

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ VE ÜÇ BOYUTLU LİNEER OLMAYAN AKUSTİK
ALAN YAPILARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

DEVKAN KALECİ

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

MALATYA
Nisan 2007

ÖZET

Doktora Tezi

İKİ VE ÜÇ BOYUTLU LİNEER OLMAYAN AKUSTİK ALAN YAPILARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Devkan KALECİ
İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
132 + xi sayfa
2007

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Şahin

Lineer olmayan akustik alanındaki artan çabalar teknolojik gelişmeleride beraberinde getirmiştir. Lineer ve lineer olmayan etkileri kullanan çok çeşitli medikal aletler klinik uygulamalarda kullanılmaktadır. Buna rağmen, çoğu aletler alt harmonik bileşenlerini kullanmadıkları için, görüntü kalitesi hekimleri memnun edecek düzeyde değildir. Temel neden ise, akustik alanların alt harmonik yapıları hakkında yeterli bilgiye sahip olunmamasıdır.

Bu tezin amacı, dairesel bir kaynağın iki ve üç boyutta lineer olmayan akustik basınç alanlarının deneysel olarak incelenmesidir. Geliştirilen deneysel düzenek yardımıyla, saf su ortamında, ilk dört harmonik bileşeni için akustik eksen ve radyal eksen boyunca, iki ve üç boyutta lineer olmayan akustik basınç alan yapılarının ölçüm sonuçları sunulmuştur.

Alt harmoniklerin açısal ve eksensel görüntü kalitesine etkileri tartışılmıştır. Yapılacak ek çalışmalara kısaca değinilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Akustik Alanlar, Nonlineerlik, Alt harmonik-
ler.

ABSTRACT

Ph. D.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NONLINEAR
ACOUSTIC FIELD STRUCTURE IN TWO AND THREE
DIMENSIONS**

Devkan KALECİ,
İnönü University
The Faculty of Science and Arts
Department of Physics
132 + xiii pages
2007

Supervisor : Prof. Dr. Ali Şahin

Increasing effort in the nonlinear acoustics field brought the technological progress at the same time. Various ultrasonic medical equipments were developed and are being used in clinical applications which are used linear or nonlinear effects. However, image quality of these equipments is not quite good enough to satisfy the clinicians as many equipments are not use the sub harmonic components. The main reason is that the unsatisfying knowledge about the harmonic content of the nonlinear acoustic fields.

The aim of thesis is to investigate the experimental nonlinear pressure fields of circular source in two and three dimensions. Nonlinear pressure field measurements were presented by the designed experimental system in two and three dimensions for the first four harmonics, measured both an acoustic axis and radial axis, in distilled water medium.

The effect of the sub harmonics on the lateral and axial image quality were discussed. Future works were also outlined briefly.

KEYWORDS: Acoustic Fields, Nonlinearity, Sub Harmonics.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması süresince benden her türlü desteğini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali ŞAHİN'e,

Başta bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Ali BAYRİ olmak üzere bütün hocalarım ve mesai arkadaşlarıma,

Tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen Bilgisayar Öğretmenliği Bölüm Başkanı Sayın Yrd.Doç. Dr. Olgun Adem KAYA'ya,

Tezin yazımında kullandığım Latex Template dosyasının hazırlanmasında ve tez aşamasındaki yardımlarından dolayı Enformatik Bölüm Başkanı Sayın Yrd.Doç. Dr. Mustafa KARAKAPLAN'a,

Doktora çalışmam süresince bana her türlü desteği veren aileme sonsuz teşekkür ederim.

İçindekiler

Özet	i
Abstract	iii
TEŞEKKÜR	iv
Şekiller Dizini	vii
Çizelgeler Dizini	xi
1. Giriş	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Kapsamı	1
2. Temel Bilgiler	3
2.1 Giriş	3
2.2 Tarihsel Süreç	3
2.3 Temel Tanımlar	5
2.3.1 Duran ve İlerleyen Dalgalar	5
2.3.2 Düzlemsel ve Küresel Dalgalar	6
2.3.3 Kırınım ve Huygens Prensibi	7
2.3.4 Girişim ve Young Deneyi	8
2.3.5 Yansıma ve Snell Yasası	9
2.3.6 Akustik Empedans ve Yansıma Katsayısı	11
2.3.7 Akustik Şiddet ve Desibel Ölçeği	12
2.4 Akustik Dalgaların Sınıflandırılması	14
2.4.1 Frekansına Göre Akustik Dalgalar	14
2.4.2 Ortam İçinde Yayılma Şekline Göre Akustik Dalgalar	15
3. Lineer ve Lineer Olmayan Akustik	19
3.1 Giriş	19
3.2 Lineer Akustik	19
3.2.1 Lineer Dalga Denklemleri	20
3.3 Lineer Olmayan Akustik	26
3.3.1 Lineer Olmayan Ortamda Akustik Dalga Yayılması	27
3.3.2 Akustik Nonlineerlik ve Nonlineer Parametre (β)	28
3.3.3 Akustik Dalga Yayılım Zayıflaması	29
3.3.4 Akustik Şok Oluşumu	32
3.3.5 Lineer Olmayan Akustik Dalga Denklemleri	33

4. Akustik Dalgaların Uygulama Alanları	36
4.1 Giriş	36
4.1.1 Ultrasonik Görüntüleme (Pulse-Echo) Sistemleri	36
4.1.2 Ultrasonik Hasarsız Muayene Testleri (NDT)	40
4.1.3 Taramalı Akustik Mikroskop (SAM)	42
4.1.4 Akustik Temizleyiciler	44
4.1.5 Böbrek Taşı Kırıcıları	45
4.1.6 Kanser Tedavisi	46
4.2 Akustik Görüntüleme Kalitesini Etkileyen Faktörler	46
4.2.1 Kullanılan Aletlerin Teknik Özellikleri	47
4.2.2 Seçilen Görüntüleme Değişkenleri ve Kullanılan Yöntemler	53
5. Deneysel Düzenek	55
5.1 Giriş	55
5.2 Donanım	55
5.2.1 Su Tankı Ünitesi	57
5.2.2 Stepper (Adımlayıcı) Motor Ünitesi	64
5.2.3 Bilgisayar Kontrol Ünitesi	64
5.2.4 RF (Radio Frequency) Güç Yükseltici	66
5.3 Yazılım	67
6. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlar	73
6.1 Giriş	73
6.2 Başlangıç Basınç Değerleri (P_0)	74
6.3 Akustik Eksen Ölçümleri	76
6.4 Radyal Eksen Ölçümleri	80
6.5 İki Boyutlu Ölçümler	89
6.5.1 Kontür ve Üç Boyutlu Çizimler	89
6.6 Üç Boyutlu Ölçümler	103
6.7 Deneysel Sonuçlar İle Teorik Sonuçların Karşılaştırılması	106
6.8 Harmonik Görüntüleme	111
7. Genel İrdemeler ve İleri Çalışmalar	114
8. Kaynaklar	116
9. Ekler	125
Özgeçmiş	132

Şekiller Dizini

2.1	Aynı fazda iki harmonik dalganın üst üste binmesi ile oluşan duran dalgalar.	6
2.2	Akustik dalganın kırınımı.	8
2.3	(a) Çift yarıktaki iki dalganın girişimi, (b) perde üzerindeki girişim deseni ve (c) şiddetindeki değişim.	9
2.4	(a) Düzgün ve (b) pürüzlü yüzeyde yansıma.	10
2.5	Kırılma indisi n_1 olan bir ortamdan kırılma indisi n_2 olan bir ortama geçerken dalgada meydana gelen kırılma.	10
2.6	Boyuna akustik dalganın hareketi.	15
2.7	Enine akustik dalgasının hareketi.	16
2.8	Rayleigh akustik dalgasının hareketi.	17
2.9	Plate akustik dalgalarının titreşim modları.	17
3.1	Birim hacimden geçen kütle akısı.	21
3.2	Akustik dalganın lineer olmayan ortamda bozulması nedeniyle oluşan değişim.	27
3.3	Sinüzoidal dalganın bozulmasıyla ortaya çıkan alt harmonikler.	31
3.4	Tipik bir akustik şok dalgasının basıncı ve oluşum süresi.	32
4.1	A-scan görüntüleme tekniğinin şematik gösterimi.	38
4.2	B-scan görüntüleme tekniğinin şematik gösterimi.	39
4.3	SAM aletinin diyagram gösterimi.	43
4.4	Bir ultrasonik sistemin tasarımında gerekli temel parametreler.	47
4.5	Transducerin ürettiği güç için karakteristik bant genişliği.	48
4.6	Δt zaman aralığında seçilen $\cos(2\pi f_c t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü (Ref [58]'den alınmıştır).	50
4.7	Akustik Alıcı ve vericinin yerleşim düzeni.	51
4.8	$E(\theta)$ fonksiyonunun $a = 0.02$ m, $f_c = 4$ MHz, $c = 1540$ m/s için çizilen örnek grafiği (Ref [21]'den alınmıştır).	52
5.1	Deney sisteminin farklı açılardan fotoğrafları.	56
5.2	Deney sisteminin genel konfigürasyonu.	57
5.3	Deney sisteminde kullanılan ultrasonik tank ünitesinin şematik gösterimi.	58
5.4	Dışardan uygulanan elektrik alan sonucu oluşan piezoelektrikleme etkisinin şematik gösterimi.	59
5.5	Tipik bir transducerin kesiti ve oluşturduğu akustik basınç alanı (Ref [59]'den alınmıştır).	60
5.6	Zar tipi hydrophone'ların genel yapısı	62

5.7	Y-34-3598 ER 212 tipi hydrophone'nun frekansa göre duyarlılığı (Ref [64]'den alınmıştır).	63
5.8	Stepper motor ünitesinin şematik gösterimi.	64
5.9	AR 75A250 RF güç yükselticisinin frekansa göre güç çıkışı (Ref [71]'den alınmıştır).	67
5.10	Deney sisteminde kullanılan yazılımın başlangıç ara yüzü.	68
5.11	Koordinat ekseninin ayarlanmasında kullanılan ara yüz.	69
5.12	Ölçüm parametrelerinin belirlendiği ara yüz.	70
5.13	Data topla ara yüzü.	71
5.14	Dataların analizlerinin yapılmasında kullanılan ara yüz.	72
6.1	Ölçümlerin yapıldığı eksenlerin şematik gösterimi.	74
6.2	Başangıç basınç değerlerinin hesaplanmasında kullanılan örnek ölçüm sonuçları.	75
6.3	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.015$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.	77
6.4	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.055$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.	78
6.5	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.	78
6.6	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.	79
6.7	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.	79
6.8	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 16 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	81
6.9	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 16 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	81
6.10	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 16 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	82
6.11	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 27 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	83
6.12	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 27 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	83
6.13	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 27 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	84
6.14	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 38 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	85

6.15	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 38 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	85
6.16	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 38 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	86
6.17	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 60 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	87
6.18	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 60 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	87
6.19	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 60 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.	88
6.20	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	91
6.21	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	91
6.22	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	92
6.23	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	92
6.24	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	93
6.25	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	93
6.26	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	94
6.27	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	94
6.28	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	95
6.29	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	95
6.30	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	96
6.31	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	96
6.32	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	97
6.33	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	97
6.34	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	98
6.35	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.	98

6.36	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	99
6.37	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının u boyutta gösterimi.	99
6.38	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	100
6.39	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının u boyutta gösterimi.	100
6.40	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	101
6.41	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının u boyutta gösterimi.	101
6.42	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.	102
6.43	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının u boyutta gösterimi.	102
6.44	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 1. harmoniğin u boyutta yapılan limlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları. . . .	104
6.45	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 2. harmoniğin u boyutta yapılan limlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları. . . .	104
6.46	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 3. harmoniğin u boyutta yapılan limlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları. . . .	105
6.47	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 4. harmoniğin u boyutta yapılan limlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları. . . .	105
6.48	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk u harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanların akustik eksen boyunca değişimlerinin karşılaştırması.	107
6.49	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk u harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanların akustik eksen boyunca değişimlerinin karşılaştırması.	107
6.50	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.095$ MPa değerleri için ilk u harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanların akustik eksen boyunca değişimlerinin karşılaştırması.	108
6.51	$f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk u harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanlarının kontür çizimlerinin karşılaştırması.	110
9.1	<i>Deney sistemi için geliştirilen yazılımın akış diyagramı.</i>	125
9.2	şekil 5.10'da gösterilen başlangıç ara yüzün <i>Labview Block Diagramı</i>	126
9.3	şekil 5.11'de gösterilen koordinat eksenlerinin ayarlanmasında kullanılan ara yüzün <i>Labview Block Diagramı</i>	127
9.4	şekil 5.12'de gösterilen lim parametrelerinin belirlendiği ara yüzün <i>Labview Block Diagramı</i>	128
9.5	şekil 5.13'de gösterilen data topla ara yüzünün <i>Labview Block Diagramı</i>	129
9.6	şekil 5.14'de gösterilen dataların analizlerinin yapılmasında kullanılan ara yüzün <i>Labview Block Diagramı</i>	130
9.7	Dataların dosyaya yazılmasını sağlayan alt programın <i>Labview Block Diagramı</i>	131

Çizelgeler Dizini

2.2	Sıcaklık etkisi ile akustik dalganın hava içinde ilerlerken hızında, yoğunluğunda ve empedansında meydana gelen değişim.	11
5.1	75A250 RF güç yükselticisinin karakteristik özellikleri.	67

1. Giriş

1.1 Tezin Amacı

Günümüzde bilimsel ve teknolojik ilerlemeye paralel olarak lineer olmayan akustik çalışmaları da önemli bir gelişme içerisinde girmiş ve lineer olmayan etkileri kullanan çeşitli medikal sistemler klinik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Buna rağmen görüntü kalitesi henüz istenilen düzeye ulaştırılamamıştır. Bunun temel sebebi ise, ortamın lineer olmayışının sonucu ortaya çıkan bir çok etkinin yeteri kadar etkin kullanılmaması ve alt harmonik oluşumları hakkında yeterli bilgiye sahip olunmamasıdır. Özellikle alt harmonik yapıların iki ve üç boyutta deneysel incelenmesini temel alan çalışmaların literatürde az sayıda bulunması bu konuya olan ilgiyi arttırmıştır.

Bu nedenle bu çalışmada, dairesel bir kaynak tarafından oluşturulan ultrasonik dalgaların iki ve üç boyutlu lineer olmayan akustik basınç alanlarının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Kapsamı

Tezin ilk bölümünde, tezin amacı ve kapsamı açıklanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, ilk olarak tarihsel süreçten bahsedilmiştir. Duran ve ilerleyen dalgalar, düzlemsel ve küresel dalgalar hakkında bilgiler verilerek, kırınım, girişim, yansıma, akustik empedans ve akustik şiddet kavramaları ayrıntıları ile açıklanmıştır. Son olarak ise, frekansına ve ortamda yayılma şekline göre sınıflandırılan akustik dalga türlerine değinilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, lineer ve lineer olmayan akustik kavramları ayrıntıları ile açıklanmıştır. İlk olarak lineer akustik olaylara değinilerek, lineer akustik denklemleri olan, Durum Denklemi, Süreklilik Denklemi, Euler Denklemi ve Lineer

Dalga Denklemi türetilmiştir. Daha sonra lineer olmayan akustik olayların fiziksel sonuçlarından bahsedilmiştir. Ortamın lineer olmaması nedeniyle akustik dalgada meydana gelen değişim ve bozulmalara değinilerek, akustik nonlineerlik kavramı açıklanmıştır. Yine ortamın lineer olmamasının sonucu olarak akustik dalganın zayıflaması ve özel bir hali olan akustik şok dalgası oluşumu açıklanmıştır. Son olarak ise, lineer olmayan dalga denklemleri olan Burger, Genelleştirilmiş Burger ve KZK Denklemleri hakkında bilgi verilerek fiziksel önemleri üzerinde durulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde, akustik dalgaların uygulama alanlarından bahsedilmiştir. İlk olarak temel *pulse-echo* görüntüleme sistemleri olan A-scan, B-scan ve Doppler etkisi hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra sanayide, tıpta ve bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılan uygulamalar olan NDT (Nondestructive Testing), SAM (Scanning Acoustic Microscopy), akustik temizleyiciler, böbrek taşı kırıcıları ve kanser tedavi sistemleri açıklanmıştır. Son olarak ise, akustik görüntüleme kalitesi ve görüntüleme kalitesini etkileyen temel etkenler açıklanarak, görüntü kalitesinin artırılması için yapılması gereken çalışmalar üzerinde durulmuştur.

Tezin beşinci bölümünde, akustik basınç alanının ölçülebilmesi için dizayn edilen bilgisayar kontrollü deneysel düzenek hakkında bilgi verilmiştir. Sistemde yer alan tüm donanım araçları ayrıntıları ile açıklanmıştır. Bölümün sonunda ise, deney sistemi için geliştirilen yazılım ayrıntıları ile tanıtılmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, lineer olmayan akustik basınç alanlarının ölçülmesi ile elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. İlk olarak, başlangıç basınç (P_0) değerinin hesaplanması için yapılan örnek ölçüm sonuçları verilmiştir. Daha sonra, akustik eksen, radyal eksen, iki ve üç boyutta yapılan ölçümlerin sonucunda elde edilen ilk dört harmoniğin akustik basınç alan değişimleri sunulmuştur. Son olarak ise, deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar karşılaştırılmış ve akustik görüntüleme sistemlerinde alt harmoniklerin kullanılmasının sağlayacağı avantajlar tartışılmıştır.

Tezin yedinci bölümünde, genel irdelemeler ve ileri çalışmalar sunulmuştur.

2. Temel Bilgiler

2.1 Giriş

Akustik dalgalar, periyodik değişiklikleri koordinata ya da zamana bağlı olan mekaniksel titreşimlerdir. Yayılabilmek için bir ortama ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle yayılma hızları yayıldığı ortamın elastik özelliklerine, ortamın yoğunluğuna, sıcaklığına ve kaynaktan gönderilen dalganın türüne bağlıdır. Bu tür dalgalar ortamda yayılırken, ortam içindeki molekülleri dalganın hareketi boyunca yoğunluk ve hacim değişikliklerine uğratarak titreştirirler. Yerel parçacık titreşimleri, ortam içinde sıkışma ve genişlemelere neden olur. Bu titreşimleri ya da basınç değişimlerini matematiksel olarak bir dalga fonksiyonu ile temsil etmek mümkündür.

2.2 Tarihsel Süreç

Lineer olmayan akustik ile ilgili ilk çalışmalar 18. yüzyıla kadar uzanmaktadır [1, 2]. İlk olarak Euler 1759 yılında sonlu genlikteki akustik dalgalar için lineer olmayan dalga denklemini türetmiştir [3]. Kısa bir süre sonra ise, Lagrange akustik dalgaların yerel genliğine bağlı yayılma hızını veren genel bir çözüm üretmiştir [4]. Lagrange, bu denkleminde yayılma hızını sabit alarak bir yanılığa düşmüştür. Oysa gerçekte ürettiği denklemde hesaba katmadığı lineer olmayan distorsion (bozulma), akustik dalganın olağan hareketini bozmaktadır. Poisson, eşisıl gaz içinde ilerleyen düzlem dalgalar için açık bir çözüm üretmiştir [5]. Stokes ise, şok dalgalarının analizini yaparak genliğindeki kaçınılmaz azalma için viskozitenin ve sıcaklık etkileşimlerinin rol oynadığını göstermiştir [6, 7].

1860'lı yılların başlarında Riemann ve Earnshaw'ın yayınladıkları iki makale, ilk lineer olmayan akustik çalışmaları açısından önem ihtiva etmektedir. [1]. Riemann, zıt yönde ilerleyen iki dalga için çözümler üretirken, Earnshaw bir akustik kaynağın keyfi büyüklükteki yüzeyinden yayılan akustik dalgalar için sınır koşullarını

ifade etmeye çalışmıştır. Beyer ise, bu iki çalışmayı içine alan ve temel sayılabilecek bir çalışma sunmuştur [8]. Bu çalışmalardan sonra Rankine, Hugoniot, Rayleigh ve Toylar tarafından şok dalgalarının analizi konusunda yapılan bir kaç çalışma dışında 1930'lu yıllara kadar lineer olmayan akustikle ilgili önemli çalışmalara rastlanmaz. 1930'lu yıllarda yayınlanan iki makalede, düzlem dalgaların hareket denklemlerini çözebilmek için iki farklı Fourier serisi analizi yapılmıştır. İlk çalışma, akustik zayıflamanın olmadığı sıvılar içinde ilerleyen akustik şok dalgaların analizinin yapıldığı Fubini'nin çalışmasıdır [9]. İkinci çalışma, viskoziteden kaynaklanan kayıpların olmadığı durum için Fay tarafından yapılan asimtotik çözümleri içeren çalışmadır [10]. Bu iki çalışma, akustik dalgalar için harmonik oluşumlarını gösteren ilk modellemeler olması açısından önemlidir. Yine bu yıllarda Thuras, Jenkins ve O'neil tarafından yapılan çalışmada ise, daha önceki çalışmalardan farklı olarak lineer olmayan akustik alanında yapılmış olan ilk deneysel sonuçlar sunulmuştur [11].

Lineer olmayan akustiğin modern çağını başlatan dalga denklemleri 1950'li yılların başlarında Eckart, Lighthill, Mendousse tarafından türetilmiştir. Mendousse, viskoz sıvılar içinde ilerleyen düzlem dalgaları modellemede kullanılan Burger denklemini doğrulayarak, Eckart ve Lighthill'in üretmiş oldukları denklemlerin düzlemsel olmayan sonlu genlikteki akustik dalgalar için de kullanılmasını sağlamıştır. Bu çalışmaları ABD ve Sovyetler Birliği'nde yapılan önemli çalışmalar izlemiştir. Khokhlov ve çalışma arkadaşları Burger Denklemini küresel [12] ve silindirik [13] dalgalar için modellemesini yaparak bu denklemi düzlemsel akustik dalgalar için de kullanılabilirliğini göstermişlerdir.

Pratik uygulamalarda oldukça önemli yer tutan parametrik diziler üzerine yapılan ilk çalışmalar, 1960'lı yılların başlarında Westervelt tarafından başlatılmıştır [1]. Bu konuda, ilk teoriler ve deneysel çalışmalar yine Westervelt tarafından yapılmıştır [14]. Parametrik dizilerle ilgili ilk çalışmalar ABD'de başlamış olmasına rağmen, 1968 yıllarına kadar olan çalışmaların büyük bir kısmı İngiltere ve Norveç'te yapılmıştır. Parametrik dizilerle ilgili teorilerin önemli bir kısmı H. O. Berktaf tarafından yapılmıştır [15, 16]. Daha sonra Muir ise, Berktaf'ın çalışmalarından

faydalanarak parametrik dizilerle ilgili teorilerin ve deneysel çalışmalarının yer aldığı kapsamlı bir çalışma sunarak parametrik dizilere olan ilginin artmasına büyük katkıda bulunmuştur [17]. 1970'li yılların başlarında özellikle askeri araştırmalarda olmakla birlikte, sivil alandaki araştırmalarda da parametrik dizilerle ilgili çalışmalar önemli bir yer bulmuştur. Yine bu yıllar içinde parametrik dizileri konu alan yüzün üzerinde bilimsel çalışma çeşitli sempozyum ve kongrelerde sunulmuştur [1].

1970'li yılların başlarında Zabolotskaya, Khokhlov ve Kuznetsov tarafından Sovyetler Birliği'nde akustik dalgalar için temel lineer olmayan etkiler olan nonlineerlik, difraksiyon ve dissipation (dağınım) etkilerini içine alan ve KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetskov) [18, 19] Denklemi olarak bilinen lineer olmayan dalga denklemini türetmişlerdir. Bu denklem, lineer olmayan akustiğin en önemli ve henüz tam olarak analitik çözümüne ulaşılmamış dalga denklemi durumundadır [18, 20, 21].

Akustik dalgaların yayılma esnasındaki lineer olmayan etkiler üzerine Norveçli matematikçiler J. Naze Tjøtta, S. Tjøtta ve çalışma arkadaşları tarafından önemli teorik çalışmalar yapılmıştır [22, 23, 24]. Daha sonra bu konuyla ilgili nümerik çalışmalar Bakhvalov, Zhilieikin ve Zabolatskaya tarafından birleştirilerek derleme bir makale olarak yayınlanmıştır [19]. Bu derleme daha sonraları geliştirilerek bir kitap haline getirilmiştir. Bu kitap günümüzde lineer olmayan akustiğe yeni başlayan araştırmacılar için önemli ve temel bir kaynak durumundadır. Ayrıca bu kitap lineer olmayan akustikle ilgili araştırma düzeyinde ilk kitap sayılabilir.

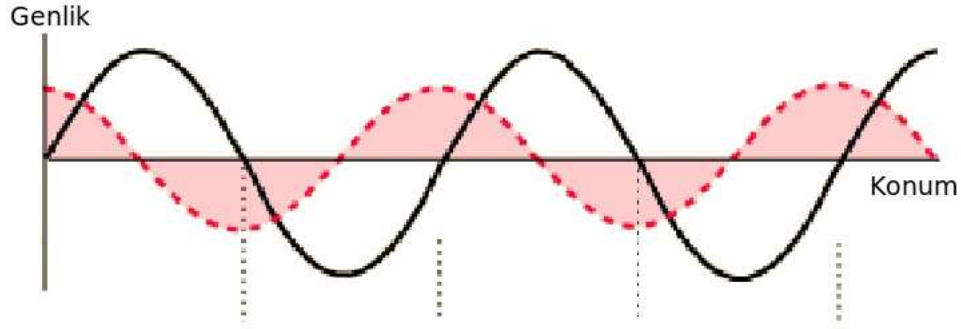
2.3 Temel Tanımlar

2.3.1 Duran ve İlerleyen Dalgalar

Zıt yönde aynı frekansta ve aynı fazda ilerleyen iki harmonik dalganın üst üste binmesi ile oluşan dalgalara *duran dalgalar* denir. Duran dalgalar kararlı dalgalar olarakta bilinir ve dalganın profili hareket etmez [25]. Duran dalga şekillenimleri yerdeğıştirmenin olmadığı ortam boyunca sabit durağan noktalar ile karakterize edilir. Yerdeğıştirmenin olmadığı bu noktalara *node* (düğüm noktaları) denir. Düğüm noktaları her zaman ortam boyunca aynı yerlerde bulunurlar. Duran dalgalar, genellikle

sünizoidal dalga biçimindedir.

Şekil 2.1’de, üst üste binmiş birbirinden farklı genliklere sahip iki duran dalga gösterilmektedir. Şekilden dalgaların profillerinin hareketsiz olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 2.1: Aynı fazda iki harmonik dalganın üst üste binmesi ile oluşan duran dalga-

lar. Açık bir ortamda çiflenimli sürücü bir kuvvetin yarattığı dalgalara *ilerleyen dalgalar* denir [26]. Bu tür dalgalar kaynaktan uzaklaşarak yayılırlar. İlerleyen dalgaların en önemli özellikleri enerji ve momentum taşımalarıdır. İlerleyen bir dalganın oluşturulabilmesi için sürücü bir kuvvet tarafından ortamın harmonik olarak titreştirilmesi gerekir. Bu kararlı durumda ortam içinde bulunan tüm parçacıklar sürücü frekansında harmonik salınım yapar. Genel olarak ilerleyen lineer bir dalga,

$$\Psi(z, t) = A \cos(\omega t - kz) \quad (2.1)$$

formunda gösterilir. Burada Ψ dalga fonksiyonunu, ω açısal frekansı, k dalga sayısını ve z konumu göstermektedir.

2.3.2 Düzlemsel ve Küresel Dalgalar

Noktasal bir kaynaktan yayılan dalgaların dalga cephelemi kaynaktan yeteri kadar uzakta çizgiler halinde ve neredeyse paralellerdir. Bu tür dalgalar üç boyutta

incelenirse hemen hemen düzlemsel olduğu gözlenir. Bu nedenle uzaktaki bir kaynaktan yayılan dalgalara *düzlemsel dalgalar* denir.

Üç boyutta düzlemsel dalgalar, tepe ve çukur noktaları olmayan bir sinüzoidal dalga olarak kabul edilebilir. Dalganın ön kısmı sabit fazda noktalardan oluşur ve faz ifadesi basitce $\phi = \vec{k} \cdot \vec{r} = \text{sabit}$ şeklindedir.

Küresel simetriye sahip dalgalara küresel dalgalar denir. Küresel dalgayı, küçük bir kaynaktan her yöne yayılan dalgalar olarak kabul edebiliriz. Genel olarak transducer tarafından oluşturulan dalgalar küresel dalgalardır. Küresel dalgalarda akustik basınç (p), sadece radyal eksenin bir parçasıdır ve açısal koordinatlara (ϕ, θ) bağlı değildir. Küresel simetriye sahip akustik bir dalganın basınç alanı için dalga denklemi,

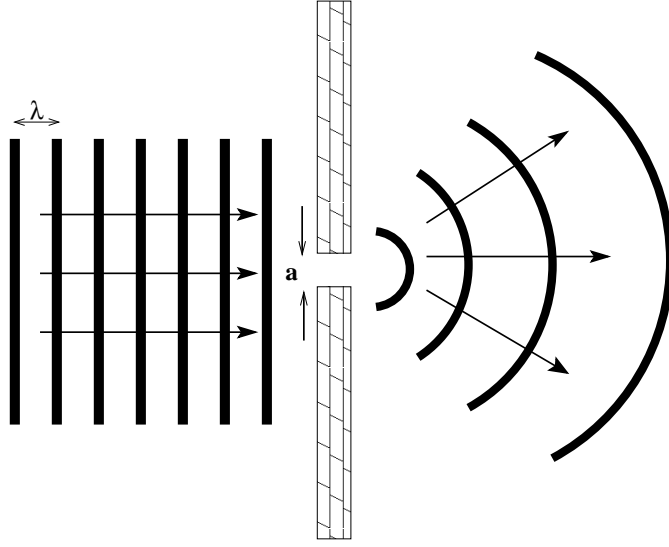
$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

şeklinde verilir. Denklem 2.2'den küresel bir dalganın sadece radyal eksen r 'ye bağlı olup, açısal koordinatlara bağlı olmadığı açıkça görülmektedir.

2.3.3 Kırınım ve Huygens Prensibi

Herhangi bir dalganın dalga boyuna yakın boyutta engellere ya da yarıklara gelerek yön değiştirmesi olayına *kırınım* denir. Diğer bir deyişle dalganın doğrusal yayılışından sapıp küresel yayılması olayıdır. Kendi dalga boyundan daha küçük bir yarığa gelen su dalgaları, yarıktan geçtikten sonra dairesel olarak hareket ederler. Bu, kırınım olayına bir örnektir. Kırınım miktarı engele gelen dalganın dalga boyu ile engelin boyutlarına bağlıdır. Engelin boyutu sabit ise, dalga boyu ne kadar küçülürse kırınım olayı o kadar fazla gözlenir.

Herhangi bir engele gelen doğrusal bir dalga, bu engelden geçerken bükülür ve dalga cephesi üzerindeki her nokta, yeni dalga kaynağı gibi davranır. Bu olaya *Huygens Prensibi* denir. Bu dalgalar, çıktıkları noktadan itibaren ortamdaki dalganın hızı ile bütün yönlerde yayılmaya devam ederler.

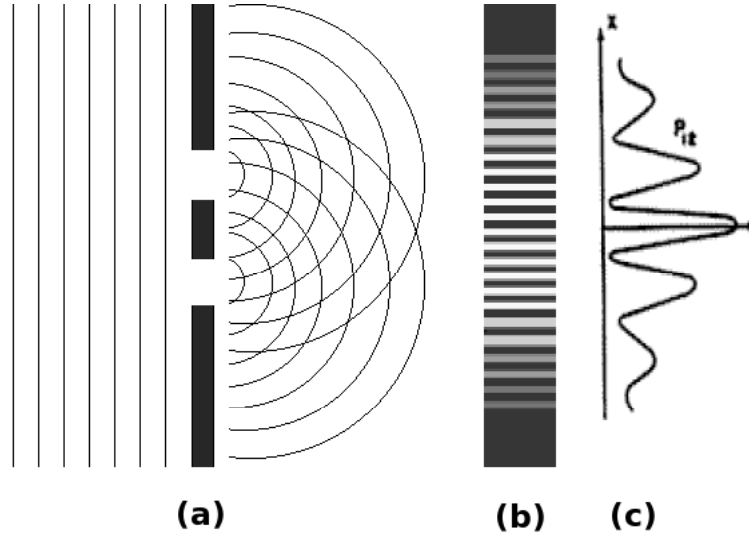


Şekil 2.2: Akustik dalganın kırınımı.

Şekil 2.2’de düzlemsel olarak gelen bir dalganın genişliği a olan bir yarıktan geçtikten sonra küresel olarak yayılması gösterilmektedir. Bu olay Huygens prensibinin de bir sonucudur. Yarık üzerinde her nokta yeni bir kaynak gibi davranır ve bunun sonucunda dalga küresel olarak ilerlemeye devam eder.

2.3.4 Girişim ve Young Deneyi

Aynı ortamda aralarında faz farkı bulunan dalgaların bir noktada üst üste gelmeleri olayına *girişim* denir. Girişimle meydana gelen şiddet farkı bölgelerinin görünümüne de *girişim deseni* denir. Herhangi bir dalganın tepesi (ya da çukuru) öteki dalganın tepesi (ya da çukuru) ile bir noktada karşılaşırsa yapıcı girişim, dalga tepesi (ya da çukuru) ile dalga çukuru (ya da tepesi) karşılaşırsa yıkıcı girişim oluşur.

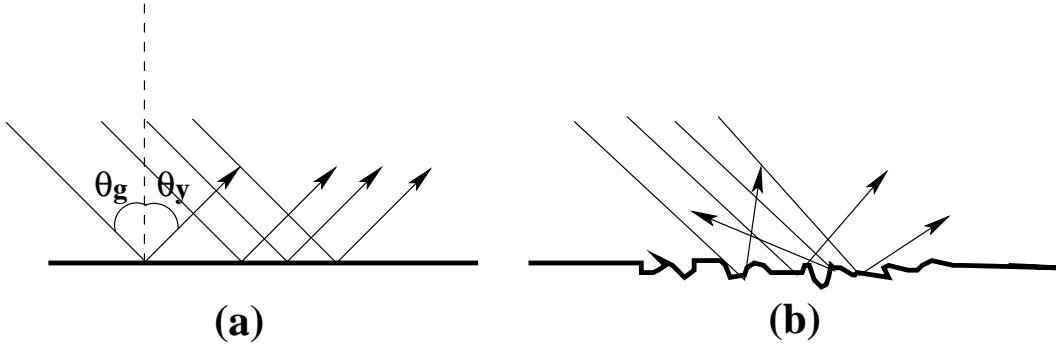


Şekil 2.3: (a) Çift yarıktaki iki dalganın girişimi, (b) perde üzerindeki girişim deseni ve (c) şiddetindeki değişim.

Şekil 2.3’de bir kaynaktan gönderilen dalganın çift yarıktan geçerek bir perde üzerine düşürülmesi ile oluşan girişim deseni gösterilmektedir. Girişim deseni üzerinde gösterilen koyu kısımlar yapıcı girişim bölgelerini, bu noktalar arasında kalan açık renkli kısımlar ise, yıkıcı girişim bölgelerini göstermektedir. Girişim olayında da tıpkı kırınım olayında ki gibi düzlemsel olarak gelen dalga, yarığı geçtikten sonra küresel olarak ilerlemeye devam etmektedir.

2.3.5 Yansıma ve Snell Yasası

Herhangi bir düzleme gelen dalga, bu düzleme gelme açısı ile yansır. Yansıyan dalganın doğrultusu gelen dalgayı içeren yansıtıcı yüzeye dik olan düzlemdir. Dalganın düzgün bir yüzeyden yansıması olayına *düzgün yansıma*, pürüzlü bir yüzeyden yansıması olayına ise, *dağınık yansıma* denir. Pürüzlü yüzeyden yansıyan dalgalar birbirine paralel olmaz. Yüzey üzerindeki pürüzler ya da değişimler gelen dalganın dalga boyuna göre küçük ise, yüzey düzgün olarak kabul edilir ve bu yüzeylerde meydana gelen yansımalar düzgün yansımalarlardır.



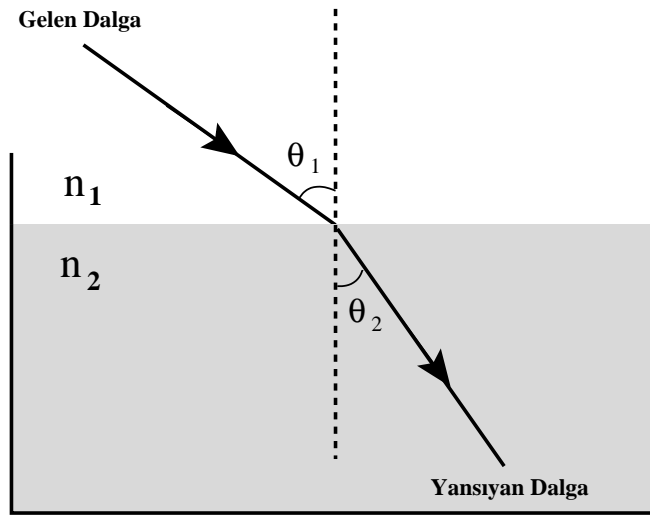
Şekil 2.4: (a) Düzgün ve (b) pürüzlü yüzeyde yansımalar.

Şekil 2.4'de düzgün ve pürüzlü yüzeye gelen dalgaların yansımaları gösterilmektedir. Düzgün yüzeyde bütün dalgalar birbirine paralel olarak yansırken pürüzlü yüzeyde dalgalar yüzeyin durumuna bağlı olarak farklı yönlerde yansımaktadır.

İlerleyen bir dalga bir ortamdan diğer ortama geçerken ortamların kırılma indislerine ve geliş açısına bağlı olarak yön değiştirir. Bu olaya *Snell yasası* denir.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$

Burada n_1 birinci ortamın kırılma indisini, n_2 ikinci ortamın kırılma indisini göstermektedir.



Şekil 2.5: Kırılma indisi n_1 olan bir ortamdan kırılma indisi n_2 olan bir ortama geçerken dalgada meydana gelen kırılma.

2.3.6 Akustik Empedans ve Yansıma Katsayısı

Bir ortam içindeki akustik basıncın parçacık hızına oranına akustik empedans denir.

$$Z = \frac{p}{u} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'de Z akustik empedansı, p akustik basıncı ve u akustik dalganın parçacık hızını göstermektedir. Düzlemsel dalgalar için bu oran,

$$Z = \pm \rho_0 c \quad (2.5)$$

şeklinde verilir. Burada kullanılan artı ve eksi işaretleri dalganın yayılma yönünü göstermektedir [27].

Sıcaklık Etkisi			
$^{\circ}C$	c (m/s)	ρ (kg/m)	Z (Pa·s/m)
-10	325.4	1.341	436.5
-5	328.5	1.316	432.4
0	331.5	1.293	428.3
5	334.5	1.269	424.5
10	337.5	1.247	420.7
15	340.5	1.225	417.
20	343.4	1.204	413.5
25	346.3	1.184	410.0
30	349.2	1.164	406.6

Tablo 2.2: Sıcaklık etkisi ile akustik dalganın hava içinde ilerlerken hızında, yoğunluğunda ve empedansında meydana gelen değişim.

Tablo 2.2'de farklı sıcaklık değerleri için hava ortamında yayılan akustik dalganın yayılma hızı, ortamın yoğunluğu ve empedansı verilmiştir. Dikkat edilecek olursa sıcaklık arttıkça dalganın yayılma hızı artmaktadır. Bunun sebebi ise, tablodan da görüldüğü gibi ortamın empedansının azalmasıdır.

Akustik dalgalar, akustik empedansı farklı olan sınırlarda yansımaya uğrarlar. Bunun sebebi, empedans uyumsuzluğu nedeniyle oluşan ortamın tepkisidir. Akustik yansımaya katsayısı birinci ve ikinci ortamın empedanslarına bağlı olarak,

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir.

Akustik empedansın bilinmesi, farklı empedanslara sahip iki ortamın sınırlarındaki yansımaya ve geçişlerin belirlenmesinde, akustik transducer tasarımında ve ortam içinde akustik dalganın soğrulma mekanizmasının açıklanmasında önemli rol oynamaktadır.

2.3.7 Akustik Şiddet ve Desibel Ölçeği

Akustik bir dalganın şiddeti, yayılma yönünde birim alanda ölçülen enerji akışı ile belirlenir ve en temel birimi W/m^2 'dir. Ayrıca akustik şiddet, birim alan başına düşen akustik güç miktarı ile de ifade edilir. İlerleyen harmonik akustik bir dalga için akustik şiddet, dalganın oluşturduğu basınca ve parçacık hızına bağlı olarak,

$$I = \frac{1}{2} p \cdot u \quad (2.7)$$

şeklinde verilir. Burada p akustik basıncı, u akustik dalganın parçacık hızını göstermektedir. Akustik basınç, $p = \rho_0 c u$ şeklinde verildiğinden, akustik şiddet ifadesi,

$$I = \frac{p^2}{2\rho_0 c} \quad (2.8)$$

olarak bulunur.

Ses düzeyleri genel olarak logaritmik desibel ölçeği ile belirlenir. Desibel ölçeği, iki akustik basınç ya da şiddet seviyesi arasındaki bağıl ilişkiyi ifade etmek için kullanılan logaritmik bir ölçektir. Logaritmik ölçeğin kullanılmasının sebebi ise,

insan kulağının ses seviyelerini lineer olarak algılayamamasından ve algılama aralığının çok geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Bir insan kulağı 10^{-12} W/m² ile 10 W/m² arasındaki şiddetleri duyabilmektedir. I şiddetindeki bir sesin akustik şiddet seviyesi,

$$I_{dB} = 10 \log_{10}(I/I_{ref}) \quad (2.9)$$

şeklinde verilir. Burada I herhangi bir andaki çıkış akustik şiddeti, I_{ref} duyma sınırındaki akustik şiddeti ifade eder. Hava ortamında bir insan kulağının duyma sınırının standart akustik şiddet değeri 10^{-12} W/m²'dir. Akustik basınç ile akustik şiddet arasında $I = P_e^2/\rho_0 c$ şeklinde bir ilişki vardır. Akustik basınç seviyesi ise;

$$SPL = 20 \log_{10}(P_e/P_{ref}) \quad (2.10)$$

şeklinde yazılır. Burada P_e ölçülmek istenilen basıncın etkin değerini, P_{ref} referans basınç değerini göstermektedir. Bu durumda,

$$P = \sqrt{2\rho_0 c \cdot I} = 2.89 \cdot 10^{-5} Pa \quad (2.11)$$

olarak bulunur. Denklem 2.11'den,

$$P_{ref} = P/\sqrt{2} = 2 \cdot 10^{-5} Pa \quad (2.12)$$

sonucu elde edilir. 2.12'de elde edilen sonuç, hava ortamında ses basınç seviyesi için referans basınç değerini ifade etmektedir.

2.4 Akustik Dalgaların Sınıflandırılması

2.4.1 Frekansına Göre Akustik Dalgalar

Frekansına göre akustik dalgalar üç temel grupta incelenebilir [28].

a. Duyulabilir (Audible) Akustik Dalgalar

İnsan kulağının algılayabileceği sınır olan 20 Hz - 20 kHz arası frekansa sahip akustik dalgalardır. Tüm duyabildiğimiz akustik dalgalar bu grup içinde yer alır.

b. Ses Altı (Infrasonic) Akustik Dalgalar

Duyuma eşiği altındaki frekansa sahip akustik dalgalardır. Ses altı akustik dalgaların frekans aralığı 0.001 Hz ile 20 Hz arasında değişmektedir. Bu dalgalara sismik dalgalar denilmektedir. Bu tür dalgalar, okyanus dalgalarında, depremlerde, çığ, volkan ve meteor hareketlerinde gözlenmektedir. Ayrıca hem kimyasal hem de nükleer reaksiyonlar sonucu oluşan patlamalarda da bu tür dalgalar oluşmaktadır. Aynı zamanda balinaların, fillerin, gergedanların, zürafaların ve afrika timsahı gibi bir kısım hayvanların bu frekansta kilometrelerce uzaktaki diğer hayvanlarla haberleştikleri bilinmektedir. Bu tür dalgaların diğer bir özelliği ise, insan üzerinde bir korku ve dehşet hissi uyandırmalarıdır [29].

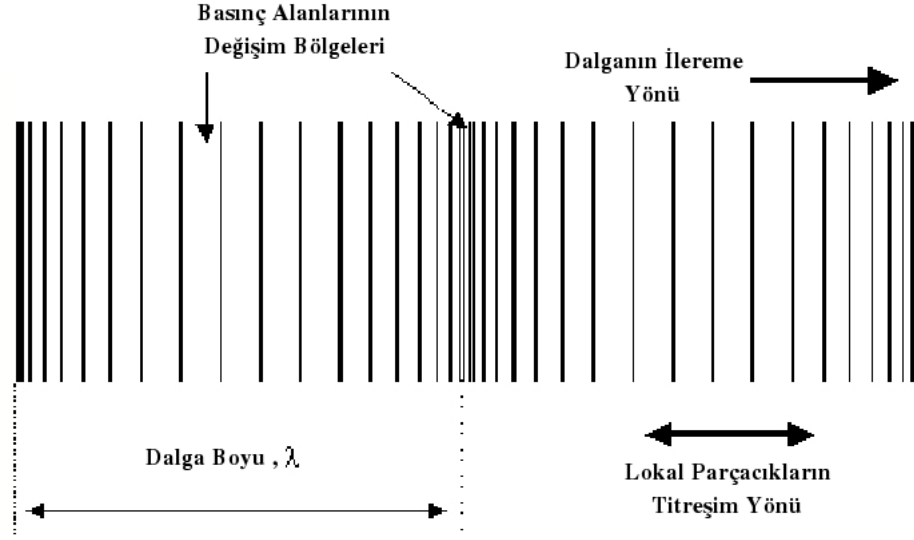
c. Ses Üstü (Ultrasonic) Akustik Dalgalar

Duyuma eşiğinin üstündeki frekanslara sahip akustik dalgalardır. Günümüzde başta medikal uygulamalar olmakla beraber bir çok bilimsel ve sanayi uygulamalarında bu tür dalgalar sıklıkla kullanılmaktadır. Piezoelektrik maddelere alternatif elektriksel sinyal verilmesi ile istenilen frekanslarda ses üstü (ultrasonic) dalgaların üretilmesi mümkündür. Dördüncü bölümde bu tür dalgaların uygulama alanları ayrıntıları ile anlatılacaktır.

