

**SERAMİK KAROLARIN ULTRASONOGRAFİK
TAHRİBATSIZ MUAYENE
METODU İLE İNCELENMESİ**

Elif EREN

Doktora Tezi

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2011

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 080210**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Elif EREN'in “**Seramik Karoların Ultrasonografik Tahribatsız Muayene Metodu ile İncelenmesi**” başlıklı **Seramik Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 29.12.2010 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı-Soyadı		İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Doç. Dr. Semra KURAMA	
Üye :	Doç. Dr. Alpagut KARA	
Üye :	Yard. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK	
Üye :	Prof. Dr. Ferhat KARA	
Üye :	Yard. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

SERAMİK KAROLARIN ULTRASONOGRAFİK TAHRİBATSIZ MUAYENE METODU İLE İNCELENMESİ

Elif EREN

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Semra KURAMA
2011, 193 sayfa**

Seramik karo üretiminde kalite kontrolü zor ve işgücü yoğun bir süreçtir. Kalite kontrolünde en önemli basamağı ürünün istenilen yoğunluk ve mukavemete ulaşması oluşturmaktadır. Geleneksel yöntemlerle yapılan yoğunluk ölçüm testleri mevcut üretimden seçilen temsili ürünler için yapılabilmekte ve yaklaşık 8 saat sürmektedir. Kalitenin artırılması ve üretime anında müdahale edilebilmesi açısından bu sürecin kısaltılması ve çok daha fazla ürün için gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Buradan hareketle yapılan çalışmalarda tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik test yönteminin kullanımı araştırılmıştır. Granit karo granüllerinden hazırlanmış karolar farklı sıcaklıklarda sinterlenerek temaslı ultrasonik A-tarama ile ultrasonik dalgaların ilerleme süresi ve hızının yığınsal yoğunluk, görünür yoğunluk, görünür porozite (%) ve su emme (%) ile değişimi incelenmiştir. Geleneksel yöntemle ölçüm yapmaya gerek kalmadan elde edilen ultrasonik hız-yığınsal yoğunluk, ultrasonik hız-görünür yoğunluk, ultrasonik hız-görünür porozite (%), ultrasonik hız-su emme (%) kalibrasyon eğrilerini kullanarak ve sadece ultrasonik hız ölçümü yaparak diğer özellikler (yoğunluklar, porozite, su emme) belirlenebilmektedir. Delikli numunelerde, iletilen ultrasonik dalgaların enerjisinin azalması sebebiyle ultrasonik pik şiddeti azaldığı görülmüştür. Daldırma ultrasonik C-tarama ile karolardaki çeşitli hatalar incelenerek hata boyutu ve yeri ile ilgili detaylı bilgi elde edilmiştir. Hatanın yüzeye uzaklığı ile ilgili taramalı elektron mikroskobu (SEM) karakterizasyon görüntüleri, ultrasonik C-tarama ile elde edilen hata yeri bilgisini desteklemektedir. Yurtdışında yapılan temassız ultrasonik C-tarama analizleri ise hata çeşidine göre farklı sonuçlar vermiştir. Temassız ultrasonik yöntem ile ultrasonik süre ölçümleri mevcut laboratuvar imkânlarıyla denenmiş ancak kullanılan temassız problemlerin ultrasonik sinyalleri iletmemesi nedeniyle ölçüm yapılamamıştır.

Anahtar Kelimeler: Tahribatsız muayene, seramik karo, ultrasonik test

ABSTRACT

PhD Dissertation

INSPECTION OF CERAMIC TILES WITH ULTRASONOGRAPHIC NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD

Elif EREN

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Ceramic Engineering Program**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Semra KURAMA
2011, 193 pages**

Quality control at tile production is a difficult and extensive labour force process. The most important step of quality control consists of achievement of desired density and strength. Traditional density test method conducts chosen representative samples of production and takes 8 hours. Improvement of quality and interfere to the production process immediately, it is necessary to shorten this test time and inspect more samples. From this point of view, in this study ultrasonic test method was investigated as one of non-destructive testing method. Tiles prepared by using porcelain tile granules were sintered in different temperatures and then changing of ultrasonic time and velocity with bulk density, apparent density, apparent porosity (%), water absorption (%) inspected via contact A-scan ultrasonic testing. Without necessity of traditional test methods, by using obtained ultrasonic velocity-bulk density, ultrasonic velocity–apparent density, ultrasonic velocity–apparent porosity (%), ultrasonic velocity–water absorption (%) calibration plots and only ultrasonic velocity measurement other properties (densities, porosity, water absorption) can be determined. In the samples containing drilled holes, because of the energy decrease of induced ultrasonic velocity, a decrease in the intensity of ultrasonic peak was observed. Various defects were inspected by using water immersion ultrasonic C-scan, detailed information was obtained about defects' size and place. By measurement of scanning electron microscope (SEM) characterization images about the distance between the defect and the surface supported by defect place information obtained with C-scan ultrasonic. Non-contact ultrasonic C-scan analyses held abroad yielded different results for various defects. Ultrasonic time measurements with non-contact ultrasonic test method was tried with current laboratory equipments but since the non-contact transducers used did not conduct ultrasonic signals, measurements could not be held.

Keywords: Non-destructive testing, ceramic tile, ultrasonic test

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca azmini ve kararlılığını örnek aldığım değerli danışmanım Doç. Dr. Semra KURAMA'ya, değerli endüstriyel danışmanım Graniser Granit ve Seramik A.Ş. Ar-Ge Müdürü Levent ORHAN'a en derin şükranlarımı sunarım. Tez çalışmalarımın yönlendirilmesi ve değerlendirilmesinde bana yol gösterici olan tez izleme jürimdeki değerli hocalarım Doç. Dr. Alpagut KARA ve Yard. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım süresince bana her türlü desteği veren Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği çalışanlarına, Hamburg-Harburg Teknik Üniversitesi İleri Teknoloji Seramikleri ve Polimer Kompozitler Bölümleri çalışanlarına, Seramik Araştırma Merkezi çalışanlarına ve Graniser Granit ve Seramik A.Ş. çalışanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım için destek sağlayan Graniser Granit ve Seramik A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın katkılarından dolayı Dr. Rolf JANSSEN'e, Doç. Dr. Gürsoy ARSLAN'a, Prof. Dr. Karl SCHULTE'ye, Wilfried LIEBIG'e, Hüseyin ÖZÇOBAN'a, Prof. Dr. Igor SOLODOV'a, Dr. Eckhardt SCHNEIDER'e, Prof. Dr. Çetin ÇETİNKAYA'ya, Sn. Neslihan MAHMUTYAZICIOĞLU'na, Sn. Mehmet ÇİFCİ'ye, Sn. Celal ÇELEBİ'ye, Sn. Ahmet DEMİRKESEN'e, Sn. Ayşegül ÜNYE'ye, Sn. Mahmut KOÇ'a, Yeşim ÖZCAN'a, Pervin DAĞ'a, Yapıncak GÖNCÜ'ye, Kıymet EŞİYOK'a, Araş. Gör. Şükrü GÖRGÜLÜ'ye, Araş. Gör. Özen YELBAŞI'ya, Zahide ÖZTÜRK'e, Burçak ATAY'a, Özgür CENGİZ'e, Dr. Aslı TAYÇU'ya, Yeşim TUNÇEL'e, Hasan SARI'ya, Baran TARHAN'a, Evren BAŞKUT'a ve Endüstriyel Doktora Programı'na, Yellow Submarine'e, Türk-ING Kulübü'ne, teyzelerim Ayşe TAN, Neşe GÜLTEKİN ve Songül MUTLUER'e, dayım Zafer YILDIRIM'a, kuzenim Zeynep ÖZGÜN'e teşekkür ederim.

Canım annem Ayfer EREN, babam Necdet EREN ve kardeşim Emre EREN'e her zaman yanımda oldukları için çok teşekkürler...

Elif EREN

Şubat 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. SERAMİK KAROLAR	4
2.1. Porselen Karo	12
2.2. Yer Karosu	14
2.3. Duvar Karosu	14
3. TAHRİBATSIZ MUAYENE	16
3.1. Sıvı Penetrant Yöntemi	17
3.1.1. Penetrant sıvının uygulanması	18
3.1.2. Hata görüntülerinin değerlendirilmesi	20
3.2. Manyetik Yöntemler	20
3.2.1. Manyetik yöntemin kullanılabilmesinin şartları	21
3.2.2. Manyetik yöntemin uygulanmasındaki prensipler	21
3.2.3. Manyetik yöntemde kanıtlanabilir hata boyutları	21
3.2.4. Manyetizasyon akımı	22
3.3. Radyografi Yöntemi	22
3.3.1. Radyografi yönteminin uygulanmasındaki prensipler	23
3.3.2. Radyografi yönteminin seramiklerde uygulamaları	23
3.3.3. Bilgisayarlı X-ışını tomografisi	24
3.4. Ultrasonik Muayene Yöntemi	25
3.4.1. Dalga yayılma modeli	28

3.4.2. Ultrasonik dalga tipleri.....	28
3.4.3. Akustik direnç (Z).....	32
3.4.4. Ses zayıflaması.....	33
3.4.5. Probların seçimi	35
3.4.6. Ultrasonik testin uygulama örnekleri	36
3.4.6.1. Ortalama tane boyutunun belirlenmesi	36
3.4.6.2. Mikroyapının incelenmesi.....	37
3.4.6.3. Sertlik ölçümü	37
3.4.6.4. Elastik sabitlerin ve gerilmelerin belirlenmesi.....	37
3.4.6.5. Kırılma tokluğu ve akma dayancı değerlerinin saptanması	39
3.4.6.6. Kompozit ve seramik malzemelerdeki uygulamalar.....	39
3.4.7. Temassız ultrasonik teknikler	46
3.4.7.1. Doğrudan iletim	47
3.4.7.2. Aynı tarafta verici-alıcı	48
3.4.7.3. Tek prob	48
3.4.8. Lazerle ultrasonik test	49
3.5. Girdap Akımları Yöntemi	50
3.5.1. Girdap akımları ile muayenenin prensipleri.....	50
3.5.2. Eddy akımlarının oluşumuna malzeme özelliklerinin etkisi.....	51
3.6. Diğer Tahribatsız Muayene Yöntemleri.....	51
3.6.1. Akustik emisyon	52
3.6.2. Termografi.....	52
3.6.3. Optik holografi ile kontrol	53

4. SERAMİK KARO SEKTÖRÜNDE TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI 54

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 63

5.1. Bünyelerin Hazırlanması.....	63
5.2. Bünyelerin Sinterlenmesi	65
5.3. Fiziksel Özelliklerin Karakterizasyonu.....	66

5.3.1. Yoğunluk, porozite ve su emme özelliklerinin Arşimet metodu ile karakterizasyonu	66
5.3.2. Fiziksel özelliklerin ultrasonik test yöntemi ile karakterizasyonu	68
5.3.2.1. Ultrasonik süre ve hız ölçümü	68
5.3.2.2. Ultrasonik pik şiddetinin ölçülmesi	69
5.3.2.3. Ultrasonik C-tarama incelemeleri	69
5.4. Helyum Piknometresi ile Teorik Yoğunluk Ölçümü	70
5.5. Civa Porozimetresi ile Por Boyutunun Belirlenmesi	70
5.6. Fleksimetre ile Piroplastik Deformasyonun Belirlenmesi	71
5.7. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu	72
5.8. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Karakterizasyon	73
6. SONUÇLAR	74
6.1. Yoğunluk, Porozite ve Su Emme Ölçümü	74
6.2. Ultrasonik Süre ve Hız Ölçümleri.....	75
6.2.1. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karoların ultrasonik süre ve hız ölçümleri.....	75
6.2.2. Farklı kalınlıklarda preslenen karoların ultrasonik süre ve hız ölçümleri	85
6.2.3. Endüstriden temin edilen karoların ultrasonik süre ve hız ölçümleri	94
6.3. Fleksimetre ile Piroplastik Deformasyonun Belirlenmesi	101
6.4. Civa Porozimetresi ile Por Boyutunun Belirlenmesi	102
6.5. Ultrasonik Pik Şiddetlerinin Ölçülmesi	105
6.6. Helyum Piknometresi ile Yoğunluk Ölçümü.....	109
6.7. Hatalı Karoların Ultrasonik A-tarama ile İncelenmesi	112
6.7.1. Safsızlık şeklindeki hatalar	113
6.7.2. Boşluk şeklindeki hatalar	124
6.8. Ultrasonik C-tarama İncelemeleri	151
6.8.1. Safsızlık şeklindeki hatalar	152
6.8.2. Boşluk oluşturan hatalar.....	155

6.9. Temassız Prob C-tarama Görüntüleri.....	171
6.10. SEM ile Karakterizasyon	174
6.11. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu	179
7. GENEL SONUÇLAR	182
8. ÖNERİLER	185
KAYNAKLAR	186

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Sırlı tek pişirim seramik karo üretimi akış şeması	5
2.2. Preslenmiş üründe yoğunluk dağılımı (kesit alanı).....	8
2.3. Çoklu kalıplarda yoğunluk dağılımı (yukarıdan görünüşü)	8
3.1. Malzemede bulunan hataya bağlı olarak kullanılabilecek TMY	17
3.2. Ultrasonik muayenenin (darbe-yankı tekniği) şematik gösterimi	27
3.3. Boyuna dalga.....	29
3.4. Enine dalga.....	30
3.5. Yüzey dalgası	31
3.6. Lamb dalgaları	32
3.7. Ham seramikte hata tespiti. (a) Hatasız bölge, (b) 1,5 mm'lik yandan açılmış delik ile	35
3.8. Sinterlenmiş seramikte hata tespiti. (a) Hatasız bölge, (b) 1,5 mm'lik yandan açılmış delik ile.....	35
3.9. Sinterlenmiş seramikte ultrasonik dalga hızının, gözenekliliğin ve mekanik mukavemetin sıcaklıkla değişimi.....	40
3.10. Doğrudan iletim yöntemi	48
3.11. Aynı tarafta verici-alıcı yöntemi	48
3.12. Tek prob yöntemi	49
4.1. Temassız ultrasonik ölçüm sistemi	56
4.2. Temassız problemlerin seramik karo üretiminde kullanımı.....	58
4.3. Görüntü işleme programı ile elde edilmiş tane boyut dağılımı eğrisi	59
4.4. Kırılmış bir karoda tabakalanma hatası	60
4.5. Tabakalanma hatasının karonun yüzey sıcaklığına etkisi	61
4.6. Sağlam (a) ve tabakalanma içeren (b) ham karoların termografik görüntüleri.....	62
5.1. 330 mm X 330 mm karonun kenarına değişik çaplardaki matkap uçlarıyla açılan delikler.....	64
5.2. Hata oluşturmak amacıyla kullanılan seramik ve metal bilyeler	65
5.3. Boşluk oluşturmak amacıyla kullanılan ilaveler	65

