

1. ULTRASONİK MUAYENE

1.1. Temel İlkeler

Ultrasonik dalgalarının malzeme içerisine; ultrasonik dalga üretebilme ve dalgaları algılayabilme özelliğine sahip olan “**PROB**” aracılığı ile bir (huzme) demet halinde gönderilmesi ve malzemenin iç yapısına bağlı olarak değişimlere uğrayan dalga demetinin malzemeden çıktığı anda kullanılan prob veya başka bir prob aracılığı ile alınarak değişimlerin saptanmasına “**Ultrasonik Muayene**” denir. **Hertz** ; saniye başına düşen devir sayısını (frekansı) ifade eder. 1 Hertz saniyede bir devir veya 1 MHz saniye başına bir milyon (1,000,000/s) devir şeklinde tanımlanır. **1MHz** (10^6 Hz) veya giga hertz **GHz** (10^9 Hz) olarak ifade edilir. ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$) Ultrasonik muayene yöntemi insan kulağının duyacağı (**20 Hz ile 20 kHz**) seviyeden bir hayli yüksek (**0.1 ile 25 MHz**) frekansta olan ses dalgaları ile yapılmaktadır. Bu dalgalara bu nedenle “**ultrasonik dalgalar veya ses ötesi dalgalar**” adı verilmiştir. Frekans (**f**), dalga boyu (**λ**) ve ses hızı (**C**) arasında **$f \cdot \lambda = C$** bağıntısı vardır. Ultrasonik dalgalar ara yüzeylerden kuvvetle yansır. Çatlaklar, ince tabaka toplanmaları, büzülmeler, çukurlar, boşluklar, gözenekli kısımlar ve iç yapıda sürekliliği bozan yapılar (süreksizlikler) ara yüzey oluşturdıklarından kolaylıkla incelenebilmektedir. Ultrasonik muayene, tahribatsız muayene yöntemlerinden en geniş uygulama alanına sahip olanıdır. Ultrasonik yöntemle yapılabilen incelemeler ve ölçmeler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

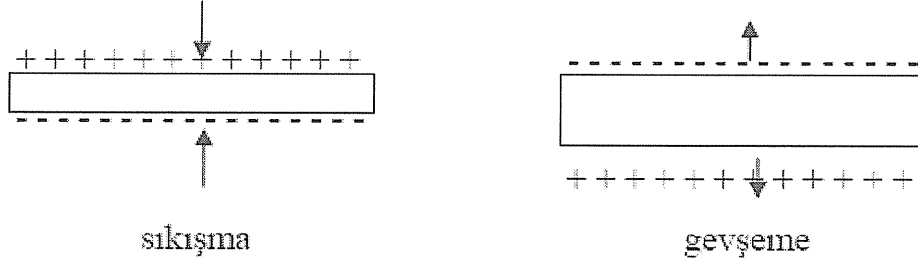
- Boy ve kalınlık ölçümleri (ultrasonik termometre, tankları v.b. kalınlığının ölçülmesi)
- Yüzey sertliği ölçümü
- Elastiki katsayıların tayini (elastiklik modülü, poisson oranı)
- Metalurjik yapının kontrolü (tane boyutu, yönlenme dercesi, mikroskopik hatalar, ayrılmış fazlar, inklüzyonlar, soğuk işlem derecesi...)
- İç gerilmelerin tayini
- Kalıp kumunda nem oranı tayini
- Beton kalitesinin tayini
- Mühendislik malzemelerinde süreksizliklerin (hataların) kontrolü
- Tıpta iç organların muayenesi
- Büyükbaş hayvanlarda deri altındaki yağ tabakası kalınlığının tayini
- Deniz altı sonar sistemleri
- Görme engelliler için klavuz aletler
- Uzaktan kumanda aletlerinin yapımı
- Ultrasonik kaynak yapımı
- Ultrasonik temizleme işlemlerinin uygulanması.

2. Ultrasonik Dalgaların Üretimi

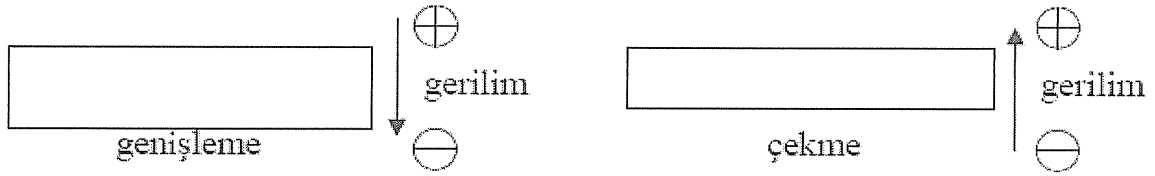
Ses üretimi titreşim enerjisi üretmek demektir. Bir teli, bir zarı veya hava moleküllerini titreştirmek günlük hayattan bildiğimiz ses üretimi yöntemleridir. Bütün ses üretim araçları bu yöntemlerden biriyle çalışır.

Ultrasonik dalgaların üretiminde ve algılanmasında “prob veya transduser” adı verilen düzenekler kullanılır. Probların yapımında çoğu zaman “piezoelektrik” özelliğe sahip kristaller kullanılır. Piezoelektrite yüksek frekanslarda enerji üretimine uygun tek temel olaydır. Bu yüzden ultrasonik muayenede genellikle Piezoelektrik kristaller kullanılır. Piezoelektrik etki gösteren bazı malzemeler şunlardır: Kuvartz (SiO_2), Lityum sülfat (LiSO_4) Baryum titanat (BaTiO_3), Kurşun zirkonat titanat, Rochelle tuzu. Ultrasonik muayenede en çok kullanılan Baryum titanat seramiğidir.

Bu tür kristaller belirli yönlerde basma yada çekme kuvvetine maruz kaldıklarında elastik deformasyonla birlikte yüzeylerinde eksi yada artı elektriksel yüklenme oluşur. Bu olaya piezoelektrik olay denir. Diğer taraftan bu kristallere belirli frekanslarda elektriki gerilim uygulandığında o frekansta boyut değişimi (titreşim) yaparlar (ters piezoelektrik olay) Şekil 1, Şekil 2.



Şekil 1. Doğrudan piezoelektrik olayı



Piezoelektrik etki ile üretilen titreşimlerin malzeme içerisine gönderilebilmesi için prob doğrudan veya dolaylı olarak muayene yüzeyi ile temas etmelidir. Prob (transdüser), bir enerjiyi başka bir enerji sekline dönüştüren bir düzendir. Ultrasonik transdüserler, elektrik enerjisini ultrasonik enerjiye (yani mekanik enerjiye) ve ultrasonik enerjiyi de elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu olaydan da titreşimlerin algılanmasında (alıcı prob yapımında) yararlanılır. Yani doğrudan piezoelektrik olay ultrasonik dalgaları algılamada, ters piezoelektrik olay ise ultrasonik dalgaları üretmede kullanılır.

Verici probdaki piezoelektrik kristalde elektrik titreşimlerinin mekanik titreşimlere dönüştürülmesi üretilen ultrasonik dalgalar malzeme içinde yayılırken farklı akustik özellikteki bölgelerin ara yüzeylerinden kısmen geçer veya yansır. Böylece alıcı proba gelen dalgalar probun piezoelektrik kristali tarafından tekrar elektrik titreşimlere dönüştürülür. Daha sonra ultrason cihazının ekranında elde edilen görüntüler ile parçada bulunan hatalar belirlenir.

2.1. Ultrasonik Muayene Problemleri ve Yapıları

Ultrasonik probu elektrik enerjisinin ultrasonik enerjiye dönüştüğü veya bunun tersinin yapıldığı yerdir. Bir ultrasonik cihazı devresinde ultrasonik enerjisi, devrenin en uç elemanı olan probda üretilir. Buradan muayene olunacak malzeme içine gönderilir ve gelen yankı yine bu elemanda ultrasonik enerjiden elektrik enerjisine çevrilir.

Aşağıda muayene problemlerinin kesit görüntüleri Şekil 3.'de verilmiştir

2.1.1. Normal Prob

Yüzey girişine dik bir şekilde ultrasonik titreşimler yayar .Darbe-yankı metodunda alıcı-verici, iletim usulünde ise alıcı veya verici olarak çalışırlar. Prob numune içersine boyuna dalgalar göndererek arka yüzeyden ve çatlaktan dönen dalgalar ile malzeme muayenesi yapılır.

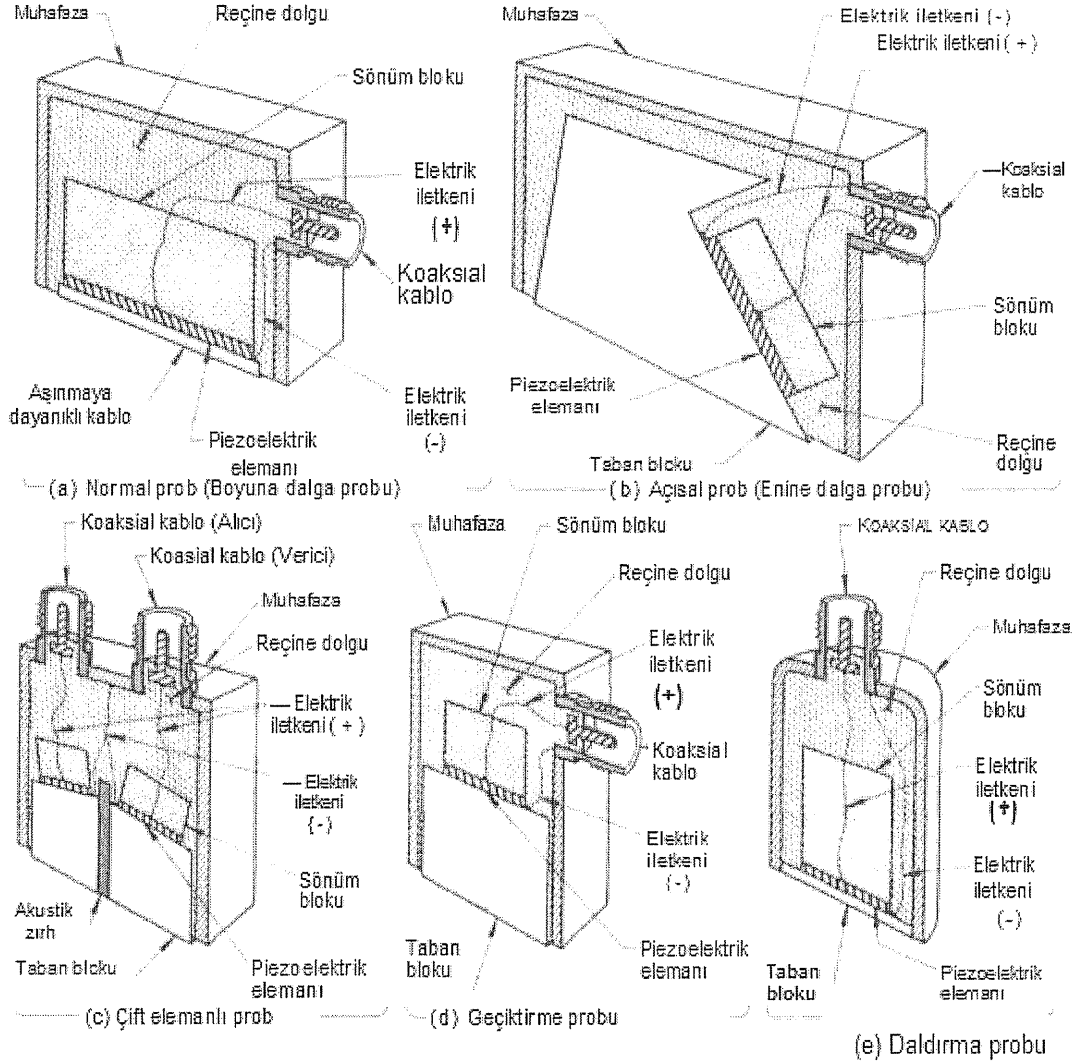
2.1.2. Açılı Prob

Açılı problarda sönüm bloku piezoelektrik elemanı ve temas yüzeyi arasında sabit bir açı vardır. Açılı problemler enine dalga üretirler.Özellikle kaynak dikişlerinin muayenesinde

kullanılırlar.Örneğin; levha, ince tabaka, boru kaynağı ile tüplerin muayenesinde kullanılmaktadırlar.