2.4.2 Ortam İçinde Yayılma Şekline Göre Akustik Dalgalar

a. Boyuna Akustik Dalgalar

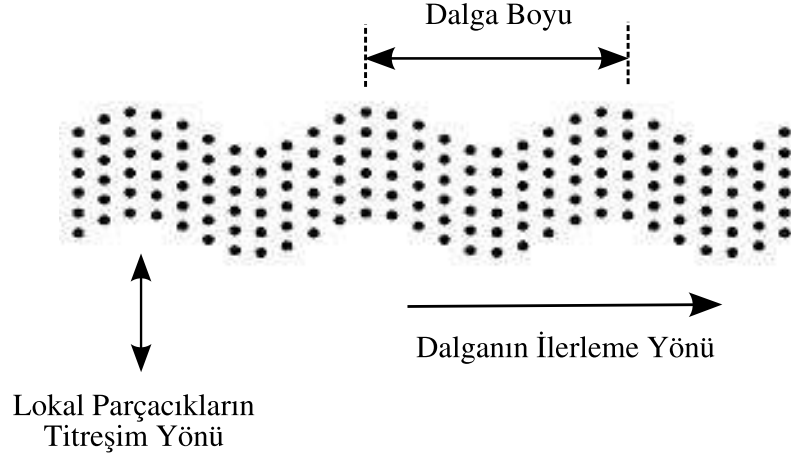
Bu tür dalgalar en genel akustik dalgalarıdır. Boyuna akustik dalgalar, yayılırken ortam içinde bulunan yerel parçacıkları dalganın ilerleme yönüne paralel olarak titreştirirler. Bu tür dalgalar hava, sıvı ya da katı ortamlarında oluşabilirler. Sıkıştırma ve basınc kuvvetleri bu dalgalarda etkili olduğundan bu dalgalara basınc dalgaları da denir. Bu tür dalgalar ortam içinde ilerlerken yerel olarak basınc değişimine neden olduklarından yoğunluk dalgaları olarak da bilinir.



Şekil 2.6: Boyuna akustik dalğanın hareketi.

b. Enine Akustik Dalgalar

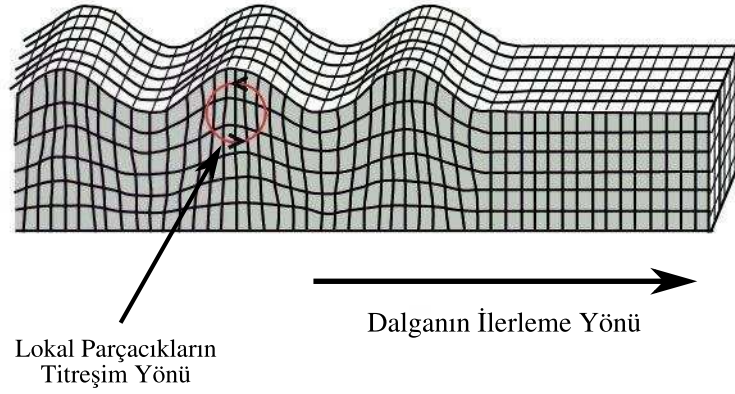
Enine akustik dalgalar ilerlerken, ortam içinde bulunan yerel parçacıkları dalganın ilerleme yönüne dik olarak titreşirler. Bu tür dalgalar, bir ip üzerinde, bir sıvının yüzeyinde ya da bir katının içinde oluşabilirler. Enine akustik dalgalar, ortam içinde boyuna akustik dalgalardan daha yavaş yayılırlar.



Şekil 2.7: Enine akustik dalgasının hareketi.

c. Rayleigh Akustik Dalgaları

Rayleigh akustik dalgaları, yüzey dalgaları olarak da bilinir ve yüzey boyunca hareket ederler. Bu tür dalgalar ilerlerken yerel parçacıkları, dalga'nın ilerleme yönüne göre dairesel ya da eliptik olarak hareket ettirirler. Rayleigh dalgaları özellikle deprem araştırmalarında ve yüzey yapı testlerinde kullanılır. Depremden sonra oluşan bu tür dalgalar yardımı ile, depremin şiddeti, oluşum merkezi ve yüzeyden olan derinliği hesaplanabilir. Ayrıca NDT uygulamalarında çatlak ya da defonun bulunması amacıyla kullanılır. Rayleigh dalgalarında yerel parçacık titreşimleri eliptik oldukları için yerel parçacıklar, eliptik parçanın üst tarafında dalga'nın ilerleme yönüne ters, alt tarafında ise aynı yönde hareket ederler. Şekil 2.8'de bu olay açıkça görülmektedir. Rayleigh dalgalarının dağılımı özelliği vardır ve farklı hızlarda farklı dalga boylarında yayılırlar. Bu ise, derinlik ile hız değişimi arasındaki ilişkinin değerlendirilebilmesini mümkün kılar. Bu nedenle yer hareketlerinde bu tür dalgalar kullanılmaktadır.

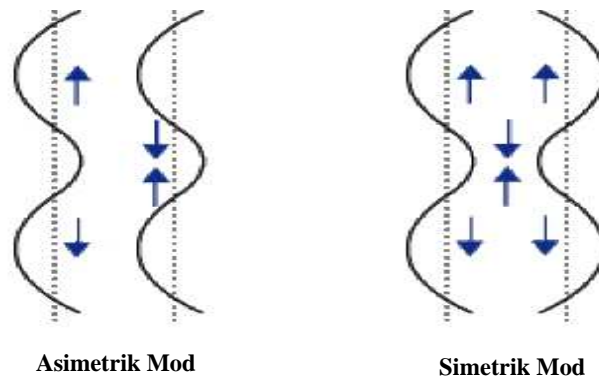


Şekil 2.8: Rayleigh akustik dalgasının hareketi.

d. Plate Akustik Dalgalar

Plate akustik dalgaları sadece çok ince metallerin içinde oluşabilirler. İki farklı Plate akustik dalga türü vardır.

1. *Love Plate Akustik Dalgası*: Bu tür akustik dalgalar ilerlerken, yerel parçacıklar düzlem plakaya paralel dalganın ilerleme yönüne dik olarak titreşirler.
2. *Lamb Plate Akustik Dalgası*: Bu tür dalgalar kompleks titreşimli dalgalardır ve parçacık titreşimleri simetrik ve asimetrik moddadır. NDT uygulamalarında en çok kullanılan akustik dalga türüdür. Lamb plate akustik dalgalarının yayılması yoğunluğa ve maddenin elastik özelliklerine bağlıdır ve maddenin kalınlığına göre seçilen uygun frekansta en iyi şekilde yayılırlar.



Şekil 2.9: Plate akustik dalgalarının titreşim modları.

e. Stoneley (Zayıf Rayleigh) Akustik Dalgalar

Stoneley akustik dalgaları iki elastik ortam sınırında oluşan ok gibi düz hareket eden yüzey dalgalarıdır [30]. Bu tür dalgalar hızları, her iki ortamın da bulk hızlarından daha yavaş olduğundan, yayılırken zayıflamaya uğramazlar [31].

3. Lineer ve Lineer Olmayan Akustik

3.1 Giriş

Akustik çalışmalarını genel olarak iki temel kategoride incelemek mümkündür. Birinci kategori, ortam içinde yayılan dalganın faz hızının sabit kaldığı, içindeki molekülerin birbiri ile etkileşmelerin ve ısı transferinin hesaba katılmaksızın işlemlerin yapıldığı lineer akustik alandır. Genel olarak bu çalışma alanı, lineer akustik problemleri kapsamaktadır. Günümüzde bu problemlerin büyük bir kısmının kesin çözümlerine ulaşılmıştır. İkinci kategori ise, lineer olmayan akustik alanıdır. Lineer olmayan ortamlarda faz hızı frekansın fonksiyonu olarak değişir. Bu etki kaçınılmaz olarak akustik dispersiyona neden olur ve alt harmoniklerin oluşması anlamına gelir. Bu nedenle lineer olmayan problemlerin çözümlerinde bu etkilerin hesaba katılması gerekir. Bu ise, problemlerin çözümlerini zorlaştırır. Günümüzde bir çok lineer olmayan akustik problemlerin analitik veya nümerik çözümlerinin bulunamayışının altında bu etkiler yatar [18, 21].

3.2 Lineer Akustik

Lineer akustik ile ilgili çalışmalar daha çok sıvı ortamında uygulama alanı bulmaktadır. Sıvılar, denge konumunda iken ortalama basınçları ve moleküllerin konumları yaklaşık olarak sabittir. Akustik dalganın hareketi tamamen bu denge konumundaki basınç alanlarının bozulması şeklinde gerçekleşir. Lineer akustik dalga denklemleri, gravitasyon kuvvetlerinin etkisinin ihmal edildiği, akustik basıncın ve yoğunluğun denge konumunda iken her noktada sabit olduğu durumlarda çözüme kavuşturulabilmektedir [27]. Çünkü bu denklemler, sıvının homojen, isotropik, ideal elastik özelliklere sahip, viskozite ve sıcaklık etkileşimlerinin olmadığı durumlar göz önüne alınarak oluşturulmaktadır.

3.2.1 Lineer Dalga Denklemleri

Durum Denklemi

Akustik dalgalar ortam içinde yayılırken ortam içinde bulunan molekülleri titreştirirler. Bu titreşimler, yerel parçacıkların yer değiştirmesi anlamına geldiğinden, dalga ilerlerken yerel olarak basınç alanının ve yoğunluğun değişimine neden olur. Durum Denklemi, akustik dalganın ortam içindeki yayılışı boyunca basınç ve yoğunluk değişimi arasındaki ilişkiyi ifade eder. Verilen ifadeler doğrultusunda Durum Denklemi,

$$P = P(\rho) \quad (3.1)$$

şeklinde yoğunluğa bağlı olarak yazılabilir. Bu denklem, sıvılar ve gazlar için geçerlidir ve akustik basıncın yoğunluğa bağlı olduğunu gösterir. Ayrıca akustik basınç sıcaklığın da bir fonksiyonudur ve sıcaklık değişimine bağlı olarak akustik basınçta bir değişim gözlenir. Fakat lineer akustik denklemler oluşturulurken bu etkiler ihmal edilir [18]. Lineer akustik denklemlerin büyük bölümü bir kısım ihmaller ve yaklaşıklıklar yapılarak elde edilir [28]. Durum Denklemi, akustik yoğunlukta çok küçük değişimlerinin olduğu kabul edilerek, akustik basıncın akustik yoğunluğa göre Taylor serisine açılması ile elde edilir ve

$$P = P_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots \quad (3.2)$$

şeklinde verilir. Denklem 3.2'de, P akustik basınçtaki değişimi, P_0 denge durumundaki akustik basıncı, ρ herhangi bir andaki yoğunluğu ve ρ_0 denge durumundaki yoğunluğu ifade etmektedir. Bu denklem, akustik basınç ile akustik yoğunluk arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Denklem oluşturulurken yoğunlukta değişim çok küçük olduğu yani düşük genlikteki dalgalar için geçerli olduğu ifade edilmişti. Buna göre bu küçük değişimler ele alındığında ikinci ve daha üst dereceden gelen terimler ihmal edilebilir. Bu durumda denklem 3.2,

$$p = P - P_0 \approx B \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) = c^2(\rho - \rho_0) \quad (3.3)$$

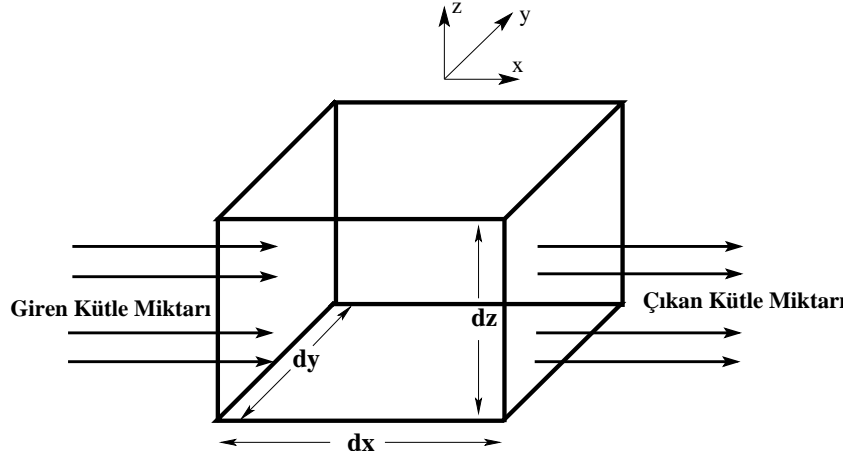
şeklini alır. Burada $B = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0}$ olarak verilir ve *Bulk Modülünü* ifade eder. Bulk modülü katıların ve sıvıların sıkıştırılabilirliğinin bir ölçüsüdür ve değişen basınca karşılık yoğunluktaki değişimin bulunması ile hesaplanır. Net akustik basınç $p = P - P_0$ ve yoğunlaştırma terimi $s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$ olarak alınırsa, Denklem 3.3,

$$p = B \cdot s \quad (3.4)$$

şeklinde bulunur. Denklem 3.4, *Durum Denklemi* olarak adlandırılır ve akustik basıncındaki değişimin sıkıştırılabilirliğin ölçüsü olan Bulk modülüne ve yoğunluk değişimine bağlı olduğunu gösterir. Burada, $s \ll 1$ koşulu sağlanmalıdır.

Süreklilik Denklemi

Süreklilik Denklemi, akustik dalganın yayılması sırasında oluşan akustik basıncın sıvı içinde bulunan moleküllerin hareketine nasıl bağlı olduğunu açıklayan denklemdir.



Şekil 3.1: Birim hacimden geçen kütle akısı.

Şekil 3.1'de dV birim hacimde, $+x$ yönündeki kütle akısındaki değişim gösterilmiştir. Giren kütle akısı $\rho \vec{u}_x$, çıkan kütle akısı $\rho \vec{u}_x + \frac{\partial(\rho \vec{u}_x)}{\partial x} dx$ şeklinde ise, dV haciminden $+x$ yönündeki net akı değişimi,

$$\rho \vec{u}_x - \left[\rho \vec{u}_x + \frac{\partial (\rho \vec{u}_x)}{\partial x} dx \right] = - \frac{\partial (\rho \vec{u}_x)}{\partial x} dx \quad (3.5)$$

şeklinde olur. Kütle akışı her yönde olduğu kabul edilirse, üç boyutlu net kütle akı değişimi;

$$- \left[\frac{\partial (\rho \vec{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \vec{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \vec{u}_z)}{\partial z} \right] dV = - \left[\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) \right] dV \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir. Seçilen birim hacim elemanından geçen toplam kütle miktarı ise,

$$M = \int \rho dV \quad (3.7)$$

şeklinindedir. Denklem 3.7'ye göre birim zamanda birim hacimden geçen kütle miktarı ise,

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV \quad (3.8)$$

şeklinde olur. Denklem 3.6'nin hacim integrali ve Denklem 3.8, birim hacimden geçen kütle miktarını ifade ettiklerine göre, dV birim hacim elemanı için bu iki denklem birbirine eşittir. Bu iki denklem eşitliğinden,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = - \int \left[\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) \right] dV \quad (3.9)$$

yazılabilir. Buradan,

$$\int \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) \right] dV = 0 \quad (3.10)$$

elde edilir. Denklem 3.10 yardımı ile de,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.11)$$

sonucu bulunur. Denklem 3.11'i Süreklilik Denklemi olarak bilinir ve sabit bir hacimden çıkan kütle miktarının, hacim içinde meydana gelen kütle azalmasına eşit

olduğunu ifade eder. Denge konumundaki yoğunluk ρ_0 , zamana ve konuma göre sabit alınıp, ortam içinde küçük yoğunluk değişimleri göz önüne alındığında, $\rho = \rho_0(1 + s)$ şeklinde yazılabilir. s 'nin ihmal edilebilecek kadar küçük olması durumu için Denklem 3.11,

$$\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right) + \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (3.12)$$

şeklini alır. Denklem 3.12, lineer ortamda *Süreklilik Denklemi* olarak bilinir. Lineer ortamda süreklilik denklemi olarak ifade edilmesinin sebebi ise, ortam içinde yoğunluk değişimin çok küçük olması yani ortamın lineer bir ortam olarak alınabileceğinden kaynaklanmaktadır.

Euler Denklemi

Euler Denklemi, hareket eden bir sıvının basıncı ve yoğunluğu ile hızı arasındaki ilişkiyi ifade eder. Temel olarak sıvılar, belli bir viskoziteye sahiptirler ve sıvı içinde termal etkileşimler mevcuttur. Euler Denklemi oluşturulurken bu termal etkileşmelerin olmadığı, sıkıştırılabilir, hareket eden ve viskozite etkilerinin ihmal edildiği sıvılar göz önüne alınır.

Sıvı içinde hareket eden $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ hacminde ve dm kütlede bir sıvı göz önüne alalım. Newton'un ikinci yasası $d\vec{f}_x = \vec{a} \cdot dm$ şeklindedir. Bu yasayı $+x$ yönünde hareket eden dm kütleli ve dV hacimli sıvıya uygulanan net kuvvet olarak yazılırsa,

$$df_x = \left[P - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) \right] dy \cdot dz = -\frac{\partial P}{\partial x} dV \quad (3.13)$$

sonucunu elde edilir. Bu net kuvvete her yönden katkı geleceği düşünülürse toplam net kuvvet,

$$d\vec{f} = df_x \hat{x} + df_y \hat{y} + df_z \hat{z} = -\vec{\nabla} P \cdot dV \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. Sıvı içinde bulunan yerel parçacıkların hızları, zamanın ve konu-

mun bir fonksiyonu olarak kabul edilirse, parçacık hızı $\vec{u}(x, y, z, t)$ şeklinde yazılabilir. \vec{u} hızı ile ilerleyen bir hacim elemanının dt süre sonunda hızı $\vec{u}(x + dx, y + dy, z + dz, t + dt)$ şeklinde olur. Bu durumda seçilen hacim elemanın ivmesi,

$$\vec{a} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\vec{u}(x + dx, y + dy, z + dz, t + dt) - \vec{u}(x, y, z, t)}{dt} \quad (3.15)$$

şeklinde olur. Burada $dx = u_x dt$, $dy = u_y dt$, $dz = u_z dt$ şeklindedir. Sıvı içinde küçük yer değiştirmeler göz önüne alındığında, \vec{u} hız ifadesi Taylor serine açılabilir. Üst dereceden terimler ihmal edildiğinde hız ifadesi,

$$\vec{u}(x + u_x dt, y + u_y dt, z + u_z dt, t + dt) = \quad (3.16)$$

$$\vec{u}(x, y, z, t) + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} u_x dt + \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} u_y dt + \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} u_z dt + \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} dt$$

şeklinde olur ve seçilen hacim elemanının ivmesi,

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} u_x + \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} u_y + \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} u_z \quad (3.17)$$

şeklinde bulunur. $(\vec{u} \cdot \nabla) = u_x \frac{\partial}{\partial x} + u_y \frac{\partial}{\partial y} + u_z \frac{\partial}{\partial z}$ şeklinde bir operatör seçilerek, hacim elemanın ivmesi yeniden yazılırsa,

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \quad (3.18)$$

ifadesi bulunur. $d\vec{f} = \vec{a} \cdot dm$ ve $dm = \rho dV$ olduğundan,

$$-\nabla P = \rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] \quad (3.19)$$

şeklinde elde edilir. Denklem 3.19, *Euler Denklemi* olarak bilinir. Denklem 3.19'u lineer biçimde yazabilmek için s terimi, $|s| \ll 1$ şeklinde olduğu kabul edilir ve $|(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}| \ll \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ yaklaşımı yapılır. Böylece $\left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right]$ terimi $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ şekline sadeleşmiş olur. Ayrıca denge durumunda ρ yerine ρ_0 yazılabilir ve basınç değeri olan P_0 'ın konuma göre sabit olduğu düşünülürse, ∇P yerine net basınç cinsinden ∇p ifadesi yazılabilir. Böylece Denklem 3.19,

$$\vec{\nabla} p = -\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (3.20)$$

haline dönüşür. Bu denklem lineer yaklaşımlar kullanılarak elde edildiğinden *Lineer Inviscid Denklemi* olarak ifade edilir ve küçük genlikteki akustik dalgalar için geçerlidir [27].

Lineer Dalga Denklemi

Bu denklem lineer akustikteki en temel dalga denklemidir. Lineer Dalga Denklemi, uzayda ve zamanda akustik dalganın özelliklerini ve bu özelliklerin nasıl değiştiğini ifade eder. Lineer Dalga Denklemi, üç temel denklem olan Durum Denklemi, Süreklilik Denklemi ve Euler Denkleminin tek bir denklem halinde birleştirilmesi ile elde edilir. Denklem 3.20 ile verilen Euler Denkleminin diverjansı alındığında,

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} P) = \nabla^2 P = -\rho_0 \vec{\nabla} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \quad (3.21)$$

ifadesi bulunur. Denklem 3.12 ile verilen süreklilik denkleminin zamana göre türevi alınır ve $\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \vec{u}) = \vec{\nabla} \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right)$ eşitliği kullanılırsa,

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \vec{\nabla} \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.22)$$

denklemi elde edilir. Denklem 3.22 içinde, Denklem 3.21 kullanılırsa,

$$\nabla^2 p = \rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad (3.23)$$

sonucu bulunur. Denklem 3.23'de s terimi elendiğinde ise,

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.24)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 3.24, sıvılar için klasik dalga denklemini ifade eder.

Denklem 3.24 ile verilen Durum Denkleminde, c akustik dalganın yayılma

hızıdır ve Denklem 3.3'de tanımlandığı gibi $c^2 = \left(\frac{B}{\rho_0}\right)$ şeklindedir.

Akustik dalganın yayıldığı ortamın sıkışmaz, içinde türbülans ve kenardan yansımalarından kaynaklanan etkilerin olmadığı *inviscid* bir sıvı göz önüne alındığında $\vec{\nabla} \times \vec{u} = 0$ yaklaşıklığı kullanılabilir. Bu durumda parçacık hızı,

$$\vec{u} = \vec{\nabla}\Phi \quad (3.25)$$

şeklinde skaler bir fonksiyona bağlı olarak yazılabilir. Burada tanımlanan Φ büyüklüğü, skaler hız potansiyelini ifade eder. Denklem 3.25'de hız terimi, Denklem 3.20'de yerine yazıldığında,

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} + p \right) = 0 \quad (3.26)$$

sonucu bulunur. Bu denklemin sıfıra eşit olabilmesi parantez içindeki ifadenin sıfır olmasını gerektirir. Bu durumda,

$$p = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3.27)$$

şeklinde elde edilir. Denklem 3.27'de hız potansiyeline bağlı olarak bulunan akustik basınç, Denklem 3.24'de kullanılırsa,

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (3.28)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 3.28, hız potansiyeli için *Lineer Dalga Denklemi*ni ifade eder.

3.3 Lineer Olmayan Akustik

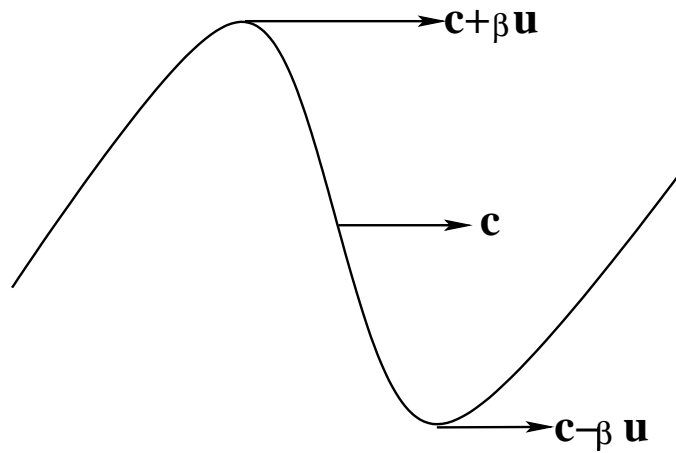
Lineer yaklaşımlar, çoğu akustik problemlerin çözümünde yeterli olmaktadır. Fakat, doğadaki akustik olayların büyük bir kısmı lineer olmayan olaylardır. Bu nedenle lineer olmayan akustik problemleri ve çözümleri önem kazanmaktadır. Bu tür problemler, bir çok fiziksel parametreyi içerdiğinden çözümleri oldukça zor ve

kompleks matematiksel ifadeler içermektedir [32, 33].

Akustik dalgalar, periyodik değışiklikleri koordinata ya da zamana bağlı olan mekaniksel titreşimlerdir. Yayılabilmek için bir ortama ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle, yayılma hızları ortama göre değışim gösterir. Bu tür dalgalar, ortamda yayılırken ortam içindeki molekülleri, dalganın hareketi boyunca titreştirirler [28]. Bu titreşimler ise, ortam içinde basınç ve yoğunluk değışimine neden olur. Lineer olmayan ortam, akustik basıncın akustik yoğunluğa bağlı olduğu ortamdır. Bu durum faz hızının sabit olmayışı ile kendini gösterir ve faz hızını frekansın fonksiyonu haline getirir. Bu ise, alt harmonik oluşumuna neden olur ve bu oluşumun analizi ayrıntılı Fourier dönüşümünü gerekli kılar.

3.3.1 Lineer Olmayan Ortamda Akustik Dalganın Yayılması

Akustik dalgalar lineer olmayan ortamlarda yayıldığında bozulmaya uğrarlar. Bu bozulma ortamın süreksizliğinden kaynaklanmaktadır. Ortam içinde yayılan dalganın bozulmasının iki temel sebebi vardır. Birincisi, ortam içindeki ısı transferidir. Parçacık titreşimleri ile ifade edilen dalga hareketi, ortam içinde bulunan moleküllerin birbirleri ile etkileşmelerine yani aralarında bir ısı transferi oluşmasına neden olur. İkincisi ise, dalganın hareket yolu boyunca basınç ve yoğunluk değışiklikleri yaratarak yayılmasıdır.



Şekil 3.2: Akustik dalganın lineer olmayan ortamda bozulması nedeniyle oluşan değışim.

Şekil 3.2’de sinüzoidal bir akustik dalga için yerel parçacık titreşimlerinin akustik dalganın yayılma hızına etkisi gösterilmektedir. Pozitif genlikteki titreşimlerin yönü akustik dalganın ilerleme yönü ile aynı yönde olduğundan akustik dalganın hızına eklenmiş, negatif genlikte ise, ters yönde olduğundan çıkarılmıştır [28]. Parçacık titreşimleri dalganın tüm hareketi boyunca devam edeceğinden pozitif genlik kısmı negatif genliğe göre daha fazla yol alacaktır. Sonuç olarak, gerekli koşullar oluştuğu zaman şok oluşumu başlayacaktır. Şok dalgasının son durumu ise, testere dişli bir dalgadır. Akustik şok dalgası, sonlu genlikte bir akustik dalganın lineer olmayan ortamda yayılması sonucu oluşur. Kesim 3.3.4’de şok dalgasının oluşumu ile ilgili ayrıntılı bilgi verilecektir.

3.3.2 Akustik Nonlineerlik ve Nonlinear Parametre (β)

Sıvılar için çoğu problemler, belirli yaklaşımlar altında Durum Denklemi ifadesinde bulunan ikinci ve üçüncü dereceden terimlerin kullanılması ile çözüme kavuşturulabilmektedir [34]. Durum Denklemi içindeki ikinci ve daha üst dereceden terimlerin kullanılması, çözümlerin artık lineer olmaması anlamına gelir.

Lineer olmayan durumu tam olarak görebilmek için, akustik basıncı denge konumundaki akustik yoğunluk etrafında Taylor serisine açmak alışıla gelmiş bir yöntemdir [1, 7]. Serinin ikinci dereceden katsayıları, akustik parametrelerin çarpımını içerir ve akustik nonlineerliği temsil eder. Durum Denklemi, Taylor serisine açıldığında,

$$\begin{aligned}
 p = P - P_0 &= \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{\rho_0}(\rho - \rho_0) + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{\rho_0}(\rho - \rho_0)^2 + \dots \\
 &= \rho_0\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{\rho_0}\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right) + \frac{1}{2}\rho_0^2\left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{\rho_0}\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right)^2 + \dots
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

şeklinde bulunur. Nonlinear parametre ise,

$$\beta = 1 + \frac{B}{2A} \tag{3.30}$$

şeklinde ifade edilir. Burada A ve B terimleri Denklem 3.29’dan elde edilir ve

$A = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} = \rho_0 c^2$ ve $B = \rho_0^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{\rho_0}$ şeklindedir.

Nonlinear parametre β , boyutsuz bir sabittir. Bu parametre ortamın linear olmamasının bir göstergesidir ve ortam içinde yayılan sonlu genlikteki akustik dalganın linear olmayan özelliklerini açıklar. Akustik dalganın yayılma hızı nonlinear parametreye direk olarak bağlıdır. Bu bağlılık,

$$\frac{dx}{dt} = c = c_0 + \beta u \quad (3.31)$$

şeklindedir. Burada, c akustik dalganın yayılma hızını, c_0 denge durumundaki dalganın yayılma hızını ve u yerel parçacıkların hızını ifade eder.

Nonlinear parametre, linear olmayan akustik içinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır ve başta medikal uygulamalar olmak üzere tüm akustik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [35, 36, 37]. Nonlinear parametre, akustik bozulma, harmonik oluşumu, akustik doyum gibi linear olmayan etkilerin açıklanmasında ve hesaplanılmasında kullanılır.

3.3.3 Akustik Dalganın Zayıflaması

Akustik dalga, kaynaktan uzaklaştıkça enerjisinde bir azalma meydana gelir. Bu olaya *akustik zayıflama* denir. Akustik dalganın sahip olduğu enerji ortam içinde bulunan moleküllere ısı enerjisi olarak aktarılır ve sonunda belli bir mesafe ilerledikten sonra dalgada sönüm meydana gelir. Bu olay, akustik dalganın ortam içindeki moleküllere momentum transferinin bir sonucudur.

Akustik dalganın enerjisindeki azalmayı etkileyen beş temel mekanizma vardır.

a. Geometrik Faktörler

Akustik dalganın enerjisindeki zayıflama, kaynağın boyutuna, gönderilen akustik dalganın frekansına ve genliğine bağlıdır. Genel olarak akustik dalganın

enerjisindeki zayıflama yüksek frekanslarla birlikte artma gösterir [38]. Aynı zamanda noktasal kaynaktan çıkan tüm akustik dalgalar küresel olarak yayılmaya devam ederler. Bu ise, dalganın kaynaktan uzaklaşması ile birlikte enerjisinde bir azalma anlamına gelir.

b. Akustik Soğrulma

Akustik dalga, ortam içinde ilerlerken ortamda bulunan moleküller ile etkileşir. Bu etkileşim dalganın moleküllerden saçılması ya da moleküllere momentum ve enerji aktarması şeklindedir. Yani ortam, yayılma boyunca akustik dalganın enerjisinin bir kısmını soğurur. Soğrulma mekanizması viskoziteden, sıcaklık ve moleküller arası elastik etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Soğrulma mekanizmasından kaynaklanan akustik dalganın enerjisindeki azalma üstel bir azalmadır ve

$$I = I_0 \exp(-\alpha \Delta x) \quad (3.32)$$

şeklinde verilir. Burada I_0 akustik dalganın başlangıç şiddet değeri, I akustik dalganın Δx mesafesini aldıktan sonraki şiddet değeri, α ise, akustik şiddet için soğrulma katsayısıdır ve cm^{-1} boyutundadır.

Soğrulma mekanizmasından kaynaklanan akustik enerjideki zayıflama katı, sıvı ve gaz ortamlarında moleküllerin ortam içinde diziliş durumuna bağlı olarak farklılık gösterir. Katı içindeki akustik enerjideki zayıflama sıvılar ve gazlara göre daha fazla ve komplekstir [38].

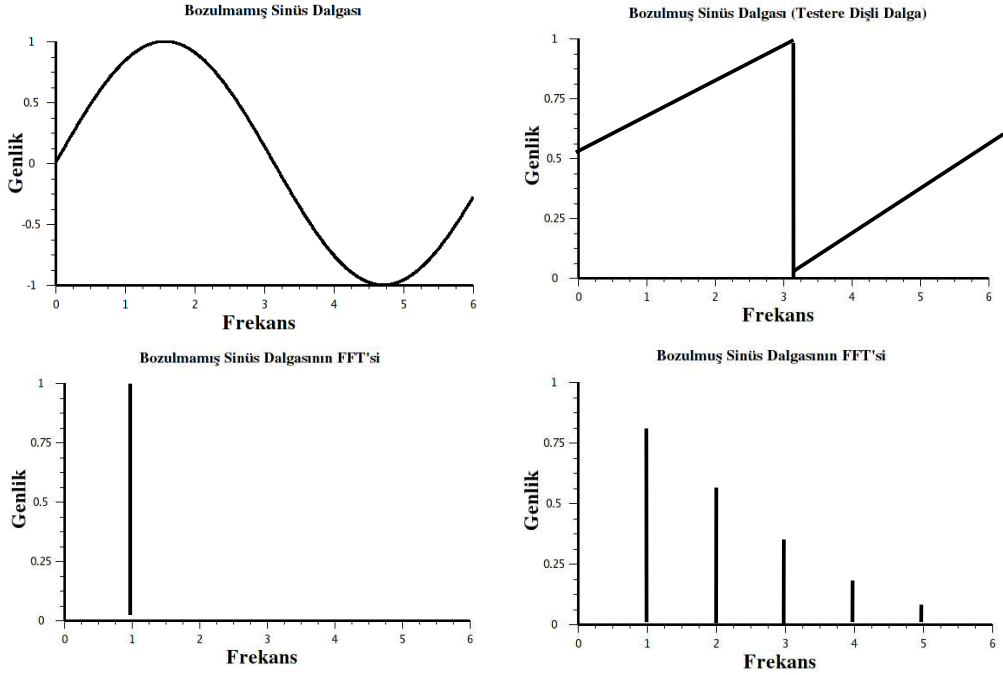
c. Akustik Saçılma

Dalga ortam içindeki süreksizliklerden dolayı yansımaya ve saçılmaya uğrar. Bu nedenle ortam içinde farklı bölgelere doğru yayılan dalganın genliğinde ve enerjisinde bir azalma gözlenir.

d. Akustik Dağılım

Akustik dağılım, frekans ile akustik dalganın hızında meydana gelen değişimi ($u=u(f)$) ifade eder. Akustik dalga, lineer olmayan ortamda ilerledikçe ana harmoniğin frekansında bir dağılım olur ve ana harmoniğin frekansına bağlı olarak alt harmonikler oluşur. Ana harmoniğin enerjisinin bir kısmı alt harmoniklere aktarılır. Bu nedenle, ana harmoniğin genliğinde bir azalma olur.

Şekil 3.3'de bozulmamış ve bozulmuş sinüzoidal dalgalar ve bu dalgaların Fourier dönüşümlerinin (FT) alınmış şekilleri verilmiştir. Bozulmamış sinüzoidal dalganın FT 'sinde tek bir pik varken, bozulmuş sinüzoidal dalganın FT 'sinde (testere dişli dalga haline almış) birden fazla pik görülmektedir. Alt harmoniklerin frekansı, ana harmoniğin tam katları $f_n = n \cdot f_1$ şeklindedir. Genlikleri ise, ortama, kaynağın frekansına ve ölçüm yapılan yerin kaynağa olan uzaklığına bağlı olarak değişir.



Şekil 3.3: Sinüzoidal dalganın bozulmasıyla ortaya çıkan alt harmonikler.

e. Dalganın Yayılma Şekli

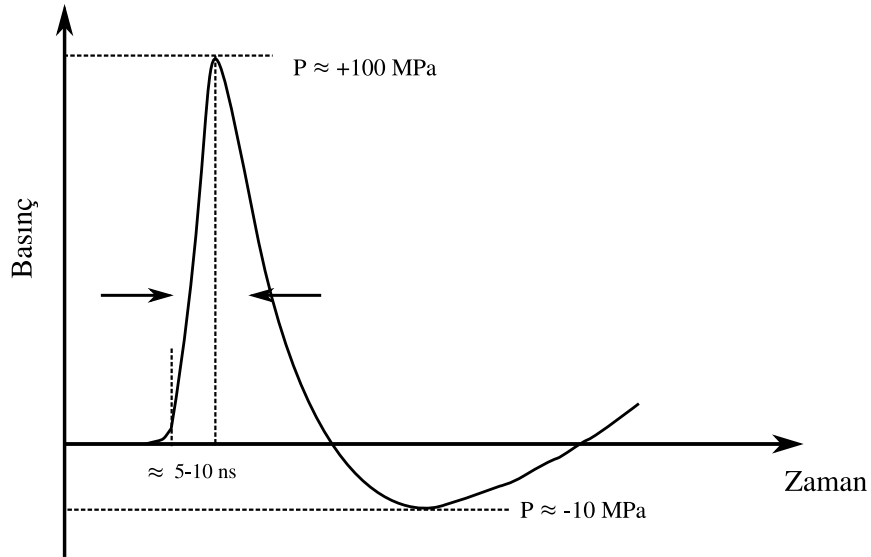
Kaynaktan gönderilen akustik dalga hiçbir zaman doğrusal olarak yayılmaz. Dalga geometrik bir yayılma içine girer. Bu yayılma şekli ise, dalganın genliğinde ve

enerjisinde bir azalmaya neden olur.

Akustik zayıflamanın bilinmesi doku özelliklerinin belirlenmesinde ve hasarsız muayene testi uygulamalarında oldukça önemlidir [39] ve doku yüzeylerinin karakteristik özelliklerini belirlemede kullanılır [40]. Akustik zayıflama biyolojik organlarda sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterir [41].

3.3.4 Akustik Şok Oluşumu

Akustik şok dalgaları, yüksek basınçlara (10-100 MPa) sahip akustik dalgalardır. Bu tür dalgaların en önemli özellikleri yüksek basınç değerlerine çok kısa süre (5-10 ns) içinde ulaşmaları ve tekrar normal basınç değerlerine düşmeleridir [42].



Şekil 3.4: Tipik bir akustik şok dalgasının basıncı ve oluşum süresi.

Şekil 3.4'de, bir şok dalgasında meydana gelen ani basınç değişimi gösterilmektedir. Bir kaç nano saniye içinde dalganın basıncı yaklaşık sıfırdan 100 MPa değerine kadar çıkmakta ve tekrar ani olarak düşmektedir. Bu düşüş, Şekil 3.4'den de görüldüğü gibi negatif basınç değeri için -10 MPa'la kadar azalma göstermektedir. Dikkat edilecek olursa, nano saniyelik bir zaman diliminde oluşan bu yüksek basınç değişimi dalganın yüksek bir gradyent oluşturduğu anlamına gelir. Bu ise, ortamlar arası empedans farkı olması durumunda şok dalgasının ortama maksimum bir güç

aktarmasına neden olur. Örneğin, böbrek taşı kırma sistemlerinde bu etki kullanılır. Yumuşak dokuda oluşturulan akustik dalga böbreğin içinde bulunan böbrek taşı ile karşılaştığında (yumuşak dokunun empedası düşük böbrek taşının empedası büyük) empedans farkı nedeniyle taş üzerinde grandyent farkı oluşturur ve taşın kırılması sağlanır.

3.3.5 Linear Olmayan Akustik Dalga Denklemleri

Burger Denklemi

Burger Denklemi, lineer olmayan ortam içinde ilerleyen düzlem bir dalganın ortam içindeki kayıplarını ve lineer olmayan etkileri birlikte açıklayan tek boyutlu dalga denklemidir [28, 43]. Bu denklemin tam çözümü yapıldığında, denklem, akustik dalganın hareketini, akustik enerji transferini, türbülansı ve çeşitli lineer olmayan dalga problemlerini açıklamaktadır. Ayrıca viskozite, ısı değişimi, kimyasal reaksiyonlar, katı difüzyonu ve termal yayılmadan kaynaklanan dağılım artışını da açıklamak için kullanılmaktadır [44]. Burger Denklemi,

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial p}{\partial \tau} - \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} = 0 \quad (3.33)$$

şeklindedir. Bu denklemde, β nonlinear parametreyi, δ ise, akustik dalganın yayılım sabitini [45] ifade etmektedir. Denklem 3.33'de birinci terim akustik basıncın konuma göre bir değişim içinde olduğunu, ikinci terim ortamın lineer olmayışını ve son terim viskoziteden kaynaklanan kaybı göstermektedir [46]. İkinci terim içinde bulunan β değeri sıfıra eşitlendiğinde artık Burger Denklemi lineer bir denklem olur ve denklemin çözümü,

$$p = p_0 \exp[jw\tau - \delta(w^2/\rho_0 c_0^3)x] \quad (3.34)$$

şeklinde harmonik bir çözüm halini alır. Burada, p_0 başlangıç basınç değerini, w açısal frekansı, τ gecikmeli zamanı, ρ_0 denge konumunda basıncı, c_0 denge durumdaki

yayıma hızı, x konumu göstermektedir.

Genelleştirilmiş Burger Denklemi

Genelleştirilmiş Burger Denklemi, homojen ortamda silindirik ve küresel dalgaların hareketini açıklayan dalga denklemidir. Bu denklem, Burger Denklemi silindirik ve küresel dalgalar için genişletilmiş halidir. Böylece Burger Denklemi, sınır değer problemleri için kullanılabilir duruma getirilmiş olur [47]. Genelleştirilmiş Burger Denklemi,

$$\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{m}{r}p \pm \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial p}{\partial \tau} \pm \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} = 0 \quad (3.35)$$

şeklinindedir. Denklem 3.35, $m = 0$ için tek boyutlu, $m = 1$ için silindirik koordinatlarda ve $m = 2$ için küresel koordinatlarda Burger Denklemi verir.

KZK Denklemi

Lineer teori bir çok akustik olayı açıklamada yeterli olmasına rağmen parametrik diziler, akustik mikroskoplar, medikal ultrasonik uygulamalar gibi bir çok alanda lineer olmayan etkiler önemli rol oynamaktadır. Bu uygulamalar için yayılma ortamındaki saçılma etkileri, soğurma mekanizması ve lineer olmayan etkilerin hesaba katılması gereklidir.

KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) Denklemi, Burger Denklemi saçılma, soğrulma ve lineer olmayan etkilerin hesaba katılarak genişletilmiş halidir. Bu denklem, ilk olarak Khokhlov ve Zabolotskaya tarafından soğrulma etkisi olmaksızın, lineer olmayan ortamda yayılan sonlu genlikteki akustik dalgaların hızlarını dairesel geometriye sahip kaynak için veren bir denklem olarak geliştirilmiştir. Daha sonra Kuznetsov, bu denkleme, soğurma mekanizmasını ekleyerek, günümüzde KZK denklemi olarak bilinen ve lineer olmayan ortamda yayılan dalga hareketini açıklayan denklem haline getirmiştir [1, 18, 43, 48]. KZK denklemi,

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \sigma \partial \tau} = \alpha R_0 \frac{\partial^3 W}{\partial \tau^3} + \frac{R_0}{2\bar{x}} \cdot \frac{\partial^2 (W^2)}{\partial \tau^2} + \frac{1}{4} \nabla^2 W \quad (3.36)$$

şeklindedir. Burada,

$$\begin{aligned} W = u/u_0 &\Rightarrow \text{Normalizasyon parçacık hızı,} \\ \sigma = z/r_0 &\Rightarrow \text{Normalizasyon eksen uzunluğu,} \\ \alpha &\Rightarrow \text{Soğurma katsayısı,} \\ \tau &\Rightarrow \text{Gecikmeli zaman,} \\ \bar{x} = \frac{1}{\beta \varepsilon k} &\Rightarrow \text{Şok oluşum mesafesi,} \\ R_0 = ka^2/2 &\Rightarrow \text{Rayleigh mesafesi,} \\ \nabla^2 &\Rightarrow \text{Laplace operatörüdür.} \end{aligned}$$

Denklem 3.36'nın üçüncü mertebeden türevler içermesi nedeniyle henüz tam bir analitik çözümü bulunamamıştır. Bu nedenle yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı nümerik çözümlerdir [18, 21, 49, 50, 51, 52]. Bu çözümler ise, bir kısım nümerik yaklaşımlar kullanılarak yapılmaktadır.

4. Akustik Dalgaların Uygulama Alanları

4.1 Giriş

Günümüzde teknolojik ilerlemeye paralel olarak akustik çalışmalarında önemli bir ilerleme içine girmiştir. Akustik uygulamaları başta tıp alanında teşhis ve tedavi amaçlı olmakla birlikte bir çok sanayi ve bilimsel amaçlı çalışmalarda da karşımıza çıkmaktadır.

Akustik uygulamalarda kullanılan dalgalar genel olarak yüksek frekanslı ultrasonik dalgalardır. Bu dalgalar, farklı bir çok yöntemle elde edilebilirler. En temel elde edilme yöntemi, piezoelektriksel özelliğe sahip bir kristale alternatif akım uygulamaktır. Bir sonraki bölümde, piezoelektriklenme olayın nasıl gerçekleştiği ve ultrasonik dalga üretici aletlerin (transducer) çalışma prensibi ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Yukarıda bahsedildiği üzere bu tür uygulamalarda kullanılan temel aletler ultrasonik dalga üreticileri ve alıcılarıdır. Çoğu uygulamalarda transducerlar, hem ultrasonik dalga üreticisi hem de alıcısı olarak kullanılır. Fakat ultrasonik görüntülemenin bazı özel uygulamalarında hydrophone olarak bilinen yüksek frekans aralıklarına duyarlı ultrasonik dalga alıcıları da kullanılmaktadır.

