

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ULTRASONİK HIZ ÖLÇME YÖNTEMİYLE REFRAKTER VE SERAMİKLERDE
ÖZELLİK VE ÇATLAK DERİNLİĞİ BELİRLENMESİ**

MEHMET YASAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÜRETİM PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. CEMALETTİN YAMAN**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ULTRASONİK HIZ ÖLÇME YÖNTEMİYLE REFRAKTER ve SERAMİKLERDE
ÖZELLİK ve ÇATLAK DERİNLİĞİ BELİRLENMESİ**

Mehmet YASAK tarafından hazırlanan tez çalışması 2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Cemalettin YAMAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

İSİM

Yıldız Teknik Üniversitesi

İSİM

Yıldız Teknik Üniversitesi

İSİM

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bağımsız araştırma yeteneğimin gelişmesine olanak sağlayan ve yapıcı eleştirilerini benden esirgememiş olan, değerli fikirleri ile bana yön veren danışmanım sevgili Prof. Dr. Cemalettin Yaman'a,

İlkokul çağımdan bu yana eğitim ve öğretim hayatımda sürekli beni olumlu olarak yönlendiren ve metalürji ve malzeme mühendisi olmamda çok büyük etkisi olan Prof. Dr. Sabriye Pişkin'e,

Yüksek lisans eğitim hayatım boyunca çalışma saatlerimde esneklik gösteren Pyrotek Refrakter Sanayi Türkiye yöneticisi O. Murat Özaydınlı'ya ve müdürü Arzu Kızılok'a,

Deneyler esnasında kullanılan refrakter ürünlerinin temini, üretilmesi ve bilgi paylaşımından dolayı Süper Ateş firmasından Doç. Dr. Ziya Aslanoğlu ve çalışanlarına,

Göstermiş olduğu sonsuz sevgi, maddi, manevi destek ve sabır için, sevgili annem Zehra Yasak'a, sevgili kardeşim Hasan Yasak'a sonsuz teşekkür ederim.

Ağustos, 2014

Mehmet YASAK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
ULTRASONİK MUAYENE.....	4
2.1 Tarihçe	4
2.2 Ultrasonik Muayene Tanımı	5
2.3 Ultrasonik Muayenenin Gelişmesini Sağlayan Nedenler	5
2.4 Ultrasonik Muayenede Kullanılan Frekanslar ve Dalga Boyları.....	6
2.5 Ultrasonik Muayene Çalışma Prensipleri	7
2.6 Ultrasonik dalgaların yayılma biçimleri:	9
2.6.1 Boyuna Dalga.....	10
2.6.2 Enine Dalga.....	10
2.6.3 Yüzey Dalgaları	11
2.7 Prob Çeşitleri	11
2.8 Probların Yerleştirme Şekilleri	11
2.9 Ultrasonik Muayenenin Önemi	12
2.10 Ultrasonik Muayenenin Avantajları ve Dezavantajları	14

2.11 Ultrasonik Muayenenin Çalışma Prensipleri	15
2.12 Kuplaj	16
2.13 Gözeneksiz Malzemelerin Yankı Metodu ile Muayenesi.....	20
2.14 Gözenekli Malzemelerin Muayenesi	22
2.15 Ultrasonik Yöntemle Tayin Edilebilecek Minimum Hata Boyu	23
2.16 Ultrasonik Muayene Yönteminde Kullanılan Cihaz	26
2.17 Ultrasonik Yöntemle Gözeneklilik ve Buna Bağlı Özelliklerin Belirlenmesi.....	27
2.18 Ultrasonik Yöntem ile Saptayabileceğimiz Özellikler	28
2.19 Üretimde ultrasonik hızı değiştirebilecek parametreler.....	28
2.20 Kullanım Yerleri.....	29
2.21 Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemiyle Refrakter Malzemelerde Özellik Belirlenmesi.....	30
2.22 Rezonans Yöntemi ile Muayene	33
2.23 Dökülebilir Refrakterlerin Sesle Muayenesi	35
2.24 Ultrasonik Muayene ile Diğer Muayene Yöntemlerin Karşılaştırılması..	38
2.24.1 X-Ray Işınları ile Muayene.....	38
2.24.2 Görsel Muayene	39
2.24.3 Penetrant Muayene.....	39
2.24.4 Manyetik Partiküllerle Muayene.....	39
2.24.5 Eddy Current Muayenesi	40
2.24.6 Phased Array Yöntemi	41
2.25 Ultrasonik Muayene Yönteminin Önemli Uygulama Alanları.....	41
2.25.1 Sürgü Plakasının Muayenesi	42
2.25.2 Sürekli Döküm Borusunun Muayenesi	42
2.25.3 Yüksek Fırın ve Soba Tuğlalarının Muayenesi	42
2.25.4 Ateş Tuğlalarının Ultrasonik Muayene Yöntemiyle Muayenesi	43
2.25.5 Genel Değerlendirme	45
2.26 Pişmiş Seramik ve Refrakter Ürünlerden Numune Çıkarma.....	47
2.26.1 Emniyet Bilgileri.....	48
2.27 Dökülebilir Refrakterlerin Uygulanmasında Dikkat Edilmesi Gereken Uysurlar	48
2.28 Dökülebilir Refrakterlerde Uygun Su Oranının Belirlenmesi	48
2.29 Yüksek Alüminalı Çimentoların Yapısı ve Özellikleri	49
2.29.1 C ₁₂ A ₇	50
2.29.2 CA	50
2.29.3 CA ₂	51
2.29.4 C ₂ AS	51
2.29.5 C ₂ S	51
2.29.6 Demirli Bileşikler.....	51
2.29.7 Fondu	52
2.29.8 Secar 50 / 51.....	52
2.29.9 Secar 80.....	53
2.30 Formüller ve Bağlıntılar	54
2.30.1 Porozitenin Ultrasonik Hıza Etkisi	54
2.30.2 Porozitenin poisson oranına etkisi	56
2.30.3 Çekme Dayanımının Porozite ile ilişkisi	56
2.31 Malzemedeki Ses Hızını ve Ultrasonik Hızı Etkileyen Parametreler.....	58
2.31.1 Porozite, Çatlak ve Boşluk Etkisi	60

2.32 Dökülebilir Refrakterlerde Çatlak Sorunu ve Çözümü	61
2.33 Sıcak Tamir.....	61
2.33 Yüksek Alüminalı Çimentolarda Zamana ve Agreganın Oranına Bağlı Olarak Kullanılan Suyun Ultrasonik Hız Üzerindeki Etkisi	64
2.34 Dökülebilir Refrakterlerde Hidratasyon Boyunca Görülen Süreçler	67
2.34 Standartlar.....	68
2.34.1 ASTM	68
2.34.2 DIN	69
BÖLÜM 3.....	71
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	71
3.1 Deney Sırasında Meydana Gelebilecek Hatalar	71
3.1.1 Proplar Arası Mesafenin Etkisi	71
3.1.2 Prob Bastırma Kuvvetinin Etkisi	72
3.1.3 Kuplaj Malzemesinin Etkisi.....	72
3.2 Refrakter Beton ile İlgili Meydana Gelebilecek Kusurlar.....	73
3.2.1 Agreganın Oranının Ultrasonik Hıza Etkisi.....	73
3.2.2 Heterojen Çekirdeklenme Etkisi	75
3.2.3 Kalıba Döküm Sırasında Oluşan Boşluklar	75
3.3 Refrakter Beton ve Sunta Numunede Yapılan Deneysel Çalışmalar	76
3.3.1 Refrakter Betonda Çatlak Derinliğinin Etkisi	76
3.3.2 Sunta Malzemede Çatlak Derinliğinin Etkisi	77
3.3.3 İki Kenarından Kontrollü Çatlak Oluşturulmuş Sunta Numunesinde Ultrasonik Hız Tayini	79
3.3.4 Kontrollü Oluşturulan Deliklerin Ultrasonik Hıza Etkisi	82
BÖLÜM 4	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	95

SİMGE LİSTESİ

μs	Mikro saniye
Hz	Hertz
kHz	Kilo hertz
m	Metre
MHz	Mega hertz
mm	Milimetre
Mpa	Mega pascal

KISALTMA LİSTESİ

Al_2O_3	Aluminyum Oksit
BaTiO_3	Baryum Titanat
CaO	Kalsiyum Oksit
CCL_4	Karbon tetra-klorür
Fe_2O_3	Demir Oksit
K_2O	Potasyum Oksit
LiSO_4	Lityum Sülfat
MgO	Magnezyum Oksit
NaO	Sodyum Oksit
NDT	Non-Destructive Testing
SiO_2	Kuvars
TiO_2	Titanyum Oksit

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Ultrasonik dalganın parça içerisinde iletilmesinin temsili gösterimi	9
Şekil 2.2 Problemlerin yerleştirilme biçimleri.....	12
Şekil 2.3 Gözenekli bir malzemede ultrasonik dalganın gözenekler arasından geçişi	16
Şekil 2.4 Çelik yüzeyinden gönderilen ultrasonik dalganın çelik numune içerisinde ilerlemesini temsil etmektedir.....	19
Şekil 2.5 Çelik içerisinde ilerleyen dalganın, çelikte yansımaları ve su ortamına geçişini temsil etmektedir.	19
Şekil 2.6 Ultrasonik muayene ile yankı metodu kullanılarak gözeneksiz malzeme içerisindeki hatanın tespiti ve osiloskop ekran görüntüsü	21
Şekil 2.7 Gözeneksiz katı malzemelerde tek prob kullanımı ile ultrasonik hız tayini.	21
Şekil 2.8 Ultrasonik muayene ile numune içerisinde hatanın tespit edilmesi ve osiloskop ekranındaki görüntüsü	25
Şekil 2.9 Altı kapalı bir boruya üfleme sırasında üretilen frekans hesabı	26
Şekil 2.10 Ultrasonik muayene yönteminde kullanılan Pundit cihazı	27
Şekil 2.11 Verici probtan gönderilen ultrasonik dalganın alıcı proba doğru ilerleyişi..	31
Şekil 2.12 Belirli sayıda refrakter için (eğme mukavemeti)-(elastiklik modülü) ilişkisi. Aly and Semler bu ilişkiyi kurmaya çalışmıştır.....	34
Şekil 2.13 3 boyutlu titreşen piyano telinin dalga boyunun yarısına eşitliği	38
Şekil 2.14 3 boyutlu titreşen piyano telinin dalga boyunun yarısına eşitliği	38
Şekil 2.15 Ultrasonik NDT İncelemesi örneği.....	41
Şekil 2.16 Yüksek gözenekli tuğla için ultrasonik hız ile görünür gözeneklilik (sol), eğme mukavemeti (sağ) arasındaki ilişki.....	43
Şekil 2.17 Oda sıcaklığındaki basma mukavemeti ile ultrasonik hız arasındaki ilişki. A,B ve C özel şekilli ateş tuğlalarıdır	45
Şekil 2.18 %90 alüminalı refraktere ait LogMOR/Ultrasonik Hız ilişkisi	46
Şekil 2.19 Alümina oranının mukavemete, maliyete ve maksimum kullanım sıcaklığına etkisi şematik genel eğilim olarak verilmiştir.	53
Şekil 2.20 Su oranına bağlı olarak dökülebilir refrakterin şekillendirilmesi esnasında vibratörün mukavemet üzerindeki etkisi.....	54
Şekil 2.21 Perlitli dökülebilir refrakterde basma dayanımının yoğunluğa bağlı değişimi (R: Regrasyon Katsayısı)	57
Şekil 2.22 Perlitli dökülebilir refrakterde ultrasonik hızın yoğunluğa bağlı değişimi (R: Regrasyon Katsayısı)	58
Şekil 2.23 Perlitli dökülebilir refrakterde ultrasonik hızın basma dayanımına bağlı değişimi (R: Regrasyon Katsayısı)	58

Şekil 2.24	Üçlü çatlak oluşumu	61
Şekil 2.25	4 farklı alümina içeriğine sahip refrakterin zamana bağlı olarak ultrasonik hızdaki değişimi	66
Şekil 2.26	Hidratasyon prosesi boyunca görülen süreçler (a) Isı değişim eğrisi, (b) Hidratasyon eğrisi, (c) Malzeme Özelliği	67
Şekil 3.1	Problar arası mesafenin ultrasonik hıza etkisi	72
Şekil 3.2	Agrega oranındaki değişimin ultrasonik hıza etkisi	74
Şekil 3.3	Refrakter betonda oluşturulan kontrollü çatlakların ultrasonik hız üzerindeki etkisi	77
Şekil 3.4	Sunta çatlak derinliğinin ultrasonik hıza etkisi.....	79
Şekil 3.5	Kontrollü olarak çatlak oluşturulmuş 340x 470 mm ölçülerinde sunta numunesi	80
Şekil 3.6	Kontrollü çatlak oluşturulmuş sunta numunesinde 0 noktasından itibaren ölçülen ultrasonik hız değerleri.....	82
Şekil 3.7	5 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi	83
Şekil 3.8	7 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi	84
Şekil 3.9	9 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi	84
Şekil 3.10	11 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi	85
Şekil 3.11	12,5 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi	85
Şekil 3.12	12 mm kalınlıktaki sunta numunesindeki ultrasonik hız değerlerin grafik halinde gösterimi.....	87
Şekil 3.13	12 mm kalınlıktaki sunta numunesindeki yüzde oranların değerlerin grafik halinde gösterimi.....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Ultrasonik muayenenin avantajları ve dezavantajları.....	14
Çizelge 2.2 Ultrasonik dalgaların üretiminde kullanılan piezoelektrik malzemeler ve özellikleri	15
Çizelge 2.3 Seramik ve metalik malzemelerde minimum hata boyutunun kullanılan frekansa göre değişimi.....	24
Çizelge 2.4 Elde edilen ultrasonik hıza bağlı olarak refrakterlerde yapılacak olan genel kalite değerlendirmesi.....	26
Çizelge 2.5 Bazı canlı türlerinin ısıtma ve ses üretme aralığı frekans değerleri	37
Çizelge 2.6 Çeşitli kalsiyum-alüminat çimentoların kimyasal bileşimleri	49
Çizelge 2.6 Yüksek alüminalı çimentoya ve %50 alümina ilaveli çimentoya katılan su oranı	65
Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan agreganın kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri	73
Çizelge 3.2 Morcast 145 kimyasal bileşim ve fiziksel özellikleri	76
Çizelge 3.3 Kontrollü çatlak oluşturulmuş sunta numunesinde 0 noktasından itibaren ölçülen süreler ve ultrasonik hız değerleri	81
Çizelge 3.4 12 mm kalınlıkta üretilen sunta numunesinde yapılan ultrasonik hız ölçümleri ve değişim yüzdeleri	86

**ULTRASONİK HIZ ÖLÇME YÖNTEMİYLE REFRAKTER VE SERAMİKLERDE
ÖZELLİK VE ÇATLAK DERİNLİĞİ BELİRLENMESİ**

Mehmet YASAK

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cemalettin YAMAN

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte geçtiğimiz yüzyılda, başta demir-çelik sanayi olmak üzere bütün metalürji sanayinde refrakter ihtiyacı artmıştır. Dökülebilir (monolitik) refrakterler üzerinde yapılan araştırmalar, şekillendirilmiş refrakterlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin yeterli olmadığını ortaya koymuştur. Bu araştırmalarda ham maddelerin saflığının etkisi ve kimyasal bağlayıcıların özellikler üzerindeki etkisi de incelenmiş ve farklı uygulamalar için farklı kimyasal bağlayıcılar ihtiyaç duyulduğu ortaya konmuştur. Bundan dolayı monolitik refrakter içerisindeki kimyasal bağlayıcılar, refrakterin özelliklerini ile döküm parametrelerini etkilemekte ve monolitik refrakterleri sınıflandırmaktadır.

Son yıllarda fırın hacimleri ve fırın ömürleri arttırıldı. Bunlarda kullanılacak malzemelerin kalitesinden emin olma sorunu ortaya çıktı. Bu konuda en etkin kalite kontrol yöntemi olarak ultrasonik yöntem geliştirildi. Kullanılacak malzemelerin kalitesinden emin olduğumuz için fırın boyutları göreceli olarak düşürüldü.

Katı malzeme içerisinde ilerleyen ultrasonik dalga, dökülebilir refrakterin ve ahşap malzemenin yoğunluğundan ve elastik özelliklerinden etkilenmektedir. Bu malzemelerin kaliteleri elastiklik özellikleri ile ilişkili olduğu için ultrasonik hız ölçümü bu malzemelerin elastiklik özellikleri hakkında bilgi vermesi için sıkça kullanılabilmektedir.

Ultrasonik tarama betonun homojenliği ve segregasyon olup olmadığını kalitatif olarak tayin etmemizi sağlayan tahribatsız bir muayene yöntemidir. Test cihazları, betonda

ultrasonik hızı tayin etmeye yarar. Ultrasonik hızdan giderek çatlakları, boşlukları, mukavemeti ve dinamik elastiklik modülünü tahmin edebiliriz. Bu cihaz, seramik üreticisi ve kullanıcılarının özel ihtiyaçları için (kalite kontrol amaçlı) kullanılır.

Bu çalışmada monolitik refrakterlerde kullanılan kimyasal bağlayıcıların dökümde şartlarına ve özelliklere etkisi açıklanmıştır. İlave olarak monolitik refrakterlerde yaygın olarak kullanılan kalsiyum alüminat bağlayıcının döküme etkisi de açıklanmıştır. Deneylerde, kalsiyum alüminat refraktere ilave edilen su oranının özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Uygun miktarda eklenen su ve değişik oranlarda eklenen suyun mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmalarda, 3 farklı agrega oranı kullanılmış ve mekanik dayanım ile ultrasonik hız etkisi analiz edilmiştir. Ultrasonik hız ile basma dayanımı arasında bir ilişki bulunmaktadır. Ultrasonik hız ölçme yöntemi, dökülebilir refrakterlerde basma dayanımı ile su oranı (ağırlıkça) arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için etkin bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Bu metot, dökülebilir refrakter üretiminde kalite kontrol amaçlı ile malzemenin üretiminde ve kullanım aşamasında kullanılabildiği için, çatlaklı sunta numunelerle iki farklı deney yapılmıştır. Alınan test sonuçlarına göre, numune içerisinde çatlak, kırılma veya parça kopması olması halinde, ultrasonik hızın düşmesi neticesine bakılarak parça hakkında yorum yapılabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Ultrasonik hız, tahribatsız muayene, dökülebilir refrakter, su oranı, kalsiyum alüminat, çatlak

ABSTRACT

QUALIFY THE FRACTURE AND SPECIFICATION IN REFRACTORIES AND CERAMICS WITH ULTRASONIC VELOCITY TESTING METHOD

Mehmet YASAK

Department of Metallurgy and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Cemalettin YAMAN

Especially in the last century as a result of technology development, the whole metallurgy industry leading iron-steel increased expectation from refractory materials. The research of unshaped (monolithic) refractories have gained importance, with understood of high physical, chemical and mechanical properties had not been met from the shaped refractory materials. In these researches, also the effect of high purity raw materials, the effect of chemical binders on properties were observed and it is required that application of various chemical binders for several demands. Therefore chemical binders in monolithic refractories the effect on properties and installation variety, chemical binders in monolithic refractory classifies.

In the last few years furnace capacities and furnace lifetime is increased. Because of that reason it is going to be an obligation to determine the quality of used materials. Ultrasonic testing method is one the most effective method. As much as we are sure about the quality of used materials, as much as we could lower the quantity of used materials.

The velocity of ultrasonic pulses travelling in a solid material depends on the density and elastic properties of castable refractories and timbers. The quality of these materials is sometimes related to their elastic stiffness so that measurement of ultrasonic pulse velocity in such materials can often be used to indicate their quality as well as to determine their elastic properties.

Ultrasonic scanning is a recognized non-destructive evaluation test to qualitatively assess the homogeneity and integrity of concrete. The ultrasonic tester devices are used for measuring the velocity of ultrasonic pulses through a concrete section providing information on cracks, voids, strength, and giving quick estimates of dynamic modulus of elasticity on site or in the laboratory. This unit has also been modified to suit the special needs of ceramics users.

In this study various chemical binders in monolithic refractories the effect of on installation and their properties are explained. Also it is explained that the effect on the installation of calcium aluminate cement which is widespread chemical binder in monolithic refractories. In experiments, it is investigated that how the amount of water added to calcium aluminate cement changes the properties of refractory materials. Also conformable amount of water adding and mechanical properties of various specimen with different amount water are determined. 3 different percentage of aggregates used in trials and analyse effect to material strength and ultrasonic velocity. There is a relationship between the ultrasonic velocity and compression strength. Ultrasonic testing was found to be an effective method for determining compression strength and water percentage (weight) in castable refractory.

Since this method can be used as a quality control test for checking castable refractory while and during production, we also made 2 different fracture test with woods. With test results, it is obvious that if there is a fracture, crack or missing part in the material, it could be easily understood by getting lower pulse velocity.

Keywords: Ultrasonic velocity, non-destructive testing method, castable refractory, water content, calcium aluminate, fracture

1.1 Literatür Özeti

Ultrasonik muayenenin imalatta kalite kontrol amaçlı uygulamaları, dökülebilir refrakterlerde şekillendirme, yüksek alüminalı çimento ve agrega oranına bağlı olarak su oranı, döküm koşulları, karıştırma, şişleme ve benzeri işlemler mukavemeti ve dolayısıyla ultrasonik hızı etkilemektedir. Ultrasonik hız ile mukavemet arasında doğru orantılı ilişkiler kurulabilmektedir. Ultrasonik muayene ile bu etken faktörlerin değişmesi halinde üretim sırasında ultrasonik hız ile mukavemet arasında bir ilişki kurup, ultrasonik hız kontrol edilerek üretimin yolunda gidip gitmediği kontrol edilebilmektedir.

Son yıllarda ultrasonik hız ölçümüyle kalite kontrol yaygın kullanılan bir yöntem olmuştur. Ürün özelliklerini, kalitesini ve üniformluğunu ortaya koymak ve karşılaştırma yapmak için uygulanmaktadır. Dataların teknik geçerliği, kullanım kolaylığı ve ekipmanın portatif olması nedeniyle metodun önemi giderek artmakta ve daha geniş uygulama alanı bulmaktadır. Refrakter kalitelerinin ve maliyetlerinin giderek artmasından tahmin edilebilir ki gelecek yıllarda ultrasonik hız ölçümüyle kalite kontrolünün önemi artacaktır. Burada etkin zaman ve maliyette önemlidir. Refrakter üretim prosesinin anlaşılması da önemlidir. Tahribatlı ve tahribatsız deney sonuçları arasında geçerli uygun ilişki kurulmasıyla bundan sonra sadece ultrasonik deney sonuçları kullanılacaktır. Sonik yöntem ayrıca iç laminasyonları, düşük yoğunluklu bölgeleri ve diğer yapı hatalarını da ayırmamızı sağlar. Ultrasonik yöntem refrakter kalitesini geniş bir perspektif alanda sunar.

1.2 Tezin Amacı

Literatür özeti kısmında belirtildiği gibi, ultrasonik hız ile mukavemet arasında doğru orantılı ilişkiler kurulabilmektedir. Çalışmanın amaçlarından biri bu etken faktörlerin değişmesi halinde üretim sırasında ultrasonik hızı ile mukavemet arasında bir ilişki kurup, ultrasonik hız kontrol edilerek üretimin yolunda gidip gitmediği kontrol edebilmektir.

Monolitik refrakterlerin imalatı sırasında işçilik veya malzeme kusurları olabilir. Monolitik refrakterler sinterlendikten ve pişirildikten sonra, rutubet ve kristal bağlı suyu kaybeder ve çatlaklar meydana gelir. Çoğu uygulamada bu çatlaklar kullanım amacına zarar vermez ve gerçekte bu çatlaklar ilk pişirme sonrası ısıtma soğutma işlemlerinde malzemedeki meydana gelen genleşmenin basma gerilmesi meydana getirmesini önleyeceği için çok yararlıdır. Astarların dövülmesi sırasında laminasyon çatlakları da meydana gelebilmektedir. Ancak bunun dışında üretim sırasındaki sorunlar nedeniyle segregasyon ve benzeri nedenler ile belirli bölgelerde çatlakların fazla olmasına sebep olmaktadır. Kullanım sırasında fırın duvarlarında malzeme birikmesi ile kalınlaşma veya tam tersine erozyon veya korozyon nedeniyle incelme meydana gelebilir. Ayrıca fırınlarda metal donatılarda korozyon meydana gelirse donatı ile refrakter arasında boşluk meydana gelebilir. Ultrasonik yöntemle bu tip hatalar zamanında saptanabilir. Fırın kullanıma alınmadan önce saptanacak hatalar, çok düşük maliyet ile telafi edilebilir. Bu hataların kullanım sırasında ortaya çıkması ciddi masraflara neden olabilir.

Tahribatsız ultrasonik hız ölçme yöntemiyle ateş tuğlasında laminasyon ve göbeklenme gibi içyapı hataları belirlenebilir. Tüm refrakterlerde gözenek oranı, yoğunluk, basma dayanımı ve eğme mukavemeti ultrasonik hız ölçülerek tayin edilebilir. Dökülebilir refrakterlerde ultrasonik hızı bağli olarak plastiklik suyu pişmiş malzemenin basma dayanımı tayin edilebilir. Elde edilen bu sonuçlar kalite kontrol amacıyla kullanılabilir. Rezonans yöntemiyle dinamik elastiklik modülü, buna bağli olarak da eğme mukavemeti bulunabilir. Fakat cihaz pahalıdır ve kullanımında zorluklar vardır.

1.3 Hipotez

İmalat sırasında oluşan herhangi bir hatanın ultrasonik yöntemle bu aşamalarda tayin edilmesi ve bunların giderilmesi, sorunların çalışma sırasında ortaya çıkması durumunda meydana gelecek ciddi zararları önlediği için çok büyük yarar sağlar. Birçok endüstri sanayiinde ve inşaat sektöründe bu hataların önceden tespiti ve önlem alınması sonradan önüne geçilemeyecek iş kazalarının engellenmesi ve büyük maddi kayıpları bertaraf etmek için kullanılabilir.

ULTRASONİK MUAYENE

Ultrasonik muayene bir tahribatsız muayene olup, test edilen malzemeleri tahrip etmeden 20.000 Hz frekansın üzerindeki dalgalar kullanılarak uygulanan bir muayene yöntemidir. Tahribatsız muayene yöntemi sadece malzemedeki hataları ortaya çıkarmakla kalmamakta, aynı zamanda da malzemenin kalitesi hakkında bilgi verebilmektedir [1]. Seramik malzemelerde, önceden diyagram çizilmişse, mukavemet tayin etmemize olanak sağlar. Kalite üzerine en iyi istatistik bilgi ancak tahribatsız yöntemle sağlanabilir [2]. Tahribatlı yöntemler hem malzeme kaybına yol açarlar hem de laboratuvarında masrafa neden olurlar. Oysa ultrasonik yöntem bütün bu sorunları ortadan kaldırır.

2.1 Tarihçe

Ultrasonik muayene yöntemi 1948'de keşfedildikten sonra metallere uygulanmıştır. Seramikler gözenekli yapıya sahip olduğu ve gözenekleri aşan dalga yöntemi uygulanması gerektiği için ultrasonik yöntemin seramiklere uygulanması gecikmeli olmuştur. 1960'lerden sonra ateş tuğlasına uygulanmasına başlanmıştır. Ultrasonik uygulamanın tıp alanındaki yaygınlaşması ve kullanım sıklığının artması gibi, metal ve seramiklerde de kullanımı yayılmıştır. Duyulabilir ses dalgaları eski zamanlardan beri malzeme muayenesinde kullanılmıştır. Özellikle seramik parçalarda parçaya vurulduğu zaman çıkan sesteki parçada bir hata olup olmadığı anlaşılabilmektedir. Örneğin demiryollarında, balyozla raylara vurarak muayene yapılmaktadır [3].

2.2 Ultrasonik Muayene Tanımı

Çalışan ekipmanlarda bir parçanın kullanım sırasında arızalanması, kırılması, o anda çok büyük zararlara neden olabilir. Fırınlarda tuğlaların veya diğer parçaların kullanım sırasında arızalanması ciddi zararlara yol açar. Arıza meydana geldiği zaman fırındaki çok miktarda malzemenin ıskartaya atılmasına neden olur.

Son yıllarda endüstriyel refrakterlerin ultrasonik yöntemle muayenesi, ürün özelliklerini, kalitesini ve üniformluğunu ortaya koymak genel bir olay haline gelmiştir [3]. Kullanım kolaylığı, cihazın portatif oluşu nedeniyle gelecekte daha fazla kullanılabilir.

Ultrasonik tarama betonun homojenliği ve segregasyon olup olmadığını kalitatif olarak tayin etmemizi sağlayan tahribatsız bir muayene yöntemidir [4].

Test cihazları, betonda ultrasonik hızı tayin etmeye yarar. Ultrasonik hızdan giderek çatlakları, boşlukları, mukavemeti ve dinamik elastiklik modülünü tahmin edebiliriz [5]. Cihaz genel olarak sunta, beton, seramik ve plastik malzemelerin muayenesinde kullanılır [6]. Bunun yanında cihaz, seramik üreticisi ve kullanıcılarının özel ihtiyaçlar için (kalite kontrol amaçlı) sıkça kullanılır. Ultrasonik muayene yangında hasar gören refrakterler ve betonların da muayenesinde kullanılmaktadır [7].

2.3 Ultrasonik Muayenenin Gelişmesini Sağlayan Nedenler

Tahribatsız muayene yöntemleri, tahribatlı muayene yöntemlerinin birçok dezavantajlarını bertaraf etmektedir. Özellikle ultrasonik muayene, tahribatsız muayene yöntemleri içerisinde en popüler olanıdır [8].

Tahribatsız muayenenin gelişmesini sağlayan nedenler arasında aşağıdaki maddelerden bazıları sayılabilir.

- Parçaların hafifletilmesi nedeniyle limit dizaynlara gidilmesi ve bu limit dizaynlarda kusursuzluk olayının ön plana çıkması,
- Belirli bir kademede hatayı belirleyip, müteakip işçilik masraflarının minimuma indirilmesi,

- Kazaları önlemek ve sistemin durmasını önlemek [4], [9]. Buna örnek olarak, uçaklarda millerin ve dönen diğer parçaların yorulma çatlak testleri periyodik olarak kontrol edilmektedir. Çatlak başladıktan sonra kalan ömür toplam ömrün %10'u kadardır.

2.4 Ultrasonik Muayenede Kullanılan Frekanslar ve Dalga Boyları

İnsan kulağı 20 Hz – 20.000 Hz (20 kHz) arasındaki frekansları işitebilmektedir. 20.000 Hz ve üzeri frekanslı dalgalara ultrasonik dalga denir.

Metal malzemelerin muayenesinde genellikle 500.000 – 10.000.000 Hz'lik (0,5-10 MHz) dalgalar kullanılır.

Seramik, refrakter ve beton malzemelerin muayenesinde ise 20.000 – 250.000 Hz (20-250 KHz) frekanslı dalgalar kullanılır (Pundit kataloğu). Özellikle 1-2 mm grog tanelerini geçecek şekilde seçim yapılmıştır. Beton muayenesinde ise 54 kHz kullanılır, yaklaşık 12 mm kadar olan çakıl tanelerini de geçmesi hedeflenmiştir. Refrakter muayenesinde daha çok 150 kHz frekanslı dalgalar kullanılır. Agregaların çapı genellikle 2 mm'yi geçmez [10], [11].

Seramik malzemelerde ultrasonik hız, elastiklik modülü, poisson oranı ve mekanik özellikler malzemedeki gözenek oranına bağlı olarak geniş bir aralıkta değişmektedir. Dökülebilir refrakterlerin 200 metreye varan uzunlukta yapıldığı veya 15-20 yıl çalışacak bir fırın duvarında tahribatsız muayenenin önemini anlamak zor değildir.

Frekans arttıkça ultrasonik dalga kolay demet haline getirilebilmektedir. Ultrasonik dalgalar genellikle piezoelektrik malzemelerle üretilir. Bu malzemeler, elektrik akımı uygulandığında fiziksel boyut değişimi gösterir. Bu olayın tersi de doğrudur. Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü piezoelektrik olay olarak adlandırılır. Kuvars en fazla kullanılan kristaldir, baryum titanat da çok kullanılır. Piezoelektrik malzeme ($BaTiO_3$) sıkıştığı zaman elektrik akımı üretir ve kıvılcım çıkartır.

