

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

128781

**DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLERDE ULTRASONİK HIZ
ÖLÇME YÖNTEMİ İLE ÇATLAK TAYİNİ**

Müh. Alper YETER

**F.B.E Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı

: Prof. Dr. Cemalettin YAMAN

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İSTANBUL, 2002

Prof. Dr. Cemalettin Yaman
Doç. Dr. Selahattin Yılmaz
Prof. Dr. C. S. Karakaraşön
128781

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. REFRAKTER MALZEMELERE GİRİŞ	2
3. REFRAKTER SANAYİİNDEKİ SON GELİŞMELER	3
3.1 Refrakter Sanayiinde Son Yıllardaki Gelişmeler.....	3
3.2 Refrakter Tüketimindeki Azalmanın Nedenleri.....	5
4. REFRAKTER TÜKETİMİNDE SON GELİŞMELER	6
4.1 Dökülebilir Refrakterler	6
4.1.1 Dökülebilir Refrakterlerin Özellikleri.....	7
4.1.2 Dökülebilir Refrakterlerdeki Yeni Gelişmeler.....	8
4.1.3 Dökülebilir Refrakterlerin Hazırlanması.....	9
4.1.4 Dökülebilir Refrakterlerin Özelliklerini Etkileyen Faktörler.....	10
4.2 Yüksek Alüminalı Çimento Üretimi	12
4.2.1 Yüksek Alüminalı Çimentoların Bileşik Yapısı.....	13
4.2.1.1 Alüminatlar ve Silikatlar	13
4.2.2 Bileşenlerin Karakteristik Özellikleri.....	13
4.2.3 Yüksek Alüminalı Çimentonun Fiziksel Özellikleri.....	18
4.2.4 Yüksek Alüminalı Çimentonun Hidratasyonu	20
5. ULTRASONİK HIZ ÖLÇME YÖNTEMİYLE REFRAKTERLERDE MUAYENE.....	24
5.1 Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemleri ile Muayenenin Önemi	25
5.2 Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemi ile Muayenenin Üstünlükleri ve Eksiklikleri	27
5.3 Ultrasonik Dalgaların Özellikleri ve Oluşumu.....	27
5.3.1 Ultrasonik Dalgaların Yayılma Çeşitleri.....	28
5.4 Ultrasonik Muayenenin Uygulama Yöntemleri	29
5.4.1 Doğrudan Geçiş (V-Geçiş) Yöntemi	29
5.4.2 İkili Prob (Tandem) Yöntemi.....	29
5.5 Ultrasonik Muayenede Kullanılan Prob Çeşitleri	30
5.5.1 Normal Prob	30

5.6	Probların Yerleştirme Şekilleri.....	30
5.7	Ultrasonik Yöntemle Tayin Edilebilecek Minimum Hata Boyutu.....	32
5.8	Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemi ile Çatlak Tayini.....	34
5.8.1	Çatlakları Saptama ve Boyut Tayini	36
5.9	Şaşırtma Delik Yöntemiyle Ultrasonik Hızın İncelenmesi	38
5.10	Şaşırtmalı Kanallar Yöntemiyle Ultrasonik Hızın İncelenmesi.....	39
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
7.	SONUÇLAR	52
	KAYNAKLAR.....	54
	ÖZGEÇMİŞ	56



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	Yıllara göre 1 ton sıvı çelik üretimi için harçanan refrakter miktarı.....	5
Şekil 4.1	Monolitik refrakterlerin toplam refrakter üretimine oranının değişimi	9
Şekil 4.2	CA hidratasyon reaksiyonları.....	22
Şekil 4.3	CA ₂ hidratasyon reaksiyonları	23
Şekil 5.1	Doğrudan geçiş yönteminde problemlerin alıcı ve verici olarak çalışması	29
Şekil 5.2	İkili prob yönteminde problemlerin çalışma şekli	30
Şekil 5.3	Ultrasonik cihaz problemlerinin yerleştirme şekilleri.....	31
Şekil 5.4	Yüzey metodu ile ultrasonik hız tayini	35
Şekil 5.5	Çatlak derinliğinin ölçülmesi	36
Şekil 5.6	Yüzey metodu kullanılarak ultrasonik hız tayini	37
Şekil 5.7	Ahşap malzeme üzerine delinen deliklerin yerleştirme şekli.....	38
Şekil 5.8	Ultrasonik hız ile delik çapı ebadı arasındaki ilişki	39
Şekil 5.9	Şaşırtma kanalla ultrasonik hız ölçümünde kullanılan numunenin görünüşü...	39
Şekil 6.1	Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin prob yerleşim düzeneği	43
Şekil 6.2	Uzun ahşap numunede geçiş zamanı, ultrasonik hız, çatlak derinliği arasındaki ilişki 6-6 konumu, çatlak tam ortada.....	44
Şekil 6.3	Uzun ahşap numunede geçiş zamanı, ultrasonik hız, çatlak derinliği ilişkisi 2-3 konumu çatlak tam ortada problemler çatlak sağ ve solunda	44
Şekil 6.4	Ahşap numunede geçiş zamanı, ultrasonik hız, çatlak derinliği arasındaki ilişki 6-6 konumu, çatlak 10 mm uzakta	45
Şekil 6.5	Refrakter betonda; çatlak derinliği, geçiş zamanı ve ultrasonik hız arasındaki ilişki.6-6 prob konumu, çatlak probdan 10 mm uzakta.	46
Şekil 6.6	Refrakter beton numunede 6-6 konumu için; çatlak derinliği, geçiş zamanı, ultrasonik hız ilişkisi Lo:182 mm çatlak numune ortasında.....	48
Şekil 6.7	Refrakter beton numunede 1-4 konumu için; çatlak derinliği, geçiş zamanı, ultrasonik hız ilişkisi Lo:182 mm çatlak numune ortasında.....	48
Şekil 6.8	Refrakter beton numunede 2-3 konumu için; çatlak derinliği, geçiş zamanı, ultrasonik hız ilişkisi, çatlak numune ortasında.....	48
Şekil 6.9	Refrakter beton numunede problemlerin yerleşim düzeneği, çatlak ortada, verici prob sabit alıcı prob hareketlidir.	49
Şekil 6.10	Refrakter beton numunede verici prob sabit alıcı prob çatlak öncesi, üstü ve sonrası konumlarında problemler arası mesafe ve geçiş zamanı arasındaki ilişki.....	49
Şekil 6.11	Refrakter beton numunede verici prob sabit, alıcı prob hareketli durumda problemler arası mesafe ve geçiş zamanı arasındaki ilişki, çatlaksız numune	50
Şekil 6.12	Çift çatlaklı refrakter beton numunede; çatlak derinliği, geçiş zamanı ve ultrasonik hız arasındaki ilişki.....	51
Şekil 6.13	Çift çatlaklı refrakter beton numunede; çatlak derinliği, geçiş zamanı ve ultrasonik hız arasındaki ilişki.....	51

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Almanyada yıllara göre ocak sayılarındaki değişim	4
Çizelge 4.1	Dünya refrakter üretimi.....	6
Çizelge 4.2	Kalsiyum aluminatı oluşturan hammaddelerin kimyasal analizleri	8
Çizelge 4.3	Değişik ülkelerde yüksek alüminalı çimentonun tipik bileşimleri.....	12
Çizelge 4.4	Bazı ticari yüksek alüminalı çimentonun kimyasal bileşikleri	12
Çizelge 4.5	Sanayide kullanılan çeşitli alümina çimentosu bileşim yüzdeleri.....	13
Çizelge 4.6	Alüminalı çimentonun bileşenlerinin karakteristik özellikleri.....	14
Çizelge 5.1	Seramiklerde ve çeliklerde, frekans, ultrasonik hız ve saptanabilecek minumum hata boyutu arasındaki ilişkiler	33
Çizelge 5.2	Şaşırtmalı kanal yöntemiyle ultrasonik muayene ölçüm sonuçları.....	40
Çizelge 6.1	Mortar 80 refrakter betonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	41
Çizelge 6.2	Çatlak derinliği-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 234*1190 mm. Çatlak tam ortada.	44
Çizelge 6.3	Çatlak derinliği-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 390*322 mm. Çatlak probdan 10 mm uzakta, 6-6 prob konumu	45
Çizelge 6.4	Çatlak-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 355*420 mm' dir. Çatlak probdan 10 mm uzakta	46
Çizelge 6.5	Refrakter beton numunede, çatlak derinliği-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 182*302 mm. Çatlak tam ortada prob 6-6 konumunda.	47
Çizelge 6.6	Refrakter beton numunede problemler arası mesafe ve geçiş zamanı ilişkisi.....	49
Çizelge 6.7	Refrakter beton numunede problemler arası mesafe ve geçiş zamanı ilişkisi.....	50
Çizelge 6.8	Çatlak derinliği, ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 320*395 mm. Çatlak probdan 10-80 mm uzakta, çift taraflı çatlak	50
Çizelge 6.9	Çatlak-Ultrasonik Hız ve Geçiş Zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 135*420 mm' dir. Çatlak probdan 30 mm uzakta ve ultrasonik dalgaya dik durumda yer almaktadır. Çift taraflı çatlak.....	51

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, dökülebilir refrakterlerde tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik hız ölçme yöntemi ile malzeme içerisindeki gözenek, boşluk, çatlak gibi kusurları saptamak amaçlanmıştır. Ultrasonik muayene yöntemi bir tahribatsız muayene yöntemi olup, test edilen malzemeleri tahrip etmeden 20000 Hz frekansın üzerindeki dalgalar kullanılarak uygulanan bir muayene yöntemidir. Seramik malzeme muayenesinde 20-250 kHz frekanslı ultrasonik dalgalar kullanılır. Yöntemin ana prensibi, malzeme içindeki hata ile onu çevreleyen ana malzemenin yüzeyinde akustik empedansın ani değişimine dayanmaktadır.

Bu tez çalışması süresince beni öncelikle yönlendiren, kıymetli fikir ve önerileri ile çalışmalarına yön veren ve tezin tamamlanmasında büyük emeği geçen, mevcut bütün imkanları ve bilgisini sunan ve her türlü yardımlarda bulunan sayın hocam Prof. Dr. Cemalettin YAMAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanmasında emeği geçen, Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm başkanı değerli hocam Sn. Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU' na, tezin hazırlanması aşamasında yardımlarını esirgemeyen Metalurji ve Malzeme Bölümü öğretim üyeleri bütün değerli hocalarıma ve araştırma görevlileri ile teknisyenlere en içten teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca tezi hazırlamamda bana yardım eden İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyesi değerli hocam Sn. Prof. Dr. Ercan AÇMA' ya ve Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyesi hocam Sn. Prof. Dr. Fevzi YILMAZ' a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen, İ.T.Ü. ve Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim elemanları ve araştırma görevlilerine ve TÜBİTAK Malzeme Bölümü ile kütüphane çalışanlarına yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Müh. Alper YETER

ÖZET

Ultrasonik muayene yöntemi bir tahribatsız muayene yöntemi olup, test edilen malzemeleri tahrip etmeden 20 kHz frekansın üzerindeki dalgalar kullanılarak uygulanan bir muayene yöntemidir. Seramik malzeme muayenesinde 20-250 kHz frekanslı ultrasonik dalgalar kullanılır Yöntemin ana prensibi, malzeme içindeki hata ile onu çevreleyen ana malzemenin ana yüzeyinde akustik empedansın ani değişimine dayanmaktadır. Tahribatlı deneylerde numuneler kullanılamaz duruma gelirken, bunlara ek olarak test masrafları da meydana gelmektedir. Ultrasonik muayenede parçalar kırılmadığından bu tür masraflar en aza indirilmektedir. Bu çalışmada, numune üzerinde çatlak oluşturulup geçiş sürelerinin ölçülmesi ile ultrasonik hızı tayin edip çatlak derinliği, çatlak konumunun saptanması amaçlanmıştır. Ayrıca malzeme üzerinde farklı bölgelerde çift çatlak oluşturarak aralarındaki etkileşimde incelenmiştir.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan ultrasonik test cihazının frekansı 150 kHz' dir. Deney numunesi alüminyum kalıba dökülmüştür. Deneylerde kullanılan dökülebilir refrakter beton, ticari adı Mortar 80 olan yüksek alüminalı çimentodur. Refrakter beton numune açık havada kurutulmaya bırakılmış ve 48 saat sonra işlem yapılmıştır. Deneylerde prob ve malzeme yüzeyine vazelin sürülerek malzemeler arası ultrasonik dalganın geçişi sağlanmıştır. Deneyisel çalışmalarda, önce farklı ahşap numuneler üzerinde ölçümler yapılmıştır ve bu çalışmada bu verilerde verilmiştir. Ahşap numune üzerinde çalışma yapılmasının sebebi, büyük boyutlu refrakter beton numunelerinin dökümü ve kesme işleminin (çatlak oluşturulması) zor oluşundan dolayı tercih edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ultrasonik hız, yüksek alüminalı çimento, çatlak, mortar 80, ahşap

ABSTRACT

Ultrasonic velocity method is a non-destructive testing method, which testing method uses over 20 kHz frequency waves. In ceramic materials testing uses 20-250 kHz frequency ultrasonic waves. Main principle that method inside the materials with defections the surface that around the main materials based on instant change of acoustice impedance. In destructive experiments samples was became useless and testing was expensessed. In ultrasonic velocity method expenditures became less because of not to break. In this study, on samples formed cracks and found ultrasonic velocity based on transmitting time and determination of the crack deep. On the surface material, single and double crack forming different zones and reached activity.

In experimental studies, the frequency of the ultrasonic testing apparatus was 150 kHz. Experiment samples poured into an aluminium mold. In experiments used castable refractory concrete which is named commercially Mortar 80 high aluminium cement. Refractory concrete was dried outdoors and after 48 hours procedured. In experiments, surface of the transducers and materials vaselined for ultrasonic wave transmitting. Experiments was started different wood samples for testing and these datas was given here. Reason of the testing on the wood samples, use the impossible dimension casted materials and it preferenced becuse of hard cutting.

Key Words: Ultrasonic velocity, high aluminium cement, crack, mortar 80, wood

1.GİRİŞ

Duyulabilir ses eskiden beri malzeme muayenesinde kullanılmaktadır. Özellikle seramik parçalarda, parçaya vurulduğu zaman çıkan sestten bir parçada hata (örneğin bir çatlak) olup olmadığı anlaşılmaktadır (Krautkramer, 1977). Bugün modern ultrasonik (ses ötesi) cihazlarla malzemedeki ultrasonik hız değişiminden giderek de aynı şeyi yapmaktayız. Frekansı 20 kHz’ den yüksek olan ses dalgalarına ultrasonik dalga denir (Bargel 1985). Seramik muayenesinde 20-250 kHz frekanslı dalgalar kullanılır. Son yıllarda endüstriyel refrakterlerin ultrasonik yöntemle muayenesi, ürün özelliklerini, kalitesini ve üniformluğunu ortaya koymak genel bir olay haline gelmiştir (Aly ve Semler, 1985). Kullanım kolaylığı, cihazın portatif oluşu nedeni ile gelecekte daha fazla kullanılabileceklerdir. Bu çalışmada, numune üzerinde çatlak oluşturularak, geçiş sürelerinin ölçülmesine dayanılarak ultrasonik hızı tayin edip, çatlak derinliğinin ve çatlak konumunun saptanması ve malzeme üzerinde farklı bölgelerde tek ve çift çatlak oluşturularak etkileşim incelenmiştir. Bu amaçla hem ahşap numunede hemde refrakter betonda çalışma yapılmış ve çıkarılan diyagramlar ile çatlakların derinliği ve konumu tespit edilmiştir. Ultrasonik yöntem, sadece malzeme içerisindeki hataları ortaya koymaz, aynı zamanda malzemenin kalitesi ve homojenliği hakkında da bilgi verir. Tahribatsız muayenenin gelişmesini sağlayan nedenler;

- Parçaların hafifletilmesi nedeni ile limit dizaynlara gidilmesi
- Hatayı önceden bulup gelecekteki işçilik ve malzeme masraflarını minimuma indirilmesi
- Kazaları ve sistemin durmasını önlemek (Topuz, 1993).

Seramik malzemelerde, önceden diyagram çizilmişse şayet, mukavemeti tayin etmemize olanak sağlar. Kalite üzerine en iyi istatistik bilgiyi tahribatsız yöntem verir (Uygur 1976). Tahribatlı yöntemler hem malzeme kaybına yol açarlar hemde laboratuarda masrafa neden olurlar. Oysa ultrasonik yöntem bütün bu sorunları ortadan kaldırır. Ultrasonik dalga, içinde hareket ettikleri katı ortamın elastik özelliklerinden etkilenir. Elastik özelliklerde malzemenin içerdiği mineral fazlarının türlerine, oranlarına, porozite oranına bağlı olarak değişir. Bazı malzemelerin kalitesi elastik özelliklerine dolayısıyla yukarıda belirtilen özelliklere bağlıdır, bu nedenle ultrasonik hız ölçümü ile malzeme özellikleri saptanabilir (PUNDIT).

2. REFRAKTER MALZEMELERE GİRİŞ

Bir malzeme yüksek sıcaklıklarda korozif katılar, sıvılar, gazların hareketine şayet dayanabilirse refrakter olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel olarak, yüksek sıcaklıkta çalışan fırın ve benzeri ünitelerin yapımında veya iç kaplanmasında kullanılan sıcaklık altında fiziksel ve kimyasal nitelikte çeşitli aşındırıcı etkilere karşı erimeden ve fiziksel-kimyasal özelliklerini koruyarak dayanabilen malzemelere refrakter malzeme denilmektedir. ISO tarafından ise şu şekilde tanımlanmaktadır; Bünyelerinin tamamı metal yada alaşım olmayan ve fakat metalik bir bileşene sahip olabilen ve refrakterliği asgari 1500 °C olan malzemelerdir. Refrakter malzemeler fırın yapımları, tuğla ocakları, kurutma fırınları ve jet motorlarının ve uzay araçlarının kritik parçaların yapımında kullanılırlar (Yeter, 2001).

Refrakter malzemeler, asidik, bazik, nötr olmak üzere kimyasal karakterlerine göre üç sınıfa ayrılmaktadırlar. Asidik ve bazik refrakterler aynı anda kullanabildiğinden dolayı refrakterlerin ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta ergiyen bileşikler oluşmaktadır ve refrakterin ömrü kısalmır. Asidik ve bazik refrakterleri yan yana kullanmak gerektiği zaman aralarına nötr refrakter konulmalıdır. Refrakterlerin bir diğer sınıflandırma biçimi ise ergime sıcaklığına göre yapılmasıdır, bunlar 1600-1800 °C arası kullanılan normal refrakterler, 1800-2000 °C arası ağır şartlarda kullanılan refrakterler ve 2000 °C üzerinde kullanılan süper refrakterler olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar.

3. REFRAKTER SANAYİİNDEKİ SON GELİŞMELER

3.1 Refrakter Sanayiinde Son Yıllardaki Gelişmeler.

Tüm refrakterlerin yaklaşık %72'si metalurji sektöründe kullanılır. Metalurji sektöründe genel dağılım şöyledir:

% 3 kok fırınlarında	% 15 sürekli döküm
% 10 yüksek fırın ve tesislerde	% 12 potalarda
% 60 çelik üretimi	

Dünya çelik üretiminin yıllara göre değişimi şöyledir [Mton].

Yıl	1976	1990	2000
Miktar	675	790	915

1990' lı yıllarda tahmin edilen ve gerçekleşen değerlere bakılırsa 2000 yılında bu rakamın oldukça altında gerçekleşmiştir. Bir ton sıvı çelik üretmek için halen ortalama 17 kg refrakter tüketilmektedir, buna göre yıllık refrakter tüketimi yaklaşık 140 milyon ton civarındadır. Gelişmiş ülkelerde kişi başına çelik tüketimi 400-730 kg, Türkiye de ise; 78 kg' dır. Geri kalmış ülkelerde ise ortalama 13 kg' dır.

1856 öncesi ancak çakı, bıçak, kılıç ve kalkan gibi ince aletler çelikten yapılabilirdi. Önce ince olarak dökme demirden dökülür, yüksek sıcaklıkta tavlayarak yabancı maddeler ve karbon yakılırdı. Karbon iyice yandığı için bunları çelik haline getirmek için sementasyon işlemine tabi tutulurdu. Kalın parçaları (ray gibi) çelikten üretmek ise imkansızdı. 1856' da Henry Bessemer silika astarlı (tuğla) ocakta sıvı demir içinden hava geçirerek C, P, S gibi istenmeyen ve Mn gibi istenilen elementleri yakmayı başardı. Çelik üretebilmek için ilave olarak karbon katmak gerekti, böylece sıvı çelik üretmiş oldu. Bu sayede, çelikten büyük kütle örneğin ray dökmek mümkün oldu, fakat üretilen raylar hala gevrek kırılıyordu. Bunu araştıran Thomas, kendi adı ile anılan yöntemi geliştirdi.

Thomas, silika astar yerine bazik karakterli dolomit astar ile cüruf yapıcı kireçtaşı kullandı. Bu sayede P ve S' ü yakmayı başardı böylece süneklik özelliğinde iyileşme oldu. Dökme demir içindeki yabancı maddelerin yanması sonucu ısı açığa çıkar ve ergime sıcaklığı 1500°C' nin üzerine çıkar ki çelik sıvı kalmaya devam edebilir.

Endüstriyel çelik üretiminde %5 fire çıkmakta idi, zamanla hurdaların artması Siemens-Martin ocaklarının gelişmesine yol açmıştır. Bu yöntemde katı çelik kütle, dışardan ısı verilerek ergitilir, fakat bu yöntem sona erdi. Eski bazı ocaklar çalışıyor ama yenileri kesinlikle yapılmıyor. Temiz ve kaliteli çelik ihtiyacı, elektro-çelik (ark ve indüksiyon) üretiminin artmasına neden oldu.

Çizelge 3.1 Almanya’da yıllara göre ocak sayılarındaki değişim .