6.1. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin su emme ile değişimi	76
6.2. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin yığinsal yoğunluk ile değişimi.....	76
6.3. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin görünür yoğunluk ile değişimi.....	77
6.4. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin görünür porozite ile değişimi.....	77
6.5. Ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi	82
6.6. Ultrasonik dalga hızının yığinsal yoğunluk ile değişimi	82
6.7. Ultrasonik dalga hızının görünür yoğunluk ile değişimi	83
6.8. Ultrasonik dalga hızının görünür porozite ile değişimi.....	83
6.9. (a) Lamelli dökme demir, (b) küresel dökme demir mikroyapıları	84
6.10. Farklı iki cihaz için ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin su emme ile değişimi.....	85
6.11. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı).....	87
6.12. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)	87
6.13. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga hızının vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)	88
6.14. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga ilerleme süresinin vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)	88
6.15. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga hızının kalınlık oranı ile değişimi	89
6.16. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı).....	91
6.17. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)	92
6.18. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga hızının vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı).....	92
6.19. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga ilerleme süresinin vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile	

değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)	93
6.20. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga hızının kalınlık oranı ile değişimi	93
6.21. Farklı rejimlerde pişen 200 mm X 200 mm karolar için ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi	94
6.22. Farklı rejimlerde pişen 200 mm X 200 mm karolar için ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi.....	96
6.23. Yer karolarının ultrasonik ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi	98
6.24. Yer karolarının ultrasonik ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi .	98
6.25. Granit karolarda ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi.....	99
6.26. Granit karolarda ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi.....	99
6.27. Tuğlaların su emmesi (%)’sinin kaynatma metodu ile belirlenmesinde görülen hataların analizi	100
6.28. Standart granit bünyesi için piroplastik deformasyon eğrisi.....	103
6.29. Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünyesi için piroplastik deformasyon eğrisi	104
6.30. 50 mm X 100 mm boyutta delikli granit karolar için matkap çapına göre ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin oranındaki değişim.....	105
6.31. 450 mm X 450 mm boyutta delikli granit karolar için matkap çapına göre ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin oranındaki değişim.....	107
6.32. 330 mm X 330 mm granit karolar için matkap çapına göre ultrasonik dalgaların karodan çıkış pik yüksekliklerinin değişimi (1: Hatasız karo, 2: 1,5 mm matkap ucuyla delinen, 3: 2 mm matkap ucuyla delinen, 4: 3 mm matkap ucuyla delinen).....	108
6.33. 330 mm X 330 mm’lik granit karonun 3 mm’lik matkap ucuyla delinen bölgesi için sinyallerin voltaj değerleri	108
6.34. 330 mm X 330 mm’lik granit karonun 2 mm’lik matkap ucuyla delinen bölgesi için sinyallerin voltaj değerleri	109
6.35. 330 mm X 330 mm’lik granit karonun 1,5 mm’lik matkap ucuyla delinen bölgesi için sinyallerin voltaj değerleri	109

6.36. Ultrasonik dalga hızının toplam porozite (%) ile değişimi	111
6.37. Ultrasonik dalga hızının teorik yoğunluk ile değişimi	112
6.38. Ultrasonik dalga hızının yığinsal yoğunluk ve toplam gözeneklilik ile değişimi	112
6.39. (a), (b) hatasız bölge için, (c), (d) 5 mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için, (e), (f) 3 mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi ve voltaj değerleri	113
6.40. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 3 mm çapında Si_3N_4 bilye içeren bölge için (c), (d) voltaj değerleri.....	117
6.41. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 4 mm çapında çelik bilye içeren bölge için (c) voltaj değerleri.....	120
6.42. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm çapında çelik bilye içeren bölge için (c) voltaj değeri; (d) hatasız bölge piklerinin, (e) hatalı bölge piklerinin düşük voltajdaki görüntüsü ...	122
6.43. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; karbon karası içeren bölge için (c) ve (e) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri.....	125
6.44. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından küçük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri	128
6.45. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından büyük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c), (d) ve (e) dalga ilerleme süresi, (f) voltaj değerleri	130
6.46. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; altıgen şeklinde bir PEG tableti içeren bölge için (c) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri.....	134
6.47. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 0,5 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri	136
6.48. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri	139

6.49. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi değeri; 2 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (b) dalga ilerleme süresi, (c) voltaj değerleri.....	142
6.50. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt hatası içeren bölge (c) voltaj değeri ...	144
6.51. Hatasız bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi (a), voltaj (b) değerleri; 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren bölge için dalga ilerleme süresi (c), voltaj (d) değerleri	146
6.52. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri	148
6.53. 5 mm ve 3 mm çaplarında ZrO ₂ bilyeler içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü.....	152
6.54. 3 mm çapında Si ₃ N ₄ bilye içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü.....	153
6.55. 4 mm çaplı çelik bilye içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	154
6.56. 1 mm çaplı çelik bilye içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	155
6.57. 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	156
6.58. Kağıt hatası içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü.....	157
6.59. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	157
6.60. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü	158
6.61. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen temsili geri yansıyan elektron (BE) görüntüsü (a), bu bölgeden yapılan EDX analizi (b)	159
6.62. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen temsili geri yansıyan elektron (BE) görüntüsü (a), bu bölgeden yapılan	

EDX analizi (b).....	160
6.63. 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	161
6.64. 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü	161
6.65. Plastik içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü.....	162
6.66. Plastik içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü....	162
6.67. Karbon karası içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	163
6.68. Karbon karası içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü.....	164
6.69. PMMA taneleri içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	164
6.70. PMMA içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	165
6.71. PEG içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü.....	166
6.72. 0,5 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	167
6.73. 1 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	168
6.74. 10 mm X 10 mm ebatlarında folyo içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü	169
6.75. Hatasız (a), 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt içeren (b), karolar için geri yansıyan ekolar.....	170
6.76. 1210°C’de sinterlenen (a), 1190°C’de sinterlenen (b) karolar için geri yansıyan ekolar.....	171
6.77. 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt hatası içeren numunenin C-tarama ultrasonik görüntüleri	173
6.78. 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren numunenin C-tarama ultrasonik görüntüleri	173

6.79. Gözenek miktarı fazla olan numunenin C-tarama ultrasonik görüntüleri..	174
6.80. Parlatılmış yüzeyinden çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü. (a) 1150 °C’de, (b) 1170 °C’de sinterlenmiş numuneler	175
6.81. Parlatılmış yüzeyinden çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü. (a) 1180 °C’de, (b) 1190 °C’de, (c) 1200 °C’de, (d) 1210 °C’de, (e) 1200 °C’de, (f) 1230 °C’de sinterlenmiş numuneler	176
6.82. (a) 1150°C, (c) 1190°C, (e) 1230°C’ler için karoların parlatılmış yüzeylerinden çekilen temsili geri yansıyan elektron (BE) görüntüsü ve bu görüntüler için por alan %’si (b) 1150°C, (d) 1190°C, (f)1230°C.....	178
6.83. Mukavemetin boyuna dalga hızı ile değişimi	180

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Yoğunluk dağılımını belirlemek için kullanılan yöntemler	9
2.2. Karo ürünlerin sınıfları.....	11
3.1. Yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak kanıtlanabilir hata boyutunun değişimi	18
3.2. Sıvı penetrant muayene sisteminde kullanılan işlem maddeleri	18
3.3. Malzemelere ve görülen hatalara göre nüfuz etme süresinin değişimi	19
5.1. Sinterleme rejimleri.....	66
6.1. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen granit karoların yığinsal yoğunluk, görünen katı yoğunluğu, görünen porozite ve su emme analiz sonuçları	74
6.2. Sinterleme rejimlerinin su emme değerleri üzerindeki etkisi	75
6.3. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için deney sonuçları.....	78
6.4. Farklı tepe sıcaklıklarında sinterlenen granit karoların yığinsal yoğunluk, görünen katı yoğunluğu, görünen porozite, su emme, kalınlık, süre, hız ölçüm sonuçları	81
6.5. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için deney sonuçları.	86
6.6. Kalınlık oranına bağlı olarak granit karolarda (50 mm X 100 mm) ultrasonik hızın değişimi	89
6.7. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için deney sonuçları....	90
6.8. Kalınlık oranına bağlı olarak yer karolarında (50 mm X 100 mm) ultrasonik hızın değişimi	91
6.9. Farklı rejimlerde pişen 200 mm X 200 mm karolar için su emme, ultrasonik süre ve hız sonuçları.....	95
6.10. Sinterleme rejimine bağlı olarak yer karolarının (200 mm X 200 mm) su emme, ultrasonik süre, ultrasonik hız analiz sonuçlarının ortalamaları ..	95
6.11. Endüstriden temin edilen karoların su emme ve dalga ilerleme süresi sonuçları	97
6.12. Granitlerin su emme (%) sonuçları	100
6.13. Granit bünyeler için fleksimetre ölçüm sonuçları.....	102
6.14. Ortalama por çapının fırın tepe sıcaklıkları ile değişimi.....	105

6.15. 50 mm X 100 mm boyutta delikli granit karolar için ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin yüksekliklerindeki değişim	106
6.16. 450 mm X 450 mm boyutta delikli granit karolar için ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin yüksekliklerindeki değişim	106
6.17. Fırın tepe sıcaklığına bağlı olarak yığınsal yoğunluk, teorik yoğunluk, toplam porozite, görünen porozite ve kapalı porozitedeki değişim	110
6.18. Farklı. tepe sıcaklığına bağlı olarak yığınsal yoğunluk, teorik yoğunluk, toplam porozitenin hız ile değişimi.....	111
6.19. Farklı karolarda dB'lere göre hata yüzdelerinin (%) değişimi.....	172
6.20. Ultrasonik hız ile ortalama por boyutunun değişimi.....	174
6.21. Por alan %'sinin sinterleme sıcaklığı ile değişimi.....	177
6.22. Mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi	181

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1950'li yıllardan itibaren gelişen Türk seramik kaplama malzemeleri sektörü, özellikle 1990 yılından sonra yaptığı büyük yatırım atağı ile bugün dünya seramik karo üretiminde söz sahibi olmayı başarmıştır. Ülkemiz 261 milyon m²'yi aşan üretimi ile dünyanın beşinci, Avrupa'nın ise üçüncü büyük seramik karo üreticisidir. 24 üreticinin faaliyet gösterdiği kaplama malzemeleri sektöründe, 2002 yılında 255,1 milyon m² olan kurulu kapasite 2007 yılında 360 milyon m²'ye çıkmıştır. Üretim miktarı 162 milyon m²'den 260 milyon m²'ye, iç piyasa satışları 89 milyon m²'den 156 milyon m²'ye, ihracatı ise 72,37 milyon m²'den 104 milyon m²'ye yükselmiştir. Türk seramik sektörü 5 kıtada 100'den fazla ülkeye ihracat yapmaktadır. En önemli ihracat pazarları sırasıyla İngiltere, Almanya, İsrail, Kanada, A.B.D., Yunanistan ve Fransa'dır. Üretiminin % 50'sini ihraç eden Türkiye, bugün dünyanın İtalya, İspanya, Çin'in ardından dördüncü büyük seramik kaplama malzemeleri ihracatçısıdır (Anonim 2010a).

Ülkemizin sahip olduğu yeri daha ileriye götürmek ve üretim potansiyelini arttırmak amacıyla birçok etkinlik düzenlenmektedir. Türkiye'nin Sanayi Stratejisi çerçevesinde Sanayi ve Ticaret Bakanlığı tarafından tüm ilgili kesimlerin katkılarıyla oluşturulan Seramik Sanayi Strateji Belgesi ve Eylem Planı'na göre seramik sanayi stratejisinin uzun dönemli vizyonu "Türk Seramik Sanayinin İmajını Yükselterek Küresel Pazar Payını Artırmak" olarak belirlenmiştir. Bu vizyonun yakalanabilmesi için "iç pazarda büyümenin sağlanması ve Türk Seramik sektörünün rekabet gücünün artırılması" genel amacı doğrultusunda "Kalite ve verimliliğin artırılması ile iç ve dış pazarda ticaret ve rekabet şartlarının iyileştirilmesi" şeklinde stratejik hedefler tespit edilmiştir (Anonim 2010b).

Günümüzde açık pazar koşulları ve rekabet nedeniyle sadece üretim yapmak yeterli olmamakta; güvenilir, kaliteli, çevre dostu ve rekabet edilebilir maliyetlerde üretim ve imalatı gerçekleştirmek gerekmektedir. 1960'lı yıllardan itibaren tüketicilerin beklentilerinin artması ve pazar koşullarının ağırlaşması, firmaları yeni üretim teknikleri ve kalite stratejileri geliştirmek zorunda bırakmıştır (Gür 1999a). Yoğun rekabet nedeniyle firmalar, ürünlerinde yüksek kaliteyi sürekli olarak sağlamak istediklerinden, kalite kontrol stratejilerinin

geliştirilmesinde tahribatsız tekniklerin önemi artmıştır. Tahribatsız teknikler, uygulama kolaylığının yanısıra gerek üretim hattında gerekse imalat işlemlerinden sonra ve kullanım sırasında parçalarda oluşan hataların belirlenmesini sağlamaktadır. Böylece, otomasyon sayesinde üretilen parçaların tamamı incelenebilmekte ve uygulanan testler parçaya zarar vermediği için, parça test sonrasında kullanılabilir. Ayrıca test sonrasında atık oluşmadığı için üretim maliyeti düşürülmekte; ürünün sağlamlığı ve kalitesinden emin olunmaktadır (Gür 1999b).

Seramiklerde sinterleme öncesi hatalar, mikroyapı kaynaklı gözeneklere ve yoğunluk farklılıklarına bağlı oluşabilmektedir. Bu hataları belirlemek ve üretim sırasında tespit etmek üretim etkinliğini geliştirecek ve seramik ürünleri için yeni pazarlar açacaktır. Kalite kontrolünde geleneksel metodları kullanmak, seramik üretiminde mikroyapı-hata gelişimini etkileyen farklı süreç değişkenlerinin ekisini en aza indirmek çok zordur (Shilling ve Gray 1998).

Seramik karo üretiminde kalite kontrolü zor ve işgücü yoğun bir süreçtir. Ayrıca bu kontrol gürültü, sıcaklık ve nem ile yıpratıcı bir endüstriyel ortamda yapılmaktadır. Kalite kontrolü; renk analizi, boyut kontrolü ve yüzey hatalarının tespiti gibi bölümlere ayrılabilir. Çoğu üretim aktiviteleri otomasyonla yapılırken hata tespiti hâlâ operatör olan kişilerin kararına bağlı olarak yapılmaktadır. Operatörlerden gelecek hataları ortadan kaldırmak ve seramik karoların kalite kontrolünü yapmak amacıyla kullanılan Tahribatsız Muayene Yöntemleri (TMY) ile üretim hattı üzerinde doğrudan süreç kontrolü sağlanabilmektedir. Tahribatsız Muayene Yöntemleri (TMY) bir nesne ya da malzemenin, test sonrasındaki kullanımına zarar vermeden, o nesne ya da malzemeyi incelemeyi sağlayan test teknikleridir. Böylece, tahribatsız muayene teknolojileri kalite kontrolü ve maliyet-etkinliği arasında bir denge kurmayı sağlamaktadır (Elbehiery ve ark. 2003).