Tahribatsız muayene yöntemi sadece malzemedeki hataları ortaya çıkarmakla kalmamakta, aynı zamanda da malzemenin kalitesi hakkında bilgi verebilmektedir. Ultrasonik hız frekanstan etkilenmez. Fakat dalga boyu ile frekans ters orantılıdır. Bu

nedenle ultrasonik hız genellikle malzemelerin özelliklerine bağlı olup, bu hızın ölçülmesi malzeme hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar.

Katı malzeme içinde hareket etmekte olan ultrasonik dalga o malzemenin yoğunluğundan ve elastik özelliklerinden etkilenir. Bir malzemenin kalitesi kimi zaman bu elastik özelliklere bağlı olarak, dolayısı ile ultrasonik hıza bağlı olarak değişir. Tahribatlı deneylerde numuneler kullanılamaz duruma gelirken, bunlara ek olarak test masrafları da meydana gelmektedir. Ultrasonik muayenede parçalar kırılmadığından bu tür masraflar en aza indirilmektedir.(Pundit [5])

Ultrasonik muayene ile malzeme mukavemetlerini güvenle tayin edebiliriz. Bazı ürünlerin özelliklerinin birbirlerine yakın olup olmadıklarını kontrol edebiliriz. Bu tür muayenelerde oldukça ekonomik bir yöntemdir. B.S.1881; Part 203; 1986 and ASTM C 597 – 83’e uygun ultrasonik cihazlar en fazla beton muayenesinde kullanılmaktadır [12]. Seramik malzemenin homojenliğini, bir parti içindeki parça özelliklerinin birbirine yakın olup olmadığını, refrakter beton gibi malzemelerde, hidratasyon gibi reaksiyonlarla özelliklerin zamanla değişip değişmediği saptanabilir. Betonda ve refrakter betonda donma ve kimyasal olaylardan etkilenme saptanabilir.

2.5 Ultrasonik Muayene Çalışma Prensipleri

Tahribatsız muayene yöntemi sadece malzemedeki hataları ortaya çıkarmakla kalmamakta, aynı zamanda da malzemenin kalitesi hakkında bilgi verebilmektedir. Katı malzeme içinde hareket etmekte olan ultrasonik dalga, o malzemenin yoğunluğundan ve elastik özelliklerinden etkilenir. Bir malzemenin kalitesi kimi zaman bu elastik özelliklere bağlı olarak, dolayısı ile ultrasonik hıza bağlı olarak değişir. Tahribatlı deneylerde numuneler kullanılamaz duruma gelirken, bunlara ek olarak test masrafları da meydana gelmektedir. Bazı uygulamalarda tahribatsız muayene yöntemi ile yapılan deneyler, parça maliyetini çok fazla etkilememektedir [13].

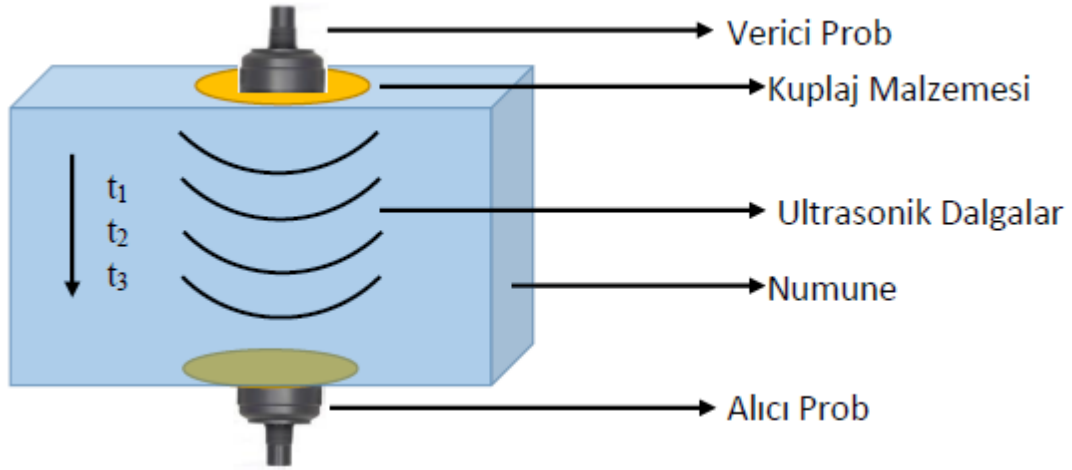
Ultrasonik dalganın frekansı arttıkça daha kolay demet haline gelebilir ve daha küçük hatalar saptanabilir [11]. Ultrasonik dalga parça yüzeyinden gönderilir ve bir pik osiloskop ekranında görülür. Daha sonra, arka yüzeyden yansıyan dalga proba geri döndüğünde arka yüzey piki ekranda görülür. Bu iki pik ayar düğmesi ile birbirine

yaklaştırılabilir veya uzaklaştırılabilir. İki pik arasındaki mesafe parça kalınlığını gösterecek şekilde ayarlanabilir. Seramik ve refrakter malzemelerde düşük frekans kullanmak zorunluluğu vardır. Bunun sebebi yapıdaki gözeneklerin büyük olmasıdır. Ultrasonik dalganın bir ortamda yayılma hızını etkileyen unsurlar, o ortamın yoğunluğu ve elastik özellikleridir. Ultrasonik yöntemle refrakter malzemenin muayenesinde problemlerin üzerine vazelin sürülür.

Ultrasonik dalgalar katıların içinde doğrusal olarak yayılırlar, metrelerce yol kat etseler bile çok az zayıflarlar [3]. Bu yönüyle x-ışınlarından ayrılırlar. Hareket doğrultusunda rastladıkları çok küçük boşluklarda bile yansır ve osiloskop ekranında hata piki olarak ortaya çıkarlar. Fakat bu kural seramik ve beton muayenesinde geçerli değildir çünkü seramiklerin muayenesinde düşük frekanslar kullanılır. Bu tip malzemelerin muayenesinde ultrasonik hızın ölçümüyle bilgi edinilir. Şekilli refrakterlerin ultrasonik yöntemle tahribatsız muayenesinin çabuk ve güvenilebilir yöntem olduğu ispatlandı. Ultrasonik dalganın gecikmesi, yani dalganın geçiş süresinin uzaması, bazı tip hataların veya süreksizliğin örneğin boşluk veya laminasyon hatasının olduğunu gösterir [14].

Kalite kontrol üzerine daha iyi istatistik değerlendirme tahribatsız yöntem uygulanarak başarılabılır. Bu metotla hızlı ve daha çok sayıda numune deneye tabi tutulabilir. Refrakterlerin tahribatsız muayenesinde 2 yöntem vardır. Rezonans yöntemi ve ultrasonik hız ölçme yöntemidir. Tahribatsız muayene, yalnızca malzemelerin çatlaklarını bulmaya yarayan bir yöntem değildir. Seramik ve refrakter malzemelerde, ultrasonik hızın ölçümü ile bilgi edinilebilmektedir. Şekillendirilmiş refrakter malzemesinin yapısındaki gözenekliliğin tespiti için ultrasonik yöntemin çabuk ve güvenilir bir yöntem olduğu ispatlanmıştır. Yöntem, malzemelerin kalitesi ve homojenliği ile de uğraşır. Nitekim bu araştırmalarda ultrasonik hız ile eğme mukavemeti veya basma mukavemeti arasında ilişki kurmaktadır. Tahribatsız muayene imalat sırasında kalite kontrolünde, proses kontrolünde, tesislerin yerlerinde incelenmesinde servis sırasında çatlamların kontrolünde kullanılır. Yukarıda adı geçen iki tahribatsız yöntemde henüz gelişme çağındadır. Şekilli refrakterlerin ultrasonik yöntemle tahribatsız muayenesinin güvenilebilir yöntem olduğu ispatlanmıştır. Ultrasonik dalgaların gecikmesi yani dalgaların geçiş süresinin uzaması bazı tip

hataların veya süreksizliğinin örneğin boşluk veya laminasyon hatasının olduğunu gösterir. Gelecek yıllarda ultrasonik hız ölçümü ile kalite kontrolünün önemi daha da artacaktır. Bunu refrakter kalitelerinin ve maliyetlerinin giderek artmasından anlayabiliyoruz.



Şekil 2.1 Ultrasonik dalgaın parça içerisinde iletilmesinin temsili gösterimi

Son yıllarda ultrasonik hız ölçümüyle kalite kontrol yaygın kullanılan bir yöntem olmuştur. Ürün özelliklerini, kalitesini ve üniformluğunu ortaya koymak ve karşılaştırma yapmak için uygulanmaktadır. Dataların teknik geçerliliği, kullanım kolaylığı ve ekipmanın portatif olması nedeniyle metodun önemi giderek artmakta ve daha geniş uygulama alanı bulmaktadır. Refrakter kalitelerinin ve maliyetlerinin giderek artmasından tahmin edebiliriz ki gelecek yıllarda ultrasonik hız ölçümüyle kalite kontrolünün önemi artacaktır. Burada etkin zaman ve maliyette önemlidir. Refrakter üretim prosesinin anlaşılması da ayrıca önem arz etmektedir. Tahribatlı ve tahribatsız deney sonuçları arasında geçerli uygun ilişki kurulmasıyla bundan sonra sadece ultrasonik deney sonuçları kullanılacaktır. Ultrasonik yöntem ayrıca iç laminasyonları, düşük yoğunluklu bölgeleri ve diğer yapı hatalarını da ayırmamızı sağlar.

2.6 Ultrasonik dalgaların yayılma biçimleri:

Ultrasonik muayene için en yaygın kullanılan dalga türleri boyuna (basınç) ve enine (kesme) dalgalarıdır. Normal prob denilen sıfır derece giriş açısına sahip problemlerle

çalışılırken malzeme içinde ilerleyen dalgalar boyuna dalgalardır. Açılı problemler ise malzeme içine genellikle 45°, 60° ve 70° giriş açısı ile (bu değerler çelik malzeme içindir) enine dalgalar gönderir [9].

2.6.1 Boyuna Dalga

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{d(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.1)$$

V: Ultrasonik Hız

E: Elastiklik Modülü

ν : Poisson Oranı

d: Yoğunluk [9]

Titreşim doğrultusu ile yayılım doğrultusu aynı olan ultrasonik dalgalara boyuna dalga denir. Titreşen komşu atomlar bir periyodun yarısında birbirine yaklaşarak sıkışırlar. Periyodun diğer yarısında ise komşu atomlar birbirinden uzaklaşarak kendi aralarında bir çekme kuvvetinin doğmasına neden olurlar. Böylece malzeme içinde elastik sınırı içinde kalan bası ve çeki kuvveti oluşur. Kalınlık ölçümlerinde boyuna dalgalar kullanılır. Günlük hayattaki ses dalgaları bu şekildedir.

Boyuna dalgalar bir boşluğa çarpmaz ise hareket doğrultusuna dik düzlemden proba doğru geri yansıma olurken diğer yüzeylere çarpanlar yüzeyle belirli bir açı yapacak şekilde çevreye saçılırlar. Bu saçılan dalgalar başka boşluklara çarparak boşluk çevresini dolaşıp ilerlemeye devam eder. Eğer boşlukların çevresinde ilerleme olanağı olmasaydı gözenekli seramikleri ultrasonik yöntemle muayene etmek mümkün olmazdı.

2.6.2 Enine Dalga

$$V = \sqrt{\frac{E}{2d(1+\nu)}} \quad (2.2)$$

V: Ultrasonik Hız

E: Elastiklik Modülü

ν : Poisson Oranı

d : Yoğunluk [9]

Titreşim doğrultusu yayılma doğrultusuna dik olan ultrasonik dalgalara enine dalgalar denir. Buna aynı zamanda kayma dalgası adı da verilir. Atom düzlemleri birbirine sıkıştırarak değil, birbirine göre kayarak titreşim hareketini yitirirler. Atomlar arasında bağ kuvveti olan ortamlar yani katılar içinde kayma gerilmesi doğabilir. Dolayısıyla enine dalgalar ancak katı ortamlarda yayılırlar. Örneğin kaynak dikişi muayenesinde sık kullanılan bir yayılma çeşididir. Enine dalgaların katı ortamlarda yayılma hızı boyuna dalgaların yaklaşık yarısıdır.

2.6.3 Yüzey Dalgaları

Yüzey dalgaları ile ilgili detaylı bilgiler Metals Hand Book Non-destructive Testing Methods cildinde mevcuttur. Çalışmamızı çok fazla ilgilendirmedeği için değinilmemiştir.

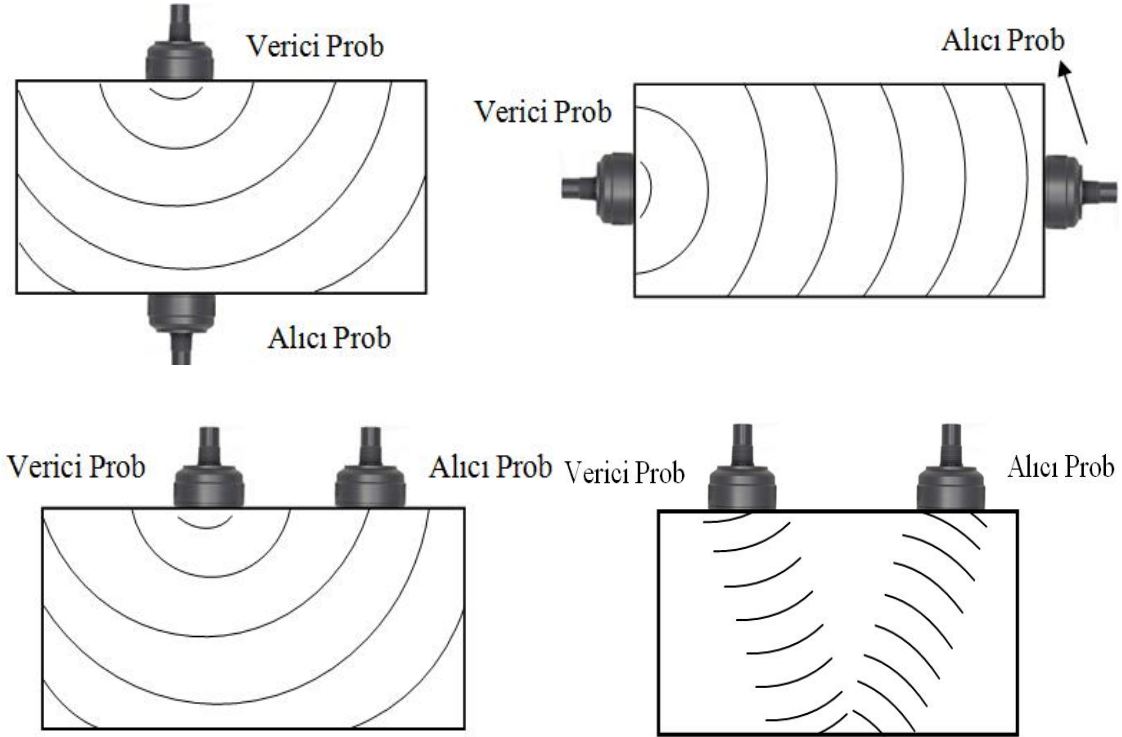
2.7 Prob Çeşitleri

Ultrasonik dalgaları parça üzerine göndermeye veya gönderilen dalgaları algılamaya yarayan parçalara prob denir. Ultrasonik muayenede temelde beş çeşit prob kullanılır. Bunlar, normal, açısız, daldırmalı, çift elemanlı ve geciktirme blokludur. Normal prob, dövme parçalar, kalıntılar, kofluk şeklinde tanımladığımız hatalar ve katmerlerin bulunmasında, yırtılmalarda kullanılır. Açısız prob, hatanın kendi eksenine ile belirli bir açı yapması halinde kullanılır. Özellikle gözeneklilik tespitinde sıkça kullanılır. Daldırmalı prob, seri kontrollerde su ile yapılan muayeneler için kullanılan bir prob çeşididir. Çift elemanlı prob ve geciktirme blokludur prob ise kalınlık incelemelerinde kullanılır [9].

2.8 Probların Yerleştirme Şekilleri

Seramiklerin muayenesinde çift problu ultrasonik cihazlar kullanılmaktadır. Bir probtan çıkan ultrasonik dalga diğerine ulaştığında geçiş zamanı mikro saniye olarak cihaz tarafından saptanır. Problar muayene edilecek parçaya göre üç şekilde yerleştirilir. Bunlar direkt, yarı direkt, endirekt veya yüzey yansımalıdır. Şekil 2.2’de direkt

yerleştirme biçimi, yerleştirme biçiminin bir başka şekli ve endirekt yerleştirme biçimi görülmektedir.



Şekil 2.2 Probların yerleştirilme biçimleri [4], [10]

Ultrasonik hız, yol/zaman formülü ile bulunur. Yol ve zaman ± 1 tamlıkla ölçülmelidir. Bir probtan çıkan ultrasonik dalga diğerine ulaştığında geçiş zamanı mikro saniye olarak cihaz tarafından saptanır [4], [10].

2.9 Ultrasonik Muayenenin Önemi

Dökülebilir refrakterler yüksek alüminalı çimento ve agregası olmak üzere iki farklı maddeden oluşmaktadır. Ultrasonik dalganın bu tür fazların birinden diğerine kırılarak geçişi, yansıması ve boşluklardan yansıması Krautkramer firmasının 'Introduction to the Basic Principles' kataloğunda geniş açıklanmıştır [15]. Ultrasonik yöntem ateş tuğlalarında iç çatlakların saptanmasında etkili olarak kullanılabilir. Çok sayıda veri göstermiştir ki ateş tuğlasında basma dayanımı ile ultrasonik hız arasında doğrusal ilişki vardır. Kok fırınlarında kullanılmadan önce kalite kontrol amacıyla kullanılabilir [16]. Russel, ateş tuğlası, yüksek alüminalı ve bazik refrakterler

üzerinde ultrasonik hız, yoğunluk ve mukavemet tayinleri yapmıştır. Porozite ile ultrasonik hız, eğme dayanımı ile ultrasonik hız arasında doğrusal ilişki kurmuştur [2]. Aly, pişmiş yüksek alüminalı, müllit, yüksek görevli ateş tuğlası, vitroz silika ve karbon refrakterleri üzerinde ultrasonik ölçmeler yapmıştır [3]. Ultrasonik hızla diğer özellikler arasında ilişki kurmaya çalışmıştır. %90 alüminalı refrakterlerde,

$$\sigma = A e^{Bv} \quad (2.3)$$

σ : Basma Dayanımı

V: Ultrasonik Hız

diğerleri sabit olmak üzere bir ilişki araştırmıştır. Diğer refrakterler içinde aynı eğilimin söz konusu olduğunu ortaya koymuştur. Adı geçen beş refrakterde eğme dayanımı ile elastiklik modülü arasında doğrusal bir ilişki ortaya konmuştur [3].

Ultrasonik muayenenin imalatla kalite kontrol amaçlı uygulamaları, dökülebilir refrakterlerde şekillendirme, yüksek alüminalı çimento ve agrega oranına bağlı olarak su oranı, döküm koşulları, karıştırma, şişleme ve benzeri işlemler hem mukavemeti hem de ultrasonik hızı etkilemektedir. Ultrasonik hız ile mukavemet arasında doğru orantılı ilişkiler kurulabilmektedir. Ultrasonik muayene ile bu etken faktörlerin değişmesi halinde üretim sırasında ultrasonik hız ile mukavemet arasında bir ilişki kurup, ultrasonik hız kontrol edilerek üretimin yolunda gidip gitmediği kontrol edebilmektedir.

Dökülebilir refrakter piştikten sonra, rutubet ve kristal bağlı suyu kaybeder. Çatlak meydana gelir. Çoğu uygulamada bu çatlaklar kullanım amacına zarar vermez ve bazı sorunları çözdüğü için de istenmektedir. Üretim sırasındaki sorunlar nedeniyle segregasyon ve benzeri nedenler ile belirli bölgelerde çatlağın fazla olması, ultrasonik yöntemle ortaya konabilmektedir.

Yukarıdaki iki paragrafta belirtilen hataların ultrasonik yöntemle bu aşamada tayin edilmesi ve bunların giderilmesi sorunların çalışma sırasında ortaya çıkması durumunda meydana gelecek ciddi zararları önlediği için yarar sağlar. Birçok endüstri

sanayiinde ve inşaat sektöründe bu hataların önceden tespiti ve önlem alınması büyük önem arz etmektedir.

Petrokimya tesislerinde ise fırınların yatay boyu 15-20 m, yüksekliği 7-8 m olabilmektedir. Bunun gibi büyük boyutlu fırınlarda çekiçle ses kontrolü ile çatlak tayini çok pratik ve kolaydır. Ayrıca ultrasonik dalgaının metal ile refrakter içerisinden geçiş hızları da farklı olduğu için zamanla refrakter duvar kalınlığındaki incelmeler bu yöntem ile fark edilmektedir.

2.10 Ultrasonik Muayenenin Avantajları ve Dezavantajları

Çizelge 2.1 Ultrasonik muayenenin avantajları ve dezavantajları [17]

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek penetrasyon gücü derinlerdeki hataları bile muayenesine olanak sağlar.	Cihaz manuel olarak kullanıldığı için saptanan hataların tecrübeli kişiler tarafından analiz edilmesi gerekmektedir.
Yüksek hassasiyet, çok küçük hataların muayenesine olanak sağlar.	Kapsamlı teknik bir bilgi gerektirmektedir.
Çalışılacak alanın sadece bir yüzünün açık olması muayene için yeterlidir.	Düzgün olmayan, girintili-çıkıntılı bölgelerde çalışma zorlukları mevcuttur.
Diğer tahribatsız muayenelere göre daha yüksek doğrulukta çalışmaktadır.	Muayene edilecek yüzeyde ön temizleme ve hazırlama işlemine ihtiyaç duyulmaktadır.
Hatanın boyutu, şekli hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar.	Muayene esnasında problemler ile numune temas etmek zorundadır.
İnsan sağlığına ve parçanın bütünlüğüne herhangi bir zararı bulunmamaktadır.	Bazı uygulamalar su altında gerçekleştiği için numunenin su geçirmez özellikte olması gerekmektedir.
Portatif cihazlardır.	Muayene sonrasında, numune yüzeyinde kullanılan kuplaj malzemesinin temizlenmesi gerekmektedir.

2.11 Ultrasonik Muayenenin Çalışma Prensibi

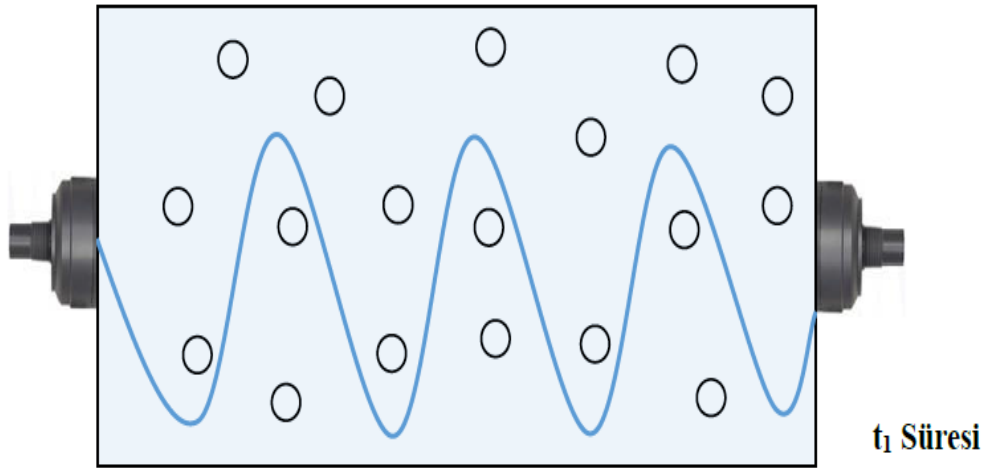
Yöntemin ana prensibi, malzeme içindeki hata ile onu çevreleyen ana malzemenin ana yüzeyinde akustik empedansın ani değişimine dayanmaktadır. İnsan kulağı 20 Hz - 20 KHz arasındaki frekansları işitebilmektedir. 20 KHz'den daha yüksek frekanslı dalgalara ultrasonik dalga denir. Metal malzemelerin muayenesinde genellikle 0,5-10 MHz'lik dalgalar kullanılır. Seramik, refrakter ve beton malzemelerin muayenesinde ise 20-250 KHz frekanslı dalgalar kullanılır [10], [11]. Frekans arttıkça ultrasonik dalgayı daha kolay demet haline getirilebiliriz. Ultrasonik dalgalar genellikle piezoelektrik malzemelerle üretilir. Bu malzemeler, elektrik akımı uygulandığında fiziksel boyut değişimi gösterir. Bu olayın tersi de doğrudur. Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü piezoelektrik olay olarak adlandırılır. Kuvars en fazla kullanılan kristaldir, baryum titanatta çok kullanılır.

Çizelge 2.2 Ultrasonik dalgaların üretiminde kullanılan piezoelektrik malzemeler ve özellikleri [9]

	Baryum Titanat (BaTiO₃)	Kuvars (SiO₂)	Lityum Sülfat (LiSO₄)
Yoğunluk (gr/cm³)	5,4	2,65	2,06
Akustik Hız (m/sn.)	5100	5740	5460
Akustik Empedans (10⁶ NS/m²)	27	15,2	11,2
Piezoelektrik Modülü (10⁻¹² m/Volt)	125-190	2,3	15
Normal Prob	iyi	iyi	zayıf
Açısal Prob	iyi	orta	orta
Daldırma Prob	orta	iyi	çok iyi

Ultrasonik hız frekanstan etkilenmemektedir, fakat dalga boyu ile frekans ters orantılıdır. Bu nedenle ultrasonik hız genellikle malzemelerin özelliklerine bağlı olup, bu hızın ölçülmesi malzeme hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar. Ultrasonik hız ölçümü ile kalite kontrol yapılabilmesi için hız ölçümünün hassas yapılması gerekmektedir. Bu iyi bir ultrasonik dalga oluşturucu ve dalganın parça içinden geçiş zamanını ölçen saat ile gerçekleştirilebilir.

Aşağıdaki şekilde gözenek miktarının ultrasonik hıza etkisi şematik olarak gösterilmektedir. Gözenek miktarının artması ile ultrasonik dalganın malzeme içerisindeki geçişi yavaşlamakta ve geçiş süresi artmaktadır. Gözenek miktarının daha az olduğu üstteki şekilde ultrasonik hız daha yüksek iken, gözenekliliğin daha yüksek olduğu alttaki şekilde ultrasonik hız daha düşüktür.



Şekil 2.3 Gözenekli bir malzemede ultrasonik dalganın gözenekler arasından geçişi

Gözenekli bir malzemede ultrasonik dalganın gözenekler arasından geçişini göstermektedir. Daha gözenekli bir malzemede ultrasonik dalga daha fazla sayıda gözenekleri dolaşmak zorunda kalacağı için geçiş süresi artar ve ultrasonik hız düşer.

2.12 Kuplaj

Ultrasonik cihazlarda prob kabloları çok uzundur. Büyük duvarların iki ayrı tarafına prob koyarak ölçme yapmak gerekebilir. Bu tür uygulamalar için uzun kabloya ihtiyaç vardır. Ultrasonik problemlerin malzeme ile temas eden kısmı genellikle alüminyumdur.

Malzemesinin fazla bir önemi yoktur ama metal malzeme pürüzlü refrakter veya seramik malzeme yüzeyine tam oturmaz. Ultrasonik dalganın bu parçalara geçmesinde zorluk olur. Hem metal malzemelerde hem de seramiklerde hem muayene edilen parçaya hem de proba vazelin (katı yağ) sürülür. Amaç geçişi kolaylaştırmaktır. Kullanılan vazelinin asitsiz olması gerekmektedir.

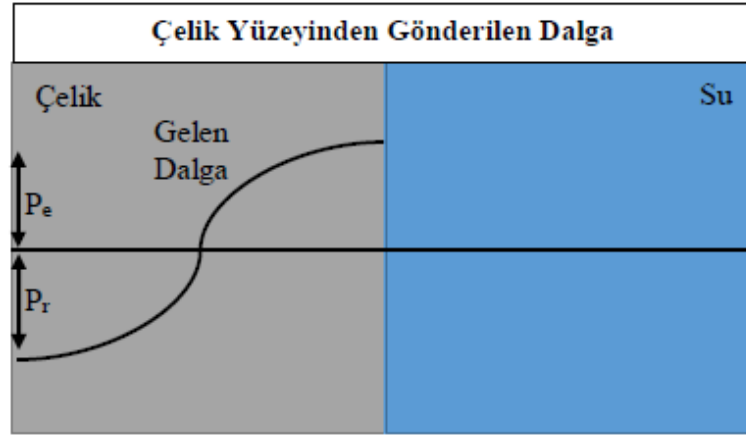
Metalik malzemelerde ultrasonik dalga frekansı çok yüksek olduğu için minimum hata boyu çok düşüktür. Bu nedenle, ultrasonik dalganın, metal malzemeye geçebilmesi için yüzeyin çok düzgün olması gerekmektedir. Buna rağmen metal malzemelerin muayenesinde dalganın parçaya geçebilmesi için kuplaj malzemesi olarak vazelin kullanılır. Seramik malzemelerin muayenesinde kullanılan dalga frekansları düşüktür, minimum hata boyu göreceli olarak daha yüksektir. Bu nedenle seramik malzemelerin yüzeyleri metal malzemeler kadar pürüzsüz olmak zorunda değildir. Bununla beraber dalganın seramik parçaya geçebilmesi için kuplaj malzeme kullanma zorunluluğu vardır. Burada da metalik malzemelerde olduğu gibi vazelin kullanılmaktadır. Fakat seramik malzemelerin yüzeyleri çok pürüzlü ve gözenekli olduğu için vazelin yüzeyden temizlemekte zorluklar vardır. Kuplaj malzemesinin seramik malzeme yüzeyinden temizlenmesinde yağ çözücü olarak en fazla CCL₄ (karbon tetra-klorür) kullanılır. Refrakter malzemelerde bu yağ temizlenmez ise refrakterin kullanıldığı yerde ilk pişirimde yağ yanar. Fırın içinde is meydana getirir. Koşullara göre redüktan etki yapabilir. Bunu önlemek için vazelin yüzeyden temizlenir. Genellikle bu etkiyi ortadan kaldırmak için muayene yapılacak bölge çok ince naylon ile kaplanır ve muayene sonrasında bu naylon numune yüzeyinden çıkarılır. Ayrıca vazelin pahalı olduğu için, sanayide test edilecek bölgede gres yağı da kullanılmaktadır [10].

Bazı uygulamalarda kil kuplaj malzeme olarak kullanılır. Bazen silikon veya lastik kaplı probalar kullanılır. Ultrasonik dalga parça içinden geçer ve öbür taraftaki alıcı proba erişir. Tek problu ultrasonik cihazlar da vardır. Doğrudan gönderme metodu en tatminkâr olanıdır. Çünkü verici probtan çıkan dalga doğrudan doğruya alıcı proba gitmektedir. Endirekt gönderme metodunda ultrasonik dalga demeti, muayene edilmekte olan malzemedeki süreksizlikten ötürü dağılma gösterir. Direkt metotla karşılaştırıldığında bu dağılma % 1-2 kadardır.

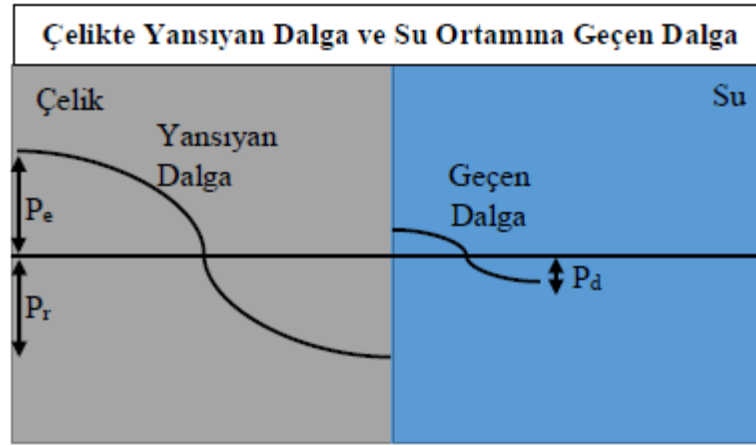
Problar, iyi bir akustik temas sağlayacak şekilde, 50mm çapında, 0,05 mm kalınlığında alüminyum folyo üzerine, folyo da parça üzerine bastırılarak muayene yapılabilir. Prob eksenini doğrultusunda en az 0,3 Mpa yük uygulanmalıdır. Uygulanan basınç çok artırılırsa en fazla 0,1 – 0,2 mikro saniyelik bir düşüş olmaktadır. Bazı uygulamalar için vazelin yerine çok ince naylon kaplama önerilmektedir. Gözenekli malzeme üzerine prob çok bastırılırsa yüzeydeki vazelin bastırma oranına göre yüzeyden uzaklaşır ve kuruluk derecesine kadar gelebilir. Çok baskı uygulandığı zaman ölçme hatası ortaya çıkabilir.