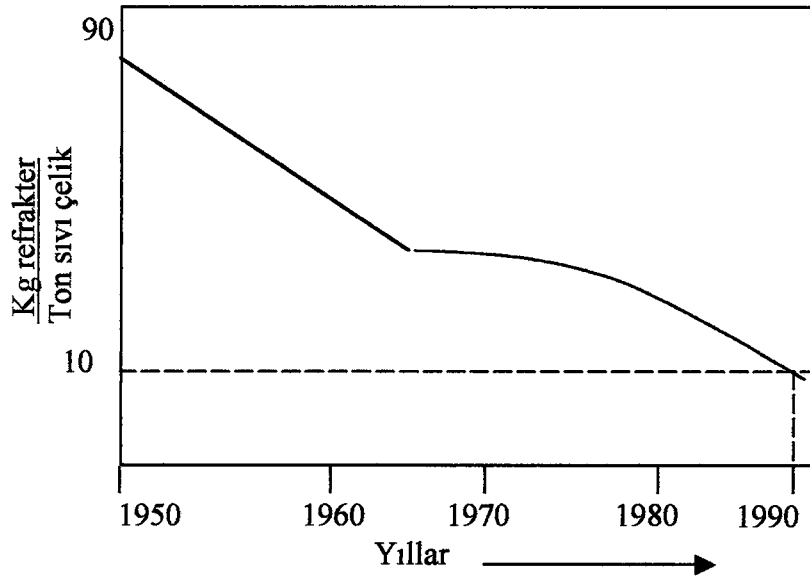
Fırın Tipi	1960	1971	1985
Bessemer	43	19	9
Siemens Martin	237	209	82
Bazık Oks. Konverter	12	247	771
Elektrik	35	85	218
Diğerleri Toplam	344	627	1088

Çizelge 3.1’ e göre Bessemer ve Siemens-Martin yöntemleri giderek azalmaktadır. Bunu karşılayan bazık oksijen konverterleri ve elektrikle çalışan çelik üretim yöntemleri çok hızlı gelişmektedir. Diğer bazı yöntemlerde de artış görülmektedir. Diğer yöntemler 3 katına çıkarken elektrikle çelik üretim yöntemleri 6, bazık oksijen konverteri ile çelik üretim yöntem 60 katına çıkmıştır. Bazık oksijen konverteri esas çelik üretim yöntemi olmuş, elektro çelik üretim yöntemleri onu takip etmektedir.

Japon Endüstriyel Standartı, ergime sıcaklığı SK 26 (1580°C)’ dan büyük olan malzemeleri refrakter olarak kabul etmektedir. Fakat bugün, ergime sıcaklığı 1580 °C’ nin altında olan çok sayıda refrakter bulunmaktadır. Bunların yanı sıra refrakter metaller de vardır. Örneğin platin gibi. Refrakterlerin çoğu oksittir, bu nedenle oksitleyici atmosferlerde yüksek sıcaklığa dayanıklıdırlar. Refrakterler yüksek sıcaklıkta çeşitli kimyasal maddelerle karşılaşılır, bunlara da dayanıklı olmak zorundadırlar.

20. yüzyılın başındaki modern endüstriyel çağın gelip çatmasına kadar, kullanımdaki esas refrakter ateş tuğlasıydı. 20. yüzyılda monolitik refrakterler gündeme geldi. Monolitik refrakterler şekilsiz taşındıklarından çok miktarda saklanma mecburiyeti yoktur. Oysa şekilli refrakterlerden, sadece bir pota için bile değişik boyutlu türlerinden ayrı ayrı stoklama mecburiyeti vardı. Bu nedenle, monolitikler avantajlıdır ve ucuzdur. II.Dünya savaşının sonunda Almanya’ da refrakter tüketimi 90 kg ref./tonsıvı çelik iken 1980’ de yaklaşık % 10’ a düşmüştür (Yaman, Ders Notları).

3.2 Refrakter Tüketimindeki Azalmanın Nedenleri



Şekil 3.1 Yıllara göre 1 ton sıvı çelik üretimi için harcanan refrakter miktarı.

II.Dünya savaşının sonunda Almanya’ da refrakter tüketimi 90 kg ref./tonsıvı çelik iken 1980’ de yaklaşık % 10’ a düşmüştür. Japonya’ da yeni yapılan refrakterlerde bu oran 7.5’ e düşmüştür, fakat ülke bazında dikkate alındığında, eski ocaklarda olduğu için ortalama refrakter tüketimi % 17 seviyesindedir.

Refrakterlerin kalitesi iyileştirildi. En önemli gelişme yüksek alüminalı refrakterlerde oldu. Kil veya kaoline boksit katıldığı zaman boksit hem refrakterliği hemde kimyasal etkileme dayanımını artırmaktadır. Magnezitte ve dolomit refrakterlerde SiO_2 ve Fe_2O_3 gibi katkı maddelerinin oranları düşürüldü.

Sıcaklık kontrolü eskiye göre daha iyi yapılmaya başlandı ve aşırı ısınmalar önlendi. Aşırı ısınmalar refrakteri çok hızlı aşınmasına neden olur. Seramik fiberler, eskiden kullanılan izolasyon malzemelerine göre çok daha hafif olduğu için fırınların ağırlıklarında ağırlık azalması gerçekleşmiştir. Kesintili çalışmaların önlenmesi, çelik üretiminde kesintili çalışmalar büyük ölçüde azaltıldı. Oksijen üretiminin ekonomik hale gelmesi ve çelik üretiminde kullanılması, oksijen üfleme, işlem süresini kısalttı. Sürenin kısılması ile üretim hızı arttı dolayısıyla fabrikanın kurulmuş büyüklüğü değişmediği halde çelik üretimi arttı ve refrakter tüketimi azaldı.

4. REFRAKTER TÜKETİMİNDE SON GELİŞMELER

4.1 Dökülebilir Refrakterler

En basit anlamda dökülebilir refrakter; iri agregaların bağlayıcı nitelikteki daha ince viskoz bir faz sayesinde bağ yapması ve genellikle çimentonun hidrasyon reaksiyonları sonucu taneler arasındaki bağ kuvvetinin oluşması sonucu meydana gelen iskelet yapı olarak karakterize edilebilir. Refrakterin niteliğine bağlı olarak matrix ve agregası birbirinden çok farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterebilir. Agregası cinsi, bağlayıcı tipi ve miktarı, tane boyut dağılımı malzemenin kış özellikleri yanı sıra nihai ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından da önemlidir. Geleneksel dökülebilir refrakterlerin çalışma sıcaklığındaki performansı açısından sınırlayıcı bir faktör en yüksek çimento oranının düşmesi sonucu düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerin gelişmesi ile birlikte bu malzemelerin şekilli refrakterler ciddi bir alternatif olduğunu görmekteyiz. Çizelge 4.1’ de özellikle Japonya da gelişen dökülebilir refrakterlerin dünya üretimindeki yerini görmekteyiz. Çimento oranının azalması düşük sıcaklıkta ergiyen fazların miktarını ve su ihtiyacını düşürmekte, bunun sonucu olarak ta malzemenin fiziksel ve mekaniksel özellikleri artmaktadır (Durmuş, 1998).

Çizelge 4.1 Dünya Refrakter Üretimi ($\times 10^6$ ton), (Durmuş, 1998).

Ülke	Yıl	Şekli	Şekilsiz	Toplam
Avrupa Birliği	1988	3,10	1,80	4,90
	1995	3,00	1,90	4,90
Almanya	1988	1,07	0,73	1,80
	1995	1,09	0,55	1,64
Japonya	1988	0,95	0,80	1,75
	1995	0,71	0,86	1,57
USA	1989	1,33	1,18	2,50
	1993	1,27	1,00	2,30
Rusya	1991	3,41	1,71	5,12
	1994	3,11	1,56	4,67

Şekli refrakterlere kıyasla şekilsiz refrakterlerin termal şok dayanımları daha yüksektir. Bunun nedenlerinden biri sinterleşmenin sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru değişmesidir. Sıcak yüzde sinterleşmesini tamamlayan bölge 1-2 cm kalınlığındadır.

Dökülebilir refrakterler en genel anlamda, döküm yolu ile şekillendirilen tüm monolitik refrakterleri kapsar. Dökülebilir refrakter üretiminde refrakter agrega ve kalsiyum-alüminat esaslı harç kullanılmaktadır. Uygulama şekli porland çimentosuna benzediğinden refrakter betonda denilmektedir. Dökülebilir refraktreler, kaba ve ince taneli refrakter agregalarla kalsiyum-alüminat harcının uygun oranda karıştırılması ile üretilirler. Eğer agrega serbest nem içerirse, kalsiyum-alüminat harcı, su ile reaksiyona girer ve refrakterin kalitesi düşer, bu nedenle çok iyi kurutulduktan sonra karıştırılmalıdır.

Dökülebilir refrakterlerin ısı iletkenliği $0,4-1,2 \text{ g/cm}^3$ arasında doğrusal, daha yüksek yoğunluklarda is parabolik değişme gösterir. Isı yalıtım gücü belirli bir duvarı, daha yüksek yoğunluklu refrakter den yaparsak hem duvar kalınlığı hemde maliyeti artar. Şekillendirme suyu top testi ile tayin edilir, sudaki değişme mukavemeti düşürür (Yaman ve Topuz, 1991).

4.1.1 Dökülebilir Refrakterlerin Özellikleri

Dökülebilir refrakterlerin üretiminde kullanılan kalsiyum alüminat çimentoları;

Fondu

Secar 50/51

Secar 70/71

Secar 80 ve Alcoa CA 25' tir.

Ergime sıcaklıkları sırası ile 1270, 1440, 1700, 1750, 1770 $^{\circ}\text{C}$ ' dir. Secar 80 ve Alcoa CA 25' nin bileşenleri birbirine çok yakındır. Secar' lardaki 50, 70, 80 rakamları alümina oranlarını gösterir. Fondu da ise % 39 alümina ve % 16,5 Fe_2O_3 vardır (Yaman, 1996). Dökülebilir refrakter malzemeler katı taneler ve bunlar arasındaki boşluklardan ibaret yapılar olarak düşünülebilir. Refrakter karışımlarda taneler arası boşluk hacimleri şu şekilde sınıflandırılabilir;

- ❖ $> 1 \text{ mm}$ boş hacimler (çatlak, boşluk)
- ❖ Tüm boşluğu çevreleyen hacimler
 - ♣ $>25 \mu\text{m}$ çapındaki kaba boşluklar
 - ♣ $25-0.1\mu\text{m}$ çapındaki ince boşluklar
 - ♣ $1-100\mu\text{m}$ çapındaki mikro boşluklar
- ❖ $< 1 \mu\text{m}$ çapındaki nokta hacimler (Durmuş, 1998).

Dökülebilir refrakterlerin temel bileşimlerinde esas olarak kalsiyum alüminat (CA ve CA₂, C = CaO ve A = Al₂O₃) kullanılır. Kalsiyum alüminat, dökülebilir refrakterlerin bir tipi olan yüksek alüminalı çimentoların da yapısını oluşturur. Kalsiyum alüminat çimentosunun yapısında değişik fazlar bulunmaktadır. Çizelge 4.2' de kalsiyum alüminatı oluşturan hammaddelerin standart kimyasal analizleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Kalsiyum alüminatı oluşturan hammaddelerin standart kimyasal analizleri

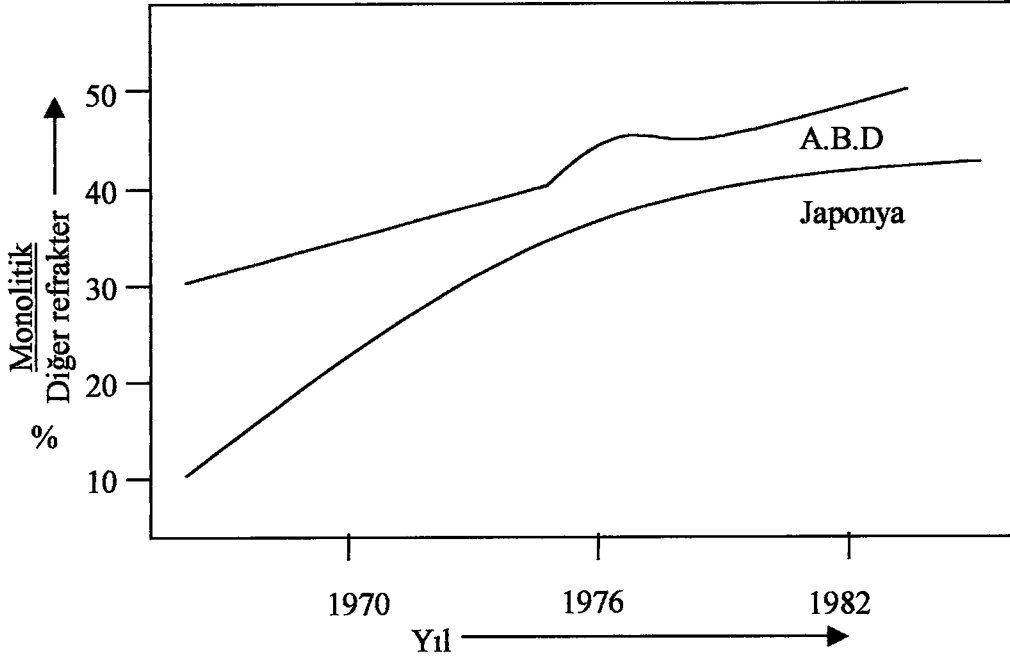
	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ +FeO	Al ₂ O ₃ +TiO ₂
Fondu	45-48	37,0-39,5	4,0-7,0	5,0-9,0	-
Secar 50/51	80,5-53,0	37,0-39,0	4,0-5,5	-	50,5-56,0
Secar 70/71	70,0-72,7	26,7-29,2	-	-	-
Secar 80	79,5-82,5	16,5-19,0	-	-	-

4.1.2 Dökülebilir Refrakterlerdeki Yeni Gelişmeler

Dökülebilir refrakter teknolojisinde 1980 ve 1990 arasında önemli gelişmeler olmuştur. Dökülebilir refrakter üretici ve tüketicileri bu refrakterlerin fiziksel davranışlarını ve termo mekanik özelliklerini incelediler. Dökme demir ve çelik üretiminde son gelişmeler nedeni ile bu alanlarda kullanılan refrakterler giderek şiddetli şartlara maruz kalmaktadırlar. 1980 ve 90 arasında yeni ve kalitesi geliştirilmiş hammaddeler kullanılmaya başlandı (Yaman, 96).

Dünyanın her tarafından yeni sentetik ve grog hammaddeleri gelmektedir. Bunlardan özellikle Çin ve G.Amerika çok önemlidir. Amerika' da yerli boksitlerin kalitesi iyileştirilmiş ve dökülebilir refrakterlerin kalitesi de artmıştır. Alkali oranının düşürülmesi dökülebilirlerin sıcakta mukavemetinin artmasına ve 1540 °C' de pişirildiği zaman ki pişme küçülmesinin azalması, agrega ile onu saran faz arasındaki sorunları, iç gerilmeleri azalttığından 1980 sonrası kullanıma sunulan agrega ile hazırlanan refrakterlerin mukavemetinin artmasına neden olmuştur.

Titreşimle yerleştirme çok yaygınlaştı ve standart hale geldi. Büyük boyutlu uygulamalarda örneğin alüminyum fırın hazneleri, tandiş ve kepçelerde bağlantı olmaksızın sürekli yerleştirme gerekmektedir. Buralarda 20 tondan fazla düşük çimentolu dökülebilir refrakter kullanılmaktadır.



Şekil 4.1 Monolitik refrakterlerin toplam refrakter üretimine oranının değişimi

Dökülebilir refrakterler çimento gibi torbada satılırlar. Plastikler, plastik halde torbalarda satılırlar. Şekillendirilerek kullanılırlar, ucuzdurlar. Şekil 4.1' de monolitik / diğer refrakter oranı verilmiştir. Toplam refrakter tüketimindeki payları %33' tür (Yaman, 1996).

4.1.3 Dökülebilir Refrakterlerin Hazırlanması

Boşaltmak suretiyle yerleştirilen tüm monolitik refrakterler, dökülebilir refrakter olarak adlandırılır. Çok genel bir değerlendirmeye, dökülebilir refrakterlerin hazırlanması ve yerleştirilmesi inşaat betonuna benzer. Dökülebilir refrakterlerde kum yerine grag kullanılır. Bazı dökülebilir refrakterler özel olarak hazırlanır ve tabanca ile püskürtülerek uygulanabilir. Kullanılan grog (agrega) sıcaklığa dayanıklı olmalıdır. Alumina en ideal agregadır. Çünkü yüksek sıcaklıkta yüksek alüminalı çimentoyla reaksiyona girerek daha yüksek sıcaklıkta ergiyen fazlar meydana getirir, fakat maliyet açısından pahalı olduğundan bunun yerine ateş tuğlası ve curuflar agregası olarak kullanılır (Parker ve Sharp).

Kaba ve ince taneli agregalar uygun oranda yüksek alüminalı çimentoyla karıştırılır. Sınıflandırılmış agregalar arasında yaklaşık % 45 boşluk vardır, % 80 kaba % 20 ince taneli karıştırılırsa gözenek oranı en aza düşer. Fakat uygulamada orta büyüklükteki taneleri de tüketebilmek için üçlü karışımlar tercih edilir (Norton, 1974).

Yoğun karışımlarda gözenek oranı düşük olacağından gözenekleri dolduracak yüksek alüminalı çimento tüketimi de az olacaktır. Eğer agrega serbest rutubet içerirse, yüksek alüminalı çimento ile karıştırıldığı zaman reaksiyonlar derhal başlar. Refrakter beton hazırlanmadan önce kalitesini bozar. Bu nedenle kesinlikle kuru agrega kullanılmalıdır.

Dökülebilir refrakterlerin termal, kimyasal ve toz özellikleri önemlidir. Torba içinde kullanıma sunulan dökülebilir refrakterlerde, taşıma sırasında ince ve kaba taneler birbirinden ayrılabilir. Böyle bir durumda döküm yapıldığında segregasyon meydana gelebilir. İnce tanelerin bulunduğu yerde borik asit ve benzeri bağlayıcılar fazla olacaktır. Dolayısıyla mekanik özellikler ve porozite heterojen olacaktır (Norton, 1974).

4.1.4 Dökülebilir Refrakterin Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Dökülebilir refrakterlerin su ile karıştırıldıktan sonraki yumuşaklığına kıvam denir. Uygun kıvam veya diğer adıyla top testi ASTM C 860' a göre yapılmaktadır. Uygun kıvamda su içeren dökülebilir refrakter kütleyi avucumuz içinde sıkığımızda yırtılmadan parmaklarımızın arasından akar. Eğer su oranı bu miktardan az ise, plastik kütlenin yüzeyinde yırtılmalar oluşur. Su oranı gereğinde fazla ise kendiliğinden akma gösterir, fakat bu yöntemin hassasiyeti düşüktür (Nishikawa, 1984).

Düşük miktarda su katıldığında hidrasyon çabuk tamamlanır, fazla su katıldığında ise kuruma sonunda fazla gözenek oluşacak ve mukavemet düşecektir. Top testi standart cihazlarla tayin edilmelidir. Tespit edilen su bir defada katılmalıdır, su katıldıktan sonra 3-5 dk. karıştırma yapılmalıdır, uzun süre karıştırma heterojenleşmeye neden olur. Çoğu ticari dökülebilir refrakterlerde yüksek alüminalı çimentonun hidrasyon suyu % 3-10 arasında değişir. Fakat pratikte bunun iki katı su katılır. Fazla su akıcılığı sağlamak için gereklidir. Suyun bir kısmı, agreganın gözeneklerini doldurur, bu durumda katı taneler süspansiyon halindedir ve süreksizdir, su ise sürekli. Eğer gereğinden fazla su kullanılırsa daha ağır taneler yani agregalar dibe çöker ve yüksek alüminalı çimento dahil olmak üzere ince tanelerden ayrılır. Fazla su dökülebilir çamurun tepesinde toplanır (Yaman, 1994).

Katılaşmanın çok hızlı olduğu yaz aylarında dökülebilir refrakterler su ile karıştırıldıktan sonra güneş ışığı altında bırakılmamalıdır, katılaşma sırasında açığa çıkan ısı, sıcaklığı yükseltir. Sıcaklık yükseldiği için reaksiyon hızlanır ve meydana gelen genleşme sonucu

çatlama riski ortaya çıkar. Böyle bir sorunla karşılaşmamak için döküm işleminden sonra refrakter betonun üzerine ıslak bez veya üstübu konur ve açığa çıkan ısı atılır. Beton yüzeyi rutubetini korumuş olur.

Katılma hızını sıcaklık, katılma zamanı ve çeşitli katkı maddeleri etkiler. Katkı maddeleri mukavemeti de önemli ölçüde etliler. Hızlandırıcılar; Na, K ve Ca' nın hidroksitleri, Na ve K silikatları, ağırlıkça % 0.5-1 sülfatlar ve nitratlar, lityum tuzları, trietanolamit ve hidrate olmuş refrakter beton sayılabilir. Yavaşlatıcılar; Mg ve Ca hidroksitleri, Na, K, Ba, Mg ve Ca klorürleri, % 0.25'in altında sülfatlar ve nitratlar, boraks, Pb tuzları, fosfatlar, glikoller, gliserin, şeker, un, nişasta, deniz suyu örnek sayılabilir (Yaman, 1994).

Katılma sırasında refrakter beton içinde su donarsa, hidratasyon reaksiyonları durur. Buzun oluşmasıyla meydana gelen mukavemet buzun erimesiyle düşer. Su donarken hacimce % 9 artış gösterir. Bu genleşme, katılmış kısmın yapısını bozar ve mukavemeti zayıflatır. Dökülebilir refrakterlerin katılma öncesi ve katılma esnasında donmaya maruz bırakılmamalıdır.

Yüksek alüminalı çimento kristal bağı sularını 100-500 °C' de kaybeder. Bu sıcaklık değeri soğuk mevsimlerde 100-200 °C olur. Kurutma ile iç buhar basıncı yükselir, eğer kurutma sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselirse su buharı basıncı da yüzeyde yükselir ve patlamaya neden olur. Patlama, doğrudan katılma sıcaklığına bağı olduğundan kurutma esnasında malzemelerin katılma sıcaklıkları göz önünde bulundurulur. 15 °C' nin altında katılanlar 540 °C' nin altında, 20 °C' nin üzerinde katılanlar 1300 °C' ye çıkar (Nishikawa, 1984).