Fabrikada üretim sürecinde, seramik karoların su emme miktarlarını (%) belirlemek için yapılan su emme testi, sadece temsili olarak seçilen karolara uygulanabilmektedir. Bu nedenle üretilen tüm karoların su emme miktarlarının (%) tespit edilmesi mümkün olmamaktadır. Test uygulanan karonun standartlar dışında olduğunun belirlenmesi halinde, test süresi sırasında üretilen ve fırında

pişen diğer karolarda hatalı üretim devam edeceği için büyük miktarda standart dışı üretim yapılmış olacaktır. Hammaddeler ve ham yığinsal yoğunluğu etkileyen faktörler çok hassas kontrol edilse dahi, fırında olabilecek değişiklikler çok mükemmel bir yarı ürünün bile istenen standartlar dışında çıkmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle fırın çıkışında bir kontrole ihtiyaç vardır.

Bu tezde temassız ultrasonik test metodunun fırın çıkışında sinterlenmiş seramik karoların su emme miktarlarını (%) belirlemek amacıyla geliştirilmesi ve sistemin endüstriyel boyutta uygulanarak ürün standartlarının artırılması hedeflenmiştir. Seramik sektörü dünya genelinde teknolojik açıdan sürekli gelişen ve rekabetin giderek zorlaştığı bir sektördür. Temassız ultrasonik test metodunun işletme şartlarına uygulanması üretilen ürün kalitesinin artmasına, böylece pazarlama gücünün ve dolayısıyla rekabet gücünün artırılmasına katkıda bulunacaktır. Bu amaçla yapılacak düzenli ve disiplinli Ar-Ge çalışmaları ile temassız ultrasonik test sisteminin fabrikada kullanılması ve sadece temsili seçilen birkaç karonun değil, üretilen tüm karoların su emme miktarlarının (%) kontrolden geçirilmesi sağlanacaktır. Standart dışında ürünler fırından çıktığında, anında müdahale edilerek hatalı üretim yapılması da önlenecektir. Böylece hatalı üretimden kaynaklanan maliyetlerin ortadan kaldırılacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu sistem, pişmemiş ürünlerde ve diğer kaplama malzemelerinde de uygulanabilecektir.

2. SERAMİK KAROLAR

Seramik kaplama malzemeleri üretiminde kil, kaolen, feldspat, kuvars gibi ana hammaddeler ile frit, zirkon, korund, çinko oksit, boraks, asit borik, talk, volastonit, renk verici metal oksitler ve seramik boyaları gibi maddeler kullanılır. Ana hammaddeler Türkiye’de bulunmaktadır, Ukrayna’dan kil ithalatı yapılmakta, ayrıca yardımcı hammaddelerden zirkon, korund, bazı seramik boyaları, oksitler ve kimyasal maddeler diğer ülkelerden ithal edilmektedir. (Anonim 2010c).

Seramik kaplama malzemesi üretimi birbirini izleyen süreçlerden oluşmaktadır (Küçüker 2009). Seramik karolar, püskürtmeli kurutucu granülleri (nadiren kuru öğütme granülleri) ile kuru preste şekillendirilebilir ya da ekstrüzyonlu üretilirler (Werr 2002). Genel olarak püskürtmeli kurutucu granülleriyle hazırlanmış sırlı tek pişirim seramik karo üretiminin akış şeması Şekil 2.1’de verilmiştir (Küçüker 2009).

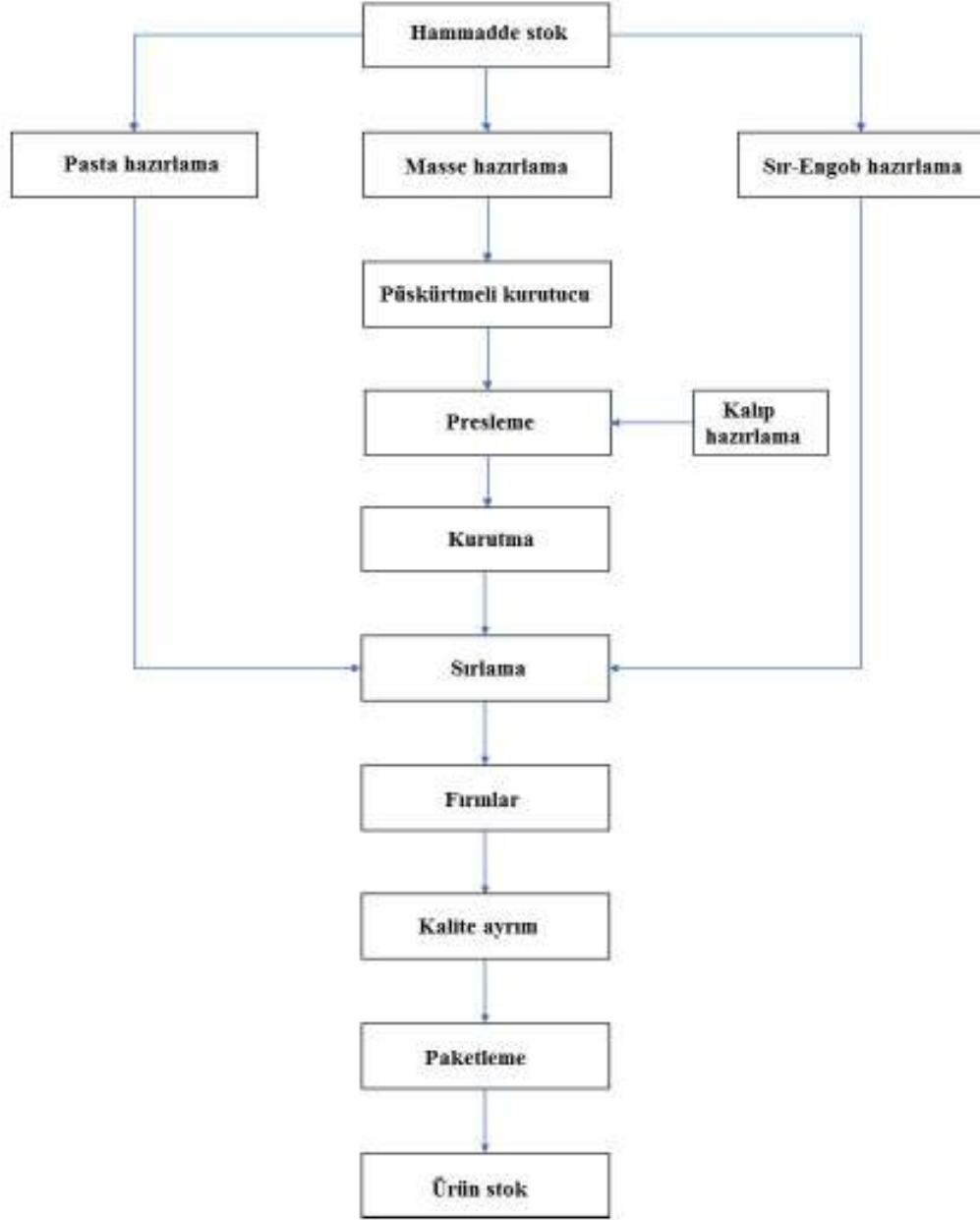
Türkiye’de seramik üretici firmalar hammadde ihtiyaçlarını çoğunlukla kendi maden ocaklarından sağlamaktadırlar. Hammaddeler çeşitli kırıcılardan geçirilerek ufaltılmakta ve homojenleştirilmektedir. Belli oranlarda tartılarak bilyalı sulu değirmenlerde öğütülen hammaddeler, eleklerden ve manyetik ayırıcılardan geçirilir (Anonim 2010c).

Öğütme, ham maddeleri su ile bir çözelti haline getirerek uygun tane boyut dağılımını elde edebilmek amacıyla yapılır. Püskürtmeli kurutma işleminin en iyi şekilde yapılabilmesi için, öğütülen ham maddenin yüksek katı içeriğinde ve uygun viskozitede olması gerekir (Gasch 2006).

Çözeltideki katıların tane boyutu, preslemede karonun preslenebilmesini ve son ürün olan karonun boyutunu ve gözenekliliğini belirlemektedir (Gasch 2006).

Tane boyut dağılımının ölçülmesi karmaşık ve pahalı bir işlemdir. Bu nedenle; öğütülen malzeme ve değirmen çeşidi için endüstriyel seviyede farklı öğütme süreleri için elde edilen tane boyut dağılımı ve kaba taneciklerin miktarı arasında yakın bir bağlantı vardır. Aslında yaş öğütme kaba taneciklerin boyutunu

küçültmeye yöneliktir, tane boyut dağılımı daraltarak öğütme işleminin basit bir test metodu olan “elek analizi” ile ölçülmesini sağlar (Gasch 2006).



Şekil 2.1. Sırlı tek pişirim seramik karo üretimi akış şeması (Küçükler 2009)

Çözeltinin yoğunluğu püskürtmeli kurutma aşamasında kullanılan enerjinin etkinliğini belirlemektedir. Bu nedenle; mümkün olduğu kadar çözelti yoğunluğunun yüksek olması istenir. Bununla birlikte, herhangi bir bileşim için yoğunluk arttıkça viskozitede artmaktadır. Yüksek viskozite değirmeni boşaltmayı

zorlaştırmakta ve aglomerlerin oluşmasına neden olabilmekte, eleme hızını düşürmektedir. Öğütme aşamasının mümkün olan en yüksek çözelti yoğunluğunda ve viskoziteyi sabit tutacak şekilde sağlanması gerekmektedir (Gasch 2006).

Elde edilen masse çamuru, “spray dryer” denilen püskürtmeli kurutucularda granüller haline getirilir (Anonim 2010c). Püskürtmeli kurutma, karo sektörünün pres granülü hazırlamak amacıyla, en yaygın olarak kullandığı granülasyon yöntemidir (Gasch 2006).

Kullanılan makinelerin (püskürtmeli kurutucu, pres, fırın gibi) karmaşıklığı bu makinelerden çıkan ürünleri kontrol etmeyi gerektirmektedir. Bu kontrol makine değişkenlerini içine aldığı gibi ürün değişkenlerini de içermektedir (Gasch 2006).

Bazı makinelerde kontrol hem giriş hem çıkış değişkenlerine yapılmaktadır. Püskürtmeli kurutucuda gaz sıcaklığı/püskürtmeli kurutucu granül nemi manuel olarak kontrol edilirken gaz sıcaklığı/ateşleyici gaz valfi pozisyonu makine değişkenleri ile otomatik olarak kontrol edilmektedir (Gasch 2006).

Granül masse silolarda bir süre bekletildikten sonra otomatik, hidrolik preslerde karo şeklinde kalıplanır (Anonim 2010c). Kontrol seviyesi presler için, makine değişkenleri presleme basıncı ile kontrol edilirken, ürün değişkenleri yığinsal yoğunluk ve ürünün kalınlığı ile kontrol edilmektedir (Gasch 2006).

Granüllerin en önemli değişkenleri, nem içerikleri ve granül boyut dağılımıdır. Nem, maksimum presleme basıncı ile birlikte bünyenin yığinsal yoğunluğunu belirler. Yoğunluk, presleme basıncı ve nem arasında kantitatif bir ilişki vardır. Granül boyut dağılımı, tozun akabilirliğini belirler, akma davranışı ise; pres kalıbını doldurmak için temel bir özelliktir. Uygun akabilirliğe sahip granüller pres kalıbını homojen olarak doldururlar ve preslenen bünyenin yığinsal yoğunluğunun kalıbın her yerinde aynı olmasını sağlarlar. Bunun sonucu olarak, pişmiş ürünün geometrisi de düzgün ve kenarlardaki çekmeleri eşit olur (Gasch 2006). Preslemede etkin bir paketleme, granül boyut dağılımı yaklaşık olarak 74-125 μm arasında olduğunda sağlanmaktadır. < 74 μm granüllerin granül boyut dağılımında küçük bir yüzdeye sahip olması paketlemeyi artırırken granüllerin akabilirliğini ve kalıptaki dolgu yoğunluğunu azaltmaktadır. Bu nedenle < 74 μm

granüller ya tamamen uzaklaştırılmalı ya da granül boyut dağılımındaki oranları kontrol edilmelidir (Reed 2000).

Preslenmiş bünyenin en önemli süreç değişkeni, onun yığinsal yoğunluğudur. Yığinsal yoğunluğun herhangi bir karodaki ortalama değeri ve karolar arasında dağılımı da önemlidir. Yığinsal yoğunluk, karonun preslenmeden sonraki aşamalardaki özelliklerini de belirler ve son ürünün en önemli özelliklerini kazanmasını sağlar. Yığinsal yoğunluk, bünyenin gaz geçirgenliğini, mekanik mukavemetini, sinterleme sürecini, elastisite modülünü belirlemektedir. Yetersiz yığinsal yoğunluk kurumada çatlamalara, sırlama bantlarında kırılmalara, siyah bant oluşumuna, boyutsal kararlılığın olmayışına ya da uygun olmayan gözenek miktarına neden olabilmektedir (Gasch 2006). Son yıllarda preslerde karonun her yerine homojen basınç veren izostatik kalıp sistemlerinin yaygın olarak kullanılmasıyla, karolar arasındaki yığinsal yoğunluk farklılıkları oldukça azaltılmıştır. Böylece karolarda hassas boyutlar ve şekil düzgünlüğü sağlanmıştır (Gasch 2006, Anonim 2010c).

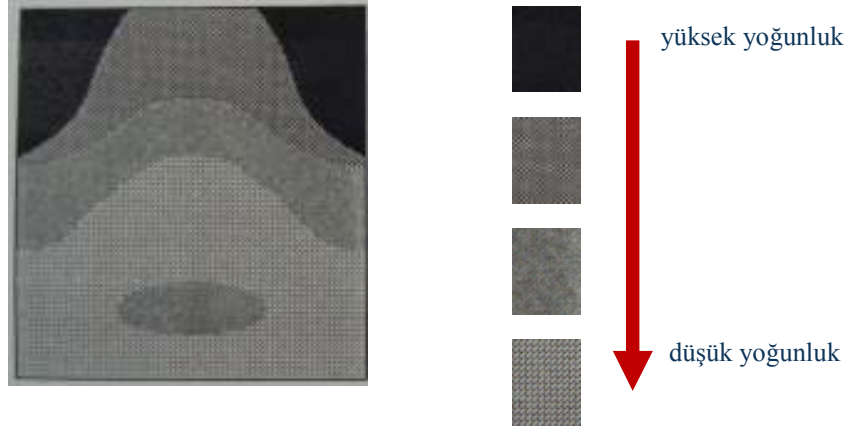
Kuru preslenmiş karoların üretiminde granüller, doldurma sürgüsü aracılığı ile kalıba doldurulmaktadır. Sürgünün hareketi ile granüllerin fazlası kalıbın seviyesi hizasından süpürülmektedir. Alt kalıbın aşağıya doğru hareketinden sonra, üst kalıbın da aşağıya doğru hareket etmesiyle presleme işlemi başlamaktadır. Dolan granüllerin havasını boşaltmak amacıyla, bir'den üç'e kadar değişen sayılarda havalandırma yapılmaktadır. Bu havalandırmalar arasında üst kalıp, hafifçe yukarı kalkmaktadır. Son preslemeden sonra alt kalıbın yardımıyla, karo kalıptan çıkarılmakta ve bir sonraki dolumu yapan; doldurma sürgüsü ile kalıp dışına itilmektedir. Kuru preslenmiş ürünlerin yoğunluk dağılımları araştırmalarla incelenmiştir (Şekil 2.2). Yoğunluk dağılımı, silindirik ürünlerin analizi için belirlenmiştir, fakat kalınlıklarına oranla büyük boyutlara sahip olan ürünler için de uygundur.

