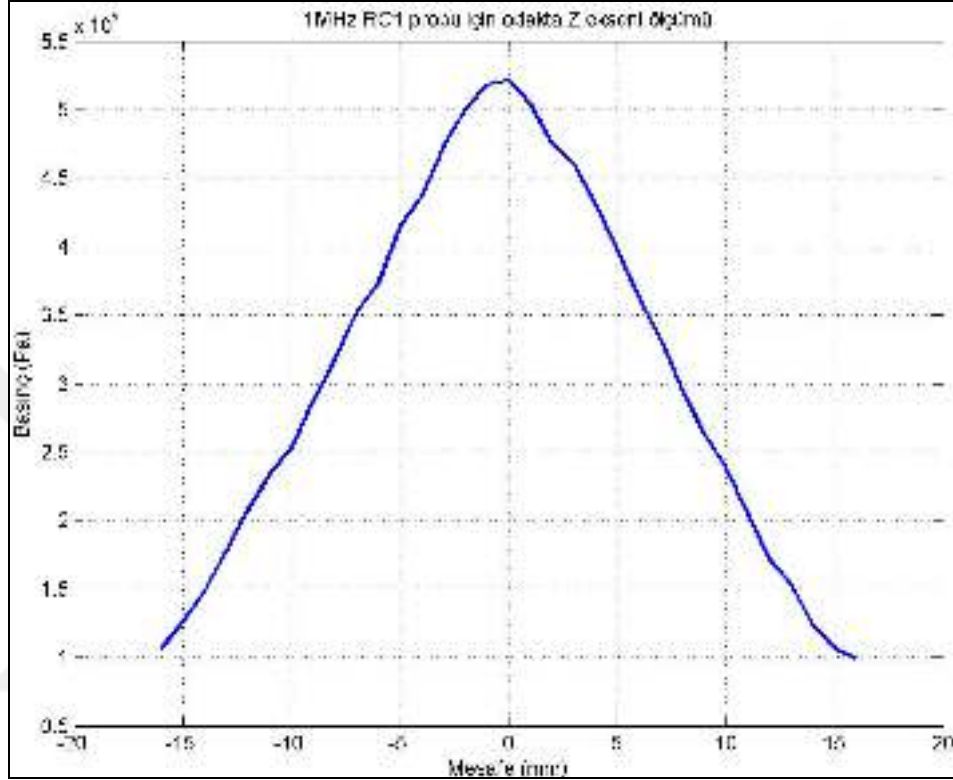
Elde edilen değerlerle çizdirilen grafiklere göre Y eksenini için doğru odak noktası bulunana kadar eksen değerleri “Koordinata Git” menüsünden değiştirildikten sonra “Eksen Kontrol” menüsünden yeni koordinat değerleri ayarlandı ve yeni ölçümler alındı. Y ekseninde elde edilen ölçüm verileriyle çizdirilen grafik “0” noktasına göre simetrik olduğunda, Y ekseninde yaklaşık odak noktası bulundu. RC1 model proba ait örnek Y eksenini grafiği Şekil 3.6’da görülmektedir. Y ekseninde 1 mm adımlarla 29 noktada ölçüm alındı. Bu ekseninde alınan ölçümlerin, eğrinin yaklaşık olarak “0” noktasına göre simetrik olduğu görüldü. Bu grafik Y ekseninde ayarlamamın doğru yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.6. RC1 probunun Y eksenini basınç alanı ölçümü

Daha sonra aynı işlem Z eksenini için yapılarak doğru konum ayarlandı. RC1 model proba ait örnek Z eksenini grafiği Şekil 3.7’de görülmektedir.

Odak noktası, ölçüm uzayında bir nokta olduğundan, her ekseninde bulunan odak noktası tepe gerilimlerinin yaklaşık olarak birbirine eşit olması gerekmektedir. Bu şartın sağlanması, ölçüm uzayında doğru noktanın bulunduğuna işaret etmektedir. Bu işlemler ile ultrasonik probun basınç alanı taraması için doğru konumlar bulundu.



Şekil 3.7. RC1 probu için Z ekseninde basınç alanı ölçümü

X, Y ve Z konumları ile odak noktası ayarlandıktan sonra XY, XZ ve YZ eksenlerinde yapılan ölçümler ile ultrasonik probun karakterizasyonu tamamlandı. Probun geometrisine göre odak noktasının ultrasonik probun yüzeyine olan mesafesinin değiştiği görüldü.

Problar için en uzak mesafe, odakta 170 mm olarak belirlendi. Probların odak noktası tespiti için X, Y ve Z eksenleri tarama aralıkları Tablo 3.1 ve 3.2’de verildi. Tabloda gösterilen tarama aralıklarında 1 adımla (1 mm) ölçümler alındı.

XY ve XZ ölçümleri için geometrilere göre Y ve Z eksenlerinde ölçülecek değerler değişmektedir. Bunun sebebi, geometrilere göre dönüştürücünün en ve boylarının değişmesidir. Ultrasonik problemlerin geometrilere göre iki boyutlu ölçüm aralıkları ve adım değerleri Tablo 3.3 ve 3.4’te gösterildi.

Tablo 3.1. Odak noktası tarama aralıkları (1 MHz)

Model	Eksen	Başlama	Bitiş
RC1	X	-31	+170
	Y	-12	+12
	Z	-15	+15
RH1	X	-14	+170
	Y	-10	+10
	Z	-10	+10
CR1	X	-30	+170
	Y	-12	+12
	Z	-12	+12

Tablo 3.2. Odak noktası tarama aralıkları (2 MHz)

Model	Eksen	Başlama	Bitiş
RC2	X	-70	+170
	Y	-10	+10
	Z	-12	+12
RH2	X	-34	+170
	Y	-10	+10
	Z	-10	+10
CR2	X	-120	+170
	Y	-15	+15
	Z	-15	+15

X eksenini için başlama değeri, probun yüzeyine en yakın mesafeye ayarlandı. Bu değer girildikten sonra ölçümlere başlandığında, iğne uçlu hidrofona probun yüzeyine olan mesafesi yaklaşık olarak 0,5 mm ile 2 mm arasındadır. X eksenini için bitiş değeri, odak noktasından 170 mm uzaklıktadır. Eksenlerde 1 mm adımlarla tarama yapıldı. Her bir noktada ölçüm süresi yaklaşık olarak 21 sn. sürmektedir.

Y ve Z eksenleri için ayarlanan başlangıç ve bitiş değerlerinde ultrasonik probda kullanılan dönüştürücünün boyutları göz önünde bulunduruldu. Merkez "0" noktasına göre "+" ve "-" yönlerde, dönüştürücünün yüzey alanının sınırlarına göre bir aralık seçilerek ölçüm yapıldı. Dikdörtgen geometrideki dönüştürücünün en ve boy değerleri 10 mm ile 15 mm'dir. Bu sebeple, XY ölçümü için Y ekseninde en az 12 mm eninde bir mesafe ölçüldü. XZ ölçümünde ise Z ekseninde en az 16 mm uzunluğunda bir mesafe ölçüldü.

Tablo 3.3. Probların taranması için eksen değerleri (1 MHz)

Model	Eksen	XY		XZ		YZ	
		Başlama	Bitiş	Başlama	Bitiş	Başlama	Bitiş
RC1	X	-31	+170	-31	+170	0	0
	Y	-6	+6	0	0	-7	+7
	Z	0	0	-8	+8	-8	+8
RH1	X	-14	+170	-14	+170	0	0
	Y	-10	+10	0	0	-10	+10
	Z	0	0	-9	+9	-9	+9
CR1	X	-30	+170	-30	+170	0	0
	Y	-12	+12	0	0	-12	+12
	Z	0	0	-12	+12	-12	+12

Tablo 3.4. Probların taranması için eksen değerleri (2 MHz)

Model	Eksen	XY		XZ		YZ	
		Başlama	Bitiş	Başlam a	Bitiş	Başlam a	Bitiş
RC2	X	-70	+170	-70	+170	0	0
	Y	-10	+10	0	0	-10	+10
	Z	0	0	-10	+10	-10	+10
RH2	X	-34	+170	-34	+170	0	0
	Y	-10	+10	0	0	-10	+10
	Z	0	0	-10	+10	-10	+10
CR2	X	-120	+170	-120	+170	0	0
	Y	-11	+11	0	0	-11	+11
	Z	0	0	-11	+11	-11	+11

Ölçümlerin tamamlanmasından sonra MATLAB programında yazılan kod parçacığı ile akustik basınç alanı grafikleri çizdirildi.

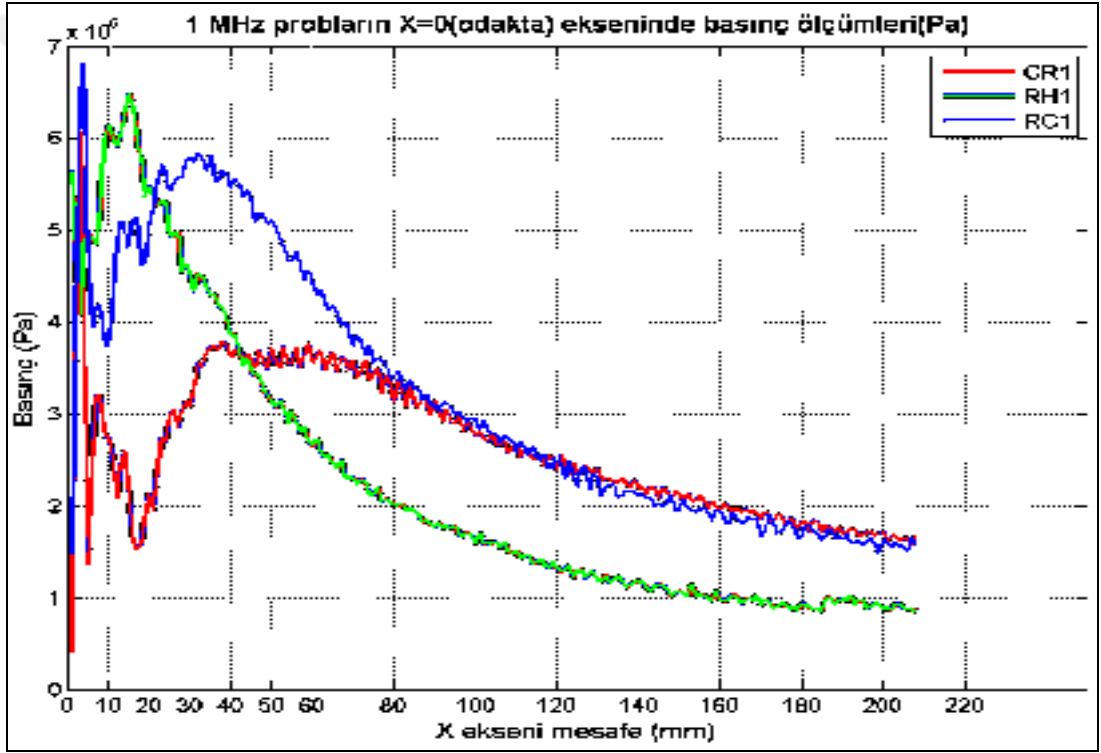
3.3. Basınç Alanı Ölçüm Sonuçları

Ölçümler, odak noktalarının ve basınç yoğunluklarının farklı geometriler ile frekanslara göre değişimleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla literatürden faydalanılarak yapıldı. Akustik basınç alanı ile dönüştürücünün şekli ve üretilen işaretlerin genliği arasında bir ilişkinin var olduğu literatürde görülmektedir [12-19].

Dikdörtgen, eşkenar dörtgen ve daire şeklindeki dönüştürücülere sahip ultrasonik problemlerin odak noktaları bulunduğundan sonra, X ekseninde yapılan basınç alanı ölçümlerine ait sonuçlar Şekil 3.8 ve 3.9'da görülmektedir.

Ölçüm sonuçlarına göre çizilen grafikte, odak noktasının ultrasonik probun yüzeyine olan uzaklığının, dairesel problarda (CR1 ve CR2) en uzakta, eşkenar dörtgen problarda (RH1 ve RH2) ise en yakında olduğu görüldü. Eşkenar dörtgen ve dikdörtgen geometriler için uzak alan başlama noktaları deneysel olarak elde edildi [17].

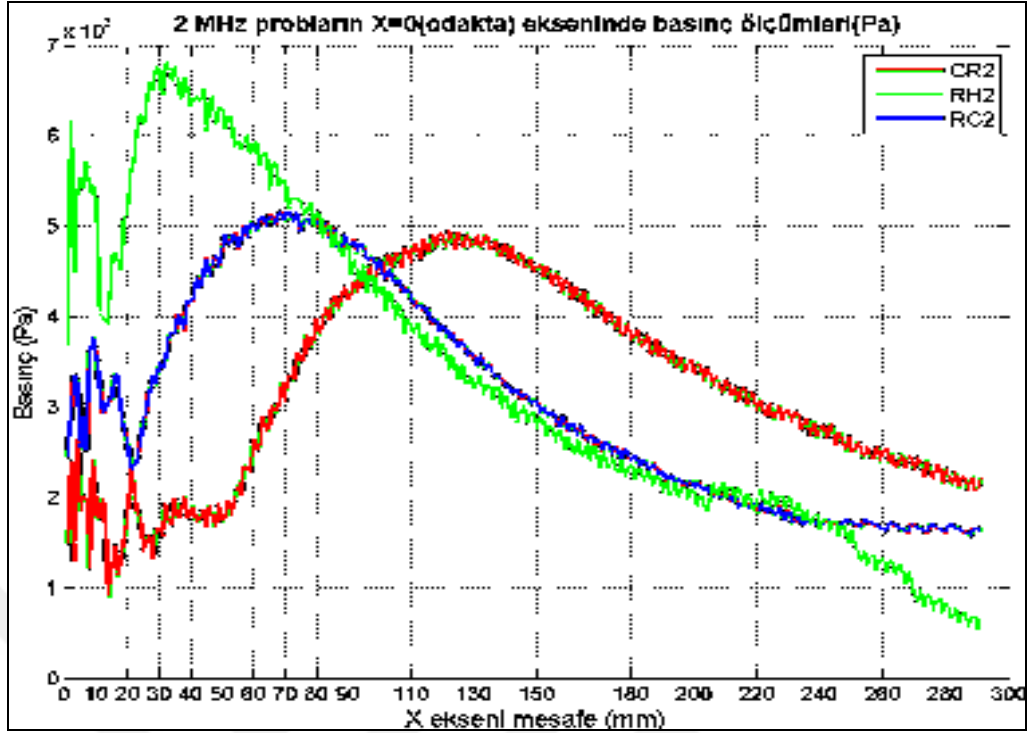
Ayrıca, Şekil 3.8 ve 3.9 incelendiğinde, 2 MHz problemin odak noktalarının 1 MHz problemlere göre yaklaşık iki kat arttığı görüldü. Basınç alanının aksenal incelemesinde dikdörtgen dönüştürücülü (RC2) probun Şekil 3.9’da görülen deneysel sonuçlarının literatürde elde edilen sonuçlarla benzerlik sağladığı tespit edildi [15].



Şekil 3.8. Odak noktasında X ekseninde ölçümleri (1 MHz problemler)

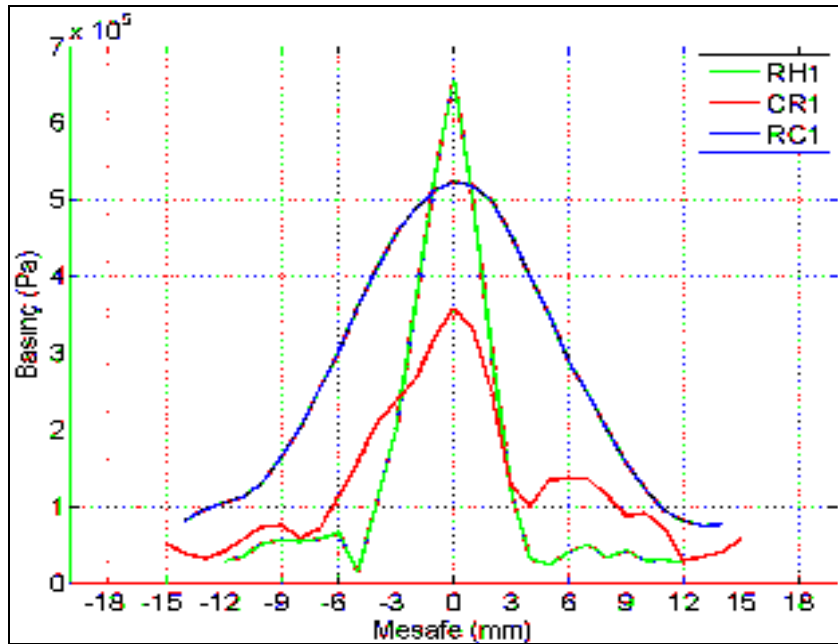
Ultrasonik problemler için Y ekseninde odak noktasında yapılan ölçümlere ait sonuçların simetrik olduğu Şekil 3.10’da görülmektedir.

Y ekseninde yapılan basınç alanı ölçüm sonuçlarından elde edilen değerlerin, X ekseninde elde edilen basınç alanı değerlerine yakın olması, ölçüm uzayında X ekseninde bulunan odak noktasının Y ekseninde de yaklaşık olarak aynı noktada olduğunu desteklemektedir.



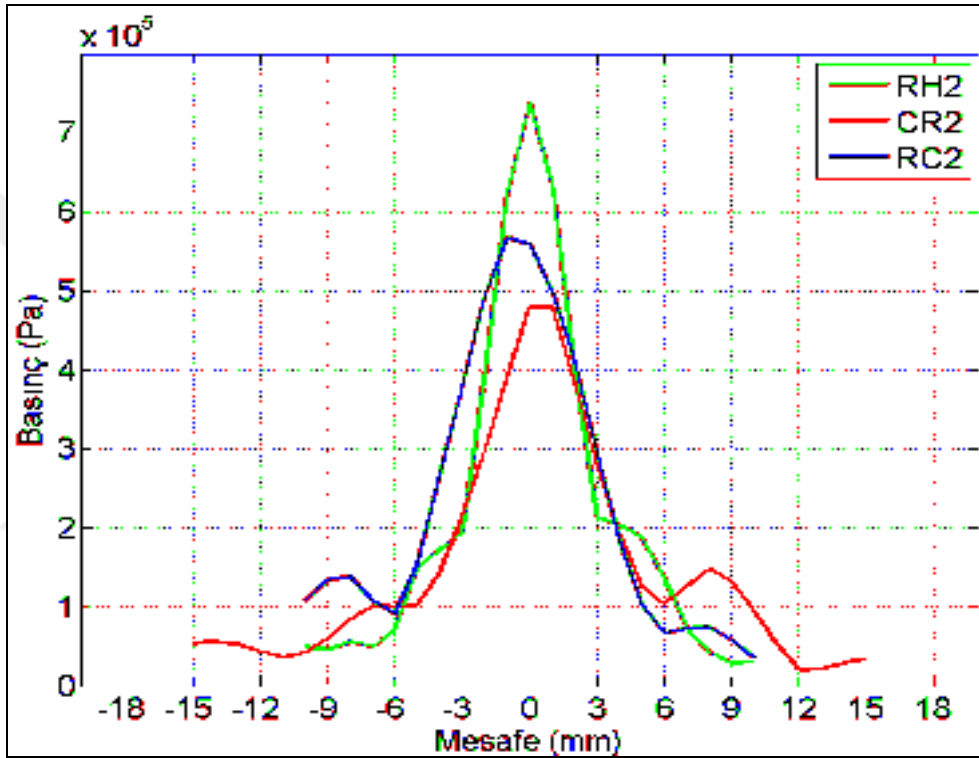
Şekil 3.9. Odak noktasında X eksen ölçümleri (2 MHz prob lar)

Şekil 3.10'daki ölçüm sonuçları incelendiğinde, odak noktasında basınç alanının yanal genişliğinin eşkenar dörtgen dönüştürücülü ultrasonik prob (RH1) için en dar, dikdörtgen ve daire şeklindeki dönüştürücülü ultrasonik prob lar (RC1 ve CR1) için ise yaklaşık olarak eşit olduğu görüldü [17].



Şekil 3.10. Odak noktasında Y eksen ölçümleri (1 MHz prob lar)

2 MHz merkez frekansında çalışan ultrasonik probların ölçümlerinde her üç probun da yanal alan oluşumu olduğu Şekil 3.11’de görülmektedir. Ancak, bu alanların eşkenar dörtgen dönüştürücülü ultrasonik prob (RH2) için çok belirgin bir şekilde olmadığı görüldü. RH2 model probun odak noktası “1” noktasına göre simetriktir. Yani, odak “0” noktasına göre 1 mm “+” yöndedir. Bu durumun, probun üretimi sırasında, dönüştürücünün kılıf içindeki pozisyonundan kaynaklanmış olabileceği düşünüldü.



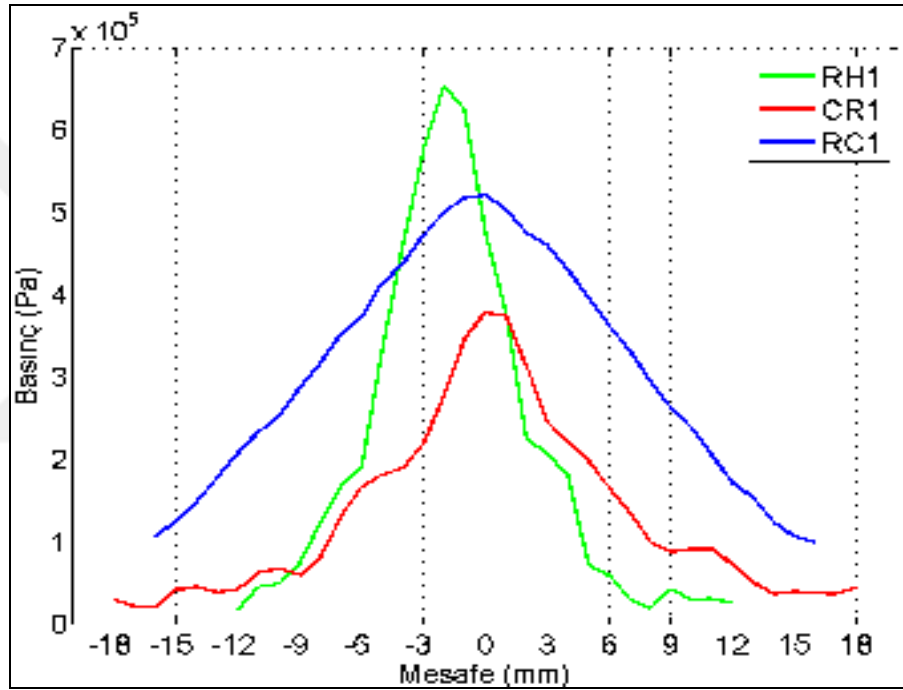
Şekil 3.11. Odak noktasında Y ekseninde ölçümleri (2 MHz problar)

1 MHz ve 2 MHz probların Z ekseninde ölçüm verilerine ait Şekil 3.12 ve 3.13 incelendiğinde, basınç değerlerinin Y ekseninde elde edilen basınç alanı ölçüm sonuçlarına yaklaşık olarak eşit olduğu görüldü.

RH1 model probun odak noktasının “0” noktasına göre 2 mm “-“ yönde, “-2” noktasına göre simetrik olduğu görüldü. RH2 model probun ise odak noktasının “+1” noktasına göre simetrik olduğu, odak “0” noktasına göre 1 mm “+“ yönde olduğu belirlendi. Bu durumun, probun üretimi sırasında, dönüştürücünün kılıf içindeki pozisyonundan kaynaklanmış olabileceği düşünüldü. Ancak, Y ve Z ekseninde basınç alanı ölçüm sonuçlarının birbirine yakın olduğu görüldü ve yaklaşık olarak “0”

noktasına göre simetrik grafikler elde edildi. Bu durum, ayarlanan koordinatların her iki model ultrasonik prob için de Z ekseninde yaklaşık olarak odak noktası olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.12 incelendiğinde, RC1 model probun yanıl alana sahip olmadığı görülmektedir. Y eksenine göre ortaya çıkan bu durumun, RC1 model ultrasonik probda kullanılan dönüştürücünün Y ekseninde 10 mm, Z eksenin de ise 15 mm olan boyutundan kaynaklandığı düşünöldü. CR1 ve RH1 model ultrasonik problarda ise belirgin bir şekilde olmasa da yanıl alanlar göröldü.

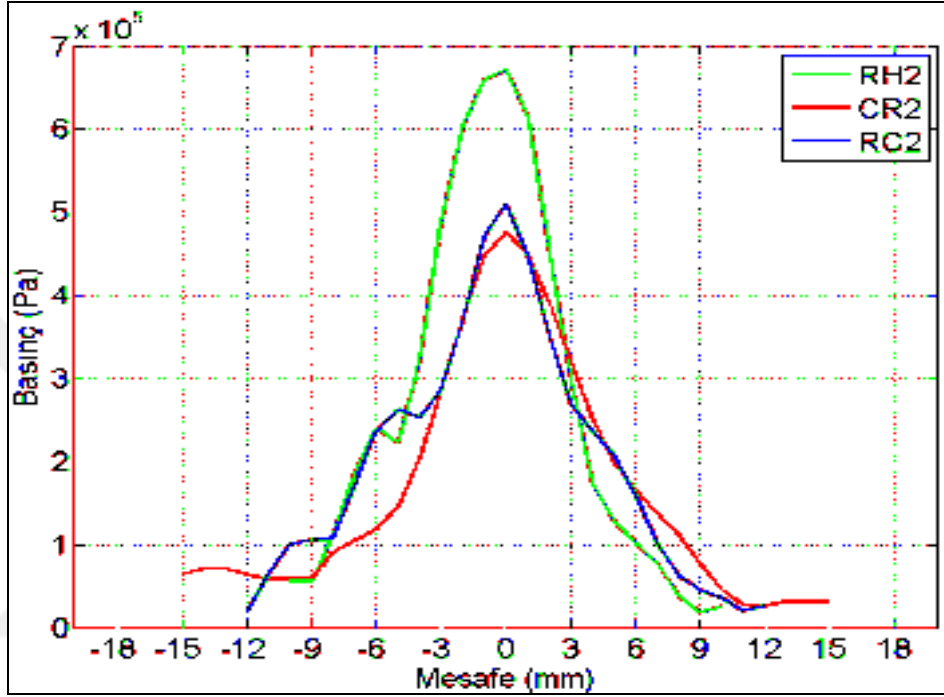


Şekil 3.12. Odak noktasında Z eksenı ölçümleri (1 MHz problar)

CR1 model probun Y ve Z eksenlerindeki ölçüm sonuçlarının benzemesi her iki ekseninde de merkez "0" noktasına olan uzaklığın yarıçap olarak eşit mesafesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumun, RH1 model probun da boyutlarından kaynaklandığı düşünöldü. RH1 model probun boyutları Z ekseninde 10 mm, Y ekseninde ise 6 mm'dir. Yanıl alanların belirlenmesi, iki eksenli tarama gruplarında daha belirgin olmaktadır.

2 MHz merkez frekansında çalışan ultrasonik problemlerin Z ekseninde yapılan ölçümlere ait değerlerle elde edilen grafiksel değerlendirme Şekil 3.13'te gösterildi.

RC2 ve CR2 model ultrasonik probların basınç alanı değerleri birbirine yakın olarak ölçüldü. CR2 model probun değeri Y eksenı sonucuyla aynı olmakla birlikte RC2 model probun değeri ise az miktarda düşük değerde ölçüldü. Aynı durum, RH2 model probda da görüldü. Ancak ölçülen değerlerde çok büyük bir fark olmaması sebebiyle bu noktaların yaklaşık odak noktası olduğu sonucuna ulaşıldı.



Şekil 3.13. Odak noktasında Z eksenı ölçümleri (2 MHz problar)

Odak noktasının belirlenmesinden sonra üç eksen de ikişerli gruplar halinde XY, XZ ve YZ eksenlerinde basınç alanı ölçümleri yapıldı.

XY ölçümleri, ölçüm havuzuna yukarıdan bakıldığında, probun yüzeyine en yakın noktada, probun solundan sağına doğru yatay düzlemde 1 mm adımlarla Y eksenı ölçümü alındıktan sonra probdan X ekseninde 1 mm uzaklaşarak yeniden probun solundan sağına doğru Y eksenı ölçümü alınmasıdır. Bu işlem X ekseninde belirlenen bitiş noktasına kadar devam eder.