2.1.3. Çift Kristalli Prob

Çift elemanlı problarda elemanları birisi verici diğeri ise alıcı olarak çalışır. Özellikle yüzeye yakın hataların incelenmesinde kullanılırlar. Boyuna dalga üretirler ve algılarlar



Şekil 3. Çeşitli probların yapılarının şematik gösterimi.

2.1.4. Geciktirme Probu

Geciktirme problarının en önemli uygulama alanları; kalınlık ölçümü, ince malzemelerde ve yüzeye yakın hataların yüksek hassasiyetle incelenmesinde kullanılırlar. Bu problarda probun algılama yapamadığı yüzeye yakın ölü bölge probun içine alınmıştır.

2.1.5. Daldırma Probu

Su ortamında (parça ve prob suya daldırılarak) kullanılan problardır. Hızlı muayeneye olanak verirler. Probun sızdırmaz olması önemlidir.

2.2. Prob Seçimi

Prob seçiminde; demet yönü, frekans ve kristal boyutu göz önüne alınır. Demet yönü seçiminde, önce normal veya açılı problardan birine karar verilir. Açılı prob kullanıldığında prob açısı hatadan maksimum yansıma elde edilecek şekilde seçilir; yani, beklenen hataya ses demetinin dik olarak çarpması düşünülür. Bunun için kaynak dikişlerinin muayenesinde açılı

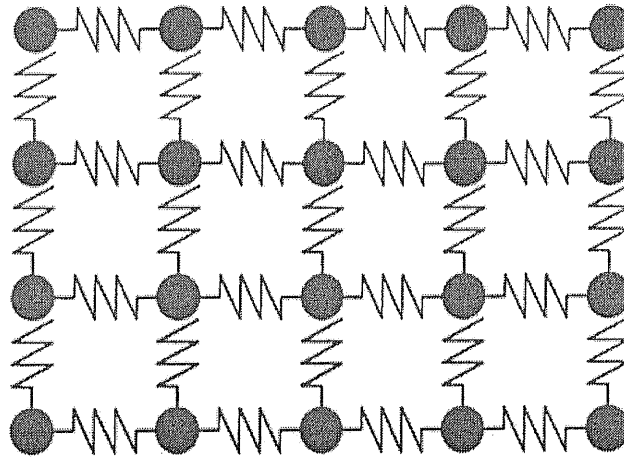
prob tercih edilir. Frekans seçiminde, malzeme kalınlığı ve metalurjik yapı ile görülebilecek en küçük hata boyutu göz önüne alınır. Mümkün mertebe yüksek frekans ile çalışmak, hem daha küçük hataların algılanmasını sağlar hem de ayırma gücünü iyileştirir. Frekans seçiminde asıl belirleyici faktör malzemenin tane boyutudur. Tane boyutu büyüdükçe artan, saçılma ve soğurulmayı azaltmak için düşük frekansları seçmek gerekmektedir. Ayrıca, malzeme kalınlığı arttıkça frekans düşürülmelidir. Yüksek frekans, kaba taneli malzemede saçılmaya ve ekranda gürültü veya çimlenme denilen sinyallerin oluşmasına neden olur.

Sonuç olarak, malzemenin yapısı müsaade ettiği sürece, mümkün olan en yüksek frekans kullanılmalıdır. Kristal boyutu seçiminde yakın alan uzunluğu ve eğri yüzeyli malzemelerde temas yüzdesi göz önüne alınır. Prob çapı küçüldükçe yakın alan kısalmaktadır. Yakın alan içerisinde merkez demetin ses enerjisi karmaşık bir değişim gösterdiğinden, hataların uzak alanda değerlendirilmesi arzu edilir. Malzeme türüne göre prob frekansları aşağıda verilmiştir.

Malzeme	Frekans(MHz)
Özel işler ve uçak sanayi	6-15
İnce taneli çelikler	2-6
Dökme çelik	1-2
Dökme demir	0,5-1
Porselen izolatör	0,05-0,02
Beton	0,05-0,2
Ağaç	0,05

2.3. Ultrasonik Dalga Çeşitleri ve Özellikleri

Katı bir maddenin yapısı Şekil 4’de gösterilen basit modelle tanımlanabilir. Bu modele göre parçacıklar (atomlar veya moleküller) birbirlerine elastik yaylarla (enerji bağları) bağlıdır. Sıvı ve gazlarda parçacıklar arasındaki bağlar daha zayıftır ve parçacıkların hareketleri katılardakine oranla daha serbesttir. Böyle ortamlarda yoğunlukta meydana gelen değişimler birbirine karşı koyan elastik kuvvetlere neden olur ve ses dalgalarını iletirler.

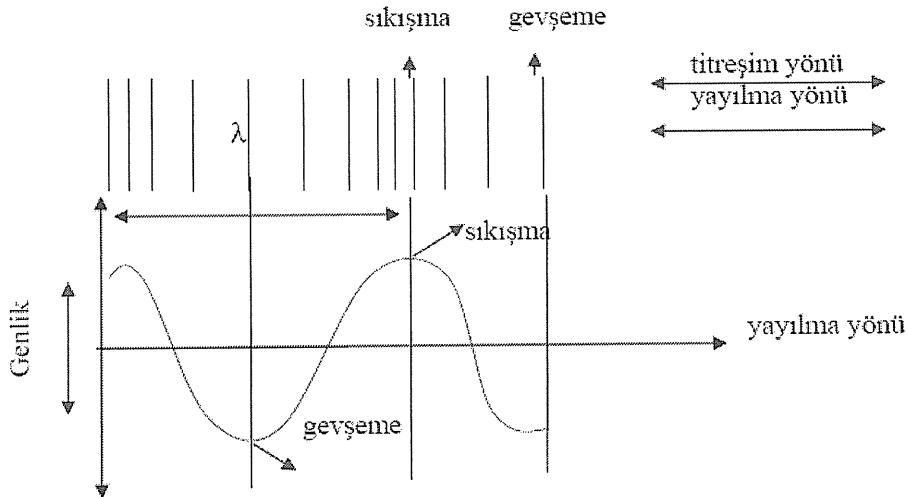


Şekil 4. Katı bir malzemenin iki boyutlu (düzlemsel) modeli

Malzeme içinde oluşan ultrasonik dalga çeşitlerinin en önemlileri, ortam parçacıklarının titreşim sekline ve yayılma yönüne göre boyuna, enine, yüzey (Rayleigh) dalgaları olmak üzere üç gruba ayrılır.

2.3.1. Boyuna Dalgalar

Boyuna dalgalara basınç dalgaları da denir. Bu dalga türü yayıldığı ortamın parçacıklarını sıkışmaya ve gevşemeye zorlayarak hareket eder ve yayılma yönü titreşim yönü ile aynı, yani paraleldir. Boyuna dalga hızı C_b ile gösterilir

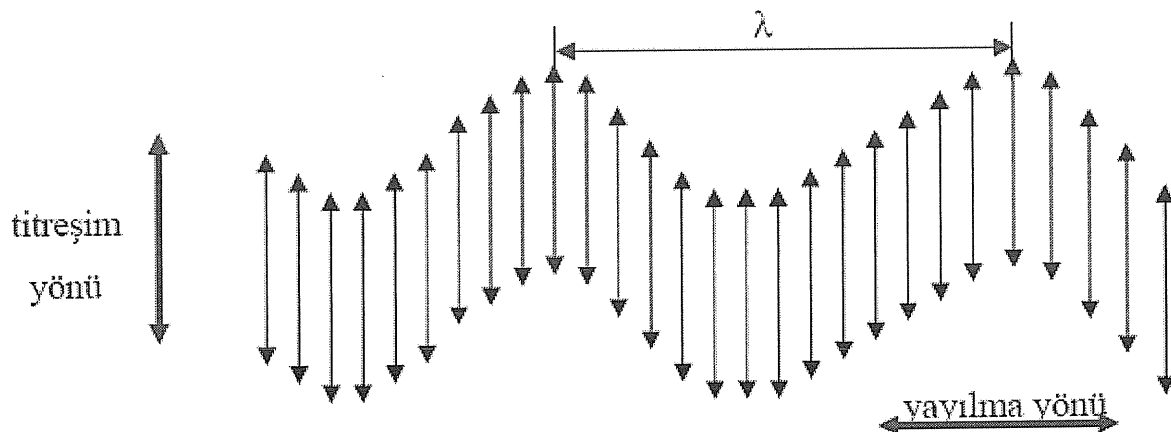


Şekil 5 : Boyuna dalgaının mesafeye bağlı olarak yer değişimi

Şekil 5’de şematik olarak boyuna dalga ve mesafeye bağlı olarak yer değişimi gösterilmektedir. Üretimlerinin ve algılanmalarının kolay olmasından dolayı, boyuna dalgalar ultrasonik testte en çok kullanılan dalgalardır. Boyuna dalgalar katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılabilirler.

2.3.2. Enine Dalgalar

Titreşim yönü yayılma yönüne dik olduğundan dolayı, enine dalgalara kesme dalgaları da denir. Enine dalgalar, şematik olarak Şekil 6'da gösterilmiştir. Enine dalgalar, yayıldıkları ortam parçacıklarını çapraz yönde çekmeye zorlarlar ve bu yüzden sadece katılarda yayılabilirler. Sıvı ve gazlarda moleküller veya atomlar arası mesafe katılara göre çok büyük olduğundan, bunlar arasındaki çekme kuvveti, birinin diğerini hareket ettirmesi için yeterli gelmemekte ve dalga hızla zayıflamaktadır. Enine dalga hızı ($C_e = C_b/2$), boyuna dalga hızının yaklaşık yarısıdır.



