İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYNAK BAĞLANTILARINDA KONVANSİYONEL VE GELİŞMİŞ ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melkan ÇELİK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYNAK BAĞLANTILARINDA KONVANSİYONEL VE GELİŞMİŞ ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melkan ÇELİK
(503041311)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat VURAL

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503041311 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Melkan ÇELİK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"KAYNAK BAĞLANTILARINDA KONVANSİYONEL VE GELİŞMİŞ ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Murat VURAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. H.Tolga YALÇIN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **06 Haziran 2013**

ÖNSÖZ

Endüstrinin birçok dalında kendisine yer bulabilecek ve gelecekte daha da yaygınlaşacak böyle bir konuda bana çalışma imkanı veren ve tez çalışmam boyunca yardımlarını ve hoşgörüsünü esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat Vural'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle yardımcı olan, özellikle imalat sahasında uygulama çalışmaları yapmamı sağlayan İmkosan Kalite Kontrol Ticaret A.Ş. ortağı metalurji ve kaynak mühendisi Doğa İmrat'a ve Tekkon Teknoloji ve Kontrol Ltd. Şti.'den makina ve kaynak mühendisi Hüseyin Aver'e en içten dileklerimle teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam süresince ihmal edip zaman ayıramadığım aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2013

Melkan Çelik
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
2. TAHRİBATSIZ MUAYENE **3**
2.1 Tahribatsız Muayene Nedir 3
2.2 Tahribatsız Muayenenin Üstünlükleri ve Sınırlamaları 4
2.3 Tahribatsız Muayene Yöntemleri 8
2.3.1 Ultrasonik muayene 8
2.3.2 Radyografik muayene 9
2.3.3 Manyetik parçacık muayenesi 9
2.3.4 Penetrant muayene 9
2.3.5 Görsel muayene 10
3. ULTRASONİK MUAYENE **11**
3.1 Ultrasonik Muayene Yöntemi Prensipleri 11
3.2 Ultrasonik Muayene Yönteminin Prensipleri 12
3.2.1 Boyuna dalga 14
3.2.2 Enine dalga 14
3.2.3 Plaka-lamb dalgaları 14
3.2.4 Üst yüzey dalgaları 15
3.2.4.1 Rayleigh dalgaları 15
3.2.4.2 Stoneley dalgaları 16
3.2.4.3 Love dalgaları 16
3.2.4.4 Yüzey dalgaları 16
3.3 Ultrasonik Muayene Yöntemi Bileşenleri 16
3.3.1 Katot ışını tüpü veya ekran 17
3.3.2 Tarama devresi 18
3.3.3 Darbe devresi 18
3.3.4 Algılama-yükseltme devresi 19
3.3.5 Zaman devresi 19
3.3.6 Problar 19
3.4 Ultrasonik Muayene Uygulama Teknikleri 21
3.4.1 Darbe-yankı yöntemi 21
3.4.1.1 Doğrudan kontak yoluyla kontrol 21
3.4.1.2 Daldırma yoluyla kontrol 22
3.4.1.3 Çift prob tekniği 22
3.4.1.4 LLT tekniği 22

3.4.2 Transmisyon yöntemi 23
3.4.3 Rezonans yöntemi 24
3.5 Ultrasonik Muayenede Bulguların Değerlendirilme Yöntemleri 25
3.6 Ultrasonik Muayene Üstünlükleri ve Sınırlamaları 26
4. PHASED ARRAY YÖNTEMİ 29
4.1 Phased Array Yöntemi Uygulama Prensipleri 29
4.2 Phased Array Yönteminde Tarama Teknikleri 31
4.2.1 Lineer tarama 31
4.2.2 Çift yönlü ve tek yönlü tarama 32
4.2.3 Helezonik tarama 33
4.2.4 Spiral tarama 33
4.3 Phased Array Yönteminde Görüntüleme Teknikleri 34
4.4 Phased Array Yönteminde Kullanılan Temel Prob Çeşitleri 36
4.5 Phased Array Yönteminin Üstünlükleri ve Sınırlamaları 37
5. TOFD YÖNTEMİ 39
5.1 TOFD Yöntemi Uygulama Prensipleri 39
5.2 TOFD Yönteminde Görüntüleme 40
5.3 TOFD Yönteminin Üstünlükleri ve Sınırlamaları 41
6. KONVANSİYONEL VE GELİŞMİŞ ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI 43
6.1 Konvansiyonel Ultrasonik Muayene Yöntemi Uygulaması 43
6.2 Gelişmiş Ultrasonik Muayene Yöntemlerinin Uygulaması 51
6.3 Konvansiyonel ve Gelişmiş Ultrasonik Muayene Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırması 65
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 73
ÖZGEÇMİŞ 75

KISALTMALAR

CRT	**:** Cathode Ray Tube
DGS	**:** Distance-Gain-Size
IIW	**:** International Institute of Welding
ISO	**:** International Organization for Standardization
ITAB	**:** Isı Tesiri Altındaki Bölge
LLT	**:** Long-Long-Trans
PA	**:** Phased Array
TFT LCD	**:** Thin-film-transistor liquid-crystal display
TOFD	**:** Time of Flight Diffraction

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tahribatsız muayenenin üstünlükleri ve tahribatlı muayene yöntemleriyle karşılaştırılması.....5
Çizelge 2.2 : Tahribatsız muayenenin sınırlamaları ve tahribatlı muayene yöntemleriyle karşılaştırılması.....7
Çizelge 3.1 : Çeşitli ortamların akustik özellikleri.....13

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Tahribatsız muayene yöntemleri. 8
Şekil 3.1 : Ultrasonik dalganın yansıması. 12
Şekil 3.2 : Ultrasonik dalga yansımasının ekranda görüntüsü. 12
Şekil 3.3 : Boyuna dalga. 14
Şekil 3.4 : Enine dalga. 14
Şekil 3.5 : Asimetrik ve simetrik plaka dalgaları. 15
Şekil 3.6 : Rayleigh dalgaları 15
Şekil 3.7 : Love dalgaları 16
Şekil 3.8 : Yüzey dalgaları 16
Şekil 3.9 : Ultrasonik cihazın blok diyagramı. 17
Şekil 3.10 : Katot ışın tüpü (CRT). 18
Şekil 3.11 : Tek kristalli normal bir probun yapısı. 20
Şekil 3.12 : Çift prob tekniği ile hata kontrolü. 22
Şekil 3.13 : LLT tekniği 23
Şekil 3.14 : Transmisyon yöntemi. 23
Şekil 3.15 : Rezonans yöntemi 24
Şekil 3.16 : Genel ultrasonik teknikler kullanılarak yankı görüntülerinin değerlendirilmesi için metotlar. 26
Şekil 4.1 : Konvansiyonel ultrasonik muayene ve phased array yöntemi. 30
Şekil 4.2 : Phased array yönteminin prensip ve özellikleri. 31
Şekil 4.3 : Adım adım tarama ve lineer tarama yöntemleri. 32
Şekil 4.4 : Çift yönlü ve tek yönlü tarama. 32
Şekil 4.5 : Helezonik tarama. 33
Şekil 4.6 : Spiral tarama. 33
Şekil 4.7 : B, C ve D-ekranın parça üzerindeki görüntü karşılıkları. 34
Şekil 4.8 : A-ekran prensibi. 35
Şekil 4.9 : S-ekran. 35
Şekil 4.10 : Temel prob çeşitleri. 37
Şekil 5.1 : TOFD yönteminin çalışma prensibi. 40
Şekil 5.2 : TOFD yönteminde görüntüleme. 41
Şekil 6.1 : Konvansiyonel ultrasonik muayenede kullanılan test cihazı. 43
Şekil 6.2 : Krautkramer USM 35 X DAC kontrol düğmeleri. 45
Şekil 6.3 : V1 ve V2 kalibrasyon blokları. 46
Şekil 6.4 : Probun V2 bloğu ile kalibrasyonu. 46
Şekil 6.5 : Konvansiyonel yöntemle muayene edilen birinci parça. 47
Şekil 6.6 : Açılı probla kaynak bölgesinin taranması. 48
Şekil 6.7 : Kaynak dikişindeki süreksizliğin ekran görüntüsü. 48
Şekil 6.8 : Konvansiyonel ultrasonik muayene raporu. 49
Şekil 6.9 : V kaynak dikişiyle kaynatılmış iki plaka. 50
Şekil 6.10 : Kaynak bölgesinde yetersiz ergime hatası. 50
Şekil 6.11 : Kaynak bölgesinin açılı probla taranması. 51

Şekil 6.12 : Açılı probların A-ekran karşılaştırması. 51
Şekil 6.13 : Olympus OmniScan MX cihazı. 52
Şekil 6.14 : ESBeamTool ile parça çizimi. 53
Şekil 6.15 : Kaynağın kök kısmına odaklanma. 53
Şekil 6.16 : Sektörel tarama ile kaynağın alt tarafına odaklanma. 54
Şekil 6.17 : Sektörel tarama ile kaynağın üst tarafına odaklanma. 54
Şekil 6.18 : Phased Array yöntemi için simülasyonun son hali. 55
Şekil 6.19 : TOFD yöntemi için simülasyonun son hali. 56
Şekil 6.20 : TOFD yönteminde çatlak görüntüsü. 56
Şekil 6.21 : X kaynağında yetersiz kök nüfuziyetinin TOFD görüntüsü. 57
Şekil 6.22 : V kaynağında yetersiz kök nüfuziyetinin TOFD görüntüsü. 57
Şekil 6.23 : TOFD yönteminde yan duvarda yetersiz ergime görüntüsü. 57
Şekil 6.24 : TOFD yönteminde gözenek görüntüsü. 58
Şekil 6.25 : Üst yüzeyde enine çatlağın TOFD görüntüsü. 58
Şekil 6.26 : Kök içbükeyinin TOFD görüntüsü. 58
Şekil 6.27 : Yetersiz dolgu ergimesinin TOFD görüntüsü. 58
Şekil 6.28 : TOFD C568-SM probu ve taban bloğu. 59
Şekil 6.29 : TOFD muayenesi sonucu çatlak görüntüsü. 59
Şekil 6.30 : TOFD muayenesi sonucu yetersiz nüfuziyet görüntüsü. 60
Şekil 6.31 : TOFD muayenesi sonucu yetersiz dolgu ergimesi görüntüsü. 60
Şekil 6.32 : Phased array yöntemiyle uygulama örneği. 61
Şekil 6.33 : Yarı otomatik tarama arabası. 62
Şekil 6.34 : 5L64-A2 probu. 62
Şekil 6.35 : PA muayenesinde curuf görüntüsü. 64
Şekil 6.36 : PA muayenesinde çatlak görüntüsü. 64
Şekil 6.37 : PA muayenesinde yan duvarda yetersiz ergime görüntüsü. 65
Şekil 6.38 : 16"-schedule 160 borunun ultrasonik muayenesi. 66
Şekil 6.39 : 16"-schedule 160 borunun TOFD muayene görüntüsü. 66
Şekil 6.40 : 16"-schedule 160 borunun phased array muayene görüntüsü. 67

KAYNAK BAĞLANTILARINDA KONVANSİYONEL VE GELİŞMİŞ ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada konvansiyonel ultrasonik muayene ile gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleri olan phased array ve TOFD yöntemlerinin karşılaştırmaları yapılmış ve gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin üstünlükleri incelenmiştir.

İlk olarak tahribatsız muayene ve başlıca tahribatsız muayene yöntemleri anlatılmıştır. Tahribatsız muayene, bir malzemenin kullanma amacı için gerekli özelliklerine zarar verecek ölçüde hasar vermeden, yani malzemenin yapısını ve fonksiyonunu bozmadan, malzemenin yapısı ve özellikleri hakkında bilgi edinilmesini sağlayan test metotlarına denir. Tahribatsız muayene yöntemleri temel olarak yüzeysel ve hacimsel yöntemler olarak iki ana gruba ayrılır.

Tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik muayene yöntemi malzemelerin hacimsel olarak incelenebildiği, hataların türünün, konumunun ve boyutunun tespit edilebildiği bir yöntemdir. Ultrasonik muayene temel olarak bir kaynaktan çıkan ses dalgalarının fiziksel olarak malzeme içerisinde hareket etmesine dayanır. Bu ses dalgaları duyulabilen ses dalgalarına göre çok daha yüksek frekansa sahiptir.

Ultrasonik cihazın muayene parçasına direkt olarak temas eden temel elemanına prob denir. Ultrasonik dalganın üretilmesi ve algılanması amacıyla kullanılırlar. Dalga üretiminde piezoelektrik olayından faydalanılır. Piezoelekrik malzemesine dış etki ile basınç uygulanılarak deforme edilirse yüzeylerinde elektriksel yük oluşur. Eğer basınç kuvvetinin yönü değiştirilerek çekme kuvveti uygulanırsa yüzeylerdeki elektrik yüklerinin işareti değişir. Bu olay tersinirdir ve piezoelektrik elemanın iki yüzeyine elektrod yerleştirilerek elektrik yükü uygulanırsa kristalin şekli değişir. Kristale uygulanan elektrik yükü sürekli değiştirilirse piezolektrik malzemede titreşim oluşturulur. Bu titreşim ile malzeme içerisine ses dalgalarının gönderimi gerçekleştirilir. Malzeme içerisinden yansıyan dalgaların etkisiyle piezoelektrik elemanında oluşan elektriksel yükün ekrana ulaştırılmasıyla hatanın tespiti yapılır. Konvansiyonel yöntemde kullanılan problar tek piezoelektrik elemana sahiptir ve muayene bölgesinin tamamen taranması için muayene esnasında probun gezdirilmesi gerekir.

Phased array yönteminde, gönderilen ses dalgalarının şeklini ve yönünü kontrol eden bilgisayar yazılımları kullanılarak hataların başlangıç ve bitiş noktalarının daha hassas belirlenmesini sağlayan dinamik odaklanma ve gerçek zamanlı görüntüleme mümkün olmaktadır. Phased array yönteminde kullanılan problar birbirinden bağımsız olarak görev yapan çok sayıda elemandan oluşur. Bağımsız elemanlar çok farklı yapılar oluşturacak şekilde dizilebilirler ve uygun bir programlama ile istenen özellikte kullanılabilirler. Phased array teknolojisinin en temel özelliği bu bağımsız elemanların bilgisayar kontrolüyle uyarılmasıdır.

TOFD tekniğinde ses dalgalarının yansıma özelliği değil, kırınım özelliği temel alınır. Geniş açılımlı ses demeti veren bir probla, algılayıcı bir başka prob, hataların yüzeylerini saptamak amacıyla kaynak dikişinin her iki yanına yerleştirilir. Kaynak bölgesinin hacmi tamamen taranacak şekilde gönderilen ultrasonik ses dalgalarıyla hataların konumlandırılması ve boyutlandırılması çok hızlı ve kolay şekilde gerçekleştirilebilir.

Konvansiyonel ve gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin uygulama örnekleri endüstriyel imalat sahasında gerçekleştirilmiştir. Gerçek imalat parçaları olan plaka, tank ve boru gibi malzemelerin kaynak bölgeleri hem konvansiyonel hem phased array hem de TOFD muayene yöntemleri ile uygulamalı olarak incelenmiştir. Muayeneler esnasında karşılaşılan hatalar, bu hataların ekran görüntüleri, hataların türleri, boyutları ve konumlarının tespit edilmesi incelenmiştir. Aynı parça üzerinde tüm teknikler uygulanmış ve muayene sürelerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmalar ile gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin konvansiyonel ultrasonik muayeneye göre endüstriyel uygulamalar için daha kısa sürede daha kesin sonuçların elde edilmesi gibi avantajlar sağladığı görülmüştür. Ancak bu yöntemlerin kullanımı, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle enerji santralleri, petro-kimya tesisleri, nükleer santraller, havacılık ve demiryolu taşımacılığı gibi kritik öneme sahip alanlar dışında fazla yaygınlaşmamıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle maliyetlerinin azalacağı, neticesinde de gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin kullanım alanlarının çok daha fazla olacağı düşünülmektedir.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONVENTIONAL AND ADVANCED ULTRASONIC TESTING METHODS FOR WELDED JOINTS

SUMMARY

In this study, the conventional ultrasound testing and phased array and TOFD (Time-of-Flight Diffraction) testing techniques which are methods of advanced ultrasound testing have been compared and the advantages of advanced ultrasound methods were inspected.

First of all nondestructive testing and the main methods of nondestructive testing are described. In nondestructive testing there is no impairment of the properties, structure and performance in future use of the material under examination. On the other hand, destructive testing has been defined as a form of mechanical test of materials whereby certain specific characteristics of the material can be evaluated quantitatively. In some cases, the test specimens being tested are subjected to controlled conditions that simulate service. The information that is obtained through destructive testing is quite precise, but it only applies to the specimen being examined. Since the specimen is destroyed or mechanically changed, it is unlikely that it can be used for other purposes beyond the mechanical test. Such destructive tests can provide very useful information, especially relating to the material's design considerations and useful life.

Main benefits of nondestructive testing include:

- The part is not changed or altered and can be used after examination,
- Every item or a large portion of the material can be examined with no adverse consequences,
- Materials can be examined for conditions internal and at the surface,
- Parts can be examined while in service,
- Many nondestructive testing methods are portable and can be taken to the object to be examined,
- Nondestructive testing is cost effective.

Nondestructive testing methods, basically divided into two main groups as superficial and volumetric methods. Superficial methods are visual testing, penetrant testing and magnetic particle testing methods. Volumetric methods are ultrasonic testing and radiographic testing methods.

Ultrasonic testing is based on the laws of physics that govern the propagation of high frequency sound waves through solid materials have been used to detect hidden cracks, voids, porosity, and other internal discontinuities in metals, composites, plastics, and ceramics, as well as to measure thickness and analyze material properties. Ultrasonic testing is completely nondestructive and safe, and it is a well

established test method in many basic manufacturing, process, and service industries, especially in applications involving welds and structural metals.

Ultrasonic nondestructive testing utilizes the range of frequencies from approximately 20 KHz to over 100 MHz, with most work being performed between 500 KHz and 20 MHz. Both longitudinal and shear (transverse) modes of vibration are commonly employed, as well as surface (Rayleigh) waves and plate (Lamb) waves in some specialized cases. Because shorter wavelengths are more responsive to changes in the medium through which they pass, many material analysis applications will benefit from using the highest frequency that the test piece will support. Sound pulses are normally generated and received by piezoelectric transducers that have been acoustically coupled to the test material. In most cases a single transducer coupled to one side of the test piece serves as both transmitter and receiver (pulse/echo mode), although in some situations involving highly attenuating or scattering materials separate transmitting and receiving transducers on opposite sides of the part are used (through transmission mode). A sound wave is launched by exciting the transducer with either a voltage spike or a continuous wave impulse. The sound wave travels through the test material, either reflecting off the far side to return to its point of origin (pulse/echo), or being received by another transducer at that point (through transmission). The received signal is then amplified and analyzed.

Sound-field generation and reception is performed using special devices, so called ultrasonic tranducer or ultrasonic probes. The active sound-field generation tool is in the most cases a special ceramic with piezoelectric properties. A piezoelectric material has the characteristic that, if it is deformed by an external mechanical pressure, electric charges are produced on its surface. The reverse phenomenon, according to which such a material, if placed between two electrodes, changes its form when an electric potential is applied. The first effect is referred to as the direct piezoelectric effect, and the second as the inverse piezoelectric effect. The direct effect is used for measuring and the inverse effect for producing mechanical pressures and ultrasound waves.

Conventional ultrasonic transducers for nondestructive testing commonly consist of either a single active element that both generates and receives high frequency sound waves, or two paired elements, one for transmitting and one for receiving. Phased array probes, on the other hand, typically consist of a transducer assembly with from 16 to as many as 256 small individual elements that can each be pulsed separately. These may be arranged in a strip (linear array), a ring (annular array), a circular matrix (circular array), or a more complex shape. As is the case with conventional transducers, phased array probes may be designed for direct contact use, as part of an angle beam assembly with a wedge, or for immersion use with sound coupling through a water path. A phased array system will also include a sophisticated computer-based instrument that is capable of driving the multi-element probe, receiving and digitizing the returning echoes, and plotting that echo information in various standard formats. Unlike conventional flaw detectors, phased array systems can sweep a sound beam through a range of refracted angles or along a linear path, or dynamically focus at a number of different depths, thus increasing both flexibility and capability in inspection setups.

The main feature of phased array ultrasonic technology is the computer-controlled excitation (amplitude and delay) of individual elements can generate beams with

defined parameters such as angle, focal distance, and focal spot size through software.

To generate a beam in phase and with constructive interference, the multiple wavefronts must have the same global time-of-flight arrival at the interference point. This effect can only be achieved if the various active probe elements are pulsed at slightly different and coordinated times. The echo from the desired focal point hits the various transducer elements with a computable time shift. The echo signals received at each transducer element are time-shifted before being summed together. The resulting sum is an A-scan that emphasizes the response from the desired focal point and attenuates various other echoes from other points in the material.

In most typical flaw detection and thickness gaging applications, the ultrasonic test data will be based on time and amplitude information derived from processed RF waveforms. These waveforms and the information extracted from them will commonly be presented in one or more of four formats: A-scans, B-scans, C-scans, or S-scans.

TOFD is now becoming a standard technique for both power generation and petrochemical industries. The TOFD technique is very useful for weld and other inspections. In the last few years, TOFD use has grown rapidly for many applications, such as pipeline and pressure vessel inspections.

The principle of the TOFD technique is based on mapping of the position of the edges of defects. This is in marked contrast with conventional ultrasonic, which relies on the amplitude of specular reflections received from defects. To determine the position of the defect edges, a wide-beam transmitter probe is placed on one side of the weld under inspection. An identical receiver probe is placed on the other side of the weld. In the case of a flawless weld, the relevant ultrasonic signal will consist of a so called lateral wave, corresponding to the direct surface path between transmitter and receiver, and a back wall echo. Between the lateral wave and the back wall echo there will be no signals. If defects are present in the weld, however, the ultrasonic waves will be diffracted by the edges of the defects. The depth of the defect edge can be calculated from the time of flight of the corresponding ultrasonic wave. Defect height can be readily measured by subtraction of the depth of lower and higher defect edge.

The TOFD technique is a fully computerized system able to scan, store, and evaluate indications in terms of height, length, and position with a grade of accuracy never achieved by other ultrasonic techniques. These features have extended the use of TOFD to replace radiography and complex ultrasonic inspection by a tandem technique wherever planar defects (cracks, lack of fusion) are the main object of examination.

Both conventional ultrasonic method and advanced ultrasonic methods have been practised at the construction site. Initially single v-groove welded steel construction component was taken, the weld zone has been inspected and the discontinuity display has been shown. Then another weld zone of two plates has been inspected with two different angle beam probes and the A-scan displays have been compared. Weld zones of a storage tank and 20 mm thick steel plates have been inspected with advanced ultrasonic testing methods. Determined defects have been displayed and type, location, and size of the defects have been inspected. At last both conventional ultrasonic method and advanced ultrasonic methods have been practised on the same part and the inspection times have been compared.

In this study advantages of advanced ultrasonic methods against conventional ultrasonic method has been inspected in practice. Main advantages of advanced ultrasonic methods are:

- Speed: The phased array technology with so much individual elements and electronic scanning, on the other hand TOFD technology with linear scanning in a single scan parallel with the weld center line, advanced ultrasonic methods are much more faster than conventional ultrasonic method.
- Reliable defect detection and imaging: Phased arrays can detect defects with an increased signal-to-noise ratio, using focused beams and display defects on S-scan which permit easier interpretation and analysis. The TOFD data is displayed in a gray-scale B-scan real time and it permits positioning and sizing defects high accuracy. But in conventional ultrasonic method, defects are displayed on A-scan screen which shows only amplitude of waves.
- Data recording: At advanced ultrasonic methods examination results and defect displays can be stored that permits re-analysis at a later time and is less subjective.

The potential disadvantages of advanced ultrasonic methods are a somewhat higher cost and a requirement for operator training, however these costs are frequently offset by their greater flexibility and a reduction in the time required to perform a given inspection. By improving of technology and manufacturing processes, these costs may reduce and advanced ultrasonic methods will enhance areas of use.

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe ilerleyen teknoloji ve beraberinde sanayinin gelişmesiyle ürün yelpazesi de genişlemektedir. Bu durum doğal olarak rekabet ortamını arttırmakta ve firmalar için sadece imalat yapmak yeterli olmamaktadır. Firmalar, yüksek ve sürdürülebilir kalitede, güvenilir ürünleri rekabet edebilir maliyette sunmak zorundadırlar. Tüm bunlara dayanarak kalite kontrol stratejileri geliştirilmiş ve özellikle imalat sanayinde tahribatsız muayene yöntemlerinin önemi ortaya çıkmıştır.

Enerji santralleri, petro-kimya tesisleri, rafineri tesisleri ve nükleer santraller gibi tesislerde işletme güvenliği, çevrenin korunması ve emniyet çok büyük öneme sahiptir. Böyle bir tesiste yeterli kalitenin sağlanamaması ve kontrol edilememesinden kaynaklanabilecek hasarlar geri dönüşü olmayan büyük felaketlere ve ekonomik zararlara yol açabilir. Bu yüzden imalatın her aşaması uygun yöntemlerle kontrol edilmelidir. Tahribatsız muayene yöntemleriyle parçanın kullanma özelliklerine zarar verilmeden kontrol edilmesi sağlanır. Bulunan hataların doğru bir şekilde tahlil edilmesiyle kullanımdan önce bu hataların düzeltilmesi sağlanır ve istenmeyen kayıpların önüne geçilmiş olunur.

Tahribatsız muayene yöntemleri muayene bölgesinin yüzeyini ya da hacmini kontrol edecek şekilde farklı türlere ayrılır. Muayenenin kapsamı arttıkça yöntemler daha karmaşık hale gelmekte ve alınan sonuçların süresi de artmaktadır.

Tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik muayene yöntemi ile malzemenin ya da muayene bölgesinin hacmi üç boyutlu olarak kontrol edilebilir. Böylece hataların türleri, konumları ve boyutları hassas bir şekilde tespit edilir. Tesislerin ve hatların imalatında sıklıkla kullanılan kaynaklı birleştirmelerin de hacimsel olarak kontrol edilmeleri büyük önem taşır. Çünkü kaynaklı birleştirmeler böyle bir tesisin maliyetini, kalitesini ve servis ömrünü direkt olarak etkilemektedir.

Kaynaklı birleştirmelerin imalat tekniklerinin ilerlemesi ve imalat sürelerinin azalmasıyla konvansiyonel ultrasonik muayene yöntemleri yetersiz kalmaya başlamıştır. Muayene sürelerinin azaltılması, alınan sonuçların daha hassas ve güvenilir olması için yeni yöntemler geliştirilmiştir.

Temel prensip olarak yine muayene bölgesine ses ötesi dalgaların gönderilmesine dayanan bu yöntemler konvansiyonel yöntemlerin sınırlamalarını azaltmayı hedeflemektedirler. Konvansiyonel yöntemdeki zaman kayıplarının temeli tek piezoelektrik elemana sahip olan problarıdır. Böylece muayene bölgesinin tamamen taranabilmesi için prob hem yatay hem de dikey eksende hareket ettirilmelidir. Aynı zamanda hatanın konumu ses dalgasıyla aynı açıda bulunuyorsa hatanın tespit edilememe olasılığı bulunmaktadır ve bu yüzden en az iki farklı açıda probla muayene yapılmalıdır. Ayrıca hatanın konumlandırılması için ikiden fazla probla da muayene yapılması gerekebilir. Bu dezavantajları azaltmak için gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinde muayene bölgesi tek seferde taranmakta böylece probların tek eksende hareketiyle muayene tamamlanabilmektedir. Bunun yanında farklı görüntüleme yöntemleriyle hatayı daha hassas ve daha kesin bir şekilde tespit etmek de mümkün olmaktadır.