Granüller, doldurma sürgüsü ile pres gözlerine doldurulurken yığinsal yoğunluk farklılıkları oluşmaktadır. Doldurma işlemiyle oluşan yoğunluk farklılıkları, her karonun ön ve arka kenarları arasında yoğunluk farklılıkları ve çoklu kalıplarda içte-dıştaki karolar arasında yoğunluk farklılıkları (Şekil 2.3) şeklindedir. Bu yoğunluk farklılıkları karoda çarpımalara ve kabul edilemeyen

boyut farklılıklarına neden olmaktadır. Örneğin (30x30) cm² ebatlardaki karonun iki kenarı arasında 0,05 g/cm³ yoğunluk farklılığı bulunduğunda, yaklaşık 1 mm boyut farkı oluşturan % 6'lık küçülme farklılığına yol açmaktadır.

Bu farklılıkların önüne geçmek için alınabilecek önlemler:

- İsostatik kalıplar homojen presleme sağlayacak şekilde ayarlanmalı,
- Doldurma sürgüsü ve alt kalıp hareketi granüllerin akış özellikleri ve presleme davranışı göz önüne alınarak ayarlanmalıdır.
- Karonun ön ve arka kenarlar arasındaki yoğunluk farklılıklarını tolere etmek için simetrik olmayan kalıp doldurma yapılmalıdır.
- Sinterleme eğrisi ayarlanmalıdır.



Şekil 2.2. Preslenmiş üründe yoğunluk dağılımı (kesit alanı) (Werr 2002)



Şekil 2.3. Çoklu kalıplarda yoğunluk dağılımı (yukarıdan görünüşü) (Werr 2002)

Yoğunluk dağılımını belirlemek için kullanılabilecek yöntemler Çizelge 2.1’de kıyaslanmıştır.

Çizelge 2.1. Yoğunluk dağılımını belirlemek için kullanılan yöntemler (Werr 2002)

Metod	Metod süresi	Maliyeti	Veri sonucu
Penetrometre	düşük	düşük	düşük
Civa porozimetresi	orta	yüksek	iyi
Daldırma ve tartma	orta	düşük	orta
Ultrasonik metodlar	orta	yüksek	iyi
Bilgisayarlı tomografi	yüksek	yüksek	iyi

Penetrometre ölçümleri seramik karo üretiminde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, verdiği bilgi değeri düşüktür. Bu metotta sivri olmayan bir iğne, karoya bir yük altında batırılır ve karo içindeki ilerlediği mesafe ölçülür. Civa porozimetresi üretim kontrolünde yaygın olarak kullanılmamaktadır. Çünkü çok pahalı cihaza ihtiyaç vardır ve bu cihazı çalıştırmak için işletim maliyeti (civayı temin etmek, atık test ürünlerini saklamak) fazladır. Civaya daldırma ve tartma günümüzde yaygın değildir. Çünkü çevre kirliliğine neden olmaktadır ve güvenlik önlemleri pahalıdır. Ultrasonik teknikler seramik üretime uygundur. Ancak, toza ve neme hassasiyetleri, temas sıvısı olmadan ölçüm gereksinimleri nedeniyle, bu sistemlerin üretim bantlarında kullanımı henüz yaygın değildir. Bilgisayarlı tomografi metodu, mükemmel çözünürlüğe sahip olmasına rağmen, maliyetli ve metod süresi uzun olduğu için rutin ölçümlerde kullanımı uygun değildir (Werr 2002).

Presten çıkarılan karolar, nemlerini kaybetmeleri ve dekorasyon aşaması için, yeterli sıcaklıkta olmaları amacıyla kurutulurlar. Kurutma sonrasında kontrol edilecek değişkenler karo sıcaklığı ve nem içeriğidir. Karonun sıcaklığı, sırlama işlemini etkiler. Yetersiz sıcaklık değerleri iğne deliği gibi hataların oluşmasına ya da sırnın karo yüzeyinde homojen bir şekilde yayılamamasına sebep olmaktadır. Hem karonun nemi, hem de sıcaklığı kurutucu içindeki sıcaklık dağılımına bağlıdır. Sıcaklık sensörleri kurutuculara yerleştirilmekte ve karo yüzeyindeki ya da sıcaklık eğrisini oluşturan gazlardaki sıcaklık hakkında bilgi sağlamaktadır.

Kurutuculardaki sıcaklık eğrileri, kurutmanın çok yavaş ya da çok hızlı olduğu bölgeleri tespit etmeyi sağlarlar. Kurutma eğrilerinin daha iyi tasarlanmasına olanak sağlarlar. Kalıntı nem içeriği, incelenen karonun kesilerek bir etüvde kurutulup; kurutulmadan önceki ve kurutulduktan sonraki farkın alınmasıyla bulunmaktadır. Bu tip problemlerin kurutucu çıkışında karonun kalıntı nemini hassas bir şekilde ölçmek amacıyla kullanımı mümkündür (Gasch 2006).

Sırlama ve dekorasyon süreci tek bir aşamadan oluşmamakta, birbirine bağlı bir seri şeklindedir. Seriyi oluşturan her bir kısım kendi değişkenlerine sahip olmakla birlikte, farklı kısımlar arasında etkileşim bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar bir izleme sistemi ile bu kısımların her birini kontrol etmeye yöneliktir (Gasch 2006). Sırlama bantlarında karoların üzerine çeşitli metodlarla sır kaplanır, desen ve dekor yapılır (Anonim 2010c).

Sinterleme, seramik süreçlerinde karonun son teknik ve estetik özellikleri kazandığı aynı zamanda en fazla enerji tüketiminin gerçekleştiği en önemli aşamadır. Fırın değişkenleri sıcaklık dağılımı, fırın içindeki gazların bileşimi ve basıncı, oksijen miktarı şeklindedir. Bütün bunlar kontrol edilmelidir (Gasch 2006). Karolar tek veya çift katlı fırınlarda, dönen rulolar üzerinde ilerlerken pişirilir. Karolar önce ısınır, sonra pişer ve fırının son kısmından soğuyarak çıkarlar. Fırınlarda türbülanslı ve pulsar brülörlerle kanal içinde homojen sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. Ruloların sıcakta eğilime dayanımları da arttırılmıştır. Kanal genişlikleri arttıkça, fırın kapasiteleri de yükselmektedir (Anonim 2010c).

Pişmiş karonun kalitesi, büyük bir oranda preslenmiş karoda gelişen özelliklere bağlıdır. Seramik karolar kil, ergitici ve dolgu malzemesini içeren çok miktarda malzemeden şekillendirilir. Karo ürünlerin sınıfları Çizelge 2.2’de verilmektedir. Ürünler; boyutlarına, boyutsal toleranslara, mukavemete, görünür gözenekliliğe, yüzey yapısına, dekoratif kaplamalara ve karo endüstrisi tarafından oluşturulan toplam kaliteye göre sınıflandırılmaktadır. Üretilen karonun, yüzey alanının kalınlığına oranı yüksektir ve üretim süreci bu şekli hızlı bir şekilde üretebilecek şekilde tasarlanmıştır (Reed 2000).

Çizelge 2.2. Karo ürünlerin sınıfları (Reed 2000)

Porselen karo
Vitrifiye yer karosu
Gözenekli duvar karosu

Porselen karolar, preslerde yüksek basınçlarda şekillendirilen, fırınlarda uzun sürede ve yüksek sıcaklıkta pişirilen, su emme oranı az olan sırsız veya sırlı karolardır. Bütün karo kütlesi renklendirilmiş olduğundan dolayı, yerde, fazla yaya trafiğinde kullanılırsa, mat karo yüzeyinde aşınma olsa bile genel görünümü bozulmaz. Mat karoların yüzeyleri özel makinelerle taşlanıp ayna gibi parlatılarak, güzel görünümlü parlak granit seramik karolar elde edilir.

Duvar karolarında hızlı tek pişirim metodu yaygınlaşmıştır. Ancak bazı ürünler için ve bazı duvar karosu fabrikalarında hızlı çift pişirime devam edilmektedir. Bu metodda, preste şekillendirilip kurutulan karoların sırlanmadan evvel bisküvi pişirimi yapılır ve sırlandıktan sonra tekrar pişirilir. Yer karoları ise tek pişirim ile üretilmektedir.

Çok sayıda desen ve dekor uygulamalı karolar ile yaldızlı, el desenli veya cam eritmeli bordürlerin dekor tesislerinde tekrar pişirilmesi (üçüncü pişirim) gerekir.

Fırından çıkan karolar kalite ayırma bantlarında işçiler ve çeşitli cihazlarla incelenerek kalite sınıflarına, renk tonu ve boyut gruplarına ayrılır, karton kutulara ambalajlanır. Kutular ahşap paletler üzerine istiflenir ve plastik folyo ile kaplanır (Anonim 2010c).

Sınıflandırma, otomatik sınıflandırma aleti farklı makine üreticilerinin kendi sınıflandırma makinelerini üretmesiyle başlamıştır. Hızlı bilgisayarların karmaşık bilgisayar programlarının ve yüksek çözünürlüklü kameraların geliştirilmesi bu tip sınıflandırma aletlerinin de başarıyla gelişmesini sağlamıştır.

Seramik karoları sınıflandırma süreci çok karmaşıktır. Çünkü, estetik faktörler olmak üzere bilgisayarın anlayabileceği ve matematiksel terimler olarak ifade edilmesi zor birçok faktör göz önüne alınmalıdır.

Günümüzde otomatik sınıflandırma sistemleri, bu sınıflandırmayı yapan personele göre daha az hata yapmaktadır. Çünkü; personel kısa bir süre çalışmanın ardından renk farklılıklarını ayıramamaktadır (Gasch 2006).

Ürünler arasında ya da aynı ürün tipi içinde boyutsal farklılıklar seramik karo kalitesini büyük oranda etkileyen bir hatadır (Reed 2000). Bu nedenle ürünler farklı kaliberler ile ayrılmaktadır.

Pişmiş ürün dört özelliğe göre ayrılmaktadır:

- 1- Yüzey görünüşü,
- 2- Eğrilik
- 3- Renk tonu farklılığı
- 4- Boyut ya da kaliber

Bunlardan ilk üçü görünüşüyle ilgili özelliklerdir. Kaliberlerin bulunuşu bazen istenen boyutlarda olmayan ürünlerin daha düşük fiyatlarla satılmasına neden olmaktadır. Kaliber sayısının düşürülmesi ürünlerin satılmasını kolaylaştırır, depolama alanını azaltır, siparişte oluşabilecek hataları düşürür (Gasch 2006).

Gözenek boyutu, görünür gözeneklilik, mukavemet ve çarpma (chipping) dayanımı karo kalitesini etkileyen diğer özelliklerdir. Çoğu deneyimler ham karodaki değişimler ile pişmiş karodaki değişimler arasında kuvvetli bir bağlantı olduğunu göstermektedir (Reed 2000).

Seramik kaplama malzemeleri sektörü toplam kapasitesinin %80'inin 1990 yılından sonra kurulmuş olması ve 1990 yılından önce faaliyete geçen firmaların son 10 yıl içinde teknoloji yatırımlarını yenilemiş olması nedeniyle, Türk seramik firmaları teknolojik açıdan rakiplerine göre üstün bir durumdadır (Anonim 2010c).

2.1. Porselen Karo

Porselen karolar mükemmel teknik özelliklere sahip düşük su emmeli ürünlerdir. Porselen karolar için gerekli olan çok düşük su emme değeri (ISO 13006'e göre $<0,05$), çoğu ürünlerde $<0,1$ olacak şekilde yerine getirilmektedir. Bununla birlikte ürünün mekanik özelliklerini ve parlatılmış

karoların leke direncini etkileyen kapalı gözeneklilik % 2-8 arasında değişen oranlarda görülmektedir.

Porselen karolar temel olarak % 30-40 kil karışımı, % 40-50 alkali feldispatlar ve % 10-15 oranında kuvars kumundan oluşmaktadır. Porselen karoların kimyasal bileşimleri, ergiticilerin cinsine (sodyum ya da potasyum feldispatlar) ve oranlarına, kullanılan sinterleme ilavelerine (dolomit, talk, vollastonit gibi toprak alkali bileşenleri) ya da cam seramik firitlerine ($\text{CaO-ZrO}_2\text{-SiO}_2$, CaO-MgO-SiO_2 , $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ sistemleri) bağlı olarak değişmektedir.

Karolar hızlı tek pişirimle 60 dakikadan daha kısa zamanlarda maksimum $\sim 1200^\circ\text{C}$ 'de ve 5 dakikalık bekleme zamanlarıyla sinterlenmektedir. Elde edilen faz bileşimi % 55-65 camsı faz, % 5-15 müllit ve % 15-25 kuvarsa ilaveten zirkon ya da korundum gibi pigment olarak kullanılan hammaddelerdir (Zanelli ve ark. 2003).

Sinterleme sırasında feldispatlar erirler ve yüksek bir miktarda sıvı faz oluşturarak, sinterleme sıcaklığı arttıkça viskozitenin düşmesine neden olurlar. Bu olay sıvı fazın bünyedeki gözenekleri doldurmasına ve ilerleyen aşamalarda onları elimine etmesine neden olur. Kuvarsın bir kısmı sıvı faz ile çözünür ve müllit gibi yeni kristal fazlar oluşturur. Sinterleme sırasında gerçekleşen farklı dönüşümler ve reaksiyonlar sıvı fazın sürekli olarak değişmesine ve sonuç olarak; sıvı fazın viskozitesinin de değişmesine neden olur. Son mikroyapı ince müllit kristalleri ve camsı matriste çözülmeden kalan kuvars taneciklerinden oluşmaktadır (Salem ve ark. 2003).

Endüstriyel sinterleme süreci kalıntı gözenekleri tamamen uzaklaştıramaz. Mikroyapıda hem küçük küresel gözenekler ($<10\ \mu\text{m}$), hem de küçük gözeneklerin bir araya gelmesiyle oluşmuş düzensiz şekilli büyük gözenekler ($50\ \mu\text{m}$ 'a kadar) bulunmaktadır (Dondi ve ark. 2003). (Gasch 2006).

Porselen karoların mukavemetleri diğer seramik yer ve duvar karolarından daha yüksektir. Bu onun çok kompakt yapısına bağlıdır. Porselen karolar 8-10 mm kalınlıkta olmakla birlikte, özel uygulamalar için 15-20 mm'ye kadar değişen kalınlıklarda üretilmektedirler. Yüksek mekanik gerilme uygulanan ev, iş yeri, laboratuvar gibi yerlerde porselen karoların ortalama eğme mukavemetinin 27N/mm^2 'den fazla olması gerekmektedir (Biffi 1999).

Genellikle gözenekler azaltılmalıdır. Çünkü, seramiklerin eğme mukavemeti gözenekteki artışa bağlı olarak eksponelsiyel olarak azalmaktadır (Kobayashi ve ark. 1992).

2.2. Yer Karosu

Yer karolarının sınıflandırılması, ürünlerin farklı derecelerde su emme değerlerine göre ISO 13006 standartları esas alınarak yapılmaktadır.

