T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ULTRASONİK KALINLIK ÖLÇER VE HATA DEDEKTÖRÜ SİSTEMİ TASARIMI

Hazırlayan
Ahmet ATCI

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

MAYIS 2017
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ULTRASONİK KALINLIK ÖLÇER VE HATA DEDEKTÖRÜ SİSTEMİ TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Ahmet ATCI

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

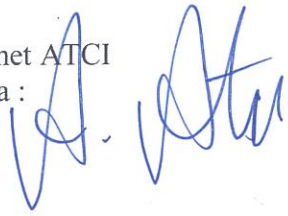
Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2015-5697 kodlu proje ile desteklenmiştir.

MAYIS 2017
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Ahmet ATCI
İmza :



YÖNERGEYE UYGUNLUK

"Ultrasonik Kalınlık Ölçer ve Hata Dedektörü Sistemi Tasarımı" adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Ahmet ATCI

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

ABD Başkanı
Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR danışmanlığında **Ahmet ATCI** tarafından hazırlanan "**Ultrasonik Kalınlık Ölçer ve Hata Dedektörü Sistemi Tasarımı**" adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

24 / 05 / 2017

JÜRİ:

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Turan Özdemir .....

Üye : Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN .....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Teoman KARADAĞ .....

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 20/06/2017 tarih ve 2017/27-31 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

21 / 06 / 2017

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca her türlü teknik destek ve yardımları ile bu tezin gerçekleşmesinde katkı sahibi sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FYL-2015-5697) teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet ATCI
Kayseri, Mayıs 2017

ULTRASONİK KALINLIK ÖLÇER VE HATA DEDEKTÖRÜ SİSTEMİ TASARIMI

Ahmet ATCI

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2017

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

ÖZET

Bu yüksek lisans tezi kapsamında çeşitli malzemelerin kalınlık ölçüm ve hata tespiti işlemlerini ultrasonik muayene yöntemi ile gerçekleştirecek bir el terminalinin güncel teknolojiler ile tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ultrasonik muayene işlemini mümkün kılan, yüksek voltaj güç kaynağı (+40V - +250V), yüksek frekanslı ve yüksek genlikli darbe üreteci (1-10 MHz), geri dönen (yansıyan) anlamlı akustik sinyallerin kuvvetlendirildiği analog kuvvetlendirme birimi (+72dB), yüksek örnekleme hızına sahip sayısallaştırıcı (ADC, Analog Sayısal Dönüştürücü) birim (100 MHz), veri edinimi ve işlenmesi işlemleri ile darbe üreteci birimin sürücüsü olan FPGA (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri, Field Programmable Gate Arrays) katı, geliştirilen kartın kontrolü, PC haberleşmesi ve TFT ekran ara yüzünü süren MCU (Mikrodenetleyici, Microcontroller Unit) katı gibi alt birimlerinin bulunduğu bir ultrasonik cihazın donanım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında USB ara yüzü üzerinden ultrasonik kartın konfigürasyonlarının atanabildiği ve ultrasonik muayene işleminin PC ortamında izlenebildiği bir görsel yazılım da gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen ultrasonik cihazı oluşturan birimlerin donanımsal testleri ve FPGA & MCU gömülü yazılımlarının yüklemeleri yapıldıktan sonra ultrasonik kalınlık ölçümü ve tahribatsız muayene işlemlerinin başarı ile gerçekleştirildiği prototip tasarımı tamamlanmış ve ölçüm sonuçları bu tez dokümanı içerisinde verilmiştir. Bu yüksek lisans çalışması sayesinde ultrasonik muayene tekniği hakkında kapsamlı bilgi birikimi edinilmiş ve üzerinde farklı yazılımsal ve donanımsal geliştirme çalışmalarının yapılabileceği bir ultrasonik geliştirme kartı ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik Test; Kalınlık Ölçümü; Hata Tespiti; FPGA; Veri Kazanımı

DESIGN OF A ULTRASONIC THICKNESS GAUGE AND FLAW DETECTOR SYSTEM

Ahmet ATCI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, May 2017

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

ABSTRACT

In this Master's Thesis, the main goal of the study is accomplishing thickness gauging and nondestructive testing of various materials with the ultrasonic testing method and designing a handheld device with up to date technologies. For this purpose, hardware design of all the necessary subdivisions which are required for ultrasonic testing such as, high voltage generation unit (+40V- +200V), high frequency and high amplitude pulser unit (1-10 MHz), gain unit for strengthening meaningful echoes (+72dB), high-speed digitizer (ADC, Analog Digital Converter) unit (100 MHz), an FPGA (Field Programmable Gate Arrays) unit for data acquisition, signal processing and driving pulser unit and an MCU (Microcontroller Unit) unit which is responsible for card control, PC communication and TFT controller tasks are combined on a ultrasonic board. Besides, a PC program which uses USB as an interface with the board is developed to achieve card control and visual presentation of ultrasonic test results by PC. After finishing hardware test of all the units and embedded programming of MCU & FPGA, ultrasonic thickness gauging and nondestructive testing prototype board is completed and measurment results are given in this thesis. With the prototyping board, thickness measurement and flaw detection processes were performed successfully and the results were given in this study. In addition to this, besides acquiring comprehensive knowledge about the ultrasonic inspection technique, an ultrasonic development card which is capable of developing various software and hardware improvements has been presented.

Keywords: Ultrasonic Test; Thickness Gauging; Flaw Detection; FPGA; Data Acquisition

İÇİNDEKİLER

ULTRASONİK KALINLIK ÖLÇER VE HATA DEDEKTÖRÜ SİSTEMİ TASARIMI

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI iii
KABUL VE ONAY SAYFASI iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR VE SİMGELER xi
TABLOLAR LİSTESİ xii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiii

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
GENEL BİLGİLER

1.1. Ultrasonik Muayene Yönteminin Tarihsel Gelişimi 3
1.2. Ultrasonik Muayenenin Temel Prensipleri 5
1.2.1 Ultrasonik Sinyallerin Üretilmesi 6
1.2.1.1 Ultrasonik Çevirgeçler 7
1.2.2 Ses Sinyallerinin Malzeme İçerisine Aktarılması ve Akustik Empedans . 8
1.2.2.1 Ultrasonik Sinyallerin Yayılım Biçimleri 11
1.2.2.1.1 Boyuna Dalgalar (Longitudinal Waves) 14
1.2.2.1.2 Enine Dalgalar (Shear Waves) 14
1.2.2.1.1 Rayleigh Dalgalar 15
1.2.2.1.1 Lamb Dalgalar 15
1.2.2.2 Ultrasonik Dalganın Kırınım, Dağılım ve Zayıflaması 16
1.2.2.3 Sinyal Gürültü Oranı 19

1.2.2.4 Frekans Etkisi 21
1.2.2.5 Dalga Boyu ve Hata Tespiti 21
1.2.3 Malzeme İçerisinden Geri Dönen Sinyallerin Kazanımı 23
1.2.3.1 Görüntüleme Teknikleri 23
1.3. Ultrasonik Test Teknikleri 24
1.3.1 Doğrudan Geçişli Ultrasonik Test Tekniği (TTU) 25
1.3.2 Darbe Yankı Test Tekniği (PE) 26
1.4. Lineer Dizi (Linear Array) ve Fazlı Dizi (Phased Array) Çevirgeç Test Tekniği .. 26

2. BÖLÜM
GEREÇ ve YÖNTEM

2. Gereç ve Yöntem 27
2.1. Sistemin Genel Blok Diyagramı 30
2.2. Batarya, Güç Kontrol ve Regülasyon Bölümü 32
2.3. Ultrasonik Analog Ön Uç Alt Birimleri 34
2.3.1 Çevirgeç 34
2.3.2 T/R Anahtarlama 36
2.3.3 Kuvvetlendirme Birimi 37
2.3.4 ADC Birimi 40
2.3.5 Yüksek Voltaj Üretim Birimi 40
2.3.6 Darbe Üreteci Birimi 41
2.4. Veri Edinim Bölümü 42
2.4.1 FPGA Birimi 42
2.5. Merkezi Kontrol Birimi 44
2.5.1 Mikrodenetleyici Birimi 44
2.5.1.1 USB Ara Yüzü 44
2.5.1.2 Tuş Takımı Birimi 45
2.5.1.3 TFT Ekran Kontrolcü Birimi 45
2.5.1.4 Harici Flash Hafıza 49
2.5.1.5 Buzzer Birimi 49
2.6. FPGA-MCU Veri Transferi İşlemi 49
2.7. PC Programı 50
2.8. Uygulamanın Akışı 53

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Kalınlık Ölçüm İşleminin Gerçekleştirilmesi 56

3.1. Hata Tespit İşleminin Gerçekleştirilmesi 61

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4. Tartışma-Sonuç ve Öneriler..... 68

KAYNAKLAR 71

EKLER..... 75

ÖZGEÇMİŞ..... 77

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı	Birimi
TTU	Doğrudan Geçişli Ultrasonik Test Yöntemi (Through-Transmission Ultrasound)	
PE	Darbe Yankı Ultrasonik Test Tekniği (Pulse Echo Ultrasound)	
ρ	Yoğunluk	$(kg.m^{-3})$
v	Boyuna Dalgalardaki Ses Hızı	$(m.s^{-1})$
Z	Akustik Empedans	$(10^{6}kg.m^{-2}.s^{-1})$
UM	Ultrasonik Muayene	
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array)	
ASIC	Uygulamaya Özel Tümleşik Devre (Application Specific Integrated Circuit)	
DSP	Sayısal Sinyal İşlemcisi (Digital Signal Processor)	
FIFO	İlk Giren İlk Çıkar (First In First Out)	
MCU	Merkezi Kontrol Ünitesi (Microcontroller Unit)	
TFT LCD	İnce-Film-Transistörlü Sıvı-Kristal Gösterim (Thin-Film-Transistor Liquid-Crystal Display)	
PCB	Basılmış Devre Kartı (Printed Circuit Board)	
ADC	Analog Sayısal Dönüştürücü (Analog Digital Converter)	
LNP	Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici (Low-Noise Preamp)	
VGA	Değişken Kazanç Kuvvetlendiricisi (Variable Gain Amplifier)	
UAFE	Ultrasonik Analog Ön Uç (Ultrasonic Analog Front End)	
HSYNC	Yatay Senkronizasyon (Horizontal Synchronization)	
VSYNC	Dik Senkronizasyon (Vertical Synchronization)	
DMA	Direkt Hafıza Erişimi (Direct Memory Access)	
RGB	Kırmızı-Yeşil-Mavi (Red-Green-Blue)	
FPS	Saniyede Sahne Gösterimi (Frame per Second)	
PRF	Darbe Tekrar Frekansı (Pulse Repetition Frequency)	
TOF	Ultrasonik Dalgaların İlerleme Süresi (Time of Flight)	

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Bazı malzemelerin akustik özellikleri.....9
Tablo 2.1. USB veri paketleri 51
Tablo 3.1. Alüminyum test bloğunun ölçüm sonuçların incelenmesi.....61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. a) UBM uygulaması ile elde edilen görüntü b) 3D ultrasonik görüntüleme.....5
Şekil 1.2. Geleneksel ultrasonik hata dedektörünün temel bileşenleri 6
Şekil 1.3. Ultrasonik çevirgecin temel bileşenleri 8
Şekil 1.4. Yansıyan ve iletilen ses dalgalarının büyüklüklerinin denkleme uygulanması 10
Şekil 1.5. Yansıyan ve iletilen ses dalgalarının yüzde cinsinden büyüklükleri 11
Şekil 1.6. Her bir parçacığın seri bağlı yay biçimli gösterimi 12
Şekil 1.7. Newton'un 2. Yasası ile Hooke yasasının ilişkisini gösteren yay modeli 13
Şekil 1.8. Farklı tipteki dalga ilerlemeleri esnasındaki parçacık hareketleri 15
Şekil 1.9. Giriş, yansıma ve kırılma açılarının birbiriyle ilişkisi 16
Şekil 1.10. Açılı dalga oluşturma ve mod dönüştürme işlemi 17
Şekil 1.11. Yüksek frekanslarda zayıflama etkisi 21
Şekil 1.12. Ultrasonik dalga boyu ile kusur büyüklüğü ilişkisinin gösterimi 22
Şekil 1.13. A-Scan ve B-Scan Gösterimler a) Prob ve malzeme b) A-Scan gösterim c) B-Scan gösterim 24
Şekil 1.14. C-Scan görüntüleme a) Prob ve malzeme b) Tarama güzergahının gösterimi c) C-Scan gösterim.....24
Şekil 2.1. PCB tasarımı öncesinde oluşturulan Ultrasonik sistem a) Kontrol ünitesi (DSK6416) b) Ethernet ara yüz kartı c) 125 MHz ADC kartı d) FPGA ünitesi e) Alıcı ve verici çevirgeçler f) Darbe üreteci kartı g) PC programı 29
Şekil 2.2. PCB tasarımı öncesinde oluşturulan Ultrasonik sistemin blok diyagramı.....30
Şekil 2.3. Ultrasonik kalınlık ölçer ve hata dedektörü blok diyagramı.....31
Şekil 2.4. Sistemin Güç Yönetimin Blok diyagramı.....33
Şekil 2.5. Çevirgeçlerin gösterimi a) Tek elementli 1 MHz çevirgeç b) Çift elementli 2 MHz çevirgecin fotoğrafı.....35
Şekil 2.6. Tez çalışması ile üretilen ultrasonik kartın çevirgeç girişleri ve konfigürasyonları 36
Şekil 2.7. Anahtarlama entegre devresi blok diyagramı 37
Şekil 2.8. Örnek bir kuvvetlendiricinin blok diyagramı 38
Şekil 2.9. Kuvvetlendirici girişi diferansiyel sinyallerinin üretilmesi 38

Şekil 2.10. VGA biriminin kazanç kontrol pinine uygulanan analog genlik ile kazanç miktarının gösterimi 39
Şekil 2.11. Dijital potansiyometre ile VGA kazanç kontrol genliğinin üretilmesi 39
Şekil 2.12. Mosfet sürücüsü örnek konfigürasyonu 41
Şekil 2.13. Darbe Üreteci Ünitesi akış diyagramı 42
Şekil 2.14. FPGA biriminin içerisinde oluşturulmuş önemli modüllerin gösterimi 43
Şekil 2.15. 320x240 LCD kontrolcü birimi 46
Şekil 2.16. TFT ekran için gerekli olan olan konfigürasyon sinyallerinin gösterimi a) Piksellerin sürülmesi b)Satırların sürülmesi 48
Şekil 2.17. Harici Bus Ara yüz pinleri 50
Şekil 2.18. PC programında konfigürasyon sayfasının gösterimi 51
Şekil 2.19. PC programında analiz sayfasının gösterimi 53
Şekil 2.20. Uygulamanın yazılımsal akış diyagramının gösterilmesi 54
Şekil 2.21. Tez çalışması ile üretilen ultrasonik kartın birimlerinin gösterimi a) Batarya kontrol birimi b) Voltaj regülasyonu birimi c) FPGA ünitesi d) ADC birimi e) Kuvvetlendirici Birimi f) Darbe üreteci g) Yüksek voltaj üretim birimi h) MCU birimi 55
Şekil 3.1 Ultrasonik kalınlık ölçüm test kurulumu a) PC b) Ultrasonik Kart c) Test bloğu 57
Şekil 3.2 1 MHz çevirgeç ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunun gösterimi 57
Şekil 3.3 5 MHz çevirgeç ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunun gösterimi 58
Şekil 3.4 Yalnızca iki adet 5 MHz'lik yankı sinyalinin gösterimi 59
Şekil 3.5 10mm, 20mm ve 30mm kalınlık değerlerine sahip alüminyum blok üzerinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları a) 10mm kalınlık ölçümü b) 20mm kalınlık ölçümü c) 30mm kalınlık ölçümü 60
Şekil 3.6 Hata tespit işlemi gerçekleştirilen referans bloğun görünümü a) 100mm'lik kusursuz bölgede gerçekleştirilen ölçüm b) Kusurlu bölgede gerçekleştirilen ölçüm 62
Şekil 3. 7Şekil 3.6a'da gerçekleştirilen ultrasonik ölçümün görüntülenmesi a) Ham A-Scan görüntüleme b) Bölgelere ayrılmış görüntü c) Ultrasonik sinyalin ilerlediği blokların gösterimi 64

Şekil 3.8 Şekil 3.6b'de gerçekleştirilen ultrasonik ölçümün görüntülenmesi a) Ham A-Scan görüntüleme b) Bölgelere ayrılmış görüntü c) Ultrasonik sinyalin ilerlediği blokların gösterimi.....66
Şekil 4.1. Şekil 4.1: Veri transfer biçimlerinin gösterimi a) Tez kapsamında kullanılan veri transfer metodu b) Gelecek çalışmalarda eklenebilecek veri transfer metodu.....69
Şekil 4.2. Dâhili 8 kanala sahip özelleşmiş ultrasonik analog ön uç vazifesi gören AFE5805 entegresinin blok diyagramı 70

GİRİŞ

Ultrasonik muayene, tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Tahribatsız muayene bir nesnenin amaçlanan fonksiyonunu yerine getirme kabiliyetine mani olmadan, fiziksel durumunun belirlenmesi olarak tanımlanmıştır. Tahribatsız muayene yöntemi genellikle uygun bir enerji çeşidi kullanarak malzeme özelliklerini ortaya koymayı ya da malzeme bağlantısızlıklarını (yüzey, iç veya gizlenmiş kusurlar) tespit etmeyi amaçlamaktadır [1]. Günümüzde pek çok endüstriyel ürünün muayene işlemi hem ekonomik hem de insan hayatı bakımından ciddi öneme sahiptir ve birçok tahribatsız muayene tekniği standart hale gelmiştir. Bunlardan başlıcaları Görsel ve optik Test (Visual and Optical Testing), Ultrasonik Muayene (Ultrasonic Testing), Elektromanyetik Test (Electromagnetic Testing), Termografik Test (Thermographic Testing), Radyografik Test (Radiographic Testing), Sıvı İlerleme Testi (Liquid Penetrant Testing), Manyetik Parçacık Testi (Magnetic Particle Testing), Akustik Yayılım Testi (Acoustic Emission testing), Manyetik Rezonans Görüntüleme Testi (Magnetic Resonance Imaging Testing)
gibi tahribatsız muayene uygulamalarıdır. Bu muayene teknikleri maliyet, sağlık, malzeme tipi, test ortamı gibi parametrelere bağlı olarak ayrışmaktadır ve birbirlerine karşı avantaj veya dezavantaja sahiptirler [1].

Ultrasonik muayene yönteminin diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre üstünlükleri aşağıda sıralanmıştır.

- Yüksek nüfuz gücü ile parçanın derinliklerindeki kusurların tespit edilebilmesi,
- Son derece küçük kusurların saptanmasına izin veren yüksek hassasiyete sahip olması,
- Parçanın tek yüzeyi kullanılarak test işleminin gerçekleştirilebilmesi
- Kusurların boyutunu, yönelimini, şeklini ve niteliğini tahmin etme bazı yetenekleri,

- Farklı akustik özelliklere sahip alaşımlarının yapısını tahmin edebilme yeteneğine sahip olması,
- Operasyon esnasında yakındaki personele, civardaki ekipmana ve malzemeler üzerine zararlı etkisi olmaması,
- Taşınabilir olması ve otomatikleştirilmiş bir işlem için son derece uygun olması
- Malzeme mekanik özellikleri ve mikro yapısının belirlenmesinde kullanılabilmesi,
- Hem görüntüleme hem de mikroskobik uygulama geliştirilebilmesi,
- Plazma ve vakum harici malzemenin bütün hallerinde kullanılabilmesi,

gibi özellikler diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre üstünlükleridir [2, 3].

Ultrasonik test elektronik malzeme ve komponent üreticileri, plastik ve kompozit malzeme üreticileri, uçak ve uzay sanayi, kimya ve petrokimya sanayi, gıda ve ilaç endüstrileri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır [2, 3].

Günümüzde ticarileşmiş taşınabilir ve ultrasonik hata tespit cihazları mevcut ve yoğun bir biçimde kullanılmaktadır. Ancak ülkemizde bu cihazların üretimi bulunmamaktadır. Bu nedenle bu alanda dışa bağımlılık söz konusudur. Bu cihazlar hem üretim sonrasında malzeme kusur tespiti gerçekleştirebilirken hem aktif bir biçimde kullanılan malzemelerin (boru hatları, basınçlı kaplar vb.) çeşitli etkilere karşı bakım ve muayene işlemlerinde de kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmanın temel amacı ultrasonik kalınlık ölçüm ve hata tespiti işlemini başarı ile gerçekleştiren bir ultrasonik el terminali geliştirilmesidir. Böylelikle ultrasonik yönteme ait bilgi birikimi oluşturulacak ve çeşitli ultrasonik uygulama, fonksiyon, yazılım ve donanımların geliştirilebileceği bir uygulama kartına sahip olunacaktır. Bir diğer önemli kazanım ise bu çalışmanın ultrasonik görüntülüme ve medikal ultrason gibi ileri teknoloji cihaz geliştirme süreçleri için bir basamak vazifesi görmesidir.

BÖLÜM 1
GENEL BİLGİLER

1.1 Ultrasonik Muayene Yönteminin Tarihsel Gelişimi

1877 yılında İngiltere'de Lord Rayleigh'in "Ses Teorisi" isimli bilimsel eseri ile ilk kez ses dalgaları matematiksel denklemler şeklinde ifade edilmiş ve akustik alanında gelecekteki çalışmaların temelleri atılmıştır. 'Ultrason' ifadesine gelince bu ifade ilk kez İtalyan biyolog, Lazzaro Spallanzani tarafından 1794 yılında yarasaların karanlıkta duyulamayan ses ile kusursuz bir şekilde yol alabildiklerinin ispatlanması ile ortaya çıkmıştır. Çok yüksek frekanslı, insan duyma limitinin üzerindeki ses dalgaları İngiliz bilim adamı Francis Galton Tarafından 1876 yılında "Galton Islığı" adını verdiği icadı ile üretilmiştir [4].

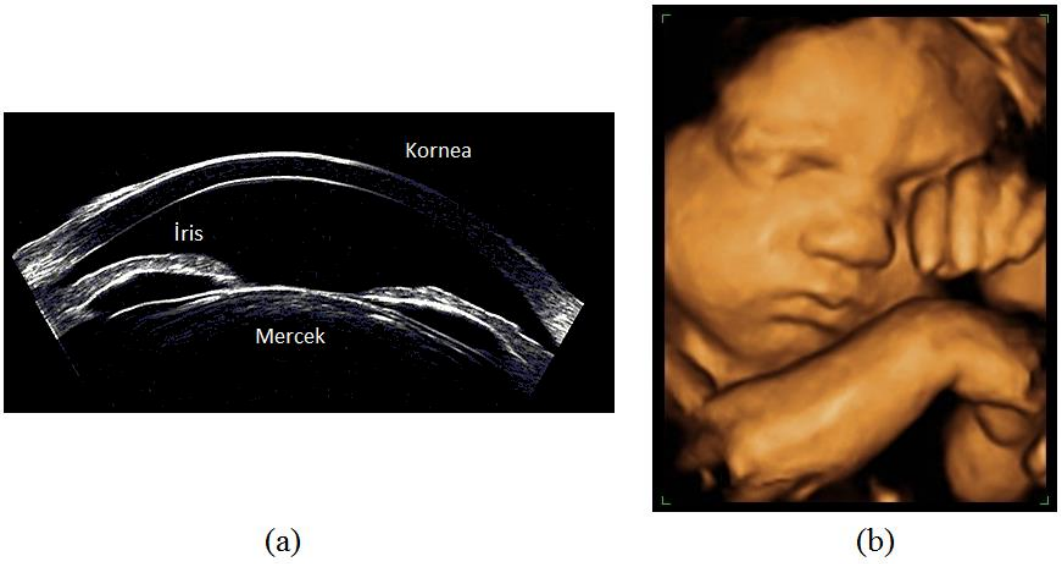
Yirmili yaşların başlarında kristallerin yapısını inceleyen ve özellikle piroelektrik etki (kristallerin ısıtılması ile elektrik akımı oluşturulması) üzerine araştırmalar yapan Pierre ve Jacques Curie kardeşler, bu etkinin malzeme üzerindeki mekanik stresin değişimine bağlı olduğunu ve kristal malzemeye uygulanan fiziksel kuvvet ile malzeme kutupları arasında potansiyel fark oluşturulabileceğini ilk kez ortaya koymuşlardır. Bu durum piezoelektrik etki olarak adlandırılmıştır. Fizikçi Gabriel Lippman tarafından 1881 yılında termodinamik ilkelere dayandırılarak kuvars kristallere uygulanan elektriksel genliğin bu kristallerde mekaniksel basınç oluşturulacağı ortaya konulmuş ve bu durum Curie kardeşler tarafından doğrulanmıştır. 1917 yılında Paul Langevin'in denizaltı tespiti için kuvars rezonatörler ve yüksek frekanslı akustik dalgaları kullanmasıyla modern ultrasonik dönemi başlamıştır [4]. Langevin, kuvars kristaller kullanarak yaklaşık 150 kHz frekansında sualtına daldırılmış objelerin yankı ile mesafelendirme çalışması ile ultrasonik (ses üstü) alana ait ilk uygulamalardan birini gerçekleştirmiştir [5].

II. Dünya Savaşı öncesinde sualtı ses dalgaları gönderilip alınması şeklinde nesnelerin tespitinde kullanılan sonar teknik, medikal tanı sistemlerinin gerçekleştirilmesi için ilham verici olmuştur [5]. 1929 ve 1935 yıllarında Sokolov metal nesnelerin tespitinde ultrasonik dalgaların kullanılması konusunda çalışmıştır [6]. Mulhauser 1931 yılında 2 çevirgeç kullanarak TTU (Doğrudan Geçişli Ultrasonik, Through-Transmission Ultrasound) yöntemiyle metal hatalarının tespit edilmesi uygulamasının patentini almıştır. Firestone 1940 ve Simons 1945 PE (Darbe Yankı, Pulsed Echo) yöntemini kullanarak ultrasonik test işlemini gerçekleştirmişlerdir. Firestone'un metallerdeki hata tespiti işlemini gerçekleştirmek amacıyla 1942 yılında aldığı patent ilk modern darbe yankı yöntemi olarak kabul edilmektedir [5].

II. Dünya Savaşı'ndan hemen sonra Japonya'daki araştırmacılar ultrasonik yöntemin medikal tanı alanındaki kullanım kapasitesi üzerinde çalışmışlardır. Bu alandaki ilk ultrasonik enstrüman A-Scan gösterim sağlayan osiloskop ekranı olmuştur. Bunu iki boyutlu ve gri tonlamalı (grayscale) B-Scan gösterimi izlemiştir [7]. Bu araştırmalar 1950'lere kadar batı dünyasına tamamıyla ulaşmadı. Sonraki yıllarda Japon araştırmacılar safra taşı, göğüs kütleleri ve tümörlerin tespitinde kullanılabilecek ultrasonik alanda elde ettikleri bilgileri uluslararası sağlık araştırmacılarına açtılar. Aynı zamanda Japonya Doppler ultrason uygulamasının kullanıldığı ilk ülkedir [7].

Teknolojinin pek çok alanda hızlı ilerleyişi sayesinde yüksek frekanslarda çalışan yüksek hassasiyetli çevirgeçler üretilebilmiş ve dijital teknolojide yaşanan gelişmelere bağlı olarak da ultrasonik testin örnekleme hızı ve kayıt işlemleri kolaylaşmıştır. Günümüzde ise fazlı-dizi ultrasonik test tekniği (phased-array ultrasound) ile 2D (iki boyutlu, two dimensions) görüntüleme ve Doppler görüntülemeye sahip cihazlar standart hale gelmiştir [6]. Günümüzde 2D görüntü elde etmek için tek sıralı ultrasonik çevirgeç dizileri (1D diziler) ile yüksek frekanslarda (>20 MHz) görüntüleme gerçekleştirmektedirler. Frekans artışı ile çözünürlük artmakta yani minimum hata büyüklüğü azalmakta, böylelikle mikroskobik ölçekte görüntüleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tarz uygulamalara UBM (Ultrasonik BioMikroskobi, Ultrasound Biomicroscopy) denilmektedir. Böylelikle kornea gibi ince yapıların kalınlık ve büyüklükleri hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olunabilmektedir [8]. 3D görüntüleme işlemini gerçekleştirmek içinse iki boyutlu çevirgeç dizileri kullanmak gerekmektedir [9]. Kretztechnik tarafından 1989 yılında Fransa Radyoloji Konferansı'nda ilk ticari 3D

ultrasonik görüntüleme cihazının tanıtımının ardından günümüzde 3D ve 4D (hareketli ultrason) farklı uzmanlıklarda tıbbi tanı koymak amacıyla hekimler tarafından yaygın biçimde kullanılmaktadır [10]. Şekil 1.1a'da UBM uygulamasıyla elde edilen gözün ultrasonik görüntüsü ve Şekil 1.1b'de fetüsün 3D ultrasonik görüntüleme örneği yer almaktadır [8].



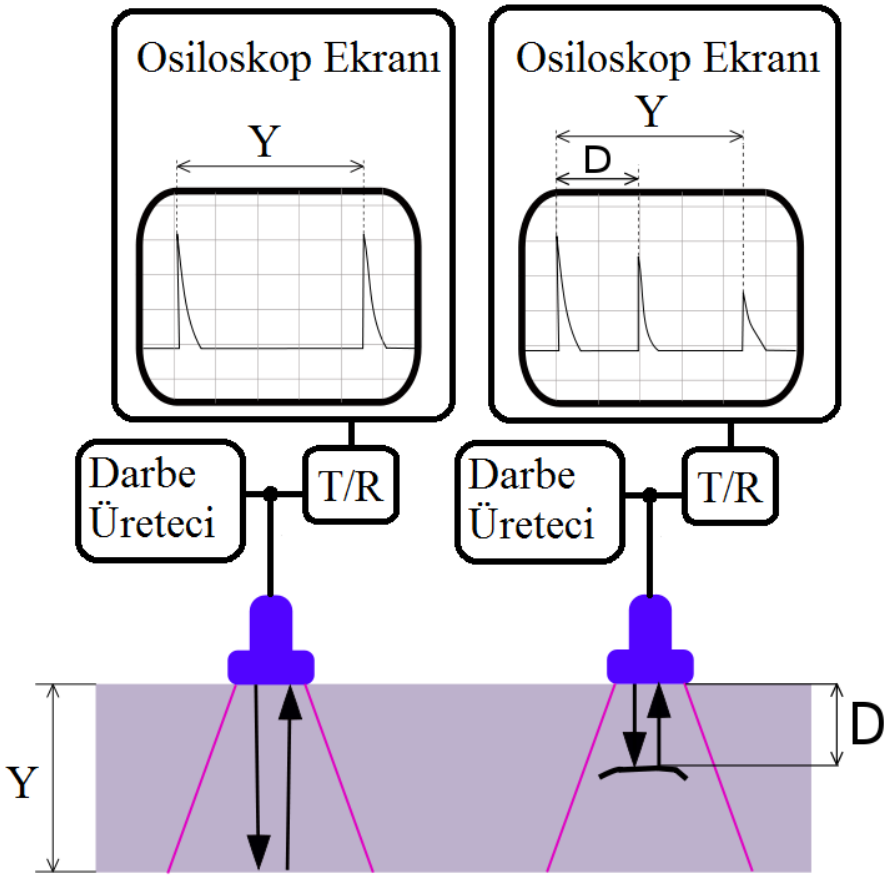
Şekil 1.1: a) UBM uygulaması ile elde edilen görüntü b) 3D ultrasonik görüntüleme

1.2 Ultrasonik Muayenenin Temel Prensipleri

Ultrasonik test, yüksek frekanslı ses sinyallerinin test malzemesi içerisine aktarılarak sesin malzeme içerisinde ilerlemesini ve malzeme içerisinde sesin maruz kaldığı etkileri inceleme işlemleridir [11]. Bu tanımlamadan yola çıkarak ultrasonik test işlemini gerçekleştirmek için yüksek frekanslı ses sinyallerine, bu sinyallerin malzeme içerisine aktarılmasına ve çeşitli etkilere maruz kalan sinyallerin kaydedilmesine ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.