2. TAHRİBATSIZ MUAYENE

2.1 Tahribatsız Muayene Nedir?

Bir malzemenin kullanma amacı için gerekli özelliklerine zarar verecek ölçüde hasar vermeden, yani malzemenin yapısını ve fonksiyonunu bozmadan, malzemenin yapısı ve özellikleri hakkında bilgi edinilmesini sağlayan test metotları tahribatsız muayene adı altında toplanır. Hasarın derecesini bu şekilde sınırlamak, deneylerin tahribatsız olarak nitelenmesi için gereklidir. Aksi halde, en önemli tahribatsız deneylerden biri olan radyografide kullanılan X ve gamma ışınlarının içinden geçtikleri malzemede oluşturabilecekleri bir takım ışınım hasarları ile tahribatsız olarak tanınan diğer deneylerin malzemede yapabileceği benzer değişmeler düşünülürse, kesinlikle tahribatsız deney olarak elimizde sadece el ve göz ile yapılabilecek muayeneler kalır.

Tahribatsız muayene seri üretimin vazgeçilmez bir aşamasıdır. Bu muayene tekniğinin kullanılmaması halinde, üretimin ilk kademelerinde malzemede var olan hataların farkına varılamaması, üretimin hurdaya çıkabilecek kadar kusurlu ürünler elde etmekle sonuçlanmasına neden olur. Bu olgu, doğal olarak üretim harcamalarının artması ile sonuçlanır. Ayrıca ürünlerin kalitesinde her birim ürün için var olabilecek değişiklikler sonucunda, tüketime yeterli kalitedeki ürün sağlanamaz ve ürünlerin kalitesine olan güvence sarsılır. Üstelik böyle bir muayeneden yoksun hatalı parçalarla imal edilmiş olan makina ve yapıların emniyet faktörleri düşeceğinden kazalar artar ve insan hayatı tehlikeye girer.

Üretimde tahribatsız muayeneye olan gereksinme, kullanma süresinde yapılan periyodik kontrollerde de aynı önemle kendini hissettirmekte, ayrıca günümüzdeki ileri teknolojinin araştırma ve geliştirme sorunlarının çözümü de yine bu teknikten yararlanmayı gerektirmektedir [1].

2.2 Tahribatsız Muayenenin Üstünlükleri ve Sınırlamaları

Tahribatsız muayenenin aksine tahribatlı muayenede malzeme ya da ürünün tekrar kullanılma olanakları ortadan kalkmaktadır. Bu yöntemler çekme, basma, burma, eğme, yorulma, sürünme ve korozyon deneyleri gibi deney parçasını tahrip ettikten sonra sonuç veren deneylerdir. Yani tahribat bu deneylerin bünyesinde mevcuttur ve deney sonuçları tahrip olmasına neden olan şartların kantitatif ölçüleridir. Kullanılacak bütün malzeme ve parçaların tahribatlı olarak denenmesi düşünülemeyeceğine göre, bunların bütününü temsilen yalnız bir veya birkaç tanesi üzerinde uygulanabilen deneylerden elde edilen sonuçların, bütün geri kalanlar için de aynı olduğu kabulü her zaman geçerli değildir ve tahribatlı deneylere dayandırılmış birçok muayene programına önemli ölçüde belirsizlik getirir.

Buna karşı tahribatsız deneyler bizzat kullanılacak veya her bir satılacak parça üzerinde yapılabildiğinden bu mahsur ortadan kalkar. Ayrıca parçayı kullanacak olan da parçayı kullanmadan evvel muayene imkanına bu deneyler sayesinde sahip olur. Tahribatsız muayenenin üstünlükleri çizelge 2.1'de tahribatlı muayene ile karşılaştırılarak verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Tahribatsız muayenenin üstünlükleri ve tahribatlı muayene yöntemleriyle karşılaştırılması.

Tahribatsız muayene	Tahribatlı muayene
Üreticiye bitirilmiş parçaları muayene olanağı verir, aynı biçimde alıcı da aynı parçaları kullanmadan evvel muayene olanağı bulur.	Deney uygulanan parça diğer parçaları temsil eden numunedir ve diğer parçaların aynı olduğu kabulünün yapılmasını gerektirir.
Parça tahrip olmadığından hatalı parçalardan başka hurdaya ayrılma kaybı yoktur.	Parça tahrip olur ve ticari değerini kaybederek hurdaya ayrılır, bu nedenle çok sayıda yapılması genellikle mümkün olmaz.
Pahalı malzeme ve üretim yöntemleriyle hazırlanmış parçalar sayısına bakmadan muayene edilebilir, üretilen parçaların tümünde yapılabilir.	Pahalı malzeme ve üretim yöntemleriyle yapılmış parçalar veya sayıca sınırlı parçalarda uygulanması doğru olmayabilir.
Parçadan parçaya değişme fazla ve önceden bilinmeyen biçimde olsa bile uygulanabilir.	Parçadan parçaya değişmenin fazla olduğu hallerde yalnızca alınan temsili numunelere uygulanabilmesi ve diğerlerinin de aynı olduğu kabulünün yapılması sonuçlara önemli derecede belirsizlik getirir.
Aynı parçaya birkaç farklı yöntem beraberce veya arka arkaya uygulanabilir, aynı yöntem aynı parçada tekrar tekrar uygulanabilir.	Deneyin yapıldığı parçada başka deneylerin yapılması genellikle olanaksızdır ve farklı tipten deneyler farklı numunelere gereksinme gösterir.
Kullanımda olan parçalara da uygulanabilir (Tesisi durdurmadan veya parçayı sökmeden). Kullanımdaki parça üzerinde herhangi bir kümülatif etki doğrudan doğruya ölçülebilir, kırılma mekanizmasını meydana çıkarmak dahi mümkün olabilir.	Deney uygulanan parçalar tekrar kullanılamaz, kümülatif etki aynı parça üzerinde doğrudan doğruya ölçülemez, yalnızca farklı sürelerde kullanılmış farklı parçalarda yapılan farklı deneylerle sonuca varılır.
Numune hazırlama işi yoktur ya da minimum düzeydedir.	Parçadan deney numunesinin çıkarılması birçok işleme ve diğer hazırlama işlerini gerektirir.
Cihazlar genellikle muayene yerine taşınabilen portatif cihazlardır.	Cihazlar daha ziyade sabittir ve taşınabilme olanağı yoktur.

Deneyler çabuk sonuç verir ve muayene için sarfedilecek zamandan büyük bir ekonomi sağlanabilir, daha kısa zamanda daha çok sayıda parça muayene edilebilir.	Hazırlama ve deney sürelerinin uzunluğu belirli bir muayene süresi içinde denenecek parça sayısını sınırlar.
İşçilik giderleri, özellikle aynı cinsten parçaların tekrarlanan muayenelerinde genellikle azdır.	İşçilik ve tesisat giderleri için gerekli yatırım genellikle yüksektir.

Tahribatlı testler, malzemenin tasarım koşullarını ve kullanım şartlarının kontrolünü sağlar. Tahribatlı testler dinamik ya da statik olabileceği gibi malzemenin:

- Çekme mukavemeti,

- Akma noktası,

- Süneklik,

- Birim şekil değiştirme,

- Yorulma ömrü,

- Korozyon direnci,

- Tokluk,

- Sertlik,

- Darbe dayanımı,

gibi özelliklerinin tespit edilmesinde kullanılırlar [2].

Tahribatsız muayene yöntemleri malzemenin içyapısının incelenmesi, hata ve kusurlarının tespiti için kullanılıp mekanik özelliklerin tespiti konusunda tahribatlı deneylere başvurma ihtiyacı vardır. Bu sebeplerden çizelge 2.1'de toplu olarak verilmiş olan tahribatsız muayenenin üstünlüklerine karşı bazı sınırlamaları da mevcuttur. Deney sonuçlarının muayene parçasına ait mukavemet özelliklerinin doğrudan doğruya bir ölçüsü olmayıp bir karşılaştırma niteliğinde olması tahribatsız deneylere dayandırılan bir muayene programında en büyük güçlüğü oluşturur. Bu bakımdan ihtiyaç duyulan mukavemet değerlerinin karşılandığı tahribatlı deney uygulanarak kanıtlanan parça, sonraki adımda tahribatsız muayeneye tabi tutulur. Ancak tahribatlı muayeneye tabi tutulan parça ya da parçaların üretim grubunun tamamını temsil edip etmedikleri sorunu yine de mevcuttur. Çizelge 2.2'de

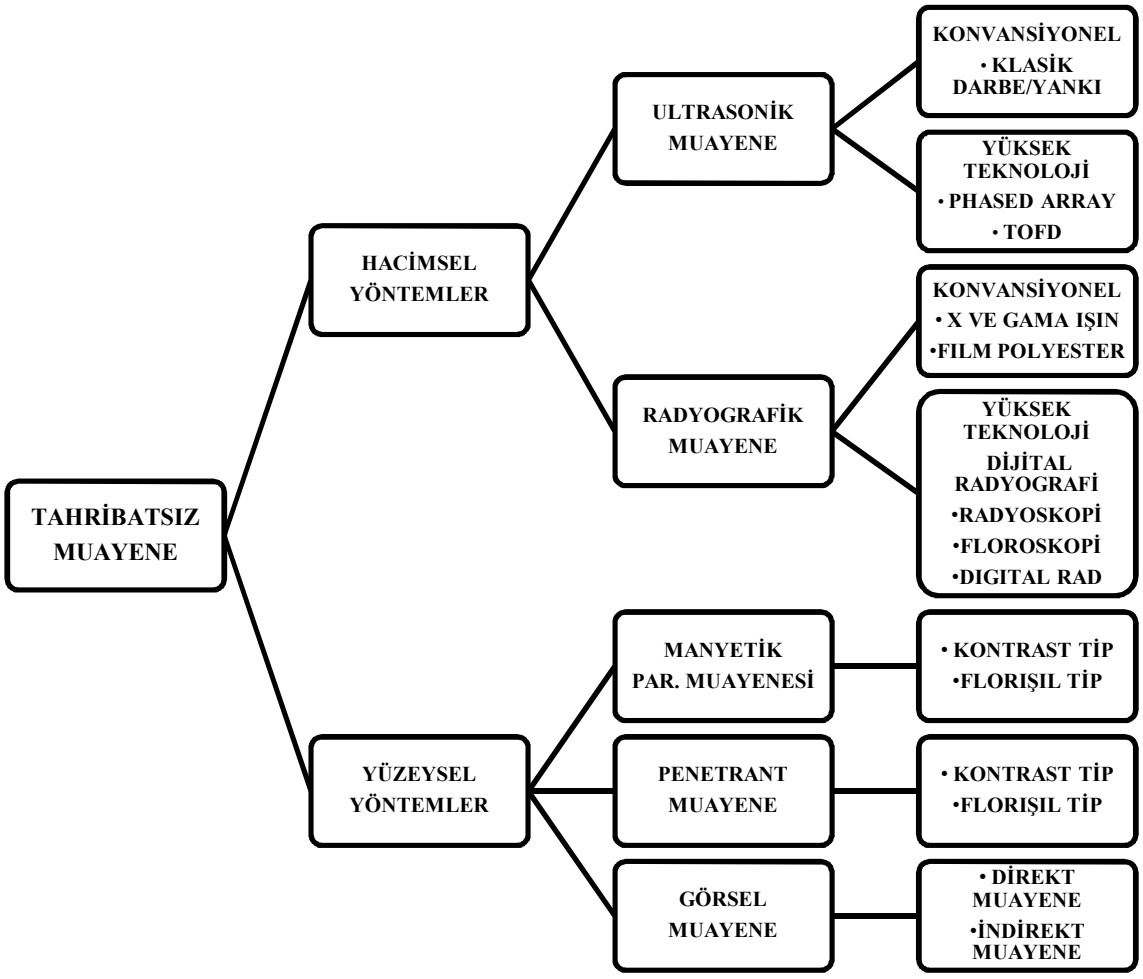
tahribatsız muayenenin sınırlamaları tahribatlı muayene yöntemleriyle karşılaştırılarak verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Tahribatsız muayenenin sınırlamaları ve tahribatlı muayene yöntemleriyle karşılaştırılması.

Tahribatsız muayene	Tahribatlı muayene
Deneyde özellikler dolaylı olarak ölçülür ve genelde kalitatif veya karşılaştırma ölçmeler yapılabilir.	Deney sonuçları parçanın tahrip olmasına neden olan koşulların kantitatif ölçüsüdür ve genellikle çizim veya standardizasyona yararlı güvenilir değerler elde edilir.
Sonuçların yorumları tecrübeli ve iyi eğitilmiş bir eleman tarafından yapılmalıdır.	Sonuçların yorumlanmasında iyi eğitimli eleman ihtiyacı yoktur.
Sonuçların birbirine uymaması halinde farklı gözlemciler anlaşmazlığa düşebilirler.	Sonuçlar ve servis koşulları arasındaki karşılıklı bağıntı genellikle doğrudan doğruyadır. Sonuçlar üzerinde yorum için gözlemcilere çok az serbestlik tanır.
Her yöntem her malzemeye uygulanamaz, malzeme yöntem seçiminde bir sınırlama oluşturabilir.	Malzeme türünün uygulanacak deney bakımından önemi yoktur.
Parçanın geometrik özellikleri uygulamayı sınırlandırabilir.	Parça şeklinin genelde bir önemi yoktur, deney numunesi normlara uygun olarak hazırlanmalıdır.
Otomasyon gerektiği bazı hallerde büyük yatırım giderleri gerekebilir.	Deneyler tek tek yapılır, otomasyona uygun değildir.

2.3 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayene yöntemlerini temel olarak muayene bölgesine göre hacimsel ve yüzeysel yöntemler olarak ikiye ayırabiliriz. Şekil 2.1'de tahribatsız muayene yöntemleri şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.1 : Tahribatsız muayene yöntemleri.

2.3.1 Ultrasonik muayene

Ultrasonik muayene metal ve metal dışı malzemelerde kullanılabilen çok yönlü bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntemle gerek yüzeydeki gerekte malzemenin hacminde bulunan hatalar, inklüzyonlar, boşluklar vs. tespit edilebilir. Ultrasonik yöntemde bir piezoelektrik transduserde üretilen yüksek frekanslı ses dalgalarından yararlanılır. Malzeme içerisinde ilerleyen ses dalgası yapı içerisindeki bir süreksizlik

ya da hatayla karşılaştığı zaman geri yansımasıyla bu hatanın yeri ve büyüklüğü hakkında bilgi elde edilebilir [3].

2.3.2 Radyografik muayene

Bu yöntem X-ışınları, gamma ışınları ve radyo-izotop kaynaklarını içermektedir. Malzeme içindeki ya da kaynak bölgesindeki iç çatlaklar ve hataların tespit edilmesinde kullanılır. Işınlar malzeme içinden geçerken malzemelerin yoğunluğuyla orantılı olarak emilirler ve bir floresan ekran ya da fotografik film tabakası üzerine görüntüler aktarılır. Malzeme içinde çatlak, gözenek, boşluk gibi süreksizlikler ana malzemenin görüntüsünden daha koyu, cüruf kalıntısı gibi yabancı maddeler ise ana malzemeden daha yoğun ise açık görüntü verir [4].

2.3.3 Manyetik parçacık muayenesi

Manyetik parçacık muayenesi ferromanyetik malzemelerin yüzey ve yüzey altı bölgelerinin incelenmesi için kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Yöntem manyetik alan yaratılarak hatalı bölgenin kuru manyetik tozu ya da yaş manyetik toz süspansiyonu ile doldurulmasıyla gerçekleşir. Yüzeydeki süreksizlikler indüklenen manyetik alanda bozulmalara yol açar, dolayısıyla manyetik alandaki bu bozulmanın etkisiyle manyetik tozlar birikir ve hataların gözle görülmesini sağlar. Ancak bu yöntem sadece ferromanyetik malzemelerde kullanılabilir. Ferromanyetik malzemeler demir, nikel ve kobalt alaşımlarının çoğunluğunu kapsamaktadır [5].

2.3.4 Penetrant muayene

Penetrant muayene, yüzeyi gözeneksiz malzemelerin yüzey hatalarının tespiti için kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Alüminyum, magnezyum, pirinç, bakır, dökme demir, paslanmaz çelik ve titanyum gibi malzemelerde iyi sonuçlar verir. Ayrıca metal olmayan seramik, plastik, cam gibi malzemelerde de uygulanabilir. Penetrant sıvının yüzeyde bulunan boşluklara dolup burada kalmasıyla hatanın bulunduğu yerin tespiti yapılır. Penetrant muayenenin gerçekleşmesi sırasıyla şu adımlardan oluşur; malzeme yüzeyinin temizliği, penetrantın uygulanması, penetrantın ara temizlikle alınması, parçanın kurutulması, geliştirici uygulanması, değerlendirme ve raporlama [6].

2.3.5 Görsel muayene

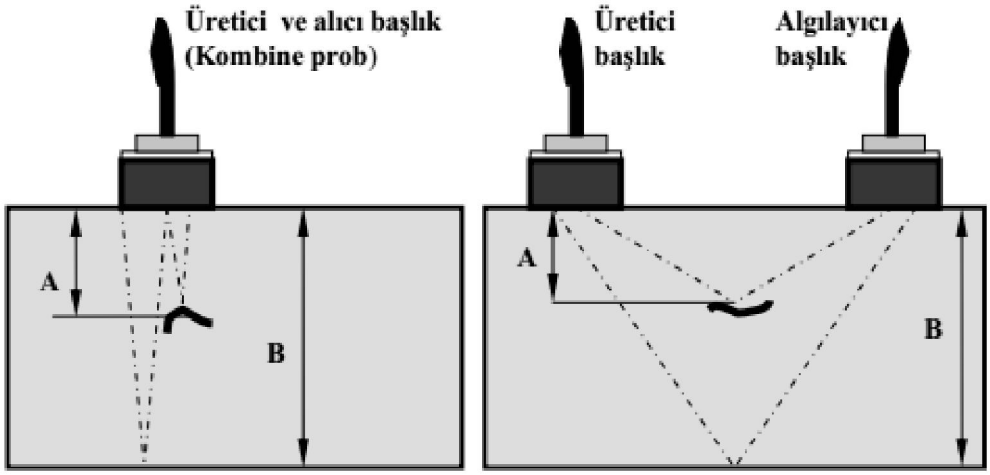
Görsel muayene yüzey kontrolü amaçlı en fazla kullanılan tahribatsız muayene yöntemidir. Uygulanması kolay, düşük maliyetli ve diğer birçok tahribatsız muayene yöntemlerinden önce yaygın olarak kullanılır. Endoskoplar ya da optik cihazlar gibi yardımcı ekipmanlarla veya bunlar kullanılmadan yapılabilir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle beraber otomasyonla yüksek hızlarda diğer tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standardlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenir [7].

3. ULTRASONİK MUAYENE

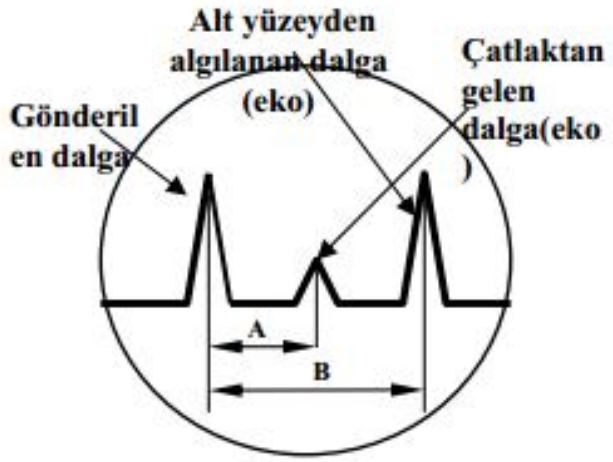
3.1 Ultrasonik Muayene Yönteminin Prensipleri

Tahribatsız muayene konusunun dallarından biri olan ultrasonik muayene; malzemelerin analiz uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahip çok yönlü bir muayene yöntemidir. Ultrasonik muayene malzeme içerisindeki hataların ve hata bölgesinin yerinin tespit edilmesinde, ayrıca bunların akustik olarak ekrana aktarılmasıyla bu hataların değerlendirilmesinde, parçaların kalınlık ölçümünde kullanıldığı gibi, yüksek frekanslı ses dalgalarıyla katı ve sıvıların temel mekanik, yapısal ve bileşim özelliklerinin ölçümlerinde de kullanılabilir [8].

Ultrasonik muayene temel olarak bir kaynaktan çıkan dalgaların fiziksel olarak malzeme içerisinde hareket etmesine dayanır. Bu ses dalgalarının frekansları yaklaşık olarak 20 KHz ile 100 MHz arasında olup duyulabilen ses dalgalarının frekanslarının çok üstündedir. Duyulabilen ses dalgaları ise 16 Hz ile 20 KHz arasındadır. Ultrasonik ses dalgaları tahribatsız muayene dışında temizlik, kesme, tıp alanında doku yıkımı gibi farklı alanlarda da birçok kullanım yerine sahiptir [9]. Bu ses dalgaları malzemenin içinde komşu atomların birbirini etkileyerek titreşmesiyle mekanik olarak yayılırlar ve dalgalar ses yolu üzerinde bir engele çarparak yansırlar. Çarpma açısına bağlı olarak yansıyan sinyal alıcı proba gelebilir veya gelmeyebilir. Alıcı proba ulaşan sinyal ultrasonik muayene cihazının ekranında bir yankı belirtisi oluşturur. Yankının konumuna göre, yansıtıcının muayene parçası içindeki koordinatları hesaplanabilir. Ayrıca yankının yüksekliği de yansıtıcının büyüklüğü hakkında fikir verir. Yankı sinyalinin şekline bakılarak yansıtıcının türü hakkında da bir yorum yapmak mümkün olabilir. Şekil 3.1'de ses dalgasının yansıması ve şekil 3.2'de ise bu yansımanın ekranda görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1 : Ultrasonik dalganın yansıması.



Şekil 3.2 : Ultrasonik dalga yansımasının ekranda görüntüsü.

3.2 Ultrasonik Muayenede Dalga Tipleri

Ses malzemede boyuna ve enine dalgalar halinde yayılır. Boyuna dalga vakum hariç her ortamda, enine dalga ise katı ortamda yayılır. Sesin yayılma hızı (c=.....m/sn) malzeme cinsine ve dalga tipine bağlıdır [10]. Çizelge 3.1'de çeşitli ortamların akustik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.1 : Çeşitli ortamların akustik özellikleri.

Özellikler	Çelik	Alüminyum	Su	Hava	Pleksiglas
Boyuna Dalga Hızı C_L m/sn	5920	6320	1480	333	2730
Enine Dalga Hızı C_T m/sn	3250	3130	-	-	1430
Elastisite Modülü kN/mm^2	210	70	-	-	-
Yoğunluk ρ kg/m^3	7850	2700	1000	1,29	1180

Ses hızı ve frekans arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur;

$$c = f \times \lambda \qquad \textbf{(3.1)}$$

Bu bağıntıda c; ses hızı (m/sn), f; frekans (1/sn), λ; dalga boyu (mm)'dur.

Ses dalgaları malzemeden geçerken tane sınırları ve safsızlıklar nedeniyle az veya çok zayıflarlar. Ses malzeme içerisinde bir ses demeti halinde ilerler, ses demetinde artan mesafe veya derinlik ile sesin basıncında ya da şiddetinde hangi azalmanın olacağı mesafenin karesi kuralı ile açıklanır.

Kazanç değeri ve aynı zamanda ses zayıflaması bir oranla desibel olarak aşağıdaki bağıntılar ile verilir.

$$\text{Ses zayıflaması} = 20.\log (A_2/A_1) \quad \text{dB} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada A_2 ve A_1 sesin genliğini göstermektedir.

Ses mesafesi s_1'den s_2'ye doğru değişirse ses genliğindeki zayıflama (α) aşağıdaki gibi belirlenir.

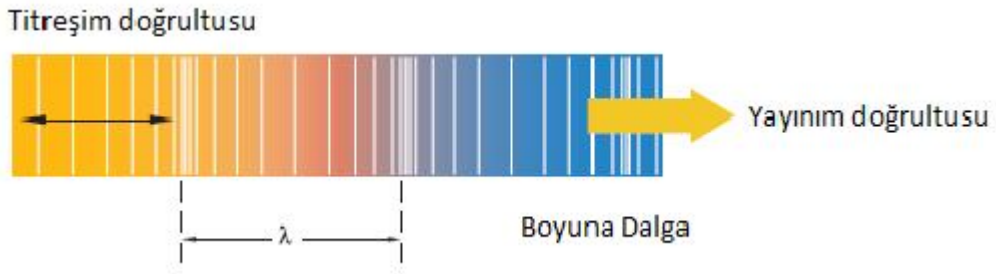
$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{\mathbf{20.log\ (A_2/A_1)}}{\boldsymbol{s_2 - s_1}} \qquad \text{dB/mm} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Örnek olarak genlik (yankı yüksekliği) yarıya düşerse s_1 mesafesinden s_2 mesafesine doğru ses zayıflaması 6 dB olur [10].

Ultrasonik muayenede temel olarak enine ve boyuna olmak üzere iki çeşit dalga tipi vardır.

3.2.1 Boyuna dalga

Boyuna dalgalarda yayınım doğrultusu ile titreşim doğrultusu şekil 3.3'te de görüldüğü gibi aynıdır [11].



Şekil 3.3 : Boyuna dalga.

3.2.2 Enine dalga

Enine dalgalarda yayınım doğrultusu ile titreşim doğrultusu şekil 3.4'te de görüldüğü gibi birbirine diktir [11].

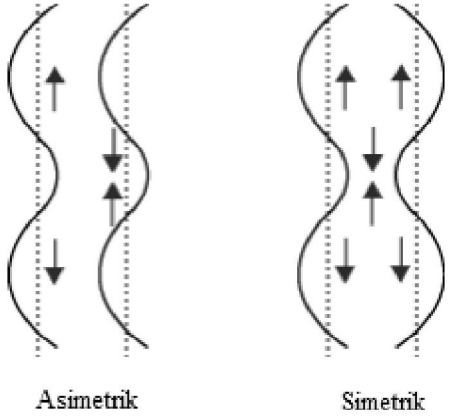


Şekil 3.4 : Enine dalga.

Sınırlı yayılma ortamlarında enine ve boyuna dalgaların kombinasyonu olan birçok dalga tipi de meydana gelir.

3.2.3 Plaka (Düzlemsel) - lamb dalgaları

Bu tip dalga plaka şeklindeki parçalarda meydana gelir. Bu oluşumda esas olarak iki dalga tipi vardır. Birisi simetrik plaka dalgası diğeri asimetrik plaka dalgasıdır [10]. Simetrik plaka dalgaları şekil 3.5'te de görüldüğü gibi bir plakanın eksen düzlemleri etrafında simetrik olarak hareket ederler, bu dalga tipine aynı zamanda genleşmeli tip de denmektedir, çünkü dalga, plaka üzerinde hareket ederken genleşip sıkışmaktadır. Asimetrik plaka dalgaları ise eğilme tipinde dalgalar olup şekil 3.5'te de görüldüğü gibi plaka üzerinde birbirlerine paralel olarak aynı yönde hareket etmektedirler [12].