Su emme değerlerine göre:

Su emme < % 0,5	(BIa sınıfı),
% 0,5 < Su emme < % 3	(BIb sınıfı),
% 3 < Su emme < % 6	(BIIa sınıfı),
% 6 < Su emme < % 10	(BIIb sınıfı) şeklinde sınıflandırılmaktadır (Anonim 2007a).

Yer karosunda kullanılan hammaddeler, plastik (özlü) ve plastik olmayan (özsüz) hammaddeler olmak üzere iki sınıf şeklinde gruplanabilir. Plastik hammaddelerden olan killer ve kaolenler ham ve kuru ürünlerin mekanik mukavemetini arttıırırlar. Plastik olmayan hammaddelerden feldispatlar, talk ve kuvars en çok kullanılan hammaddelerdir (Vieira ve ark. 2006).

Kullanılan hammaddelere ve ürün boyutuna bağlı olarak pişme süresi 35-60 dakika, pişme sıcaklığı 1100-1200°C arasında değişmektedir (Anonim 2007a).

2.3. Duvar Karosu

Duvar karoları pişme sırasında hemen hemen hiç küçülme olmaksızın (<%1) yüksek boyutsal kararlılık gösterirler. Ürünlerin gözenek miktarı % 13- 18 arasındadır (absorplanan suyun yüzdesi olarak). Pişmiş ürünlerin mukavemeti ise 200 ile 250 kg/cm² arasındadır. Elde edilen değerler ISO 13006 standardının BIII grubunda belirtilen bu değerlere uygun olmalıdır (Anonim 2007b).

Duvar karosu bünyeleri, reaktif ve reaksiyona girmeyen olmak üzere iki çeşit bileşen kullanılarak şekillendirilir. Reaktif bileşen kil ve CaCO₃ içermektedir. Bununla birlikte CaCO₃'ün sırn yumuşamasından sonra ayrışması

karoda hatalara neden olur. Reaksiyona girmeyen bileşen, reaktif bileşenden dolayı pişmede oluşan küçülmeyi azaltır. Bunun sonucunda bünyede iyi paketlenme, maksimum kuru ve pişmiş mukavemet elde edilmektedir.

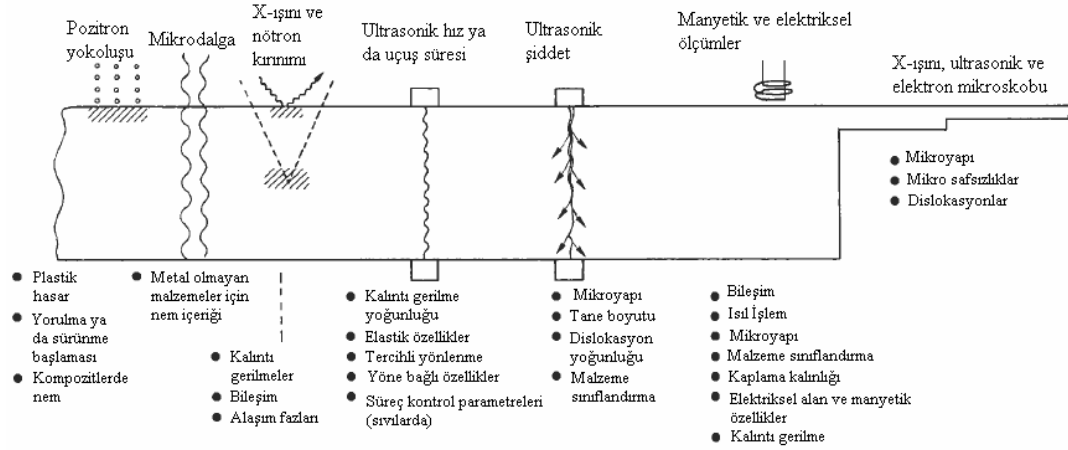
Hızlı çift pişirimlerde bisküvi pişirimi 40–50 dakikada, sırlı pişirim ise 30–40 dakikada yapılmaktadır. Bisküvi ve sır eşzamanlı olarak pişirildiği hızlı tek pişirimlerde de ürün 45–50 dakikada pişirilmektedir. Bu tür bünyelerin pişirme sıcaklıkları 1000–1100°C arasındadır. Bu sıcaklıklarda killer vollastonit ile reaksiyona girerek düşük sıcaklık anortitini oluşturmaktadır. Kuvars ise reaksiyona girmemekte ve değişmeden kalmaktadır (Ibáñez ve ark. 1992).

3. TAHRİBATSIZ MUAYENE

Kırılma mekanikleri araştırmaları yerine ve çeşidine dayalı olarak 0,1 mm'den küçük boyuttaki hataların bir malzemede hata kaynağı olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle bu kadar küçük boyuttaki hataların tespit edilmesi ve çözünürlüğünün belirlenmesi tahribatsız muayene yöntemlerine (TMY) olan talebi arttırmaktadır. Yapısal bileşen ve iç gerilmelerin oluşumu malzemenin kalitesini belirleyen faktörlerdendir. Mukavemet; mikroyapıya, tane boyutuna ve tane boyut dağılımına, gözeneklerin homojen dağılmasına ve yöne bağlı olarak değişmektedir. Bir malzemedeki bölgesel gerilmeler, iç gerilmelerin ve uygulanan yük ile oluşan gerilmelerin toplamı şeklinde ifade edilmektedir. İç gerilmelerin oluşumu nedeniyle uygulanabilecek yükler azalmaktadır. Örneğin, uygun bir şekilde yapılmayan yüzey işlemleri bölgesel gerilmelere sebep oldukları için mukavemeti % 40'a kadar düşürebilmektedir. TMY bu nedenle yapı, hatalar ve gerilmelerden oluşan üç faktör üzerine yoğunlaşmalıdır (Arnold ve Reiter 1991).

Tahribatsız muayene (TM) endüstrisine teknolojik ve ekonomik değişimler şekil vermektedir. Bu değişimler, bilgisayarlı otomasyonu, farklı TM tekniklerinin tek test biriminde kullanılmasını, yeni pazarların oluşmasını da içermektedir. Business Communications Co. Inc. Şirketinin araştırmalarına göre Amerika Birleşik Devletleri'nde TM teçhizat pazarı ~799 milyon \$'dır. Ortalama yıllık büyüme hızı % 3,6 olarak öngörüldüğünde, bu pazarın 2004 yılında 952 milyon \$'a ulaşacağı beklenmektedir. Gelecek beş yılda en hızlı büyüme yaşayacak TM tekniklerinin Eddy akımı ve ultrasonik olacağı düşünülmektedir (Business Communications Co. Inc. 2000).

Çoğu TM tekniğinin çeşitli oranlarda artacağı beklenirken filme bağlı radyografik test, sıvı penetran ve manyetik parçacık testlerinin uzun süreden beri süren azalmalarının devam edeceği düşünülmektedir. Bu tekniklerin otomasyona izin vermemesi, son kullanıcıların ultrasonik veya kızılötesi gibi diğer teknikleri tercih etmesine yol açmaktadır (Business Communications Co. Inc. 2000). Malzemede bulunan hataya bağlı olarak kullanılacak TMY Şekil 3.1'de gösterilmektedir (Smith 1998).



Şekil 3.1. Malzemede bulunan hataya bağlı olarak kullanılabilir TMY (Smith 1998)

Yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri sıvı penetrant yöntemi, manyetik yöntemler, radyografi, ultrasonik, girdap akımları yöntemi şeklindedir.

3.1. Sıvı Penetrant Yöntemi

Bu yüzey hatalarını belirleyen, görülemeyen hataların çıplak gözle tanımlanmasına olanak veren bir yöntemdir. Muayene işlemi elle veya tam otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Sıvı penetrant yönteminin değişik boyut ve şekilli, farklı türdeki malzemeden, farklı yüzey pürüzlülüğündeki parçalara uygulanabilme olanağının olması, yöntemin yaygın olarak kullanılmasına sebep olmaktadır. Bu yöntem, hata yüzeyden başladığı ve hata ağzının penetrant sıvının nüfuz etmesini sağlayacak şekilde açık olduğu durumlarda kullanılabilir. İncelenecek ürünün muayene sıvısına dayanıklı olması da yöntemin kullanılabilmesi için gerekli şartlardandır (Kayalı ve ark. 1997).

Sıvı penetrant yönteminde kanıtlanabilir hata boyutları, yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak Çizelge 3.1’de verildiği şekilde değişmektedir.

Sıvı penetrant muayene sistemlerinde kullanılan muayene gereçleri penetrant sıvı, ara yıkama sıvısı, geliştirici olmak üzere üç temel işlem maddesinin bileşiminden oluşmaktadır. Bu işlem maddeleri Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak kanıtlanabilir hata boyutunun değişimi (Kayalı ve ark. 1997)

Yüzey Pürüzlülüğü	Minimum Hata Derinliği	Kanıtlanabilir Hata Boyutu
Yüksek parlaklık 0,2 µm	50 µm	0,5 µm'dan büyük olanlar
<0,8 µm	50 µm	1 µm'dan büyük olanlar
<3,2 µm	50 µm	5 µm'dan büyük olanlar
6,3–20 µm	100 µm	30 µm'dan büyük olanlar

Çizelge 3.2. Sıvı penetrant muayene sisteminde kullanılan işlem maddeleri (Kayalı ve ark. 1997).

Penetrant Sıvı	Ara Yıkama Maddesi	Geliştirici
A Floresan Penetrant Sıvı	A Sıvı Çözücü	A Kuru Geliştirici
B Renkli Penetrant Sıvı	B Buhar Çözücü	B Sıvı Geliştirici (Çözücü bazlı)
C Renkli Floresan Penetrant Sıvı	C Su	C Sıvı Geliştirici (Su bazlı)
	D Hidrofil Emülgatör	
	E Lipofil Emülgatör	

Penetrant sıvılar: Temel maddesi mineral yağı olan, düşük yüzey gerilimleri sayesinde katı maddeleri ıslatma ve hatalara iyi nüfuz etme kabiliyetine sahip özel sıvılardır.

Ara yıkama sıvıları: Hatalara nüfuz etmiş penetrant sıvıları dışarıya çıkarmadan muayene edilen parçanın yüzeyindeki tüm penetrant sıvıyı uzaklaştırmaya olanak vermelidir.

Geliştiriciler: İnce taneli toz halindeki sıvı veya kuru karbonat veya silikatlar kullanılır. Geliştiriciler, hata içinde bulunan penetrant sıvının emilerek yüzeye çıkmasını ve görüntü oluşturmalarını sağlarlar.

3.1.1. Penetrant sıvının uygulanması

Penetrant sıvı, muayene edilecek parçaya sprey, yıkama, fırça ile sürme veya bazı durumlarda daldırma suretiyle uygulanır. Son yıllarda elektrostatik sprey yöntemi uygulaması gittikçe yaygın bir kullanım alanına sahip olmaktadır.

Nüfuz etme süresi: Penetrant sıvının nüfuz etme süresi penetrant sıvının özelliklerine, muayene sıcaklığına, muayene edilen parçanın özelliklerine ve

öngörülen hataların türüne bağlıdır (Çizelge 3.3). Genel olarak 5 dakikadan az, 40 dakikadan fazla olmayan bir süre uygulama için yeterlidir.

Çizelge 3.3. Malzemelere ve görülen hatalara göre nüfuz etme süresinin değişimi (Kayalı ve ark. 1997)

Malzeme	Beklenen Hata Türü	Nüfuz Etme Süresi (dak.)	
		(15-50 °C’de)	(5-15 °C’de)
Tüm metaller	Isıl işlem çatlakları	3-5	10-15
	Zımparalama çatlakları	7-10	15-20
	Yorulma çatlakları	7-10	15-20
Plastikler ve Seramikler	Çatlaklar	3-5	10-15
	Porozite	3-5	10-15
Takım çelikleri	Lehim hataları	3-5	10-15
	Çatlaklar	3-5	10-15
Döküm parçalar	Çekilme çatlakları	3-5	10-15
	Poroz yüzey	3-5	10-15
	Malzeme ayrılması	3-10	10-20
Dövme parçalar, Haddelenmiş malzemeler	Çatlaklar ve yarıklar	7-20	15-40
	Kılcal çatlaklar	7-20	15-40
Al ve Çelik kaynak	Çatlak ve porlar	3-5	10-15
		7-20	15-20

Muayene sıcaklığı: Muayene sıcaklığından anlaşılan muayene edilen parçanın ve penetrant sıvının sıcaklığıdır.

Muayene edilecek parça çok büyük ise penetrant sıvının sıcaklığından çok parça sıcaklığı önemlidir. Ancak penetrant sıvı uygulaması banyoda daldırma ile yapılıyorsa önemli olan banyodaki penetrant sıvının sıcaklığıdır. Penetrant sıvının özellikleri sıcaklıkla değişim göstermektedir. En uygun çalışma sıcaklığı 5–50°C’dir.

Muayene sistemlerinin ve sıvılarının kontrolünde: Alüminyum test blokları, krom kaplanmış kontrol numuneleri ve yapay oluşturulmuş çatlak içeren kontrol numuneleri kullanılmaktadır.

3.1.2. Hata görüntülerinin değerlendirilmesi

Gözle, büyüteçlerle veya kontrastı iyileştiren gözlüklerle yapılmaktadır. Hata görüntüsünün çapı, genişliği veya yoğunluğu hata ağzının açıklığı hakkında kısmen fikir vermekle birlikte derinliği açısından hiç anlam taşımaz.

Fluoresan penetrant sıvı kullanıldığında değerlendirme UV ışık altında ve karanlıkta yapılır. UV ışığının dalga boyu 365 µm, lambalar odaklanmış olmalıdır. Renkli penetrant sıvıların kullanılması durumunda iyi aydınlatılmış bir çalışma alanı gereklidir. Aydınlatma 500 lüks'ten fazla olmalıdır (Kayalı ve ark. 1997).

3.2. Manyetik Yöntemler

Manyetik muayene de aynı fiziksel prensibe dayanmakla birlikte, muayene edilen parçada varlığı öngörülen hataların görüntüye getirilmesine veya algılanmasına yönelik uygulamalar açısından değişik yöntemler bulunmaktadır.

Aynı zamanda en yaygın kullanım alanına sahip bu yöntemler: Manyetik toz yöntemi, manyetik duyarlı sonda yöntemi, manyetik induktif yöntem olup, üretim ve servis süreçlerindeki kontrollerde elle veya otomatik olarak uygulanırlar. Manyetik muayene yüzey hatalarının saptanmasında, sıvı penetrant yöntemine oranla daha hassas sonuç veren bir yöntem olmakla birlikte, esasta bu iki yöntem birbirinin tamamlayıcısı olarak ele alınmalıdır.

Manyetik muayenede sonuçların güvenilirliği ve performansı muayene edilecek parçanın manyetizasyon işleminin doğru yapılmasına bağlıdır. Parça geometrisi ve yüzey özellikleri de yöntemin hassasiyetini etkilemektedir.

Manyetik muayene yönteminde, parçanın yüzeyinde ve içinde oluşturulan manyetik akı parçadaki süreksizliklerden (hatalar özellikle çatlaklar) dolayı değişime uğramaktadır (Kayalı ve ark. 1997).