Geleneksel ultrasonik test işleminin temel bileşenleri Şekil 1.2'de verilmiştir. Burada yer alan birimler darbe üreteci, ultrasonik çevirgeç, T/R (Gönderme/Alma, Transmit/Receive) anahtarlayıcı, test malzemesi ve osiloskop ekranıdır. Darbe üreteci yüksek genlik ve yüksek frekanslı elektriksel darbelerle ultrasonik çevirgeci besler, malzeme içine aktarılan ve çeşitli etkilere maruz kalıp arka yüzeyden yansıyan ses

sinyalleri tekrar ultrasonik proba ulaşır ve bu sinyaller geri kazanılarak osiloskop ekranında gösterilir. İlk osiloskop ekranında 'Y' kalınlığına sahip bir malzemenin test sonucu yer almaktadır. İki genlik tepesi arasındaki süre, sesin, test malzemesinin ön yüzeyinden arka yüzeyine kadar ulaşmak için geçen süredir. İkinci osiloskop ekranında ise 'D' mesafesi kadar bir derinlikte yer alan kusurun oluşturduğu hata genlik değeri görülmektedir. T/R anahtarlayıcı birim, üreteçten çıkan yüksek genliği engelleyip geri yansıyan düşük genlikli sinyallere izin vermektedir. Şekil 1.2'de yer alan bu uygulama darbe yankı yani PE yöntemidir.



Şekil 1.2: Geleneksel ultrasonik test işleminin temel bileşenleri

1.2.1 Ultrasonik Sinyallerin Üretilmesi

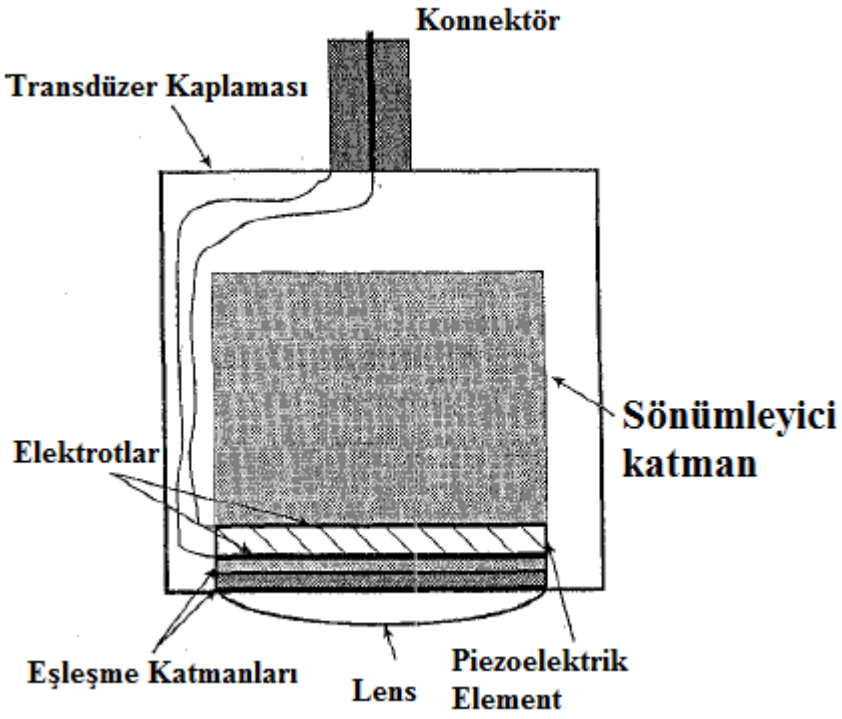
Ultrasonik ses 20 kHz üzeri insan duyumunun üzerindeki frekanstaki fiziksel ses işaretlerini ifade etmektedir. Galton ıslığı adı verilen düdüğün mucidi Francis Galton ilk kez 23 kHz - 54 kHz arasındaki ultrasonik sesleri üretmeyi başardığında başka bir

fiziksel etkiyi yani hava basıncını kullanmıştır. Bu frekanslardan daha yüksek değerlerdeki ultrasonik ses sinyallerinin üretilebilmesi için elektriksel bir sinyale maruz kaldığında fiziksel bir titreşim hareketi gerçekleştirerek cevap veren piezoelektrik kristallerin keşfi ile başlanmıştır. Piezoelektrik kristaller dipol biçimli moleküler yapıya sahiptirler ve elektriksel bir etkiye maruz kaldıklarında bütün dipoller aynı yönde kutuplanırlar. Elektriksel etkinin sonlandığı veya ters alternansta bir darbeye dönüştürüldüğü anlarda dipoller serbest kalır veya ters yönde kutuplanırlar [12]. Bu değişim frekansına bağlı olarak ses sinyalleri üretilmiş olur. Piezoelektrik kristalleri ultrasonik test işlemi için biçilmiş kaftan yapan şey piezoelektrik etkinin tersinir olmasıdır. Yani bu kristaller fiziksel bir etkiye maruz kaldıklarında bu etkiye elektriksel sinyaller üreterek karşılık verirler. Bu sayede malzeme içerisinde ilerlemiş ve bu ortamda çeşitli etkilere maruz kalarak geri dönen sinyaller piezoelektrik kristallere ulaşarak çarptığında, bu çevirgeçler elektrik işareti üretirler. Böylelikle ses sinyallerinin geri kazanımları gerçekleşmiş olur [9].

1.2.1.1 Ultrasonik Çevirgeçler

Dâhili piezoelektrik kristale sahip genellikle bir merkez frekansında çaloşan ultrasonik problara ultrasonik çevirgeç (ultrasonic trasnducer) denilmektedir. Şekil 1.3'de bir piezoelektrik ultrasonik çevirgecin bileşenleri görülmektedir [9].

Temel bileşenler piezoelektrik element, uygunlaştırıcı katman (matching layer) ve sönümleyici katmandır (backing layer). Piezoelektrik element ultrasonik ses sinyallerinin üretilmesi için elzemdir. Eşleşme katmanı ses sinyalleri bir ortamdan diğerine geçerken akustik empedansı test objesine yakın olan malzeme seçilerek maksimum güç transferini sağlamak için kullanılmıştır. Sönümleyici katman ise muayene yönünün tersi istikametinde oluşacak sinyallerin yok edilmesi ve ekstra fiziksel girişimlerin önlenmesi vazifelerini göstermektedir [9].



Şekil 1.3: Ultrasonik çevirgecin temel bileşenleri

1.2.2 Ses Sinyallerinin Malzeme İçerisine Aktarılması ve Akustik Empedans

Piezoelektrik kristallere uygulanan yüksek frekanslı ve yüksek genlikli elektriksel darbeler ile meydana gelen ultrasonik dalgalar öncelikle çevirgeç içerisindeki eşleşme katmanına aktarılır. Bu katman çevirgecin kullanılması planlanan alana özel ve yakın akustik empedansa sahip materyalden üretilir. Ses sinyalleri farklı malzemelerde farklı hızlarda ilerler ve bu değer o malzemenin karakteristik özelliğine bağlı olarak değişmektedir.

$$Z = C \cdot \rho \tag{1.1}$$

Empedans genellikle elektriksel ve mekanik uygulamalarda çeşitli sınırlarda enerji transfer karakteristiğini tanımlamak için kullanılır. Akustik empedans ya da ses direnci "Z" sembolü ile gösterilir. Bu değer ses hızı "*C*" ile malzemenin yoğunluğundan "ρ" üretilen bir malzeme özelliğidir [13]. Denklemi ise Eşitlik 1.1'de verilmiştir. Tablo 1.1'de bazı malzemelerin, yoğunluk, ses hızı ve akustik empedans değerleri verilmiştir [16].

Tablo 1.1: Bazı malzemelerin akustik özellikleri

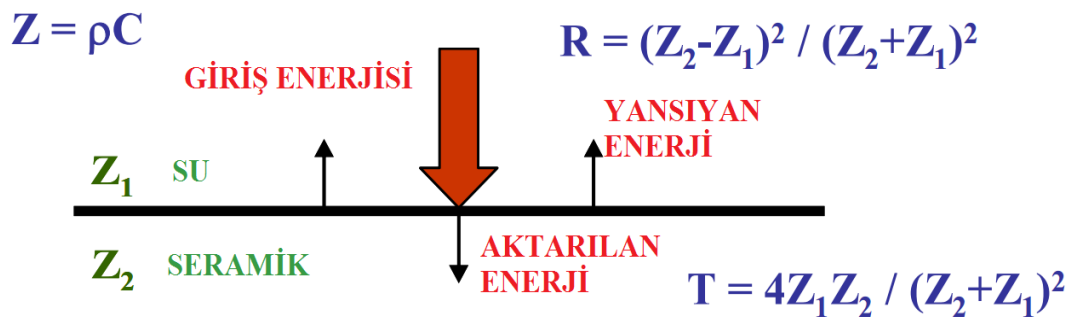
	Yoğunluk ρ[kg.m^{-3}]	Boyuna dalgalardaki ses hızı C[m.s^{-1}]	Akustik Empedans Z[10^6kg.m^{-2}.s^{-1}]
Hava	1,3	344	0.00045
Su	1000	1480	1,48
Epoksi reçine	1150~1300	2500~2800	2.8~3,7
Akrilik Reçine	1180	2720	3.21
Karbon/Karbon	1400~2200	1600~16000	2.24~35,2
Alüminyum	2690	6320	17

Akustik empedans, ses dalgalarının farklı malzemeler arası yansıma ve iletim karakteristiklerinin oluşturulmasını ve iki farklı malzeme arasındaki ses geçişindeki aktarılan ve yansıyan enerji miktarını belirler. Belirli bir malzeme içerisinde ilerleyen akustik dalgalar farklı bir malzeme ile buluştukları anda malzemenin sahip olduğu akustik empedansa bağlı olarak birleşim noktasından yansımaya maruz kalırlar ayrıca diğer malzemeye ses dalgalarının bir kısmı geçer veya tamamı geri yansır. Akustik empedans farklılığından ortaya çıkan bu durum empedans uyumsuzluğu olarak adlandırılır. Empedans uyumsuzluğu arttıkça bir malzemeden diğer malzemeye geçen enerji miktarı azalacaktır ve büyük miktarda geri yansıma gerçekleşecektir. Akustik dalgaların yansıma miktarı, yansıma katsayısı olan "R" ile tanımlanır ve aynı şekilde akustik dalgaların iletimi de iletim katsayısı olan "T" ile tanımlanır. Bu katsayıların formülü Eşitlik 1.2 ve 1.3'de verilmiştir. Formüllerde birinci ortamın akustik empedansı "Z_1" diğeri ise "Z_2" olarak tanımlanmıştır [13].

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \tag{1.2}$$

$$T = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \tag{1.3}$$

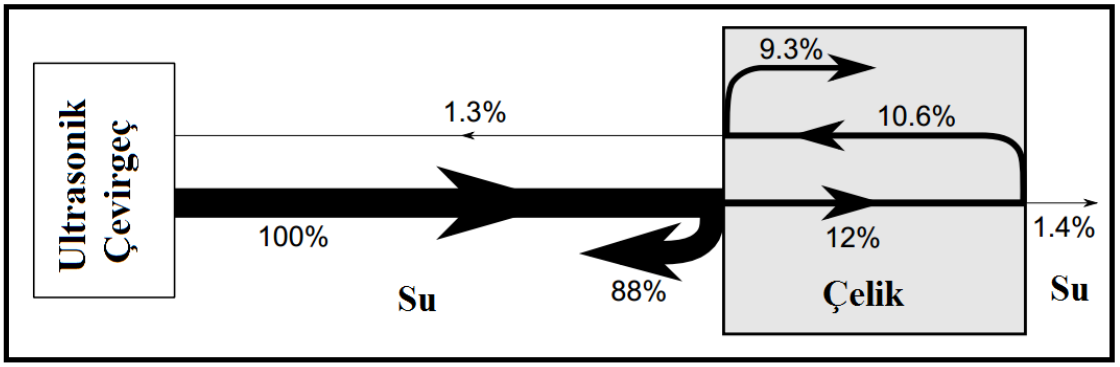
Yansıma ve iletim katsayılarını 100 ile çarpılarak yansıyan ve iletilen enerji miktarını, giriş enerjisinin yüzdesi biçiminde ifade edebiliriz. Yansıyan ve iletilen enerji miktarı kullanılan toplam enerjiye eşit olmalı bu yüzden yansıma ve iletim katsayıları toplamı her zaman 100' dür. Değerlerden birisi bulunursa diğerini bulmak için 100' den çıkarmak yeterlidir. Şekil 1.4'de farklı empedansa sahip bölgelerde ilerleyen ses sinyallerinin ilerleme ve yansıma denklemleri gösterilmiştir [13].



Şekil 1.4: Yansıyan ve iletilen ses dalgalarının büyüklüklerinin denkleme uygulanması

Ultrasonik inceleme esnasında test malzemesi içerisine maksimum miktarda enerji transferi yapılmak istenildiği takdirde, Z değerleri arasındaki fark minimize edilmek zorundadır. Böylelikle malzeme yüzeyinden malzeme içerisine doğru maksimum akustik enerji aktarımı sağlanır. Diğer taraftan malzeme içerisindeki boşluk, delaminasyon, homejensizlik gibi büyük akustik empedans uyumsuzluğuna sahip süreksizlikler, test malzemesinden çok farklı akustik empedansa sahiptirler. Bu yüzden akustik dalgaların geri yansımasına veya bloklanmasına sebep olmaktadırlar. Bunun sonucunda okuyucu probda beklenenden faklı bir ultrasonik sinyal oluşur. Böylelikle ultrasonik kusur tespit işlemi mümkün hale gelir. Test malzemesi ve dâhili kusur arasındaki empedans uyumsuzluğu arttıkça o kusurdan yansıyan akustik enerji büyüklüğü de artmaktadır. Bunun sonucunda malzemenin homojen olmama durumunu tespit etmek daha kolay olmaktadır. Bütün bu sebeplerden dolayı akustik empedans malzemelerin ultrasonik incelemelerinde kritik bir öneme sahiptir [13].

Şekil 1.5'de malzeme içerisindeki alınan yola bağlı olarak meydana gelen ultrasonik zayıflama ihmal edilerek ve Eşitlik 1.2 ve 1.3 kullanılarak çelik ve su ortamında yansıyan ve iletilen enerji miktarları yüzde biçiminde gösterilmiştir [14]. Malzeme arka yüzeyinden yansıyıp çevirgece ulaşan ses sinyallerinin büyüklüğü giriş enerjisinin %1,3'ü kadardır [14]. Bu değer ADC aktif genlik sahasından çok daha küçük değerlere tekabül ettiğinde sayısallaştırıcı birimin öncesi kuvvetlendirme işlemi zaruri hale gelir.

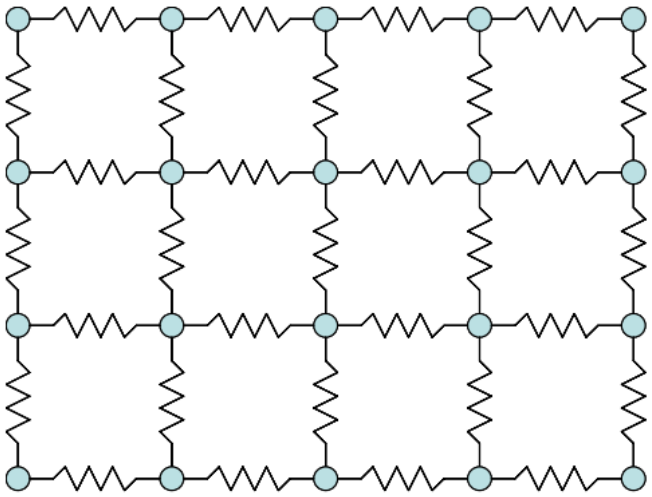


Şekil 1.5: Yansıyan ve iletilen ses dalgalarının yüzde cinsinden büyüklükleri

1.2.2.1 Ultrasonik Sinyallerinin Yayılım Biçimleri

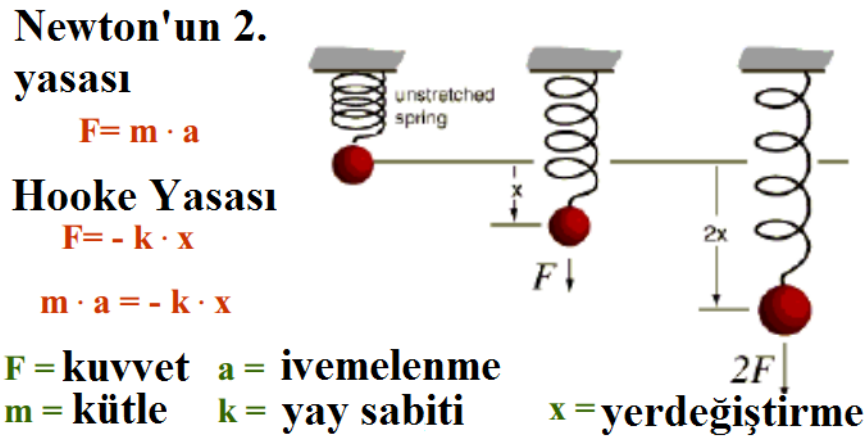
Bütün malzemeler denge pozisyonları etrafında titreşim hareketine zorlanabilen atomlardan oluşurlar. Titreşim hareketine zorlanabilen atomlar sayesinde ses dalgaları malzeme içerisinde titreşimler ya da taneciklerin osilasyon hareketleri ile yayılırlar. Elektromanyetik dalgaları kullanan x-ray teknolojisinin aksine ultrasonik muayenede kullanılan akustik dalgalar malzeme içerisindeki taneciklerin etkileşmesi şeklinde oluşan mekanik dalgalardır. Dalgalar malzeme içerisinden geçerken tanecikler denge pozisyonları etrafında ileri geri titreşmeye başlarlar. Bu düzensizlik tek bir yerde kalmayıp malzeme içerisinde seyahat eder. Bir malzeme elastik limitlerinin ötesinde çekme ya da basma altında zorlanmıyorsa, onun her bir taneciği elastik osilasyon yaparlar. Akustik dalgalar genelde dalganın frekansına uyumlu olarak malzemenin tanecikleri üzerinde zorlanmış osilasyon yapan bir basınç ile seyahat eder. Bir malzemedeki tanecikler denge pozisyonlarından çıktıklarında dâhili toparlama kuvvetleri ortaya çıkar. Bütün ortamın osilasyon hareketine yol açan, taneciklerin ataletiyle birleşmiş tanecikler arasındaki bu kuvvetler elastik toparlama kuvvetleridir. Taneciklerin sıkı bir şekilde birbirlerini tuttuğu katı ortamlarda bir taneciğin osilasyonu

komşu parçacıklarda osilasyon oluşmasına sebep olur ve bu şekilde devam ederek ultrasonik yayılım mekanizması tamamlanır. Her bir tanecik onun en yakın komşularının hareketlerini etkiler ve hem eylemsizlik hem de elastik toparlama kuvvetleri her tanecik için oluşur. Bütün tanecikler sinüzoidal osilasyonlarla toplu bir şekilde uyarılırsa, ilk düzlemdeki bütün tanecikler aynı genlik ya da osilasyon genişliği ve frekans ya da saniyedeki osilasyon sayısı ile osilasyon yapmak için zorlanır. Elastik kuvvetler ikinci düzleme osilasyonlarla iletilir ve titreşim hareketi osilasyonlarla iletilmeye devam eder. Bir elastik malzeme içerisinde hareket iletilmek için zamanın belli bir periyoduna ihtiyaç duyar ve uyarılmış düzlemler arasında bir faz gecikmesi vardır [13]. Osilasyonların bu faz kayması taneciklerin birbirine yaklaşıp uzaklaştığı birbirini izleyen bir sıkışma genişleme bölgesi oluşturur. Bu bölgeler sabit bir hızda ve düzenli bir sıklıkla seyahat eder ve bu elastik dalga olarak bilinir. Elastik dalganın düzensizliğinin tam modeli okyanustaki dalgalar gibi görünen bir dalga modeli üretir. Elastik dalga bir ortam boyunca kaynaktan uzaklaşarak ilerleyen ses enerjisi taşır [13].
Bir elastik ortamda meydana gelen taneciklerin osilasyonları bir kere çekilip bırakılan ve küçük bir kütle takılmış bir yayın hareketi ile kıyaslanabilir. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi yayları birbirine bağlayarak elastik bir kuvvet temsil edilerek tüm malzeme içerisindeki her bir taneciği hayal etmek bu durumu anlamaya yardımcı olabilir [13]. Osilasyonlar doğada sinüzoidal olup bir sinüs dalga zamanın bir fonksiyonu olarak tasvir edilebilir [13].



Şekil 1.6: Her bir parçacığın seri bağlı yay biçimli gösterimi

Ucuna kütle eklenmiş bir yayın rezonans frekansı, yay sabiti (k), ve kütleye (m) bağlıdır. Yay sabiti birim uzunluk başına yay kuvvetini temsil eder. Herhangi bir maddenin elastik limiti içinde maddenin bozunumunun, bozunuma sebep olan kuvvetle bir ilişkisi vardır. Bu Hooke Yasası olarak bilinir. Şekil 1.7'de tasvir edilen yay modeli açısından Hooke Yasası, yay gerildiğindeki uzunluğuna ve sıkıştığındaki uzunluğuna orantılı olarak dengeleme kuvvetini ifade eder [13].



Şekil 1.7: Newton'un 2. Yasası ile Hooke yasasının ilişkisini gösteren yay modeli

Bu kanuna ait eşitlik Eşitlik 1.5'deki gibidir.

$$F = -k \cdot x \tag{1.5}$$

Newton' un ikinci kanununa göre bir taneciğe kuvvet uygulandığında taneciğin kütle (m), ve ivmesi (a) yoluyla dengelenir. Bu denklem Eşitlik 1.6'daki gibidir [13].

$$F = m \cdot a \tag{1.6}$$

Hooke yasası uygulanmış kuvvet yer değiştirme miktarı ve yay sabitine bağlı olan zıt bir kuvvetle dengeleneceğini ifade eder ve Eşitlik 1.7'deki gibi formüle edilir [13].

$$m \cdot a = -k \cdot x \tag{1.7}$$

Kütle ve yay sabiti burada kullanılan malzeme için sabittir fakat ivme ve yer değiştirme direkt olarak orantılı ve değişkendir. Bir taneciğin yer değiştirmesi artırılırsa onun ivmesi de artar. Bir taneciğin hareketini yapıp denge pozisyonuna geri dönmesi için geçen zaman uygulanan kuvvetten bağımsızdır. Basınç sıcaklık gibi diğer tüm değişkenler ve durumlar bir malzeme için sabit tutulur, uygulanan kuvvet ne kadar olursa olsun ses aynı hızda seyahat eder. Bir malzeme için ses hızı bir sabit olmasına rağmen farklı malzemelerde atomik taneciklerin kütlesi ve yay sabiti farklı olduğu için ses hızı da farklıdır. Ultrason hızı ve onun yayılma modu içinde iletildiği malzemenin kompozisyonuna ve fiziksel karakterine doğrudan bağlıdır. Taneciklerin kütlesi malzemenin yoğunluğuna bağlıdır ve malzemenin yay sabiti malzemenin elastik sabitine bağlıdır. Bu ilişkiler ultrasonik muayeneye izotropik bir katı içerisinde doğrudan yoğunluk ve elastik özelliklerin ölçümüne izin verir [13].

Düzgün bir şekilde ölçüm yapabilmek için test süresince kullanılan dalga tipi son derece önemlidir. Katılarda ses dalgaları malzemedeki atomik taneciklerin osilasyonuna göre dört temel mod ile yayılırlar. Bu modlar ise boyuna dalgalar (longitudinal waves), enine dalgalar (shear waves), Rayleigh dalgalar ve ince malzemelerde Lamb dalgalardır (Lamb waves). Boyuna ve enine dalgalar ultrasonik testte en fazla kullanılan dalgalardır [14].

1.2.2.1.1 Boyuna Dalgalar (Longitudinal Waves)

Boyuna dalgalar duyulabilir ses dalgalarına benzerdirler. Bir piezoelektrik kristalin genleşme ve sıkışması sonucu üretilirler. Sadece boyuna dalgalar sıvılarda yayılabilir [2]. Bu dalgalar dalga yayılım yönüne boylamsal bir şekilde yayılırlar. Bunun yanında katı, sıvı ve gazlarda yayılabilirler. Malzemede yayılırken bölgesel sıkıştırmalar ve yayılmalar meydana getirirler [14].

1.2.2.1.2 Enine Dalgalar (Shear Waves)

Bu dalgalar sadece katı nesnelerde yayılabilirler. Enine dalgalar kutuplanmışlardır, çünkü tanecikler düzlem içinde sadece tek yönde ve yayılma yönüne dik bir şekilde titreşirler. Enine dalgalar genellikle boyuna dalgalara bir takım işlemler uygulanarak elde edilir. Bir enine dalganın kaynağının pozisyonu değiştiğinde, parçacık titreşim

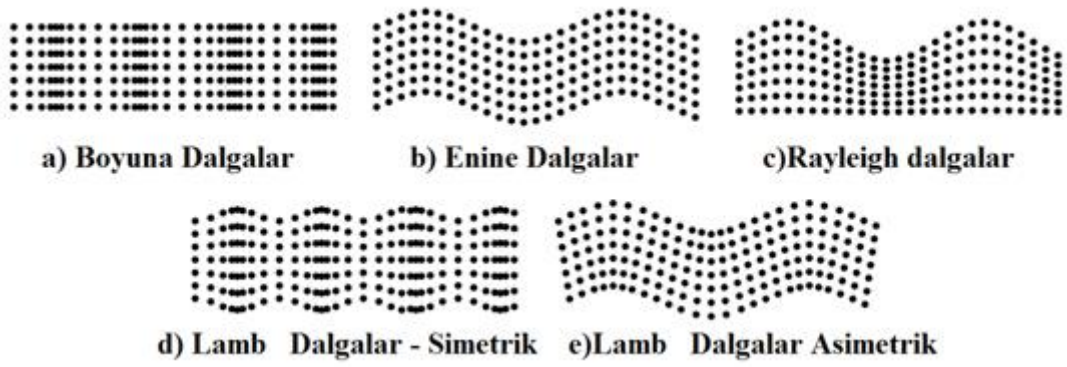
düzlemi de değişir. Enine dalganın hızı her zaman boyuna dalgadan azdır ve bu iki dalga tipi aynı frekansta farklı dalga boylarına sahiptirler [14].

1.2.2.1.3 Rayleigh Dalgalar

Rayleigh Dalgalar sadece malzemenin yüzeyinde yayılabildikleri için yüzey dalgaları olarak da bilinirler. Bu dalgalar malzemeye yaklaşık olarak dalga boyuna eşit derinlikte nüfuz edebilirler. Tanecik titreşim yönü iki vektörden oluşur. Vektörlerden biri dalga seyahat yönüne paralel diğeri ise paralel olan vektörün değerinden daha büyük bir değere sahip ve seyahat yönüne diktir. Bu yüzden tanecikler düzlemde yüzeye dik ve yayılım yönüne paralel olarak eliptik bir şekilde hareket ederler. Rayleigh dalgaların avantajı yüzeydeki hatalara ve diğer yüzey özelliklerine karşı oldukça hassas olmalarıdır. Bu özelliği sayesinde diğer dalga tipleriyle muayene edilemeyen bölgeler muayene edilebilir [14].

1.2.2.1.4 Lamb Dalgalar

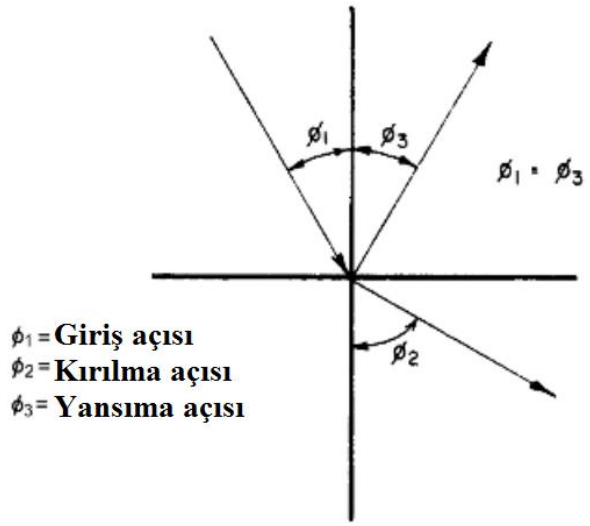
Bu dalgalar yaklaşık olarak dalga boyuyla aynı olan kalınlıktaki malzemelerde kullanılır. Simetrik ve asimetrik şeklinde iki tiptir. Simetrik ve asimetrik dalgalar onların frekansına ve yüzeyin kalınlığına bağlı olarak farklı hızlarla yayılabilirler [14]. Şekil 1.8'de farklı tipteki dalga ilerlemeleri esnasındaki parçacık hareketleri gösterilmiştir [14].



Şekil 1.8: Farklı tipteki dalga ilerlemeleri esnasındaki parçacık hareketleri

1.2.2.2 Ultrasonik Dalganın Kırınım, Dağılım ve Zayıflaması

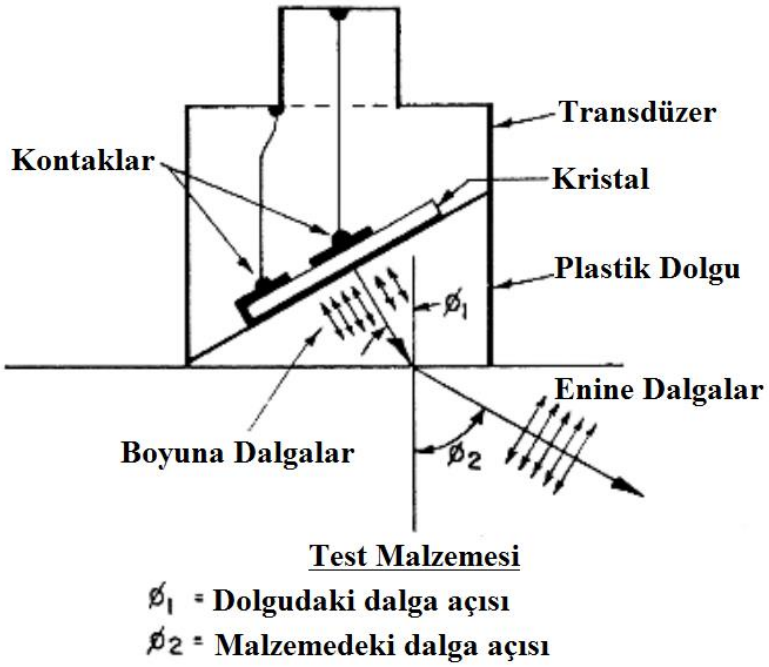
Ultrasonik titreşimler iki malzeme yüzeyi arasında akustik empedans uyumsuzluğu meydana geldiğinde yansıtılırlar. Akustik uyumsuzluk malzeme özellikleri birbirinden oldukça farklı olan metal-metal, metal-hatalı yüzey, su-metal gibi ara yüzlerde meydana gelir. Yansıyan dalganın önemli bir özelliği yüzeye gelen dalga ile her zaman aynı açıya sahiptir. Şekil 1.9'da gelen, yansıyan ve kırılan dalga ilişkisi gösterilmiştir [2].