Şekil 3.5 : Asimetrik ve simetrik plaka dalgaları.

Boyuna ve enine komponentlerin kombinasyonu olan bu dalgalar dispersiftir, yani hızları plaka kalınlığı ile dalga uzunluğunun oranına bağlıdır.

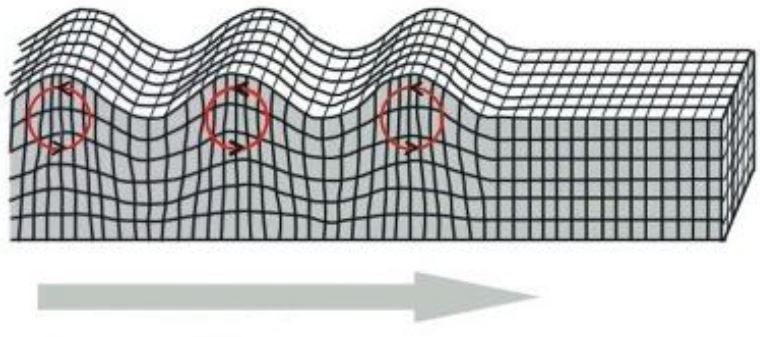
3.2.4 Üst yüzey dalgaları

Bu tip dalgalar sınır yüzeydeki yayılıma bağlıdır ve sınır yüzey dalgaları olarak da bilinir. Parçacıkların yer değişimleri boyuna ve enine dalgaların kombinasyonuna bağlıdır [10]. Bunlar aşağıdaki tiplere ayrılır:

3.2.4.1 Rayleigh dalgaları

Yüzey dalgalarının önemli bir kısmını teşkil ederler ve sadece katı malzemelerin üst yüzeylerinde yayıldıklarından üst yüzey dalgaları da denilir. Enine ve boyuna komponentlerin kombinasyonu olan parçacıkların yer değişimleri eliptiktir.

Yüzeydeki tümseklerden geçer giderler, nüfuziyet derinlikleri düşük olduğundan yüzeydeki en ufak bir süreksizlik veya yağ ve kirden etkilenirler ve yansırlar [10]. Rayleigh dalgalarının yüzey hareketi şekil 3.6'da gösterilmektedir.



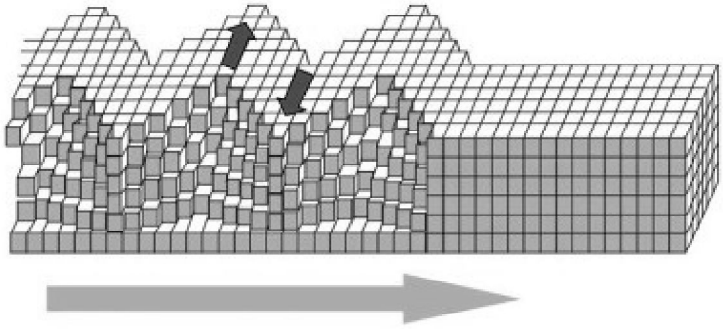
Şekil 3.6 : Rayleigh dalgaları.

3.2.4.2 Stoneley dalgaları

Katı parçanın ara yüzeyinde ilerleyen dalgalardır [10].

3.2.4.3 Love dalgaları

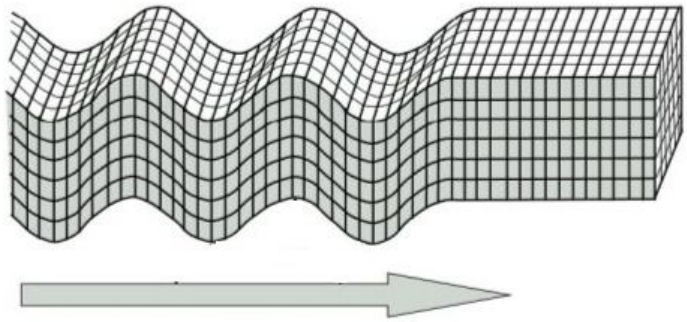
Kaplama olan yüzeylerde ilave olarak bir ara yüzey dalgası daha meydana gelir. Buna love dalgaları denir ve şekil 3.7'de görülmektedir [10].



Şekil 3.7 : Love dalgaları.

3.2.4.4 Yüzey dalgaları

Serbest yüzeyde yayılan bir dalga tipidir ve şekil 3.8'de görülmektedir. Bu dalgalar eğimli yüzeylerde de yayılır.



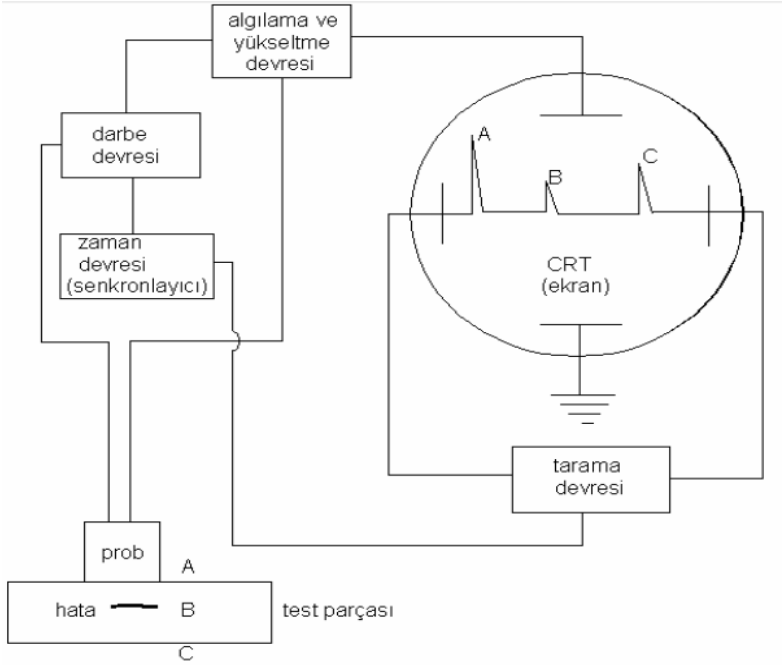
Şekil 3.8 : Yüzey dalgaları.

Ultrasonik muayenede mümkün tüm dalga tipleri kullanılır. Seçim test problemine uygun olarak yapılır. Yaygın olarak kullanılan dalga tipleri enine ve boyuna dalgalardır [10].

3.3 Ultrasonik Muayene Yöntemi Bileşenleri

Ultrasonik muayene cihazı, esas itibariyle duyarlı olarak zaman ölçen bir osiloskoptur. Darbe - yankı tipi bir ultrasonik cihazın blok diyagramı şekil 3.9'da

verilmiştir. Katot ışını tüpü (CRT veya ekran), tarama devresi, darbe devresi, algılama-yükseltme devresi, zaman devresi ve prob bir ultrasonik cihazın temel elemanlarını oluşturmaktadırlar [13,14].



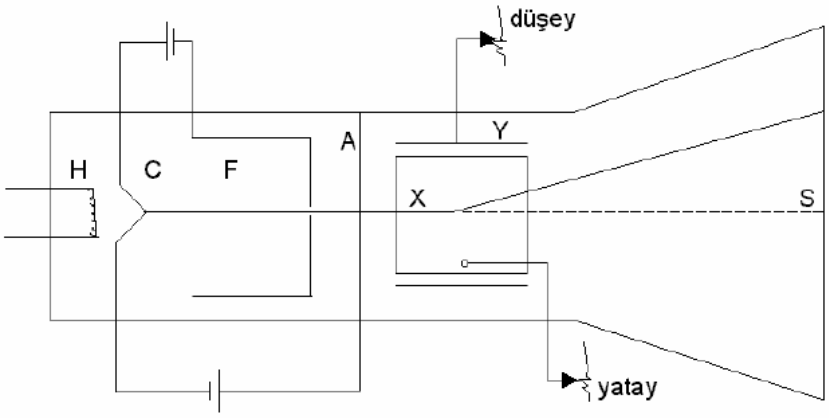
Şekil 3.9 : Ultrasonik cihazın blok diyagramı.

3.3.1 Katot ışını tüpü (CRT) veya ekran

Cihazın en uç elemanı olup, şekil 3.10'da gösterilmiştir. Tüpün bir ucunda, katodu (C) ısıtarak elektron üretilmesini sağlayan ısıtıcı bobinden (H) oluşan bir elektron tabancası ve bunun karşısındaki uçta ekran (S) bulunmaktadır. Elektronların zayıflamasını önlemek amacıyla tüpün içinde yüksek derecede vakum oluşturulmuştur. Katottan çıkan elektronlar, katot (C) ve anot (A) arasına uygulanan gerilim (voltaj) ile hızlandırılmaktadır. Oluşan elektron demeti, içinde elektromagnetik alan yaratılan bir odaklama silindiri (F) aracılığı ile odaklanır ve böylece ekrana çarpan demetin kesiti nokta kadar küçülür. İç yüzeyi fosfor bileşenleri ile kaplı olan ekran, hızlandırılmış elektronların çarpması ile görünür ışık floresansı yaparak elektronları görünen ışığa dönüştürür. Görüntü kalitesi, parlak ışık noktasının netliğine (odaklanmasına), elektron demetinin şiddetine ve yatay/düşey eksenlerin doğrusallığına bağlıdır.

Elektronlar ekrana doğru hareket ederken iki saptırma plakasından (x ve y-plakaları) geçerler. X - plakasına bir gerilim uygulandığında elektron demeti ekranda yatay

doğrultuda sapar, y - plakasına bir gerilim uygulandığında da düşey doğrultuda sapar [13, 14].



Şekil 3.10 : Katot ışın tüpü (CRT).

3.3.2 Tarama devresi

Katot ışını tüpünün yatay saptırma plakasına (x - plakası) bir gerilim uygulayarak elektron demetinin sabit ve belirli bir hızla ekranı soldan sağa doğru taramasını sağlar. Böylece, yatay eksen (zaman ekseni) bir ışık çizgisi şeklinde görünür hale gelir. Tarama hızı, çalıştırma süresine (yani, plakaya uygulanan gerilimin sıfırdan maksimum değere çıkma süresine) bağlıdır.

Çalıştırma süresi ne kadar kısa ise noktanın hareket hızı o kadar yüksektir. Çalıştırma süresi, dolayısıyla noktanın hızı, test alanı kontrol düğmesi aracılığı ile ayarlanır. Tarama işlemi çok kısa zaman aralıklarıyla tekrarlanır. Bu sayede ekranın yatay ekseninde sürekli bir ışık çizgisi oluşur. Tarama devresine bağlı olarak çalışan gecikme veya paralel kaydırma düğmesi ekran yatay ekseninin sola veya sağa doğru hareketini sağlar [13, 14].

3.3.3 Darbe devresi

300-1000 V arasında kısa elektrik darbeleri üreterek, bunları hem probdaki transdüsere hem de yükseltme devresine uygular. Piezoelektrik transdüser bu elektrik darbesini ultrasonik titreşimlere dönüştürür. Bazı cihazlarda elektrik darbesinin frekansını ve genliğini ayarlayan kontrol fonksiyonları mevcut olmasına karşılık, bazı cihazlarda bu ayarlama otomatik olarak yapılmaktadır [13, 14].

3.3.4 Algılama-yükseltme devresi

Bir yükseltici, bir doğrultucu ve bir zayıflatıcı içermektedir. Yükseltici devre, darbe devresinden ve probdan gelen elektrik darbelerini kuvvetlendirir. Doğrultucu, elektrik sinyallerini kolay gözlenmesi için doğrultur. Bazı cihazlarda, algılanan sinyallerin hem doğrultulmuş hem doğrultulmamış şekilde gözlenmesini sağlayan kontrol fonksiyonu mevcuttur. Zayıflatıcı, sinyal genliğinin istenilen şekilde değiştirilmesini sağlar. Bu amaçla kullanılan kontrol düğmesine kazanç düğmesi denir ve desibel değerine göre kalibre edilmiştir.

Yükseltici devre, darbe devresinden ve probdan gelen elektrik darbelerini kuvvetlendirerek, bunları katot ışını tüpünün düşey saptırma plakalarına gönderir. Böylece, uygulanan darbeye ve probdan dönen başlangıç darbesine veya yankılara ait ekranda düşey sinyallerin oluşması sağlanır. Darbe üreticisinden yükselticiye gönderilen gerilim darbesi, buradan da katot ışını tüpüne gönderildiği için, prob cihaz ile bağlantılı olmasa bile ekranda başlangıç anını gösteren bir elektrik darbesi sinyali gözükecektir. Prob cihaza bağlandığında, transdüserden gelen titreşimin sinyali elektrik darbesi sinyalinin hemen yanında yer alacaktır. Bu iki sinyal ortak bir sinyal halinde başlangıç darbesini veya ilk darbeyi gösterir [13, 14].

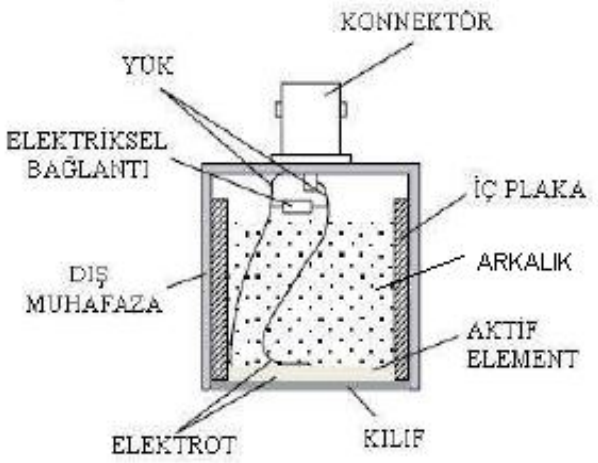
3.3.5 Zaman devresi

Tarama ve darbe devrelerini aynı anda harekete geçiren elektrik darbelerini üretir. Yani, bu devrelerin zamanlamasını ayarlar. Ekrandaki ışıklı çizginin sürekli ve parlak olması için bu darbeler tekrarlı olarak üretilir. Bu darbelerin bir saniyedeki tekrarlanma sayısına darbe tekrarlama frekansı denir. Bazı cihazlarda darbe tekrarlama frekansını ayarlayan kontrol fonksiyonları olmasına karşılık, bazı cihazlarda da bu ayar seçilen test alanına göre otomatik olarak yapılmaktadır. Algılama devresinde yer alan gürültü bastırma kontrol fonksiyonu, gürültü veya çimlenme olarak adlandırılan belirtileri ekrandan yok etmek için kullanılır. Bu fonksiyon, düşey doğrusallığa etki ettiği sürece ve hata genliği değerlendirmesi yapıldığında kullanılmamalıdır [13, 14].

3.3.6 Problar

Ultrasonik cihazın muayene parçasına direk olarak temas eden elemanıdır. Ultrasonik dalganın üretilmesi ve algılanması amacıyla kullanılırlar.

Dalga üretiminde piezoelektrik olayından faydalanılır. Piezoelekrik malzemesine dış etki ile basınç uygulanılarak deforme edilirse yüzeylerinde elektriksel yük oluşur. Eğer basınç kuvvetinin yönü değiştirilerek çekme kuvveti uygulanırsa yüzeylerdeki elektrik yüklerinin işareti değişir. Bu olay tersinirdir ve piezoelektrik elemanın iki yüzeyine elektrod yerleştirilerek elektrik yükü uygulanırsa kristalin şekli değişir. Kristale uygulanan elektrik yükü sürekli değiştirilirse piezolektrik malzemede titreşim oluşturulur. Elektrik yükü ile mekanik basınç birbirleri ile orantılıdır. Piezoelektrik özelliğe sahip birçok malzeme bulunmaktadır. En çok kuvars ve lityum sülfat gibi doğal malzemeler ve baryum titanat ve polisitalin keramik gibi yapay malzemeler kullanılır.



Şekil 3.11 : Tek kristalli normal bir probun yapısı.

Tek kristalli normal bir probun yapısı şekil 3.11'de görülmektedir. Bir probun üç temel elemanı; piezoelektrik transdüser (aktif element), kılıf (aşınma plakası) ve arkalık (sönümleme bloğu)'dur. Aktif element piezoelektrik etkiye sahip malzeme olup elektrik enerjisini mekanik titreşime dönüştürür ya da tersinir olarak titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek veri alınmasını sağlar, bu piezoelektrik malzeme uygulanan gerilimin polaritesine, kristalin geometrisine ve ilk polarizasyonuna bağlı olarak boyuna, enine veya radyal olarak çevresine doğru genişler ya da daralır [15]. Arkalık ise aktif elementteki vibrasyonu absorbe ederek kontrol eden yüksek yoğunluklu bir malzemedir, ayrıca bu blok derinlik yönünde birbirine yakın iki hatanın yankılarını ayırt edebilen ayırma gücüne ve küçük hataların yankılarını algılayabilmek için duyarlık fonksiyonuna sahiptir. Kılıf ya da

diğer bir deyişle aşınma plakasının asıl görevi piezoelektrik transdüseri çalışma sırasındaki çevre şartlarına karşı korumak olup genelde sert plastik ve ya seramikten imal edilirler.

Tek kristalli normal prob dışında çift kristalli prob, açısal prob, daldırma prob ve geciktirme bloklu prob gibi prob çeşitleri vardır. Çift kristalli problar birbirinden akustik zırh ile ayrılmış ve biri alıcı diğeri verici olarak görev yapan iki ayrı transdüser içermektedir. Sıklıkla kullanılan bir diğer prob çeşidi olan açısal problarda ultrasonik dalgaları muayene yapılacak malzemeye değişik açılarda iletmek için dalga kırılması ve dönüşümünden yararlanılmaktadır. İstenen açının elde edilmesi için uygun açıda hazırlanan bir taban bloğunun üzerine piezoelektrik transdüser yerleştirilir.

3.4 Ultrasonik Muayene Uygulama Teknikleri

Ultrasonik muayenede uygulanan teknikler üç parametre dikkate alınarak sınıflandırılabilir. Bunlar; ölçülmek istenen fiziksel büyüklük (genlik, faz, zaman), ses üretim şekli (sürekli, darbe) ve süreksizliklerin etki şekli (yansıtıcı, gölgeleyici, ses üretici) olarak yapılabilir. Muayene tekniği bu parametreler göz önüne alınarak seçilir [16].

3.4.1 Darbe-yankı yöntemi

Malzemelerin ultrasonik muayenesinde en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntem, prob tarafından yayılan ses dalgalarının malzeme içindeki süreksizliğe çarpıp geri yansıyarak tekrar proba ulaşması esasına dayanır. Bu yöntemde ölçülen büyüklükler ses basıncı genliği ve darbenin girdap dönüş süresi olup süreksizlik bir yansıtıcı olarak etki eder.

3.4.1.1 Doğrudan kontak yoluyla kontrol

Probun test malzemesi yüzeyine bir ara sıvısı ile doğrudan temas ettirildiği test şeklidir. Tek kristalli prob kullanıldığında prob hem alıcı hem de verici olarak çalışır. Çift kristalli problarda ise alıcı ve verici ayrıdır. Algılanan hata yankısının genliği aşağıdaki etkenlere bağlıdır:

- Üretilen sesin enerjisi,

- Verici kristalin yön karakteristiği,

- Hatanın boyutu,

- Hatanın yüzey yapısı,

- Hatanın yeri,

- Alıcı kristalin yön karakteristiği (çift kristalli ise),

- Yansıma ve kontak kayıpları,

- Absorbsiyon ve saçılmadan dolayı zayıflama,

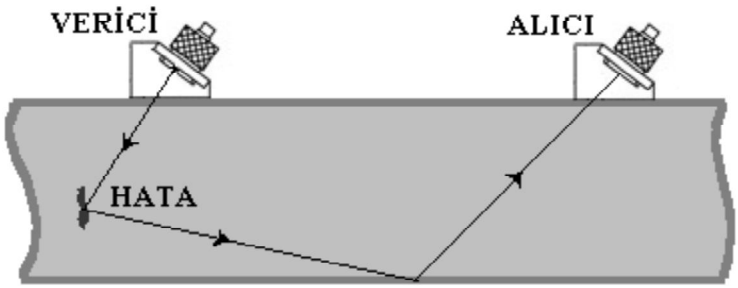
- Hatanın önünde bulunabilecek hataların ses dalgalarını gölgelemesi [16].

3.4.1.2 Daldırma yoluyla kontrol

Daldırma tekniğinde prob ve test parçası bir su tankının içerisine daldırılır. Bu amaç için özel su sızdırmaz problar kullanılır [16].

3.4.1.3 Çift prob tekniği (tandem veya ardışık)

İki prob kullanılan tandem tekniğinde, problardan biri tarafından gönderilen ultrasonik dalgalar önce hatada ve sonra arka yüzeyden yansıdıktan sonra alıcı proba ulaşır. Şekil 3.12'de görülebileceği gibi problar birbirine özel bir düzenekle bağlanmış olup aralarındaki mesafe ses açılarına bağlıdır [16]. Prob açıları arasındaki fark 4°'den fazla olmamalıdır. Çift prob tekniği problar malzemenin karşılıklı yüzeylerine yerleştirilmek suretiyle de uygulanabilir. Burada hata, yansıtıcı olarak etki eder. Özellikle cidar kalınlığı 100 mm'nin üzerinde olan kalın malzemeler ayrıca çift prob tekniği ile de muayene edilmelidir.

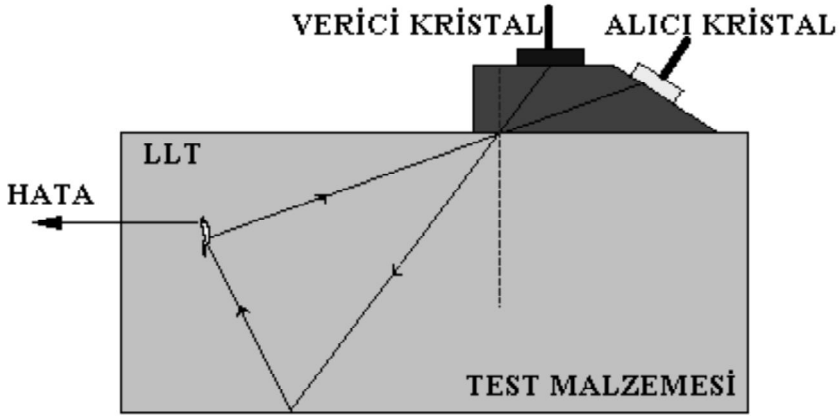


Şekil 3.12 : Çift prob tekniği ile hata kontrolü.

3.4.1.4 LLT (long-long-trans) tekniği

LLT tekniği aynı taban bloğu üzerine farklı açılarda yerleştirilmiş iki kristalli özel problarla yapılır. Verici probdan gönderilen boyuna dalgalar (long) malzeme içerisinde yüzeye dik doğrultuda bulunan hatalara çarpar. Hata yüzeyinde dalga

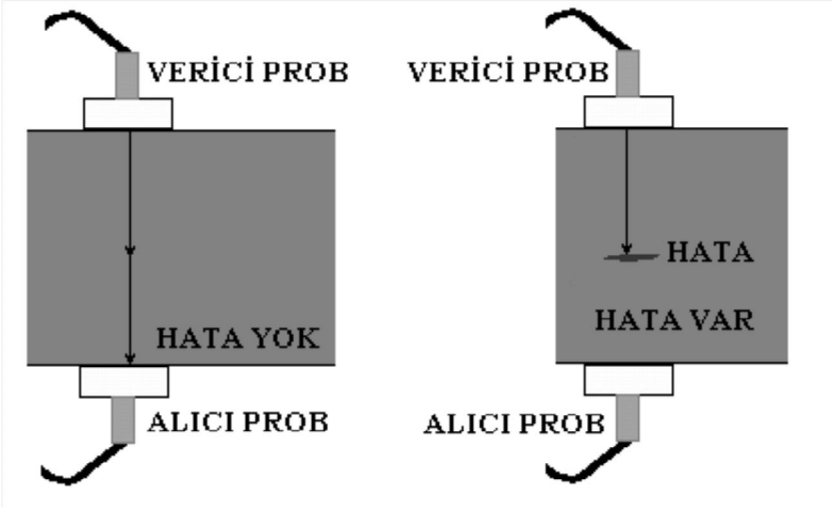
dönüşümü meydana gelir. Yani enine dalgalara dönüşür. Alıcı kristal sadece enine dalgaları (trans) algılar. Hata yansıtıcı olarak etki eder. LLT tekniği malzemelerin dış yüzeyinin testi için daha uygundur. Tandem tekniklerinden daha üstündür. Şekil 3.13'te LLT tekniği gösterilmiştir [16].



Şekil 3.13 : LLT tekniği.

3.4.2 Transmisyon yöntemi

Transmisyon tekniğinde biri verici diğeri alıcı olan iki prob kullanılır. Problardan biri tarafından gönderilen ses dalgalarının algılayıcı proba ulaşmadan önce bir süreksizlik tarafından gölgelenmesi esasına dayanır. Şekil 3.14'te transmisyon tekniği gösterilmektedir [16].



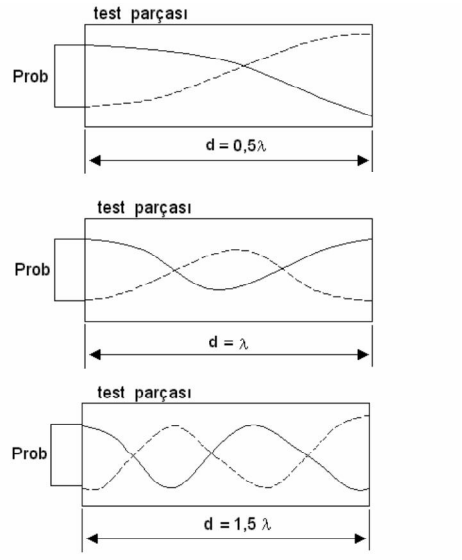
Şekil 3.14 : Transmisyon yöntemi.

Bu yöntem, zayıflamanın yüksek olduğu ve büyük hataların bulunduğu ingot ve dökümlerin testinde çok kullanılmaktadır. Yöntem, hatanın büyüklüğünü ve derinliğini vermez. Ayrıca, problar karşılıklı yüzeylere çok duyarlı bir şekilde konumlanmalı ve hareket sırasında konumları bozulmamalıdır. Bu yöntemde ölçülen

büyüklükler mesafe veya zaman ve geçen sesin genliğidir. Yöntemin en önemli avantajları, ses demeti tek geçiş yaptığı ve geri dönmediği için zayıflama etkisinin yarıya inmesi ve geçiş süresinden dolayı transmisyon sinyalinin diğer sinyallerden kolayca ayrılabilmesidir [14].

3.4.3 Rezonans yöntemi

Dışarıdan uygulanan tek bir darbenin etkisi ile serbest titreşen bir yapı rezonans frekansı ile titreşir ve titreşim sıfıra ininceye kadar frekans aynı kalır. Test parçası içinde rezonansın oluşması için ön ve arka yüzeylerinden gelen yansımaların büyük kayıplar olamaması, yansımadan sonra dalgaların yine geldikleri doğrultuda geri dönmeleri, başka yönlere saparak kaybolmamaları gerekir. Yani test parçası paralel yüzlü ve yüzeyleri pürüzsüz olmalıdır. Test parçasının boyu yarım dalga boyuna veya bunun tam katlarına eşitse rezonans meydana gelir. Rezonans tekniği şekil 3.15'te gösterilmiştir. Bu yöntem yeteri kadar duyarlı olmadığından günümüzde kullanımı oldukça azdır. Rezonans yönteminin en verimli uygulaması kalınlık ölçümüdür. Rezonans yöntemi kaplama kalınlığının ölçümünde ve kaplama tabakasının ana malzemeye yapışma hatalarının tespitinde de uygulanır. Fakat mikron (1/1000 mm) mertebesinde hassas değildir. Malzeme hatası testinde uygulanması oldukça zordur ve fazla yaygınlaşmamıştır [16].