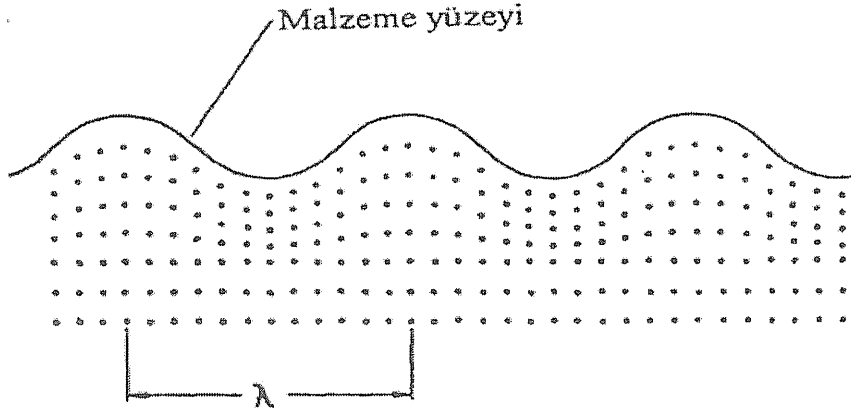
Şekil 6: Enine dalga

2.3.3.Yüzey dalgaları

Rayleigh dalgaları da denir. Bu dalga türü, sadece malzeme yüzeyinde yayılabilmektedir. Yüzey dalgalarının hızı, aynı malzemede enine dalgaları hızının yaklaşık %90'ıdır ve malzeme yüzeyinden en fazla 1 dalga boyu derinlikte yayılabilirler. (Çelikte $C_v = 0,92 C_e$ 'dir.) Bu derinlikte, dalganın enerjisi yüzeydeki enerjisinin yaklaşık yüzde

dördüdür ve genlik, daha fazla derine inildiğinde çok küçük bir değere düşer. Yüzey dalgalarını, boyuna dalgaları malzeme yüzeyine belli bir kritik açı altında göndererek üretmek mümkündür. Bu, enine dalgaların malzeme içinde 90° kırılmasıyla sağlanır. Örnek olarak, çelikte yüzey dalgalarını üretmek için pleksiglas bir bloktan 57° geniş açısıyla boyuna dalgaları göndermek yeterlidir.

Yüzey veya yüzeye yakın çatlakların tespitinde yüzey dalgaları enine ve boyuna dalgalara göre daha kullanışlıdır. Karmaşık şekilli malzemelerin yüzey testinde kullanılabilirler.



Şekil 7. Yüzey dalgaları

2.4. Akustik Empedans

Bir malzemede ultrasonik dalgaların yayılmasına karşı gösterilen dirence akustik empedans denir. Z harfi ile gösterilen akustik empedans, malzemedeki ultrasonik dalga hızı ile malzeme yoğunluğunun (ρ) çarpımına eşittir.

$$Z = \rho \cdot C \text{ [kg / m}^2 \text{ s]}$$

2.4.1. Akustik Basınç ve Şiddet

Akustik basınç, bir ultrasonik dalga tarafından malzemeye uygulanan değişken gerilmelerin genliğini ifade etmek için kullanılan terimdir. Akustik basınç, aşağıdaki bağıntı ile verilir .

$$P = Z a$$

Burada; P : Akustik basınç Z : Akustik empedans

a : Parçacık titreşiminin genliğidir.

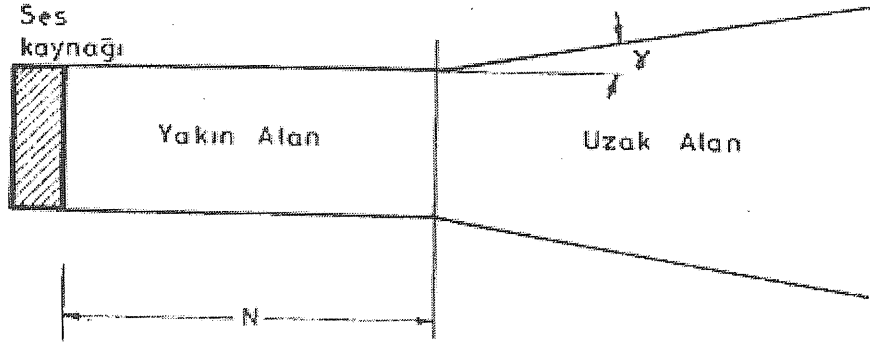
Ultrasonik dalgalar tarafından yayılma yönüne dik doğrultudaki birim kesitten geçirilen mekanik enerji miktarına ultrasonik dalgaların şiddeti denir. Şiddet (I) ; akustik basınç, akustik empedans ve parçacık titreşiminin genliği ile ilişkili olup aşağıda verilmiştir .

$$I = P^2 / (2Z) \quad \text{veya} \quad I = P (a / 2)$$

2.4.2. Ultrasonik Ses Huzmesini Geometrisi

Malzeme içine gönderilen ultrasonik enerji prob ve malzeme özelliklerine göre malzeme içinde aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi bir huzme (demet) oluşturur. Yüzeye yakın kısımda yakın alan adı verilen girişimli bölge oluşur, bundan sonra giderek genişler. Geometriyi belirleyen eşitlikler şunlardır:

$N = D^2 \cdot f / 4 \cdot C = D^2 / 4 \cdot \lambda$ burada D kristal çapı, N yakın alan boyu, f frekans, C ses hızı, λ dalga boyu ($f \cdot \lambda = C$)



Şekil 8. Ultrasonik ses huzmesinin geometrisi

Şekilde gösterilen γ sapma açısı olarak adlandırılır. Aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$\gamma = C / f \cdot D = \lambda / D$$

Görüldüğü gibi kristal çapı ve frekans arttıkça yakın alan boyu artar, artan ses hızı ile azalır. Ses huzmesi içine enerji dağılımı homojen değildir. Yakın alanda ses basıncı maksimum ve minimumlar gösterir. Onun için genellikle bu bölge muayenede kullanılmaz. Uzun alan bölgesinde kayıplar nedeniyle ise uzaklaştıkça ses basıncı azalır.

2.4.3. Ultrasonik Dalgaların Zayıflaması

Bir algılayıcı transdüser tarafından algılanan bir ultrasonik demetin şiddeti, başlangıçta iletilen demet şiddetinden oldukça daha azdır. Ultrasonik dalgaların çeşitli etkenlerle şiddet ve enerjilerini kaybetmesine ultrasonik zayıflama denir. Zayıflamanın nedenleri şunlardır:

- Demet genişlemesi
- Soğrulma ve saçılma
- Ara yüzey kayıpları

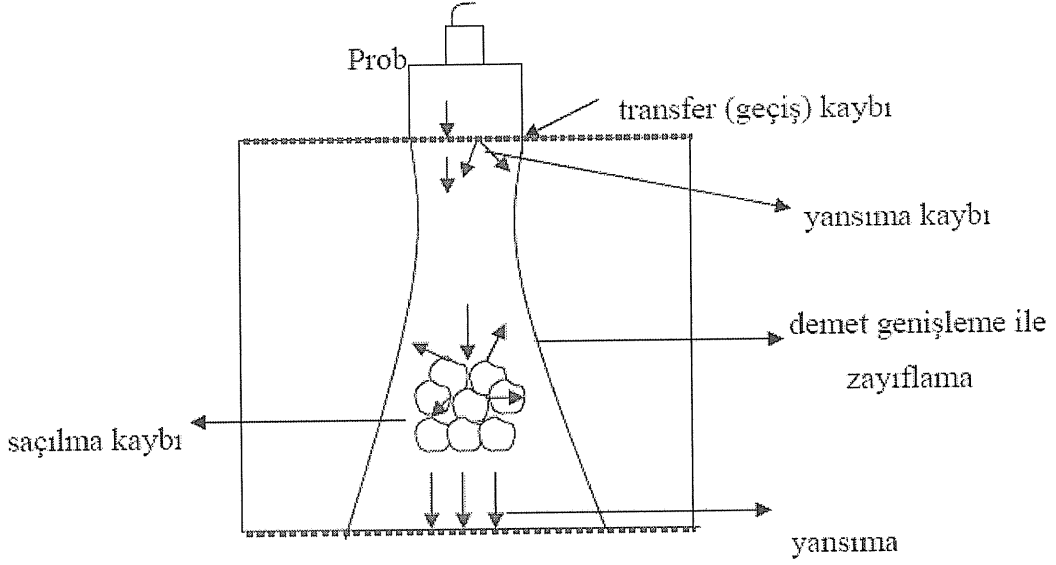
Bir malzemede ultrasonik dalgaların saçılması, o malzemenin tam olarak homojen olmamasından ileri gelmektedir. Akustik empedansı farklı iki malzeme arasındaki sınır ultrasonik dalgalar için bir inhomojenite oluşturmaktadır. Ultrasonik dalgaların frekansı yükseldikçe saçılma artar.

Ultrasonik dalgaların soğurulması, ses enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi olayıdır. Bir ultrasonik dalga malzeme içinde yayılırken parçacıkları uyarır. Bu parçacıklar uyarılmayan parçacıklarla çarpıştığında bunlara bir enerji transferi olur ve parçacıklar daha hızlı ve daha uzun mesafelerde titreşmeye baslar. Dalga geçtikten sonra da bu hareket devam eder; böylece, geçen dalgaın bıraktığı mekanik enerji malzemede ısıya dönüşerek kaybolur. Soğurulma, frekans yükseldikçe artmaktadır.

Ultrasonik dalgaların zayıflamasına neden olan diğer olaylar, temas maddesinden ve yüzey pürüzlüğünden ileri gelen geçiş kayıplarıdır. Bir transdüser, çok düzgün yüzeyli bir parça yüzeyine bir temas sıvısı aracılığı ile temas ettirildiğinde, arka yüzeyden gelen sinyalin genliği temas maddesinin kalınlığına göre değişir.

Yukarıdaki nedenlerin dışında, yansıtıcının (süreksizliğin) yüzey pürüzlüğünden kaynaklanan saçılmalar ve demet genişlemesi de zayıflamaya neden olmaktadır. Bu durumda, bütün bu faktörlerin zayıflamaya katkıda bulunduğu unutulmamalıdır. Zayıflama katsayısı

malzeme özelliklerine ve frekansa bağlıdır. Genelde, frekans yükseldikçe zayıflama artar. Sesin malzemede yayılması sırasında oluşan zayıflama kayıpları Sekil 3.15’de gösterilmiştir.



Şekil 9. Sesin malzemede yayılması sırasında oluşan zayıflama kayıpları

Saçılma ve soğurulma ile meydana gelen zayıflama sonucu ses basıncının azalması aşağıdaki eksponansiyel fonksiyonla ifade edilir .

$$P = P_0 \cdot e^{-\phi \cdot x}$$

Burada; P_0 : Başlangıçtaki ses basıncı ($x=0$), P : x mesafesindeki ses basıncı x : Malzemede sesin aldığı yol , ϕ : Zayıflama Katsayısı’dır.

2.4.4. Ultrasonik Dalgaların Hızları ve Elastisite Mod.ülleri

Boyuna, enine ve yüzey dalgalarının hızları, malzemenin yoğunluğuna ve elastisite modüllerine bağlıdır. Bu dalgaların hızları frekansa ve malzeme boyutuna bağlı değildir. Plaka dalgalarının hızları ise, sadece malzeme yoğunluğuna bağlı değil, aynı zamanda plaka dalgasının tipine (asimetrik veya simetrik) ve frekansa bağlıdır. Boyuna, enine ve yüzey dalgalarının hızları, elastisite modülleri ve poisson oranlarına bağlı olarak aşağıdaki bağıntılarla verilmiştir .

$$C_b = \left\{ \left(E / \rho \right) \left[\left(1 - \mu \right) / \left(1 + \mu \right) \left(1 - 2\mu \right) \right] \right\}^{1/2}$$

$$C_e = \left\{ \left(E / \rho \right) \left(1 / (2+2\mu) \right) \right\}^{1/2} = \left(G / \rho \right)^{1/2}$$

$$C_y = \left\{ \left(0,87 + 1,12\mu \right) / \left(1 - \mu \right) \right\} \cdot C_e$$

Burada; C_b , C_e , C_y : Sırasıyla boyuna, enine ve yüzey dalgalarının hızları

E : Young (Elastisite) modülü G : Kayma modülü μ : Poisson oranıdır.