Şekil 1.9: Giriş, yansıma ve kırılma açılarının birbiriyle ilişkisi

Bir ultrasonik yayılım bir malzemeden diğer malzemeye belli bir açıyla geçtiğinde kırılma ve mod dönüşümü meydana getirebilir. Kırılma iki farklı malzeme arasındaki geçişte ultrasonik dalganın yönü ve hızının değişmesi şeklinde oluşur. Hem kırılma hem de yansıma ışık ışınlarında gözlemlenebilen olay ile benzer gerçekleşir. Akustik uyumsuzluktan kaynaklanan ses dalgalarının yansıması olayı bir ışık demetinin aynadan yansımasına benzer şekilde gerçekleşir. Ses dalgalarının kırılması ise bir çubuğun yarısının suda yarısının suyun dışındayken meydana gelen kırılmasına benzer şekilde gerçekleşir. Çubuk, su ve hava ara yüzeyinde kırık ya da bağlantısız şekilde görünür ve yönü de değişmiş bir biçimde görünür [2]. Belirli bir açı ile malzeme içerisinde ilerleyen ses dalgaları eğer kırılmaya maruz kalırlarsa dalga yayılım modu başka tipte bir yayılım moduna dönüşebilir. Bu durum gelen dalga normalden farklı bir açıyla ilerlerken farklı akustik empedanslara sahip bir malzemeye geçiş ile gerçekleşir ve mod

dönüşümü olarak adlandırılır. Mesela bir boyuna dalga belli bir açıyla farklı malzeme ara yüzüne geldiğinde enerjinin bir kısmı iletim yönünde parçacık hareketine neden olur ve enine dalga üretir. Bu olayın yaygın olarak sudaki bir katı malzemede meydana getirilir, sudaki boyuna dalga malzeme içerisinde enine dalgaya dönüşerek mod dönüşümü gerçekleştirilir [13].



Şekil 1.10: Açılı dalga oluşturma ve mod dönüştürme işlemi

Şekil 1.10 dalgaların yayılma açılarını ve sonuçta oluşan tanecik hareketini göstermektedir [2]. Burada kontak test esnasında piezoelektrik elementi belirli bir açıyla yerleştirilmiş ve ultrasonik sinyallerin plastik dolgu malzemesine belirli bir açıyla gönderildiği çevirgeç görülmektedir. Bu noktada mod dönüşümü, malzeme içerisinde plastik içindeki boyuna dalgaların suyun içinde enine dalgalara dönüşmesi şeklinde gerçekleşir. Normalden farklı diğer açılarda sudan metale geçerken dalgaların kırılma açısı, metal ve su içindeki ses hızına bağımlı bir fonksiyon olarak ortaya çıkar [2].

Snell Kanunu yansıyan ve kırılan açıları tanımlar ve formülü Eşitlik 1.8 verilmiştir [2].

$$\sin\frac{\theta_1}{V_1} = \sin\frac{\theta_2}{V_2} \tag{1.8}$$

Burada θ_1, gelen açı ya da yansıyan açıyı θ_2, kırılma açısını V_1, ilk malzeme içerisindeki ses hızını V_2, ikinci malzeme içerisindeki ses hızını temsil eder [2]. Ses bir ortamda seyahat ederken yoğunluğu mesafeyle orantılı azalır. İdeal malzemelerde, sinyal genliği ile belirlenen ses basıncı yalnızca sesin yayılmasıyla azalır. Zayıflama sesin dağılması ve soğrulmasının kombine edilmiş etkisine verilen isimdir. Zayıflama genelde sinyal gücünün zayıflaması şeklinde tanımlanır. Ultrasonikte ise, seyahat edilen iki nokta arasında meydana gelen akustik enerji kaybı olarak tanımlanabilir. Bu yüzden ultrasonik zayıflama özel olarak bir malzemede yayılan akustik dalganın sönüm oranı olarak tanımlanır [13].

Soğrulma ses enerjisinin başka bir formdaki enerjiye dönüşmesidir. Akustik dalga malzeme içinden geçerken mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi şeklinde açıklanır. Bu enerji kalıcı olarak kaybolur ve malzeme hakkında ilave olarak hiçbir bilgi sağlamadığı için malzemenin test edilmesinin küçük bir sonucudur [13].

Dağılma, sesin yayılma yönü dışındaki yönlere doğru yansımasıdır. Sadece malzemenin tam olarak homojen olmamasından değil aynı zamanda farklı yoğunluk ve ses hızlarına sahip akustik ara yüzlerden de kaynaklanır. Dağılma tane sınırı, küçük çatlaklar ve diğer malzemenin homojen olmama özellerinden kaynaklı yansımalar şeklinde gerçekleşir [10]. Bu homojen olmama durumları kasıtsız olarak işleme ve şekil verme işlemlerinde eklenmiş gerçek malzeme hataları ya da kasıtlı olarak eklenmiş hatalar şeklinde telaffuz edilebilir. Kasıtlı veya kasıtsız olarak malzeme içerisinde yer alan hatalar farklı yönlerde farklı elastik özelliklere ve ses hızlarına sahip olan düzensiz yönlü tanecikler içerisindeki (anizotropik) farklar kadar güç algılanabilir olabilirler. Tane saçılma kayıpları mikroyapısal bir seviyede meydana gelir. Çünkü malzemedeki küçük kristalize tanecikler (seramik ve metal gibi) gelen dalgayı pek çok yöne dağıtır. Sonuç olarak yayılım yönünde mesafe ile bağlantılı olarak net bir genlik kaybı ortaya çıkar [13].

Zayıflama genelde eksponansiyel fonksiyonun bir formunda akustik dalganın ses basıncı şeklinde ifade edilir [13].

$$P=P_0 e^{-\alpha L} \tag{1.9}$$

P_0 referans noktada yada bir kaynakta başlangıç ses basınç seviyesi, *P* ikinci referans noktadaki ses basınç seviyesi, α Neper/birim uzunluk şeklindeki zayıflama katsayısı ve *L* ilk noktadan ikinci referans noktaya olan seyahat mesafesidir. Diğer zayıflama ile ilgili yaygın eşitlik akustik dalganın yoğunluğu ya da genliğiyle bağlantılıdır. Bu denklem Eşitlik 1.9 ile aynı olup tek fark ses basıncı yerine yayılan dalganın genliğinin kullanılmasıdır [13].

$$A=A_0e^{-\alpha L} \tag{1.10}$$

A_0 bir noktadaki yayılan dalganın genliği, *A* ilk noktada *L* mesafesinde seyahat ettikten sonraki zayıflamış olan genliktir. Eşitliğin iki tarafında doğal logaritması alınırsa ifade oluşur.

$$\alpha L = \ln(A_0/A) \tag{1.11}$$

Ultrasonik zayıflama tipik olarak Neper'in tersine desibel (dB) cinsinden ifade edilir. Çünkü desibel logaritmik ölçeğe dayandırılır ve çok büyük bir aralıkta çeşitli genlik büyüklüklerinde kullanmak için oldukça elverişlidir. Bu dönüşüm 10'luk logaritma tabanı uygulanıp 20 ile çarpılarak elde edilir [13].

$$\alpha L = 20 \log\left(\frac{A_0}{A}\right) dB \tag{1.12}$$

Bu eşitlikle zayıflama birim uzunluk başına desibel şeklinde ifade edilebilir. Birim uzunluk genelde metredir ve ifade dB/m'dir. Bu ise malzemede akustik kayıp ifadesini daha uygun bir ölçekle ifade etmeyi sağlar [13].

1.2.2.3 Sinyal Gürültü Oranı

Hata tespitini dalga boyu ve frekansın dışında pek çok unsur etkilemektedir. Bir malzemedeki hatadan sesin yansıma miktarı malzeme ve hatanın arasındaki akustik empedans uyuşmazlığına büyük oranda bağlıdır. Çatlak ya da katmanların ayrılması şeklindeki bir hata, malzeme içerisinde ultrasonik dalgalar için çok iyi bir yansıtıcı olan hava içerir. Malzemelerin nadiren anizotropik olması da durumu daha kompleks hale getiren sebeplerdendir. Bu yüzden mikroyapı ve malzemenin kompozisyonu dalgaların yansımasına neden olur [16]. Sinyalin gürültüye oranı (S/N) hatadan ve malzemenin

arkasından yansıyanların kıyasının yapıldığı bir hata tespit edebilme ölçümüdür [16]. Metallerde sinyalin gürültüye oranı Eşitlik 1.13 biçiminde ifade edilmektedir.

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{16}{\rho v_{metal} w_x w_y}} \times \frac{A_{Akış}(f_0)}{FOM(f_0)} \tag{1.13}$$

$A_{Akış}(f_0)$ merkez frekansta hata saçılma genliği ve $FOM(f_0)$ merkez frekansta (figure of merit) gürültü verim ölçüsüdür. Sinyalin gürültüye oranı, hatanın tespit edilebilmesinin hatanın büyüklüğüyle direkt olarak orantılı ve dolaylı olarak yoğunlukla ρ, ses hızıyla v_{metal} sinyal darbesinin süresiyle Δt orantılı olduğunu gösterir. S/N oranı, hatanın olduğu derinlikte $w_x w_y$ yanal dalga (beam) genişliğinin olduğu yerde daha fazla odaklanmış dalga (beam) ile artar [16].

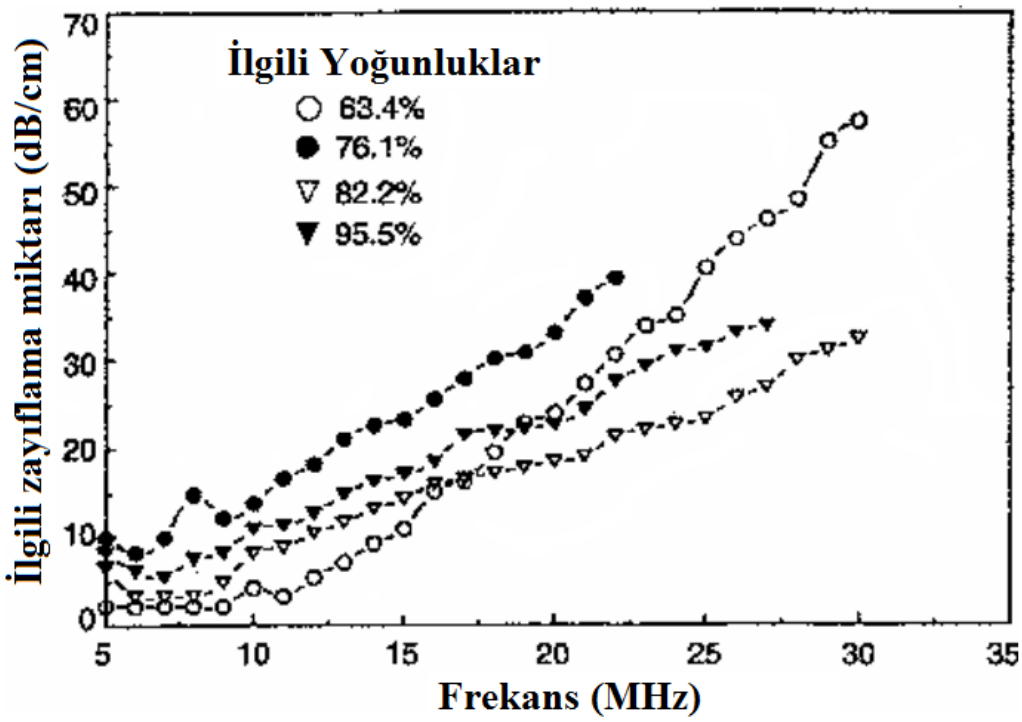
Hassasiyet ve çözünürlük SNR' ın birer fonksiyonudur. SNR değerinin minimum 1' e 3 olması genel bir kuraldır. Yüksek değerli bir SNR ultrasonik muayenede daha yüksek çözünürlük ve hassasiyet anlamına gelir [13].

SNR'ı etkileyen faktörler arasında çevirgecin frekans ve bant genişliği, ultrasonik yöntem ve mesafe, çevirgeç büyüklüğü ve odaksal özellikleri, malzemenin ara yüz özellikleri, hatanın yeri, büyüklüğü, şekli, yönü ve hatanın empedansı sayılabilir [13].
Formül 1.12'ye göre SNR hatanın büyüklüğü ile direkt olarak orantılıdır. Hatanın büyüklüğündeki artış onun daha kolay tespit edilebilmesini sağlar. Daha fazla odaklanmış dalga (beam) için dalga (beam) çapı azalırken SNR artar, yani hata tespitinin çevirgeç dalga (beam) genişliği ile ters orantılı bir ilişkisi vardır. SNR darbe genişliğinin azalmasıyla da artar, yani bir çevirgeç tarafından üretilen darbenin süresi ile ters orantılı bir ilişki vardır. Darbe genişliği daha yüksek frekanslarda, daha geniş bant genişliklerinde, daha yüksek verimlerde azalır. SNR yüksek yoğunluk ve hızda azalır, yani SNR ile malzemenin yoğunluğu ve akustik hızı arasında ters orantı vardır. SNR formülü ultrasonik muayenede hatanın hassasiyet ve çözünürlüğünü tanımlayan pek çok bilgiyi içermektedir [13].

1.2.2.4 Frekans Etkisi

Teoride 20 kHz insan duyumunun üzeri ses sinyalleri ultrasonik sinyaller olarak tanımlanmıştır. Pratikte ise ultrasonik çevirgeçler 50 kHz ile 200 MHz arasında faaliyet göstermektedir. Bu frekans değerleri insan duyumunu çok yüksek bir şekilde aşsalar da yine parçacık titreşimi biçiminde yayılmaya devam ederler. Bu dalgalar homojen katılarda ve az akışkanlığa sahip sıvılarda kolaylıkla ilerlerken boşluk ve gazlar hızlıca sönümlenmeye yol açar [2].

Ultrasonik dalga frekansı arttıkça zayıflama ile malzeme içi penetrasyon azalmaktadır. Bu durum Şekil 1.11'de gösterilmiştir [17]. Frekans arttıkça çözünürlüğü yüksek ama ince test malzemeleri ile sonuç alınırken düşük frekanslarda ise hava ara yüzüne sahip çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir [15].



Şekil 1.11: Yüksek frekanslarda zayıflama etkisi

1.2.2.5 Dalga Boyu ve Hata Tespiti

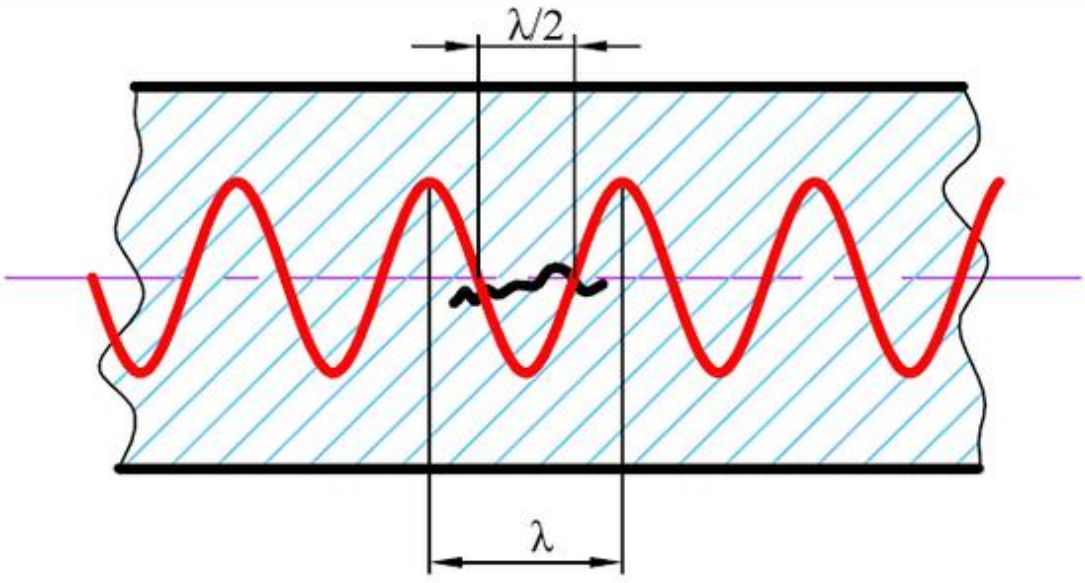
Ultrasonik değerlendirmenin genel fikri, objeden yansıyarak alınan sinyalin işlenmesi ve sinyalin yayılmasında geçen zaman bilgisine dayandırılır. Bir izotropik malzeme

içerisindeki ultrasonik dalga boyu (λ) sesin yayılma hızı (*v*) ve frekans (*f*) ile direkt olarak bağlantılıdır [16].

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{1.14}$$

Formülden de görüldüğü gibi dalga boyu ve frekans arasında ters bir orantı vardır. Bu yüzden yüksek frekans düşük dalga boyunu ifade etmektedir ve tam tersi de geçerli bir durumdur. Çözünürlük frekans yükseldikçe artmaktadır. Hız malzemenin bir karakteridir, belirli bir dalga boyu ve frekans ile bir sabittir. Bir hata tespitinde temel kural, tespit edilmeye çalışılan hatanın boyu çalıştığımız dalga boyundan en az yarısından daha büyük olmalıdır. Tek bir dalga varken bu geçerlidir. Gerçekte dalgalar kısa patlayan (shorttone-bursts) formlarda yayılırlar ve odaklanma tek bir noktaya değildir. Bu nedenle gerçekte dalga boyunun yarısından daha az olan hataları da tespit edebilme olanağı sağlar [16].

Şekil 1.12'de tek bir ultrasonik dalga ve dalga boyunun yarısından küçük bir kusurun gösterimi yer almaktadır [16].



Şekil 1.12: Ultrasonik dalga boyu ile kusur büyüklüğü ilişkisinin gösterimi

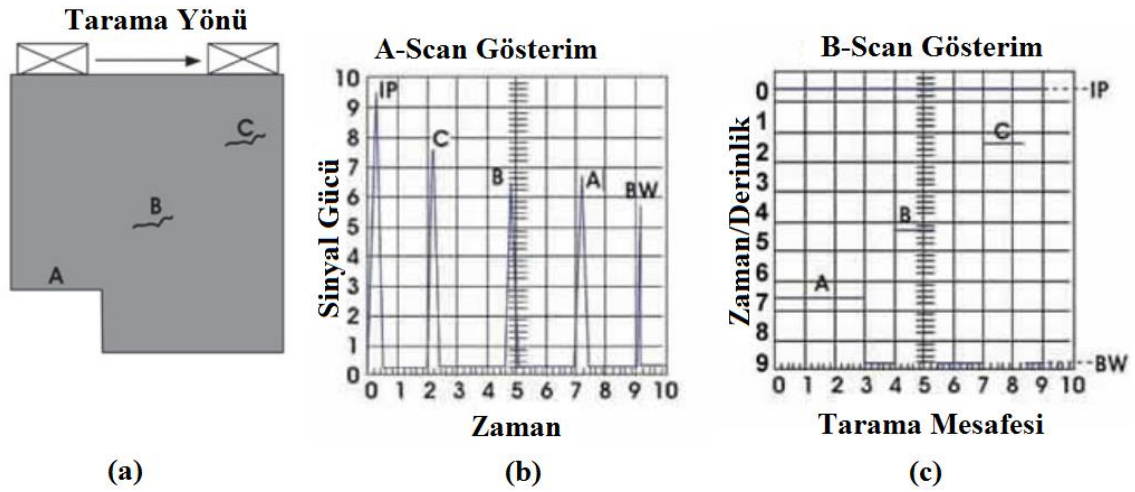
1.2.3 Malzeme İçerisinden Geri Dönen Sinyallerin Kazanımı

Piezoelektrik etki ile oluşturulmuş olan darbeler yine piezoelektrik kristallere çarptığında analog elektriksel sinyallere dönüşürler. Bu analog sinyallerin veri edinimi ve işlenmesi okuyucu birimin görevidir. Analog sinyaller merkez frekansına bağlı olarak analog bant geçiren filtre ile gürültü azaltımı işlemi gerçekleştirilir ve ADC tarafından örneklenebilmesi için yüksek kuvvetlendirme işlemine tabi tutulurlar. Ultrasonik sinyaller sayısal işaretlere dönüştürülürken sayısallaştırıcı frekansı, çözünürlüğü sayısallaştırıcı birimde dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Nyquist–Shannon örnekleme teoremine göre sayısallaştırıcı birim analog işaretin beklenen maksimum frekansının en az 2 katı örnekleme frekansına sahip olmalıdır.

1.2.3.1 Görüntüleme Teknikleri

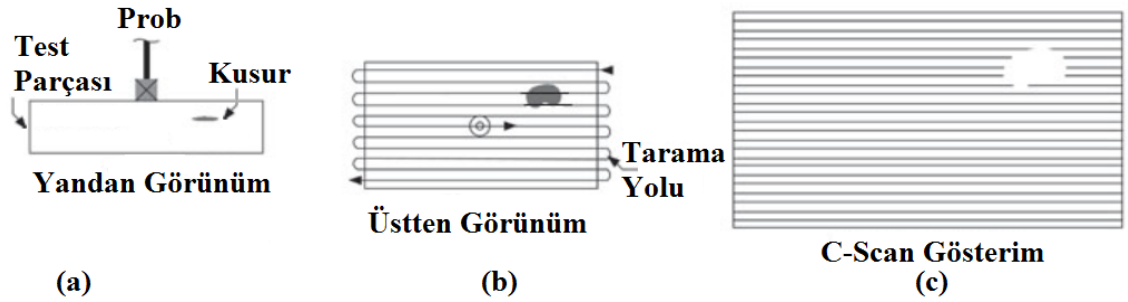
En yaygın ve temel sunum biçimleri üç adettir. Bunlar A-Scan, B-Scan ve C-Scan'dir. Her bir sunum biçimi incelenen alana farklı açılardan bakmaya ve işlemeye olanak sunar. A-Scan gösterim alınan ultrasonik enerjiyi zamanın bir fonksiyonu olarak sunmaktadır. Elde edilen enerji büyüklüğü dikey eksende, geçen süre ise yatay eksende yer alır. Bu gösterimde sinyal süresi ve miktarı bilinmektedir bu nedenle kusur derinliği ve büyüklüğü elde edilebilmektedir. B-Scan gösterim test parçasının yatay kesim gösterimini sunar. Dikey eksen derinlik bilgisini, yatay eksen ise tarama mesafesini (sırasını) gösterir. C-Scan gösterim ise A-Scan taramalar ile cismin ultrasonik fotoğrafının oluşturulması demektir. Her bir A-Scan sunum bir pikseli ifade etmektedir [18].

Şekil 1.13a'da sağdan sola doğru noktasal okumalar ile gerçekleştirilen ultrasonik test işlemi yer almaktadır. Şekil 1.13b'de ise bütün okumaların A-Scan görüntüsü verilmiştir. Burada dikkat edileceği üzere A-Scan görüntülemede kusur derinliği bilinirken kusurun konumu hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Şekil 1.13c'de ise B-Scan gösterim sonucu yer almaktadır [18]. Bu gösterim ile kusur derinliği ve kusur konumu verilmektedir. B-Scan gösterim genel olarak kesit tarama işlemini temsil etmektedir.



Şekil 1.13: A-Scan ve B-Scan Gösterimler a) Prob ve malzeme b) A-Scan gösterim c) B-Scan gösterim

Şekil 1.14 sırasıyla C-Scan gösterim için ultrasonik test kurulumunu, test işleminin gerçekleştirildiği güzergahı ve C-Scan gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.14: C-Scan görüntüleme a) Prob ve malzeme b) Tarama güzergâhının gösterimi c) C-Scan gösterim

1.3 Ultrasonik Test Teknikleri

Ultrasonik problar kontak veya daldırma tipinde üretilirler. Kontak çevirgeçler düz ışın veya açılı ışın üniteleri olarak tasarlanabilirler. Sonik ışınlar test malzemesi yüzeyi ile herhangi bir açı yapıyorsa düz ışın üniteleri boyuna dalgaları test materyalinin yüzeyine aktarırlar. Aynı şekilde açılı ışın üniteleri test malzemesi yüzeyiyle herhangi bir açı yaptığında sonik dalgaları üretirler [2].

Düz ışınlı kontak çevirgeçler, ultrasonik titreşim ışınını test yüzeyine dik olarak yansıtırlar. Böylelikle darbe-yankı (pulse-echo) tekniği ile veya doğrudan geçişli ultrasonik test (TTU) tekniği ile kullanılabilirler [2].

1.3.1 Doğrudan Geçişli Ultrasonik Test Tekniği (TTU)

Tahribatsız muayenede malzeme içerisine aktarılan ses sinyallerinin malzeme arka yüzeylerine çarpıp geri dönenlerin değil arka yüzeyden çıkan kısmının kazanımı ile gerçekleştirilen muayene yöntemidir. Yönleri aynı eksen çizgisinde iki adet birbirine bakan çevirgeç kullanarak gerçekleştirilen muayenede çevirgeçlerden biri darbe üreteci, diğeri ise alıcı birimi oluşturur. Bu yöntemde elle muayene gerçekleştirmek zordur ve genellikle otomatikleştirilmiş sistemlerde kullanılmaktadır. Tek elementli çevirgeç kullanılarak gerçekleştirilen her bir ultrasonik test ile A-Scan sunum elde edilir. A-Scan sunum noktasal bazda malzemenin muayene sonucunu verir ve otomatikleştirilmiş tarama ile bütün malzemenin tarama sonucu oluşturulur ve görselleştirilir. Test sistemi çevirgeç, ara ortam (coupler), malzeme, ara ortam ve alıcı çevirgeçten oluşmaktadır. Kusursuz bir malzeme test edilirken çeşitli ortamlardan geçen ses dalgaları belli bir genlik seviyesinde alıcı birim tarafından kazanılır. Ancak malzemede meydana gelen her hangi bir kusur ultrasonik ses dalgalarını zayıflatacak veya dağıtacaktır bu nedenle alıcı birime beklenenden çok zayıflamış bir genlik değeri ulaşacaktır. Bu test metodu hatalı noktaların malzemenin ne kadar içerisinde olduğunu tespit edemezler. Bu durum darbe yankı yöntemine göre bir diğer dezavantajı oluşturmaktadır [2].

Avantajları,

- Malzeme arka çeperini ara ortamla kapatıldığından düzgün olmayan yüzeylerin test işlemi gerçekleştirilir.
- Geri yansıyan darbelerin genliği malzeme içerisinden geçerek karşıya ulaşan sinyallerin genliğinden azdır. Bu nedenle TTU ile gerçekleştirilen testte daha az zayıflamış sinyaller çevirgeçe ulaşır.

Dezavantajları,

- Kusurun konumu ve türü hakkında bilgi veremez.
- Darbe yankı yöntemine göre daha komplekstir ve hassasiyet gerektirmektedir.

1.3.2 Darbe Yankı Test Tekniği (PE)

Tek bir çevirgeç kullanılarak malzemenin arka çeperinden yansıyan dalgaların elde edilmesi ile ultrasonik test işlemi gerçekleştirilmiş olur. Ultrasonik dalgalar malzeme içerisinde bir kusurla karşılaştıklarında geri yansırlar. Böylece beklenen veya referans değerden önce meydana gelen ultrasonik genlik bir kusuru gösterir ve sinyale bağlı olarak kusur hakkında bilgi sahibi olunabilir[2]. Darbe yankı yöntemi ile test gerçekleştirilirken malzeme arka yüzeyinin düzgün olması gerekir [19].

1.4 Lineer Dizi (Linear Array) ve Fazlı Dizi (Phased Array) Çevirgeç Test Tekniği

TTU ve darbe yankı yöntemi tek elementli çevirgeçlerden elde edilen A-scan görüntülerin birleştirilmesi ile C-scan görüntü elde etme prensibine dayanıyordu. Fazlı dizi yöntemi ise çok fazla element barındıran çevirgeçler ile gerçekleştirilen test biçimini ifade eder. İki temel çevirgeç tipi bulunmaktadır ve bunlardan ilki lineer dizidir. Bu çevirgeçler 128 ile 256 arasında piezoelektrik elementten oluşmaktadır. Lineer dizi çevirgeçleri gruplar halinde (örneğin 8'li) çevirgeçleri aynı anda darbelerle besleyerek her bir çevirgeçten A-scan görüntünün elde edilmesi ile ve bu işlemin bütün element dizisi için tamamlanması ile gerçekleştirilir. Böylelikle malzeme kesiti elde edilmiş olur. Fazlı dizi çevirgeçleri ise daha az elementten oluşur ancak element gruplarına darbeler aynı anda gönderilmezler. Her bir elemente belirli sürelerde darbeler gönderilerek sesin yayılım yönü değiştirilir. Yani ses farklı eksenlerde yazılımsal olarak odaklanıp dönüş yapan sinyallerin tekrar hizalanarak toplanması ile odaklanan kesitin A-Scan görüntüsü elde edilir. Dönen ses sinyallerinin hizalanması işlemine ışın düzenleme (beamforming) denilmektedir. Bu işlem ile bir adet odaklanmış bölümün A-Scan taraması gerçekleştirilmiş olur. Sırayla ses dalgaları bütün malzemeye satır satır odaklanarak A-Scan görüntülerin toplanması ile malzeme kesitinin B-Scan görüntüsü elde edilmiş olur [20].