Alınan ölçümler ölçüm dosyasına otomatik olarak kaydedilir. Bu ölçümlerde, ölçüm alınan noktadaki basınç alanı değeri, "mV" ve "Pa" birimlerinde kaydedildikten sonra ölçümlerde kullanılan yazılım, bu değerlerden basınç alanı değerini "dB" olarak hesaplar ve ölçüm dosyasında ayrı bir sütuna kaydeder.

Ölçümler, merkez frekansında ve 5 harmoniğinde yapılır. Ayrıca, X eksenindeki tek boyutlu ölçümlere ait “+” ve “-“ basınç alanı genlik değerleri de otomatik olarak aynı ölçüm dosyasının farklı sütunlarına kaydedilir.

XZ düzlemindeki ölçümler, ölçüm havuzuna yandan bakılarak, dönüştürücünün yüzeyinden X eksenini boyunca dönüştürücünün üst noktasından alt noktasına doğru dikey düzlemde ölçümlerin bir matris şeklinde yapılmasıdır. Bu ölçümler yapılırken, yazılım ultrasonik probun yüzeyine en yakın noktadan başlar ve X ekseninde bitiş noktasına kadar ölçümleri alır. Daha sonra Z ekseninde 1 mm “-“ yönde gidip aynı şekilde X eksenini boyunca bitiş noktasına kadar ölçümleri yapar. Bu işlem, Z ekseninde bitiş noktasına kadar birbirini tekrarlayarak devam eder.

YZ düzlemindeki ölçümler, X ekseninde seçilen noktalarda, ultrasonik probun yüzeyinin yatay ve dikey olarak bir matris şeklinde ölçülmesidir. Yazılım ölçümlere, probun yüzeyine en yakın noktada Y ekseninde “-“ yönden başlar ve “+” yöne doğru ilerler. Daha sonra Z ekseninde “-“ yönde 1 mm ilerler ve yeni Y eksenini ölçümünü alır. Bu işlem Z eksenini bitiş değerine kadar birbirini tekrarlayarak devam eder.

Her üç grup ölçümlerde de prob yüzeyi 1 mm adımlarla taranmaktadır. Ölçüm sonuçları, ölçüm dosyasında kendisiyle ilgili bir sütunda alt alta kaydedilir. LabView ile hazırlanmış, ölçüm sistemine ait program yardımıyla alınan ölçümlere ait verileri analiz edebilmek için MATLAB programında bir program yazıldı. Böylelikle ölçüm sonuçlarının grafik ve resim halinde çıktıları alındı.

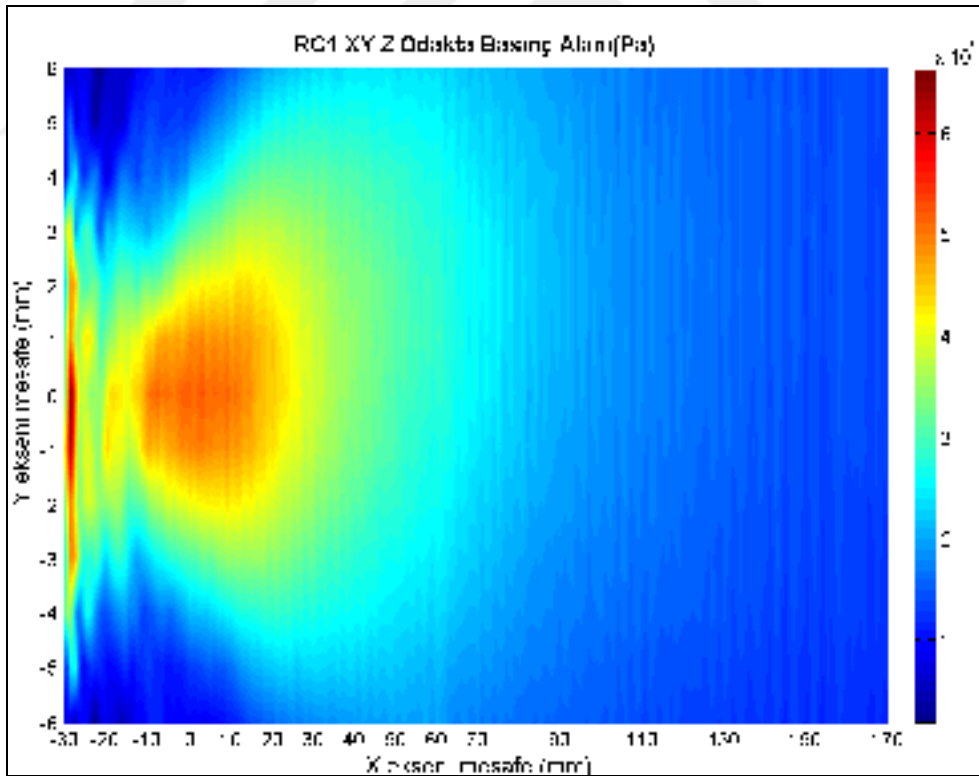
RC1 model probun, odak noktasına göre Z ekseninde sabit ve XY düzlemi için yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.14’te görülmektedir. Y ekseninde ± 6 mm aralığında, X eksenini boyunca 202 noktada ölçüm alındı. Odak noktasının prob yüzeyine olan mesafesinin 31 mm olduğu belirlendi.

RC1 model proba ait yakın alan (nearfield) bölgesi, probun yüzeyinden yaklaşık olarak 20 mm mesafeye kadar devam ederken, bu bölgede ayrıca yan lobların var olduğu Şekil 3.14’te görülmektedir. Yakın alanda beklenen, basınç alanının tam belirgin olmama durumu görüldü [12, 32].

Bunun sebebi, kaynağa çok yakın olan basınç alanının kaynak tarafından üretilen yeni alanlarla birlikte ileri geri hareketlerle bir karışık alan oluşumuna sebep olmasıdır.

Uzak alan (farfield) bölgesi, başladıktan itibaren odakta +20 mm mesafeye kadar yaklaşık olarak 500 kPa değerinde bir basınç alanının oluştuğu görüldü. Ancak oluşan bu basınç alanı tam olarak odaklanmış bir alan değildir. Basınç alanı yoğunluğu eğrisinin, literatürde belirtildiği gibi uzak mesafede kısa kenar boyunca elips şeklinde yayılarak [12] ve azalarak odak noktasından yaklaşık olarak +70 mm mesafede 250 kPa değerine indikten sonra yok olduğu görüldü.

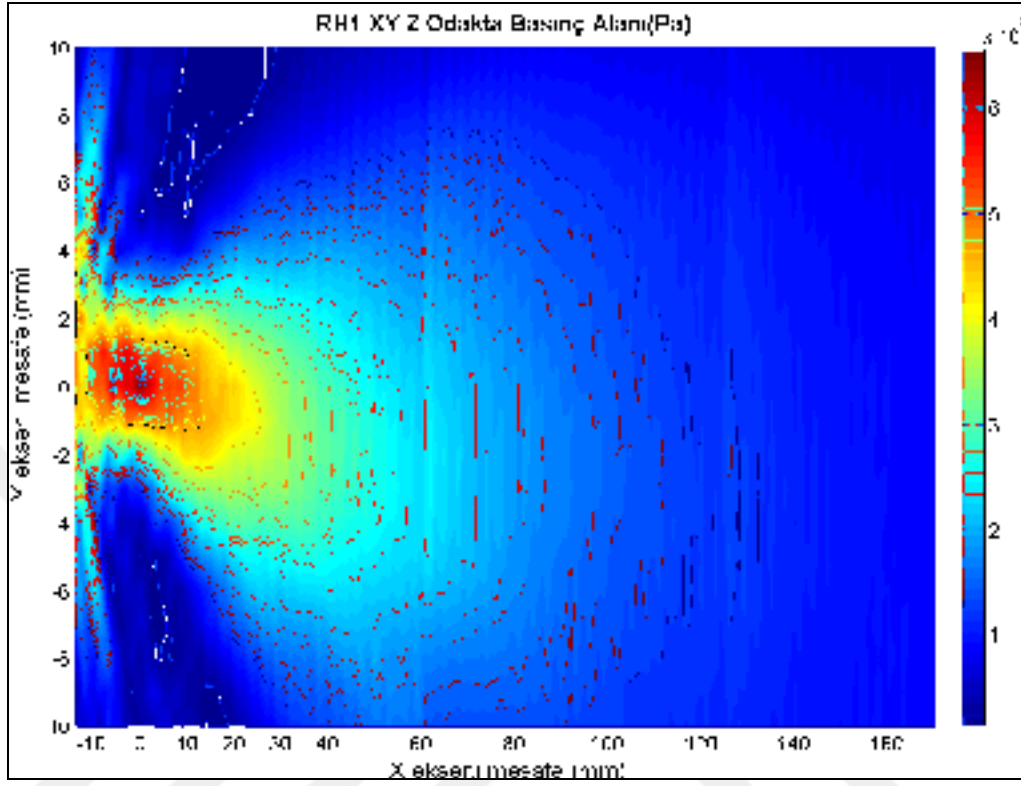
Literatürde belirtilen çok yakın alan, yakın alan ve uzak alan mesafelerinin, RC1 probuna ait ölçümler sonucunda yapılan hesaplarla (Ek-A) yaklaşık olarak elde edildiği görüldü [12, 32]. Hesaplanan ve ölçülen basınç alanı değerlerinin sonuçları arasında meydana gelen farklar, ortamın akustik direncinden kaynaklanmış olabilir.



Şekil 3.14. Dikdörtgen dönüştürücülü probun XY ölçümü (1 MHz)

RH1 model ultrasonik probun, odak noktasına göre Z ekseninde sabit ve XY düzlemi için yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.15'te görülmektedir. Y

ekseninde ± 10 mm aralığında, X ekseninde boyunca 185 noktada ölçüm alındı. Odak noktasının prob yüzeyine olan mesafesinin 14 mm olduğu tespit edildi.



Şekil 3.15. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü probun XY ölçümü (1 MHz)

RH1 ve RC1 model problemlerin odak noktalarının probun yüzeyine olan mesafeleri karşılaştırıldı ve RH1 model problemin odak noktasının prob yüzeyine olan mesafesinin daha yakın olduğu ölçüm sonuçlarından elde edilen grafikte görüldü. RC1 model proba göre daha dar olan ışın demeti, literatürde belirtildiği gibi Şekil 3.15'te görüldü [17].

RH1 model problemin basınç alanı yoğunluk etkisinin, probun yüzeyinden itibaren ölçüm uzayında eliptik bir geometriyle yayıldığı görüldü [33]. Yaklaşık olarak +60 mm mesafede, yakın alan bölgesinde oluşan yanal lobların ise odak noktasında yok olduğu görüldü. RC1 probuna göre daha yüksek olan, 600 kPa değerinde bir basınç alanının, odak noktası etrafında oluştuğu ve bu alanın, dar, yoğun ve belirgin bir alan olduğu görüldü.

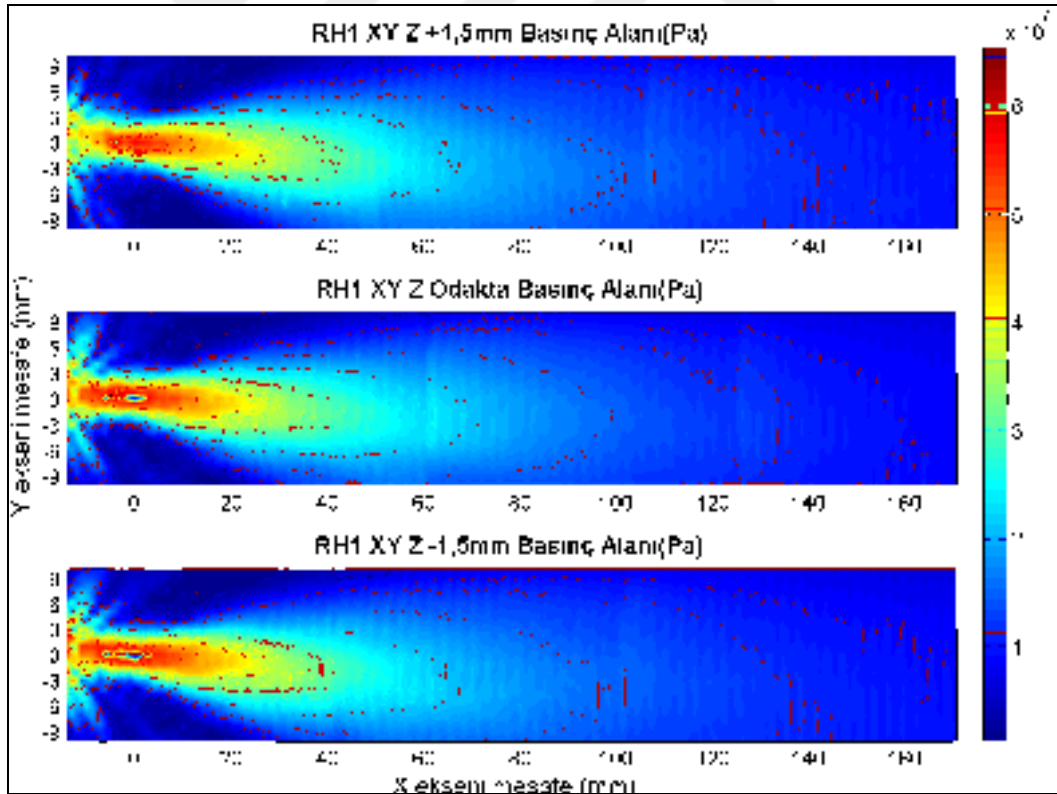
RH1 model problemin, Z ekseninde XY düzlemi için üç farklı konumda yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.16'da görülmektedir.

Z ekseninde odakta ve odakta $\pm 1,5$ mm kaydırılarak elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, basınç alanı mesafesinin ve geometrinin yaklaşık olarak aynı kaldığı görüldü.

Geometrinin aynı kalması, probun Z ekseninde bu mesafelerde birbirine benzer şekilde çalıştığını göstermektedir. Fakat odakta, 600 kPa değerinde oluşan basınç alanı, Z+1,5 mm konumunda oluşmamıştır.

Bu değer, Z-1,5 mm konumunda oluşmasına rağmen, odakta fark edilebilir şekilde meydana gelen beş farklı basınç alanı eğrisinin, bu konumda dört basınç alanı eğrisi şeklinde ortaya çıktığı görüldü.

Ayrıca, Z+1,5 mm konumunda basınç alanına ait grafiğin odak noktasında, basınç alanı dış eğrisinin daraldığı görüldü. Bu durumda, XY düzlemi ölçümü için, probun Z=0 (Z odakta) ekseninde daha etkin olduğu sonucuna ulaşıldı.



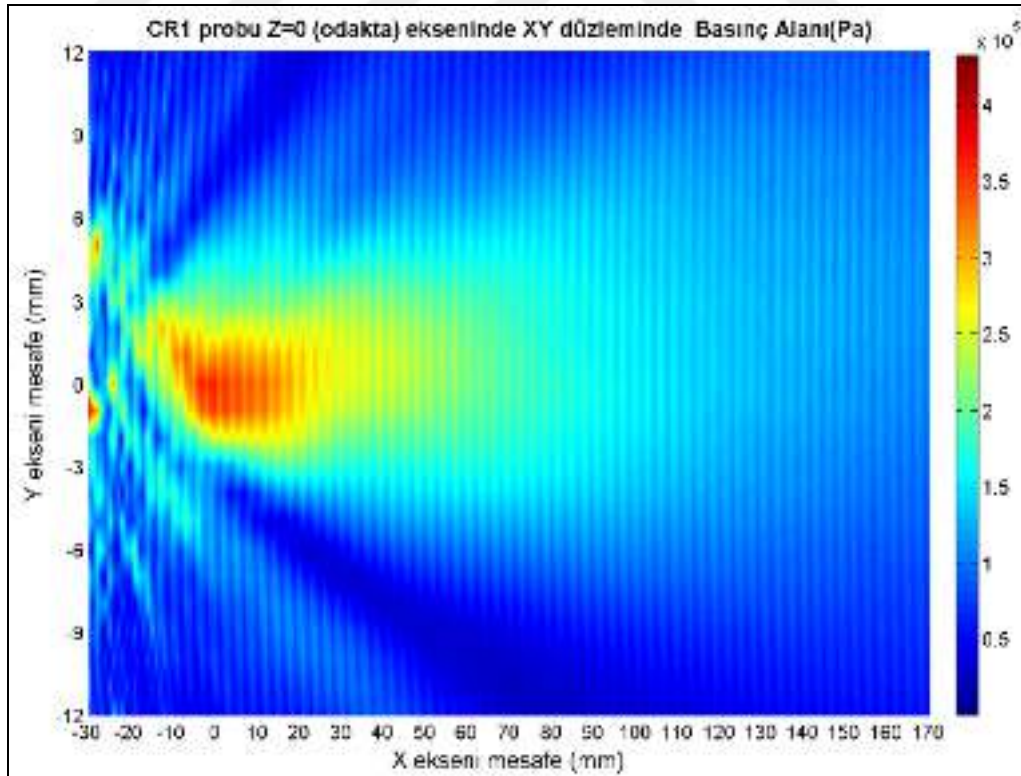
Şekil 3.16. RH1 probunun Z ekseninde farklı noktalarda XY ölçümleri

CR1 model ultrasonik probun, odak noktasına göre Z ekseninde sabit ve XY düzlemi için yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.17’de görülmektedir. Y

ekseninde ± 12 mm aralığında, X ekseninde boyunca 201 noktada ölçüm alındı. Odak noktasının prob yüzeyine olan mesafesinin 30 mm olduğu tespit edildi.

CR1 model probun yakın alan (nearfield) bölgesinin probun yüzeyinden yaklaşık olarak 20 mm mesafeye kadar devam ettiği Şekil 3.17’de görülmektedir. Teoride belirtildiği şekilde [32], yakın alan bölgesinde oluşan yanal loblar ve basınç alanının tam belirgin olmama durumunun ortaya çıktığı görüldü [12, 32]. Bu durum, kaynağa çok yakın olan basınç alanının kaynak tarafından üretilen yeni alanlarla birlikte ileri geri hareketlerle bir karışık alan oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Odaktan (“0” noktası) başlayarak, +20 mm mesafeye kadar ortalama 370 kPa değerinde bir basınç alanı oluştuğu görüldü. Ancak oluşan bu basınç alanı tam olarak odaklanmış bir alan değildir. Basınç alanı yoğunluğunun, literatürde belirtildiği gibi elips bir şekilde yayıldığı [12], X ekseninde “+” yönde ilerlerken azaldığı ve odak noktasından yaklaşık +80 mm mesafede 150 kPa değerine indikten sonra yok olduğu görüldü.

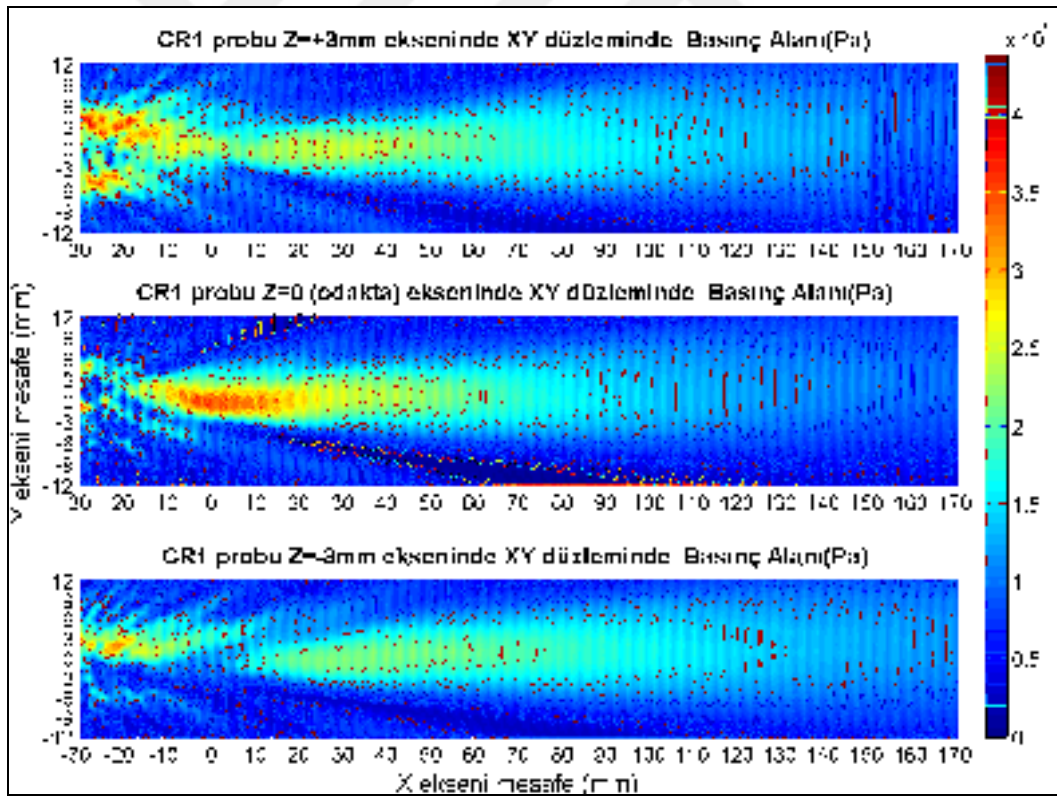


Şekil 3.17. Dairesel dönüştürücülü 1 MHz probun XY ölçümü

RC1 ve CR1 model problemlerin basınç alanı yoğunluklarının literatürle benzerlik gösterdiği tespit edildi. Uzak alana doğru X eksenini boyunca ilerlerken, CR1 model problemin doğruluğunu koruyarak zayıfladığı, RC1 model problemin ise $\pm Y$ yönünde yayılarak zayıfladığı görüldü.

CR1 model problemin yanall loblarının, yakın alanda var olduğu, X ekseniniyle belli bir açı yaparak ilerlediği, RC1 model problemin yanall loblarının ise Y ekseniniyle yaklaşık 0° açı yaparak oluşmadan yok olduğu görüldü. Ayrıca, basınç alanı yoğunluk değeri, CR1 model problemin basınç alanı değeri, RC1 model probleme göre daha düşük olduğu görüldü. CR1 model problemin yakın alan yanall loblarının ilerlemesinin ise RH1 model problemla benzerlik gösterdiği belirlendi.

CR1 model problemin, Z eksenini XY düzlemi için üç farklı konumda yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.18 ve 3.19’da görülmektedir.

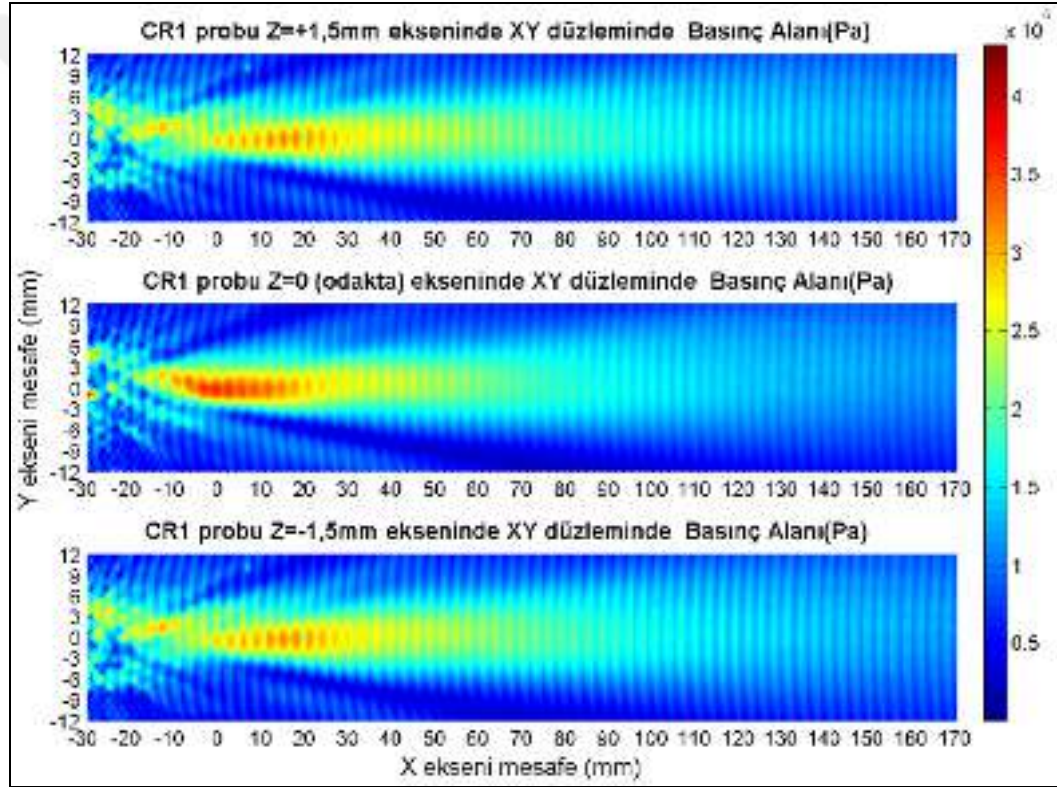


Şekil 3.18. CR1 probleminin Z eksenini odaktan ± 3 mm’de XY ölçümü

Z eksenini odakta ve odaktan ± 3 mm kaydırılarak elde edilen Şekil 3.18’deki ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, basınç alanı mesafesinin yaklaşık olarak aynı

kaldığı görüldü. Odakta, 400 kPa değerinde oluşan basınç alanı, $Z \pm 3$ mm konumlarında oluşmamıştır. Odak haricindeki eksenlerde yakın alan bölgelerinin daha belirgin olduğu görüldü. Bu durumda, probun odakta daha etkin çalıştığı sonucuna ulaşıldı.

Z ekseninde odakta ve odakta $\pm 1,5$ mm kaydırılarak elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, basınç alanı mesafesinin yaklaşık olarak aynı kaldığı görüldü. Odakta, 400 kPa değerinde oluşan basınç alanının, $Z \pm 1,5$ mm konumlarında oluşmadığı görüldü. Odak haricindeki eksenlerde yakın alan bölgelerinin daha belirgin olduğu, bu sebeple probun odakta daha etkin çalıştığı sonucuna ulaşıldı.



Şekil 3.19. CR1 probunun Z ekseninde odakta $\pm 1,5$ mm'de XY ölçümü

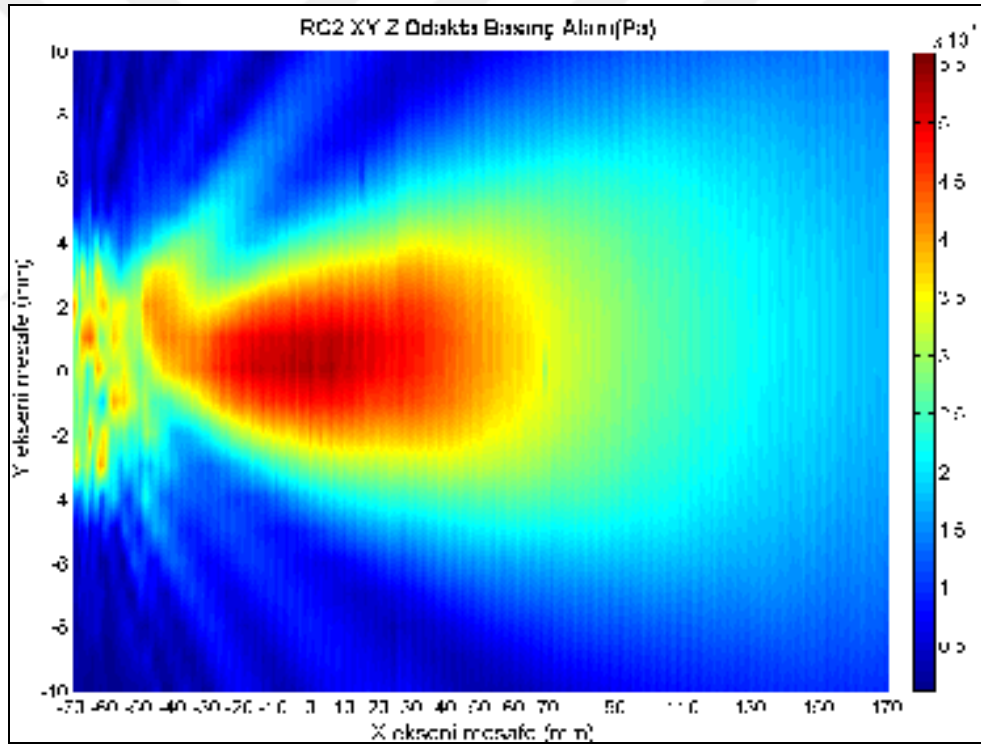
$Z \pm 1,5$ mm, $Z \pm 3$ mm ve odak noktasında yapılan ölçümler karşılaştırıldığında, $Z \pm 1,5$ mm eksenlerinde yapılan ölçümlerin basınç alanı eğrilerinin, odak noktasında yapılan ölçüm sonuçlarının basınç alanı eğrilerine benzediği görüldü.