3.2.1. Manyetik yöntemin kullanılabilirliğinin şartları

Özellikle yüzey hatalarının belirlenmesine yönelik olarak kullanılan manyetik muayene yöntemleri, uygun koşullarda yüzeyin hemen altındaki hataların ve malzeme yapısındaki değişikliklerin belirlenmesinde de kullanılabilir.

Manyetik muayenenin gerçekleştirilebilmesi için gerekli ön şart muayene edilecek malzemenin ferromanyetik karakterde ve manyetik iletkenliğin (μ) > 100 seviyesinde olmasıdır. Bu grupta yer alan başlıca malzemeler ostenitik yapıdakiler dışındaki tüm alaşımlı ve alaşımsız çelikler, nikel, kobalt ve alaşımlarıdır.

3.2.2. Manyetik yöntemin uygulanmasındaki prensipler

Manyetizasyon: Manyetik muayene için parçanın manyetize edilmesi gerekir.

Manyetik akı değişiminin algılanması: Hata mevcudiyeti durumunda manyetik akı değişimi algılanır.

Değerlendirme: Manyetik akı değişimi ile oluşan sonuçlar anlamlandırılır.

Demagnetizasyon: Manyetik yöntemle muayene edilen parçada kalan artık manyetik alanın daha sonraki işlem kademelerinde veya kullanım aşamasında oluşabilecek hataların kaynağı olmasına engel olmak için parçanın manyetikliği sıfır seviyesine indirilir.

3.2.3. Manyetik yöntemde kanıtlanabilir hata boyutları

- Yüzeydeki çatlakların boyutları arasındaki orantı genişlik:derinlik:uzunluk=1:10:50 seviyesinde olmalıdır.
- Kanıtlanabilir hataların derinliğinin yüzey pürüzlülüğü, derinliğinin en az üç katı kadar olması gereklidir.
- Optimal bir hata algılaması, hatanın manyetik alan çizgilerini dik olarak kesmesi durumunda söz konusudur.
- Manyetik alan çizgileriyle beklenen hata arasındaki açı 30° 'den az olmamalıdır.

- Yüzey altı hatalarını algılama olasılığı, hatanın derinliğinin 0,2 mm'nin altına düşmesiyle hızla azalmaktadır.
- Çok geniş yarıklar, kenarları kuvvetle yuvarlatılmış ayrıklar, malzeme içerisine doğru yüzeye paralel ilerleyen ayrımlar, ferromanyetik oksitlerle dolu çatlaklar ve 40 µm'dan kalın ve manyetize edilemeyen kaplama tabakaları manyetik toz yönteminin hataları algılamasını güçleştirmekte veya olanaksızlaştırmaktadır (Kayalı ve ark. 1997).

3.2.4. Manyetizasyon akımı

Manyetizasyon işleminde kullanılan akımın parçada oluşturulan manyetik alanın dağılımına, yönüne ve kuvvetine büyük etkisi vardır. Manyetizasyon işlemi doğru veya alternatif akım kullanılarak gerçekleştirilebilir. Doğru ve alternatif akımla oluşturulan alanlar birbirinden farklılık gösterirler. Doğru akımla oluşturulan alanlar parçanın kesiti boyunca etkili olurken, alternatif akımla oluşturulan alanların etkinliği parçanın yüzeyinde 2 mm'lik bir tabakada kendini hissettirir. Bu nedenle yüzey altı hataların araştırılmasında alternatif akım kullanılmamalıdır (Kayalı ve ark. 1997).

3.3. Radyografi Yöntemi

Radyografi, fotoğraf olgusuna benzer bir anlam taşımakta olup nüfuz etme yeteneğine sahip olan ışınlamalar (X-ışınları, γ-ışınları, nötron ışınlamı) yardımı ile katı maddelerin iç yapısının görüntüsünü alma tekniğidir (Kayalı ve ark. 1997).

Malzemenin temel özelliklerinin (bileşim, tane boyutu ve yoğunluk) ve üretim özelliklerinin (hata oluşumunu ve karmaşıklık) belirlenmesi radyografinin başlıca uygulama alanlarıdır (Kim ve Liaw 1998).

Radyografi yöntemi her türlü metal ve alaşımının, plastiklerin, kompozit malzemelerin ve teknik seramik malzemelerin muayenesinde özellikle iç yapı kusurlarının belirlenmesine yönelik olarak kullanılır.

En yaygın kullanılan ışınlamalar X- ve γ-ışınları olup ışınlamın nüfuz etme kabiliyeti malzemenin cinsine, kalınlığına ve ışınlamın enerjisine bağlıdır. X- ve γ-

ışınlarının aralarındaki tek fark oluşum mekanizmalarına dayanır. X-ışınları, farklı dalga boyundaki bir X-ışınları demeti iken γ -ışınları çizgisel spektrum karakterindeki ışınlardan oluşur (Kayalı ve ark. 1997).

3.3.1. Radyografi yönteminin uygulanmasındaki prensipler

Yöntemin temel prensibi numune üzerine gönderilen X- veya γ -ışınlarının numuneyi kat ederken absorpsiyon nedeni ile zayıflamaya uğramasıdır. Ancak bu ışınlardan belirli bir kısmı filme ulaşır ve kararma sağlar. Film üzerinde parçada farklı kütle absorpsiyon katsayısına sahip bölgelerden geçerek absorpsiyona uğrayan ışınının oluşturduğu kontrast farklı olacağından parça içindeki hataların görüntüsünün film üzerine oluşturulması sağlanır. İncelenen numune tek bir kalınlığa ve hatasız homojen bir yapıya sahipse filme ulaşan ışınlar aynı oranda absorbe olurlar ve film de her noktasında aynı oranda kararır. Numunede kalınlık farklılıkları söz konusu ise veya numune içinde çatlak, porozite, curuf kalıntısı gibi hatalar varsa bu hataların farklı absorpsiyon katsayıları nedeni ile film üzerinde farklı kontrasta sahip bölgelerin görüntüye gelmesi söz konusu olur (Kayalı ve ark. 1997). Radyografinin avantajları olmakla birlikte ışınların incelenen malzemenin diğer tarafına geçmesi gerekmektedir ve bazı yapılarda çalışmak (radyoaktif bileşenler ya da yüksek sıcaklık ortamları) mümkün değildir. Hataların tespit edilebilirliğinin en yüksek olması için çatlakların ışınlara yaklaşık paralel olarak bulunması gerekmektedir. Tabakalanmaları tespit etmek ise mümkün değildir. Radyografi yönteminin kullanılması sağlık riski oluşturmaktadır ve bu teknik pahalı bir tahribatsız muayene yöntemidir (Kim ve Liaw 1998).

3.3.2. Radyografi yönteminin seramiklerde uygulanmaları

Nötron radyografisi lityum bazlı seramiklerin ve camların farklı süreksizlik (boşluklar ve yığınsal yoğunluktaki azalma) türlerini tespit etmek ve yapıdaki değişimleri belirlemek amacıyla kullanılmaktadır (Kim ve Liaw 1998).

Lewis ve arkadaşları (1994) Si_3N_4 ve $\text{Al/Si/Al}_2\text{O}_3$ kompozitlerin kontrast özelliklerini nötron ve X-ışını radyografisi ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda nötron radyografisi ile X-ışını radyografisine göre daha iyi görüntüler elde edilmiştir ve nötron radyografisi kompozit malzemelerin daha kalın kesitlerinin incelenmesini sağlamaktadır.

Yüksek hassasiyette mikro odaklamalı X-ışını radyografisi ZrO_2 tabletlerin mikron boyutunda hatalarının belirlenmesinde ve bu hataların boyutlarının ölçülmesinde kullanılmıştır (Kim ve Liaw 1998).

3.3.3. Bilgisayarlı X-ışını tomografisi

Bilgisayarlı X-ışını tomografisi malzemenin iç kesit alanının görüntülenmesini sağlamaktadır. Aslında bilgisayarlı X-ışını tomografisi, X-ışını radyografisinin ileri bir şeklidir. Radyografi üç boyutlu malzemenin X-ışınına dik olarak iki boyutlu görüntüsünü elde etmeyi sağlarken bilgisayarlı tomografi X-ışınına paralel ince bir dilimin dijital olarak görüntüsünü elde etmeyi sağlamaktadır. Dilim kalınlığı 0,025 mm'den 3 mm'ye değişmektedir (Kim ve Liaw 1998). Genellikle 360 yada 720 radyografik görüntünün birleştirilmesiyle malzemede oluşan absorpsiyon belirlenmektedir. Bu nedenle X-ışını tomografisi malzemenin bütün hacmi içinde X-ışınlarının bölgesel absorpsiyonu hakkında bilgi vermektedir. Ham seramiklerde olduğu gibi malzemenin her yerinde kimyasal bileşimin sabit olduğu düşünülürse, X-ışını absorpsiyonu gözenek miktarının basit bir fonksiyonudur (Rabe ve ark. 2003).

Çok çeşitli bilgisayarlı tomografi metodlarından x ışını bilgisayarlı tomografisi en çok kullanılan metoddur. Küçük boyutlu numuneler için; endüstriyel uygulamaları birkaç mikron çözünürlüğe sahip olarak son zamanlarda yapılabilmektedir (Suziki 2007). Bilgisayarlı X-ışını tomografisi seramik hata analizlerinde, kompozitlerde yapı gelişimlerinde ve mikroyapı karakterizasyonunda kullanılmaktadır (Kim ve Liaw 1998). Otomobil motorlarının Si_3N_4 sübapları tahribatsız muayene tetkikleri ile incelenmiş, sübap başı ve sapı arasındaki bölgedeki hataları tespit etmek amacıyla X-ışını tomografisi kullanılmıştır (Netzelmann ve ark. 1997). X-ışını tomografisiyle 19

mm çapında, 12 mm ykseklğinde ve ortalama gözenek miktarı ~ % 43 olan karmaşık şekilli ham Al_2O_3 seramik incelenmiştir. Bu seramiğın çapsal ve eksenel kesitleri incelenmiştir. İncelenen kesitlerdeki bölgesel çözünürlük her yönde 100 μm 'dur. Elde edilen görüntü ham seramik içindeki yüksek ve düşük gözenekli bölgeleri göstermektedir. Ham seramiğın konkav yüzeylerinde gözeneklilik ortalama gözenek miktarından % 5 daha küçüktür. Bununda ötesinde çatlaklar tespit edilmiştir. Bu çatlakların kalıptan çıkarma esnasında olduğu düşünülmektedir (Rabe ve ark. 2003).

3.4. Ultrasonik Muayene Yöntemi

Ultrasonik muayene bir malzemenin yüzeyindeki farklı bölgelere uygulanan yüksek frekanslı ses dalgalarının hareketinin ölçülmesidir. Elektronik olarak kontrol edilebilen bu sinyaller, malzemede ilerledikten sonra akustik enerjinin tekrar elektronik sinyallere dönüştürülmesiyle toplanmaktadır. Bu ses dalgalarının belirli sınırlardan yansıma ve kırınımının yorumlanması, incelenen malzemede ki süreksizliklere ilişkin bilgi vermektedir. Ultrasonik dalgalar çoğu malzemede hareket edebildiği için ultrasonik muayene hem iç hem de yüzeydeki hataları tespit etmede en yaygın kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden birisidir (Grandt, Jr. 2004).

Ultrasonik muayene yöntemi piezoelektrik kristaller aracılığı ile üretilen ve algılanan ultrasonik dalgaların katı malzemeler içerisinde yayınması ve sınır yüzeylerden yansıyarak malzemenin iç yapısı ile ilgili bilgileri vermesi temel prensibi üzerine kurulmuştur (Kayalı ve ark. 1997).

Ultrasonik dalgalar piezoelektrik kristal adı verilen ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine eviren özelliklere sahip kristaller aracılığıyla üretilirler ve algılanırlar. Ters piezoelektrik etki ultrasonik dalgaların üretilmesinde, doğrudan piezoelektrik etki ise ultrasonik dalgaların algılanmasında kullanılır.

Ultrasonik uygulamalarda kullanılan piezoelektrik malzemelerin en önemlileri:

Kurşun-Zirkonat-Titanat (PZT)	Baryum titanat (BaTiO_3)
Kurşun-metaniobat (PbNb_2O_6)	Lityum sülfat (LiSO_4)
Kuvars (SiO_2)	Lityum niobat (LiNbO_3)

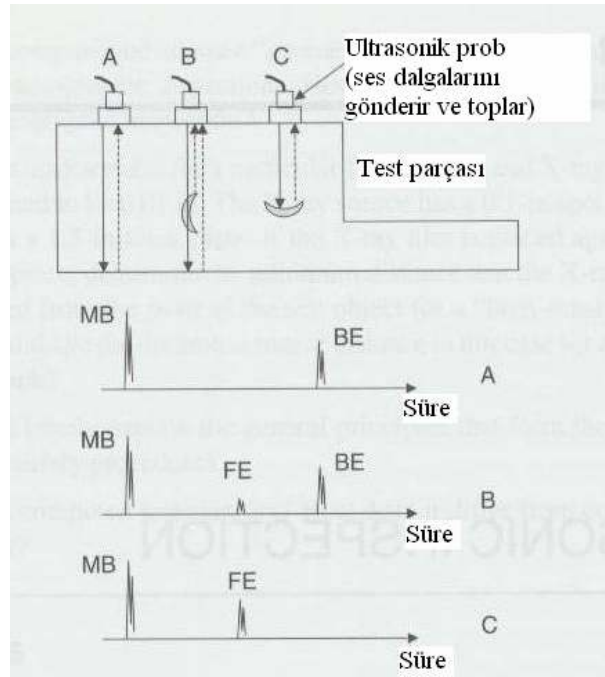
Ultrasonik ses dalgaları yayıldığı ortam değiştiğinde fizikteki optik kanunlarına uygun olarak yansır. Malzeme içerisindeki katı ile gaz ortamlar arasındaki yansıma neden olan sınır yüzeylere ultrasonik sınır yüzey denir. Üretilen ultrasonik dalgalar, muayene edilen parça içerisine gönderilir. Bu dalgalar sınır bir yüzeye gelince yansır, geri dönen ses dalgaları piezoelektrik kristal tarafından algılanır. Ses dalgalarının piezoelektrik kristalden çıkış ve dönüş zamanları elektronik olarak ölçülüp bir osiloskop ekranı üzerine düşülerek malzeme iç yapısıyla ilgili bilgiler elde edilir (Kayalı ve ark. 1997).

Ultrasoniğin en önemli uygulama alanlarından birisi tahribatsız muayenedir. Katı bir bünyedeki herhangi bir homojensizliğin ultrasonik dalgaları engellemesi ya da en azından ilerlemesini etkilemesine dayanmaktadır (Kuttruff 1991). Tahribatsız muayenede kullanılan karakteristik ultrasonik frekans aralığı, 20 ile 20000 Hz frekans aralığı ile sınırlı insan kulağının duyamayacağı 200 kHz ile 25 MHz arasındadır (Grandt, Jr. 2004). Porselen, çelik gibi 5 MHz'ten yüksek frekanslarda incelenebilen bir seramiktir. Yüksek voltaj yalıtkanları gibi teknik teknik uygulamalarda kullanılan porselenlerin incelenmesi gözeneklilik ve çatlak gibi bulunan hatalar hem mekanik, hem de elektriksel özellikleri etkilediği için oldukça önemlidir. Kaba taneli yapılarıyla beton ve yapay taşlar 100 kHz frekansın altındaki frekanslarda ancak incelenebilmektedir (Kuttruff 1991). Ses dalgaları, X-ışınları ve gama ışınlarının aksine sağlığa zararlı değildir. Buna ek olarak elektronik sinyallerle üretilmeleri ve toplanırken de tekrar elektronik sinyallere dönüştürülmeleri nedeniyle, analiz sonuçlarını değerlendirirken sinyal işlemenin kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Grandt, Jr. 2004).