Dökülebilir refrakterler kullanılacağı yerde pişirilirler. İlk ısıtma aynı zamanda pişirme yerine geçer. Bu ısıtma ile malzeme kristal bağı suyunu kaybedeceği için çok yavaş yapılmalıdır. Dökülebilir refrakterin önemli avantajlarından biride geleneksel refrakterler gibi kullanım sıcaklığının üzerinde pişirilmelerine gerek olmayışıdır. Refrakterin oda sıcaklığında gösterdiği mukavemet soğuk mukavemet, sıcakta gösterdiği mukavemete ise sıcak mukavemet denir. 100-500 °C arasında kristal bağı su atıldığı ve bunun hemen ardından C₁₂A₇ sıcaklıkla kayboldüğundan soğuk mukavemet düşer. Bu fazın azalmasını takiben CA, CA₂ fazları artar, 1000 °C üzerinde sinterlenme başlar, buna bağı olarak mukavemette artma olur. 1000 °C' nin üstündeki sıcaklıklarda sıvı faz oluşumu başladığından (sıcak) mukavemet tekrar düşer (Parker ve Sharp).

4.2 Yüksek Aluminalı Çimento Üretimi

Yüksek aluminalı çimento iki şekilde üretilmektedir, bunlar ergitme ya da pişirmedir. Fırın olarak ergitmede yüksek fırın, uzun alevli fırın, döner fırın ve elektrikli fırın, pişirmede ise döner fırın kullanılmaktadır. Hammadde olarak boksit ile kireç taşı kullanılmaktadır. Almanya hariç tüm ülkelerde daha ucuz olması nedeniyle CA ve alümina-ferrit karışımı olan Fondu çimentosu kullanılmaktadır (Nishikawa, 1984).

Çizelge 4.3 Değişik ülkelerde yüksek alüminalı çimento' nun tipik bileşimleri

ÜLKE	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	FeO (%)
Almanya	5-8	48-51	39-42	0.1	<1
Çekoslovakya	8-9	40-41	36-37	5.6	5-6
ABD	6-8	40-45	37-42	12-14	-
Yugoslavya	6-8	38-40	36-39	8-10	4-7
İspanya	4-5	36-38	39-42	10-12	4-5
İngiltere	4-5	38-40	36-39	8-10	5-7
Fransa	3.5-4.5	38-40	36-39	9-11	4-6

Yılda yaklaşık 80.000 ton boksit, Muğla-Milas' tan ABD' ye, 50.000 ton da Fransa' ya ihraç edilmektedir. Buna karşılık ihraç fiyatı 24 dolar/ton iken ithal ettiğimiz düşük demirli boksitin fiyatı ise 140 dolar/ton' dur (Yaman, 1994).

Boksit ve kireç taşı kırılıp 100 mm. altındaki tozlar peletlenerek kullanılır. Pişirme için toz kömür kullanılır ve miktarı da yüksek aluminalı çimentoların % 20' si kadardır. Pişirme sırasında çıkan buhar ve karbondioksitin etkisiyle 1600 °C' ye kadar ısınır.

Çizelge 4.4 Bazı ticari yüksek alüminalı çimentonun kimyasal bileşikleri

Bileşim	A	B	C	D	E
SiO ₂	3.1-8.3	4.7-4.6	2.5-3.4	0.2	0.1-0.2
TiO ₂	2-2.1	2.2-2.1	3.2-2.1	-	-
Al ₂ O ₃	42.1-41.3	47.6-52.3	56.7-56.2	73.4-71.1	80.2-79.5
Fe ₂ O ₃	15.6-11.3	9.5-5.3	0.9-1.9	0.4-0.1	0.2
CaO	37.5-35.2	34.8-35.3	35.7-35.3	24.5-23.5	17.6-17.4

“A” grubunda demiroksit oldukça yüksektir, adıyla Fondu'dur. “B” grubu biraz daha az demirlidir. “C” grubu yaklaşık % 70 alümina içermektedir ve Lafarge tarafından Secar 71 adıyla satışa sunulmuştur. “E” grubuysa % 80 alümina içermektedir ve saflığı yüksektir (Nishikawa, 1984).

4.2.1 Yüksek Alüminalı Çimentoların Bileşik Yapısı

4.2.1.1 Alüminatlar ve Silikatlar

C_3A bileşeni Portlant çimentosu olmasına rağmen yüksek alüminalı çimentoda görülmez. CA_6 yüksek alüminalı çimento' da bulunmaz fakat çimento yüksek sıcaklıkta ısıtılmış korundum agregalar ve yüksek alüminalı çimentolardan meydana gelmişse oluşabilmektedir. Korundum agregası yoksa, yüksek alüminalı çimento' ta CA_6 oluşmamaktadır.

CA_2 oluşumu, yüksek (Al_2O_3 / CaO) oranlı yüksek alüminalı çimento' da ya da füzyon işlemi esnasında tamamen homojenitenin oluşmadığı durumlarda saptanabilmektedir. (Hallstedt, 1990). Alüminalı çimentonun bileşenindeki ana mineral CA' dır, alüminalı çimento aynı zamanda bünyesinde $C_{12}A_7$, CA_2 ve/veya C_2AS , yada C_4AF , C_6A_4fS veya cam fazı bulundurulur. Ayrıca bileşiminde %10 veya daha fazla demir oksiti $CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3$ sistemini bulundurulur. Alüminalı çimento oldukça yüksek oranda silika bileşimi olan C_2AS (gehlenit) fazını da içerir. İndirgeyici ortamda C_6A_4fS fazı oluşabilir.

Çizelge 4.5 Sanayide kullanılan çeşitli alumina çimentosu bileşim yüzdeleri

İmalat prosedürü	CA	$C_{12}A_7$	Diğer mineraller
Reverber fırın, ergitilmiş	42	5	53
Döner fırın, sinterlenmiş	60	4	36
“	61	1,5	37,5
“	73	2,5	24,5
EAF, ergitilmiş	69	0	31
“	57	2	41

4.2.2 Bileşenlerin Karakteristik Özellikleri

Yüksek alüminalı çimentolarda alumina oranı arttıkça ergime sıcaklığı da artmaktadır. CA_6 anormal ergiyen bileşiklerarası bileşiktir. $CaO-Al_2O_3$ sisteminin termodinamik özellikleri, metalurjik curuflar, seramik malzemeler, çimentolar ve jeoloji gibi konularda çok önemlidir. CA_6' nın oluşum serbest enerjisi en düşük, dolayısıyla en kararlı, CA' nın oluşum serbest enerjisi en yüksek dolayısıyla en kararsız bileşiklerarası bileşiktir (Yaman, 94).

Çizelge 4.6 Alüminalı çimentonun bileşenlerinin karakteristik özellikleri

Testler ► Mineraller ▼	Kimyasal kompozisyon(%) $CaO, Al_2O_3,$ Fe_2O_3, SiO_2	Ergime Noktası (°C)	Kristal sistem	Zaman saat:dk. Baş. Son.	Yoğunluk (g/cc)
$C_{12}A_7$	48,6 51,4 -- --	1415-1495	Kübik	0:05 0:07	2,69
CA	35,4 64,6 -- --	1600	Monoclinic (Triclinic)	7:00 8:00	2,98
CA_2	21,7 78,3 -- --	1750-1765 (Ayrışma)	Monoclinic	18:00 20:00	2,91
C_2AS	40,9 37,2 -- 21,9	1590	Tetragonal	--	3,04
C_4AF	46,2 20,9 32,9 --	1415	Orthorombic	--	3,77

• $C_{12}A_7$

$C_{12}A_7$ genelde yüksek alüminalı çimentolarda düşük oranlarda bulunur fakat miktarı, çimentodaki CaO/Al_2O_3 oranının artmasıyla artmaktadır. Bileşimin hidratasyonu çok hızlı olmaktadır ve çabuk sertleşir, eğer miktar belli bir değerin üzerindeyse, çimento hızlı bir şekilde çökmeye başlayabilir. Eğer çimento normalden fazla alkali içeriyorsa bu işlemin şiddeti artabilir. Ergimesi ve sertliği düşüktür bu nedenle $C_{12}A_7$ ayrıca üretilip yüksek alüminalı çimento' da sertleşme hızını ayarlamak için özel olarak az miktarda katılmaktadır. Böylece dökülebilirlerin katılma süresini düşürmektedir (Singh, 1980,1982).

En hızlı katılan faz $C_{12}A_7$ ' dir. Su ile karıştırdıktan 5 dk. sonra katılma başlar, 7 dk. sonra katılma sona erer. Bu fazın ergime sıcaklığı 1415 °C olup çok düşüktür. Fakat katılma hızını artırmak için yüksek alüminalı çimentolar katılır. $C_{12}A_7$ fazının oluşumu için 1000 °C' de yaklaşık 20 dk. beklemek gerekir. Daha yüksek sıcaklıklarda bekleme yapılırsa CA fazıda oluşur. $C_{12}A_7$ fazı seramik yapıda istenmez (Yaman, 94).

Yüksek alüminalı çimentoların üretimi sırasında pek oluşmaz. Bu fazın hızlı katılması, diğer fazlar için çekirdek oluşumu sağladığından, yüksek alüminalı çimentoların katılma hızını artırıcı etki yapar. Bu nedenle $C_{12}A_7$ özel olarak üretilir ve yüksek alüminalı çimentolara az oranda katılır (Yaman ve Akdoğan, 2000).

- CA

Yüksek alüminalı çimentodaki en önemli bileşiktir. Nedeniyse malzemeyi dayanıklı yapmasıdır, çünkü bileşenler arasında en yüksek sertliğe ve oldukça yüksek ergime noktasına sahiptir. Özellikle çökmesi yavaş olup eriyik halde soğutulması hızlıdır fakat sonradanda çok büyük bir hızla sertleşmektedir. Eriyik çimento bileşiğin yavaşça soğutulmasıyla CA kristallerinin oluşmasını sağlayan erken safhalardaki maksimum hidrolik oluşumu elde edilir. Yüksek alüminalı çimentolar çok hızlı soğutulurlar böylece ürün tamamen cam yapı olur, son ürün çimento hidratasyonuna uğrar ve çok yavaş sertleşir, eğer suda tutulmuşsa kopma mukavemeti normale yaklaşır (Robson, 1962).

Bileşenler arasında en yüksek mukavemetli olan CA' dır ve ergime sıcaklığı göreceli olarak çok yüksektir. Bu nedenle yüksek alüminlı çimentoların en önemli bileşiğidir. Katılma başlama zamanı uzun fakat ondan sonra katılmanın sona ermesi için geçen zaman kısadır. Yüksek alüminalı çimentolarda önemli miktarda bulunduğu için bulunduğu refrakterlerin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. CA' nın optimum oluşma sıcaklığı 1000 °C' dir. Bu sıcaklıkta bir miktar amorf faz ve $C_{12}A_7$ fazı oluşur. 1500 °C' de sinterlenirse yoğunluk teorik yoğunluğunun % 95' ine erişir, bu sıcaklıkta bir miktar sıvı faz oluşur. Faz türleri ve miktarları sıcaklığa bağlı olduğu kadar belirli bir sıcaklıkta bekleme zamanına da bağlıdır. CA bileşimine uygun hazırlanan bir karışımda 1300 °C' de 30 dk. sonra eşit miktarda CA ve $C_{12}A_7$ görüldüğü halde 2 saat sonra hemen hemen sadece CA fazı kalmaktadır (Yaman, 94).

Çimento özelliğini bu bileşik kazandırır. Ergitilerek üretilen türler, ergiyik haldeyken hızlı soğutulmuşsa bunların, dökümden sonraki setleşme hızları düşüktür. Fakat sertleşmeye başladıktan sonra hızlı katılırlar. Üretim sırasında ergiyik haldeyken yavaş soğutulursa CA' ların tamamı kristalleşir. Eğer ergiyik halde suya dökülürse, tümü camsı faz oluşur ve yüksek alüminlı çimentonun sertleşmesi çok yavaş olur (Yaman ve Akdoğan, 2000).

- CA₂

CA₂ 1700 °C' nin üzerindeki sıcaklıklara dayanıklıdır fakat bunun yanında katılma süresi fazlasıyla uzundur. Buna ilaveten oldukça düşük sertliğe sahiptir. Alüminalı çimentoda ana bileşim olarak rol almaz fakat yardımcı mineral olarak bulunur. Saf bileşik düşük sıcaklıklarda su ile çok yavaş reaksiyona girer fakat hidratasyon ve dayanıklılık artışı yüksek

pH ağırlıklı solüsyonlarla yada kireç-su ile hızlandırılabilir. Saf CA_2 hidratasyonu bir kere başlamasıyla, hızda buna bağlı olarak hidratasyon sonuçlarının artan konsantrasyonu ile artar. Aynı nedenden dolayı monokalsiyum alüminat mevcudiyetiyle uygun hızlarda hidratasyon olur (Robson, 1962).

CA_2 1770 °C' ye kadar dayanır fakat katılma çok uzun sürer. Buna ilaveten mukavemeti göreceli düşüktür. Yüksek alüminalı çimentolarda esas faz olarak bulunmaz ancak az miktarda yardımcı faz olarak bulunur CA_2 ' nin oluşma sıcaklığı 1150-1200 °C arasındadır. 1550-1600 °C' de sinterleşerek, yoğunluk teorik yoğunluğun % 96.5' ine ulaşır (Yaman, 94). Oda sıcaklığında su, ile çok yavaş reaksiyon girer, fakat kireç-su veya yüksek pH değerleri hidratasyonu ve mukavemetin gelişme hızını artırır. Saf CA_2 ' nin hidratasyonu bir defa başladığı zaman reaksiyon hızlanır ve mono kalsiyum alüminat bulunduğu zamanda reaksiyon hızlanır (Yaman ve Akdoğan, 2000).

- **C_2AS (Gehlenite)**

CAS sisteminde en önemli kristal fazlar; CA , CA_2 , $C_{12}A_7$, C_2AS ve C_2S 'dir. Yüksek alüminalı çimento' da gehlenite yüksek silika durumlarında yapı olarak ortaya çıkar. Saf gehlenite oldukça yavaş reaksiyona girer (eğer suyla beraberse hiç gerçekleşmez). Bununla beraber, cam halindeyken daha fazla hidrolik oluşumuna sahip olduğu gözlenmiştir ve kireç - su ile hidrate olur. Gehlenite melilit serilerinin bir üyesi olup magnezyum oksit, manyetit ve hematit içermektedir. Bundikov ve Tcherkesova gehlenite aktivasyon enerjisinin kristal yapı modifikasyonu ile olduğunu ortaya koymuşlardır. Böylece yüksek alüminalı çimentoda bulunması hidratasyon ve dayanım artışına neden olmaktadır (Robson, 1962).

Silika oranı yüksek olan yüksek alüminalı çimentolarda önemli miktarlarda bileşik olarak bulunur. Saf gehlenit su ile yavaş reaksiyona girer. Gehlenitin yüksek oranda bulunması, yüksek alüminalı çimentoların sertleşme hızını düşürür (Yaman ve Akdoğan, 2000).

Bununla beraber bazı hidrolik aktiviteler çok yavaş olur ve yüksek alüminalı çimento' da yüksek miktarlarda bulunması hemen hemen kaçınılmaz olarak normal bir çimentonun karakteristiği olan hızlı katılma özelliklerinde bir seri reaksiyona neden olur. Bu yüzden yüksek alüminalı çimento' daki silis miktarı düşük tutulur. C_2AS amorf bölgedeyken veya

kireçle temas etmeden hidratasyana eğilimi çok azdır. Bu bileşik yüksek alüminalı çimentonun isteksiz bileşiklerindendir (Yaman, 94).

- β - C_2S

Bu bileşik çoğu kez küçük dairesel taneler veya yüksek alüminalı çimentonun ötektik kısımlarındaki curufları olarak meydana getirilmiştir, özellikle %5' den fazla SiO_2 içermezler. Yüksek silikalı curuflarda gehlenitin (C_2AS) gittikçe artan bir miktar olasılığın yüksekliği fark edilmiştir. Bu bileşikler silika içeren yüksek alüminalı çimentoların ötektik kısımlarında küçük yuvarlaklar şeklinde çok sık görülür. Yüksek silikalı klinkerlerde gehlenit genellikle görülür (Robson, 1962).

- **Demir İçerikli Bileşikler**

Yüksek demir içerenler diğerleriyle aynı mukavemet özelliğini göstermektedir. Hematitin yüksek alüminalı çimentoda bulunabilen CF ve C_2F 'i oluşturduğu ihtimali yüksektir. C_2F ile C_2A arası katı çözülmesi C_6AF bileşiğine kadar büyür ve yüksek alüminalı çimentodaki hematit C_6AF_2 ve C_6A_2F arası bileşikleriyle CAF şeklinde birleşir. Morive Tagani, bu katı bileşiklerin 20 °C' deki hidratasyon sonuçlarını ortaya çıkarmıştır (Robson, 1962).

Manyetit oluşum kombinasyonları biraz daha belirsizdir fakat bir kısım yüksek alüminalı çimentolarda vüstit olarak serbestçe oluşabilir ve Fe_2O_3 ile birleşmesiyle curuftaki cam fazın en önemli elemanını sağlar. Fe_3O_4 mevcudiyetinin belirtilmesi camın magnetik doğasıyla yapılmaktadır. Sundings 1938' te yüksek alüminalı çimento' da lifli malzemenin kireç ve alümina dışında diğer oksitleri içerdiğini açıklamıştır (Yaman, 94).

- **Fondu**

Fondu (yüksek demirli çimento) refrakter malzeme olarak oldukça iyidir, çünkü yüksek sıcaklıkta zamanla faz dönüşümü göstermez. PCE değeri 1270 °C olduğu halde uygun agrega kullanılarak 1400 °C' ye kadar kullanılmaktadır (Yaman, 94). Demir oksit oranı %15-18 arasında değişir. Üretiminde doğada bulunan yüksek oranda demir oksit için hammadde kullanılır. Bu nedenle diğer yüksek alüminalı çimentolara göre çok ucuzdur.

Fakat portland çimentosuna göre pahalıdır. Çünkü hammadde o kadar yaygın değildir ve yüksek alüminalı çimento klinkerini öğütmek daha zordur. Fondu' nun mukavemet değeri pek çok değere bağlıdır;

- * Agreganın bileşimine,
- * Su-çimento ve çimento-karışım oranına,
- * Karıştırma zamanına ve ekipmanına,
- * Ortam sıcaklığına.

Yüksek alüminalı çimento ile portland çimentosunun priz zamanı yaklaşık aynıdır. Fakat portland çimentosunun basma dayanımı 24 saatte çok yavaş artışı halde fondu' nun basma dayanımı çok hızlı artmaktadır. Fondu yerleştirildikten ve gerekli işlem yapıldıktan sonra servise alınır (Yaman ve Akdoğan, 2000).

• Secar 50/51

Alümina oranı yaklaşık %50'dir. Temel bileşeni CA' dır ve bu onu refrekterler için ideal bağlayıcı yapar. Secar 51 döküm dizayn edilmiştir, bu nedenle karıştırma işleminde 1 saat sonra bile mükemmel akıcılık gösterir. Kısmen CA içerdiği için mekanik özellikleri mükemmeldir. Demiroksit oranının düşük olması nedeni ile, CO içeren redüktan atmosferlere karşı direnci iyidir. Özellikle püskürtme ve döküm metotlarına elverişlidir. Secar 51 herhangi bir katkı maddesi içermez. Çoğu şartlarda özelliklerini bir yılın üzerinde korur, refrakter karışımları için tavsiye edilir (Yaman, 1995).

• Secar 80

Temel minerali CA' dır . Bu nedenle hem mukavemeti iyidir hem de iyi bir bağlayıcıdır. Pişirme sırasında CA, alümina ile birleşerek CA₆ bileşikleri oluşturur ki bu bileşik refrakterin ergime sıcaklığını artırıcı etki yapar. Düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerin üretiminde kullanılırlar (Yaman, 1995).

4.2.3 Yüksek Aluminalı Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Alçı, kireç, portlant çimentosu ve organik maddeler yüksek aluminalı çimentonun katılaşma süresini önemli derecede etkiler. Bu nedenle katılaşma zamanını ayarlamak için katkı maddeleri katılmaktadır. Yüksek aluminalı çimento ve portlant çimentosunun katılaşma

zamanları birbirine çok yakındır. C_5A_3 birkaç dakikada katılaşır fakat işlenebilmeyi kötüleştirir, CA oldukça yavaş katılaşır. Yüksek aluminada C/A oranı arttıkça katılaşma hızı artar. Yapıda cam faz oranının artması katılaşma hızını düşürür. Eğer iki çimento karıştırılırsa, katılaşma zamanı, oranlarına bağlı olarak aza, kısalır. % 20-60 arası portlant çimentosu içeren karışımlar çok hızlı katılaşır. Portlant çimentosunda açığa çıkan kireç, yüksek alüminalı çimentodaki CA ile birleşerek C_4A hidratları meydana getirir. Bu da katılaşma hızını artırır. Alçının CA ile birleşmesi, geciktirici etkinin ortadan kalkmasına neden olur ve böylece hızlı katılaşan çimento elde edilmiş olur (Neville, 1981).

Su girişini önlemek için veya gelgitler arasındaki geçici konstrüksiyonlar için hızlı katılaşan çimentolar büyük bir önem arzeder. Uygulamada iki çimento birbiriyle temas etmemelidir. Eğer yüksek alüminalı çimento önce dökülmüşse 24 saat sonra diğeri, portlant çimentosu önce dökülmüşse 3-7 gün sonra diğeri dökülmelidir. Yüksek alüminalı çimento üretilirken hammadenin tamamı eritilmektedir. Bu nedenle yüzeyi portlant çimentosundan daha düzgündür (Neville, 1981).