RC2 model ultrasonik probun, odak noktasına göre Z ekseninde sabit ve XY düzlemi için yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.20'de görülmektedir. Y

ekseninde ± 10 mm aralığında, X eksenini boyunca 241 noktada ölçüm alındı. Odak noktasının prob yüzeyine olan mesafesinin 70 mm olduğu tespit edildi.

RC2 model probun yakın alanda yanal loblarının, Y ekseniniyle yaklaşık 0° açı yaparak ± 4 mm aralığında ve 200 kPa basınç değerine sahip bir şekilde oluşmadan yok olduğu görüldü. Basınç alanı odak ışın demetinin, RC1 model proba göre dar ve uzun, yakın alan basınç yoğunluğu eğrilerinin ise literatüre uygun olarak karmaşık bir şekilde olduğu görüldü [12, 32].

Basınç alanı yoğunluğunun, eliptik bir şekilde yayıldığı [12, 32], odak noktasından yaklaşık olarak +150 mm mesafede 200 kPa değerine indikten sonra yok olduğu, yakın alan ve uzak alan bölgelerinin oluştuğu görüldü [12, 17, 32].



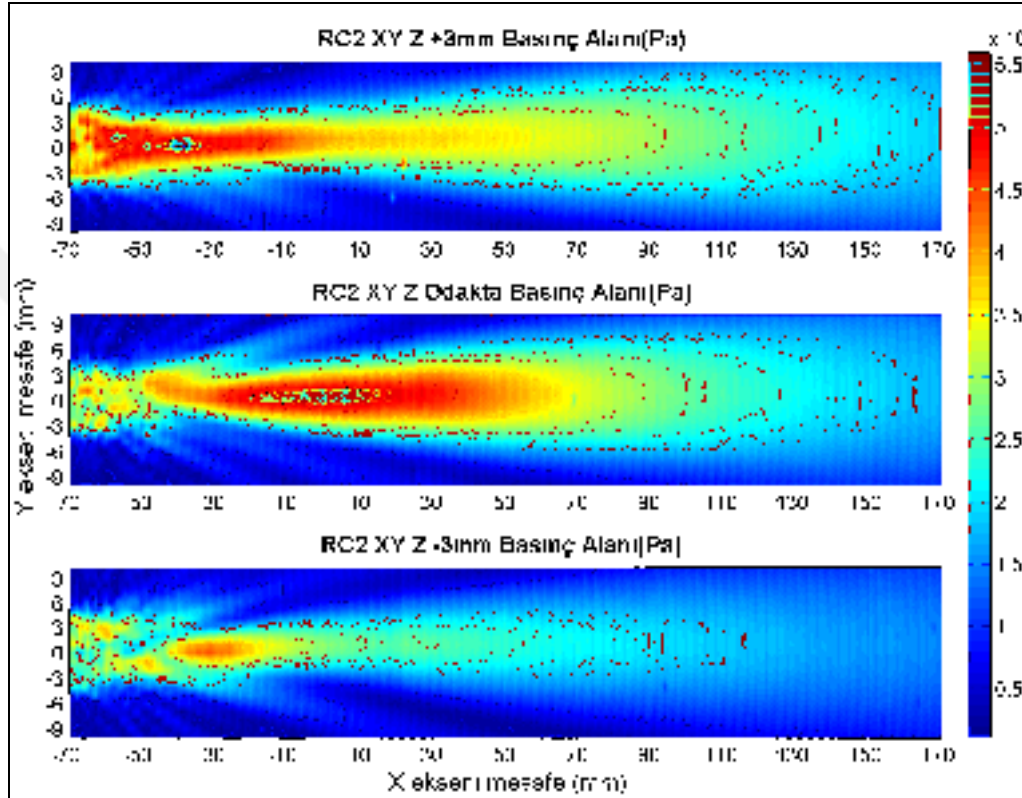
Şekil 3.20. Dairesel dönüştürücülü 2 MHz probun XY ölçümü

RC2 model probun, Z ekseninde XY düzlemi için üç farklı konumda yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.21’de görülmektedir.

Z ekseninde odakta ve odakta ± 3 mm kaydırılarak elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, basınç alanı mesafesinin yaklaşık olarak aynı kaldığı fakat basınç alanı değerinin eksendeki konumuna göre düştüğü görüldü. Odak noktasında, eliptik

geometride X eksenine göre simetrik ve yüksek (550 kPa) olan basınç alanı eğrisinin, $Z \pm 3$ mm eksenlerinde oluşmadığı tespit edildi.

$Z \pm 3$ mm konumlarında aynı basınç alanı geometrisinin oluşmamasının sebebinin, probun merkez noktasının XY düzleminde konumunun değişmesinden dolayı kaynaklanmış olabileceği düşünüldü.



Şekil 3.21. RC2 probunun Z ekseninde odak ± 3 mm'de XY ölçümleri

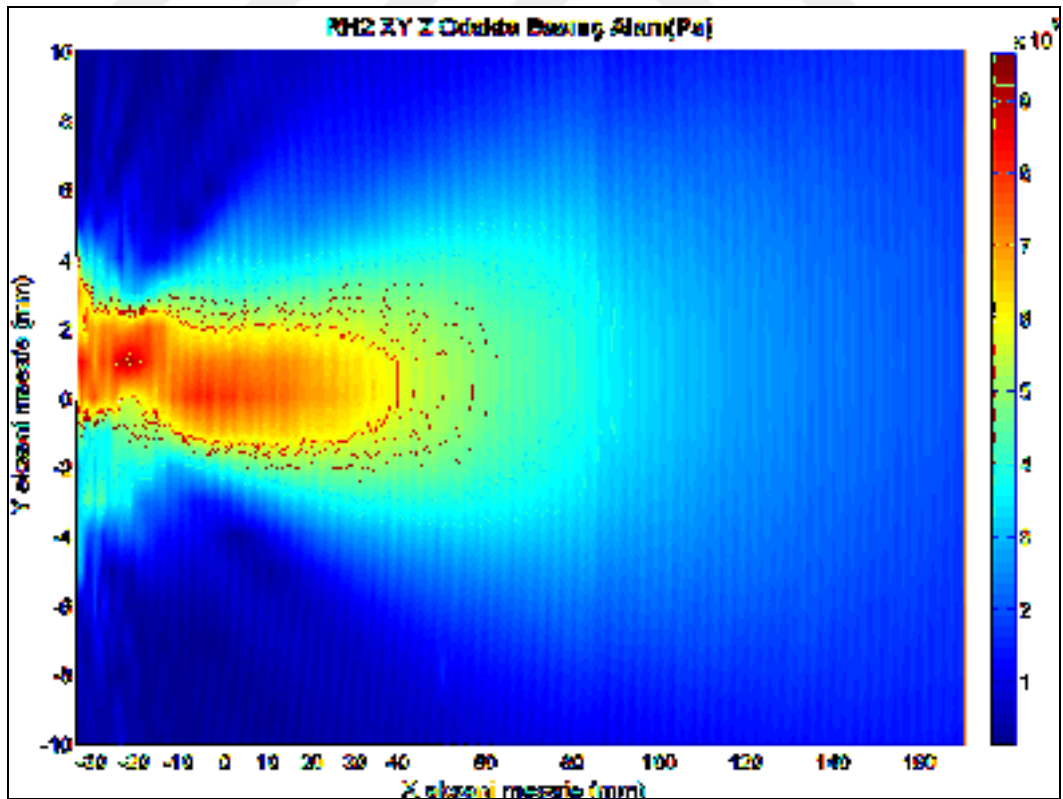
RH2 model ultrasonik probun, odak noktasına göre Z ekseninde sabit ve XY düzlemi için yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.22'de görülmektedir. Y ekseninde ± 10 mm aralığında, X eksenini boyunca 205 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasının prob yüzeyine olan mesafesinin 34 mm olduğu tespit edildi.

RH2 model probun yanal alanlarının değerlerinin yaklaşık 300 kPa ile 450 kPa arasında olduğu görüldü. Basınç alanı yoğunluğunun doğrusallığı, prob yüzeyinden yaklaşık 25 mm mesafede $-Y$ yönünde kaymıştır. Basınç alanı doğrusallığının $-Y$ yönünde kaymasının, RH1 probunda da bir miktar var olduğu, Şekil 3.15 incelendiğinde görüldü. Işın demetinin merkez alanda, 750 kPa ile 850 kPa değerleri

aralığında, RC2'ye göre dağılmadan belirli bir genişlikte, literatüre uygun bir şekilde ilerlediği görüldü [17].

Ölçüm uzayında eliptik bir geometriyle yayılarak [12] ve azalarak probun odak noktasından yaklaşık 90 mm mesafede, basınç alanı yoğunluk eğrisinin yok olduğu görüldü. RC2 nmodel probdan farklı olarak, yaklaşık 750 kPa değerinde ve 2 mm genişliğinde belirgin bir basınç alanı, düzlemsel olarak ilerlerken, prob yüzeyine 14 mm mesafede 900 kPa değerinde dar bir basınç alanının oluştuğu görüldü. Bu alanın, X ekseninde 5 mm uzunluğunda ve Y ekseninde 0,5 mm genişliğinde dar, yoğun ve belirgin bir alan olduğu, X eksen ölçümleri ile bulunan odak noktasından farklı bir noktada olduğu tespit edildi. Bu değer, RH1 model probdaki basınç alanı değerine benzerlik göstermektedir.

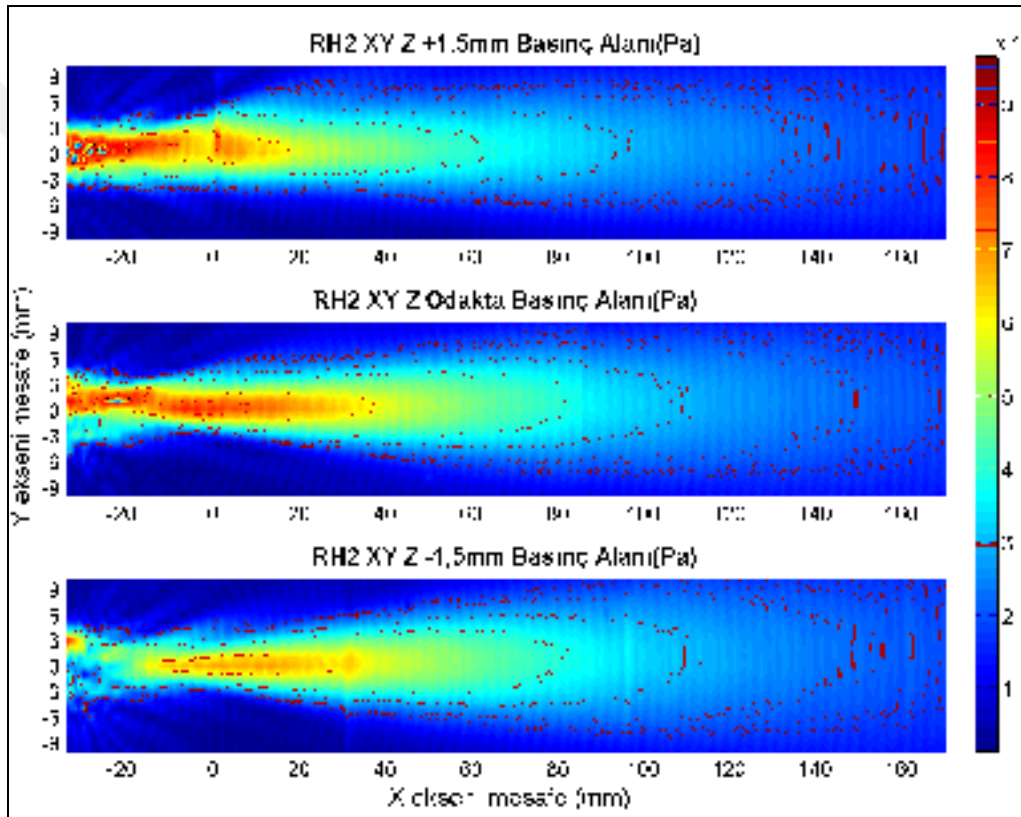
RC2 ve RH2 model problemlerin basınç alanları incelendiğinde, yakın alan bölgesinin literatüre uygun biçimde, RH2 model probda RC2 model proba göre daha yakın ve dalga demetinin daha dar olduğu görüldü [17].



Şekil 3.22. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü 2 MHz probun XY ölçümü

RH2 model probun, Z ekseninde XY düzlemi için üç farklı konumda yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.23'te görülmektedir.

Z ekseninde odakta ve odakta $\pm 1,5$ mm kaydırılarak elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, basınç alanı mesafesinin yaklaşık olarak aynı kaldığı fakat basınç alanı değerinin odak konumuna göre farklılıklar gösterdiği görüldü. Z+1,5 mm konumunda prob yüzeyine yakın bölgede geniş ve yüksek basınç alanı değeri görüldü. Z-1,5 mm konumunda ise prob yüzeyine yakın bölgede düşük değerli ve karmaşık şekilde bir basınç alanı görüldü.



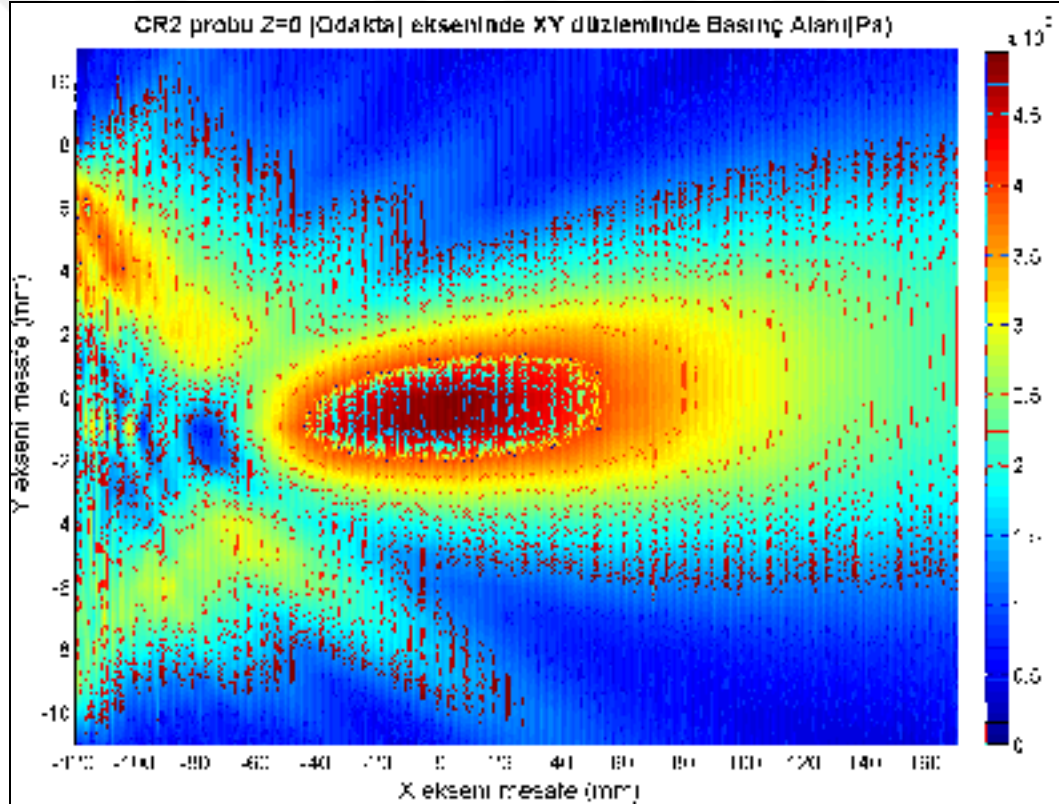
Şekil 3.23. RH2 probunun Z ekseninde farklı noktalarda XY ölçümleri

CR2 model ultrasonik probun, odak noktasına göre Z ekseninde sabit ve XY düzlemi için yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.24'te görülmektedir. Y ekseninde ± 11 mm aralığında, X eksen boyunca 291 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasının prob yüzeyine olan mesafesinin 120 mm olduğu tespit edildi.

CR2 probunun yakın alan bölgesinin oluştuğu, bu bölge içerisinde yanal loblarının, yaklaşık olarak ± 8 mm aralığında oluştuğu görüldü. Yanal lobların, +Y yönünde

yaklaşık 450 kPa bir değere ulaşmış olması Şekil 3.11'deki Y eksenli ölçümlerini deseklemektedir. Y eksenli ölçümlerinde +Y yönünde basınç alanının merkeze göre tam simetrik olmayıp bir miktar yüksek olduğu görüldü. Odak noktasında basınç alanı eğrisinin, RH2 modele göre daha geniş ve RC2 modele göre ise daha dar olduğu görüldü. Basınç alanı eğrisi, RC2 ve RH2 model problemlerinin eğrilerine göre X ekseninde daha simetriktir [17]. Yakın alan basınç alanı yoğunluğunun, dairesel problemlardan beklendiği gibi çok karmaşık bir şekilde oluştuğu görüldü [12].

Eliptik bir şekilde yayılan basınç alanı yoğunluğunun [12], odak noktasından yaklaşık olarak +150 mm mesafede 200 kPa değerine indikten sonra yok olduğu görüldü. Literatürde belirtilen yakın alan ve uzak alan bölgelerinin oluştuğu görüldü.

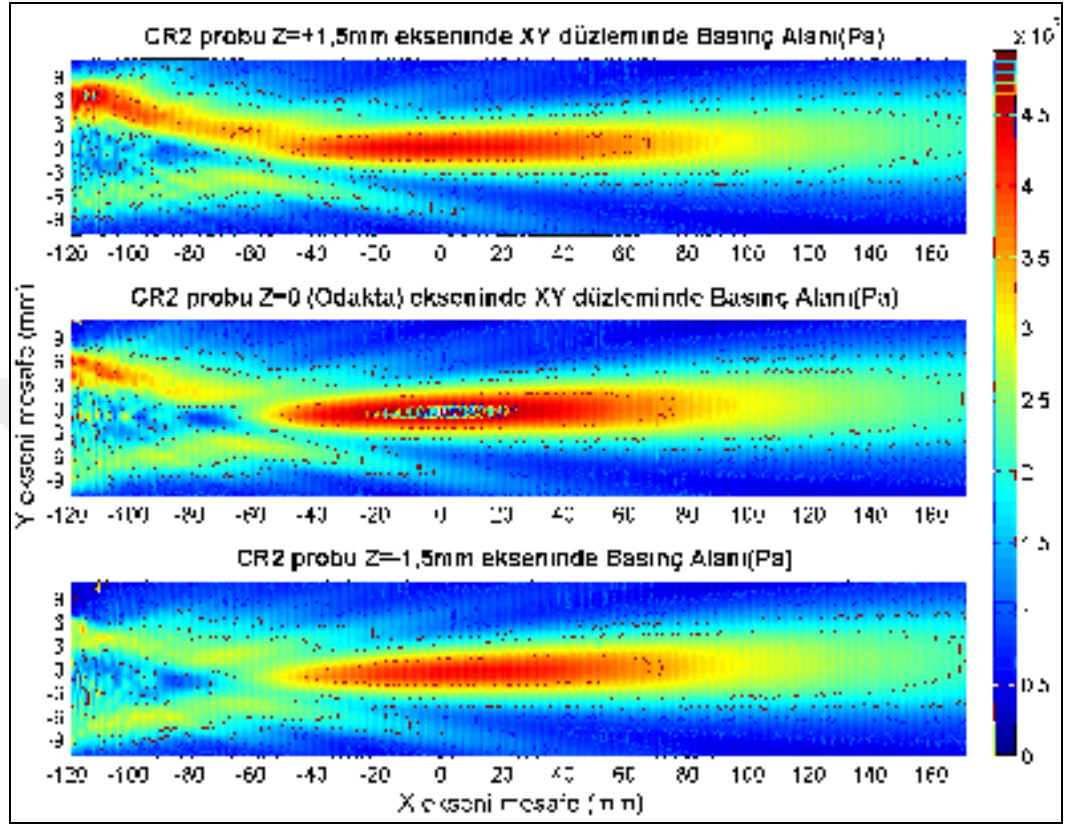


Şekil 3.24. Dairesel dönüştürücülü 2 MHz probun XY ölçümü

CR2 model probun, Z ekseninde XY düzlemi için üç farklı konumda yapılan tarama ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.25 ve 3.26'da görülmektedir.

Z ekseninde odakta ve odakta $\pm 1,5$ mm kaydırılarak elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, her üç ekseninde de uzak alan başlangıç mesafesinin aynı olduğu

görüldü. Z+1,5 mm ekseninde +Y yönünde belirgin bir alanın yakın alan mesafesi içerisinde oluştuğu ve basınç değerleri farklı olmakla birlikte geometrilerinin aynı olduğu görüldü.

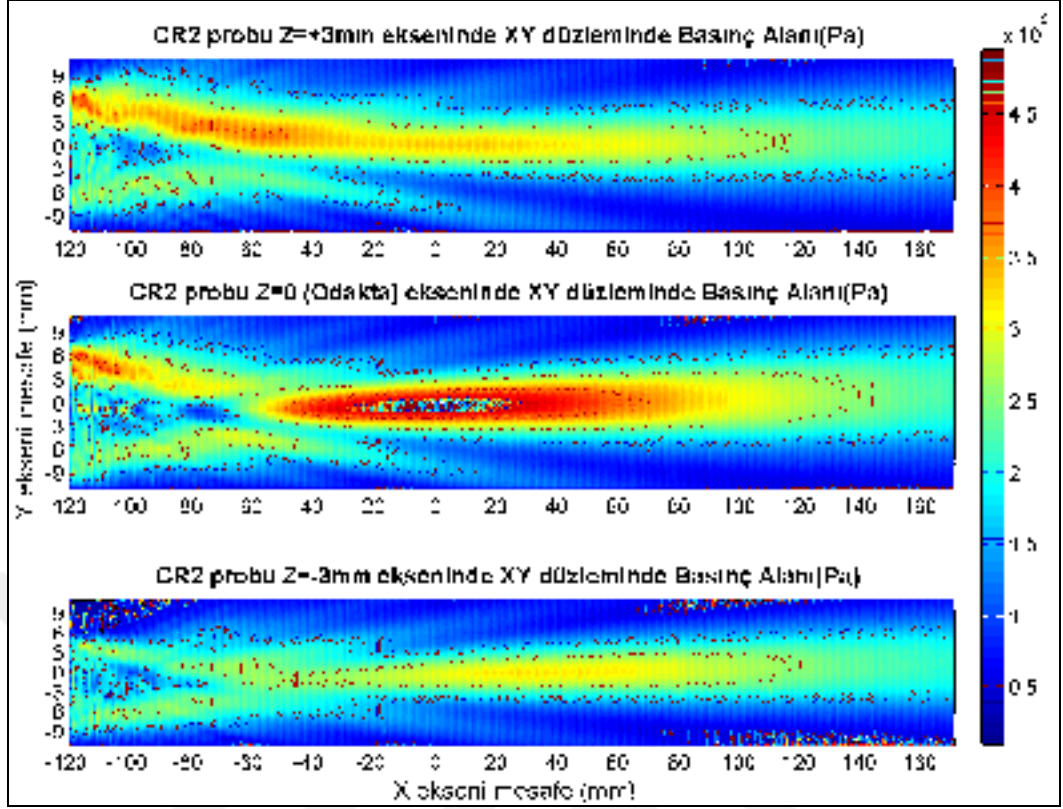


Şekil 3.25. CR1 model probun Z ekseninde odak $\pm 1,5$ mm XY ölçümü

Z ekseninde odakta ve odakta ± 3 mm kaydırılarak elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, her üç ekseninde de uzak alan başlangıç mesafesinin ve oluşan basınç alanı eğrilerinin aynı olduğu fakat değerlerinin farklı olduğu görüldü.

RC2, RH2 ve CR2 model ultrasonik problemlerin Z ekseninde konumlarının değiştirilmesiyle elde edilen grafiklerde “+” yönde, “-” yöne göre daha yüksek basınç alanlarının oluştuğu görüldü.

Bu durum, prob üretiminin destekleme işlemi sırasında dönüştürücünün prob gövdesi içerisinde veya probun ölçümler için havuza yerleştirilmesi sırasında “+” yönde kaymasından kaynaklanmış olabilir. Ancak her üç probun basınç alanının, eksenin “+” yönünde yüksek olmasına, ölçüm havuzunda su yüzeyinden yansıyan dalgaların, oluşan basınç alanına serbest ve dağınık alan olarak etki etmesi sebep olabilir.