4.1.1 Ultrasonik Görüntüleme (Pulse-Echo) Sistemleri

Ultrasonik görüntüleme sistemleri, bir ultrasonik dalga üreticinden (transducer) herhangi bir nesneye gönderilen ve nesneden yansıyan ya da geçen ultrasonik dalgalar yardımı ile nesnenin konumunun ve şeklinin belirlenmesi amacıyla kullanılan sistemlerdir. Bu tür sistemler, çoğunlukla medikal uygulamalarda kullanılmaktadır [28]. Akustik görüntüleme sistemleri, temel olarak vücuda ultrasonik dalga göndermek ve yansıyan dalgaları algılamak amacı ile kullanılan bir transducerdan ve transducerdan alınan sinyalleri analiz eden sinyal işleme ünitesinden oluşur. Günümüzde çoğunlukla sinyal işleme ünitesi olarak özel donanımlı bilgis-

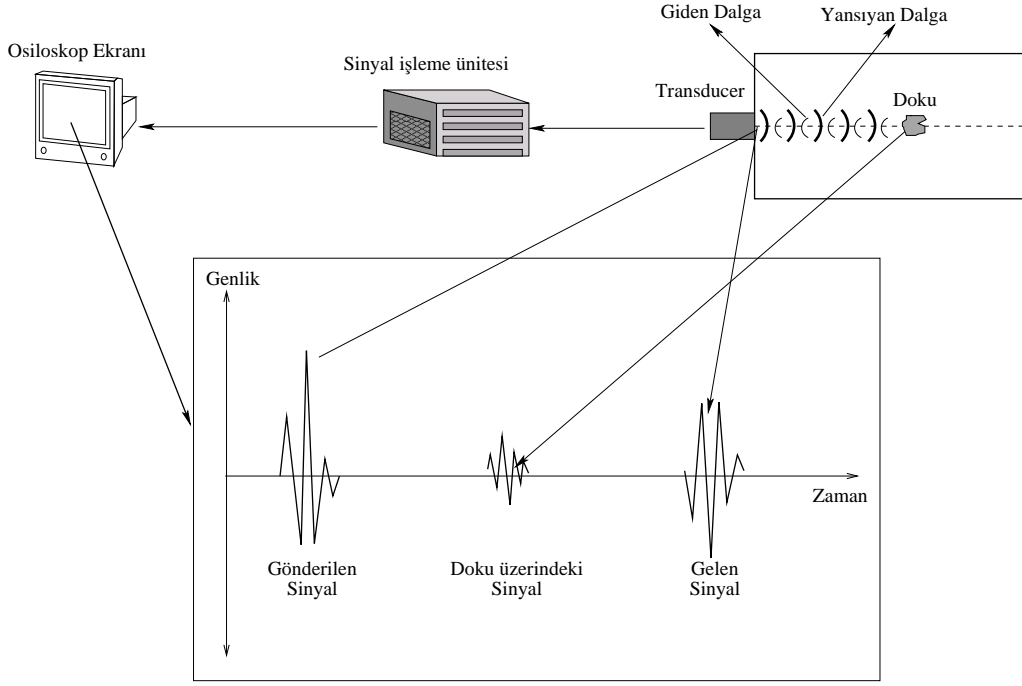
yarlar kullanılmaktadır. Bu bilgisayarlar, sinyallerin yükseltilmesini, işlenmesini, bir monitor aracılığı ile görüntülenmesini ve kaydedilmesini sağlar.

A-Scan (Pulse-Echo) Görüntüleme Sistemleri

En temel ultrasonik görüntüleme sistemleri A-scan görüntüleme sistemleridir. Bu tür sistemler, vücut içinde bulunan dokunun ya da organın transducera olan uzaklığının bulunması amacıyla kullanılır. Transducere tek boyutta kısa pulslar gönderilir ve bu pulslar vücut içinde görüntülenecek dokuya ya da organa geldiğinde, dokunun ya da organın empedansı dalganın yayıldığı ortamının empedansından farklı olması nedeniyle yansımaya uğrar. Yansıyan bu dalgalar belli bir zaman sonra tekrar transducere ulaşır. Transducere alınan veriler bir sinyal işleme ünitesi tarafından işlenerek dokudan ya da organdan yansıyan dalganın genliği ve transducere ulaşma süresi hesaplanır ve bir osiloskop ekranında zamanın fonksiyonu olarak dalganın genliği çizilir. Vücut içinde dalganın yayılma hızının sabit olduğu kabul edilirse;

$$r_{max} = \frac{ct}{2} \quad (4.1)$$

formülü ile dokunun ya da organın transducere olan uzaklığı bulunabilir. Burada r_{max} , dokunun ya da organın transducere olan uzaklığını, c ultrasonik dalganın vücut içinde yayılma hızını, t ultrasonik dalganın dokuya ulaşma süresini göstermektedir.



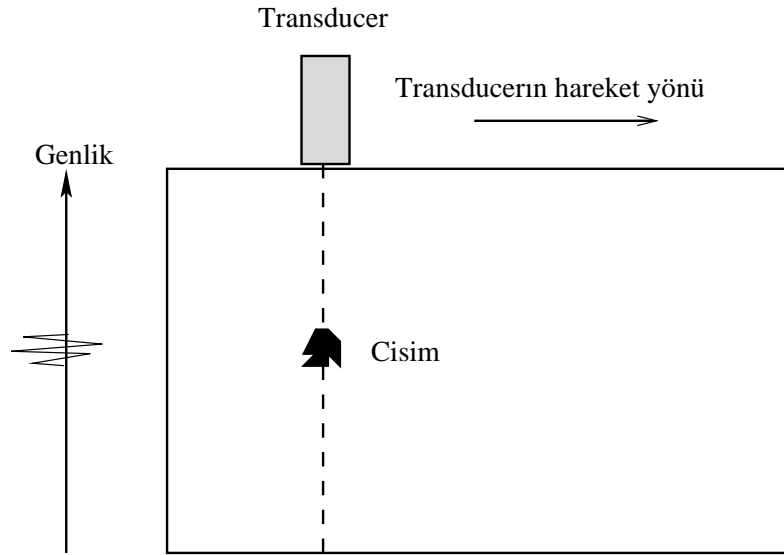
Şekil 4.1: A-scan görüntüleme tekniğinin şematik gösterimi.

Şekil 4.1'de A-scan görüntüleme sistemlerinin temel çalışma prensibi gösterilmektedir. Transducere gönderilen ultrasonik dalganın empedans uyumsuzluğuna neden olan doku ya da organdan yansıyarak tekrar transducere gelmektedir. Transducere gelen dalganın genliği ve dalganın geri gelme süresi sinyal işleme ünitesi yardımı ile bulunur ve bir osiloskop ekranında gözlenir.

Tüm bu işlem sürecinde vücut içinde ortamın sürekli bir ortam olduğu kabul edilmiştir. Fakat vücut içinde ortam sürekli değildir. Bu nedenle gönderilen ultrasonik dalganın bir bozulmaya ve soğurmaya uğrar. Bu ise, dalganın belli bir mesafe sonra sönüme uğraması anlamına gelir. Bu nedenle, bu tür sistemlerde r_{max} mesafesi önemlidir. Dokunun ya da organın transducere olan uzaklığı yaklaşık olarak belirlenerek ultrasonik dalganın o doku ya da organdan tekrar transducere ulaşabileceği genlik ve frekans aralığında dalgalar kullanılmalıdır. Bu nedenle çoğu medikal uygulamalarda kullanılan ultrasonik dalgaların frekansları (2 MHz - 15 MHz) oldukça geniş bir frekans yelpazesindedir. Ayrıca kılcal damar ya da biomikroskopi gibi özel uygulamalarda çok daha yüksek frekanslı ultrasonik dalgalarda kullanılmaktadır [53].

B-Scan (Pulse-Echo) Görüntüleme Sistemleri

B-scan görüntüleme sistemleri, medikal uygulamalarda en çok kullanılan ve dokunun konumunu ve boyutunu en iyi şekilde gösteren pulse-echo gösterim sistemleridir. B-scan görüntüleme sistemleri tek boyutlu A-scan (pulse-echo) görüntüleme sisteminden oluşur. Fakat B-scan görüntüleme sistemlerinde, transducer deri yüzeyi boyunca hareket ettirilerek her farklı hareket noktası için dokudan ya da organdan yansıyan pulsları rapor eder. Bu veriler, bir osiloskop ekranında y-ekseni boyunca transducerın konumunun değişimine bağlı olarak dokunun transducera olan uzaklığının x-ekseni boyunca belirlenmesini sağlar. Böylece dokunun şekli iki boyutlu olarak çizilir.



Şekil 4.2: B-scan görüntüleme tekniğinin şematik gösterimi.

Şekil 4.2’de B-scan görüntüleme tekniğinin temel çalışma prensibi gösterilmektedir. B-scan görüntüleme sisteminin A-scan görüntüleme sisteminden temel farkı, A-scan görüntüleme sisteminde transducer sabit tutulurken, B-scan görüntüleme sisteminde transducer vücut üzerinde tek eksen boyunca hareket ettirilerek dokunun iki boyutlu görüntüsünün elde edilmesidir. Bu tür sistemlerde, transducerın hasta vücudu üzerinde sabit ve yüksek hızla hareketini sağlamanın zorluğundan dolayı, günümüzde istenilen bölgeyi tarayabilmek için elektronik olarak akustik demeti

yönlendirebilen transducer dizileri (array) kullanılmaktadır.

Ayrıca çeşitli özel amaçlar için C-scan, D-scan, F-scan, M-scan gibi iki ve üç boyutlu görüntüleme sistemleri mevcuttur.

Doppler Etkisi

Kaynağın ya da gözlemcinin hızının değişmesi yayılan dalganın gözlenen frekansında bir değişime neden olur. Bu değişim Doppler etkisi olarak bilinir ve ilk defa Christian Andreas Doppler tarafından bulunmuştur. Doppler olayında oluşan frekans değişimine ise, *Doppler kayması* adı verilir.

Doppler etkisinden faydalanarak vücut içindeki hareketli nesnelere gözlenmesini sağlayan görüntüleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu tür sistemlerde de, tüm görüntüleme sistemlerinde olduğu gibi ultrasonik dalgalar kullanılır. Doppler görüntüleme sistemleri yardımı ile kanın akış yönü ve hızı bulunabilir ya da kalbin hareketi incelenebilir. Daha hızlı kan akışı, daha büyük Doppler kayması anlamına gelir.

Günümüzde artık renkli Doppler sistemleri mevcuttur. Bu sistemlerde, kanın akış hızının değişimi farklı renklerle gösterilir. Her damarda kanın akış hızı farklı olduğundan, vücut içinde bulunan tüm damar sistemlerinin ayrı ayrı görüntüsü elde edilebilir.

4.1.2 Ultrasonik Hasarsız Muayene Testleri (NDT)

Literatürde Nondestructive Testing (NDT) adını alan yöntem, hasarsız muayene testi olarak bilinir ve düşük şiddetli ultrasonik dalga uygulamaların en başarılı örneklerinden biridir. Hasarsız muayene testleri, özellikle kritik noktalarda kullanılan ve sağlamlığından kesin olarak emin olunması gerekli objelerin (türbinler, yüksek basınca maruz kalan borular, demir yolu hatları, köprü ayakları, uçak motorlarının dişli çarkları, v.b.) içindeki boşluk, çatlak ve defoların bulunmasında kullanılan test ölçüm teknikleridir [21]. Hasarsız muayene testlerinde ultrasonik dalgaların kullanılmasının en önemli avantajlarından biri, test sırasında ultrasonik dalgaların özelliğinden kaynaklı olarak test yapılan objenin neredeyse hiç zarara uğramamasıdır. Diğer

yöntemlere göre başka bir artışı ise, hasarsız muayene testleri oldukça büyük (uzun ya da geniş olabilir) nesnelere de test imkanı sağlamaktadır. Oysa x ve β ışınları kullanılarak yapılan testlerde, bu ışınların obje içinde derinlere kadar girememesi, derinlerde bulunan defo ya da çatlakların gözlenmesinde yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde eddy akım metodunun ise, sadece metal objelerde kullanılması ve yine obje içinde derin bölgelerdeki çatlak ya da defoların gözlemlenmesinde yetersiz kalması, hasarsız muayene testlerinde ultrasonik dalgaların kullanılmasını öne çıkarmaktadır.

İlk olarak 1929 yılında bir obje içinde bulunan çatlak ya da defonun tespiti için ultrasonik dalgaların kullanılabilceği fikri Sokolov tarafından ortaya atılmış ve bu konuda ilk çalışmalar yine Sokolov tarafından yapılmıştır [54]. Yine aynı yıllar içerisinde Mulhauser iki transducer kullanarak katı içindeki defoyu gösteren bir sistemin patentini almıştır. 1940'lı yıllarla beraber transducer teknolojisindeki gelişmeye paralel olarak hasarsız muayene testleri de belli bir standarda kavuşmuştur [55]. Günümüzde hasarsız muayene testlerinin özellikle doğru sonuçlar vermesi, hızlı ve ucuz olması bu yöntemi oldukça popüler kılmış ve geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılan bir yöntem halini almasını sağlamıştır.

Çoğu hasarsız muayene testlerinde, hem alıcı hem de verici özelliğine sahip tek bir transducer ve transducerdan sinyali alıp işleyen ve görüntüleyen bir sinyal işleme ünitesi kullanılır. Transducer tarafından üretilen ultrasonik dalga incelenecek olan meteryal üzerine gönderilir. Meteryal içinde bir süreksizlik varsa, gönderilen ultrasonik dalga bu süreksizlikten yansır ve belli bir süre sonra tekrar transducera ulaşır. Yansıyan dalga transducer tarafından algılanır ve elektriksel sinyale dönüştürülür. Bu sinyal, sinyal işleme ünitesi tarafından yükseltilir ve bir ekran üzerinde görüntülenir. Yansıyan sinyalin transducera ulaşma zamanı defo ya da çatlağın transducera olan uzaklığı ile orantılıdır. Bu ilişki daha önce pulse-echo görüntüleme sistemleri kısmında ayrıntılı biçimde açıklanmıştı. Böylece transducer tarafından algılanan sinyal yardımı ile defo ya da çatlağın konumu, büyüklüğü, şekli ve diğer tüm şekilsel özellikleri bulunabilir.

Hasarsız muayene yöntemlerinde ultrasonik dalgaların kullanılmasının bir çok önemli avantajları vardır. Başlıcaları;

1. Bu testler yardımı ile, hem yüzeyde hem de yüzeyin içindeki süreksizlikler hassasiyetle belirlenebilir.
2. Ultrasonik dalgalar meteryal içinde oldukça derinlere nüfuz edebilmektedir. Bu ise, oldukça geniş ve büyük meteryallerin de test edilmesine imkan sağlar.
3. Pulse-echo tekniği kullanıldığında, tek bir yüzeye yerleştirilen transducer yardımı ile defo ya da çatlak kolayca tespit edilebilir.
4. Bu yöntem yardımı ile, herhangi bir meteryal içinde bulunan çatlağın ya da defonun transducera ne kadar uzaklıkta olduğu, büyüklüğü, hacmi ve şekli kolayca belirlenebilir. Artık günümüzde bu tür yöntemlerin yeterli sayılabilecek düzeyde hassasiyete sahip olması, çok küçük çatlak ya da defoların bile gözlemlenebilmesine imkan sağlamaktadır.
5. Transducere dan alınan sinyal otomatik bir sisteme bağlandığı zaman defo ya da çatlağın şekli eş zamanlı olarak monitör ekranından da görüntülenebilir.
6. Ayrıca bu yöntemler yardımı ile, ± 1 mikron hassasiyete kadar metallerin, plastiklerin, seramik ve camların kalınlıkları ölçülebilmektedir [21].

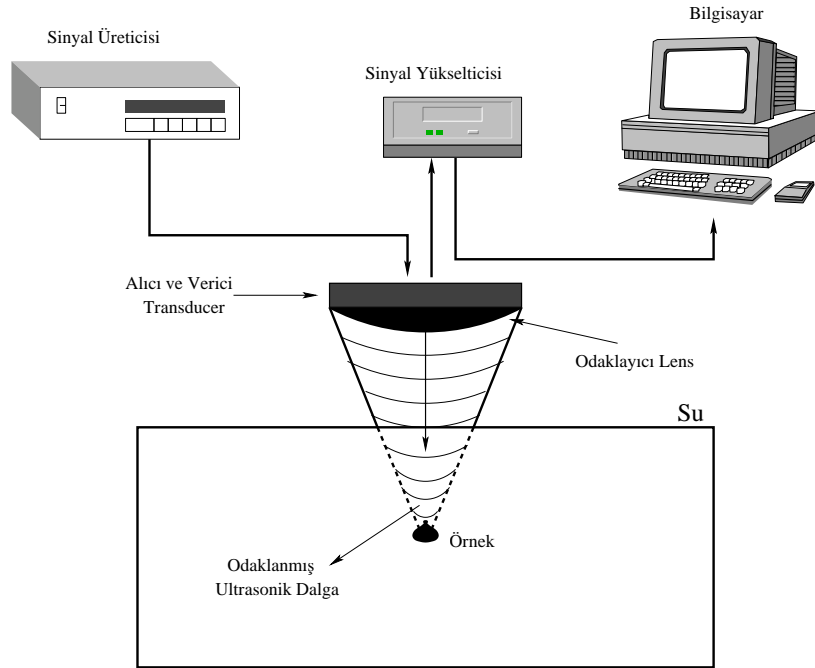
4.1.3 Taramalı Akustik Mikroskop (SAM)

SAM (Scanning Acoustic Microscopy), bir objenin yüzeyindeki ve içindeki fiziksel özellikleri belirlemek amacı ile yüksek frekanslı ultrasonik dalgaların kullanıldığı bir tür mikroskoptur. İlk SAM çalışmaları 1970'li yılların başlarında başlamış ve 1974 yılında Lemons ve Quate tarafından ilk SAM geliştirilmiştir [56].

Bu tür mikroskoplarda, incelenecek olan örneğe yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar gönderilerek örnek içinde empedans uyumsuzluğu neden olan bölgelerden yansıyan dalgaların incelenmesi ile örneğin yüzeyinin ve içinin görüntülenmesi amaçlanmaktadır. Genel olarak bu tür mikroskoplarda kullanılan ultrasonik dalgaların

frekansları 100 MHz ile 2 GHz arasında değişim göstermektedir. Aynı zamanda bu tür mikroskoplarda odaklanmış ultrasonik dalgalar kullanılır. Odaklanmış ultrasonik dalgalar yardımı ile, akustik enerjinin bir dalga boyundan daha küçük yarıçaplara odaklanması sağlanır ve böylece girişim saçakları ortadan kaldırılır. Bu durumda ne kadar yüksek frekans kullanılırsa o kadar iyi sonuç alınır.

Bir örneğin yüzeyini ya da içini incelenmede kullanılan bir çok yöntem vardır. Fakat SAM uygulamaları bazı özel durumlarda öne çıkmaktadır. Bilindiği üzere ultrasonik stres dalgaları maddenin elastik özelliklerinin değişimi ile beraber hassas şekilde bir değişim içine girmektedir. Bu nedenle elastik özelliği büyük olan katıların incelenmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntem, su bazlı kayaların mikro yapılarının karakterize edilmesi için de oldukça uygundur.



Şekil 4.3: SAM aletinin diyagram gösterimi.

Şekil 4.3’de, bir SAM’in çalışma ilkesi gösterilmiştir. Sinyal üretici ile üretilen elektriksel sinyaller transducer tarafından yüksek frekanslı ultrasonik dalgalara dönüştürülür. Bu dalgalar bir lens yardımı ile incelenecek örneğin üzerine odaklanır. Empedans uyumu sağlanması amacı ile örnek su dolu kaba yerleştirilir. Böylece

transducerdan gönderilen dalga minimum yansımaya uğrar. Daha sonra empedans farkı nedeniyle örnekten yansıyan dalgalar tekrar transducera gelir ve transducer tarafından elektriksel sinyallere dönüştürülür. Bu sinyaller bir sinyal yükselteci tarafından yükseltilerek bilgisayar ortamında değerlendirilir ve örneğin özellikleri monitör yardımı ile görselleştirilir.

4.1.4 Akustik Temizleyiciler

Yüksek şiddetli akustik çalışmaların diğer başarılı uygulamalarından biri, bir katı yüzeyinde bulunan ve istenilmeyen parçacıkların temizlenmesi işlemidir. Akustik temizleyiciler diğer mekanik ve kimyasal temizleyicilerden daha etkin bir temizleme yaparlar. Bu nedenle günümüzde özellikle sanayide, tıpta ve bilimsel çalışmalarda tercih edilen bir yöntem haline almıştır.

İlk akustik temizleme işlemi, 1970'li yıllarda gemi bacaları ve hava çıkış sirenlerinin temizlenmesi amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. 1990'lı yıllarda endüstriyel gelişmeye paralel olarak akustik temizleyiciler bir çok sanayi ve bilimsel alanda karşımıza çıkmıştır. Günümüzde bu tür temizleme işlemleri etkin ve insan eli değmeden yapıldığı için, özellikle insan sağlığı açısından risk oluşturan temizlik işlemlerinde yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Akustik temizleme işlemi, transducerlar tarafından gönderilen yüksek şiddetli akustik dalgalar tarafından yapılır. Temizlenecek madde, içi sıvı dolu temizleme kabının içine yerleştirilir. Çoğu temizleme işlemi için birden daha fazla transducer kullanılır. Transducerlar tarafından üretilen yüksek şiddetli akustik dalgalar, dalganın yayılma doğrultusu boyunca yüksek ve alçak basınç alanları yaratarak temizleme kabında bulunan sıvı içinde kaviteler oluşturur. Bu kaviteler sıvı içinde hızla hareket eden hava kabarcıklarının oluşmasına neden olur. Oluşan bu kaviteler nedeniyle büyüyen hava kabarcıkları belli bir büyüklükten sonra patlar ve temizlenecek madde üzerinde bulunan ve istenilmeyen parçaların sökülmesini sağlar.

4.1.5 Böbrek Taşı Kırıcıları

Böbrek taşları, böbrekte ve uterusu çözülmemiş minerallerden dolayı oluşan katı yapılardır. Büyüklükleri bir tuz zerreciğinden bir golf topuna kadar değişmektedir. Bu taşlar, 5-6 mm büyüklüğü geçmediği sürece idrar yolu ile vücuttan atılır. Vücuttaki ve böbreklerdeki çeşitli rahatsızlıklar nedeniye büyüyen ve böbrekten atılamayan bu taşlar bir kısım cerrahi operasyonlarla böbrekten uzaklaştırılır. Belli başlı cerrahi operasyonlar, açık ameliyatlara taşları almak, lazer ve ultrasonik dalgalar kullanarak taşları küçük parçalara bölerek vücudun kendisinin uzaklaştırmasını sağlamak şeklindedir.

Ultrasonik dalgalar, lineer olmayan bir ortamda yayıldıkları zaman bozulmaya uğrarlar. Kesim 3.3.4'de ayrıntıları ile anlatıldığı üzere, ultrasonik dalga başlangıçta yeterli şiddete sahipse, lineer olmayan ortamda belli bir ilerleme sonrası şok dalgasına dönüşür. Şok dalgası, empedans uyumsuzluğuna neden olan bölgeye gradyent farkı nedeniyle büyük bir kuvvet etki etmesine neden olur. Bu kuvvet, böbrek taşlarının kırılmasına sağlar.

Bu uygulamalarda önemli olan noktaların başında böbrek taşının yerinin ve büyüklüğünün kesin olarak bilinmesidir. Buna göre vücuda gönderilecek dalganın şiddeti ve frekansı ayarlanır ve taşın tam üzerininde maksimum gradyente sahip şok dalgası oluşturulur. Bu tür şok dalgaların empedans uyumsuzluğu olmadığı yerde vücuda herhangi bir zararı olmaz. Dalganın yayıldığı ortam boyunca bir empedans farkı yoksa şok dalgası belli bir mesafeye ilerledikten sonra ortam tarafından soğrulur. Bu nedenle ultrasonik şok dalgalarının kullanıldığı bu tür sistemler, günümüzde diğer böbrek taşı kırma yöntemlerine nazaran daha çok kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntemin uygulanmasının oldukça kısa sürmesi (1 saat kadar) ve hastanın kısa bir süre içinde tedavi edilerek (5-6 saat) hastaneden taburcu edilebilecek duruma gelmesi diğer önemli bir avantajıdır. Fakat bu yöntem çok büyük böbrek taşlarının kırılmasında yeteri kadar etkili değildir. Bu tür durumlar için cerrahi müdahaleler gerekir.

4.1.6 Kanser Tedavisi

Karşımıza bir çok başarılı uygulama ile çıkan ultrasonik dalgalar, günümüzde artık kanser tedavisi için de kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek şiddetli odaklanmış ultrasonik dalgalar başta prostat kanseri olmakla beraber bir çok farklı kanser türünün tedavisinde kullanılmaktadır.

Kanser, vücut içinde bulunan bir kısım hücrelerin çeşitli nedenlerle olağan dışı şekilde bölünerek çoğalması ve bu çoğalma olayının herhangi bir iç ve dış etki tarafından kontrol edilememesidir. Kanser hücreleri tüm hücreler gibi protein ihtiva etmektedir. Proteinler $43 - 45^{\circ}C$ 'de bozulmaktadır. Bu nedenle kanser hücreleri bu sıcaklıklarda ölürler. Yüksek şiddetli odaklanmış ultrasonik dalgalar yerel olarak kanser hücrelerinin bulunduğu bölgeyi ısıtmada kullanılır.

Ultrasonik yöntemle kanser tedavisine başlanmadan önce kanser hücrelerinin tam olarak yeri saptanmalıdır. Bunun için çeşitli kimyasal ve radyoaktif elementler içeren ilaçlar kullanılır. Bu ilaçlar yardım ile kanser hücreleri işaretlenmiş olur. Vücut içine batırılabilen ince uçlu transducerlar tarafından üretilen yüksek şiddetli ultrasonik dalgalar işaretlenmiş hücreler üzerine odaklanır. Bu odaklanmış dalgalar, bölgenin yerel olarak ısınmasına neden olur. Böylece belli bir sıcaklığa ulaşan yerel kanser hücreleri yok edilmiş olur. Aynı zamanda bu yöntemle kanserli olmayan hücreler de yok edilebilir. Bu nedenle kanserli hücrelerin yerleri ve büyüklükleri tam olarak saptanması gerekir. Benzer şekilde bu yöntem çeşitli tümörlerin yok edilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Literatürde bu yöntem hyperthermia (ısıya dayalı tedavi) olarak bilinir [57].

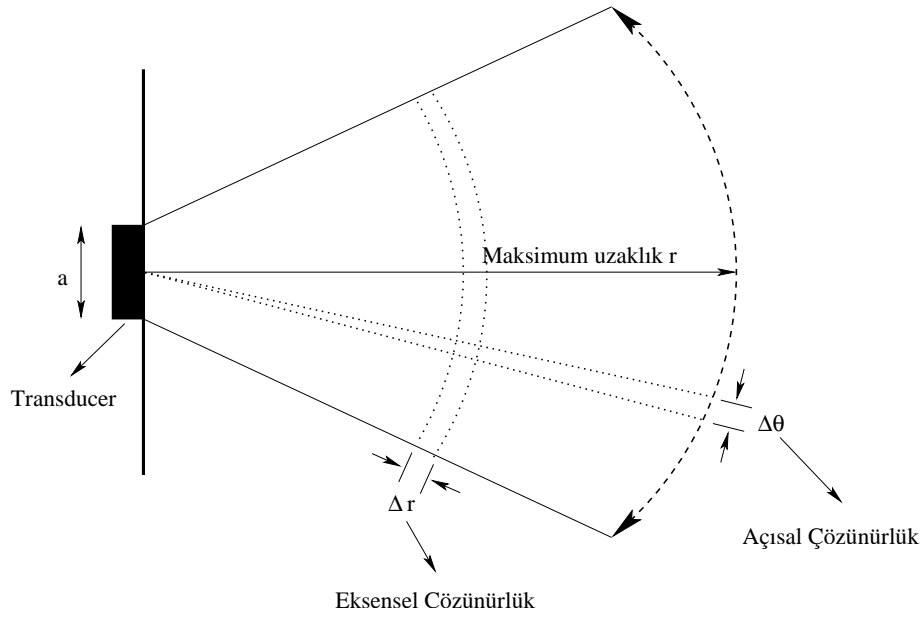
4.2 Akustik Görüntüleme Kalitesini Etkileyen Faktörler

İnsan vücudunun iç kısımları ve birçok özelliği sadece özel bir kısım görüntüleme metotları kullanılarak gözlemlenebilmektedir. Medikal görüntüleme ise, insan vücuduna açılan bir pencere gibidir. Bu pencereden nelerin görüldüğü, yani medikal cihazların görüntü kalitesi teknisyen tarafından seçilen görüntüleme değişkenlerine, kullanılan yöntemlere ve aletlerin teknik özelliklerine bağlıdır. Görüntü kalitesini

etkileyen temel faktörler, kullanılan aletlerin özellikleri ve seçilen görüntüleme değişkenleri ve kullanılan yöntemler şeklinde iki gruba ayrılabilir.

4.2.1 Kullanılan Aletlerin Teknik Özellikleri

Görüntüleme sistemlerinde kullanılan aletlerin temel elemanlarından birisi transducerlardır. Transducerlar görüntülenecek nesne üzerine istenilen frekans ve şiddette ultrasonik dalga göndermek amacı ile kullanılır. Bu tür sistemlerde kullanılan transducerın karakteristik özellikleri, görüntü kalitesini etkileyen faktörlerin başında gelir. Transducer, belirli bir merkez frekans (rezonans frekansı) değerinde maksimum güç üretir.



Şekil 4.4: Bir ultrasonik sistemin tasarımında gerekli temel parametreler.

Şekil 4.4'de ultrasonik sistemlerin çözünürlük kalitesini etkileyen temel parametreler gösterilmiştir. Bu temel parametreler, görüntünün transducera olan maksimum uzaklığı r , eksensel çözünürlük Δr , ve açısal çözünürlük $\Delta\theta$ 'dir.

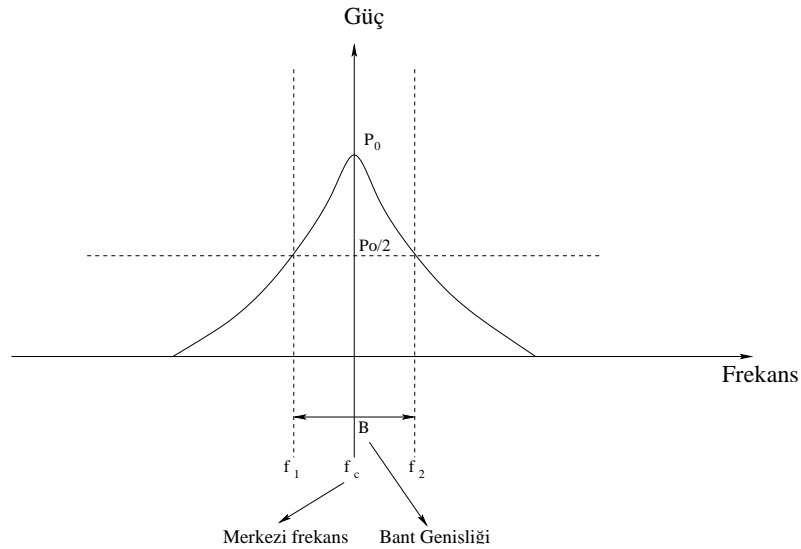
Nesnenin Transducera Olan Maksimum Uzaklığı

Su ve insan dokusunda ultrasonik dalganın hızı sabit ve yaklaşık olarak 1540 m/s'dir. Transducere çıkan dalganın görüntülenecek olan objeye ulaşma zamanı t ise, objenin transducera maksimum uzaklığı $r_{max} = ct/2$ şeklindedir. Vücut içinde daha derinlerde bulunan yapıları incelemek için r_{max} büyük seçilmelidir. Fakat bunun bazı dezavantajları vardır. Ortamın lineer olmaması dalganın daha uzak mesafeye gidilmesi ile daha fazla soğrulmaya uğraması anlamına gelir. Soğrulma mesafesi, gönderilen dalganın başlangıç şiddet değeri ile orantılıdır. Bu nedenle etkin r_{max} için uygun bir şiddet değeri seçilmelidir.

Eksensel Çözünürlük

Ultrasonik görüntüleme cihazlarının oluşturduğu akustik demet doğrultusundaki objeleri ayırt edebilme yeteneğine eksensel (axial) çözünürlük denir. Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi eksensel çözünürlük Δr ile gösterilir ve transducerin merkez frekansına bağlıdır.

Transducerların karakteristik özelliklerinden biri, belirli frekans aralıklarında güç üretebilme ve algılayabilme özelliğidir. Maksimum güç ürettikler frekans değerine (f_c) merkez frekansı ya da rezonans frekansı denir.



Şekil 4.5: Transducerin ürettiği güç için karakteristik bant genişliği.

Şekil 4.5'de transducerın ürettiği ultrasonik dalganın bant genişliği gösterilmektedir. Bant genişliği başlangıç gücün yarıya indiği frekanslar aralığıdır ve

$$\Delta f = f_2 - f_c = f_c - f_1 \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan B bant genişliği;

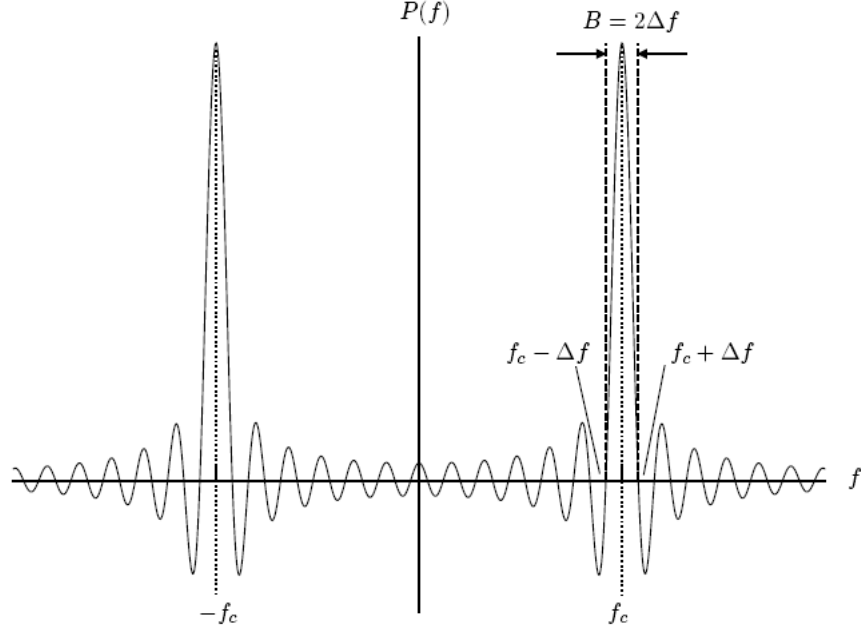
$$B = 2 \Delta f \quad (4.3)$$

şeklinde elde edilir.

Transducerdan gönderilen pulsun Δr kalınlığından geçme süresi $\Delta t = \frac{\Delta r}{c}$ şeklindedir. Burada c , ultrasonik dalganın yayılma hızını ifade etmektedir. Transducerdan gönderilen bir pulsun etkin frekansı Fourier analizi yapılarak hesaplanabilir. $\cos(2\pi fct)$ şeklinde sinüzoidal bir puls için transducerın ürettiği güç frekansın fonksiyonu olarak,

$$\begin{aligned} P(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} [pulse(t)]e^{-i2\pi ft} dt \\ &= \int_{-\frac{\Delta t}{2}}^{+\frac{\Delta t}{2}} \cos(2\pi fct)e^{-i2\pi ft} dt \\ &= \frac{\Delta t}{2} sinc[\pi(f_c - f)\Delta t] + \frac{\Delta t}{2} sinc[\pi(f_c + f)\Delta t] \end{aligned} \quad (4.4)$$

şeklinde verilir. Burada $sinc = \sin(x)/x$ ifade etmektedir.



Şekil 4.6: Δt zaman aralığında seçilen $\cos(2\pi f_c t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü (Ref [58]'den alınmıştır).

Şekil 4.6'da $\cos(2\pi f_c t)$ şeklinde tanımlanmış periyodik bir fonksiyonun Fourier dönüşümü gösterilmektedir. Bu grafik, $+f_c$ ve $-f_c$ şeklinde tanımlanmış iki *sinc* fonksiyonundan oluşmaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere $\pm f_c$ değerlerinde maksimum pik elde edilmektedir. Bu nedenle transducerdan maksimum güç elde edilmesi amacıyla bu pik frekanslarına yakın bölgelerde transducera giriş frekansı verilmelidir. *sinc* fonksiyonu içinde bulunan $\pi(f_c - f)\Delta t$ argümanı π 'ye eşit olduğunda, *sinc* fonksiyonu sıfıra eşit olur. Bu ise, pikin başlangıç ve bitiş noktalarına karşılık gelmektedir. Bu durumda,

$$\begin{aligned}\pi(f_c - f)\Delta t &= \pi \\ (f_c - f)\Delta t &= 1 \\ \Delta f\Delta t &= 1\end{aligned}\tag{4.5}$$

eşitliği elde edilir. Bu pikin bant genişliği ise, Denklem 4.3'den,

$$B = 2\Delta f = \frac{2}{\Delta t} = \frac{2c}{\Delta r}\tag{4.6}$$

olarak bulunur. Eksensel çözünürlüğü artırmanın yolu Δr 'yi küçültmektir. Bunun

için ya bant genişliği arttırılmalı ya da Δt süresi kısaltılmalıdır. Fakat gönderilen pulsun bir periyodu tamamlayabilmesi için pulsun gönderilme süresi en az $\frac{1}{f_c}$ olması gerekir. Bu durumda Denklem 4.6'de $B \leq 2f_c$ koşulu sağlamak zorundadır.

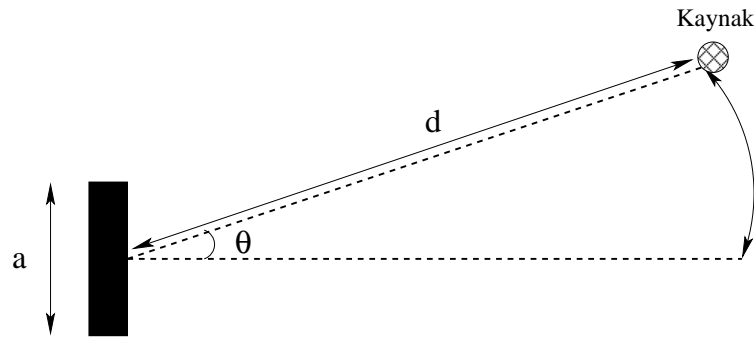
Açısal Çözünürlük

Ultrasonik görüntüleme cihazlarının, ortama gönderilen akustik dalga demetine dik olan yöndeki objeleri ayırt edebilme yeteneğine açısal çözünürlük adı verilir. Açısal çözünürlük direk olarak akustik demetin genişliği ile orantılıdır. Eğer yan yana duran iki küçük obje birbirine çok yakın ise, bu iki objeden yansıyan dalgalar, tek bir objeden yayılıyormuş izlenimi verir. Objeler birbirinden ayırt edilemediği için elde edilen görüntüde o bölge yeteri kadar net gözlenemez. Bu durumun önüne geçebilmek için istenilen bölgeye gönderilen akustik demetin bant genişliğinin olabildiğince dar tutulması gereklidir [21].

Akustik görüntülemede kullanılan transducerın boyutları dalga demetinin genişliğini belirler. Kenar uzunluğu a olan kare şeklinde bir transducer, Şekil 4.7'de görüldüğü gibi f_c merkezi frekansı ile sürülen bir dalga üretsin. Bu transducerın d uzaklığında oluşturduğu akustik enerji yakın alan yaklaşıklığı yapıldığında,

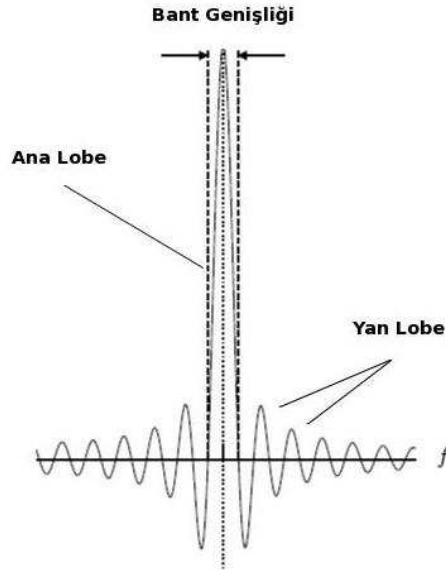
$$E = a \operatorname{sinc}[\pi f_c a \sin(\theta)/c] \quad (4.7)$$

şeklinde θ 'ya bağlı *sinc* fonksiyonu ile verilir [58].



Şekil 4.7: Akustik Alıcı ve vericinin yerleşim düzeni.

Bu fonksiyonun grafiği, Şekil 4.8'de görülmektedir. Bu fonksiyonun tipik özelliği merkeze yerleŐmiŐ bir adet ana lob (pik) ve simetrik olarak her iki tarafta yer alan, ana loba göre daha küçük genlik değerlerine sahip yan loblardan oluŐmasıdır. Bu ana lob ve yan loblar görüntü oluŐumunda önemli rol oynamaktadır.



Şekil 4.8: $E(\theta)$ fonksiyonunun $a = 0.02$ m, $f_c = 4$ MHz, $c = 1540$ m/s için çizilen örnek grafiği (Ref [21]'den alınmıştır).

İdeal olarak yüksek bir açısal çözünürlük için akustik enerjinin büyük bir kısmının ana lobda toplanmıŐ olması gerekmektedir. Yani yan lobların genlikleri olabildiğince küçük olmalıdır. Ana lobun demet genişliği olabildiğince dar tutulması da açısal çözünürlüğü arttırmaktadır. Yine eksensel çözünürlükle ilgili elde edilen sonuçlar açısal çözünürlük için de kullanıldığında, ana lobun başladığı ve bittiği noktalar *sinc* fonksiyonunun ilk sıfır değerini aldığı noktalar olduğu için $\pi f_c a \sin(\Delta\theta)/c = \pi$ Őartı sağlanmalıdır. Böylece dalga demetinin kalınlığı $\Delta\theta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{c}{a f_c} \right)$ Şeklinde elde edilir. Kaynak büyüklüğü olan a 'nın arttırılması ve uygulanan f_c frekansının arttırılması ile $\Delta\theta$ 'nın azaltılması ve bu sayede açısal çözünürlüğün arttırılması sağlanabilir.

Açısal çözünürlüğün arttırılması için kullanılan diğer yöntem ise, dizi transducerlar kullanılarak elektronik odaklama yapmaktır. Fakat dizi transducer kulla-

mlarak yapılan odaklamada birden fazla ana lob oluşabilmektedir. Diziyi oluşturan elemanların arasındaki uzaklığın ve dizideki eleman sayısının uygun bir şekilde seçilmesi ile bu durumdan kaçınmak mümkün olur [58].

4.2.2 Seçilen Görüntüleme Değişkenleri ve Kullanılan Yöntemler

Bu kısımda görüntü kalitesini etkileyen beş temel faktör vardır.

a. Kontrast (Contrast)

Kontrast zıtlık anlamına gelir ve görüntünün en temel karakteristik özelliğidir. Görüntü içinde kontrast, gri rengin farklı tonları ya da farklı renkler şeklinde gösterilir. Bir objenin fiziksel kontrastı, o objenin diğer objelerden ne kadar ayırt edilebileceğinin bir ölçüsüdür. *Kontrast hassasiyeti* ise, ayırt etme derecesini ifade eder. Daha yüksek hassasiyet daha iyi görüntü anlamına gelir. Yani görüntünün daha fazla noktadan oluşmasına ve net bir görüntü elde edilmesine olanak sağlar.

b. Bulanıklık (Blurring)

Görüntülenecek yapıların sadece fiziksel görüntüleri değil aynı zamanda şekilleri de değişebilir. Vücut içinde büyük organlardan küçükcük hücrelere kadar birçok yapı bulunur. Her görüntüleme sisteminin belli bir küçüklüğe kadar objeleri gösterebilme özelliği vardır. Küçük objelerin ayrıntılı görüntülenmesi için *blurring etkisi* artırılmalıdır.

c. Gürültü (Noise) Etkisi

Gürültü etkisi, sistemde kullanılan aletlerden ve uygulanan yöntemlerden kaynaklanan istenilmeyen bir etkidir. Bu etki, görüntü kalitesini olumsuz şekilde etkiler. Fazla *gürültü* daha düşük görüntü kalitesi anlamına gelir.

d. Artifacts

Bazı görüntüleme yöntemleri, bir obje üzerinde görünmeyen bölgeler yaratabilir. Bu olaya *image artifact* denir. Çoğu durumlar da *artifact* objenin görünübilirliğini etkilemez fakat objenin bir kısmının görünmesini engelleyebilir.

e. Bozulma (Distortion)

Yukarıda görüntü kalitesini etkileyen dört temel faktörden bahsedildi. Her faktör birbirinden tamamen bağımsız değildir. Yani bir faktörde meydana gelen değişim diğer faktörleri etkilemektedir. Bu ise, iyi bir görüntü elde edilmesi için tüm faktörlerin aynı anda göz önüne alınmasını gerektirir. Ayrıca her görüntüleme yöntemi özel objelerin görüntülenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Örneğin bir organı görüntülemeye kullanılan yöntem, bir dokunun görüntülenmesinde yeteri kadar başarılı olmayabilir. Ayrıca görüntü kalitesini artırmanın diğer bir yolu, seçilen bakış koşuluna uygun bir görüntüleme seçeneği sunmaktır. *Bozulma faktörü*, tüm özelliklerin göz önüne alınarak en uygun koşulun seçilmesi olarak ifade edilebilir.