Yüksek alüminalı çimento mukavemetinin zamana bağlı değişimi konusunda farklı görüşler vardır. Neville' ye göre ilk 6-8 saat içinde yeteri kadar mukavemet kazanır, ilk 24 saatte en yüksek mukavemetin % 80' ine erişir. Başka bir literatüre göre yüksek alüminalı çimentonun mukavemeti portlanta göre daha yavaş artış göstermekte ve 4 hafta sonraki mukavemetleri birbirine çok yakın olmaktadır (Nishikawa, 1984).

Renk

İçerdiği boksit türüne göre renklerde değişiklik görülmektedir. Çimento tozunun rengini, içerdiği demir bileşimlerinin oksidasyon durumu ve miktarı belirlemektedir. Düşük demir içeriklilerin rengi açıktır. Yüksek alüminalı çimentonun potansiyel dayanımıyla renginin alakası yoktur (Robson, 1962).

Yoğunluk

Yüksek alüminalı çimentoda yoğunluk 3–3,25 arası değişmektedir. Demir içeriklilerin yoğunluğu yaklaşık 3,7' den 4' e kadar değişir.

Alümina ve silis oranı 3' den düşük olmalıdır ve yüksek alüminalı çimentoların yoğunlukları içerdikleri demiroksitle ilgilidir. Termal iletkenlik yoğunluğa bağlı olarak artar ve değişim genellikle paraboliktir (Wallace, 1968).

Kullanıldığı Yerler

Demir-çelik endüstrisi, demirdışı metal üretimi, petrol ve petrokimya sanayi, cam ve çimento sanayinde, çekirdekli ve çekirdeksiz indüksiyon ocaklarında kullanılmaktadır. Petrokimya sanayinde çok yüksek duvarlara dökülebilir refrakter uygulanmaktadır. Aynı duvarlara şekilli tuğla uygulanmasında çok büyük zorluklar vardır. Dökülebilir refrakterler, uygulama hızının yüksekliği, maliyeti ve uygulama alanındaki esnekliği nedeniyle diğer refrakterlere nazaran caziptir. Bir fırın astarı, ticari tuğla astarlama aşamaları olmaksızın bir günde tatbik edilebilir. Kalifiye işçiye daha az gereksinim vardır (Wallace, 1968).

4.2.4 Yüksek Alüminalı Çimentonun Hidratasyonu

Yüksek alüminalı çimentonun su ile reaksiyona girip hidrat oluşturması reaksiyonu henüz tam olarak bilinmemektedir. Su ile karıştırıldıktan sonra ilk 1-6 saat içinde kireç ve alüminanın suda çözünürlüğü en yüksek seviyededir. Hidratların oluşumu arttıkça çözünürlük azalır. Suda çözünmüş kalsiyum alüminatlar daha sonra hidrat olarak çöker. CAH_{10} , C_2AH_8 , C_3AH_6 , AH_3 jel ve gibsite fazları ortaya çıkar. Oluşan bu fazların türü ve miktarı hidratasyon sıcaklığına bağlıdır. Hidratasyon sırasında önce yarı kararlı bileşikler oluşur, sonra kararlı bileşiklere dönüşürler (Nishikawa, 1984).

Uzmanlar kışın CAH_6 ' un yazın ise, C_2AH_8 ve/veya C_3AH_6 ' nın oluşma eğiliminde olduğunu ortaya koymuşlardır (Fuju vd., 1986). Katılma için kışın önemli miktarda yazın göreceli olarak daha az miktarda suya ihtiyaç vardır. Oluşan fazlar incelendiğinde bunun normal olduğu görülür. Hidratasyon reaksiyonu özetle şöyle verilir:



Burada ara kademe reaksiyonları verilmemiştir. 100 °C üzerinde kurutulduğu zaman bütün ara kademeler ortadan kalkar sadece C_3AH_6 fazı kalır. Portlant çimentosunda $Ca(OH)_2$ açığa çıkarken, yüksek alüminalı çimentonun hidratasyonunda AH_3 açığa çıkar ve yüksek alüminalı

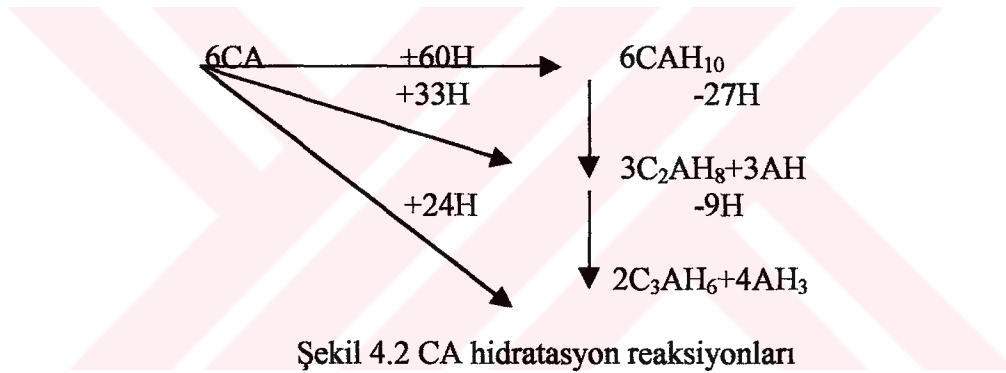
çimentoya refrakterlik özelliği kazandıran bileşik budur. Hidratların parçalanma reaksiyonları DTA, TGA VE DSC yöntemleriyle incelenmektedir. Parçalanma reaksiyonları, hidratasyon sıcaklığına bağlıdır. Düşük sıcaklıkta hidrate olan bileşikler, kristal bağlı sularını düşük sıcaklıkta, yüksek sıcaklıkta hidrate olanlar ise yüksek sıcaklıkta kaybederler (Nishikawa, 1984). Kararlı bileşik C_3AH_6 kristal bağlı suyunun bir kısmını yaklaşık $450^{\circ}C$ 'de kaybeder. AH_3 kristal bağlı suyunu $210-300^{\circ}C$ ' de kaybeder. Hidratasyondan sonra ilk olarak $C_{12}A_7$ fazı oluşur. Bu bileşik $900-1000^{\circ}C$ ' ye kadar karardır. Bu sıcaklık aralığında CA oluşmaya başlar. Secar71' de ise CA_2 oluşmaya başlar. CA ve CA_2 $1500^{\circ}C$ ' ye kadar kalırlar. Secar 80' de yaklaşık $1400^{\circ}C$ ' de CA ve CA_2 serbest alumina ile reaksiyona girerek CA_6 oluşturur, bu durumda CA kaybolur. Su / yüksek alüminalı çimento oranı arttıkça mukavemet düşmektedir. Reaksiyon için gerekli olan suyun üzerindeki su taneler arasında yer işgal etmekte, kuruma esnasında yerleri boş kalmaktadır. Bu da poroziteyi arttırmakta ve mukavemeti düşürmektedir (Nishikawa, 1984).

• C—A—H Sistemi

Çeşitli hidratların denge eğilimlerinin çalışmaları $1^{\circ}C$ ' den $250^{\circ}C$ ' ye değişen sıcaklıklarda gerçekleştirildi, fakat uygun sıcaklıklarda en uygun hidratların tamamen kristalleşmesi gibsit veya $Al_2O_3.3H_2O$, kalsiyum hidroksit ve kübik trikalsiyum alüminat hidrat $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ (C_3AH_6) olduğu söylenebilir (Robson, 1962). Hidratasyon esnasında metastabil kalsiyum alüminatın hidratasyonu hemen ortaya çıkar ve bir kere oluşmalarıyla yüksek sıcaklıklar haricinde kararlı bir şekilde kalırlar. Uzun bir süre yüksek alüminalı çimentodan üretilen esas hidratın $2CaO.Al_2O_3.8H_2O$ (C_2AH_8) olduğu düşünülmüştür. Fakat artık bu hidratın oluşumunun belirli koşullarda ortaya çıktığı halde normal hidratasyonun en önemli ürününün $CaO.Al_2O_3.10H_2O$ (CAH_{10}) olduğu bilinmektedir. Bu olgunun iddiası ilk olarak Assarson tarafından 1935' de ortaya atılmış ve düşük sıcaklıklardaki çözünürlük eğrisi de Carlson ve Buttle tarafından ortaya çıkarılmıştır. C_4AH_{19} bileşiğinin bir kısım su kaybı ile en temel hidrat olan $4CaO.Al_2O_3.13H_2O$ (C_4AH_{13}) hidrate olmuş yüksek alüminalı çimentoda meydana gelir. Farran' da bu hidratın kalsit agregası ve yüksek alüminalı çimentonun yüzeylerinin arasındaki reaksiyonla oluştuğunu belirtmiştir. CAH_{10} , C_2AH_8 ve C_4AH_{13} (veya C_4AH_{19}) bunların hepsi metastabil hegzagonal hidratlardır ve geniş bir sıcaklık alanı üzerinde bulunan tek stabil alüminat hidratı olan kübik hidrat C_2AH_6 'a dönüşme eğilimleri vardır. İyi kristallenmiş alumina hidratın yokluğu ile CAH_{10} 'un C_3AH_6 'a karşı kararlı olabileceği ortaya çıkarılmıştır (Robson, 1962).

• CA Hidratasyonu

Yüksek alüminalı çimentoda CA' nın suyla birleşmesiyle süspansiyon oluşur ve katı çözülmeye başlar. Su, kalsiyum ve alüminat iyonlarına doyduğunda, bir çok kalsiyum alüminat ve alümina hidratların oluşumuna izin verir ve tamamen doymuş olur. Çözelti içinde çözünmeye için daha fazla anhidrat CA_{10} ' un bulunmasına izin verilmesiyle bu hidratlar çekirdeklenir ve büyürler. Su miktarının fazla olmasıyla çimento çamurundaki kireç, alümina ve suyun arasındaki ilişki bozulabilmektedir. Hidratasyon esnasında, kristallenmiş kalsiyum alüminat hidratların eklenmesiyle alümina jel oluşmaktadır. 20 °C gibi düşük sıcaklıklarda hegzagonal hidrat CAH_{10} oluşmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda; 30 °C' nin üzerinde bu hızlı bir şekilde kübik bir faz olan C_3AH_6 ' ya dönüşebilmektedir. Orta seviye sıcaklıklardaysa bir başka hegzagonal yapı olan metastabil C_2AH_8 oluşmakta ve C_3AH_6 ' a dönüşmektedir. CA hidratasyon reaksiyonları şekil 4.2' dedir (Singh, 1982).

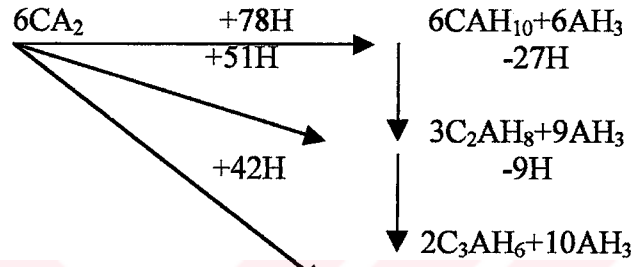


CA çamuru 20 °C' de hidratasyona uğradığında, en fazla CAH_{10} ve bunun yanında az miktarda C_2AH_4 ve AH_3 içerir. Fakat uygun su miktarı sınırlandırılmışsa C_2AH_8 ' de oluşabilir. Önemli miktarlarda CAH_{10} ve C_2AH hegzagonal hidratları öncelikli oluşur, bunlarda derece derece çözülebilir ve termodinamik bakımdan kararlı hidratlar olan C_3AH_6 ve AH_3 formlarında rekristalize olabilirler. Bu sıradışı olay konvensiyon olarak adlandırılır. Konvensiyon her sıcaklıkta olabilir, fakat 20 °C' nin altında çok daha yavaş gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda hız artmakta ve 50 °C' nin üzerinde 1 gün sonra çamur tamamen dönüşmüş hale gelmektedir. DTA ile hidratların izafi oranlarını ve çimento çamurunun dönüşüm derecesine bakılabilir. Her bir hidrat karakteristik sıcaklık bölgesinde endotermik varlığıyla teşhis edilir. Konvensiyonun temeli sudur. Su çamurda bulunan reaksiyona girmemiş herhangi CA tanelerini reaksiyona sokabilmek için uygundur. Porozite oluşumu dayanımının hızlı bir şekilde düşüşüne neden olur.

Konvensiyon hızı porozite oluşumuna direkt etki etmektedir, eğer konvensiyon yeterli derecede yavaş olursa, hacim değişikliği sonucu oluşan porozite ikinci hidratasyondan oluşan hidratlarla dolabilir (Singh, 1982).

- **CA₂ Hidratasyonu**

CA₂, CA' da olduğu gibi aynı hidratasyon ürünlerini oluşturur. CA' dan farklı olarak daha fazla alumina jeli ve gibsit oluşturur. CA₂ hidratasyonu şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.3 CA₂ hidratasyon reaksiyonları

Hidratların oluşumundaki en büyük etken sıcaklıktır. Hidratasyon sıcaklığının değişimi yanında hidratların da değişimine neden olur. 20 °C sıcaklıktaki hidratasyon ürünleri CAH₁₀, CAH₈, gibsit ve alumina jeli iken daha yüksek sıcaklıklarda CAH₁₀, C₃AH₆ ve gibbsit oluşmaktadır. 40 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda ise hidrate edilmiş çamurların sadece C₃AH₆ ve AH₃ içerdiği görülür. Refrakterliği yüksek çimento üretmek için CA₂ esaslı çimento istenir. Kalsiyum aluminat üretiminde 1410 °C' de zamana bağlı olarak CA₂, CA artar; 1560 °C' de CA₂ artarken CA düşer (Singh, 1982).

5. ULTRASONİK HIZ ÖLÇME YÖNTEMİ İLE REFRAKTERLERDE MUAYENE

Ultrasonik yöntem, iç yapı hatalarının tayin edilmesinde etkin bir yöntemdir. Ultrasonik hız ile basma dayanımı ve diğer özellikler arasında ilişki kurulabilmektedir. Bu ilişkiler hem ateş tuğlası hem de diğer refrakterler için geçerlidir. Bu metod, refrakterleri üretim sırasında ve konstrüksiyonda kullanılmadan evvel kontrol etmeye yarar. Çeşitli refrakterler üzerinde ultrasonik hızla diğer fiziksel özellikler arasında istatistiksel olarak önemli ilişkiler kurulmuştur. Bu yöntem, tuğlanın iç yapı hatası içerip içermediğini açık bir şekilde ortaya koyar.

İnsan kulağı 20Hz-20kHz arasındaki frekansları işitebilmektedir. 20 kHz' den daha yüksek frekanslı dalgalara ultrasonik dalgalar denir. Ultrasonik dalgalar genellikle piyezo elektrik malzemelerle üretilir. Bu malzemeler, elektrik akımı uygulandığında fiziksel boyut değişimi gösterir. Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü piyezoelektrik olay olarak adlandırılır. En fazla kullanılan kristal kuvarstır. Ses dalgaları ile tahribatsız muayene yöntemi çok eskilere dayanır. Eski uygarlıklar toprak kaplara vurarak, çıkan sesteki çatlak olup olmadığını anlamaya çalışmışlardır.

Beton ve ahşap gibi heterojen malzemeler için 20-250 kHz frekanslar kullanılır. Beton muayenesinde 54 kHz, refrakter muayenesinde 150 kHz ve metal muayenesinde 0,5-10 MHz frekans kullanılmaktadır (Yaman, 1995). Seramik malzemelerde ultrasonik hız, elastiklik modülü, poisson oranı ve mekanik özellikler seramik malzemedeki gözenek oranına bağlı olarak geniş bir aralıkta değişmektedir.

$$v = \lambda \cdot f \quad (5.1)$$

v : Ultrasonik Hız [m/s]

λ : Dalga boyu [m]

f : Frekans [s]

Seramik malzemelerde hammadelerde bulunan organik maddeler, rutubet suyu, kristal bağlı su. Seramik malzemelerde özellikleri etkileyen en önemli parametrelerden birisi porozitedir.

Porozite ile mukavemet, elastiklik modülü, ultrasonik hız arasında ilişkiler kurulmaktadır. Boyuna dalga hızı şu formülle hesaplanır (Knudsen, 1974; Topuz, 1993).

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{d(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5.2)$$

$$E = E_0 \exp(-bp) \quad (5.3)$$

$$d = d_0(1-p)$$

Sıfır indisli semboller, gözeneksiz malzeme özelliklerini gösterir. E elastiklik modülü, ν poisson oranı ve d yoğunluktur. Basma dayanımı ve eğme dayanımı ile porozite arasında değişik formüller önerilmektedir. Ultrasonik hız, yukarıdaki formül gereği poroziteye bağlı değişmektedir. Mukavemette poroziteye bağlı değişmektedir. Bu iki özellik arasında Lawlar ve Russell doğrusal ilişki, Aly logaritmik ilişki kurmuştur. Mukavemet ve hız formülleri oranlanırsa eksponansiyel kısımlarda bulunmaktadır. Bu nedenle logaritmik ilişki araştırılabilir. Eğme dayanımı Mor ile, hız arasında $MOR = A \exp(V)$ formülünü önermektedir, b malzemeye bağlı sabittir (Aly ve Semler, 1985).

5.1 Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemleri İle Muayenenin Önemi

Duyulabilir ses dalgaları eski zamanlardan beri malzeme muayenesinde kullanılmıştır. Özellikle seramik parçalarda parçaya vurulduğu zaman çıkan sestten parçada bir hata (örneğin bir çatlak) olup olmadığı anlaşılabilmektedir. Demiryolcular, balyozla demir yoluna vurarak muayene yapmaktadırlar. Ultrasonik yöntem X-ışınları yerine veya onunla birlikte kullanılmaktadır (Krantkramer, 1977). Metalik malzemelerde ultrasonik muayene yöntemi, dalga hareketi doğrultusuna dik boşluklara, laminasyonlara hassastır. Oysa X-ışınları, ışınların hareket doğrultusuna paralel boşluk türü hatalara daha hassastır. Bir parça geometrisi sınırlaması nedeniyle, sadece bir doğrultuda muayene ediliyorsa bu son cümle çok önemlidir.

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 hızla bağlı olarak değişir. Bu nedenle seramiklerde ultrasonik hız, kalite kontrol amacı ile kullanılmaktadır (PUNDIT).

Tahribatlı deneylerde numuneler kullanılmaz hale gelirler, ilave olarak laboratuvar masrafları da gelmektedir. Tahribatsız ultrasonik muayenede parçalar kırılmadığından zaman ve laboratuvar masrafları da en aza inmektedir.

Son yıllarda endüstriyel refrakterlerin ultrasonik yöntemlerle muayenesi, ürün özelliklerini, kalitesini ve üniformluğunu ortaya koymak genel bir olay haline geldi (Aly ve Semler, 1985). Kullanım kolaylığı, cihazın portatif oluşu, kullanım alanını daha da yaygınlaştırmaktadır.

Tahribatsız muayene yöntemlerinin gelişmesini sağlayan nedenler:

- a) Parçaların hafifletilmesi nedeni ile limit dizaynlara gidilmesi,
- b) Belirli bir kademede hatayı belirleyip, müteakip işçilik masraflarının minimuma indirilmesi,
- c) Kazaları ve sistemin durmasını önlemek (Topuz, 1993).

Ultrasonik yöntem sadece malzeme içindeki hataları ortaya koymakla kalmaz, aynı zamanda malzemenin kalitesi ve homojenliği hakkında da bilgi verir (Uygur, 1976). Önceden diyagram çizilmişse, seramiklerde mukavemet tayin etmek, mümkündür. Kalite üzerine en iyi istatistik bilgi ancak tahribatsız yöntemle sağlanabilir (Russell ve Morrow, 1984).

20 – 250 KHz frekanslı cihazlar, seramik, refrakter, ahşap, beton, jeolojik numuneler, karbon elektrod, bazalt, granit ve dökme demir muayenesinde kullanılabilirler. Ultrasonik hız ile malzeme mukavemetlerini güvenle tayin edebiliriz. Bazı ürünlerin özelliklerinin birbirlerine yakın olup olmadıklarını kontrol edebiliriz. Bu tür muayenelerde oldukça ekonomik bir yöntemdir. Seramik malzemenin homojenliğini, bir parti içindeki parça özelliklerinin birbirine yakın olup olmadığını, refrakter beton gibi malzemelerde, hidrasyon gibi reaksiyonlarla özelliklerin zamanla değişip değişmediği saptanabilir. Betonda ve refrakter betonda donma ve kimyasal olaylardan etkilenme saptanabilir.

Dinamik yöntem, belirli kalınlığa sahip bir malzemeye, parça kalınlığının yarısı veya n katı olan ses dalgaları uygulansa parça kendi doğal frekansı ile titreşir. Bu frekanstan (öz titreşim) ve parça boyutlarından giderek dinamik elastiklik modülü bulunur.

5.2 Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemi ile Muayenenin Üstünlükleri ve Eksiklikleri

Ultrasonik hız ölçme yöntem ile yapılan muayenelerin diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında benzer yöntemlere olan üstünlükleri ve eksiklerini ise şöyle sıralayabiliriz. Üstünlükleri;

- Çok kalın kesitlerde dahi ses dalgalarının iyi geçirici karakteristiği nedeni ile iç süreksizliklerinin belirlenmesine olanak sağlar.
- Küçük hatalarda oldukça hassas bir şekilde belirlenebilir.
- İç hatanın konumu, boyutu ve şekli belirlenebilir
- Muayene parçanın bir tarafından yapılabilir.
- Portatif donanımlar ile büyük parçalar yerinde muayene edilebilir.
- Çalışma esnasında gerek personelle gerekse diğer donanımlar ile bir tehlike arz etmez

Yöntemin eksikliklerini, ise şöyle sıralayabiliriz;

- Muayene için çok iyi yetişmiş personele ihtiyaç vardır.
- Yüzeyi çok pürüzlü, düzgün olmayan biçimli parçaların muayenesinde zorluk vardır.
- İş parçası ile prob arasındaki ultrasonik titreşimleri iletebilmek için kimyasal bir sıvıya ihtiyaç duyulur.
- Aleti kalibre edebilmek, hata büyüklüğünü değerlendirmek için referans standartlara ihtiyaç vardır (Spaulding ve Wheeler, 1999)

5.3 Ultrasonik Dalgaların Özellikleri ve Oluşumu

Frekans 16 Hz altında ise ses-altı, 16 Hz – 16 kHz akustik veya ses, 16 kHz’ den büyükse ultrasonik dalga denir. Metal malzemelerin muayenesinde 0.5–20 MHz (Gür, 1999), seramik malzemelerde ise 20–250 kHz frekanslı cihazlar kullanılmaktadır. Kristal yapılarda atomlar belirli bir düzene göre sıralanmışlardır. Elastiklik sınırının altında kuvvet etkisiyle malzemelerin yay gibi şekil değiştirebildikleri bilinmektedir. Ultrasonik probda üretilen dalgalar, malzeme içinde belirli bir hızla yayılırlar.