Yukarıdaki bağıntılardan görüleceği gibi, bir malzemede boyuna, enine ve yüzey dalgası hızlarını ölçerek, o malzemenin elastisite ve kayma modüllerini tayin etmek mümkündür.

2.4.5. Normal Geliş Açısında Yansıyan ve Geçen Enerji Miktarları

Ultrasonik dalgalar, akustik empedansları farklı olan iki ortamın ara yüzeyine dik açıda (normal geliş açısında) geldiklerinde, dalgaların bir kısmı ara yüzeyden geri yansıtılır, bir kısmı da geçirilir. Yansıtılan veya geçirilen ultrasonik enerji miktarı, iki ortamın akustik empedansları farkına bağlıdır. Bu fark büyükse, enerjinin büyük bir kısmı yansıtılır, sadece

küçük bir kısmı ara yüzeyden geçirilir. Eğer akustik empedans farkı küçükse, ultrasonik enerjinin büyük bir kısmı geçirilir ve küçük bir kısmı geri yansıtılır.

ansıyan (Y) ve geçen(G) enerji oranları aşağıdaki bağıntılarla verilmiştir .

$$Y = [(Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)]^2$$

$$G = [(4Z_2 Z_1) / (Z_2 + Z_1)^2]$$

Burada; Y : yansıyan enerji oranı, G : Geçen enerji oranı, Z₁ : 1. ortamın akustik empedansı, Z₂ : 2. ortamın akustik empedansı'dır.

Örnek problem 1: Çelik /su ara yüzeyine dik olarak gelen ultrasonik enerjinin yansıyan ve geçen oranlarını hesaplayınız. Aşağıdaki tabloda gösterilen veriler kullanılırsa;

$$Y = [(0,15 - 4,66) / (0,15 + 4,66)]^2 = (0,937)^2 = \%87,9$$

$$G = [(4 (0,15) (4,66)) / (0,15 + 4,66)^2] = \%12,1$$

Örnek problem 2: Çelik / hava ara yüzeyine dik olarak gelen ultrasonik enerjinin yansıyan ve geçen oranlarını hesaplayınız. (Hava için Z=0,00004 .10⁶ g/cm².s.)

$$Y = [(0,0004 - 4,66) / (0,0004 + 4,66)]^2 = 1 \rightarrow (\%100 \text{ yansıma})$$

$$G = [(4 (0,00004) (4,66)) / (0,00004 + 4,66)^2] = 0 \rightarrow (\%0 \text{ geçen})$$

Bu örneklerden görülüyor ki ultrasonik enerji ara yüzeylerden büyük ölçüde yansır. Çok azı malzeme içine geçebilir. Çelik/hava ara yüzeyinden geçiş pratik olarak sıfırdır. Buradan aşağıdaki sonuçlar çıkar:

1. Malzeme içersine gönderilen sesötesi enerjinin yüzeylerden sızma olasılığı yoktur. İçerde hapsolür.
2. Ultrasonik enerji ara yüzeylerden kuvvetle yansır. Kılcal veya kapanmış çatlakları algılama olasılığı büyüktür.
3. Sesötesi enerji malzeme içine havadan geçerek gönderilemez. Prob malzeme yüzeyine bastırılrsa dahi yüzey pürüzlülüğü nedeniyle arada kalan hava filmi geçişi engeller. Bu nedenle probla malzeme yüzeyi arasına su, yağ, gres vb. madde ile sesötesi bağ oluşturmak zorunludur. Buna kuplaj sıvısı denir. Bu tür muayeneye temas muayenesi (contact test) denir.
4. Sesötesi enerji malzeme içine sudan geçerek gönderilebilir. Muayene olunacak parça ve prob içi su dolu bir tanka daldırılırlar. Probla malzemenin temasına gerek yoktur. Birbirlerine belirli bir uzaklıktan bakabilirler. Bu tür muayeneye daldırma muayenesi (immersion test) denir. Otomatik muayeneye elverişlidir. Sıvı ortamda enine dalgalar yayınamadığından açılı prob kullanılamaz. Ancak su içinde malzeme üzerine belirli açıda boyuna dalga gönderilerek malzeme içinde enine dalga oluşturulabilir.

Tablo.1. Çeşitli metal ve metal olmayan malzemelerin akustik özellikleri [2]

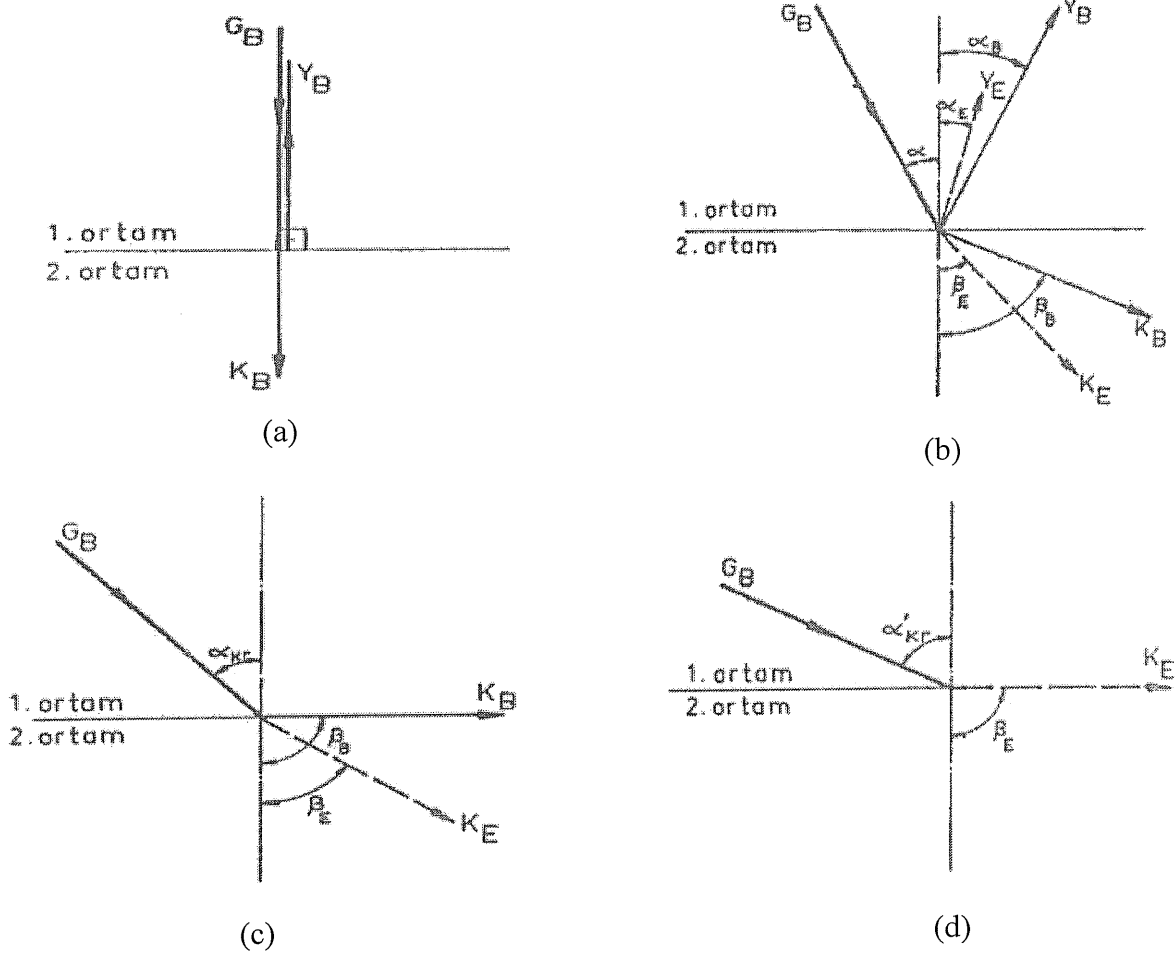
Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	C_b	Ses Hızı km/s C_e	C_y	Akustik empedans $g/cm^2 \cdot s \cdot 10^6$
DEMİR METALLER					
Karbon çeliği (tavlanmış)	7.85	5.94	3.24	3.0	4.66
Alaşımlı çelik					
Tavlanmış	7.86	5.95	3.26	3.0	4.68
Sertleştirilmiş	7.8	5.90	3.23	-	4.6
Dökme demir	6.95-7.35	3.5-5.6	2.2-3.2	-	2.5-4.0
52100 çeliği					
Tavlanmış	7.83	5.99	3.27	-	4.69
Sertleştirilmiş	7.8	5.89	3.20	-	4.6
D6 takım çeliği					
Tavlanmış	7.7	6.14	3.31	-	4.7
Sertleştirilmiş	7.7	6.01	3.22	-	4.6
Paslanmaz çelik					
Tip 302	7.9	5.66	3.12	3.12	4.47
Tip 304L	7.9	5.64	3.07	-	4.46
Tip 347	7.91	5.74	3.10	2.8	4.54
Tip 410	7.67	5.39	2.99	2.16	4.13
Tip 430	7.7	6.01	3.36	-	4.63
DEMİR OLMAYAN METALLER					
Alüminyum 1100-0	2.71	6.35	3.10	2.90	1.72
Alüminyum alaşımı	2.80	6.25	3.10	2.79	1.75
2117-T4					
Berilyum	1.85	12.80	8.71	7.87	2.37
Bakır	8.9	4.70	2.26	1.93	4.18
Bakır alaşımları					
260 (fişek pirinci % 70)	8.53	3.83	2.05	1.86	3.27
464, 467 (gemici pirinci)	8.41	4.43	2.12	1.95	3.73
510 (fosfor bronz)	8.86	3.53	2.23	2.01	3.12
753 (nikel gümüş 65-18)	8.75	4.62	2.32	1.69	4.04
Kurşun					
Saf kurşun	11.34	2.16	0.70	0.64	2.45
Sert	10.88	2.16	0.81	0.73	2.35
Magnezyum alaşımı MIA	1.76	5.74	3.10	2.87	1.01
Cıva sıvı	13.55	1.45			1.95
Molibden	10.2	6.25	3.35	3.11	6.38
Nikel					
Saf nikel	8.8	5.63	2.96	2.64	4.95
Inconel x- 750	8.3	5.94	3.12		4.93
Titanyum (ticari saflıkta)	4.5	6.10	3.12	2.79	2.75
Tungsten	19.25	5.18	2.87	2.6	9.98
Perspex (plexiglass)	1,1	2,73	1,43	--	0,32
Su (20°)	1	1,483	--	--	0,15
Motor yağı	0,88-1,02	1,25-	---	---	0,11-0,17
		1,74			

2.5. Ultrasonik Dalgaların Ara Yüzeylerdeki Davranışı

Ultrasonik dalgalar özelliği farklı olan bir ortamdan diğerine geçerken kırılma ve yansıma uğrarlar. Yansıma ve kırılma açıları **Snell Kanunu** ile hesaplanmaktadır. Bu kanuna göre geliş açısının sinüsü ile yansıma veya kırılma açısının sinüsü oranı her iki ortamdaki ses hızlarının oranına eşittir. Snell kanunu şu formülle ifade edilir ;

$$\sin \alpha / \sin \beta = C_1 / C_2$$

Burada α gelme , β kırılma açısı, C_1 birinci, C_2 ikinci ortamdaki ses hızlarıdır. Akustik hızlar boyuna ve enine dalgalar için farklı olduğundan her iki dalganın kırılma ve yansıma açıları farklı olmaktadır. Gelen tek bir ışının ara yüzeyde dört farklı yöne ayrılmasının sebebi budur..