BÖLÜM 2
GEREÇ VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında günümüz teknolojisinin ulaşmış olduğu yüksek hızlı, büyük hafızaya sahip, düşük maliyetli, düşük güç tüketimine sahip entegre devreler ile UM (Ultrasonik Muayene) işlemi için özelleşmiş entegreler kullanılarak ultrasonik yöntem ile metal malzemelerin kalınlık ölçümü ve malzeme iç kusurlarını tespit edebilen bir cihaz tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Kalınlık ölçüm ve hata dedektörü el terminalinin tasarlanması ve gerçekleştirilmesinin yanında tahribatsız muayene tekniklerinin en önemlilerinden biri olan ultrasonik yöntem hakkında bilgi birikimine sahip olunması ve araştırma geliştirme faaliyetlerini gerçekleştirmek üzere bir uygulama geliştirme kartına sahip olunması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda öncelikle ultrasonik yöntem ile kalınlık ölçüm işlemi için gerekli olan temel birimlerin tespiti gerekmektedir. Ultrasonik yöntem ile kalınlık ölçüm işleminin temelleri 1950'li yıllarda atılmıştır [21]. Birinci bölümde de belirtildiği üzere ultrasonik yöntemin en temel prensibi ultrasonik ses sinyallerinin üretilmesi, malzeme içerisine aktarılması ve malzeme içerisinden dönen sinyallerin kazanımı ile gerçekleşmektedir. Ses sinyallerinin üretim birimi temel olarak yüksek genlik değerinin üretilmesi sonrasında bu genlik değeri ile yüksek frekanslı darbelerin üretilmesi işleminden oluşmaktadır. Bu birime darbe üreteci (pulser) birimi denmektedir. Bu işlem için özelleştirilmiş mosfetler kullanılabileceği gibi değişik darbe üreteci topolojileri de kullanılabilir [22-25]. Malzemeden geri yansıyan sinyaller ultrasonik sinyalin bant genişliği dâhilinde kuvvetlendirilmeli ve sonrasında sayısallaştırılmalıdırlar. Ultrasonik kalınlık ölçüm işlemlerinde kullanılan ultrasonik darbe frekansları 0,5 MHz ile 20 MHz arasındadır. Bu nedenle dönen sinyaller de 0,5 MHz ile 20 MHz arasında olacaktır. 20 MHz'lik sinyalin anlamlı bir şekilde kazanılabilmesi için Nyquist–Shannon örnekleme teoremine göre en az kazanılması beklenen maksimum sinyal frekansının 2 katı

frekansta yani minimum 40 MHz'de örneklemesi gerekmektedir. Bu frekans sayısallaştırıcı birimin minimum frekansını temsil etmektedir. Sayısallaştırıcı birim sonrası verilerin kaydedilmesi ve çeşitli sinyal işleme algoritmaları ve dijital filtre uygulamalarının gerçekleştirileceği veri kazanım ve işleme birimine ihtiyaç vardır. Bu birim FPGA, ASIC, DSP veya FIFO hafıza kullanarak çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir.

Bu kapsamda öncelikle tasarlanacak sistem özelliklerine bağlı olarak (veri transfer hızı, sinyal işleme gücü, maliyet gibi parametreler) sistemin birimlerinin belirlenmesi, blok şemalarının oluşturulması ve komponent seçimlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Farklı ihtiyaçlar farklı sistem tasarımlarını ortaya çıkarmıştır. 40 MHz üzeri veri edinim ve örnekleme işlemi için pek çok farklı alternatif kullanılabilir. Sayısallaştırıcı sonrası veri edinim işlemi için ASIC [26], FPGA [27-30] veya hafıza [31] (FIFO) kullanılabilir. Bu birimden sonra ise dijital sinyal işleme ihtiyacına bağlı olarak DSP [27,29], mikroişlemci veya mikrodenetleyici kullanılabilir. Böylelikle sistemin çekirdeği olan veri edinim, sinyal işleme ve kontrol birimi belirlenmiş olacaktır.

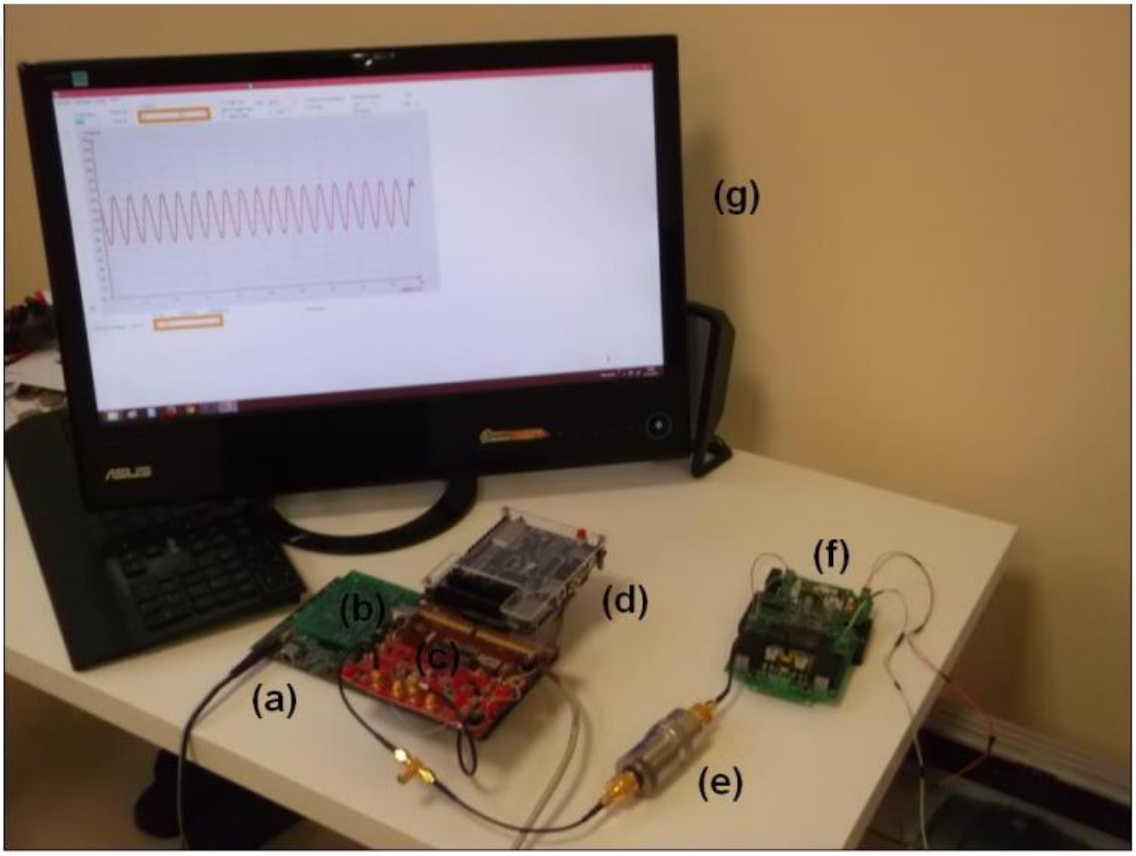
Yüksek dijital sinyal işleme kapasitesine sahip veri edinime ihtiyaç duyulduğunda işlemci birimi olarak DSP kullanılması uygundur ve bu alanda bir çok uygulama bulunmaktadır [27,32,33]. Bununla birlikte bu tez çalışması kapsamında ilk olarak DSP ve ADC geliştirme kartları kullanılarak bir ultrasonik okuyucu birimi tasarımı çalışması gerçekleştirilmiştir [31]. Daha sonra bu üniteye bir FPGA geliştirme kartı ve yüksek hızlı ADC kartı eklenerek yazılımsal doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu ön prototipte doğrulamanın yapılmasının ardından tez kapsamında kompakt bir geliştirme kartı tasarım çalışmalarına başlanmıştır.

Yüksek veri kazanımına ihtiyaç duyulduğu medikal ultrason gibi uygulamalarda PC haberleşme ara yüzü olarak PCI [34], daha düşük hızlarda veri kazanımına ihtiyaç duyulan uygulamalarda ise USB tercih edilebilir [35]. Bu çalışmada ise USB ara yüzü tercih edilmiştir.

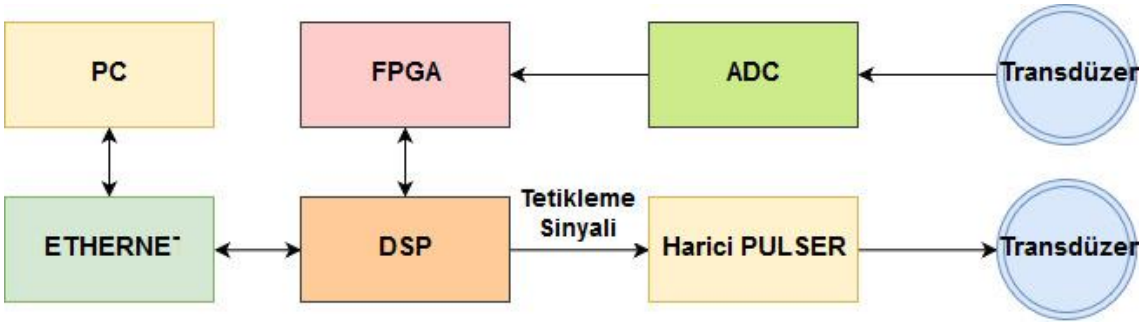
Tez kapsamında tasarlanan kartın veri edinim ve kontrol birimi için FPGA ile yüksek saat frekansına sahip (252 MHz) 32 bit mikrodenetleyici birlikteliği tercih edilmiştir. Bunun temel nedeni FPGA yüksek hızlı veri edinimi ile dijital sinyal işleme işlemleri

rahatlıkla gerçekleştirilirken, düşük maliyetli 32 bit bir MCU ile dâhili donanımsal birimleri sayesinde yüksek hızlı PC veri transferi (USB), TFT sürme işlemi, SD kart okuma, yüksek hızlı harici hafıza ara yüzü ile FPGA veri transferinin sağlanması gibi işlemler gerçekleştirilmektedir.

Şekil 2.1'de proje doğrulamasının gerçekleştiği ilk sistem görülmektedir. Bütün birimler için hazır geliştirme kartları kullanılarak yazılımsal doğrulama sağlanmış ve sonrasında ultrasonik kompakt geliştirme kartının tasarımına başlanmıştır.



Şekil 2.1: PCB tasarımı öncesinde oluşturulan ultrasonik sistem a) Kontrol ünitesi (DSK6416) b) Ethernet ara yüz kartı c) 125 MHz ADC kartı d) FPGA ünitesi e) Alıcı ve verici çevirgeçler f) Darbe üreteci kartı g) PC programı



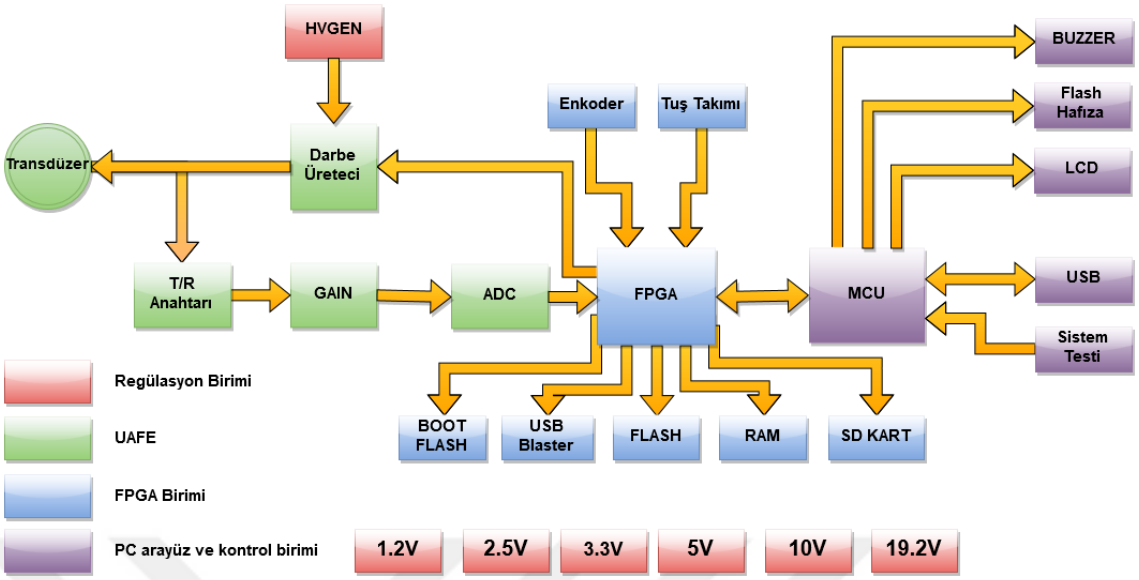
Şekil 2.2: PCB tasarımı öncesinde oluşturulan ultrasonik okuyucu sistemin blok diyagramı

Şekil 2.2'de ise bu sistemin blok diyagramı verilmiştir. Bu çalışma tez çalışmasına önemli bir dayanak görevi görerek tasarlanan sistemin devre özelliklerinin belirlenmesinde yardımcı olmuştur. Yazılımsal doğrulama tamamlandıktan sonra ultrasonik kartın her bir birimine ait blokların özelliklerinin belirlenmesi ve ardından şematik tasarımlarının gerçekleştirilmesi işlemine başlanmıştır. Şematik tasarımlarla komponent seçimleri eş zamanlı yürütülmüştür. Bu işlemlerin ardından PCB tasarımı, üretimi, dizgisi işlemleri tamamlanıp test ve yazılımsal doğrulama gerçekleştirilmiştir.

2.1 Sistemin Genel Blok Diyagramı

Ultrasonik kalınlık ölçüm ve hata tespitinin gerçekleştirileceği el terminalinin blok diyagramı Şekil 2.3'de yer almaktadır. Sistemin blok diyagramı 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlardan ilki Ultrasonik Analog Ön Uç (UAFE, Ultrasonic Analog Front End), regülasyon bilirimi, veri edinim FPGA bloğu ve MCU bloğudur.

Sistemin çekirdeğini oluşturan sayısallaştırıcı, veri edinim ve veri işleme birimleri sırasıyla 100 MHz ADC, FPGA ve PIC32MZ ailesinden bir mikrodenetleyiciden oluşmaktadır. Veri edinim ve işleme işlemi FPGA bloğuna, kart kontrol ve PC ara yüzü mikrodenetleyiciye bırakılmıştır.



Şekil 2.3: Ultrasonik kalınlık ölçer ve hata dedektörü blok diyagramı

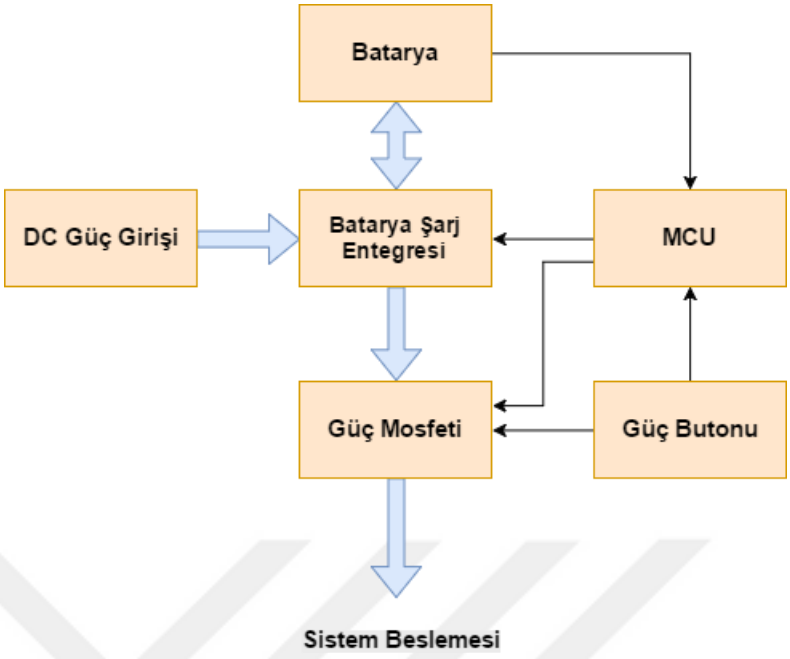
Bu bölümün giriş bölümünde anlatılan ultrasonik yöntemin gerçekleştirilmesi için gerekli olan birim ve parametreler e bağlı olarak tez kapsamında üretilecek olan cihazın temel özellikleri belirlenmiş ve bu ihtiyaçları en iyi şekilde gerçekleştirecek komponent seçimleri yapılmıştır. Tez kapsamındaki cihazın ultrasonik yönteme ait temel teknik kapasiteleri aşağıda yer almaktadır.

- +40V ile +250V ayarlanabilir yüksek genlik üretimi gerçekleştirilmektedir.
- ±250V genliğe sahip, 1 MHz ile 20 MHz arası yüksek genlikli darbe üretimi gerçekleştirilebilmekte ve darbe sayısı ve darbe biçimi ayarlanabilmektedir.
- 72dB analog kuvvetlendirme kapasitesine sahiptir.
- 100 MHz sayısallaştırıcı birimine sahiptir.
- Veri edinimi ve sinyal işleme işlemlerinin gerçekleştirileceği FPGA birimi kullanılmaktadır.
- MCU ünitesi ile kart kontrol, USB (High-Speed USB), TFT ekran sürülmesi gibi çevresel işlemlerin gerçekleştirildiği yüksek hızlı (252 MHz) mikrodenetleyici birimine sahiptir.
- Metal yapıların kalınlık ölçümünü ve A-Scan tarama sonuçları gösterilebilmektedir.
- Tek elementli ve çift elementli çevirgeçler ile test işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

- Bütün sistem çift kanal olarak tasarlanmıştır (Pulser, kuvvetlendirme sayısallaştırıcı).
- USB bağlantı ile PC tabanlı ultrasonik okumalara ve kart kontrolüne olanak sağlanabilmektedir.

2.2 Batarya, Güç Kontrol ve Regülasyon Bölümü

Sistem bir el terminali olduğundan dâhili tek hücreli lityum polimer batarya ile beslenebilmektedir. Sistemin harici güç girişini, bataryanın gücünü ve batarya şarj işlemini kontrol etmek üzere sisteme batarya kontrol birimi eklenmiştir. Sistemin güç yönetiminin sağlanabilmesi için yazılımsal olarak sistem gücünün kesilebilmesi, şarj işlemi sürerken sistem beslemesinin devam edebilmesi, şarj esnasında doluluk seviyesinin ölçülmesi ve farklı güç hatlarının voltaj değerlerinin monitör edilmesi gerekmektedir. Güç kesim işlemi için donanımsal anahtarlama yerine yazılımsal anahtarlama tercih edilmiştir. Bu işlem için güç butonunun MCU tarafından sürekli olarak izlenmesi gerekir. Ardından güç kesme durumu oluştuğuda güç mosfeti yine MCU tarafından kapatılmakta ve böylelikle kesim anında bataryadan şarj bloğu hariç güç çekilmemektedir. İzlenmesi gereken güç hatları batarya voltajı, giriş voltajı ve güç butonudur. Her bir genlik değeri MCU'ya ait ADC birimi ile sayısallaştırılıp takip edilmektedir. Sistemde kullanılan lityum polimer piller belirli bir genlik seviyesinin altına düştüklerinde geri dönülemeyecek biçimde zarar görmektedir. Bu nedenle belli bir kesim değerinden aşağıya düştüğünde ve sistemin çalışma genlik aralığından aşağı düşüldüğünde güç otomatik olarak MCU ile kesilmektedir. Şekil 2.4'de sistemin güç kontrol birimleri ve MCU'nun dâhili ADC birimi ile ölçülen genlik değerleri görülmektedir.



Şekil 2.4: Sistemin Güç Yönetimin Blok diyagramı

Regülasyon işlemi ise sistem birimlerinin ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı voltaj regülasyonlarının yapıldığı bölümdür. DC adaptör güç girişi 5V ve lityum polimer bataryaların çıkış voltajı 2.7V ile 4.2V arasında olduğundan sistemin bütün birimleri bu değer aralığını kapsayacak bir biçimde 2.7V ile 5.5V arasındaki değerlerde güvenli bir biçimde çalışacak bir biçimde tasarlanmıştır. Ayrıca batarya bazlı bir ölçüm cihazı tasarlandığından güç tüketimlerinin asgari seviyede tutulması önemlidir. Ultrasonik test kartında gürültü hassasiyeti bulunan alt birimler az gürültüye sahip lineer regülatörlerle (2.5V, 1.2V), gürültü hassasiyeti düşük olan sayısal birimler ise anahtarlamalı (switching) regülatörler ile voltaj regülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistemde en çok güç tüketiminin gerçekleştiği bölüm 3.3V çıkışıdır. Bu değer batarya aktif sahası içerisinde bulunduğundan lineer regülatör kullanılması halinde batarya kapasitesi tam olarak kullanılamayacaktır. Bu nedenle özel bir regülasyon biçimi olan Buck-boost topolojisine sahip dönüştürücü yapısı kullanılarak 3.3V çıkış elde edilmiştir. Bu teknikte eğer çıkış voltajı giriş voltajından düşük ise bu dönüştürücü buck yani azaltan biçimde 3.3V çıkışını vermekte, giriş voltajı 3.3V'un altına düştüğünde ise boost topolojisiyle yani düşük voltajı arttırma biçiminde 3.3V çıkış sunmaktadır. Böylelikle batarya tam kapasiteli bir biçimde kullanılabilmektedir. Ayrıca kartta 3 farklı birim besleme voltajından daha yüksek voltaj ile çalışmaktadır. Bu birimler ultrasonik analog

sinyallerin kuvvetlendirildiği birim (5V), darbe üreteci biriminde mosfet sürücüsü (5V ile 10V arasında, besleme genliği arttıkça anlık sağladığı akım değeri arttığından 10V besleme tercih edilmiştir) ve LCD arka aydınlatmasıdır (19.2V). 5V ve 10V hattında ilkinde analog kuvvetlendirme yapıldığından diğerinde ise gürültüye bağlı olarak yüksek frekanslarda (100 MHz) osilasyonlara sebep olabileceğinden arttırmalı (boost) regülatör çıkışları 6V ve 11V olarak ayarlanıp her bir çıkışa lineer regülatör konularak gürültü giderilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Bu düzenleme gereksiz güç tüketimine neden olabileceği düşünülse de bu birimlerin güç tüketimleri düşük olduğundan lineer regülatörlerdeki kayıp da güç tüketimlerine nispetle azalmaktadır. Son birim ise LCD arka aydınlatması için gerekli olan 19.2V değeridir. Bu değer de yine arttırmalı regülatör yapısı ile üretilir.

2.3 Ultrasonik Analog Ön Uç Alt Birimleri

2.3.1 Çevirgeç

Çevirgeçler UM işleminde kullanılan problardır. Çevirgeçler yüksek genlikli ve yüksek frekanslı elektriksel işaretlere maruz kaldığında yüksek frekanslı, fiziksel titreşimler üretir. Böylece bu yüksek frekanslı titreşimler malzeme içerisine aktarılır ve malzeme tipine özgün olarak malzeme içerisinde çeşitli hızlarda ilerler (genellikle katılarda, >1000m/s). Yüksek frekanslı ses sinyalleri (>1 Mhz) hava ortamında yüksek oranda zayıflamaya maruz kalarak kazanılamayacak seviyelere düşer. Çevirgeç ve test malzemesi arasına bu ortamlara yakın bir eşleşme katmanı konulduğunda ses sinyalleri malzemeye aktarılırlar. Piezoelektrik etki tersinir olduğundan çevirgecin yüksek frekanslı elektriksel işaretlerle beslendiğinde yüksek frekanslı fiziksel titreşimler elde edildiği gibi çevirgece uygulanan yüksek frekanslı fiziksel etkiler de elektriksel işaretlere dönüştürülür. Böylece malzeme içerisine aktarılan ses sinyalleri malzeme içi farklı akustik empedansa sahip bölgelerden veya malzeme arka yüzeyinden yansıyarak ultrasonik çevirgece ulaştıklarında bu sinyaller kazanılabilir ve kaydedilirler.

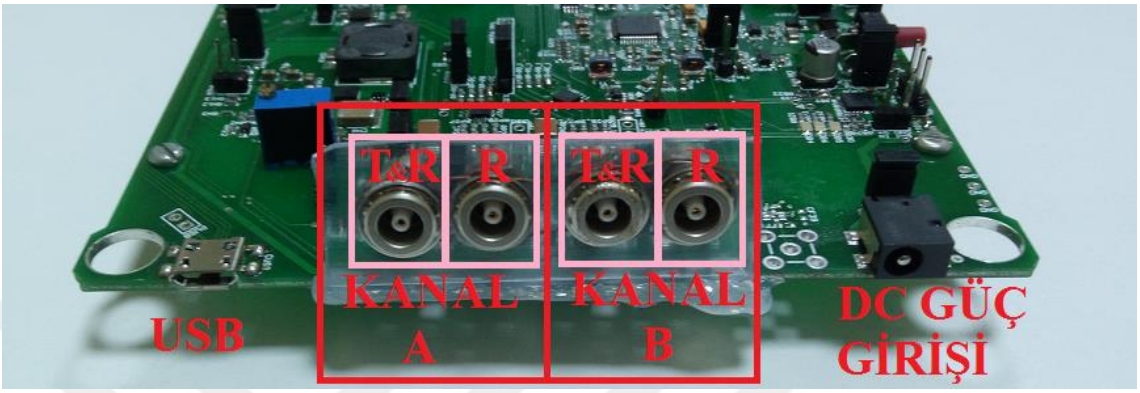
Ultrasonik kart 2 kanal olarak tasarlanmıştır. Her bir kanal için iki adet konnektör bağlantı noktası bulunmaktadır. Bu bağlantı noktalarında her ikisi de bir multiplekser üzerinden kuvvetlendirici birime aktarılabilmektedir. Kullanıcı ultrasonik test yöntemine göre istenilen multiplekser girişini kuvvetlendirici bloğuna aktarabilmektedir. Şekil 2.5a'da yer alan çevirgeç tek elementlidir yalnızca bir adet

piezoelektrik elemente sahiptir. Darbe gönderim ve alım işlemi aynı hattan gerçekleşir. Şekil 2.5b'de ise çift elementli çevirgeç bulunmaktadır. Bu tip çevirgeçlerde iki adet birbirinden izole edilmiş piezoelektrik element bulunur. Çift elementli çevirgeçler genellikle kalınlık ölçüm işlemlerinde kullanılırlar ve düşük maliyetlidirler. Çift elementli çevirgeçlerden biri ultrasonik darbelerle beslenir diğeri ise anlamlı sinyallerin kazanım işlemini sağlar. Yani çift elementten birisi yüksek frekans ve genlikle beslenirken diğeri dönen sinyallerin kazanımı gerçekleştirir.



Şekil 2.5: Çevirgeçlerin gösterimi a) Tek elementli 1 MHz çevirgeç
b) Çift elementli 2 MHz çevirgecin fotoğrafı

Şekil 2.6'da ultrasonik kartın çevirgeç girişleri gösterilmiştir. Her kanalda darbe yankı yöntemi için bir adet 'T&R' girişi ile çift elementli ve TTU yöntemi için bir adet 'R' girişi bulunmaktadır.

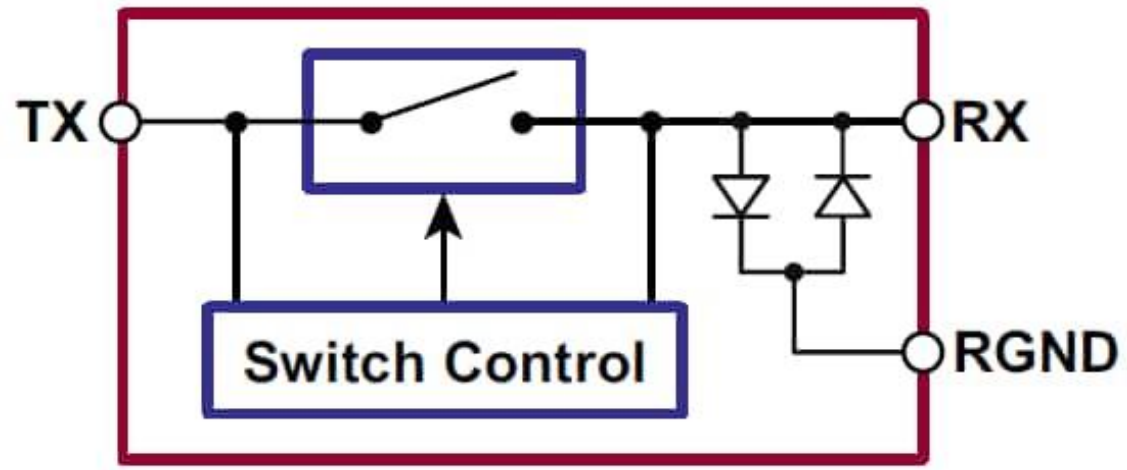


Şekil 2.6: Tez çalışması ile üretilen ultrasonik kartın çevirgeç girişleri ve konfigürasyonları

2.3.2 T/R Anahtarlama

Tek elementli ultrasonik test işlemini (Darbe/Yankı Tekniği) ele aldığımızda, çevirgeç fiziksel ses sinyallerinin oluşturulabilmesi için yüksek genlik ve yüksek frekanslı elektriksel darbelere maruz kalır ve aynı ultrasonik sensör aracılığı ile malzeme içerisinden yansıyan ve çok büyük oranda sönümlemeye maruz kalan ses sinyalleri geri kazanılır. Bu durum sensör hattının hem ±200V gibi yüksek genlik değerleriyle çevirgecin sürülmesi için kullanılması hem de mikrovolt sahasındaki ultrasonik ses sinyallerinin elde edilmesi için kullanılmasını anlamına gelmektedir. Bu iki olay birbirinden ayrılmadığı takdirde kuvvetlendirici birim yüksek genlik değerlerine maruz kalarak kullanılamaz duruma gelecektir. Yüksek genlik değerlerini bloklayıp düşük genlik değerlerinin kuvvetlendirici birime iletimine izin verecek ve bunu nanosaniyeler mertebesinde gerçekleştirecek olan birim gönderme/alma anahtarıdır (Transfer/Receive Switch). Piyasada ultrasonik test işlemi için özelleşmiş entegre devreler bulunmaktadır.

Şekil 2.7'de yer alan anahtarlama entegresi TX giriş değeri 2V'dan yüksek olduğunda açık devre, 2V değerinden aşağı düştükten 50ns sonra kısa devre olmaktadır. Böylece anlamlı ultrasonik işaretler kaybedilmeden kuvvetlendirici birime aktarılabilmektedir.

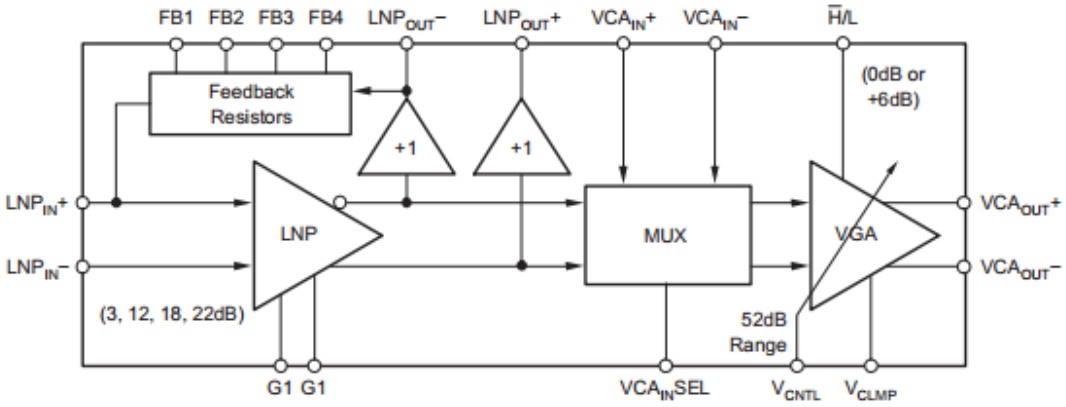


Şekil 2.7: Anahtarlama entegre devresi blok diyagramı

2.3.3 Kuvvetlendirme Birimi

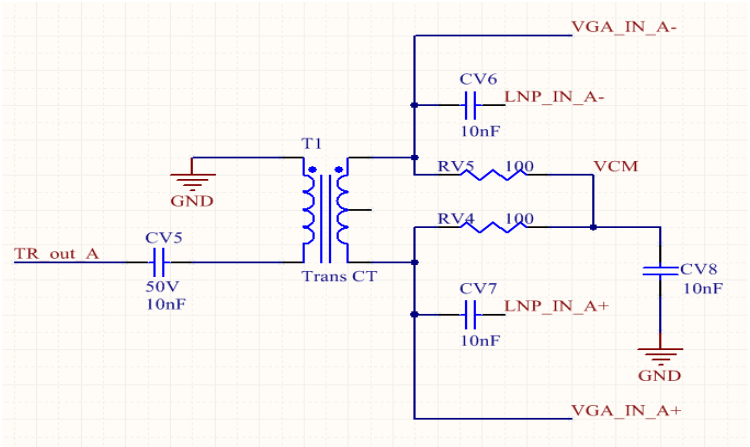
Çevirgeç aracılığı ile malzeme içerisine iletilen ultrasonik işaretler malzeme türüne, kalınlığına ve ultrasonik tekniğe (TTU, PE) bağlı olarak farklı oranlarda zayıflamaktadırlar. Bu zayıflama belirli bir seviyeden düşük olduğu takdirde ADC minimum anlamlı genlik değerinin altına düşerek anlamlandırılamayacak seviyede kalabilirler. Bu nedenle bu sinyaller öncelikle bir kuvvetlendirme işlemine tabi tutulmalıdırlar. Kuvvetlendirme biriminin analog bant genişliği ultrasonik işaretlerin kullanıldığı 1-20 MHz sahasını kapsamalıdır.