5.3.1 Ultrasonik Dalgaların Yayılma Çeşitleri

- **Boyuna Dalga**

Boyuna dalga şeklinde isimlendirilen türde, titreşim doğrultusu ile yayılım doğrultusu aynıdır. Bu tip yayılmaya basınç dalgası adı verilir. Aşağıdaki ifadede boyuna dalga formül olarak açıklanmış ve malzeme sabitleriyle arasındaki ilişki belirtilmiştir.

$$C_B = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (5.4)$$

(5.4) eşitliğinde boyuna dalga, Bu eşitlikte;

C : hız,

E : elastiklik modülü,

ρ : yoğunluk,

μ : poisson oranıdır.

Dikkat çekeceği üzerine ultrasonik ses dalgası hızıyla elastiklik modülü ve yoğunluğunun ilişkisi olduğunu görmekteyiz. Refrakterlerde hız genellikle 3000 m/s, frekans ise 150 kHz olarak seçilir (Topuz, 1993).

Boyuna dalgaların etkin olduğu yerde atom düzlemleri sıkışırken, diğer yerlerde, dalga boyunun büyüklüğüne göre yer yer seyrekleşme sıkışma meydana gelmektedir. Boyunu dalgalarda titreşme doğrultusu ile ultrasonik dalganın hareket doğrultusu aynıdır. Çoğu standart straight – beam (direkt tip) probları, boyuna dalgaları gönderir ve geri yansıyanları algılar. Bu olay atomların birbirine yaklaşabilmesi ve uzaklaşabilmesi ile ilgilidir.

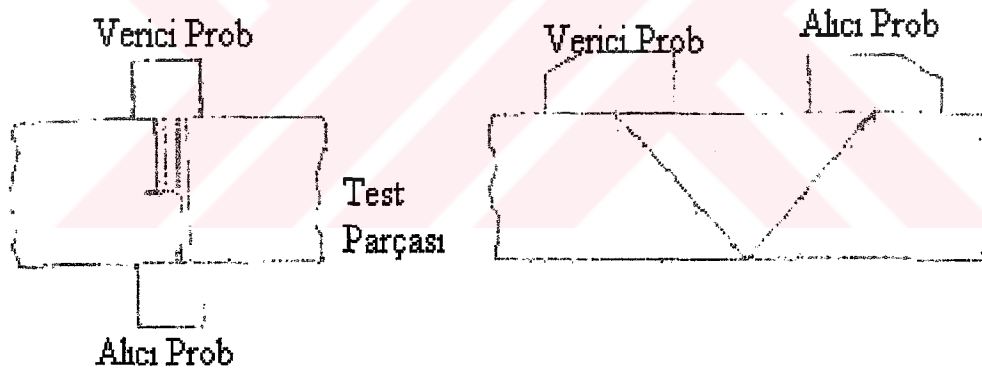
Seramiklerde daha çok boyuna dalga esasına göre çalışan problar kullanılır. Atom veya moleküller, ultrasonik dalgaların hareket doğrultusuna dik yönde titreşirler Çünkü titreştirme, hareket doğrultusuna dik doğrultudaki kayma gerilmeleriyle gerçekleştirilmektedir. Sıvı ve gazlarda enine dalgalar asla meydana gelmez. Bir malzemedeki enine dalgalar boyuna dalgalardan daha yavaş ilerler (Krantkramer, 1977).

Ultrasonik dalgalar boşluğa çarptıklarında çevreye saçıldıklarından hareket doğrultusunda enerji kaybederler, buna soğurulma denir. Bu olay, plastiklerde çok ciddi hissedilirken seramik ve metalik malzemelerde az hissedilir. Dalga yayılma hızındaki değişimin ve zayıflama katsayısının ölçülmesiyle, metalik malzemelerde mikroyapı, mekanik özellikler, kalıntı gerilmeler ve malzeme yoğunluğu hakkında bilgi ifade edilmektedir. Topuz (1999) ultrasonik hızlardaki gerilmenin nasıl hesaplandığını vermiştir.

5.4 Ultrasonik Muayenenin Uygulama Yöntemleri

5.4.1 Doğrudan Geçiş (V- Geçiş) Yöntemi

Doğrudan geçiş yöntemleri de iki proba çalışır. Problardan birisi sadece verici, diğeri de sadece alıcı durumundadır. Şekil 5.1 normal problemlerle çalışıldığında, problemler malzemenin alt ve üst yüzeyine kontaktlanır. Verici prob tarafından gönderilen ses dalgaları tamamen alıcı prob tarafından algılanır.

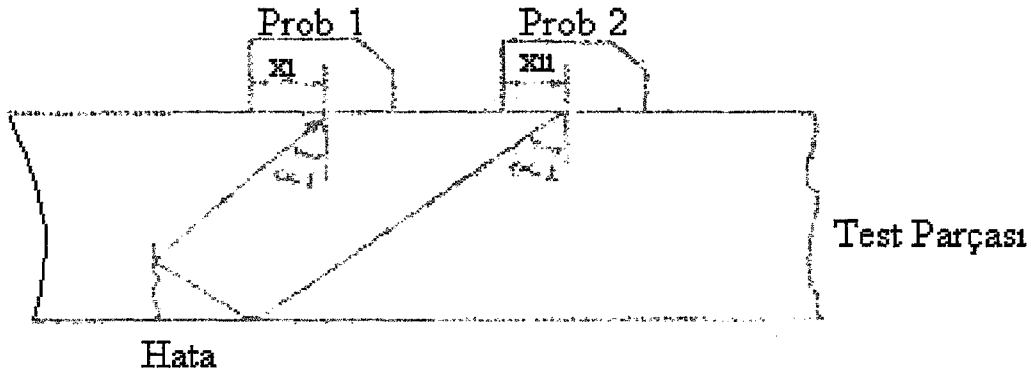


Şekil 5.1 Doğrudan geçiş yönteminde problemlerin alıcı ve verici olarak çalışması.

Eğer malzeme içerisinde herhangi bir süreksizlik varsa, gönderilen sinyaller sadece belli bir kesri algılar (Tuncer, 2001).

5.4.2 İkili Prob (Tandem) Yöntemi

Cidar kalınlığı 100 mm' nin üzerinde olan malzemeler ayrıca ikili prob yöntemi ile de test edilmelidirler. Şekil 5.2 prob açıları α_1 ve α_2 arasındaki fark 4° den daha fazla olmamalı ve 35° ile 55° arasında olmalıdır.



Şekil 5.2 İkili prob yönteminde problemlerin çalışma şekli.

Ses çıkış noktasından prob ön yüzüne olan x_1 ve x_2 değerleri arasındaki fark 2 mm' den daha fazla olmamalıdır. Tandem yöntemi ile test yaparken, problemler birbirin sıkı olarak bağlanmamalı ve aradaki mesafe sabit kalmalıdır (Spaulding ve Wheeler, 1999).

5.5 Ultrasonik Muayenede Kullanılan Prob Çeşitleri

Ultrasonik muayenede temelde 5 çeşit prob kullanılır. Bunlar; normal, açısallı, daldırmalı, çift elemanlı ve geciktirme bloklı problemlerdir (Topuz, 1993).

5.5.1 Normal Prob

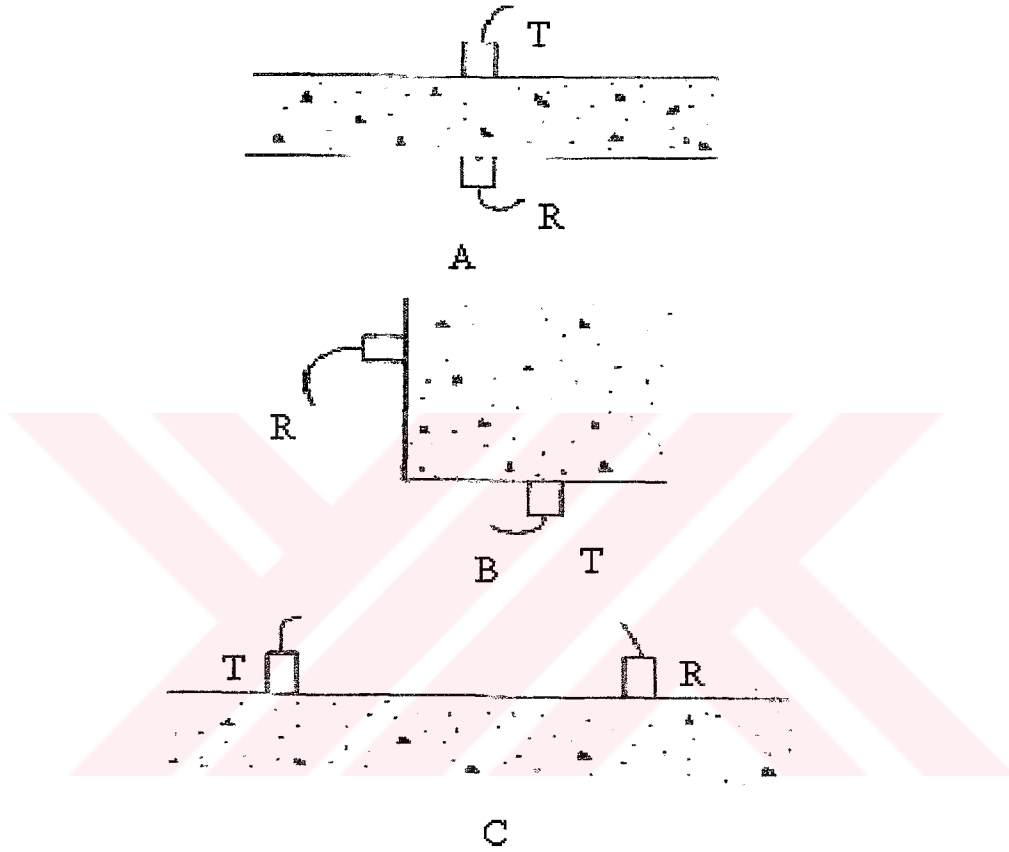
Dövme parçaları, kalıntılar, kofluk diye tanımlanan hatalar ve segregasyonlar için ayrıca hadde ürünlerinde, yırtılmalarda kullanılır. Ayrıca yorulma çatlakları, korozyon, erozyon ve gerilimli çatlaklar için kullanılır (Topuz, 1993).

5.6 Problemlerin Yerleştirilme Şekilleri

Ultrasonik dalgaları parça üzerine göndermeye yarayan parçaya prob adı verilir. Seramiklerin muayenesinde çift problu ultrasonik cihazlar kullanılır. Bir probdan çıkan ultrasonik dalga diğerine ulaştığında geçiş zamanı mikrosaniye olarak cihaz tarafından saptanır. Ultrasonik dalganın takip ettiği yol bilindiğine göre aşağıdaki formülden hız bulunur;

$$Ultrasonik\ hız\ (m/s) = \frac{yol(m)}{zaman(s)} \quad (5.5)$$

Problar, muayene edilecek parçaya üç şekilde yerleştirilmektedir. 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.



Şekil 5.3 Ultrasonik cihaz problemlerinin yerleştirilme şekilleri. A: direkt metod, B: yarı direkt metod, C: yüzey metodu (Tarun ve Malhotra, 1990)

Seramik malzemelerin muayenesinde kullanılan frekanslar 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. Vazelin yüzeyden temizlenmediği takdirde, pişme sırasında yanar ve duman çıkartır. Bunu önlemek için karbon tetra-klorür ile vazelin yüzeyden temizlenir. Problar, iyi bir akustik temas sağlayacak şekilde, 50 mm çapında, 0.05 mm kalınlığında alüminyum folyo üzerine, folyo da parça üzerine bastırılarak muayene yapılabilir.

Uygulanan basınç çok artırılırsa en fazla 0.1–0.2 mikrosaniyelik bir düşüş olmaktadır. Bazı uygulamalar için vazelin yerine çok ince naylon kaplama önerilmektedir. Bir malzemenin, ultrasonik dalgaların yayılmasına karşı gösterdiği dirence akustik empedans denir. Yoğunluk ve ultrasonik hızın çarpımına eşittir. Farklı akustik empedansa sahip iki bölgenin arayüzeyine çarpan dalgaların bir kısmı geri yansır, bir kısmı yeni ortamda yoluna devam eder. Empedanslar arasında fark fazla ise yansıyan miktar artar (Gür, 1999).

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 dalganın yüzdesini hesaplırsak %100 bulunur. Cam içinde hareket etmekte olan dalgalar hava boşluğuna veya parça kenarına gelirse, tamamı geri yansır, havaya geçen olmaz.

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.

5.7 Ultrasonik Yöntemle Tayin Edilebilecek Minimum Hata Boyu

Metal malzemelerin ultrasonik yöntemle muayenesini anlatırken saptanabilecek minimum hata boyu için Bargel (1985) dalga boyunun yarısı derken, Krautkramer dörtte biri demektir. Bargel (1985) çelikte ultrasonik hızı 6000 m/s, cihaz frekansını 3 MHz alarak minimum hata boyutunu 1 mm bulmuştur.

Perlitli dökülebilir refrakterlerde ultrasonik hız 800 m/s' ye kadar düşmektedir 150 kHz' lik cihaz kullanıldığında minimum hata boyu 2.7 mm' dir. Dökülebilir refrakterlerde ultrasonik hız 3400 m/s' ye kadar çıkmaktadır. Buna göre minimum hata boyu 11.3 mm' dir (Yaman, 1995).

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 daha kolay demet haline getirilebilir (Bargel ve Shulze, 1985).

Metalik malzemelerde ultrasonik dalga, malzeme içindeki kusurlardan yansımaktadır. Buna bağlı olarak hata büyüklüğü ve yeri tayin edilebilmektedir. Saptayabileceğimiz minimum hata boyu;

$$d) \frac{V}{4f} \quad (5.6)$$

V : Ultrasonik hız [m/s]

f : frekans [Hz]

formülünden saptanmaktadır. Bu değer dalga boyunun dörtte biri demektir. Oysa katalog dalga boyu yarısı demektir.

Çizelge 5.1 Seramiklerde ve çeliklerde, frekans, ultrasonik hız ve saptanabilecek minimum hata boyutu arasındaki ilişki (Yaman, 1995 ve Topuz, 1993).

	Frekans (f)	Ultrasonik Hız (v)	Dalga Boyu (λ)	Minimum Hata	Minimum Hata
Çelik	10 MHz	5900 m/s	0,6	0,15 mm	λ/4
	4 MHz		1,5	0,37 mm	
	0,5 MHz		1,2	0,30 mm	
Seramik	150 kHz	3500 m/s	23	11,5 mm	λ/2
	55 kHz		64	32 mm	

Çizelge 5.1' 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 alınmayabilir (Topuz 1993).

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 55 kHz frekanslı ultrasonik cihaz kullanılır. Her iki cihaz için, ultrasonik dalga hızı 3500 m/s olan malzemeler için dalgaboyu ve minimum hata boyu Çizelge 5.1' de verilmiştir.

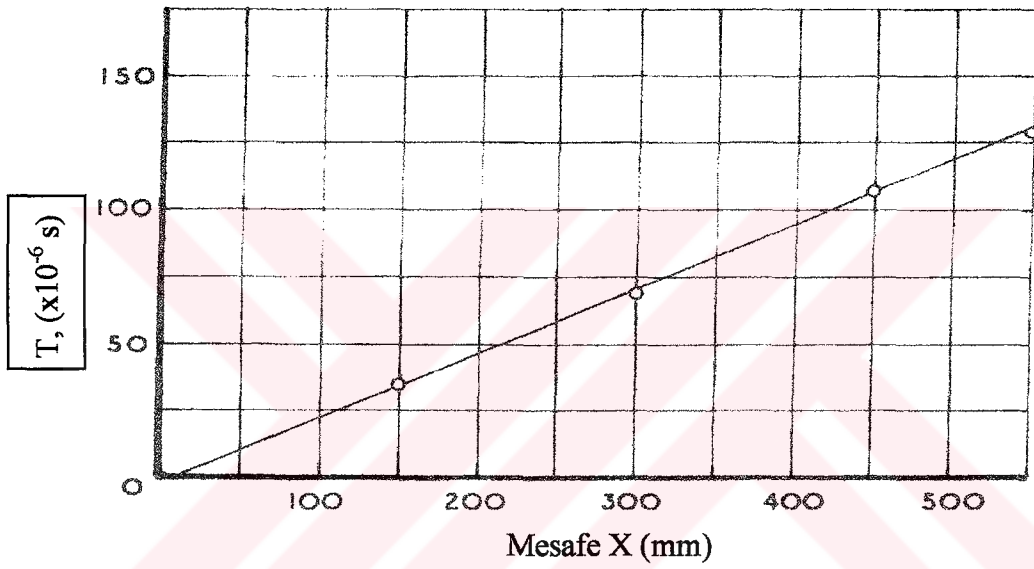
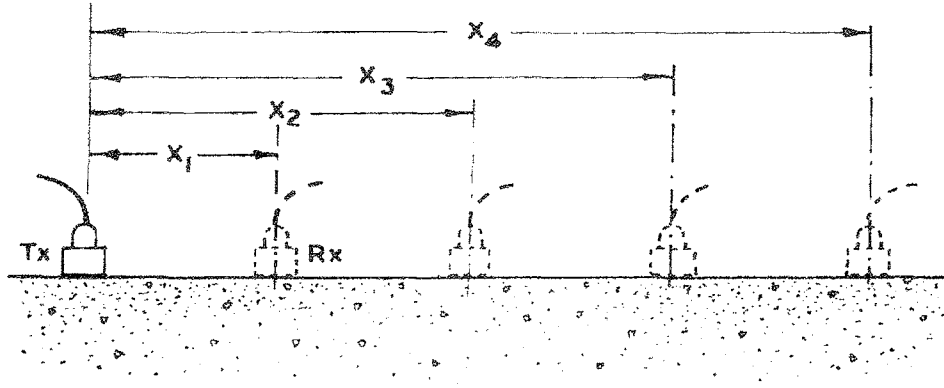
5.8 Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemi ile Çatlak Tayini

Ultrasonik hız yönteminde, havaya enerjinin çok az bir miktarı geçmektedir, şayet ultrasonik dalga malzeme içerisine hareket halindeyken hava dolu bir boşluk veya çatlakla karşılaşır ise uzunluğa dik olan ve belirlenmiş olan alan, geçerli alandan daha büyüktür.

Ultrasonik dalga hatalar etrafında saçılacaktır. Böylece ultrasonik dalga gidiş hızı herhangi bir kusursuz benzer bir malzemenin içerisine gidiş hızından büyük olacaktır, böylece ultrasonik hız metodu ile çatlakların, oyukların, diğer benzer kusurların yerlerinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Ayrıca hataların yerlerinin belirlenmesinde bu tekniğin uygulanmasının ciddi sınırlamalara sebep olduğu belirtilmelidir. Örnek olarak, şayet çatlaklar ve kusurlar küçükse yada suyla veya diğer kalıntılarla doldurulmuş ise, kusurlara doğru dalga yayılımına müsaade etmiyor ise, ultrasonik hız önemli bir azalma göstermemektedir. Bunun anlamı ise, kusur olmadığını belirtmektedir (Tarun ve Malhotra, 1990).

Betonun içerisine doğru hareket eden ultrasonik hız hava-beton arayüzeyi ile karşılaştığı zaman, arayüzey çaprazında enerjinin ihmal edilebilir bir geçişi vardır. Bu yüzden hava dolu çatlak yada boşluk, prob yüzey alanlarından daha büyük bir alan tarafından korunduğu zaman, problemler arasında ilerleyen sesötesi ışınlar engel olacaktır.

Büyük bir boşluk, problemler arasındaki ultrasonik sesin geçiş zamanını ölçülmesi, ile bulunur. Problemler uygun yere yerleştirildiği zaman boşluklar bunların arasındaki bir mesafede olduğu belirlenir. Boşlukların boyutu ve pozisyonu boşluk çevresinin ve problemler arasındaki en kısa mesafe boyunca ultrasonik geçişi ile tahmin edilebilir. Şayet boşluk alanı prob çapından küçükse boşluk belirlenmeyebilir (PUNDIT).