Şekil 10. Ultrasonik dalgaların ara yüzeylerde yansıması ve kırılması (G_B =Gelen boyuna dalga, Y_B =Yansıyan boyuna dalga, K_B =Kırılan boyuna dalga, K_E =Kırılan enine dalga, Y_E =Yansıyan enine dalga , α gelme ve yansıma açıları, β kırılma açıları)

Perspex prob taban malzemesi olarak kullanıldığından Plexiglass (perspex) / çelik ortamlara ultrasonik muayenede çok sık rastlanılmaktadır. Yansıyan ışın malzemenin fiziksel özelliklerine, ara yüzeydeki yönlenmelerine ve kendine özgü fiziksel niteliklerine bağlı olmaktadır. Örneğin ses dalgaları metal / gaz ara yüzeyinden tamamen , metal / sıvı ve metal / katı ara yüzeylerinde ise kısmen yansıma uğramakta kısmen de kırılmaya uğrayarak malzeme içine geçmektedir.

Tablo.2. Perspex – Çelik ara yüzeyi için kritik açılar

Kritik sınırlar	α_{Kr}	β_E
Alt kritik sınır	27,6°	33,2°
Üst kritik sınır	57,6°	90°

Şekil 10. (a)'da yüzeye perspex/çelik ara yüzeyine dik olarak gelen ultrasonik enerji aynı doğrultu içinde kalmak şartıyla kısmen yansıyarak geri döner ve kısmen de yoluna devam ederek diğer ortama geçer..

Şekil 10 (b)'de ultrasonik enerjinin ara yüzeye eğik olarak gelmesi durumunda yansıma ile birlikte dalga dönüşümü de olduğu görülmektedir. Gelen enerji enine ve boyuna dalga hızlarını farklı olması nedeniyle dört ışına bölünür ve bunlardan ikisi yansıyan, diğer ikisi de kırılan ışınlardır. α - geliş açısı büyütülürse kırılma açıları da büyümektedir. Şekil 10 (c)'de görüldüğü gibi alt kritik açıda ($\alpha_{kr} = 27,6^0$) kırılan boyuna dalgalar yüzeye çıkmış ve çelik içinde sadece $\beta_E = 33,20^0$ açısı ile kırılan enine dalgalar kalmıştır.

Geliş açısı $57,60^0$ olunca ise kırılan boyuna dalga açısı $\beta_E = 90^0$ olmuştur. Şekil 10 (d) 'den de görüleceği gibi artık enine dalgalarda yüzeye çıkmıştır. Bu geliş açısının üstünde bir açı ile gelen ultrasonik enerji çelik içersine giremez. Bu sebeple Tablo 2.'deki kritik açılar muayene yönünden büyük önem taşımaktadır.

Açısal problemler çelik içine verdikleri enine dalga kırılma açısı ile anılırlar. Prob açıları her ne kadar $33,2^0 - 90^0$ arasında olsalar da bazı sebeplerden ötürü uygulamada prob açıları $35^0 - 80^0$ sınırlarının dışına çıkamazlar. Piyasada standart olarak prob açıları $45^0, 60^0, 70^0$ ve 80^0 ' dir.

2.6. Ultrasonik Muayene Yöntemleri

Ses ötesi dalgaları, malzeme özelliklerinin (Örneğin E-modülü) tespitini konumuz dışında bırakılıp, sadece malzemedeki hataların tespiti ve kalınlık ölçümünde kullanmakla sınırlanırsa aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- Geçiş veya iletim yöntemi,
- Rezonans yöntemi,
- Yansıma (darbe-yankı veya İmpuls-eko) yöntemi

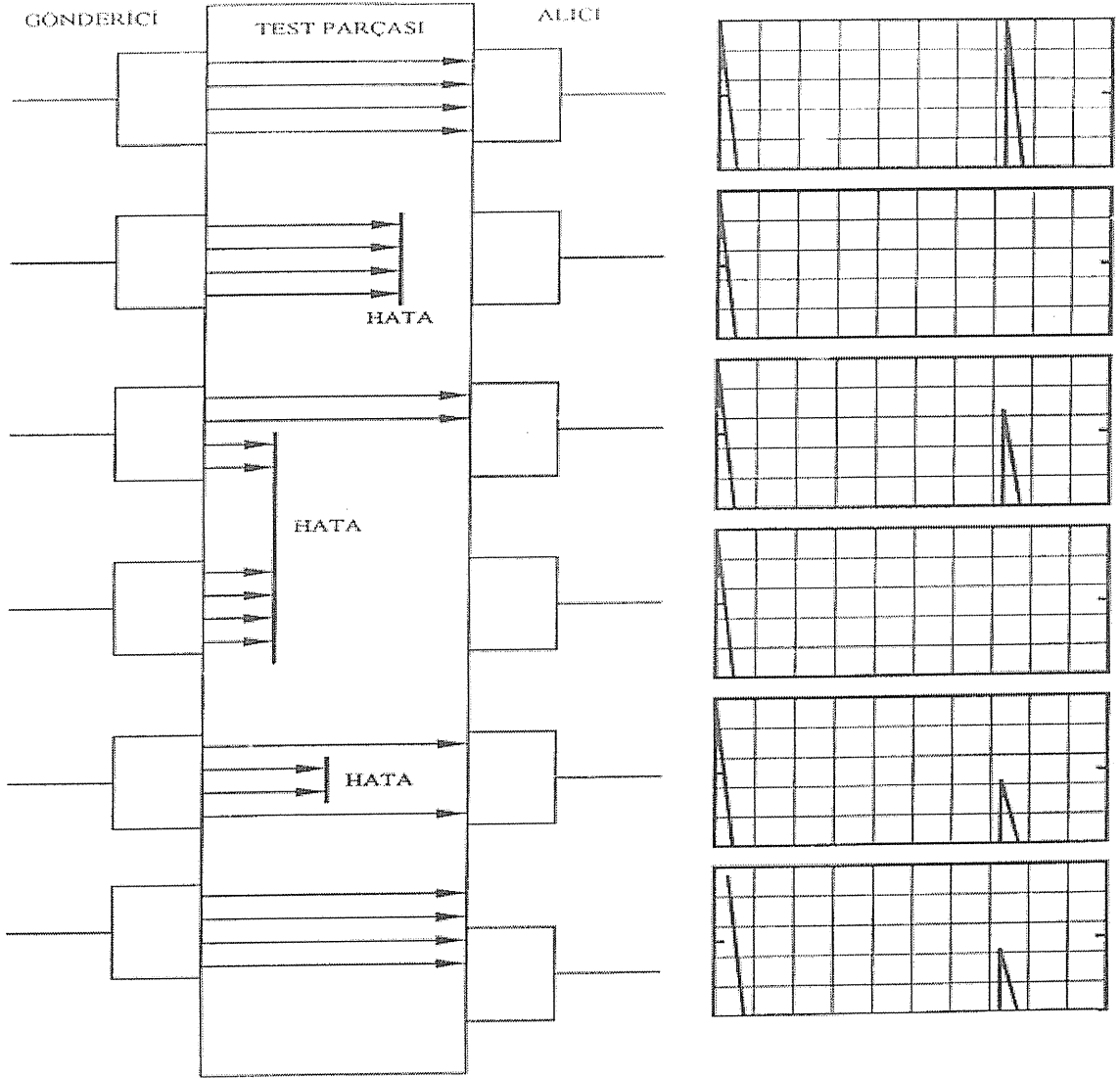
2.6.1. Geçiş veya İletim Yöntemi

Bu yöntemde bir verici ve bir de alıcı olmak üzere iki prob kullanılır. Malzemenin bir yüzüne alıcı, diğer yüzüne verici prob yerleştirilir. Parça içinden geçerek alıcıya ulaşan ses enerjilerinin farklı oluşu test parçası içinde hatalar olduğunu gösterir. Bu yöntemde hatanın pozisyonunu tam olarak tespit etmek mümkün değildir. Hata mevcut olan parçalarda (hata ses demetine dik) ekranda hatanın büyüklüğüne göre daha düşük değerde sinyaller oluşur. Çünkü bu durumda ses dalgalarının bir kısmı yansımaya uğrayacağı için alıcıya ulaşamazlar. Hatasız bir malzemede ise ultrasans dalgaları hiçbir engelle rastlamadan geçerler (Şekil 11) ve ekrandaki sinyal maksimum yüksekliğe ulaşır.

Bu yöntem çok kullanılan bir yöntem değildir. Genellikle saçların ve boruların muayenesinde kullanılır

2.6.2. Rezonans Yöntemi (Kalınlık Ölçme)

Rezonans bütün titreşim olaylarında görülebilen bir olgudur. Rezonansı temin için deney parçası içine ultrasonik dalgaları sürekli olarak gönderilir. Malzemenin içine daha önce gelen, ön ve arka cidarlarda birçok kez yankılanan ultrasonik dalgaları arkadan yeni gelen dalgalarla farklı frekansta iseler birbirlerini zayıflatırlar (sönümlendirirler), aynı frekansta iseler birbirlerini kuvvetlendirirler. Bu taktirde malzeme içinde sönümlenmeyen sürekli dalgalar oluşur. Bu olay kendini yüksek genlik ile belli eder. Bu duruma ultrasonik frekansı denmektedir.



Şekil 11. Geçiş veya iletim yöntemi

Deney parçası içinde rezonansın oluşması için ön ve arka yüzeylerden yansımaların büyük kayıpla olmaması, yansımadan sonra dalgaların yine geldikleri doğrultuda geriye dönmeleri yani başka doğrultulara saparak kaybolup gitmemeleri gerekir. Bunun için deney parçası paralel yüzölçümlü ve yüzeyleri pürüzsüz olmalıdır. Örnek olarak pitting korozyonu ile ileri derecede pürüzlü olmuş yüzeylerde rezonans olasılığı giderek azalmaktadır. Şekil 2.17’de rezonans halleri görülmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi deney parçasının uzunluğu ultrasonik yarım dalga boyuna veya bunun tam katlarına eşit olduğunda rezonans durumu oluşur. Rezonans koşulunun sağlanması için ;

$$d = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{veya} \quad d = N \cdot \frac{c}{2f} \quad (N = 1, 2, 3, \dots)$$

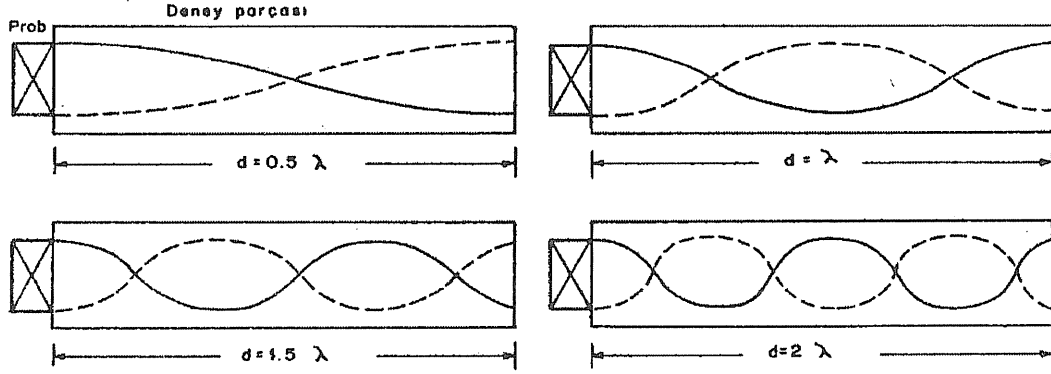
Fakat bu denklemi pratikte kullanılabılır hale getirmemiz için N sayısının bilinmesi gerekmektedir. N = 1 alınarak denklem yeniden düzenlenirse ;

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_0} \quad N = 1 \text{ için.}$$

Burada f_0 temel harmonik frekanstır yani en düşük rezonans frekansıdır. Şekil 12'den görülebileceği gibi diğer rezonanslar bu temel harmoniğin tam katlarında oluşmaktadır. Böylelikle birbirini takip eden herhangi iki harmonik frekansı arasındaki f farkı f_0 temel harmonik frekansına eşittir. Yani ,

$$f = f_{N+1} - f_N = f_0$$

olmaktadır. Böylelikle f_0 temel harmonik frekansı ve deney parçası içindeki C sesötesi hızı bilinirse bizden istenilen kalınlık kolayca bulunabilmektedir.