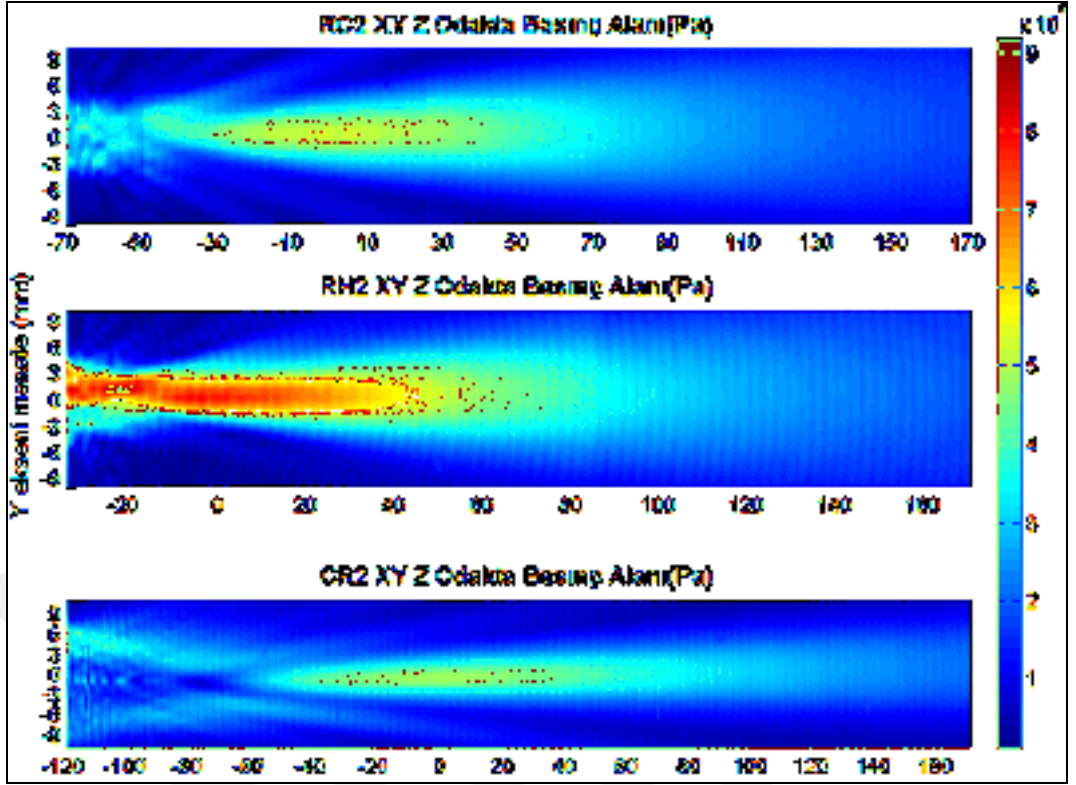


Şekil 3.26. CR2 model probun Z ekseninde odak ± 3 mm XY ölçümü

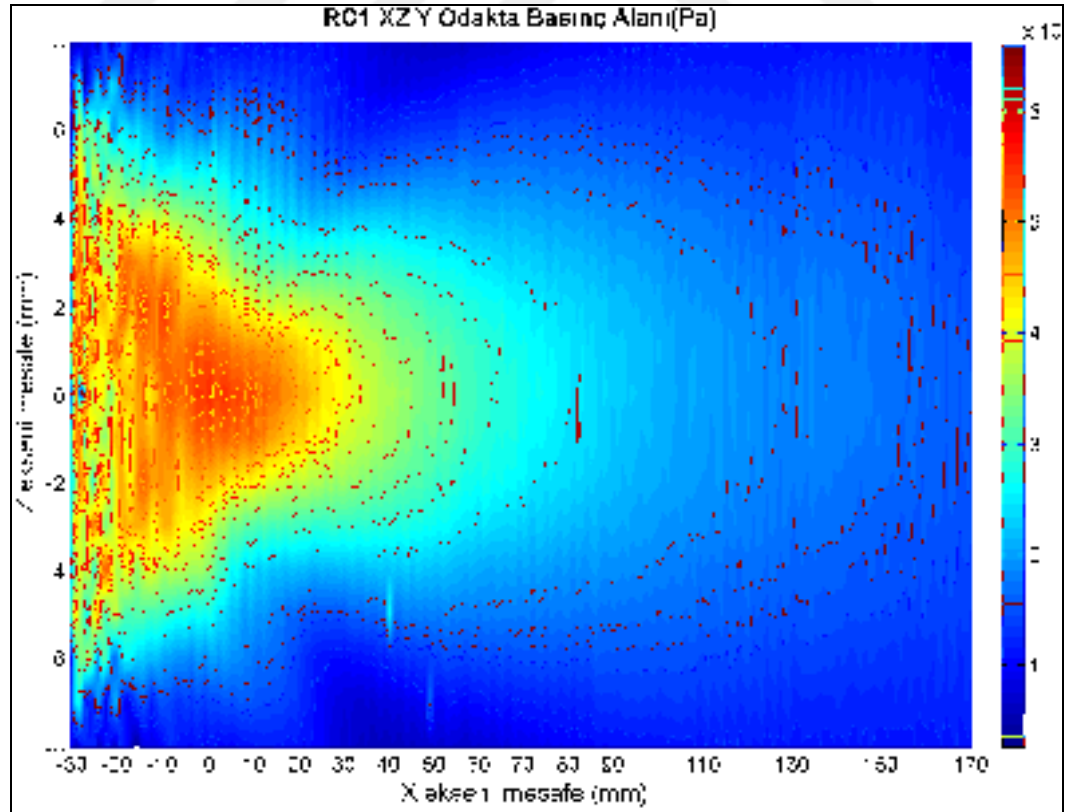
2 MHz frekansında, çalışan üç farklı geometrideki probun aynı grafikte birleşik ölçeklendirmeye karşılaştırılması Şekil 3.27’de görülmektedir. Literatüre uygun şekilde, en yüksek basınç alanının RH2 model probda olduğu ve CR2 model probun basınç alanının X eksenine göre simetrik bir şekilde ilerlediği görüldü.

RC1 model probun odak noktasında, XZ düzleminde yapılan ölçümleri ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.28’de görülmektedir. Z ekseninde ± 8 mm aralığında ve X ekseninde boyunca 202 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasından prob yüzeyine olan mesafenin 31 mm olduğu tespit edildi.

XZ düzleminde yapılan ölçümde, odak noktasından “+” yönde yaklaşık olarak 30 mm mesafede basınç alanı değerinin 500 kPa olduğu görüldü. Bu mesafede, XY ölçümünde alınan değerle yaklaşık olarak eşit olduğundan odak noktasının doğru tespit edildiği sonucuna ulaşıldı. Probu yüzeyinden yaklaşık 33 mm mesafede biteceği hesaplanan (Ek-A) yakın alan bölgesinin, ölçümler ile 31 mm mesafede bittiği görüldü.



Şekil 3.27. Probların birleştirilmiş XY düzlemi ölçümleri (2 MHz)

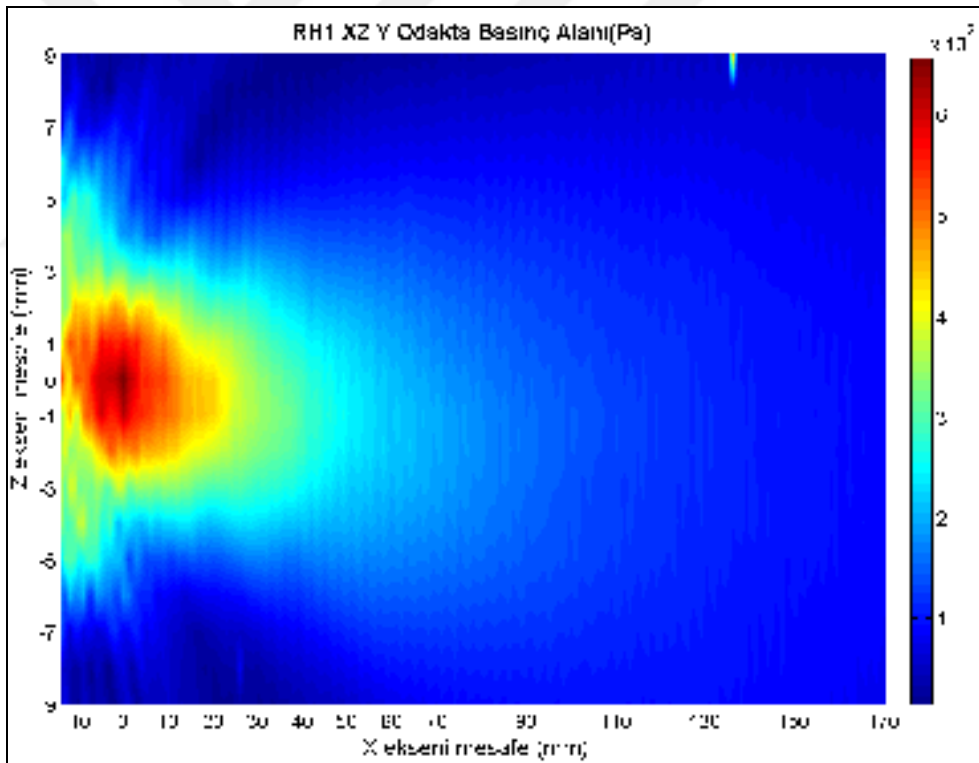


Şekil 3.28. Dikdörtgen dönüştürücülü 1 MHz probun XZ ölçümü

Basınç alanının dönüştürücünün boyuyla ilişkili olacak şekilde, probun yüzeyinden itibaren X eksenini boyunca ilerleyerek odakta 50 mm mesafede 300 kPa değerine düştüğü ve +70 mm mesafede sönümlendiği görüldü.

RH1 model probun odak noktasında, XZ düzleminde yapılan ölçümler ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.29'da görülmektedir. Z ekseninde ± 9 mm aralığında, X eksenini boyunca 185 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasından prob yüzeyine olan mesafenin 14 mm olduğu tespit edildi.

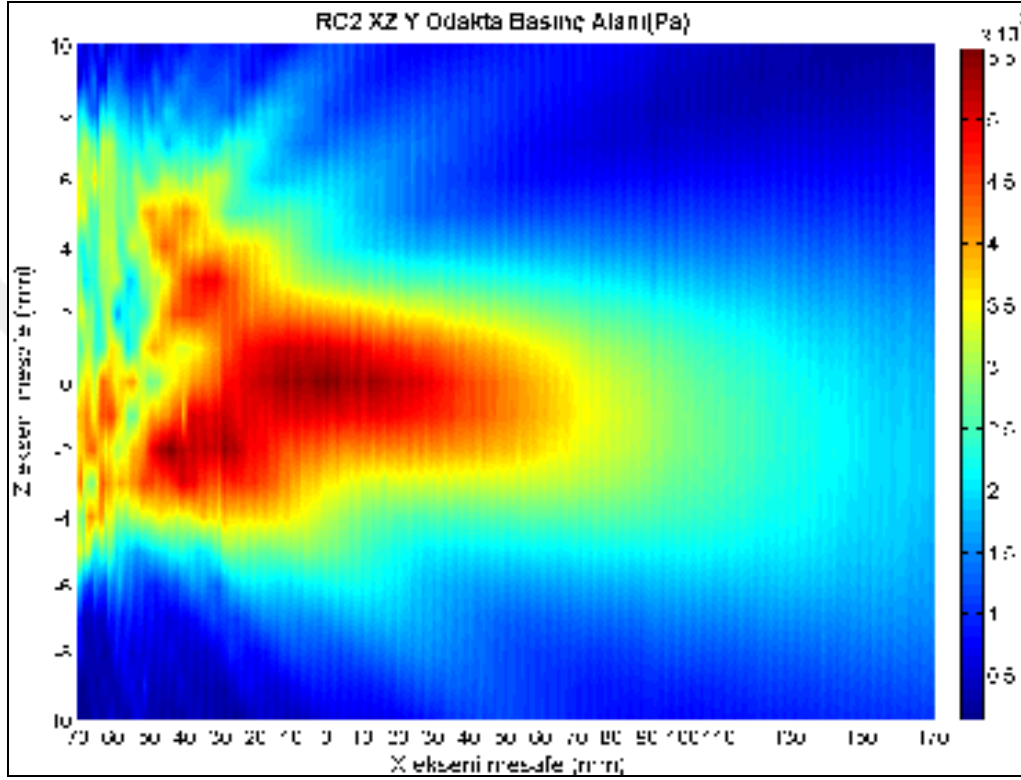
XZ düzleminde yapılan ölçümde, odak noktasından “+” yönde yaklaşık olarak 25 mm mesafede basınç alanı değerinin 400 kPa olduğu görüldü. XY düzleminde yapılan ölçümlerde olduğu gibi probun yüzeyinden yaklaşık olarak 14 mm mesafede, odak noktasında en yüksek basınç alanının oluştuğu görüldü.



Şekil 3.29. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü 1 MHz probun XZ ölçümü

RC2 model probun odak noktasında, XZ düzleminde yapılan ölçümler ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.30'da görülmektedir. Z ekseninde ± 10 mm aralığında ve X eksenini boyunca 241 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasından prob yüzeyine olan mesafenin 70 mm olduğu tespit edildi.

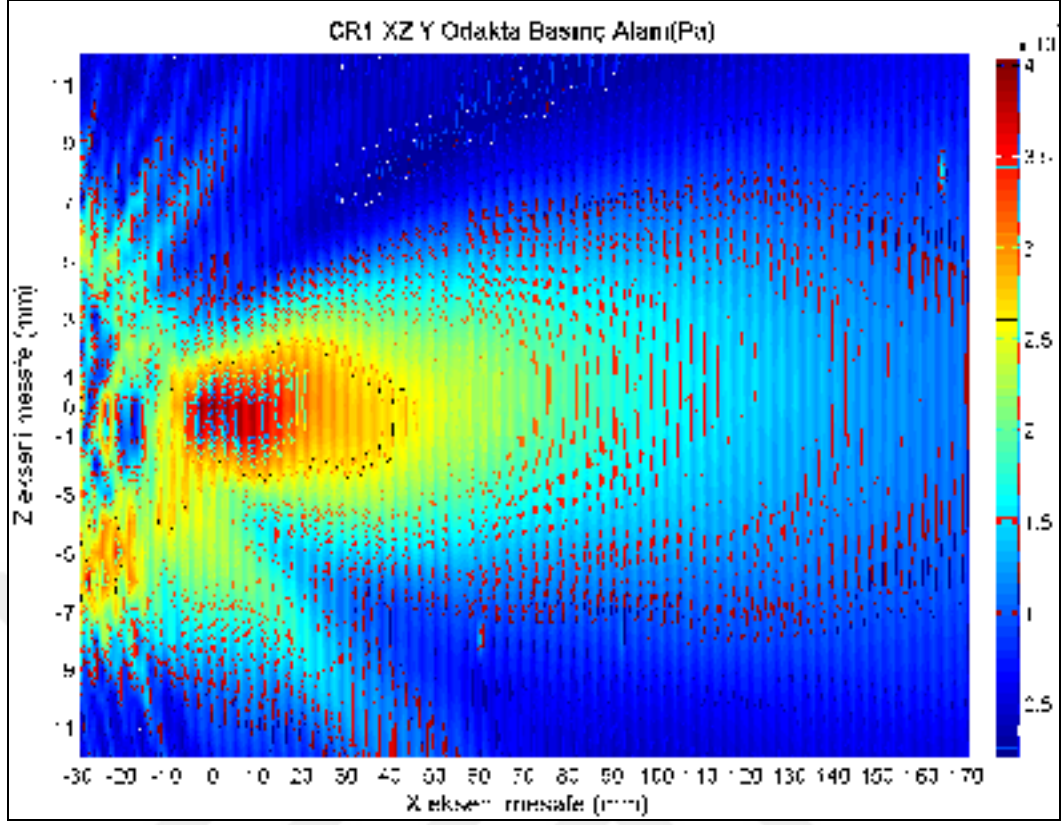
XZ düzleminde yapılan ölçümde, odak noktasından “+” yönde yaklaşık olarak 70 mm mesafede basınç alanı değerinin 350 kPa olduğu görülmektedir. Bu mesafedeki basınç alanı değeri ile XY düzleminde yapılan ölçümde elde edilen değer yaklaşık olarak eşit olduğu görüldü. Prob yüzeyinden yaklaşık olarak 50 mm mesafede yakın alan bölgesi bitmiştir.



Şekil 3.30. Dikdörtgen dönüştürücülü 2 MHz probun XZ ölçümü

CR1 model probun odak noktasında, XZ düzleminde yapılan ölçümler ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.31’de görülmektedir. Z ekseninde ± 12 mm aralığında ve X ekseninde boyunca 201 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasından prob yüzeyine olan mesafenin 31 mm olduğu tespit edildi.

XZ düzleminde yapılan ölçümde, basınç alanı yoğunluğu odak noktasından “+” yönde eliptik şekilde ilerleyerek yaklaşık olarak 50 mm mesafede değerinin 250 kPa olduğu görüldü. Bu mesafede XY ölçümünde elde edilen ölçüm değeriyle yaklaşık olarak eşit olduğundan odak noktasının doğru tespit edildiği sonucuna ulaşıldı. Probun yüzeyinden yaklaşık olarak 25 mm mesafede yakın alan bölgesinin bittiği görüldü.

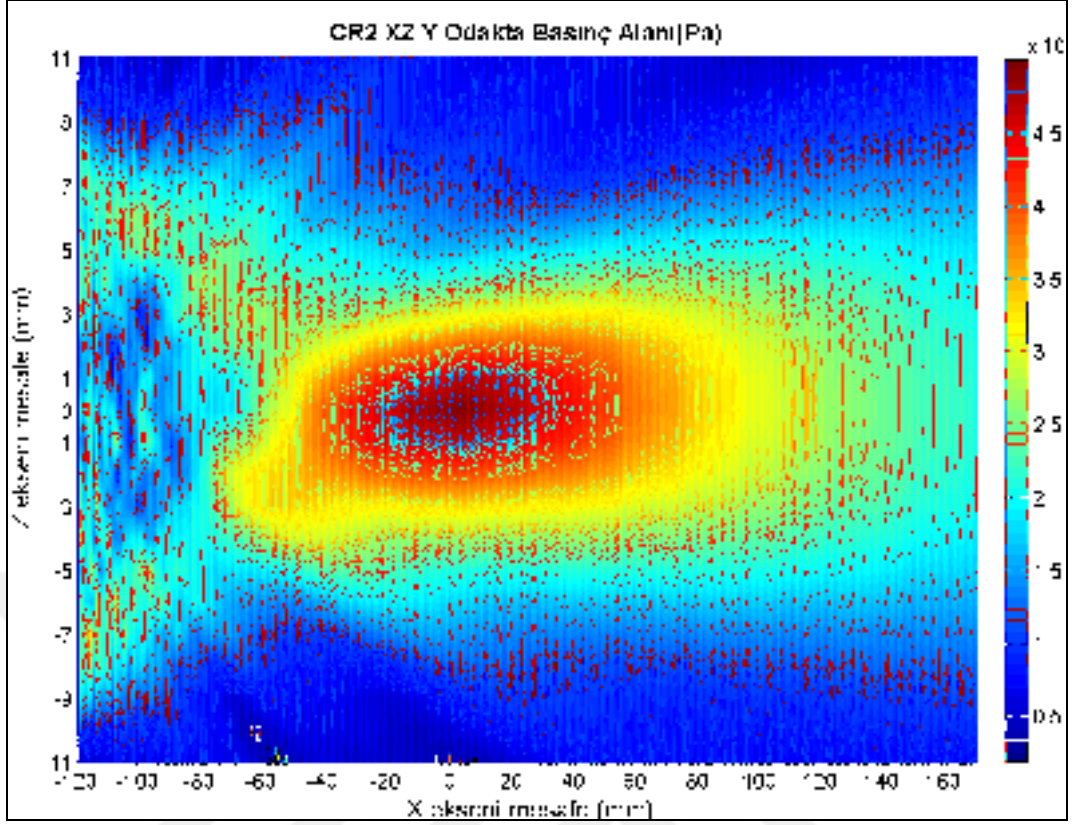


Şekil 3.31. Dairesel dönüştürücülü 1 MHz probun XZ ölçümü

CR2 model probun odak noktasında, XZ düzleminde yapılan ölçümler ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.32’de görülmektedir. Z ekseninde ± 11 mm aralığında ve X eksenini boyunca 291 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasından prob yüzeyine olan mesafenin 120 mm olduğu görüldü.

XZ düzleminde yapılan ölçümde, basınç alanı yoğunluğunun odak noktasından “+” yönde eliptik ve X eksenine simetrik bir şekilde ilerleyerek yaklaşık olarak 100 mm mesafede değerinin 300 kPa olduğu görüldü. Bu mesafede XY düzleminde yapılan ölçümde elde edilen değerle yaklaşık olarak eşit olduğundan odak noktasının doğru tespit edildiği sonucuna ulaşıldı.

Basınç alanı yoğunluğu, CR1 model proba göre merkezde 475 kPa değerinde daha yoğun bir alana sahiptir. Ancak yakın alan bölgesinde 200 kPa ile 275 kPa aralığında, karmaşık bir şekilde basınç alanına sahip olduğu görüldü. Probu yüzeyinden yaklaşık olarak 80 mm mesafede yakın alan bölgesinin bittiği tespit edildi.

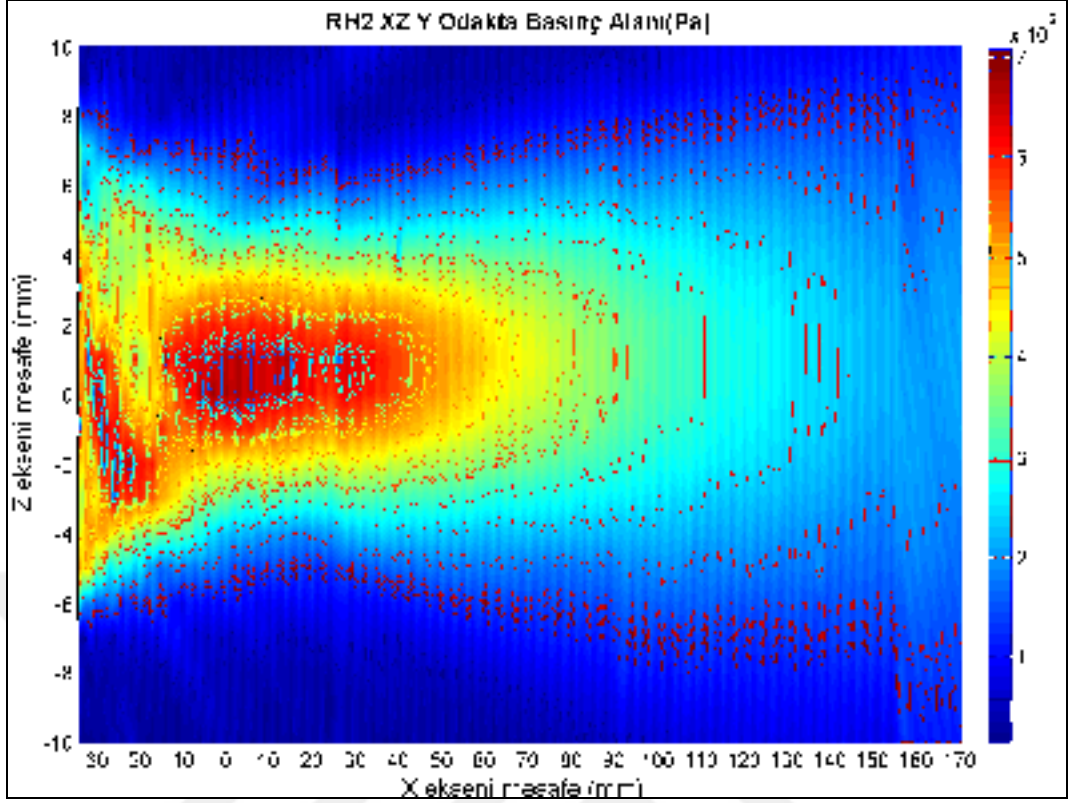


Şekil 3.32. Dairesel dönüştürücülü 2 MHz probun XZ ölçümü

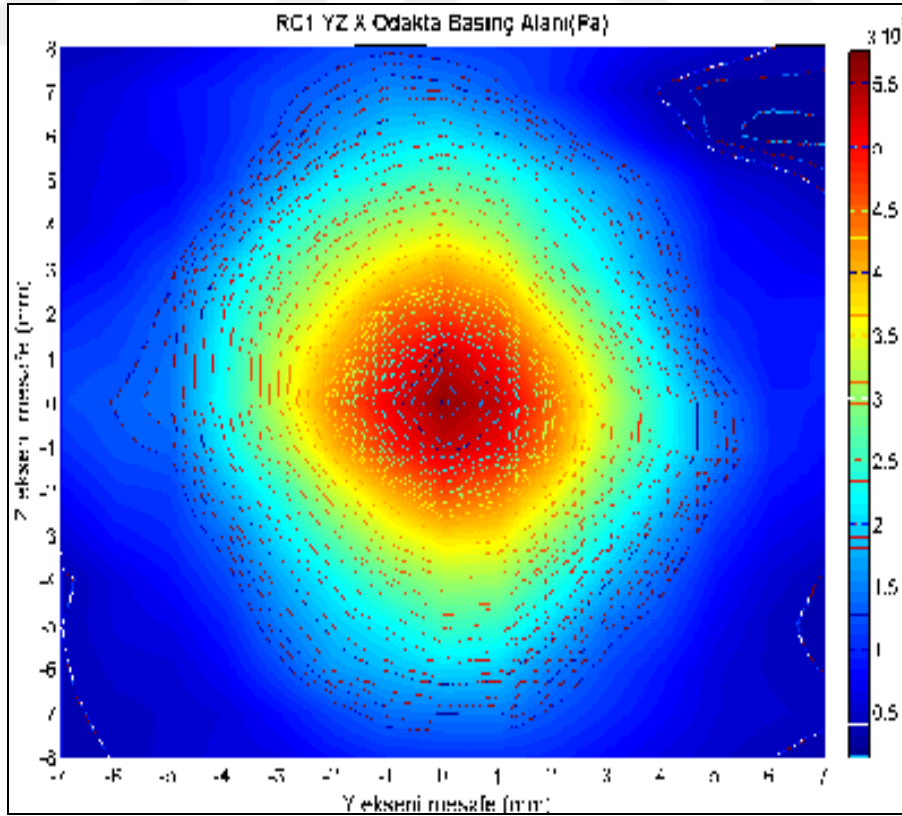
RH2 model probun odak noktasında, XZ düzleminde yapılan ölçümleri ile elde sonuçlar Şekil 3.33'te görülmektedir. Z ekseninde ± 10 mm aralığında ve X eksenini boyunca 205 noktada ölçüm yapıldı. Odak noktasından prob yüzeyine olan mesafenin 34 mm olduğu tespit edildi.

XZ düzleminde yapılan ölçümde, odak noktasından “+” yönde yaklaşık olarak 80 mm mesafede basınç alanı değerinin 400 kPa olduğu görülmektedir. Bu mesafede XY düzleminde yapılan ölçümle elde edilen değerle yaklaşık olarak eşit olduğundan odak noktasının doğru tespit edildiği sonucuna ulaşıldı. Probu yüzeyinden yaklaşık olarak 20 mm mesafeden itibaren yakın alan bölgesinin biterek basınç alanı grafiğinin düzenli bir hale geldiği görüldü.

RC1 model ultrasonik probun, odak noktasında ve YZ düzlemi için, Z ekseninde ± 8 mm ve Y ekseninde ± 7 mm aralığında ölçümleri yapıldı. Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 31 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.34'te görülmektedir.

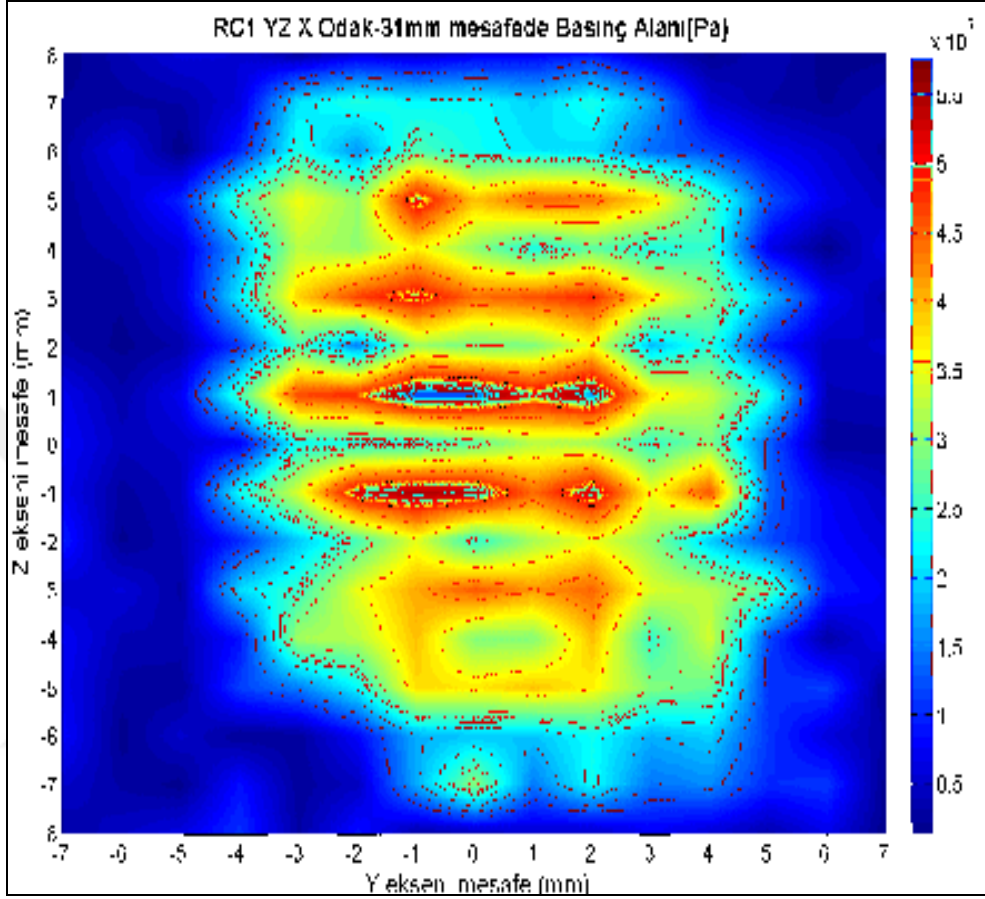


Şekil 3.33. Eşkenar dörtgen dönüştürücülü 2 MHz probun XZ ölçümü



Şekil 3.34. RC1 probunun X ekseninde odakta YZ ölçümü

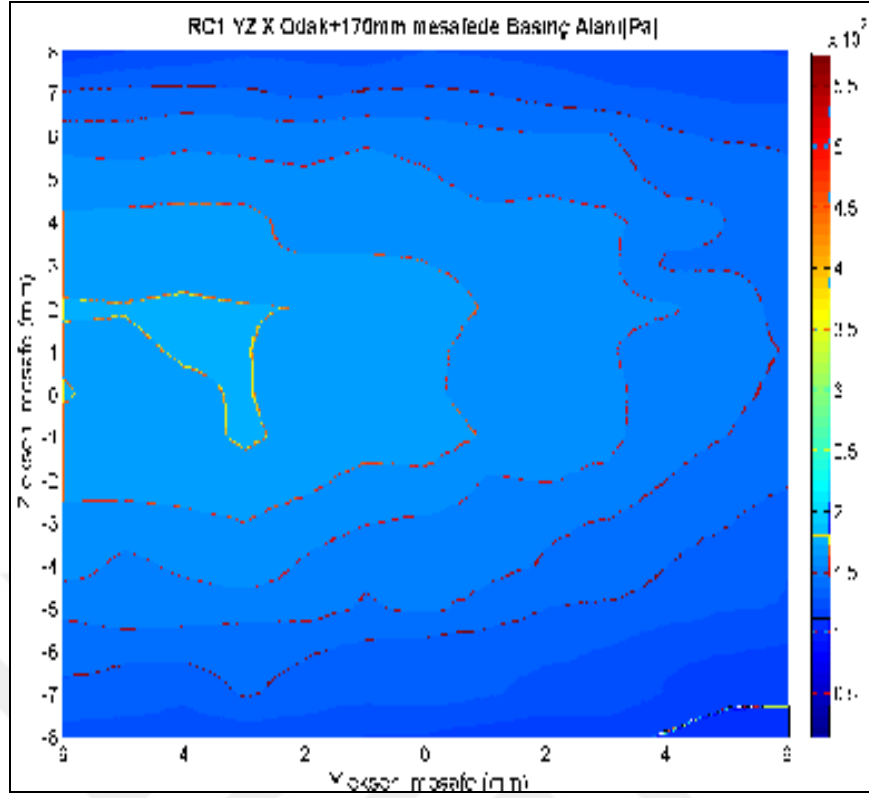
Şekil 3.34'teki ölçüm sonucuna göre; merkezde 2 mm yarıçapında 550 kPa basınç alanı oluştuğu görüldü. 3 mm yarıçapta 350 kPa değerine düşen basınç alanının, 4 mm yarıçaptan sonra 200 kPa değerine düşerek sönümlendiği görüldü.