Şekil 5.4 Yüzey metodu ile ultrasonik hız tayini

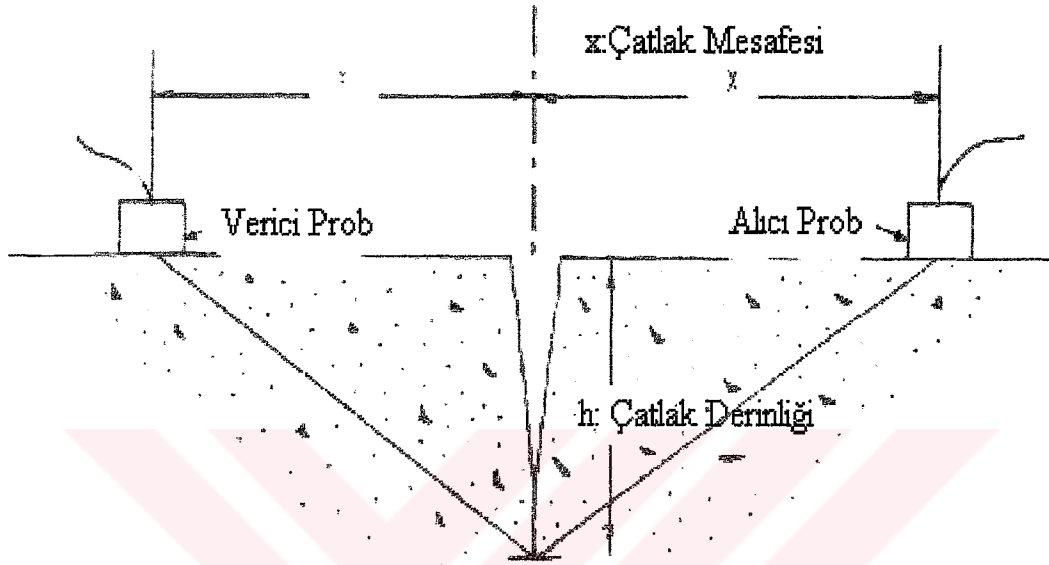
Yüzey metodu kullanılarak yapılan ultrasonik hız tayininde, şekil 5.4' deki gibi Rx' ler adım adım değiştiriliyor ve geçiş zamanının (T) ölçülmesi ile bulunur. Denklem 5.7' de yüzeye dik bir çatlağın, çatlak derinliğinin tayin edilmesi için kullanılan denklemler verilmiştir (PUNDIT).

$$h = \left[x / 2 \right] \left[T_1/T_2 - T_2/T_1 \right] \quad (5.7)$$

Burada; x: çatlağa olan uzaklık (mm), h: çatlak derinliği (mm), T' ler geçiş zamanını (x10⁻⁶ s) göstermektedir. T₁: çatlak etrafına geçiş zamanı, T₂: herhangi bir çatlak olmaksızın malzemenin aynı tipinin yüzeyi boyunca geçiş zamanı.

5.8.1 Çatlakları Saptama ve Boyut Tayini

Hava ile dolu bir yüzey çatlağının derinliği ultrasonik hız ölçme metodu ile fikir sahibi olunabilir. Aşağıdaki şekilde h ile verilen çatlak derinliğinin bulunuşu denklem 5.7 ile verilmektedir. Alıcı ve verici probların çatlağın her iki yanına yerleştirilmesi ile (h) bulunur.



Şekil 5.5 Çatlak derinliğinin ölçülmesi (Tarun ve Malhotra, 1990)

Şekil 5.5' de derinlik (h) denklem 5.8 ile verilmiştir:

$$h = \left[x / T_2 \right] \left[T_1^2 - T_2^2 \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

Burada; x : çatlakla vericinin uzaklığı (her iki probda çatlakla eşit uzaklığa yerleştirilmelidir.), T_1 : çatlak etrafına geçiş zamanı, T_2 : herhangi bir çatlak olmaksızın malzemenin aynı tipinin yüzeyi boyunca geçiş zamanı (T_1 ve T_2 için yüzey mesafesi eşit olmalıdır), böyle bir durum için denklem 5.8 geçerlidir. Yüzeyde çatlakların derinliğinin tahmini yüzeye yerleştirilmiş probların iki farklı düzeneği için çatlağın geçiş zamanının ölçülmesi ile gözlemlenebilir.

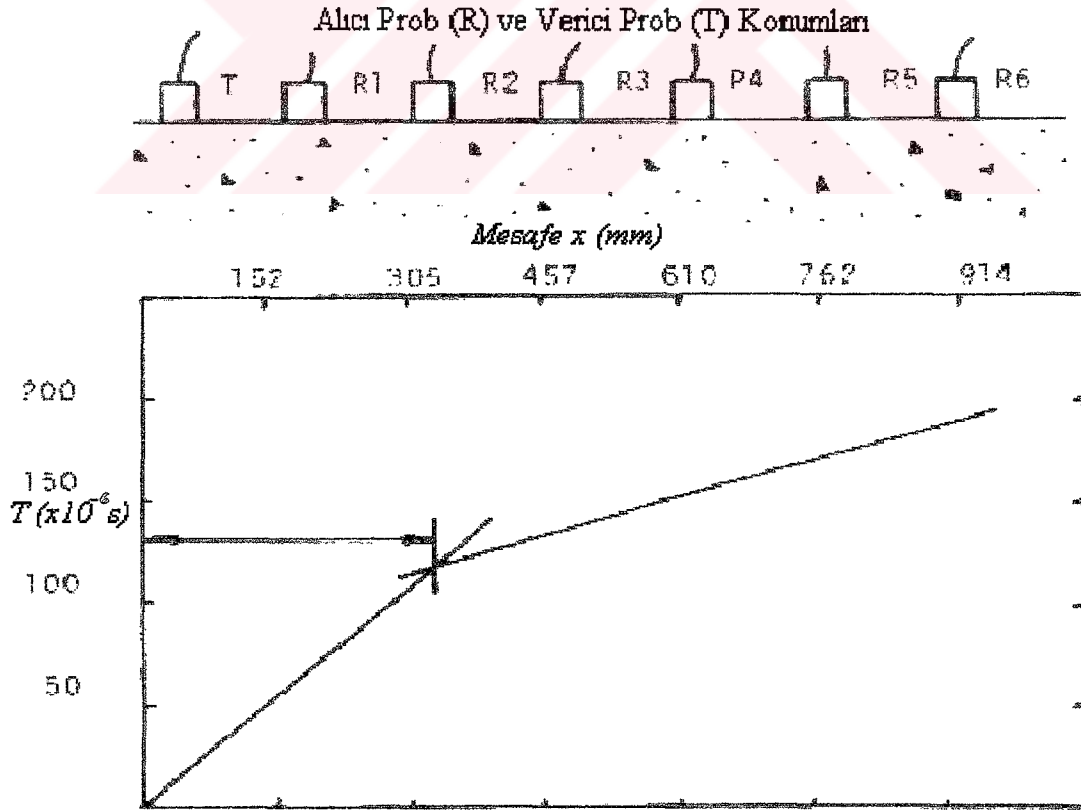
Şekil 5.5' de uygun bir düzenek gösterilmektedir, burada verici ve alıcı problar çatlağın zıt kenarlarına yerleştirilmiştir ve eşit uzaklıktadır. X' in seçilen iki değeri burada bir diğerinin aynısı olmaktadır ve geçiş zamanı bu ölçülen değerlerin yerini tutmaktadır. 5.8' de verilen denklem beton yüzeyine denk kabul edilmesi ile aktarılmıştır, bu çatlağın yakınındaki beton oldukça ünitardır. Şekil 5.5' de gösterildiği gibi çatlağa her iki prob kenara yerleştirilmesi ile çatlak yüzeye dik bir diklikte olup olmadığı kontrol edilerek tayin edilmektedir (Tarun ve Malhotra, 1990).

Çatlak malzeme yüzeyine dik olmalıdır, şayet çatlağın yüzeye dik olup olmadığını anlamak istersek önceden bir belirleme kontrolü yapılmalıdır. Bunun sebebi ise bulunan geçiş zamanı çatlaktan problemlerin her ikisinin de eşit uzaklıkta olmasıdır. Her iki probda hareket ettirilerek çatlaktan sırası ile uzaklaştırılmalıdır (Tarun ve Malhotra, 1990).

Uygulamada, ultrasonik hız ölçme ile aşağıdaki faktörler belirlenebilir;

- Betonun homojenliği.
- Boşluk, çatlak yada diğer kusurların varlığı.
- Betonda zamanla meydana gelen değişimler (çimentonun hidratasyonundan dolayı) yada sıcaklık, soğukluk veya diğer kimyasal etkiler.
- Belirli standart özellikler ile ilgili beton kalitesi.

Bunlarla beraber test şartlarının da etkisi vardır. Bunlar; yol uzunluğuna, test edilen numunenin yanal boyutlarına ve betonun nem muhtevasına bağlıdır. Şekil 5.6' da yüzey metodu kullanılarak ultrasonik hızın tespitinin şematik bir gösterimi mevcuttur. Burada problemler farklı uzaklıklara konularak çatlağın, boşluğun veya kusurun yeri saptanmaktadır.



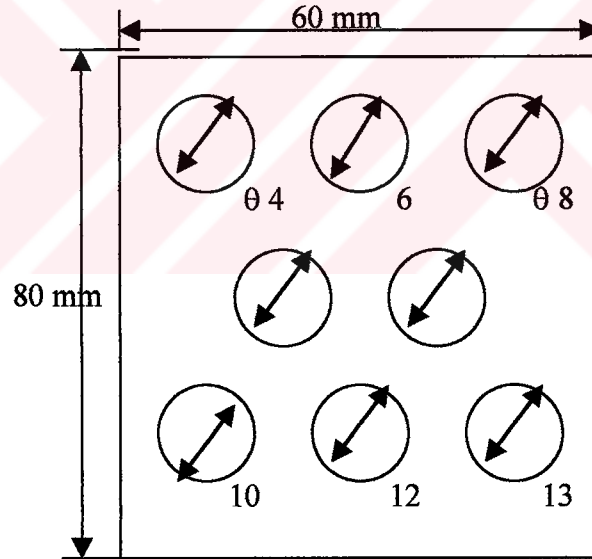
Şekil 5.6 Yüzey metodu kullanılarak ultrasonik hız tayini (Tarun ve Malhotra, 1990)

Burada; T: Verici prob, R' ler alıcı probu temsil etmektedir. Diyagram, geçiş zamanı ve mesafe cinsinden veriler alınarak çizilmiştir.

5.9 Şaşırtma Delik Yöntemiyle Ultrasonik Hızın İncelenmesi

Seramiklerde porozite yüzdesi sıfırdan % 95'e kadar çıkmaktadır. Porozite, mukavemet dahil tüm özellikleri etkilemektedir. Seramiklerde gözeneklerin göreceli olarak artması mukavemetin ve elastiklik modülünün göreceli olarak düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle özelliklerle porozite arasında ilişki kurulmuştur. Ahşap malzeme kullanılmasının sebebi, seramik malzemelerin sert olmasından dolayı uygun delik delme işlemine izin vermemesidir.

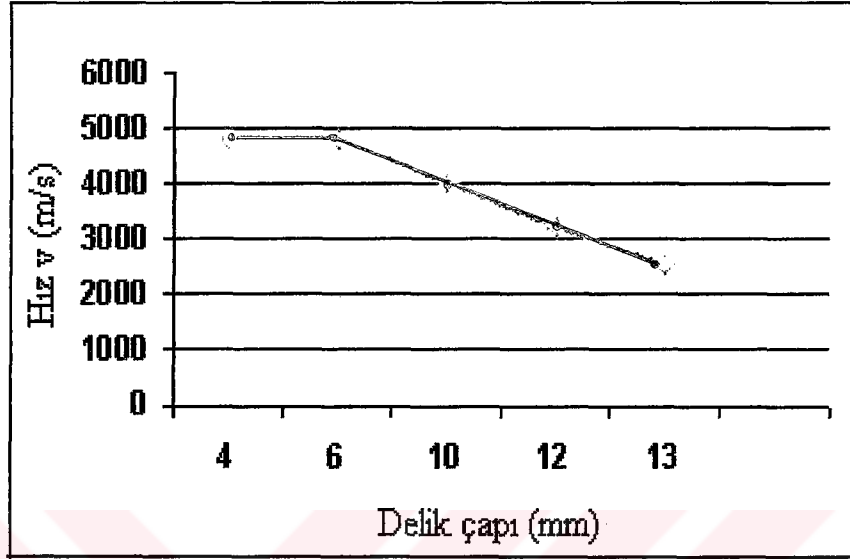
Yapılan çalışmalarda 55 kHz frekanslı bir ultrasonik cihaz kullanılmıştır. Çalışma esnasında sırayla Ø 4, 6, 8, 10, 12, 13 mm ebatlı matkap uçları kullanılarak 60x80 mm boyutunda ve 12 mm kalınlığında ahşap malzeme üzerine şaşırtmalı delikler açılmıştır (Yaman ders notları).



Şekil 5.7 Ahşap malzeme üzerine delinen deliklerin yerleştirme şekli

Şekil 5.7' den görüleceği üzere 1.sıradaki deliklerin arasından geçen ultrasonik dalga tam karşısında 2.sıra delikleri ile karşılaşmaktadır. Ultrasonik dalgaların boşlukları geçmesi söz konusu değildir. Ancak deliklerin çevresindeki katı kütle içinde kalmak koşulu ile saçılmalarla yollarına devam etmektedirler. Nitekim 13 mm çaplı delik delindiği zaman boyuna dalgaların düz bir yol üzerinde ilerleyip, diğer uca gitmesi olanaksızdır. Delik çapı büyüdükçe toplam alandaki azalmadan dolayı ultrasonik hızda azalma meydana gelmektedir.

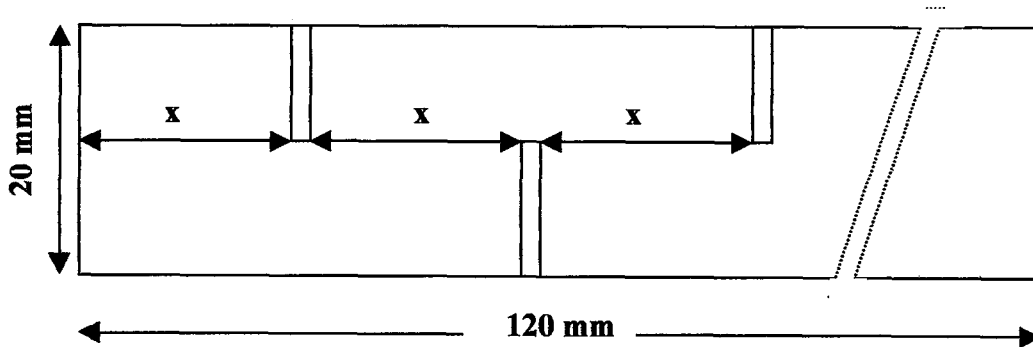
Görüldüğü üzere, küçük çaplarda hızda çok önemli bir değişim olmamakla beraber delik çapı büyüdükçe özellikle 12 mm delik çapından sonra ultrasonik hızda gözle görülebilir bir düşme meydana gelmektedir. Bu da yukarıda belirttiğimiz gibi dalgaının ilerleyebileceği alanda meydana gelen azalma ile orantılı olarak ultrasonik hızı etkilemektedir (Yaman ders notları).



Şekil 5.8 Ultrasonik hız ile delik çapı ebadı arasındaki ilişki

5.10 Şaşırtmalı Kanallar Yöntemiyle Ultrasonik Hızın İncelenmesi

Şaşırtmalı delik yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de seramik malzemenin şekillendirilmesinin zor olmasından dolayı ahşap malzeme kullanılmaktadır. 20x120 mm ebadında ve 12 mm kalınlığında ahşap malzemeye Şekil 5.8’ de olduğu gibi altı üstlü mesafelerde kanallar açılarak mesafe değişimine bağlı olarak ultrasonik hızın davranışı incelenmiştir (Yaman ders notları).



Şekil 5.9 Şaşırtmalı kanalla ultrasonik hız ölçümünde kullanılan numunenin görünüşü

Esas olarak, 20x120 mm ebadındaki numuneler enlemesine 5' er mm aralıklarla 4 eşit parçaya bölünmüş ve kanal derinliği sırasıyla 5, 10, 15, ve 17,5 mm derinleştirilerek, her derinlik için ayrı ölçüm yapılmıştır (Yaman ders notları).

Çizelge 5.2 Şaşırtmalı kanal yöntemiyle ultrasonik muayene ölçüm sonuçları

Kanal Derinliği (mm)	X mesafesine göre ultrasonik hızdaki değişim (m/s)			
	X=10 mm için	X=20 mm için	X=30 mm için	X=40 mm için
5	3761	4067	3921	4010
10	2884	3508	3053	3658
15	2054	1680	2164	2268
17,5	1630	1121	1562	1756

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda 150 KHz' lik portatif ultrasonik cihaz kullanılmaktadır. Cihaz iki problu olup prob çapları 38 mm' dir. Bir probdan çıkan ultrasonik dalga diğerine ulaştığında geçiş zamanı mikrosaniye olarak cihaz tarafından saptanır ve formül yardımı ile ultrasonik hız hesaplanır. Seramik malzemelerde gözeneklerin büyüklüğü kadar, gözeneklerin dağılımı da önem kazanmaktadır. Bu nedenle seramik ve refrakter endüstrisinde 150 kHz' lik ultrasonik cihazlar kullanılmaktadır. Agreg a çapı, seramik ve refrakter endüstrisinde kullanılan agregalardan daha büyük olan beton muayenesinde ise 54 kHz' lik ultrasonik cihazlar tavsiye edilmektedir.

Ultrasonik dalgayı refrakter beton parçaya aktarmak için deney sırasında hem parçaya hem de problara vazelin sürülmüştür. Deney numunesi dikdörtgen şeklinde olduğu için ölçüm sırasında direkt metot uygulanmıştır, yani problemler parçanın iki karşı ucuna birbirine paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Cihazın zaman ve boyut ölçme tamlığı 0.01 mikrosaniyedir.

Çalışmalarda elde edilen veriler ile, çatlak derinliği verilen denklemler vasıtasıyla yaklaşık olarak bulunabilir, fakat bu denklemler farklı numuneler için çıkarılmış olup deneyleri yapılan numuneler ile farklılık göstermektedir, bu sebepten dolayı çalışmamızda hedeflenen çatlakların konumu ve derinliği çıkarılmış olan grafikler vasıtası ile kolayca saptanabilir.

Deneysel çalışmalarda, yüksek alüminalı çimento kullanılmıştır. Bu çalışmada ticari adı Mortar 80 olan 800 °C' ye dayanıklı düşük yoğunluklu genel kullanım amaçlı izolasyon refrakter betonu kullanılmıştır. Aşağıda kullanılan refrakter betonun kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.1 Mortar 80 refrakter betonun fiziksel ve kimyasal özellikleri (Kiltaş).

Kimyasal Analiz %		Fiziksel Özellikler			Diğer Özellikler	
Al ₂ O ₃	12.3	Sıcaklık, °C	110	500	Max. Kullanım Sıc.	800
TiO ₂	1.2	Kırılma Modülü kg/cm ²	28	20	Yumuşama Sıc.	-
SiO ₂	58	Basma Muk. kg/cm ²	180	95	Katılacak Su Oranı	% 45
Fe ₂ O ₃	2.7	Linear Değişme %	-	-	Stokta Bekleme Sür.	8 Ay
CaO	24.2	Termal İletkenlik kcal/h	0.19	0.22	Yoğunluk kg/dm ³	0.55
Alkali	1.6	-	-	-	-	-

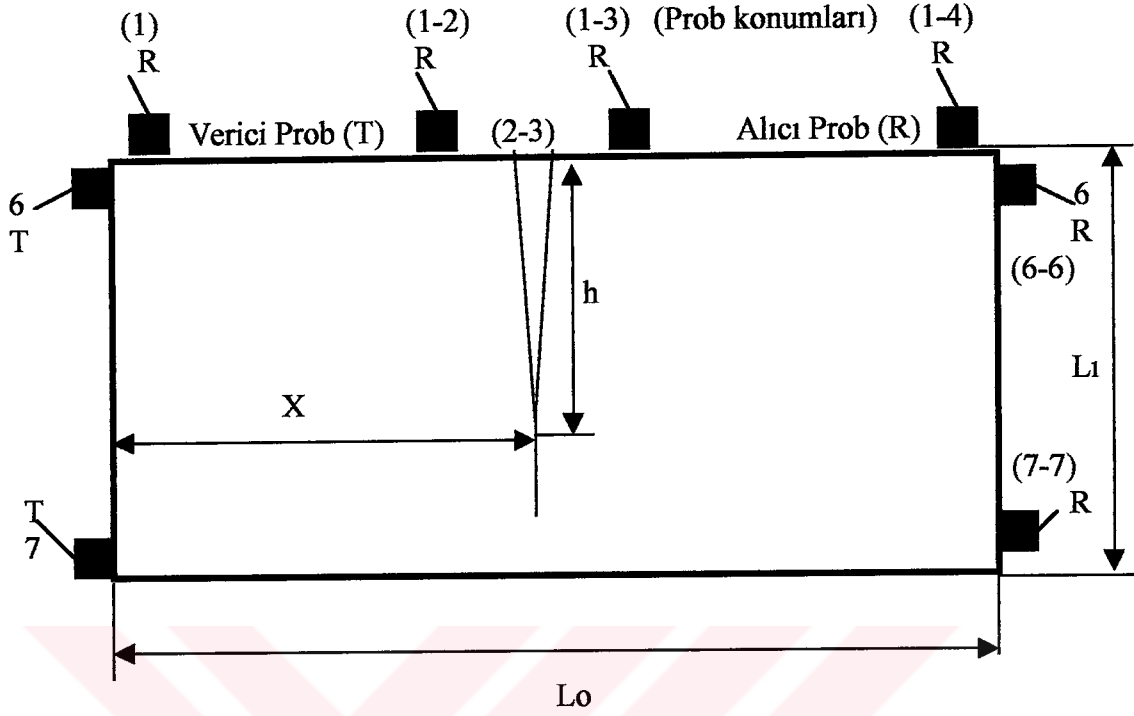
Deneysel çalışmalarda ultrasonik hız ölçümlerine uygun olmayan yüzeyler kullanılmamıştır. Numuneler, farklı ebatlardaki alüminyum kalıplarda şekillendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda ayrıca ahşap numuneler üzerinde ultrasonik hız ölçümleri yapılmıştır. Ahşap numuneler üzerinde yapılan çalışmaların sonuçları burada verilmektedir. Ahşap numuneler üzerine yapılan çalışmalarda farklı ahşap numuneler kullanılmış ve çatlaklar numune üzerinde farklı yerlerde meydana getirilerek ölçümler yapılmıştır. Ahşap numune üzerine yapılan çalışmaların amacı refrakter beton numunede döküm ve kesme işlemlerinin zor olmasından dolayı tercih edilmiştir.