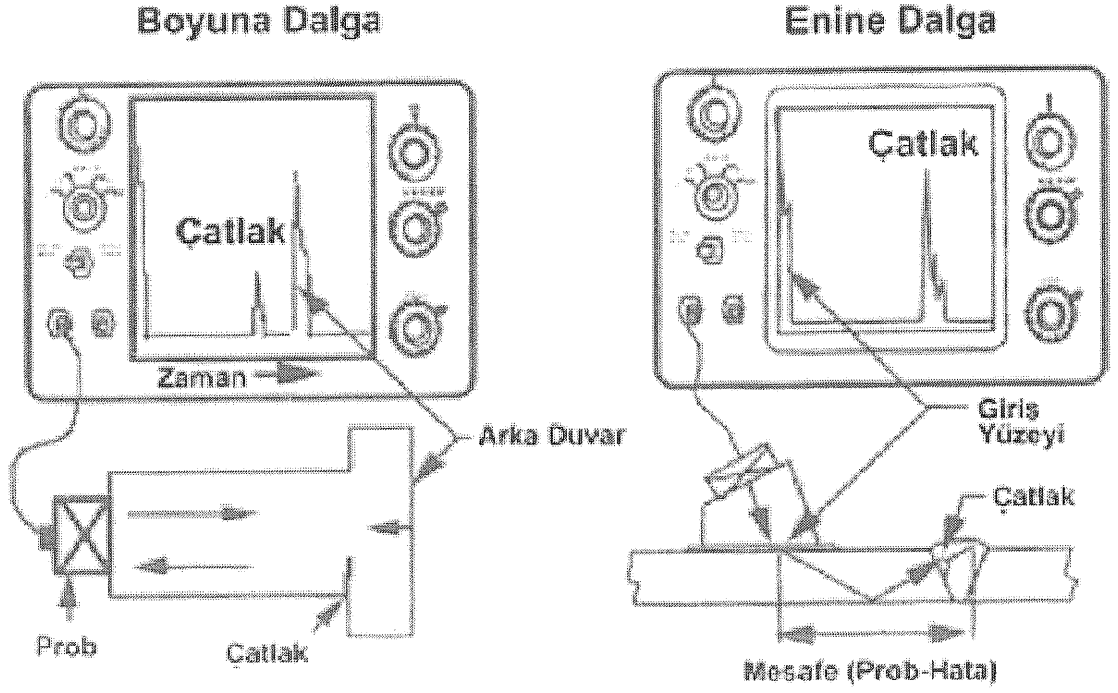


Şekil 12. Rezonans halleri. İlk şekil harmoniğin, diğer şekiller yüksek harmoniklerin rezonanslarıdır.

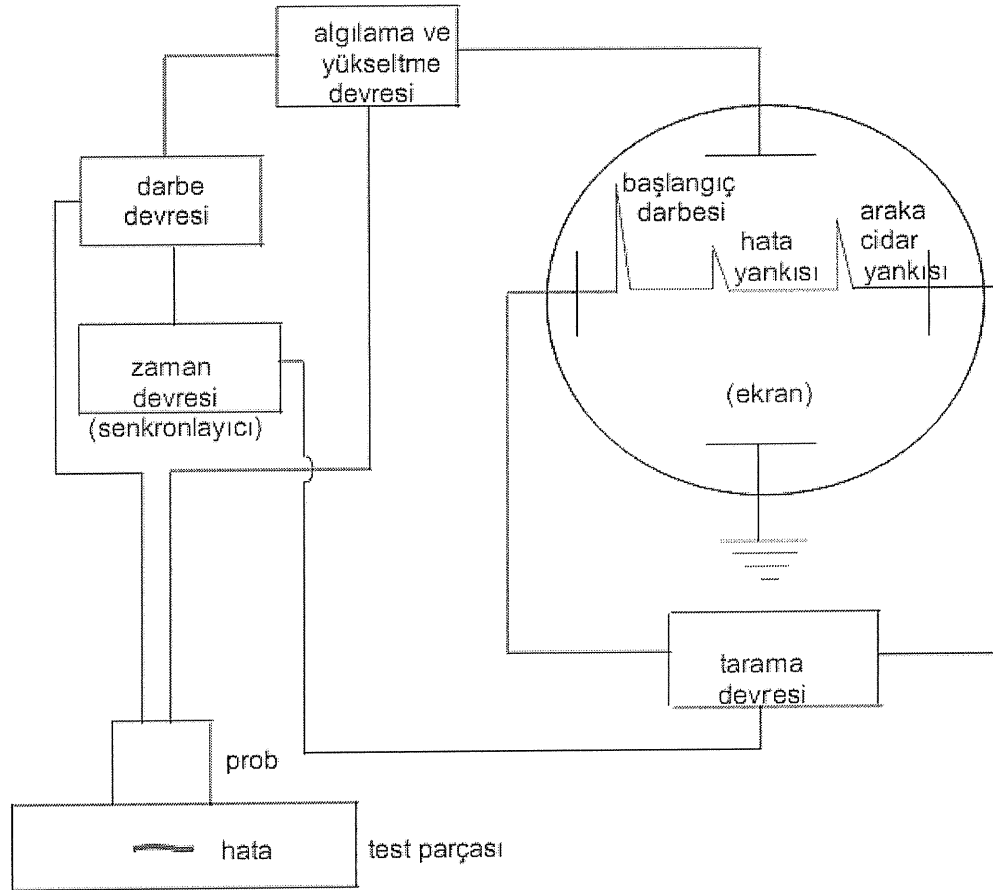
2.6.3. Yansıma (Darbe-Yankı veya İmpuls-Eko) Yöntemi

Yansıma yöntemi de denilen darbe-yankı yöntemi en çok kullanılan yöntemdir. Ses demeti tek taraftan verici ve alıcı olarak çalışan proba gönderilir. Hatasız malzemede bir ön cidar, bir de arka cidar yankısı elde edilir. Hatalı malzemede ise hatadan yansıyan ses dalgaları bu iki sinyal arasında bir hata sinyali (yankısı) oluşturur. Bu yöntemde sürekli ses ötesi demeti yerine düzenli olarak kısa impulsler gönderilir. Şekil 3.21.'de impuls-eko ile yapılan muayenelere ait ekran sinyalleri (ekolar) gösterilmiştir.

Her impuls; deney parçası içinde belli bir hızla giderek hata veya arka cidara çarpıp geri döner. Bu hız ses dalgasının o malzeme içindeki ses hızına eşit olup malzemeye ait bir sabittir. Ses yansıyıp geri döndüğünde bu defa prop alıcı olarak çalışır ve yansıyan dalganın şiddeti ile orantılı olarak ölçü aletine elektrik sinyali verir. Belli bir malzeme için ses ötesi dalgaların gönderilmesi ve geri dönmesi arasında geçen süreden, hatanın yüzeyden olan uzaklığı tespit edilebilir. Bu yöntem aynı zamanda arka cidar yankısını aldığından malzeme kalınlığı ölçümünde de kullanılır. Yankı sinyallerinin gösterilmesi ve ses demetinin yolculuk sürelerinin ölçülmesi bir katot ışınları tüpü ekranı üzerinden yapılır. Şekil 14'de ultrasonik muayene cihazının blok ve devre şeması verilmiştir.



Şekil 13. Darbe-yankı yöntemi



Şekil 14. Ultrasonik muayene cihazı blok diyagramı

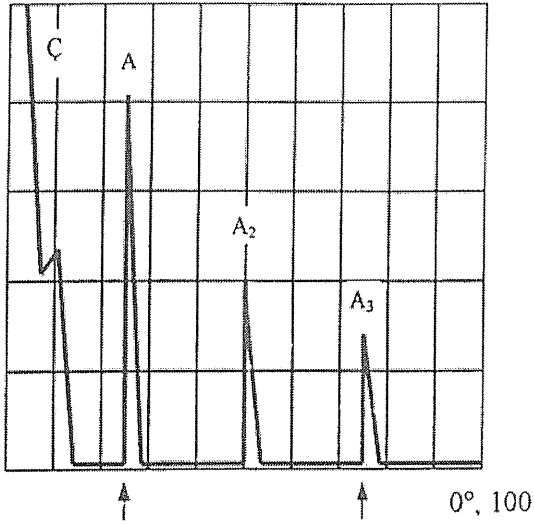
2.7. Ultrasonik Muayenede Kalibrasyon

2.7.1. Normal Problemlerle Mesafe Kalibrasyonu

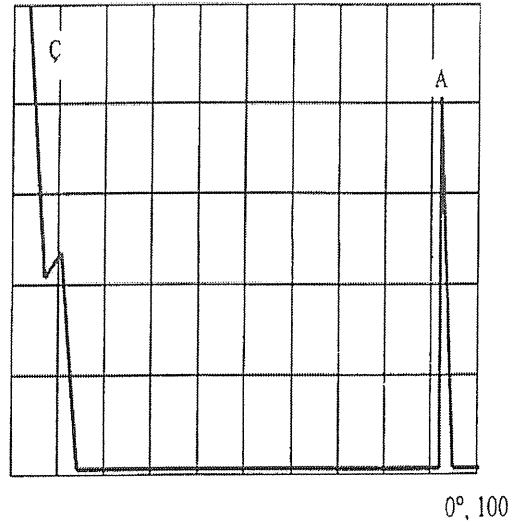
Ultrasonik muayene cihazına bağlanan prob, uygun bir temas sıvısı (örneğin yağ, gres, gliserin, vb.) ile kalınlığı bilinen kalibrasyon bloğuna temas ettirilir. Eğer tek prob kullanılacaksa, çalışma modu anahtarı Darbe – Yankı konumunda tutulur, bu durumda cihaz üzerindeki prob bağlama soketlerinin her ikisi de aynı işleve sahip olur. Mesafe kalibrasyonu için çıkış yankısı kullanılmaz. Birbirinden ekran genişliğinin % 60'ı kadar aralıklı iki yankı kullanılabilir. Zaman eksen aralığı S_B olarak gösterilir ve ekranın tamamının kaç mm uzunluğa karşılık geldiğini tanımlar. Ölçek faktörü k ile gösterilir ve ekranda bir taksimatın kaç mm'ye karşılık geldiğini tanımlar ($k = S_B / 10$ mm/SKT). Kalibrasyon mesafesinin (s_j) seçilen zaman eksen aralığı için ekrandaki yankı konumu şu formülden bulunabilir;

$$T = s_j / k \quad \text{SKT (skala taksimatı)}$$

İstenen zaman eksen aralığına kalibrasyon yapmak için önce ses hızı ve boyutları bilinen bir kalibrasyon malzemesi gereklidir. Bu malzemede uygun bir boyut kalibrasyon mesafesi olarak seçilir ve bir kalibrasyon tablosu hazırlanır. Kalibrasyon tablosu hazırlandıktan sonra mesafe kalibrasyonuna başlanır. Önce paralel kaydırma düğmesi ile çıkış yankısı yaklaşık olarak 0 SKT konumuna getirilir. Ancak kalibrasyon sırasında ve sonrasında çıkış yankısı kullanılmaz. Kalibrasyon için kullanılan ilk yankı yüksekliği tekrar % 80'e getirilir ve konumu kontrol edilir. Her iki yankının konumları da hesaplanan T değerleri ile aynı olduğunda s_j 'den farklı ve mümkünse s_j 'nin katı olmayan bir başka ses mesafesinde yapılan kalibrasyon kontrol edilir. Kontrol mesafesi için beklenen yankı konumu hesaplanır ve ekrandaki belirti konumu karşılaştırılır.