Günümüzde ticarileşmiş ve ultrasonik muayene işlemi için özelleşmiş entegre devreler bulunmaktadır. Bunların başlıca özelliği yüksek kuvvetlendirme sahasına sahip olmasıdır (örneğin +70db). Ayrıca bünyesinde iki farklı tipte kuvvetlendirme işlemini gerçekleştirebilen yapılar bulundurabilmektedirler. Bunlardan ilki düşük gürültülü ön kuvvetlendirici (LNP, Low-Noise Preamp) diğeri ise voltaj kontrollü kazanç birimi olan değişken kazanç kuvvetlendiricisi (VGA, Variable Gain Amplifier) birimleridir. LNP biriminin kazanç miktarı dijital olarak ayarlanmakta iken VGA, kazanç kontrol pinine uygulanan analog genlik ile belirlenmektedir. Bu tür kuvvetlendiricilerin sahip olması gereken bir diğer özellik ise giriş empedansının kontrolünü sağlayarak empedans uygunlaştırma işlemini gerçekleştirebilmesidir. Böylelikle farklı empedansa sahip çevirgeçlerle ultrasonik muayene işlemi geçekleştirirken maksimum güç transferi sağlanabilecektir.



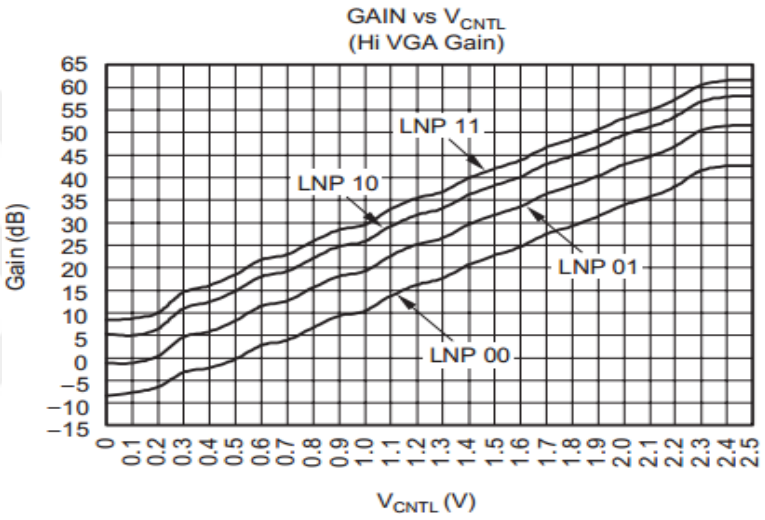
Şekil 2.8: Örnek bir kuvvetlendiricinin blok diyagramı

Şekil 2.8'de örnek bir kuvvetlendirici blok diyagramı yer almaktadır. Burada da görüleceği üzere geri besleme dirençleri ile empedans uygunlaştırma yapılırken LNP ve VGA bölümleri ile +70dB mertebesinde kuvvetlendirme gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda bu kuvvetlendirici girişleri diferansiyel sinyalleri kabul etmektedir. Şekil 2.9'da T/R anahtarlama biriminden gelen ultrasonik sinyal 1:1 sinyal transformatöründen geçerek diferansiyel hale dönüştürülmesi, LNP ve VGA birimlerine uygulanış biçimi görülmektedir. Ayrıca bu sinyal transformatörleri darbe üreteci ile kazanç biriminin izolasyonunu sağlayarak gürültünün azaltılmasını sağlamaktadır. Diferansiyel sinyaller belirli bir merkez DC genlik seviyesinde kullanılabilmektedirler. Bu nedenle şekilde yer alan VCM noktasına uygulanan genlik ile diferansiyel sinyalin DC seviyesi belirlenmiş olur.

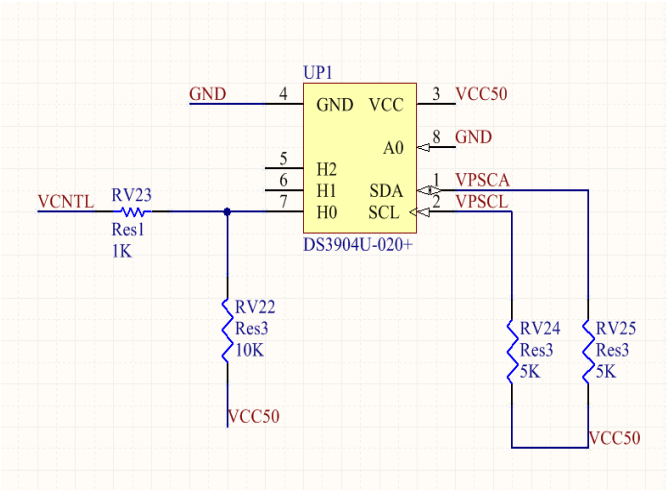


Şekil 2.9: Kuvvetlendirici girişi diferansiyel sinyallerinin üretilmesi

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi VGA birimin kuvvetlendirme miktarı kazanç kontrol pin voltajına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek hızlı kuvvetlendirme cevaplarına ihtiyaç duyulan uygulamalarda DAC (Dijitalden Analoğa Dönüştürücü, Digital Analog Converter) kullanarak yüksek hızlarda kuvvetlendirme manipülasyonları gerçekleştirilebilir. Ancak böyle bir ihtiyaç yok ise I2C bağlantı ara yüzüne sahip dijital potansiyometreler kullanılarak genlik bölme işlemi ile analog kontrol voltajı elde edilebilir. Şekil 2.11'de, 256 adıma ve dâhili 3 dijital potansiyometreye sahip olan DS3904 entegresinin bağlantı konfigürasyonu görülmektedir.



Şekil 2.10: VGA biriminin kazanç kontrol pinine uygulanan analog genlik ile kazanç miktarının gösterimi



Şekil 2.11: Dijital potansiyometre ile VGA kazanç kontrol genliğinin üretilmesi

2.3.4 ADC Birimi

Kuvvetlendirilme işlemi gerçekleştirilen analog sinyaller bu birim aracılığı ile dijitalleştirilmektedir. Ultrasonik muayenenin gerçekleştirildiği frekans sahası 1 MHz ile 20 MHz arasında değişmektedir. Bu frekans aralığındaki sinyallerin anlamlı ve kayıpsız dijitalleştirme işlemini gerçekleştirebilmek için Nyquist–Shannon örnekleme teoreminin çok üzerinde 100 MHz örnekleme frekansında ve10 bit çözünürlükte ADC entegre devresi kullanılmıştır. Bütün UAFE birimleri çift kanallı olduğundan bu birim de çift kanaldır. Sistemde kullanılan ADC'nin çıkış hattı paralel CMOS 10 bittir. ADC saat frekansı 100 MHz'dir ve saat frekansı FPGA ile üretilmektedir. Örneklenen veriler yine FPGA ile kaydedilmektedir. Günümüzde piyasada bulunan yüksek örnekleme frekansına sahip ADC'ler dâhili bir çok fonksiyona sahiptirler. SPI, I2C gibi seri haberleşme ara yüzleri kullanarak ADC entegre devrelerinin dâhili saklaçları (register) ile ADC konfigürasyonları değiştirilebilmektedir. Böylece ADC entegre devrelerinin sahip olduğu çeşitli fonksiyonlar; CMOS çıkış terminasyonu için dâhili terminasyon işlemi, saat frekansı bölme işlemi, çıkış veri formatı değiştirilebilmesi, istenilen kanalın gücü kesilebilmesi veya sistem doğruluğunun kontrolü adına belirli bir veri döngüsünün çıkışa sunulması gibi işlemler kullanıcı ve uygulama bağımlı olarak atanabilmektedir.

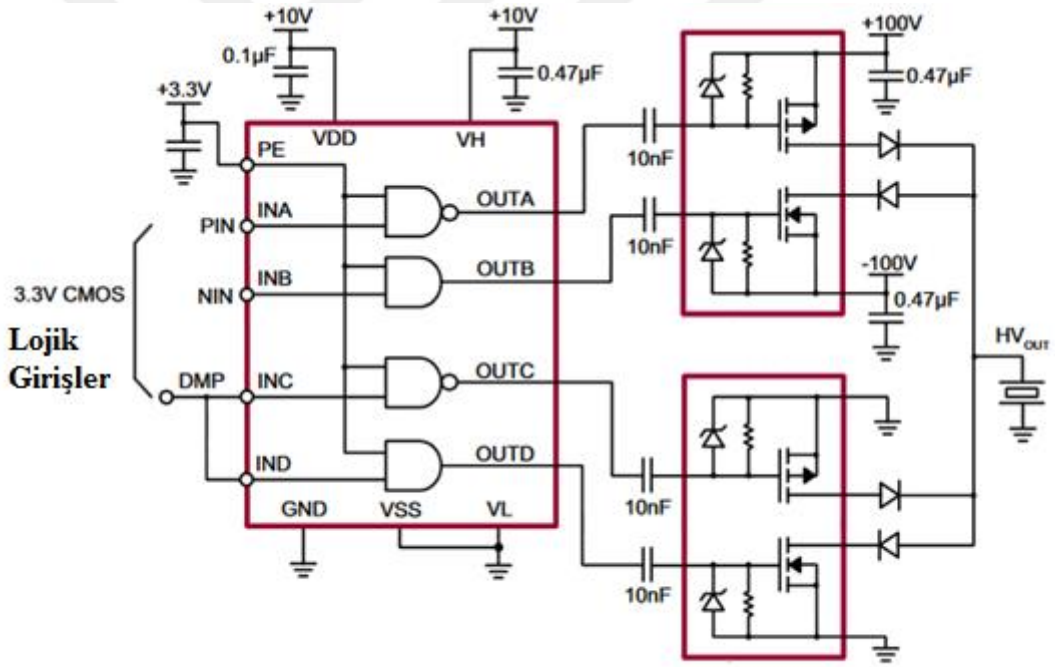
2.3.5 Yüksek Voltaj Üretim Birimi

Ultrasonik muayene işlemlerini gerçekleştirmek için yüksek genlikli ve yüksek frekanslı darbeler ile ultrasonik çevirgeçler sürülür. Malzeme kalınlığına, cinsine ve uygulanan ultrasonik tekniğe bağlı olarak bu sinyaller yüksek miktarda zayıflamaya maruz kalırlar. Endüstriyel uygulamalarda ultrasonik darbelerin genliği ±250V seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu nedenle darbe üreteci birimi için bu yüksek genlik değerlerinin üretilmesi gerekir. Tez kapsamında üretilen prototip bir el terminali olduğundan ve ortalama 3,7V genlik seviyesinde çıkış üreten batarya ile çalıştığından bu genlik değerinin ±250V seviyelerine çıkarılması gerekmektedir. Bu işlem için anahtarlamalı genlik arttırıcı regülatör (switching boost regulator) kullanılmıştır. Bu tip regülatörler piyasada yaygındır, maliyetleri düşüktür ve yüksek verimle çalıştıklarından ultrasonik uygulamalar için uygundur. Devre kartı için kullanılan yüksek voltaj üretici birimi yalnızca pozitif alternansta genlik üretimine olanak sağlamaktadır. Bu sayede unipolar

darbelerin üretimi gerçekleşmektedir. Ancak harici olarak negatif alternaslı yüksek genlik sağlandığı takdirde bipolar elektriksel darbelerin de üretimi mümkündür.

2.3.6 Darbe Üreteci Birimi

Ultrasonik muayenenin temel birimlerinden biri de darbe üreteci birimidir. Üretilen yüksek genliği kullanarak yüksek genlikli ve yüksek frekanslı darbelerin üretilmesini sağlayan birimdir. Piezoelektrik kristaller kapasitif davranış sergilediğinden 1 MHz ila 10 MHz arasındaki ±200V'a kadar üretilen darbeler darbenin yükselen kenarında anlık olarak yüksek akımlar çekmektedir. Kullanılacak birim anlık yüksek akım değerlerini sağlama kapasitesine sahip olmalıdır.



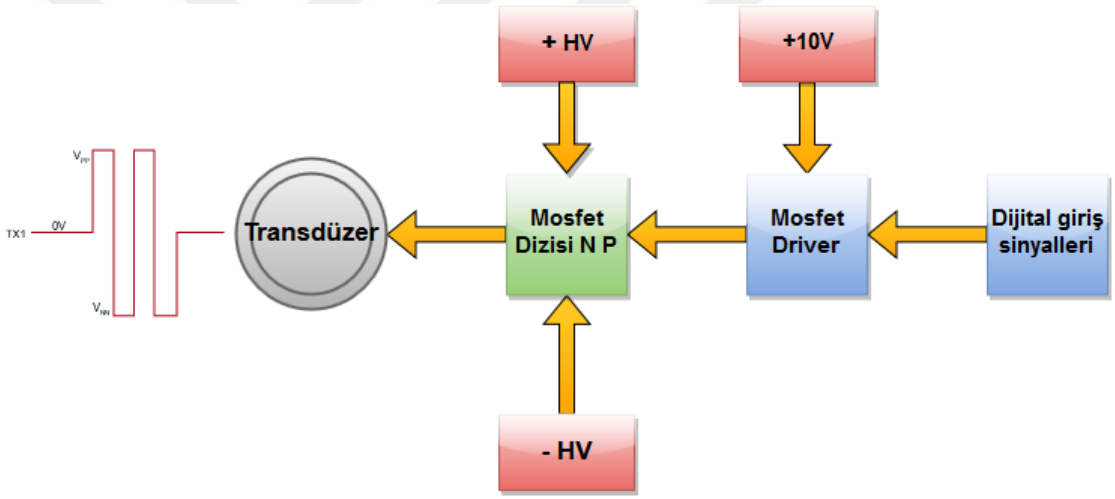
Şekil 2.12: Mosfet sürücüsü örnek konfigürasyonu

Şekil 2.12'de örnek bir mosfet sürücüsü ve mosfet dizisi konfigürasyonu gösterilmiştir. Burada tek kanal darbe üreteci konfigürasyonu görülmektedir. Mosfet sürücülerin giriş sinyalleri FPGA ile sürülmektedir. Her bir kanalda güç hattında yer alan mosfetler 2 adet P kanal mosfet ve 2 adet N kanal mosfetten oluşmaktadır. Bu güç hattı 4 adet mosfet sürücüsü (2'si eviren 2'si evirmeyen) ile sürülmektedir. Güç katında yer alan P-N mosfet çiftlerinden ilki negatif ve pozitif alternansta yüksek voltajla beslenirken diğer

P-N konfigürasyonu yalnızca sönümleme işlemi gerçekleştirmektedir. Bu aşamadan sonra FPGA yazılımı ile bu sürücü bloğu şu yetenekleri kazanmıştır.

- İstenilen sayıda darbe üretimi
- İstenilen frekansta darbe üretimi
- Başlangıç fazının belirlenmesi
- Darbe biçiminin belirlenmesi
- Sönümlenmenin belirlenmesi

Şekil 2.13'de darbe üreteci blok diyagramı gösterilmiştir.



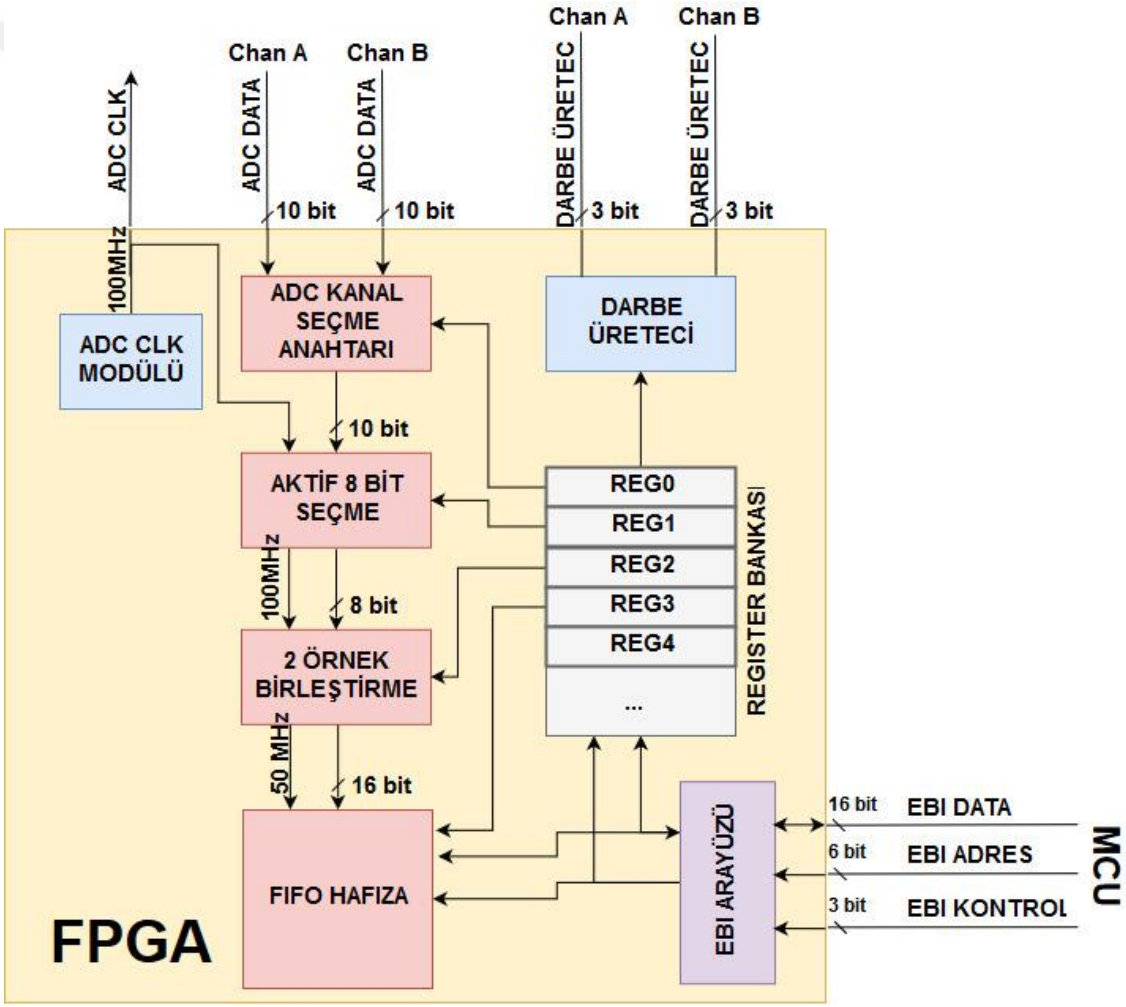
Şekil 2.13: Darbe üreteci ünitesi akış diyagramı

2.4 Veri Edinim Bölümü

2.4.1 FPGA Birimi

Analog yankı sinyalleri 100 MHz örnekleme frekansında sayısallaştırıldığı için bu verilerin kaydedilmesi ve işlenmesi için FPGA birimi kullanılmıştır. Bu amaçla ALTERA firmasına ait CYCLONE III ailesi bir FPGA istihdam edilmiştir. Sistem tamamıyla 2 kanal (2 kanal darbe üreteci, 2 kanal kuvvetlendirme, 2 kanal sayısallaştırıcı) olarak gerçekleştirildiği için 10'ar bit 2 kanal sayısallaştırıcı çıkışı toplam 20 bit veri akışı sağlayacaktır. Mikrodenetleyiciler paralel işlem kapasitesine sahip değillerdir. Yani işlemler sıra ile gerçekleştirilir ancak FPGA'lerde durum böyle

değildir. FPGA'ler aynı anda birçok işlemi paralel olarak gerçekleştirebilmektedir. Böylelikle 20 MHz'e kadar olan darbe üreteci sinyallerinin üretilmesi ve ADC veri çıkışlarının kazanım işlemini FPGA aynı anda gerçekleştirilebilmektedir. Ultrasonik test işlemi bu yönü ile zamanlama hassasiyeti olan bir işlemdir. Darbe sinyalleri üretilir üretilmez veri edinim işlemleri gerçekleştirilmelidir. Aynı zamanda bu bölüm ultrasonik verilerin dijital sinyal işleme işleminin gerçekleştirileceği bölümdür. Ultrasonik ölçümlerin gerçekleştiği, ortalama değerlerinin alındığı, filtreleme yapıldığı ve kalınlık ölçüm işleminin gerçekleştiği birimdir.



Şekil 2.14: FPGA biriminin içerisinde oluşturulmuş önemli modüllerin gösterimi

Şekil 2.14'de bu tez çalışmasıyla FPGA içerisine gömülmüş olan modüller gösterilmiştir. Bunlar MCU harici hafıza ara yüzü, saklaç (register) bankası, darbe

üreteci modülü, ADC sonrası dijital veri edinimi bloğudur. Saklaçlarda her bir modüle ait bilgiler tutulurken aynı zamanda modüllerin çıktıları da saklaçlar aracılığı ile MCU tarafından okunabilmektedir. Darbe üreteci modülü mosfet sürücüsüne iletilen dijital sinyallerin oluşturulmasını sağlar. ADC CLK modülü ise ADC saat frekansını üretir. ADC sonrası veri edinim bloğu ise verilerin 8 bit çözünürlükte kaydedilmesi için gerekli olan düzenlemelerin yapıldığı bölümdür.

Bu işlemlerin yanında ultrasonik teste ait kapılama, gecikme, dijital filtreleme gibi çeşitli uygulamalar FPGA tarafından en az zaman kaybı ve en yüksek verimde gerçekleştirilebilir. Ayrıca ihtiyaca bağlı olarak FPGA içerisine gömülecek bir mikrodenetleyici ile sistem yetenekleri arttırılabilir durumdadır.

2.5 Merkezi Kontrol Birimi

2.5.1 Mikrodenetleyici Birimi

Ultrasonik kartın bütün kontrol, konfigürasyon ve PC ile ultrasonik veri transferi işlemlerinin gerçekleştirmesi adına bir mikrodenetleyici istihdam edilmiştir. Bu birim çeşitli regülatör çıkışlarından genlik ölçümlerini, yüksek voltaj genlik ölçümünü, ADC ve kuvvetlendirme biriminin konfigürasyonlarının gerçekleştirilmesi, batarya kontrolünün ve monitörünün sağlanması ile sistemin ana gücünün kontrolünün sağlanması (softswitch), çeşitli voltaj regülatörlerinin aktif veya pasif edilmesi, buzzerın sürülmesi, LCD parlaklık kontrolünün sağlanması, USB veri transferi, TFT LCD sürülmesi ve FPGA'den yüksek hızlı veri transferinin gerçekleştirilmesinden sorumludur. Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için Microchip firmasına ait PIC32MZ1024ECH144 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Maksimum saat frekansı 252 MHz, dâhili flash hafızası 1024kb ve 512kb dâhili RAM hafızasına sahiptir.

2.5.1.1 USB Ara Yüzü

PIC32MZ1024ECH mikrodenetleyicisi USB 2.0, Hi-speed OTG (On-the-go) kontrolcüsü dâhili donanıma sahiptir. USB ara yüzünün veri transfer hızları çeşitli modlara göre belirlenmiştir. Günümüz çoğu mikrodenetleyicisi Full-Speed (12Mbit/s) modunu kullanarak veri transferi gerçekleştirmektedir. Ancak yüksek veri edinimine sahip olan ultrasonik hata tespiti uygulamalarının gerçekleştirilmesi için bu hız yeterli

olmadığından PIC32MZ ailesinden bir mikrodenetleyici seçilerek Hi-Speed (480Mbit/s) modda veri transferi gerçekleştirilmiştir.

2.5.1.2 Tuş Takımı Birimi

Prototip kontrolü PC ara yüzü aracılığıyla USB bağlantısı kullanılarak yönetilebileceği gibi aynı zamanda tuş takımı kullanılarak da bütün sistem konfigürasyonları ve hata tespit işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Maksimum 16 butona ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle 4x4 matris formu kullanılarak mikrodenetleyici tarafından her 100ms'de tuş kontrolü yapılmaktadır. Tuş takımı kontrolü dâhili olarak mikrodenetleyicide gerçekleştirilmektedir.

2.5.1.3 TFT Ekran Kontrolcü Birimi

Sistemde kontrol ve ölçüm sonuçlarının sunulabilmesi için Newhaven Display firmasına ait,

- 3.5" ekran genişliğine sahip olan,
- 320xRGBx240 (QVGA) Çözünürlüğe sahip olan,
- 24 bit (color) paralel bağlantı ara yüzüne sahip (6,4 MHz) olan,
- 72.88mm en, 55.36mm boy görüş alanına sahip olan,
- Transmisive gösterim modunu kullanan,

TFT LCD ekran kullanılmıştır. Dâhili NV3035C piksel sürücüsüne sahip olan TFT modülün kontrolcü (Controller) ünitesi bulunmamaktadır ve bu kontrolcü birim ultrasonik kalınlık ölçüm ve hata dedektörü kartı üzerinde FPGA ve MCU birimlerinin ortak kullanımı ile gerçekleştirilmiştir.

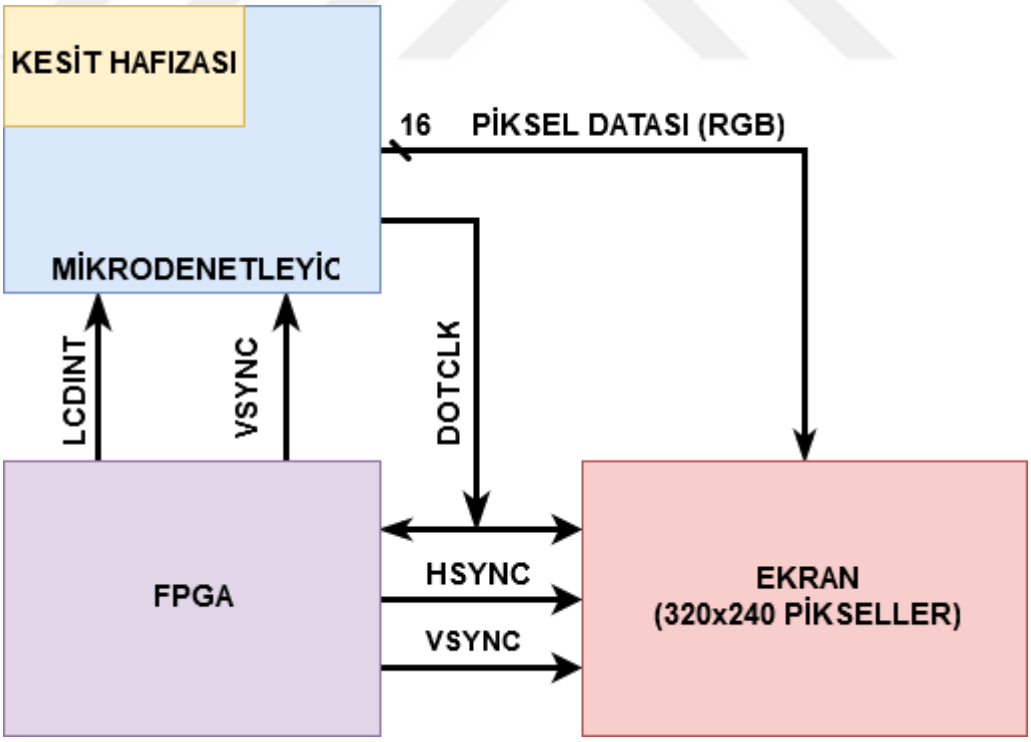
Bir grafik sisteminde 3 temel unsura ihtiyaç vardır. Bunlardan ilki kesit (Sahne) hafızası (Frame Buffer) diye adlandıran ekran görüntüsüne ait her bir piksel verisinin tutulduğu hafıza birimidir. 24 bit renk derinliğine sahip olan TFT ekran 16 bit olarak kullanıldığını hesaba katığımızda ihtiyacımız olan hafıza birimi,

$$\text{Kesit Hafızası (Byte)} = \text{Piksel sayısı} * \text{renk derinliği} / 8 \qquad (2.1)$$

$$\text{Kesit Hafızası (Byte)} = \frac{320*240*16}{8} = 153\text{Kbyte} \quad (2.2)$$

olmaktadır. Bu hafıza birimindeki veriler ekran görüntüsünün kesit hafızasını oluşturmaktadır. Ekran tekrar frekansına bağlı olarak saniyede 60 kez ekrana yazılmakta ve bu verilerin değiştirilmesi ile ekran görüntüsü değiştirilmektedir. Bu nedenle bu veriler RAM hafızada tutulmak zorundadır. Kullanılan mikrodenetleyici 512 Kbyte Ram hafızaya sahip olduğundan kesit hafızası mikrodenetleyici içerisinde oluşturulmuştur.

Ekran Kontrolcüsü (Display Controller) birimi ise LCD ekranların kontrol sinyallerinin üretilmesi ve kontrolü işlemini gerçekleştirir. Bu sinyaller yatay (satır) senkronizasyon sinyali (HSYNC), dik (frame, kesit) senkronizasyon sinyali (VSYNC), piksel saat sinyali ve piksel verisi sinyalleridir. Tez kapsamında tasarlanan kontrolcü birimin blok diyagramı aşağıdadır.