Dökülebilir refrakterlerin şekillendirilmesinde uygun kıvamda su-çimento karıştırılarak numune hazırlanır, normal betona benzer şekilde su kullanılır. Suyun yarısı hidrasyonda kullanılırken diğer yarısı agrega gözeneklerinde ve aralarındaki boşlukta absorbe olur. Bu nedenle şekillendirme sırasında kullanılan suyun oranı çok önemlidir ve standartlara uygun olarak tayin edilmelidir. Numunelerin şekillendirilmesinde alüminyum kalıp kullanılmıştır. Daha sonra uygun kıvam elde edilinceye kadar su ilave edilmiştir. Şekillendirme sırasında numune üzerine basınç uygulanmamıştır.

Kurutma sırasında serbest su uzaklaşır. Numunenin kurutma işlemi açık havada yapılmış olup 48 saat bekletilmiştir. Katılan su, uzaklaştığı zaman yeri boş kalır. Su oranının, gerekenden fazla katılması, malzemede gözenek oranını ve kuruma küçülmesini artıracığından mukavemeti ve ultrasonik hızı düşürür. Katılan su oranının düşük olması halinde, uygun oranda su kullanıldığı zaman meydana gelen hidrasyon reaksiyonları tam olarak gerçekleşemez ve mukavemet düşer.

Refrakter beton, ve pek çok seramik malzemede birden fazla faz bulunmaktadır. Refrakter beton agrega ve bunların çevresini saran ikinci faz diyebileceğimiz çimento bulunmaktadır. Çimento oranı düşük olmakla birlikte agreganın çevresini sardığı için malzeme özelliklerinde etkin rol oynamaktadır. Seramik malzemelerde önemli oranda gözenekte bulunmaktadır. Ultrasonik dalgalar bu boşluklardan saçılırlar ve birinden diğerine yollarına devam ederler.

Aşağıdaki ahşap ve refrakter beton üzere yapılan çalışmaların numune üzerindeki prob konumlarının şematik çizimi verilmiştir konumlar tüm çalışmalar için aynı olup sonuçlar bu konumlara göre verilmiştir. Farklı numune ebatları kullanıldığından dolayı boyutlandırma yapılmamıştır ve çizelgelerde her bir ölçüm için numunenin ebatları verilmektedir.



Şekil 6.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin prob yerleşim düzeneği.

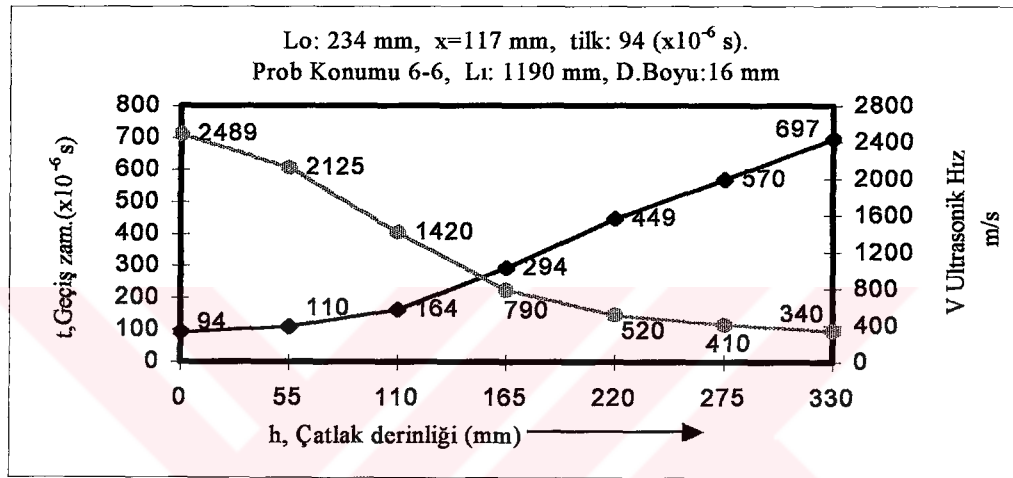
Şekil 6.1’ de verilen şematik çizimde, T: Verici prob, R: Alıcı prob, X: Çatlakla prob arası mesafe (mm), h: Çatlak derinliği (mm), Lo: Numune genişliği (mm) ve L1: Numune uzunluğunu (mm) temsil etmektedir.

Aşağıda ahşap numune üzerinde yapılan bir çalışma verilmiştir. Burada numunemizin boyutları çok uzun olduğundan (234x1190 mm) dolayı refrakter betonla yapmak mümkün olmamıştır ve ahşap tercih edilmiştir, ahşap tercihindeki sebep ise ölçüm ve kesme kolaylığından dolayı tercih edilmiştir.

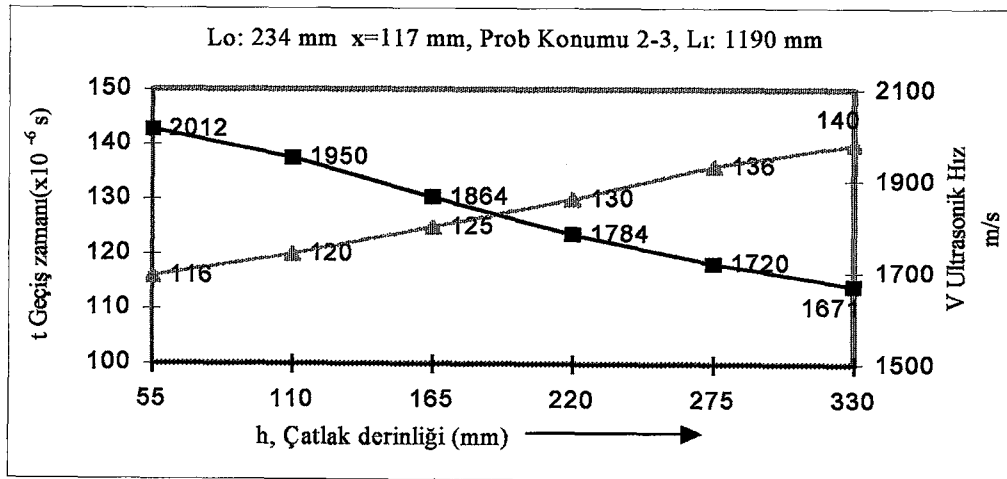
Uzun ahşap numunede yapılan deney sonucunda ultrasonik hızımızın malzemenin derinliği ile fazla etkilenmediği ve ultrasonik dalganın malzeme içerisinde çatlaka dik bir yol boyunca ilerlediği ve çatlakın etrafından dolaşarak alıcı proba ulaştığı anlaşılmaktadır. Malzeme üzerine yaptığımız çalışmada bunu destekler veriler elde edilmiş olup sonuçlar aşağıdaki çizelge ve şekillerde sunulmuştur. t geçiş zamanını göstermekte olup birimi mikrosaniyedir ($\times 10^{-6}$ s).

Çizelge 6.2 Çatlak derinliği-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 234*1190 mm. Çatlak tam ortada.

Çatlak Derinliği, mm	2-3 Konumu $t, (x10^{-6} s)$	6-6 $t, (x10^{-6} s)$	2-3 V, Hız m/s	6-6 V, Hız m/s
0	-	94	-	2489
55	116.3	110	2012	2125
110	120.5	164	1950	1420
165	125.5	294	1864	790
220	132.0	449	1784	520
275	135.9	570	1720	410
330	140.6	697	1671	340



Şekil 6.2 Uzun ahşap numunede geçiş zamanı, ultrasonik hız, çatlak derinliği arasındaki ilişki. 6-6 Konumu, çatlak tam ortada,

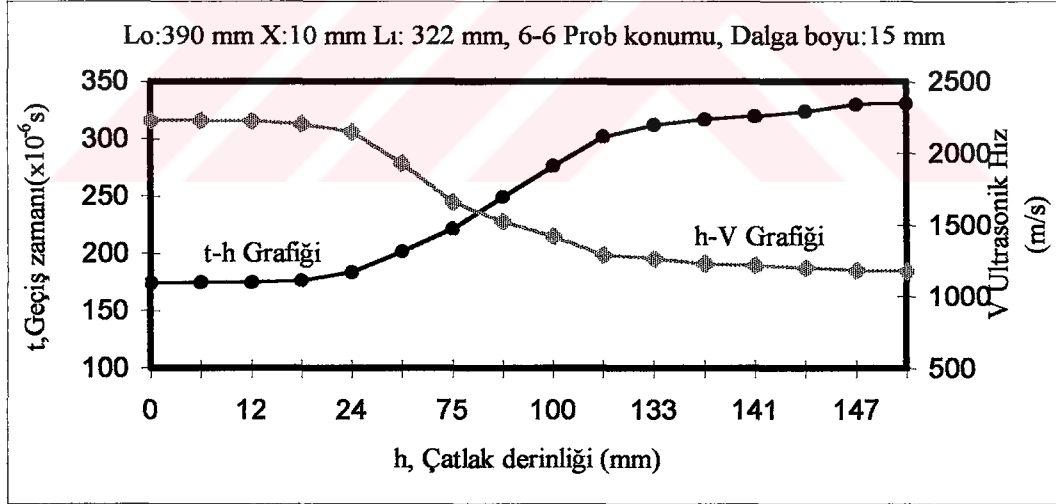


Şekil 6.3 Uzun ahşap numunede geçiş zamanı, ultrasonik hız, çatlak derinliği arasındaki ilişki. 2-3 Konumu, çatlak tam ortada, problar çatlak sağında ve solunda.

Aşağıda numune boyutları 390*322 mm olan ahşap malzeme kullanılarak yapılan bir çalışma verilmiştir. Çatlak verici probdan 10 mm uzakta ve prob konumları 6-6 şeklindedir. Burada, ultrasonik hız dalga boyunda düşüşe geçmiştir. Çatlaklar numunenin ortasında oluşturulmuş ve 6 mm kademe olarak daha sonra ise adım mesafesi değiştirilerek geçiş zamanı ölçülmüştür.

Çizelge 6.3 Çatlak derinliği-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 390*322 mm. Çatlak probdan 10 mm uzakta, 6-6 prob konumu.

Çatlak derinliği (h) mm	Geçiş zamanı ($\times 10^{-6}$ s)	Ultrasonik Hız (m/s)
6	175.1	2227
12	175.2	2226
18	176.8	2206
24	178.0	2190
50	202.0	1930
75	241.4	1618
90	249.4	1565
100	267.3	1455
130	302.1	1291
133	308.0	1266
138	316.8	1230
141	319.9	1219
144	324.4	1204
147	330.1	1182
150	330.5	1180

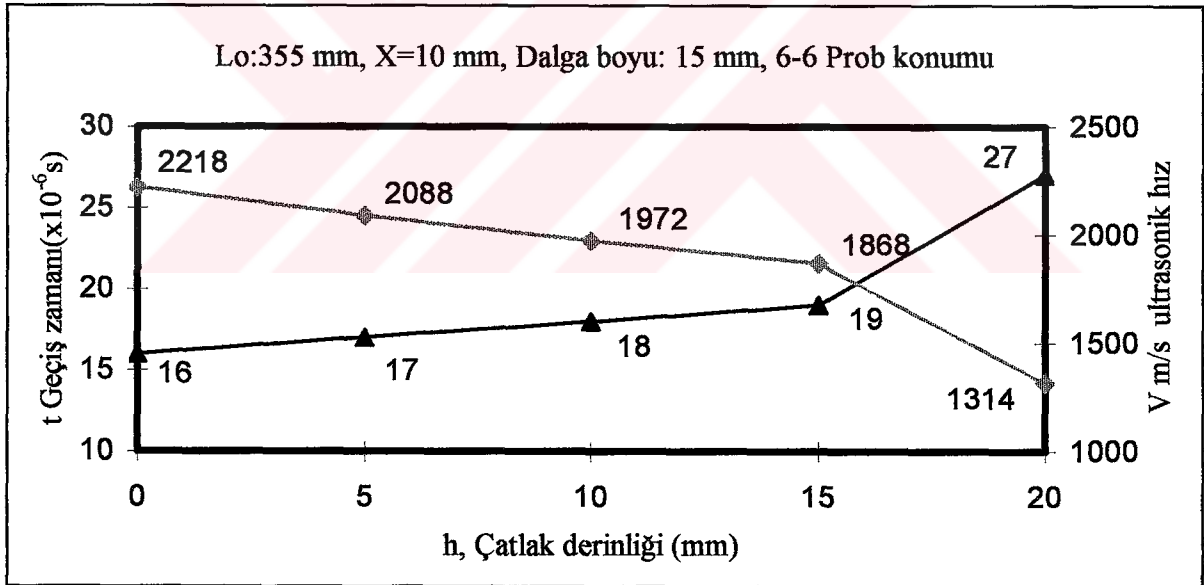


Şekil 6.4 Ahşap numune de geçiş zamanı, ultrasonik hız, çatlak derinliği arasındaki ilişki. 6-6 Konumu, çatlak 10 mm uzakta

Refrakter beton numune kullanılarak yapılan çalışmada aşağıda, çatlak mesafesine göre geçiş zamanları ve ultrasonik hızlar verilmiştir. Dalga boyu 15 mm olarak bulunmuştur, ultrasonik hız dalga boyunda azalma göstermiştir. Numunemiz 355*420 mm boyutlarında olup çatlak 10 mm verici probdan uzaktadır. Prob konumu 6-6 olarak ölçüm yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi çatlak derinliği 20 mm' ye kadar gidilmiştir, refrakter betondan çatlak oluşturmak zor olmaktadır. Her 5 mm' de ölçüm yapılmış olup hızlar bulunmuştur. Ultrasonik hızda saptanabilecek min. hata boyutu Bargel' e göre dalga boyunun yarısı iken krautkramer' e göre dörtte biridir, bu çalışmada bulduğumuz dalga boyu 15 mm' dir. Min. hata boyutumuz dalga boyumuzun yarısıdır ve daha küçük hatalardan etkilenmemektedir.

Çizelge 6.4 Çatlak-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 355*420 mm' dir. Çatlak probdan 10 mm uzakta

Çatlak derinliği h , mm	0	5	10	15	20
Geçiş zamanı t , ($\times 10^{-6}$ s)	16.1	17.2	18.0	19.1	27.0
Ultrasonik Hız V , m/s	2218	2088	1972	1868	1314



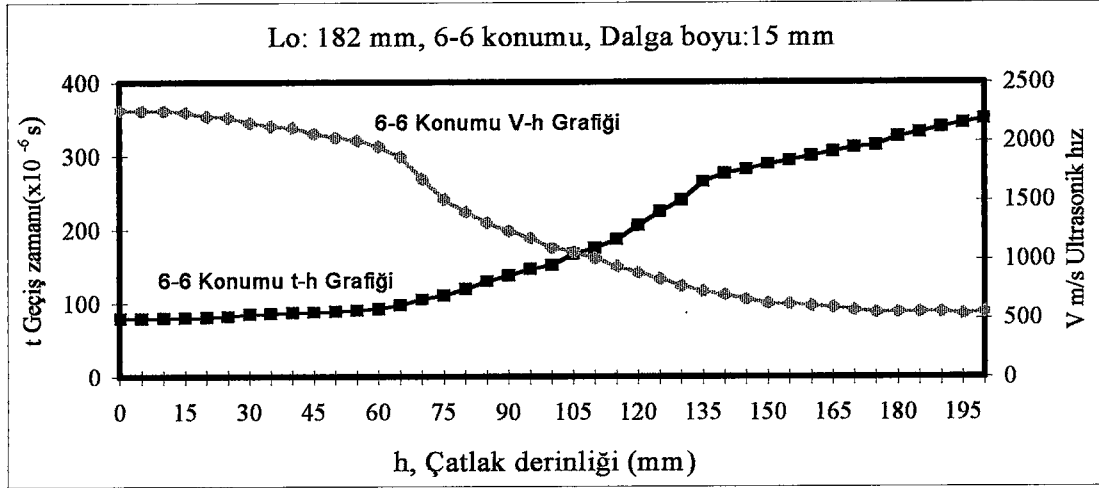
Şekil 6.5 Refrakter betonda; çatlak derinliği, geçiş zamanı ve ultrasonik hız arasındaki ilişki. 6-6 prob konumu, çatlak probdan 10 mm uzakta.

Bir diğer çalışmada ise boyutları 182*302 mm olan refrakter beton kullanılmıştır. Problar 6-6, 1-4, 2-3 konumlarına getirilerek ölçümler yapılmıştır. Numunemizde çatlak ortada yer almaktadır. Çizelge 6.5' de çatlak derinliğine göre geçiş zamanları ve ultrasonik hızlar verilmiştir. 6-6 konumu için çatlak 5 mm adımlarla ilerletilmiş ve ölçüm yapılmıştır. Geçiş süresinin bulunması sonucu ölçülen hız değerinde dalga boyu 15 mm olarak bulunmuştur.

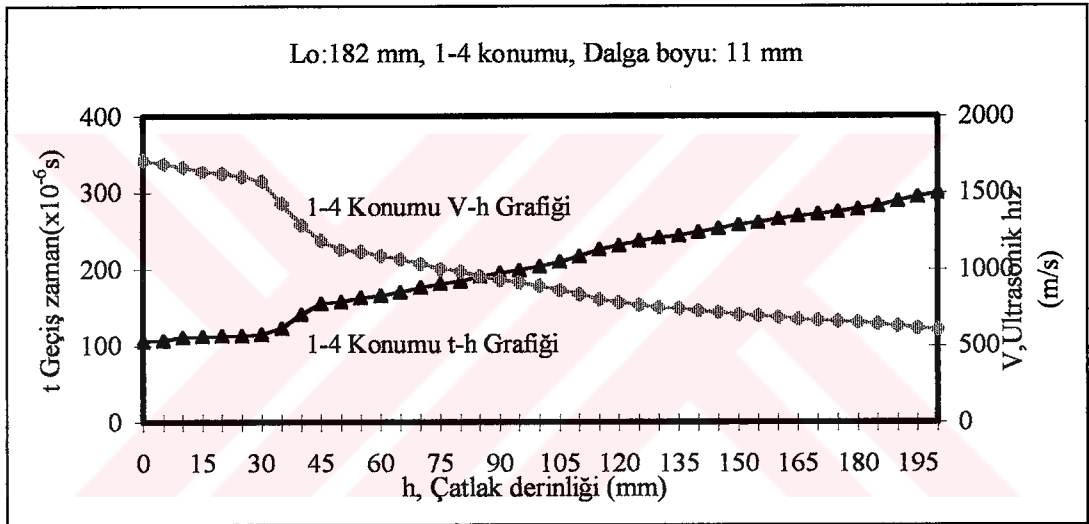
1-4 konumunda yaklaşık olarak üç dalga boyunda ciddi bir etkileşim söz konusudur. Dalga boyu 11 mm olup, ultrasonik hız 30 mm çatlak derinliğinde düşüşe geçmiştir.

Çizelge 6.5 Refrakter beton numune, çatlak derinliği-ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 182*302 mm. Çatlak tam ortada.

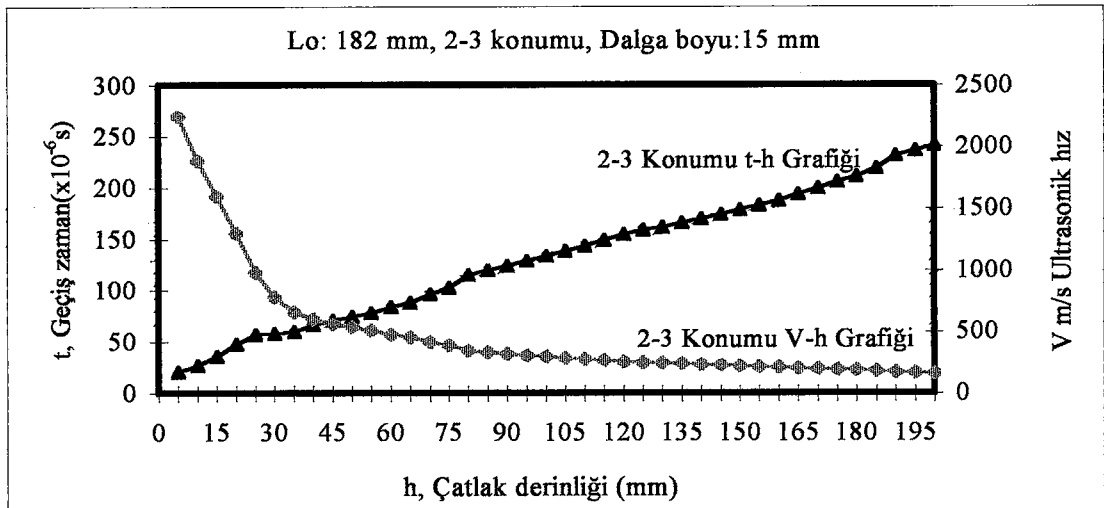
Çatlak Derinliği (h) mm	Prob 6-6 t,Geçiş Z. ($\times 10^{-6}$ s)	Prob 2-3 t,Geçiş Z. ($\times 10^{-6}$ s)	Prob 1-4 t,Geçiş zam ($\times 10^{-6}$ s)	Ultrasonik Hız, V m/s 6-6 Konum.	Ultrasonik Hız, V m/s 2-3 Konum.	Ultrasonik Hız, V m/s 1-4 Konum.
0	79.9	-	103	2273	-	1766
5	80.2	17.8	107	2269	2242	1700
10	80.3	21.2	111.6	2265	1887	1630
15	80.6	28	112.3	2258	1428	1621
20	81.3	30.5	112.9	2238	1300	1612
25	82.6	41.1	113.1	2203	980	1609
30	85.7	51.3	115.4	2123	780	1577
35	86.2	58.7	116.3	2111	680	1565
40	87.5	66.5	142	2080	602	1193
45	88.2	70.9	155.8	2063	564	1168
50	89.3	74.4	158.1	2038	538	1151
55	90.5	78.1	163.3	2011	512	1114
60	92.8	83.6	165.6	1961	478	1100
65	98	88	170.2	1860	455	1069
70	105.8	96.2	175.8	1720	416	1035
75	111	102.5	181.2	1639	390	1004
80	120	115.2	184.2	1510	347	988
85	130	119.6	190.6	1407	334	955
90	138	124.2	195.3	1320	322	932
95	146.2	129	198.8	1240	310	915
100	151.8	133.6	204	1190	299	892
105	167	139.2	210	1090	287	867
110	175	143.6	217.6	1010	279	836
115	186.8	149.6	226.3	970	267	804
120	205.5	155.3	231.3	888	258	787
125	225	159.6	237.4	833	250	767
130	240	162	241.5	773	247	754
135	265	166.1	244	730	241	746
140	276.3	170.3	248.6	700	235	732
145	281.9	174.6	253.2	660	229	719
150	289	179.2	258.5	630	223	704
155	294.6	183.5	261.3	618	218	697
160	300.1	188.2	265.8	607	213	685
165	306.1	194.2	269.6	595	206	675
170	311.7	199.8	272.5	585	200	668
175	315	206.5	275.1	577	194	661
180	326.5	211.7	279.2	557	189	652
185	332.8	219.5	282.8	560	182	644
190	339.6	231.8	289.1	535	173	630
195	345.1	236.3	295.3	528	170	617
200	350.8	241.6	300.1	520	166	607



Şekil 6.6 Refrakter beton numunede 6-6 konumu için; çatlak derinliği, geçiş zamanı, ultrasonik hız ilişkisi Lo:182 mm çatlak numune ortasında.