Yukarıda anlatılan özellikler doğrultusunda, ultrasonik alan yapılarının teorik ve deneysel olarak ayrıntılı şekilde incelenmesi ve karakteristik alan yapılarının ortaya konması ile görüntü kalitesi daha da geliştirilebilirler. Bu nedenle, bu tezde ultrasonik alan yapılarının iki ve üç boyutta deneysel olarak incelemesi amaçlanmıştır.

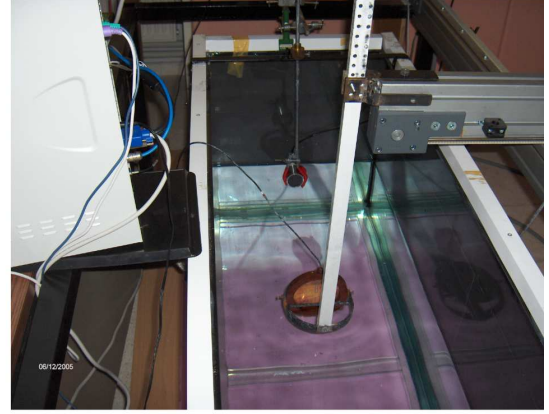
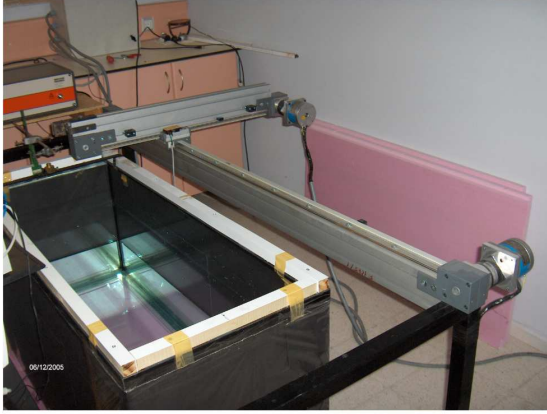
5. Deneysel Düzenek

5.1 Giriş

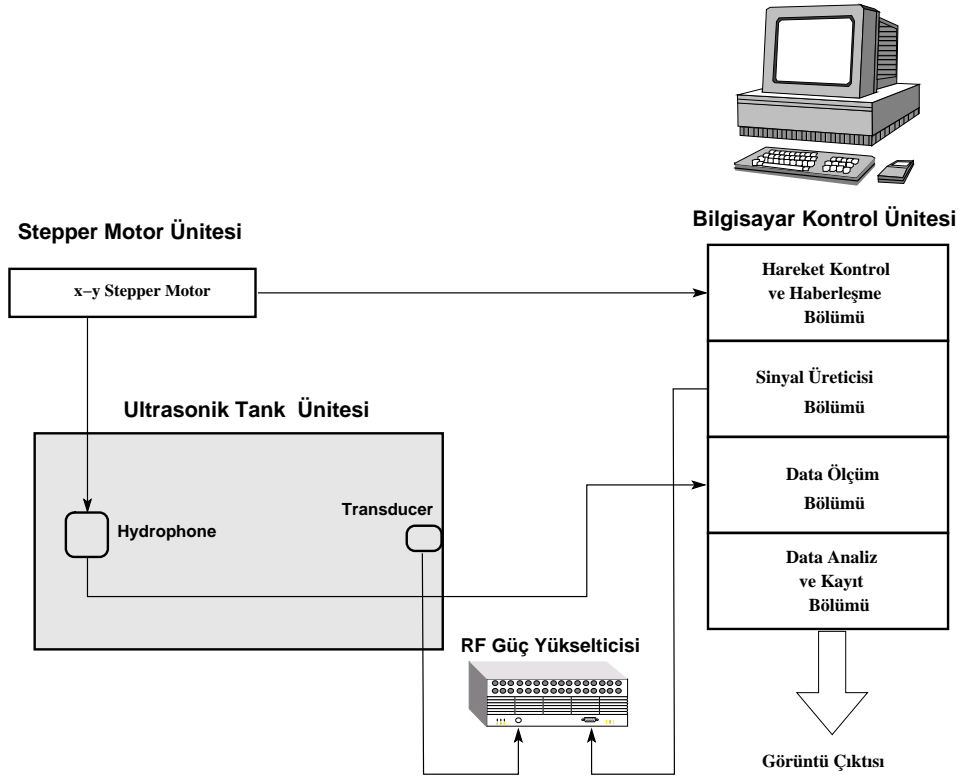
Bu bölümde, deney sisteminde kullanılan mekanik ve elektronik donanımlar ve deneysel ölümler için geliştirilen yazılım hakkında geniş bilgi verilecektir. Öncelikle deney sistemini oluşturan temel donanım üniteleri, deney sisteminde mevcut olan tüm cihazlar, bilgisayar ve kartları ayrıntılı Şekilde açıklanacaktır. Son olarak ise, deney sistemi için geliştirilen yazılımın temel yapısı sunulacaktır.

5.2 Donanım

Deney sisteminin farklı açılardan çekilmiş resimleri Şekil 5.1'de, genel konfigürasyonu ise, Şekil 5.2'de görülmektedir. Deney sistemi, dört temel üniteden oluşmaktadır. Birinci  nite; saf su ile dolu ve içinde transducerın ve hydrophone'nun (ultrasonik alıcı) bulunduğu ultrasonik tank  nitesi, ikinci ünite; hydrophone'nun iki boyutta hareketini sağlayan stepper motor  nitesi, üçüncü ünite; hareket kontrol ünitesinin yönetildiği, elektriksel sinyallerin üretildiği, sinyallerin işlendiği ve kaydedildiği bilgisayar kontrol  nitesi ve son olarak elektriksel sinyalin yükseltilmesi için kullanılan Radyo Frekans (RF) güç y kselticisidir.



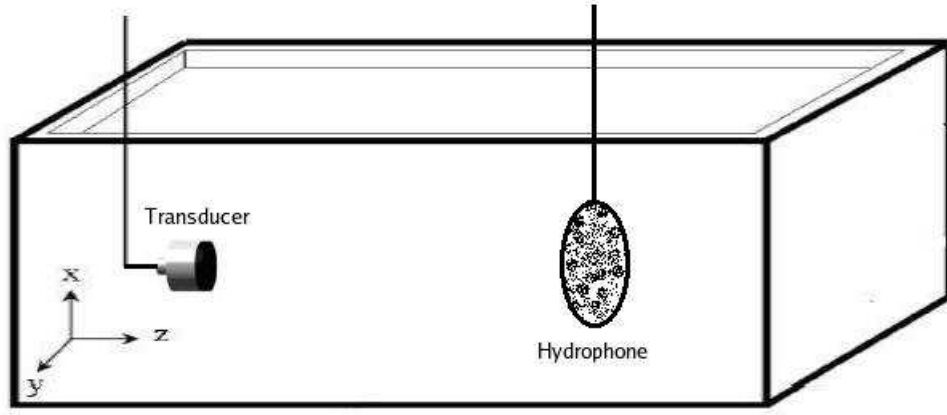
Şekil 5.1: Deney sisteminin farklı açılardan fotoğrafları.



Şekil 5.2: Deney sisteminin genel konfigürasyonu.

5.2.1 Su Tankı Ünitesi

Şekil 5.3’de akustik basınç alanlarının ölçümünün gerçekleştirildiği ultrasonik tank ünitesi gösterilmektedir. Ultrasonik tank, içinde transducerın ve hydrophone’nun monte edildiği ve ebatları $48 \times 67 \times 124$ cm olan içi su ile dolu camdan yapılmış tanktır. Gerekli yalıtımlar cam silikonu ile yapılmıştır. Muhtemel darbelerle karşı dayanıklılık için 0.5 cm kalınlığında cam kullanılmış ve demir borular ile desteklenmiştir.



Şekil 5.3: Deney sisteminde kullanılan ultrasonik tank ünitesinin şematik gösterimi.

Deneyisel ölçümler için ortam olarak saf su seçilmiştir. Çoğu zaman bu tip çalışmalarda normal şehir şebeke suyu kullanılmaktadır [18, 49]. Fakat mevcut şehir şebeke suyunun çok fazla kireçli olması ve kirecin ultrasonik tank ünitesi içinde bulunan bazı elemanları olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle şehir şebeke suyu tercih edilmemiştir. Tüm ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

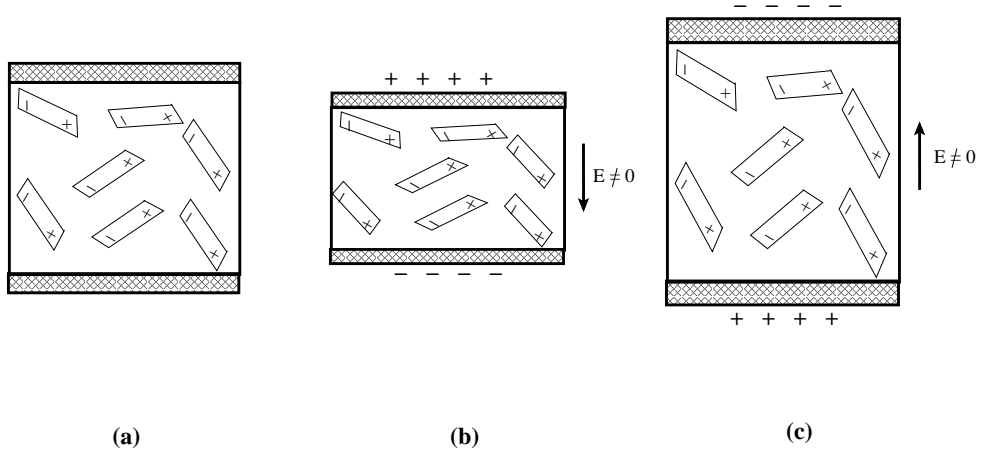
Transducer, suyun içinde kalacak şekilde tankın kısa kenarlarından biri üzerine sabitlenmiştir. Tüm ölçümler boyunca transducerin hareketsiz kalması sağlanmıştır.

Stepper motorlar yardımı ile hydrophone'nun iki boyutta (y-z) hareket etmesine imkan verilmiştir. Tüm bu hareketler bilgisayar kontrolü ile yapılmıştır. Bu şekilde hydrophone'nun tüm alanı taraması sağlanmış, bu esnada veriler bilgisayara kaydedilmiş, belirlenen ölçüm aralığında ölçümler bittiğinde işlemin otomatik olarak sonlandırılması sağlanmıştır. Akustik eksen boyunca yapılan ölçümlerde hydrophone, sadece akustik eksen boyunca hareket ettirilmiştir. Benzer şekilde radyal eksen boyunca yapılan ölçümlerde hydrophone sadece radyal eksen boyunca hareket ettirilmiştir. Ayrıca üç boyutlu ölçümler için hydrophone elle kontrol edilebilen bir mekanizma ile aşağı yukarı hareket ettirilebilmektedir. Üçüncü boyutta her adım aralığı için yine hydrophone, akustik eksen ve radyal eksen boyunca iki boyutlu olarak hareket ettirilmiştir. Böylece hydrophone'nun üç koordinat eksenini boyunca tüm hacmi taraması sağlanarak üç boyutlu akustik basınç alanlarının ölçülebilmesine

imkan sağlanmıştır.

Transducer (Ultrasonik Dalga Üreteci)

Transducerlar, ultrasonik sistemlerin en temel parçalarıdır. Genel olarak transducerlar, elektriksel sinyalleri mekanik titreşimlere, mekanik titreşimleri de elektriksel sinyallerine dönüştüren aletler olarak tanımlanır. Transducerın bu özelliği, transducerın içinde bulunan aktif element olarak ifade edilen ve polarizasyon özelliği olan maddeden kaynaklanmaktadır. Aktif element, akustik enerjiyi elektriksel enerjiye, elektriksel enerjiyi de akustik enerjiye dönüştürür. Aktif element içinde polarize olmuş elektriksel dipoller bulunmaktadır.



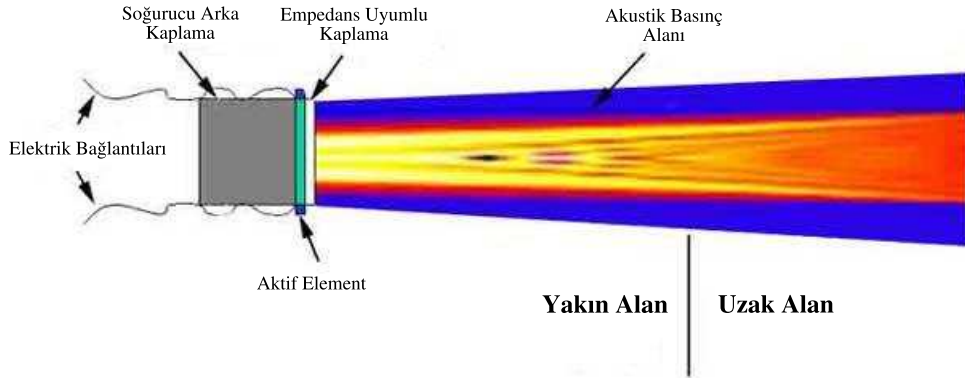
Şekil 5.4: Dışardan uygulan elektrik alan sonucu oluşan piezoelektrikleme etkisinin sematik gösterimi.

Şekil 5.4'de, piezoelektrik maddeye elektriksel potansiyel uygulandığı durum için temsili olarak piezoelektrik madde içinde bulunan yüklerin hareketleri gösterilmektedir. Şekil 5.4.a, maddeye herhangi bir elektriksel alan uygulanmadan önce madde içinde bulunan dipollerin genel durumunu göstermektedir. Şekil 5.4.b'de, piezoelektrik maddeye elektriksel bir alan uygulanmıştır. Bu ise, aktif element içinde bulunan dipollerin yönelimlerini değiştirmiş ve piezoelektrik maddeye bir stres uygulanmasını neden olmuştur. Elektrik alana bağlı bu stresden dolayı piezoelektrik maddenin iç yapısı yeniden şekillenmiştir. Şekil 5.4.c'de ise, Şekil 5.4.b'de uygulanan elektriksel alanın tam tersi yönünde bir alan uygulanmıştır. Bu yeni alan madde

içinde ters yönde strese sebep olarak yüklerinin yeniden düzenlenmesini sağlamıştır. Şekil 5.4.b'de ve Şekil 5.4.c'de gösterilen alan harmonik olarak değişen bir sinyal aracılığı ile kontrol edildiğinde basit sinüzoidal formda harmonik bir akustik dalga üretilmiş olur.

Günümüzde çoğu transducerların aktif elementleri için farklı yöntemlerle üretilen piezoelektrik seramikler kullanılmaktadır. İlk piezoelektrik seramik çalışmaları 1950'li yıllarda başlamıştır. Bu piezoelektrik seramiklerde, kuartz kristaller ve yüksek manyetik etkisi olan maddeler kullanılmıştır. Bu yıllarda kullanılan piezoseramikler çoğunlukla baryum titanyum alaşımlarından oluşmaktaydı. Daha sonraki yıllarda ise, zirkonyum titanyum alaşımları kullanılmaya başlanmıştır.

Aktif elementin kalınlığı transducer tarafından oluşturulacak sinyalin frekansına göre ayarlanır. Yüksek frekanslar için daha dar, düşük frekanslar için daha geniş bir aktif element kullanılır. Çoğu zaman bu kalınlık kullanılacak dalganın dalga boyunun yarısı olarak seçilir.



Şekil 5.5: Tipik bir transducerin kesiti ve oluşturduğu akustik basınç alanı (Ref [59]'den alınmıştır).

Şekil 5.5'de, transducer üzerinden alınmış bir kesit ve bu transducerin oluşturduğu akustik basınç alanı gösterilmiştir. Transducerin arka kısmında, oluşan sinyalin soğurması ve yansımaların ortadan kaldırılması amacıyla kristalden yapılmış bir soğurucu arka kaplama bulunur. Bu kaplama sayesinde aktif element tarafından

oluşturulan akustik dalgalar soğrulur ve tekrar aktif elementi etkileyerek sinyalin bozulması engellenir. Soğurucu arka kaplama özel olarak dizayn edilir. Transducerlar için temel problemlerden biri olan geniş bant aralığında daha az hassas sinyal üretilmesi bu tabaka sayesinde minimuma indirilebilmektedir [60]. Bu kaplama sayesinde üretilecek dalganın bant genişliği gibi bir çok özelliği ayarlanabilmektedir. Soğurucu arka kaplamanın hemen önünde akustik dalganın üretildiği aktif element bulunur. Aktif element elektrik bağlantı kabloları ile tutturulmuştur. Aktif elementin önünde ise, dalganın yayılacağı ortam ile empedans uyumunu sağlayan empedans uyumlu kaplama bulunur. Ayrıca transducerın ürettiği dalganın kullanılacağı ortama göre bu empedans uyumlu tabakanın önüne ortam ile transducerın empedans uyumunu sağlayan özel malzemeler konulmaktadır.

Ultrasonik deney sisteminde, 38 mm çapında dairesel geometriye sahip transducer kullanılmıştır. Bu transducerın merkezi frekansı 2.25 MHz 'dir ve sürekli formda *sinüzoidal* sinyal üretmektedir.

Transformer

Transformer, iki veya daha fazla elektrik devresini elektromanyetik indüksiyonla birbirine bağlayan bir elektrik devre elemanıdır. Esas olarak transformerlar, elektromanyetik indüksiyonla enerjiyi bir devreden diğer devreye geçirirler.

Transducerlarda karşılaşılan en önemli problemlerin başında transducerın çıkış empedansı ile giriş empedansı arasındaki uyumsuzluklardır. Pratikte transformerlar bu uyumsuzluğu minimuma indirmek amacı ile kullanılır.

Deney sisteminde kullanılan transformer transducerın içine yerleştirilmiş ve transducerla birlikte tek parça halindedir.

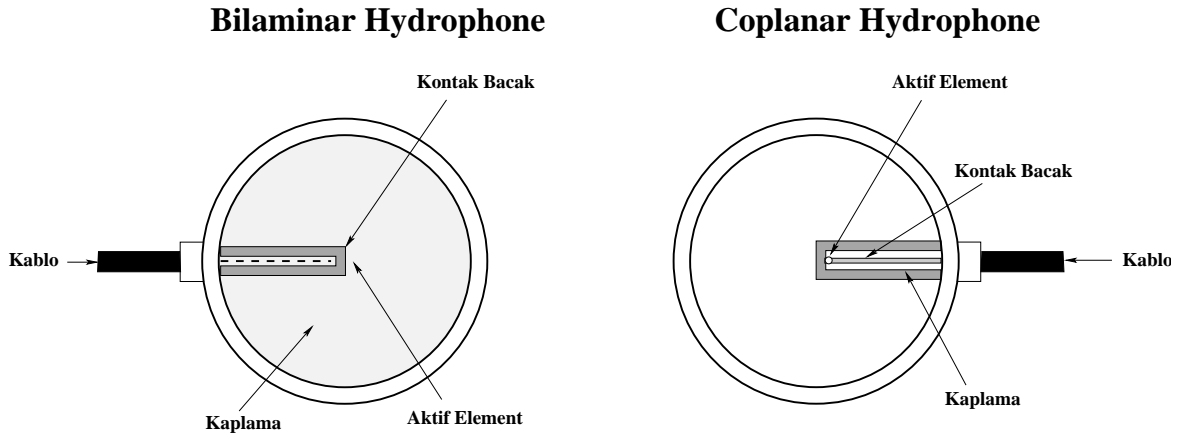
Hydrophone (Ultrasonik Alıcı)

Hydrophone'lar, sıvı içinde ultrasonik dalganın oluşturduğu basınç değişimi ile oluşan enerjiyi algılayan ve bunu elektrik sinyaline dönüştüren özel aletlerdir. Hydrophone'lar, su altı çalışmaları olan sonar sistemlerinin temel bir parçasıdır. Su

altından gelen ultrasonik dalgalar hydrophone yardımı ile dinlenerek gerekli analizler yapılır. Hydrophone'ların yapımında piezoelektrik özelliğe sahip bir malzeme olan baryum titanit kullanılır. Transducerların da ultrasonik basınç değişimlerini algılayabildikleri düşünüldüğünde, hydrophone'ların transducerlardan temel farkı, hydrophone'ların oldukça geniş frekans aralığında bu işi yapabilme özelliğine sahip olmalarıdır.

1970'li yılların başlarında çeşitli amaçlar için minyatür hydrophone çalışmaları başlamasına rağmen ilk PVdF zar tipi hydrophone'lar 1979 yılında UK National Physical Laboratory (NPL)'in katkıları ile GEC-Marconi Research Centre (MRC)'de geliştirilmiştir [61, 62, 63].

Zar tip hydrophone'lar tek ya da iki katman ince PVdF film tabakasından meydana gelirler. Bu tabakaların ortasında piezoelektrikliği sağlayan aktif element bulunur. Coplanar kaplamalı hydrophone'lar tek katman, bilaminar kaplamalı hydrophone ise, iki katman PVdF film tabakasından meydana gelir. Şekil 5.6'da her iki tip hydrophone'nun yapısı ayrıntıları ile görülmektedir.



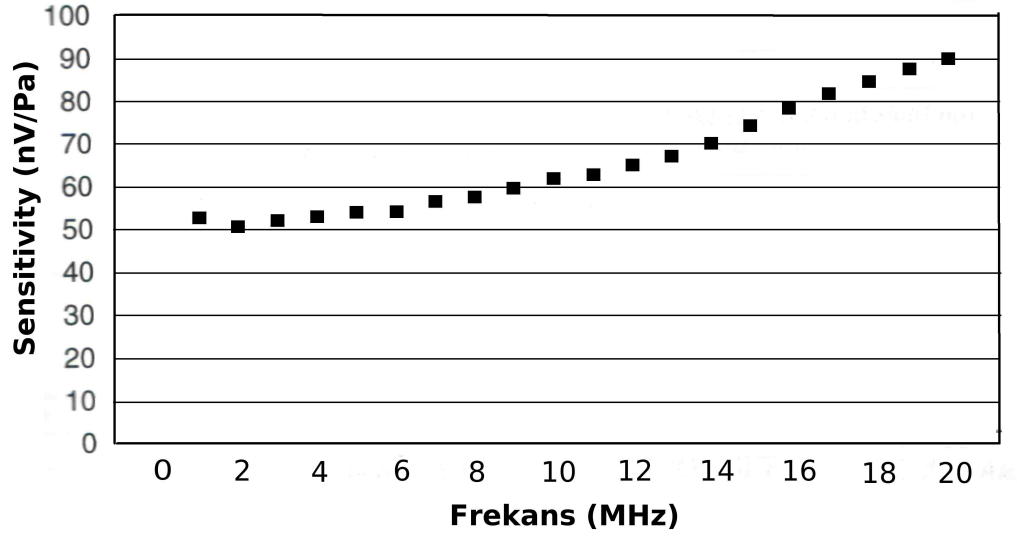
Şekil 5.6: Zar tipi hydrophone'ların genel yapısı

Bilaminar kaplamalı hydrophone'lar genel amaçlar için düşük frekans aralığında (1-20 MHz) dizayn edilmişlerdir ve direk su içine batırılarak ölçüm alabilme özelliğine sahiplerdir. Coplanar kaplamalı hydrophone'lar ise, özel amaçlı ve yüksek

frekanslı (20-100 MHz) çalışmalar için dizayn edilmişlerdir ve direk olarak su ile teması yapılmadan kullanılırlar.

Ayrıca günümüzde çeşitli amaçlara yönelik üretilmiş düşük frekanslara duyarlı iğne uçlu hydrophone'lar da mevcuttur.

Deney sisteminde kullanılan hydrophone, Marconi firması tarafından üretilmiş yarıçapı 65 mm, kablo direnci 50Ω olan polyvinylidene difluoride'den (PVdF) yapılmış bilaminar zar tipi hydrophone'dur (Type: Y-34-3598, Serial No:MRQ-ER212). Hydrophone'nun PVdF zar kalınlığı 50 micron olup 2.25 MHz frekansta yaklaşık olarak 50 mV/MPa hassasiyete sahiptir [64, 65, 66, 67]. Şekil 5.7'de deney sisteminde kullanılan hydrophone'nun frekansa karşı hassasiyeti gösterilmiştir.



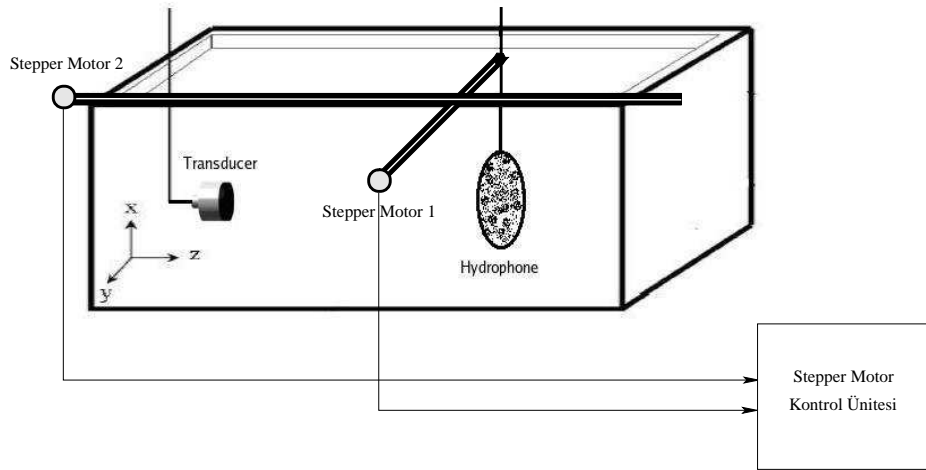
Şekil 5.7: Y-34-3598 ER 212 tipi hydrophone'nun frekansa göre duyarlılığı (Ref [64]'den alınmıştır).

Deney sisteminde kullanılan hydrophone, bir metal çubuk yardımı ile iki eksen boyunca hareket edebilen bilgisayar kontrollü bir stepper motora monte edilmiştir. Ayrıca üçüncü eksen ölçümler için metal çubuk aşağı yukarı elle hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Hydrophone'nun çıkışı empedansı küçük bir kablo ile dijital osiloskop kartının girişine bağlanmıştır.

5.2.2 Stepper (Adımlayıcı) Motor Ünitesi

Stepper motor ünitesi, su tankı içinde bulunan hydrophone'un iki boyutta hareketini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Birbirinden bağımsız iki eksende hareket edebilen iki stepper motor kullanılmış ve hareketi bilgisayar kontrollü bir sistem ile sağlanmıştır. Her stepper motor, minimum 0.1 mm adım aralığı hassasiyetine sahiptir.

Şekil 5.8'de stepper motor ünitesinin şematik diagramı gösterilmektedir. Ünite birbirinden bağımsız hareket edebilen iki stepper motordan oluşmaktadır ve her bir motor isteğe bağlı olarak hareket ettirilebilmektedir. Böylece hydrophone'un tüm yüzeyi taraması sağlanmaktadır.



Şekil 5.8: Stepper motor ünitesinin şematik gösterimi.

5.2.3 Bilgisayar Kontrol Ünitesi

Bilgisayar kontrol ünitesi, bir adet kişisel bilgisayarı ve ilgili kartları içermektedir. Bu ünite, genel olarak dört temel işlevi yerine getirmektedir.

1. **Stepper motorların kontrolünü sağlamak:** Bu amaçla bilgisayar üzerinde bulunan hareket kontrol kartı kullanılır. Bu kart her bir stepper motorun hareketini kontrol eder ve hydrophone'nun istenilen noktaya ya da noktalara götü-

rülmesini sağlar. Aynı zamanda bu kart, her bir stepper motorun birbirinden bağımsız hareket etmesine imkan verir.

2. **Transducer tarafından üretilecek olan sinyalin kontrolünü sağlamak:** Bu amaçla bilgisayar üzerinde bulunan sinyal üretici kart kullanılır. Bu kart yardımı ile istenilen genlikte, frekansta ve tipte (*CW veya pulsed wave*) ultrasonik sinyal üretmek mümkündür.
3. **Hydrophone tarafından algılanan akustik basınç alanlarının alınmasını sağlamak:** Bu işlem, yine bilgisayar üzerinde bulunan dijital osiloskop kartı tarafından gerçekleştirilir. Bu kart yardımı ile hydrophone'dan elektriksel sinyaller alınır.
4. **Dijital osiloskop kartı tarafından alınan dataların işlenmesini, görüntülenmesini ve depo edilmesini sağlamak:** Bu işlem için geliştirilmiş özel bir yazılım kullanılmaktadır. Bu yazılım bir sonraki kesimde ayrıntıları ile anlatılacaktır.

Haraket Kontrol Kartı

Deney sisteminde kullanılan hareket kontrol kartı *NI PCI-7344* tipi hareket kontrol kartıdır ve National Instrument firması tarafından üretilmiştir [68]. Bu kart, bağlı bulunduğu stepper motorların ileri düzeyde kontrolüne olanak sağlar. Kart yardımı ile stepper motorları, lineer, dairesel, noktadan noktaya, artan aralıklar şeklinde hareket ettirmek mümkündür. Deney sisteminde tüm hareketler sabit adımlarla noktadan noktaya hareket şeklinde yapılmıştır. Ayrıca her adım aralığı için belli bir süre beklenerek bir sonraki harekete geçilmiştir.

Sinyal Üretici

Deney sisteminde kullanılan sinyal üretici, *NI PCI-5411* tipi sinyal üretici kartıdır ve National Instrument firması tarafından üretilmiştir [69]. Bu kart 40 MS/s dalga üretme (AWGs) özelliğine sahiptir. Bu özelliği her bir kanal için standart dalga biçiminin 8 milyon örneklemesine (sample) denk gelmektedir. Aynı zamanda

bu kart, istenilen türde dalga formu üretici, sweep jeneratörü ve fonksiyon jeneratörü özelliklerinin tamamını içermektedir. Kart tarafından dijital bir sinyal üretildiğinde, sinyalin türü kullanıcı tarafından belirlenir ve onboard hafıza kartı yardımı ile sinyalin görüntüsü kaydedilir. 16 MB hafıza kartı ile 8 milyon örnekleme yapmak mümkündür. Ayrıca bu kartla, standart matematiksel fonksiyonlar kullanıldığında keyfi sinyal türleri üretmek mümkündür.

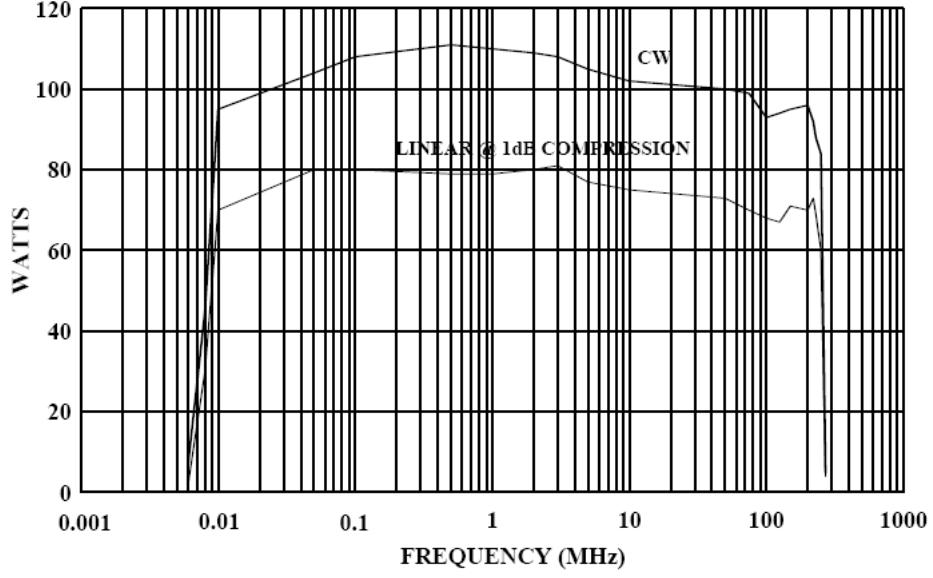
Dijital Osiloskop Kartı

Deney sisteminde kullanılan dijital osiloskop kartı, **NI PCI-5102** tipi dijital osiloskop kartıdır ve National Instrument firması tarafından üretilmiştir [70]. Bu kart, çift kanal 20 MS/s örnekleme (sample) oranına sahiptir. Aynı zamanda gerçek zamanlı olarak 20 MS/s'den 15 kS/s'ye kadar örnekleme yapabilmektedir. Her bir kanal 15 MHz analog giriş bant genişliğine sahiptir ve ± 50 mV ile ± 5 V arası giriş voltaj değerlerini ve yazılım yardımı ile AC veya DC sinyalleri algılayabilmektedir.

5.2.4 RF (Radio Frequency) Güç Yükseltici

RF güç yükselticileri, herhangi bir sinyalin genliğini sinyalde herhangi bir bozulma olmaksızın artırmak amacı ile kullanılan elektronik devre elemanlarıdır. RF güç yükseltici, giriş sinyalini (voltaj, akım v.s.) baz alan fakat tamamen yeni olan bir çıkış sinyali üretir. Çoğu uygulamalarda giriş sinyali ile çıkış sinyalinin genlikleri dışında her şeyleri aynıdır.

Deney sisteminde kullanılan *RF (Radio Frequency) Güç Yükseltici*, AR 75A250 (AR-Worldwide Company) modelidir [71]. Şekil 5.9'da RF güç yükselticinin tipik güç çıkışları, Tablo 5.1'de ise, bazı karakteristik özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.9: AR 75A250 RF güç yükselticisinin frekansa göre güç çıkışı (Ref [71]'den alınmıştır).

Güç Çıkışı (CW)	
<i>Net</i>	100 Watts
<i>Minimum</i>	75 Watts
Frekans Aralığı	10 kHz - 250 MHz
Kazanç	
<i>Minimum</i>	49 dB
<i>Değişim Aralığı</i>	18 dB
Giriş Direnci	50 ohms, VSWR 1.5:1 maksimum
Çıkış Direnci	50 ohms, VSWR 2.0:1 maksimum

Tablo 5.1: 75A250 RF güç yükselticisinin karakteristik özellikleri.

5.3 Yazılım

Deney sistemi için geliştirilen yazılım, *LabVIEW* program geliştirme ortamı altında çalışmaktadır. LabVIEW, veri toplama ve kontrolünde, veri analizi ve veri sunumunda kullanılan, C programlama dili tabanlı grafiksel bir program geliştirme ortamıdır [72]. 1980'lerin başında ilk geliştirilmeye başlanmasından bu yana çok sayıda mühendislik, bilimsel araştırma ve teknolojik uygulamalarda kullanılan bir

program halini almıştır. LabVIEW uygulamalarının diğer grafiksel ortam programlarından daha hızlı çözüm üretebilmesi, geliştirmeye harcanan zamanın önemli ölçüde azalmasını sağlaması program açısından önemli bir avantajdır.

Deney sistemi için geliştirilen yazılım yardımı ile, stepper motorların hareketi, transducera gönderilecek ultrasonik sinyalin özellikleri kontrol edilebilmektedir. Ayrıca hydrophone'dan veri alınması ve bu verilerin işlenmesi yapılmaktadır. Yazılım stepper motorların iki boyutlu bir düzlem boyunca hydrophone'u hangi noktaya götüreceğinin ve o noktada ne kadar süre kalacağını kontrolünü ve hydrophone'dan alınan tüm dataların analizinin yapılmasını sağlar.

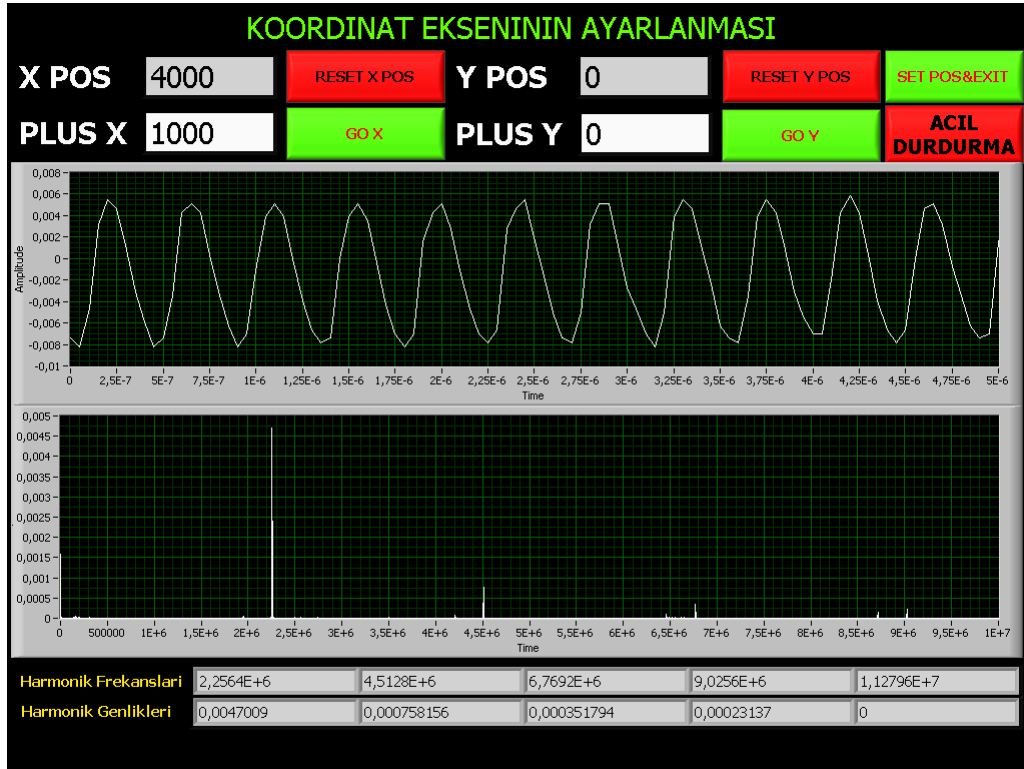
Şekil 5.10'den de görülebileceği gibi deney sistemi için geliştirilen yazılım, beş temel fonksiyonu yerine getirmektedir. Her bir fonksiyon için ayrı ara yüz yazılmıştır.



Şekil 5.10: Deney sisteminde kullanılan yazılımın başlangıç ara yüzü.

a. Eksen Kalibrasyonu Ara Yüzü:

Bu ara yüz, hydrophone'nu ölçümün yapılacağı başlangıç noktasına getirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Şekil 5.11'den görülebileceği gibi, bu adımda her bir stepper motorun ayrı ayrı kontrolü sağlanmaktadır. Stepper motorlar minimum 0.1 mm aralıklarla hareket ettirilebilmektedir. Hydrophone, uygun başlangıç noktasına getirildiğinde, **SET POS&EXIT** butonuna tıklanarak başlangıç konum ayarları tamamlanır ve bir sonraki adıma geçilir. Ayrıca koordinat ayarları altında bulunan iki grafik sırasıyla hydrophone'un bulunduğu konumda algılanan dalganın şeklini ve harmoniklerin genliğini grafiksel olarak göstermektedir. En alt kısımda ise, her harmoniğin frekansı ve genliği rakamsal olarak verilmektedir.



Şekil 5.11: Koordinat ekseninin ayarlanmasında kullanılan ara yüz.

b. Ölçüm Parametreleri Ara Yüzü:

Bu kısımda, ölçüm parametreleri belirlenir. x eksenini akustik eksenini, y eksenini ise, radyal eksenini göstermektedir. Şekil 5.12'den de görüldüğü gibi her eksen için ayrı ayrı parametre girişleri mevcuttur. **START** ve **STOP** butonları ile ifade edilen kısımlara hydrophone'nun başlangıç ve bitiş uzaklıkları yazılır. Daha alt kısımda bulunan **STEP** butonu ile ne kadar aralıklarla ölçüm yapılacağı belirlenir ve son olarak en alt kısımda her bir ölçümden sonra ne kadar bekleneceğini belirlemek amacıyla kullanılan ölçüm bekleme süresi kısmı bulunur. Burada yazılan her sayı değeri *ms* olarak gösterilir. Ayrıca sağ alt köşede kaç ölçüm yapılacağını ve bu ölçümlerin ne kadar süreceğini eş zamanlı olarak gösteren bir bölüm mevcuttur. Tüm ölçüm parametreleri girildikten sonra **SAVE & EXIT** butonuna tıklanarak ana menüye tekrar dönülmektedir.

ÖLÇÜM PARAMETRELERİ

START X POS 0

STOP X POS 0

START Y POS 0

STOP Y POS 0

STEP ÖLÇÜM X 1

STEP ÖLÇÜM Y 1

ÖLÇÜM DELAY 1000

ÖLÇÜM SAYISI 0

ÖLÇÜM SÜRESİ(sn) 0

SAVE & EXIT

Ölçüm Parametreleri

START X POS
0

STOP X POS
0

START Y POS
0

STOP Y POS
0

STEP ÖLÇÜM X
1

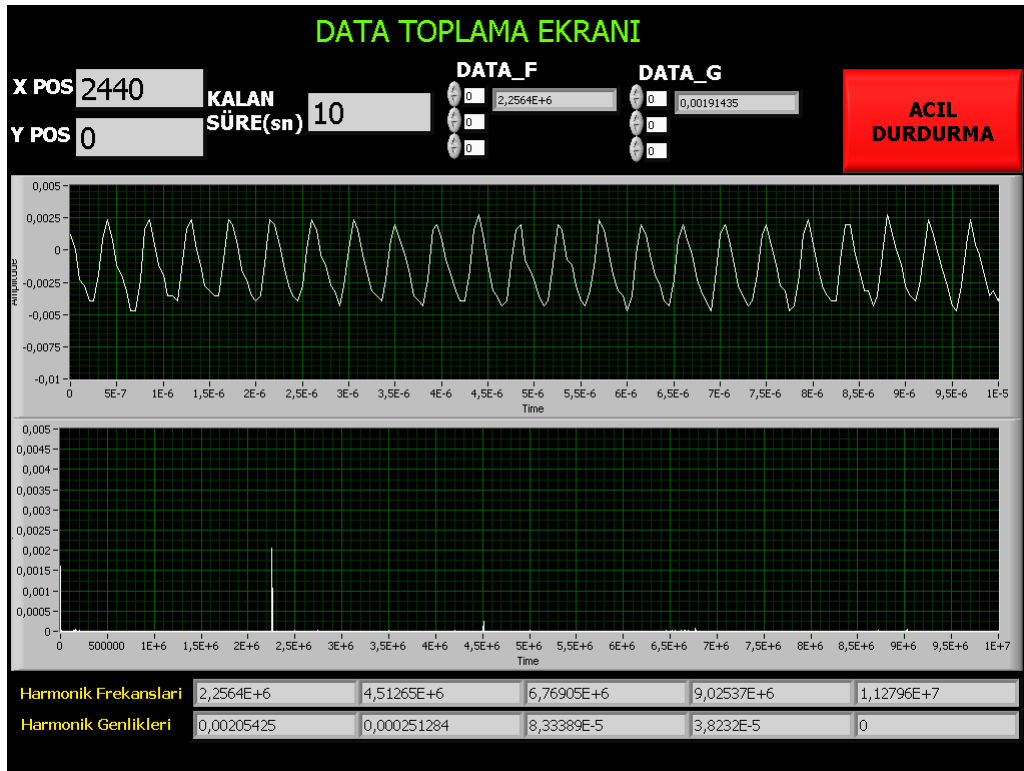
STEP ÖLÇÜM Y
1

ÖLÇÜM DELAY
1000

Şekil 5.12: Ölçüm parametrelerinin belirlendiği ara yüz.

c. Data Toplama Ara Yüzü:

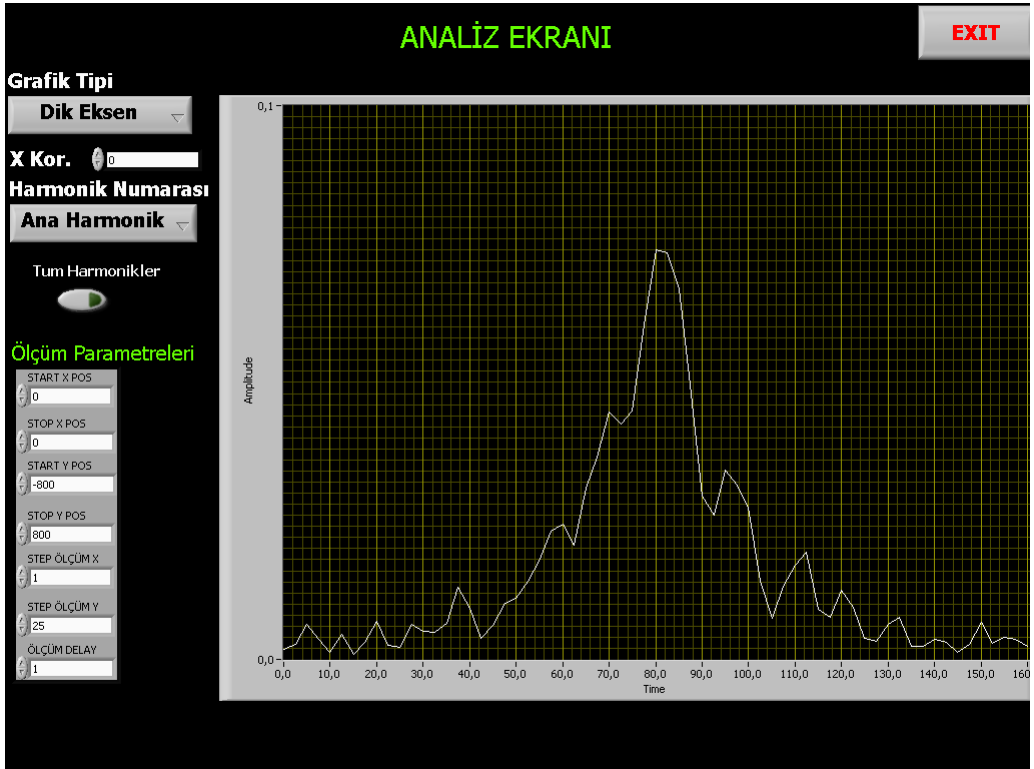
Birinci ve ikinci adımlar geçildiğinde sistem artık ölçüm yapmaya hazırdır. Bunun için ana menüde ölçüm yap butonuna tıklamak yeterlidir. Ölçüm yap butonuna tıkladığında Şekil 5.13’de görünen data toplama ara yüzü ekrana gelmektedir. Data toplama ara yüzünde x ve y ekseninde hydrophone’nun yeri, dalganın şekli, harmoniklerin genlikleri, frekansları ve kalan süreyi eş zamanlı olarak görmek mümkündür.