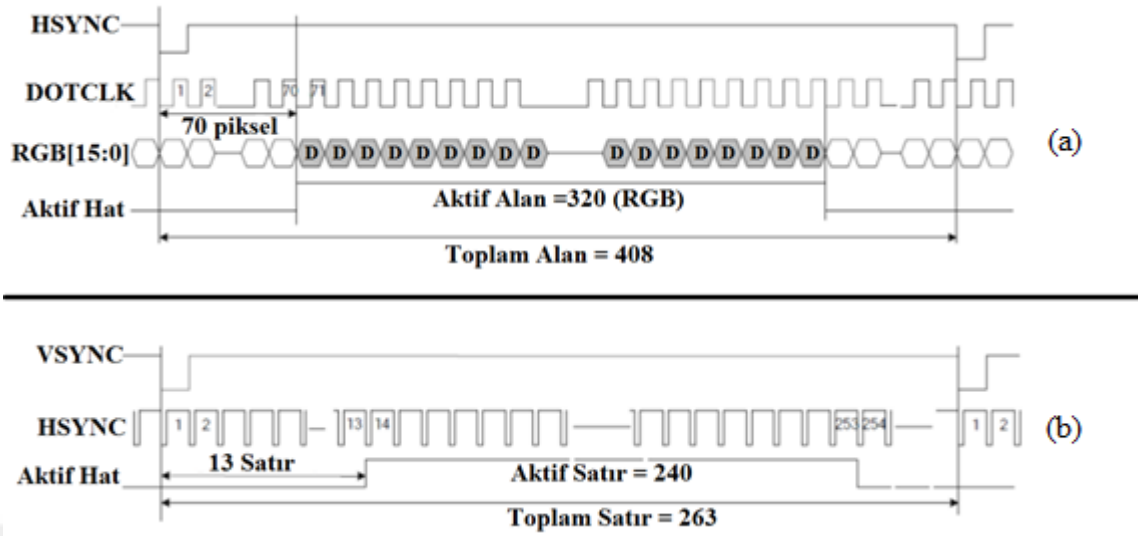
Şekil 2.15:320x240 LCD kontrolcü birimi

Sistem tasarımında mikrodenetleyici birimi olarak PIC32MZ2048EFH144 entegresi kullanılmıştır. PIC32MZ ailesi mikrodenetleyiciler bünyesinde donanımsal olarak

grafik ekran kontrolcü birimine sahip değildirler. Bu nedenle LCD sürme işlemlerinde yüksek oranda CPU işlemine ihtiyaç duymakta ve LCD'ye ait kontrol sinyalleri (VSYNC, HSYNC, DOTCLK gibi) yazılımsal olarak oluşturulmaktadır. Sistem tasarımı harici bir LCD kontrolcü birimi veya dâhili LCD kontrolcüsüne sahip olmayan bir mikrodenetleyici kullanıldığından yalnızca mikrodenetleyici ile LCD sürüldüğü takdirde minimum %5 CPU gücü bu işleme aktarılmak zorundadır. Sistemde dâhili bir FPGA bulunduğundan FPGA ve mikrodenetleyici birlikte hibrit bir biçimde kullanılarak LCD sürme işlemi gerçekleştirilmiş ve neredeyse %0'a yakın CPU kullanımı ile bu işlem gerçekleştirilmiştir. Akış biçimi aşağıda yer almaktadır.

1. MCU tarafından bir DOTCLK (8 MHz) sinyali üretilir. Bu sinyal MCU'nun harici saat çıkışıdır ve donanımsal olarak üretilir. Bu sinyal hem LCD'nin piksel verilerinin sürülmesinde kullanılır hem de FPGA'e aktarılır.
2. FPGA, DOTCLK sinyalini kullanarak VSYNC (dik senkronizasyon), HSYNC (yatay senkronizasyon) gibi LCD için gerekli sinyalleri üretir.
3. VSYNC (dik senkronizasyon) MCU'yu da besler. Bu sinyal bir kesme (interrupt) olarak kullanılır ve her sahne ekrana aktarıldıktan sonra adres bilgileri başlangıç değerlerine atanır ve böylece yeni bir sahne başlangıcı yapılır. Bu kısım CPU'nun kullanıldığı tek yerdir ve bu saniyede sistem FPS'si (frame per second) kadar tekrarlanır. Örneğin 60 FPS için saniyede 60kez CPU başlangıç ayarları ve adres bilgisi atanır.
4. LCDINT kesme sinyali ile MCU'yu besleyerek 16 bit RGB verisinin çıkışa konulmasını sağlar. LCDINT sinyali MCU'nun dâhili DMA birimini tetikleyerek donanımsal ve CPU gerektirmeksizin verilerin çıkışa konulmasını sağlamaktadır. Bu sinyale ihtiyaç duyulmasının nedeni ise her grafik LCD'nin DOTCLK'a bağlı olarak aktif ve pasif sahaları bulunmasıdır. Aktif olan sahada RGB verisi ile piksellerin sürülmesi gerekirken pasif olan sahada anlamlı RGB verisine ihtiyaç yoktur. Şekil 2.16'da aktif ve pasif alanlar görülmektedir.

Böylelikle neredeyse hiç CPU işlemine ihtiyaç duymayan bir LCD kontrolcü birimi oluşturulmuştur.



Şekil 2.16: TFT ekran için gerekli olan olan konfigürasyon sinyallerinin gösterimi
a) Piksellerin sürülmesi b)Satırların sürülmesi

Şekil 2.16'da görüleceği üzere HSYNC sinyali satır tetikleme sinyali anlamına gelmektedir. Her satırda 320 piksel vardır ve piksel çözünürlüğü 24 bittir, bu piksellere veriler DOTCLK sinyali aktarılır. Ancak her satırda aktif pikseller öncesi ve sonrasında hazırlanma bölümleri bulunmakta ve bu bölümler DOTCLK ile sürülmesine rağmen RGB verisine ihtiyaç duymamaktadır. HSYNC sinyalinin oluşturulması için 408 DOTCLK sinyaline ihtiyaç vardır. FPGA tarafından LCDINT sinyali yalnızca aktif sahada RGB verisinin çıkışa aktarılabilmesi için üretilir.

HSYNC sinyaline benzer bir biçimde VSYNC sinyali bütün satırların tamamlanarak sayfanın tamamlandığını bildirir. Yine aktif 240 satır bulunmasına rağmen başlangıç ve bitiş hazırlanma bölgeleri bulunmaktadır. VSYNC sinyalinin oluşması için 263 HSYNC sinyaline ihtiyaç vardır.

MCU'nun sahip olduğu DMA birimi CPU kullanmaksızın istenilen hafıza veya ara yüz biriminde (SPI, EBI, UART, portlar gibi) yer alan verileri istenilen hafıza ve ara yüze aktarılmasını sağlayan dâhili bir yapıdır. LCD sürme işlemi esnasında kesit hafızasında yer alan veriler her bir LCDINT sinyali ile PORTB çıkışına aktarılmaktadırlar. DMA işlemleri CPU kullanılmadan MCU'da yer alan bütün kesmeler ile tetiklenebilmektedir. Ayrıca bir DMA kanalı maksimum 65 Kbyte veri transferi gerçekleştirebilmektedir. Bir

kanalın kapasitesi dolduğunda bir sonraki kanal tetiklenebilmekte ve bir 65 Kbyte büyüklüğünde veri transferi gerçekleşebilmektedir. 16 bit derinliğe sahip ekranın kesit hafızası 153 Kbyte olduğundan birbirine bağlanmış 3 DMA kanalı birbirini tetikleyerek (chaining) kesit hafızası verilerini ekrana aktarmaktadır. Kesit hafızası bittiğinde ve VSYNC tetiklemesi oluşarak MCU bütün DMA ayarlarını başlangıç konumuna getirip ekranı sürmek için hazır hale gelmektedir.

Sistem bu haliyle saniyede 60 FPS gibi çok yüksek yenileme hızına sahip olup başarılı bir biçimde istenilen görüntüleri kusursuz bir biçimde ekrana aktarmaktadır.

2.5.1.4 Harici Flash Hafıza

Genel amaçlı hafıza birimidir. Seri SPI bağlantı ara yüzüne sahip MCU ile veri transferi sağlayan kalıcı bir hafızadır. Özellikle MCU ve FPGA yazılım güncellemelerinde boot hafızası olarak kullanılabileceği gibi ekran ara yüzüne ait farklı sayfa bilgilerinin depolandığı bir birim olarak da kullanılabilmektedir.

2.5.1.5Buzzer Birimi

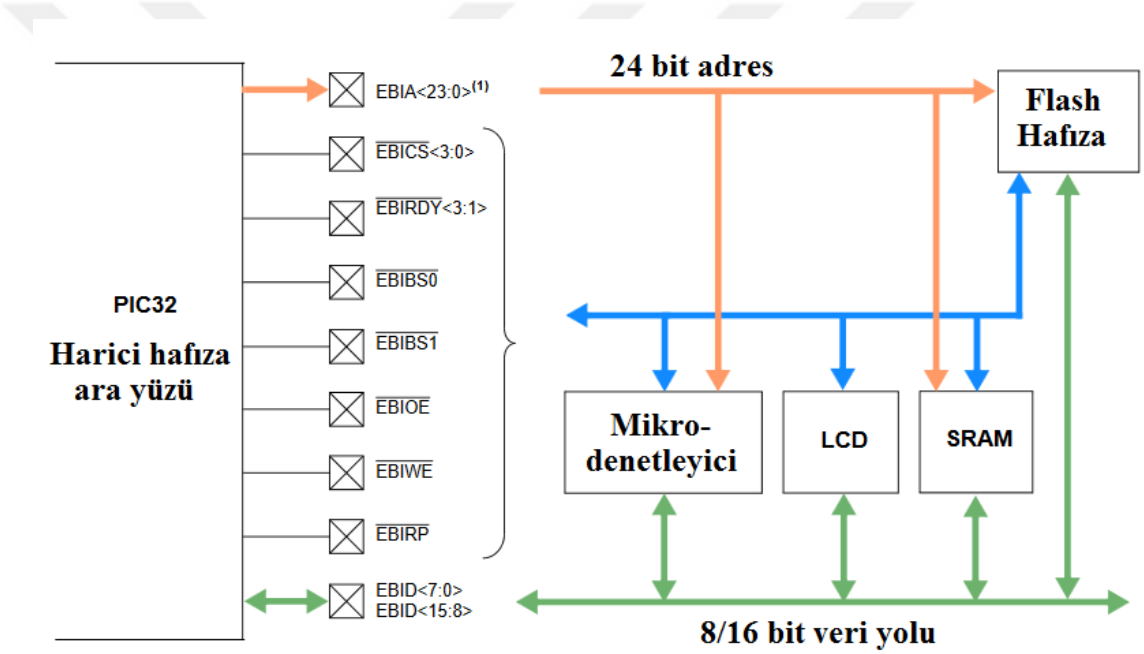
Kullanıcı tarafından ayarlanarak belirli seviyelerde uyarı vermek ve kullanım kolaylığını sağlamak amacıyla kullanılır.

2.6 FPGA-MCU Veri Transferi İşlemi

Bu uygulamada FPGA, UM akışının gerçekleştirilmesi, veri edinim ve sinyal işleme görevlerini gerçekleştirirken MCU çeşitli entegre devrelerin konfigürasyonları, ultrasonik kart alt birimlerinin test ve monitör işlemi ile PC ara yüzü ve ekran sürücüsü olarak kullanılmıştır. Bütün kullanıcı girişleri MCU aracılığı ile ilgili birimlere aktarılır.

Ultrasonik veri edinim ve kontrol kartında yüksek hızlı, SD kart, USB ara yüzü gibi çevresel ünitelere ait kapsamlı kütüphanelere sahip mikrodenetleyici istihdam edildiğinden FPGA içerisine bir mikrodenetleyici gömerek kart ve akış kontrolünü sağlamak yerine saklaç bazlı kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. FPGA içerisinde saklaç bilgilerinin tutulduğu 64x16 bitlik bir RAM hafıza oluşturulmuştur. Her bir saklaç adresi farklı işlemlere ait bilgileri tutmaktadır. MCU ihtiyaç duyulan RAM adresine bilgi yazarak veya okuyarak FPGA kontrol ve işletimini gerçekleştirmektedir. UM ile

ilgili konfigürasyonlar da MCU üzerinden FPGA içerisindeki saklaçlara aktarılır ve UM sonrası oluşan büyük veri MCU tarafından FPGA içerisindeki ilgili saklaçtan okunarak gösterim birimlerine aktarılmaktadır. FPGA-MCU veri transferi işlemi için kullanılan ara yüz ise MCU'ya ait EBI (External Bus Interface) harici hafıza ara yüzüdür. Bu ara yüz MCU'nun çeşitli senkron veya asenkron hafıza birimlerine yüksek hızlarda paralel olarak erişmesini sağlamaktadır (50 MHz). Bu bus 16 bit veri yolu 21 bit adres ve çeşitli kontrol sinyallerine sahiptir. Şekil 2.17'de PIC32 mikrodenetleyicisinin harici hafıza ara yüzü görülmektedir. Bu sinyallerden 16 bit veri hattı, 6 bit adres hattı (64 adres) ve EBIWE, EBIRE gibi yazma ve okuma izin pinleri kullanılmıştır.



Şekil 2.17: Harici Bus Ara yüz pinleri

2.7 PC Programı

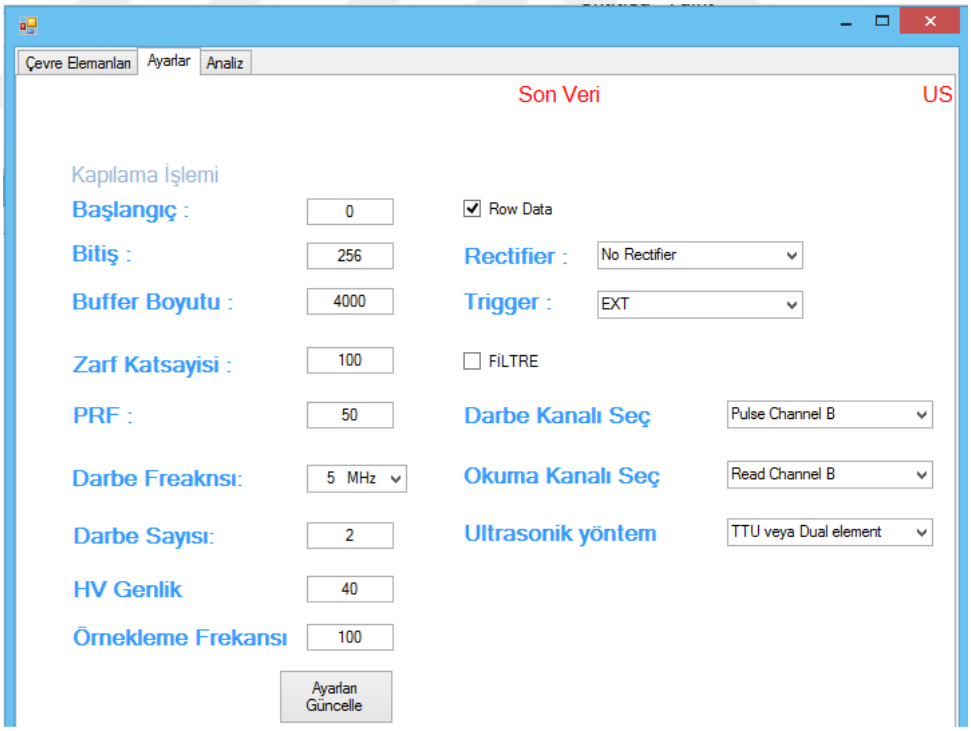
PC ara yüzü, ultrasonik kartı PC üzerinden kontrol etme ve aynı zamanda ultrasonik test ve ölçümlerin bilgisayar üzerinden gerçekleştirilebilmesi amacı ile üretilmiştir. Bilgisayar bağlantısı USB ile 512 byte paketler kullanılarak vendor id bazlı iletişim sağlanmaktadır. Böylelikle yüksek hızlarda karşılıklı veri transferi gerçekleştirilebilmektedir. Verilerin anlamlandırması işlemi aşağıdaki biçimdeki gibidir.

Tablo 2.1: USB veri paketleri

Veri No	Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	…
Veriler	0xFF	0x00	0x03	0x01	0x01	…
Anlam	Açılış kontrol	Paket Byte adeti		Paket konusu	Paket Verisi	

Her paket heksadesimal ‘0xFF’ açılış verisi ile başlamalıdır. Daha sonra 2 byte olarak gelen paketin kaç adet byte veriye sahip olduğu bilgisi iletilir. İlk byte MSB’dir. Adet bilgisinin ardından paket konusu gelir. Tablo 2.1’de ‘0x01’ verisi konunun “Led_islemi” olduğunu ifade eder. Sonraki bytelar ise konuya ait verileri oluşturur.

PC ara yüzü için gerçekleştirilen program 2 ana bölümden oluşmaktadır bunlardan ilki konfigürasyon sayfası diğeri ise analiz sayfasıdır.



Şekil 2.18: PC programında konfigürasyon sayfasının gösterimi

Şekil 2.18’de PC programındaki ultrasonik ölçümlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan ayarlamalar gösterilmiştir. Bu konfigürasyonlardan bazıları şu şekildedir.

“Buffer boyutu”, her bir ultrasonik test için sayısallaştırıcı birim sonrası kazanılacak veri âdetini belirtir. Ultrasonik kartta 200 örnek ile 16000 örnek (her bir örnek 8 bit) arasında ayarlanabilecek büyüklüktedir. ADC örnekleme frekansına bağlı olarak yankı sinyallerinin alınma süresi değişmektedir. Örneğin örnekleme frekansı 100 MHz iken 10ns adım ile örnekleme işlemi gerçekleştirilir. Eğer bu koşulda buffer büyüklüğü 16000 ise 160us’lik süre boyunca ultrasonik veri edinimi gerçekleştirilecek demektir. 50 Mhz örnekleme söz konusu ise adım 20nS olacağından veri edinim süresi 320uS’ye çıkacaktır. Örnekleme frekansı düştükçe ultrasonik sinyallerin kazanım süresi artmaktadır.

“PRF” (Pulse Reputition frequency), darbe tekrar frekansıdır. Saniyede kaç adet ultrasonik test işleminin gerçekleştirileceğini belirtir. Her bir ultrasonik test işlemi frekansa ve buffer boyutuna bağlı olarak değişik sürelerde gerçekleşebilmektedir.

“Darbe frekansı” kullanılan ultrasonik çevirgece bağlı olarak yüksek genlik ve yüksek frekanslı darbelerin frekansının seçildiği bölümdür. Çevirgece bağlı olarak değişmekle beraber ultrasonik kart 1 MHz ile 10 MHz arası ultrasonik darbeleri üretebilmektedir.

“HV genlik” bölümü ise yüksek genliğin 0.5V adımlarla dijital olarak ayarlandığı bölümdür.

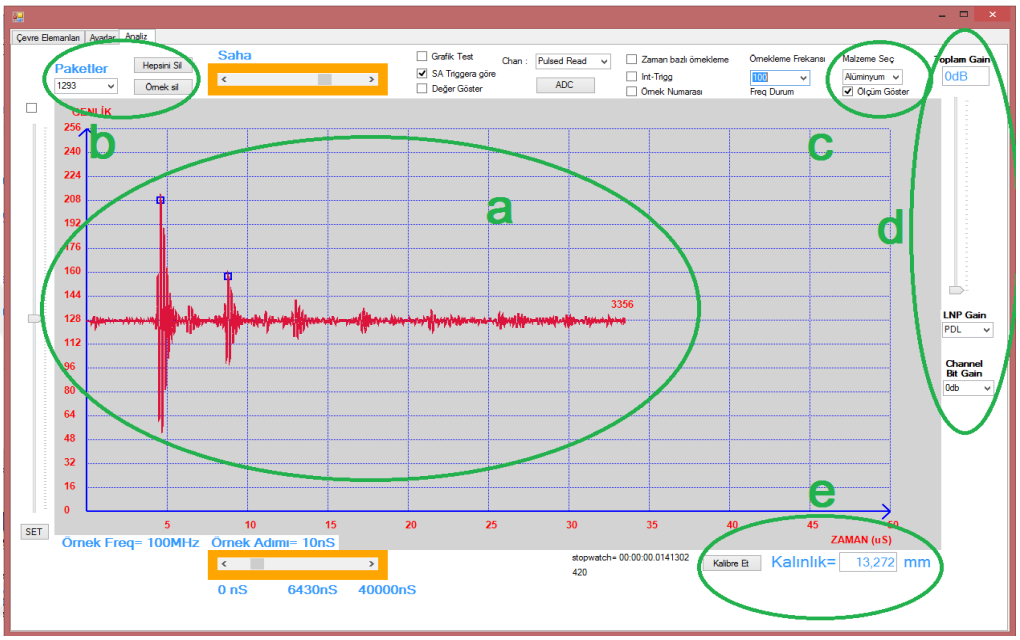
“Darbe Sayısı” farklı tipteki ultrasonik testlere veya test ortamındaki ses sinyallerini zayıflatıcı etmenlere bağlı olarak farklı sayıda darbe uygulanabilmektedir. Bu yüzden darbe sayısı parametresi arttırılarak iletilen sinyal gücü de arttırılabilir ancak bu durum ince materyallerin ölçümünde yankı sinyallerinin karışması veya çakışması nedeni ile hassasiyet azaltıcı bir rol oynayabilir.

“Örnekleme frekansı” sayısallaştırıcının örnekleme frekansını temsil eder. Bu frekans değeri 100 MHz, 50 MHz, 25 MHz veya 12.5 MHz olarak seçilebilmektedir.

“Trigger” parametresi ultrasonik test başlangıç komutunun nereden geleceğinin seçildiği bölümdür. Bu dâhili olarak üretilip çıkışa verilebileceği gibi harici bir sinyal de ultrasonik test işlemini başlatabilmektedir.

"Darbe Kanalı Seç" ve "Okuma Kanalı Seç" parametreleri hangi kanaldan okuma yapılıp hangi kanaldan darbe gönderileceğinin seçildiği bölümdür.

Son olarak "Ultrasonik yöntem" parametresi de TTU veya darbe yankı yöntemlerinden hangisinin kullanılacağını belirtmektedir.



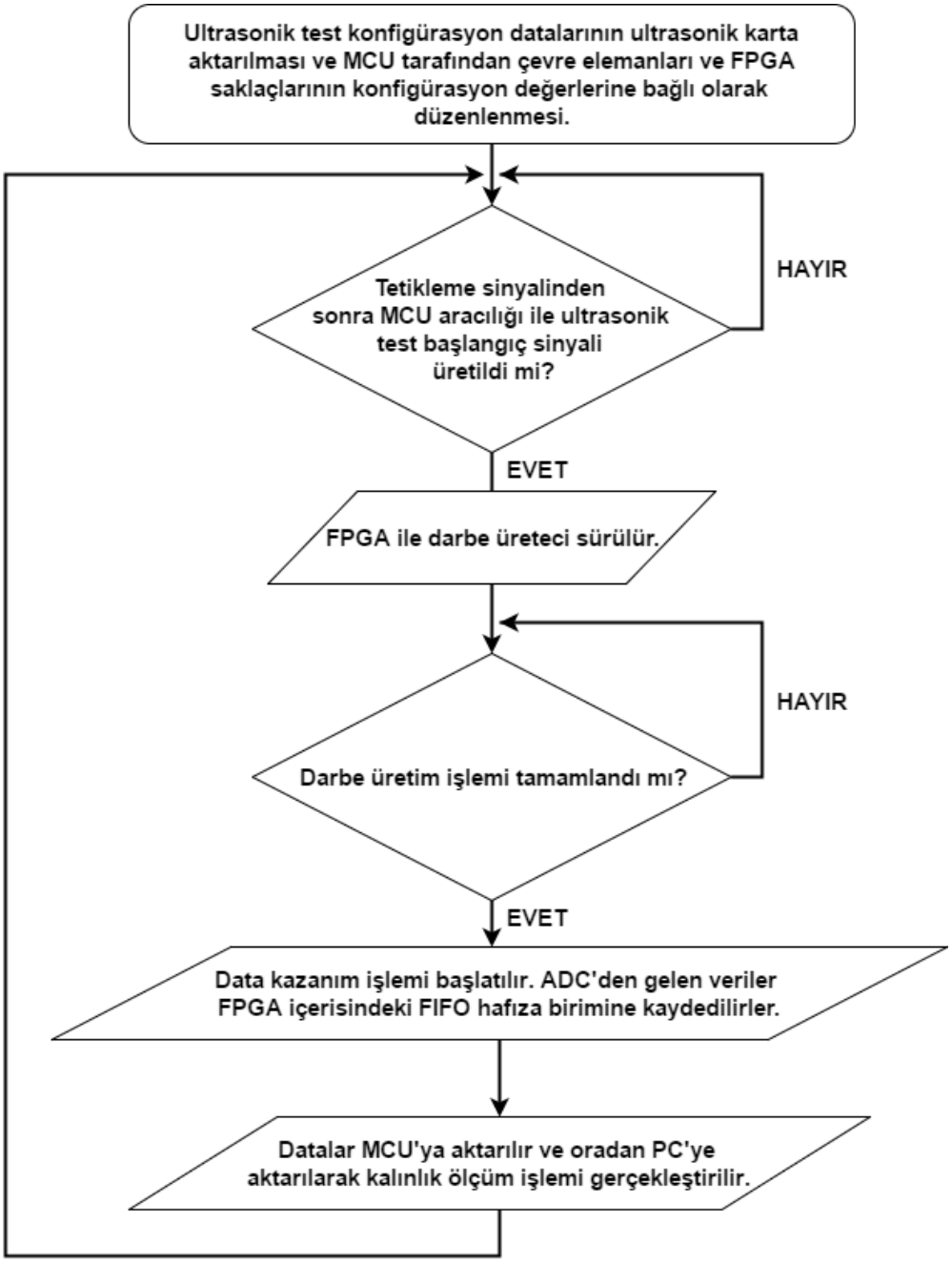
Şekil 2.19: PC programında analiz sayfasının gösterimi

Ultrasonik test kartı için yazılmış olan PC programının analiz sayfası Şekil 2.19'da görülmektedir. Bu şekilde yer alan unsurlar sırasıyla a'da ultrasonik sinyalin zaman-genlik ekseninde gösterimi, b'de kaydedilmiş ultrasonik test paketlerinin gösterimi, c'de malzeme tipi seçme birimi, d'de sistemin bütün kuvvetlendirme birimlerinin gösterilmesi, e'de kalınlık ölçüm gösterimi ve kalibrasyon işlemi yer almaktadır. Toplam kuvvetlendirme miktarı 2 farklı kuvvetlendirme işleminin sonucudur. Bunlar LNA ve VGA ile elde edilen kuvvetlendirmedir.

2.8. Uygulamanın Akışı

Şekil 2.20'de ölçüm değerlerinin ve görüntüleme işleminin PC ara yüzü aracılığı ile gerçekleştirildiği durumdaki uygulamanın akış diyagramı yer almaktadır. Buna göre öncelikle istenilen konfigürasyon değerleri ultrasonik karta gönderilir. Şekil 2.18'de yer alan değerler ultrasonik karta USB bağlantısı ile iletilirler. Ardından MCU ünitesi

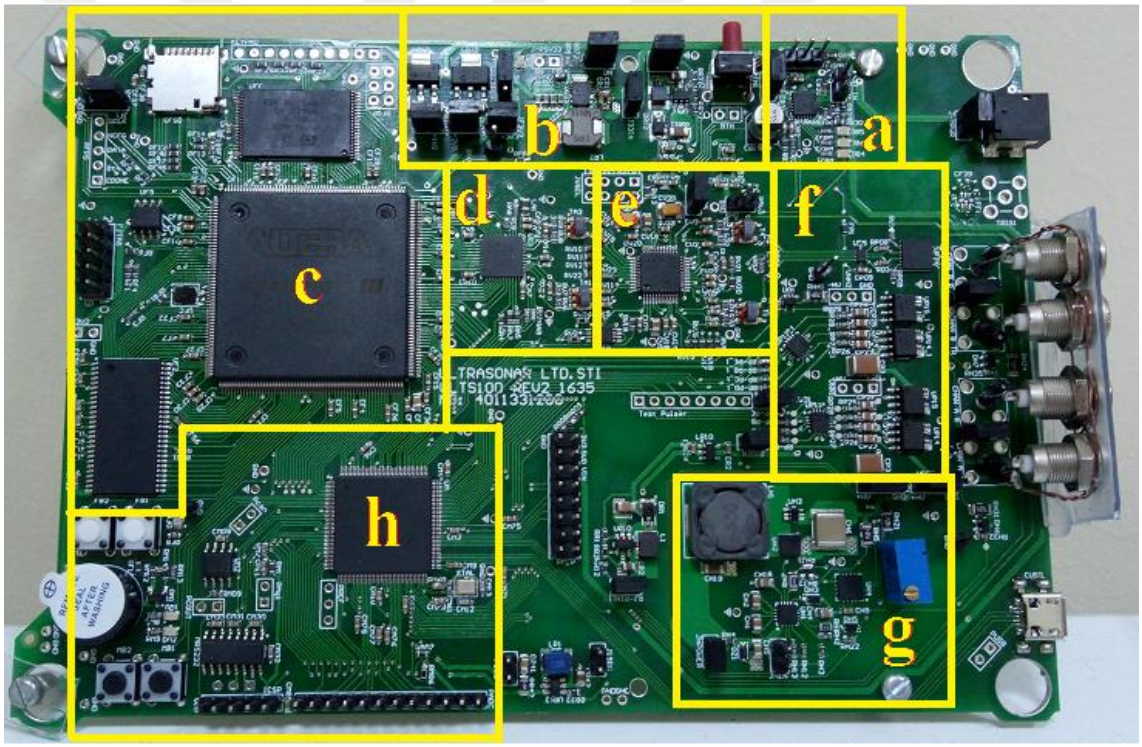
ultrasonik testi mümkün kılacak konfigürasyon parametrelerini hem FPGA içerisinde ilgili saklaçlara yazar hem de ADC, kuvvetlendirme ünitesi, yüksek genlik üreteci gibi çevresel birimlerin konfigürasyonlarını gerçekleştirir. Örneğin "Darbe Sayısı" parametresindeki değer, darbeler FPGA aracılığıyla gerçekleştirildiği için FPGA içerisindeki ilgili saklaca yazılır.



Şekil 2.20: Uygulamanın yazılımsal akış diyagramının gösterilmesi

Konfigürasyonların tamamlanmasının ardından MCU dâhili olarak ultrasonik test işlemini başlatacağı gibi harici bir tetikleme sinyali ile de test işlemini başlatabilir. Başlangıç komutundan sonra FPGA ile ultrasonik darbeler üretilir. Bu işlem biter bitmez sayısallaştırıcı çıkışındaki veriler FPGA içerisinde oluşturulmuş FIFO hafıza birimine aktarılır. Belirli bir doluluk oranından sonra MCU'nun harici kesme girişi aktif edilerek MCU'nun EBI ara yüzünden DMA aracılığı ile veriler aktarılır ve bu veriler PC'ye gönderilirler. PC'de ise bu verilerin gösterim ve ölçüm işlemi gerçekleştirilir.

Şekil 2.21'de tez kapsamında üretilen ultrasonik kart ve üzerindeki çeşitli birimler gösterilmiştir.