Bir malzemenin, ultrasonik dalgaların yayılmasına karşı gösterdiği dirence akustik empedans denir. Yoğunluk ve ultrasonik hızın çarpımına eşittir. Farklı akustik empedansa sahip iki bölgenin ara yüzeyine çarpan dalgaların bir kısmı geri yansır, bir kısmı yeni ortamda yoluna devam eder. Empedanslar arasında fark fazla ise yansıyan miktar artar [11]. Düz camın akustik empedansı $1.44 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$, boyuna ultrasonik hızı 1110 m/s, enine ultrasonik hızı 1660 m/s'dir. Havanın akustik empedansı $0.00004 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ 'dir. Cam – hava ara yüzeyinde yansıyan dalga'nın yüzdesini hesaplarsak %100 bulunur. Cam içinde hareket etmekte olan dalgalar hava boşluğuna veya parça kenarına gelirse, tamamı geri yansır, havaya geçen olmaz.

Şekil 2.4'de çelik yüzeyinden gönderilen ultrasonik dalga'nın su ortamına yansıyan miktarı temsili olarak gösterilmiş ve değerler formüllerde yerine konularak geçen miktar yüzdesel olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.4 Çelik yüzeyinden gönderilen ultrasonik dalganın çelik numune içerisinde ilerlemesini temsil etmektedir [9].



Şekil 2.5 Çelik içerisinde ilerleyen dalganın, çelikte yansımısını ve su ortamına geçişini temsil etmektedir [9].

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.4)$$

$$D = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.5)$$

$$R = \frac{P_r}{P_e} \quad (2.6)$$

$$D = \frac{P_d}{P_e} \quad (2.7)$$

R: Yansıyan Dalga

D: Geçen Dalga

Z: Akustik Empedans

P_r : Yansıyan Dalganın Basıncı

P_e : Gönderilen Dalganın Basıncı

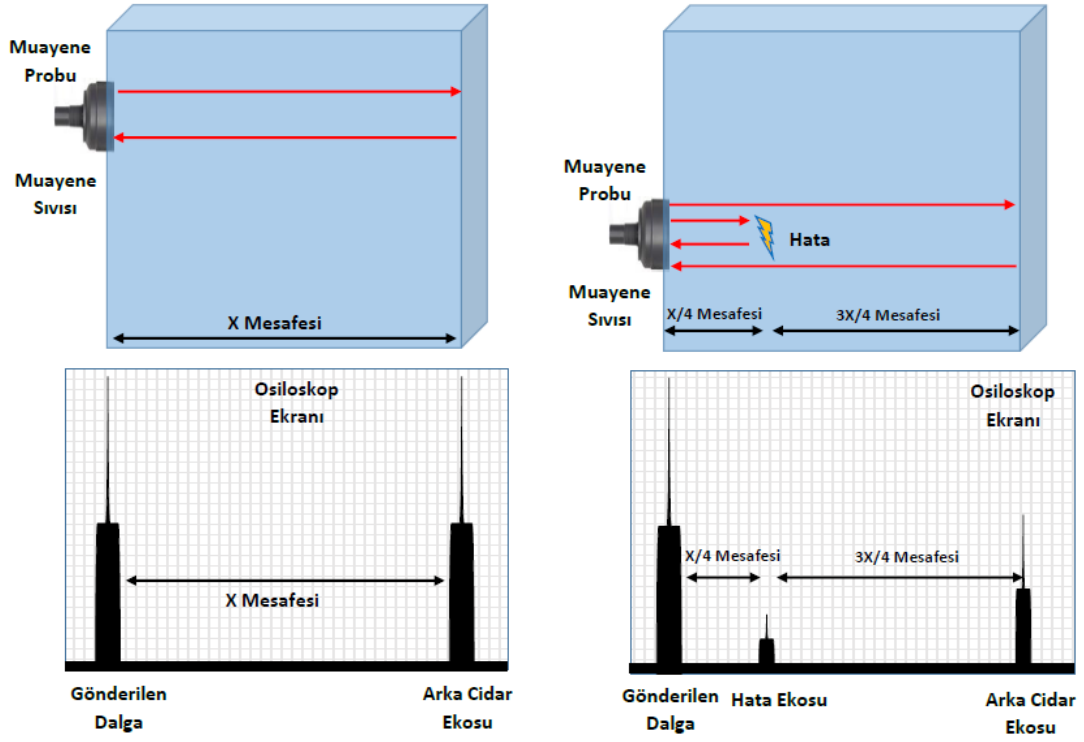
P_d : Geçen Dalganın Basıncı [9]

Çelik için $Z_1=45 \times 10^6$ ve su için $Z_2=1,5 \times 10^6$ değerler yerine konularak, $R= \%93,5$ ve $D=\%6,5$ bulunur. Yani gönderilen dalganın $\%6,5$ 'lik bir kısmı su ortamına geçiş yapacaktır.

Refrakter beton ve betonda ve pek çok seramik malzemede birden fazla faz bulunmaktadır. Refrakter beton ve betonda agrega ve bunların çevresini saran ve ikinci faz diyebileceğimiz çimento bulunmaktadır. Agregalar çok çeşitlilik göstermektedirler. Çimento oranı düşük olmakla birlikte, agreganın çevresini sardığı için malzeme özelliklerinde etkin rol oynamaktadır. Çimento ve agregaların akustik empedansları farklı olduğuna göre, bu malzemelerde ultrasonik hız defalarca birinden diğerine geçmek zorunda kalacaktır. Her fazda ultrasonik hızda farklı olacaktır. Seramik malzemelerde önemli oranda gözenekte bulunmaktadır. Ultrasonik dalgalar bu boşluklardan saçılırlar. Birinden diğerine saçılarak yollarına devam ederler.

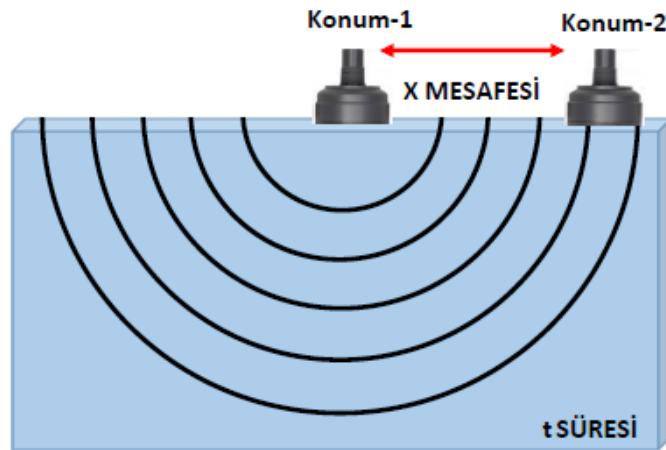
2.13 Gözeneksiz Malzemelerin Yankı Metodu ile Muayenesi

Metalik malzemelerde yöntemin ana prensibi, malzeme içindeki hata ile onu çevreleyen ana malzemenin yüzeyindeki akustik empedansın ani değişimine dayanmaktadır [9]. Katı malzeme içinde hareket etmekte olan ultrasonik dalga o malzemenin yoğunluğundan ve elastik özelliklerinden etkilenir. Bir malzemenin kalitesi kimi zaman bu elastik özelliklere bağlı olarak, dolayısı ile ultrasonik hıza bağlı olarak değişir. Tahribatlı deneylerde numuneler kullanılamaz duruma gelirken, bunlara ek olarak test masrafları da meydana gelmektedir. Ultrasonik muayenede parçalar kırılmadığından veya hasar almadığından bu tür masraflar en aza indirilmektedir.



Şekil 2.6 Ultrasonik muayene ile yankı metodu kullanılarak gözeneksiz malzeme içerisindeki hatanın tespiti ve osiloskop ekran görüntüsü

Metalik malzemelerde gözeneklilik çok az olduğu için dalga boyu yüksek seçilmektedir. Genellikle 0,5 – 10 MHz frekanslı dalga boyları ile ultrasonik hız tayin edilir ve tek prob kullanılır. Bu yöntem uygulama prensibi bakımından sonar ve radar muayene ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 2.7 Gözeneksiz katı malzemelerde tek prob kullanımı ile ultrasonik hız tayini

2.14 Gözenekli Malzemelerin Muayenesi

Refrakter betonda agrega ve bunların çevresini saran ve ikinci faz diyebileceğimiz çimento bulunmaktadır. Agregalar çok çeşitlilik göstermektedirler. Çimento oranı düşük olmakla birlikte, agreganın çevresini sardığı için malzeme özelliklerinde etkin rol oynamaktadır. Çimento ve agregaların akustik empedansları farklı olduğuna göre, bu malzemelerde ultrasonik dalga defalarca birinden diğerine geçmek zorunda kalacaktır. Her fazda ultrasonik hızda farklı olacaktır. Ultrasonik dalgalar bu boşluklardan saçılırlar. Birinden diğerine saçılarak yollarına devam ederler.

Dökülebilir refrakterlerde normalde gerekenin 2 katı kadar su katılır. Suyun yarısı hidratasyonda kullanılırken diğer yarısı agrega gözeneklerinde ve aralarındaki boşlukta absorbe olur. Kurutma sırasında serbest su uzaklaşır. Kimyasal bağlı su 300 °C üzerinde yapıdan uzaklaşır. Sonuç olarak katılan su, uzaklaştığı zaman yeri boş kalır. Su oranının, gerekenden fazla katılması, malzemede gözenek oranını artıracığından mukavemet gibi özellikleri olumsuz etkiler. Gerekenden fazla su katılırsa, fazla suyun boş bıraktığı gözenekler hem ultrasonik hızı düşürür hem de mukavemeti düşürür. Bu nedenle ultrasonik hızın düşüşünden basma dayanımındaki düşüş, yaklaşık olarak tayin edilebilir. Katılan su oranının düşük olması halinde, uygun oranda su kullanıldığı zaman meydana gelen hidratasyon reaksiyonları tam olarak gerçekleşemez. Bu da su oranının azlığı ile orantılı olarak, ultrasonik hızın ve basma dayanımının düşmesine neden olur. Bu nedenle ultrasonik hızın düşüşünden basma dayanımındaki düşüş, yaklaşık olarak tayin edilebilir. Fakat ultrasonik hızın düşüşünden suyun yetersiz mi yoksa fazla mı olduğu saptanamaz.

Dökülebilir refrakterlerin kendi bünyesinde belirli bir miktarda çatlak olması istenen bir durumdur. Çünkü bu çatlaklar, genleşme boşluğu olarak hareket etmektedir. Çatlak belirli boyutu geçerse tamir yapılır. Dökülebilir refrakterlerin ilk pişirmesi sırasında şekillendirme suyu ve hidratasyon suyu bünyeden atılacağı için önemli miktarda rutubet, kristal bağlı su atılır. Buna bağlı olarak önemli miktarda küçülme meydana gelir ve yüzeye dik doğrultuda ciddi çatlaklar meydana gelir. Bu çatlaklar konuyu bilmeyen mühendisler tarafından olumsuz olarak algılanmaktadır. Gerçekte bu çatlaklar bundan sonraki ısıtma soğutma işlemlerinde malzemede meydana gelen

genleşmenin basma gerilmesi meydana getirmesini önleyeceği için çok yararlıdır. Astarın kullanımı sırasında duvarda basma gerilmelerinin meydana gelmesini önler. Duvarın tahrip olmasını önler. Bunun için bilim adamları çatlak dökülebilir refrakterlerin şanındandır derler. Bu çatlaklar parçanın bütünlüğünü bozmaz ve kullanım ömrünü olumsuz yönde etkilemez.

Refrakter betonun ultrasonik hızını etkileyen faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- Yol uzunluğu
- Numunenin yanal boyutları
- Ön gerilmeli çeliğin oranı
- Betonun rutubeti [4]

2.15 Ultrasonik Yöntemle Tayin Edilebilecek Minimum Hata Boyu

Metal malzemelerin ultrasonik yöntemle muayenesini anlatırken saptanabilecek minimum hata boyu için Bargel [16] dalga boyunun yarısı derken, Krautkramer [15] dörtte biri demektir. Bargel [16] çelikte ultrasonik hızı 6000 m/s, cihaz frekansını 3 MHz alarak minimum hata boyutunu 1mm bulmuştur. Perlitli dökülebilir refrakterlerde ultrasonik hız 800 m/s'ye kadar düşmektedir [14]. 150 KHz'lik cihaz kullanıldığı takdirde minimum hata boyu 2,7 mm'dir. Dökülebilir refrakterlerde ultrasonik hız 3400 m/s'ye kadar çıkmaktadır [14]. Buna göre minimum hata boyu 11,3 mm'dir. Ultrasonik dalga minimum hata boyundan daha küçük hatalardan etkilenmez. Metalik malzemelerde minimum hata boyutundan daha küçük hatalar geri yansımaz. Seramik malzemelerde ultrasonik hızda bir düşüş yaşanmaz. Seramik malzemelerde porozitenin büyüklüğü kadar, porların dağılımı da önem kazanmaktadır. 20 kHz'den daha yüksek frekanslı dalgalara ultrasonik dalga denir. Metal malzemelerin muayenesinde genellikle 0,5-10 MHz frekanslı dalgalar kullanılır. Seramik, refrakter ve beton malzemelerin muayenesinde ise 20-250 kHz frekanslı dalgalar kullanılır. Frekans arttıkça ultrasonik dalga daha kolay demet haline getirilebilir [16]. Metalik malzemelerde ultrasonik dalga, malzeme içindeki kusurlardan yansımaktadır. Buna bağlı olarak hata büyüklüğü ve yeri tayin edilebilmektedir.

$$d \geq \frac{V}{4f} \quad (2.8)$$

V : Ultrasonik hız (m/s)

f : Frekans (Hz)

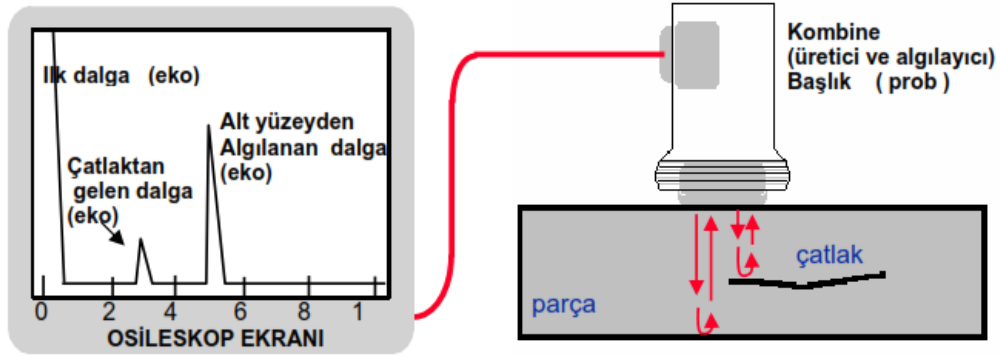
Saptayabileceğimiz minimum hata boyu 2.8 formülünden saptanmaktadır. Bu değer dalga boyunun dörtte biri demektir. Oysa katalog dalga boyu yarısı demektir.

Perlit, yarı kararlı amorf bir alüminyum silikattır. Artan sıcaklık ile bünyesindeki su uzaklaşır ve hacmi artar ve büyük ölçüde yoğunluğu düşer [18].

Çizelge 2.3 Seramik ve metalik malzemelerde minimum hata boyutunun kullanılan frekansa göre değişimi [14]

Malzeme	Frekans	Ultrasonik Hız (m/s)	Dalga Boyu (mm)	Minimum hata boyu (mm)
Metalik Malzeme	0,5 MHz	5800	1,16	0,58
	1 MHz		0,58	0,29
	5 MHz		0,12	0,06
	10 MHz		0,06	0,03
Gözeneksiz Seramik	50 kHz	3000	60	30
	150 kHz		20	10
	300 kHz		10	5
Perlitli Gözenekli Refrakter	50 kHz	1500	30	15
	150 kHz		10	5
	300 kHz		5	2,5

Tablo 2.3’den görüldüğü gibi yüksek frekanslı ultrasonik dalgalarla çok küçük hatalar tespit edilebilmektedir. Fakat içinde yüksek oranda boşluk içeren seramiklerde yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar kolayca saçılır ve sinyal alınamayabilir [9]. Bu nedenle seramik muayenesinde daha çok 150 kHz frekanslı ultrasonik dalga kullanılır. Göreceli olarak daha düşük frekanslı olduğu için tespit edilebilecek minimum hata boyutu artmıştır. Başka bir deyişle, daha büyük hataları dolaşarak ilerleyebilirler. Fakat bu dalgaların aşabileceği gözeneklerin boyutu da sınırlıdır. Bazı inşaat malzemeleri daha heterojen olduğu için 54 kHz frekanslı ultrasonik cihaz kullanılır.



Şekil 2.8 Ultrasonik muayene ile numune içerisinde hatanın tespiti ve osiloskop ekranındaki görüntüsü

Refrakterlerde hız genellikle 3000 m/s, frekans ise 150 kHz olarak seçilir. Aşağıdaki eşitlikte λ değeri $\lambda/2$ 'nin altında olduğu takdirde hata tespit edilemez ki bu da karşımıza minimum hata boyutu kavramını çıkartır. Frekansı ne kadar yüksek seçersek tespit edebileceğimiz hatada boyutu o kadar küçülür. Yalnız her zaman küçük hataların tespit edileceği söylenemez. Örneğin heterojen yapı olarak dökme demirler küçük pütürlü ve gözenekli olduğu için gönderdiğimiz ultra ses dalgaları kolayca saçılabilir [9].

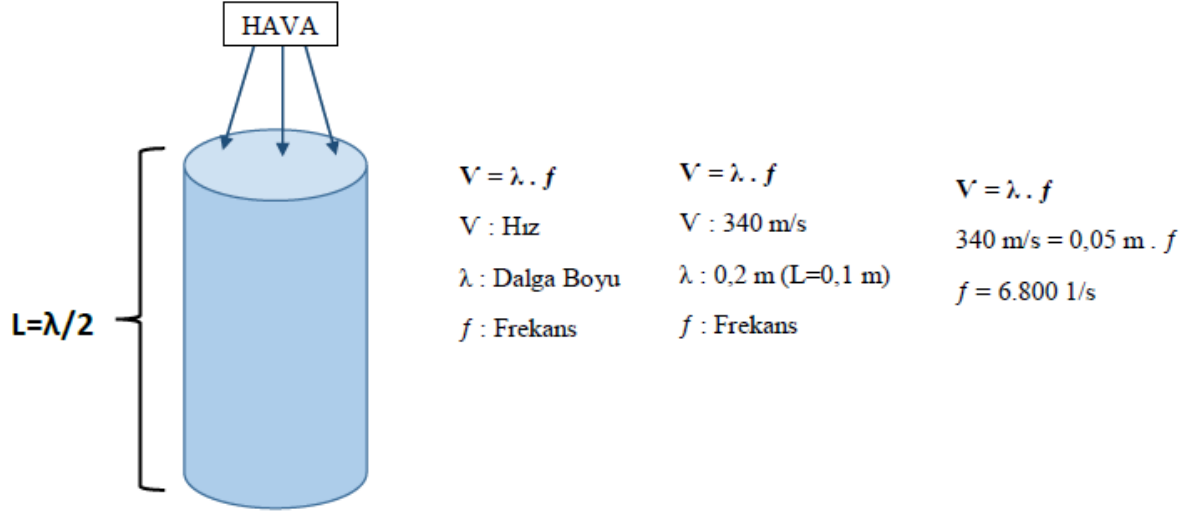
$$v = \lambda \cdot f \quad (2.9)$$

v = Ultrasonik hız (m/s)

λ = Dalga boyu (m)

f = Frekans (Hz)

Minimum hata boyutunu ve geçebileceği eşiği anlatmak için basit bir örnek vermek gerekirse, herhangi bir şişenin ürettiği ses, ancak o boyuttaki veya daha büyük bir pencereden çıkar. Aynı şekilde kapalı bir borudan çıkan ses, boru boyutundan küçük pencereden dışarı çıkamaz ve geri yansır.



Şekil 2.9 Altı kapalı bir boruya üfleme sırasında üretilen frekans hesabı

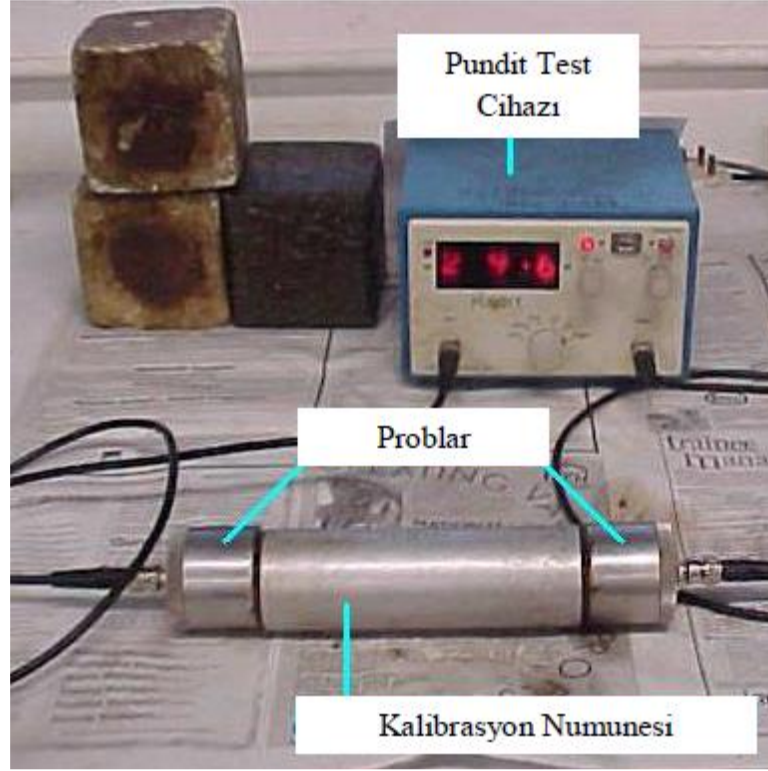
Çizelge 2.4 Elde edilen ultrasonik hıza bağlı olarak refrakterlerde yapılacak olan genel kalite değerlendirmesi [4]

Ultrasonik Hız	Refrakter Kalitesi
>4.000 m/s	Çok İyi
3.500 – 4.000 m/s	İyi
3.000 – 3.500 m/s	Orta
<3.000 m/s	Zayıf

2.16 Ultrasonik Muayene Yönteminde Kullanılan Cihaz

Verilen elektrik akımını ultrasonik dalgaya çevirerek parçaya gönderen parçaya verici prob, parçadan gelen ultrasonik dalgayı elektrik akımına çeviren parçaya ise alıcı prob

adı verildiğini daha önce de belirtmiştik. Ultrasonik dalganın verici probtan alıcı proba gidinceye kadar geçirdiği süre osiloskop ekranından okunur. Cihaz, alıcı, verici prob ve hızlı bir saatten oluşmaktadır. Seramik ve refrakter uygulamalarında silikon lastik kaplı problar da kullanılmaktadır.



Şekil 2.10 Ultrasonik muayene yönteminde kullanılan Pundit cihazı [7]

Refrakter malzemeler genellikle tuğla şeklinde yapılır. Eğme deneyine elverişli değildir ve basma deneyi yapılır. Yer karosu ve fayans gibi malzemeler levha şeklinde üretildiği ve kullanıldığı için genellikle eğme deneyi yapılır.

2.17 Ultrasonik Yöntemle Gözeneklilik ve Buna Bağlı Özelliklerin Belirlenmesi

Ultrasonik dalganın frekansı arttıkça daha kolay demet haline gelebilir ve daha küçük hatalar saptanabilir [13]. Ultrasonik dalganın hareketi doğrultusunda 1 mikrometre boşluk olsa dalga o boşluğu göremez ve geri döner. Ultrasonik dalga yüzeyden gönderilir ve bu pik osiloskop ekranında görülür. Daha sonra, arka yüzeyden yansıyan dalga proba geri döndüğünde arka yüzey piki ekranda görülür. Bu iki pik ayar düğmesi ile birbirine yaklaştırılabilir veya uzaklaşılabilir. İki pik arasındaki mesafe parça

kalınlığını gösterecek şekilde ayarlanabilir. Seramik ve refrakter malzemelerde düşük frekans kullanmak zorunluluğu vardır. Bunun sebebi yapıdaki gözeneklerin büyük olmasıdır. Ultrasonik dalganın bir ortamda yayılma hızını etkileyen unsurlar, o ortamın yoğunluğu ve elastik özellikleridir. Ultrasonik yöntemle refrakter malzemenin muayenesinde problemlerin üzerine vazelin sürülür.

Tabiatı hayvanlar sesle anlaşırlar. Sesle anlaşmada dikkat etmeniz gereken herhangi bir kural yoktur. Ses geldiği an tepki gösterirsiniz. Buna karşın ışık ile anlaşmada insanın gözetleyebileceği maksimum bir etki alanı vardır. Seste böyle bir sınır yoktur. Örneğin baykuşun kulakları asimetrik olduğu için 3 boyutlu yer tayini yapabilmektedir. Zifiri karanlıkta bile yaklaşık 5 metre uzaklıktaki avının yerini ses ile tayin edip, avını yakalar ve geri döner.

2.18 Ultrasonik Yöntem ile Saptayabileceğimiz Özellikler

Seramik ve refrakter malzemelerde pişirme sırasında sinterleme olur. Sinterleme arttıkça mukavemet artar. Sinterleme ne kadar iyi olursa yani taneler birbirine ne kadar temas ederse;

- Mukavemet o kadar yüksek olur
- Ultrasonik dalga o kadar kısa yoldan hedefe gider.
- Bunlara bağlı olarak porozite azalır, mukavemet artar hızda artar.
- Seramik ve refrakterlerde sinterlemeyi etkileyen uygulamalarda mukavemet artarsa ultrasonik hız artar. Buradan hareketle kalite kontrol yapabiliriz.

2.19 Üretimde ultrasonik hızı değiştirebilecek parametreler

- Çatlak,
- Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak porozite oranı değişir ve buna bağlı olarak gözeneklilik ve mukavemet değişir.
- Hammaddede tane büyüklüğü değişirse gözeneklilik oranı değişir
- Dökülebilir refrakterlerde agrega/çimento oranı değişirse, ultrasonik hız değişir.

- Seramik ve refrakter malzemelerde pişirme sırasında sinterleme olur. Sinterlemenin az veya çok olması mekanik özellikleri etkiler. Sinterleme ne kadar iyi olursa yani taneler birbirine ne kadar temas ederse gözeneklilik o derece az olur ve mukavemet artar.

2.20 Kullanım Yerleri

Endüstriyel refrakterlerin ultrasonik yöntemle tahribatsız muayenesi konusunda pek çok makale yayınlanmış ve pek çok bildiri sunulmuştur. Son yıllarda ultrasonik hız ölçümüyle muayene konusu diğerlerine üstünlük sağlanmıştır. Ultrasonik hız verilerinin istatistik dağılımına göz atmak da bilgidir. Birikmiş datalar göstermiştir ki sinter bazik, kimyasal bağlı, yüksek görevli, süper görevli ateş tuğlası, bekletme potası ve silika tuğla ile ultrasonik hız arasında iyi bir ilişki (korelasyon) kurulabilir. İki tip tuğlada yoğunluk ve gözeneklilik ile ultrasonik hız arasında iyi bir ilişki yoktur. Bunlar yüksek alüminalı ve direkt bağlı tuğlalardır. Bunlara birde grafit bağlı tuğlayı eklemek gerekir. Direkt bağlı tuğlada eğme mukavemeti ile hız arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Açıktır ki en önemli ilişki mukavemetle ilgilidir. İlişkinin zayıf olduğu uygulamalarda hammadde kaynaklarının farklı olduğu anlaşılmıştır. İmalat yönteminin farklı olması da karakteristik ilişkileri etkilemektedir. Grafitin anizotropik ve tabakalı yapıya sahip olması ultrasonik yöntemden netice almayı zorlaştırmaktadır.

Tahribatsız ultrasonik hız ölçme yöntemiyle ateş tuğlasında laminasyon ve göbeklenme gibi içyapı hataları belirlenebilir. Hemen hemen tüm refrakterlerde ve pişmemiş dökülebilir refrakterlerde yoğunluk, gözenek oranı, elastiklik modülü, basma dayanımı ve eğme mukavemeti ultrasonik hız ölçülerek tayin edilebilir. Yani Ultrasonik hız ile basma dayanımı ve diğer özellikler arasında ilişki kurabilmektedir. Seramik malzemelerin homojenliği, bir parti içindeki malzemelerin özelliklerinin birbirine yakın olup olmadığını, refrakter beton gibi malzemelerde hidratasyon gibi reaksiyonların zamana bağlı değişimi saptanabilir. Refrakter malzemelerde çatlak ultrasonik hız ölçülerek çatlak yeri, büyüklüğü büyük bir doğruluk ile tayin edilebilmektedir. Dökülebilir refrakterlerde En uygun su oranı ASTM C 860 (reapproved 1991)'e göre tayin edilmektedir [19]. Su oranının az veya çok olması ultrasonik hızı düşüreceğinden

böyle bir olumsuzluk ta tayin edilebilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar kalite kontrol amacıyla kullanılabilir. Daha önemlisi Bu yöntem refrakter performansını tahmin etme olanağı verir.

Geçmişte sadece tuğla boyutu kontrol ediliyordu fakat şimdi, ultrasonik hızın gösterdiği fiziksel özellikler de kontrol edilmektedir. Yapısal farklar, ultrasonik hıza tesir etmektedir. Yapının bozuk olduğu durumlarda hız düşük, iyi olduğu durumlarda hız yüksektir. Yüksek fırın tuğlaları üzerinde araştırma yapan Russel ve Morrow ultrasonik hız ile eğme mukavemeti ve ultrasonik hız ile porozite arasında doğrusal ilişki ortaya koymuştur [14]. Ancak bu doğrusal ilişki belirli limitler arasında geçerlidir.

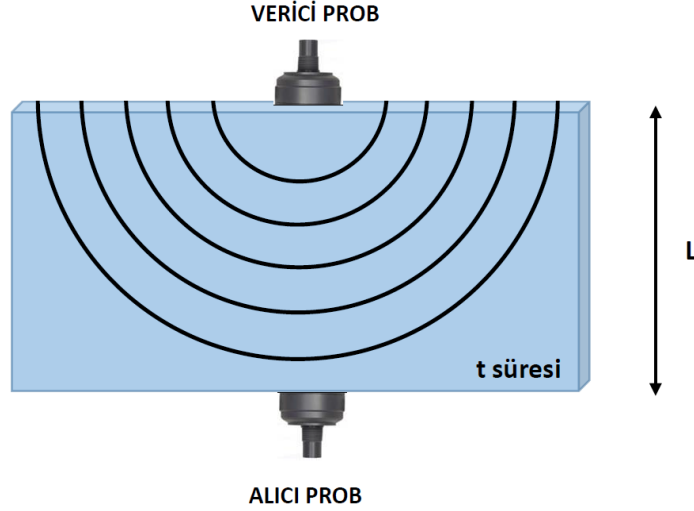
Kok fırını refrakterlerinde bulunan içi çatlaklar, laminasyonlar ve siyah merkezileşme gibi hatalar, basma dayanımının son derece değişkenlik göstermesine neden olur. Amerika'ya Denizaşırı üreticilerden sağlanan kok fırını ateş tuğlaları bu yöntemin gelişmesini hızlandırmıştır. Yöntem, kaba hataları ve kabul edilebilir bir hata ile basma dayanımlarını bulma imkânı verir.

2.21 Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemiyle Refrakter Malzemelerde Özellik Belirlenmesi

Ultrasonik hız ölçümü ile kalite kontrol yapılabilmesi için hız ölçümünün hassas yapılması gerekmektedir. Bu iyi bir ultrasonik dalga oluşturucu, alıcı ve verici prob ile dalganın parça içinden geçiş zamanını ölçen hızlı bir saat ile gerçekleştirilebilir. Seramik ve refrakter uygulamalarında silikon lastik kaplı prob kullanılır. Tek problu ultrasonik cihazlar da kullanılmaktadır.