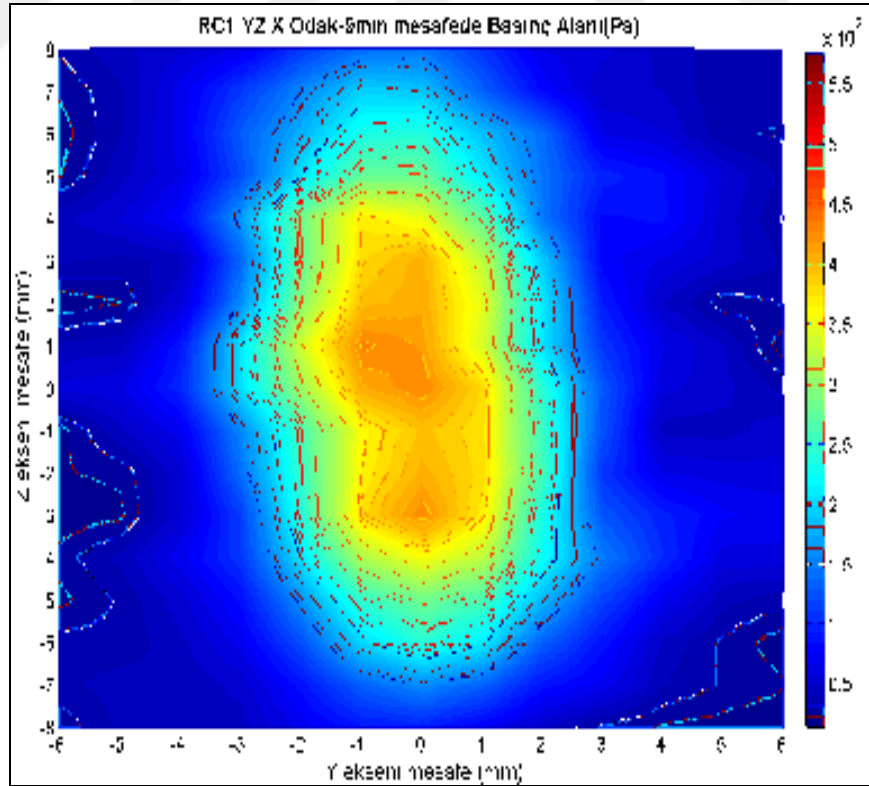
Şekil 3.35. RC1 probunun X<1 mm mesafede YZ ölçümü

RC1 probunun yüzeyinden 22 mm mesafede X ekseninde odakta, YZ düzleminde yapılan ölçümlere ait sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 3.37'de görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasına yaklaşırken oluşmaya başladığı, odak noktasına göre Y ekseninde daraldığı, Z eksenini boyunca uzandığı ve merkezinde düzgün bir şekilde görülen yüksek basınç değerinin oluşmadığı görüldü. En yüksek basınç alanı değeri 425 kPa olarak oluşmuştur.

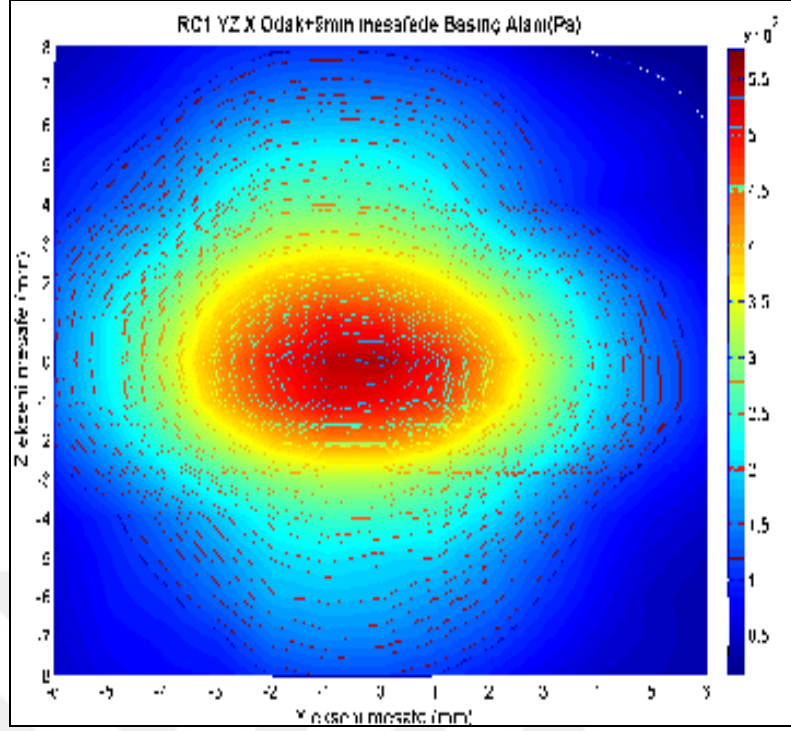
RC1 probunun yüzeyinden 41 mm mesafede X ekseninde odakta, YZ düzleminde yapılan ölçümlere ait sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 3.38'de görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasından itibaren prob yüzeyinden uzaklaşırken, odak noktasına göre Y ekseninde yayıldığı, Z ekseninde ise daraldığı görüldü [12, 17].



Şekil 3.36. RC1 probunun X=202 mm mesafede YZ ölçümü

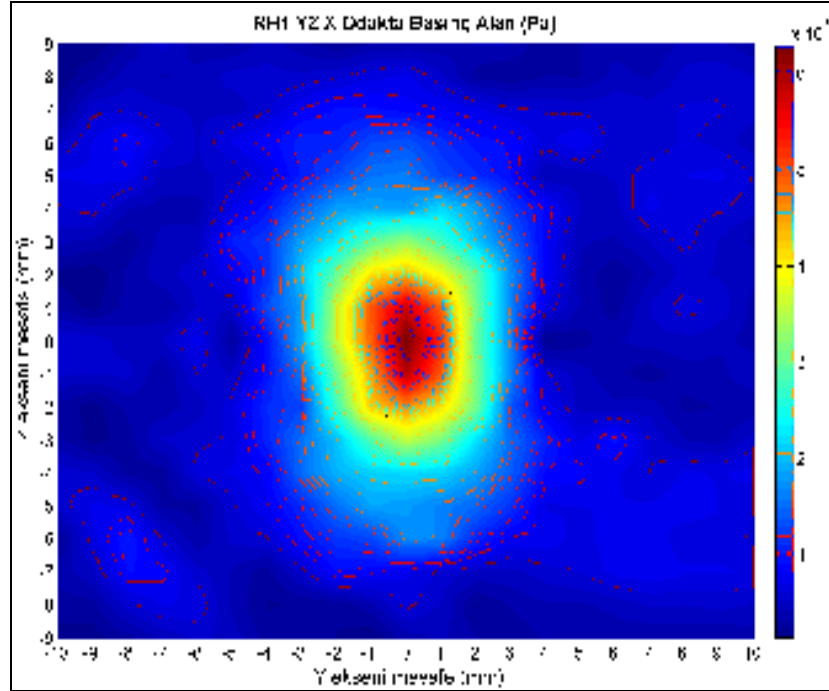


Şekil 3.37. RC1 probunun X=22 mm mesafede YZ ölçümü



Şekil 3.38. RC1 probunun X=40 mm mesafede YZ ölçümü

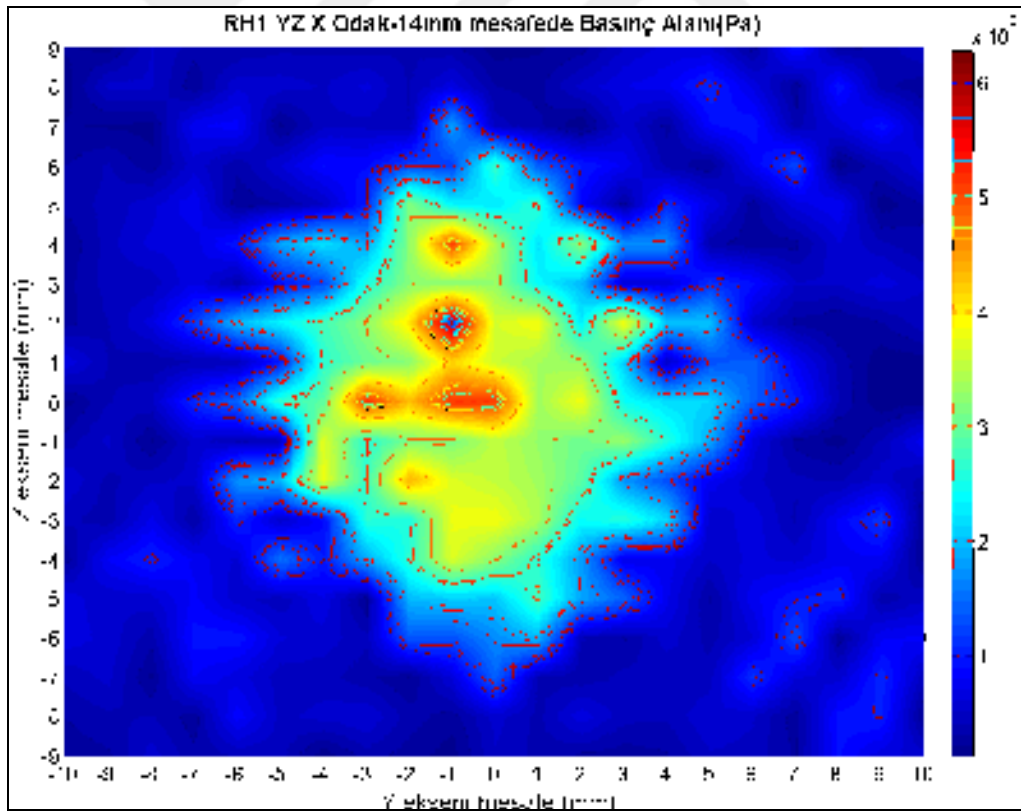
RH1 model ultrasonik probun odak noktasında ve YZ düzlemi için, Z ekseninde ± 9 mm ve Y ekseninde ± 10 mm aralığında yapılan ölçümlere ait sonuçlar Şekil 3.39'da görülmektedir.



Şekil 3.39. RH1 probunun X odakta YZ ölçümü

Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 14 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.39'da görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre; merkezde Y ekseninde 1 mm ve Z ekseninde 2 mm uzunluğunda, yaklaşık 600 kPa değerinde basınç alanı oluştuğu görüldü. Y ekseninde, ± 2 mm aralıkta 300 kPa değerine düşen basınç alanı değerinin, ± 3 mm aralıktan sonra 200 kPa değerine düştüğü ve saçılmalara uğrayarak yok olduğu görüldü.

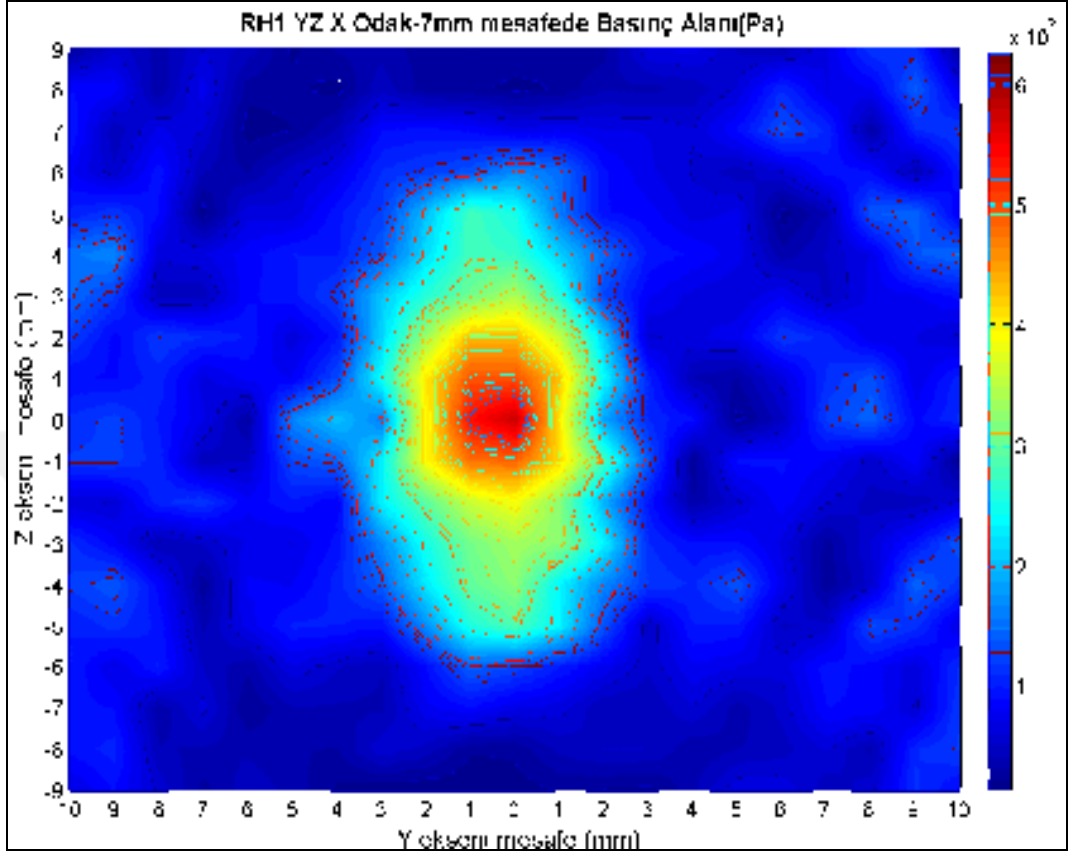
RH1 model ultrasonik probun yüzeyine 1 mm'den kısa mesafede X ekseninde odakta, YZ düzleminde yapılan ölçümlere ait sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 3.40'ta görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre yüzeyin farklı noktalarının birer farklı kaynak gibi davrandığı görüldü [12, 32]. Yakın alan bölgesinde bulunan bu mesafede eşkenar geometri seçilmekle birlikte, alanların ayrılamaz karışıklıkta olduğu ve birden fazla kaynak şeklinde davrandığı görüldü.



Şekil 3.40. RH1 probunun X=-14 mm mesafede YZ ölçümü

RH1 model ultrasonik probun yüzeyinden 7mm mesafede X ekseninde odakta, YZ düzleminde yapılan ölçümlere ait sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 3.41'de

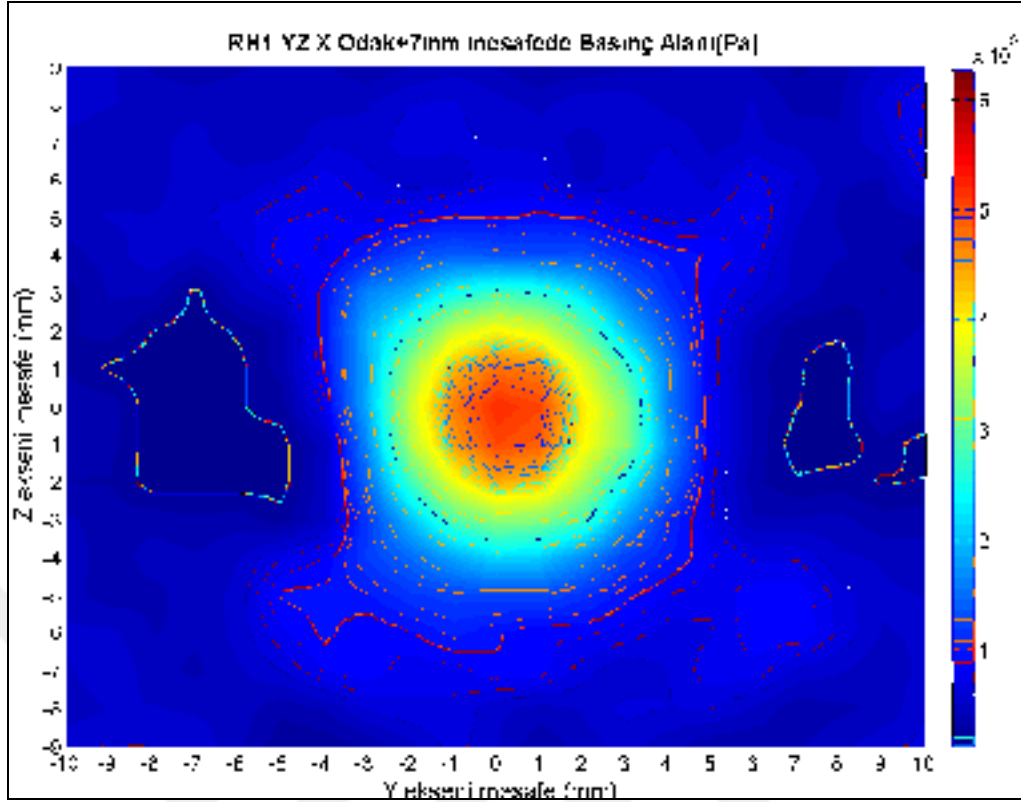
görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasına yaklaşırken oluşmaya başladığı, odak noktasına göre Y ekseninde daraldığı, Z ekseninde yayıldığı görüldü.



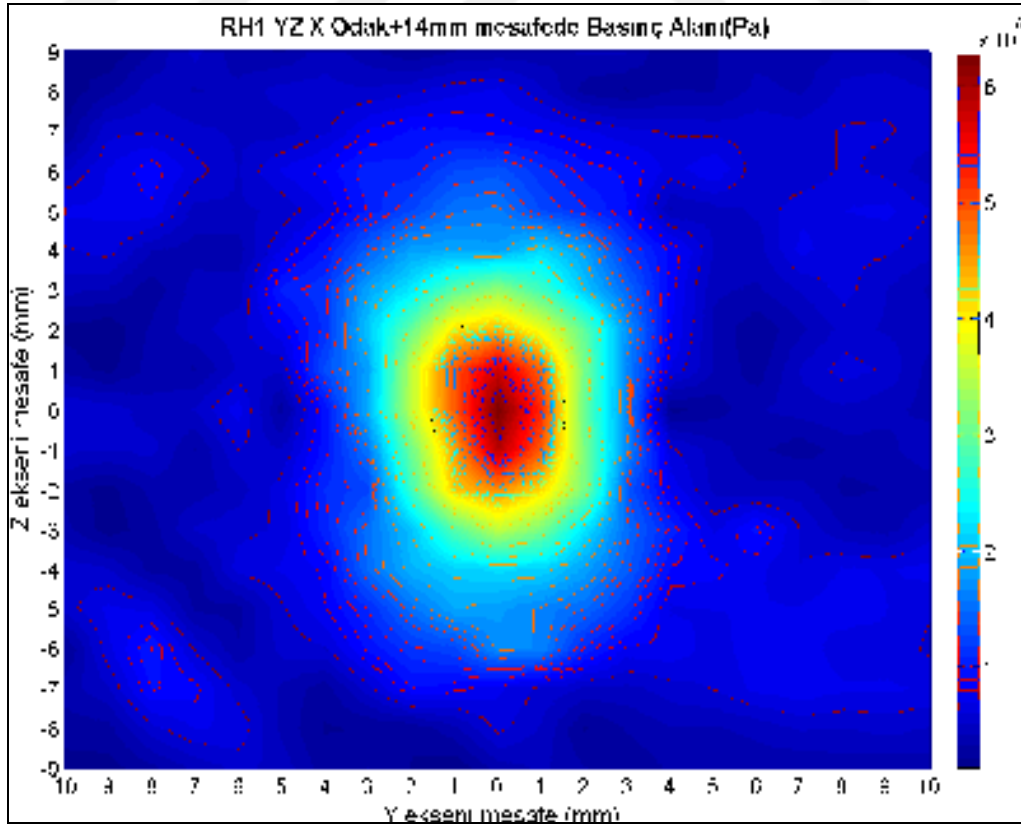
Şekil 3.41. RH1 probunun X=7 mm mesafede YZ ölçümü

RH1 model ultrasonik probun yüzeyinden 22 mm mesafede X ekseninde odakta, YZ düzleminde yapılan ölçümlere ait sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 3.42’de görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasından itibaren prob yüzeyinden uzaklaşırken, eşkenar geometrinin kaybolarak dairesel bir alan oluştuğu görüldü. Merkezde 2 mm yarıçaplı 450 kPa değerinde bir basınç alanının oluştuğu görüldü.

RH1 probunun yüzeyinden 29 mm mesafede X ekseninde odakta, YZ düzleminde yapılan ölçümlere ait sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 3.43’te görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasından itibaren prob yüzeyinden uzaklaşırken, odak noktasına göre Y ekseninde yayıldığı, Z ekseninde ise daraldığı görüldü.



Şekil 3.42. RH1 probunun X=22 mm mesafede YZ ölçümü

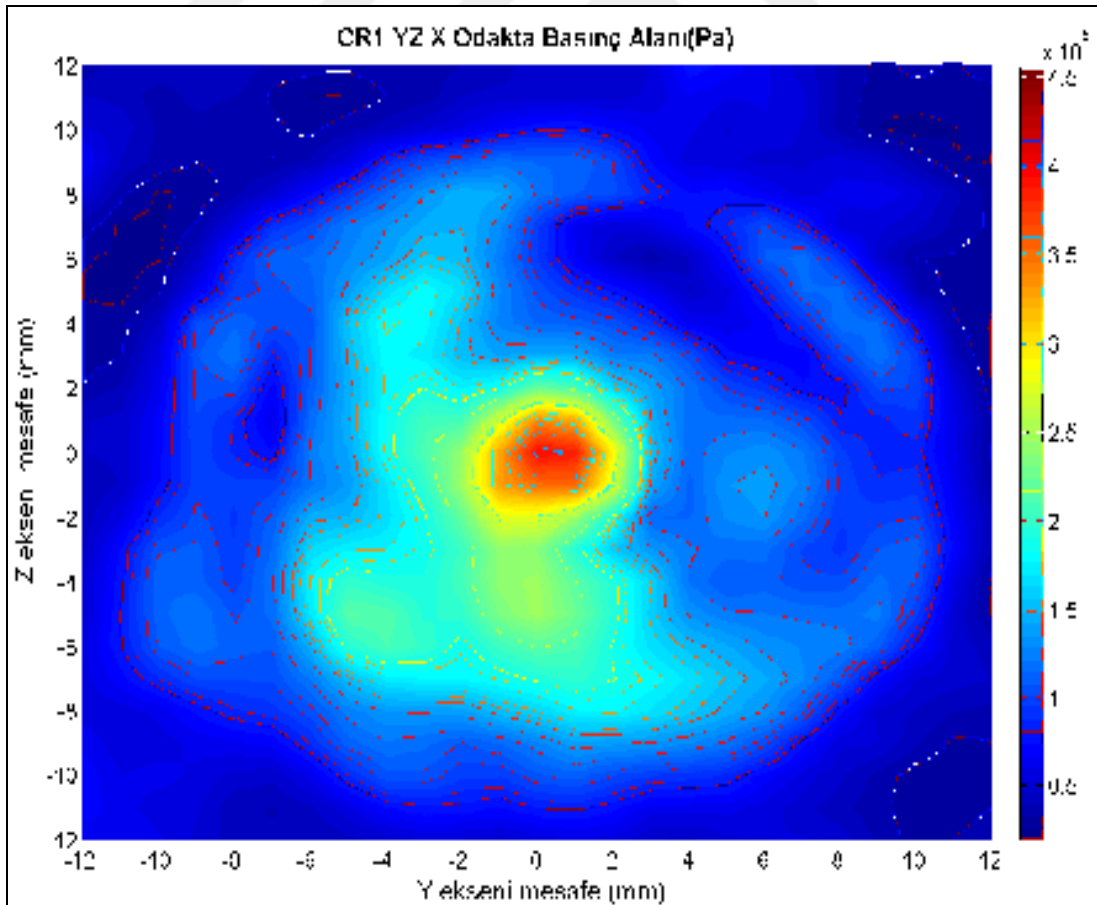


Şekil 3.43. RH1 probunun X=29 mm mesafede YZ ölçümü

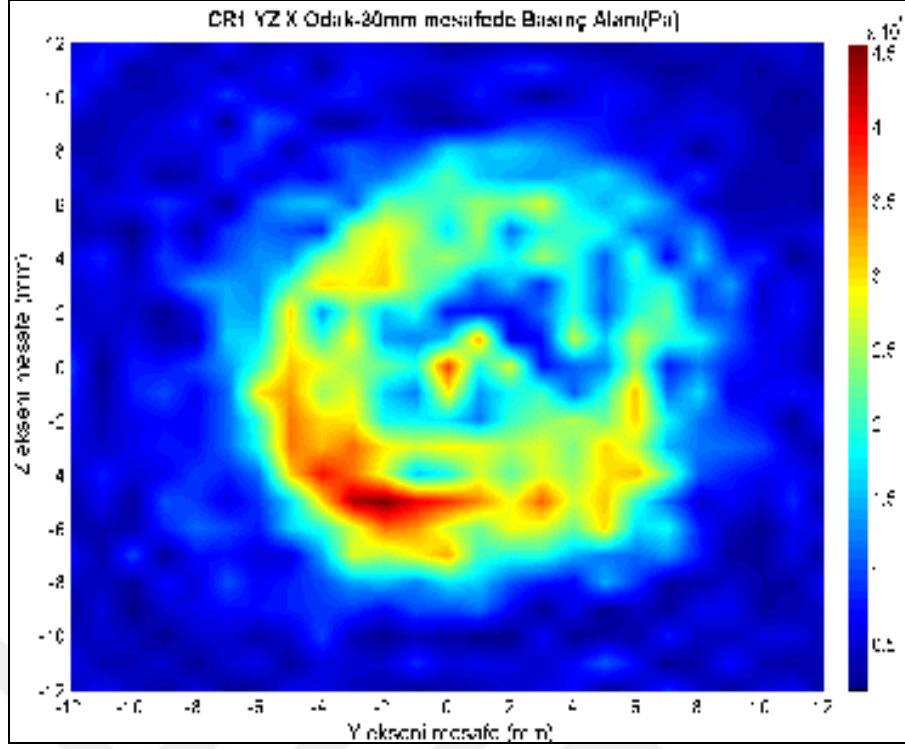
CR1 model ultrasonik probun X ekseninde odak noktasında ve YZ düzlemi için, Y ve Z eksenlerinde ± 12 mm aralığında ölçümleri yapıldı.

Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 31 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.44'te görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre; merkezde Y ekseninde 3 mm ve Z ekseninde 2 mm uzunluğunda, yaklaşık 400 kPa değerinde basınç alanı olduğu görüldü. Merkez halkanın dışında 300 kPa değerine düşen basınç alanı, 3. ve 4.basınç alanı eğrilerinin tam olarak oluşmadan saçılmaya başladığı görüldü.

Hidrofonun probyüzeyine 2 mm'den daha kısa mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.45'te görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre yüzeyin farklı noktalarının birer farklı kaynak gibi davrandığı [12, 32] ve yakın alan bölgesinde bulunan bu mesafede, dairesel geometri seçilmekle birlikte alanların ayrılmaz karışıklıkta ve birden fazla kaynak şeklinde davrandığı görüldü.

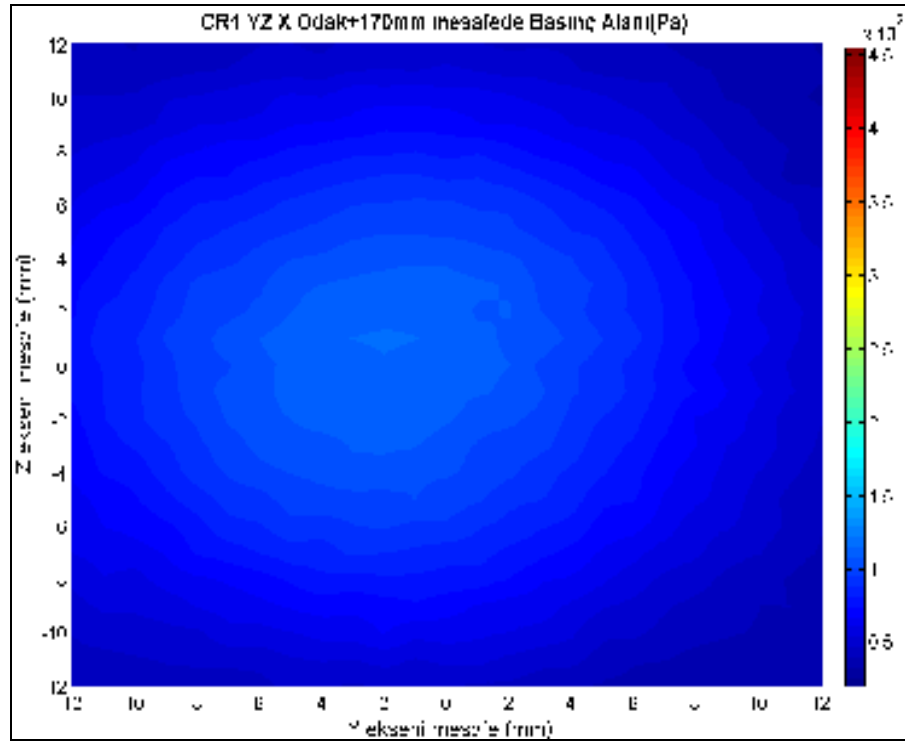


Şekil 3.44. CR1 probunun X odak mesafede YZ ölçümü



Şekil 3.45. CR1 probunun X<2 mm mesafede YZ ölçümü

Hidrofonun prob yüzeyine 201 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.46’da görülmektedir.



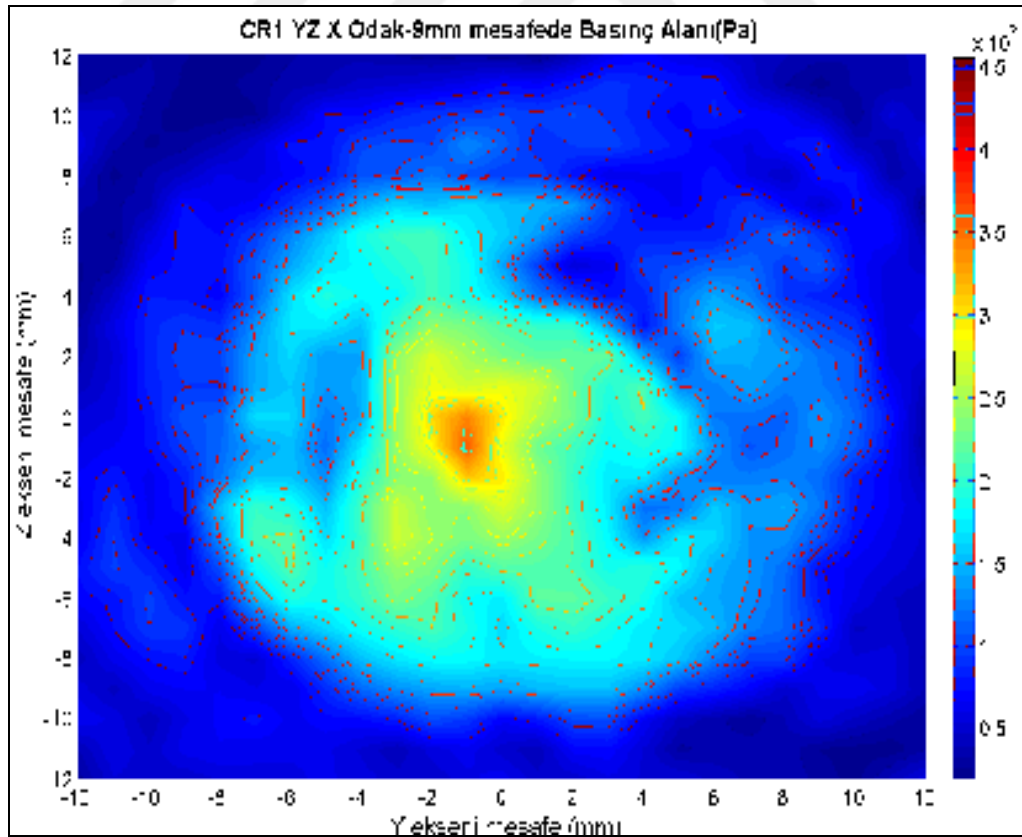
Şekil 3.46. CR1 probunun X=170 mm mesafede YZ ölçümü

Şekil 3.46'daki ölçüm sonucuna göre basınç alanının, dairesel geometride odak noktasına göre yaklaşık üç kat azalmış bir basınç alanı değerinde oluştuğu görüldü.

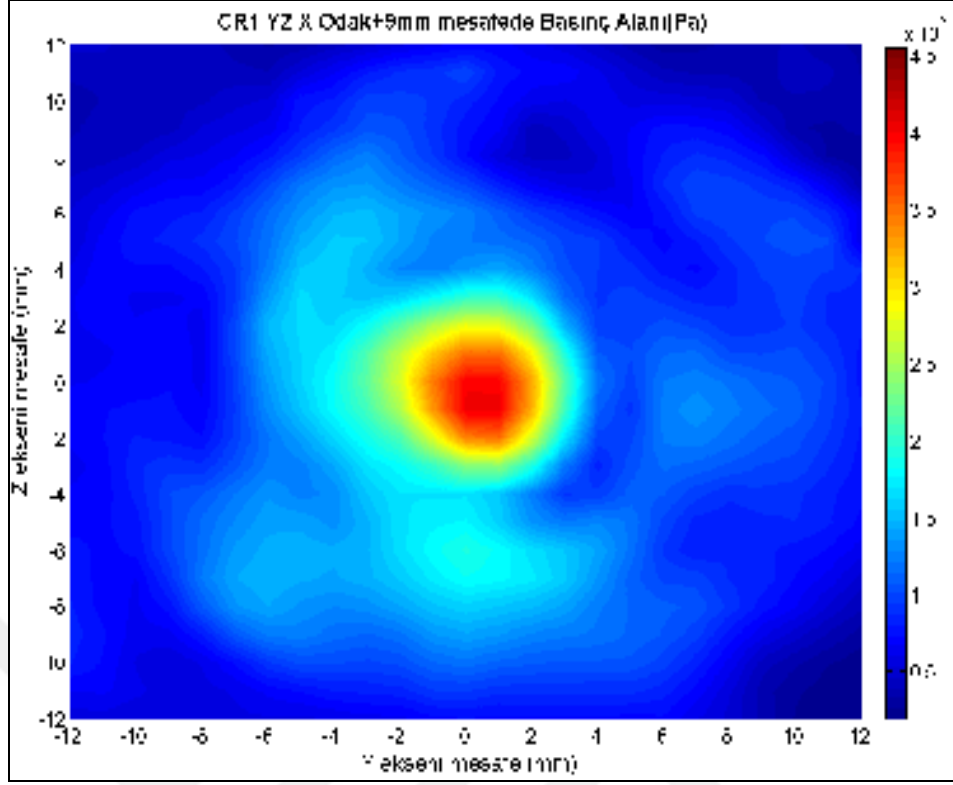
Hidrofonun prob yüzeyine 22 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.47'de görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasına yaklaşırken oluşmaya başladığı görülmektedir.

Hidrofonun prob yüzeyine 40 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.48'de görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre; merkezde yaklaşık 400 kPa değerinde ve 2 mm yarıçaplı basınç alanı oluştuğu ve bu alanının odak noktasına göre biraz daha geniş ve dairesel geometride olduğu görüldü.

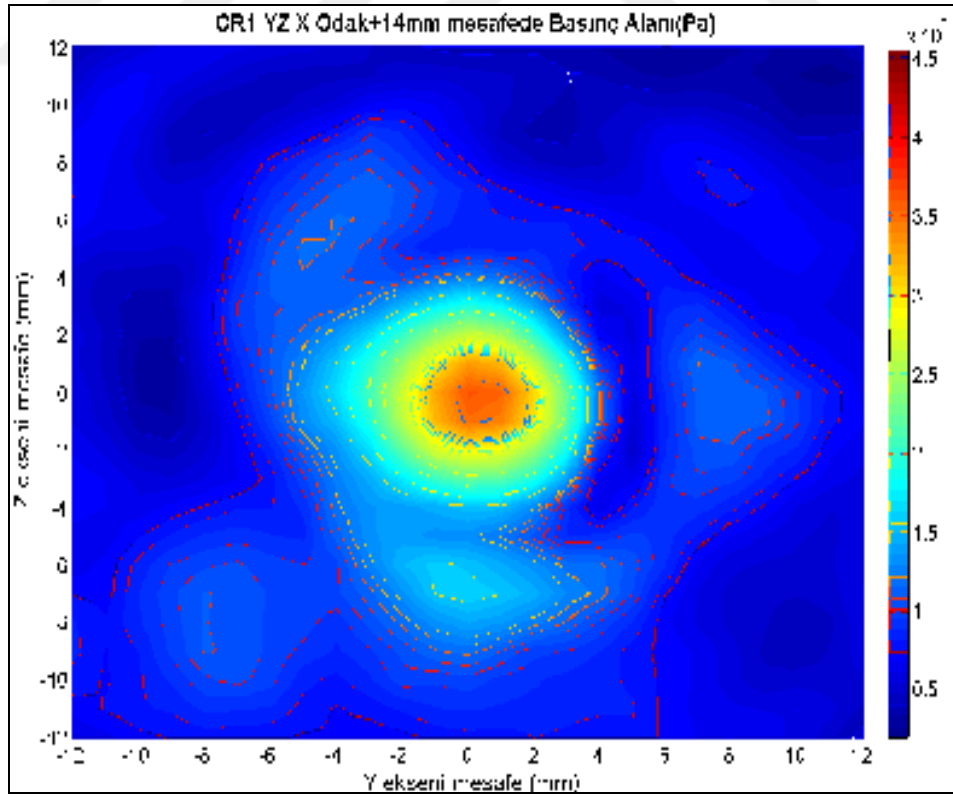
Hidrofonun prob yüzeyine 45 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.49'da görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre; merkezde yaklaşık 350 kPa değerinde, Y ekseninde yayılırken Z ekseninde daralan ve daireselden eliptiğe dönen bir basınç alanının oluştuğu görüldü.



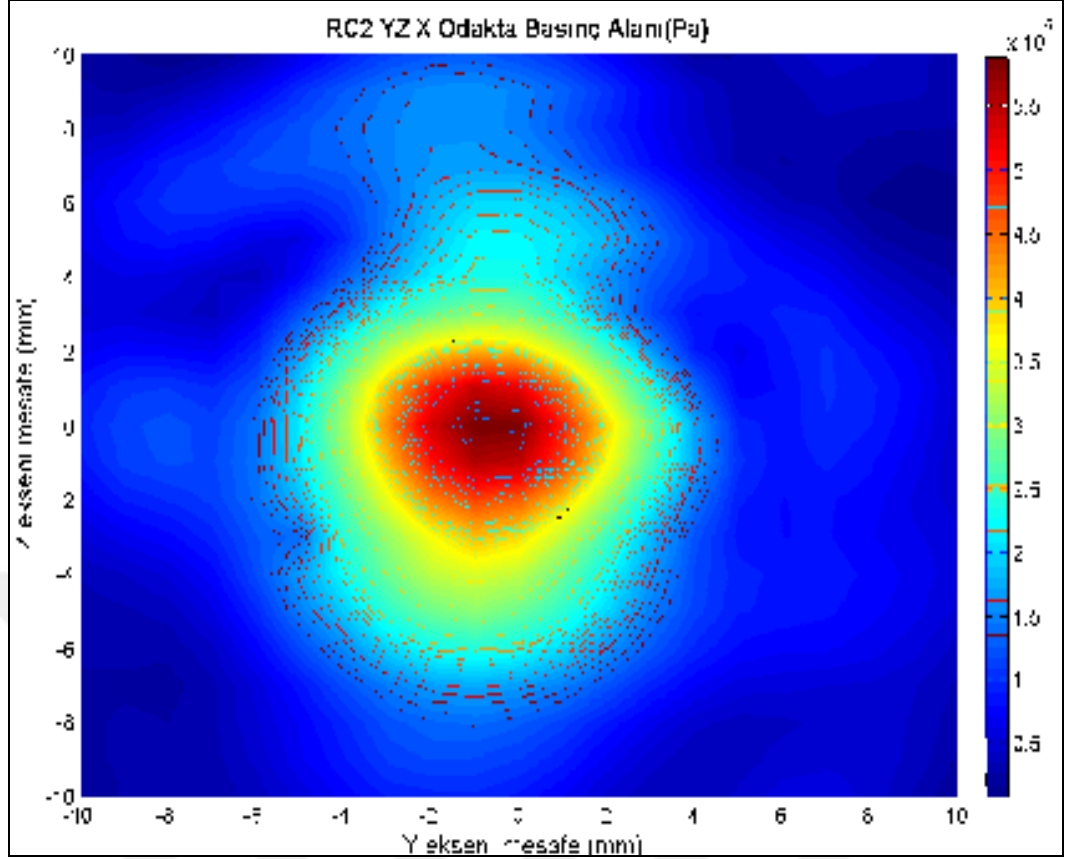
Şekil 3.47. CR1 probunun X=22 mm mesafede YZ ölçümü



Şekil 3.48. CR1 probunun X=40 mm mesafede YZ ölçümü



Şekil 3.49. CR1 probunun X=45 mm mesafede YZ ölçümü



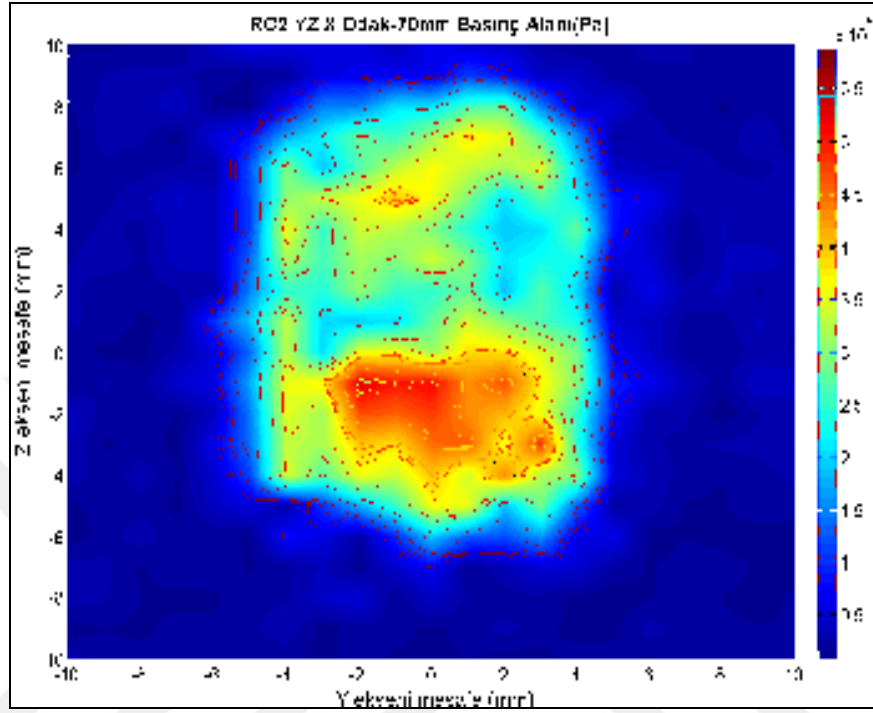
Şekil 3.51. RC2 probunun X odak mesafede YZ ölçümü

Hidrofonun prob yüzeyine 1 mm'den daha kısa mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.52'de görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre yüzeyin farklı noktalarının birer farklı kaynak gibi davrandığı [12, 32] ve yakın alan bölgesinde bulunan bu mesafede dikdörtgen geometri seçilmekle birlikte, birden fazla kaynak şeklinde davrandığı ve alanların ayrılamaz karışıklıkta olduğu görüldü.

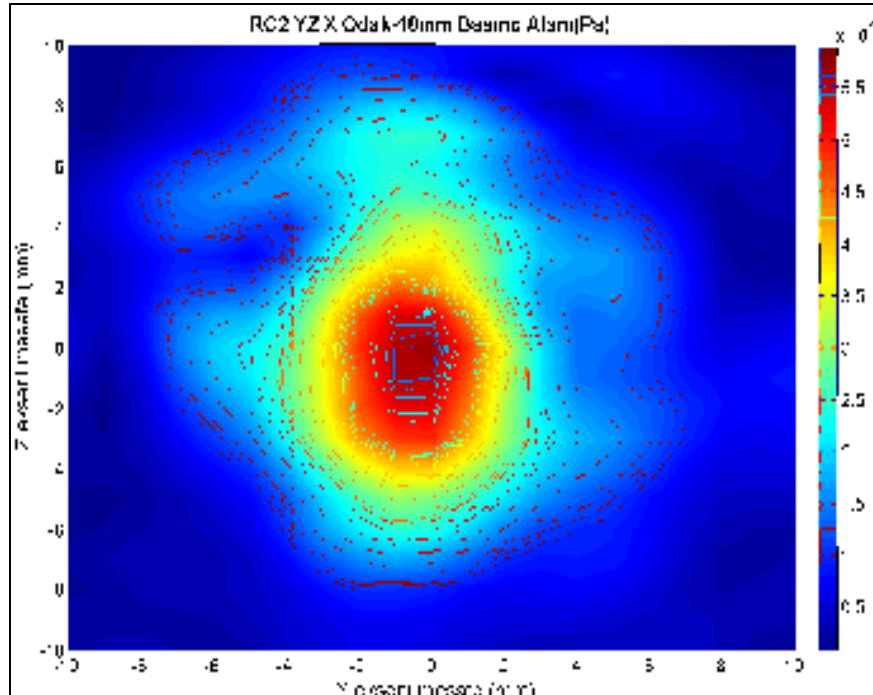
Hidrofonun prob yüzeyine 52 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.53'te görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasına yaklaşırken oluşmaya başladığı, ancak merkezinde düzgün bir şekilde görülen yüksek basınç değerinin oluşmadığı, Z ekseni boyunca uzadığı ve Y ekseninde ise daraldığı görüldü.

Hidrofonun prob yüzeyine 89 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.54'te görülmektedir. Basınç alanının, odak noktasından itibaren prob yüzeyinden uzaklaşırken, odak noktasına göre Y ekseninde

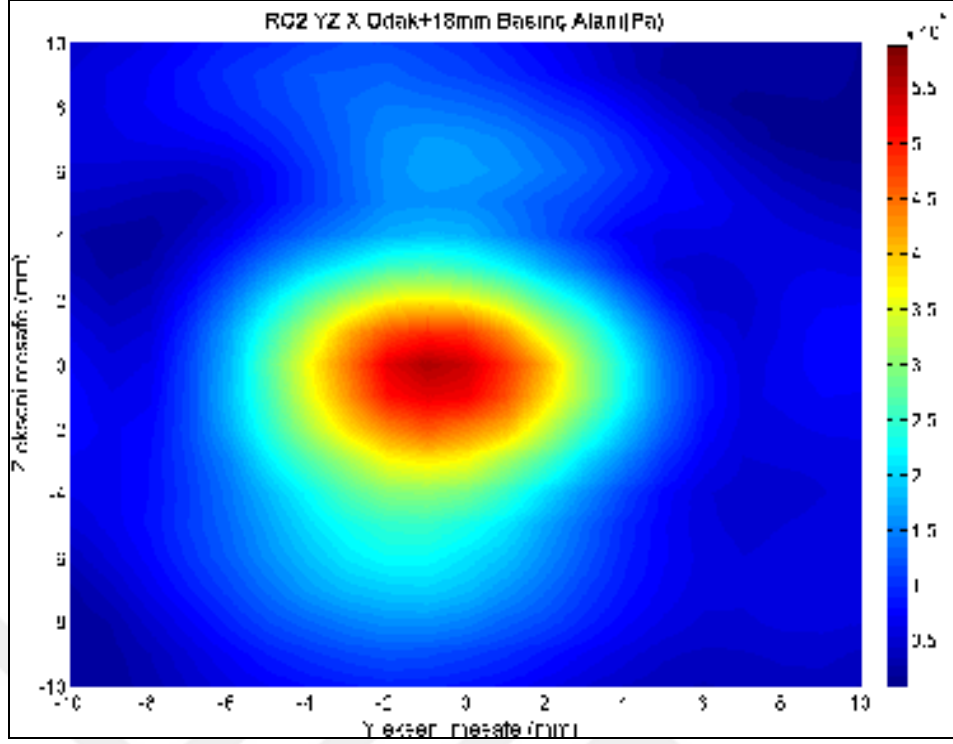
yayıldığı, Z ekseninde ise daraldığı görüldü. Yaklaşık olarak 500 kPa olan basınç alanı değerinin, RC1 probunun değeriyle benzerlik gösterdiği fakat şekil olarak daha düzgün olduğu görüldü.



Şekil 3.52. RC2 probunun $X < 1$ mm mesafede YZ ölçümü



Şekil 3.53. RC2 probunun $X = 52$ mm mesafede YZ ölçümü

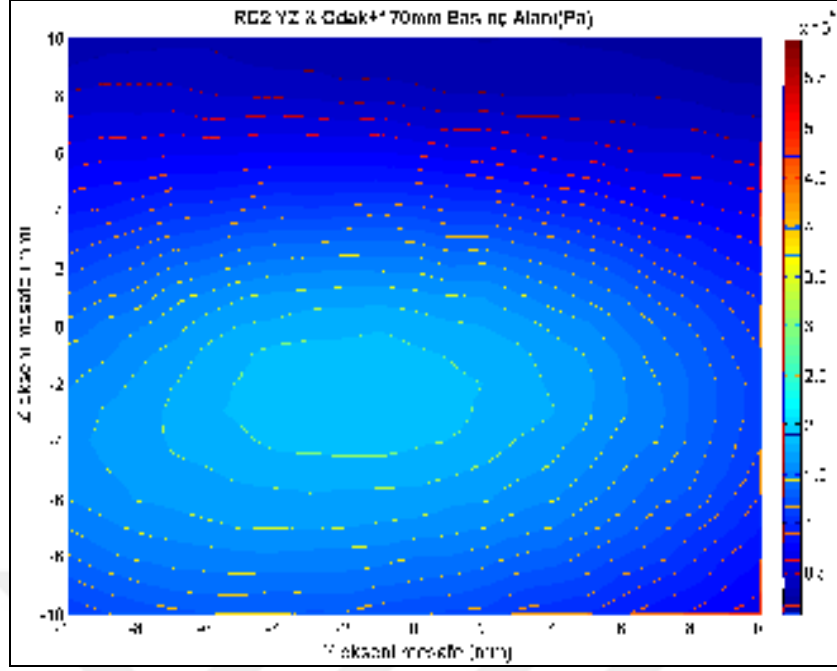


Şekil 3.54. RC2 probunun X=89 mm mesafede YZ ölçümü

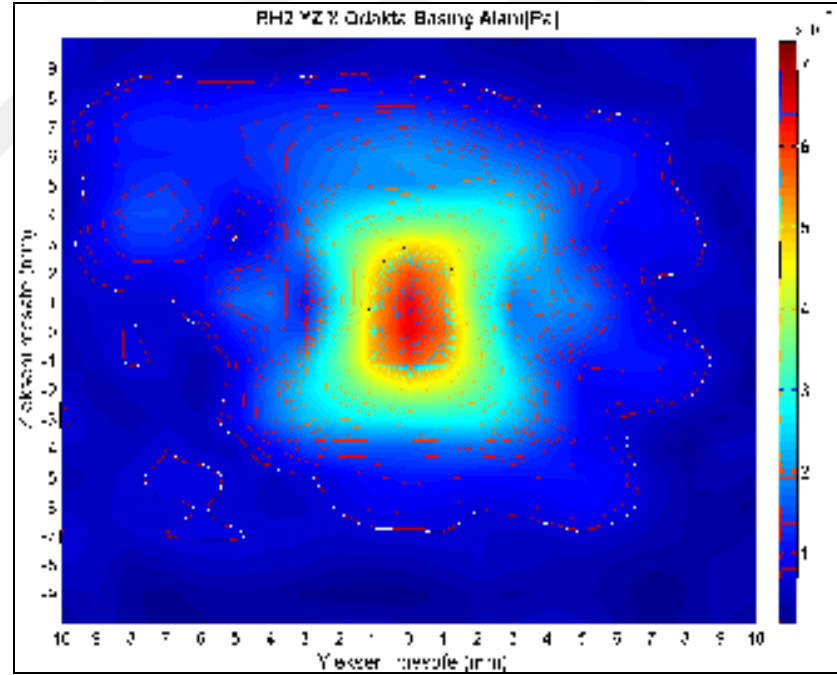
Hidrofonun prob yüzeyine 241 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.55'te görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre, basınç alanının proba yakın mesafelerde yapılan aralığın (± 10 mm) dışında olduğu daha geniş bir alana yayıldığı görüldü. Dönüştürücünün basınç alanı etkisinin, Z ekseninde daralırken, Y ekseninde ise yayıldığı ve odak noktasına göre yaklaşık üç kat azalmış bir şekilde oluştuğu görüldü.

RH2 model ultrasonik probun X ekseninde odak noktasında ve YZ düzlemi için, Y ve Z eksenlerinde ± 10 mm aralığında ölçümleri yapıldı. Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 34 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.56'da görülmektedir.

Ölçüm sonucuna göre; merkezde, Y ekseninde yaklaşık 3 mm genişliğinde ve Z ekseninde 5mm uzunluğunda, dikdörtgen bir geometrinin ortasında eşkenar dörtgen bir geometriye sahip 600 kPa değerinde bir basınç alanının oluştuğu görüldü. Yoğun olan basınç alanı bölgesinin, Z ekseninde düz bir çizgi şeklinde olduğu,merkezin çevresinde ise, 450 kPa, 350 kPa ve 250 kPa değerlerinde oluşan basınç alanlarının saçılarak sönmüldüğü görüldü.