Şekil 5.13: Data topla ara yüzü.

d. Data Analiz Ara Yüzü:

Ölçüm işlemi tamamlandığında program otomatik olarak tekrar ana menüye döner. Ana menüde **Analiz** butonuna tıklandığında Şekil 5.14'de görülen data analiz ara yüzü görülür. Burada hydrophone tarafından alınan dataların her bir harmoniğin konuma bağlı genliği, akustik eksen, radyal eksen, kontür ve üç boyutlu grafikleri çizilir.



Şekil 5.14: Dataların analizlerinin yapılmasında kullanılan ara yüz.

e. Data Kaydet ve Çıkış Ara Yüzü:

Data analiz ara yüzü kapatıldığında otomatik olarak tekrar ana menüye döner. Son olarak ise, hydrophone tarafından her adımda alınan verilerin kaydedilmesi amacı ile ana menüde bulunan **Data Kaydet** butonu kullanılır. Datalar her adımda her harmonik için ayrı ayrı kaydedilir. Kayıt işlemi bittiğinde ise, ölçüm işlemi tamamlanmış olur ve ana menüde bulunan **ÇIKIŞ** butonu yardımı ile program tamamen kapatılır.

6. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlar

6.1 Giriş

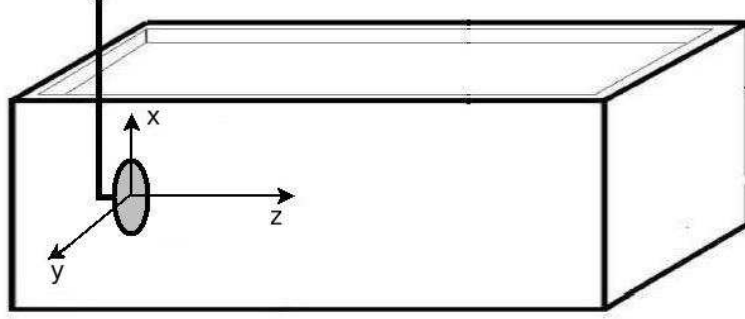
Bu bölümde, lineer olmayan akustik basınç alanlarının ölçülmesi ile elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. İlk olarak, farklı başlangıç basınç (P_0) değerleri için akustik eksen ve radyal eksen boyunca ilk dört harmoniğinin akustik basınç alanları ile ilgili ölçüm sonuçları verilmiştir. Daha sonra, yine ilk dört harmoniğin iki boyutta (y - z düzlemi üzerinde) kontür çizimleri ve üç boyutlu grafikleri sunulmuş, tüm tank hacminin taranması ile elde edilen üç boyutlu lineer olmayan akustik basınç alanları gösterilmiştir. Ayrıca bu bölümde, Ref [73]'de verilen ve dikdörtgen kaynağın oluşturduğu akustik basınç alanlarının hesaplanması için kullanılan programın dairesel kaynak için değiştirilmesi ile elde edilen teorik sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bölümün sonunda ise, alt harmoniklerin ultrasonik görüntüleme sistemlerinde kullanılabilirliği tartışılmıştır.

RF güç yükseltecinin elle ayarlanıyor olması ve üzerinde belirlenmiş toplam dokuz skalanın bulunması nedeniyle deneysel ölçümler için toplam dokuz P_0 değerleri seçilmiştir. Her bir skala, farklı bir P_0 değeri anlamına gelmektedir.

Deneysel ölçümler, iki farklı eksen boyunca, yüzeysel ve hacimsel ölçümler olmak üzere toplam dört kategoride yapılmıştır. Bunlar;

1. **Akustik eksen ölçümleri:** Transducer düzlemine dik doğrultu boyunca yapılan ölçümleri kapsamaktadır.
2. **Radyal eksen ölçümleri:** Transducerin tam ortasında havuz tabanına paralel olan eksen boyunca transducerdan belli mesafelerde yapılan ölçümleri kapsamaktadır.
3. **İki boyutta ölçümler:** Akustik eksen ve radyal eksen tarafından oluşturulan yüzeyde yapılan ölçümleri kapsamaktadır.

4. *Üç boyutta ölçümler:* Tüm havuz hacminin taranması ile yapılan ölçümleri kapsamaktadır.



Şekil 6.1: Ölçümlerin yapıldığı eksenlerin şematik gösterimi.

Bu eksenler, Şekil 6.1’de verilmektedir. x eksen dikey eksen yönünü, y eksen radyal eksen yönünü, z eksen akustik eksen yönünü göstermektedir.

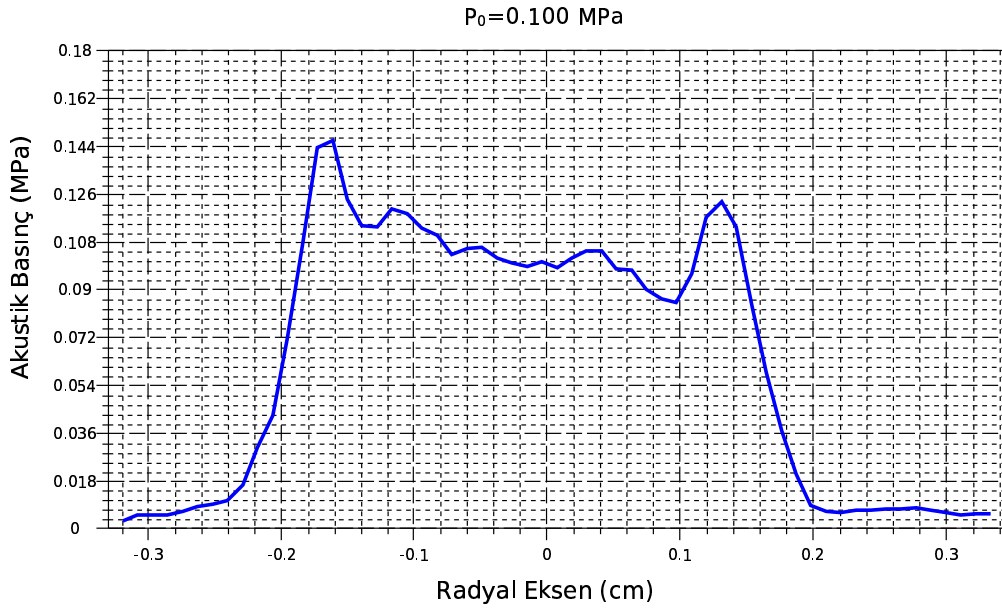
Akustik bir kaynağın oluşturduğu basınç alanının temel bileşenin (1. Harmonik) akustik eksen üzerindeki değişimi yakın alan ve uzak alan şeklinde iki temel bölgede incelenebilir [74]. Kaynağın yakınındaki bölgelere yakın alan denir ve bu bölge içerisinde difraksiyon etkisi baskındır. Benzer şekilde kaynaktan uzak bölgelere ise, uzak alan denir ve bu bölge içerisinde, lineer olmayan etkiler ve soğurma mekanizması baskındır. Yakın alan ile uzak alan sınırı akustik eksen boyunca $z = \frac{ka^2}{2} = \frac{\pi a^2}{\lambda}$ koordinatına denk gelmektedir [21]. Burada z yakın alan ile uzak alan sınırını, k dalga sayısını, a dairesel kaynağın yarıçapını ve λ dalga boyunu göstermektedir.

6.2 Başlangıç Basınç Değerleri (P_0)

Başlangıç basınç değeri, transducer tarafından oluşturulan, transducerin tam yüzeyindeki basınç değerini ifade eder ve P_0 ile gösterilir. Bu değer transducerin ortama aktardığı güç ile orantılıdır. Akustik basınç alanları karakteristik olarak P_0 değerine göre değişim gösterir. Bu etki, harmonik oluşumlarından akustik zayıflamaya kadar tüm lineer olmayan etkiler üzerinde kendini göstermektedir. Bu nedenle P_0 değerinin tüm akustik sistemler için hassas olarak bilinmesi önemlidir.

Tüm P_0 değerleri deneysel ölçümler yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde deneysel olarak P_0 değerlerinin bulunması için iki temel yöntem mevcuttur. Birinci yöntem için, transducerin karakteristik özelliklerinin bilinmesini gerekir. Transducer, her giriş frekansında ve giriş potansiyelinde belli bir güç üretir. Bu güç, o frekans ve potansiyel değeri için P_0 değeri ile orantılıdır. Genel olarak transducerin ürettiği bu güç değerleri üretici firma tarafından verilmektedir. Bu durumda istenilen frekansta giriş potansiyeli ölçülerek P_0 değeri bulunabilir. İkinci yöntem ise, P_0 değerinin bir hydrophone yardımı ile ölçülmesidir [75, 76, 77]. Yukarıda bahsedildiği üzere P_0 değeri transducerin tam yüzeyinde oluşan basınç değerini ifade ettiğine göre, transducera çok yakın mesafelerde yapılan ölçümlerin yaklaşık olarak P_0 değerine eşit olması gerekir. Bunun sebebi ise, transducera bu kadar yakın mesafelerde ultrasonik dalganın henüz bozulmaya uğramamasıdır.

Yapılan bu çalışmada, transducerin karakteristik özelliklerinin elimizde bulunmaması nedeniyle P_0 değerlerinin saptanması amacıyla yukarıda anlatılan ikinci yöntem kullanılmıştır. Tüm P_0 değerleri, transducerdan 1 cm uzaklıkta radyal eksen boyunca yapılan ölçümler sonucu elde edilmiştir.



Şekil 6.2: Başangıç basınç değerlerinin hesaplanmasında kullanılan örnek ölçüm sonuçları.

Şekil 6.2'de P_0 değerlerinin bulunması amacıyla yapılan örnek ölçümün grafiği gösterilmektedir. Transducerin çapının 38 mm olması nedeniyle -19 mm ve +19 mm'den sonra ani düşüş görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur. -19 mm ve 19 mm'den sonra artık transducerin yüzeyinden uzaklaşmaya başlamıştır ve o noktalar için bir ultrasonik dalga kaynağı mevcut değildir. Zaten ideal bir kaynak için kaynağın yüzeyinde basınç hep aynı değerde olmalı, diğer tüm uzayda bu değer sıfır olmalıdır.

6.3 Akustik Eksen Ölçümleri

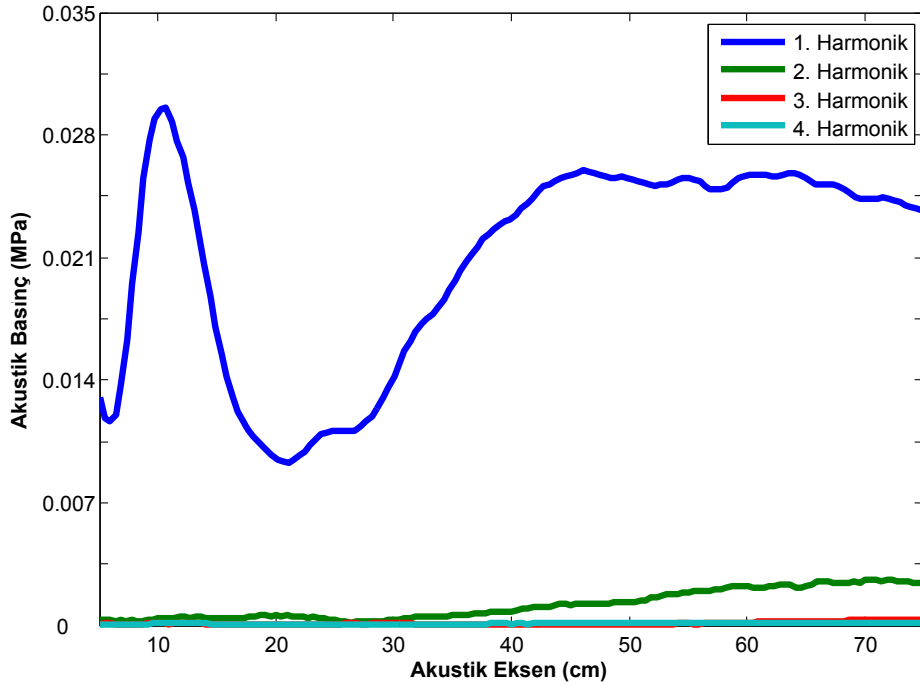
Akustik eksen, akustik basınç alanlarının karakteristik özelliklerini en belirgin şekilde ortaya koyan ve özellikle akustik difraksiyon sonucu ortaya çıkan minimum ve maksimumlarının yapısını anlamamıza yardımcı olan ölçüm eksendir.

Akustik eksen boyunca yapılan tüm ölçümler transducer'a 5 cm uzaklıktan başlanıp, 77 cm uzaklıkta tamamlanmıştır. 5 cm ile 77 cm arasında 0.45 cm aralıklarla toplam 160 ölçüm yapılmıştır. Hydrophone'nun stepper motorla bağlantısını sağlayan çubuktaki titreşimi minimuma indirerek ortamı denge konumuna getirmek amacıyla her ölçüm arasında 1 saniyelik bir bekleme süresi bırakılmıştır. Toplam dokuz farklı P_0 değeri için ölçüm gerçekleştirilmiştir. Fakat grafik kargaşasından kaçınmak amacıyla bu tezde akustik eksen için toplam beş sonuç verilmiştir.

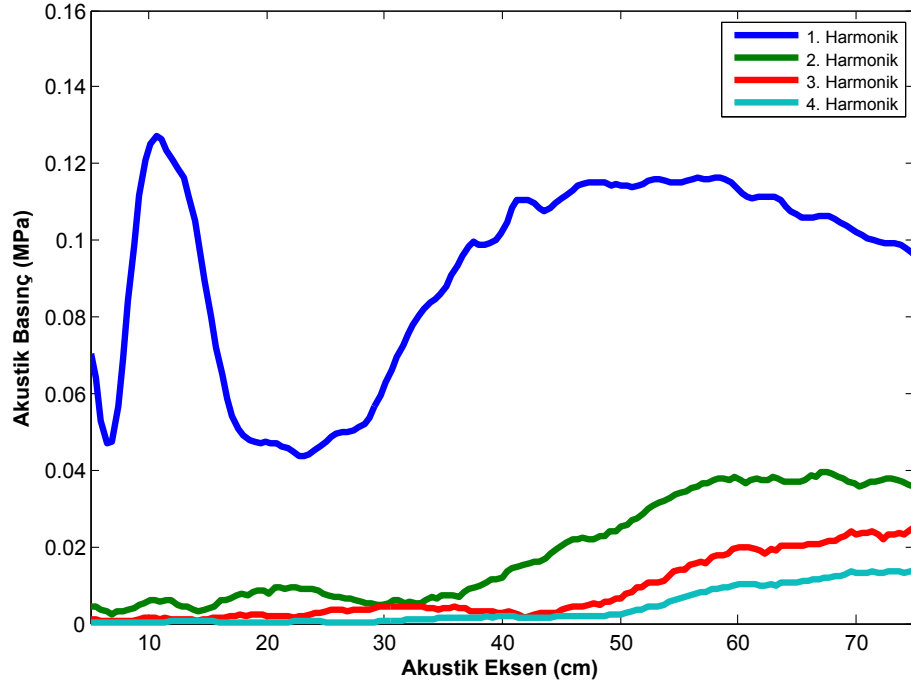
Şekil 6.3 ile Şekil 6.7 arasında $f = 2.25$ MHz frekans ve sırası ile $P_0=0.015$ MPa, $P_0=0.055$ MPa, $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa, $P_0=0.145$ MPa P_0 değerleri için akustik eksen boyunca ilk dört harmoniğin akustik basınç değişimleri gösterilmektedir. P_0 değerinin arttırılmasıyla, tüm harmoniklerin akustik eksen boyunca akustik basınçlarında bir artış olduğu gözlenmektedir. Fakat tüm P_0 değerleri için 1. harmoniğin genel görüntüsü aşağı yukarı aynı kalmaktadır. Şekil 6.3'de henüz alt harmonik oluşumu başlamamışken, daha yüksek P_0 değerlerine çıkıldıkça alt harmoniklerin oluşumları belirgin şekilde görülmektedir. Ayrıca tüm sonuçlar için 1. harmoniğin birinci maksimum değeri son maksimum değerinden daha büyüktür.

Alt harmonik oluşumu arttıkça 1. harmoniğin genliği azalma içine girmektedir. Bu ise, ana harmoniğin enerjisinin bir kısmının alt harmoniklere aktarıldığı anlamına gelir. Kaynaktan yeteri kadar uzaklaşıldıkça ortamın soğurma mekanizmasının etkisinin diğer tüm lineer olmayan etkilere göre baskın olması nedeniyle, tüm harmoniklerin genliğinde, son maksimum (ana harmonik için 45-55 cm, alt harmonikler için 50-60 cm) değerinden sonra bir azalma gözlemlenmektedir.

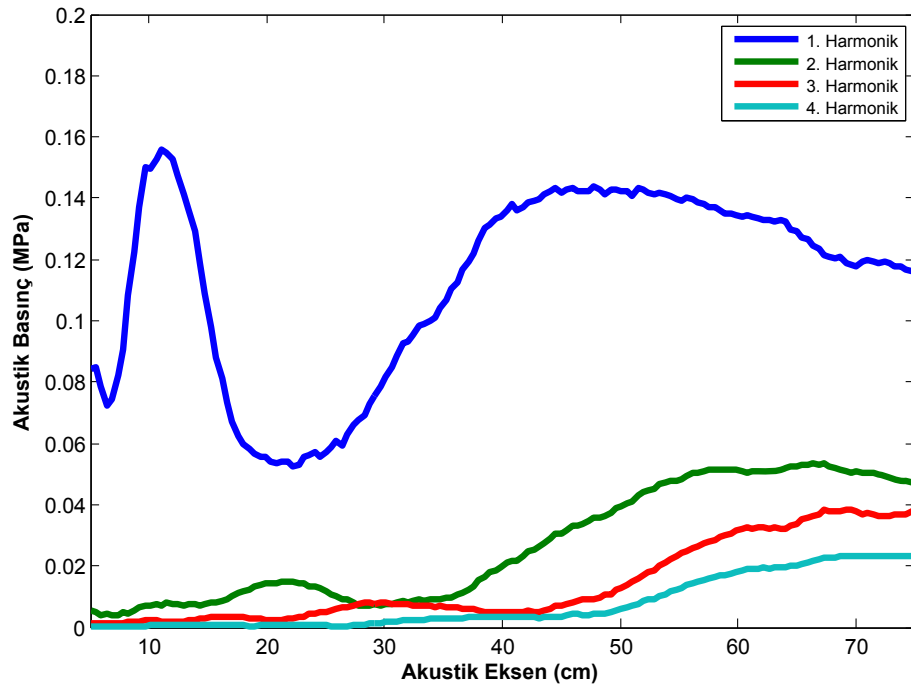
P_0 değerinin artmasıyla birlikte son maksimumun oluşum mesafesinde azalma gözlemlenmektedir. Dikkat edilecek olursa, yüksek P_0 değerleri için alt harmonikler transducera daha yakın mesafelerde oluşmaya başlamaktadır. Alt harmoniklerin ana harmonikte meydana gelen enerji kaybından dolayı oluştuğu düşünüldüğünde, son maksimumun kaynağa daha yakın mesafelerde oluşmasının sebebi anlaşılabilir. Bu mesafe, $P_0 = 0.015$ MPa'da yaklaşık 55 cm'de iken $P_0 = 0.145$ MPa'da yaklaşık 45 cm'ye kadar düşmektedir.



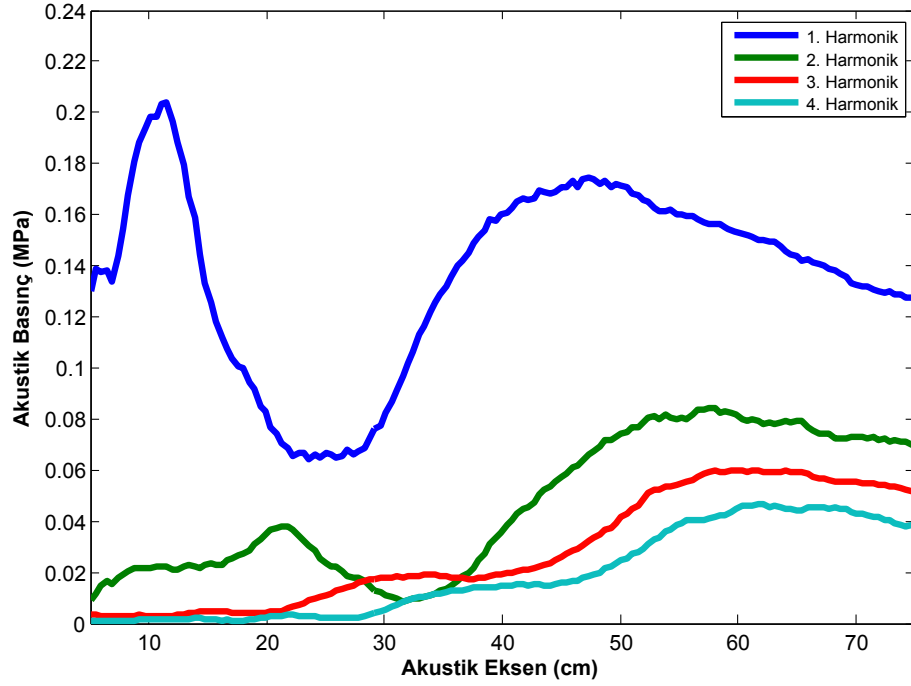
Şekil 6.3: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.015$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.



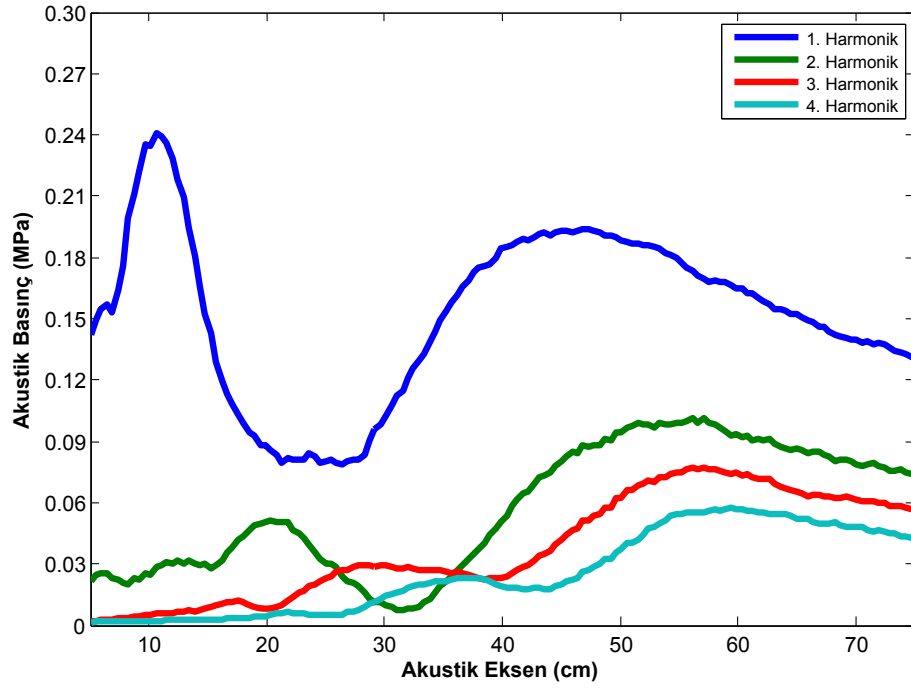
Şekil 6.4: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.055$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.



Şekil 6.5: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.



Şekil 6.6: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.



Şekil 6.7: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin akustik basıncının akustik eksen boyunca değişimi.

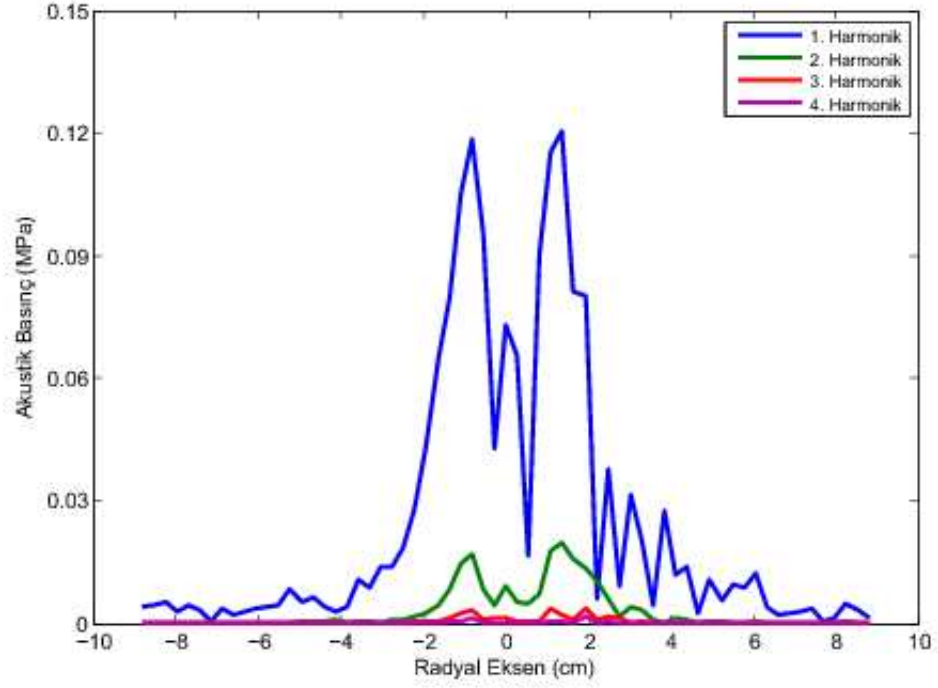
6.4 Radyal Eksen Ölçümleri

Radyal eksen ölçümleri, radyal eksen boyunca -8.8 cm ile +8.8 cm arasında gerçekleştirilmiştir. Toplam 17.6 cm mesafeye denk gelen bu aralık, 0.275 cm adımlarla toplam 65 ölçüm yapılarak tamamlanmıştır. Akustik eksen boyunca yapılan ölçümlerde olduğu gibi her ölçüm arasında 1 saniyelik bir bekleme süresi bırakılmış ve toplam dokuz P_0 değeri için ölçüm alınmıştır. Radyal eksen ölçümlerine, akustik eksen boyunca transducerdan 5 cm uzaklıkta başlanmış ve 60 cm'ye kadar 5.5 cm aralıklarla tekrarlanarak tamamlanmıştır. Fakat sadeliğin korunması amacıyla, radyal eksen ölçüm sonuçları toplam üç P_0 değeri için akustik eksen boyunca transducera dört farklı uzaklıkta sunulmuştur.

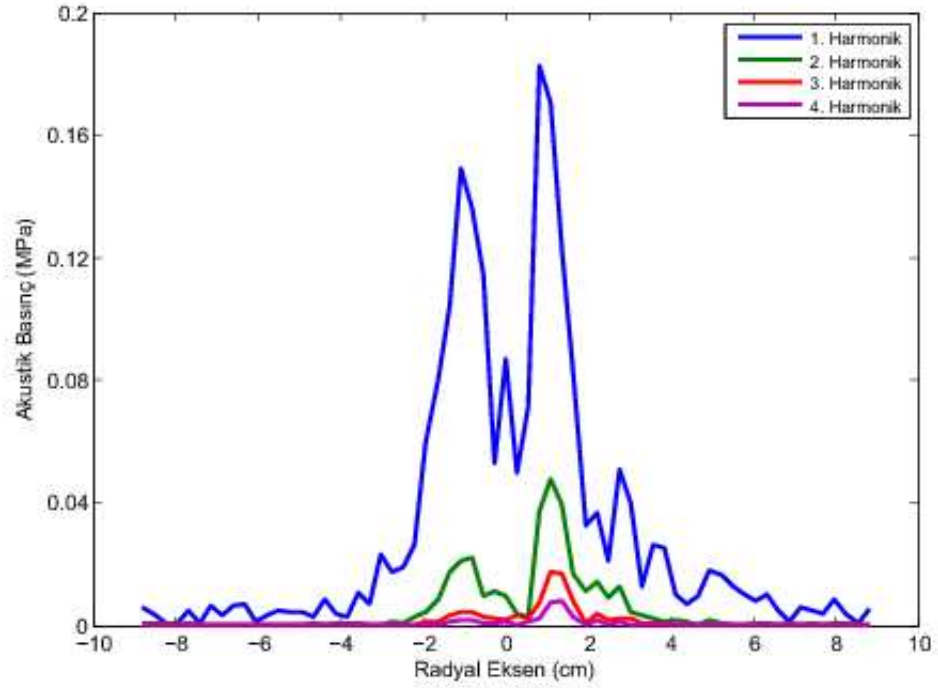
Şekil 6.8 ile Şekil 6.10 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası ile $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 16 cm uzaklıkta radyal eksen boyunca akustik basınç alanlarının değişimi gösterilmektedir. Her üç şekil içinde, 1. harmoniğin genel görüntüsü benzerlik göstermektedir. Fakat yüksek P_0 değerleri için genlikte bir artış söz konusudur. Her üç durum için merkezde küçük bir lob, yaklaşık 1.5 cm ile 2 cm ve -1.5 ile -2 cm arasında iki büyük yan lob görülmektedir. Merkezdeki küçük lob akustik eksen boyunca yapılan ölçümlerden de görüldüğü üzere, akustik eksen boyunca son minimuma yaklaşıldığını göstermektedir. Ayrıca P_0 değerinin artması ile birlikte merkezde bulunan lobun, yanlarda bulunan loblara oranının küçülmesi, daha önceki kesimde bahsedildiği üzere, P_0 değerinin artması ile birlikte akustik eksen boyunca son minimumun transducera yaklaştığının bir göstergesidir. Üç büyük lobun oluşmasının sebebi ise, kaynağa yakın mesafelerde difraksiyon etkisinin diğer lineer olmayan etkilerden daha baskın olmasıdır.

Şekil 6.8'de 2. harmonik belirginken, 3. ve 4. harmoniklerin henüz oluşmadığı, Şekil 6.9'da, 2. ve 3. harmoniğin oluştuğu, fakat 4. harmonik henüz oluşmadığı ve Şekil 6.10'de, tüm harmonikler belirgin şekilde oluştuğu görülmektedir.

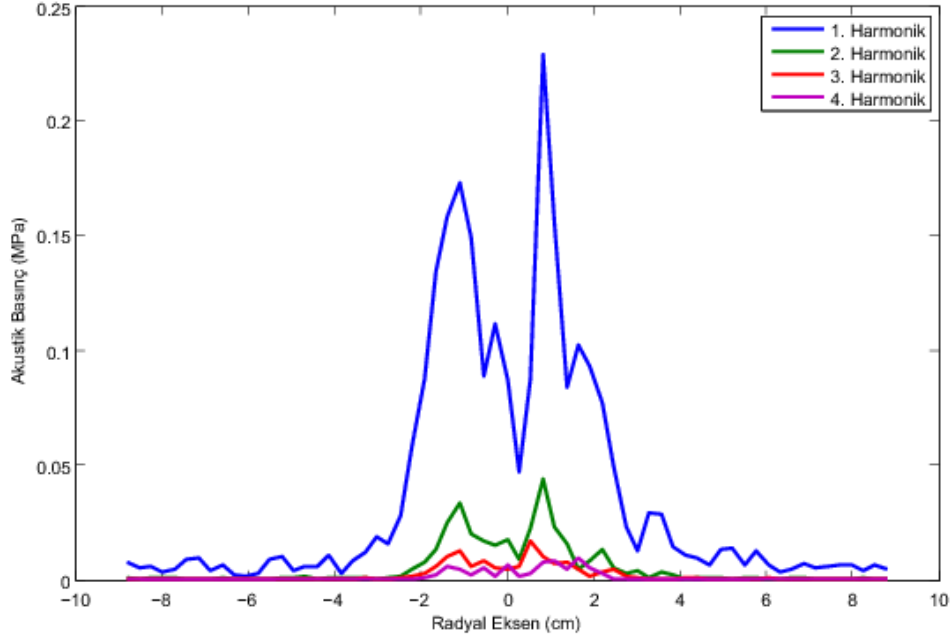
Genel olarak her üç şekilde 2. harmoniğin görüntüsü 1. harmoniğe benzemektedir. Ortada küçük bir lob, kenarlarda iki büyük yan lob şeklindedir. Bu sonuç, yine 1. harmonikte olduğu gibi 2. harmoniğin de bir minimuma gittiğini gösterir.



Şekil 6.8: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 16 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

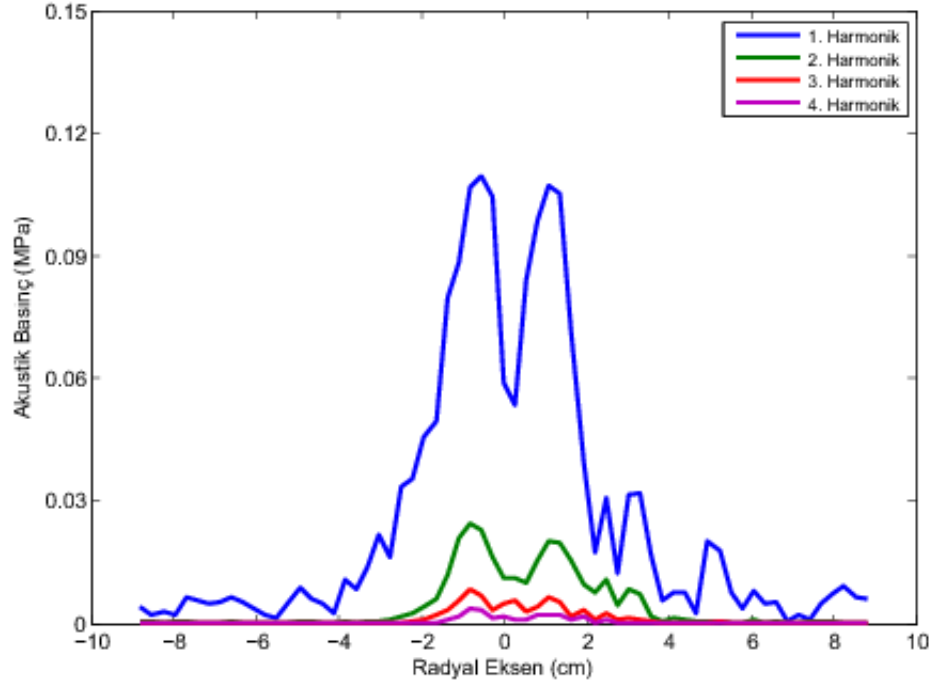


Şekil 6.9: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 16 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

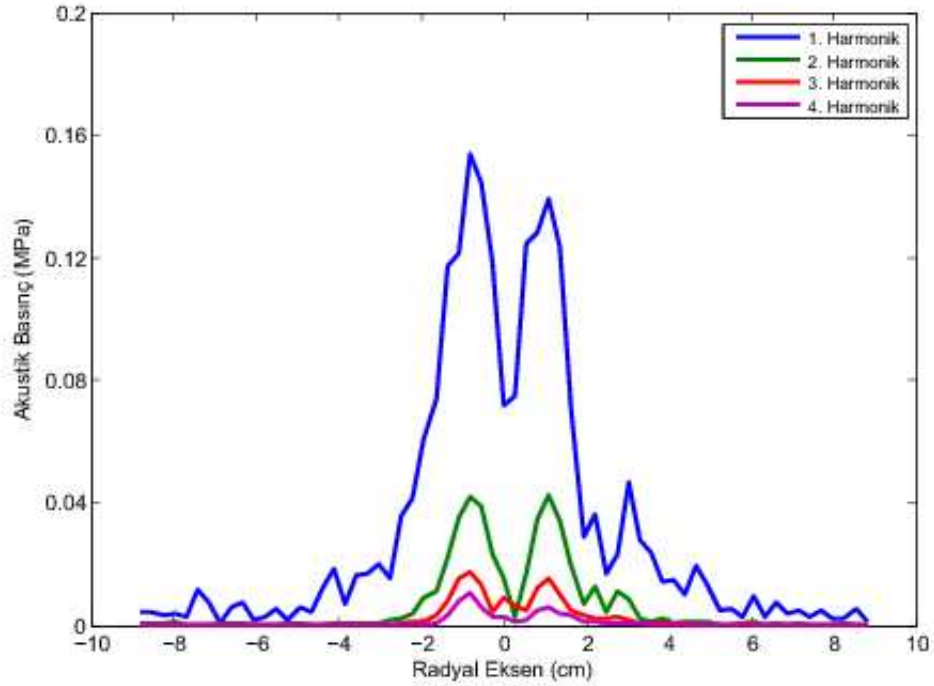


Şekil 6.10: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 16 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

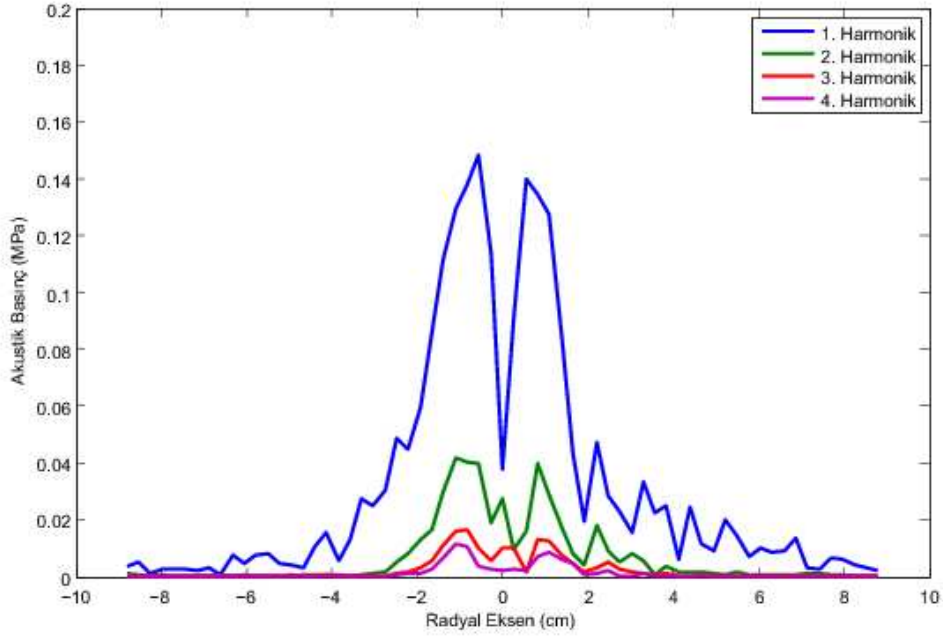
Şekil 6.11 ile Şekil 6.13 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 27 cm uzaklıkta radyal eksen boyunca akustik basınç alanlarının değişimi gösterilmektedir. Her üç şekilde 1. ve 2. harmoniğin genel görüntüsü benzerlik göstermektedir. Transducardan 16 cm uzaklıkta yapılan radyal eksen ölçümlerinden farklı olarak merkezde bir lobun olmadığı fakat yan lobların halen mevcut olduğu görülmektedir. Bu kesim noktası, akustik eksen boyunca son minimumu gösterir. Transducerdan uzaklaştıkça alt harmonikler belirginleşmeye başlamıştır.



Şekil 6.11: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 27 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

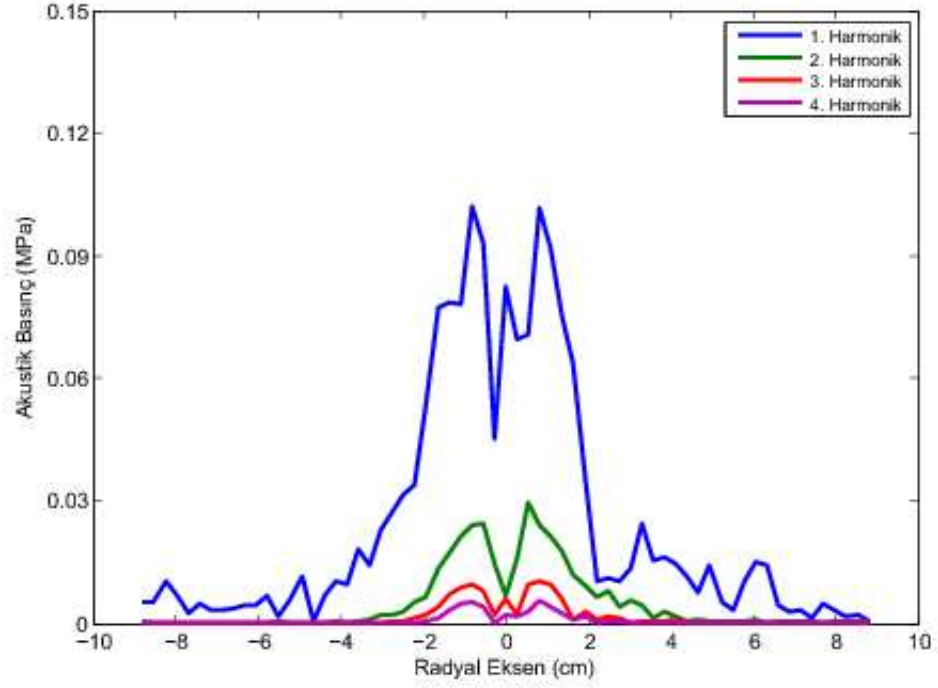


Şekil 6.12: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 27 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

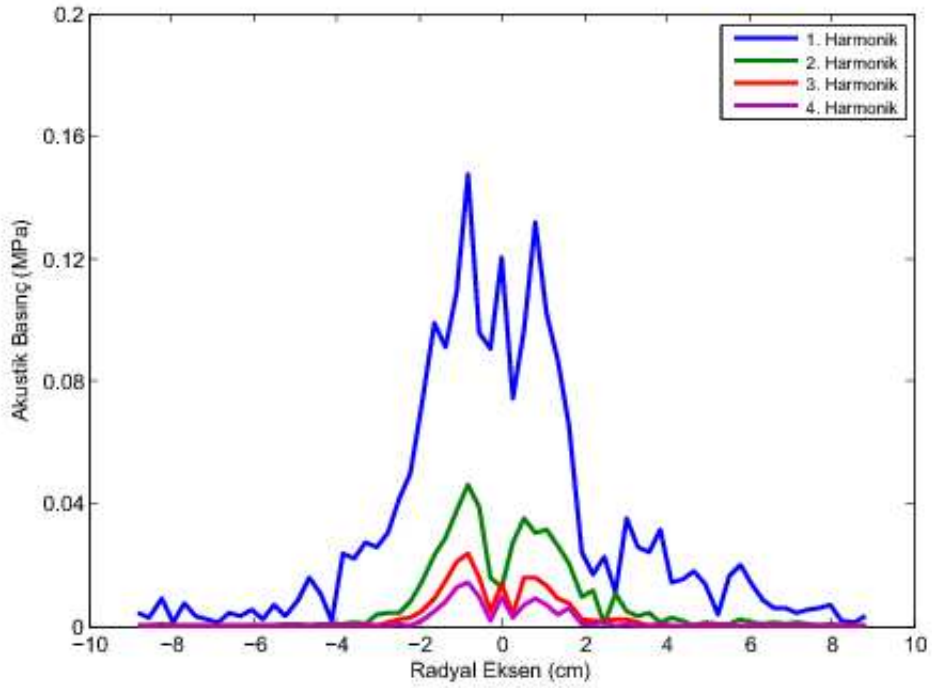


Şekil 6.13: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 27 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

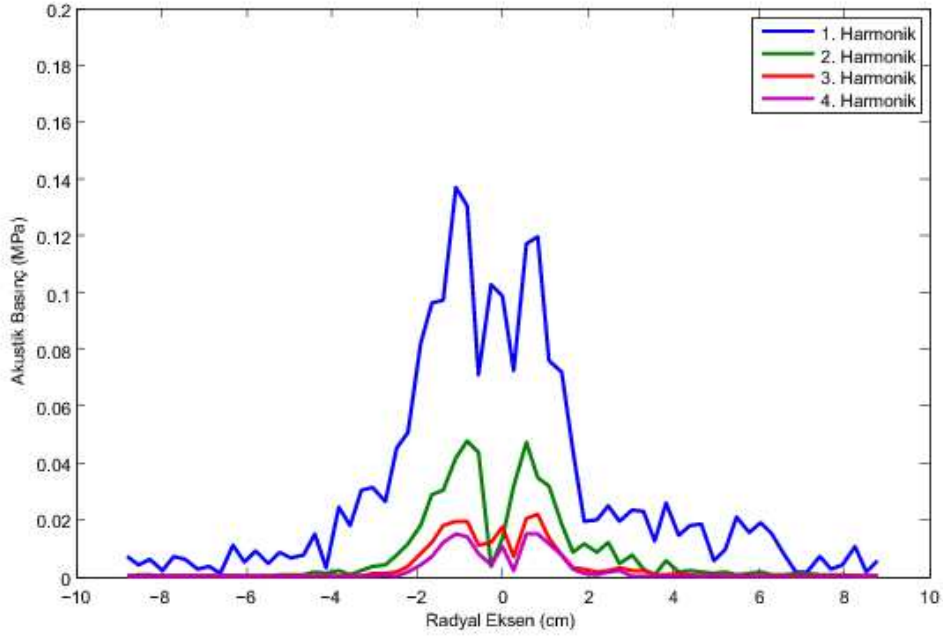
Şekil 6.14 ile Şekil 6.16 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 38 cm uzaklıkta radyal eksen boyunca akustik basınç alanlarının değişimi gösterilmektedir. 1. harmonikte merkezdeki lobun büyümeye başladığı görülmektedir. Fakat bu ana lob, genlik olarak henüz yanda bulunan iki yan lobdan daha küçüktür. 2. harmonikte ise, merkezdeki lobun ortadan kalktığı sadece merkezden yaklaşık 1 cm uzaklıkta iki yan lobun olduğu görülmektedir. 2. harmoniğin, bu kesim noktasında bir minimuma gittiği söylenebilir. 3. ve 4. harmoniklerde ise, merkezde bir lob ve yanlardaki birer yan lob iyice belirginleşmiştir. Bu kesim noktası için 3. ve 4. harmoniklerin genlikleri bir artış içine girmiştir.