Problar, ultrasonik dalganın bir probtan diğerine geçiş zamanını verir. Yol/zaman formülü kullanılarak metre/saniye olarak hız bulunur. Ultrasonik hızla diğer özellikler arasında ilişki kurulur. Frekans arttıkça daha kolay demet haline gelebilir ve daha küçük hatalar saptanabilir. Ultrasonik dalganın hareketi doğrultusunda 1 mikrometre (kafes parametresi mertebesinde) boşluk olsa, dalga o boşluğu geçemez ve geri döner. Tek problu çalışan aletlerde bu tip hataların yüzeyden uzaklığı ve büyüklüğü hakkında bilgi edinilebilir. Ultrasonik dalga yüzeyden gönderilir ve problara bağlı osiloskop ekranında gönderilen dalga pik olarak görülür. Daha sonra, arka yüzeyden yansıyan dalga proba geri döndüğünde, arka yüzey piki ekranda görülür. Bu iki pik ayar düğmesi ile birbirine

yaklaştırılabilir veya uzaklaştırılabilir. İki pik arasındaki mesafe parça kalınlığını gösterecek şekilde ayarlanabilir. Seramiklerde gözenekler büyük ve porozite oranı yüksek olduğu için düşük frekans kullanmak mecburiyeti vardır.



Şekil 2.11 Verici probtan gönderilen ultrasonik dalga'nın alıcı proba doğru ilerleyişi

$$V = L / t \quad (2.4)$$

V: Ultrasonik Hız (m/s)

L: Parça Kalınlığı (m)

t: Geçiş Süresi (s)

Etonalaj malzemesi, Pundit cihazlarında kalibrasyon parçası olarak kullanılmaktadır. 25 cm boyundadır ve üretilen dalga, numuneyi 51 mikro saniyede geçmektedir. Yukarıdaki formül kullanılarak ultrasonik hız 4.901 m/s olarak bulunur

Ultrasonik hız, yukarıdaki şekilde de gösterildiği gibi yolun zamana olan oranından bulunur. Ultrasonik hız ölçümü ile kalite kontrol yapılabilmesi için hız ölçümünün hassas yapılması gerekmektedir. Bu iyi bir ultrasonik dalga oluşturucu ve dalga'nın parça içinden geçiş zamanını ölçen saat ile gerçekleştirilebilir Yol ve zaman $\% \pm 1$ doğrulukla ölçülmelidir. Elektrikli ultrasonik dalgaya çeviren parçaya verici prob, ultrasonik dalgayı elektrik akımına çeviren parçaya ise alıcı prob adı verilir. Ultrasonik dalga'nın verici probtan alıcı proba gidinceye kadar geçirdiği süre ekrandan okunur.

Cihaz, alıcı, verici prob ve hızlı bir saatten oluşmaktadır. Seramik ve refrakter uygulamalarında silikon lastik kaplı prob da kullanılır.

Tahribatsız muayene yöntemi sadece malzemedeki hataları ortaya çıkarmakla kalmamakta, aynı zamanda da malzemenin kalitesi hakkında bilgi verebilmektedir. Ultrasonik hız frekanstan etkilenmez. Fakat dalga boyu ile frekans ters orantılıdır. Bu nedenle ultrasonik hız genellikle malzemelerin özelliklerine bağlı olup, bu hızın ölçülmesi malzeme hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar.

Metallerde tek proba çalışan aletlerde bir osiloskop ekranı vardır, hataların yüzeyden uzaklığı ve büyüklüğü hakkında bilgi edinilebilir. Refrakter muayenesinde kullanılan ultrasonik cihazlar çift probludur ve osiloskop ekranı yoktur. Seramiklerde gözenekler büyük ve porozite oranı yüksek olduğu için dalganın bunları aşabilmesi için düşük frekans kullanmak mecburiyeti vardır. Ultrasonik yöntemle tayin edilebilecek minimum hata $\lambda/2$ kadardır. Ayrıca tek proba çalışan cihazlar ile seramik malzemelerin homojenliği, bir parti içindeki malzemelerin özelliklerinin yakın olup olmadığını, refrakter beton gibi malzemelerde hidratasyon gibi reaksiyonlarla özelliklerin zamanla değişip değişmediği saptanabilir.

Metalik malzemelerde hız $V= 6000$ m/s, frekans $f=3$ MHz olup $V = \lambda \cdot f$ 'te yerine konursa dalga boyu 2 mm ve minimum hata boyu 1 mm bulunur. Ultrasonik dalga, 1 mm'den küçük hataları dolaşarak geçtiği için bu hatalardan yansımaz ve osiloskop ekranında görülmezler.

Metallerde yankı metodu kullanılırken, seramiklerde frekans düşürülerek, minimum hata boyu yükseltilir ve bunun bir faydası olarak inşaat sektöründe beton içerisindeki 12 mm çaplı çakıl taneleri bile aşılır ve bu çakıllar cihaz tarafından hata veya çatlak olarak algılanmaz.

Seramik ve refrakterlerde ultrasonik hız, porozite oranına bağlı olarak genellikle 2400-4000 m/s civarındadır. $V= 3000$ m/s, $f=150$ kHz alınırsa minimum hata boyu 10 mm bulunur ki bu durumda gözenekler minimum hata boyutunun altına düşmüş olur. Yöntem, gözenekleri görmeksizin seramik ve refrakterlerin özellikleri hakkında bilgi verecektir.

Ultrasonik dalganın bir ortamda yayılma hızı o ortamın yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Ultrasonik hız, frekanstan etkilenmez fakat dalga boyu ile frekans ters orantılıdır. Bu nedenle ultrasonik hız genellikle malzemelerin özelliklerine bağlıdır ve bu hızın ölçülmesi malzeme hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar.

Ultrasonik dalgalarla hız ölçme yönteminde hassasiyeti etkileyen en önemli faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- Vazelinin yetersiz olması ultrasonik dalganın geçişini azaltabilir.
- Prob bastırma kuvveti
- Problar arası mesafe
- Parça boyutunu ölçme hassasiyeti
- Geçiş süresinin bulunma hassasiyeti [5], [10]

2.22 Rezonans Yöntemi ile Muayene

Rezonans yöntemi, tatbik edilmekte olan kuvvetin frekansını sistemin öz frekansına uydurmakla yapılan muayenedir. Öz titreşim frekansları numunenin boyutları, şekli, kütlesi, elastik özellikleri ve titreşim türü olup iki ana faktöre bağlıdır.

Frekans = (geometrik faktör) x (fiziksel sabitler) [2]

Geometrik faktör; boy, genişlik, kalınlık iken, fiziksel sabitler; yoğunluk ve elastik sabitler olarak sayılabilir. Eğer rezonans frekansı ve geometrik faktörler formülde yerine konursa, dinamik elastiklik modülü bulunabilir. Rezonans frekansı yöntemi ile tayin edilen elastiklik modülüne dinamik elastiklik modülü denir. Elastiklik modülü ile dinamik elastiklik modülü arasında malzemedan malzemeye değişen sabit bir katsayı vardır. Dinamik elastiklik modülü hesaplandıktan sonra diğer fiziksel özelliklerle ilişki kurulabilir. Fakat pratikte rezonans cihazını kullanmak zordur ve sebepleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

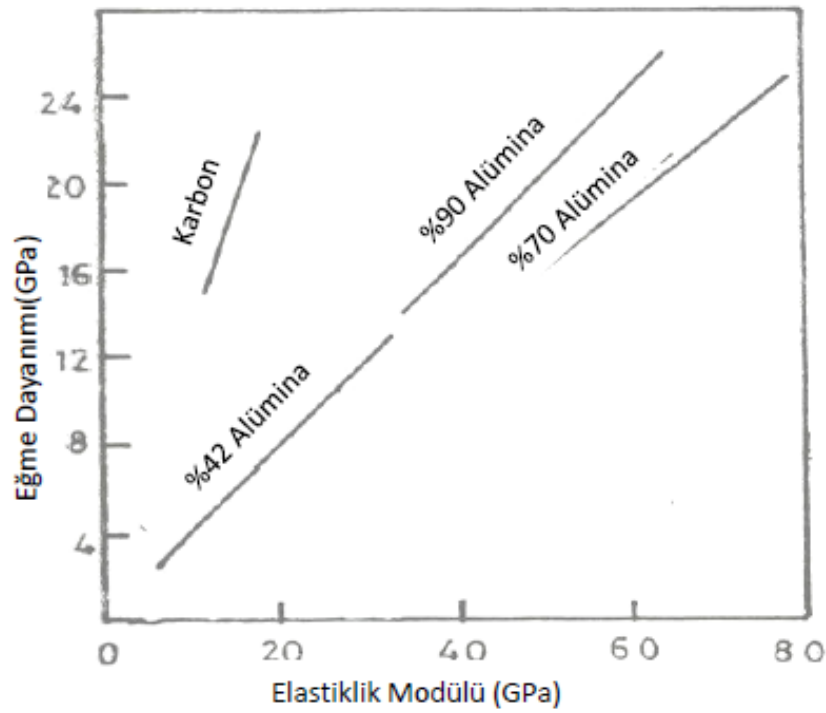
- Cihazın hacmi büyüktür.
- Refrakter parçasının yoğunluğunu deneyden önce bilmek gerekir [3].
- Geometrisi düzgün parçaya gerek vardır. Bunlarla cihazın pahalı olduğunda eklemek gerekir. Tek kelime ile bu cihazla çalışmak kolay değildir ultrasonik hız

ölçüm yöntemi 1960'larda refrakterlere uygulamaya başladığı halde daha hızlı uygulama alanı bulmuştur.

Seramik ve refrakter malzemelerin çekme deneyini yapmakta oldukça büyük zorluklar vardır. Ticari ürünlerden çekme numunesi çıkartmak çok zordur. Bu nedenle hemen hemen her yerde standart eğme deneyi uygulanmaktadır.

Dinamik elastiklik modülünü bilsek bile, değerlendirme yapabilmek için sonucu eğme mukavemetine çevirmemiz gerekir. Aly and Semler bu ilişkiyi kurmaya çalışmıştır. Dinamik elastiklik modülü ASTM C 885'e göre bulunmaktadır [20].

Dinamik muayene yöntemi ile elastiklik modülü bulunur. Elde edilen bu elastik modülü ile eğme dayanımı arasında ilişkiler kurulabilmektedir. Şekil 2.12'de elastiklik modülü- eğme dayanımı arasında ilişki kurulmuştur.



Şekil 2.12 Belirli sayıda refrakter için (eğme mukavemeti)-(elastiklik modülü) ilişkisi. Aly and Semler bu ilişkiyi kurmaya çalışmıştır [16].

(Eğme mukavemeti) / (elastiklik modülü) oranı klasik gerilme/gerinim ilişkisiyle aşağıdaki eşitliği verir.

$$MOR = K \cdot E \quad (2.10)$$

MOR: Eğme mukavemeti

K: Malzemeye bağlı bir sabit

E: Elastiklik modülü

Rezonans yöntemiyle tayin edilen dinamik elastiklik modülünden eğme mukavemetine (MOR) geçişi hedeflemektedir. Bu lineer ilişki için tayin edilen katsayılar 0,94-0,81 arasında değişir. Doğrunun eğimi refrakterden refraktere değişmektedir. Lawlar yaptığı çalışmada elastiklik modülünü (2.11) formül ile hesaplamıştır [21].

$$E=4.f^2.l^2d \quad (2.11)$$

f:frekans

l:deney çubuğunun uzunluğu ve aynı zamanda sonik sinyalin dalga boyunun iki katıdır

d: yoğunluktur.

Rezonans sinyali vericiye dik doğrultuda alıcı proba alınır. Seçilen rezonans frekansı osiloskop ekranından dijital olarak okunur.

2.23 Dökülebilir Refrakterlerin Sesle Muayenesi

Ses dalgaları ile muayene en eski tahribatsız yöntemlerden biridir. Eski insanlar toprak kaplara vurarak, çıkardığı sesteki çatlak olup olmadığını anlamaya çalışmışlardır. Telli sazlarda tel boyu değiştirilerek telin çıkardığı sesin frekansı değiştirilmektedir. Tek parça, sağlam seramik parçalarda parçanın çıkardığı sesler aynıdır. Seramik parçada çatlak meydana gelmişse o parçada meydana gelecek sesin frekansı kesinlikle değişecektir. Çatlak parçanın çıkardığı ses, sağlam (çatlaksız) parçaların çıkardığı sesteki farklıdır ve kolaylıkla ayırt edilebilir [22]. Çatlaklı parçaların azınlık olduğu durumlarda çatlak parçayı bulmamıza olanak verir.

Çekiçle vurulduğu zaman çatlaksız dökülebilir refrakter duvarın çıkardığı sesle, çatlaklı dökülebilir refrakter duvarın çıkardığı ses birbirinden aynı nedenlerle farklıdır. Çekiç testi ile dökülebilir refrakter duvarda çatlak olup olmadığının kontrolü yapılabilmektedir. Çatlak oluştuğu zaman boy yarı yarıya iner, frekans iki katına çıkar. Ses frekansının değişmesinden orada çatlak olduğu anlaşılır. Çatlak görünmediği halde

yapılan muayene ile frekansın değişmesinden çatlak olduğu anlaşılır. O bölgede çatlak genişliği araştırılır, kriterlere göre tamir yapılır veya yapılmaz. Çatlaksız bölgenin ortasına vurulduğu zaman az önceki frekansın 2 katı elde edilir. Mesafe azaldıkça ses inceler. Çatlağın görölmediği bir yerde ses değişmişse orada çatlak olduğu anlaşılır. Frekans değiştiiyse çatlak vardır. O bölgede çatlak araştırması yapılır. Vurduğumuzda çıkan sesin frekansı değiştir. Deney çok basittir fakat yine de bütün muayeneleri uzman kişiler yapmalıdır. Ses kontrolü ile hatalı bulunan bölge 150x150 mm'den büyükse tamir edilmelidir. Daha önemli uygulamalarda x-ışınları uygulanabilir. Son yıllarda tahribatsız yöntemler uygulanmaktadır.

Normal fırınlar kurutmayı müteakip şöyle kontrol edilir. Doğal kurutmada çatlama riski az, yüksek sıcaklıkta kurutmada çatlama riski daha fazladır. Öncelikle refrakterde 2-3 mm veya daha büyük çatlak olup olmadığı gözle kontrol edilir. 2 mm ve daha geniş çatlaklar 300 mm'yi geçmiyorsa normaldir. Çatlak 3 mm'den büyükse mutlaka tamir gerekir. Bundan sonra ikinci olarak genişliği ve çatlakların kesişip kesişmediği kontrol edilir. Çatlaklar kesişirlerse bağımsız bloklar oluşur ve yerlerinden çıkarlar. Bundan sonra ayırma veya genleşme bağlantıları ve ayırma cıvataları kontrol edilir. Kılcal çatlaklar göz ardı edilir.

Tamir edilecek alan küçükse tel fırça kullanılarak, alan büyükse kuru püskürtme yoluyla temizlik yapılır. Aksi takdirde yüzeyde temizlenmeden kalan tozlar tamir sırasında kullandığımız harcın yüzeye yapışmasını engeller ve pişirme sırasında tamir harcının yüzeyden uzaklaşmasına ve dökülmesine neden olur.

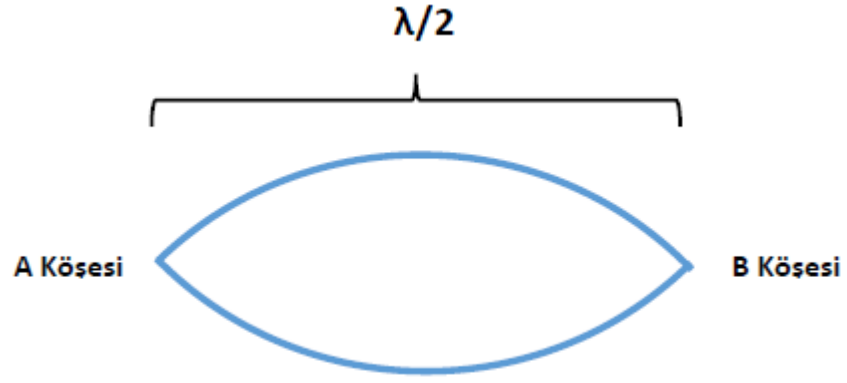
Elastiklik modölünün bulunmasında pek çok yöntem kullanılmaktadır. Bir katı cisimde ses hızı ve yoğunluktan gidilerek de ölçülebilir. Özgöl ağırlığı ρ olan bir katı malzemede sesin yayılma hızı V ise $V=(E/\rho)^{1/2}$ ilişkisi vardır. V ve ρ ölçüldüğü takdirde elastiklik modülü (E) bulunur. Uygulamada birkaç çeşit elastik modölü kullanılır. Bunlar kayma modölü ve hacimsel elastiklik modölüdür. Elastiklik modölünün bulunmasında diğer bir yöntem dinamik elastiklik modölüdür ki ayrı bir bölüm halinde incelenmiştir. Dökülebilir refrakterlerde hala geçerli bir yöntemdir.

Fırın imalat aşamasında veya imalat bittikten sonra hata tayin edilirse, yapılacak tamir çok büyük ekonomi sağlar. Sıcak tamir fırının durma süresini kısalttığı için çok faydalıdır. Bu nedenlerle fırınlarda imalat sonrasında ve kullanım sırasında çatlak tayini çok önemlidir. Sesle muayene, refrakter malzemelerde önemli bir kalite kontrol yöntemidir. Basit bir örnek vermek gerekirse, bir kaba konan beş fincanın titreştirilmesi sonrasında hepsi sağlamsa çıkan sesi bir harmonisi vardır, eğer içlerinden biri çatlaksa farklı ses çıkarır ve böylece bu seride üretilen bir fincanın çatlak içerdiğini tespit eder ve daha detaylı bir inceleme yaparız. Doğada bunun bir örneği ise baykuştur. Baykuş avını sesle bulur. Kulakları simetrik değildir. Zifiri karanlıkta avının nerede olduğunu 3 boyutlu olarak tayin edebilir.

Çizelge 2.5 Bazı canlı türlerinin işitme ve ses üretme aralığı frekans değerleri [23]

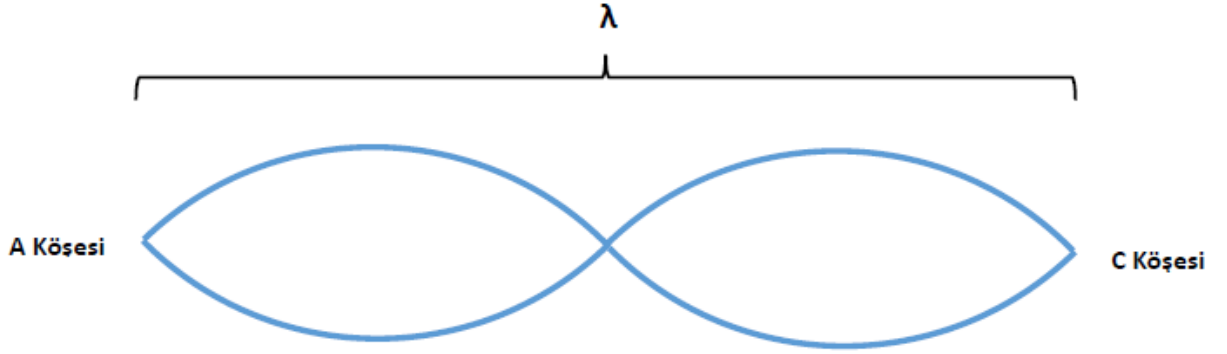
CANLI TÜRÜ	İŞİTME ARALIĞI FREKANSI (HZ)	SES ÜRETME ARALIĞI FREKANSI (HZ)
KÖPEK	15-50.000	450-1.080
KEDİ	60-65.000	760-1.520
YUNUS	150-150.000	7.000-120.000
YARASA	1.000-120.000	10.000-120.000
İNSAN	20-20.000	85-1.100

A-B sabit olmak üzere piyano teli 3 boyutlu bu şekilde titreşir ve Şekil 2.13 elde ediliyor. Telin boyu dalga boyunun yarısına yani minimum hata boyuna eşittir.



Şekil 2.13 3 boyutlu titreşen piyano telinin dalga boyunun yarısına eşitliği

A-C sabit olmak üzere şekil 2.14’de gösterilen piyano telinin ürettiği sesin bir periyodunun görüntüsü, aynı zamanda dalga boyunu gösterir.



Şekil 2.14 3 boyutlu titreşen piyano telinin dalga boyunun yarısına eşitliği

2.24 Ultrasonik Muayene ile Diğer Muayene Yöntemlerin Karşılaştırılması

2.24.1 X-Ray Işınları ile Muayene

X-Ray doğrultusunda kat ettiği derinliği gösterir. Ultrasonik yöntemde dalganın yayılışı itibari ile yayıldığı doğrultudaki hata uzunluğunu dikkate alır. Bu yönleriyle iki yöntem birbirine benzerlik gösterir. X-Ray hareket doğrultusuna dik doğrultudaki ince hataları algılamaz. Çünkü kat ettikleri yolun oranını fazla etkilemez. (X ışınları azalması) X-Ray ile muayene yapıldığında parça içerisindeki hata çok ince ise detektör bunu algılayamaz [24].

2.24.2 Görsel Muayene

Çıplak gözle yapılan muayenedir. Bir ürünün yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gibi kaliteyi etkileyen parametrelerin optik bir yardımcı (büyüteç gibi) kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilmesidir.

Gözle muayene çok basit bir metot olarak görünse de kendine özgü incelikleri vardır. Genellikle bir başka tahribatsız muayene metodunun uygulanmasından önce yapılması gereken bir çalışmadır. Zaten diğer tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standartlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenir [24].

2.24.3 Penetrant Muayene

Girici boya muayenesidir. Sadece malzeme dış yüzeyinde açılan hatalar tespit edilebilir. Manyetik muayene yüzeye açık olan ve olmayan yüzeysel hataları ortaya koyar. Sadece gözenekli malzemeler bu muayeneye tabii tutulmaz.

Ön temizlik: Malzeme yüzeyindeki yabancı maddeleri, yağı, kiri, pası temizlemek için yapılır.

Penetrant tatbiki: Penetrant sıvısı yüzeye püskürtülür, çatlakları doldurur. 15 dakika beklenir.

2. temizlik: Malzeme yüzeyindeki kırmızı sıvının (penetrant) temizleme işlemidir.

Developer tatbiki: Su, çözücü ya da püskürtme ile tatbik edilebilir. Çatlaktan sıvıyı emip dışarı çıkarır.

İnceleme: Floresan sıvı kullanımı ile değişmekle beraber gözle ya da siyah ışık altında muayene edilir [24].

2.24.4 Manyetik Partiküllerle Muayene

Sadece ferromanyetik (mıknatıslanabilir) malzemenin muayenesi yapılabilir. Parça mıknatıs hale getirilir. Yumuşak demir üzerinden manyetik alan çekilirse eski haline döner. Karbonlu çeliklerden manyetik alan kaldırılrsa bile malzemede çatlak varsa

kutuplaşma bir süre devam edebilir. Manyetik alanla enine, elektrik alanla boyuna hatalar tespit edilebilir.

Hatalı malzemede hatanın manyetik alana gösterdiği direnç büyüktür. Üzerinden alternatif akım geçen bir bobin iletken bir malzemeye yaklaştırılırsa bu malzeme içinde girdap akımları indüklenir. İndüklenen girdap akımları ilave bir manyetik alan meydana getirirler. Bu alan ya bizzat onu uyaran bobin veya bir ayrı bobin tarafından detekte olunabilir. Malzeme içinde mevcut kusurlar, geometrik ve metalürjik değişimler elektriksel iletkenlik ve permeabilitide, dolayısıyla indüklenen girdap akımlarında yerel değişimlere sebep olurlar. Girdap akımlarındaki bu değişimler detektör bobin tarafından uygun bir cihaza gönderilir. Okuma cihazı ibreli bir cihaz, scope, kalemli kaydedici, ışıklı veya sesli alarm, sayıcı, otomatik damgalayıcı veya ayırıcı bir cihaz olabilir. Böylece malzemenin elektriksel, manyetik ve geometrik süreksizlikleri endirekt olarak ölçülebilir.

İletken olmayan malzemelere uygulanamaz. Ancak bunun bir istisnası vardır; iletken bir malzeme üzerinde iletken olmayan bir kaplamanın kalınlığı girdap akımları ile ölçülebilmektedir [24].

2.24.5 Eddy Current Muayenesi

Eddy-current test iletken malzeme kusurları tespiti için elektromanyetik endüksiyon kullanır. Birçok sınırlamalar, aralarında: sadece iletken malzeme, erişilebilir olmalıdır malzemenin yüzeyinde test edilebilir, malzemenin bitiş kötü kaynaklar neden olabilir, malzemenin içine nüfuz ve derinliği sınırlı olduğunu ve bu paralel yalan kusurlarını soruşturmanın mümkün olabilir.

Ancak, Eddy-Current test metodu ile malzemenin yüzeyine yakın çok küçük çatlakları algılanabilir. Asgari hazırlık gerekir ve yüzey geometrisi düzgün olmayan parçalara da uygulanabilir. Ayrıca, elektrik iletkenliği ve kaplama kalınlığı ölçüm için yararlıdır. Test cihazları, hemen geribildirim sağlar ve taşınabilir olması avantajdır.



Şekil 2.15 Ultrasonik NDT İncelemesi örneği

Ultrasonik NDT İncelemesi örneği:

V2500 uçak motorunun pal köklerinin NDT İncelemesi.

1. Adım: Özel bir boroskop aracı vasıtasıyla NDT probunu incelemenin yapılacağı pal köküne yerleştir.

2. Adım: NDT Cihazını doğru dalga değerine ayarla.

3. Adım: Probu incelemenin yapılacağı noktaya probun açısına göre ve en yüksek inceleme dalgasının kırmızı çizgi ile belirlenmiş normal değerler içinde kaldığı gözlemlenir. Eğer kalıyorsa, pal sağlamdır, kırmızı çizginin dışında ve sol tarafında ise pal kökünde çatlak var demektir [24].

2.24.6 Phased Array Yöntemi

Malzemeye Phased Array cihazları ile muayene yapılır. Ultrasonik muayeneye göre daha avantajlıdır. Ultrasonik muayenede malzeme içi düzensizliklerin tespiti için 3 boyuttan muayene yapılmasına karşı phased array ile tek seferde hataların yönelimi ve malzeme içerisindeki konumları hakkında bilgi alınabilir [24].

2.25 Ultrasonik Muayene Yönteminin Önemli Uygulama Alanları

Yüksek fırın, ark ocakları, indüksiyon ocakları, sürücü plakalarının ömürleri çok uzundur. Buralarda kullanılan tuğlaların kusurlu olması ömrü ciddi ölçüde kısaltabilir. Bu nedenle bu tip uygulamalarda kullanılacak tuğlaların her birisinin ultrasonik yöntemle muayene edilmesi gerekmektedir. Ancak bu şekilde kazaların önüne geçilebilmektedir ve fırın ömrünü kısaltabilecek tehlikelerden uzak durulabilmektedir.

2.25.1 Sürgü Plakasının Muayenesi

Sürgü plakası (slide-gate) ingot dökümü sırasında kullanılır. Bu nedenle refrakter kalitesinin iyi olması gerekir. Ultrasonik yöntem bu refrakterlere üretici firma tarafından yükleme öncesinde uygulanmaktadır. Parça kalınlığı boyunca yapılan ölçümler laminasyon hatalarını bulmaya yöneliktir. Çünkü presleme bu doğrultuda yapılmış ve olası laminasyon çatlakları bu doğrultu ile 45° açı yapmaktadır. Parça genişliği boyunca yapılan ultrasonik ölçümler fiziksel özelliklerle ilgilidir. Sürgü plakası ile yapılan rutin kontroller çok iyi netice vermiştir [16].

2.25.2 Sürekli Döküm Borusunun Muayenesi

Sürekli döküm borusu çok pahalıdır. Bu nedenle ultrasonik hız ile tahribatlı deney sonuçları arasında ilişki kurmak için deney yapılmamaktadır. Bunun yerine çok sayıda sürekli döküm borusu ultrasonik yöntemle muayene edilmekte ve sonuçlar istatistik olarak değerlendirilmektedir.

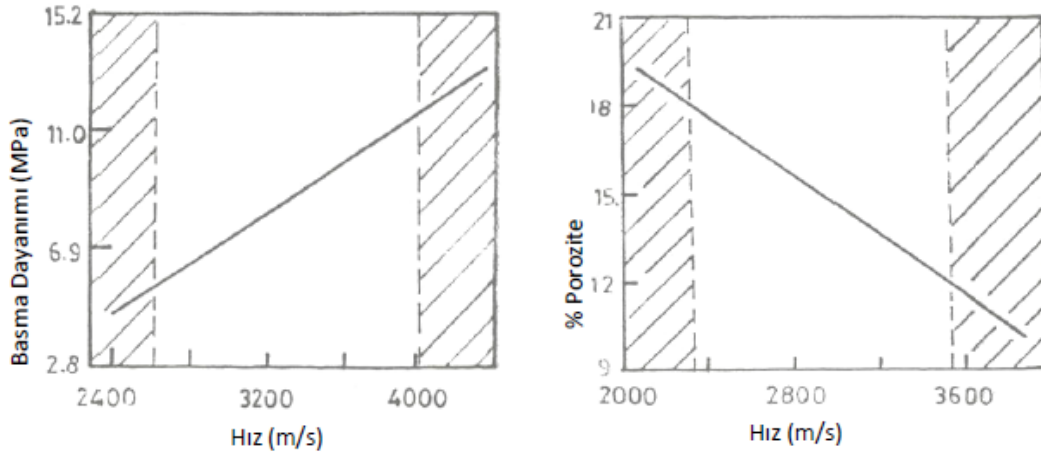
Fabrikadaki uzmanlar, ergimiş silika borularda ultrasonik hızın 3600-4400 m/s arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır. Eğer hızı çok düşükse boru çok zayıf olma eğilimindedir. Eğer çok yüksekse ön ısıtma işlemine tabi tutulmadığı anlaşılmaktadır.

Grafit-alümina boru ile çalışan uzmanlar ultrasonik hız ile fiziksel özellikler arasında hiçbir bağlantı olmadığını ortaya koydular. Yerinde yapılan deneyler göstermiştir ki mukavemetle ultrasonik hız arasında bir ilişki kurulmuştur. Ancak bir miktar destekleyici bilgiye ihtiyaç vardır.

2.25.3 Yüksek Fırın ve Soba Tuğlalarının Muayenesi

Ultrasonik yöntem yüksek fırın tuğlalarının muayenesinde yeni bir boyut getirmiştir. Geçmişte sadece tuğla boyutu kontrol ediliyordu. Fakat şimdi, ultrasonik hızın gösterdiği fiziksel özellikler de kontrol edilmektedir. Yapısal farklar ultrasonik hıza tesir etmektedir. Yapının bozuk olduğu durumlarda hız düşük, iyi olduğu durumlarda hız yüksektir. Düşük frekanslı süper görevli 2 tuğlada korelasyon katsayısı birbirinden farklıdır. Hammaddelerinin aynı olduğunu varsayarak, karıştırma, presleme ve pişirmede farklılık olmuş olabilir.

Ultrasonik hız sonuçlarını, standartlarla birleştirdiğimiz zaman muayene kabiliyetinde potansiyel alan ortaya çıkar. Şekil 2.16'da taranmamış alan geçerli, taranmamış alan geçersiz bölgeyi gösterir. Yani taralı alan bölgesinde hassasiyet düşüktür ve bundan dolayı değerlendirmeye alınmaz. Ultrasonik hız sayıları gözeneklilik ve eğme mukavemeti için özel limitleri gösterir. İki şekli birleştirecek kabul edilebilir bir bölge tanımlanabilir. Maksimum ve minimumda bir eşik değeri belirlenebilir. Bu istatistik değerlere göre parçaların kabul veya ret durumu ortaya çıkar. Yüksek fırın tuğlaları üzerinde araştırma yapan Russel ve Morrow ultrasonik hız ile eğme mukavemeti ve ultrasonik hız ile gözeneklilik arasında doğrusal ilişki ortaya koymuştur [14]. Ancak bu doğrusal ilişki belirli limitler arasında geçerlidir.



Şekil 2.16 Yüksek gözenekli tuğla için ultrasonik hız ile görünür gözeneklilik(sol), eğme mukavemeti(sağ) arasındaki ilişki [14]

2.25.4 Ateş Tuğlalarının Ultrasonik Muayene Yöntemiyle Muayenesi

Kok fırını refrakterlerinde bulunan iç çatlaklar, laminasyonlar ve siyah merkezileşme gibi hatalar, basma dayanımının son derece değişkenlik göstermesine neden olur. Deniz aşırı üreticilerden sağlanan kok fırını ateş tuğlaları bu yöntemin gelişmesini hızlandırmıştır. Yöntem, kaba hataları ve kabul edilebilir bir hata ile basma dayanımlarını bulmaya olanak sağlar [10].