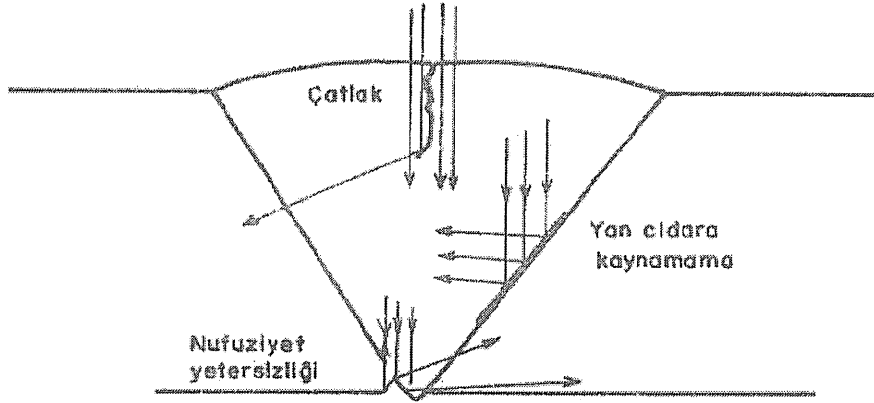
Şekil 15. Kalibrasyon sonrası ekranı



Şekil 16. Kalibrasyon kontrolü ekranı

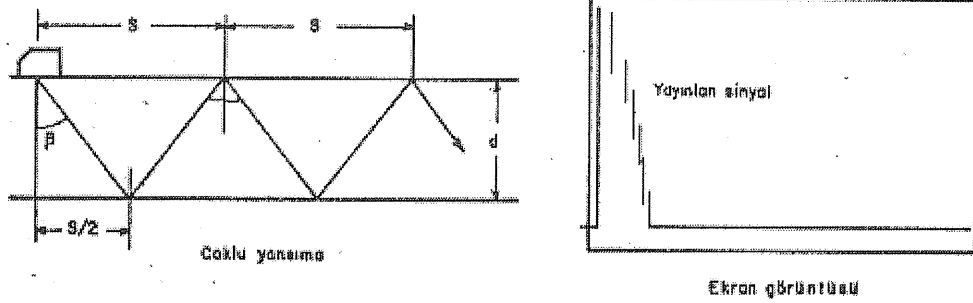
2.7.2. Açılı Problemlerde Mesafe Kalibrasyonu

Kaynak dikişinin bombeli ve yüzeyinin pürüzlü olması nedeniyle ultrasonik probunun üzerine düzgün şekilde oturması zordur. Aşağıdaki Şekil 17.'de görülen çatlak, yan cidara kaynama ve nüfuziyet yetersizliği gibi hataların yüzeye dik gönderilen ultrasonik dalgalarla algılanma olasılığı zayıf olan tehlikeli hata türlerine ait örneklerdir. Bu tür hatalar açısı uygun olarak seçilmiş açılı problemlerle algılanabilmektedir. Bu yüzden kaynak dikişi muayeneleri genellikle açıl problemlerle yapılmaktadır.



Şekil 17. Kaynak dikişlerinde normal problemlerle algılanması zor olan üç hata tipi örneği

Açılı problemlerle kalibrasyon yaparken, normal problemlerde olduğu gibi, karşılık geldiği ses mesafeleri bilinen iki yankı görüntüsü gereklidir. Paralel yüzeyli hatasız test parçalarında, açılı proba arka cidar yankı dizisi elde edilemediği için, özel kalibrasyon blokları gereklidir..

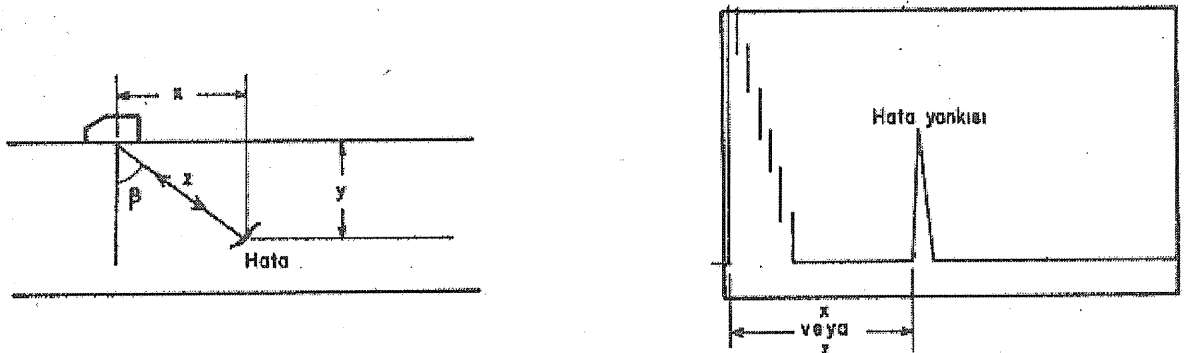


Şekil 18. Açılı proba hatasız bir malzemede elde edilen ekran görüntüsü

Burada S = Sekme uzunluğu (skip distance) olarak adlandırılır. Aşağıdaki eşitlikle hesaplanır: (β prob açısıdır)

$$S = 2d \tan \beta$$

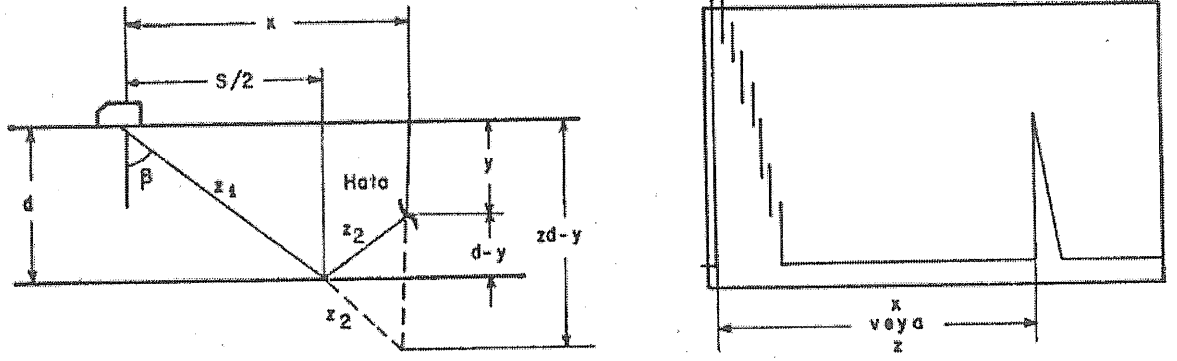
Yansıtıcı konumunun belirlenmesi: Hatanın konumu aşağıdaki şekil de gösterildiği gibi bulunur.: (y = hatanın bulunduğu derinlik, z = iz uzunluğu x = hataya olan yatay uzaklık)



Şekil 19. Açılı probda hatadan elde edilen yankının görünümü

$$\text{Burada } \tan \beta = x/y \rightarrow y = x / \tan \beta \text{ veya } y = z \cdot \cos \beta$$

Eğer huzme arka cidardan yansıdıktan sonra hataya rastlarsa:



Şekil 20. Açılı probda birinci sekmeden sonraki hatadan elde edilen yankının görünümü

Burada $z=z_1 + z_2$ şekildeki üçgen bağıntılarından:

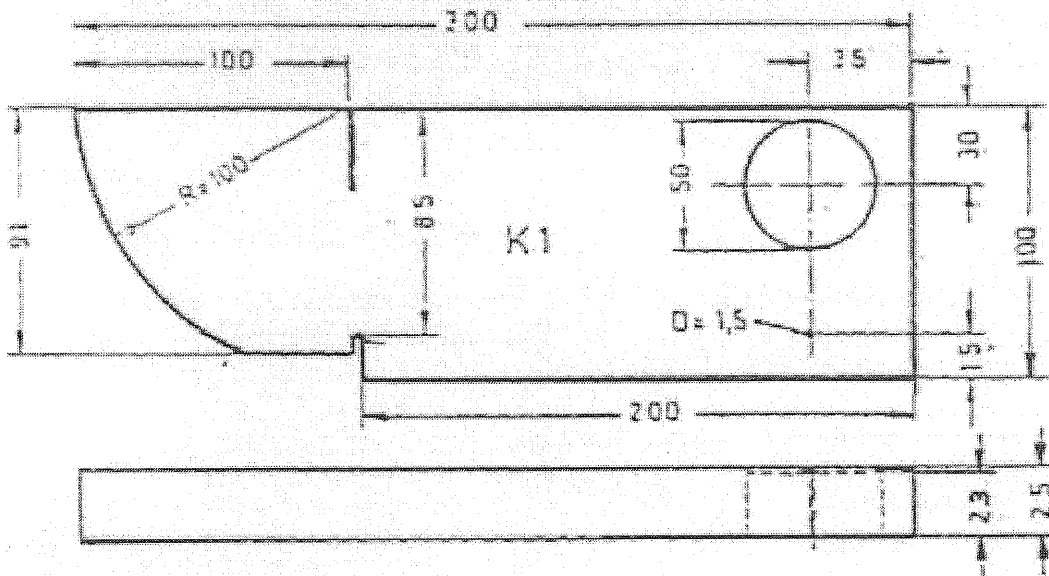
$$y=2d- x/\tan\beta \quad \text{veya} \quad y=2d-z.\cos\beta$$

Yatay eksen açılal problar ile iki türlü kalibre edilebilmektedir

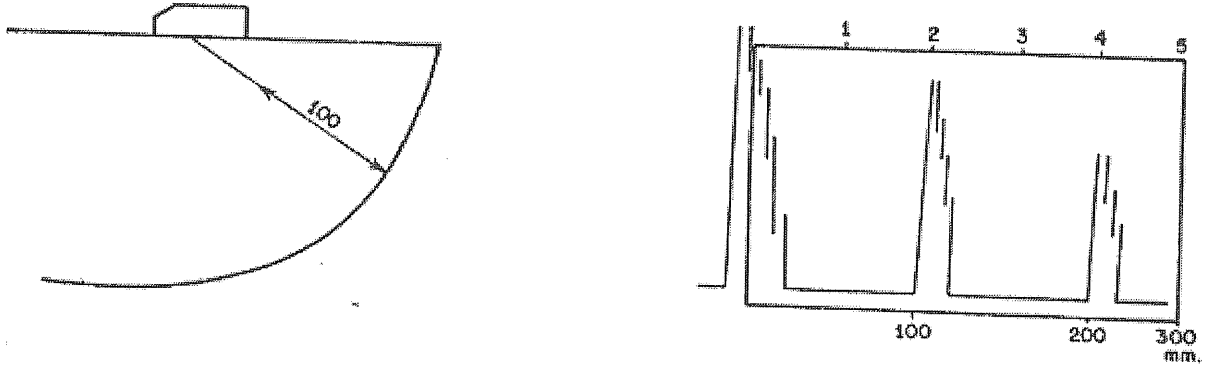
2.7.2.1. İz uzunluğuna Göre Kalibrasyon

Sesötesinin malzeme içinde izlediği yolun (izin) belli bir ölçekle ekranın yatay eksenindeki temsildir. Bunun için IIW (International Institute of Welding) V1 ve V2 kalibrasyon bloklarından yararlanılır. Büyük boyutlu açılal problar için V1 bloku, küçük boyutlu açılal problar için V2 bloku kullanılır.