Şekil 6.14: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 38 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

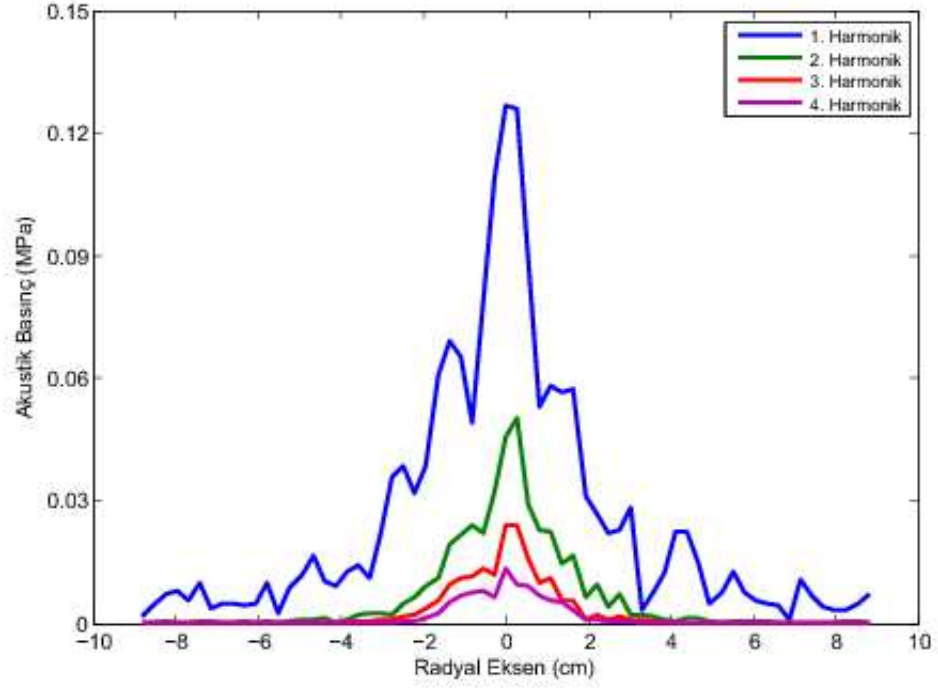


Şekil 6.15: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 38 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

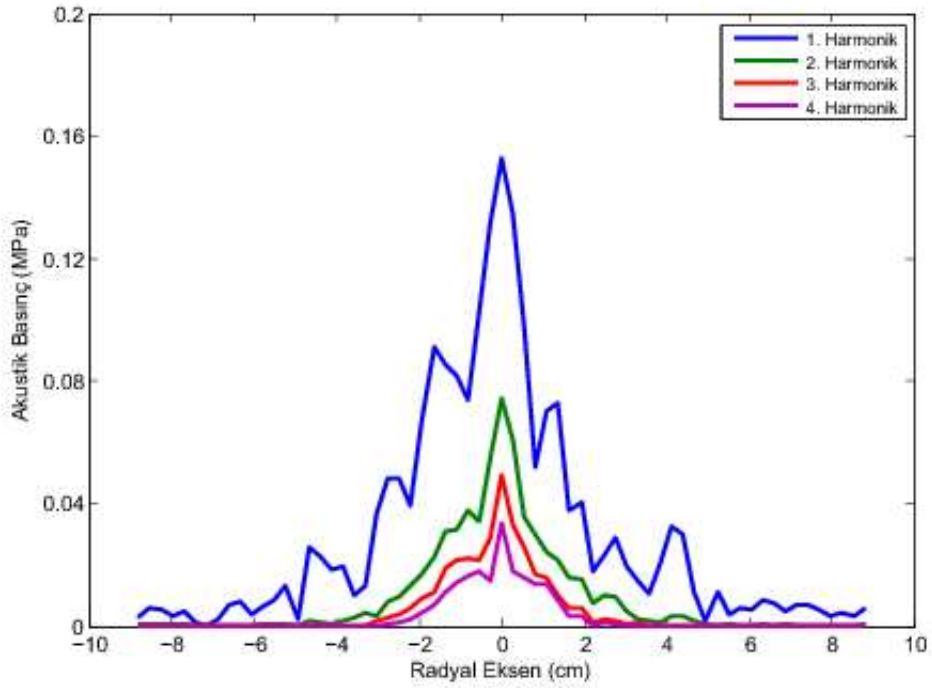


Şekil 6.16: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 38 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

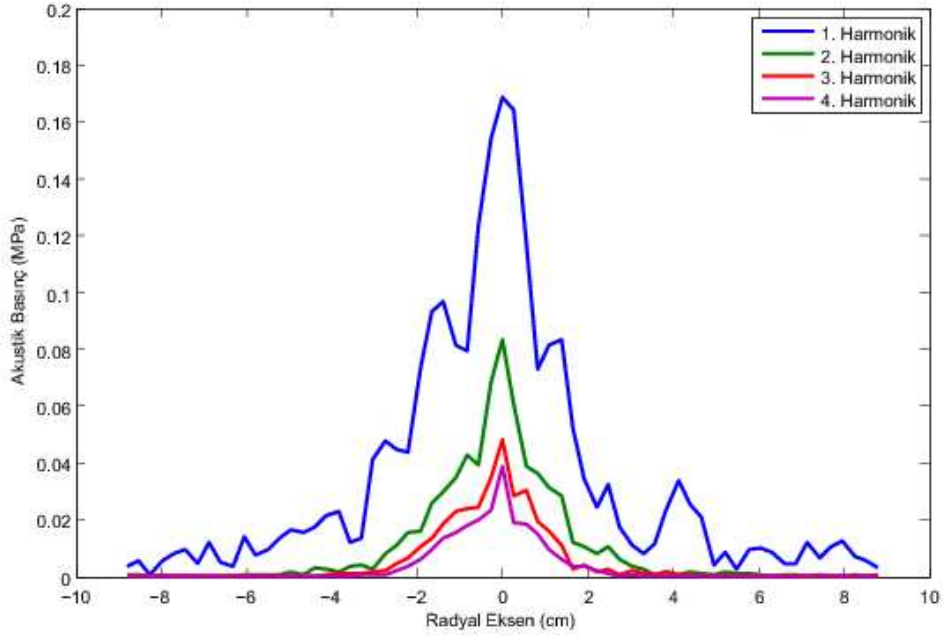
Şekil 6.17 ile Şekil 6.19 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 60 cm uzaklıkta radyal eksen boyunca akustik basınç alanlarının değişimi gösterilmektedir. Bu kesim noktasında, tüm P_0 değerleri için alt harmoniklerin iyice belirginleştiği ve her üç şekilde dört harmoniğin de genel görüntüsünün benzerlik içinde olduğu söylenebilir. Bu kesim noktası için merkezdeki ana lob, diğer tüm yan loblardan daha büyüktür. Daha önceki kesim noktalarında tam olarak gözlemlenemeyen simetrik yeni lobların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu ise, bu kesim noktasının uzak alan içerisinde yer aldığı anlamına gelir.



Şekil 6.17: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için transducerdan 60 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.



Şekil 6.18: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için transducerdan 60 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.



Şekil 6.19: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için transducerdan 60 cm kesim noktasında ilk dört harmoniğin akustik basıncının radyal eksen boyunca değişimi.

Şekil 6.8 ile Şekil 6.19 arasındaki tüm şekillerden görülebileceği gibi, tüm uzaklıklar için 1. harmoniğin demet genişliği diğer tüm alt harmoniklerin demet genişliğinden daha büyüktür. Kesim 4.2.1'de bahsedildiği üzere demet genişliği akustik görüntüleme kalitesini etkileyen temel etkenlerin başında gelmektedir. Demet genişliğinin daralması görüntü kalitesini arttırmaktadır. Sonuç olarak, alt harmoniklerin demet genişliklerinin 1. harmoniğe göre daha dar olması, akustik görüntüleme sistemlerinde bu harmoniklerin kullanılmasının bir avantaj sağlayabileceği anlamına gelmektedir [81, 82, 83]. Bu bölümün sonunda alt harmoniklerin ultrasonik görüntüleme sistemlerinde kullanılmasının avantajları ayrıntıları ile anlatılacaktır.

Sıfır noktasının transducerin tam merkezi olduğuna kabul edilirse, ideal bir dalga demeti için şeklin sağ tarafının ve sol tarafının simetrik olması beklenir. Fakat transducerin tam simetrik bir dalga demeti üretmemesinin bir sonucu olarak, tüm radyal eksen ölçümlerinde merkezden radyal yönde ilerledikçe simetride bir bozulma gözlemlenmektedir.

6.5 İki Boyutlu Ölçümler

İki boyutta ölçümler için 17.6×72 cm²'lik yüzey alanı taranmıştır. 17.6 cm mesafeye denk gelen radyal eksen için, 0.275 cm adımlarla toplam 65 ölçüm, 72 cm mesafeye denk gelen akustik eksen için, 0.45 cm adımlarla toplam 160 ölçüm yapılmıştır. Seçilen bu yüzeyde toplam **10400** adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan her ölçüm arasında 1 saniyelik bir bekleme süresi bırakılmış ve toplam dokuz P_0 değeri için ölçüm yapılmıştır. Tipik bir ölçüm süresi yaklaşık 4 saat sürmektedir.

6.5.1 Kontür ve Üç Boyutlu Çizimler

İlk dört harmoniğe ait akustik basınç alanlarının değişimi, akustik eksen ve bazı radyal eksen boyunca yukarıda sunulan grafikler yardımı ile açıklanmaya çalışılmasına rağmen, bu sonuçlarda değerlendirilmemiş bir çok ara bölge bulunmaktadır. Bu nedenle akustik basınç alanlarının daha açık ve anlaşılır bir şekilde görülebilmesi için hem akustik ekseni hem de radyal ekseni içeren iki boyutlu kontür ve üç boyutlu grafikler elde edilmiştir. Bahsedilen kontür ve üç boyutlu grafikler LabPlot [78] ve Matlab [79] programları yardımı ile çizilmiştir.

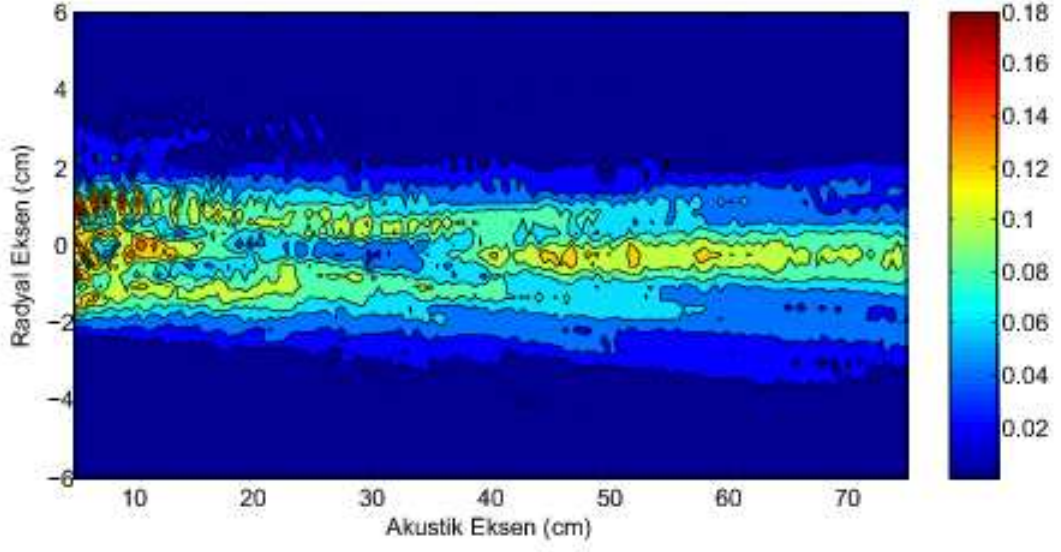
Şekil 6.20 ile Şekil 6.25 arasında, $f = 2.25$ MHz ve sırası ile $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için 1. harmoniğin basınç alanlarının kontür ve üç boyutta çizimleri gösterilmektedir. Daha önceki kesimde radyal eksen çizimlerinde verilen sonuçlarda da görüldüğü gibi yakın alanda ortada bir ana lob ve radyal yönde iki yan lob görülmektedir. Bu alan içinde yan lobların genliği büyük ve genlikçe ana loba oldukça yakındır. Uzak alanda ise, akustik eksen boyunca büyük bir ana lob ve merkezden uzaklaştıkça genlikleri azalan yan loblar görülmektedir. P_0 değeri arttıkça bu yan loblar, merkezden uzaklaşmakta ve belirginleşmektedir. $P_0=0.080$ MPa değeri için ilk yan lobun maksimum değerinin merkezden uzaklığı yaklaşık 1.8 cm iken, $P_0=0.145$ MPa değeri için yaklaşık 2 cm civarındadır. Bu ise, P_0 değerinin artması ile birlikte dalganın demet genişliğinin arttığı anlamına gelir.

Şekil 6.26 ile Şekil 6.31 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için 2. harmoniğin basınç alanlarının

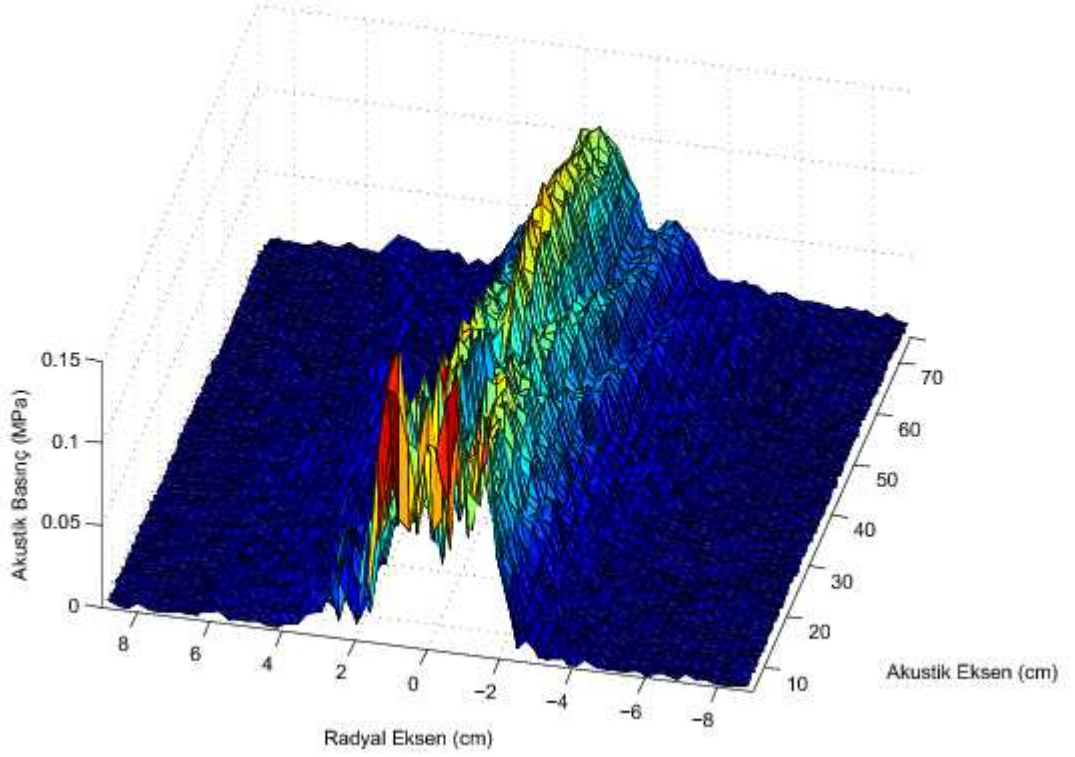
kontür ve üç boyutta çizimleri görülmekte ve yakın alanın sonlarına doğru belirginleştiği anlaşılmaktadır. 2. harmonik, P_0 değerinin artması ile birlikte yakın alan içerisinde karmaşık bir yapı, uzak alan içerisinde ise, daha basit bir yapı sergilemektedir. Yakın alan içinde, akustik eksen üzerindeki basınç alanı, çok küçük değerlere sahip olmasına rağmen, radyal doğrultuda akustik eksenin her iki yanında basıncın değerinin hissedilir biçimde arttığı gözlenmektedir. Uzak alanda ise, maksimum bir ana lob ve yüksek P_0 değerleri için radyal yönde bir tane yan lob görülmektedir. Ana lobun baskın olmasının sebebi ise, radyal yönde basınç azalmasıdır.

Şekil 6.32 ile Şekil 6.37 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için 3. harmoniğin basınç alanlarının kontür ve üç boyutta çizimleri görülmektedir. 3. harmonik yakın alan ile uzak alanı ayıran sınır bölgesi civarında belirginleşmekte ve uzak alanın sonlarına doğru maksimum genliğe ulaşmaktadır.

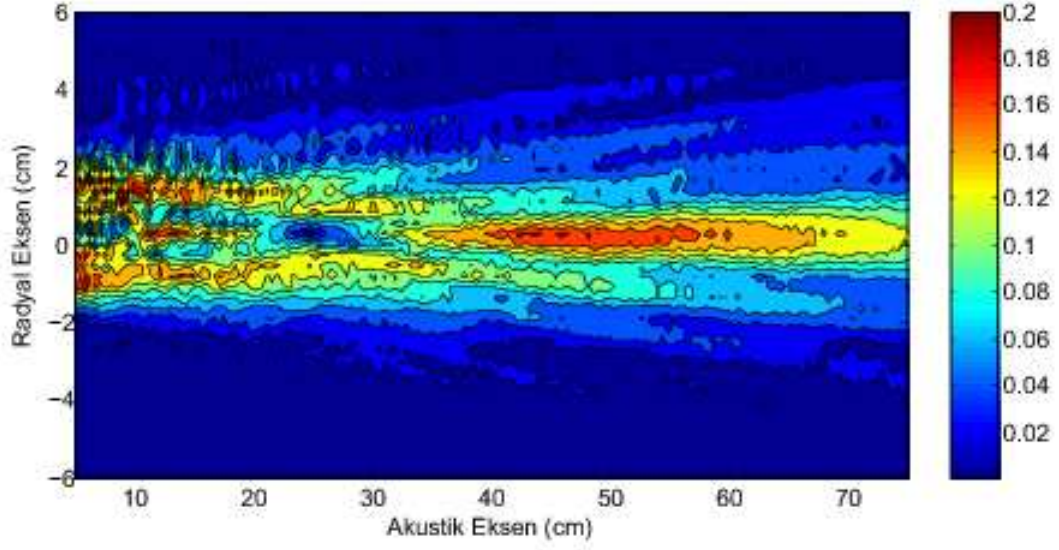
Şekil 6.38 ile Şekil 6.43 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.115$ MPa ve $P_0=0.145$ MPa değerleri için 4. harmoniğin basınç alanlarının kontür ve üç boyutta çizimleri görülmektedir. 4. harmonik uzak alan içerisinde oluşmaya başlamakta ve genel görüntü olarak 3. harmoniğe benzemektedir. Fakat beklendiği üzere genliği daha küçüktür.



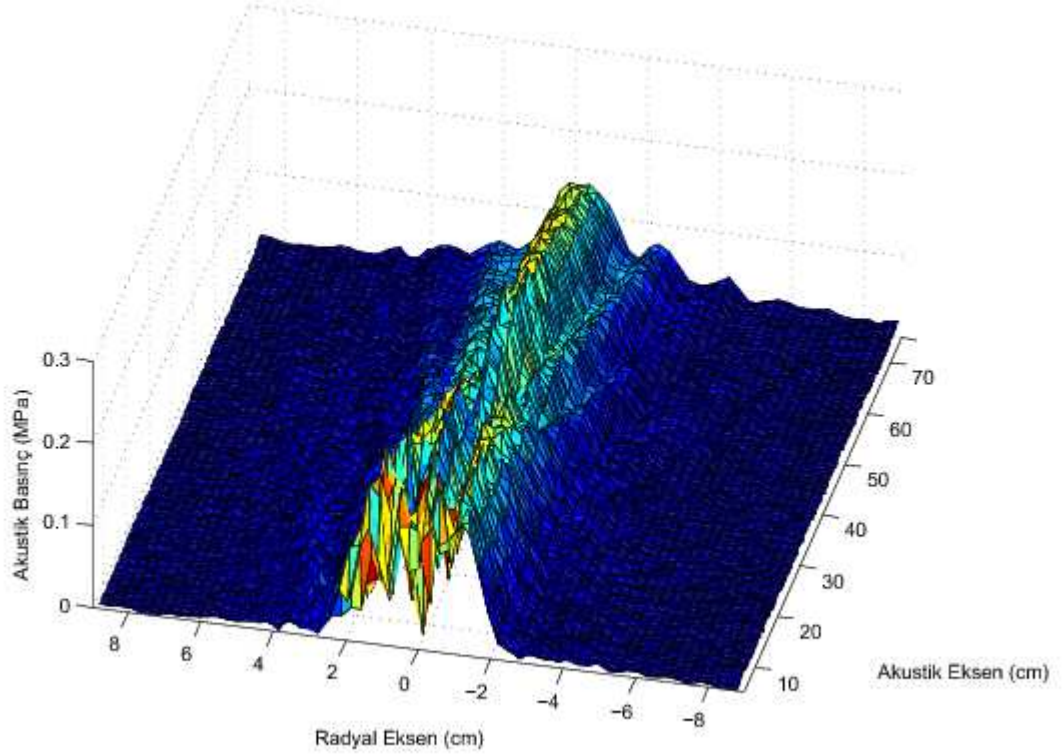
Şekil 6.20: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



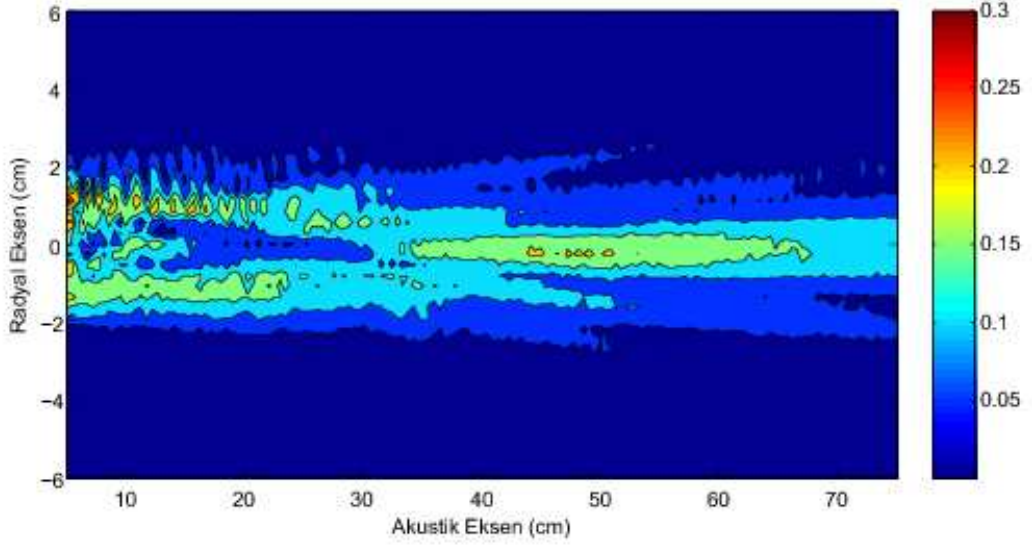
Şekil 6.21: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



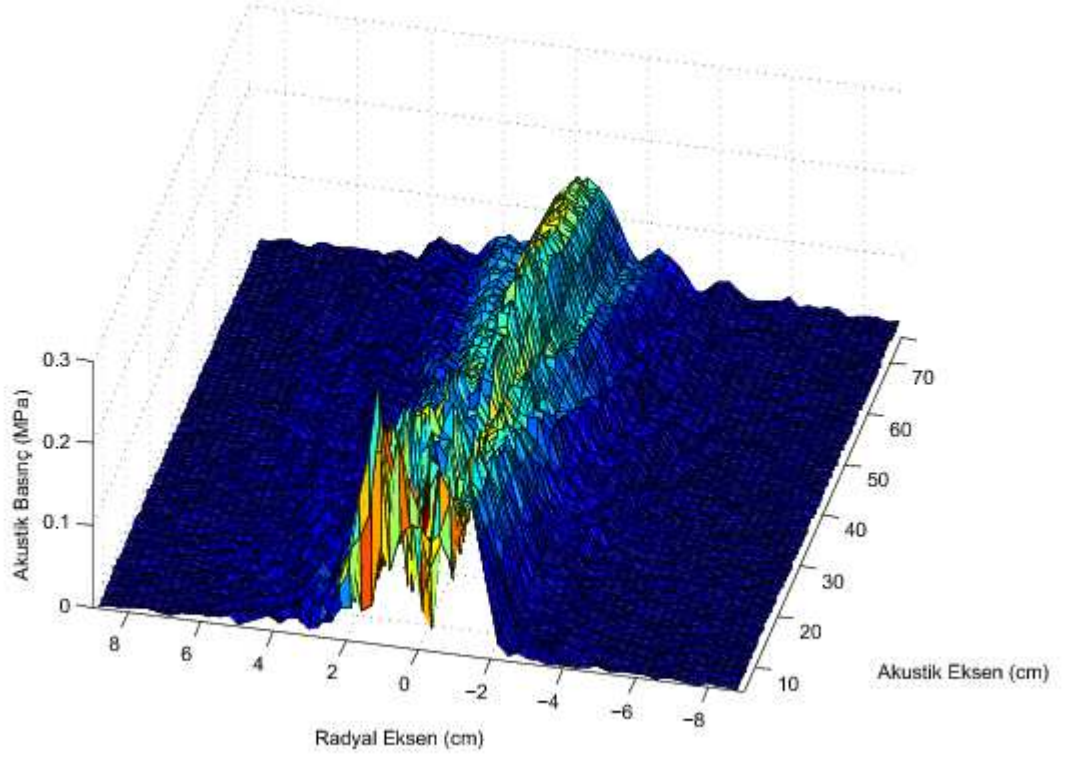
Şekil 6.22: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



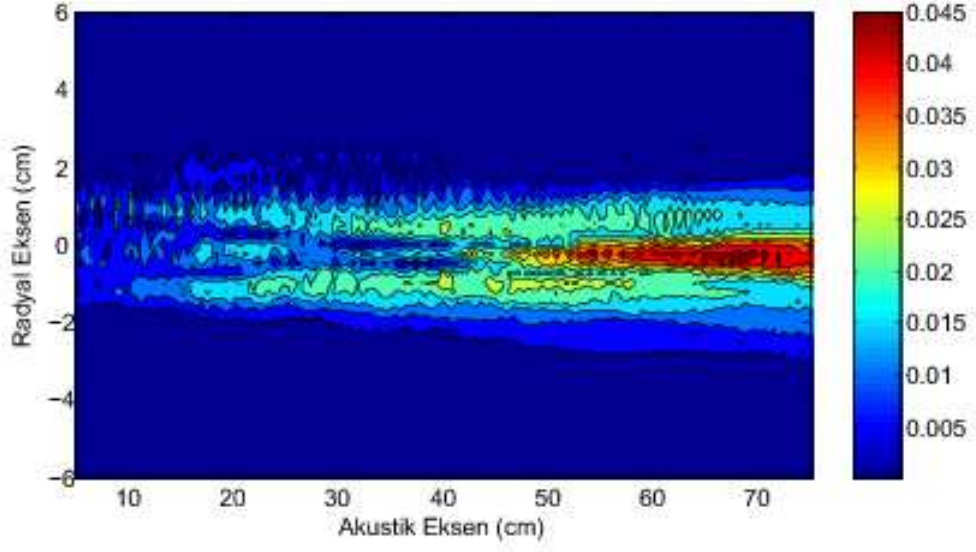
Şekil 6.23: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



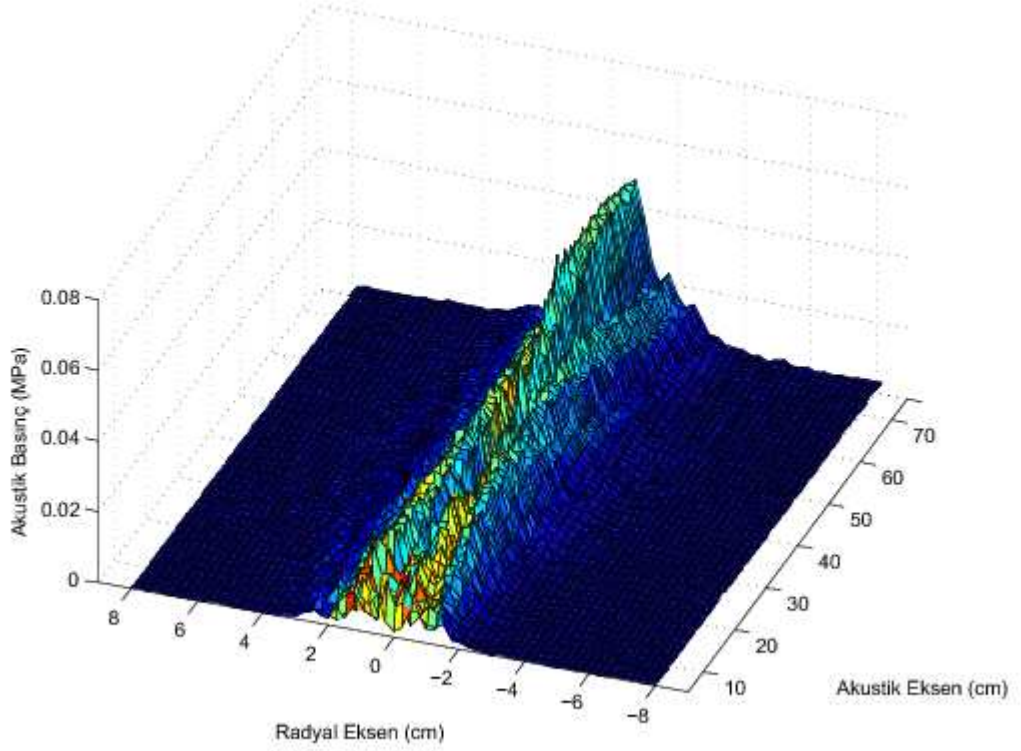
Şekil 6.24: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



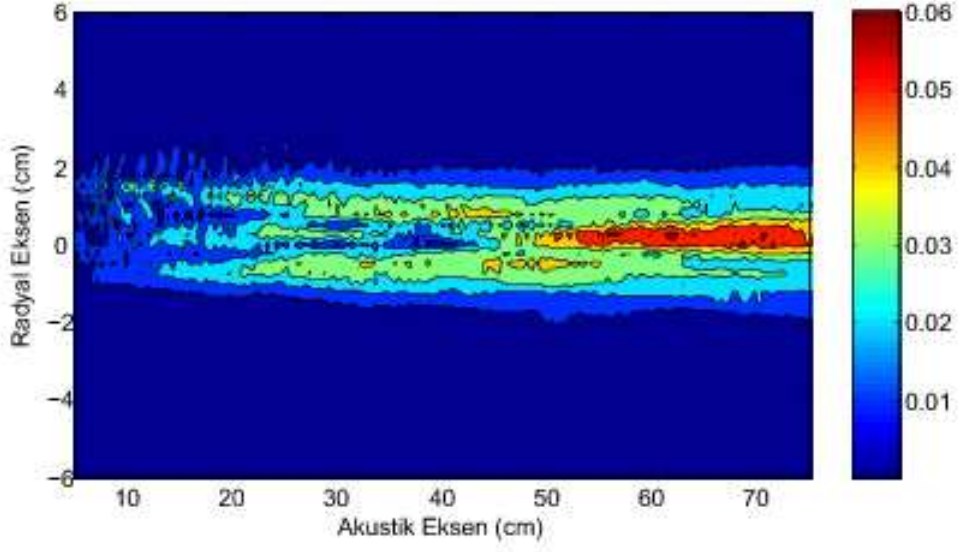
Şekil 6.25: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 1. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



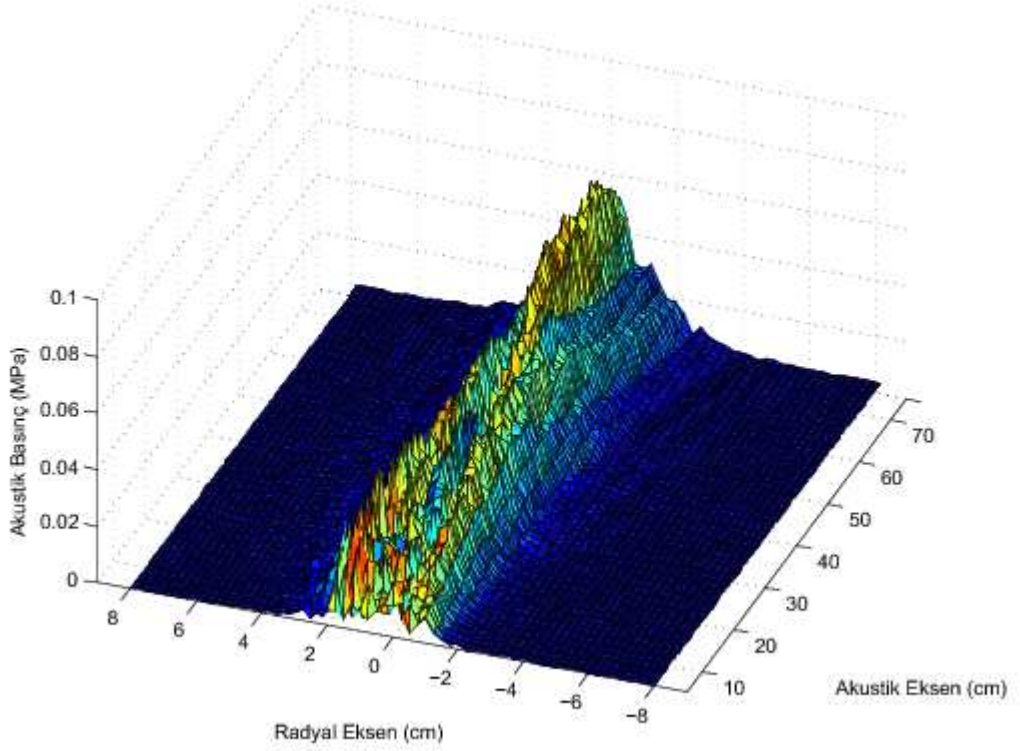
Şekil 6.26: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



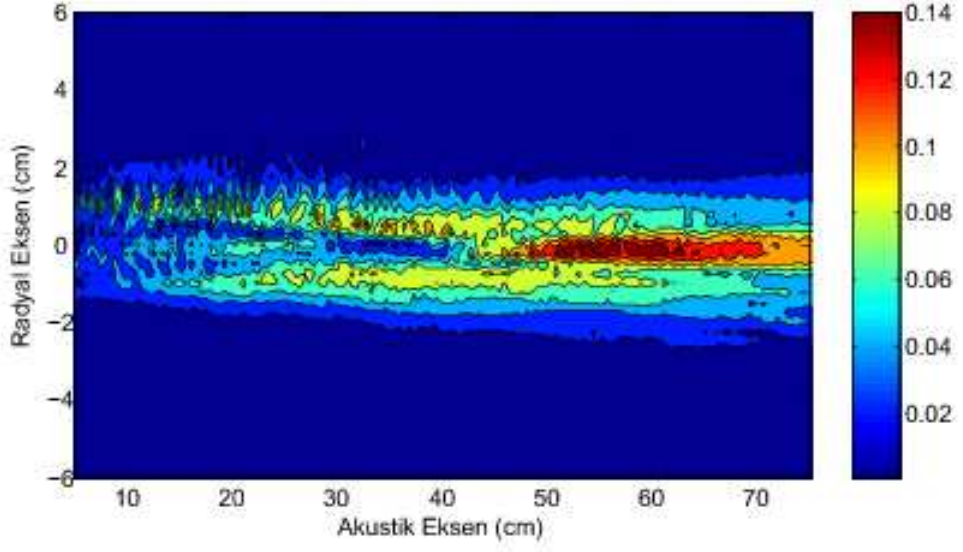
Şekil 6.27: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



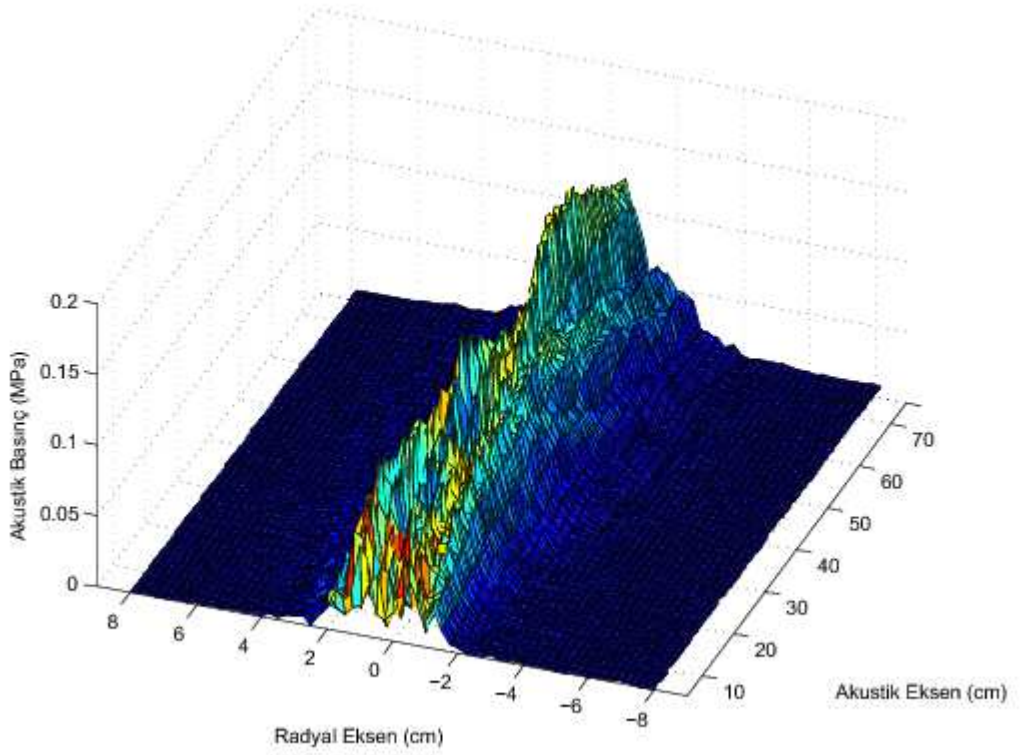
Şekil 6.28: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



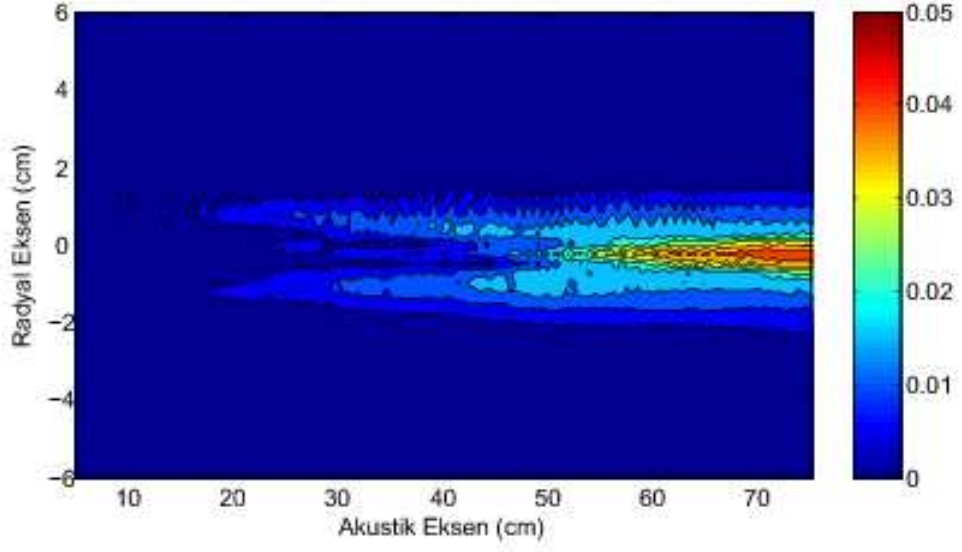
Şekil 6.29: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



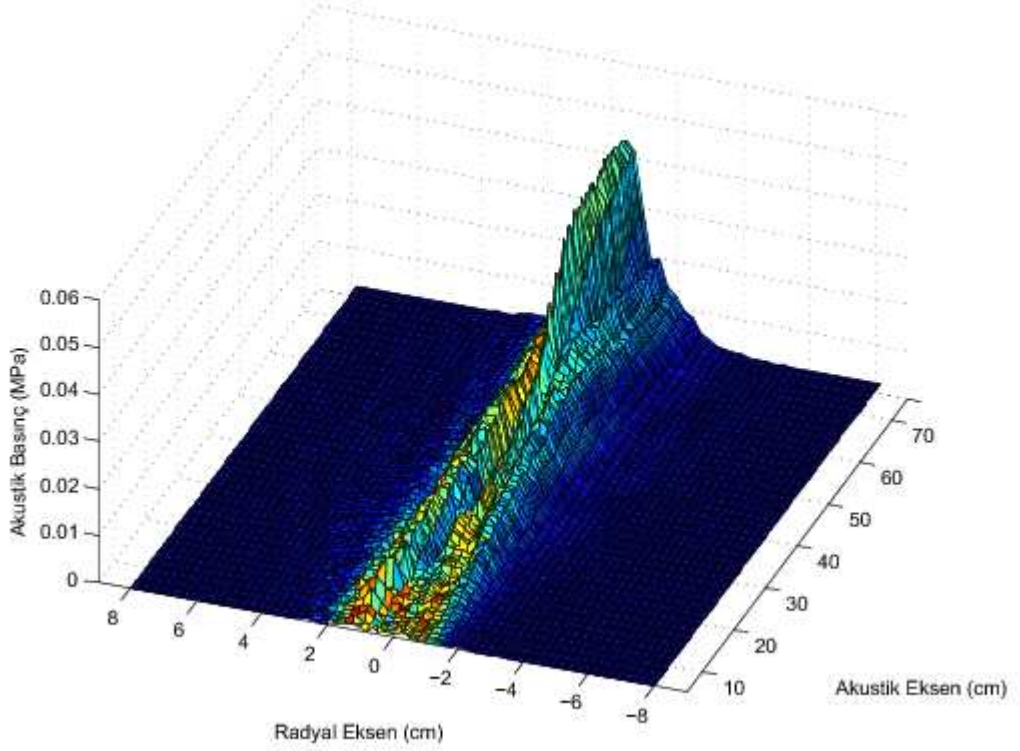
Şekil 6.30: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



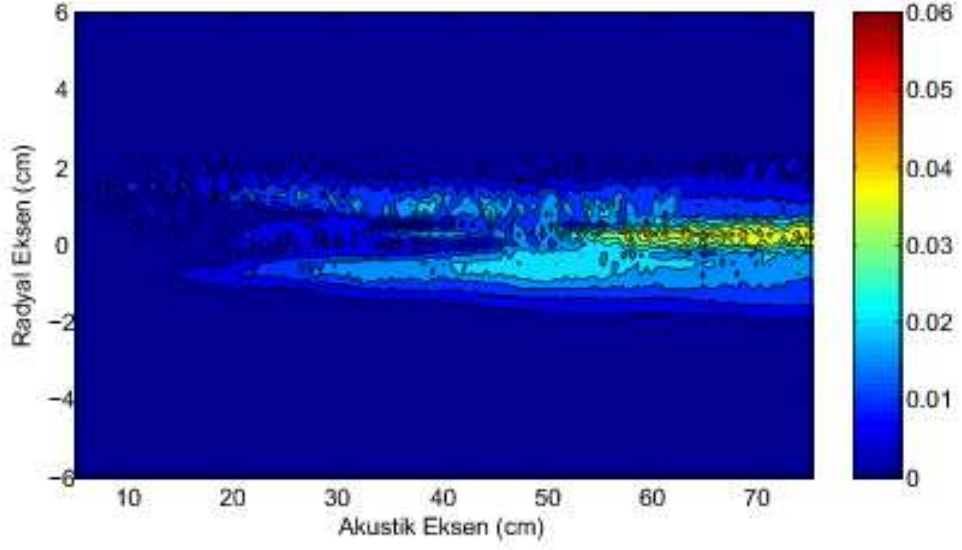
Şekil 6.31: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 2. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