Şekil 3.2'de darbe-yankı ultrasonik muayenenin şematik olarak görünüşünde normal bir dalganın hareketi ve bir süreksizliğin varlığında ses dalgasının yansımasının değişmesi görülmektedir. Hatanın varlığı ve yeri, süre ekseni ile bağıntılı olarak belirlenebilmektedir. Hata ses dalgasına dik doğrultuda

olduğunda hatanın algılanması, tespit edilebilecek en yüksek değerde elde edilmektedir (Grandt, Jr. 2004).

Ses dalgaları, mekanik-elastik özellik gösterirler. Frekans değerlerine göre ses-altı ($f < 16$ Hz), akustik ($16 \text{ Hz} \leq f \leq 16 \text{ kHz}$), ultrasonik ($f > 16 \text{ kHz}$) olarak sınıflandırılabilir. Tahribatsız muayene tekniklerinde, genellikle 0,5–20 MHz aralığı kullanılmaktadır (Gür 1999b). Seramik, refrakter ve beton malzemelerin muayenesinde ise 20–250 kHz frekanslı dalgalar kullanılır (Yaman 1999).



Şekil 3.2. Ultrasonik muayenenin (darbe-yankı tekniği) şematik gösterimi (Grandt, Jr. 2004)

Dalgaboyu (λ), aynı salınım durumuna sahip ardışık iki nokta arasındaki mesafedir. Frekans (f) ise bir saniye içinde salınan dalgaların sayısıdır. Dalgaboyu arttıkça frekans değeri azalmaktadır (Gür 1999b). İlerleyen sesin hızı (V), titreşimin dalgaboyu (λ) ve frekansına (f) bağlı olarak Denklem 3.1’de verilmektedir.

$$V = \lambda f \quad (3.1)$$

TM’de ultrasoniğin dalga boyu 1 mm’nin katları şeklindedir. Kıyaslanmak istenirse görünür ışığın dalga boyu yaklaşık 10^{-3} mm’dir ve X-ışınlarının dalga boyu da 10^{-6} - 10^{-9} mm arasında değişmektedir (Grandt, Jr. 2004).

Kuvars kristali kullanarak malzemelerde ultrasonik titreşimler oluşturmak amacıyla yapılan ilk deneyler 1929 yılında Rusya’da S.Y. Sokolov tarafından yapılmıştır. 1940–1944 yıllarında Amerika’da Dr. Floyd Firestone tarafından ultrasonik test metodu geliştirilmiştir. D.O. Sproule İngiltere’de 1942 yılında ilk hata dedektörünü keşfetmiştir. 1946 yılında ilk taşınabilir ultrasonik kalınlık ölçüm aleti geliştirilmiştir. 1950’li yılların ortalarında D.C. Erdman tarafından B ve C tarama aletleri ortaya konmuştur (Hellier 2001).

3.4.1. Dalga yayılma modeli

Ses dalgaları, çoğu malzemede ilerleyebilen mekanik (elektromanyetik değil) titreşimlerdir. Ses dalgalarının hızları, ilerledikleri malzemenin yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir ve buna bağlı olarak yansıtılabilmekte, odaklanabilmekte ve kırılabilirler. TM’de ultrasonik dalgaların üretimi ve toplanması genellikle test edilen malzemeye temas eden piezoelektrik probalar ile gerçekleştirilmektedir. 1880 yılında Currie tarafından keşfedilen piezoelektriklik, elektrik sinyallerin mekanik titreşimlere dönüştürülmesini ve bunun tersini içermektedir. Probada mekanik titreşimlerin tekrar elektrik sinyallerine dönüştürülmesiyle ses dalgaları toplanmaktadır (Grandt, Jr. 2004). Bir malzemenin kristal yapısı, atomların düzenli aralıklarla konumlandıkları ve yaylarla sembolize edilen elastik kuvvetlerle bir arada tutuldukları basit bir modelle ifade edilebilir. Ultrasonik probada üretilen dalgalar, ses enerjisi formunda, titreşen atomların elastik temasıyla malzeme içerisinde belli bir hızla yayılırlar. Dalgaların yayılma hızı, titreşen atomların kütlelerine (malzeme yoğunluğuna) ve atomlar arasındaki bağlayıcı kuvvetlere (elastisite modülüne) bağlıdır (Gür 1999b).

3.4.2. Ultrasonik dalga tipleri

Dalga hızı/ilerleme süresi, ultrasonik dalga hızı en kolay ölçülebilir ultrasonik parametredir. Ultrasonik dalga hızının homojen bir malzemede ilerlemesi hem elastisite modülüne hem de yoğunluğa bağlıdır. Bu nedenle,

elastisite modülünde ya da yoğunlukta olabilecek değişiklikler belirli bir kalınlıktaki malzemenin dalga ilerleme süresini değiştirecektir. Buna ilaveten homojensizliğin artması ses hızını etkileyecektir (İşleyici 2005) .

Ses dalgaları bir malzeme boyunca farklı şekillerde ilerleyebilmektedir. Bunlar boyuna dalgalar, enine dalgalar, yüzey dalgaları, Lamb dalgalar, duran dalgalar şeklindedir. Boyuna dalgalar aynı zamanda basma dalgaları olarak da adlandırılmaktadır. Boyuna dalgalarda, Şekil 3.3'te gösterildiği üzere parçacıkların titreşim yönleri, dalgaların ilerleme yönüne paraleldir. Boyuna dalgalar, ultrasonik dalga incelenen malzemenin yüzeyine dike yakın bir şekilde girdiği durumlarda, TM için en yaygın olarak kullanılan dalga çeşididir. Kolaylıkla üretilebilir ve toplanabilirler. Ayrıca boyuna dalgalar katılarda, sıvılarda ve gazlarda ilerleyebilmektedirler. Bir malzemede boyuna dalganın ilerleme hızı (V_c), Denklem 3.2'de verildiği şekildedir.

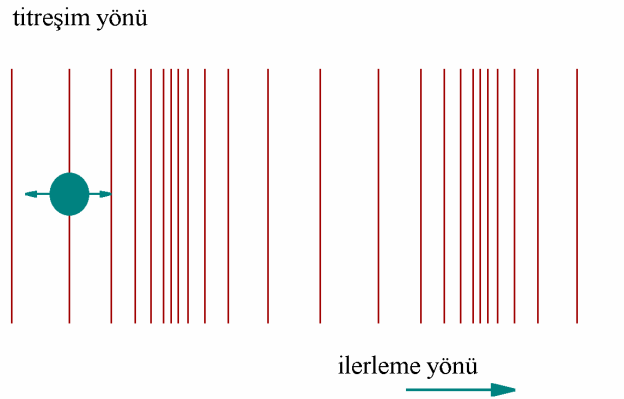
$$V_c = \left(\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

burada V_c : boyuna dalga hızı,

E: malzemenin elastisite modülü,

ν : Poisson oranı,

ρ : malzemenin yoğunluğu'dur.



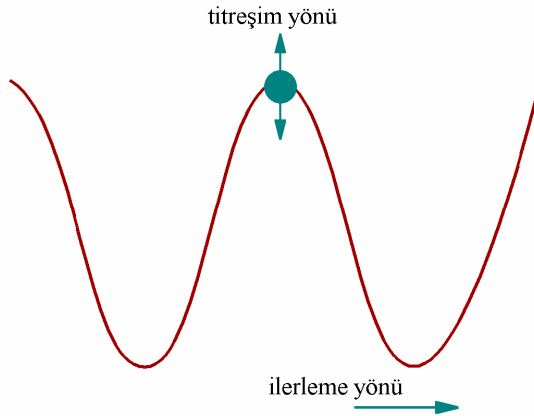
Şekil 3.3. Boyuna dalga (Anonim 2007c)

Enine dalgalar da ise Şekil 3.4'te gösterildiği üzere parçacık hareketi dalga hareketine diktir. Enine dalgaların ilerleyebildiği malzemeler genellikle katılarla

sınırlıdır, ancak yüksek viskoziteli sıvılarda da ilerleyebilmektedirler. Ultrasonik dalgalar malzemeye belli bir açıda girdiğinde oluşturulmaktadır. Enine dalgalar kutuplandırılabilir ve hızları V_s :

$$V_s = \left(\frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right)^{1/2} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.3)$$

ile ifade edilmektedir. Burada G kayma modülüdür ve diğer terimler boyuna dalga hızı için belirtilen şekildedir. Enine dalga hızı, Denklem 3.2’de verilen boyuna dalga hızı V_c ’nin yaklaşık yarısı kadardır. Enine dalgalar daha düşük hıza ve belirlenmiş bir frekansta daha kısa dalga boyuna sahip oldukları için, malzemedeki küçük anormalliklere boyuna dalgalara göre daha hassastırlar. Bununla birlikte kırılmaya karşı daha duyarlıdır ve bu nedenle malzemeye nüfus etmeleri daha az olmaktadır.

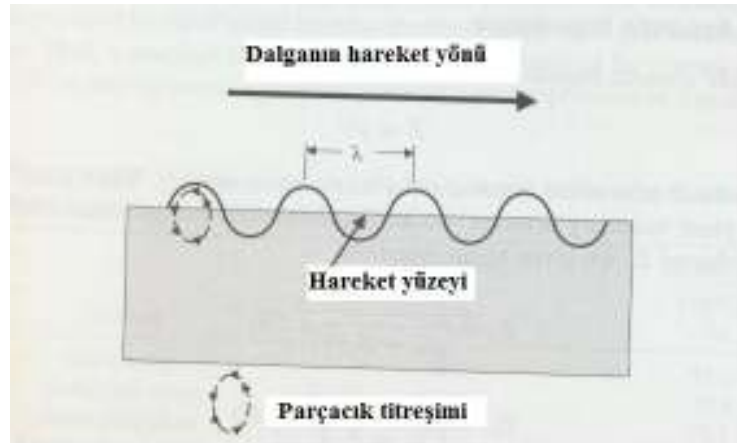


Şekil 3.4. Enine dalga (Anonim 2007c)

Yüzey dalgalarında (Rayleigh) parçacıklar, hem boyuna hem de enine dalgaların hareketine sahip olarak eliptik bir yol izlemektedir (Şekil 3.5). Bu dalgalar, sadece malzemenin yüzeyi boyunca yaklaşık olarak bir dalga boyu derinlikte yayılmakta ve yüzey kavislerini izlemektedir. Yüzey dalgaları, ultrasonik dalgalar bir katı yüzeyine çok küçük bir açı ile girdiği zaman oluşmaktadır ve hızları enine dalga hızı V_s ’nin yaklaşık %90’ı kadardır. Yüzey dalgaları, incelenen malzemenin yüzeyine yakın ilerlemekte, enerjileri yüzeyin altında çok hızlı azalmakta ve iki dalgaboyu derinlikten (2λ) sonra durmaktadırlar. Yüzey dalgaları yüzeye yakın kısımlarda ilerlemelerine rağmen, köşelerden

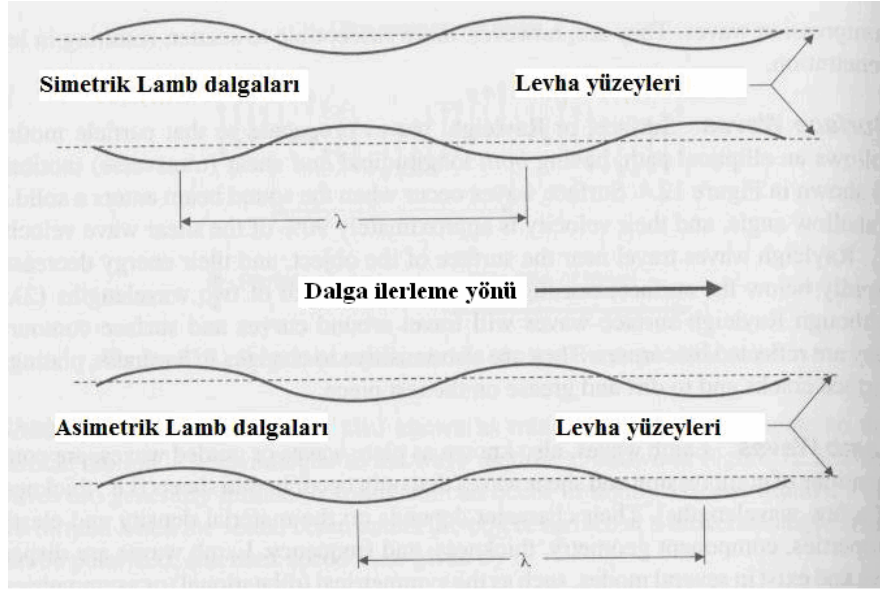
yansımaktadırlar. Ayrıca sertlikte ve plakalardaki değişimlere, yüzey çatlaklarına, incelenen malzemenin yüzeyindeki kir ve yağlara karşı hassastırlar (Grandt, Jr. 2004 ve Gür 1999b).

Plaka dalgaları ya da kılavuz dalgalar olarak da bilinen Lamb dalgalar, boyuna ve enine dalgaların bileşim şeklinde olup sadece kalınlığı birkaç dalgaboyu olan çok ince levhalarda ilerleyebilmektedir. Bu dalgaların özellikleri, malzeme yoğunluğu ve elastik özelliklerine, parçanın geometrisine ve kalınlığına, frekansa bağlıdır. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere simetrik ya da asimetrik olmak üzere farklı şekillerde ilerlemektedirler. İncelenen malzemede çeşitli hızlarla ilerleyebilmektedirler. Lamb dalgalar, özellikle metallerde ya da tabakalı kompozitlerdeki boyuna ayrışmaları tespit etmek amacıyla kullanılmaktadırlar (Grandt, Jr. 2004).



Şekil 3.5. Yüzey dalgası (Grandt, Jr. 2004)

Duran dalgalar ise aynı frekansa sahip fakat farklı başlangıç noktalarına ve ilerleme yönlerine sahip diğer dalgaların etkileşimi sonucunda oluşmaktadır. Belirli durumlarda, parçacıkların etkileşimdeki bu ilerleyen dalgalar içinde hareketsiz kalması mümkündür (Grandt, Jr. 2004).



Şekil 3.6. Lamb dalgaları (Grandt, Jr. 2004)

3.4.3. Akustik direnç (Z)

Bir malzemenin, dalgaların yayılmasına karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Malzeme yoğunluğunun ve dalganın malzeme içinde yayılma hızının çarpımına eşittir. Farklı akustik dirençlere sahip iki bölgenin ara yüzeyine çarpan dalgaların bir kısmı geri yansır, bir kısmı yoluna devam eder. Dirençler arasındaki fark büyüdükçe yansıyan miktar artmaktadır (Gür 1999b).