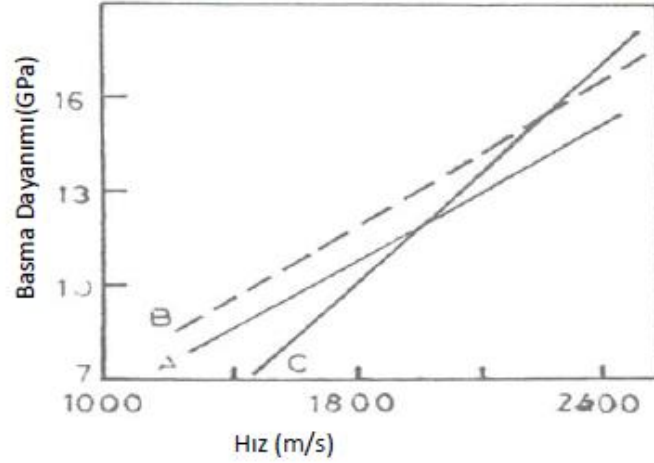
Ultrasonik yöntemle elastiklik modülünün ve eğme mukavemetinin ölçülmesi ve bu iki özellik arasındaki ilişki çeşitli araştırmacılar tarafından araştırılmıştır. Davis E/MOR (elastiklik modülü)/(eğme mukavemeti) oranının belirli bir malzeme için sabit olduğunu

ortaya koymuştur. Bu oran %32 alüminalı ateş tuğlası için 2070 iken, %42 alüminalı ateş tuğlası için 2480 değerine kadar değişmektedir.

Kok fırını ateş tuğlası kesildiği zaman önce siyah çekirdek veya siyah karın sorunu ile karşılaşırız. Siyah karın sorununa büyük tuğlalarda rastlanır. Hızlı pişirme sonucu yanmadan kalan organik maddelerin veya Fe_3O_4 'ün siyah rengine neden olduğuna inanılır. Mukavemet düşmesine, laminasyon veya siyah çekirdeklenme nedeniyle sık sık rastlanır. Belirli bir malzeme için ultrasonik hızın sabit olması gerekir. Fakat malzeme içindeki hatalar örneğin gözeneklilik ve diğer fiziksel özellikler ultrasonik hızı etkiler [10].

Ultrasonik dalgaların ortalama hızı boyuna, enine ve kalınlaşmasına doğrultularda hızların ortalamasıdır. Lawlar yaptığı çalışmalarda bir ateş tuğlasında boyuna hızı 2621, enine hızı 2865 ve kalınlaşmasına hızı 2499 m/s olarak bulmuştur. Boyuna, enine ve kalınlaşmasına yüzey merkezindeki ultrasonik hız ölçmeleri içyapı hataları özellikle yoğunluk ve iç çatlaklar hakkında bilgi verir. Örneğin boyuna doğrultuda hız düşükse bu doğrultuya dik doğrultuda hata olduğunu gösterir. Deneysel çalışmalarda bütün ultrasonik ölçmeler tamamlandıktan sonra parçalar ikiye bölünmüş, tahminlerle gerçek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bir veya iki hata hızın düşük olmasına neden olmaktadır. Boyuna okumalarda hız 1220-1830 m/s'ye düşebilir. Enine ölçmeler içyapıdan en az etkilenmiş görünüyorlar. Bu nedenle teşhise ait değerlerde soru işareti vardır. Bazı tuğlalarda hız çok değişkenlik göstermiştir. Bu numunelerde hataya rastlanmıştır. Bazı numuneler hem yüksek yoğunluğa sahiptir hem de kalitelidir. Bu numuneler kesildiği zaman merkezde çok renk değişmesi görülmüş ama hata görülmemiştir. Bu deneysel çalışmalar göstermiştir ki ultrasonik hız ölçme yöntemiyle büyük boyutlu kok fırını ateş tuğlalarında içyapı hataları tespit edilebilir. Burada çatlaklar, laminasyonlar ve siyah merkezileşmeler incelenmiştir. Aynı şekilde basma dayanımı, yoğunluk ve görünür gözeneklilik incelenebilir.

Ölçümler blok şekline göre 4, 5, 6, veya 8 ayrı noktada yapılmıştır. Deney yapılan noktalar orijinal makalede gösterilmiştir. Lawlar ve Ross basma dayanımı ile ultrasonik hız arasında doğrusal ilişki bulmuştur. Numune şekillerine göre doğruların eğimi çok az farklıdır. Bu durum, şekil 2.17'de gösterilmiştir [21].



Şekil 2.17 Oda sıcaklığındaki basma mukavemeti ile ultrasonik hız arasındaki ilişki. A,B ve C özel şekilli ateş tuğlalarıdır [21]

İnşaat tuğlası gibi düşük kaliteli tuğlalarda hammaddeden gelen organik maddeler göbekenmeye neden olmaktadır yani yanmamış organik malzemelerin olumsuz etkilerine maruz kalmaktadır. Ultrasonik yöntem ile bu tür hatalar da saptanabilmektedir.

2.25.5 Genel Değerlendirme

Birikmiş datalar göstermiştir ki sinter bazık, kimyasal bağlı, yüksek görevli, süper görevli ateş tuğlası, bekletme potası ve silika tuğla ile ultrasonik hız arasında iyi bir ilişki (korelasyon) kurulabilir. İki tip tuğlada yoğunluk ve gözeneklilik ile ultrasonik hız arasında iyi bir ilişki yoktur. Bunlar yüksek alüminalı ve direkt bağlı tuğlalardır. Bunlara birde grafit bağlı tuğlayı eklemek gerekir. Direkt bağlı tuğlada eğme mukavemeti ile hız arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Açık ki en önemli ilişki mukavemetle ilgilidir. İlişkinin zayıf olduğu uygulamalarda hammadde kaynaklarının farklı olduğu anlaşılmıştır. İmalat yönteminin farklı olması da karakteristik ilişkileri etkilemektedir. Grafitin anizotropik ve tabakalı yapıya sahip olması ultrasonik yöntemden netice almayı zorlaştırmaktadır [14].

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, ultrasonik yöntemin herhangi bir uygulamadaki refrakter için kalite kontrol amacıyla kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Çok değişik refrakter için ultrasonik hız ve diğer fiziksel özellikler arasında önemli ilişkiler kuruldu. Çeliğin boşaltıldığı kritik uygulama yerlerinde kullanılan refrakterlerin kalite

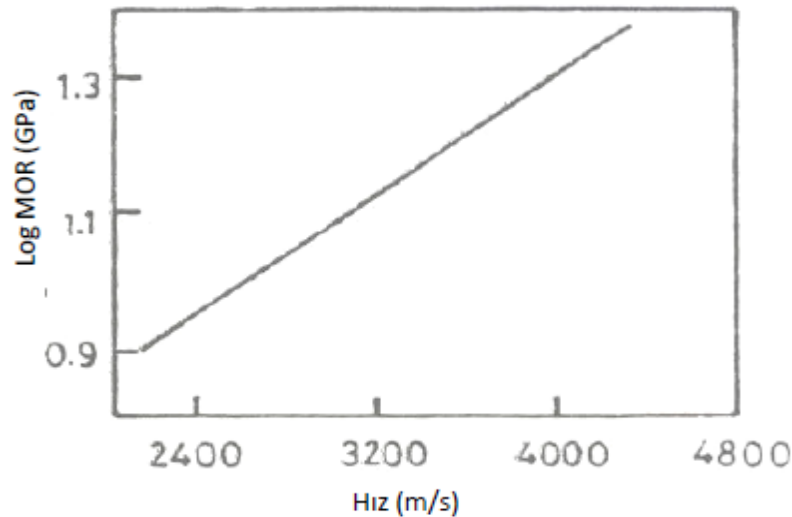
kontrolünde ultrasonik hız yöntemi çok büyük önem arz eder. Ayrıca görülmüştür ki, birkaç tanesi hariç çelik fabrikası refrakterleri, ultrasonik hız yöntemiyle kalite kontrolü yapılabilir. Bu yöntem refrakter performansını tahmin etme olasılığı verir. Ayrıca çelik üreticisinin geleceğe güvenle bakmasını sağlar [14].

Kawa ultrasonik prob kullanarak SiC plakalarda hataların bulunmasını araştırdı. Plakanın eğme mukavemetiyle ultrasonik hız arasında ilişki kurdu.

Yukarıdaki çalışmalardan da görüldüğü gibi ultrasonik hız ile çeşitli fiziksel özellikler arasında ilişki kurulabilir. Burada rezonans yöntemiyle elastiklik modülünün bulunabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Daha önce de belirtildiği gibi, Aly and Semler, yüksek alüminalı (%90), müllit (%70 alümina), yüksek görevli ateş tuğlası (%42 alümina), vitroz silika (%99 silika) ve karbon tuğlası üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ultrasonik hız ile eğme mukavemeti tayin edilmiş ve gerçek değer ile karşılaştırılmıştır. Ultrasonik ölçme işlemlerini çabuklaştırmak için prob yüzeyleri lastiklerle kaplanmıştır.

Ultrasonik hız ve eğme mukavemeti arasındaki ilişki en iyi matematik ifadesiyle konmuştur. Hem doğrusal hem de üstel ilişki dikkate alınmıştır. Aly ve Semler'den önceki araştırmacılar hep doğrusal ilişki aramışlardır. Fakat bütün durumlarda gözlemlendi ki üstel yaklaşım 0,92-0,72 arasında bir katsayı vermektedir [3].



Şekil 2.18 %90 alüminalı refraktere ait LogMOR/Ultrasonik Hız ilişkisi [3]

Şekil 2.18, yüksek alüminalı (%90 alümina) refraktere ait LogMOR-ultrasonik hız arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Aynı araştırmacılar diğer bazı refrakterler için de benzer ilişkiler kurmuşlar fakat onları yayınlamamışlardır.

Çalışmada gerçek ve ultrasonik yöntemlerle tahmin edilen değerler arasındaki hata oranları tablo halinde verilmiştir. Rezonans yöntemiyle elde edilen dinamik elastiklik modülü E ile gösterilmiştir. Elastiklik modülünden eğme dayanımına geçiş doğrusal kabul edilmektedir. Gerçek ve hesaplanmış değerler arasındaki hata %1'den az fark var ise ilişki mükemmel demektir. %1-10 gerçekçi ilişki olarak kabul edilir. Fakat hata %76'ya kadar çıkmaktadır. Arada çok büyük fark varsa karşılaştırılan refrakterlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri çok farklı demektir. Sonuçlar arasında iyi biri ilişki elde etmek için istatistik olarak geçerli matematiksel ilişki kullanılmaktadır. Fakat deneysel olarak çıkarılan ilişkilerin geçerliliği aynı tiplerde veya benzer kimyasal ve bağ yapısına sahip refrakterlerle sınırlıdır. Bu sınırlamalarla ilgili örnekler verilmiştir. Katsayıları benzer olanların kimyasal yapıları ve fiziksel özellikleri benzerdir. Yüksek görevli ateş tuğlası, silika tuğlası ve karbon tuğlası model üründen farklılık gösterir. Bütün bunlarda mukavemet ilişkisi kabaca %20'den büyüktür. Yüksek görevli ateş tuğlasının nominal kimyasal değeri süper görevli ateş tuğlasına benzer fakat ürünlerin fiziksel özellikleri birbirinden farklıdır ve gerçek hesaplanmış mukavemet değerleri farkı %23'tür. Döküm yolu ile şekillendirilmiş %99'luk silika ile kireç bağlı klasik %96'luk tuğla arasında %30 hata vardır. Karşılaştırılan iki karbon tuğla arasında kullanılan hammadde ve bağ bakımından muhtemelen fark vardır.

2.26 Pişmiş Seramik ve Refrakter Ürünlerden Numune Çıkarma

Seramik, refrakter ve cam malzemelerde talaşlı imalat yüzey çatlaklarına ve pürüzlerine neden olur. Bunlarda gerilme birikmesine ve mukavemet düşmesine neden olur. Bu nedenle seramik ürünlerden numune çıkarmak, deney sonuçlarında standart sapmanın artmasına neden olur. Yani güvenilirliğin azalmasına neden olur. Yani güvenilirliğin azalmasına neden olur. Bu nedenle pek çok seramik kitabında seramikleri ilgilendiren istatistik bilgiler mevcuttur.

2.26.1 Emniyet Bilgileri

Astar yapımında dikkate alınan en önemli parametrelerden biri emniyettir. Astar uygulamasında sağlık yönünden zararlı unsurlar vardır. Tavan yapımında son derece dikkatli olmak gerekir. Zararları ve kazaları önlemek için emniyet bilgilerine dikkat etmek gerekir. Eğer çok soğuk, çok sıcak, dezavantajlı şartlarda, yeteri kadar aydınlatılmamış alanlarda işlem yapılacak ise daha da dikkatli olmak gerekmektedir. Refrakter bileşimleri ince taneli olup, elin yağını alır ve cildi kurutur.

2.27 Dökülebilir Refrakterlerin Uygulanmasında Dikkat Edilmesi Gereken Unsurlar

Yüksek alüminalı çimento rutubetsiz ortamda ve genellikle en fazla 6 ay saklanır.

Karıştırma ekipmanları çok iyi temizlenmelidir.

Malzeme önce kuru olarak karıştırılmalıdır. Sonra öngörülen suyun yarısı katılır, homojen hale gelinceye kadar karıştırılır ve gerekli suyun kalanı ilave edilir.

Karıştırma süresi 5 dakikayı geçmemelidir.

Karıştırma mikserle veya benzeri bir ekipman yapılmalıdır.

Kalıplar döküm öncesi yağlanmalıdır.

Dökümden sonra en az 24 saat bekletildikten sonra sökülmalıdır.

2.28 Dökülebilir Refrakterlerde Uygun Su Oranının Belirlenmesi

Dökülebilir refrakterlerde uygun su oranının bulunması için uygulanan teste top testi denir. Dökülebilir refrakter su ile karıştırıldığı zaman hidrasyon meydana gelir ve zamanla mukavemet artar. Uygulanma açısından betona benzediği için refrakter beton olarak da adlandırılır. Hidrasyon için gerekli su, verilmesi gereken en az sudur. Fakat bu durumda şekillendirme yapmak zordur. Metal kalıpta şekillendirme yapıldığı zaman bile yüzey çok düzgün değildir. Döküme elverişli su oranı ASTM C 860 (reapproved 1991)'e göre yapılmalıdır [19]. Uygun kıvamda su içeren dökülebilir refrakteri avucumuzun içinde sıkığımız zaman, yırtılmadan parmaklarımızın arasından akabilmektedir. Eğer şekillendirme sırasındaki su oranı yüksek olursa çamur

parmaklarımızın arasından kolayca akar. Eğer şekillendirme sırasındaki su oranı az olursa parmaklarımızın arasından akarken yırtılır. Her iki durum da arzu edilmez.

Uygun su oranının belirlenmesinde ikinci yol, çamuru iyice karıştırdıktan ve top şekline getirdikten sonra yukarıya doğru atarız ve düşerken tutarız. Bu işlemi birkaç defa yapabiliriz. Çamur, dağılmıyorsa su oranı uygun demektir. Uygun su oranının belirlenmesinde üçüncü bir yol, çamur, eksen etrafında dönen yatay bir tabla üzerine yarım küre şeklinde konur. Tabla döndürüldüğü zaman çamurun yayılmaması gerekir.

Eğer şekillendirme sırasındaki su oranı yüksek tutulursa, fazla su reaksiyona girmeden kalır. Kurutma sırasında bünyeden uzaklaşan suyun bıraktığı gözenekler hem mukavemeti hem de ultrasonik hızı düşürmektedir. Nitekim kurutulmuş numunelerde ultrasonik hız şekillendirme suyu oranına bağlı olarak düşmektedir. Bu noktadan hareketle, dökülmüş ticari refrakter betonların su oranları ultrasonik yöntemle kontrol edilebilir. Refrakter betonun kalite kontrolü amacıyla kullanılabilir. Bu yöntem benzer şekilde diğer dökülebilir refrakterler içinde uygulanabilir.

2.29 Yüksek Alüminalı Çimentoların Yapısı ve Özellikleri

Çizelge 2.6 Çeşitli kalsiyum-alüminat çimentoların kimyasal bileşimleri [25]

Kimyasal Bileşim %	Fondu	Secar 50/51	Secar 70/71	Secar 80	Alcoa CA25
Al ₂ O ₃	39	50,5	70,5	80,5	79
CaO	38	36,8	28,7	18	18
SiO ₂	4,5	6,9	0,35	0,2	0,1
Fe ₂ O ₃	16,5	3,6	0,1	0,15	0,3
TiO ₂	2,5	1,95	0,05	0,03	/
Ergime °C	1270	1440	1700	1750	1770

Trikalsiyum alüminat (C_3A) yüksek alüminalı çimentolarda pek bulunmaz. Kalsiyum hegza alüminat (CA_6)’da bulunmaz fakat yüksek alüminalı çimento-alümina agrega karışımı refrakter beton ısıtıldığı zaman agregadaki alümina ile CA , $C_{12}A_7$, ve CA_2 fazlarının $1600\text{ }^{\circ}C$ ’de reaksiyona girmesiyle oluşur. [20] CA_x bileşiklerinde x yani alümina oranı arttıkça hem ergime sıcaklığı artar hem de bu bileşiklerin kararlılığı artar. CA_6 fazının ergime sıcaklığı diğerlerinden daha yüksektir. Kalsiyum alüminat ($Al_2O_3 \cdot CaO$) yüksek alüminalı çimentolarda veya ergitme sırasında oluşur [9]. Yüksek alüminalı çimentoların temel mineralidir. Ticari yüksek alüminalı çimentolarda bu fazlara ilaveten $C_{12}A_7$, C_2S , C_2AS bileşikleri de bulunur.

2.29.1 $C_{12}A_7$

Yüksek alüminalı çimentoların üretimi sırasında pek oluşmaz. Bu bileşiğin hidratasyonu katılaşması birkaç dakika içinde gerçekleşir. Eğer alışılagelmişin üzerinde alkali varsa bu etki fazla gözlenir. Bu fazın hızlı katılaşması, diğer fazlar için çekirdek oluşumu sağladığından, yüksek alüminalı çimentoların katılaşma hızını arttırıcı etki yapar. Bu nedenle $C_{12}A_7$ özel olarak üretilir ve yüksek alüminalı çimentolara az oranda katılır. Ergime sıcaklığı $1450\text{ }^{\circ}C$ olmasına rağmen, dökülebilir refrakterlerin ısınması sırasında agregadaki alümina ile $950\text{ }^{\circ}C$ ’de birleşmesi sonucu kalsiyum mono alüminat (CA) oluşturduğu için, içine katıldığı yüksek alüminalı çimentonun ergime sıcaklığını düşürmez [1], [3].

2.29.2 CA

Yüksek alüminalı çimentoların en önemli bileşiğidir. Çimento özelliğini bu bileşik kazandırır. Ergitilerek üretilen türler, ergiyik haldeyken hızlı soğutulmuşsa bunların, dökümden sonraki sertleşme hızları düşüktür. Fakat sertleşmeye başladıktan sonra hızlı katılışırlar. Üretim sırasında ergiyik haldeyken yavaş soğutulursa CA ’ların tamamı kristalleşir. Bu da, hidrolik aktiviteyi maksimuma çıkarır. Eğer ergiyik haldeyken suya dökülseydi, tümü camsı faz olurdu ve yüksek alüminalı çimentonun sertleşmesi çok yavaş olurdu [1]. CA bileşimine uygun karıştırılmış harman $1250\text{ }^{\circ}C$ ’de pişirilirse CA

oranı düşük, 1300 C⁰ de pişirilirse hemen hemen tamamı CA'dır. Bekleme zamanı 2saatin üstünde ise bu oran değişmez [2].

2.29.3 CA₂

Saf bileşik, oda sıcaklığında su ile çok yavaş reaksiyona girer, fakat kireç-su veya yüksek pH değerleri hidratasyonu ve mukavemetin gelişme hızını arttırır. Saf CA₂'nin hidratasyonu bir defa başladığı zaman reaksiyon hızlanır. Aynı sebeplerden dolayı, mono kalsiyum alüminat bulunduğu zaman da reaksiyon hızlanır. Aynı sebeplerden dolayı, mono kalsiyum alüminat bulunduğu zaman da reaksiyon hızlanır [1].

2.29.4 C₂AS

Silika oranı yüksek olan yüksek alüminalı çimentolarda önemli miktarlarda sık sık düzenli bileşen olarak bulunur. Saf gehlenit su ile yavaş reaksiyona girer. Gehlenitin yüksek oranda bulunması, yüksek alüminalı çimentoların sertleşme hızını kaçınılmaz olarak düşürür. Yüksek alüminalı çimentonun en önemli üç bileşiği de bu diyagramda yer almaktadır [1].

2.29.5 C₂S

Bu bileşikler, %5 den fazla silika içeren yüksek alüminalı çimentoların ötektik kısımlarında küçük yuvarlaklar şeklinde sık sık görülür. Yüksek silikalı klinkerlerde gehlenit (C₂AS) genellikle görülür.

2.29.6 Demirli Bileşikler

Çoğu yüksek alüminalı çimento demir bileşikleri içerir. Bazılarında demir oksit oranı %18'e kadar çıkar. Tüketilen yüksek alüminalı çimentoların ağırlıkça büyük bir kısmı bu grupta yer alır. Akiyama, Fe₂O₃'ün yüksek alüminalı çimento özelliklerine ve hidratasyonuna etkisini incelemiştir. Fe₂O₃ en az diğer bileşenler kadar mukavemet verir. Daha çok CaO.Fe₂O₃ 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ bileşikleri şeklinde bulunur. Bazı yüksek alüminalı çimentolarda FeO wüstite olarak serbest halde bulunur [25]. CA fazı hem demir oksitleri hem de silikayı katı çözelti halinde bulundurabilir [2]. Kalsiyum alüminat

bileşikleri yüksek alüminalı çimentoların önemli bileşenleridir. Dolayısıyla dökülebilir refrakterlerin önemli bileşenleridir [26].

2.29.7 Fondu

Demir oksit oranı % 15-18 arasında değişir. Üretiminde doğada bulunan yüksek oranda demir oksit içeren hammadde kullanılır [25]. Bu nedenle diğer yüksek alüminalı çimentolara göre çok ucuzdur. Fakat portlant çimentosuna göre çok pahalıdır. Çünkü hammadde o kadar yaygın değildir ve yüksek alüminalı çimento klinkerini öğütmek daha zordur. Robson hem yüksek alüminalı çimentoların hem de hammaddesinin ülkelere göre dağılımlarını vermiştir. Yüksek alüminalı çimento ile portlant çimentosunun priz zamanı yaklaşık aynıdır. Fakat, portlant çimentosunun basma dayanımı 24 saatte çok yavaş arttığı halde Fondu'nun basma dayanımı çok hızlı artmaktadır. Fondu yerleştirildikten ve gerekli işlem yapıldıktan 24 saat sonra servise alınabilir. Nihai mukavemet değeri aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

Agreganın bileşimine,

Su / çimento ve çimento / karışım oranına,

Karıştırma zamanına ve ekipmanına,

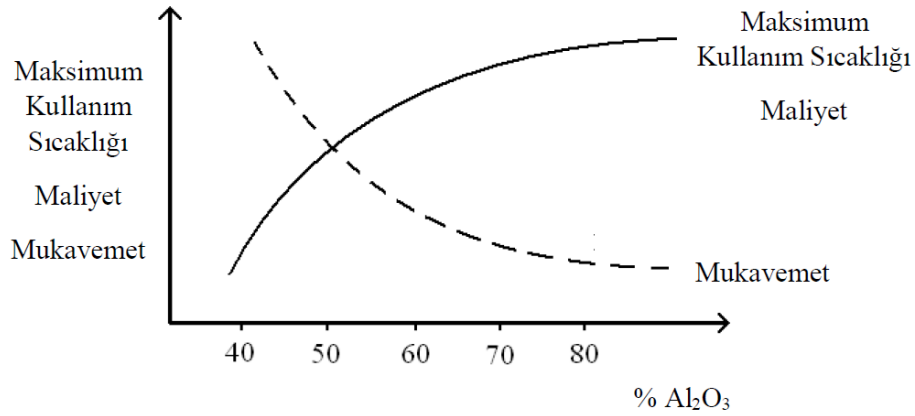
Ortam sıcaklığına [7].

2.29.8 Secar 50 / 51

Alümina oranı yaklaşık % 50'dir. Temel bileşeni CA'dır ve bu onu refrakterler için ideal bağlayıcı yapar. Secar 51 döküm dizayn edilmiştir. Bu nedenle karıştırma işleminden bir saat sonra bile mükemmel akıcılık gösterir. Kısmen CA içerdiği için mekanik özellikleri mükemmeldir. Demir oksit yüzdesinin düşük olması nedeniyle, CO içeren redüktan atmosferlere karşı direnci iyidir. Secar 51 bütün yerleştirme metotlarına adapte edilebilir. Özellikle döküm ve püskürtme metotlarına elverişlidir [25]. Secar 51 herhangi bir katkı maddesi içermez. Refrakter karışımları için tavsiye edilir. Çoğu şartlarda özelliklerini bir yılın üzerinde korur.

2.29.9 Secar 80

Temel minerali CA'dır. Bu nedenle hem mukavemeti iyidir, hem de iyi bir bağlayıcıdır. Pişirme sırasında CA, alümina ile birleşerek CA_6 bileşikleri oluşturur ki bu bileşik refrakterin ergime sıcaklığını arttırıcı etki yapar. Düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerin üretiminde kullanılırlar. Yüksek saflıkta refrakter beton üretiminde kullanılırlar [15]. Secar 71'in hidratasyon reaksiyonları Masaryk tarafından çok detaylı incelenmiştir [27].



Şekil 2.19 Alümina oranının mukavemete, maliyete ve maksimum kullanım sıcaklığına etkisi şematik genel eğilim olarak verilmiştir [27].

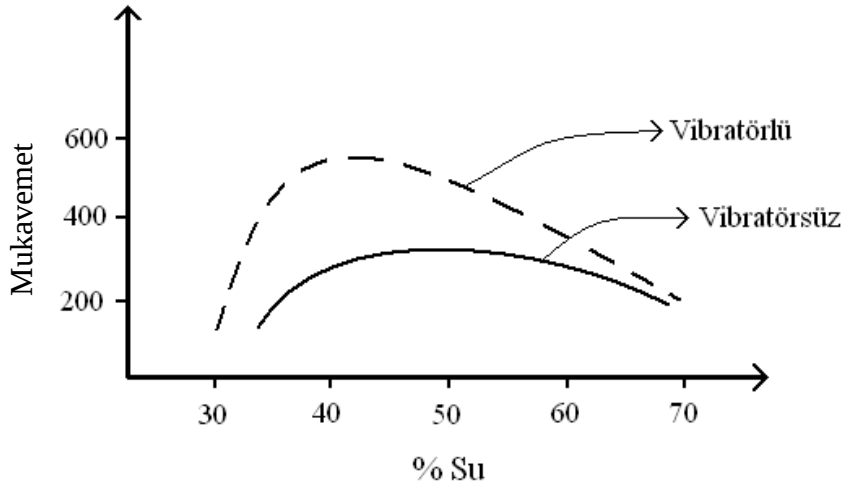
Secar 50, 70, 80'de belirtilen sayılar yaklaşık alümina oranını gösterir. Fondu La Farge yaklaşık %40 alümina içerir. Ancak Fe_2O_3 miktarı yüksek olduğundan Secar 40 şeklinde belirtilmez.

Yüksek alüminalı çimentoda, alümina oranı ultrasonik hızı düşürücü etki yapmaktadır. Bu etki ultrasonik hız tayini ile de tespit edilmektedir.

Hidratasyon reaksiyonları döküm sıcaklığına çok bağlıdır.

Alümina miktarı arttıkça mukavemet düşer, ergime sıcaklığı artar. Duvar malzemesi olarak kullanılır. Dökülebilir refrakter katılaşırken meydana gelen enerji diğerinin 50 – 100 katıdır. Sorunlar daha büyüktür. Enerji sorunu nedeniyle meydana gelen tahribat dolayısıyla refrakter beton yandı denir. Betondaki sulama gibi sistem burada geçerli değildir. Burada betonun üzerine katılaşma sırasında ıslak bez koyulur ve ısınma önlenmeye çalışılır.

Hidratasyon için gerekli sudan fazla miktarda su katılırsa pişme sırasında çıkan su buharlarının yerinde gözenekler kalır bu da mukavemeti düşürür.



Şekil 2.20 Su oranına bağlı olarak dökülebilir refrakterin şekillendirilmesi esnasında vibratörün mukavemet üzerindeki etkisi

Şekil 2.20’den vibratörlü şekillendirmenin mukavemete etkisinin çok fazla olduğu görülmektedir. Burada meydana gelebilecek işçilik hataları ultrasonik yöntemle saptanabilmektedir [22].

Al₂O₃ oranı arttıkça döküm kabiliyeti azalır, hidratasyon fazı, etkisi azalır kalıbı iyi dolduramaz, mukavemet azalır.

Kalıbı doldurma özelliğini iyileştirmek (akıcılığı arttırmak) için Silubit FB 10 (tikotropik agent) kullanılır. Bu akıcılığı artırır, genleşmeyi kolaylaştırır.

2.30 Formüller ve Bağlıntılar

2.30.1 Porozitenin Ultrasonik Hıza Etkisi

Seramik malzemelerde ultrasonik hız, elastiklik modülü, poisson oranı ve mekanik özellikler, seramik malzemedeki gözenek oranına bağlı olarak geniş bir aralıkta değişmektedir. Ultrasonik hız aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır;

$$V = \lambda \cdot f \quad (2.11)$$

V: Ultrasonik Hız (m/s)

λ : Dalga boyu (m)

f : Frekans (1/s)

Seramik malzemelerde özellikleri etkileyen en önemli parametrelerden birisi porozitedir. Porozite ile mukavemet, elastiklik modülü, ultrasonik hız arasında ilişkiler kurulmaktadır. Boyuna dalganın hızı gözeneksiz malzemelerde daha önce de belirttiğimiz gibi aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{d(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.12)$$

Boyuna dalganın hızı gözenekli malzemede aşağıdaki formülle hesaplanır ve porozite ile ilişkilendirilir.

$$V = \sqrt{\frac{E_p(1-\nu)}{d_p(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.13)$$

Seramiklerde ve refrakterlerde elastiklik modülünün poroziteye bağlı değişimi için pek çok formül verilmektedir. En fazla kullanılanlardan biri aşağıdaki formüldür.

$$E_p = E_0 \cdot e^{(-bp)} \quad (2.14)$$

$$d_p = d_0 \cdot (1 - p) \quad (2.15)$$

(2.14) ve (2.15), (2.13)'de gerekli yerlere konursa, gözenekli seramikte ultrasonik hız aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$V = \sqrt{\frac{E_0 \exp(-bp)(1-\nu)}{d_0(1-p)(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.16)$$

0 indisli semboller gözeneksiz malzeme özelliklerini göstermektedir.

p indisli semboller gözenekli malzeme özelliklerini göstermektedir.

E: Elastiklik Modülü

ν : Poisson Oranı

d: Yoğunluk

p: porozite, 0-1 arasında değişir.

b: malzemedeki malzemeye değişen bir sabit

Elastiklik modülü ve çekme dayanımı bileşimden etkilenmez. Seramik malzemelerde çekme dayanımı ile elastiklik modülü arasında doğrusal ilişki vardır.

2.30.2 Porozitenin poisson oranına etkisi

Poisson oranı teorik olarak poroziteden etkilenir. Uygulamada çok değişik nedenlerle etkilenmez. Özellikle camlarda poisson oranı bileşimden etkilenmez.

2.30.3 Çekme Dayanımının Porozite ile ilişkisi

$$\sigma_c = \sigma_0 (1 - P) / (1 + a \cdot P) \quad (2.17)$$

σ : Basma Dayanımı

p: Porozite

a: Sabit

Çekme dayanımının da porozite ile doğrusal değişmesi gerekir. Ama doğrusal değişmemektedir. Porlar gerilme birikmesine neden olmaktadır. Gerilme birikmesi ortalama değerden ciddi şekilde sapmaya neden olur. Basma dayanımını aynı oranda etkilemez. Elastiklik modülü ile çekme dayanımı birbirine yakın korelasyonla değişir. Basma dayanımı poroziteden çekme dayanımı kadar etkilenmez. ν poisson oranı, gözenekli seramik malzemelerde çok fazla değişmediği varsayılabilir.

Basma dayanımı ve eğme dayanımı ile porozite arasında değişik formüller önerilmektedir.