Şekil 3.15 : Rezonans yöntemi.

3.5 Ultrasonik Muayenede Bulguların Değerlendirilme Yöntemleri

Ultrasonik muayenenin başlıca amacı malzemenin içindeki süreksizliklerin konumlarının, tiplerinin, yönlenme ve büyüklüklerinin belirlenmesidir.

Ses mesafesi, sesin gidiş-geliş süresi ile doğru orantılıdır, bu nedenle doğru kalibre edilmiş bir cihaz ile ekrandaki yankı konumundan hareketle yansıtıcının konumu, boyuna koordinatı, enine koordinatı, derinlik koordinatı verilerek kolayca belirlenebilir.

Yansıtıcının büyüklüğünü belirlemek için ise ekran üzerinden başka bilgilerin de kullanılması gerekmektedir:

- Yankı yüksekliği,

- Yankı dinamiği,

- Yankı şekli.

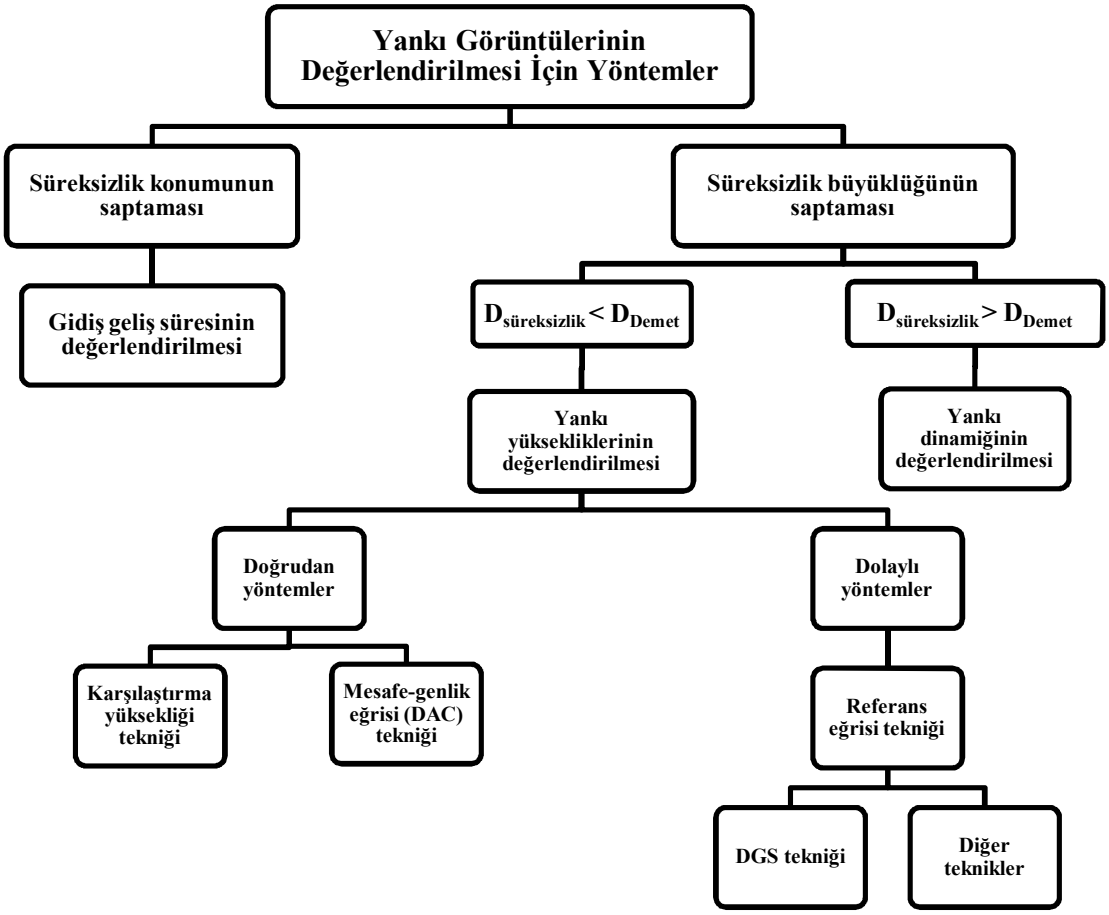
Genel ultrasonik muayene teknikleri kullanarak süreksizliklerin büyüklüklerinin belirlenmesi için sınırlı imkanlar mevcuttur. Ultrasonik yöntemle süreksizliklerin büyüklüğünün tahmini hala gelişmekte olan bir konu olup, halihazırda kullanılan yöntemler aşağıda belirtilen prensipleri esas almaktadır.

- Referans yansıtıcılar ile karşılaştırma: Süreksizliğin yansıtma özelliğinin, kalibrasyon blokları, referans blokları ve muayene parçaları içinde büyüklüğü bilinen yansıtıcılar ile karşılaştırılması.
- Süreksizliklerden alınan yankıların yüksekliklerini (süreksizliğin ses dalgalarını yansıtma özelliğini), belirli bir uzaklık ve cihaz kazanç değeri göz önünde bulundurularak dairesel referans yansıtıcı eşdeğeri olarak ifade eden DGS (Mesafe-Kazanç-Büyüklük) diyagramları kulanılarak değerlendirilmesi.
- Yankı dinamiğinin değerlendirilmesi: Süreksizlik sınırlarının ultrasonik ses demeti içinde hayali bir sınır değeri kullanılarak (demet ekseni veya demet sınır değerlerinden herhangi biri) taranması.

İlk iki seçenekte belirtilen teknikler genellikle süreksizliklerin yansıtma özelliğine göre karakterize edilmelerini olanaklı kılmaktadır. Bu özellik ancak uygun şartlar altında gerçek hata büyüklüğü ile ilintili olmaktadır. Son seçenekte belirtilen yöntem

ise ses demeti geometrisindeki düzensizlikler nedeni ile meydana gelen hatalardan dolayı zayıf bir yöntemdir [17].

Süreksizlik belirtilerinin (yankılar) değerlendirilmesi için yöntemler şekil 3.16'da özetlemiştir.



Şekil 3.16 : Genel ultrasonik teknikler kullanılarak yankı görüntülerinin değerlendirilmesi için metotlar.

3.6 Ultrasonik Muayene Üstünlükleri ve Sınırlamaları

Ultrasonik muayene yönteminin diğer tahribatsız muayene yöntemlerine karşı en önemli üstünlükleri şunlardır:

- Çok kalın kesitlerde dahi ses dalgalarının iyi girici karakteristiği nedeni ile iç süreksizliklerin belirlenmesine olanak sağlar.
- İç hatanın konumu, boyutu ve şekli belirlenebilir.
- Küçük hatalarda oldukça hassas bir şekilde belirlenebilir.

- Muayene, parçanın bir tarafından yapılabilir.
- Portatif donanımlar ile büyük parçalar yerinde muayene edilebilir.
- Çalışma esnasında gerek personele gerekse diğer donanımlara bir tehlike yaratmaz.
- Sarf malzemesi daha azdır.

Bu üstünlüklerine karşın ultrasonik muayenenin bazı sınırlamaları da vardır. Bunlar:

- Muayene için çok iyi yetişmiş, tecrübeli personele gereksinim vardır.
- Yüzeyi çok pürüzlü, düzgün olmayan biçimli kaynak bağlantılarının muayenesinde zorluk vardır.
- Bu yöntemde yüzey hataları görülemeyebilir.
- İş parçası ile prob arasına ultrasonik titreşimleri iletebilmek için yağ gibi bir tabakaya gerek vardır.
- Aleti kalibre edebilmek ve hata büyüklüğünü değerlendirebilmek için referans standartlarına gerek vardır [18].

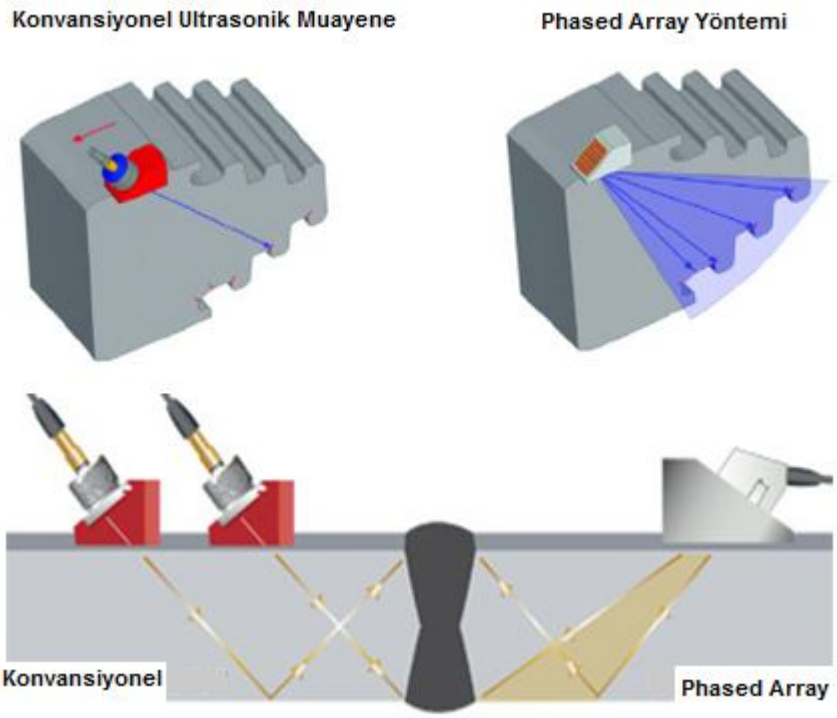
4. PHASED ARRAY YÖNTEMİ

4.1 Phased Array Yöntemi Uygulama Prensipleri

Phased array tekniğinde gönderilen ses dalgalarının şeklini ve yönünü kontrol eden bilgisayar yazılımları kullanılarak hataların başlangıç ve bitiş noktalarının daha hassas belirlenmesini sağlayan dinamik odaklanma ve gerçek zamanlı görüntüleme mümkün olmaktadır [19].

Phased array teknolojisi 1980'lerin başında tıp alanından sonra endüstride de kullanılmaya başlanmıştır [20,21]. 1980'lerin ortalarında kompleks şekilli phased array problarının imalatı için piezokompozit malzemeler geliştirilmiştir [22,23]. 1990'ların başında ise phased array yöntemi, ultrasonik muayene kitaplarında bir tahribatsız muayene metodu olarak yer almaya başlamıştır [24,25]. İlk büyük uygulamalar nükleer basınç tanklarında, büyük dövme şaftlarda ve düşük basınçlı türbin parçalarında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra mikro işleme, mikro elektronik, piezokompozit teknolojisindeki ilerlemeler ve bilgisayar teknolojisindeki yeniliklerle beraber 1990'lı yılların sonundan itibaren phased array yöntemi hızla gelişmeye başlamıştır.

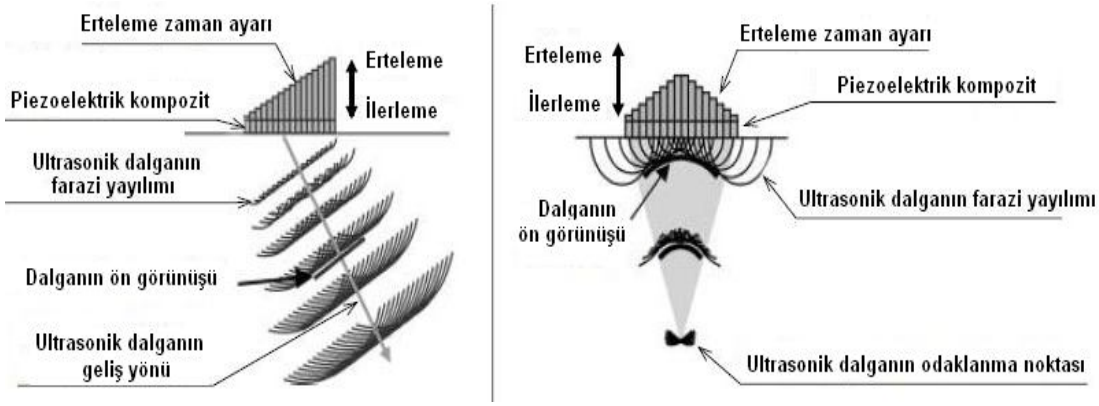
Konvansiyonel ultrasonik muayenede monokristal bir prob kullanılarak dalgalar gönderilir. Bazı durumlarda ise hem alıcı hem verici görevini ayrı elemanlarla yapan çift elemanlı problar kullanılır. Ancak phased array yönteminde kullanılan problar birbirinden bağımsız olarak görev yapan çok sayıda elemandan oluşur. Bu eleman sayısı 16'dan 256'ya kadar ulaşabilmektedir [26]. Şekil 4.1'de konvansiyonel ultrasonik muayene ile phased array yönteminin uygulama örnekleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir.



Şekil 4.1 : Konvansiyonel ultrasonik muayene ve phased array yöntemi.

Bağımsız elemanlar çok farklı yapılar oluşturacak şekilde dizilebilirler ve uygun bir programlama ile istenen özellikte kullanılabilirler. Phased array teknolojisinin en temel özelliği bu bağımsız elemanların bilgisayar kontrolüyle uyarılmasıdır. Piezokompozit elemanın uyarılmasına bağlı olarak belirlenen parametrelere uygun açıda veya belirli bir uzaklıkta odaklanacak şekilde dalgalar üretilebilir [27].

Şekil 4.2'de piezoelektrik kompozit malzemeye gönderilen uyarıların ertelenmesiyle oluşturulan açılı dalgalar ve belirli bir noktada odaklanan dalgaların bir örneği görülmektedir. Burada piezoelektrik elemanın soldan başlayarak uyarılmasıyla sağ tarafa doğru belli bir açıda dalgalar ilerlemektedir, odaklanma örneğinde ise iki kenardan aynı anda başlayarak piezoelektrik elemanın uyarılmasıyla oluşan dalgaların elemanın merkezinde belirli bir uzaklıkta odak noktası oluşturulur [28].



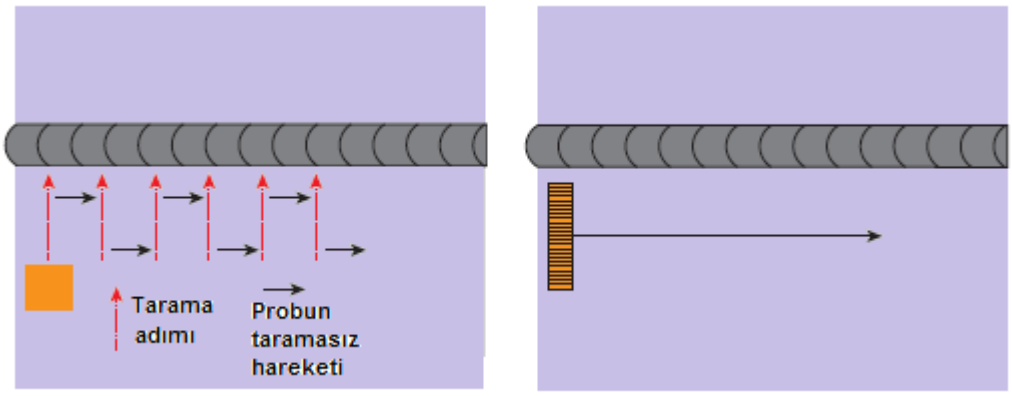
Şekil 4.2 : Phased array yönteminin prensip ve özellikleri.

4.2 Phased Array Yönteminde Tarama Teknikleri

Malzeme içindeki hata ve süreksizliklerin güvenilir şekilde belirlenmesi uygulanan tarama modeli ve uygun bir prob seçimine bağlıdır. Muayene otomatik, yarı-otomatik veya manuel olarak uygulanabilir. Otomatik uygulamada prob motorla kontrol edilen bir taşıyıcı üzerindedir, yarı-otomatik uygulamada prob elle kontrol edilen bir taşıyıcıya bağlanmıştır, manuel uygulamada ise probun elle hareket ettirilmesiyle muayene gerçekleştirilir. Probun hareket ettirilme şekline göre farklı tarama yöntemleri bulunmaktadır. Otomatik ve yarı-otomatik uygulamalarda kullanılan başlıca tarama yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

4.2.1 Lineer tarama

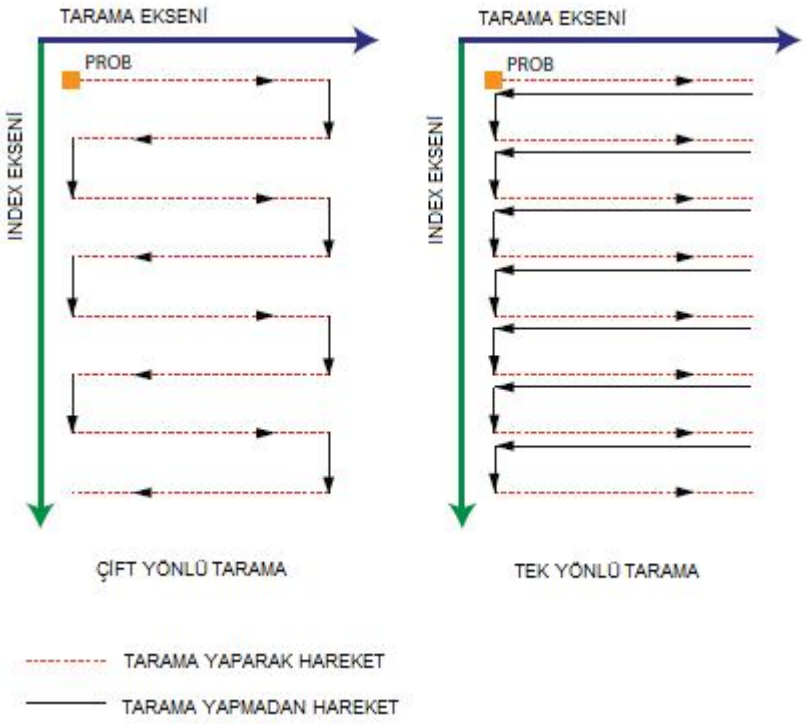
Lineer tarama tek eksen üzerinde probun hareket ettrilmesiyle gerçekleştirilir. Genelde kaynak bölgelerinin incelenmesi ve korozyon haritalandırılmasında kullanılır. Şekil 4.3'te kaynak bölgesinde konvansiyonel olarak gerçekleşen satır satır tarama ile lineer tarama görülmektedir. Satır satır taramada probun adım adım hareket ettirilmesi gerekirken lineer taramada ise aynı bölge çok fazla sayıda piezoelektrik elemana sahip olan prob ile taranması sayesinde tek eksen üzerinden hareketle ve adım adım taramaya göre çok daha hızlı olarak gerçekleştirilmektedir [27].



Şekil 4.3 : Adım adım tarama(sol) ve lineer tarama(sağ) yöntemleri.

4.2.2 Çift yönlü ve tek yönlü tarama

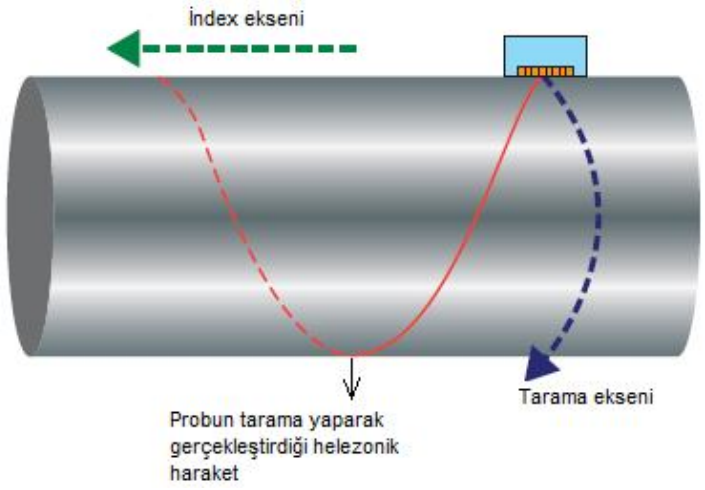
Çift yönlü taramada probun hem ileri hem de geriye dönüş hareketi boyunca tarama yapılırken, tek yönlü taramada ise prob bir yönde tarama yapıp geriye dönüşte sadece bir sonraki taramanın yapılacağı yere getirilir. Şekil 4.4'te çift yönlü ve tek yönlü tarama yöntemleri görülmektedir [27].



Şekil 4.4 : Çift yönlü ve tek yönlü tarama.

4.2.3 Helezonik tarama

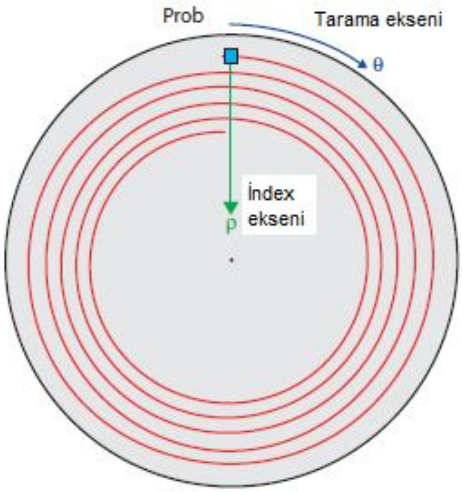
Helezonik tarama silindirik yüzeye sahip malzemelerin bir başka deyişle boruların incelenmesinde kullanılır. Prob silindir çevresinde şekil 4.5'te görüldüğü gibi helezonik olarak hareket etmektedir, bu hareket borunun, probun veya her iki elemanın beraber hareketiyle sağlanabilir [27].



Şekil 4.5 : Helezonik tarama.

4.2.4 Spiral tarama

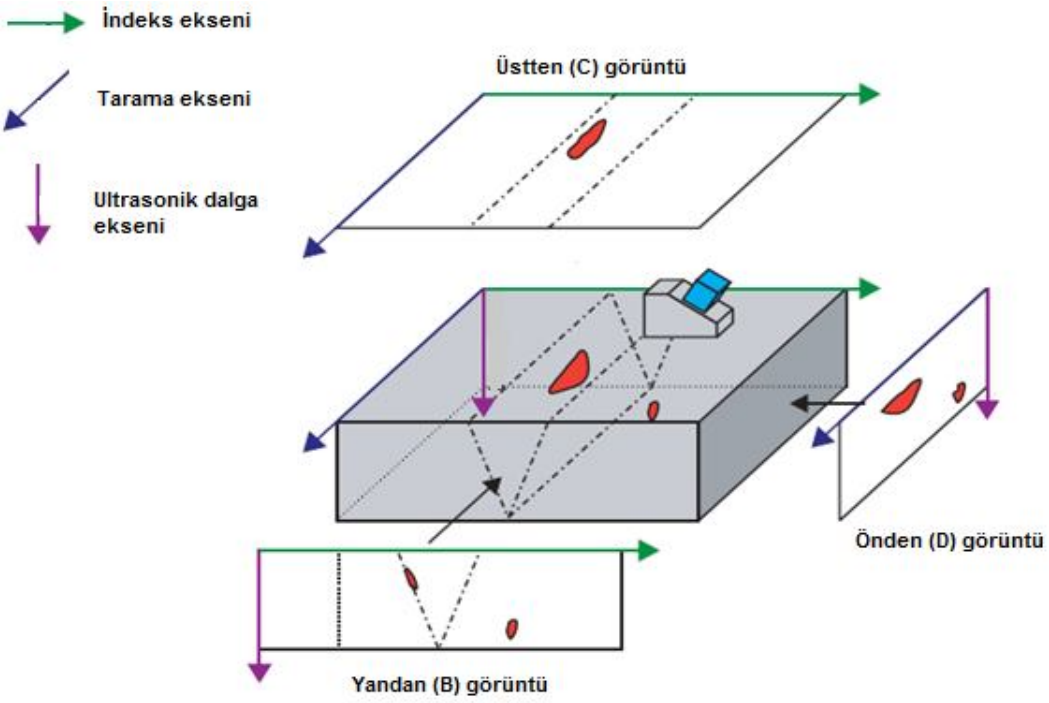
Spiral tarama disk gibi dairesel yüzeylerin incelenmesinde kullanılır. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi prob dairesel yüzey üzerinde merkeze doğru spiral şeklinde hareket ederek muayene gerçekleştirilir [27].



Şekil 4.6 : Spiral tarama.

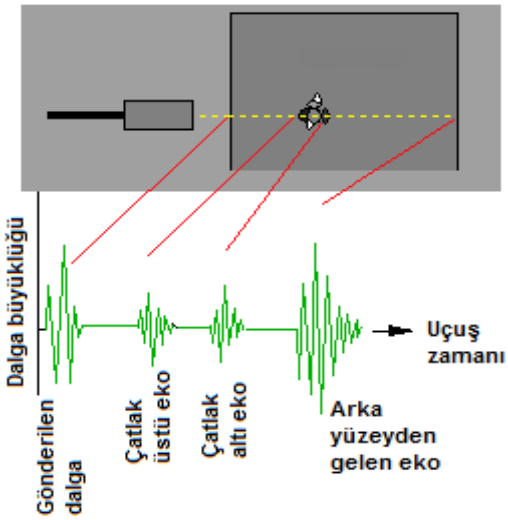
4.3 Phased Array Yönteminde Görüntüleme Teknikleri

Ultrasonik dalgalarla elde edilen görüntüler tarama parametrelerine göre dalganın aldığı yol tarafından belirlenir. En çok kullanılan görüntüleme teknikleri dalgaların malzeme üzerindeki davranışlarının iki boyutlu olarak ekrana aktarılmasıyla elde edilen B, C ve D ekran tekniklerdir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi bu ekranlar muayene parçasının önden (D-ekran), yandan (B-ekran) ve üstten (C-ekran) görüntüsünün cihaz ekranı üzerinde iki boyutlu olarak görüntüsüdür. B ve D-ekranlarda parça içindeki hatanın konumuna göre derinliği belirlenebilir [27].



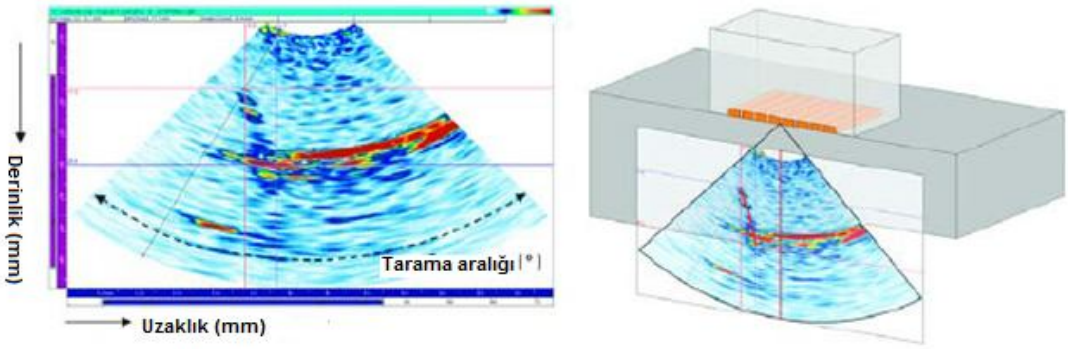
Şekil 4.7 : B, C ve D-ekranın parça üzerindeki görüntü karşılıkları.