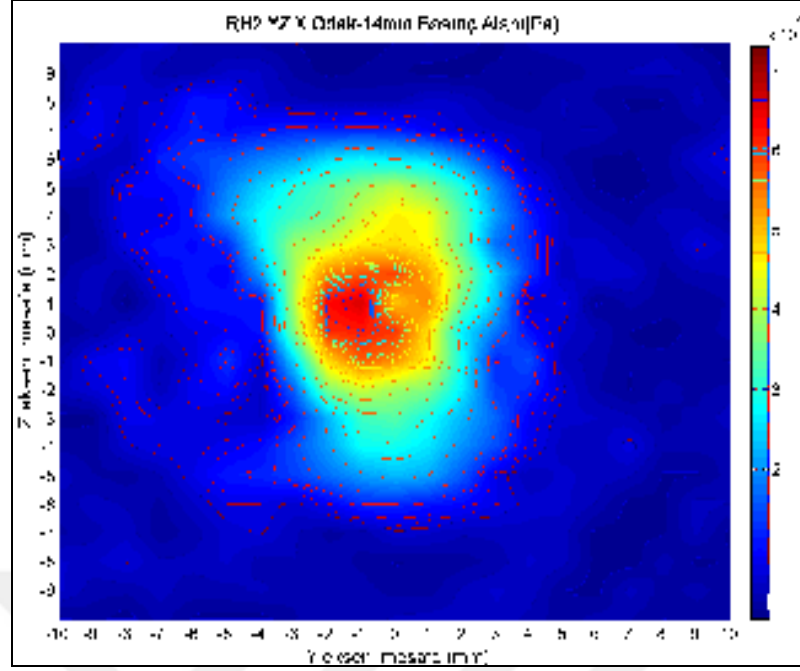


Şekil 3.55. RC2 probunun X=241 mm mesafede YZ ölçümü



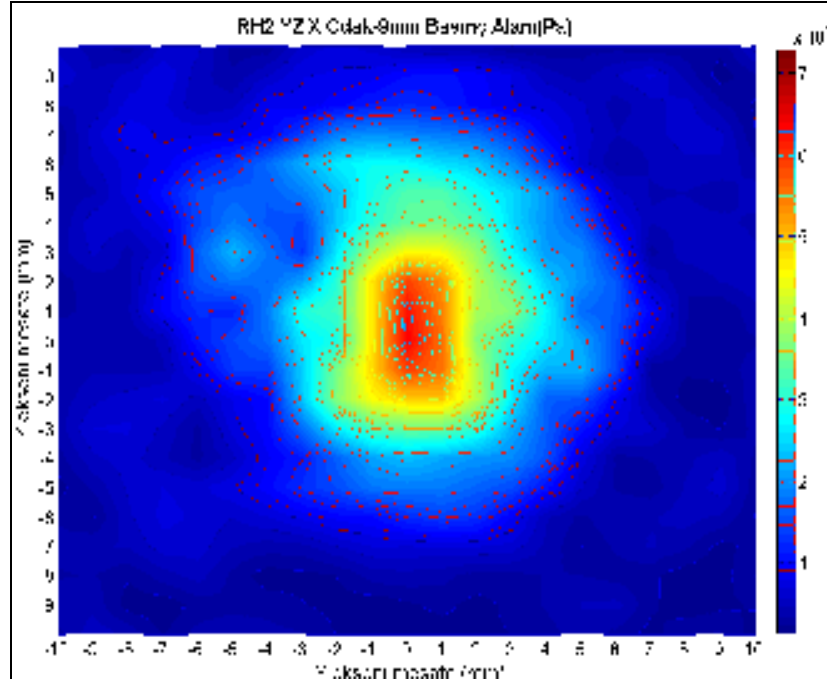
Şekil 3.56. RH2 probunun X odak mesafede YZ ölçümü

Hidrofonun, prob yüzeyine 20 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.57’de görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre, yakın alan bölgesi içinde bulunan bu mesafede alanların oluşmaya başladığı fakat düzgün bir geometri meydana gelmediği görüldü.



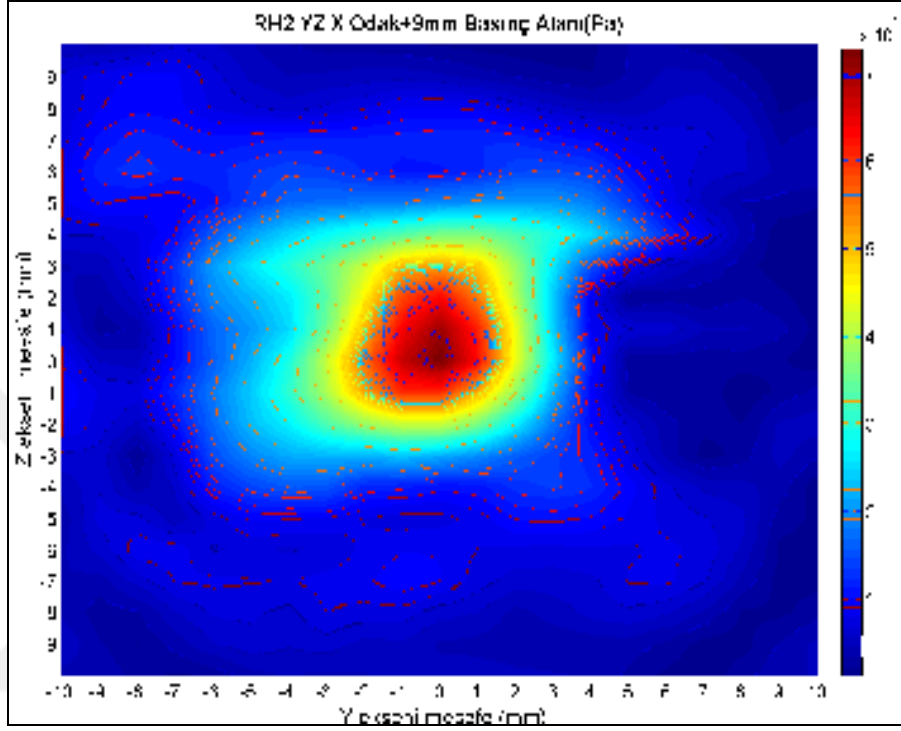
Şekil 3.57. RH2 probunun X=20 mm mesafede YZ ölçümü

Hidrofonun, prob yüzeyine 25 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.58'de görülmektedir. Odak noktasına yaklaşıırken, merkezinde dikdörtgen içinde eşkenar dörtgen geometride yaklaşık 600 kPa değerinde bir basınç alanının oluşmaya başladığı görüldü.



Şekil 3.58. RH2 probunun X=25 mm mesafede YZ ölçümü

Hidrofonun, prob yüzeyine 44 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.59'da görülmektedir. Odak noktasından itibaren prob yüzeyinden uzaklaşırken, eşkenar geometride olan basınç alanının, dairesel bir geometriye dönüşmeye başladığı görüldü.

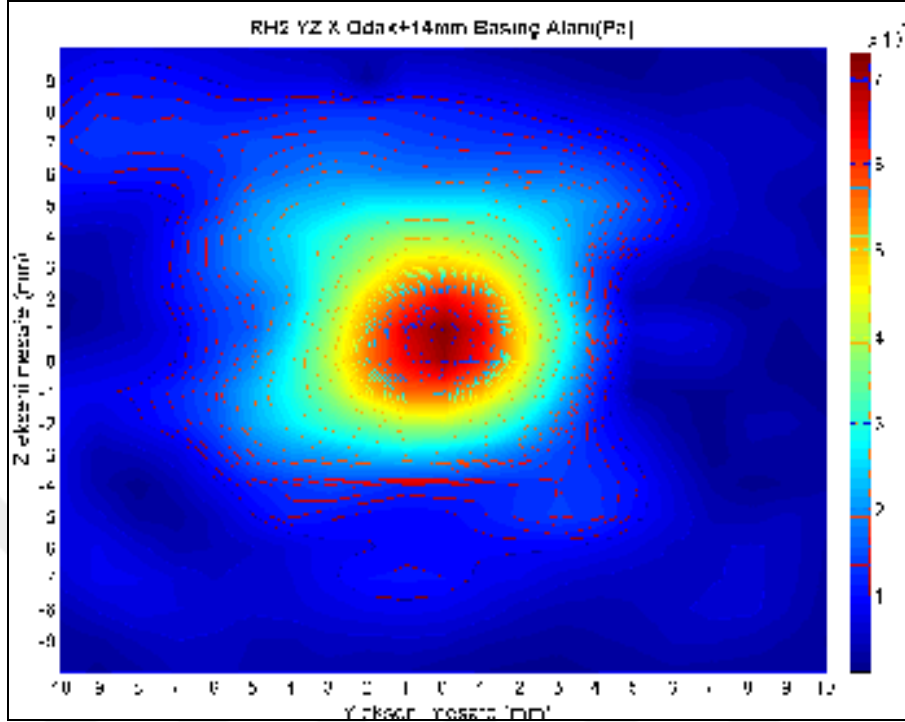


Şekil 3.59. RH2 probunun X=44 mm mesafede YZ ölçümü

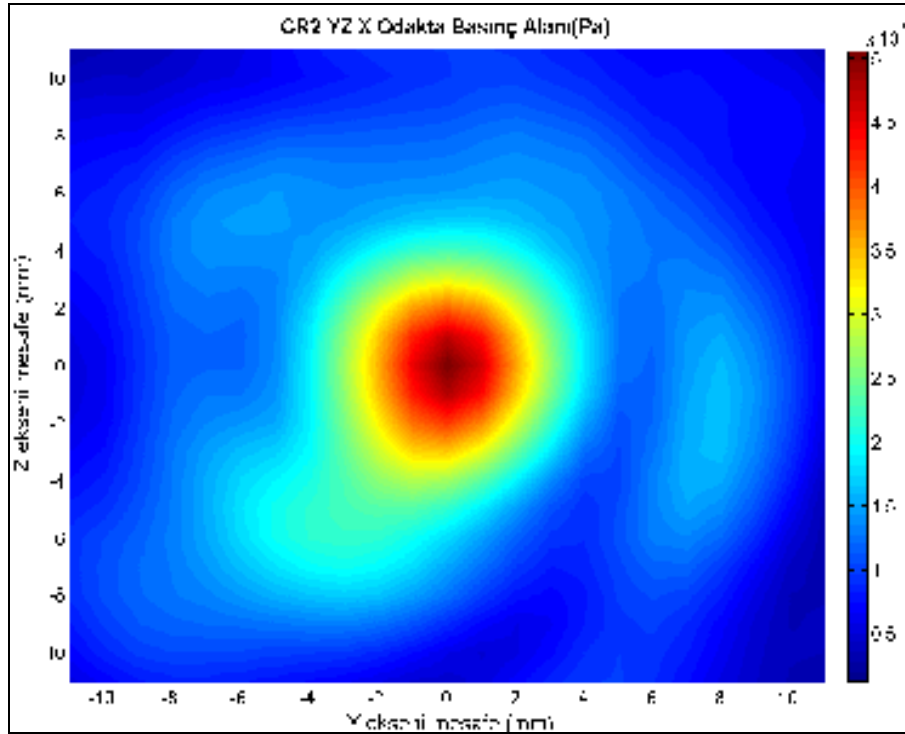
Hidrofonun, prob yüzeyine 49 mm mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.60'da görülmektedir. Altıgen bir geometride ve yaklaşık 650 kPa basınç alanı değerine sahip bir basınç alanı değerinin oluştuğu görüldü. Bu alanının çevresinde oluşan iki basınç alanı eğrisinin sırasıyla 600 kPa ve 450 kPa değerlerinde olduğu, 4. ve 5. basınç alanı eğrilerinin 400 kPa ve 270 kPa değerlerinde oluştuğu ve daha sonra saçılarak sönmüldüğü görüldü.

CR2 model ultrasonik probun X ekseninde odak noktasında ve YZ düzlemi için, Y ve Z eksenlerinde ± 11 mm aralığında ölçümleri yapıldı. Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 120 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.61'de görülmektedir. Merkezde 500 kPa değerinde 2 mm çapında bir basınç alanının oluştuğu, bu alanının etrafında 4 mm çapında 425 kPa ve 325 kPa değerlerinde 2. ve 3. eğrilerin oluştuğu görüldü. Dış

eğrilerin 250 kPa ve 200 kPa basınç alanı değerine düştükten sonra saçılarak yok olduğu görüldü.

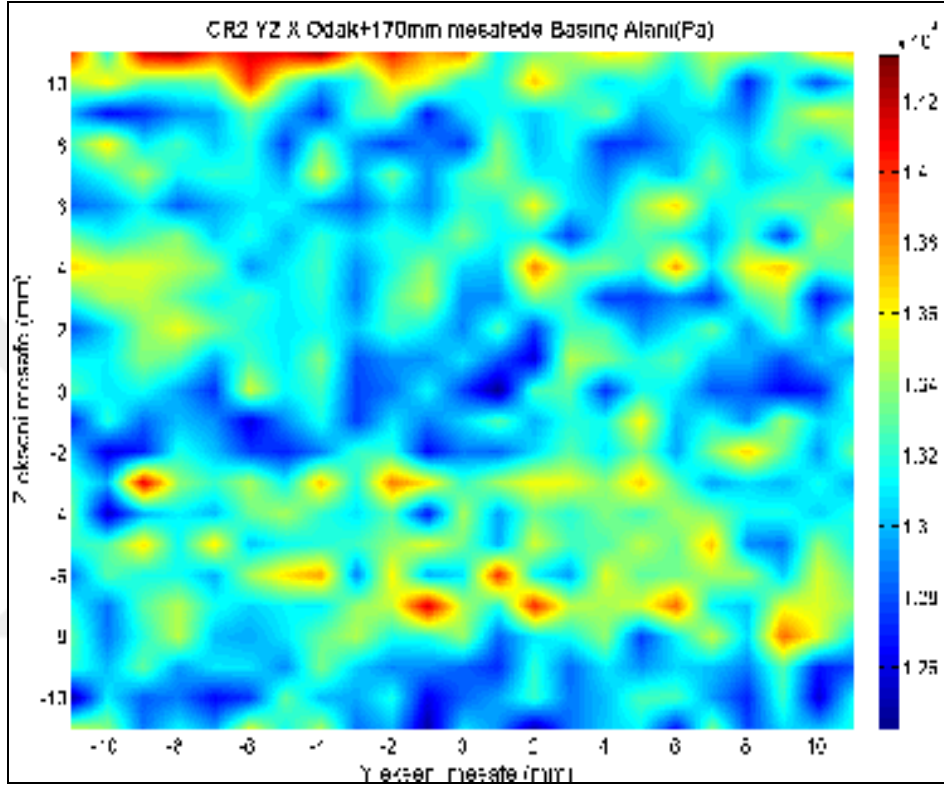


Şekil 3.60. RH2 probunun X=49 mm mesafede YZ ölçümü



Şekil 3.61. CR2 probunun X odak mesafede YZ ölçümü

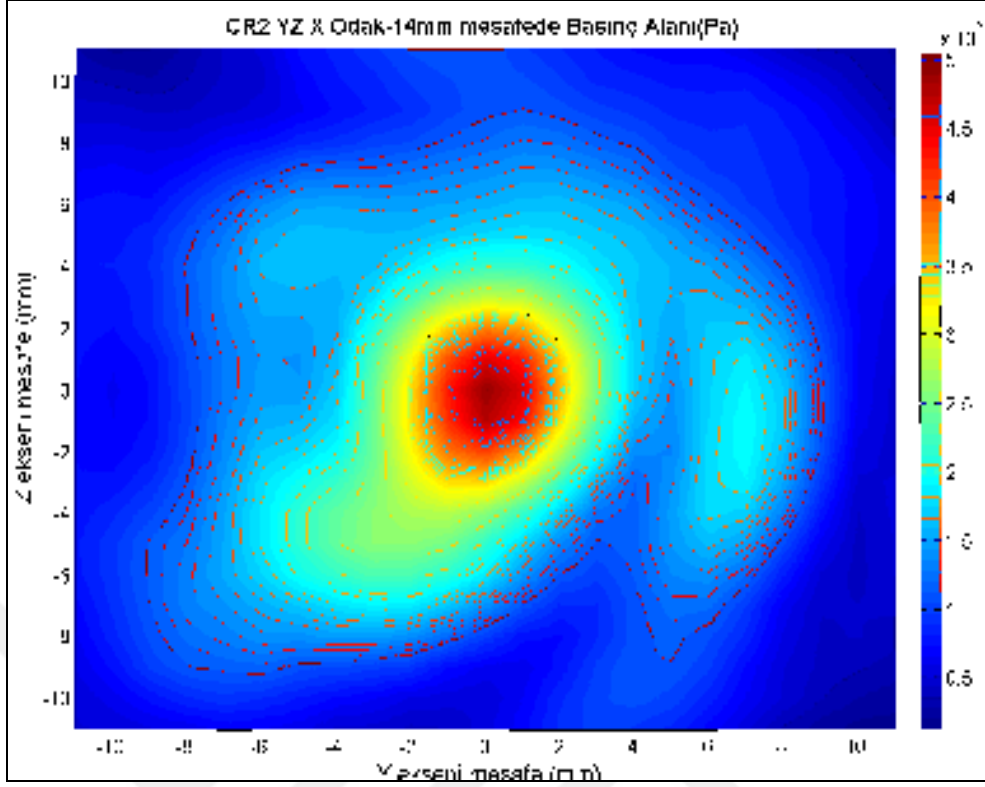
Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 291 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.62’de görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre probun yüzeyinin her bir noktasının birer kaynak gibi davrandığı bir alan oluşumu görüldü. Ölçeklendirme çubuğu incelendiğinde, prob yüzeyine çok uzak bir mesafede basınç alanı oluşmadığı tespit edildi.



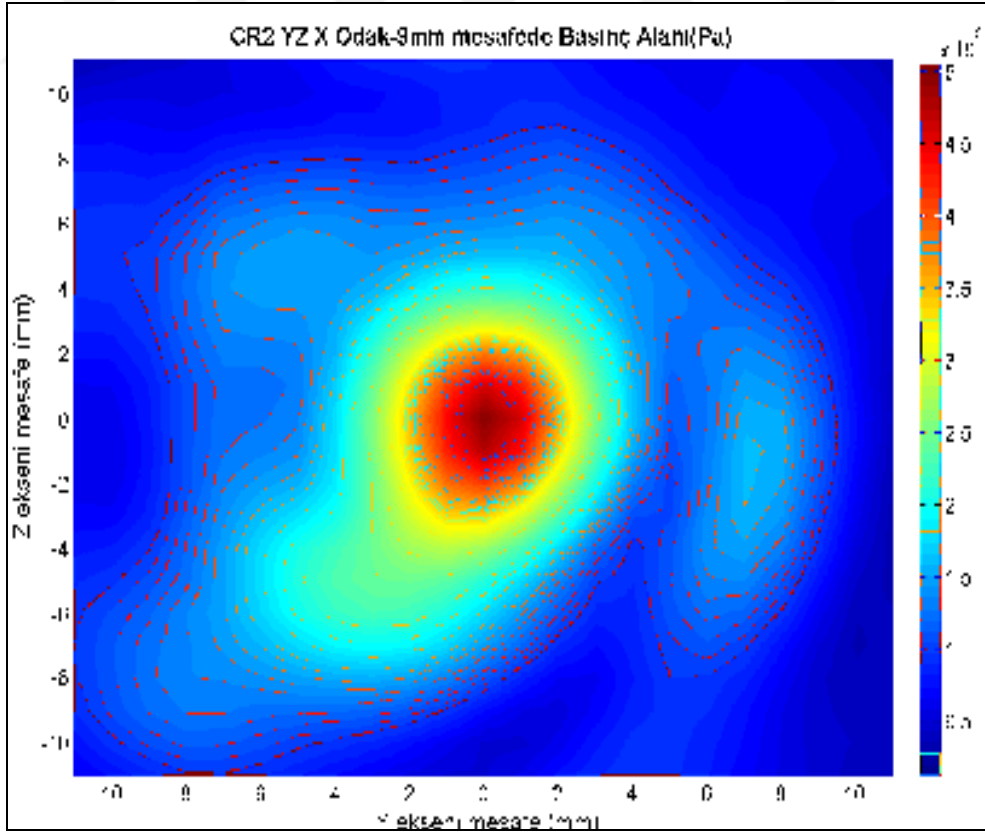
Şekil 3.62. CR2 probunun X=291 mm mesafede YZ ölçümü

Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 106 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.63’te görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre merkezde 500 kPa değerinde, odaktaki basınç alanı geometrisine benzeyen fakat değerlerin düşük olduğu bir basınç alanının oluştuğu görüldü.

Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 111 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.64’te görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre merkezde 500 kPa değerinde odaktaki basınç alanı geometrisine benzeyen fakat değerlerin düşük olduğu bir basınç alanının oluştuğu görüldü.

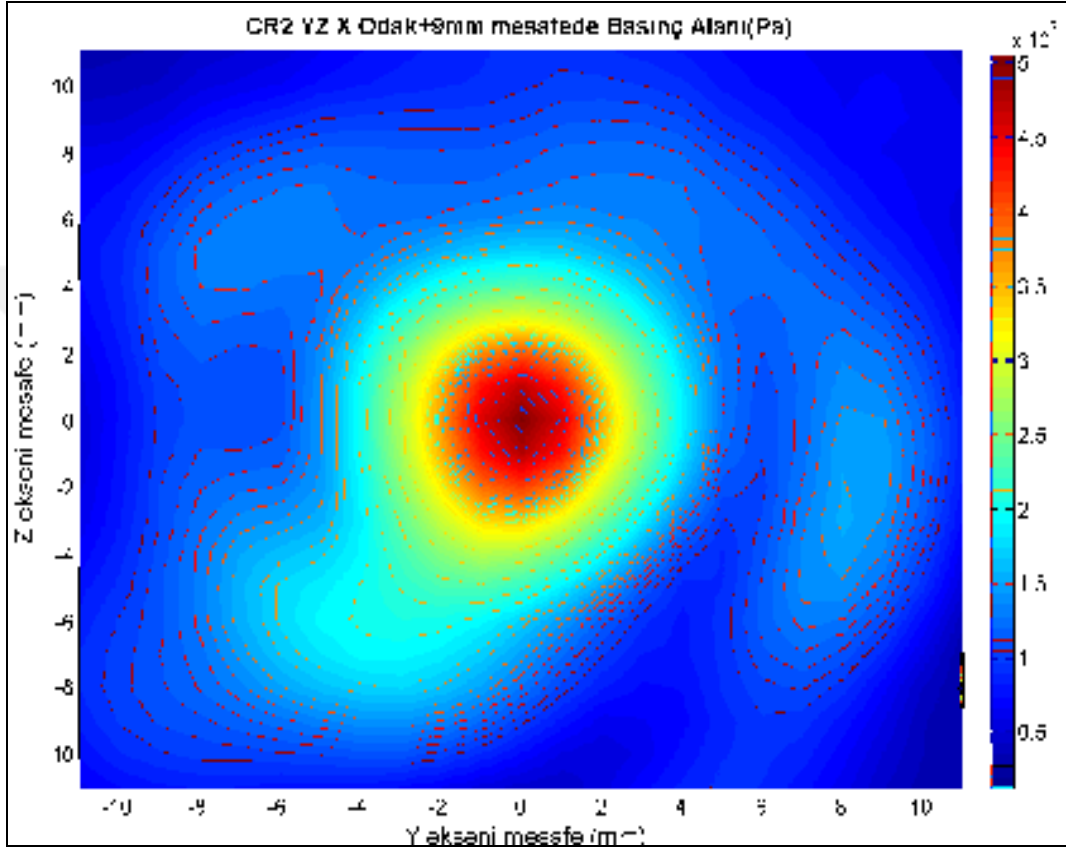


Şekil 3.63. CR2 probunun X=106 mm mesafede YZ ölçümü



Şekil 3.64. CR2 probunun X=111 mm mesafede YZ ölçümü

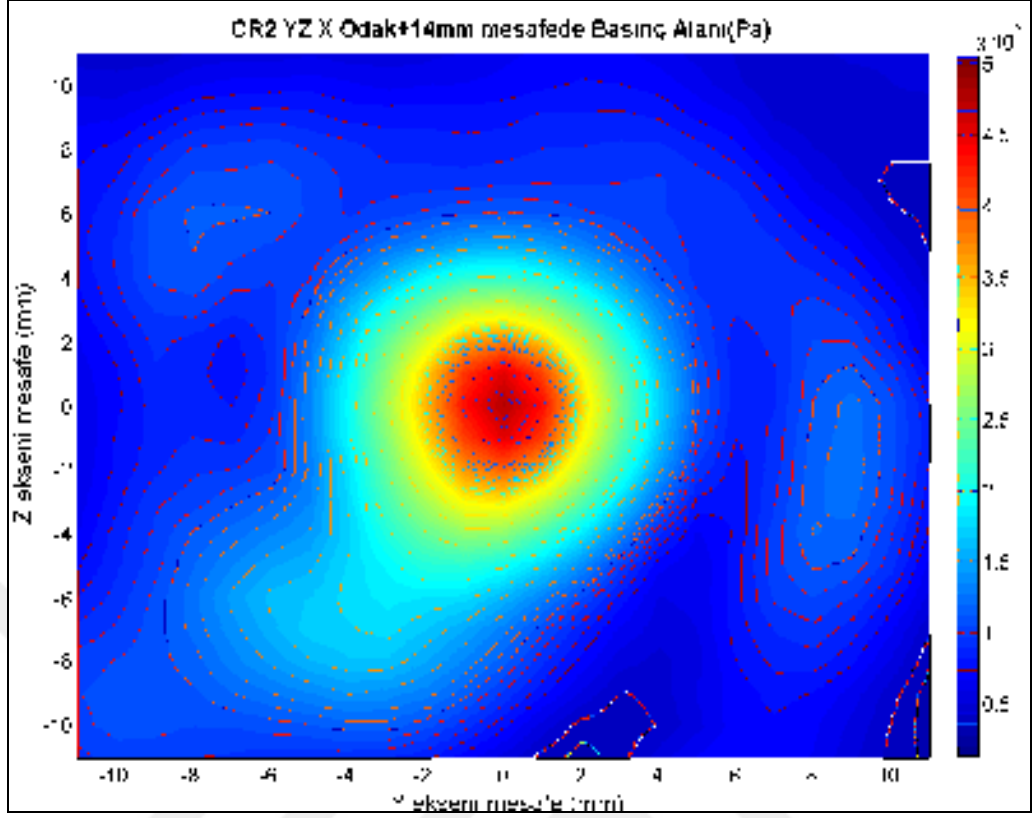
Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 129 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.65'te görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre merkezde 500 kPa değerinde, en dıştaki basınç alanı eğrisi hariç, basınç alanı eğrilerinin dairesel geometride olduğu bir basınç alanının olduğu görüldü.



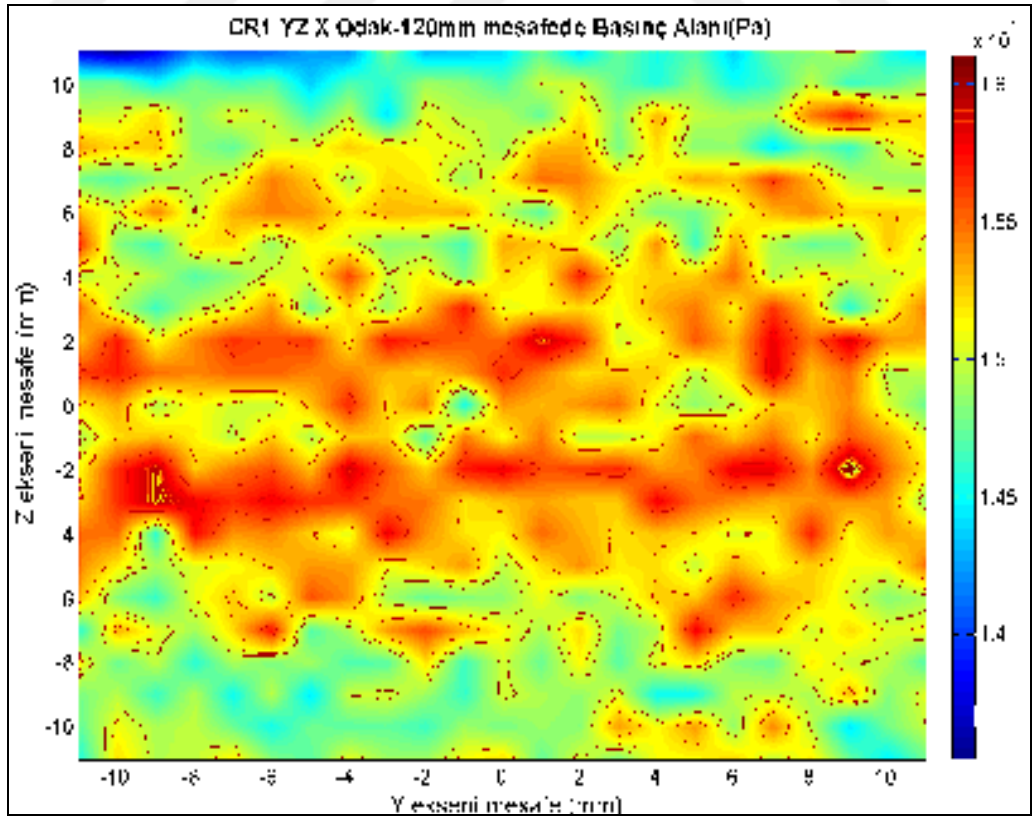
Şekil 3.65. CR2 probunun X=129 mm mesafede YZ ölçümü

Hidrofon, X ekseninde odakta olup probun yüzeyine olan mesafesi 134 mm olarak ayarlandı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.66'da görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre merkezde, 500 kPa değerinde ve bütün basınç alanı eğrilerinin dairesel geometride olduğu bir basınç alanı görüldü.