Termal şok kriterlerinde σ/E dikkate alınır. Bunu çökme miktarından giderek buluruz.

Gözenekli malzemelerde eğme deneyinde çökme miktarından giderek çekme/elastiklik modülü hesaplanabilmektedir. Burada ultrasonik hız ile de ilişki kurulabilmektedir. Buradan giderek termal şok dayanımı da hesaplanabilmektedir.

$$\Delta T = \frac{\sigma(1-\mu)}{E.\alpha} \quad (2.18)$$

(2.18) numaralı formülden σ çekilir ve aşağıdaki formül elde edilerek termal şok için kullanılır.

$$\sigma = E. \alpha \Delta T / (1 - \mu) \quad (2.19)$$

ΔT : Kırılmaya sebep olan sıcaklık farkı,

E: Elastiklik modülü

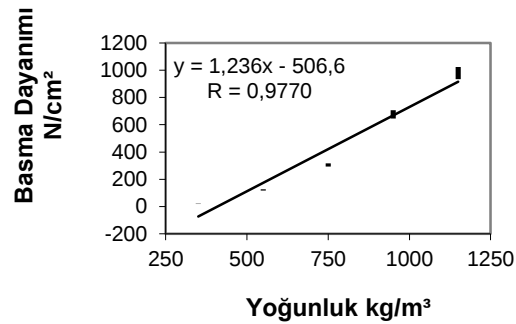
α : Termal genleşme katsayısı

μ : Poisson oranıdır.

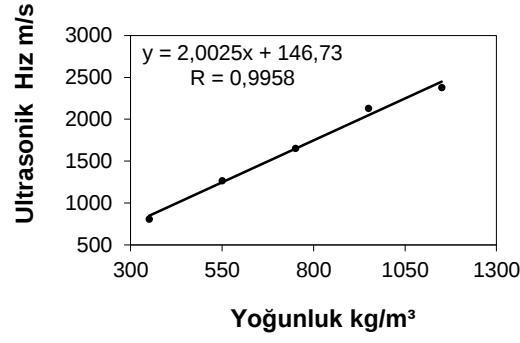
σ çekme dayanımını gösterir.

Bu formül termal şok kriterleri için temel ölçüt olarak alınmaktadır. Rejim hali ısı akışı için, izin verilen en büyük sıcaklık farkı olarak kabul edilir.

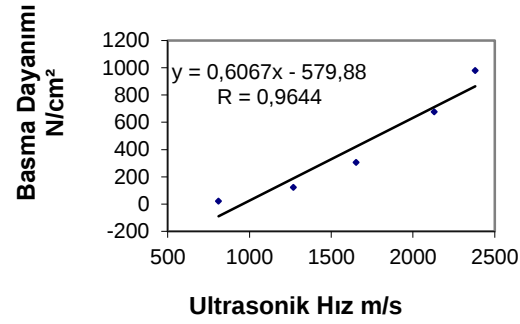
Aşağıdaki grafiklerde dökülebilir refrakterlerde porozite etkisi gösteren şekillendirme suyu ile mekanik özellikler ve ultrasonik hız arasındaki ilişkiler görünmektedir.



Şekil 2.21 Perlitli dökülebilir refrakterde basma dayanımının yoğunluğa bağlı değişimi (R: Regrasyon Katsayısı) [28]



Şekil 2.22 Perlitli dökülebilir refrakterde ultrasonik hızın yoğunluğa bağlı değişimi (R: Regrasyon Katsayısı) [28]



Şekil 2.23 Perlitli dökülebilir refrakterde ultrasonik hızın basma dayanımına bağlı değişimi (R: Regrasyon Katsayısı) [28]

2.31 Malzemedeki Ses Hızını ve Ultrasonik Hızı Etkileyen Parametreler

Seramik ve dökülebilir refrakter malzemelerde ultrasonik hızı etkileyen başlıca parametreler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Elastiklik modülü,
- Poisson oranı,
- Mekanik özellikler,
- Çatlaklar ve çatlak derinlikleri
- Gözenekler,
- Gözenekli agregalar,
- Agreganın türü ve oranı,

- Yüksek alüminalı çimento türü ve oranı,
- Dökülebilir refrakterlerde kalıp ile refrakter arasında boşluk kalması,
- Astarlarda dövmede laminasyon çatlakları,
- Şekillendirme sırasındaki su oranı,
- Pişirme sıcaklığı
- Segregasyon

Yüksek alüminalı çimento olarak; Fondu, Secar 50, Secar 70, Secar 80 ve agrega olarak; spinel, grog, boksit, alümina, perlit ve diatomit kullanılır.

Ses ve ultrasonik ses ile muayene yöntemi kullanılarak dökülebilir refrakterlerin pişirme öncesi kullanıma uygun olmayanlarını ve hatalı olanlarını ortaya koyma ve üretim sırasında ve sonrasında kalitesini kontrol etmek amacıyla kullanılır.

Ultrasonik hız, hidrasyon reaksiyona bağlı olarak zamanla değişir ve belirli bir süre sonra sabit hıza ulaşır. Kalite kontrol deneyleri genellikle bu aşamada yapılır. Refrakter betonun mukavemeti ve ultrasonik hızı üretimde kullanılan çimento, agrega ve şekillendirme suyunun oranına bağlıdır. Agrega, çimento ve şekillendirme suyunun ultrasonik hızları birbirlerinden farklıdır ve bu değişikliklerden yararlanılarak kalite kontrol amaçlı kullanılır. Perlitli dökülebilir refrakterlerde gözeneklilik oranı %90'nın üzerindedir. Perlitli dökülebilir refrakterlerde perlit oranına ve dolayısıyla gözenek oranına bağlı olarak hem mukavemet hem de ultrasonik hız değişir.

Dökülebilir refrakterlerde ve seramiklerde hammadde ve katkı oranları, şekillendirme, kurutma ve pişirme gibi üretim koşulları değişmezse ultrasonik hız hep aynı kalır. Bu faktörlerden bir veya birkaçının değişmesi, gözenek oranını, sinterleme oranını, kristal ve amorf faz oranları değiştirirse hem mukavemet hem de ultrasonik hız değişir. Devam etmekte olan bir üretimde, ultrasonik hız ölçme hem kolay hem de maliyeti düşük bir olaydır. Ultrasonik hızda bir değişme saptandığı zaman, yukarıdaki koşullardan bir veya birkaçının değiştiği saptanır ve sebebi araştırılır. Yukarıdaki hammadde ve üretim koşullarından hangisinin ne kadar etkili olduğunu anlamak amacıyla da kullanılabilir.

Dökülebilir refrakterlerde, pişirme öncesi hata saptanması daha sonra yapılacak pahalı işlemleri ortadan kaldıracığı için büyük enerji ve emek tasarrufu sağlar. Kullanılmakta olan fırınlarda fırın kesit daralması veya genişlemesi, duvar çatlakları ve derinlikleri saptanabilir. Buna göre sıcak tamir gerçekleştirilebilir. Sıcak tamir, fırın durmadan gerçekleştirildiği için, fırının çalışmadan durma süresini kısalttığı için çok büyük zaman ve enerji tasarrufu sağlar.

2.31.1 Porozite, Çatlak ve Boşluk Etkisi

Çatlak veya çentik, bulunduğu bölgede gerilme birikmesine neden olur. Çatlak ucundaki radius küçüldükçe gerilme artar. Malzemenin çekme dayanımını düşürücü etki yapar.

Lamel grafitli dökme demirlerde lameller gerilme birikmesine neden olur ve bu mukavemet üzerinde düşürücü etki yapar. Küresel grafitli dökme demirlerde ise grafit küresel yapıda olduğundan gerilme birikmesi azdır. Bu sebepten dolayı küresel grafitli dökme demirin mukavemeti lamel grafitli dökme demirin mukavemetinden daha yüksektir. Çekme ve elastiklik modülü paralel değişir. Bunlar poroziteye bağlı olarak üstel veya parabolik değişebilir.

Porlar gerilme birikmesine neden olmaktadır. Gerilme birikmesi ortalama değerden ciddi şekilde sapmaya neden olur. Basma dayanımını aynı oranda etkilemez. Elastiklik modülü ile çekme dayanımı birbirine yakın korelasyonla değişir. Basma dayanımı poroziteden çekme dayanımı kadar etkilenmez.

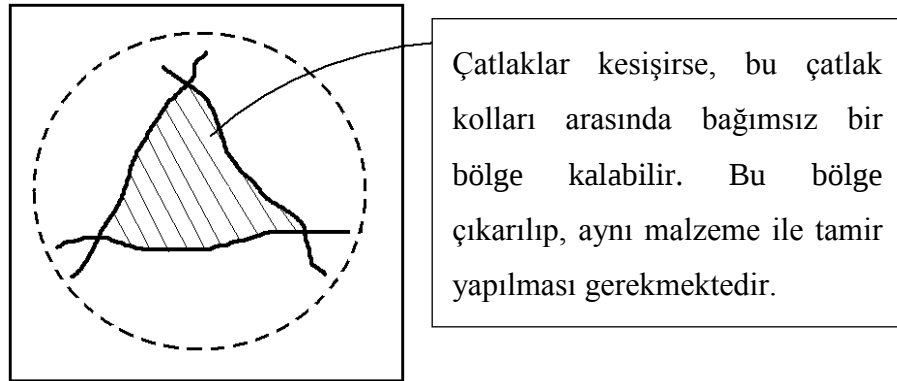
Mukavemet poroziteye bağlı değişmektedir. Bu iki özellik arasında Lawlar [21] ve Russell [2] doğrusal ilişki, Aly ve Semler [3] logaritmik ilişki kurmuştur. Katı malzeme içinde hareket etmekte olan dalga, o malzemenin yoğunluğundan ve elastik özelliklerinden etkilenir. Bir malzemenin kalitesi bazen bu plastik özelliklere bağlı olarak, dolayısı ile ultrasonik hıza bağlı olarak değişir. Bu nedenle seramiklerde ultrasonik hız, kalite kontrol amacı ile kullanılmaktadır. Tahribatlı deneylerde numuneler kullanılmaz hale gelirler, ilave olarak laboratuvar masrafları da gelmektedir. Tahribatsız ultrasonik muayenede parçalar kırılmadığı gibi fazla zaman almadığından laboratuvar masrafları da en aza inmektedir. Son yıllarda endüstriyel refrakterlerin

ultrasonik yöntemlerle muayenesi, ürün özelliklerini, kalitesini ve üniformluğunu ortaya koymak için genel bir olay haline gelmiştir [3]. Kullanım kolaylığı, cihazın portatif oluşu, kullanım alanını daha da yaygınlaştırmaktadır.

2.32 Dökülebilir Refrakterlerde Çatlak Sorunu ve Çözümü

Endüstride kullanılmakta olan fırınlar sinterleme ve kurutma işlemine müteakip kullanım öncesinde kontrol edilirler. 3 mm veya daha büyük çatlak olup olmadığı gözle kontrol edilir. Genişliği ve çatlakların kesişip kesişmediği kontrol edilir. Çatlaklar kesişirlerse bağımsız bloklar oluşur ve yerlerinden çıkarlar.

Bundan sonra ayırma veya genişleme bağlantıları ve ayırma cıvataları kontrol edilir. Kılcal çatlaklar göz ardı edilir. Çekiç testi ile ses kontrolü yapılır. Çekicin çıkardığı ses uygun olmalıdır. Bütün muayeneleri uzman kişiler yapmalıdır. Ses kontrolü ile hatalı bulunan bölge 150x150 mm'den büyükse tamir edilmelidir. Daha önemli uygulamalarda x-ışınları uygulanabilir. Son yıllarda tahribatsız yöntemler uygulanmaktadır.



Şekil 2.24 Üçlü çatlak oluşumu [22]

2.33 Sıcak Tamir

Tünel ve döner fırınların oda sıcaklığına kadar soğuması, depolanmış ısı enerjisinin çevreye yayılarak kaybolmasına neden olduğu gibi üretim de durmaktadır. 300 °C'a kadar sıcaklıklarda döküm yolu ile tamir yapılabilir. Bu sayede fırınların tamir bölgesinin 300 °C'a kadar soğutulması yeterlidir. Bu yöntem üretim, ısı ve işgücü kaybını azaltmaktadır [29]. Normal şartlarda tamir yapılırken fırını yeniden yapmaya

göre malzeme ve işgücü kaybı azalır. Tamir harcının bileşimi, dökümde kullanılan harcın bileşimine yakındır, aralarında çok az fark vardır. Döküm tekniğinde harcanan harç miktarı, aynı amaçla kullanılan dövme refrakterden azdır [29]. Refrakter duvar veya astarlarının tamirinin oda sıcaklığında yapılma mecburiyeti yoktur. Oda sıcaklığının üzerindeki belirli bir sıcaklıkta tamir gerçekleştirilebilir. 1600 °C’de çalışan bir fırının 500 °C’de çalışan bir bölgesinde tamir yapmak gerekebilir. Bu durumda fırının oda sıcaklığına kadar soğutulması gerekmez. Sıcaklığı 500 °C olan bölgenin sıcaklığını tamir edilebilecek bir sıcaklığa kadar soğutmak, örneğin 200 °C’ye soğutmak fırın tamiri için yeterlidir. Bu amaçla yapılacak soğutmada 1600 °C’lik çalışma sıcaklığı 1300 °C’ye inecektir. Bu şekilde soğutma hem kısa sürede meydana gelir hem de tamirden sonra tekrar ısıtılması da kısa zaman alır. Böylece fırının tamamen durması ve fabrikanın durması önlenmiş olur.

Bazı uygulamalar için fırını durdurup tamir etmek zorunluluktur ve uzun zaman alabilir. Plastik veya dökülebilir refrakter kullanılabilir. Plastik refrakterler, şekilsiz döverek uygulanabilir. Dökülebilir refrakterler tamir amacıyla, boşaltarak, püskürterek, pompalayarak, ekstrüzyon ile veya malalayarak uygulanabilir. Tamir pratik ve ekonomiktir [30]. Monolitik refrakterlerin hasar mekanizmaları çoktur ve çeşitlidir. Termal şok, aşırı ısınma, aşınma, erozyon, korozyon, desteklerin hasara uğraması, malzemenin hasara uğraması, zayıf veya yetersiz yerleştirme ve iç gerilmeler hasar sebepleri arasında sayılabilir.

Tamir harcının tamir edilecek bölge malzemesi ile aynı veya yakın bileşimde olması çok önemlidir. Genleşme katsayıları, gövde ve tamir malzemenin uyumu açısından önem arz etmektedir. Plastik harcı yıllardır ateş tuğlası ve dökülebilir refrakterleri tamir için kullanmaktadır. Belirli koşullar altında dökülebilir refrakterler, plastik refrakterleri iyi sonuçlarla tamir etmekte kullanılmaktadır [30]. Başarılı bir tamirat için, yüzey hazırlama işlemleri en önemli özelliklerden biridir. Aynı zamanda en fazla gözden kaçan bir olaydır. Mekanik bağ maksimuma çıkarılmalıdır, zira tamir ara yüzeyinde kimyasal bağ çok zayıf veya yok olabilir. Bu nedenle, ne kadar gevşek dökülmüş, lamine olmuş ve hasar görmüş malzeme varsa pnömatik tabanca veya benzeri bir ekipman ile

uzaklaştırılmalıdır. Yeni tamir edilecek yüzey kesiklerle kaba dalgalı hale getirilmelidir [30].

Periyodik fırınlar yani kesikli çalışan fırınlar devamlı ısınır ve soğur. Soğudukları zaman tamir yapılabilir. Tünel, döner, yüksek fırın, ark ocakları, indüksiyon ocakları uzun süre çalışırlar. Tamir amacıyla soğutulmaları 15-20 gün, tamirden sonra tekrar ısıtılmaları da bir o kadar zaman alabilir. Fırın durduğu zaman, fabrikada imalat da durur. Bu nedenle tamir çok masraflı bir iştir.

Günümüzde alaşımsız veya paslanmaz çelik fiberler, monolitik astara katılmaya başladı, özellikle petrol endüstrisinde çok tercih edilmektedir. Fiberler astarın eğme mukavemetini arttırır, termal şok ve dökülme direncini artırır. Fiberler dökülebilir refraktere karıştırıcıda ilave edilir. Belirli bir fiberi refrakterde kullanılmadan önce uygulama ile uyumunun kontrol etmek gerekir [30].

Monolitik refrakterler kurutulurken astarda çatlama meydana gelebilir. Bunlarla ilgili kriterler literatürde verilmiştir. Monolitik astarlarda, hızlı ısınma nedeniyle sıcak yüzeyde 90°'lik, dış yüzeyde 45° açılı, hızlı soğumalarda ise tam tersine çatlaklar meydana gelir [22]. Bu malzemelerin basma dayanımı çekme dayanımlarından oldukça büyük olduğu ve ısıtma hızı da çok fazla artırılmadığı için, hızlı ısıtmada çatlama tehlikesi fazla değildir.

Tuğla ile örülmüş bütün fırınlar derz aralarından hasara uğrar. Çalışmanın aksatılmaması için önemli olan sıcak tamiri yapabilmektir. Bunları dökülebilir refrakterler den yaptığımız harçla tamir ederiz.

Astar mukavemeti, kimyasal bileşime göre ve pişirme sıcaklığına bağlı değişme gösterir. Hatta agrega tane boyutuna bile bağlıdır [31]. Makro çatlaksız çimentolarda bağlayıcı oranı %10'u geçtiği zaman mukavemet hızla düşmektedir. Bu nedenle kimyasal bağlayıcının oranı doğru seçilmiş olmalıdır [32], [33]. Dökülebilir refrakterlerin termal şok dayanımlarının, ultrasonik yolla tahribatsız yöntemle tahmin edilmesi konusunda çok kapsamlı bir araştırma yapmıştır. Termal şoka bağlı olarak, ultrasonik hızın, elastiklik modülünün ve basma dayanımının nasıl değiştiğini incelemiş ve aralarında ilişki kurmuştur. Bu sayede, şekillendirilmiş ve kurutulmuş astarların, adı geçen

özellikleri, termal şok dayanımları, astar üslerinde denenmiş olacaktır. Kusur olması halinde, fırın devreye alınmadan tamir yapılabilir.

2.33 Yüksek Alüminalı Çimentolarda Zamana ve Agregası Oranına Bağlı Olarak Kullanılan Suyun Ultrasonik Hız Üzerindeki Etkisi

Deneyisel çalışmalarda dökülebilir refrakter üretiminde agrega ve yüksek alüminalı çimentolar kullanılmaktadır. Aynen betonda olduğu gibi agrega ve yüksek alüminalı çimento belirli oranlarda karıştırılmıştır. Deneyisel çalışmalarda 4 tane yüksek alüminalı çimento (Fondu, Secar 50-51, Secar 70-71 ve Secar 80) % 20 ve agrega (flint clay ve boksit) % 80 oranında karıştırılmıştır. Secar'larda rakamlar alümina oranını göstermektedir. Deneyisel çalışmalarda agrega, flint clay ve boksit kullanılmıştır. Uygun kıvam, ASTM 860 (reapproved 1991)'e göre tayin edilmiştir [19]. Numunelerin şekillendirilmesinde boyutları 20x20x80 mm olan bir piring kalıp kullanılmıştır ve daha sonra uygun kıvam elde edilinceye kadar su ilave edilmiştir. Şekillendirme sırasında numune üzerine basınç uygulanmamıştır. Hem yüksek alüminalı çimentoların hem agregaların kimyasal analizleri çizelge 2.6'da verilmiştir.

Dökülebilir refrakterlerde normalde gerekenin 2 katı kadar su katılır. Suyun yarısı hidratasyonda kullanılırken diğer yarısı agrega gözeneklerinde ve aralarındaki boşlukta absorbe olur. Kurutma sırasında serbest su uzaklaşır. Kimyasal bağlı su 300 °C üzerinde yapıdan uzaklaşır. Sonuç olarak katılan su, uzaklaştığı zaman yeri boş kalır. Su oranının, gerekenden fazla katılması, malzemede gözenek oranını artıracığından mukavemet gibi özellikleri olumsuz etkiler. Gerekenden fazla su katılırsa, fazla suyun boş bıraktığı gözenekler hem ultrasonik hızı düşürür hem de ultrasonik hızı düşürür. Bu nedenle ultrasonik hızın düşüşünden basma dayanımındaki düşüş, yaklaşık olarak tayin edilebilir.

Katılan su oranının düşük olması halinde, uygun oranda su kullanıldığı zaman meydana gelen hidratasyon reaksiyonları tam olarak gerçekleşemez. Bu da su oranının azlığı ile orantılı olarak, ultrasonik hızın düşmesine ve basma dayanımındaki düşmesine neden olur. Bu nedenle ultrasonik hızın düşüşünden basma dayanımındaki düşüş, yaklaşık

olarak tayin edilebilir. Fakat ultrasonik hızın düşüşünden suyun yetersiz mi yoksa fazlamı olduğu saptanamaz.

Çizelge 2.7 Yüksek alüminalı çimentoya ve %50 alümina ilaveli çimentoya katılan su oranı [13]

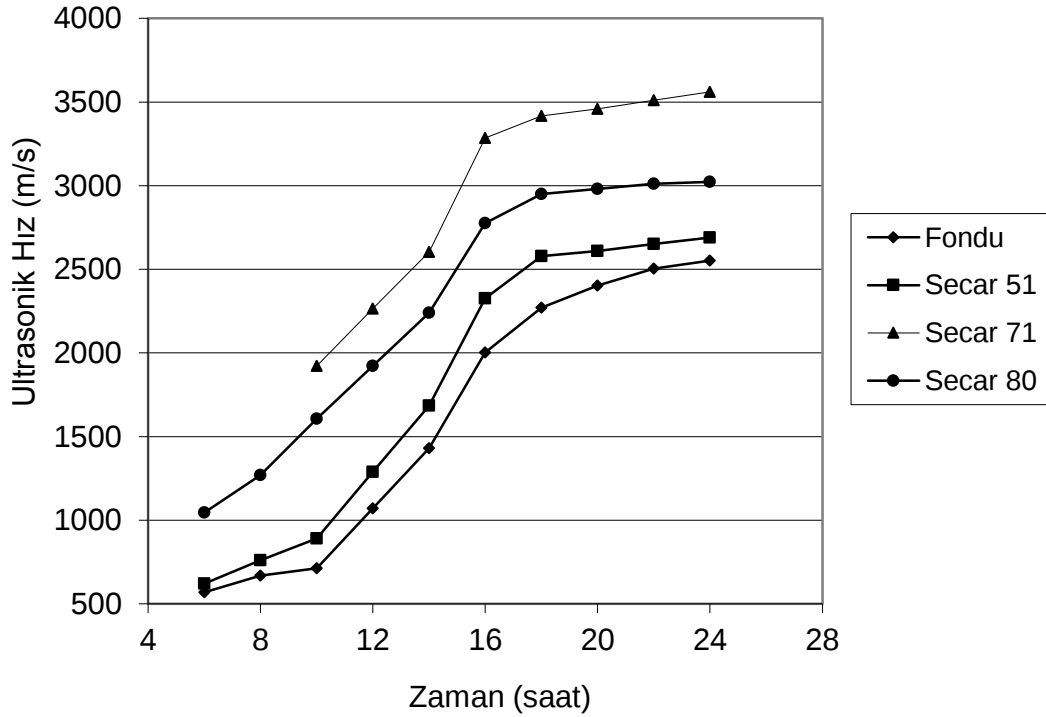
YAÇ	Fondu	Secar 51	Secar 71	Secar 80
% Su	24.94	29.81	27.33	28.33
%50 Al ₂ O ₃ ilaveli	30.30	40.16	38.33	38.65

Hidratasyon reaksiyonları ortam sıcaklığından ciddi şekilde etkilenir. Oluşan mineralojik fazlar sıcaklığa bağlı değişiklik gösterir, bu fazlarda fiziksel ve mekanik özellikleri ciddi şekilde etkiler. Yüksek alüminalı çimentolarda, 2 saat sonra ultrasonik hız ölçümü gerçekleştirilebilmiştir. Fakat fondu ve Secar 51’de ilk ölçüm dökümden 6 saat sonra, Secar 51’de 10 saat sonra ve Secar 80’de 4 saat sonra yapılabilmiştir. %50 alümina katılan numunelerde yaklaşık 2’şer saat sonra ölçümler yapılabilmiştir. Ancak her iki tip numunede ilk ölçümlerde hız çok düşük bulunmaktadır. Ultrasonik hız zamana bağlı olarak kademeli artış göstermektedir. Bu kademenin söz konusu olduğu 10-16 saatler arası kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Çizelge 2.7 Uygun oranda su ile karıştırılmış ve dökülmüş yüksek alüminalı çimentolarda ultrasonik hızın zamana bağlı değişimi [13]

Zaman (saat)	Fondu (μs)	Secar51 (μs)	Secar71 (μs)	Secar80 (μs)
6	569	620	-	1046
8	669	760	-	1269
10	712	891	1606	1923
16	2158	2482	3285	2872
18	2370	2579	3417	2949
20	2370	2610	3459	2981
22	2503	2651	3510	3012
24	2551	2690	3561	3022

Dökülebilir refrakterlerin üretiminde genellikle Fondü, Secar 51, Secar 71 ve Secar 80 kullanılır. Bu refrakter çimentolar su ile karıştırıldığı zaman hidratasyon reaksiyonları meydana gelir ve bu malzemelerdeki ultrasonik hız zamana bağlı olarak logaritmik artar. Çizelge 1'den görülebileceği gibi katılaşma işleminden sonraki 10 saat içinde ultrasonik hız çok düşüktür, 10-16 arasında çok hızlı artış görülür ve 22 saatten sonra hızdaki artış çok azalmıştır. Hızdaki değişme 24 saatten sonra çok da az olsa devam etmektedir.



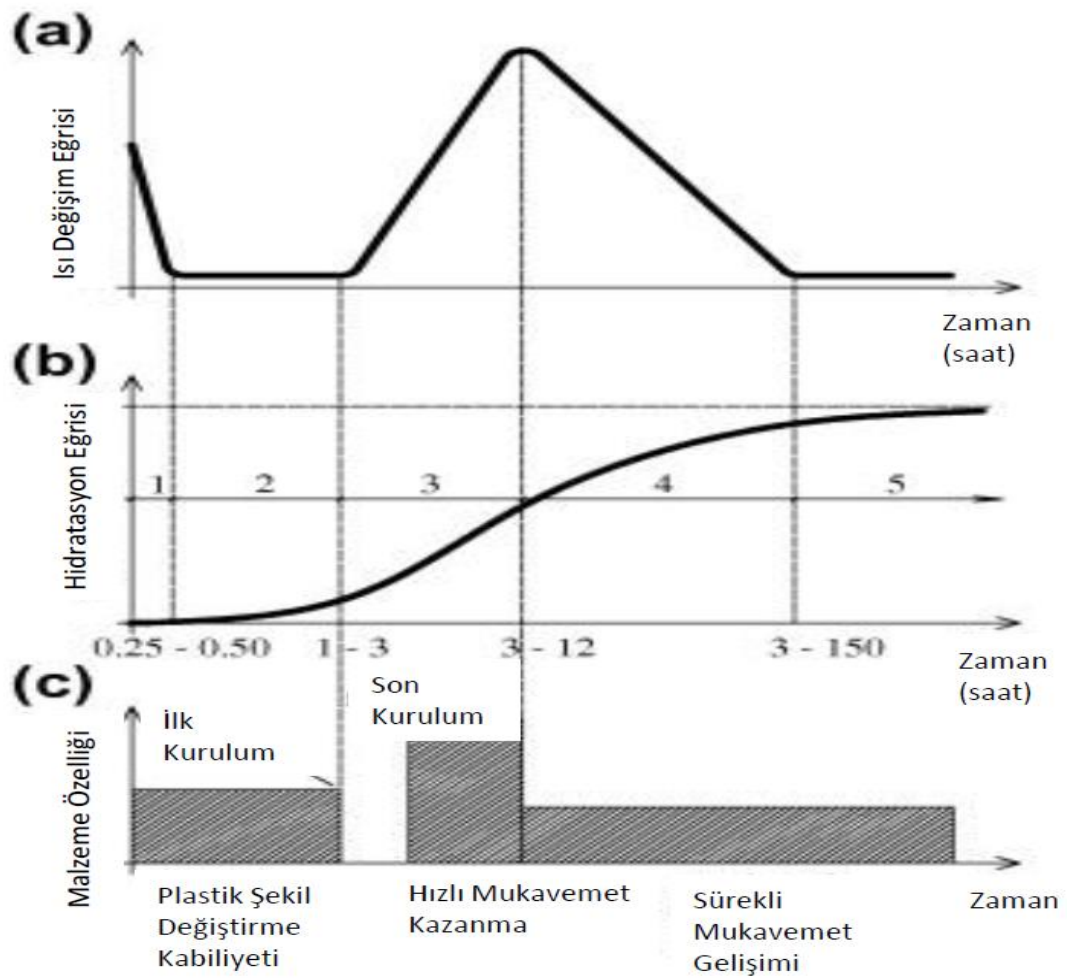
Şekil 2.25 4 farklı alümina içeriğine sahip refrakterin zamana bağlı olarak ultrasonik hızdaki değişimi [28]

Ticari dökülebilir refrakterler, döküm işleminde kaç saat sonra sökülüyorsa, laboratuvar koşullarında dökülebilir refrakterlerin ultrasonik hızı tayin edilir. Daha sonra her ticari refrakterlerde, döküm işleminden o kadar süre sonra ultrasonik hız ölçümü yapılır. Ölçülen ultrasonik hız değeri, daha önce laboratuvar koşullarında ölçülen hız değerinden farklı ise, üretim parametreleri kontrol edilmelidir. Hız değişimine neden olan faktör saptanmalıdır. Döküm sıcaklığı çok önemli parametreleridir. Öncelikle bunun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Hatanın bu aşamada belirlenmesi hem zaman hem de para tasarrufu sağlar.

2.34 Dökülebilir Refrakterlerde Hidratasyon Boyunca Görülen Süreçler

Trtnik ve Gams yaptığı bu deneylerle, monolitik refrakterin kalıba dökümünden sonra başlamak üzere 150 saat süren bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda refrakterin plastik şekil değiştirdiği, hızlı mukavemet kazandığı ve sürekli mukavemet gelişimi gösterdiği bölgeleri incelemiştir. Bu çalışma bir önceki çalışmada kaydedilen değerleri destekler biçimdedir [34].

Monolitik refrakter döküldükten sonra düşey eksen hidratasyon eğrisini göstermekle birlikte zamana bağlı olarak parabolik değişim gösterir.



Şekil 2.26 Hidratasyon prosesi boyunca görülen süreçler (a) Isı değişim eğrisi, (b) Hidratasyon eğrisi, (c) Malzeme Özelliği [34]

Ultrasonik hız ile reaksiyonların normal gerçekleşip, gerçekleşmediği kontrol edilebilmektedir. Eğer aşağıda belirtilen 3 parametreden biri dikkate alınmaz ise, elde edilecek grafikler değişeceği için ultrasonik yöntemle bu tür işçilik hataları saptanabilir.

- Temizlik iyi olmadığı için heterojen çekirdeklenme olur ise,
- Kullanılan çimento faz oranları yanlış seçilirse,
- Agregası ve yüksek alüminalı çimentoların oranı değişirse,

Beton katılaşırken enerji açığa çıkar, genişler ve kalıbı zorlar. Bazen basma gerilmelerin etkisinde betonda çatlak meydana gelir. Refrakter betonda ve yüksek alüminalı çimentoda katılaşma sırasında meydana gelen enerji, betonda meydana gelen enerjiden çok daha fazladır. Kalıbı veya dökülen malzemenin kendisini çatlatma riski daha fazladır. Bu durum basma çatlaklarını meydana getirir ve bu ultrasonik hız ile saptanabilir.