Phased array yönteminde konvansiyonel ultrasonik muayenenin temelini oluşturan A-ekran da kullanılır. A-ekran gönderilen ultrasonik dalganın büyüklüğünü ve aldığı yolu gösteren bir frekans grafiği şeklinde görülen ekrandır. Burada dönen yankının büyüklüğüne göre ekran üzerinde şekil 4.8'de görüldüğü gibi gelen yankı dalgaları görülür ve buradan malzeme içindeki hata büyüklüğü ve konumu hakkında yorum yapılabilir. Yankı genliği dikey eksende, dalga geçiş zamanı da yatay eksende yer almaktadır.



Şekil 4.8 : A-ekran prensibi.

Bunların dışında phased array yönteminde S-ekran ve polar görüntü teknikleri de kullanılmaktadır. S-ekran tekniği, şekil 4.9'da görüldüğü gibi sektörel veya belli istikamet açısındaki tüm A-ekran görüntülerinin iki boyutlu olarak görüntülenmesidir. Probun hareket ettirilmeden kristal dizisi boyunca elektronik tarama ile malzemenin kesitsel görüntüsü çıkarılabilir. Ardı ardına kristaller önceden belirlenmiş gruplar halinde etkin hale getirilir ve probdaki tüm kristallerin kapladığı alan boyunca doğrusal tarama yapılır. Prob hareket ettiriliyormuş gibi gerçek zamanlı olarak taranan bölgenin kesitsel görüntüsü alınabilir. Bu yöntem özellikle otomatik olarak yapılan kaynak muayenesinde oldukça kullanışlıdır. Taban bloğu veya takozu takılan prob belirlenen açılarda enine dalgalar oluşturabilir ve tarama esnasında probun kaynak dikişinden uzaklaştırılmasına gerek kalmadan aynı eksen üzerinde hareketiyle kaynak bölgesinin verileri alınabilir. Polar görüntü ise boru gibi silindirik parçaların iki boyutlu olarak görüntülerinin alınmasıdır [27].



Şekil 4.9 : S-ekran.

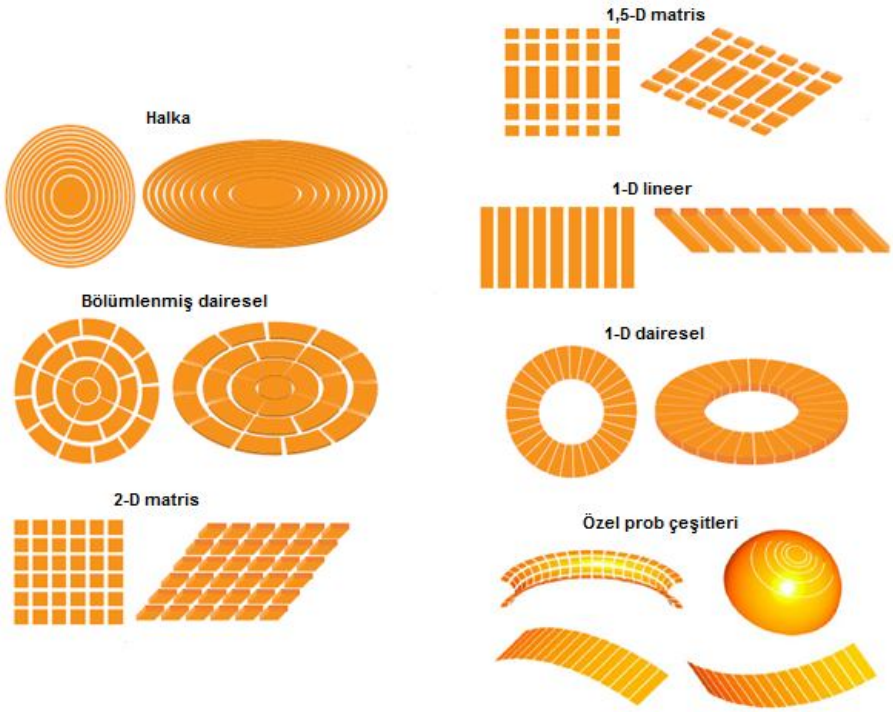
4.4 Phased Array Yönteminde Kullanılan Temel Prob Çeşitleri

Piezokompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mikro işleme teknolojisindeki gelişmelerle beraber çok farklı yapıda probların üretimi imkanlı hale gelmiştir. Prob seçiminde, muayene yapılacak bölgeye gönderilecek dalgaların özellikleri, kontrol edilecek bölgenin derinliği ile probun kullanılacağı bölgeyle olan açısal konumu, muayene yapılacak parçanın yüzey durumu gibi faktörler dikkate alınır. Genelde lineer problar muayene yapılacak bölgeye prob takozu denilen özel parçalarla tespit edilir. Bu takozlarla gönderilen dalgaların istenilen açıda ve erteleme süresinde gönderilmesi sağlandığı gibi farklı bölgelerde aynı probun kullanılmasını, örneğin farklı boru çaplarında farklı içbükey yarıçapına sahip takozların yardımıyla, imkanlı hale getirir. Phased array yönteminde kullanılan temel prob çeşitleri şekil 4.10'da görülmektedir.

Bölümlenmiş dairesel ve halka yapısındaki problar iç içe konumlandırılmış kristallerden oluşmaktadır. Bu problarla ses demeti eksenine göre simetrik bir ses basıncı oluşturulabilir ve parça içerisinde istenen noktaya odaklanma sağlanabilir.

Lineer veya başka bir deyişle doğrusal sıralı problar ise en yaygın olarak kullanılan prob tipidir. Bunun en büyük nedeni bu probların programlanmaları ve malzeme içerisine gönderilen ses demetinin kontrol edilmesinin diğer prob tiplerine göre daha kolay olmasıdır. Bu problarda kristaller doğrusal olarak yerleştirilmişlerdir. Boyuna, enine ve yüzey dalgası üretilmesi mümkündür.

Matris şeklinde dizilmiş düzlemsel dizilimli problar lineer problara göre daha hassas bir odaklanma imkânına sahiptir. Ancak bu probların imalat zorluğundan kaynaklanan yüksek maliyeti ve programlamasının daha zor olmasından dolayı kullanımı lineer problara göre daha azdır [27].



Şekil 4.10 : Temel prob çeşitleri.

4.5 Phased Array Yönteminin Üstünlükleri ve Sınırlamaları

Phased array yönteminin konvansiyonel ultrasonik muayeneye göre zaman ve güvenilirlik açısından önemli üstünlükleri vardır, çünkü bu yöntemde konvansiyonel yöntemde adım adım yapılan uygulamalar tek seferde ve çok daha hassas olarak yapılabilir. Phased array yönteminin başlıca üstünlüklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- Ultrasonik muayenede hali hazırda mevcut taramaların tümünün kullanımı ve ses demeti yönünde ve tarama yönünde mesafe kaydı işlenmiş veri ile üç boyutlu değerlendirme olanağı (B,C-D ve S-ekran üzerinden),
- Konvansiyonel ultrasonik muayenedeki operatöre bağımlılığın azalması, yüksek ve kesin hata bulma yeteneği,
- Yüksek hızlı tek eksenli tarama, daha kısa zamanda ayarlama ve muayene işleminin gerçekleşmesiyle daha yüksek verim,
- Kolay hata boyutlandırma ve geniş raporlama özelliği,
- Tek bir prob ile çok açılı ses dalgası uygulanabilmesi,

- Bütün muayenenin mesafe kaydı işlenmiş halde saklanması ve muayeneden sonra analiz edebilme olanağı ve geri dönüşümlü (parçaya ihtiyaç duymadan eski bir muayene tekrar canlandırılabilir) sabit analiz verileri.
- Kaynak ağzı çizimi üzerinden hataların veya süreksizliklerin kesitsel olarak tespit edilmesi ve analizi [27, 29].

Phased array yönteminin bu üstünlüklerinin yanında bazı sınırlamaları da mevcuttur, bunlar:

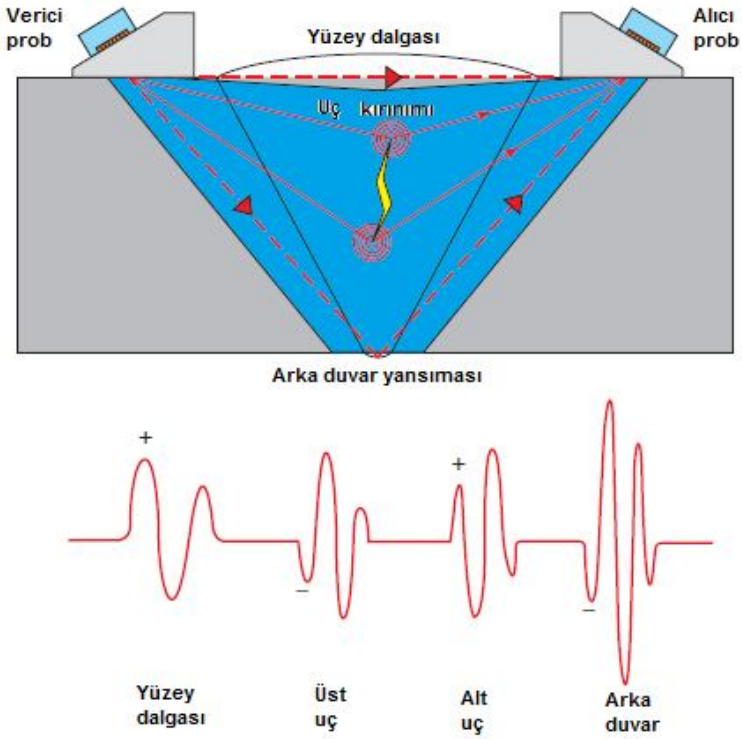
- Ekipmanlar ve yedek parçalar konvansiyonel ultrasonik muayeneye kıyasla yaklaşık 10-20 kat daha yüksek maliyetlidir,
- İyi eğitimli ve donanımlı operatörlere gereksinim vardır,
- Kalibrasyon çok karmaşık ve zaman alıcıdır,
- Metot standartlaştırılmamıştır ve muayene durumuna göre değişik prosedürler uygulanır [27].

5. TOFD YÖNTEMİ

TOFD (Time of flight diffraction) yöntemi özellikle güç santralleri ve petrokimyasal endüstri uygulamalarında standart bir teknik olarak kullanılmaya başlanmıştır [30]. Kaynaklı parçaların incelenmesinde kullanılan başlıca tahribatsız muayene yöntemleri radyografik muayene, manyetik parçacık testi, sıvı penetrant test ve ultrasonik muayene yöntemleridir. Kaynak bölgesinin doğru bir şekilde tanımlanmasıyla iki probla tek seferde tarama yaparak TOFD tekniğiyle kaynak bölgesinin incelenmesi, en hızlı tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir [31].

5.1 TOFD Yöntemi Uygulama Prensipleri

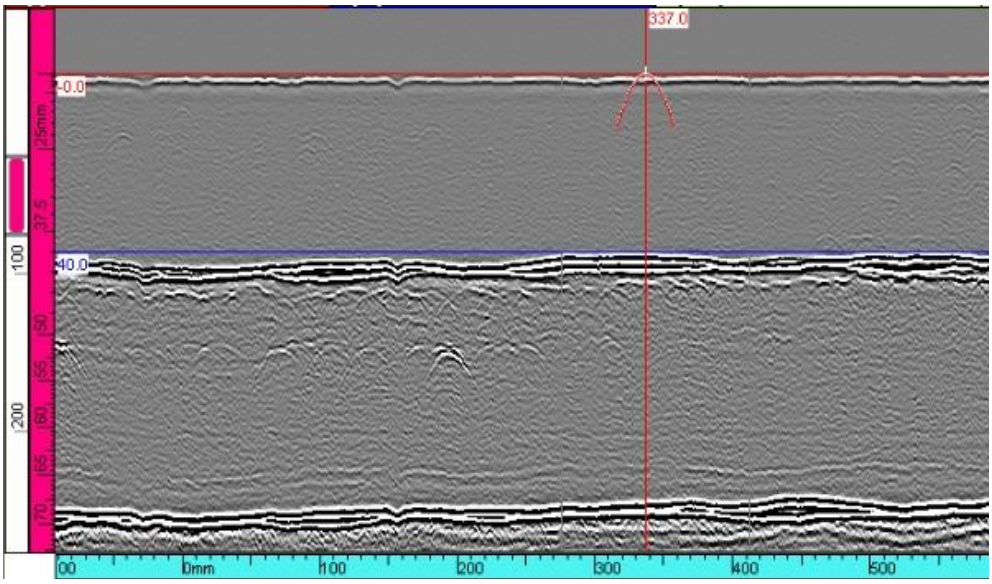
TOFD tekniğinin prensibi hataların kenarlarının konumlandırılmasına dayanmaktadır. Bu yönüyle, hatalardan yansıyan sinyallerin şiddetlerinin değerlendirildiği konvansiyonel ultrasonik muayene ile ayrılmaktadır, başka bir deyişle bu teknikte diğer ultrasonik yöntemlerden farklı olarak ses dalgalarının yansıma özelliği değil, kırınım özelliği temel alınır. Geniş açılımlı ses demeti veren bir probla, bu proba tipik algılayıcı bir başka prob, hataların yüzeylerini saptamak amacıyla kaynak dikişinin her iki yanına şekil 5.1'de görüldüğü gibi karşılıklı olarak yerleştirilir. Hatasız bir kaynakta yalnızca yüzeye yakın açıyla yayılan ses dalgası ve arka duvar yansıması verecektir. Kaynak içinde bir hata bulunduğu durumda, ses dalgaları hatanın kenar yüzeylerinde kırınır ve hatanın derinliği ses dalgasının geliş süresinden, hatanın boyutları ise hatanın en alt ve en üst kenarlarından yansıyan sinyallerin farkı alınarak hesaplanabilir [32].



Şekil 5.1 : TOFD yönteminin çalışma prensibi.

5.2 TOFD Yönteminde Görüntüleme

TOFD yöntemi hataların konumunun ve boyutunun hassas bir şekilde tespitini sağlayan önemli bir tekniktir. Bu yöntemde hataların ekranda görüntülenmesi phased array yönteminde kullanılan B-ekran tekniğinin gri tonlamalı özel bir uygulamasıyla gerçekleştirilir. Bir başka deyişle alıcı proba gelen dalgalar parçanın yandan kesiti üzerinden ekranda görülür. Şekil 5.2'de TOFD yönteminde görüntüleme örneği görülmektedir.



Şekil 5.2 : TOFD yönteminde görüntüleme.

5.3 TOFD Yönteminin Üstünlükleri ve Sınırlamaları

TOFD yönteminin diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre başlıca üstünlükleri şunlardır:

- Hassas hata boyutlandırma ve konumlama yeteneği,
- Hızlı uygulanması,
- Bütün kaynağın taranması sonucunda TOFD görüntüsünde bütün kaynağın analiz edilebilme ve kayıt altına alınabilme olanağı,
- Hızlı raporlama ile hızlı ve kesin karar verme (bütün kaynak boyunca verinin önümüzde olması ve hali hazırdaki en hassas boyutlandırma yeteneği nedeniyle),
- Sabit olarak parametrelerin kayıt edilmesi,
- Taramadan sonra muayene, analiz ve ölçümlendirme.

Bu üstünlüklerinin yanında TOFD yönteminin de bazı sınırlamaları vardır, bunlar:

- Yüzeyin üstünde bulunan hataların yüzey dalgalarının süreksizliklerinden dolayı tespiti zordur,
- Kaba taneli malzemelerin muayenesi zordur,
- Yüzeye ve arka duvara yakın hataların tespiti zordur,
- Parça geometrisi ve bağlantı bölgelerindeki problemler yüzey dalgalarının yayılımına engel olabilir [30].

6. KONVANSİYONEL VE GELİŞMİŞ ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI

6.1 Konvansiyonel Ultrasonik Muayene Yöntemi Uygulaması

Konvansiyonel ultrasonik muayene ile uygulama örneklerinin gerçekleştirilmesi için şekil 6.1'de gösterilen Krautkramer USM 35 X DAC cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.1 : Konvansiyonel ultrasonik muayenede kullanılan test cihazı.

Ultrasonik test cihazının çalışma prensibi basit olarak test malzemesinin içine prob üzerinden dalganın gönderilmesi ve buradan yansıyan ekonun ekran üzerinde gösterilmesidir. Ses dalgasının malzeme içinden yansıması herhangi bir süreksizlikten kaynaklanabileceği gibi malzemenin arka duvarından yansımasıyla da meydana gelebilir. Ses dalgasının malzeme içindeki yayılma hızı bilindiğine göre geri dönüş süresine göre malzeme içerisindeki süreksizliğin konumu ve pozisyonu bulunabilir.

Zaman ölçümü ilk dalganın piezoelektrik etkiyle prob üzerinden gönderilmesiyle başlar. Proba çok kısa bir elektrik akımı gönderilerek uyarılır ve ses dalgası üretilir. Aynı prensibe bağlı olarak malzeme içerisinden gelen yankılar prob tarafından elektrik sinyaline dönüştürülür ve cihaza iletilerek ekran üzerinden bilgi alınması sağlanır. Probun test malzemesinin üzerinde hareket ettirilmesi esnasında ses dalgasının kırılmasını önlemek için bir temas sıvısı kullanılır.

Bu deneylerde kullanılan Krautkramer USM 35 X DAC cihazının temel teknik özellikleri şöyledir:

Frekans aralığı: 0,2'den 1 MHz'e / 0,5'ten 4 MHz'e / 0,8'den 8 MHz'e / 2'den 10 MHz'e.

Test aralığı (çelik için): min. 0-0,5 mm / max.0-10 m. (0,2-1 MHz ve 0,5-4 MHz frekans aralıklarında), min. 0-0,5 mm / max.0-1,42 m. (0,8-8 MHz ve 2-20 MHz frekans aralıklarında).

Ses hızı: 1000-15000 m/s (1 m/s aralıklarla ayarlanabilen).

Ekran boyutu ve çözünürlüğü: 116x87 mm, 320x240 piksel.

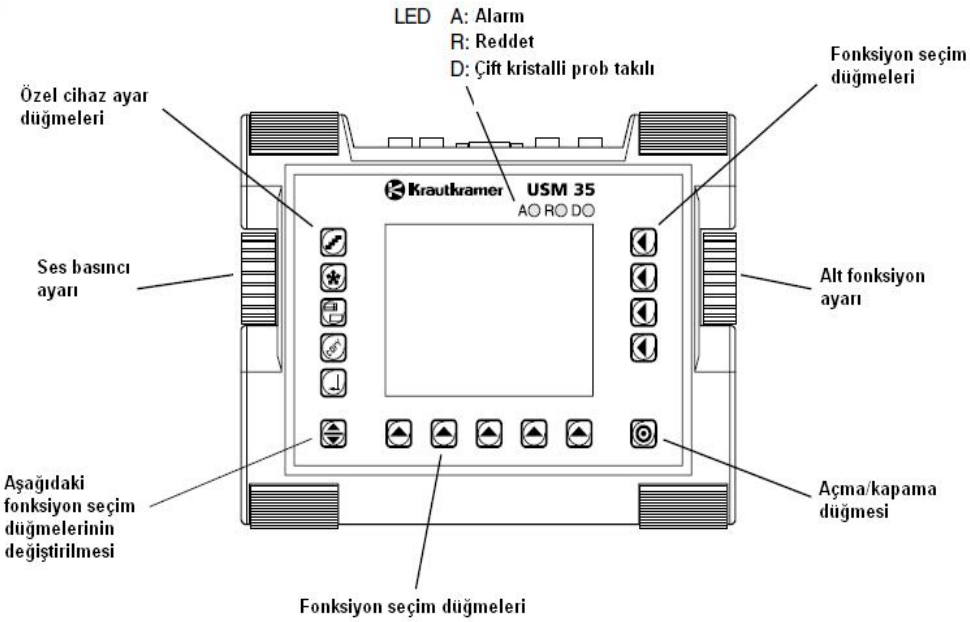
A-ekran boyutu ve çözünürlüğü: 116x80 mm, 320x220 piksel.

Ölçüm birimleri: mm, inç.

Cihaz ebatları: 117x255x100 mm.

Cihazın ağırlığı: 2,2 kg (piller dahil).

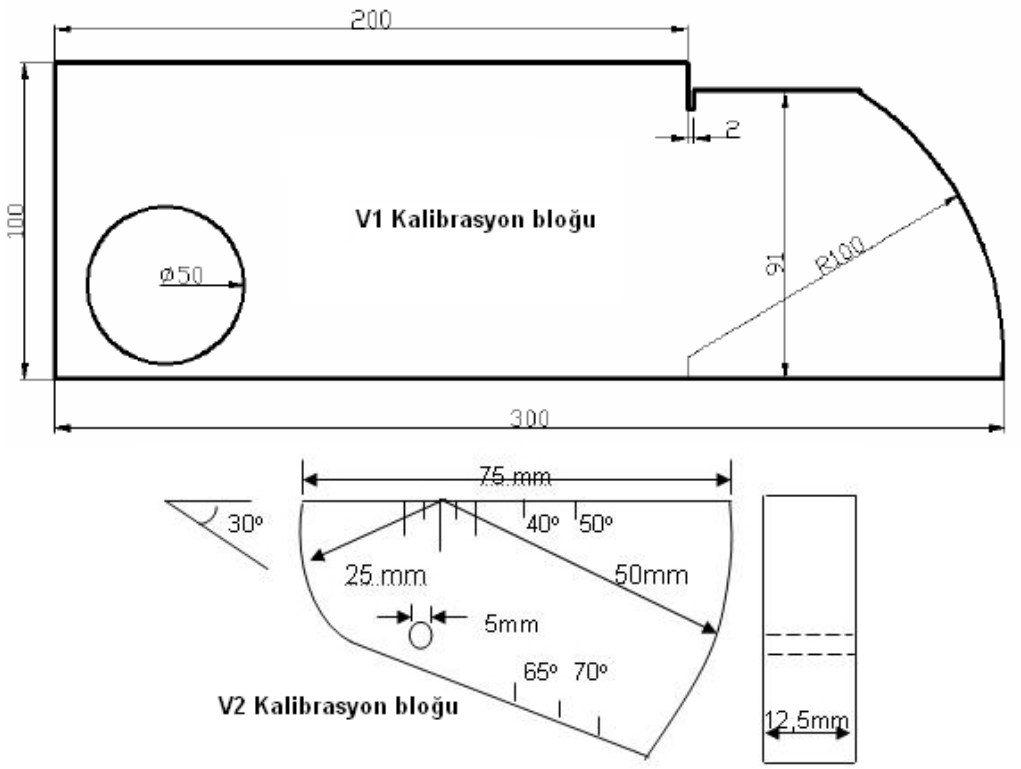
Krautkramer USM 35 X DAC ultrasonik muayene cihazının paneli ve kontrol düğmeleri şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : Krautkramer USM 35 X DAC kontrol düğmeleri.

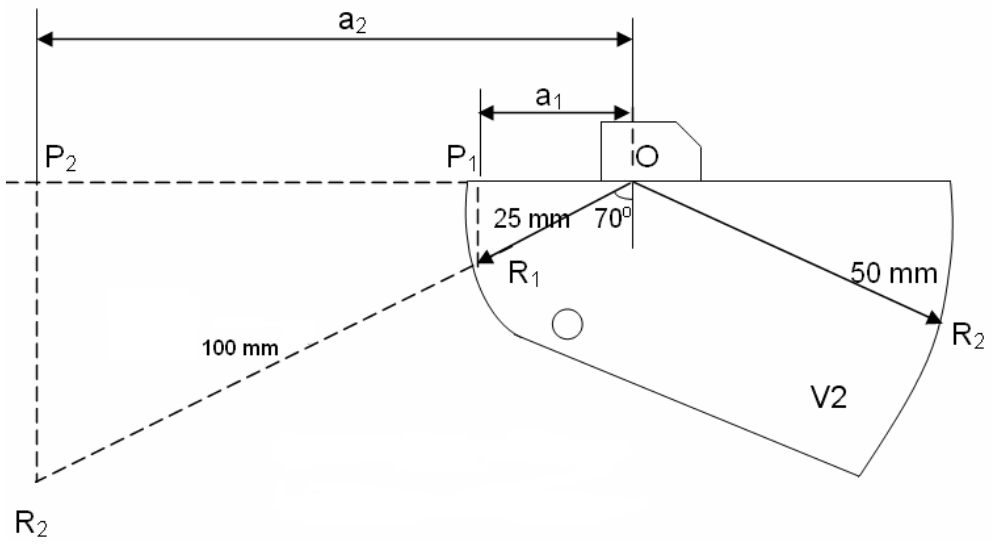
Muayeneye başlamadan önce kalibrasyon işlemi yapılması gerekmektedir. Kalibrasyon, ultrasonik cihaz ekranını test edilecek malzemenin belli bir kalınlığına göre ayarlayıp, ölçekli hale getirme işlemidir. Ekranın yatay skalasına göre ayarlanan bu kalınlığa test alanı denir. Kalibrasyon işlemi, test malzemesinin bizzat kendisi (eğer geometrisi uygun ise) kullanılarak yapılabileceği gibi, standart kalibrasyon bloklarından yararlanılarak da yapılabilir. Bu işlem için uluslararası kuruluşlar tarafından dizayn edilmiş özel kalibrasyon ve referans blokları kullanılmaktadır. Malzeme testi standartları ile uğraşan çeşitli kuruluşlar tarafından dizayn edilen ve ölçülendirilen test bloklarına standart kalibrasyon blokları denir.

En çok kullanılan standart kalibrasyon blokları, Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) tarafından tasarlanan ve Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) tarafından onaylanan şekil 6.3'te görülen V1 ve V2 bloklarıdır. Referans blok ve test malzemesinin aynı ses hızı, zayıflama ve akustik empedansa sahip olması için, bu bloklar test malzemesi ile aynı veya benzer alaşım oranına sahip ve aynı ısıl veya soğuk işlem görmüş malzemeden hazırlanmış olmalıdır.



Şekil 6.3 : V1 ve V2 kalibrasyon blokları.

Konvansiyonel muayene uygulamasında 45˚ ve 70˚'lik problar kullanılmış ve bu probların kalibrasyonu V2 bloğuyla gerçekleştirilmiştir. 70˚'lik probun 125 mm'lik tarama alanı için iz düşüm mesafesine göre kalibre edilmesi şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4 : Probun V2 bloğu ile kalibrasyonu.

Burada izdüşüm mesafeleri (a_1, a_2) ses yoluna göre hesap edilir. İzdüşüm mesafeleri sırasıyla;

a_1 = 25.sin70 = 23,5 mm,

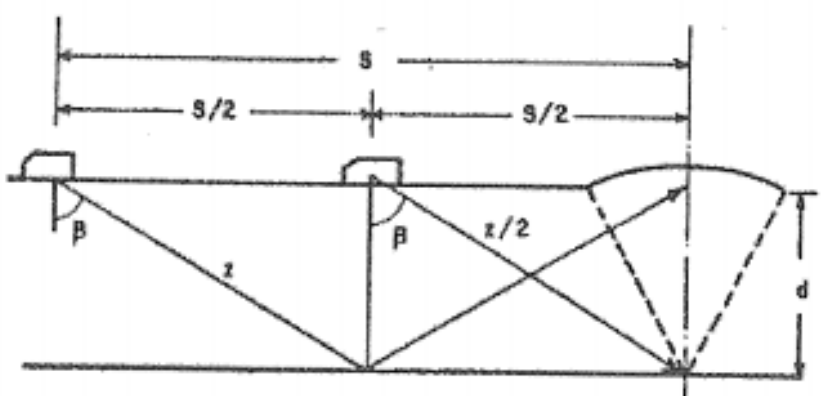
a_2 = 125.sin70 = 117,5 mm'dir.