Şekil 2.21: Tez çalışması ile üretilen ultrasonik kartın birimlerinin gösterimi a)Batarya kontrol birimi b)Voltaj regülasyonu birimi c) FPGA ünitesi d)ADC birimi e)Kuvvetlendirici Birimi f) Darbe üreteci g) Yüksek voltaj üretim birimi h)MCU birimi

BÖLÜM 3
BULGULAR

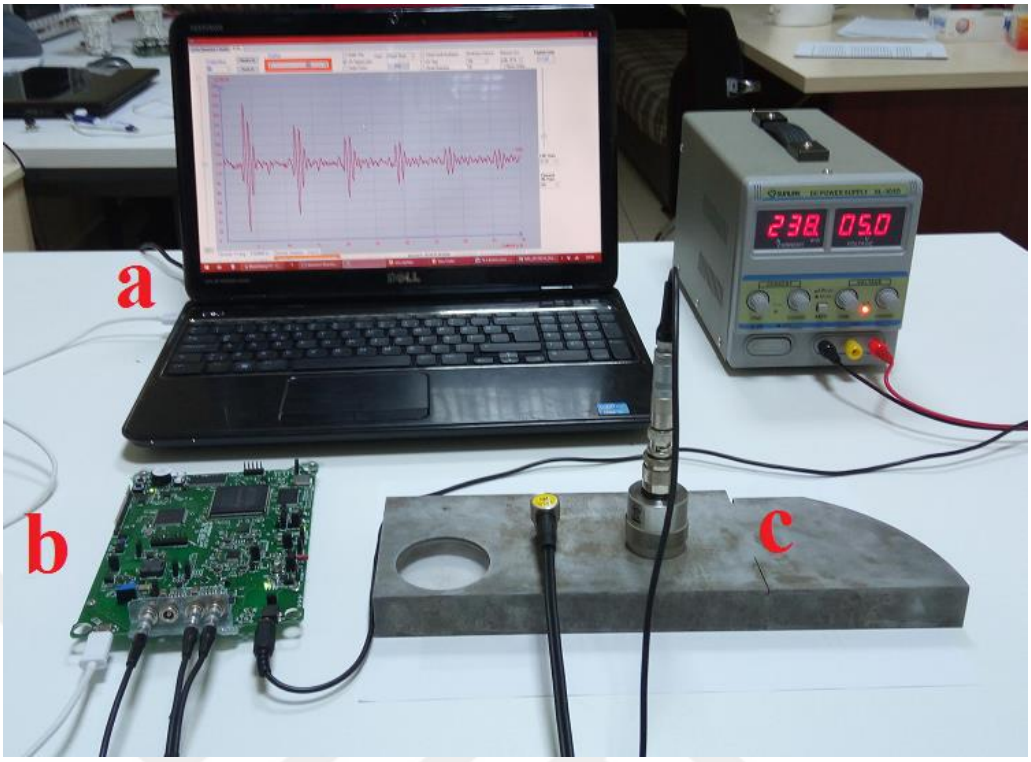
3.1 Kalınlık Ölçüm İşleminin Gerçekleştirilmesi

Ultrasonik kalınlık ölçüm işlemi, içerisinde ses hızı sabit bir nesneye uygulanan ultrasonik darbenin, nesne arka yüzeyinden yansıyarak tekrar proba ulaşma süresine bağlı olarak hesaplanır. Bu teknik uçuş süresi bazlı (TOF, time of flight) bir tekniktir. Formül (3.1)'de, V malzeme içerisindeki ses hızını, t yankı süresini, T malzeme kalınlığını temsil etmektedir.

$$T = (V \times t)/2 \tag{3.1}$$

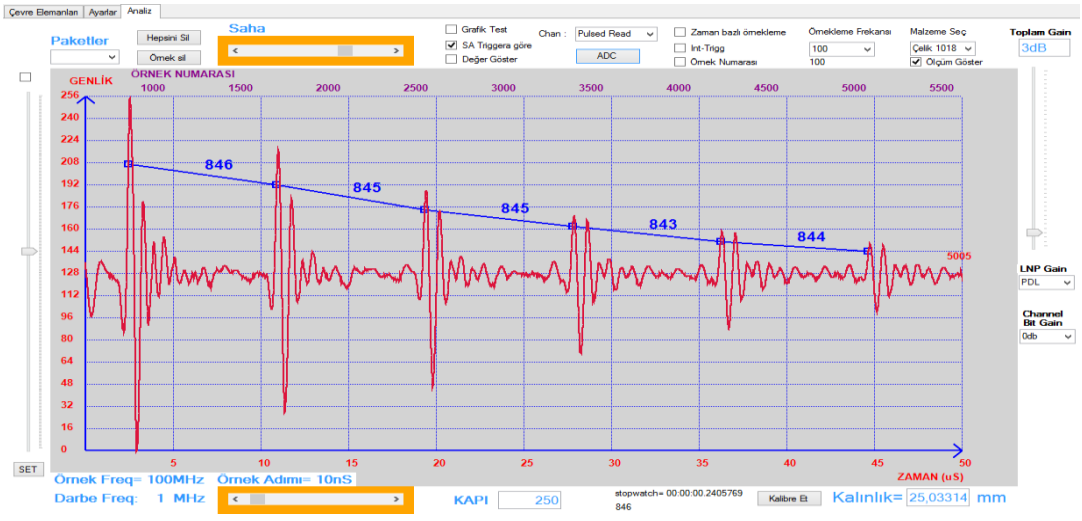
Tez kapsamında gerçekleştirilen uygulama ile ultrasonik kartın doğrulunun gösterimi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda içerisinde ses hızı sabit olan referans test bloğu kullanılarak kalınlık ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1 test kurulumunu göstermektedir.

Şekil 2.5a'da yer alan 1 MHz tek elementli yani darbe-yankı veya TTU tekniğinde kullanılabilen prob ile 2.5cm kalınlığa sahip referans test malzemesi üzerinde gerçekleştirilen ölçüm Şekil 3.2'de yer almaktadır. Anlamlı ultrasonik sinyaller 100 MHz hızında sayısallaştırılmış ve sinyal çözünürlüğü 8 bittir. Çevirgece uygulanan darbe 1MHz, +90V ve 1 adet unipolar darbedir. Şekilde anlamlı 6 adet yankı sinyali görülmektedir. Ölçüm işlemi TOF yani uçuş süresinin hesaplanması ile gerçekleşir. Bu nedenle her yankının belirli bir eşik seviyesini geçtiği noktalar yankı sinyalin başladığı ve bittiği noktalar olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.1: Ultrasonik kalınlık ölçüm test kurulumu a) PC b) Ultrasonik Kart c) Test bloğu

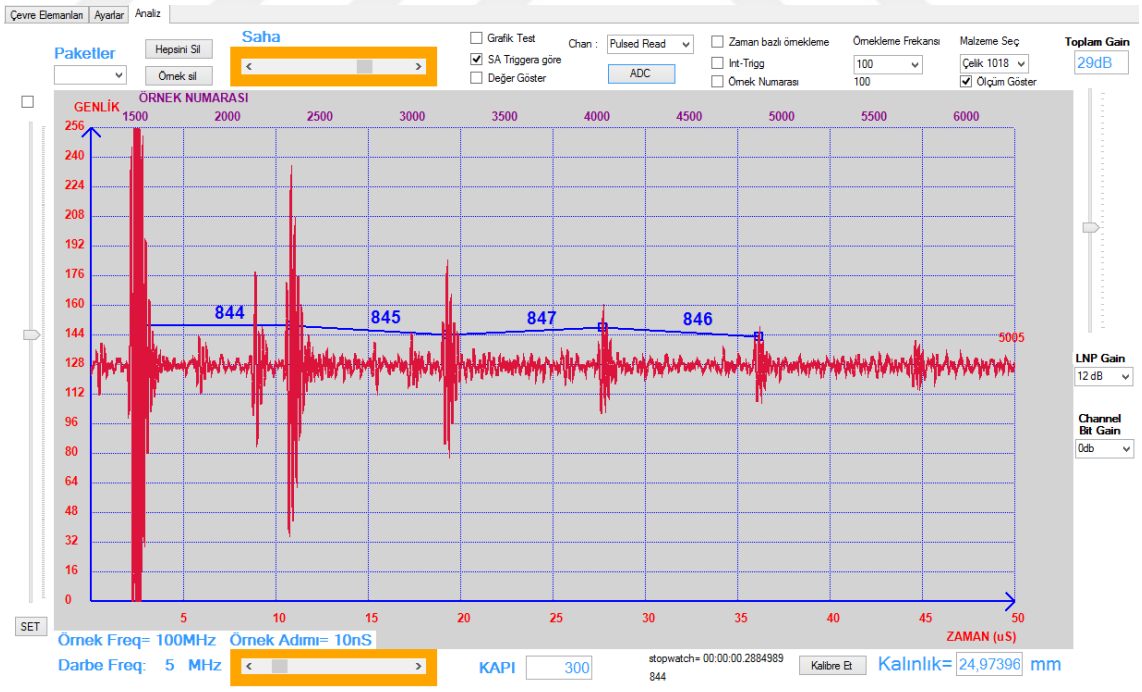
Şekil 3.2'de ilk iki yankı sinyalini temel aldığımızda sinyaller arası adım sayısı 846 olarak hesaplanmıştır. Bu değer iki yankı arasında yer alan örnek sayısını ifade eder. 100 MHz'de sayısallaştırılan her bir örnek 10ns süre aldığından toplam geçen süre 8.46uS olmaktadır.



Şekil 3.2: 1 MHz çevirgeç ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunun gösterimi

Bu değer denklem 3.1'e uygulandığı takdirde (Çelik 1018'deki ses hızı, 5918m/s) kalınlık 25,03314mm olmaktadır. Optimum örnek sayısı 845'tir ve bu değerde kalınlık 25,00355mm olmaktadır. Optimum örnek değeri çeşitli ölçüm algoritmaları ve ölçüm sayısının arttırılması ile yakalanabilecektir. Bu görselin incelenmesi ile tek bir ölçüm ile elde edilen dalgaların analizi yapılmıştır. Saniyede gerçekleştirilen ölçüm sayısı arttırılarak ölçüm netliği arttırılabilir.

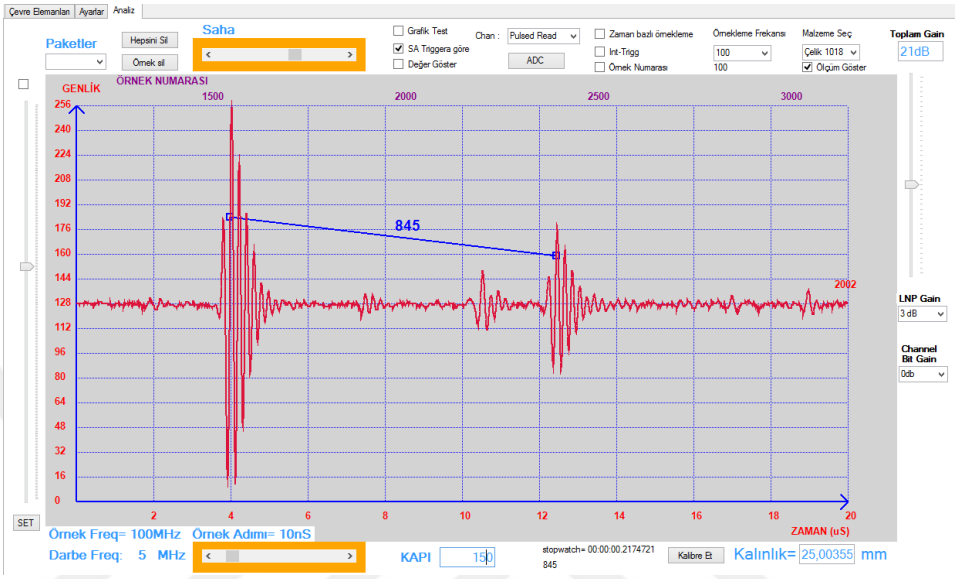
Şekil 3.3'de yer alan A-Scan gösterimde ise Şekil 2.5b'de yer alan çift elementli 5 MHz çevirgeç ile yine aynı 2.5cm kalınlığa sahip referans bloğun ölçüm sonucu yer almaktadır. Bir önceki işlemde sinyaller yalnızca +3dB kuvvetlendirmeye tabi tutulurken bu örnekte aynı seviyede sinyallerin kazanımı için yaklaşık +29dB kuvvetlendirme gerçekleştirilmiştir. Bunun sebepleri prob darbe yüzey alanı, prob kazanım yüzey alanı, prob kalitesi gibi nedenlerdir. Gerçekleştirilen test sonucunda da darbe frekansı artmasına rağmen ölçüm sonuçları optimum ölçüm etrafında şekillenmektedir.



Şekil 3.3: 5 MHz çevirgeç ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunun gösterimi

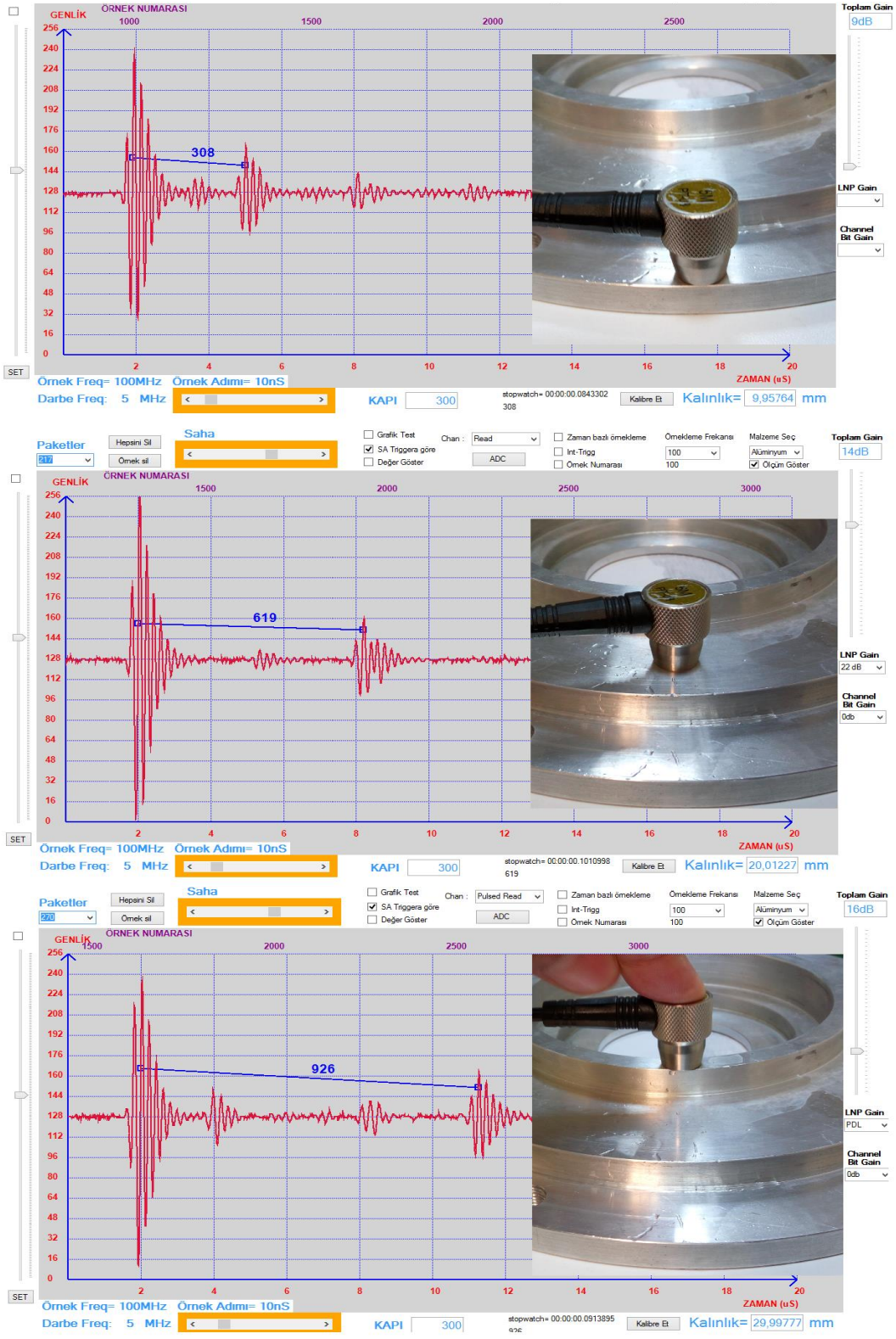
Şekil 3.4'te yalnızca Şekil 3.3'deki ilk iki yankı sinyali gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde yankı sinyallerinin birbirinin aynısı ve alınan mesafeye bağlı olarak

farklı zayıflama miktarına maruz kaldıkları görülmektedir. İki sinyalde de kalınlık ölçümü için yankı başlangıcı olarak maksimum genlik noktasından 10 örnekleme öncesindeki örnek başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.4: Yalnızca iki adet 5 MHz'lik yankı sinyalinin gösterimi

Şekil 3.5'de 3 farklı kalınlığa (10mm, 20mm, 30mm) sahip alüminyum malzemenin her bir kalınlığının 5 MHz çift elementli çevirgeç ile gerçekleştirilen kalınlık ölçüm sonuçları yer almaktadır. Şekil 3.5a'da 10mm kalınlığa sahip alüminyum bloğun kalınlık ölçümü gerçekleşmiştir. Alüminyum ses hızı 6479m/s (Malzeme kalibrasyon bloğu olmadığından 10cm'lik kalınlığa göre kalibre edilmiştir), yankı süresi ise ölçüm adımı 308 ve örnekleme frekansı 100 MHz olduğundan sesin proba ulaşana kadar geçirdiği süre 3,08uS olmaktadır. 3.1'deki formül uygulandığında kalınlık 9,9776mm olmaktadır. İki yankı arası optimum örnek sayısı ise 309'dur. Bu değerde ise kalınlık 10,0100mm olmaktadır. Kalınlık ölçüm algoritmasında yankı sinyallerinin maksimum noktaları arası örnek noktaları tam olarak doğru seçildiğinde (Test sayısı arttırılarak veya maksimum genlik noktasını tespit eden algoritma geliştirilerek vb.) optimum ölçüm gerçekleştirilmiş olacaktır. 20mm kalınlığa sahip bölgede optimum örnek sayısı 617 olarak doğru tespit edilmiş ve kalınlık 20,0009mm olarak hesaplanmıştır. Aynı durum 30mm kalınlık için de geçerlidir. Yankı sinyalleri arası örnek sayısı 925 olarak doğru tespit edilmiş ve kalınlık 29,9977mm olarak bulunmuştur.



Şekil 3.5: 10mm, 20mm ve 30mm kalınlık değerlerine sahip alüminyum blok üzerinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları a)10mm kalınlık ölçümü b)20mm kalınlık ölçümü c)30mm kalınlık ölçümü

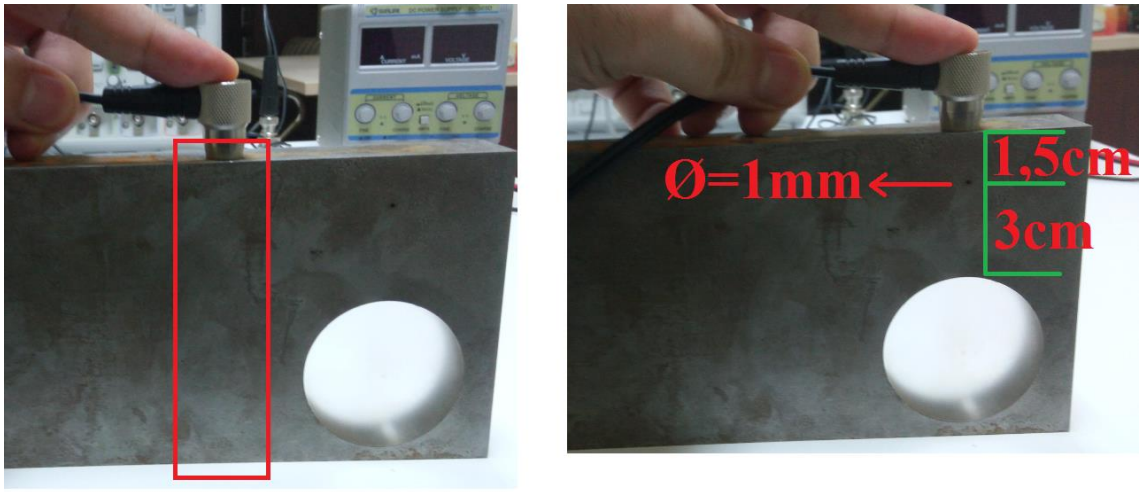
Tablo 3.1: Alüminyum test bloğunun ölçüm sonuçların incelenmesi

Kalınlık	Ölçülen Adım	Ölçüm Sonucu	Optimum Adım	Optimum Ölçüm
a (10mm)	308	9,9776mm	309	10,0100mm
b (20mm)	617	20,0009mm	617	20,0009mm
c (30mm)	925	29,9977mm	925	29,9977mm

Tablo 3.1'de yer alan ölçüm sonuçları ve olması gereken optimum değerler verilmiştir. Gelecekteki yazılımsal çalışmalarla optimum örnek değerini tespit etme çalışmalarıyla kalınlık ölçümünün kesinliği arttırılabilecektir.

3.1 Hata Tespit İşleminin Gerçekleştirilmesi

Ultrasonik testte hata tespiti işlemi A-Scan görüntünün analizi ile gerçekleşmektedir. Test esnasında boyuna dalgalar ile tespit çalışması gerçekleştirilmiş ve malzeme içinde meydana gelen herhangi bir düzensizliğin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Şekil 3.6'da referans çelik bloğun testinin gerçekleştirildiği noktalar yer almaktadır. Şekil 3.6a'da 100mm kusursuz kalınlığa sahip noktadan, 5 MHz'lik çift elementli çevirgeç ile ölçüm gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen ölçüm sonucu Şekil 3.7'de verilmiştir. Şekil 3.6b'de ise çelik referans bloğun üst yüzeyinden 1,5cm içeride, 1 mm çapa sahip ve en boyunca uzanan bir hava boşluğu bulunmaktadır. Çevirgeç ve boşlukla aynı düşey eksende yer alan, üst yüzeyden 4,5cm içerde dairesel plastik dolgu malzemesi bulunmaktadır. Bu testteki amaç öncelikle kusursuz 100mm'lik bölgenin kalınlık ölçümünü gerçekleştirip daha sonra boşluklu bölümün test sonuçlarının analizinin yapılmasıdır.



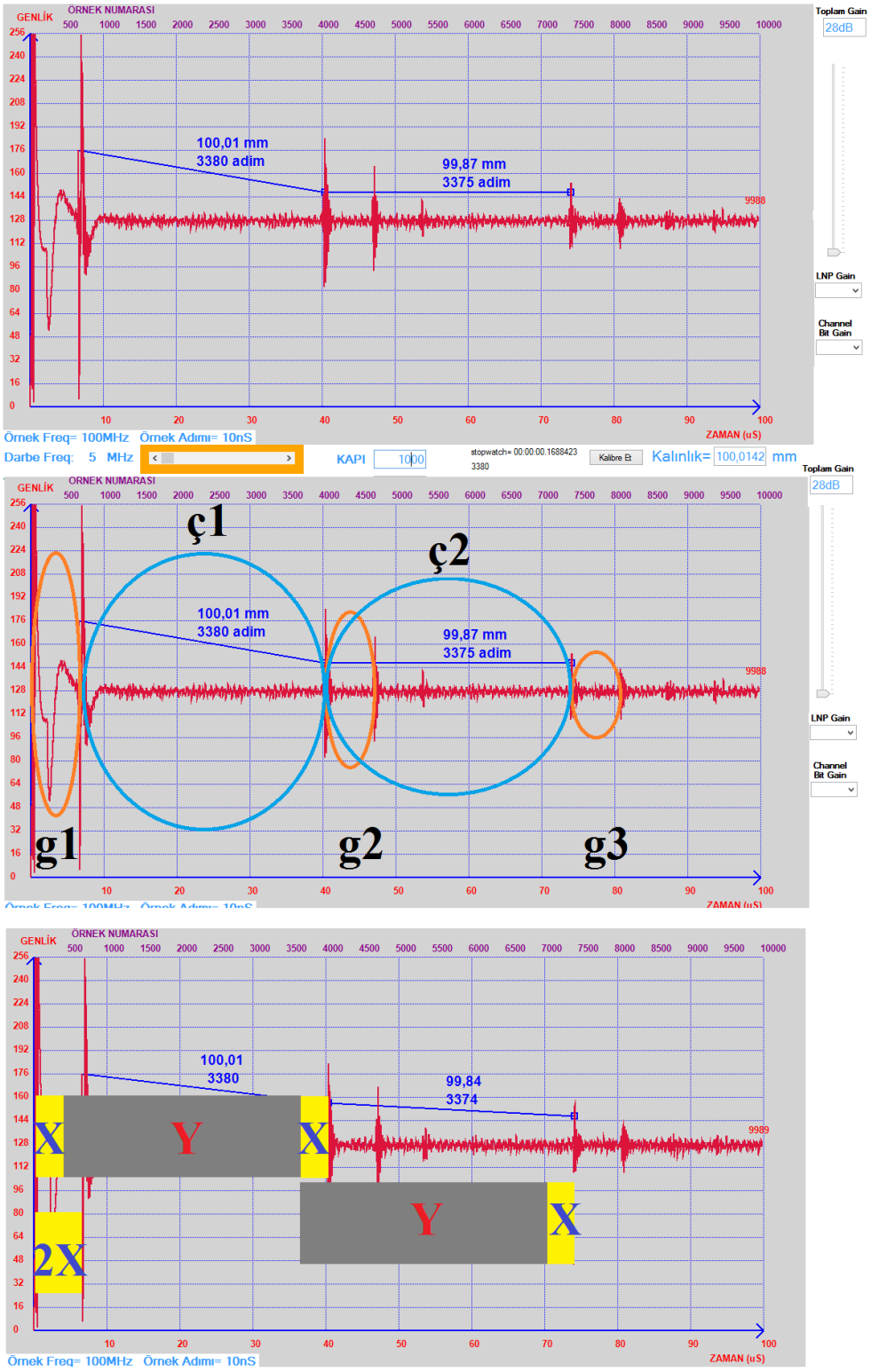
(a) (b)

Şekil 3.6: Hata tespit işlemi gerçekleştirilen referans bloğun görünümü
a)100mm'lik kusursuz bölgede gerçekleştirilen ölçüm
b)Kusurlu bölgede gerçekleştirilen ölçüm

Şekil 3.7'de, Şekil 3.6a'da yer alan bölgenin ultrasonik testinin ham görüntüsü (Şekil 3.7a), yankı sinyallerinin bölümlere ayrıştırıldığı görüntüsü (Şekil 3.7b) ve ultrasonik sinyalin ilerlediği blokların gösterimi (Şekil 3.7c) yer almaktadır. Birden fazla yankı sinyali kafa karışıklığına neden olabilir ancak bu sinyallerin sırası ile incelenmesi ile anlamlı sinyaller ayrıştırılabilecektir. Şekil 3.7b'de g1 bölgesinin solunda kalan yüksek genlikli sinyal, giriş darbesidir. Darbe gönderilir gönderilmez okuma işlemine başlandığından giriş darbesinin sönümlemesi de kazanılmıştır. Bu bölgenin sağında kalan ve yaklaşık girişten 6uS sonra oluşan yankı sinyali ise çevirgeç kaynaklı bir sinyaldir. Test esnasında kullanılan 5 MHz çevirgeç kalınlık ölçümü için özelleşmiş ve dâhili gecikme hattına sahiptir (delay line). Gecikme hattı sayesinde ince malzemelerin de kalınlık ölçümlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak 100mm kalınlığa sahip çelik blok ölçülürken yüksek miktarda kuvvetlendirme gerçekleştirilmiş (~+28dB) ve bu nedenle akustik empedans uyumsuzluğu nedeniyle gecikme hattından çelik malzemeye aktarılamayıp geri dönen sinyaller de kuvvetlendirilmiştir. Bu nedenle Şekil 3.7b'de g1, bölgesinin sonundaki yankı işareti gecikme hattından geri yansıyan akustik işarettir. Çelik içerisinde ilerleyip arka yüzeyden yansıyan sinyaller ise tekrar gecikme hattından geçerek okuyucuya ulaşırlar.

Şekil 3.7c'de ultrasonik darbelerin hangi bölgelerde yayıldığı gösterilmiştir. Sarı renkte yer alan bölgeler çevirgecin gecikme hattındaki ses sinyallerinin ilerlediği alanları, gri bölgeler ise ultrasonik sinyallerin çelik içerisinde ilerlediği bölgeleri göstermektedir.
Yankı sinyallerini anlamlandırabilmek için ses sinyallerinin ilerleme bölgelerini incelemeliyiz. Giriş sinyalinden sonra ses sinyalleri X süre boyunca gecikme hattında ilerler ve ses sinyallerinin bir kısmı çelik malzemeye aktarılırken bir kısmı ise geri yansır. Geri yansıyan sinyaller toplamda 2X sürede okuyucuya ulaşır. Bu sinyallerin oluşturduğu işaret Şekil 3.7'deki şekilde 2X sürelik mesafeden sonra oluşmuştur. Çelikte ilerleyen sinyaller (Y süresi boyunca) ise arka yüzeyden yansır ve çevirgece ulaşır. Ancak yine gecikme hattını geçerek okuyucuya ulaşabileceklerdir bu nedenle yine X sürelik gecikme oluşur. Bu aşamaya kadar geçen süre Y+2X'dir. Başlangıçtaki 2X'lik çevirgeç gecikmesi çıkarıldığında geriye yalnızca çelik kalınlığı kalacaktır. Çevirgece ulaştıkları anda çevirgece aktarılamayıp geri dönen sinyaller tekrar çelik içinde (Y kadar) ilerleyip çevirgece ulaşır ve çevirgeç gecikmesini (X kadar) de aşarak okuyucu tarafından kazanılır. Böylece yankının yankısı elde edilmiş olur.

Şekil 3.7b'de g1, g2, g3 ile gösterilen bölgeler çevirgeç gecikme hattından kaynaklanan gecikmeleri, ç1 ve ç2 çelik kalınlığın oluşturduğu bölgeyi ifade etmektedir. ç1 bölgesi sınırlarında kalan yankı sinyalleri 3380 örnekleme adımında (100 MHz örnekleme frekansı, 10nS adım) oluşmuştur. Bu durum 33,80 uS'lik süreye tekabül eder ve buradaki çelik kalınlığı 100,01mm olmaktadır. Ç2 bölgesi ise yankıdan yankıya mesafeyi göstermekte 3375 adımlık mesafe ile 33,75 uS süre almış ve 99,87 mm mesafeye tekabül etmektedir. Hem giriş sinyalinden hem de yankı sinyallerinden kalınlık ölçümünün gerçekleştirilmiş olması kalınlık ölçümünün doğrulanması konusunda önemli bir parametredir.