Teori kısmında anlatılan bilgilere ek olarak beton ve refrakter konusunda C.N.S Electronics firma kataloğu da incelenmiştir. [35]

Ultrasonik muayene ile ilgili olarak ise M.C. Bhardway isimli yazarın yayını incelenmiştir. [36]

2.34 Standartlar

2.34.1 ASTM

C64-72 Standard Specification for Refractories for Incinerators and Boilers

C673-71 Standard Classification of Fireclay and High-Alumina Plastic Refractories and Ramming Mixes

C401-77 Standard Classification of Castable Refractories

C92-76 Standard Test Methods for Sieve Analysis and Water Content of Refractory Materials

C179-72 Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkage of Fireclay Plastic Refractories

CI80- 72 Standard Method of Panel Spalling Testing Fireclay Plastic Refractories

C181-76 Standard Test Method for Workability Index of Fireclay and High-Alumina Plastic Refractories

C491- 72 Standard Test Method for Modulus of Rupture of Air-Setting Plastic Refractories

C201-68 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories

C417-72 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Unfired Monolithic Refractories

C704-76 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Refractory Materials at Room Temperature

C860- 77 Standard Recommended Practices for Determining Consistency of Refractory Concretes

C862-77 Standard Recommended Practice for Preparing Refractory Concrete Specimens by Casting

C865- 77 Standard Recommended Practice for Firing Refractory Concrete Specimens

C874-77 Standard Recommended Practice for Rotary Slag Testing of Refractory Materials

C903-79 Standard Practice for Preparing Refractory Concrete Specimens by Cold Gunning

2.34.2 DIN

DIN 51030 Measurement of Modulus of Rupture after Drying

DIN 51046 Measurement of Thermal Conductivity up to 1600 oC by Hot Wire Method (Thermal conductivity up to 2 W. K.-1m-1)

DIN 51048 Measurement of Modulus of Rupture of Refractories at Elevated Temperatures (Part 1)

DIN 51053 Measurement of Refractoriness Under Load (Differential with rising temperature) (Part 1)

DIN 51053 Measurement of Creep in Compression (with constant temperature and load) (Part 2)

DIN 51064 Measurement of Refractoriness Under Load of Firebricks (Part 1)

DIN 51067 Measurement of Cold Crushing Strength of Refractories with Total Porosity up to % 45 (Part 1)

DIN 51067 Measurement of Cold Crushing Strength of Refractories with Total Porosity more than 45% (Part 2)

DIN 51068 Measurement of Resistance to Thermal Shock (Water quenching method for firebricks)

DIN 1069 Testing Method for Corrosion Resistance to Solid and Fluid Stuffs at High Temperature

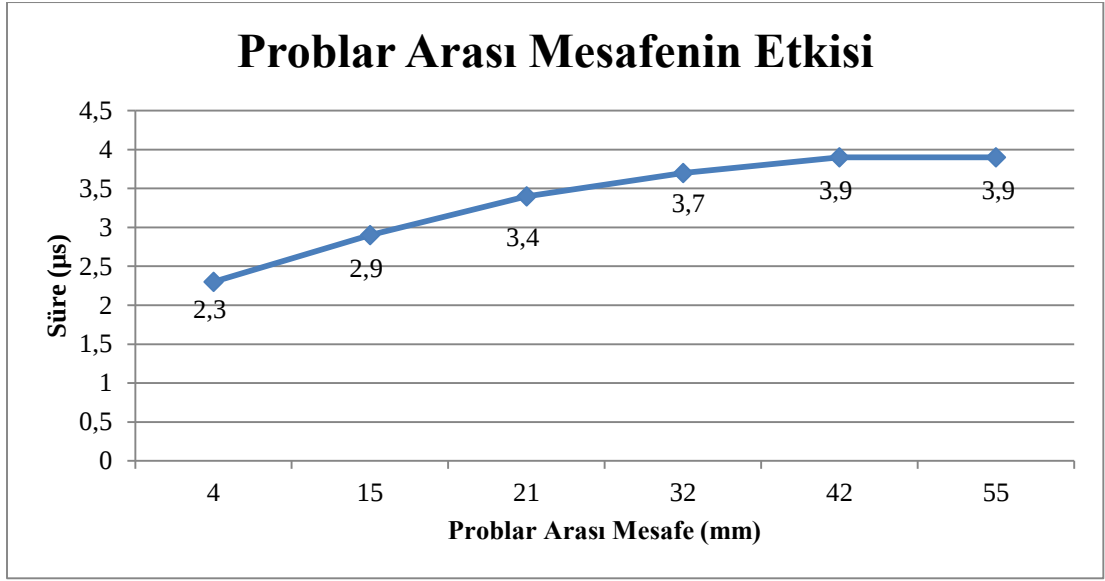
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deney Sırasında Meydana Gelebilecek Hatalar

Deney sırasında operatör, makine ekipmanı, numune hazırlama gibi işlemlerden dolayı elde edilen sonuçlarda değişiklikler olabilmektedir. En optimum koşulları bulmak için deney öncesinde deneyi etkileyecek parametrelerin belirlenmesinde fayda vardır.

3.1.1 Problar Arası Mesafenin Etkisi

Aşağıda verilen grafikte 40 mm çaplı prob kullanılarak yapılan deneyler gösterilmiştir. Problar arasındaki mesafenin çatlaksız bir refrakter yüzeyinde mesafeye bağlı olarak ultrasonik hıza etkisi gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere problar arası mesafenin artması ilk önce ultrasonik hızı bir miktar etkilemekte ancak belli bir mesafeden sonra etkisini yitirmektedir [63].



Şekil 3.1 Problar arası mesafenin ultrasonik hızı etkisi [63]

3.1.2 Prob Bastırma Kuvvetinin Etkisi

Prob eksenini doğrultusunda en az 0,3 Mpa yük uygulanmalıdır. Uygulanan basınç çok artırılırsa veya çok azaltılırsa en fazla 1 – 2 mikro saniyelik bir düşüş olmaktadır. Uygun miktarda kuplaj kullanılarak 150 KHz problarla yapılan deneyler göstermiştir ki, proba uygulanan basıncın çok az uygulanması ve çok fazla artırılması sonucu cihazla ölçülen değer 3,8 µs'den 2,6 µs'ye düşmüştür.

3.1.3 Kuplaj Malzemesinin Etkisi

150 KHz problarla, ticari ismi ile Morcast 145 olarak bilinen dökülebilir refrakterde normal döküm ile elde ettiğimiz yüzeyde kuplaj malzemesi kullanılmadığında 6 µs kayıp meydana gelebilmektedir. Yüksek alüminalı çimentolarda türüne göre, yani yüzey pürüzlüğüne bağlı olarak kayıp süre artabilir veya azalabilir. Ancak normal döküm işleminden sonra bu değer birbirine yakındır. Kuplaj malzemesi arttıkça zaman kayıp azalmaktadır ve belirli bir doyum noktasından sonra kayıp sıfıra kadar düşmektedir. Kuplaj miktarı ile uygulanan prob basıncının etkisi birlikte değerlendirilmelidir. Uygun kuplaj malzemesinde normal prob basıncı yeterlidir.

Deneyi yapan teknisyenler kendi ellerini yormayacak belirli bir minimum basınçta deneyi icra etmektedirler. Tekrarlanabilir (reproducible) değerler elde etmektedirler.

Bu koşullarda ölçüm yapılabildiğinde uygulanan basınç ve kuplajdan sorun gelmemektedir. Aynı numuneler kullanılarak yapılan iki farklı uygulamada iki farklı teknisyenin sonuçları az da olsa farklılık gösterebilir. Bu fark bastırma kuvvetinden veya uygulanan kuplaj miktarından kaynaklanmaktadır.

3.2 Refrakter Beton ile İlgili Meydana Gelebilecek Kusurlar

3.2.1 Agrega Oranının Ultrasonik Hıza Etkisi

Deneylerde kullanılan agreganın bileşimi çizelge 3.1’de verilmiştir. Normal üretimde %85 oranında agrega kullanılmaktadır. İmalat sırasında segregasyon nedeniyle bazı bölgelerde agrega oranı artar, onun dışındaki bölgelerde agrega oranı düşer. Yani heterojen bir bölge oluşur. Bir grup numunede normal üretimdeki %85 agrega oranı kullanılmıştır. Bir grupta %3 agrega arttırılıp, %88 agrega kullanılmıştır. Diğer grupta ise %3 azaltılarak %82 agrega kullanılmış ve segregasyon etkisi incelenmiştir. Çimento oranının artması hem hidratasyon suyu hem de şekillendirme suyu oranının ihtiyacını arttırmaktadır. Katılaşmış refrakter betonda bu su oranı ultrasonik hızı çok önemli oranda değiştirmektedir. Bu sayede segregasyon olayları saptanabilmektedir. Pişmiş numunelerde ultrasonik hız ile muayene, suyun uzaklaşmasından sonra işimize daha çok yarayacak bilgiler de verebilmektedir. Ancak bu konuda inceleme yapılmamıştır.

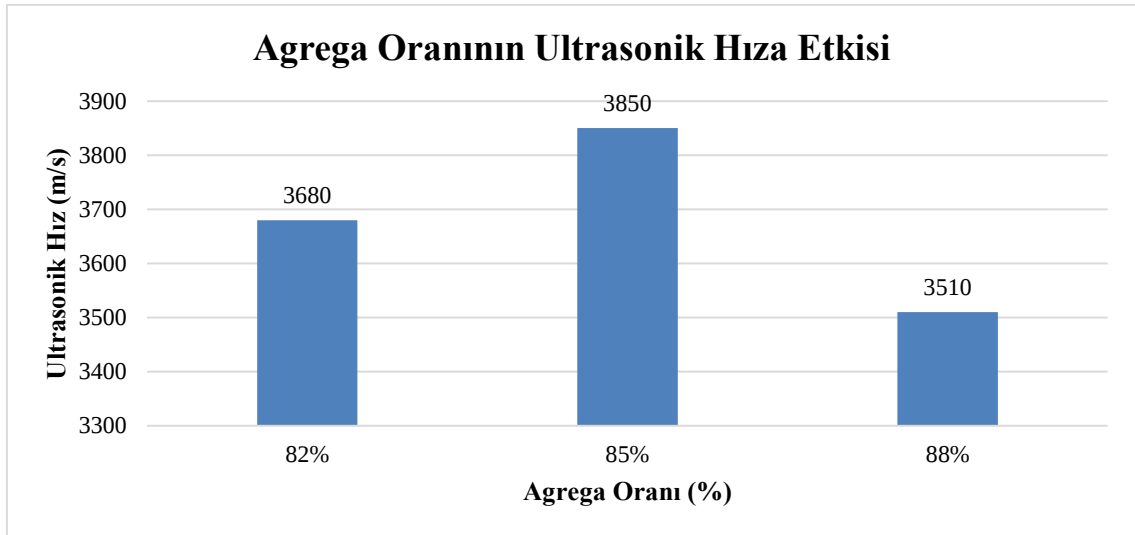
Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan agreganın kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)							Fiziksel Özellikler	
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	NaO+K ₂ O	CaO	MgO	Yoğunluk (gr/cm ³)	Tane İriliği (mm)
83	7	1,5	2,5	0,7	4,5	0,5	2,70	0-6,3

Her bir refrakter blok ölçüleri 150x150x50 mm ölçülerinde olup, üretimleri aynı kalıp içerisinde yapılmış ve ortam koşulları aynı tutulmuştur.

Dökülebilir refrakterlerde uygun su oranı ASTM C-860 (reapproved 1991)'e göre yapılmaktadır [19]. Katılan suyun bir kısmı yüksek alüminalı çimentonun hidratasyon reaksiyonlarına harcanır. Geri kalan kısmı tanelerin yüzeyine absorbe olarak, şekillendirme kabiliyeti sağlar. Kurutma sırasında bu absorpsiyon suyu buharlaşır. Pişirme sırasında yaklaşık 300 °C'nin üzerinde hidrat suyu bünyeden uzaklaşır ve ince taneli yüksek alüminalı çimento ile agregalar arasında sinterlenme olur. Dökülebilir refrakterlerin kalite kontrolünde bu 3 aşamadan da yararlanılabilir. Yani kurutulmamış, kurutulmuş, pişirilmiş numunelerin ultrasonik hız tayininden mukavemet, kalite kontrol, çatlak tayinleri yapılabilir.

Dökülebilir refrakterlerin hazırlanması, kalıba dökülmesi, uygulanması, soğutulması gibi işlemleri betona çok benzerdir. Dökülebilir refrakterlerin şekillendirilmesi sırasında uygulanan işlem bazen agregaların, bazen de kaba ve ince taneli agregaların bazı bölgelerde artmasına bazı bölgelerde düşmesine neden olur. Yani segregasyon meydana gelir. Burada yapılan deney, segregasyon olma durumunda bu ultrasonik hızın ve mekanik özelliklerin nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu şekilde heterojenleşmenin mukavemeti ne kadar etkilediğini ortaya koymak için agrega çimento oranı değiştirilmiştir. Uygulamaya benzer olması açısından, su oranı %85 agrega içeren refrakter baz alınarak belirlenmiş ve 3 refraktere de aynı oranda su ilavesi yapılmıştır.



Şekil 3.2 Agreg a oranındaki değ iş imin ultrasonik h ıza etkisi

Yapılan tekrarlı ölçümler neticesinde alınan sonuçların ortalaması alınıp, $V=l/t$ formülü kullanılmış ve tabloda belirtilen ultrasonik hız değerleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara istinaden aşağıdaki 3 yorum yapılabilmektedir.

- Uygun oranda su eklenmiş %85 agregalı refrakterde ultrasonik hız en yüksek bulunmuştur.
- Agregası oranı %82 olan karışımda yüksek alüminalı çimento oranı %18'e çıkmıştır. Çimento oranı ile orantılı olarak su ihtiyacı artmıştır. Ancak %85 agregası için öngörülen su oranında kalındığı için hidrasyon reaksiyonlarında azalma olmuştur. Dolayısıyla ultrasonik hız düşmüştür.
- %88 agregalı olan karışımda ise çimento oranı azalmıştır. Buna bağlı olarak hidrasyon için gerekli su ihtiyacı da azalmıştır. Ancak ihtiyaç fazlası su bulunmaktadır. İhtiyaç fazlası su reaksiyona girmeden kalmaktadır. Yüksek alüminalı çimento oranı azaldığı için hidrasyon reaksiyonları da azalmıştır. Ultrasonik hızın hareket edebileceği fazlar azalmıştır. Bu nedenle ultrasonik hız düşmüştür [63].

3.2.2 Heterojen Çekirdeklenme Etkisi

Standart üretimin olduğu uygulamalarda ultrasonik hız değişmez, ultrasonik hız değişirse üretim parametrelerinden veya hammadde parametrelerinden biri değişmiştir. Örneğin, refrakter uygulamalarında kullanılan karıştırıcı ve mala gibi ekipmanlar kullanım sonrasında temizlenmez ise bu ekipmanlar üzerinde kalan atıklar katılaşır ve bir sonraki kullanımda heterojen çekirdeklenmeye neden olur. İşçilerin temizlik yapmaması durumunda heterojen çekirdeklenme bazı bölgelerde çimento reaksiyonlarının erken başlamasına neden olur. Ultrasonik hız tayini ile bu tür işçilik hataları kesinlikle ortaya konur.

3.2.3 Kalıba Döküm Sırasında Oluşan Boşluklar

Yanlış kalıp dizaynı, yetersiz bağlayıcı veya su kullanımı gibi nedenlerden dolayı kalıp içerisindeki ince cidarlar veya kalıp köşelerinde boşluklar kalabilir. Bu tür durumlar,

mukavemeti etkilemekte ve ultrasonik hız ölçüm yöntemi ile döküm esnasında kolayca saptanabilmektedir.

3.3 Refrakter Beton ve Sunta Numunede Yapılan Deneysel Çalışmalar

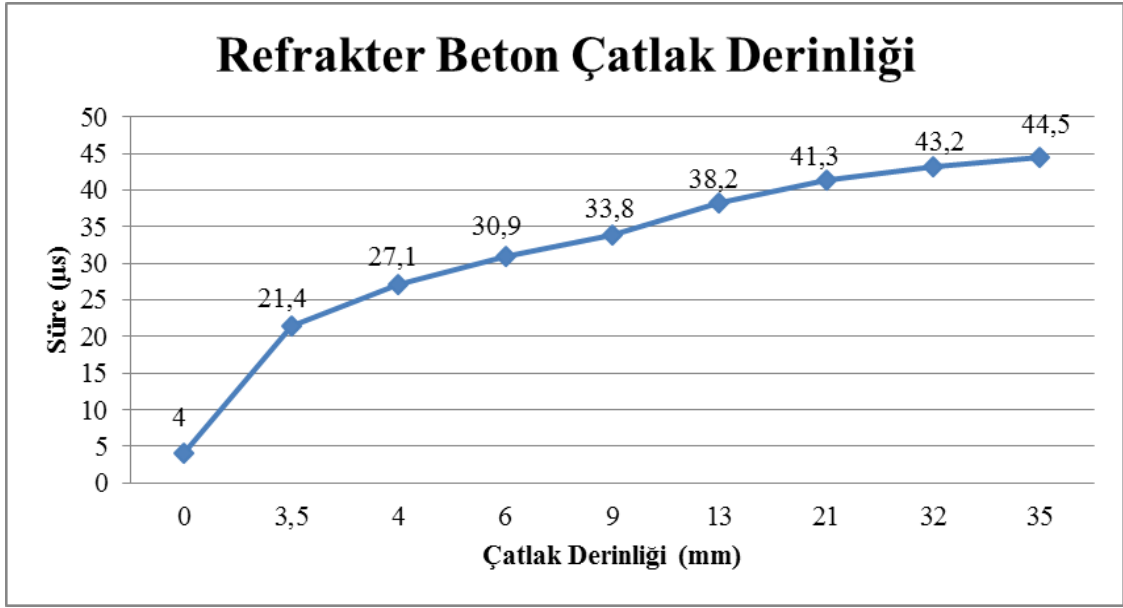
3.3.1 Refrakter Betonda Çatlak Derinliğinin Etkisi

Gerçekleştirilen bu deneyde ticari ismi Morcast 145 olarak bilinen ve detaylı bilgileri aşağıda mevcut olan 150x150x150 mm refrakter blok kullanılmıştır. Ultrasonik muayene cihazı olarak 150 KHz frekansa sahip çift prob kullanılmıştır. Kuplaj malzemesi olarak ise yüzeye yeterli miktarda vazelin uygulanmıştır.

Çizelge 3.2 Morcast 145 kimyasal bileşim ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)							Fiziksel Özellikler	
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	NaO+K ₂ O	CaO	MgO	Yoğunluk (gr/cm ³)	Tane İriliği (mm)
50	36	2,0	2,0	1,0	7,5	1,0	2,20	0-6,3

Bu refrakter blok üzerinde kontrollü oluşturulan çatlakların ultrasonik hızı nasıl etkilediği incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda çatlak derinliği arttığı sürece cihazda okunan değerlerde artış gözlenmiştir. Okunan değerlerin artmasından ultrasonik hızın düşeceği anlaşılmaktadır. Alınan sonuçları doğrulamak için ise ahşap ve sunta üzerinde de deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.3 Refrakter betonda oluşturulan kontrollü çatlakların ultrasonik hız üzerindeki etkisi

3.3.2 Sunta Malzemede Çatlak Derinliğinin Etkisi

Dökülebilir refrakterlerde çatlak derinlik tayininde, çatlak boyu tayini ticari ürünlerde çok yorucu, pahalı ve zahmetlidir. Bu nedenle çatlak derinliğinin etkisi gözenekli sunta malzemelerde incelenmiş ve etki araştırılmıştır. Daha sonra dökülebilir refrakterlerde aynı olay incelenmiş ve aynı sonuçların orada da geçerli olduğu ortaya konmuştur.

İmalatta kalite kontrol amaçlı uygulamaları, dökülebilir refrakterlerde şekillendirme yüksek alüminalı çimento ve agrega oranına bağlı olarak su oranı, döküm koşulları, karıştırma, şişleme ve benzeri işlemler hem mukavemeti hem de ultrasonik hızı etkilenmektedir. Ultrasonik hız ile mukavemet arasında doğru orantılı ilişkiler kurulabilmektedir. Çalışmanın amacı bu etken faktörlerin değişmesi halinde üretim sırasında ultrasonik hızı ile mukavemet arasında bir ilişki kurup, ultrasonik hız kontrol edilerek üretimin yolunda gidip gitmediği kontrol edebilmektir.

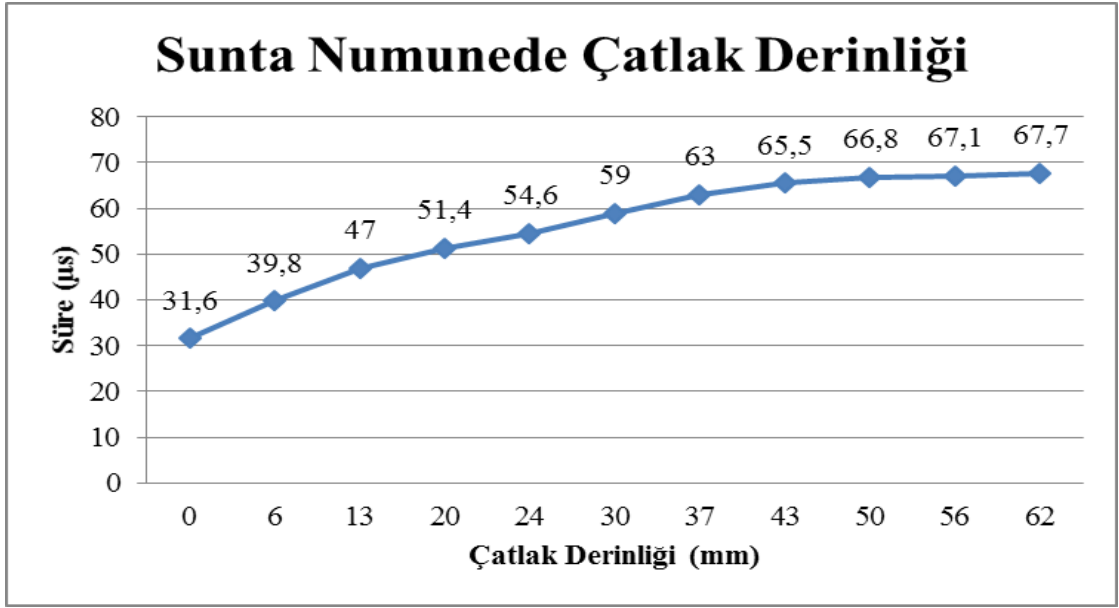
Ayrıca dökülebilir refrakter piştikten sonra rutubet ve kristal bağlı suyunu kaybederek çatlak meydana gelir. Çoğu uygulamada bu çatlaklar kullanım amacına zarar vermez ve hatta bazı sorunları çözdüğü için de istenmektedir. Üretim sırasındaki şişleme, titreştirme ve benzeri nedenlerle segregasyon meydana gelebilir ve bu nedenler ile belirli bölgelerde çatlakların fazla olması, ultrasonik yöntemle ortaya konabilmektedir.

Pişmiş dökülebilir refrakterlerde önemli miktarda ve 1-2 mm'ye varan çatlaklar meydana gelmektedir. Pek çok uygulamada bu tür çatlaklar yarar sağlamaktadır. Ancak çatlakların büyüklüğü dağılımı bazen istenmeyen boyutlara ulaşabilmektedir. Çatlak büyüklüğü ve dağılımı ve bunların özellikleri üzerinde araştırma yapılmaktadır [64].

Dökülebilir refrakterlerde 0-20 °C arasında katılaşma sırasında meydana gelen hidrat fazlarının türleri ve oranları çok değişiklik göstermektedir. Ultrasonik hızları farklıdır. Kalite kontrol deneylerinde bu fazların dikkate alınması gerekir. Hidratasyon sıcaklığı ve fazları hakkında Misikava çok detaylı bilgiler vermektedir. Kurutma sırasında bu fazların değişimi ile de çok detaylı bilgi vermektedir. Nilforoushan düşük sıcaklıkta hidratasyon reaksiyonları ve ürünlerini incelemektedir [65].

Öncelikle refrakterler gözenekli veya değişik çaplı agregalardan oluştuğu için bu özellikleri yansıtan ve gözenek çapı ile tane büyüklüğü buna benzerlik gösteren bir sunta üzerinde çatlak derinliğinin etkisi araştırılmıştır. Sunta deneyinin nedeni ise dökülebilir refrakterlerde değişik derinlikte çatlaklı numune üretmek çok pahalı ve zordur. Sunta kesitinde tanelerin kesme sonucu çıktığı boşlukların çapı maksimum 2 mm civarındadır. 20 mm kalınlıkta, 150 mm genişlikte ve 595 mm uzunluğundaki çatlaksız sunta numunesinde probun uzunluk boyunca karşılıklı yerleştirildiğinde süre 31,6 mikro saniye okunmuştur. $V = l / t$ (Ultrasonik hız = Yol / Zaman) formülünden ultrasonik hızın 1882 m/s olduğu bulunmuştur.

Aşağıdaki grafikte ise, yine aynı ölçülerde suntalar üzerinde kontrollü üretilen çatlak derinliklerinde elde edilen ultrasonik hız gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere çatlak derinliğinin ultrasonik hız üzerinde belli bir noktaya kadar etkisi olmakta ve sonrasında etki etmemektedir.



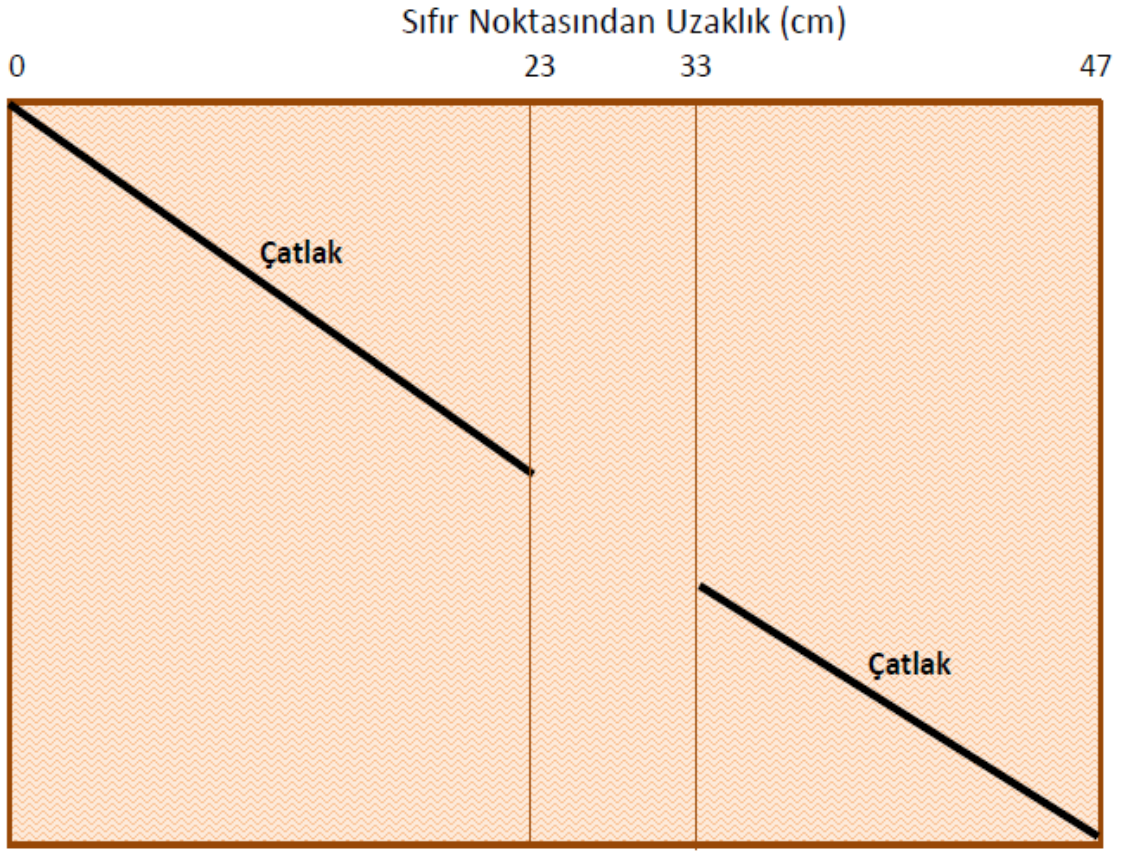
Şekil 3.4 Sunta çatlak derinliğinin ultrasonik hız etkisi

Sunta deneyinde alınan sonuçları doğrulamak adına aynı deney kontrollü çatlak oluşturulmuş refrakterde de denenmiş ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir.

3.3.3 İki Kenarından Kontrollü Çatlak Oluşturulmuş Sunta Numunesinde Ultrasonik Hız Tayini

470x340x20 mm ölçülerindeki sunta numunesi üzerinde köşeden köşeye gelecek şekilde bir köşegen çizilmiştir. Bu köşegen, bir uçtan 230 mm, diğer uçtan 140 mm gelecek şekilde sunta üzerinde çatlak oluşturulmuş ve orta kısmı Şekil 3.5’de de görüldüğü gibi çatlaksız bir şekilde bırakılmıştır.

150 KHz frekanslı probalar kullanılarak, sunta malzemesinin 0 noktasından itibaren belirlenen noktalar üzerinde muayene yapılmıştır. Elde edilen süreler, $V=l/t$ formülünde yerinde konulmuş ve Çizelge 3.3’de belirtilen ultrasonik hız değerleri elde edilmiştir.

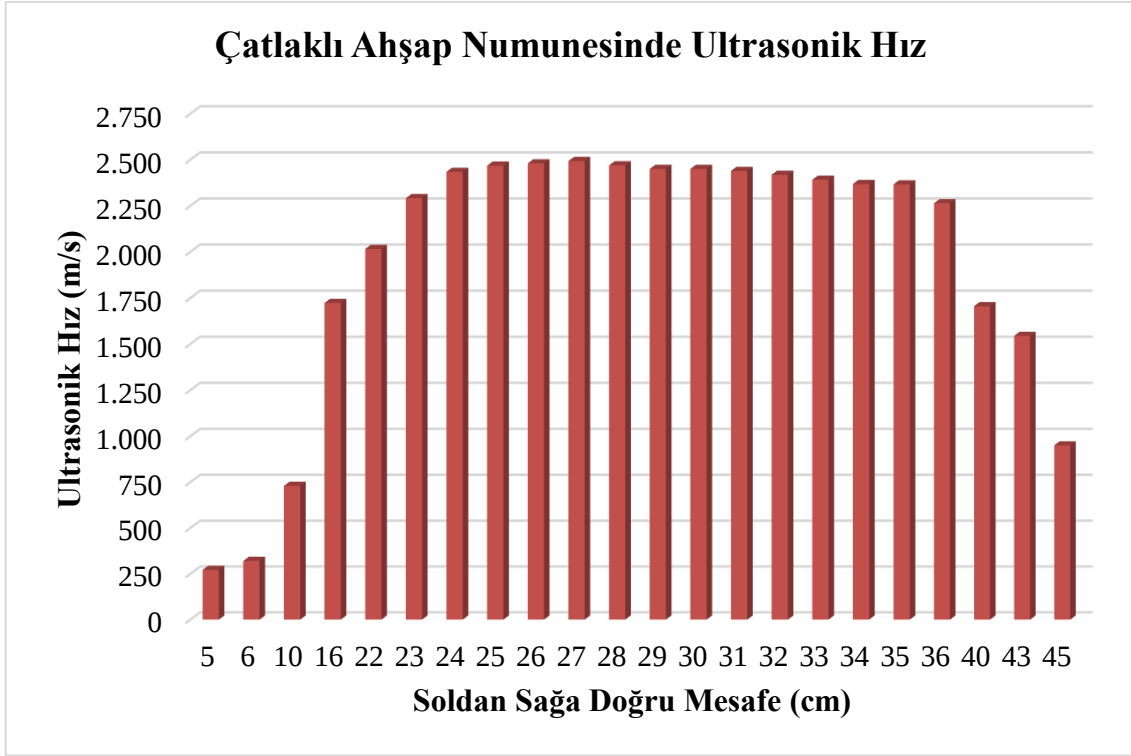


Şekil 3.5 Kontrollü olarak çatlak oluşturulmuş 340x 470 mm ölçülerinde sunta numunesi

Çizelge 3.3 Kontrollü çatlak oluşturulmuş sunta numunesinde 0 noktasından itibaren ölçülen süreler ve ultrasonik hız değerleri

Mesafe (cm)	Süre (μ s)	Ultrasonik Hız (m/s)
5	1254,3	271,1
6	1060,7	320,5
10	466,1	729,5
16	197,4	1722,4
22	168,7	2015,4
23	148,4	2291,1
24	139,7	2433,8
25	137,8	2467,3
26	137,1	2479,9
27	136,4	2492,7
28	137,7	2469,1
29	138,8	2449,6
30	138,8	2449,6
31	139,4	2439,0
32	140,6	2418,2
33	142,2	2391,0
34	143,6	2367,7
35	143,7	2366,0
36	150,2	2263,6
40	199,4	1705,1
43	220,2	1544,1
45	357,9	950,0

Sfır noktasından itibaren belirlenen aralıklarla yapılan ölçümler göstermiştir ki, problemlerin çatlaksız noktaya olan mesafesi ile ölçülen ultrasonik hız arasında bir ilişki vardır. Problemler çatlaksız bölgeye ne kadar yaklaşırsa, ölçülen süre o kadar azalmakta ve ultrasonik hız bu oranda artmaktadır. En yüksek hız problemlerin tamamen çatlaksız bölgede yapılan muayene sonucunda alınmıştır. En düşük hız ise çatlaksız bölgeden en uzak bölgede elde edilmiştir.