Cihaz ekranının yatay skalasında bir bölmeye karşılık gelen mesafe olan skala faktörü ayarlanır. İzdüşüm mesafesi değerinin skala faktörüne bölünmesiyle yankı konumu değerleri elde edilir ve buradan cihazın yatay skalasında 1. yankı 1. yankı konum değerine, 2. yankı 2. yankı değerine getirilerek kalibrasyon işlemi tamamlanmış olur.

Konvansiyonel ultrasonik muayene yöntemi ile yapılan ilk örnek uygulama şekil 6.5'te gösterilen bir parça üzerinde uygulanmıştır. Burada bir çelik konstrüksiyonun kaynak bölgesi 45˚ ve 70˚'lik problarla ayrı ayrı muayene edilmiştir. Malzeme kalınlığı 40 mm olup bu kalınlığa göre probun gezme alanı yani sekme mesafesi hesaplanır. Açılı probla kaynak bölgesinin taranması şekil 6.6'da gösterilmiştir.

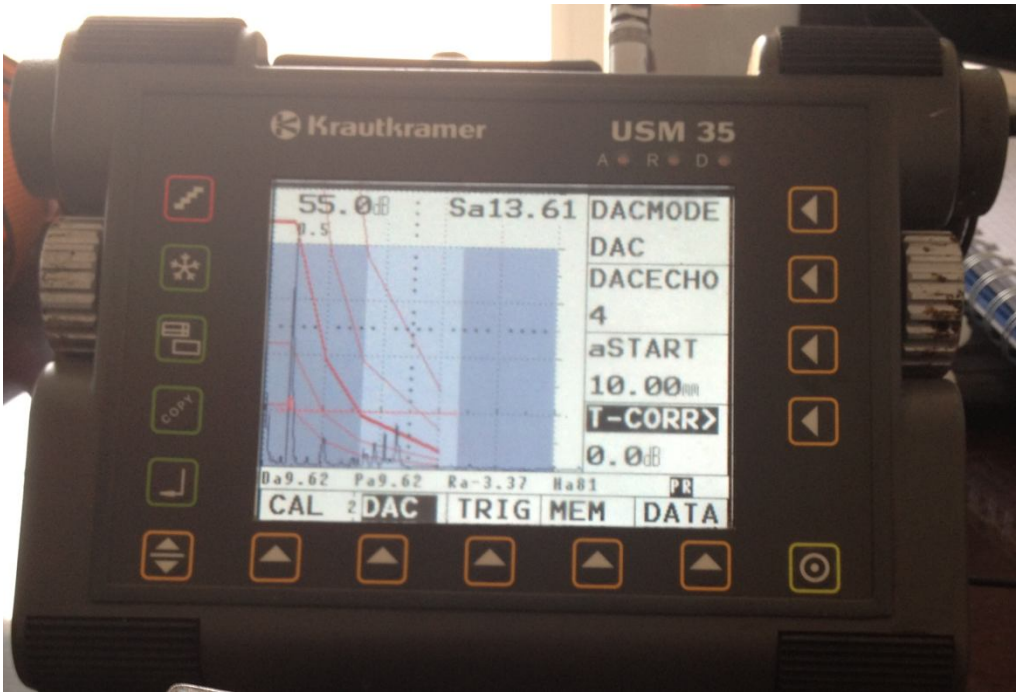


Şekil 6.5 : Konvansiyonel yöntemle muayene edilen birinci parça.



Şekil 6.6 : Açılı probla kaynak bölgesinin taranması.

Kaynak dikişinin merkezinden itibaren S/2 ve S mesafeleri işaretlenerek probun gezme alanı belirlenir. Sekme mesafesi, S = 2d.tanβ formülünden hesaplanır. Burada d, malzeme kalınlığı ve β probun açısıdır. Bu durumda ilk uygulama için kullanılan probların sekme mesafeleri 45°'lik prob için 80 mm ve 70°'lik prob için 220 mm olarak bulunur. Muayene 4 MHz frekansla yapılmış ve muayene sonucu bulunan süreksizliğin cihaz ekranı üzerindeki görüntüsü şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Kaynak dikişindeki süreksizliğin ekran görüntüsü.

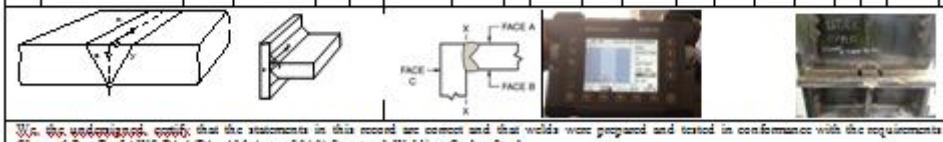
Muayene sonucu 25-45 mm arasında 18-22 mm derinliğinde süreksizlik tespit edilmiş ve bu muayene sonucuyla ilgili hazırlanan ultrasonik muayene raporu şekil 6.8'de gösterilmiştir.

	ULTRASONIC TEST REPORT (Weld Seams)	INSPECTION REPORT FORM NO.: TRF-QC-FRM-1004 SPEC NO.: 101-000-A-LE-295117
		SHEET 1/1
		REVISION 1
UNIT: 147	ITP REFERENCE 295007-C6 Rev.3	REPORT NO TEK-UT-001
ITEM: SLIDING CONNECTION DETAILS		DESCRIPTION:
RELATED DRAWING: VB-378969		CODE, SPECIFICATION: AWS D1.1/ 101-000-A-LE-295356 REV-2

Heat Treatment: ☒ No ☐ Before ☐ After	Equipment: KRAUTKRAMMER SERIAL:0802	Model: USN 58 R	Coupling Medium: UT-GELL
Examination Document: AWS D1.1/101-000-A-LE-295356	Evaluation Document: TRF-NT-PRO-0005		Examination Instruction: 101-000-A-LE-295356
Examination Level: 1.2.3(ANNEX) TABLO A1	Evaluation Class: N/A		Examination Surface: %100Welding+10mmHAZ
Distance Calibration	Sensitivity Adjustment		

Probe No	Probe	Frequency (MHz)	Calibration Range	Calibration Block	☐ DGS Ø ☐ DGS R ☒ DAC Reference Height	Other Effects (mm)	Reference Block	Reference Reflector	S_2 (mm)	V_1, V_T (dB)	ΔV_{DE} (dB)	ΔV_T (dB)	ΔV (dB)	V_R (dB)
1	AKA 002	45/4	125	K2	%80 Screen Height	1,5 SDH	IMK-OZB1-2	SDH	30	55	12	2	-	69
2	AKA 003	70/4	125	K2	%80 Screen Height	1,5 SDH	IMK-OZB1-2	SDH	44	59	12	2	-	73
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

App	Weld identification	Weld dr.	Welding Process	Material Thickness	Examination No	Transducer Angle	Direction of Scan	λ^*	dB: Indication Level a	dB: Reference Level b	dB: Attenuation Factor c	dB: Indication Rating d	Discontinuity: Length ΔL	Discontinuity: Soundpath s	Discontinuity: Depth t	Discontinuity: Distance X	Discontinuity: Distance Y	Evaluation	Remarks
	FW 20		SMAW	40	1, 2	45&70	A,B	-	-	-	-	-	25/45	-	18/22	4/6	-	NR	-
	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



We, the undersigned, certify that the statements in this record are correct and that welds were prepared and tested in conformance with the requirements of Clause 6 Part F of AWS D1.1/D1 . 1M (year 2010) Structural Welding Code - Steel.

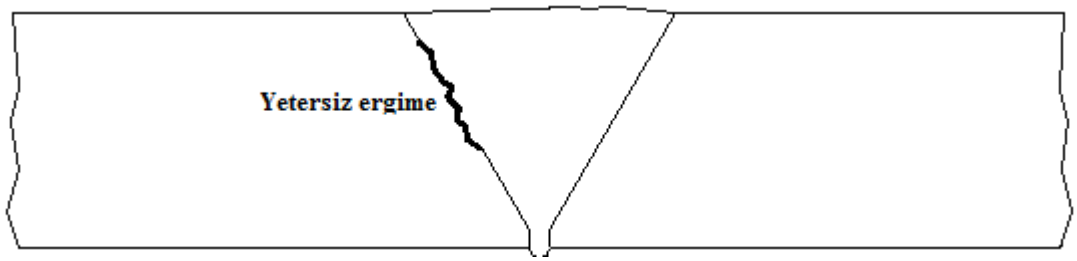
		SUBCONTRACTOR	CONTRACTOR	OWNER
Name	MELKAN ÇELİK			
Signature				
Date	19.03.2013			

Şekil 6.8 : Konvansiyonel ultrasonik muayene raporu.

Konvansiyonel ultrasonik muayene yönteminin ikinci uygulama örneği için şekil 6.9'da gösterildiği gibi iki plaka V kaynak dikişi ile birleştirilmiş ve kaynak bölgesinde şekil 6.10'da gösterildiği gibi yetersiz ergime hatası oluşturulmuştur.

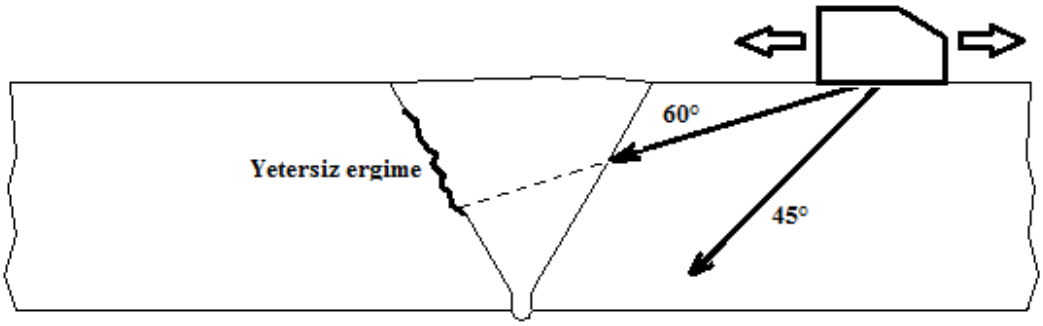


Şekil 6.9 : V kaynak dikişiyle kaynatılmış iki plaka.



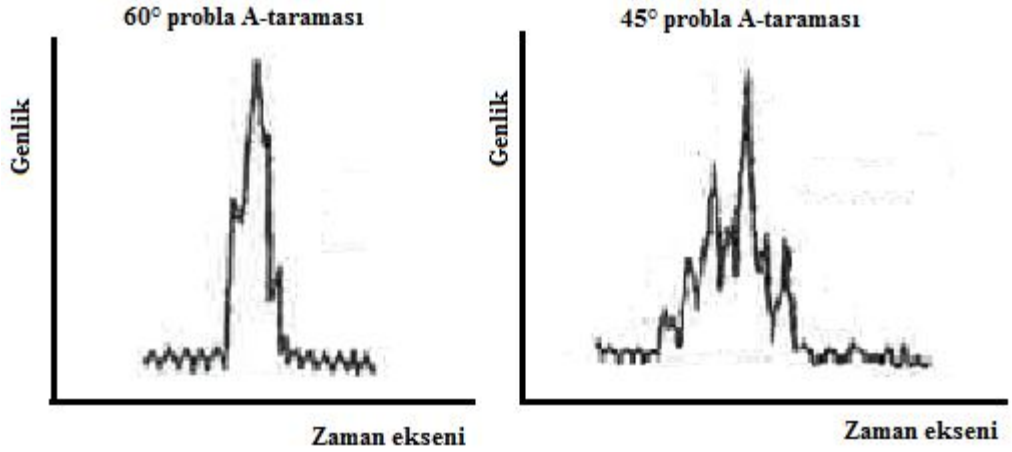
Şekil 6.10 : Kaynak bölgesinde yetersiz ergime hatası.

Kaynak bölgesi 45°-4 MHz prob ve 60°-4 MHz'lik problarla ayrı ayrı kontrol edilmiş ve A-tarama farklılıkları gözlemlenmiştir. V kaynak ağzı açısı 60° olup şekil 6.11'de görüldüğü gibi 60°'lik probun ses demeti hataya hemen hemen dik bir açıyla çarpmakta 45°'lik probun ses demeti ise hataya eğik bir şekilde çarpmaktadır.



Şekil 6.11 : Kaynak bölgesinin açılı probla taranması.

Ses demeti hataya veya yansıtıcı kaynağa yaklaşık dik çarptığında ekranda görülen yankı görüntüsü tekli fakat tırtıklı bir görünümdedir. Prob hareket ettirildiğinde, yankı genliğinde pürüzlü yüzeylerdeki yansımalardan dolayı büyük ve rastgele değişmeler görülür. Diğer yandan ses demetinin hataya eğik bir şekilde çarpmasıyla ekranda görülen yankı görüntüsü birbirini takip eden ve bir çan eğrisine benzer şekilde sıralanmış şekilde görülür. Bu iki probun A-tarama karşılaştırmaları şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12 : Açılı probların A-ekran karşılaştırması.

Benzer prensipten hareketle ses demetinin hataya paralel olduğu zaman hatanın tespit edilememe durumu söz konusudur. Bu yüzden konvansiyonel ultrasonik muayene yönteminde hatanın ve konumunun tespit edilebilmesi için en az iki farklı probla muayene yapılmalıdır.

6.2 Gelişmiş Ultrasonik Muayene Yöntemlerinin Uygulaması

Phased Array ve TOFD yönteminin uygulanması için şekil 6.13'te görülen Olympus OmniScan MX cihazı kullanılmıştır. Bu cihazla arka modülünün değiştirilmesi sayesinde hem konvansiyonel ultrasonik muayene, hem gelişmiş ultrasonik muayene

yöntemleri hem de girdap akımları testleri yapılabilir. Cihaz 4,6 kg ağırlığında ve portatif olarak kullanılabilmektedir. 800x600 piksel çözünürlüğünde ve 8,4 inç (213,36 mm) genişliğinde renkli TFT LCD ekrana sahiptir. A tarama, B tarama, C tarama ve S taramanın yanında TOFD yöntemi gösterimi de yapılabilir. Doğrudan cihaz üzerinden rapor oluşturulabildiği gibi bilgisayara da bağlanabilir.

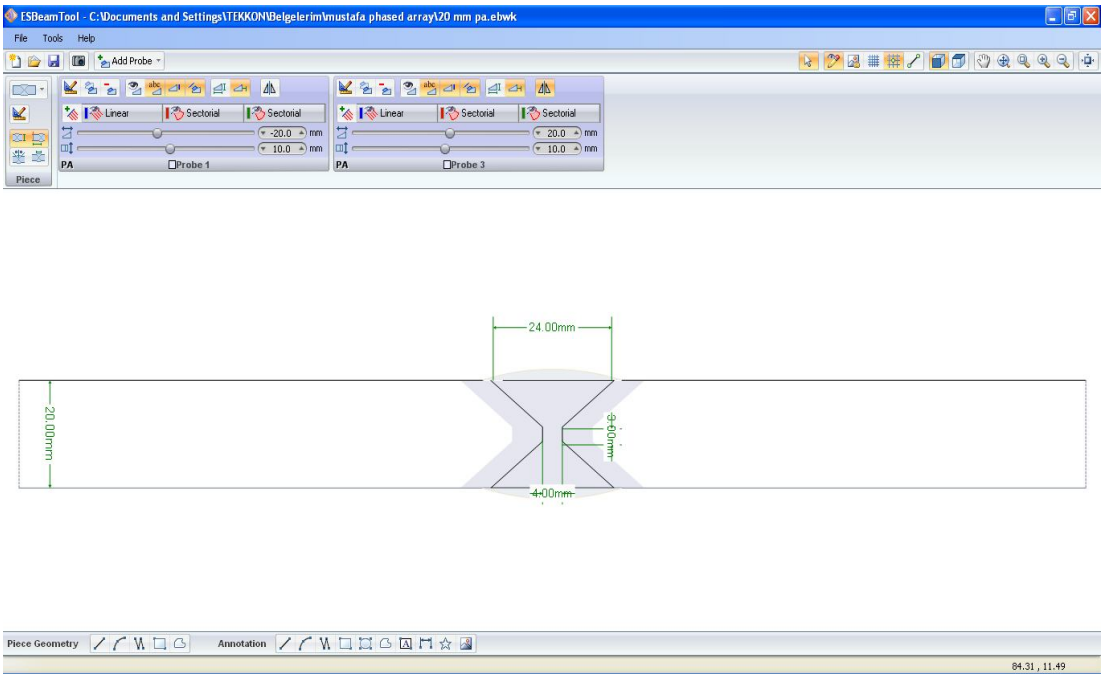


Şekil 6.13 : Olympus OmniScan MX cihazı.

Gelişmiş ultrasonik muayene cihazlarının muayene yapılacak parçaya göre ayarlanması gereklidir. Kullanılacak prob ve parçanın çizimi üzerinden prob tarama açılarını ve prob uzaklığını simule eden programlar vardır. Daha sonra bu bilgiler cihazın hafızasına yüklenip aynı tip bir muayene yapılacaksa geri çağırılabilir. Olympus OmniScan MX cihazı için kullanılan simülasyon programı ESBeamTool programıdır.

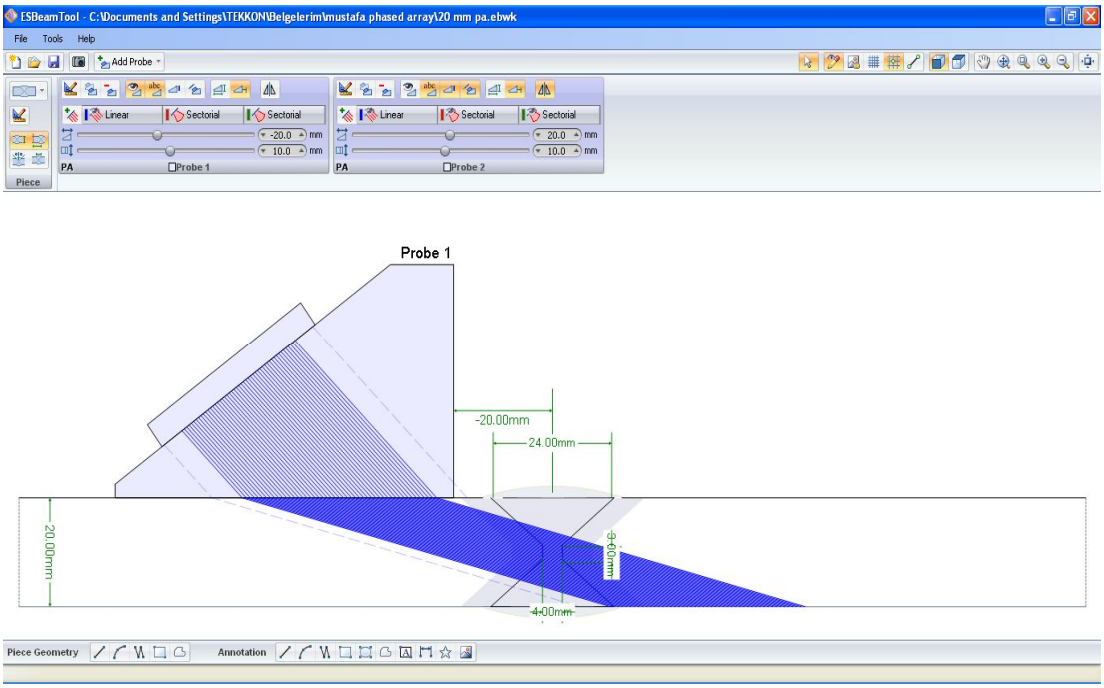
İlk olarak gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinden TOFD tekniği ile X kaynak ile birbirine kaynatılmış 20 mm. kalınlığında iki metal plakanın kaynak bölgesi incelenmiştir.

Muayeneye başlamadan önce eğer muayene edilecek parçanın parametreleri daha önce yüklenmediyse ESBeamTool programı ile parçanın simülasyonu yapılır. Bunun için ilk olarak şekil 6.14'te görüldüğü gibi kaynak ağzı ve parça kalınlığı birebir ölçülerinde çizilir.



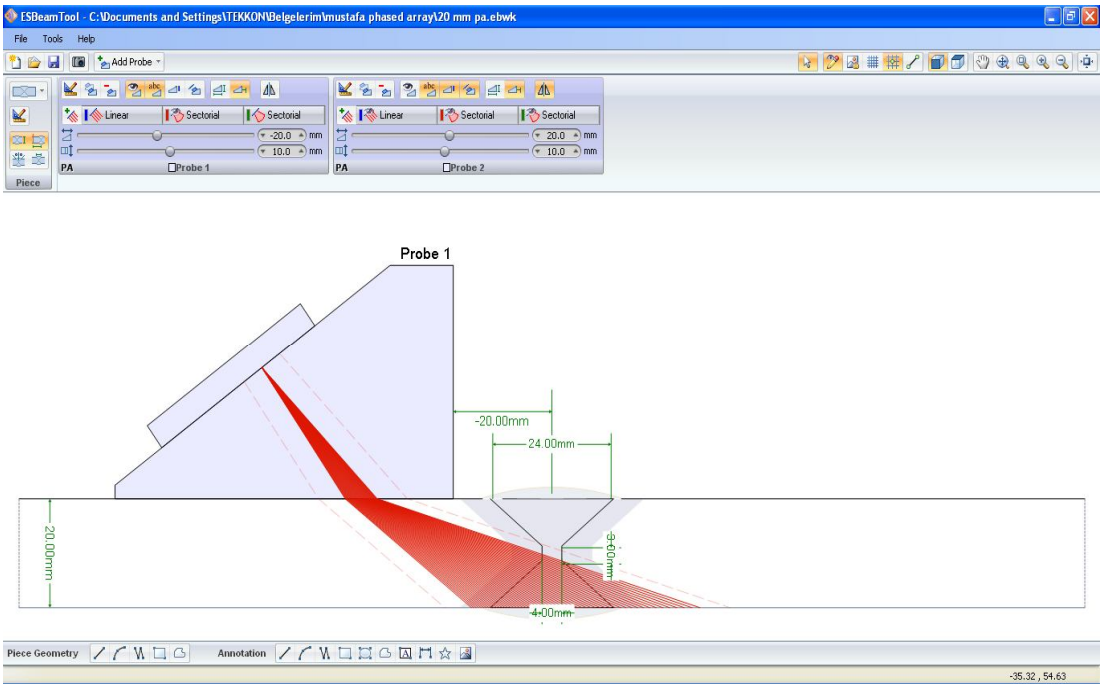
Şekil 6.14 : ESBeamTool ile parça çizimi.

İkinci adım olarak phased array yöntemi için kaynağın kök kısmına lineer tarama ile odaklanılır.



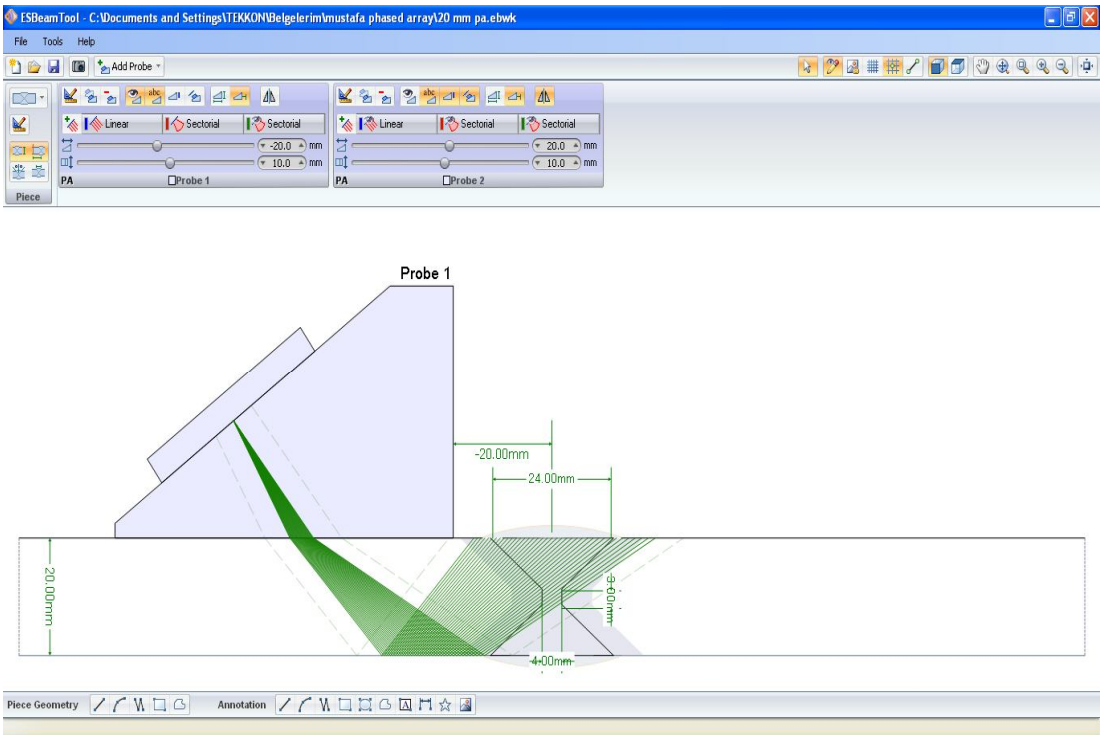
Şekil 6.15 : Kaynağın kök kısmına odaklanma.

Daha sonra sektörel tarama ile kaynağın alt tarafındaki dolgu ve kapak kısmına odaklanılır.



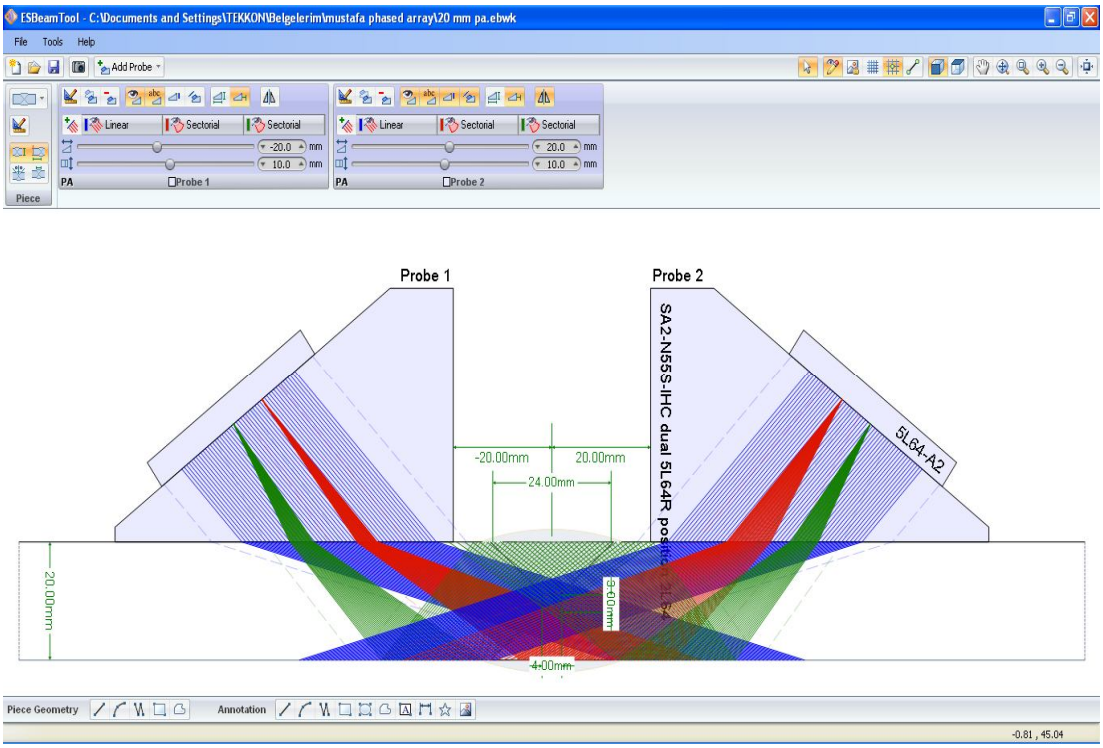
Şekil 6.16 : Sektörel tarama ile kaynağın alt tarafına odaklanma.