Hidrofonun, prob yüzeyine 1 mm'den daha kısa mesafede ayarlanmasıyla yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 3.67'de görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre yüzeyin farklı noktalarının birer farklı kaynak gibi davrandığı [12, 32] ve yakın alan bölgesinde bulunan bu mesafede ayırlamaz karışıklıkta alanların olduğu görüldü.

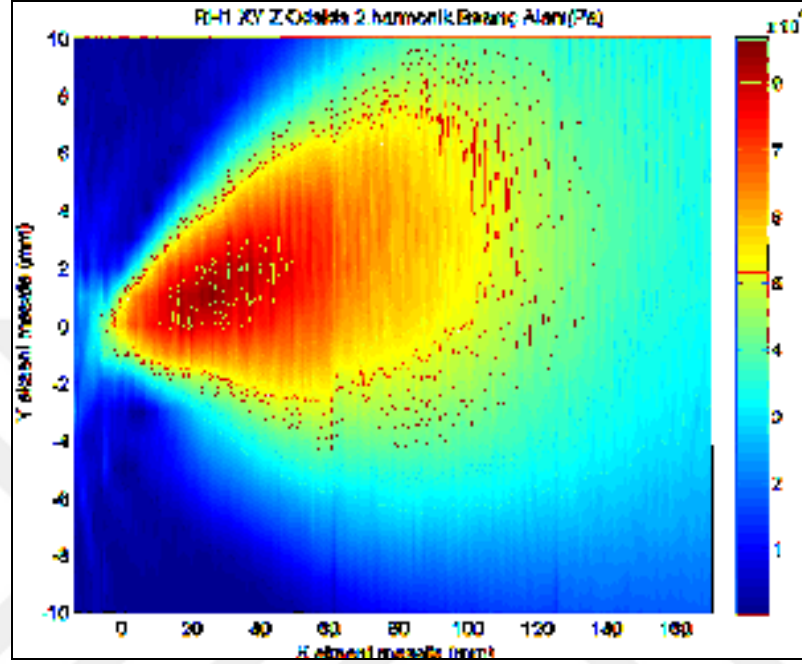


Şekil 3.66. CR2 probunun X=134 mm mesafede YZ ölçümü

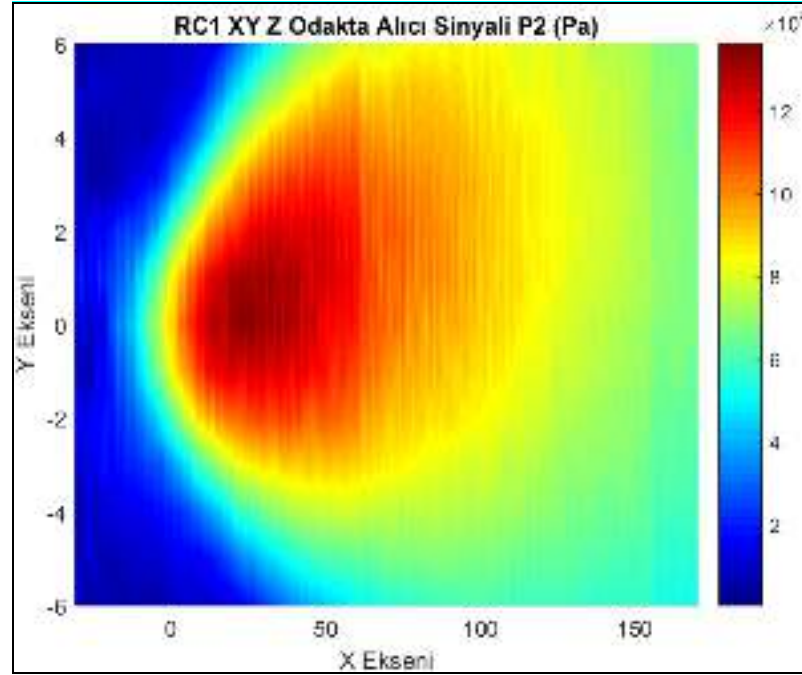


Şekil 3.67. CR2 probunun X<1 mm mesafede YZ ölçümü

Harmonik ölçümleri incelendiğinde, literatürde belirtilen istenmeyen yakın alan bölgelerinin kaybolduğu gözlemlendi [18]. Ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre oluşturulan Şekil 3.68 ve 3.69 incelendiğinde, görüntü kalitesini netleştirmek için gerekli olan yakın alan bölgesinin yok olması gerekliliği görüldü.

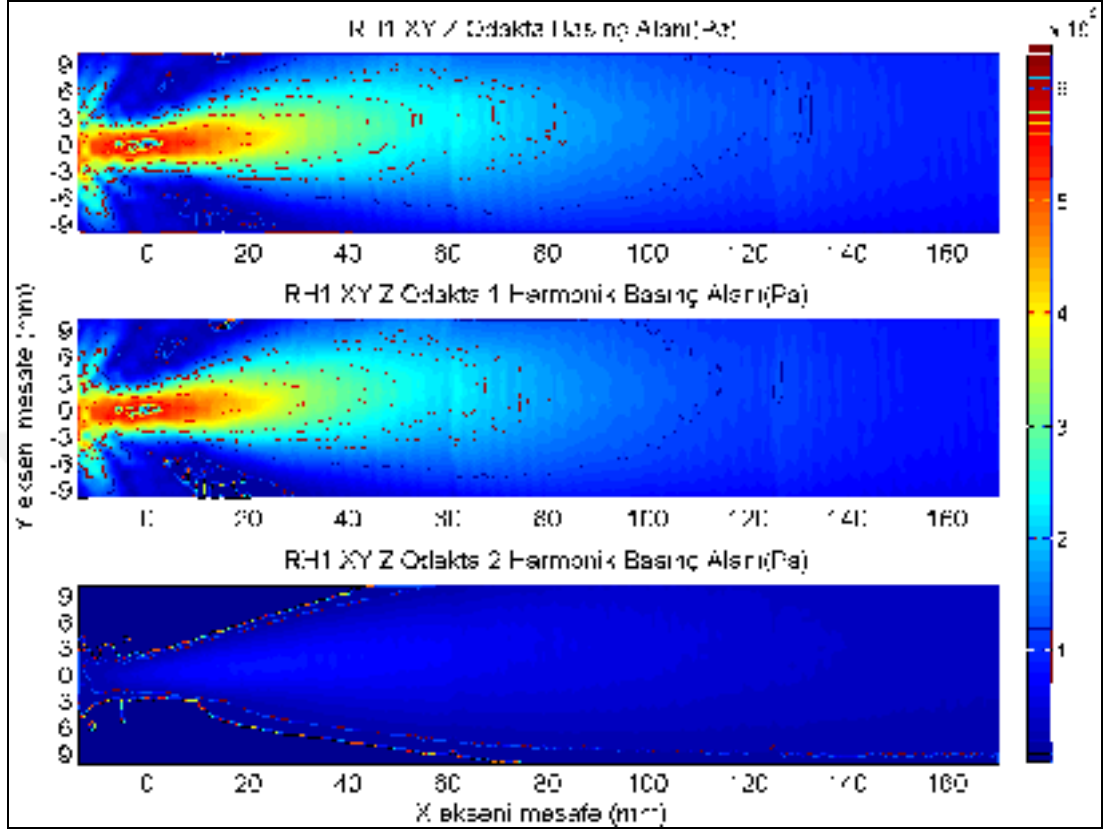


Şekil 3.68. RH1 probunun 2. harmonik XY ölçümü



Şekil 3.69. RC1 probunun 2. harmonik XY ölçümü

Tedavi amaçlı olarak bu bölgelerin basınç alanı değerleri ise çok düşük kaldığı Şekil 3.70’te görülmektedir.



Şekil 3.70. RH1 probunun harmoniklerinin XY ölçümü

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, ultrasonik problemlerin üretimi ve karakterizasyonu olmak üzere iki aşamada yapıldı. Üç farklı geometride ve iki farklı frekansta toplam altı adet prob üretildi, deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar karşılaştırıldı.

Ultrasonik problemlerde kullanılan dikdörtgen ve eşkenar dörtgen dönüştürücüler, çalışma frekansları 1 MHz ve 2 MHz olan dairesel dönüştürücülerden kesilerek elde edildi. Eşkenar dönüştürücünün köşegen uzunlukları 9,14 mm ve 21,58 mm, dikdörtgen dönüştürücünün kenar uzunlukları 10 mm ve 15 mm olup dairesel dönüştürücünün çapı 19 mm'dir. Eşkenar ve dikdörtgen dönüştürücülerin boyutları belirlenirken literatürden faydalanıldı. Dönüştürücüler kesildikten sonra prob tasarımı ve üretimi gerçekleştirildi. Proben üretim aşamalarının her bir adımında empedans ölçümleri gerçekleştirildi. Ardından üretilen problemler için empedans uyumlaştırma devreleri tasarlandı ve bu çalışma ile ultrasonik prob üretimindeki empedans uyumlaştırmanın önemi gösterildi.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, problemlerin ultrasonik basınç alanlarının deneysel çalışmaları, TÜBİTAK UME Medikal Metroloji Laboratuvarı'nda bulunan sistem kullanılarak yapıldı. Deneysel ölçümler, saf su doldurulmuş deney havuzunda ve referans ölçüm probu olan iğne uçlu hidrofona kullanılarak gerçekleştirildi. Üretilen her bir probun, tek boyutlu (X, Y, Z) ve iki boyutlu (XY, XZ, YZ) eksenlerde ultrasonik basınç alanı ölçümleri yapıldı. Daha sonra elde edilen ham ölçüm sonuçları MATLAB yazılımı yardımıyla grafiksel gösterim haline getirildi ve sonuçlar literatürle karşılaştırıldı.

YZ eksenlerinde prob yüzeyine yakın başlayıp X ekseninde ilerleyerek yapılan ölçümlere ait şekiller incelendiğinde, alandaki bir noktada basıncın, yüzeydeki farklı noktaların basınç katkıları toplanarak elde edildiği ve dönüştürücünün yüzeyindeki her bir noktanın aynı faz ve genlikte titreşen birer kaynak gibi davrandığı [12], yapılan bu tez çalışmasında da tespit edilmiştir.

Dikdörtgen dönüştürücünün yoğunluk dağılımının yakın mesafeler için oldukça karmaşık, uzak mesafeler için ise basınç alanına ait şeklin, dönüştürücünün daha küçük tarafı yönünde ana eksene sahip bir elips olduğu [12], ölçümler ile tespit edilmiştir.

Dairesel transdüserlerin, boyutu (d) ile uygulanan sinyalin dalga boyu (λ) arasındaki, d/λ değerindeki bir düşüşün, yakın alan karmaşıklığının ve yan lobların azalmasına neden olacağı, tez kapsamında yapılan deneysel sonuçlardan elde edilen şekillerde görülmektedir [13]. Frekansa bağlı olan λ değeri, artan frekansla küçüleceğinden dolayı 2 MHz frekansında görülen yanal loblar, 1 MHz frekansına göre oluşan yanal loblardan daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Dikdörtgen dönüştürücünün basınç alanının, eşkenar dörtgen kaynağa göre daha geniş bir alana sahip olduğu, eşkenar dörtgene göre daha iyi tanımlanabilen ve oluşması beklenen yanal loblarının oluştuğu, eşkenar dörtgen dönüştürücüde ise oluşmaması beklenen yanal lobların oluşmadığı ölçüm sonuçlarıyla elde edilen şekillerde görülmektedir [17].

Uzak alan başlangıç bölgesinin prob yüzeyine olan mesafesinin eşkenar dörtgen dönüştürücüde dikdörtgen dönüştürücüye göre daha yakın olduğu deneysel sonuçlar sonucunda gözlemlendi [17].

Ultrasonik basınç alanı yanal loblarına ait genliklerin harmoniklerde azalarak daha yüksek çözünürlüğün elde edilebileceği yapılan deneysel sonuçlar sonucunda görüldü [18]. Deneysel sonuçlara göre, basınç alanı harmonik ölçümlerinde yakın alan bölgesinin yok olmasına bağlı olarak yanal loblarının ortadan kaybolduğu gözlemlendi.

Deneysel sonuçlarla, eşkenar dörtgen dönüştürücülerin basınç alanı değerlerinin en yüksek ve yanal lobların en az olduğu görüldü. 2 MHz problemlerin odak noktaları, aynı geometrideki 1 MHz problemlerin odak noktalarına göre yaklaşık olarak iki katı bir mesafede oluşmuştur.

Bu tezden elde edilen deneysel verilerle sağlık alanında teşhis ve tedavi amaçlı kullanılacak ultrasonik problemlerin gelişimine katkı sağlanacaktır.

İleri Çalışmalar

1. Bu tezde belirlenmiş olan odak noktalarının koordinatlarından faydalanılarak, 0,1 mm adımlarla daha yüksek çözünürlüklü hassas ölçümler yapılabilir.
2. Problara uygulanacak farklı güç değerlerinin, odak noktası ve basınç değerleri üzerine olan etkileri incelenebilir.
3. Geometrilere göre dizi proplar yapılarak, bu propların basınç alanı etkileri incelenebilir.
4. Propların ön yüzlerine akustik empedans uyumlaştırma katman malzemeleri ve/veya odaklayıcı lensler eklenerek sonuçlardaki değişiklikler incelenebilir.
5. Tedavi amaçlı odaklı ultrasonik proplar üretilebilir.
6. Piezoelektrik dönüştürücüden üretilecek ultrasonik propların alıcı karakterizasyonu yapılabilir.
7. Propların axial ve lateral çözünürlüklerinin incelenmesi amacıyla çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bottom, V. E., A History of the Quartz Crystal Industry in the USA, *In Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium*, May: 3-12, 1981.
- [2] Loudon, J., A, Century of Progress in Acoustics, *Science*, 1901, **14**(365), 987-995.
- [3] Raichel, Daniel R., *The Science and Applications of Acoustics*, 2, Springer Science & Business Media, Fort Collins, 2006.
- [4] Reynolds, O., On The Refraction of Sound by the Atmosphere, *Proceedings of the Royal Society of London*, 1874, **22**(148-155), 531-548.
- [5] Ash, E. A., Paige, E. G. (ed.). *Rayleigh-Wave Theory and Application*, 3, Springer-Verlag, New York, 2012.
- [6] Strutt, J. W., & Rayleigh, B., *The Theory of Sound*, 2, Kindle, Dover, 1945.
- [7] Koyré, A., *Yeniçağ Bilimin Doğuşu (Bilimsel Düşüncenin Tarihi Üzerine İncelemeler)*, 3, GündoğanYayınları, Topkapı, 2010.
- [8] Tanyer, S. G., Evrene Hükmeden Fonksiyon Sinüs – 6, Euler'in Bilimde İz Bırakan Sorusuna Karşılık D'Alembert'in Şiirsel Çözümü, *Bilim ve Ütopya*, 75-80, 2016.
- [9] CANNEY, Michael S., et al. Acoustic Characterization of High Intensity Focused Ultrasound Fields: A Combined Measurement and Modeling Approach. *The Journal of The Acoustical Society of America*, 2008, **124**(4), 2406-2420.
- [10] Hutchins, D. A., Mair, H. D., Taylor, R. G., Transient Pressure Fields of PVDF Transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, **82**(1), 183-192.
- [11] Soler López, F. A., Mayorga Betancour, M. A., Cruz Salazar, E., Application of ultrasound in medicine part ii: the ultrasonic transducer and its associated electronic,. *Tecciencia*, 2013, **8**(15), 14-26.
- [12] Marini, J., and Rivenez, J., Acoustical Fields from Rectangular Ultrasonic Transducers for Non-Destructive Testing and Medical Diagnosis, 1974, *Ultrasonics*, **12**(6), 251-256.

- [13] Weyns, A., Radiation Field Calculations Of Pulsed Ultrasonic Transducers: Part 1: Planar Circular, Square and Annular Transducers, 1980, *Ultrasonics*, **18**(4), 183-188.
- [14] Weyns, A., Radiation Field Calculations of Pulsed Ultrasonic Transducers. II- Spherical Disc-And Ring-Shaped Transducers, 1980, *Ultrasonics*, **18**, 219-223.
- [15] Sahin, A., Baker, A. C., Ultrasonic Pressure Fields Due to Rectangular Apertures, 1994, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **96**(1), 552-556.
- [16] Hayman, A. J., Weight, J. P., Transmission and Reception of Short Ultrasonic Pulses by Circular And Square Transducers, 1979, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **66**(4), 945-951.
- [17] Kaya, O. A., Kaleci, D., Şahin, A., Finite Amplitude Pressure Field of Elliptical and Rhomboid Transducers in Three Dimensions, 2011, *Acoustical Physics*, **57**(2), 127-135.
- [18] Kaleci, D., Şahin, A., and Karaböcü. B., Experimental Investigation of Nonlinear Aoustic Field Structure in Two and Three Dimensions, *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Benevento, Italy, 15-18 Mayıs 2016.
- [19] Neild, A., D. A. Hutchins, T. J. Robertson, L. A.J. Davis, and D. R. Billson. The radiated fields of focussing air-coupled ultrasonic phased arrays, 2005, *Ultrasonics*, **43**(3), 183-195.
- [20] Karaböce, B., Kılıç, K., and Erdoğan, G., Investigation of Ultrasonic Fields Produced by HIFU Transducers Used in Cancer Therapy, *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Benevento, Italy, 15-18 Mayıs 2016.
- [21] Mast, T. Douglas, Fresnel Approximations for Acoustic Fields of Rectangularly Symmetric Sources, 2007, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **121**(June), 3311-3322.
- [22] Canney, Michael S., Michael R. Bailey, Lawrence A. Crum, Vera A. Khokhlova, ve Oleg A. Sapozhnikov, Acoustic Characterization of High Intensity Focused Ultrasound Fields: A Combined Measurement and Modeling Approach, 2008, *The Journal of the Acoustical Society of America* **124**(4), 2406-2420.
- [23] Ocheltree, Kenneth B., ve Leon A. Frizzell, Sound Field Calculation for Rectangular Sources, 1989, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **36**(2), 242-248.

- [24] Bjørnø, L., Introduction to Nonlinear Acoustics, 2010, *Physics Procedia*, **3**(1), 5-16.
- [25] Bjørnø, L., Characterization of biological media by means of their non-linearity, 1986, *Ultrasonics*, **24**(5), 254-259.
- [26] Varray, F., Pasovic, M., Cachard, C., Tortoli, P., Basset, O., (September). Acoustic Nonlinearity Parameter of Tissue on Echo Mode: Review and Evaluation of The Different Approaches for B/A Imaging, *IEEE International In Ultrasonics Symposium (IUS)*, Rome, Italy, 20-23 September 2009.
- [27] Sehgal, C. M., Bahn, R. C., Greenleaf, J. F., Measurement of the Acoustic Nonlinearity Parameter B/A in Human Tissues by A Thermodynamic Method, 1984, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **76**(4), 1023-1029.
- [28] Dineva P Gross D Müller R Rangelov T., *Piezoelectric Materials: Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials*, 7-32. Springer, Cham, 2014.
- [29] Gallego-Juarez, J. A., Piezoelectric Ceramics and Ultrasonic Transducers, 1989, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **22**(10), 804.
- [30] Arnold, F. J., Gonçalves, M. S., Bravo-Roger, L. L., Mühlen, S. S., Electric Impedance of Piezoelectric Ceramics Under Acoustic Loads, 2015, *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, **12**(2), 48-54.
- [31] Sherrit, S., Wiederick, H. D., Mukherjee, B. K., Sayer, M., An Accurate Equivalent Circuit for The Unloaded Piezoelectric Vibrator in the Thickness Mode, 1997, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **30**(16), 2354.
- [32] Coppens, A. B., Kinsler, L. E., Sanders, J. V., *Answers and Selected Solutions for Fundamentals of Acoustics*, 3, Wiley, New York, 1982.
- [33] Nur, S., Rhomboid Ve Hifu Dönüştürücülerin Lineer Olmayan Akustik Alan Yapılarının İncelenmesi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2016, 477664.
- [34] Pierce, A. D., *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, 2, Acoustical Society of America, New York, 1989.
- [35] Özdingiş, M., Karaböce, B., Erdemli, Y. E., Production of Probes to Characterize Acoustic Field Effects Due to The Geometry of Piezoelectric Transducers: Rectangular and Rhomboid Transducers, *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Rome, Italy, 11-13 June 2018.

- [36] Karaböce, B., Durmuş, H. O., Çetin, E., Özdingiş, M, Investigation of Hardness of Backing Material Used in Piezoelectric Transducers. *Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, Lefkoşe, Kıbrıs, 8-10 Kasım 2018.
- [37] Arnold, F. J., Gonçalves, M. S., Bravo-Roger, L. L., & Mühlen, S. S., Electric Impedance of Piezoelectric Ceramics Under Acoustic Loads, 2015, *ECTI Transactions on Electrical Engineering Electronics and Communications*, **12**(2), 48-54.
- [38] Matthaei, G., Young, L., Jones, E. M. T., *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House. Inc., Dedham, Mass, 1980.
- [39] Brounley, R. W., Matching Networks for Power Amplifiers Operating into High VSWR Loads, *High Frequency Electronics*, 58-62, 2004.
- [40] Getman, I., Lopatin, S., Matching of Series and Parallel Resonance Frequencies for Ultrasonic Piezoelectric Transducers, *Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, Honolulu, USA, 21 July – 2 Aug 2000.
- [41] Haruta, H., *The Impedance Measurement Handbook: A Guide to Measurement Technology and Techniques*, *Agilent Technologies*, December 2003.
- [42] An, J., Song, K., Zhang, S., Yang, J., Cao, P., Design of a Broadband Electrical Impedance Matching Network for Piezoelectric Ultrasound Transducers Based on a Genetic Algorithm, 2014, *Sensors*, **14**(4), 6828-6843.
- [43] Emeterio, J. S., Ramos, A., Sanz, P. T., Ruiz, A, Evaluation of Impedance Matching Schemes for Pulse-Echo Ultrasonic Piezoelectric Transducers, 2002, *Ferroelectrics*, **273**(1), 297-302.
- [44] URL-1:
<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/33240/06370831-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y>,
 (Ziyaret tarihi: 10 Temmuz 2019)
- [45] Liu, H., Zeng, J., Study On Dynamic Matching Of Electroacoustic Transducer Based on the Vibration Active Control, *In The 21st International Congress on Sound and Vibration*, Beijing, China, 13-17 July 2014.
- [46] Prokic, M., *Piezoelectric Transducers Modeling and Characterization*, *MP Interconsulting*, 2004.
- [47] Garcia-Rodriguez, M., Garcia-Alvarez, J., Yañez, Y., Garcia-Hernandez, M. J., Salazar, J., Turo, A., Chavez, J. A., Low Cost Matching Network for Ultrasonic Transducers, 2010, *Physics Procedia*, **3**(1), 1025-1031.

- [48] Svilainis, L., Dumbrava, V., Evaluation of the Ultrasonic Transducer Electrical Matching Performance, 2007, *Ultrasound*, **62**(4), 16-21.
- [49] Carey, S. J., Gregory, C. M., & Hatfield, J. V., Electronics for High Impedance ultrasound transducers, *In World Congress on Ultrasonics*, Paris, France, 7-10 September 2003.
- [50] URL-2:
<https://home.sandiego.edu/~ekim/e194rfs01/jwmatcher/matcher2.html>,
(Ziyaret tarihi: 10 Temmuz 2019)
- [51] Karaböce, B., Characterisation of Ultrasonic Transducers Used in Medical Applications and Investigation of their Effects in Phantom Tissue, Doktora Tezi, Yeditepe University, Physics Department, İstanbul, 2015, 416197.





EKLER

Ek-A

Dikdörtgen geometrideki problemler için yapılan hesaplamalar aşağıda sunulmaktadır:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = \frac{1432}{1 \times 10^6} = 0,001432 \quad \text{m}$$

$$r_1 = \frac{s}{\pi \cdot \lambda} \quad r_2 = \frac{b^2}{4 \cdot \lambda} \quad r_3 = \frac{a^2}{30 \cdot \lambda} \quad r_4 = \frac{b^2}{\lambda}$$

$$s = a \cdot b = 2 \cdot e \cdot f = \pi \cdot r^2$$

c : Distile suda akustik hız (1432 m/sn)

f : Frekans (Hz)

λ : Dalga boyu (m)

a : Dikdörtgen dönüştürünün eni (m)

b : Dikdörtgen dönüştürünün boyu (m)

D= Dairenin çapı (m)

r= Dairenin yarıçapı (m)

e = Eşkenar dörtgenin merkezden dikey mesafesi (m)

f = Eşkenar dörtgenin merkezden yatay mesafesi (m)

s: Dönüştürücünün yüzey alanı (m)

r_1 =Yakın alan bitiş mesafesi (m)

r_2 =Uzak alan başlangıç mesafesi (m)

r_3 =Çok yakın alan mesafesi (m)

r_4 =Bütün yoğunluk alanı mesafesi (m)

RC1 probu için hesaplamalar

$$r_1 = \frac{0,010 \cdot 0,015}{\pi \cdot (0,001432)} = 33,4 \text{ mm}$$

$$r_2 = \frac{0,015^2}{4 \cdot (0,001432)} = 39,3 \text{ mm}$$

$$r_3 = \frac{0,010^2}{30 \cdot 0,001432} = 2,3 \text{ mm}$$

$$r_4 = \frac{0,015^2}{0,001432} = 157,1 \text{ mm}$$

RC2 probu için hesaplamalar

$$r_1 = \frac{0,010 \cdot 0,015}{\pi \cdot (0,000716)} = 66,7 \text{ mm}$$

$$r_2 = \frac{0,015^2}{4 \cdot (0,000716)} = 78,6 \text{ mm}$$

$$r_3 = \frac{0,010^2}{30 \cdot 0,000716} = 4,6 \text{ mm}$$

$$r_4 = \frac{0,015^2}{0,000716} = 314,3 \text{ mm}$$

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Özdingiş, M.**, Karaböce, B., Erdemli, Y.E. "Production of Probes to Characterize Acoustic Field Effects Due to The Geometry of Piezoelectric Transducers ", *2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA 2018)*, Rome, Italy, 11-13 June 2018.
- [2] Karaböce, B., Durmuş, H. O., Çetin, E., **Özdingiş, M.**, Investigation of Hardness of Backing Material Used in Piezoelectric Transducers. *Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, Lefkoşe, Kıbrıs, 8-10 Kasım 2018.
- [3] **Özdingiş, M.**, Karaböce, B., Bostan, K., Korkmaz, H. "Fizyoterapide Kullanılan Ultrasonik Dönüştürücülerin Güç İletim Verimliliğinin Artırılması", *Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, Lefkoşe, Kıbrıs, 8-10 Kasım 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Ereğli’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ereğli’de, lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2000 yılında başladığı Akdeniz Üniversitesi T.B.M.Y.O. Elektronik Haberleşme Bölümü’nden 2002 yılında onur öğrencisi olarak mezun oldu. 2008 yılında başladığı Uluslararası Hoca Ahmet Yesevi Türk Kazak Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında onur öğrencisi olarak mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı Yüksek Lisans öğrenimi devam etmektedir. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü’nde araştırma personeli olarak çalışmaktadır.