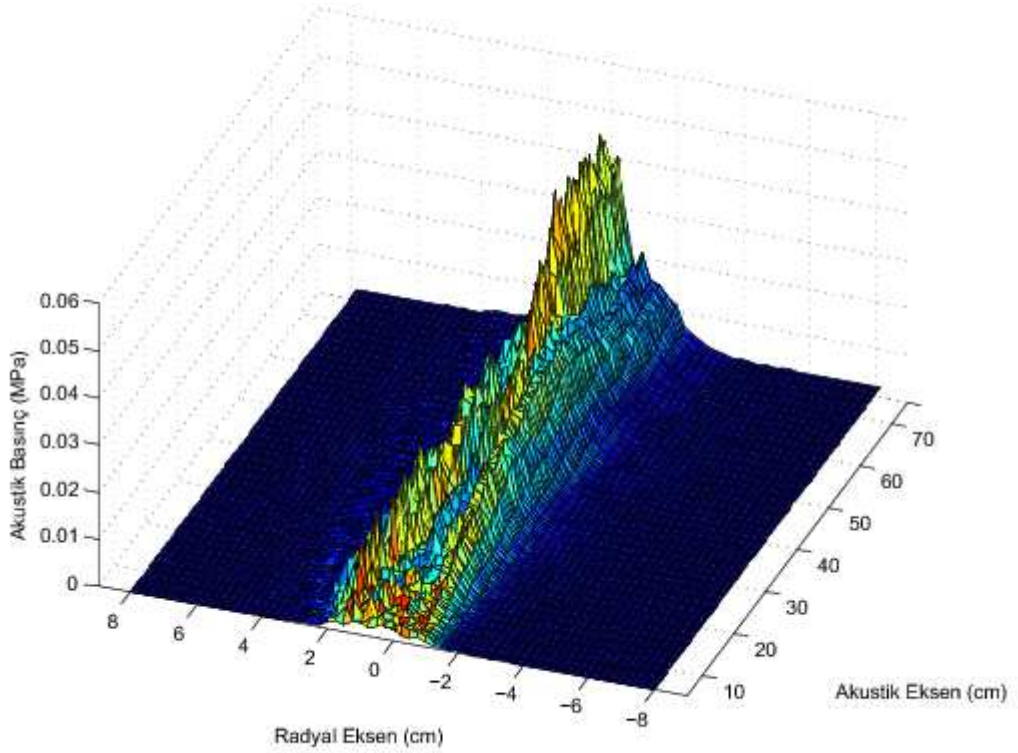
Şekil 6.32: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



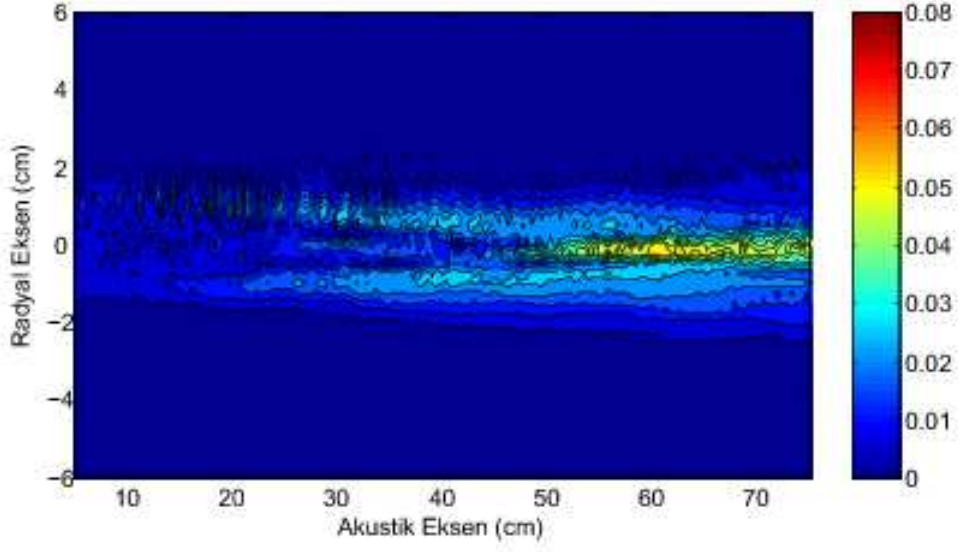
Şekil 6.33: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



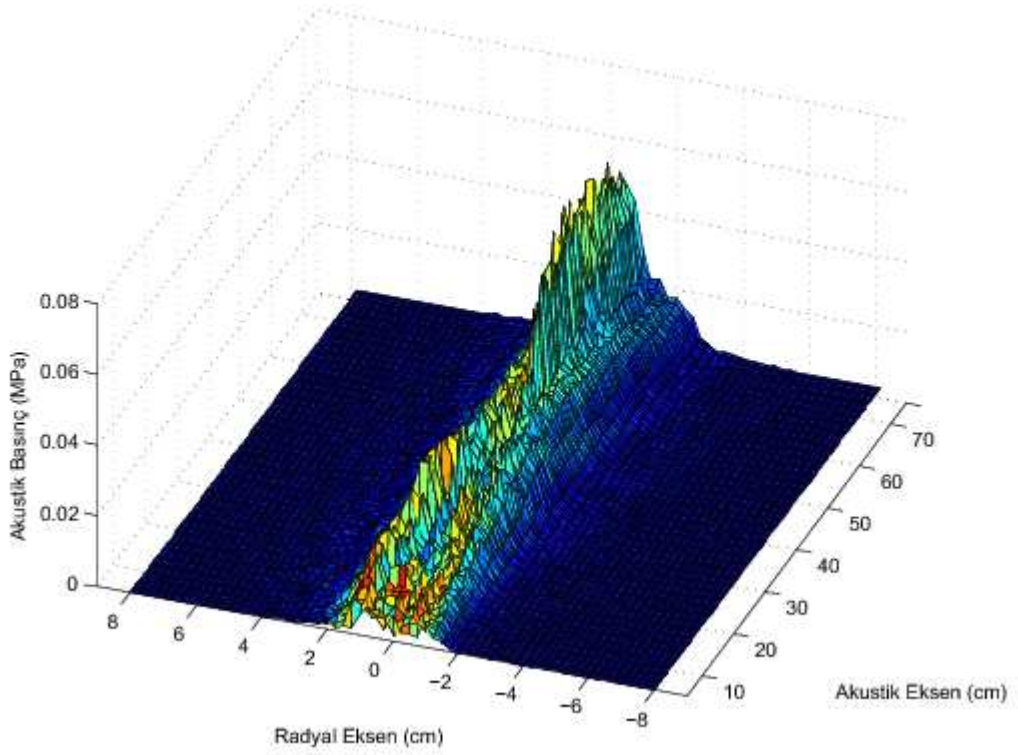
Şekil 6.34: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



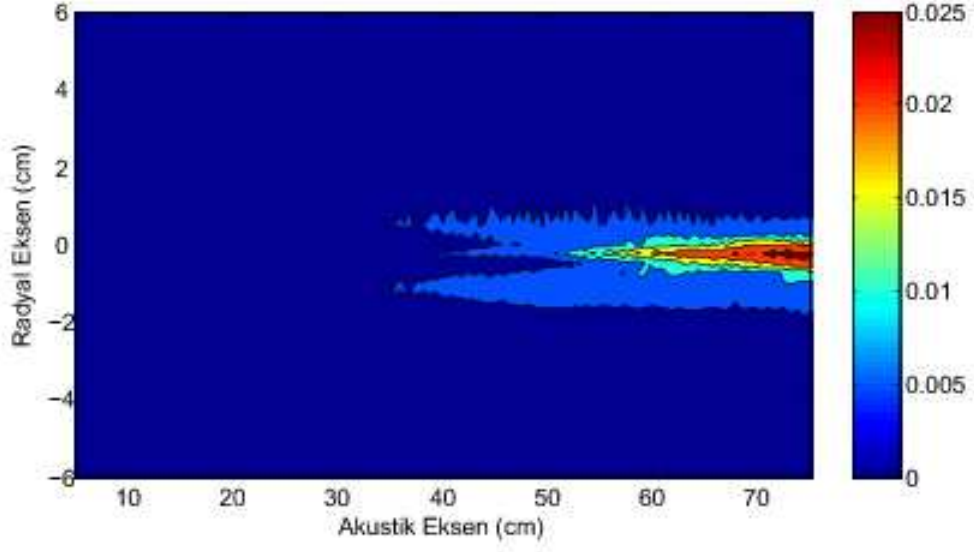
Şekil 6.35: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



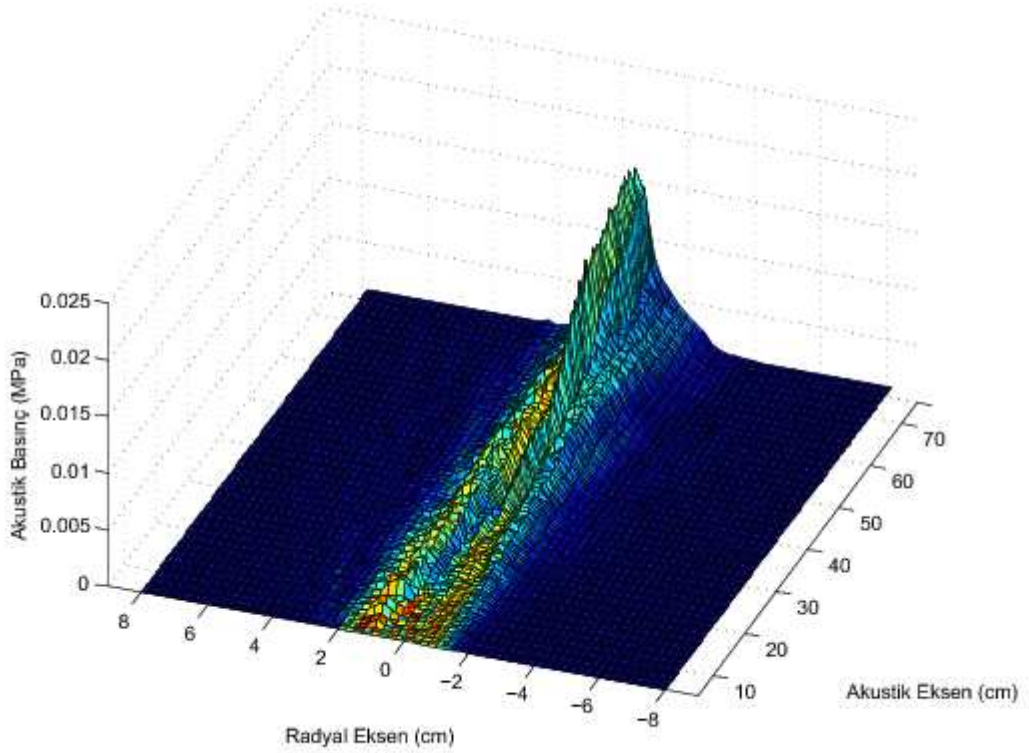
Şekil 6.36: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



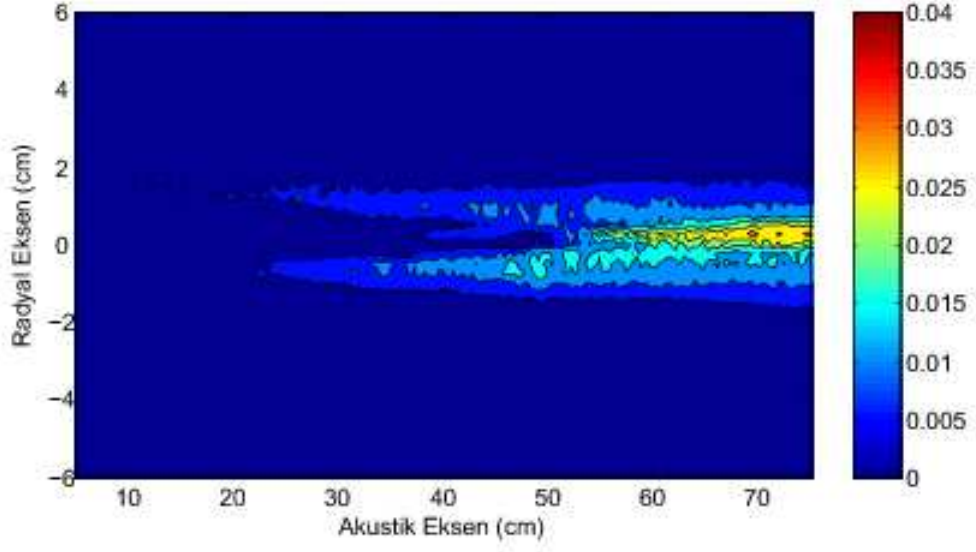
Şekil 6.37: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 3. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



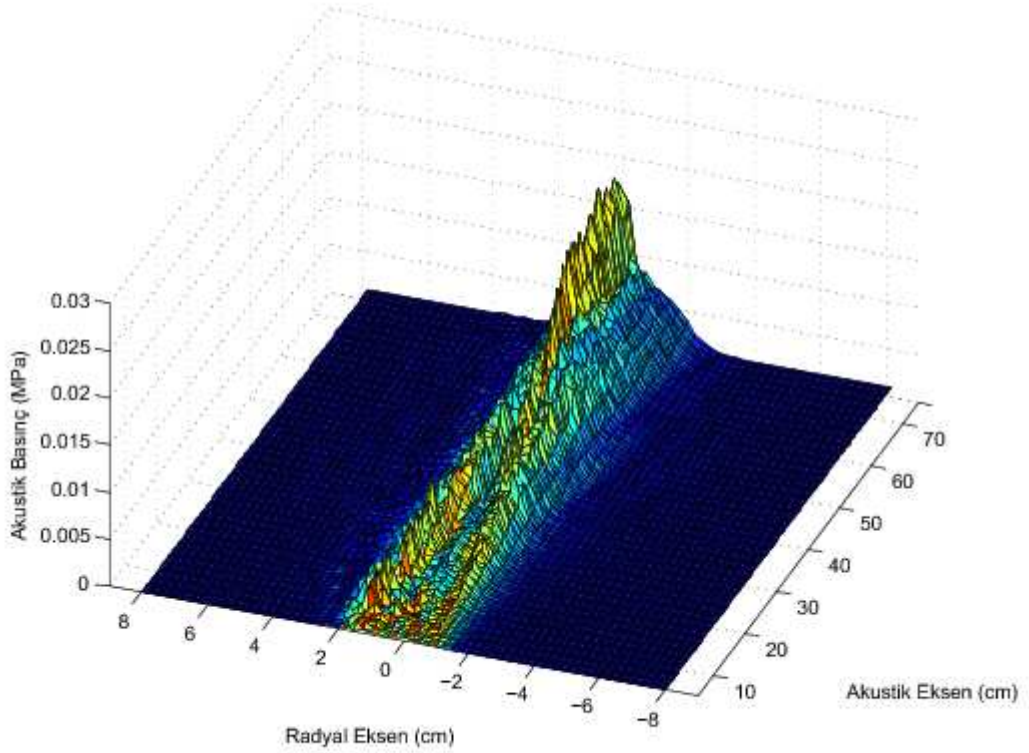
Şekil 6.38: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



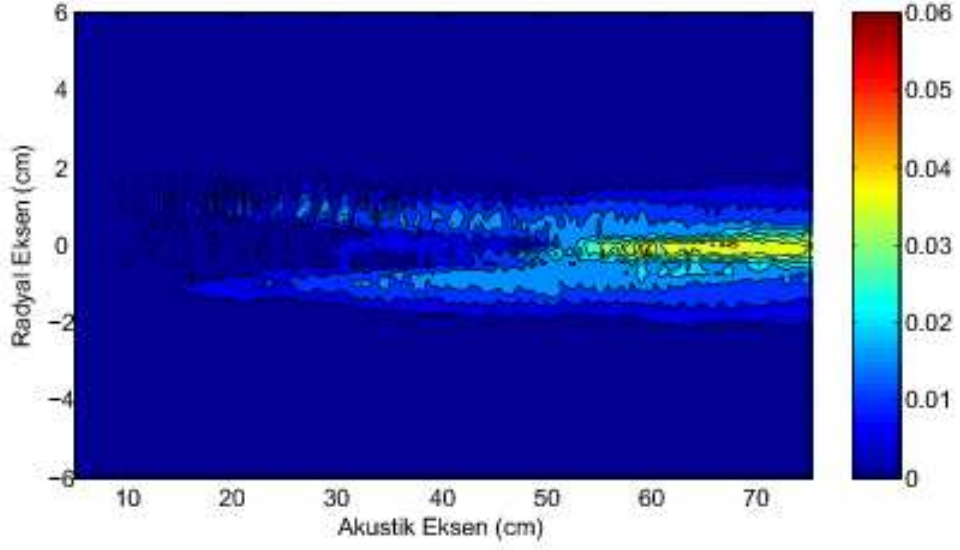
Şekil 6.39: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



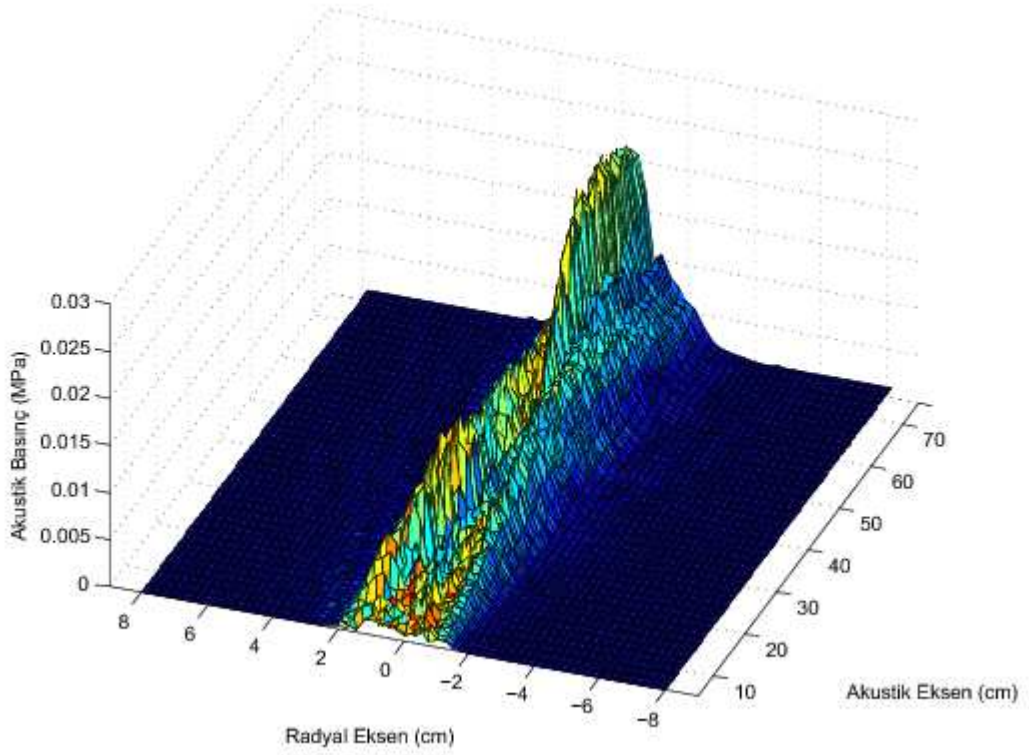
Şekil 6.40: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.



Şekil 6.41: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.115$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.



Şekil 6.42: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının kontür gösterimi.

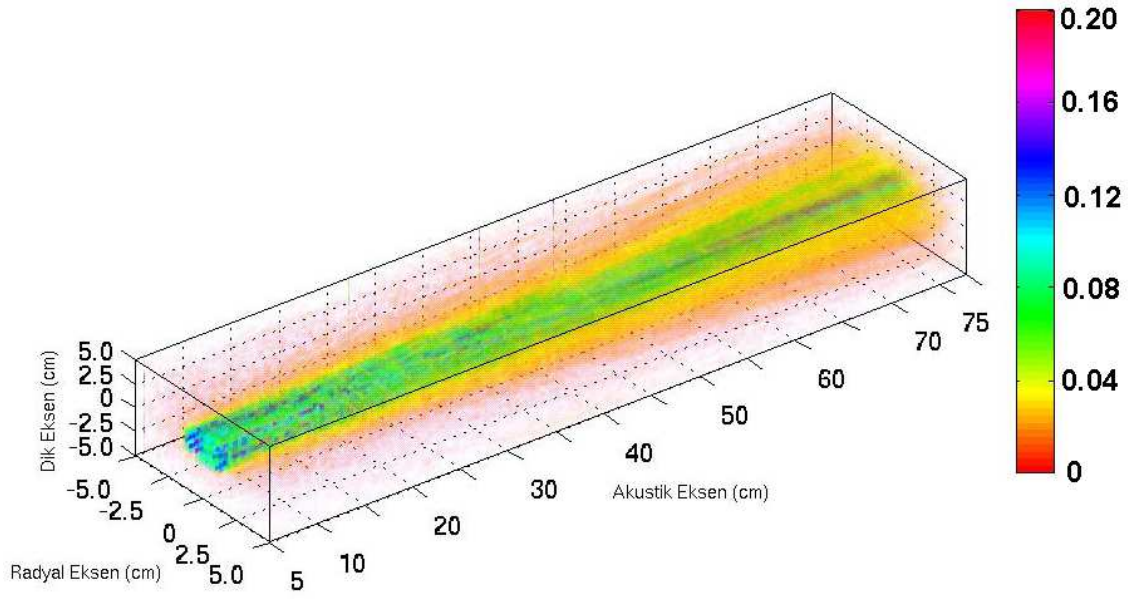


Şekil 6.43: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.145$ MPa değerleri için 4. harmoniğin akustik basınç alanının üç boyutta gösterimi.

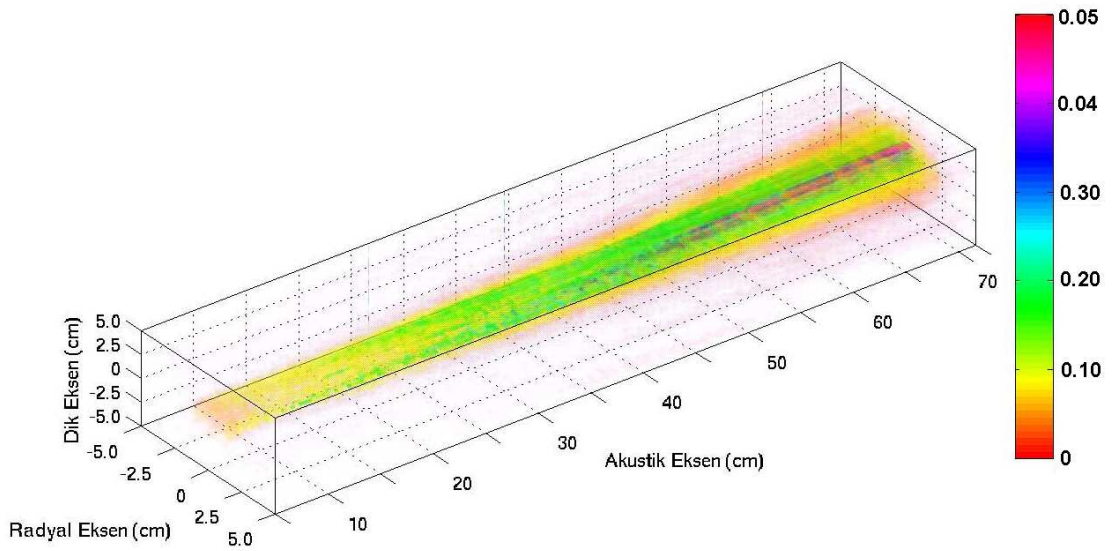
6.6 Üç Boyutlu Ölçümler

Üç boyutta ölçümler için $10 \times 10 \times 72$ cm³'lik hacim taranmıştır. 10 cm mesafeye denk gelen radyal eksen için, 0.25 cm adımlarla toplam 41 ölçüm, 72 cm mesafeye denk gelen akustik eksen için, 0.45 cm adımlarla toplam 160 ölçüm ve 5 cm'ye denk gelen dik eksen için, 0.5 cm adımlarla toplam 11 ölçüm yapılmıştır. Seçilen bu hacimde toplam **72160** adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan her ölçüm arasında 1 saniyelik bir bekleme süresi bırakılmış ve $P_0 = 0.070$ MPa değeri seçilmiştir.

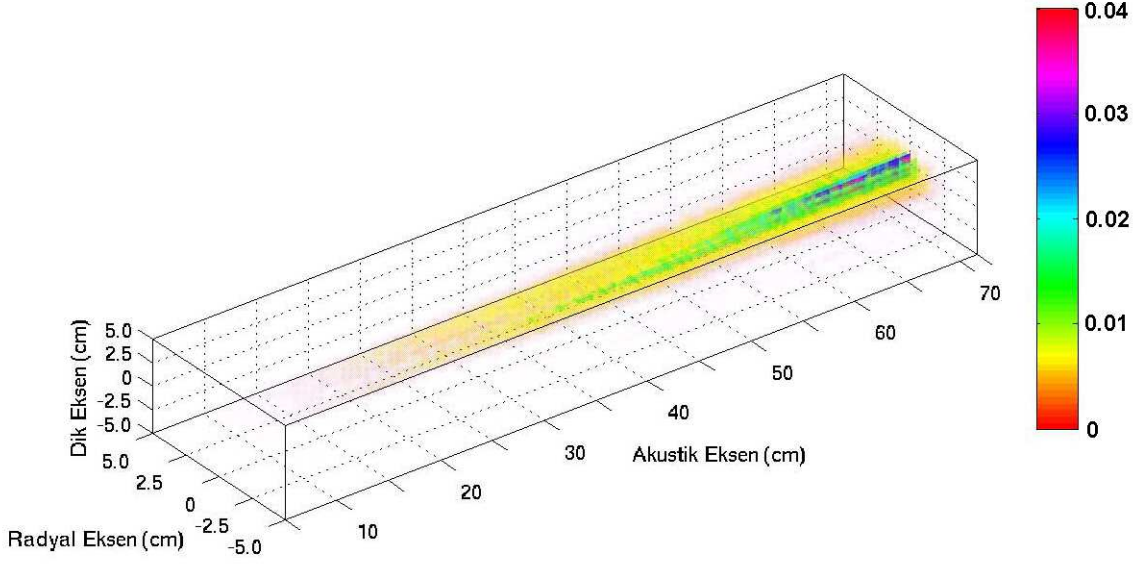
Şekil 6.44 ile Şekil 6.47 arasında $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk dört harmoniğin üç boyutta yapılan ölçümlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanlarının grafiği gösterilmektedir. Bu kısımda çizilen grafikler, Matlab programlama dili altında çalışan *sliceomatic* [80] adlı yardımcı program yardımı ile çizilmiştir. Dikkat edilecek olursa harmonik numarasının artmasıyla birlikte ultrasonik dalganın demet genişliği daralmaktadır. Ayrıca alt harmoniklerin yan loblarının genliklerinin 1. harmonikle karşılaştırıldığında daha dar olduğu görülebilir. Daha önceki kesimlerde tartışıldığı üzere, harmoniklerin kaynaktan belli bir mesafe sonra oluşmaya başladıkları çok daha belirgin şekilde görülmekte ve harmonik numarasının artmasıyla, harmoniklerin oluşum mesafesini artmaktadır.



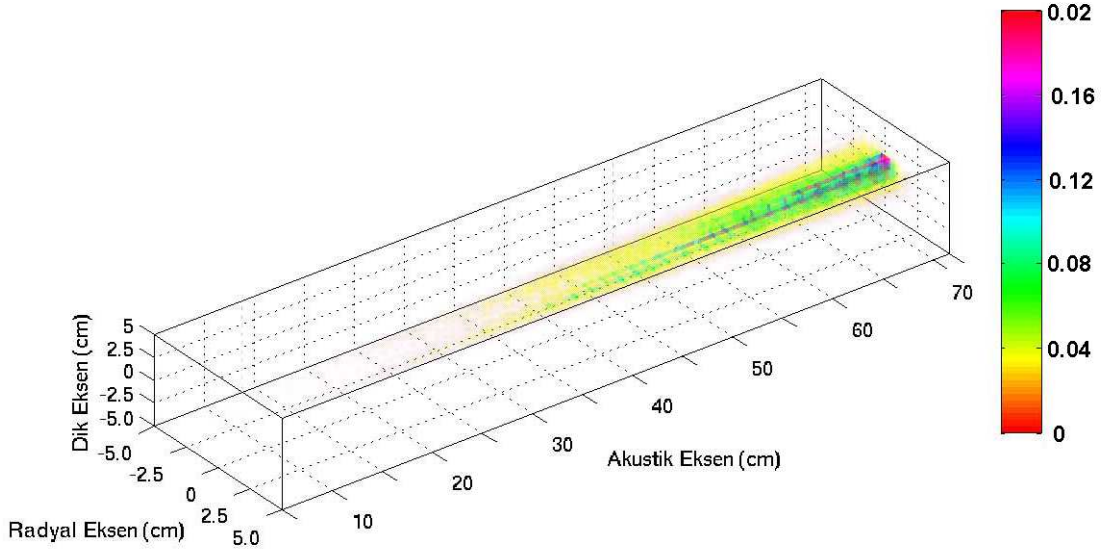
Şekil 6.44: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 1. harmoniğin üç boyutta yapılan ölçümlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları.



Şekil 6.45: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 2. harmoniğin üç boyutta yapılan ölçümlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları.



Şekil 6.46: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 3. harmoniğin üç boyutta yapılan ölçümlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları.



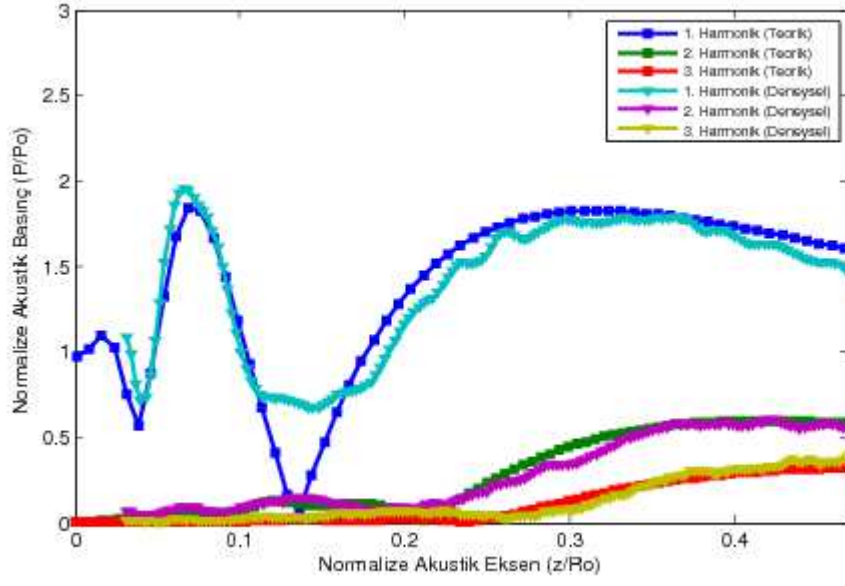
Şekil 6.47: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için 4. harmoniğin üç boyutta yapılan ölçümlerin sonucunda elde edilen akustik basınç alanları.

6.7 Deneysel Sonuçlar İle Teorik Sonuçların Karşılaştırılması

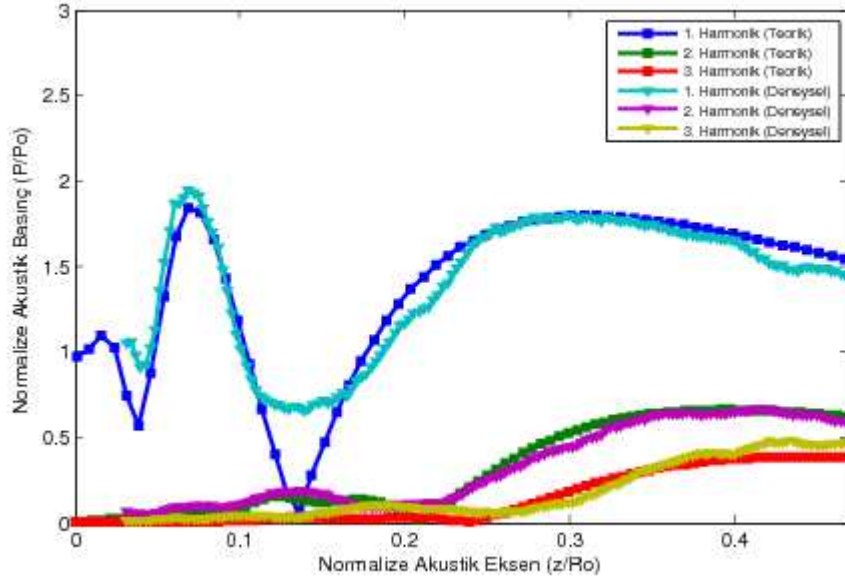
Şekil 6.48 ile Şekil 6.50 arasında $f = 2.25$ MHz ve sırası ile $P_0=0.065$ MPa, $P_0=0.080$ MPa, $P_0=0.095$ MPa değerleri için ilk üç harmoniğin akustik eksen boyunca deneysel ve teorik basınç alanlarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde, (\square) ile gösterilen çizgiler teorik sonuçları, (∇) ile gösterilen çizgiler ise, deneysel sonuçları göstermektedir. Teorik sonuçlar, Ref [73]'de sonuçları sunulan ve dikdörtgen geometriye sahip kaynak için geliştirilen Matlab programının dairesel kaynak için modifiye edilmesiyle elde edilmiştir. Sonuçların büyük ölçüde uyum içinde olduğu görülmektedir. Teorik sonuçlar için 1. harmoniğin son minimum değerinde keskin bir düşüş varken, deneysel sonuçlarda bu düşüşün daha az keskin olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, teorik modelleme için düşünülen transducerın kusursuz transducer olmasıdır. Transducer tarafından üretilen ultrasonik dalga tüm transducer yüzeyinde aynı basınç değeri üretir ve her yönde bir simetriye sahiptir. Oysa daha önce radyal eksen sonuçlarında tartışıldığı üzere, deney sisteminde kullanılan transducerın ürettiği demette bir simetri bozulması söz konusudur. Demetteki bu simetri bozulması, yakın alanda fazladan difraksiyona neden olmaktadır. Bunun sonucunda, 1. harmonik için son minimum, teorik sonuçlarla karşılaştırıldığında yeteri kadar düşüş göstermemektedir.

Deneysel sonuçlara dikkat edilecek olursa, P_0 değerinin artması ile birlikte, deneysel son maksimum değerinin teorik son maksimum değeri ile karşılaştırıldığında daha fazla düşüş içinde olduğu görülebilir. Normalde teorik sonuçlarda da bu düşüşün gözlenmesi gerekmektedir. Fakat teorik çalışmanın sonuçları, bir kısım yaklaşımlar ve sınırlamalar yapılarak elde edilmiştir ve bu yaklaşım ve sınırlamalar özellikle uzak alanda kendini hissettirmektedir. Buna karşın, difraksiyon etkisinin yakın alanın sonlarına doğru etkisini iyice kaybetmesinin sonucu olarak, yakın alanın sonlarında oluşmaya başlayan alt harmonikler daha fazla uyum içindedir.

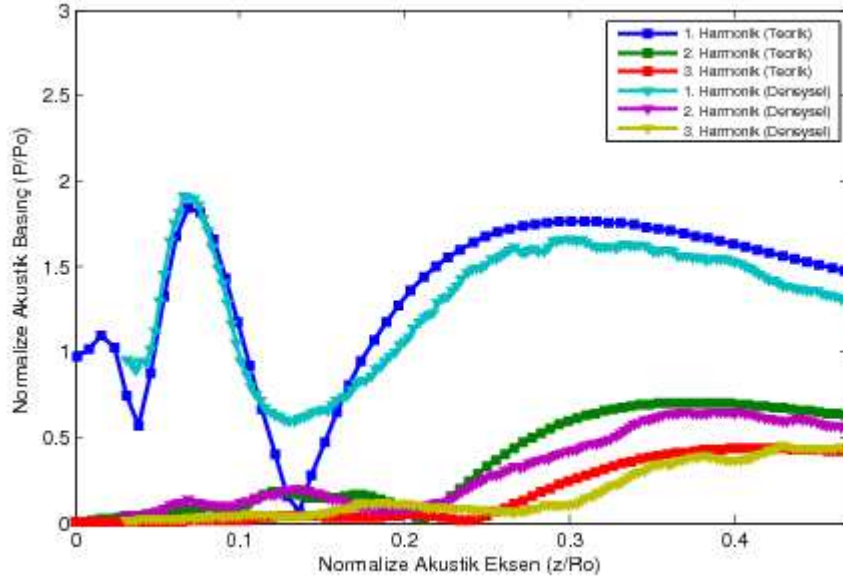
Karşılaştırmalar yapılırken, akustik eksen $\sigma = z/R_0$, radyal eksen $\xi = r/a$ ve akustik basınç $p = P/P_0$ şeklinde boyutsuz parametrelere normalize edilmiştir. Burada R_0 Rayleigh mesafesini göstermektedir.



Şekil 6.48: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk üç harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanlarının akustik eksen boyunca değişimlerinin karşılaştırması.



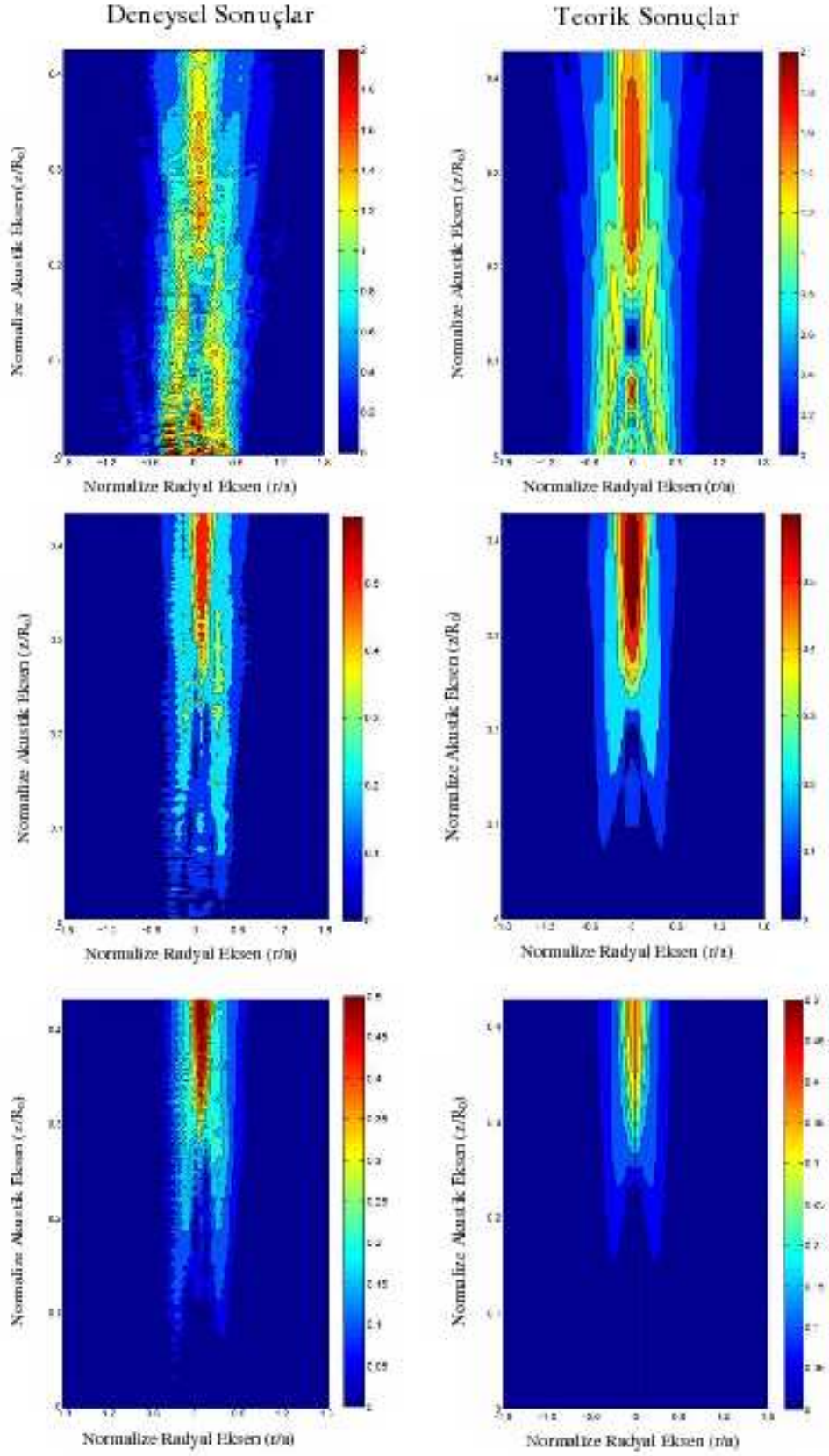
Şekil 6.49: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.080$ MPa değerleri için ilk üç harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanlarının akustik eksen boyunca değişimlerinin karşılaştırması.



Şekil 6.50: $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.095$ MPa değerleri için ilk üç harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanlarının akustik eksen boyunca değişimlerinin karşılaştırması.

Şekil 6.51'de $f = 2.25$ MHz, $P_0=0.070$ MPa değerleri için sırası ile ilk üç harmoniğin deneysel ve teorik basınç alanlarının kontür çizimlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Her üç harmonik için deneysel ve teorik sonuçlar uyum içindedir. 1. harmonik için özellikle yakın alanda transducere ürettiği dalganın simetrik olmasından kaynaklanan difraksiyon etkisi açıkça görülmektedir. Bu etkinin özellikle transducere çok yakın bölgelerde daha fazla ve karmaşık olduğu görülebilir. Akustik eksen karşılaştırma sonuçlarından da tartışıldığı üzere, teorik basınç alanının yaklaşık 0.10σ değerinde minimuma gitmeye başladığı ve yaklaşık bu minimumu akustik eksen boyunca genişliğinin 0.03σ kadar sürdüğü görülebilir. Oysa deneysel sonuçlardan bu minimum değerinin yaklaşık 0.09σ değerinde başlarken, yaklaşık 0.13σ değerinde bir minimuma gitmekte ve 0.16σ değerine son bulmaktadır. Uzak alanda ise, sonuçların daha fazla uyum içinde olduğu görülmektedir. Hem deneysel hem de teorik sonuçlar için, 2. ve 3. harmoniğin yaklaşık aynı mesafede olduğu ve genel yapılarının büyük ölçüde uyum içinde olduğu görülmektedir. Fakat harmoniklerin

oluşmaya başladıkları bölgelerde, her iki harmonik için deneysel sonuçların, teorik sonuçlarla karşılaştırıldığında daha karmaşık bir yapıya sahip oldukları görülebilir. Akustik eksen sonuçlarından da görüldüğü üzere, genlik değerlerinde az da olsa bir uyumsuzluk söz konusudur. Bu uyumsuzluk, teorik modellemedeki yaklaşımların ve deney sisteminde kullanılan transducerin oluşturduğu dalga demetinin simetrik olmamasının sonucudur.



Şekil 6.51: $f = 2.25$ MHz, $P_0 = 0.080$ MPa değerleri için ilk üç harmoniğin teorik ve deneysel akustik basınç alanlarının kontür çizimlerinin karşılaştırması.

6.8 Harmonik Görüntüleme

Harmonik görüntüleme, 1990'ların başlarında mikro büyüklükte kabarcıkların kullanıldığı, dokunun lineer olduğu ve harmoniklerin bu kabarcıklar tarafından oluşturulduğu düşüncesi altında “*Microbubble Contrast Agents*” için geliştirmiş [81] ve 1997 yılında sunulmuştur [82].

Harmonik görüntülemenin klasik görüntülemeden temel farkı, klasik görüntüleme sadece ana harmonik kullanırken, harmonik görüntülemede lineer olmayan ortamda yayılan dalganın bozulması sonucu oluşan alt harmoniklerin kullanılmasıdır [83, 84, 85, 86, 87].

Klasik görüntüleme sistemlerinde, transducer tarafından üretilen ultrasonik puls vücuda gönderilir ve dokudan ya da organdan yansıyan puls tekrar transducer tarafından alınır. Bu tür sistemlerde ortamın lineer olduğu kabul edildiğinden, geri yansıyan puls, ortam tarafından zayıflatılmış fakat gönderilen dalga ile aynı frekansıdır. Bu nedenle, pulsün genliği ve yansıma mesafesi kullanılarak görüntü elde edilir. Fakat ortam içinde ultrasonik dalgalar lineer olmayan davranış içindedir. Ultrasonik dalgalar, genellikle daha yoğun ortamda daha hızlı, daha az yoğun ortamda daha yavaş yayılırlar. Bu nedenle doku yoğunluğu fazla olan ortamda ultrasonik dalga daha hızlı, daha az olan ortamda daha yavaş yayılır. Bilindiği üzere ultrasonik dalgalar, basınç dalgalarıdır ve ortam içinde yayılırken bölgesel basınç değişimlerine neden olurlar. Bu basınç değişim bölgelerinde, ultrasonik dalganın hızı yoğunluğa bağlı olarak değişim gösterir. Sonuç olarak Kesim 3.3.1'de açıklandığı üzere dalga bozulmaya uğrar ve harmonikler oluşur. Harmonik görüntülemede, transducer tarafından geri alınan ve alt harmonikleri içeren sinyal kullanılır. Bu sinyal bilgisayar yardımı ile analiz edilerek harmonikler birbirinden ayrılır ve uygun harmonikler görüntüleme amacıyla kullanılabilir. Görüntülemede alt harmoniklerin kullanılması hem eksensel çözünürlüğü hem de açisal çözünürlüğü arttırmaktadır.

Harmonik görüntülemenin avantajları;

- Frekansın artırılması çözünürlüğü artırır. Kesim 4.2.1'de açıklandığı üzere $B \leq 2f_c$ şeklinde bir sınırlama söz konusudur. Alt harmoniklerin kullanılması ile bu

sınırlama kısmi olarak azaltılabilir. Çünkü alt harmoniklerin frekansı $f_n = nf_c$ şeklindedir. Kaynak tarafından gönderilen dalganın f_c merkezi (rezonans) frekansı aynı kalmasına rağmen, daha yüksek frekanslara sahip alt harmoniklerin kullanılması görüntü kalitesini arttırır.