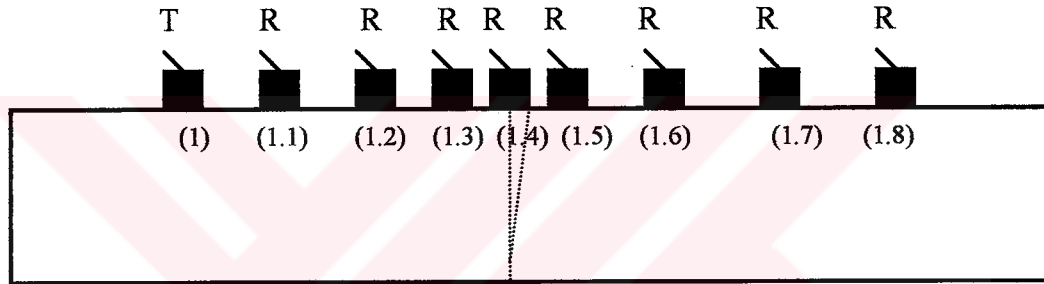


Şekil 6.7 Refrakter beton numunede 1-4 konumu için; çatlak derinliği, geçiş zamanı, ultrasonik hız ilişkisi Lo:182 mm çatlak numune ortasında.



Şekil 6.8 Refrakter beton numunede 2-3 konumu için; çatlak derinliği, geçiş zamanı, ultrasonik hız ilişkisi, çatlak numune ortasında.

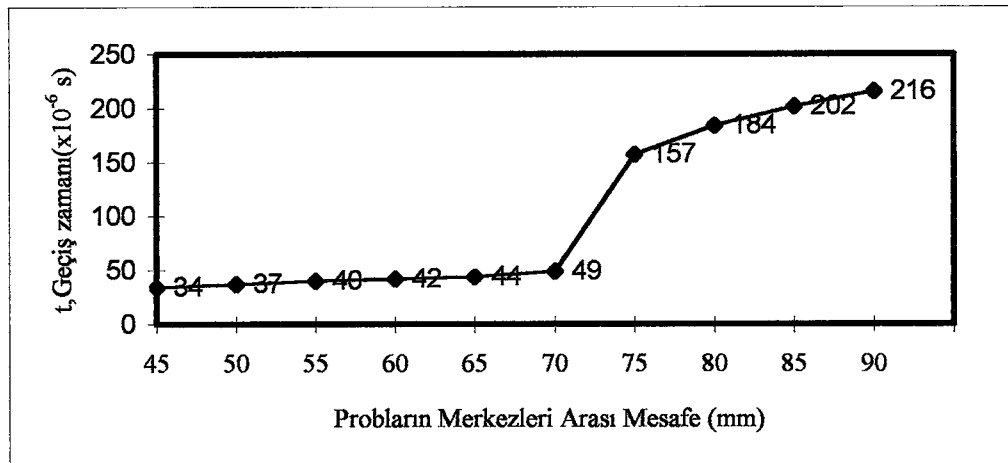
Şekil 6.9' daki örnekte görüldüğü gibi refrakter betonda yapılan çalışma, verici prob (T) sabit olmak üzere, alıcı probun (R) çatlak öncesi, çatlak üstü ve çatlak sonrası konumlarında mesafe adım adım değiştirilerek yapılmıştır. Çatlak numunenin ortasındadır, her 5 mm' de ölçüm yapılmıştır. Mesafe prob merkezleri arası konumu ifade etmektedir ve problemler birbirlerinden uzaklaştırılarak mesafe değiştirilmiştir. Verici prob merkezi kenardan 30 mm uzaklıktadır. Burada aynı zamanda problemler çatlak üzerinden geçirilerek etkileşim incelenmiştir. Şekil 6.9' da görüldüğü gibi alıcı prob, sabit konumdaki verici probdan uzaklaştırılıp ölçüm yapıldığında 60 mm' ye kadar geçiş zamanında az miktarda artış söz konusudur, fakat 60-90 mm arası büyük bir artış göstermiş. Artıştaki etken çatlak mesafesinin 90 mm civarında oluşu sebep olmuştur. Alıcı prob merkezi çatlağı geçtikten sonra geçiş zamanında büyük derecede artış meydana gelmiştir.



Şekil 6.9 Refrakter beton numunede problemlerin yerleşim düzeneği, çatlak ortada, verici prob sabit alıcı prob hareketlidir.

Çizelge 6.6 Refrakter beton numunede prob merkezleri arası mesafe ve geçiş zamanı ilişkisi.

Prob Mesafesi (mm)	0	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
t , Geçiş zam. ($\times 10^{-6}$ s)	0	32.2	34.1	36.9	40.3	42.3	44.0	49.4	157	184	202	216

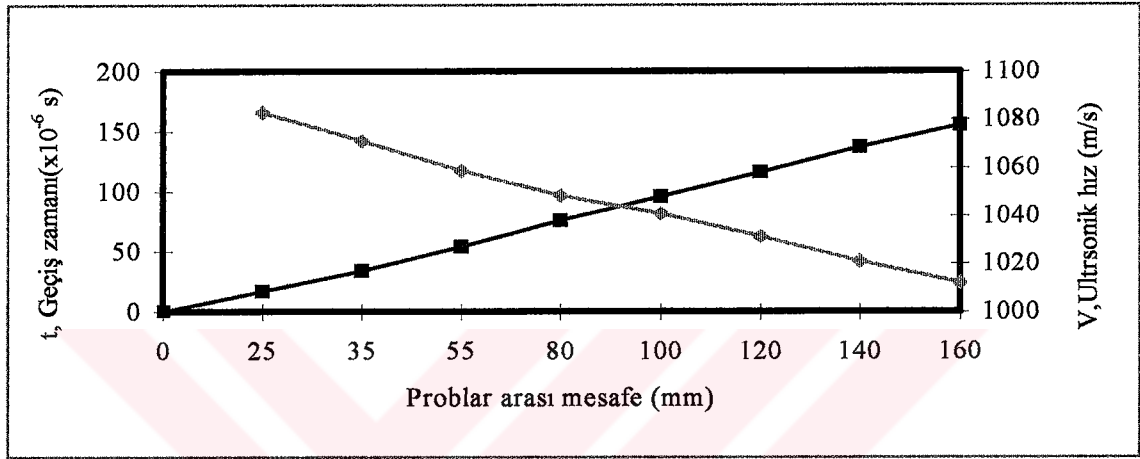


Şekil 6.10 Refrakter beton numunede verici prob sabit alıcı prob çatlak öncesi, üstü ve sonrası konumlarında prob merkezleri arası mesafe ve geçiş zamanı arasındaki ilişki.

Çizelge 6.7' de verilen veriler döküm bloğunun üzerinde çatlaksız olarak ölçülmüştür, burada mesafenin az oranda etkili olduğunu görmekteyiz ve aynı zamanda numunenin tepe konumunda ölçüm yapıldığında düz tabakadan etkilenmemekte ve bir artış göstermektedir.

Çizelge 6.7 Refrakter beton numunede problar arası mesafe ve geçiş zamanı ilişkisi.

Prob Mesafesi (mm)	0	25	35	55	80	100	120	140	160
t , Geçiş zam. ($\times 10^{-6}$ s)	0	23.1	32.9	52.3	76.1	96.2	116.3	137	152.3
V Ultrasonik hız (m/s)	0	1087	1060	1058	1052	1041	1034	1021	1012

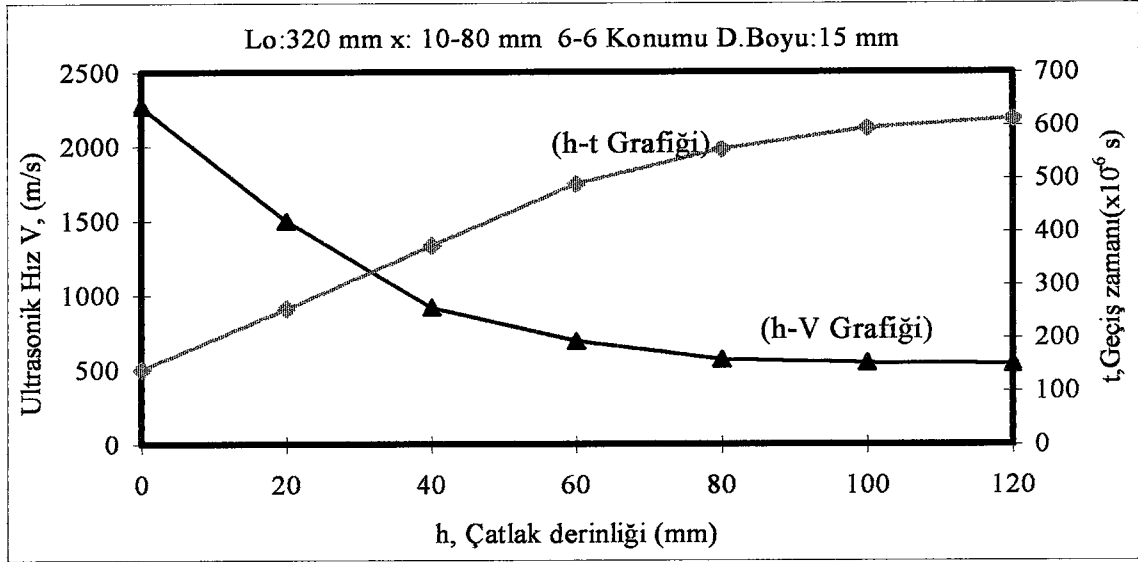


Şekil 6.11 Refrakter beton numunede verici prob sabit, alıcı prob hareketli durumda problar arası mesafe ve geçiş zamanı arasındaki ilişki, çatlaksız numune.

Çizelge 6.8 de refrakter beton numune üzerinde yapılan ve verici probdan 10 mm ve 80 mm uzaklıktaki iki çatlakın etkileşimi incelenmiştir. Dalga boyu 15 mm olarak bulunmuştur. Çift çatlaklı numunede 10 mm çatlak derinliğinde geçiş zaman aralıkları fazladır ve ultrasonik hızlarda da aynı oranda düşüş mevcuttur, bu çift çatlakın geçiş zamanında ve hızdaki düşüşte etken olduğunu göstermektedir. Şekil 10 ve 11' de görüldüğü gibi çift taraflı çatlaklarda çatlaklar geçiş zamanındaki artışı çatlak derinliği ile orantılı olarak artırmaktadır ve görüldüğü gibi 15 mm dalga boylarında ultrasonik hızlarımız da düşüş olmuştur.

Çizelge 6.8 Çatlak derinliği, ultrasonik hız ve geçiş zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 320*395 mm. Çatlak probdan 10-80 mm uzakta, çift taraflı çatlak.

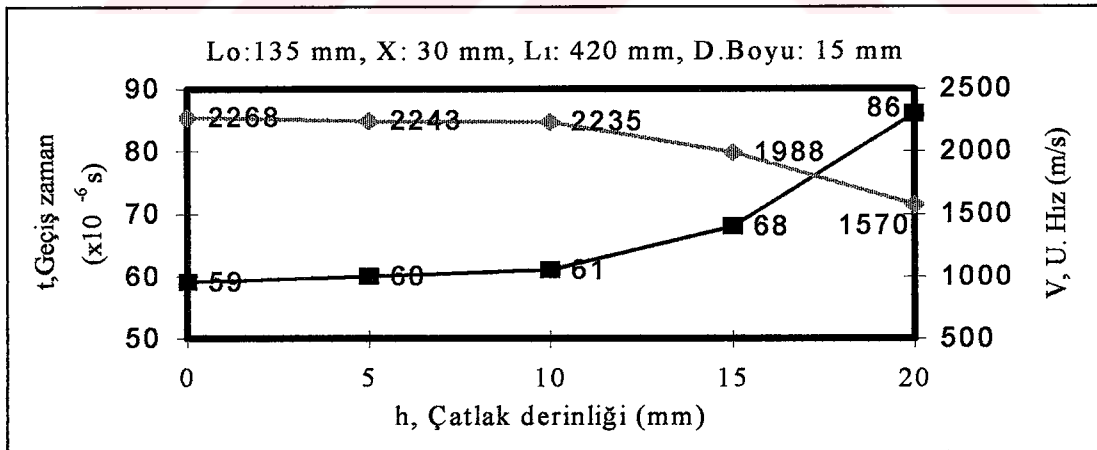
Çatlak Derinliği mm	Prob 6-6 t , ($\times 10^{-6}$ s)	Hız, V m/s 6-6 Komumu
0	141	2270
10	255	1499
20	374	920
30	490	693
40	555	570
50	595	546
60	612	538
70	-	-



Şekil 6.12 Çift çatlaklı refrakter beton numune; çatlak derinliği, geçiş zamanı ve ultrasonik hız arasındaki ilişki.

Çizelge 6.9 Çatlak-Ultrasonik Hız ve Geçiş Zamanı arasındaki ilişki. Numune boyutları 135*420 mm'dir. Çatlak probdan 30 mm uzakta ve ultrasonik dalgaya dik durumda yer almaktadır. Çift taraflı çatlak

Çatlak derinliği h, (mm)	0	5	10	15	20
Geçiş zamanı t, (x10 ⁻⁶ s)	59	60	61	68	86
Ultrasonik Hız V, (m/s)	2268	2243	2235	1988	1570



Şekil 6.13 Çift çatlaklı refrakter beton numune; çatlak derinliği, geçiş zamanı ve ultrasonik hız arasındaki ilişki.

7. SONUÇLAR

Deneysel çalışmalarda, hafif dökülebilir refrakter kullanılmış ve uygun su oranı ASTM C 860' a göre belirlenmiş ve ultrasonik hız (v) ölçmede 150 kHz' lik PUNDIT cihazı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda belirtildiği gibi, ön deneylerde ahşap malzeme kullanılmış, elde edilen bilgiler ışığında hafif dökülebilir refrakter üzerinde deneyler yapılmıştır.

1. Çatlağa dik doğrudan metod (6-6 konumu) uygulandığında, çatlak boyu, λ' yı geçtiği zaman v hız değeri, hızlı düşüş göstermektedir. Bu düşüş hem ahşap hemde dökülebilir refrakterlerde parabolik değişim şeklinde olmaktadır. Bir dökülebilir refrakter için böyle bir diyagramın çıkarılması halinde, bu malzemenin kullanıldığı uygulamalarda, bu diyagramdan faydalanılarak çatlak derinliği tahmin edilebilir.

2. Daha önce betonda ultrasonik hızda çatlak tayini ile ilgili yapılan çalışmalar dikkate alınarak uygulanan dolaylı yöntemde de (1-4 konumu) benzer bir değişim gözlenmiştir.

3. İlk iki madde sonuçlarının benzerlik göstermesi, uygulamada hata yakalamak için doğrudan ve dolaylı yöntemleri bize iki ayrı seçenek olarak sunmaktadır. Başka bir değişle, konstrüksiyon gereği bir yöntemle yakalayamayacağımız hatayı diğer yöntemle yakalayabiliriz.

4. Ultrasonik hızın çatlak derinliğine bağlı değişimi ilk iki maddeden biraz farklıdır, ama çatlak tayininde diğerlerinden fazla bir farklılık göstermez. Çatlak yerinin tayini çok kolay olduğu için, 2-3 konumunda dolaylı metodla sadece bir çatlağı inceleyebiliriz. Diğer çatlaklarla etkileşimini önleyebiliriz.

5. Refrakter betonda, kenara yakın çatlaklar oluşturmak zor olduğundan kenara yakın ikili çatlakların etkileşimi ahşap malzemede yapılmıştır. Ultrasonik hızın çatlak derinliklerine bağlı değişimleri, tek çatlağa göre daha etkin bulunmuştur.

6. Ultrasonik hız ölçme yöntemi ile; malzememizde kusur ve diğer hatalar daha önce elde ettiğimiz güvenilir sonuçlar, üretim sürecindeki veriler ile karşılaştırılarak kalite kontrol aşamasında malzeme içerisindeki kusur tespiti yapılarak üretim şartlarında kontrol sağlanmasına olanak tanımaktadır.



KAYNAKLAR

Aly, F., ve Semler, C.E., (1985), "Prediction of Refractory Strength Using Nondestructive" Amer. Ceram. Soc. Bull., 64 (12):1555-58

Anık, S., ve Vural, M., (1993), 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi Elkitabı, Birsen Yayınevi.

Banerjee, S., (1998), "Recent Development in Monolithic Refractories", Amer. Ceram. Soc. Bull., 77 (10):59-63,

Bargel, H.I, ve Schulze, G., (1985), Malzeme Bilgisi, (Çev., Ş. Güleç, A. Aran), Tübitak,

Durmuş, Ç., (1998), "Alümina Esaslı Dökülebilir Refrakterlerin Geliştirilmesi", Yük. Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Fuju, K., Kondo, W., ve Ueno, H., (1986), "Kinetics of Hiltration of Monocalcium Aluminate" J. Amer. Cer. Soc., 69 (4): 361-4

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, 357-75

Hallstedt, B. (1990), Assesment of the CaO - Al₂O₃ System, Division of Phsical Metalurgy, Royal Institute of Techonology.

Kıltaş, "Refrakter ve Çimento Hammaddeleri Sanayii Katalogu".

Krantkramer, (1977), "Ultrasen Enerjisi ve Malzeme Muayenesine Uygulanması", Yaman, C.,1995 "Ultrasonic Inspection of Castable Refractories" Interceram., 44 (5): 1995

Knudsen, F.P., (1962), "Effect of Porosity on Young's Modulus of Alumina", Amer. Ceram. Society Bull., 45 (2): 94-95

Neville, A.M., (1981), "Properties of Concrete", The English Language Book Society and Pitman Publishing. 3. Baskı,

Nishikawa, A., (1984), Technology of Monolithic Refractories, Pilibrico Japan Co. Ltd.

Niyogi, S.K. ve A.C. Das, (1994), "Prediction of Thermal Shock Behaviour of Castable Refractories by Sonic Measurements", Interceram, 81 (6): 453-457

Norton, F.H., (1974), Elements of Ceramics, Addison-Weslwy Publishing Company,

Parker, K.M., Sharp, J.H., Refractory Calsium Aluminate Cement, University of Sheffield.

PUNDIT, Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester, CNS

Robson, T.D., (1962), High-Alumina Cements and Concretes, Contractors Record Ltd., London.

- Russel, R.O., ve Morrow, G.D., (1984), "Sonic Velocity Quality Control of Steel Plant Refractories", Amer. Ceram. Soc. Bull., 63 (7):911-914
- Singh, V.K., ve Ali, M.M., (1980), Trans. J. Brit. Ceram. Soc., 79:112-14,
- Sourie, A., ve Glasser, F.P., (1991), "Studies of the Mineralogy of High Alumina Cement Clinkers", Br. Ceram. Trans. Jour., 90 (1):71-76
- Spaulding, W., ve Wheeler, G., (1999), ASNT Level 2 Study Guide Ultrasonic Teting Method
- Tarun, R. N., ve Malhotra, V.M., (1990), CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete,
- 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, TMMOB, Metalurji Mühendisleri Odası, Ankara, 373-380.
- Topuz, A., (1993), Tahribatsız Muayeneler, YTÜ, Kimya-Metalurji Fakültesi, Sayı:281 İstanbul
- Tuncer, E., (2001), "Kaynak Bağlantıların Ultrasonik ve Radyografik Muayenelerinin Karşılaştırmalı Analizi", Yük. Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uygur, M.E., (1976), Malzemelerin Dinamik Muayenesi, Middle East Technical University, Turkey
- Wallace, W.R., Criss, H.G., (1968), Thermal Conductivity of Castable Refractories in Relation to Bulk Density.
- Yaman, C., Topuz, A., (1991), "Yerli olarak Üretilen Dökülebilir Refrakterlerin Özelliklerini Etkileyen Parametreler", Metalurji Dergisi, Sayı: 72-73
- Yaman, C., (1994), "Dökülebilir Refrakterlerin Yapısı ve Özellikleri", Metal Dünyası
- Yaman, C. Abkan, T., (1994), "Ultrasonik Hız Ölçme Yöntemiyle Beton Muayenesi"
- Yaman, C., (1995), "Refrakterlerin Rezonans ve Ultrasonik Yöntemle Tahribatsız Muayenesi", Metal Dünyası, Sayı:26,
- 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,
- Yaman, C. ve Akdoğan, A., (2000) "Dökülebilir Refrakterlerde mukavemet ile Ultrasonik Hız arasındaki ilişki", 10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi 24-28.05.2000, İstanbul.
- Yeter, A., (2001), "Magnezit Refrakterlerdeki Son Gelişmeler", Seminer, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 01/01/1976

Doğum yeri Kocaeli

Lise 1991-1994 Gebze Anadolu Teknik ve End. Meslek Lisesi

Lisans 1995-1999 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Metalurji Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2000-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Üretim Programı

Çalıştığı Kurumlar

1998

Diler Demir-Çelik End. A.Ş.

1999

Nasaş Alüminyum San. A.Ş.