Büyük boyutlu açılal probun V1 bloku ile kalibrasyonunda prob blokun 100 mm yarıçaplı silindirik yüzeyinin merkezine konur. Sesötesi çıkışı silindirik yüze bakan yöndedir. Probdan çıkan sesötesi demeti silindirik yüzeyde yansıyarak tekrar proba döner ve algılanır. Cihazın ekranında yankı sinyalleri 100 mm arayla duracak şekilde ayarlanırsa yatay eksen sesötesi iz uzunluğuna göre kalibre edilmiş olur.



Şekil 21. V1 Kalibrasyon bloku

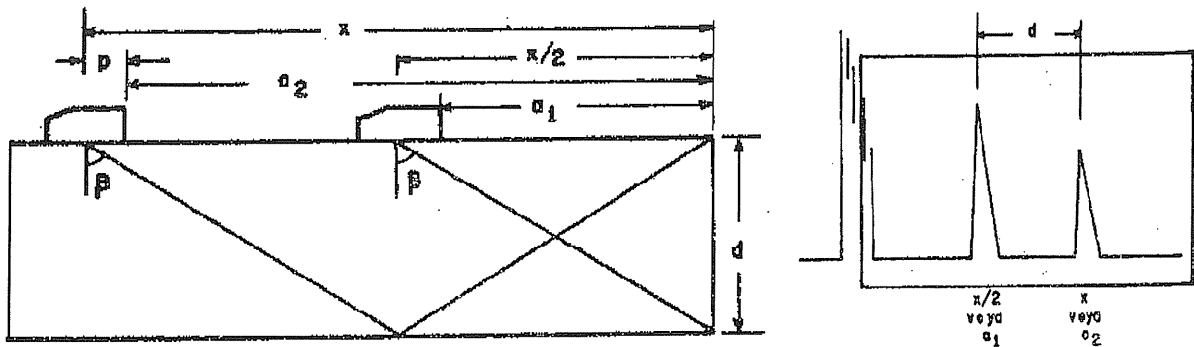


Şekil 22. V1 kalibrasyon bloku ile iz uzunluğuna göre kalibrasyon

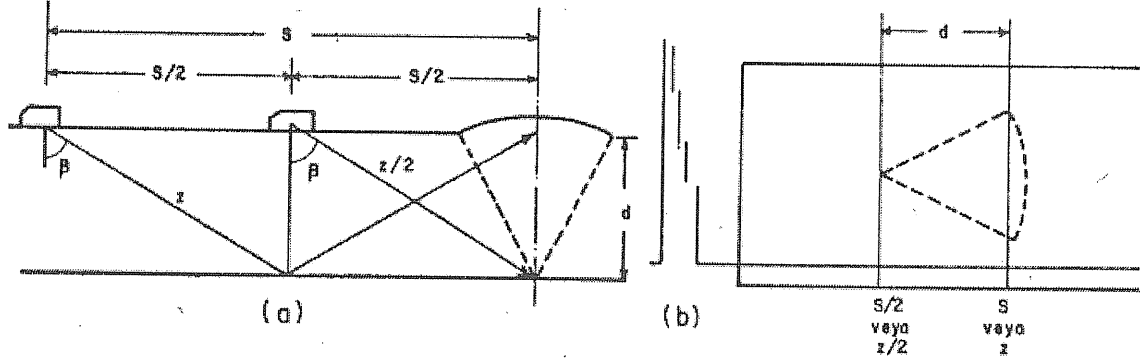
2.7.2.2. Proba Olan Yatay Uzaklığa Göre Kalibrasyon

Probun hataya olan yatay uzaklığının bilinmesi ve ekranın buna göre kalibre edilmesi uygulamada çok büyük kolaylık sağlamaktadır. Buna karşın ses ötesinin malzeme içinde izlediği eğik ve zikzaklı yolun uzunluğunun bilinmesi uygulama yönünden daha az pratik olmaktadır. Ekranın yatay uzaklığa olan kalibrasyonu muayenesi yapılacak levhanın keskin köşelere sahip bir ucunda yapılabilir. Böylelikle özel kalibrasyon blokuna gerek yoktur. Mümkünse muayene olunacak gerçek levha üzerinde kalibrasyon tercih olunmalıdır. Zira levhanın d kalınlığının ekran üzerine ölçekli bir şekilde taşınması en kolay bu şekilde mümkün olabilmektedir. Hassasiyet istenirse V1 ve V2 blokları yan yatırılmak suretiyle kalibrasyonda bunlardan birer levha gibi yararlanmak olanağı da bulunmaktadır.

Levhanın alt köşesinde alınan yankının en büyük olduğu konumda probdan levha kenarına olan $S/2$ ($X/2$) yatay uzaklığı ölçülür. Daha sonra prob geriye doğru çekilerek levhanın üst köşesinden alınan yankının en büyük olduğu konum bulunur. Bu konumda levha kenarına olan S (X) uzaklığı ölçülür ve ekran $S/2$ ve S uzaklıklarına göre kalibre edilir. Ekranda $x/2$ ve x uzaklıklarına karşı gelen noktalar arası mesafe kalibrasyondan sonra levhanın d gerçek kalınlığının ölçekli uzunluğudur. Şekil 23.'de görülen x uzaklığı sesötesi demetinin probdan çıktığı (index) noktadan itibaren ölçülür. Bunun için elimizdeki probun (index) noktasının kesin olarak bilinmesi gerekmektedir. Index noktası bilinse dahi her defasında cetvelin sıfırını tam bu noktadan başlatmak pratik olmayabilir. Bunun yerine probun alnından levhanın kenarına olan a_1 ve a_2 uzaklıklarını ölçmek çok daha kolay olmaktadır. Ekranı buna göre kalibre edersek daha sonra bulacağımız bir hata yankısının proba olan yatay uzaklığı da probun alnından başlayarak ölçülür. İki uzaklık arasındaki fark, probun alnı ile demet eksen çıkış noktası (index) arasındaki p mesafesi olmaktadır.



Şekil 23. Probdan olan yatay uzaklığa göre kalibrasyon



Şekil 24.Kaynağın bütün derinliğinin açılı proba taranması

Kaynak dikişinin merkezinden itibaren $S/2$ ve S ($S=2d.\tan\beta$) mesafeleri işaretlenerek “probonun gezme alanı” belirlenir. Prob, gezme alanında, kaynak dikişine yönelik olarak gezdirildiğinde tüm kaynak dikişi incelenmiş olur.

2.8. Ultrasonik muayene yönteminin üstünlük ve sakıncaları

Üstünlükleri;

- 1-Geniş uygulama alanına sahiptir (hata, içyapı, elastiklik modülü, kalınlık ölçme v.b.).
- 2.Yüzey ve yüzey altı hatalar incelenebilir
- 3- Muayene derinliği diğer TMM yöntemlerinden fazladır. Daha kalın malzemeler incelenebilir.
- 4- Çok ince çatlakların (0.4 mm'ye kadar) muayenesine imkan verir.
- 5- Bir yüzeyden yanaşarak muayene yapılabilir.
- 6- Hızlı sonuç verir ve kalıcı kayıt yapma olanağı vardır.
- 7- Diğer tahribatsız deneylere göre iç çatlakları, hata büyüklüğünü ve yönlenmeleri daha doğru şekilde karakterize etmektedir.
- 8- Cihazlar taşınabilir, personel sağlığına ve çevre kirliliğine zararlı etkisi yoktur.
- 9- Yeni geliştirilen bilgisayar bağlantılı cihazlarla iç yapı hataları üç boyutlu olarak görüntülenebilir.

Sakıncaları;

- 1- Kaba yüzeyli, karmaşık şekilli, çok küçük ve çok ince çatlakların incelenmesi zordur.
- 2- Ultrasonik dalgaların malzemeye etkin bir biçimde girmesini sağlamak için yüzeyde kuplaj sıvısına ihtiyaç vardır.
- 3- Yüzeye çok yakın hatalardan döncecek ışınlar algılanamayabilir.
- 4- Muayene işlemi iyi yetişmiş ve teknisyen düzeyinde eleman gerektirir.
- 5- Dökme demirlerin ve iri taneli malzemelerin muayenesi zordur.
- 6-Ultrasonik dalgalara paralel veya belirli açısız pozisyondaki çizgisel hatalar incelenemez. Bu tür hatalar için açılı prob gerekir.
- 7- Cihazın kalibrasyonu ve hata karakterizasyonu için standartlara ihtiyaç vardır.

2.9. Deneysel Çalışmalar

- a) Darbe-yankı yöntemiyle normal prob kullanarak; kalibrasyon, kaba kalınlık ölçme,hata derinliğinin bulunması
- b) Açılı probun, kalibrasyonu ve darbe-yankı yöntemiyle kaynak dikişinin muayenesi

3. KAYNAKLAR

1. Özden, N., Ses ötesi (Ultrasonik) İle Muayene, Segem Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Genel Müdürlüğü, Yayın no.48, Ankara Eylül 1981
2. Halmshaw, R., Non – Destructive Testing
3. Helvacı, E., Ultrasonik Kontrol Yönteminde Hata Değerlendirmesi, Oerlikon Kaynak Bilimi, Sayı: 2, İstanbul, 1995, a.86-98
4. Dikicioğlu, A., Vural. M., Kaynak Hataları ve Nedenleri, Tahribatsız Muayeneler ve Kaynak Bağlantılarına Uygulanışı, TMMOB Makina Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Aralık 1993, s.35-68
5. Tekiz, Y., Tahribatsız Deneyler, İ.T.Ü. Makina Fakültesi Ofset Atölyesi, 1984 Matbaası, İstanbul 1993
6. Yaylalı, G., Değirmenci, S. ve Şirin B.”Demir Döküm.Sektöründe Tahribatsız Muayenenin Önemi ve Uygulamaları”Metalurji,126, 2001