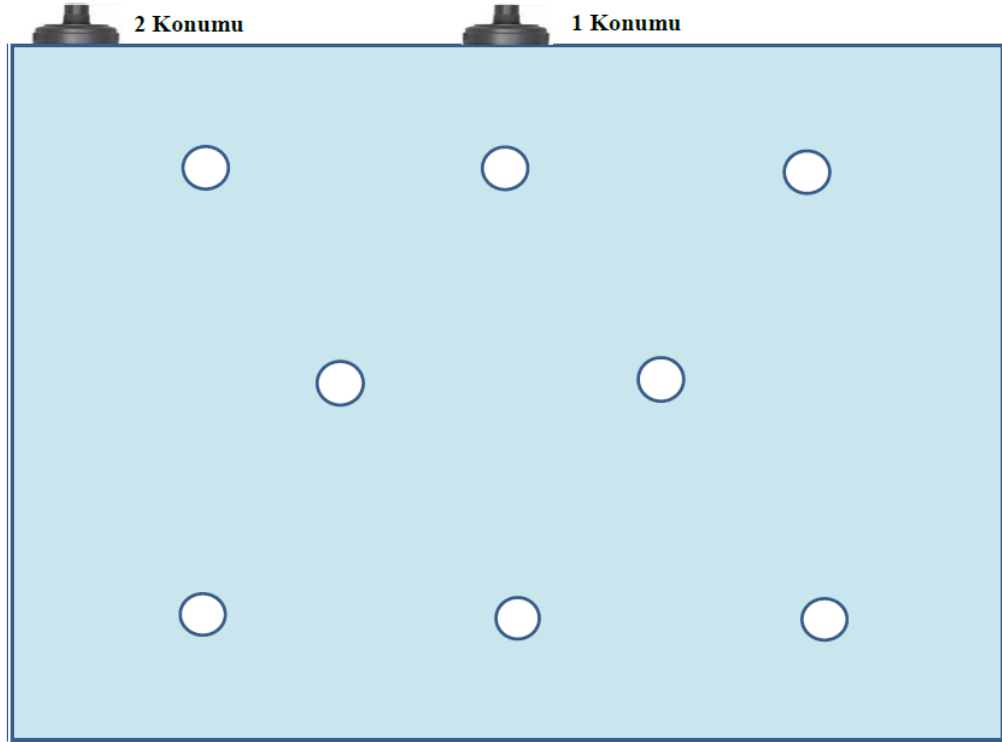
Şekil 3.6 Kontrollü çatlak oluşturulmuş sunta numunesinde 0 noktasından itibaren ölçülen ultrasonik hız değerleri

3.3.4 Kontrollü Oluşturulan Deliklerin Ultrasonik Hıza Etkisi

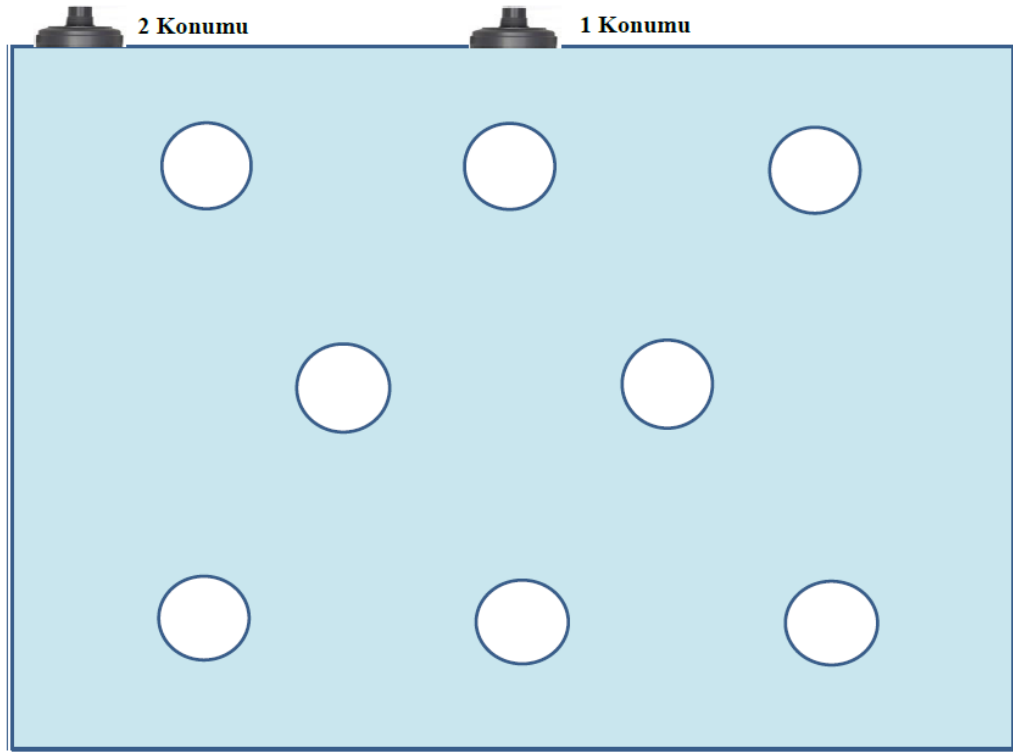
Delikli malzemelerin ultrasonik hız üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sunta üzerinde muayeneler yapılmıştır. Daha iyi anlaşılması amacıyla ölçü oranı gözetilmeksizin çizilen ve şematik gösterimi aşağıda mevcut olan, kontrollü olarak delik oluşturulmuş kavak ağacından yeni kesilmiş malzeme üzerinde ultrasonik hız ölçülmüştür. Bu malzemelerde en ve boy sabit olmak üzere kalınlık değiştirilmiştir. Birinci set sunta numunesi 120x52x12 mm ve ikinci set sunta numunesi 120x52x5 mm ölçülerindedir. Her ölçüden toplamda 6'şar adet sunta numunesi üretilmiş ve bir tanesi

tamamen deliksiz olmakla beraber diğ er 5 sunta numunesine sırasıyla 5, 7, 9, 11 ve 12,5 mm çapında eşit delikler açılmıştır.

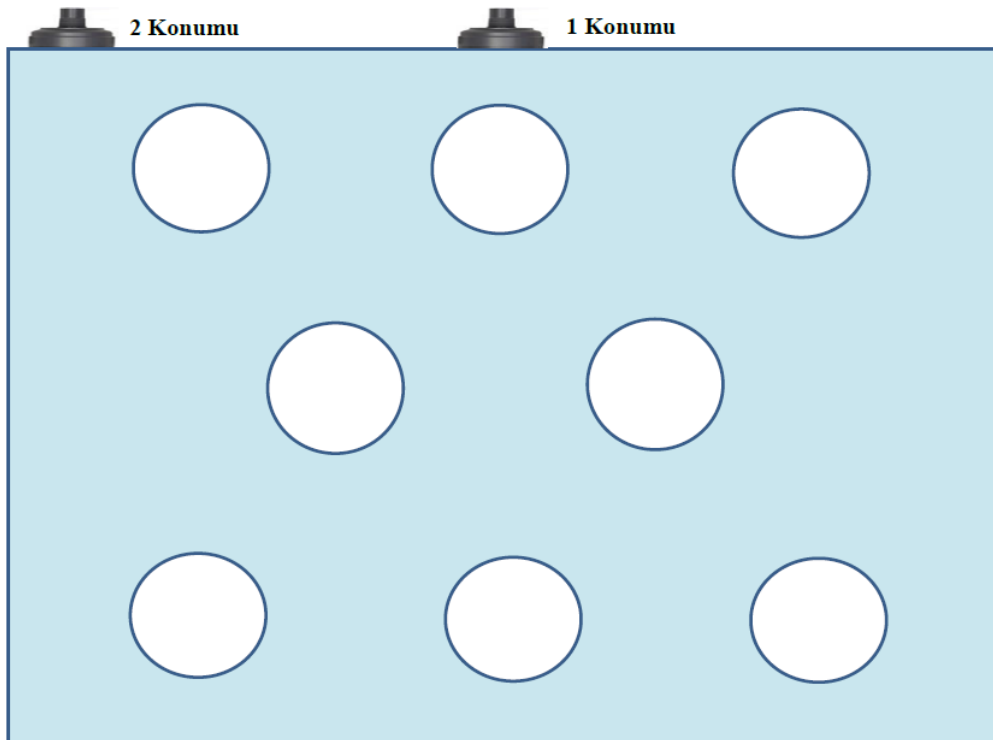
Problar ilk olarak 1 konumunda, daha sonra 2 konumundaki iken ultrasonik hız ölçümü yapılmıştır. 1 ve 2 konumuna yerleştirilen problar, numunenin 120 mm uzunluktaki kenarında bulunmaktadır. Prob 1 konumunda iken, prob merkezi numune yüzeyinin tam ortasına yani kenardan 60 mm uzaklığa denk gelmektedir. Prob 2 konumunda iken, prob merkezi numunenin k  şesinden 10 mm uzaklığa sahiptir.



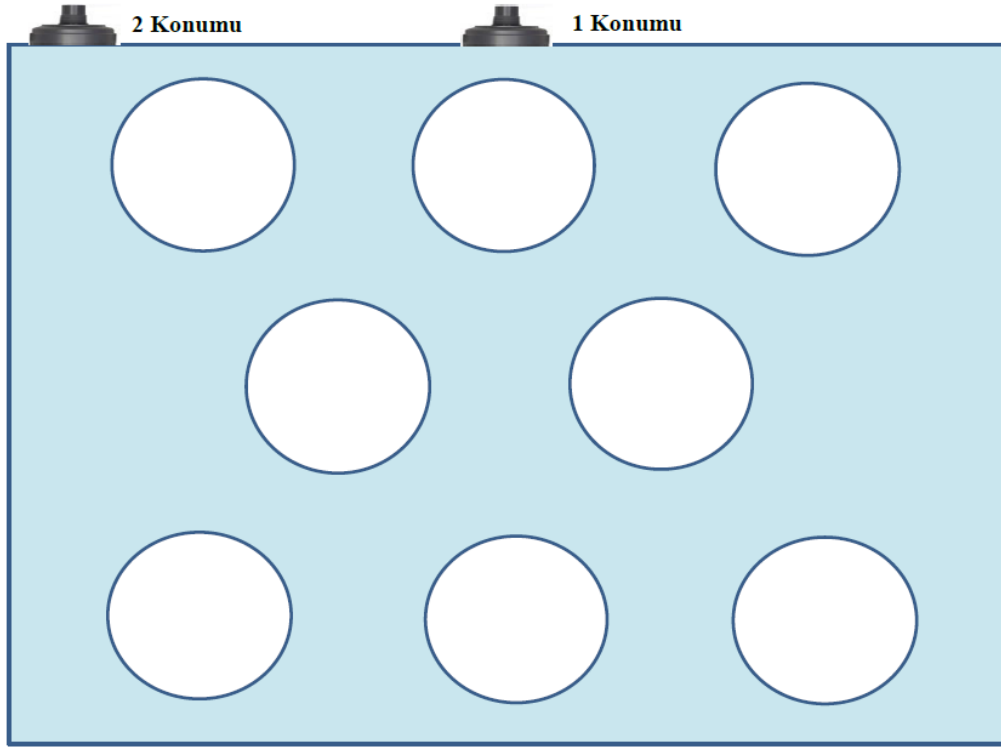
Şekil 3.7 5 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi



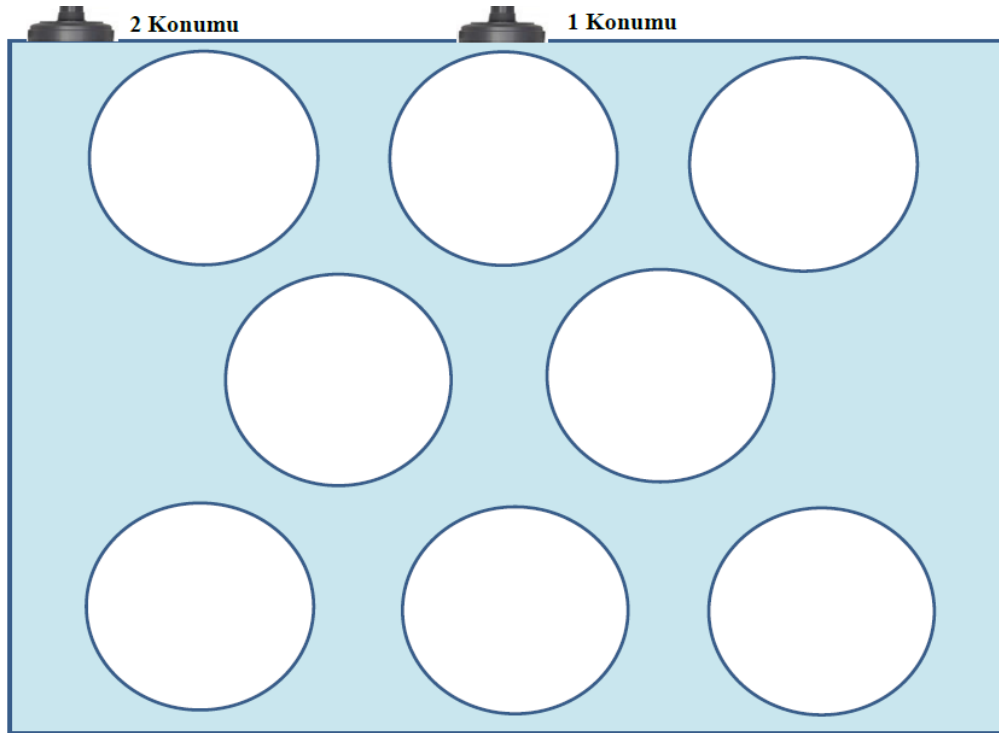
Şekil 3.8 7 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi



Şekil 3.9 9 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi



Şekil 3.10 11 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi



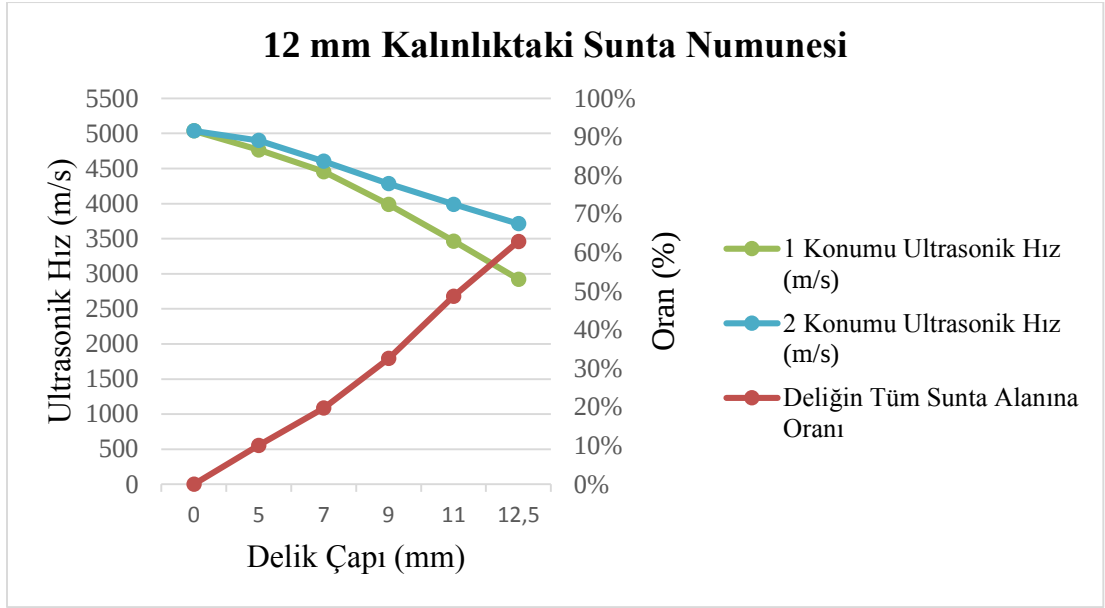
Şekil 3.11 12,5 mm çapında kontrollü delikler oluşturulmuş iki farklı kalınlıktaki sunta numunesi

Kullanılan problar 55 KHz frekanslı dalgalar üretmektedir. $V = \lambda \cdot f$ formülü kullanılarak deliksiz sunta numunesinde dalga boyu 92 mm bulunur ve bunun yarısı alınarak, minimum hata boyu 46 mm olarak tayin edilebilir. Yani kullanılan cihaz ile sunta numune içerisindeki hataların 46 mm'ye kadar olanı tespit edilebilmektedir.

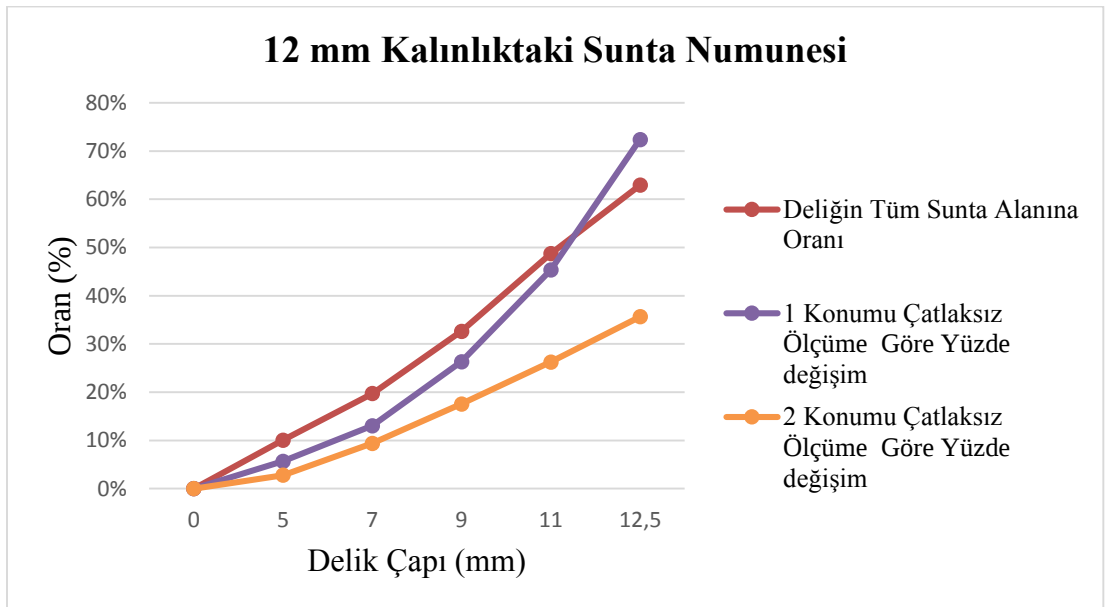
Test cihazdan alınan süreler, $V=l/t$ formülü kullanılarak ultrasonik hıza dönüştürülmüştür. Elde edilen bu değerler ile deliksiz kavak ağacı kesiti arasındaki yüzdesel fark hesaplanmış ve aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 3.4 12 mm kalınlıkta üretilen sunta numunesinde yapılan ultrasonik hız ölçümleri ve değişim yüzdeleri

	Çatlak Çapı (mm)	Delğin Tüm Sunta Alanına Oranı	1 Konumu		2 Konumu	
			Ultrasonik Hız (m/s)	Çatlaksız Ölçüme Göre Yüzde değişim	Ultrasonik Hız (m/s)	Çatlaksız Ölçüme Göre Yüzde değişim
Kalınlık 12 mm	0	-	5037	-	5037	-
	5	10%	4766	6%	4900	3%
	7	20%	4456	13%	4604	9%
	9	33%	3987	26%	4285	18%
	11	49%	3466	45%	3989	26%
	12,5	63%	2922	72%	3713	36%



Şekil 3.12 12 mm kalınlıktaki sunta numunesindeki ultrasonik hız değerlerin grafik halinde gösterimi



Şekil 3.13 12 mm kalınlıktaki sunta numunesindeki yüzde oranların değerlerin grafik halinde gösterimi

Probun 1 ve 2 konumuna yerleştirilmesi sonucu gönderilen ultrasonik dalgaların, oluşturulan delikleri geçme süresi arttığı için ölçülen süre artmakta ve dolayısıyla ultrasonik hız düşmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi minimum hata boyu 46 mm'dir. Numune kalınlığı 5 mm'ye düştüğü zaman çizelgeden de görüldüğü gibi deneysel çalışmayı olumsuz etkileyen

parametreler ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı bulunan değerler 12 mm kalınlıktaki numunelerde olduğu gibi sağlıklı değildir. Numune kalınlığı 12'den 5'e düştüğü zaman minimum hata boyutunun altına çok indiğimiz için deneysel sonuçlar olumsuz etkilenmiştir. Tahta kenarının düzgün olmayan yüzeyinin de etkili olması nedeniyle sonuçlar 12 mm kalınlıkta aldığımız sonuçlar kadar birbiri ile uyumlu değildir.

Probun yerleştirildiği iki farklı konumda da görölmüştür ki delik çapı arttıkça geçiş süresi uzamakta ve dolayısıyla ultrasonik hız düşmektedir. Genel olarak görölen bu düşüşten malzemenin mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiğini açıkça söyleyebiliriz.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmalarda dökülebilir refrakterlerde şekillendirme sırasında meydana gelebilecek olan heterojenleşmenin saptanması ile dökülebilir refrakterlerde, suntada ve yeni kesilmiş kavak ağacında çatlak derinliğinin saptanması incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1.A. Ultrasonik muayenede minimum hata boyu çok önemlidir. Genellikle seramiklerde 150 KHz, betonda 54 KHz civarında frekans kullanılarak muayene gerçekleştirilmektedir.

1.B. Çatlak boyu fırın duvar boyu ile yakından ilgilidir. Refrakter beton ve betonda çatlak, fırın boyutuna bağlı olarak artabilmektedir. Bu durumda minimum hata boyuna göre ultrasonik cihazın frekans değeri daha da düşürülebilir.

2. Çalışma sırasında çıkacak kazalar hem fırında hem de fırın içerisindeki ürünlerden dolayı büyük masraflara neden olmaktadır. Ultrasonik yöntemle muayene bunların önlenmesini sağlar.

A. Fırın duvarlarının imalatı aşamasında veya sonunda çatlağın tayin edilmesi ve fırının kullanıma alınmasından önce tamir edilmesi

B. Duvar kalınlığının artması veya incelmesi ultrasonik cihazla tayin edilmesi

C. Monolitik refrakterlerin şekillendirilmesi sırasında işçilik hataları meydana gelebilir.

D. Ultrasonik yöntemle şekillendirme hatalarının ve dökülebilir refrakterlerde meydana gelen doğal çatlakların tehlike sınırlarını aşıp aşmadığının saptanması, yani hatalı parçadan emin olma garantisi fırın boyutlarının ve ömürlerinin artmasına olanak sağlamıştır.

E. Dökülebilir refrakterlerde ve refrakterlerde başarı ile uygulanan bu testin polimer ve ahşap malzemelere aynı etkinlikle uygulanabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Uygur, M.E., (1976). "Malzemelerin Dinamik Muayenesi" Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- [2] Russel, R.O. ve Morrow, G.D., (1984). "Sonic Velocity Quality Control of Steel Plant Refractories" Amer.Gram.Soc.Bull. 63 (7): 911-914.
- [3] Aly ve Semler, C.E. (1985). Amer.Ceram.Soc. Bull. 64 (12): 1555-1558.
- [4] <http://theconstructor.org/concrete/ultrasonic-pulse-velocity-upv-test/2847>, 21 Eylül 2014.
- [5] <http://www.controls-group.com/eng/concrete-testing-equipment/ultrasonic-pulse-analyzer.php>, 21 Eylül 2014.
- [6] <http://www.ndt.net/article/ecndt98/material/173/173.htm>, 21 Eylül 2014.
- [7] <http://www.durhamgeo.com/testing/concrete/nondes-ultracontest.html>, 21 Eylül 2014.
- [8] Chang, L.S. ve Chuang, T.H., (1997). Ultrasonic Testing of Artificial Defects in Alumina Ceramic, Ceramic International 23: 367-373.
- [9] Topuz, A. (1993). "Tahribatsız Muayeneler" YTÜ, Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [10] Pundit C.N.S Electronics Ltd. Kataloğu, Londra.
- [11] Gür, C.H. (1999). "Tahribatsız Tekniklerin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesindeki Yeri" 1. Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu 29.09.1999, 01.10.1999, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Ankara, 357-375.
- [12] ASTM C 597 – 83. Test For Pulse Velocity Through Concrete, Philadelphia.
- [13] Yaman, C. (1999). "Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemleriyle Seramik Malzemelerde Özellik Belirlenmesi" 1. Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu 29.09.1999, 01.10.1999, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Ankara, 381-386.
- [14] Yaman, C. (1995). "Ultrasonic Inspection of Castable Refractories" Interceram 44 (5): 314-317.
- [15] Krautkramer, (1977). "Ultrasen Enerjisi ve Malzeme Muayenesine Uygulanması" Interceram 44 (5): 1995.

- [16] Bargel, H.I. ve Schulze, G. (1985), Werksstoffkundeö VDI*Verlag Gmbh Duesseldorf, Çevirenler: Güleç, Ş., Aran, A., Malzeme Bilgisi, Gebze MBEAE Matbaası, 1987.
- [17] Blitz, J. ve Simpson, G. (1996) Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing, First Edition, Chapman and Hall, London.
- [18] Banerjee, S. (1998). Monolithic Refractory, A Comprehensive Handbook, American Ceramic Society, New Jersey, USA.
- [19] ASTM C 860 (reapproved 2005). Standard Test Method for Determining the Consistency of Refractory Castable Using the Ball-In-Hand Test, Philadelphia.
- [20] ASTM C 885 (reapproved 2012). Standard Test Method for Young's Modulus of Refractory Shapes by Sonic Resonance, Philadelphia.
- [21] Lawlar, J.B. ve Ross, R.H., (1981). Amer.Ceram.Soc. Bull. 60 (7): 713-718.
- [22] Nishikawa, A. (1984). "Technology of Monolithic refractories", Plibrico Japon Co.Ltd.
- [23] <http://www.fenokulu.net/portal/Sayfa.php?Git=KonuKategorileri&Sayfa=KonuBaslikListesi&baslikid=149&KonuID=886>, 21 Eylül 2014.
- [24] http://tr.wikipedia.org/wiki/Tahribats%C4%B1z_muayene, 21 Eylül 2014.
- [25] Topuz, A. (1999). "Ultrasonik Hız Ölçme Tekniği ile Küresel Grafitli Dökme Demirde Mikroyapı İncelenmesi" 1. Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu 29.09.1999, 01.10.1999, 373-80 TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Ankara.
- [26] Yaman, C. (1999). "Seramiklerin Ultrasonik Yöntemle Muayene Esasları", YTÜ, Kimya-Metalurji Fak. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [27] Masaryk, J.S. and Farris, R.E. (1976). Amer.Ceram.Soc. Bull. 55 (11): 996-998.
- [28] Yaman, C. (1999). "Ultrasonic Testing of Lightweight Castable Refractories Made With Perlite By Ultrasonic Method", Ceramics International 32 (4): 108-111.
- [29] Toritani, Y., (1985). "Progress in Castint Trough Materials and Installing Technigues for Large Blast", Advances in Ceramics V13, New Developments in Monolithic Refractories, Editör Fisher, R.E. The Amer. Cer.Soc. Columbus, Ohio.
- [30] Glassgold, I.L. (1982). Repairing Monolithic Refractory Failures, Concrete Institne, Detroit.
- [31] Roy, J.M. ve Tngley, L.R., (1994). "High Performance Aluminas for Refractories" Interceram 43 (4): 236-239.
- [32] Lewis, J.A. ve Boyer, M. (1994) "Binder Distribution in Macro-Defect-Free Cements" J.Amer ceram .Soc. 77 (3): 711-716.
- [33] Niyogi,S.K. ve Das, A.C. (1994). "Prediction of Termal Shock Behaviour of Castable refractories by Sonic Measurements" Interceram 43 (6): 453-457.

- [34] Trtnik, G. ve Gams, M., (2014). "Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages", Elsevier Science 54 (1): 66-75.
- [35] Electro dynamic resonant frequency unified digital indicating test equipment, C.N.S Electronics Ltd.
- [36] M.C. Bhardway, (1992). Evolution, practical concepts and examples of ultrasonic NDC, Ceramic Monographs 4.5- Handbook of Ceramic, Verlag Schmid GmbH, Freiburg i. Br.
- [37] ASTM C64-72 Standard Specification for Refractories for Incinerators and Boilers, Philadelphia.
- [38] ASTM C673-71 Standard Classification of Fireclay and High-Alumina Plastic Refractories and Ramming Mixes, Philadelphia.
- [39] ASTM C401-77 Standard Classification of Castable Refractories, Philadelphia.
- [40] ASTM C92-76 Standard Test Methods for Sieve Analysis and Water Content of Refractory Materials, Philadelphia.
- [41] ASTM C179-72 Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkage of Fireclay Plastic Refractories, Philadelphia.
- [42] ASTM C180- 72 Standard Method of Panel Spalling Testing Fireclay Plastic Refractories, Philadelphia.
- [43] ASTM C181-76 Standard Test Method for Workability Index of Fireclay and High-Alumina Plastic Refractories, Philadelphia.
- [44] ASTM C491- 72 Standard Test Method for Modulus of Rupture of Air-Setting Plastic Refractories, Philadelphia.
- [45] ASTM C201-68 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories, Philadelphia.
- [46] ASTM C417-72 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Unfired Monolithic Refractories, Philadelphia.
- [47] ASTM C704-76 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Refractory Materials at Room Temperature, Philadelphia.
- [48] ASTM C860- 77 Standard Recommended Practices for Determining Consistency of Refractory Concretes, Philadelphia.
- [49] ASTM C862-77 Standard Recommended Practice for Preparing Refractory Concrete Specimens by Casting, Philadelphia.
- [50] ASTM C865- 77 Standard Recommended Practice for Firing Refractory Concrete Specimens, Philadelphia.
- [51] ASTM C874-77 Standard Recommended Practice for Rotary Slag Testing of Refractory Materials, Philadelphia.
- [52] ASTM C903-79 Standard Practice for Preparing Refractory Concrete Specimens by Cold Gunning, Philadelphia.

- [53] DIN 51030 Measurement of Modulus of Rupture after Drying.
- [54] DIN 51046 Measurement of Thermal Conductivity up to 1600 °C by Hot Wire Method (Thermal conductivity up to 2 W. K.-1m-1).
- [55] DIN 51048 Measurement of Modulus of Rupture of Refractories at Elevated Temperatures (Part 1).
- [56] DIN 51053 Measurement of Refractoriness Under Load (Differential with rising temperature) (Part 1).
- [57] DIN 51053 Measurement of Creep in Compression (with constant temperature and load) (Part 2).
- [58] DIN 51064 Measurement of Refractoriness Under Load of Firebricks (Part 1).
- [59] DIN 51067 Measurement of Cold Crushing Strength of Refractories with Total Porosity up to % 45 (Part 1).
- [60] DIN 51067 Measurement of Cold Crushing Strength of Refractories with Total Porosity more than 45% (Part 2).
- [61] DIN 51068 Measurement of Resistance to Thermal Shock (Water quenching method for firebricks).
- [62] DIN 1069 Testing Method for Corrosion Resistance to Solid and Fluid Stuffs at High Temperature.
- [63] Yasak, M., (2013). "Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemi ile Refrakter ve Seramiklerde Özellik ve Çatlak Tayini Belirlenmesi", 6. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
- [64] D.N. Boccaccini, (2008). A Statistical Approach for the Assessment of Reliability in Ceramic Materials from Ultrasonic Velocity Measurement: Cumulative Flaw Length Theory, Italya.
- [65] Nilforoushan, M.R., (2007). The Hdyration Products of a Refractory Calcium Aluminate Cement of Low Temperatures, 26 (2).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet YASAK
Doğum Tarihi ve Yeri : 02.11.1988 Şanlıurfa
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mmt_ysk@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalürji ve Malzeme Mühendisliği	Sakarya Üniversitesi	2010
Lise	Sayısal	Dede Korkut Anadolu Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012-	Pyrotek Refrakter Sanayi ve Ticaret	Dökümhane Uzmanı Satış Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

6. Alüminyum Sempozyumu, 2013 **Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemi ile Refrakter ve Seramiklerde Özellik ve Çatlak Tayini Belirlenmesi.**