Dördüncü adımda ise diğer bir sektörel tarama ile bu kez kaynağın üst tarafındaki kapak ve dolgu kısmına odaklanılır.



Şekil 6.17 : Sektörel tarama ile kaynağın üst tarafına odaklanma.

Simülasyonun en son hali phased array yöntemi için şekil 6.18'de görüldüğü şekilde oluşmaktadır ve kaynağın her iki tarafından, kaynak bölgesinin tamamı ile ısının tesiri altındaki bölgeyi (ITAB) tamamen kapsamalıdır.



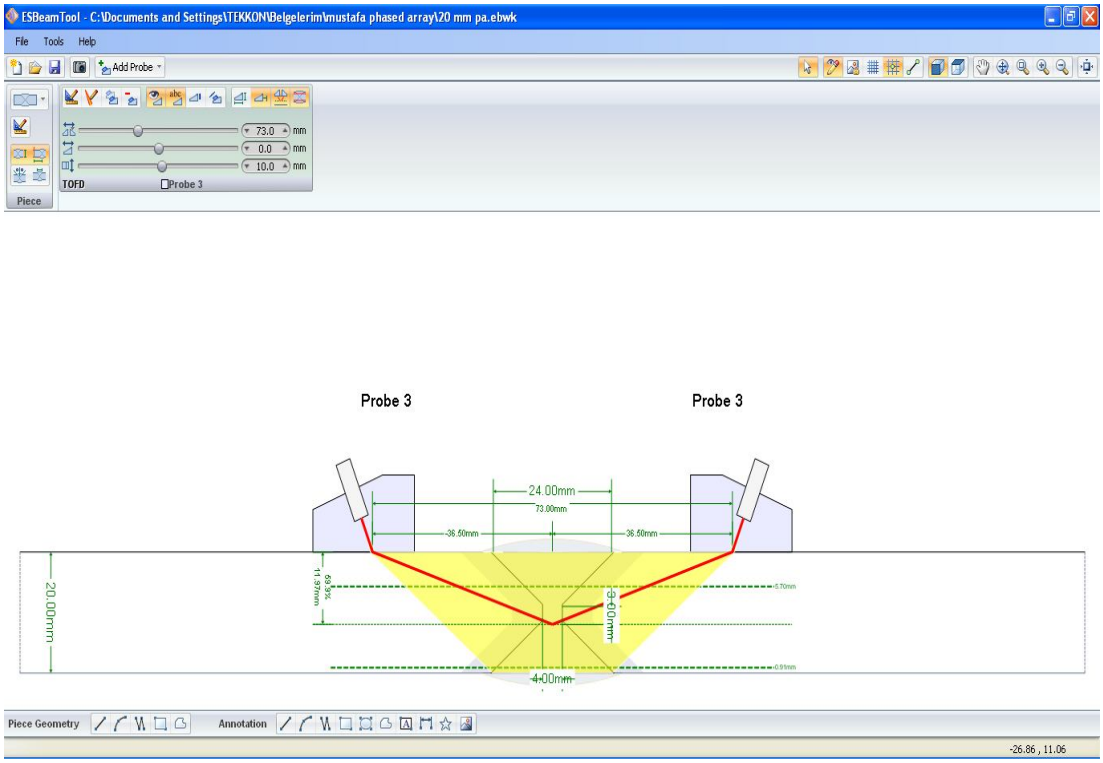
Şekil 6.18 : Phased Array yöntemi için simülasyonun son hali.

Şekil 6.14'te görülen parça ve kaynak ağzı çiziminin üzerine TOFD problarının yerleştirilmesiyle TOFD yöntemi için simülasyon yapılır. Problar:

$$mesafe = 2d \times tan\alpha \times {}^{2}/_{3} \qquad \textbf{(6.1)}$$

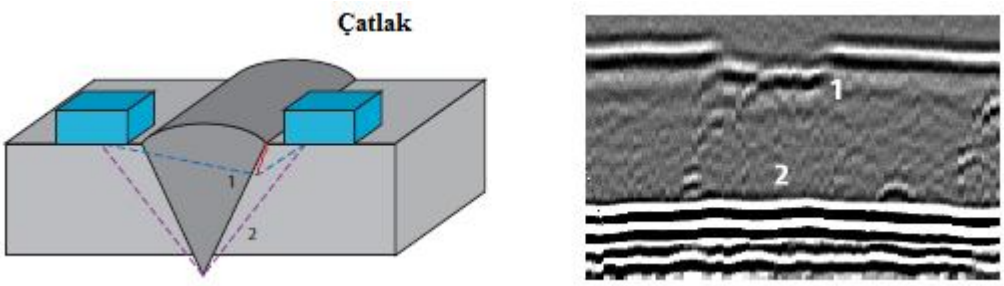
formülünden yararlanılarak yerleştirilir. Burada d, malzeme kalınlığı, α taban bloğu açısıdır. Simülasyon sonrası gerçekleşen tarama phased array yönteminde olduğu gibi kaynak bölgesinin tamamı ve ITAB'ı kapsamaktadır. TOFD yöntemi için simülasyonun son hali şekil 6.19'da görülmektedir.

Simülasyon tamamlandıktan sonra program aracılığıyla cihaza tarama açıları yüklenmiş olur. Böylece probu yatay olarak hareket ettirmeden tek eksen üzerinde kaynak bölgesinin muayenesi gerçekleştirilebilir.



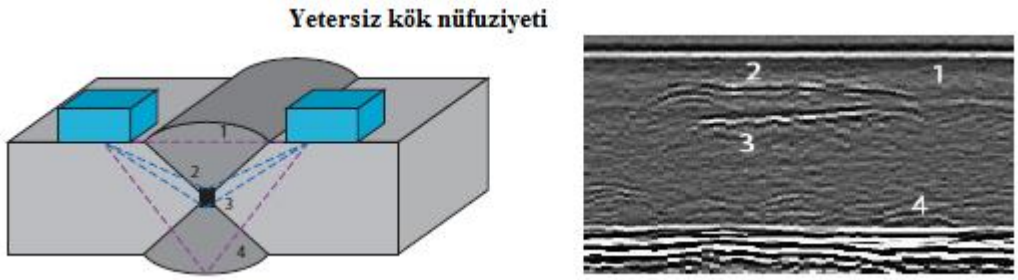
Şekil 6.19 : TOFD yöntemi için simülasyonun son hali.

TOFD yöntemiyle muayenede kaynak bölgelerinde bulunan belirli hataların ve bu hatalara karşı alınan görüntülerin belirli karakteristikleri vardır. Şekil 6.20'de kaynak bölgesindeki çatlak ve bu çatlağın ekran görüntüsü gösterilmiştir. Burada yüzey dalgaları bozulmuş ve çatlağın alt kısmı görünür hale gelmiştir. Bu çatlak bir yüzey çatlağıdır ve ekran üzerinden derinliği ölçülebilir.



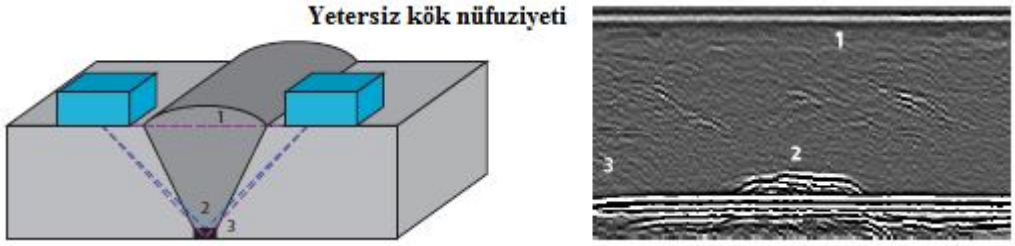
Şekil 6.20 : TOFD yönteminde çatlak görüntüsü.

Şekil 6.21'de X kaynağında kök bölgesindeki yetersiz nüfuziyet ve bunun ekran görüntüsü verilmiştir. Kırınıma uğrayan dalgaların üst ve alt noktası ayırt edilebilmektedir.



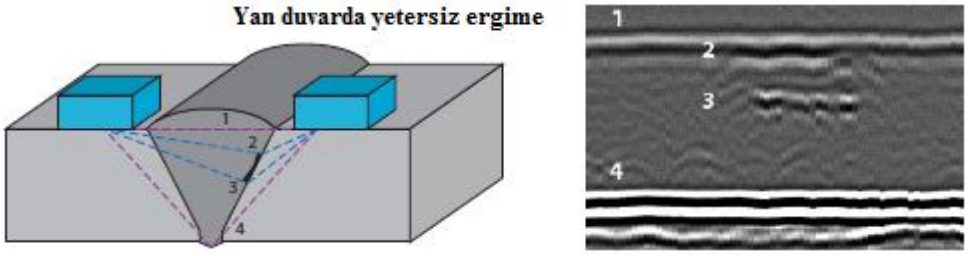
Şekil 6.21 : X kaynağında yetersiz kök nüfuziyetinin TOFD görüntüsü.

Şekil 6.22'de ise V kaynağında yetersiz kök nüfuziyeti görülmektedir. Arka duvardan yansıyan dalgalar bozulur ve arka yüzeyde bir kırılma şeklinde hata görülür.



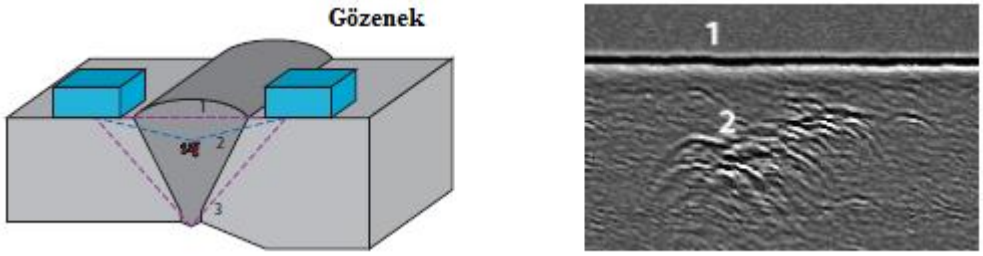
Şekil 6.22 : V kaynağında yetersiz kök nüfuziyetinin TOFD görüntüsü.

Şekil 6.23'te yan duvarda yetersiz ergime hatası ve ekran görüntüsü görülmektedir. Hata yan yüzeyde olduğundan yüzey dalgaları ve arka yüzeyden yansıyan dalgalarda herhangi bir bozulma görülmez. Dalgaların kırınımından hatanın alt noktası açıkça ayırt edilebilmekteyken üst noktası ise yüzey dalgalarının etkisiyle daha az belirgindir.



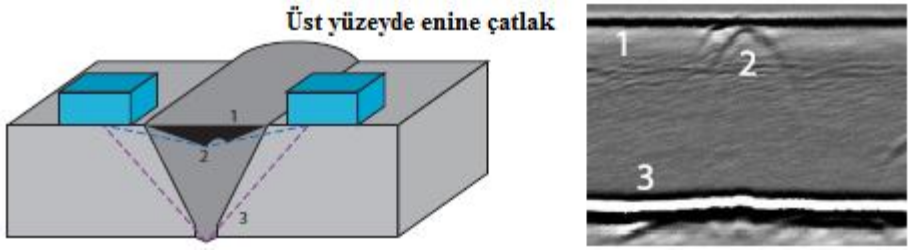
Şekil 6.23 : TOFD yönteminde yan duvarda yetersiz ergime görüntüsü.

Şekil 6.24'te kaynak bölgesinde bulunan gözeneklerin ekran görüntüsü verilmiştir. Gözeneklerin kaynak bölgesindeki konumlarının analiz edilmesi oldukça zordur, ancak kolaylıkla ayırt edilebilirler. Ayrıca gözeneklerin bulunduğu bölgede arka yüzeyden dalga yansıması gözükmez.



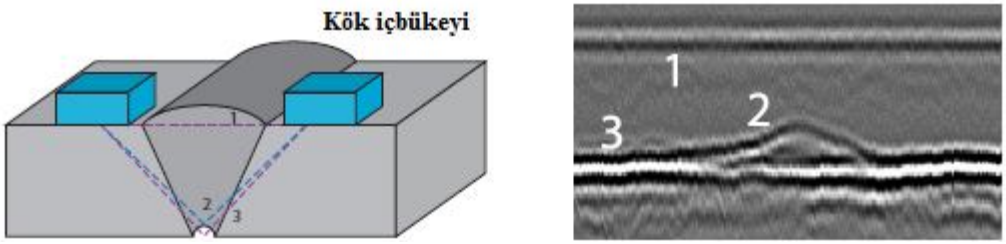
Şekil 6.24 : TOFD yönteminde gözenek görüntüsü.

Kaynak bölgesi üst yüzeyinde bulunan enine bir çatlağın görüntüsü şekil 6.25'te görülmektedir. Gözeneğe benzer olarak bir noktasal hata gibi ekranda görüntü verir.



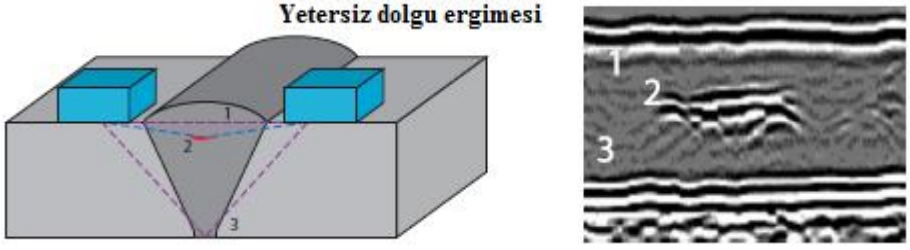
Şekil 6.25 : Üst yüzeyde enine çatlağın TOFD görüntüsü.

Şekil 6.26'da V kaynağında kök içbükeyi ve bunun ekran görüntüsü görülmektedir. Hata, arka yüzeyden yansıyan dalgalarda meydana gelen içbükey şeklindeki bozulma ile anlaşılır.



Şekil 6.26 : Kök içbükeyinin TOFD görüntüsü.

Şekil 6.27'de yetersiz dolgu ergimesi ve TOFD yöntemindeki ekran görüntüsü görülmektedir. Yüksek genlikte bir yansıma olarak ekranda görülür [30].



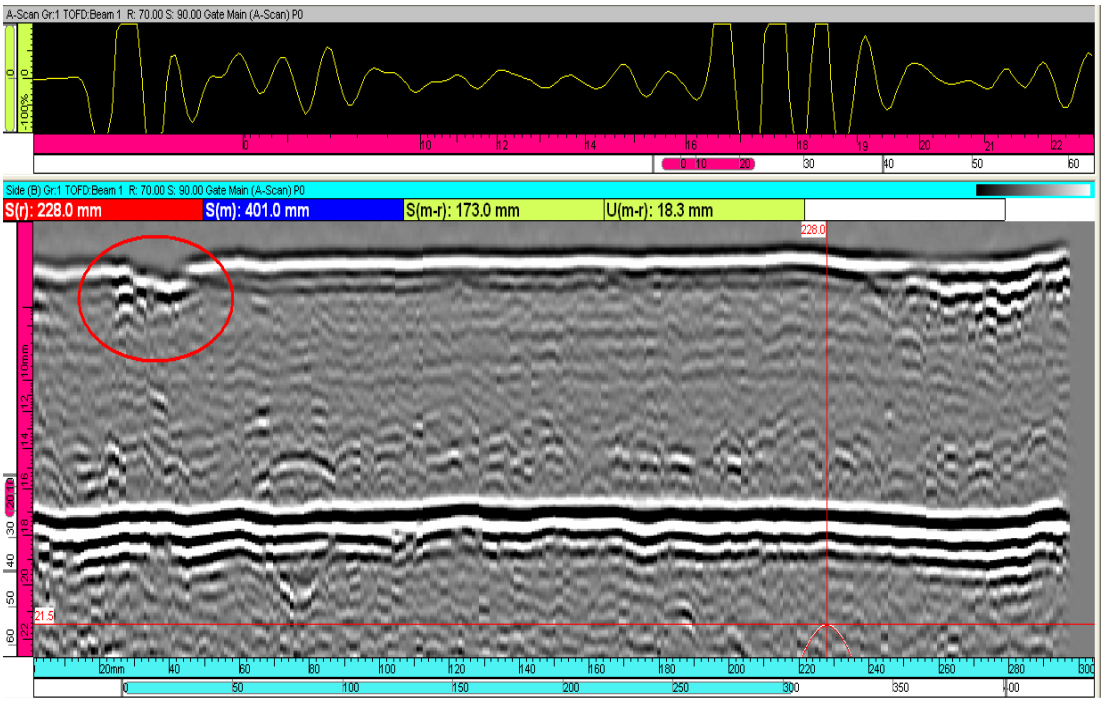
Şekil 6.27 : Yetersiz dolgu ergimesinin TOFD görüntüsü.

TOFD yöntemiyle muayene işleminde prob ve taban bloğu olarak şekil 6.28'de görülen 5 MHz frekanslı Olympus C568-SM probu ve taban bloğu olarak 70˚ kırılma açılı ST2-70L-IHC taban bloğu kullanılmıştır. Taban bloğu üzerinde malzeme ile taban bloğu arasında su veya temas sıvısı beslenmesi için nozullar bulunmaktadır.

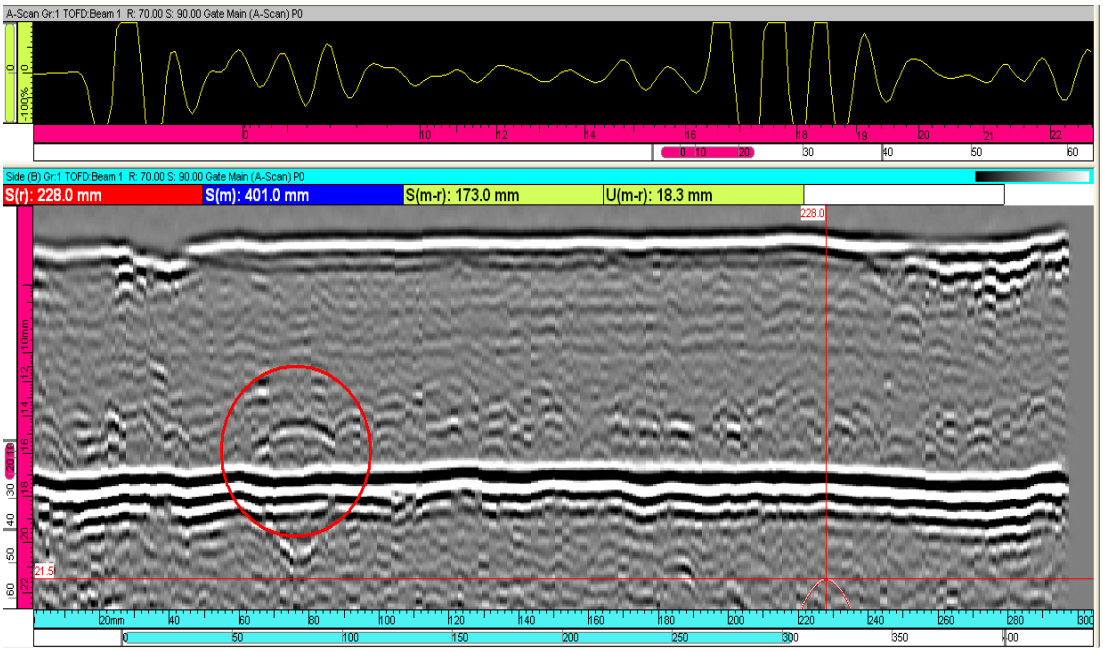


Şekil 6.28 : TOFD C568-SM probu ve taban bloğu.

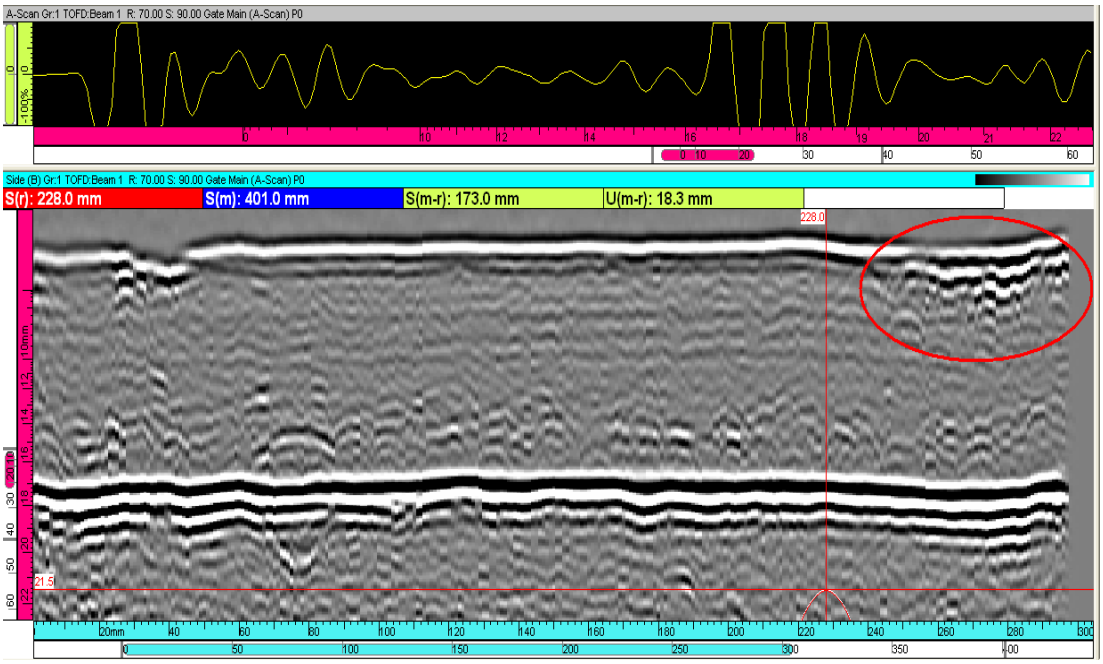
Muayene sonucunda kaynak bölgesinde bulunan hatalar ve ekran görüntüleri şekil 6.29, şekil 6.30 ve şekil 6.31'de gösterilmiştir. TOFD ekranında görülen hata karakteristiklerine göre; şekil 6.29'da görüldüğü gibi kaynak bölgesinin 22-48 mm aralığında çatlak olduğu tespit edilmiş, şekil 6.30'da görüldüğü gibi kaynak bölgesinin 64-88 mm aralığında yetersiz nüfuziyet ve şekil 6.31'de görüldüğü gibi kaynak bölgesinin 250-300 mm aralığında yetersiz dolgu ergimesi hatası tespit edilmiştir.



Şekil 6.29 : TOFD muayenesi sonucu çatlak görüntüsü.



Şekil 6.30 : TOFD muayenesi sonucu yetersiz nüfuziyet görüntüsü.



Şekil 6.31 : TOFD muayenesi sonucu yetersiz dolgu ergimesi görüntüsü.

Gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleriyle ikinci uygulama örneği phased array yöntemiyle şekil 6.32'de görüldüğü gibi 30,5 mm et kalınlığında X kaynağıyla birleştirilmiş bir depolama tankında uygulanmıştır.



Şekil 6.32 : Phased array yöntemiyle uygulama örneği.

Bu uygulamada phased array probu şekil 6.33'te görülen Olympus HSMT-Flex yarı otomatik tarayıcı arabayla gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın üzerine hem phased array hem de TOFD probları bağlanabilmekte ve uzaklık ayarı yapılabilmektedir. Alüminyumdan imal edilmiş şasesi sayesinde ağırlığı oldukça düşüktür ve mıknatıslı tekerlekleriyle çelik malzemeler üzerinde hareketi kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Cihazın ortasında bulunan eklem yapısı sayesinde farklı çaplardaki boruların ve yüzeylerin muayenesi cihazın tekerlekleri arasındaki açı ayarlanarak gerçekleştirilebilir. Muayene yapılacak malzeme üzerindeki hareket tutamaklar sayesinde elle manuel olarak sağlanmaktadır ancak özellikle ayar değiştirmeye gerek olmadan sürekli aynı tip malzemelerin kontrol edildiği seri muayene yapılan durumlarda tam otomatik arabalar da kullanılmaktadır. Bu arabaların hareketi motorla sağlanmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleri yarı otomatik veya tam otomatik tarama arabalarıyla gerçekleştirilir. Bu sayede probların uzaklık ayarı doğru bir şekilde ayarlanıp malzeme üzerinde hareketi sırasında bu aralığın korunması ve probların malzeme üzerinde kaldırılmadan yani hava boşluğuna müsaade edilmeden muayenenin tamamlanması sağlanmaktadır.



Şekil 6.33 : Yarı otomatik tarama arabası.

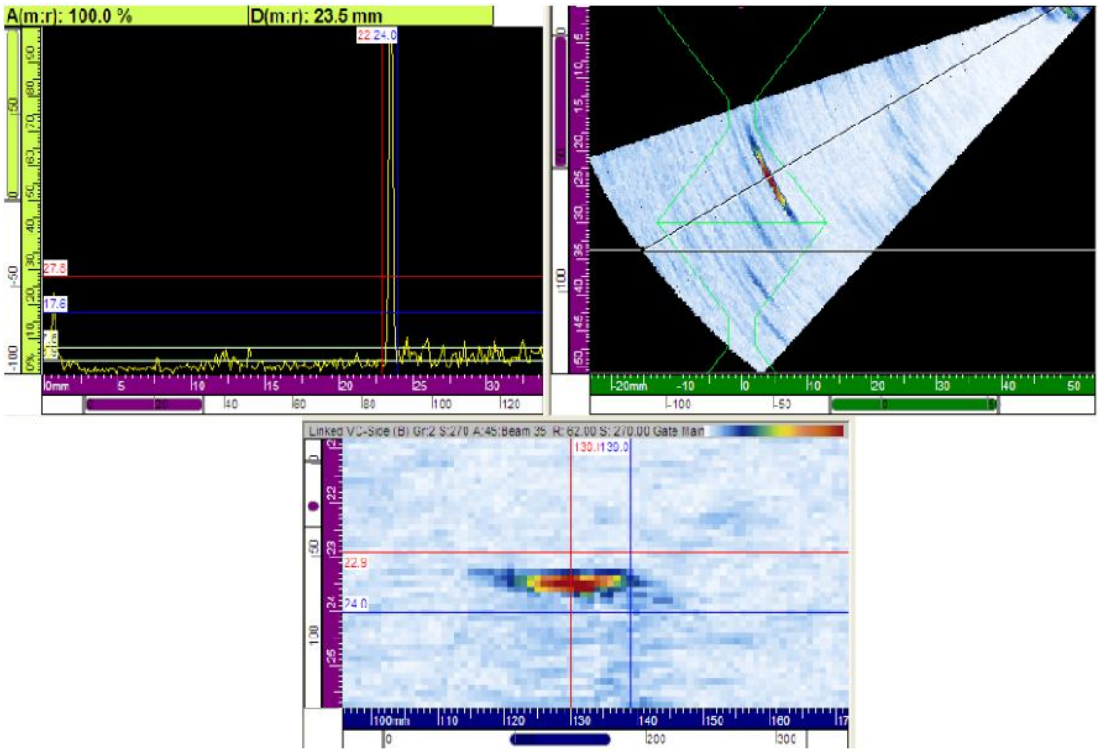
Phased array muayenesinde şekil 6.34'de görülen 5 MHz frekanslı 64 elemandan oluşan 5L64-A2 probu kullanılmıştır. Bu prob ile hem lineer hem sektörel tarama yapma imkânı vardır.