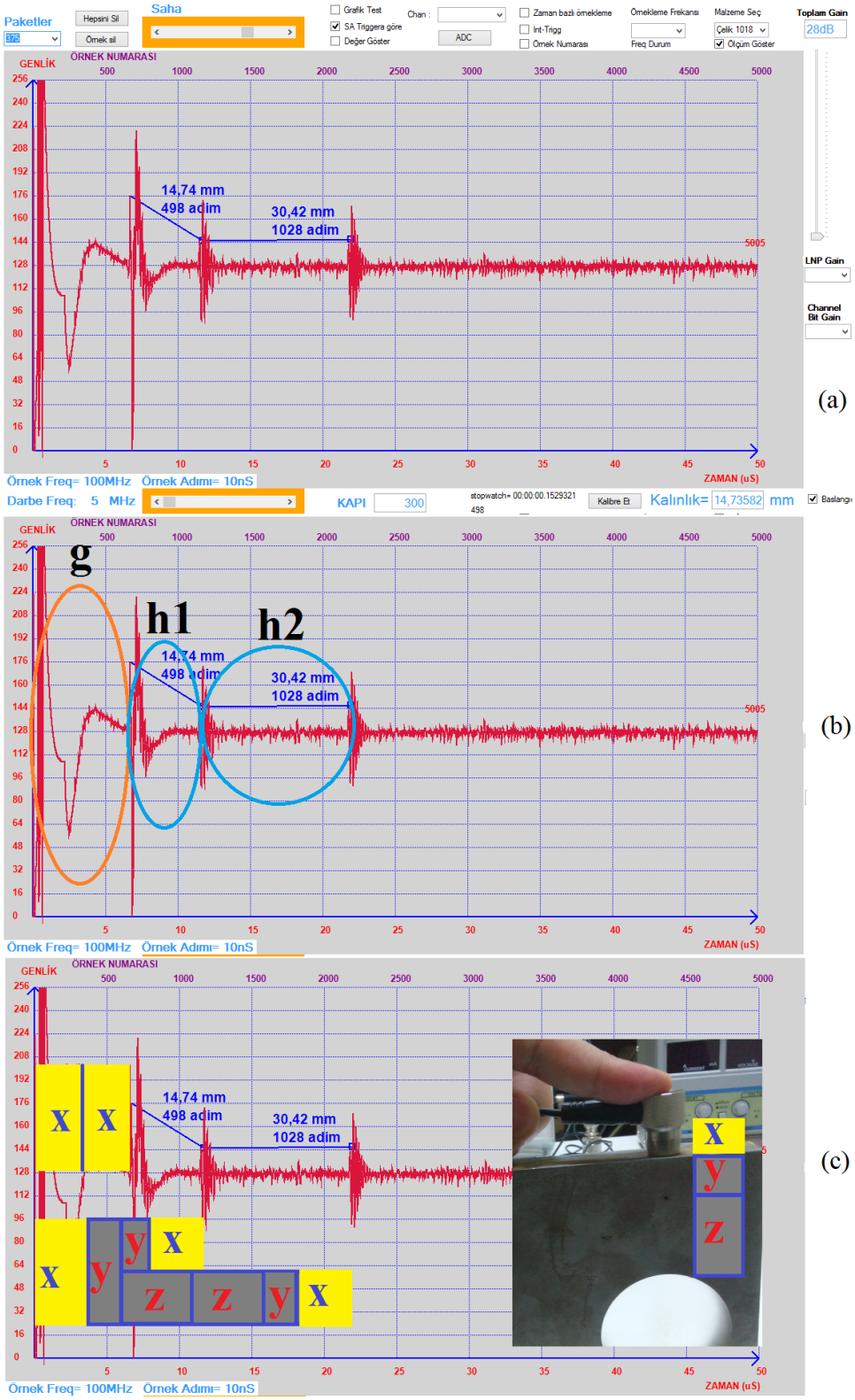
Şekil 3.7: Şekil 3.6a'da gerçekleştirilen ultrasonik ölçümün görüntülenmesi

a) Ham A-Scan görüntüleme b)Bölgelere ayrılmış görüntü

c)Ultrasonik sinyalin ilerlediği blokların gösterimi

Şekil 3.8 içerisindeki, Şekil 3.6b'de yer alan bölgenin ultrasonik testinin ham görüntüsü (Şekil 3.8a), yankı sinyallerinin bölümlere ayrıştırıldığı görüntüsü (Şekil 3.8b) ve ultrasonik sinyalin ilerlediği blokların gösterimi (Şekil 3.8c) yer almaktadır. Bu görseller temel alındığında Şekil 3.8b'de g bölgesinden sonra gelen ilk yankı sinyali çevirgeç gecikme hattına aittir ve metal ölçümünün başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Bu bölgeden sonra gelen h1 bölgesi ise merkezi üst yüzeyden 1.5cm içerde bulunan 1mm'lik çapa sahip hava boşluğundan dönen sinyallerin oluşturduğu yankı sinyalidir. h1 bölgesinin Şekil 3.8'deki kalınlık ölçüm sonucuna bakıldığında bu değerin 15mm yerine 14,74mm olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise ses sinyallerinin kusurun merkezinden değil hava ortamı ile karşılaştığı ilk noktadan döndükleri içindir. h2 bölgesi ise arka duvar yansımasını göstermektedir. Arka yüzey girişinden 45mm derinliktedir. Bu testte 45,16 mm (h1 ve h2 bölgeleri toplamı) olarak ölçülmüştür. Böylelikle hem kalınlık ölçümü doğrulaması hem de kusur tespiti işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Şekil 3.8c incelendiğinde ultrasonik darbenin hangi bölgelerden ilerlediğini tespit edebiliriz. X sürelik ilk bölge çevirgeç gecikme hattına aittir. X süre sonunda ses sinyalleri çelik yüzey ile karşılaşır. Bu sinyal belirli bir oranda çelik içerisine aktarılırken bir kısmı da geri yansır ve X sürede çevirgeç gecikme hattını aşarak okuyucu birime ulaşır ve ilk yankı sinyalini oluştururlar. Bu nedenle ilk yankı sinyali 2X sürede oluşacaktır. Çelik içerisine aktarılan sinyaller ise y süre boyunca neredeyse kayıpsız ilerler ve bu süre sonunda 1.5cm derinlikteki hava boşluğu ile karşılaşılır. Hava boşluğu sinyallerin bir kısmının geri yansımasına neden olur. Dönen sinyaller Y sürede çevirgece ve sonrasında X sürede okuyucuya ulaşacaktır. 1.5cm'lik hava boşluğundan dönen sinyaller toplamda Şekil 3.8c dikkatle incelendiğinde X+Y+Y+X süresinde ve güzergâhında okuyucu birime dönmüş olur. Toplamda geçen süre 2X+2Y'dir. Çevirgeç gecikme hattından kaynaklanan yankı 2X sürede oluştuğundan ve ikinci yankı 2X+2Y sürede oluştuğundan çevirgeç gecikmesi çıkartıldığında kalan süre yani ilk iki yankı arasındaki mesafe 2Y olacaktır. Bu da 1,47mm kalınlığa tekabül eder.



Şekil 3.8: Şekil 3.6b'de gerçekleştirilen ultrasonik ölçümün görüntülenmesi

a) Ham A-Scan görüntüleme b) Bölgelere ayrılmış görüntü

c) Ultrasonik sinyalin ilerlediği blokların gösterimi

Boşluğun etrafından geçerek arka çepere doğru ilerleyen sinyaller Z kadar sürede arka çepere ulaşır ve geri yansıyarak Z kadar sürede hava boşluğuna sonrasında Y kadar sürede çevirgece ve X kadar sürede okuyucuya ulaşır. Toplam izlenen güzergâh X+Y+Z+Z+Y+X şeklindedir. Toplam süre ise 2X+2Y+2Z'dir. Bu üçüncü yankı sinyalinin mesafesidir ve ikinci yankı sinyali 2X+2Y sürede gerçekleştiğinden ikinci ve üçünü yankıların arasındaki fark 2Z olacağından bu değer 3cm'lik kalınlığın ölçümü anlamına gelecektir. Burada ölçülen değer 1028 adım ile 30,42mm olarak ölçülmüştür.

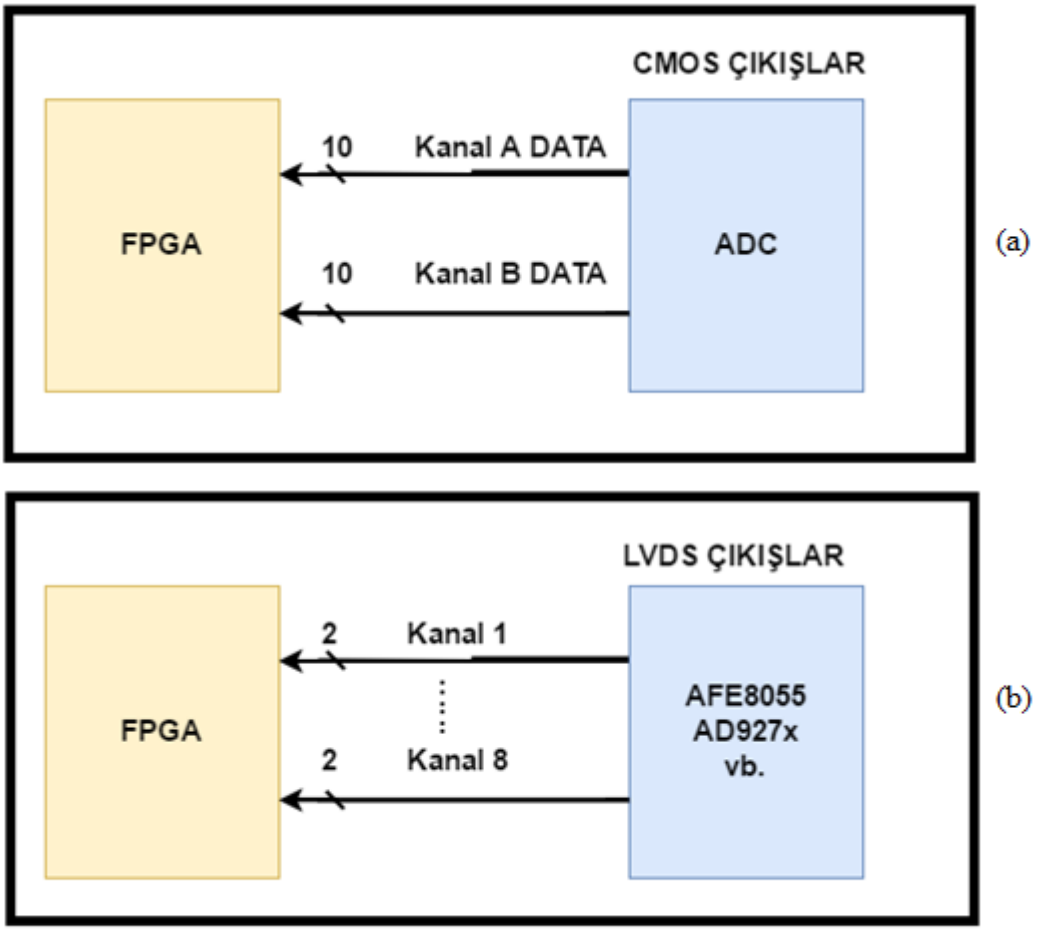
Bu ölçümle birlikte kusurlu bölgeden elde edilen A-Scan görüntüsünde yer alan bütün yankı sinyalleri anlamlandırılmıştır.

BÖLÜM 4
TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile birlikte tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik yöntem kullanılarak kalınlık ölçümü ve hata tespiti gerçekleştiren bir sistem tasarımı başarı ile gerçekleştirilmiştir. Bulgular kısmında kalınlık ölçüm ve hata tespiti sonuçları yer almaktadır. Giriş bölümünde belirtilen amaca uygun olarak günümüz teknolojik imkanları kullanılarak düşük maliyetli, yüksek işlem ve kapasiteye sahip komponentler kullanılarak ultrasonik kalınlık ölçer ve hata dedektörü sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu duruma en güzel örnek Microchip firmasının 2014 yılında piyasaya sürdüğü 252 MHz saat hızına sahip PIC32MZ ailesi mikrodenetleyici kullanılmasıdır. Bu mikrodenetleyici hem yüksek işlem gücü hem düşük maliyet sunmaktadır. Aynı zamanda veri edinim biriminin ana unsuru olan Altera firmasına ait Cyclone III ailesi bir FPGA kullanılması ile ultrasonik yazılımsal fonksiyonların ve geliştirme çalışmalarının yapılması adına büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu tez çalışması kartın doğrulamasını gerçekleştirmeyi amaçlamış ve başarı ile sonuçlandırılmıştır.

Gelecekteki yapılması gereken çalışmalardan en önemlisi kalınlık ölçümü işleminin kesinliğinin yazılımsal olarak sağlanmasıdır. Bunu sağlayacak olan teknik, algoritma ve yöntemin araştırılması ve sisteme yazılımsal olarak entegre edilmesi elzemdir. Bir diğer önemli husus ise bu tez boyunca boyuna dalgalar ile çalışmalar gerçekleştirilmesine rağmen enine dalgalar ile çalışma gerçekleştirilmemesidir. Bu alanda gerçekleştirilecek yazılımsal çalışmalar ile enine dalgalarla ölçümler gerçekleştirilebilecek ve metal kaynak analizi gibi yetenekler karta kazandırılabilecektir. Kompozit malzemelerin porosite değerleri de bu sistemle ölçülüp değerlendirilebilir ve pratik uygulamalarda kullanılabilirliği tespit edilebilir.

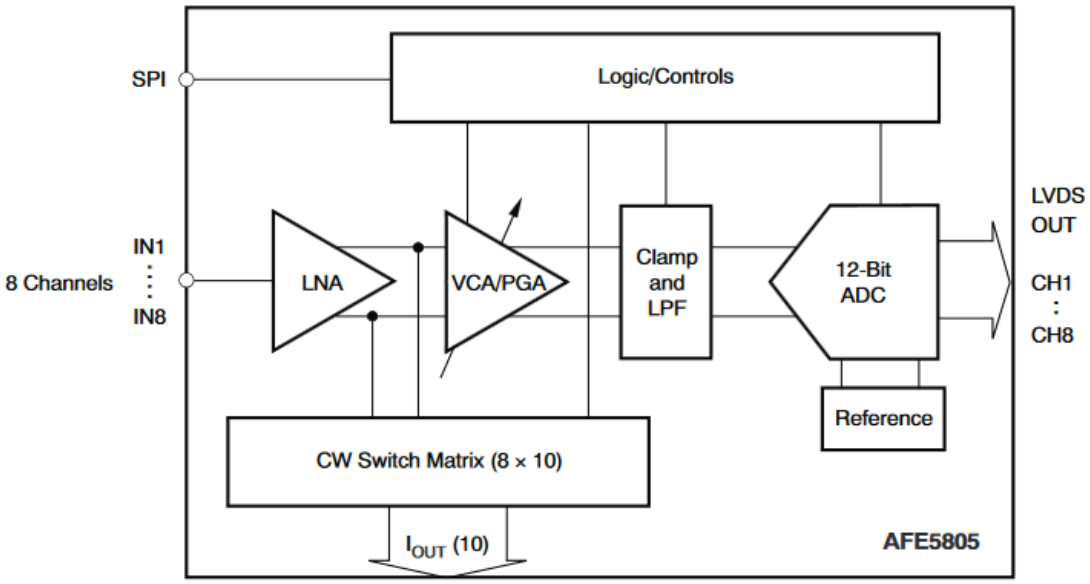
Bu çalışma boyunca kalınlık ölçüm ve hata tespiti işlemleri kazanılan verilerle A-Scan görüntülemenin oluşturularak ve görüntüleme sonucunun işlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin ultrasonik test sonucunda elde ettiği verilerden B-Scan görüntünün elde edilmesi işlemi donanımsal bir eklenti gerektirmemekte yalnızca yazılımsal bir çalışma ile bu yetenek de kazandırılabilir durumdadır. C-scan görüntüleme ise ultrasonik testin yapıldığı noktanın konum bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Ultrasonik kart bünyesinde FPGA barındırdığından donanımsal olarak bir enkoder okuma birimi tasarlandığında C-Scan görüntüleme işlemi de mümkün hale gelecektir.



Şekil 4.1: Veri transfer biçimlerinin gösterimi a) Tez kapsamında kullanılan veri transfer metodu b) Gelecek çalışmalarda eklenebilecek veri transfer metodu

Bu çalışmanın en önemli kazanımlarından bir diğeri ise güçlü donanımsal altyapısı sayesinde medikal ultrason uygulamaları için bir basamak niteliği taşımasıdır. Şekil

4.1a tez kapsamında gerçekleştirilmiş veri transfer işlemini göstermekte iken Şekil 4.1b ise potansiyel veri transfer işlemini göstermektedir. Bu iki tasarım arasındaki fark Şekil 4.1a ile CMOS çıkışlar kullanılarak paralel veri transferi gerçekleştirilmiştir. Burada elde edilebilecek maksimum veri transfer hızı yaklaşık olarak 250 MHz'dir. Ayrıca Kanal A ve Kanal B için toplamda 20 veri yoluna ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 4.1b incelendiğinde ise bir başka teknoloji, LVDS (Düşük voltajlı diferansiyel sinyalizasyon , Low-voltage differential signaling) kullanılmıştır. LVDS çok yüksek hızlarda (~800mbps) seri veri transferi işlemi gerçekleştirme kapasitesine sahip seri haberleşme ara yüzdür. Kullandığımız CYCLONE III ailesi FPGA LVDS desteğine sahiptir. Böylelikle günümüzde ticarileşmiş olarak temin edilebilen Texas Instrument firmasına ait blok diyagramı Şekil 4.2'de verilen 8 kanala sahip ultrasonik analog ön uç entegresi sisteme kolaylıkla adapte edilebilecek durumdadır. Böylelikle içerisinde 64, 128, 256 ultrasonik element bulunduran probların lineer dizi tekniği veya fazlı dizi tekniği kullanarak sürülmesi mümkün hale gelebilecektir. Böylece medikal ultrason alanında da çalışmalar gerçekleştirilebilecektir.



Şekil 4.2: Dâhili 8 kanala sahip özelleşmiş ultrasonik analog ön uç vazifesi gören AFE5805 entegresinin blok diyagramı

KAYNAKÇA

1. Kumar, S., Mahto, D., 2013. Recent trends in industrial and other engineering applications of nondestructive testing: a review. **International Journal of Scientific & Engineering Research, 4** (9): 183-195.
2. Mix, P. E., 2005. Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide. John Wiley&Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 681pp.
3. Özdemir A.T., 2014. A low-cost and highly reliable amplitude modulator design for pc-based pci plug ultrasonic pulser receiver boards. **Electronics World**, (120), pp.30-33.
4. Woo, J., 2002. A short history of the development of ultrasound in obstetrics and gynecology. (Web page: **http://www.ob-ultrasound.net/history1.Html**) (Date accessed: January 2017).
5. O'Brien Jr, W. D., 1998. Assessing the risks for modern diagnostic ultrasound imaging. **Japanese journal of applied physics, 37** (5S), 2781-2813.
6. Orenstein, B. W., 2008. Ultrasound history. **Radiol Today, 9** (24), 28-29.
7. NDT Resource Center, 2001-2014. The Collaboration for NDT Education, Iowa State University Introduction to Ultrasonic Testing (History of Ultrasonics). (Web page: ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/history.htm) (Dateaccessed: January 2017).
8. Silverman, R. H., 2009. High-resolution ultrasound imaging of the eye–a review. **Clinical&experimental ophthalmology, 37** (1), 54-67.
9. Shung, K. K., Zippuro, M., 1996. Ultrasonic transducers and arrays. **IEEE Engineering in Medicineand Biology Magazine**, 15(6), 20-30.
10. Bozzi, E.,Crocetti, L., Lencioni, R., 2008. US image acquisition (pp. 3-13). *In* Image Processing in Radiology (Eds: E. Neri, D. Caramella, C. Bartolozzi,). Springer Berlin Heidelberg.
11. Ensminger, D., Bond, L. J., 2011. Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications. CRC press, New York, 723 pp.
12. Manbachi, A.,Cobbold, R. S., 2011. Development and application of Piezoelectric materials for ultrasound generation and detection. **Ultrasound, 19** (4), 187-196.

13. Brennan, R. E., 2007. Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Armor Ceramics. The State University of New Jersey, Materials Science and Engineering, Ph.D, New Jersey, 503 pp.

14. Lukomski, T., 2012. Ultrasonic Nondestructive Methods in Inspection of Steel, AGH University of Science and Technology, Ph.D., Krakow, 92 pp.

15. Grandia, W. A., Fortunko, C. M., 1995. NDE applications of air-coupled Ultrasonic transducers, *Ultrasonics Symposium, 1995. Proceedings., 1995 IEEE***,** Nov. 7-10, 1995, Seattle, pp. 697-709.

16. Stonawski, O. (2008). Non-destructive Evaluation of Carbon/Carbon Brakes Using Air-coupled Ultrasonic Inspection Systems. Czech Technical University, Mechanical Engineering and Energy Processes, MSc, Prague, 109 pp.

17. Kulkarni, N.,Moudgil, B., Bhardwaj, M., 1994. Ultrasonic characterization of green and sintered ceramics; 2: Frequency domain**. American Ceramic Society Bulletin, 73** (7).

18. NDT Resource Center, 2001-2014. The Collaboration for NDT Education, Iowa State University Introduction to Ultrasonic Testing (Data Presentation). (Web page: nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics EquipmentTrans/DataPres.htm) (Date accessed: January 2017).

19. İŞLEYİCİ, U., 2005. Effect of Surface Roughness on Ultrasonic Testing. Middle East Technical University, Natural and Applied Sciences, PhD, Ankara, 115 pp.

20. Hu, C., 2006. Design of Digital Beamformersfor High-Frequency Ultrasound Transducer Arrays Using Field-Programmable Gate Array (FPGA). University of Southern California, Biomedical Engineering, PhD, Los Angles, 133pp.

21. Savage, F. M., 1954. An ultrasonic method of gauging. **Journal of the British Institution of Radio Engineers, 14** (9), 436-444.

22. Tang, S. C.,Clement, G. T.,Hynynen, K., 2007. A computer-controlled ultrasound pulser-receiver system for transskull fluid detection using a shear wave transmission technique. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 54** (9). 1772-1783.

23. Salazar, J., Turó, A., Chávez, J. A., Ortega, J. A., Garcia, M. J., 2003. High-

power high-resolution pulser for air-coupled ultrasonic NDE applications. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 52** (6), 1792-1798.

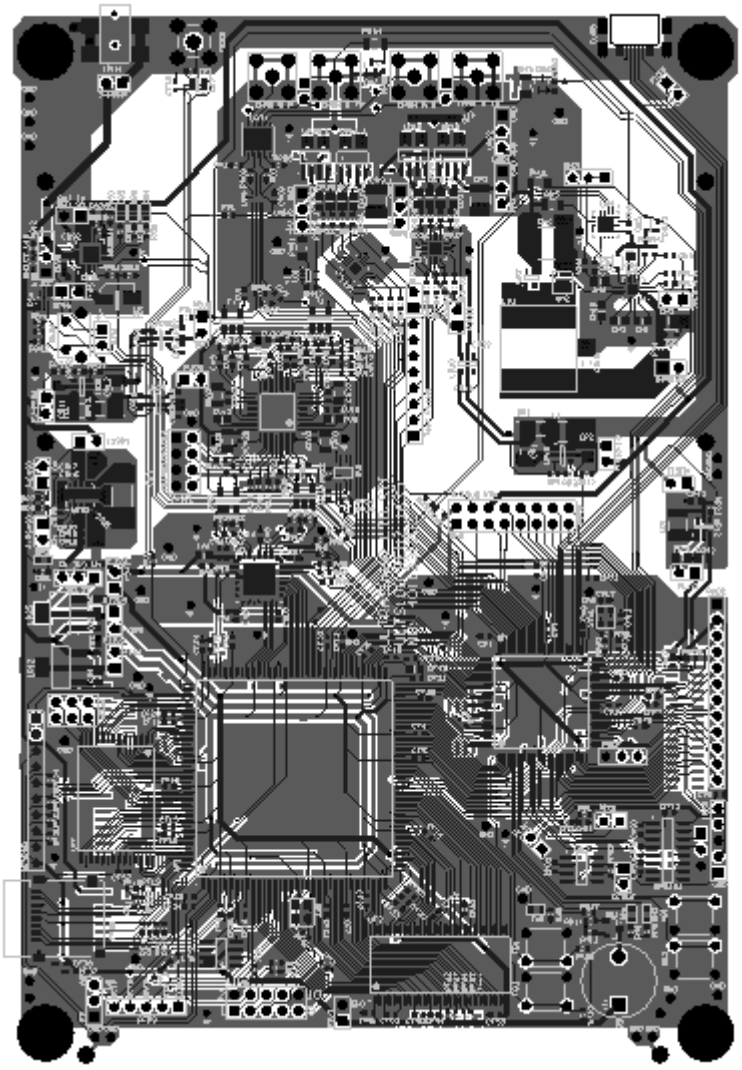
24. Athanasopoulos, G. I., Carey, S. J., Hatfield, J. V., 2004. A high voltage pulser ASIC for driving high frequency ultrasonic arrays, pp. 1398-1400. *Ultrasonics Symposium, 2004 IEEE,* Aug. 23-27, 2004, Montreal, Quebec.
25. Scales, N. R., Hicks, P. J., Armitage, A. D., Payne, P. A., Chen, Q. X., Hatfield, J. V., 1994, A programmable multi-channel CMOS pulser chip to drive ultrasonic array transducers. **IEEE Journal of Solid-State Circuits, 29** (8), 992-994.
26. Gao, W., Gao, D., Gan, B., Wang, L., Zheng, Q., Xue, F., Hu, Y., 2012. A novel data acquisition scheme based on a low-noise front-end ASIC and a high-speed ADC for CZT-based PET imaging, pp. 1-4. *Real Time Conference (RT), 2012 IEEE-NPSS 18th*, June 9-15, 2012, Berkeley, CA.
27. Wenyi, L., Hongcheng, Y., 2010. Design of high speed synchronous multi-channel data acquisition and processing system based on TMS320C6747, pp. 758-760. *Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference 2,* Feb. 26-28, 2010, Singapore.
28. Lines, D. I., Dickson, K. R., Filippi, G., Moir, T. J., 1999. A real-time image acquisition and processing system for ultrasonic arrays in NDT. **Proceedings of NDT 99**, 11-17.
29. Yin, X. P., Fan, Y. Y., Duan, Z. M., Cheng, W., Li, Y., 2010. Design of Data Acquisition and Control System Based on FPGA and DSP in Ultrasonic Inspection of Pipelines, pp. 557-559. *Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC), 2010 Second International Conference 2,* April 24-25, 2010, Wuhan, Hubei, China.
30. Luciano, N. B., Alberto, S. C. J., Carlos P. O. J., Manuel, R. A. J., 2010. Development of an ultrasonic thickness measurement equipment prototype, pp. 124-129. *20th International Conference on Electronics Communications and Computers (CONIELECOMP),* Feb. 22-24, 2010, Cholula, Mexico.
31. Özdemir, A. T., Atcı, A., 2015. A TMS320C6416 DSP-based high-

speed data acquisition system, pp. 1413-1416. *23nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) IEEE*, May 16-19, 2015, Malatya.

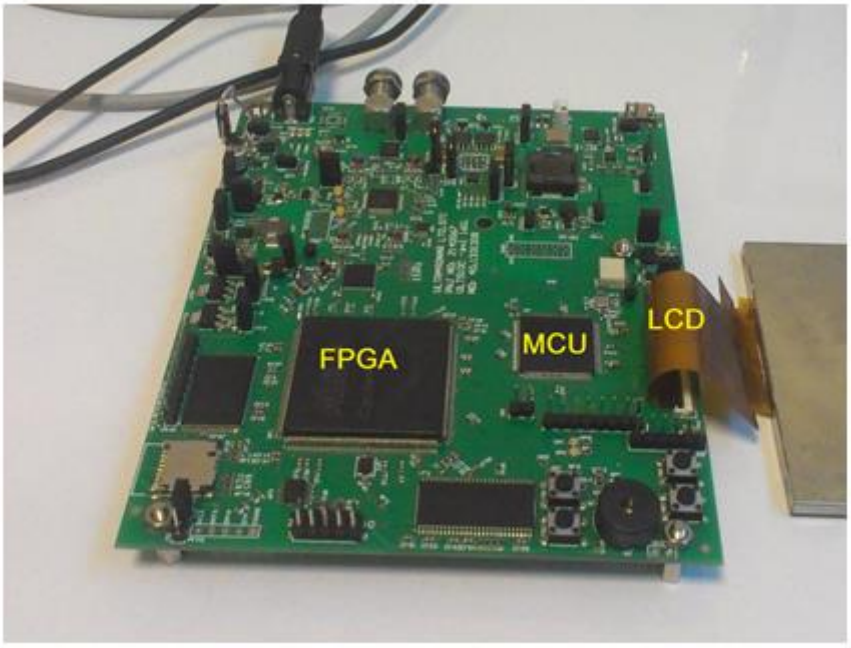
32. Bucci, G., D'Innocenzo, P., Landi, C., 1996. The Implementation of a High-Speed Data Acquisition System For a DSP-based Instrument Operating in Real-Time, pp. 10-13. *Proc. Eusipco'96***,** Sept. 10-13, 1996, Trieste, Italy.
33. Dahua, X., Jun, W., 2014. Design of general-purpose acquisition- control module for well-logging signal based on DSP and FPGA, pp. 143-145. *Security, Pattern Analysis, and Cybernetics (SPAC), 2014 International Conference*, Oct. 18-19, 2014, Wuhan, China
34. Jensen, Jørgen Arendt, 2005. Ultrasound research scanner for real-time synthetic aperture data acquisition, pp. 881-891. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 52 (5), Sept. 06, 2005.
35. Song, Z., Wang, Q., Du X., Wang Y., 2007. A High Speed Digital Ultrasonic Flaw Detector Based on PC and USB, pp. 1-4. *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, May 1-3, 2007, Warsaw.

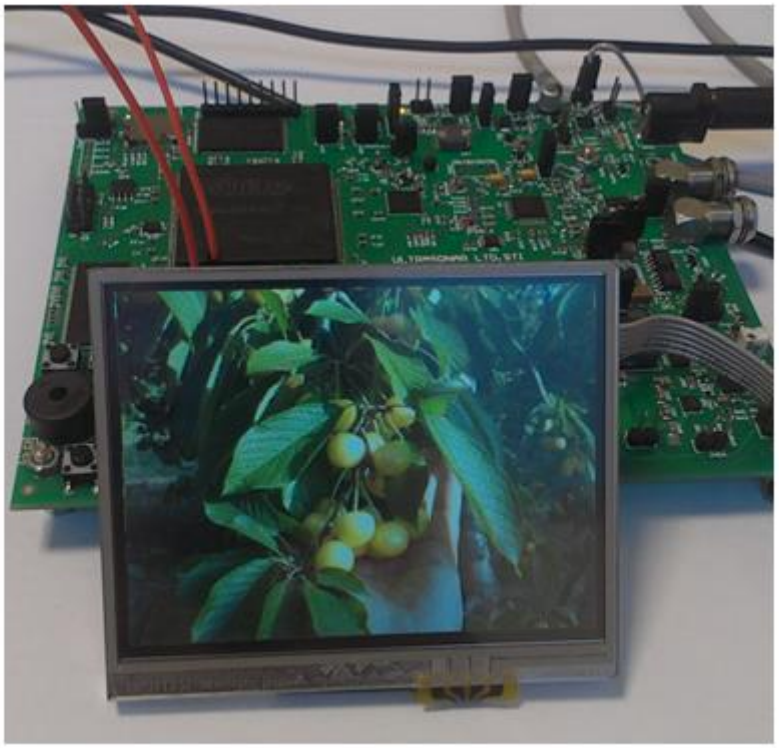
EKLER

Ek 1: Tez kapsamında tasarlanan ve üretilen ultrasonik kartın PCB çizimi aşağıda yer almaktadır.



Ek 2: TFT LCD ekranın FPGA ve MCU ile hibrit bir biçimde sürülerek ekran görüntüsünün oluşturulması.





ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Ahmet ATCI
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 13 Ekim 1987, Konya
Medeni Durumu: Bekâr
Tel: +90 5053485987
Email: ahmet.atci@hotmail.com
Yazışma Adresi: Gesi Cumhuriyet Mah. Delice Sk. Eylül Apt. 11/29
Melikgazi/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	EÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	Ereğli Anadolu Lisesi, KONYA	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2016- Halen	Sonatest Teknoloji	Elektrik Elektrik Mühendisi
2015- 2016	Ultrasonar Mühendislik	Elektrik Elektrik Mühendisi
2013- 2014	Cappadocia Technology	Elektrik Elektrik Mühendisi
2012–2013	Argetek Elektronik	Elektrik Elektrik Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Özdemir, A. T.,Atcı, A., 2015. A TMS320C6416 DSP-basedhigh-speed data acquisitionsystem,pp. 1413-1416. In*2015 23nd SignalProcessingand Communications Applications Conference (SIU)* , Malatya.