- Görüntü kalitesini arttırmanın diğer bir yolu dalga demetini daraltmaktır [88]. Alt harmoniklerin demet genişliği, her zaman 1. harmoniğin demet genişliğinden daha dardır. Sırası ile, Kesim 6.4, 6.5 ve 6.6'da sunulan radyal eksen, iki boyutta ve üç boyutta ölçüm sonuçlarından alt harmoniklerin demet genişliğinin 1. harmoniğe göre daha dar olduğu açıkça görülmektedir.
- Transducera ulaşan sinyal ne kadar temiz, güçlü ise, görüntü kalitesi o kadar iyi olur. 1. harmoniğin yan lobların genlikleri ile karşılaştırıldığında alt harmoniklerin yan loblarının genliklerinin oranı daha düşüktür [89]. Bu durum yan loblara enerji aktarımının az olması anlamına gelir. Böylece merkezde bulunan ana lob daha büyük ve belirginleşir. Kesim 6.5'de sunulan üç boyutlu akustik basınç alanı çizimlerinden alt harmoniklerin yan lobların daha düşük olduğu açıkça görülmektedir.
- Tüm alt harmonikler kaynaktan belli bir mesafe sonra oluşurlar. Bu ise, özellikle deri altında bulunan yağ dokularındaki yansımaların neden olduğu görüntü bozulmasını azaltır. Genel olarak, harmonikler yağ dokusundan sonra oluştukları için sadece bir defa yansımaya uğrarlar. Kesim 6.3, 6.5 ve 6.6'da sunulan akustik eksen, iki ve üç boyutta ölçüm sonuçlarından alt harmoniklerin transducerdan belli bir mesafe sonra oluşmaya başladıkları açıkça görülmektedir. P_0 değerinin arttırılması harmoniklerin oluşma mesafesini kısaltmaktadır. Bu durum, harmonik oluşum mesafelerin ayarlanabileceği anlamına gelir ve yukarıda bahsedildiği üzere, özellikle yağ dokuları tarafından oluşturulan yansımaların azaltılmasına imkan verebilir.
- Ana harmonikle karşılaştırıldığında alt harmoniklerin gürültü oranı daha düşüktür [90]. Kesim 6.5'de sunulan iki boyutta ölçüm sonuçlarından alt harmo-

niklerin daha belirgin ve gürültüsüz olduğu gör÷lmektedir. Bu durum daha kaliteli görüntü anlamına gelir.

7. Genel İrdemeler ve İleri Çalışmalar

Bu tezde, dairesel geometriye sahip transducerin oluşturduğu lineer olmayan akustik basınç alanlarının deneysel sonuçları sunulmuştur. Deneysel ölçümlerin tamamı saf su ortamında yapılmış olup, akustik eksen, radyal eksen, iki ve üç boyutta olmak üzere dört kategoride gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler için 38 mm çapında ve rezonans frekansı 2.25 MHz olan transducer kullanılmıştır. 0.015 MPa ile 0.145 MPa değerleri arasında toplam dokuz P_0 değeri için ilk dört harmoniğin lineer olmayan akustik basınç alanları incelenmiştir. Seçilen bu frekans ve basınç değerleri çoğu medikal uygulamalarda kullanılan tipik değerlerdir. Ayrıca akustik eksen ve iki boyutta ölçümler için deneysel sonuçlar, Ref [73]'de sunulan ve dairesel geometriye sahip kaynak için modifiye edilen nümerik modellemenin sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların büyük ölçüde uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Deneysel sonuçlardan, harmonik numarasının artmasıyla birlikte ultrasonik dalganın demet genişliğinin hem iki hem de üç boyutta daraldığı ve yan lobların genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Alt harmoniklerin görüntüleme kullanılması, hem eksensel çözünürlüğü hem de açısal çözünürlüğü artırabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu tezde, elde edilen deneysel verilerin son yıllarda geliştirilmeye başlanan üç boyutlu akustik görüntüleme sistemlerinin dizaynı için ışık tutacağı düşünülmektedir. Özellikle tıp alanında, yeni geliştirilen akustik tomografi tekniğinin radyasyon içermemesi ve yan etkilerinin bulunmaması, bu tekniği kullanan sistemleri cazip kılmaktadır. Bu teknolojinin gelişimi açısından sunulan deneysel verilerin önem arz ettiği düşünülmektedir.

İleri Çalışmalar

- Günümüzde ultrasonik görüntüleme sistemlerinde kullanılan transducerlar genellikle dikdörtgen geometriye sahip olması nedeniyle, benzer deneysel çalışma-

ların başta dikdörtgen olmak üzere farklı geometrilere sahip transducerlar için yapılması planlanmaktadır. Ultrasonik görüntüleme sistemleri için alt harmoniklerin alan yapılarının incelenmesinin görüntü kalitesinin iyileştirilmesinde önemli katkıları olacağı düşünülmektedir.

- Benzer çalışmanın odaklanmış ultrasonik dalgalar için yapılması ve odaklama işleminin alt harmoniklerin alan yapıları üzerine etkilerinin ve bu etkilerin medikal uygulamalarda sağlayacağı katkıların incelenmesi düşünülmektedir.
- Bu çalışma, daha yüksek frekans ve P_0 değerleri için genişletilmesi planlanmaktadır. Ayrıca farklı tipte ultrasonik dalgaların oluşturdukları ultrasonik basınç alanlarının incelenmesi düşünülmektedir.
- Yapılan çalışmada lineer olmayan ortam olarak su seçilmiştir ve tüm ölçümler bu ortam içinde yapılmıştır. Ultrasonik görüntüleme sistemlerinin temel amacının insan vücudunu incelemek olduğu düşünüldüğünde, çalışmanın başta insan organ ve dokuları olmak üzere farklı ortamlar için genişletilmesi planlanmaktadır.
- Akustik görüntüleme kalitesinin artırılması amacıyla geliştirilmekte olan “harmonik görüntüleme (harmonic imaging)”, “zıtlık harmonik görüntüleme (contrast harmonic imaging)” ve “süper harmonik görüntüleme (superharmonic imaging)” gibi yeni görüntüleme teknikleri üzerine daha detaylı incelemelerin yapılması düşünülmektedir.
- Görüntü kalitesini etkileyen temel faktörlerden biri olan yan lobların alt harmoniklerden arındırılması fikri ileri çalışmalar arasında düşünülmektedir.
- Deneysel sonuçlarda gösterilen iki ve üç boyutta ultrasonik basınç alanlarının, ultrasonik görüntüleme sistemlerinde iki ve üç boyutta görüntüler elde edilmesi amacıyla kullanılması ileri çalışmalar arasında düşünülmektedir.

8. Kaynaklar

- [1] M. F. Hamilton, “*Fundamentals and applications of nonlinear acoustics*”, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1986.
- [2] D. T. Blackstock, “*History of nonlinear acoustics and a survey of Burgers’ and relate equations*”, Prosedings of the Symposium Held at Applied Research Laboratories, The University of Texas at Austin, Edited by T. G. Muir (AD 719936), 1969, 1-27.
- [3] L. Euler, *1759 Mem. Acad. Sci.*, Berlin 15, 1766, 185-209.
- [4] J. Lagrange , “*New research on the nature and propagation of sound* ”, Misc. Taur. 2, 1760-61, 11-172.
- [5] S. D. Poisson, “*Memoir on the theory of sound* ”, J. L’Ecole Polytech. 7, 1808.
- [6] G. G. Stokes, “*On a difficulty in the theory of sound* ”, Philos. Mag., Ser. 3-33, 1848, 349-356.
- [7] L. Bjorno, “*Nonlinear ultrasound*”, A Review, Ultrasonic International Conference Proceedings, 1975, 110-115.
- [8] R. T. Beyer, *Nonlinear Acoustics in Fluids*, Benchmark Papers in Acoustics, Vol. 18, Van Nonstrand Reinhold Co., New York , 1984.
- [9] E. Fubini, “*Anomalies in the propagation of an acoustic wave of large amplitude*”, Alta. Freq. 4, 1935, 173-180.
- [10] R. D. Fay, “*Plane sound waves of finete amplitude*”, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 3, 1931, 222-242.

- [11] A. L. Thulas, R. T. Jenkins, and H. T. O'Neil, "*Extraneous frequencies generated in air carrying intense sound waves*", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 6, 1935, 173-180.
- [12] K. A. Naugol'nykh, S. I. Soluyan, R. V. Khokhlov, "*Spherical waves of finite amplitude in a viscous thermally conducting medium*", Sov. Phys. Acoustic. 9, 1943, 42-46.
- [13] R. V. Khokhlov, K. A. Naugol'nykh, and S. I. Soluyan, "*Waves of moderate amplitude in absorbing media* ", Acoustica 14, 1964, 248-253.
- [14] P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, 1963, 535-537.
- [15] H. O. Berktaý, "Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications", J. Sound Vib., Vol. 2, 1965, 435-461.
- [16] H.O. Berktaý, " Parametric amplification by the use of acoustic nonlinearities and some possible applications", J. Sound Vib., Vol. 2, 1965, 462-470.
- [17] T. G. Muir, "Nonlinear acoustics: A new dimension in underwater sound", Tech. Rep. ARL-TP-76-25, Applied Research Laboratories, The University of Texas at Austin, 1976.
- [18] A. Şahin, "*Nonlinear Pressure Fields Due to Focused Rectangular Aperatures in Water*", Thesis for the Degree of Ph.D. of The University of Bath, School of Physics, Bath, 1992.
- [19] N. S. Bakhvalov, Ya. M. Zhileikin and E. A. Zabolotskaya, *Nonlinear Theory of Sound Beams*, Nauka, Moskow (in Russian, to appear in English through the American Institute of Physics), 1982.
- [20] W S Gan, " *Analytical solutions of the KdV-KZK equation*", Non-Linear Acoustics and Vibration, 2005,104-107.

- [21] O. A. Kaya, “*İki ve Üç Boyutta Nonlinear Akustik Basınç Alanlarının Teorik İncelenmesi*”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2004.
- [22] S. I. Aanonsen, T. Barkve, J. N. Tjøtta, S. Tjøtta, “Distortion and harmonic generation in nearfield of finite amplitude sound beam”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 75, 1984, 749-768.
- [23] G. S. Garret, J. N. Tjøtta, S. Tjøtta, “Near field of a large acoustic transducer. Part III: General results”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 75, 1984, 769-779.
- [24] M. F. Hamilton, J. N. Tjøtta, S. Tjøtta, “Nonlinear effects in the farfield of a directive sound beam”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 78, 1985, 202-216.
- [25] E. Hetcht, *Optik*, 3. Baskı, Addison Wesley Longman, 1998. 358-359.
- [26] F. S. Crawford, *Dalgalar*, Berkeley Fizik Dersleri, 3. Baskı, 1990.
- [27] L. E. Kinsler, A. R. Frey, B. Coppens, J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley&Sons Inc., New York, 1982, 92-115.
- [28] D. Kaleci, “*Ultrasonik Bozulma ile Yayılma Mesafesi Arasındaki İlişki*”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2002.
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/Infrasonic>
- [30] J. David, N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, Publisher CRC Press, 2002, 191-195.
- [31] T. Kundu, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, CRC Press, 2003, 636-637.
- [32] A. Şahin, “*Numerical solution to the nonlinear acoustic wave equation*”, *International Journal of Applied Mathematics*. Vol. 2, No. 3, 2000, 339-352.
- [33] A. Shermenev, “*Nonlinear wave equation in special coordinates*”, *J. of Nonlinear Math. Phys.* Volume 11, Supplement. 2004, 110-115.
- [34] D. E. Hall, *Basic Acoustics*, John Wiley and Sons (WIE), 1988.

- [35] Z. Lu, J. L. Daridon, B. Lagourette, S. Ye, “*A phase-comparison method for measurement of the acoustic nonlinearity parameter B/A* ”, Meas. Sci. Technol. 9, 1998, 1699-1705
- [36] Z. Dong, G. Xiu-Fen, L. Xiao-Zhou, K. Jun-ichi, N. Hideo, “*Analysis and correction of diffraction effect on the B/A measurement at high frequencies*”, Chin. Phys. Lett., Vol. 21, No. 1, 2004, 107-109.
- [37] X. F. Gong, Y. S. Yan, D. Zhang, H. L. Wang, “*The Study of acoustic nonlinearity parameter tomography in reflection mode*”, State Key Lab of Modern Acoustics, Institute of Acoustics, Nanjing University, China.
- [38] J. R. Frederick, *Ultrasonic Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1965.
- [39] B. Zhao, O. A. Basir, G. S. Mittal, “*Estimation of ultrasound attenuation and dispersion using short time Fourier transform*”, Ultrasonics, Vol. 43, 2005, 375-381.
- [40] D. La-Lui, M. Saito, “*A new method for estimating the acoustic attenuation coefficient of tissue from reflected ultrasonic signals*”, I07 IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 8, No. 1, 1989, 1120-1121.
- [41] P. D. Tyréus, C. Diederich, “*Two-dimensional acoustic attenuation mapping of high-temperature interstitial ultrasound lesions*”, Phys. Med. Biol., Vol. 49, 2004, 533-546.
- [42] B. Sturtevant, “*Shock wave physics of lithotriptors*”, In: Smith A, Badlani GH, Bagley DH, et al, eds. *Smith’s Textbook of Endourology*, St Louis: Quality Medical Publishing Inc, 1996, 529-552.
- [43] M. F. Hamilton, D. T. Blackstock (editors), *Nonlinear Acoustics*, Theory and Applications, Academic Press, New York, 1998.
- [44] D. Drikakis, W. Rider, *High-Resolution Methods For Incompressible And Low-Speed Flows*, Springer, 1 edition, 2004.

- [45] M. J. Lighthill, *Waves in Fluids*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1980.
- [46] Richard W Johnson, *The Handbook of Fluid Dynamics*, CRC Press, May 28, 1998, 4-61.
- [47] Bengt O Enflo, C M Hedberg, *Theory of Nonlinear Acoustics in Fluids*, Springer, May 31, 2002, 27-28.
- [48] N.S. Bakhvalov, Ya. M. Zhileikin and E. A. Zabolotskaya, *Nonlinear Theory of Sound*, Moscow State University, Moskow, 1987.
- [49] A. C. Baker, "*Finite Amplitude Propagation of Focused Ultrasound Waves In Water*", Thesis for the degree of Ph.D. of the University of Bath, School of Physics, Bath, 1989.
- [50] Y.-S. Lee, "*Numerical solution of the KZK equation for pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids*", Thesis for the degree of Ph.D. of The University of The University of Texas at Austin, 1993.
- [51] Y.-S. Lee and M. F. Hamilton, "*Time-domain modeling of pulsed finite-amplitude sound beams*", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, 1995, 906-917.
- [52] M. A. Averkiou, V. A. Khokhlova, "*Time-domain numerical solution of the KZK equation for modeling sound beams radiated by rectangular sources*", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105, Issue 2, 1999, 1208.
- [53] R. W. Coatney, "*Ultrasound imaging: Principles and applications in Rodent Research*", ILAR Journal, Volume 42, Number 3, 2001.
- [54] S. Sokolov, Elek. Nachr., Tekn. 6, 1929, 451.
- [55] X. Yin, "*The Study of Ultrasonic Pulse-Echo Subwavelength Defect Detection Mechanism*", Thesis for the degree of Ph.D. University of Illinois at Urbana-Champaign, Philosophy in Electrical Engineering, 2003.

- [56] Z. M. Connor, M. E. Fine, J. D. Achenbach and M. E. Seniw, “*Using scanning acoustic microscopy to study subsurface defects and crack propagation in materials*”, JOM, vol. 50, no. 11, 1998.
- [57] M. R. Bailey, V. A. Khokhlova, O. A. Sapozhnikov, S. G. Kargl, L. A. Crum, “Physical mechanisms of the therapeutic effect of ultrasound”, Acoustical Physics, Vol. 49, No. 4, 2003, 369-288.
- [58] A. Seagar, D. Liley, “*Basic principles of ultrasound imaging system design*” Biomedical Imaging HET408, 2002.
- [59] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/radiatedfields.htm>
- [60] A. J. B. Angelsen, H. Torp, S. Holm, K. Kristoffersen, T. A. Whittingham, “*Which transducer array is best?*”, European Journal of Ultrasound 2, 1995, 151-164.
- [61] M.R. Smith, H.R. Galantree, “*PVDF membrane hydrophones an ultrasonic characterization tool*”, Elektrooptics and Acoustics Division, Materials Applications and Devices Laboratory, GEC-Marconi Research Centre, Y/265/8103/M=1.6 (B), 1993.
- [62] D. R. Bacon, “*Characteristics of a PVDF membrane hydrophone for use in the range 1-100 MHz*”, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-29, NO.1, 1992.
- [63] R. C. Preston, D. R. Bacon, A. J. Livett, K. Rajendran, “*PVDF membrane hydrophone performance properties and their relevance to the measurement of the acoustic output of medical ultrasonic equipment*”, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 16, 1983.
- [64] Y-34-3598 ER-212, *PVDF Membrane Hydrophone Information Sheet*, NPL Calibration Certificate: U709, GEC- Marconi Research Center.

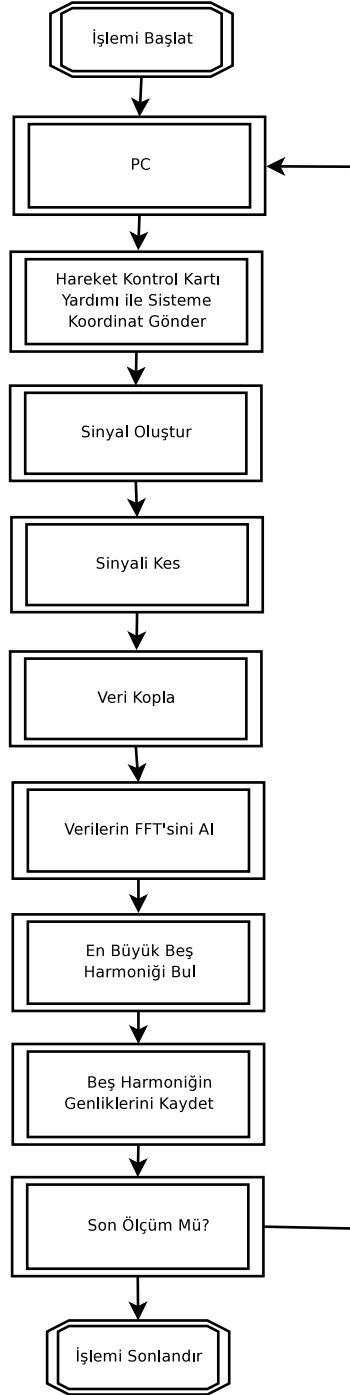
- [65] A. J. Coleman, M. Whitlock, T. Leighton, J. E. Saunderson, “*The spatial distribution of cavitation induced acoustic emission, sonoluminescence and cell lysis in the field of a shock wave lithotripter*”, *Phys. Med. Biol.*, Vol. 38, 1993, 1545-1560.
- [66] W. D. O’Brien, Jr., J. F. Zachary, “*Lung damage assessment from exposure to pulsed-wave ultrasound in the rabbit, mouse, and pig*”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 44, No. 2, 1997, 473-485.
- [67] F. Fedele, A. J. Coleman, T. G. Leighton, P. R. White, A. M. Hurrell, “*Development of a new diagnostic sensor for extra-corporeal shock-wave lithotripsy*”, *Journal of Physics: Conference Series* 1, *Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine*, 2001, 134-139.
- [68] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/13244>
- [69] <http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/8BCB60B78C3D803586256C4D0072419A>
- [70] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/12618>
- [71] <http://www.arww-rfmicro.com/html/18200.asp?id=3>
- [72] <http://www.ni.com/labview/>
- [73] O. A. Kaya, A. Sahin, D. Kaleci, “*Pressure field of rectangular transducers at finite amplitude in three dimensions*”, *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 32 (2), 2006, 271-280.
- [74] T. L. Szabo, “*Anisotropic surface acoustic wave diffraction*”, *Physical Acoustics*, Academic Press, Vol. 13, 1977, 79-111.
- [75] B. Ward, A. C. Baker, V. F. Humphrey “*Nonlinear propagation applied to the improvement of resolution in the diagnostic medical ultrasound*”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 101 (1), 1997, 143-154.

- [76] L. Filipczynski, T. Kujawska, R. Tymkiewicz, J. Wojcik, “*Nonlinear and linear propagation of diagnostic ultrasound pulses*”, *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol 25, No. 2, 1999, 285-299.
- [77] M. Vilkickas, R. Kays, “*Remote measurements of the ultrasonic pressure distribution using focused transducer*”, *Ultragarsas*, Nr. 1(58). 2006, 37-42.
- [78] <http://labplot.sourceforge.net/>
- [79] <http://www.mathworks.com/>
- [80] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=764&objectType=file>
- [81] M. A. Averkiou, “*Tissue harmonic ultrasonic imaging*”, *Optical and Acoustical Imaging of Biological Media*, No. 4, 2001, 1139-1151.
- [82] M. A. Averkiou, D. R. Roundhill, J. E. Powers, “*A new imaging technique based on the nonlinear properties of tissues*”, in: *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Vol. 2, 1997, 1561-1566.
- [83] T. S. Desser, R. B. Jeffrey, “*Tissue harmonic imaging techniques: Physical principles and clinical applications*”, *Seminars in Ultrasound, CT, and MRI*, Vol 22, No 1 (February), 2001, 1-10.
- [84] A. Bouakaz, S. Frigstad, F. J. T. Cate, N. de Jong, “*Super harmonic imaging: A new imaging technique for improved contrast detection*”, *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 28, No.1, 2002, 59-68.
- [85] N. de Jong, A. Bouakaz, F. J. T. Cate, “*Contrast harmonic imaging*”, *Ultrasonics*, Vol. 40, 2002, 567-573.
- [86] D. Gurari, “*Harmonic imaging using mechanical sector, B-Mode ultrasound system*”, Master Thesis, Department of Computer Science and Engineering, The Henry Edwin Sever Graduate Scholl, Washington University, Missouri, 2005.

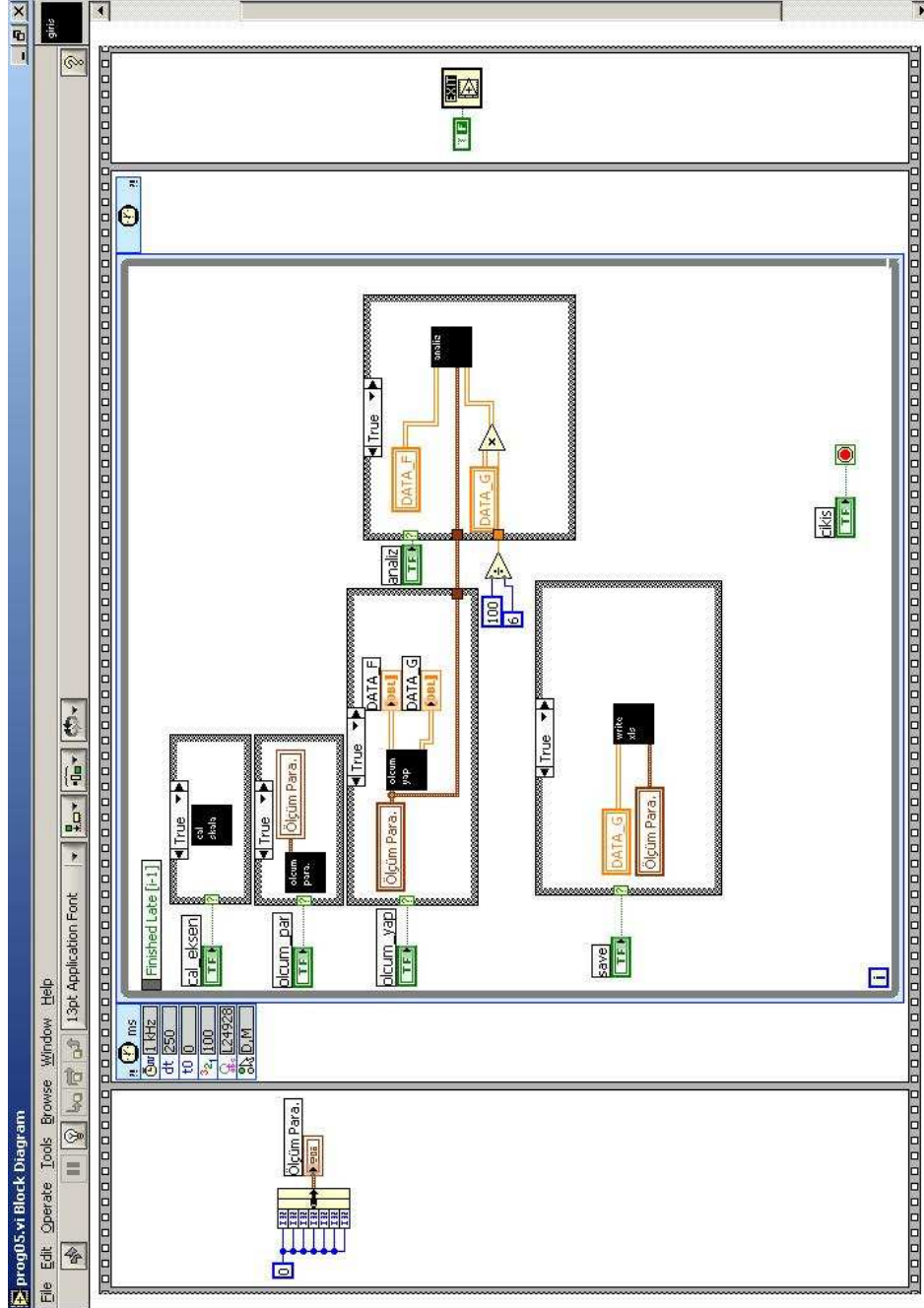
- [87] M. Qingyu, G. Xiufen, Z. Dong, “*Third order harmonic imaging for biological tissues using three phase-coded pulses*”, Ultrasonics, ARTICLE IN PRESS, 2006.
- [88] H. C. Starritt, F. A. Duck, A. J. Hawkins, V. H. Humphrey, “*The development of harmonic distortion in pulsed finite amplitude ultrasound passing through liver*”, Phys Med Biol, vol. 31, , 1986, 1401-1409.
- [89] T. Cristopher, “*Finite amplitude distortion-based inhomogeneous pulse echo ultrasonic imaging*”, IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Control, Vol. 44, 1997, 125-139.
- [90] F. Tranquart, N. Grenier, V. Eder, L. Pourcelot, “*Clinical use of ultrasound tissue harmonic imaging*”, Ultrasound in Med. & Biol., Vol. 25, No. 6, 1999, 889-894.

9. Ekler

EK 1

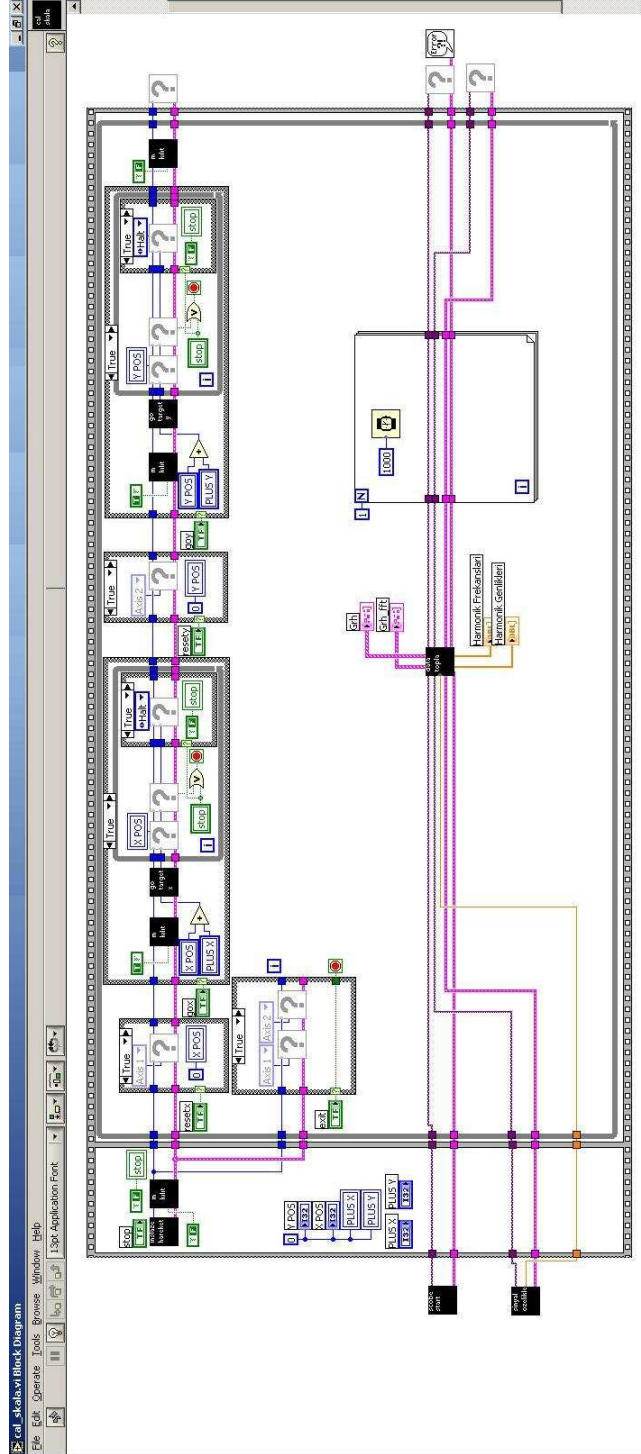


Şekil 9.1: *Deney sistemi için geliştirilen yazılımın akış diyagramı.*

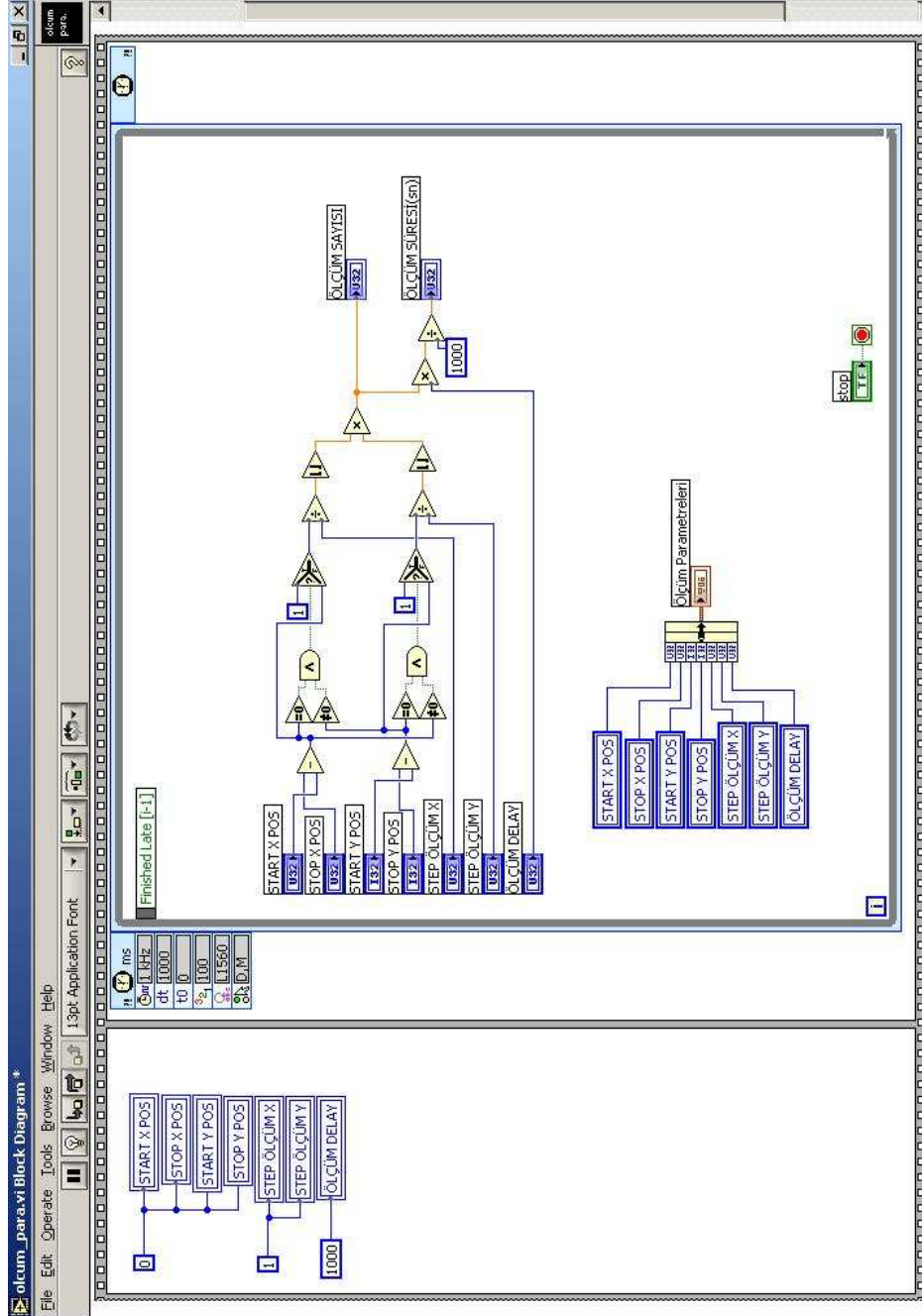


Şekil 9.2: Şekil 5.10'da gösterilen başlangıç ara yüzün *Labview Block Diagramı*.

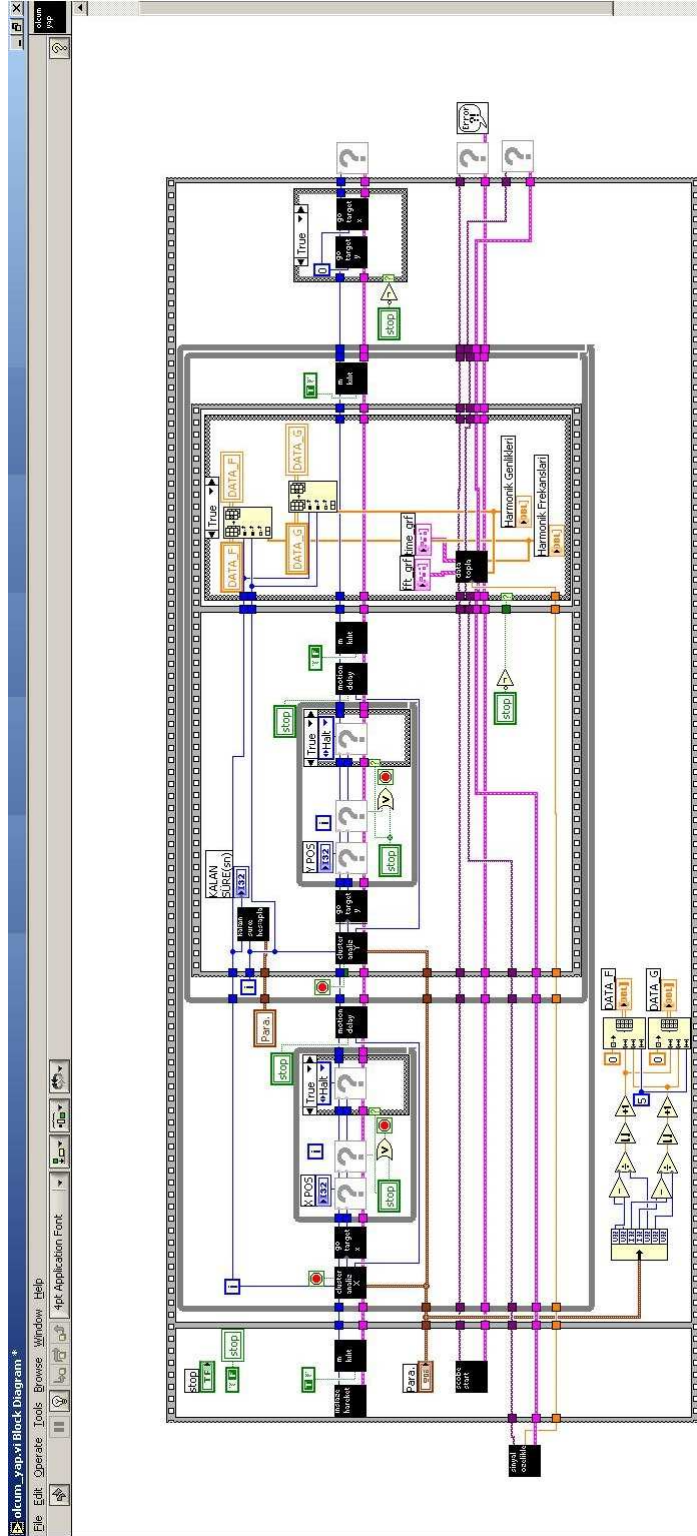
EK 3



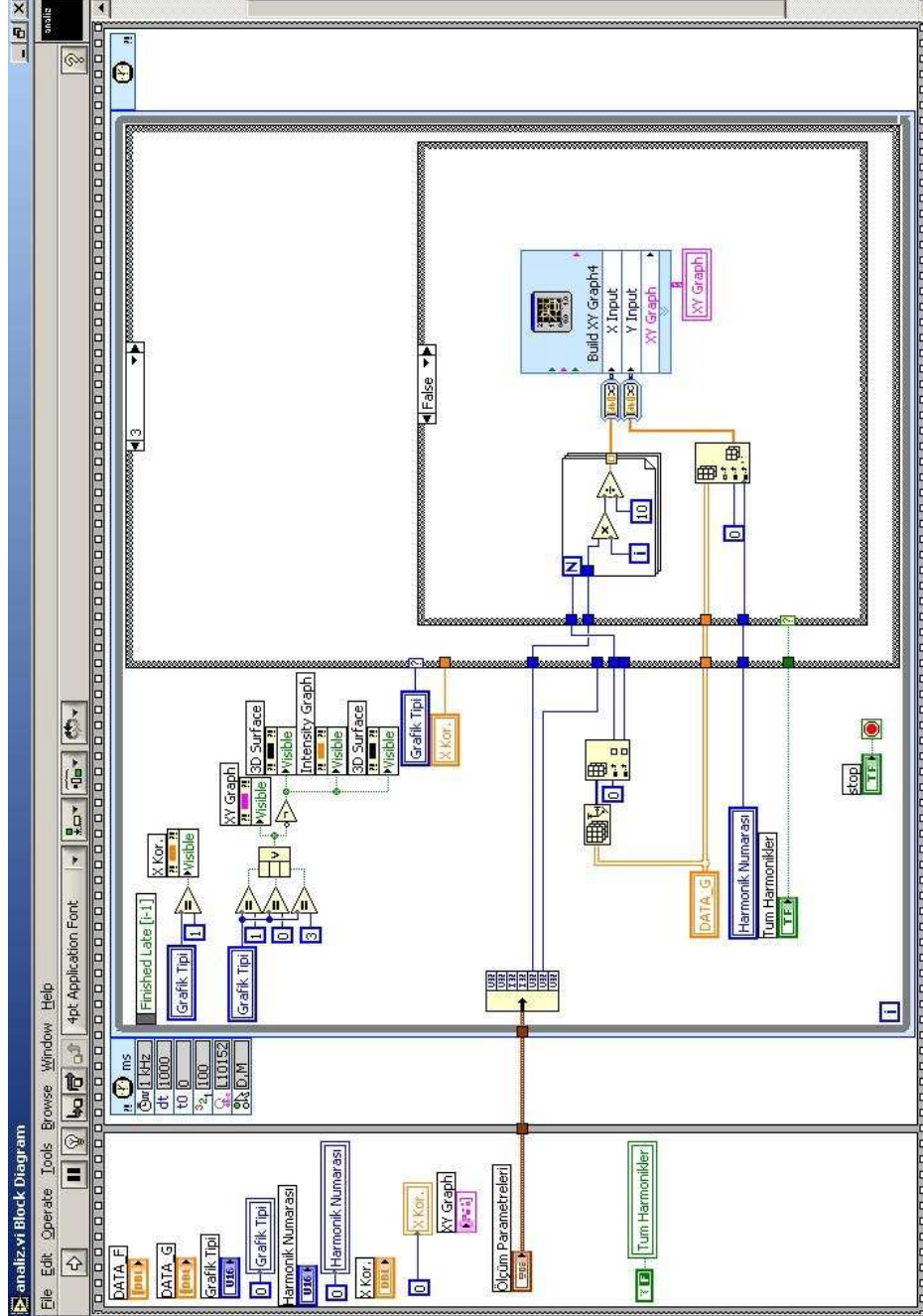
Şekil 9.3: Şekil 5.11’de gösterilen koordinat eksenlerinin ayarlanmasında kullanılan ara yüzün *Labview Block Diagramı*.



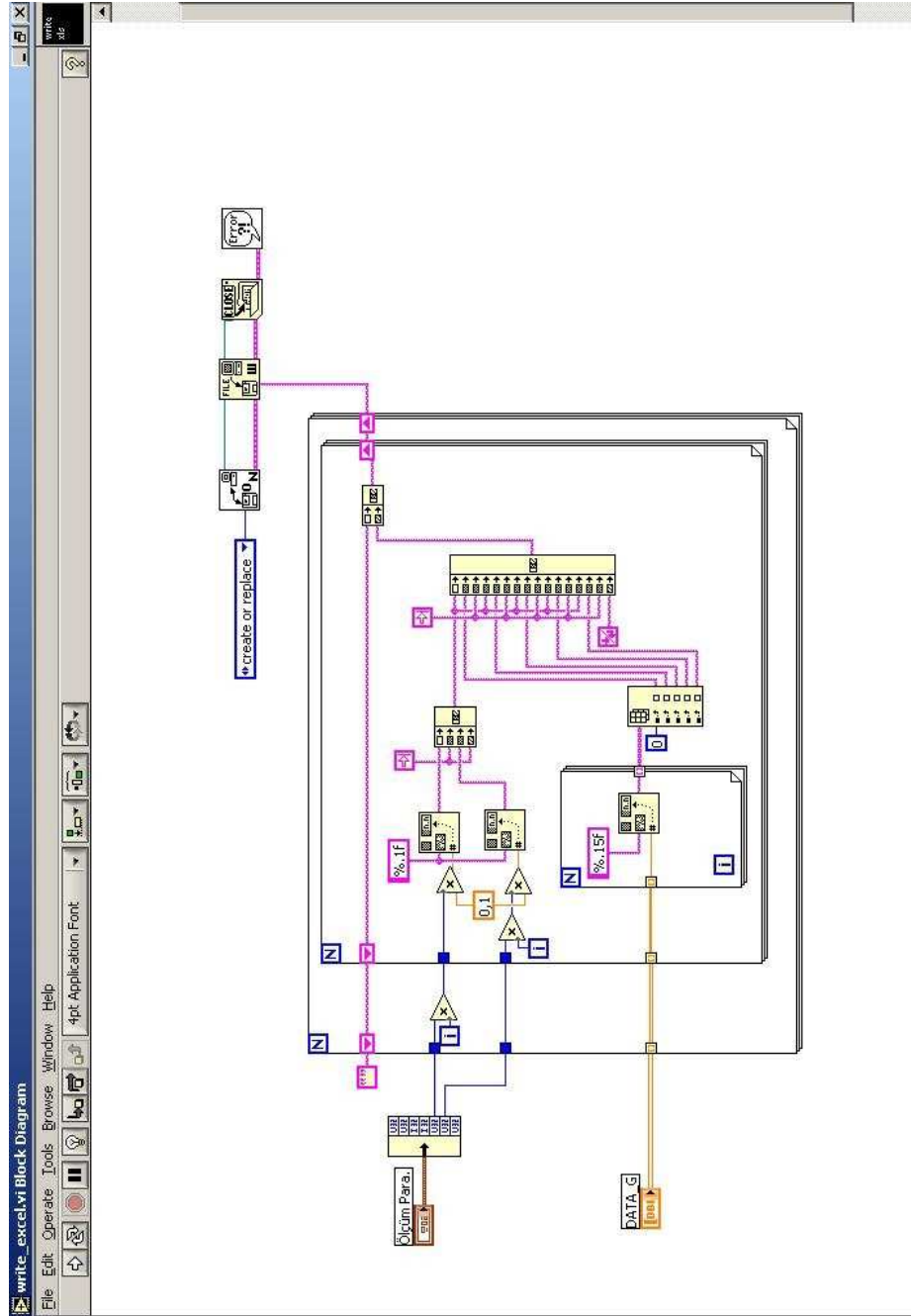
Şekil 9.4: Şekil 5.12’de gösterilen ölçüm parametrelerinin belirlendiği ara yüzün *Lab-view Block Diagram*.



Şekil 9.5: Şekil 5.13’de gösterilen data topla ara yüzünün Labview Block Diagramı.



Şekil 9.6: Şekil 5.14'de gösterilen dataların analizlerinin yapılmasında kullanılan ara yüzün *Labview Block Diagramı*.



Şekil 9.7: Dataların dosyaya yazılmasını sağlayan alt programın *Labview Block Diagramı*.

Özgeçmiş

1977 yılında Malatya'nın Hekimhan ilçesine bağlı Hasacelebi kasabasında doğdu. İlk ve orta öğrenimini Hasacelebi'de, lise öğrenimini Sivas'ta tamamladı. 1995 yılında yapılan Öğrenci Yerleştirme Sınavı (ÖYS) sonucu, Balıkesir Üniversitesi, Necatibey Eğitim Fakültesi, Fizik Öğretmenliği Bölümü'ne girmeye hak kazandı. 1999 yılında aynı bölümden mezun oldu. 1999 yılı eylül ayında, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansa, kasım ayında ise, İnönü Üniversitesi Fen - Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü'nünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2002 yılında Doç. Dr. Ali Şahin'in danışmanlığında "Ultrasonik Bozulma ile Yayılma Mesafesi Arasındaki İlişki" isimli Yüksek Lisans tezini tamamladı. Aynı yıl İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün Fizik Anabilim Dalı'nda doktora başlandı. 2005 yılında doktora ders aşamasını bitirdi ve yeterlilik sınavını tamamladı. 2007 Üniversiteler Arası Dil Sınavını (ÜDS) başarıyla geçti. Halen aynı kuruluştta araştırma görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.

Sürekli Adres: İnönü Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik
Bölümü, devkan@inonu.edu.tr

Bu tez L^AT_EX[†] ile Linux[§] işletim sistemi altında hazırlanmıştır.

[†]L^AT_EX bilimsel rapor, tez, makale hazırlama programıdır

[§]Linux İnternet üzerinden geliştirilen ve serbestçe dağıtılan bir işletim sistemidir.