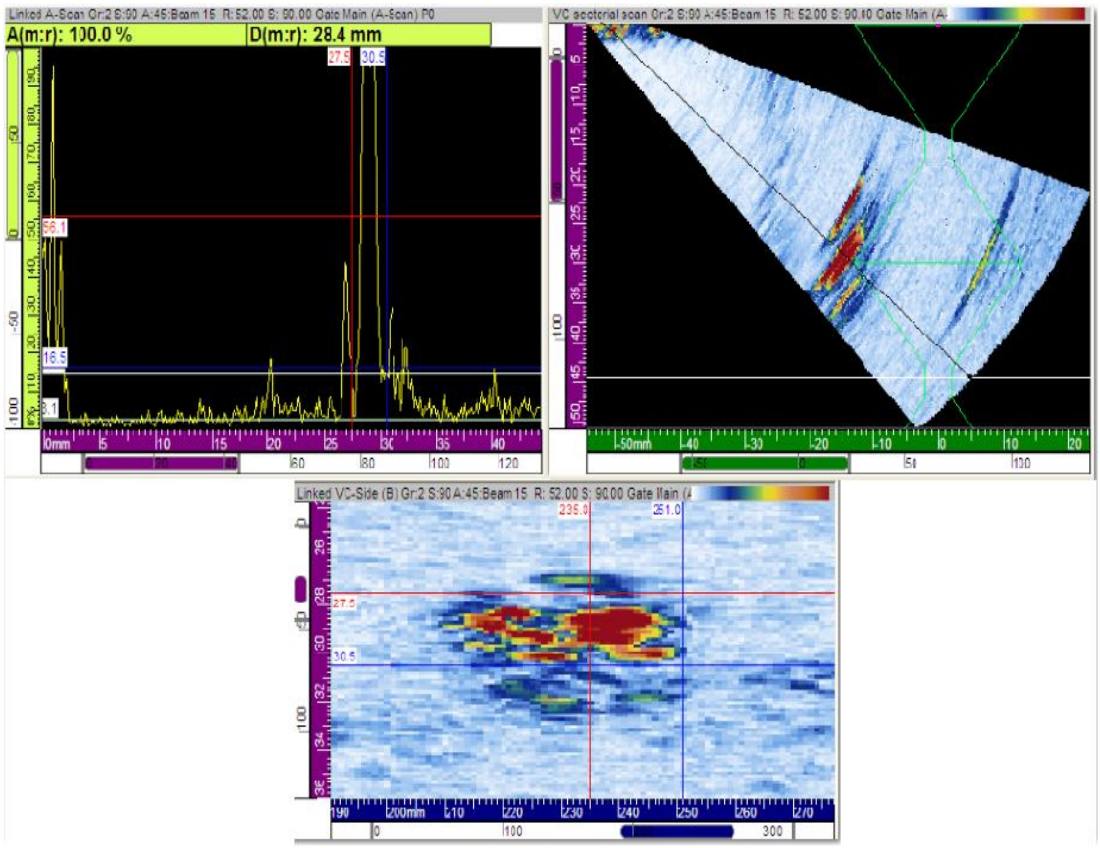
Şekil 6.34 : 5L64-A2 probu.

Phased array yönteminde de problar bir taban bloğu veya takozla beraber kullanılır. Bu sayede lineer bir probla belirlenen bir aralıktaki bütün açılar taranabilir, başka bir deyişle birçok konvansiyonel prob kullanılarak yapılması gereken bir muayene işlemi tek bir probla yapılabilir. Taban blokları sadece açılı taramalar için değil düz taramalar için de kullanılır, değiştirilen taban bloğu ile malzemenin hacmi düz olarak örneğin -30˚ ile +30˚ açı aralığında taranabilir. Prob taban bloğuna takılırken probdan çıkan ses demetinde kaybı önleyebilmek için ikisinin arasına bir temas sıvısı sürülmesi gerekir, çünkü test parçası ve taban bloğunun akustik empedansına göre havanın akustik empedansı çok düşük olduğundan dolayı ara bölgede kalabilecek hava tabakası ultrasonik dalgaların geçişine engel olacaktır. Bu temas sıvısı gres yağı veya gliserin gibi bir madde olabileceği gibi cihaz üretici firmalarının ürettiği solüsyonlar da kullanılmaktadır. Örnek uygulamada temas sıvısı olarak gliserin esaslı Olympus Couplant-B sıvısı kullanılmıştır. Taban bloğu olarak ise Olympus SA2-N55 taban bloğu kullanılmıştır. Farklı yüzey eğimleri ve boru çapları için taban blokları değiştirilmektedir, çünkü taban bloklarının içbükey açıları boru çapına göre farklı olup eğer taban bloğunun içbükey açısı daha küçükse taban bloğu ile muayene edilen malzeme arasında bir hava tabakası oluşabilir. SA2-N55 taban bloğu ile 30˚ ve 70˚ açı aralığının taranabilme imkanı vardır.

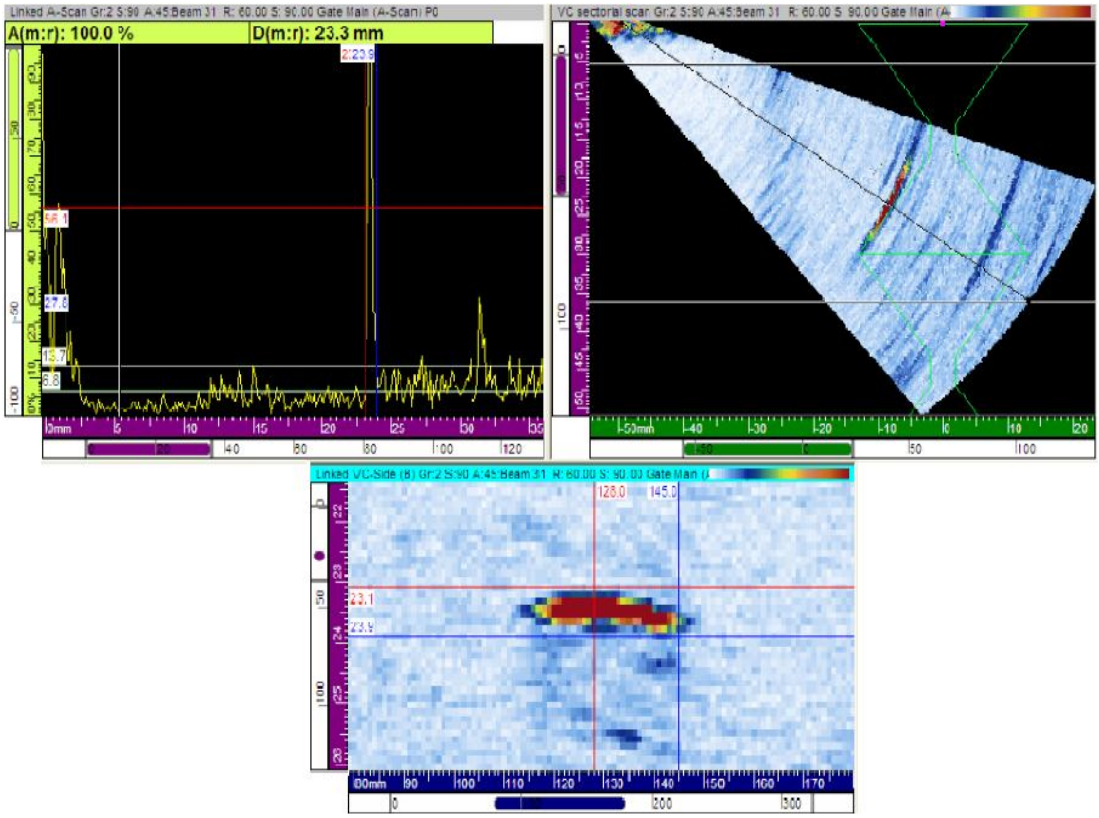
Muayene sonucunda malzemenin kaynak bölgesinde bulunan hatalar ve bunların phased array ekranında A-tarama, S-tarama ve B-tarama görüntüleri şekil 6.35, şekil 6.36 ve şekil 6.37'de görülmektedir. Bu sayede hatanın ayırt edilmesi üç boyutlu olarak konumlandırılması mümkündür. Şekil 6.35'te kaynak bölgesinde tespit edilen curufun ekran görüntüleri görülmektedir, muayene başlangıç noktasından 130-139 mm aralığında 22,9-24 mm derinliğinde olduğu tarama ekranlarında görülmektedir. Şekil 6.36'da 235-251 mm aralığında ve 27,5-30,5 mm derinliğinde tespit edilen çatlak görülmektedir. Şekil 6.37'de ise 128-145 mm aralığında ve 23,1-23,9 mm derinliğinde tespit edilen kaynak yan yüzeyindeki yetersiz ergime bölgesi görülmektedir.



Şekil 6.35 : PA muayenesinde curuf görüntüsü.



Şekil 6.36 : PA muayenesinde çatlak görüntüsü.



Şekil 6.37 : PA muayenesinde yan duvarda yetersiz ergime görüntüsü.

6.3 Konvansiyonel ve Gelişmiş Ultrasonik Muayene Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırması

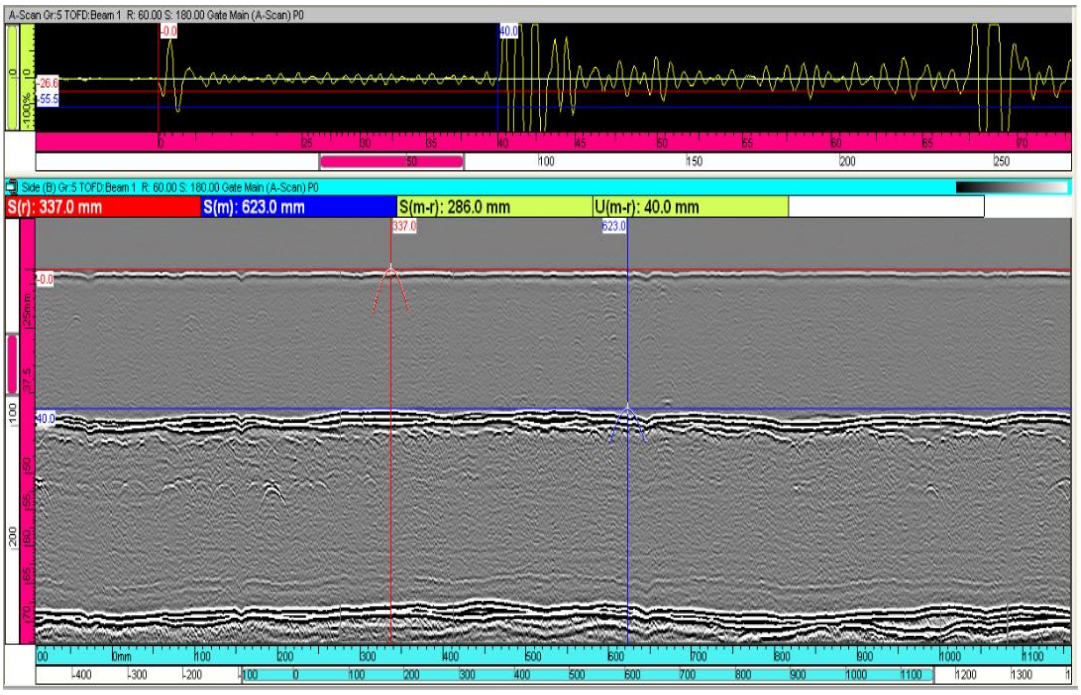
Şekil 6.38'de görülen 16 inç-schedule 160 borunun yani çapı 406,4 mm ve et kalınlığı 40,49 mm olan borunun kaynak bölgesi hem konvansiyonel hem de gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleri ile muayene edilmiştir.

Muayene sonucu ulaşılan phased array ve TOFD ekran görüntüleri şekil 6.39 ve şekil 6.40'ta verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi kaynak bölgesinde herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Konvansiyonel yöntemde öncelikle 45°-4 MHz probla daha sonra 70°-4 MHz'lik problarla ayrı ayrı kontrol yapılmıştır. İlk probla yapılan muayene sonucu hataya rastlanılmamasına rağmen ikinci defa farklı dereceli bir probla tekrar muayene yapılmıştır, bunun sebebi parçanın içinde muayene yapılan probla aynı açıda olan bir hatanın tespit edilememe olasılığıdır. Aynı zamanda konvansiyonel yöntemde probların kaynak bölgesini tamamen tarayabilmesi için sekme mesafesi boyunca probların hareket ettirilerek muayene işleminin tamamlanması gereklidir. Tüm bu etkenlerden dolayı konvansiyonel yöntemle bu

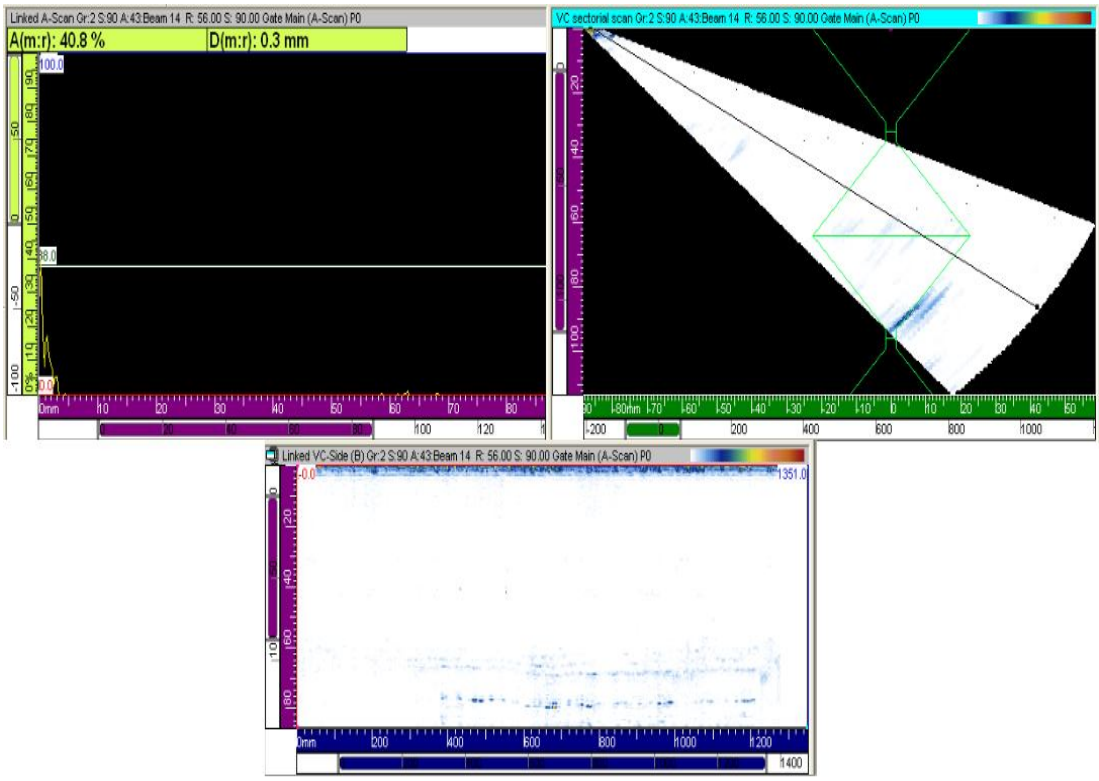
muayenenin tamamlanması 50 dakika sürmüş, oysa gelişmiş yöntemlerle muayene yarı otomatik tarayıcı arabanın da etkisiyle 5 dakikada tamamlanmıştır.



Şekil 6.38 : 16"-schedule 160 borunun ultrasonik muayenesi.



Şekil 6.39 : 16"-schedule 160 borunun TOFD muayene görüntüsü.



Şekil 6.40 : 16"-schedule 160 borunun phased array muayene görüntüsü.

Ayrıca muayene sonuçları gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinde ekran görüntüleriyle beraber rapor olarak hazırlanabilir, ancak konvansiyonel yöntemde böyle bir imkan yoktur ve nihai kullanıcı için istenmeyen bir durum ortaya çıkar. Aynı zamanda bu durum operatöre olan bağımlılığı da arttırmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Konvansiyonel ultrasonik muayene yöntemiyle kaynakla birleştirilmiş iki plakanın kaynak bölgesindeki süreksizlik şekil 6.7 ve şekil 6.8'de görüldüğü gibi tespit edilmiştir. İkinci olaraksa yine konvansiyonel ultrasonik muayene yöntemiyle kaynak bölgesinde bulunan hataya göre 45° ve 60°'lik problarla test yapılmış ve şekil 6.11'de görüldüğü gibi yetersiz ergime bölgesine dik ve eğik olarak gelen ses demetlerindeki farklılık gösterilmiştir. Böylece konvansiyonel yöntemle hatanın ve konumunun tespit edilmesi için en az iki farklı açıda probla muayene yapılması gerektiği görülmüştür.

Gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinden ilk olarak TOFD yöntemiyle kaynakla birleştirilmiş iki plakanın kaynak bölgesi incelenmiş ve bulunan kaynak hataları, hata tipleri ve konumları şekil 6.29, şekil 6.30 ve şekil 6.31'de gösterilmiştir. Bulunan hatalar muayene cihazının ekranından kolayca okunabilmekte ve hataların konumları tespit edilebilmektedir.

Phased array yöntemiyle ise bir tankın kaynak bölgesi muayene edilmiş ve bulunan kaynak hataları, hata tipleri ve konumları şekil 6.35, şekil 6.36 ve şekil 6.37'de gösterilmiştir.

Son uygulama örneği olaraksa konvansiyonel ve gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi için 16 inç çapında bir borunun kaynak bölgesi muayene edilmiştir. Kaynak sonrası bulunan ekran görüntüleri şekil 6.39 ve 6.40'da verilmiştir. Muayene işleminin tamamlanma süreleri karşılaştırılmış, kaynak bölgesinde hata bulunmamasına rağmen yaşanabilecek olumsuzlar incelenmiştir.

Gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleri konvansiyonel yönteme göre çok daha hızlı sonuç vermektedir, çünkü muayene tek bir prob hareketiyle gerçekleşebilmekte, phased array yönteminde taban bloklarıyla geniş bir tarama açısında tek seferde dalga gönderilebilmekte, TOFD yönteminde ise geniş ses dalgaları muayene yapılacak bölgeyi tamamen kapsayarak bir hataya çarptıklarında yeni bir dalga kaynağı gibi davranıp alıcı proba bilgileri ulaştırmaktadır. Konvansiyonel yöntemde

ise hatanın tespit edilebilmesi için birden fazla probla muayene işlemi yapılmalıdır, aksi halde uygun açı yakalanamadığı zaman hata tespit edilemez.

Gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinde konvansiyonel yöntemdekine göre hataların cihaz ekranı üzerinde tespiti ve konumlandırılması çok daha kolaydır. Phased array yönteminde B-tarama, C-tarama ve S-tarama ekranlarıyla beraber daha ayırt edilebilir görüntü alınabilir ve muayene bölgesinin üç boyutlu olarak taranmasıyla daha sağlıklı sonuçlara ulaşılabilmektedir. TOFD ekranında ise özel gri tonlamalı B-tarama ekranla muayene edilen bölgenin kesit görünüşü ekran üzerine aktarılır ve tipik hataların görüntü karakteristiklerinden hatanın tespiti ve konumlandırılması gerçekleştirilir. Oysa konvansiyonel yöntemde sadece osiloskop sinyalleri görülmekte ve hataların bulunması ancak tecrübeli ve iyi eğitimli bir operatöre bağlı olmaktadır.

Konvansiyonel ultrasonik muayene yönteminde kullanılan problar tek bir piezoelektrik eleman içerdiğinden muayene işlemi esnasında tüm muayene bölgesinin taranması için sekme mesafesi aralığında gezdirilmelidir. TOFD yönteminde problar tüm muayene bölgesini kapsayacak şekilde konumlandırılmakta, phased array yönteminde ise problar birden çok daha fazla eleman içermelerinden dolayı belirlenen bir açı aralığı lineer ya da sektörel olarak tamamen taranabilmekte, böylece muayene çok daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Ayrıca gerektiğinde hatanın, yanında bulunan süreksizliklerden daha kolay ayırt edilebilmesi için odaklanma da sağlanabilir.

Gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin en büyük üstünlüklerinden biri de verilerin saklanabilmesidir. Böylece hatanın izlenebilirliği ve ilerlemesinin takip edilebilmesi sağlanır. Konvansiyonel yöntemde ise kayıtlar manuel olarak kaydedilir ve operatörden operatöre sonuçlarda bir takım farklılıklar görülebilir, böylece operatör inisiyatifi ve operatöre olan bağımlılık en aza indirgenmiş olur.

Yapılan bu çalışmada gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleri ve konvansiyonel ultrasonik muayene yöntemi ayrı ayrı ve karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlarla gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin konvansiyonel ultrasonik muayeneye göre endüstriyel uygulamalar için çok büyük avantajlar sağladığı görülmüştür. İmalat yöntemlerinin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaşmasıyla gelişmiş ultrasonik muayene yöntemlerinin en büyük dezavantajı

olan ilk yatırım maliyetlerinin azalması beklenmektedir. Sonuçların çok daha hızlı, çok daha hassas ve çok daha kolay alınabilmesi ve elde edilen bilgilerin saklanmasıyla gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleri her geçen gün endüstrideki yerini arttıracaktır.

KAYNAKLAR

[1] **Tekiz, Y.** (1978). Tahribatsız muayene, İstanbul Teknik Üniversitesi

[2] **Hellier, J.B.** (2003). Handbook of nondestructive evaluation, The McGraw-Hill Companies, USA.

[3] **Raj, B., Jayakumar, T. ve Thavasimuthu, M.** (2002). Practical Non-Destructive Testing, Second Edition, Sf.77.

[4] **Kakani, S.L. ve Kakani, A.** (2006). Material Science, 259-260.

[5] **Nayar, A.** (2008). Testing of Metals, 88.

[6] **U.S. Department of Transportation: Federal Aviation Administration**, Aviation Maintenance Technician's Handbook FAA-H-8083-30, 8-19

[7] **Rajendran, V.** (2009). Engineering Physics, 6.2.

[8] **Nelligan, T.** Ultrasonic Material Analysis. Alındığı tarih:21.02.2013, adres: http://www.olympus-ims.com/en/applications-and-solutions/introductory-ultrasonics/introduction-material-analysis/

[9] **Blitz, J. ve Simpson, G.** (1996). Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing, Cambridge University, London, UK.

[10] **TSE** (2006). Tahribatsız Muayene Laboratuvarı, Ultrasonik Muayene 3.Seviye Notları Rev.00/2006, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[11] **Olympus** (2011). Ultrasonic Transducers Technical Notes, Olympus NDT Inc., Houston, USA.

[12] **The Hashemite University**, Introduction to non-destructive testing techniques-ultrasonic testing, The Hashemite University NDT Center, Zarqa, Jordan.

[13] **Berke, M. ve Hoppenkamps, U.** (1990). Testing materials ultrasonically, Krautkrämer Training System, Level 1, 3rd Edition, Krautkrämer GmbH & Co., Huerth, Germany.

[14] **Berke, M. ve Hoppenkamps, U.** (1992). Practical training with digital ultrasonic instruments, Krautkrämer Training System, Part 4, 3rd Edition, Krautkrämer GmbH & Co., Huerth, Germany.

[15] **MEGEP523EO0212** (2010). Ultrasonda görüntüleme arızaları, *T.C. Milli Eğitim Bakanlığı*, Ankara.

[16] **MEGEP525MT0004** (2012). Uçaklarda tahribatsız muayene, *T.C. Milli Eğitim Bakanlığı*, Ankara.

[17] **Tekkon** (2004). Ultrasonik muayene seviye-II eğitim notları, *Tekkon Teknoloji ve Kontrol Ltd. Şti.,* Ankara.

[18] **Anık, S., Tülbentçi, K. ve Kaluç, E.** (1991). Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı, Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, İstanbul.

[19] **Gür, C.H.** (2008). Tahribatsız muayene personelinin ASNT sistemine göre eğitimi ve belgelendirilmesi, *ASNT Türkiye Birimi,* Ankara.

[20] **Dunlap, W.L.** (1996). Recent advances in piezocomposite materials for ultrasonic transducers, G.E. Inspection Technology, Lewistown, PA, USA.

[21] **Meyer, P.A.** (1995). The evolution of a piezocomposite transducer design, Canadian Society for Nondestructive Testing, Ontario, Canada.

[22] **Erhards, A., Wüstenberg, H., Schenk, G. ve Möhrle, W.** (1995). Calculation and Construction of Phased Array UT Probes, Proceedings 3rd German-Japanese Joint Seminar on Research of Structural Strength and NDE Problems in Nuclear Engineering, Germany.

[23] **Oakley, C.** (1991). Analysis and development of piezoelectric composites for medical ultrasound transducer applications, Ph.D. thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.

[24] **American Society for Nondestructive Testing** (1991). Nondestructive Testing Handbook 2nd ed., vol. 7, Ultrasonic Testing.

[25] **Krautkramer, J. ve Krautkramer, H.** (1990). Ultrasonic Testing of Materials 4th rev. ed., Berlin; New York: Springer-Verlag.

[26] **Gan, W.S.** (2012). Acoustical imaging: techniques and applications for engineers.

[27] **Olympus** (2007). Adcances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications, Olympus NDT Inc., MA.

[28] **Kawanami, S., Kurokawa, M., Taniguchi, M. ve Tada, Y.** (2001). Development of Phased-Array Ultrasonic Testing Probe, *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol.38 No.3,* Japan.

[29] **Url-1** <*http://www.dqe.com.tr/tahribatsiz-002.php*>, alındığı tarih: 19.03.2013.

[30] **Olympus** (2007). Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline, Olympus NDT Inc., MA.

[31] **Prabhakaran, K.G., Wong, B.S. ve Teng, Y.Y.** (2004). Time of Flight Diffraction-An Alternate Non-Destructive Testing Procedure to Replace Traditional Methods, *The 3rd International Conf. on Experimental Mechanics, 29 Kasım-01 Aralık 2004,* Singapore.

[32] **Geus, S.J., Dijkstra, F.H. ve Bouma, T.** (2000). Advances in TOFD Inspection, 15th WCNDT, Roma.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Melkan Çelik

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmit, 06.08.1981

E-Posta: melkanc@hotmail.com

Lisans: Kocaeli Üniversitesi Makina Mühendisliği (2003)