Akustik direnç Z,

$$Z = \rho V \quad (3.4)$$

ile ifade edilmektedir. Burada ρ malzemenin yoğunluğu ve V dalga hızıdır. Bir ses dalgası iki ortam arasındaki bir düzleme çarptığında iletilen E_t ve yansıtılan E_r enerjilerin yüzdeleri Denklemler 3.5 ve 3.6 ile verilmektedir.

$$E_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \times 100 \quad (3.5)$$

$$E_r = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \times 100 \quad (3.6)$$

Burada Z_1 ve Z_2 , malzeme 1 ve 2 için Denklem 3.4 ile belirlenen akustik dirençlerdir. Bu denklemler bir sınırda boyuna ve enine dalgaların normal yansımaları için geçerlidir. Enine dalgalar sıvı ve gazlarda ilerleyemediği için

katı-sıvı veya katı-gaz arayüzeylerde %100 etkin bir şekilde enerji yansımaları gerçekleşmektedir (Grandt, Jr. 2004).

3.4.4. Ses zayıflaması

Ses enerjisi farklı malzemelerde farklı hızlarda absorbe edilir ya da zayıflatılır. Bunu etkileyen faktörler yoğunluk, sertlik, temas yüzeyinin pürüzlülüğü, viskozite ve moleküler yapıdır. Sinyal şiddeti incelenen malzeme için, frekans arttıkça artmaktadır.

Kırılma ses dalgaları, birbirine benzemeyen malzemelerin sınırında yansır. Tane yapısındaki, fiber dizilimlerindeki, gözeneklilikteki, parçacık konsantrasyonundaki, mikroyapıdaki değişiklikler kırılan sinyallerin şiddetini, yönünü ve frekansını etkilemektedir. Kırılma etkisi geri yansıyan eko'nun ya da direkt iletilen sinyalin şiddetindeki değişime bakarak dolaylı olarak izlenebilmektedir (İşleyici 2005).

Saçılma ve soğurulmanın yol açtığı ses basıncı kayıplarını ifade etmektedir. Metaller ve seramik malzemelerde saçılma, plastik malzemelerde ise soğurulma mekanizması daha etkindir.

Soğurulma, ses enerjisinin başka bir enerji tipine, örneğin ısıya, dönüşmesidir. Saçılma ise dalgaların tane sınırlarından yansımalarını ifade eder ve tane boyutu (D) ile dalga boyu (λ) arasındaki orana bağlıdır.

$$\text{Rayleigh saçılması} \quad 0,02 < \frac{D}{\lambda} < 0,2 \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\text{Rastgele saçılma} \quad \frac{D}{\lambda} \cong 1 \dots\dots\dots (3.8)$$

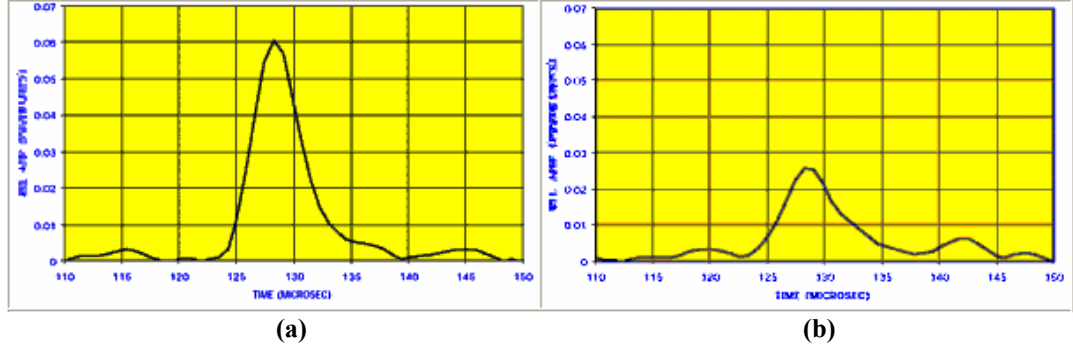
$$\text{Yayınım saçılması} \quad \frac{D}{\lambda} \gg 1 \dots\dots\dots (3.9)$$

Bilinen ortalama tane boyutuna sahip bir malzeme üzerinde yapılan ultrasonik incelemede, dalga boyu arttırıldıkça (frekans azaldıkça) saçılma azalmaktadır. Gri dökme demir ve östenitik çelik döküm gibi iri taneli malzemelerde Rayleigh ve rastgele saçılma mekanizmaları etkindir ve inceleme için düşük frekanslı probler tercih edilmektedir.

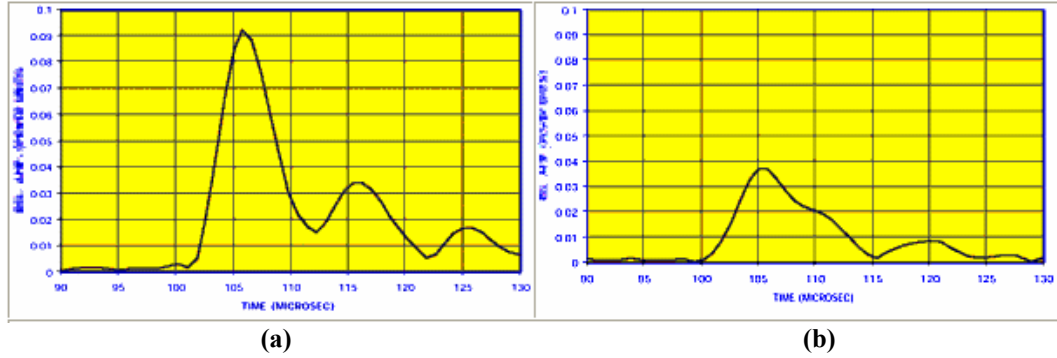
Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde temel kural, ultrasonik dalgaların malzeme içinde yayılma özelliklerinin ve bu özelliklerdeki değişmelerin hassas olarak kaydedilip incelenmesidir. Dalga yayılma hızındaki değişimin ve zayıflama katsayısının ölçülmesiyle mikroyapı, mekanik özellikler, kalıntı gerilmeler ve malzeme yoğunluğu hakkında bilgi elde edilmektedir. Ultrasonik dalga demeti malzeme içinde ilerlerken parçanın şekli, ses demetinin açılımı ve mikroyapı gibi nedenlerle enerji kayıpları olur. Ultrasonik zayıflama katsayısı ölçümleri diğer etkiler kontrol altına alındığında, malzemenin mikroyapısından ve mikroyapıdaki bölgesel farklılıklardan kaynaklanan enerji kayıplarının çok hassas bir göstergesi haline gelirler. Bunun nedeni, dalgaların hacimsel hatalarla (çatlak, mikro çatlak, kalıntı, çökelti v.b.), tane sınırlarıyla, fazlar arası sınırlarla ve dislokasyonlarla etkileşmesidir. Dalgalar, safsızlık olarak bulunan atomlardan ve atomik boşluklardan da etkilenmektedirler. Dalgaların dislokasyonlar tarafından soğrularak zayıflatılması, plastik şekil değiştirmenin incelenmesini mümkün kılmaktadır (Gür 1999b).

Kolaylıkla ölçülemeyecek küçük hatalardan gelecek pikler tespit edilemese bile, bu hataların ultrasonik dalgaların malzemeden çıkış piklerinde oluşturdukları azalma, aynı özellikteki hatasız bir malzeme ile kıyaslanarak tespit edilebilmektedir. Pikteki azalma “zayıflama” olarak tanımlanabilir ve tahribatsız muayenenin önemli bir konusudur (The Institution of Metallurgist 1983).

M.C. Bhardwaj ve grubu yaptıkları çalışmada hataların tespit edilebilirliğini ham ve sinterlenmiş seramiklere 1,5 mm çapında silindirik delikler açarak belirlemeye çalışmışlardır. İncelenen ham seramik 14 mm kalınlığında bir porselen ve sinterlenmiş seramik % 80 yoğunlukta bir $\text{NaZr}_2(\text{PO}_4)_3$ (NZP) seramiktir. Şekil 3.7’de ham seramikte ultrasonik sinyallerin hatasız ve hatalı bölgelerde geçişi görülmektedir. Şekil 3.8’de sinterlenmiş seramikten alınan görüntüler de ham seramikten alınan görüntülere benzerdir. Hatalı bölgeden geçiş esnasında, hatasız bölgeye göre iletilen enerji miktarı azalmaktadır (Bhardwaj ve ark. 2000).



Şekil 3.7. Ham seramikte hata tespiti. (a) Hatasız bölge, (b) 1,5 mm’lik yandan açılmış delik ile (Bhardwaj ve ark. 2000)



Şekil 3.8. Sinterlenmiş seramikte hata tespiti. (a) Hatasız bölge, (b) 1,5 mm’lik yandan açılmış delik ile (Bhardwaj ve ark. 2000)

3.4.5. Probların seçimi

Problun seçimi, incelenecek hataya bağlı olduğu için probun kalitesini göz önüne alarak kesin bir sınıflandırma yapmak zordur. Bazı durumlarda frekans kritik bir faktör iken, bazı durumlarda sönümlenme kritik faktördür. Aynı şekilde odak uzunluğu ya da odak noktası çapı da kritik olabilmektedir (Ülker 1995).

Normal problemleri birbirinden ayıran özellikler; osilatör cinsi, osilatör çapı ve frekanstır. Yüksek frekanslı prob seçmekle;

- Daha az hassasiyet,
- Daha iyi bir hata tespiti,
- Daha uzun bir silindirik hüzmeye,
- Daha iyi bir ayırt etme yeteneği elde edilmektedir (Kayalı ve ark. 1997).

Hata türü ve hatanın parça içindeki konumuna göre kullanılan 5 çeşit prob bulunmaktadır.

1- Normal prob: Dövme parçalarda kalıntılar, “kofluk” şeklinde tanımlanan hatalar ve anormal ayrışmalar (segregasyonlar) için; hadde ürünlerinde ise katmerlerin bulunmasında, yırtılmalarda kullanılır. Ayrıca yorulma çatlakları, korozyon, erozyon ve gerilimli çatlaklar için kullanılır.

2- Açısal prob: Eğer hatalar parça eksenine ile belli bir açıda bulunuyorsa bu tip hatalar açısal probta bulunur. Bu tip problemler daha çok kaynak hatalarının bulunmasında kullanılır. Bu hatalar eksik kaynama, nüfusiyet azlığı, çatlaklar, curuf kalıntıları, gözeneklilik gibi sıralanabilir. Bu tip problemler, borularda ise çevresel ve boyuna çatlakların bulunmasında kullanılır.

3- Daldırma probu: Seri kontrolde su ile yapılan muayeneler için kullanılan problemlerdir.

4- Çift elemanlı prob: Sac ve levhalarda kalınlık ölçümleri ve katmer hatalarında, borularda cidar kalınlığı ölçümlerinde kullanılabilir ve ayrıca cidar incelmelerinin tespitinde kullanılır.

5- Geciktirme bloklı prob: Çift elemanlı prob gibi daha çok kalınlık ölçmelerinde kullanılabilir ve yüzeye paralel olmayan hata yerlerinin tespitinde kullanılır (Topuz 2003).

3.4.6. Ultrasonik testin uygulama örnekleri

3.4.6.1. Ortalama tane boyutunun belirlenmesi

Ortalama tane boyutunun ultrasonik tekniklerle hızlı ve basit bir şekilde belirlenmesi, daha uzun süren, pahalı ve tahribatlı olan metalografik yöntemlere karşı avantajlar sağlamaktadır. Dalgaların saçılmaya bağlı zayıflama katsayıları ölçülerek ortalama tane boyutu dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Tane sınırlarında olan saçılmanın nedeni elastik özelliklerin yöne bağlı olarak değişmesi (anizotropi); fazlar arası sınırlarda oluşan saçılmaların nedeni ise akustik empedanstaki farklılıklardır (Gür 1999b).

3.4.6.2. Mikroyapının incelenmesi

Gri dökme demir içindeki yaprak biçimli grafitlerin boyut ve miktarlarının boyuna dalgaların yayılma hızını etkilediği saptanmıştır. Grafitin miktar ve biçimi, dökme demirlerin çekme dayanımını etkilediğinden, ses hızı ölçümleri kabul-red kriteri olarak kullanılabilir. Benzer ölçümler, alüminyum, magnezyum, titanyum ve alaşımları gibi hafif metallerin kalite kontrolü içinde uygundur. Bu metallerin mukavemetleri çökeltiler, kalıntılar, safsızlık olarak bulunan atomlar ve alaşım miktarındaki farklılıklar gibi ultrasonik ölçümleri etkileyen faktörlere bağlıdır. Çökelme sertleşmesi işleminin alüminyum alaşımlarına etkisi dalga hızı ve zayıflama ölçümleri ile incelenmiştir. Geliştirilen akustik mikroskoplarda, mikroyapılar ekran görüntülerine dönüştürülerek mikro-elastik farklılıklar, tane yapısı ve mikro-kalıntılar incelenebilmektedir (Gür 1999b).

3.4.6.3. Sertlik ölçümü

Ultrasonik tekniklerle sertlik ölçümünün avantajı, parçalar henüz üretim aşamasındayken çok hızlı bir şekilde kalite kontrolünün yapılabilmesidir. Dalga yayılma hızlarının belirlenmesiyle yapılan sertlik ölçümleri, yumuşak dökme demirlerin sınıflandırılmasında diğer yöntemlere karşı avantaj sağlamaktadır. Bazı çeliklerde, Rockwell-C sertliği ile zayıflama katsayısı arasında doğrudan bir bağlantı olduğu belirlenmiştir (Gür 1999b).

3.4.6.4. Elastik sabitlerin ve gerilmelerin belirlenmesi

Ultrasonik teknikler, gerilme veya gerinme durumunun ultrasonik dalganın ilerleme hızına etkisini ifade eden akusto-elastik etkiyi kullanır. Bu etki, malzemenin elastik sabitleri cinsinden analitik olarak tanımlanabilir. Hesaplamalar için, elastik ve kesme modüllerinin yanı sıra üçüncü dereceden elastik sabitlerin de bilinmesi gereklidir. Bu sabitler, uygun bir numune üzerinde yapılan mekanik testlerle belirlenmektedir. Bu değerler kullanılarak, herhangi bir,

iki veya üç boyutlu gerilme durumunun ses ilerleme hızına veya dalga-uçuş-süresine (time-of-flight) etkisi belirlenir. Bu tekniklerin uygulama alanı, metallerle sınırlı değildir. İncelenen parçanın sıcaklığı ve dokusu (texture) elastik sabitleri etkilediğinden, hesaplanacak gerilmelere ve dokunun durumuna ve parçanın şekline bağlı olarak farklı ölçüm prosedürleri geliştirilmelidir. Elastik modül, mikroyapı değişimlerinden çok fazla etkilenmemekle birlikte, üçüncü dereceden elastik sabitlerin değeri mikroyapıya bağlıdır.

Malzemelerin elastik özellikleri boyuna ve enine dalgaların yayılma hızları ölçülerek belirlenebilir. Doğrusal elastik olan ve tüm yönlerde eşit özellik gösteren (izotropik) katılarda, bu iki hız değeri belirlendiğinde formüller yardımıyla bütün elastik özellikler (elastik modül, kesme modülü, Poisson oranı) hesaplanabilmektedir. Bazı gevrek malzemelerde bu sabitler doğrudan dayanak değerlerine karşılık gelmektedir.

Malzemeye etkiyen dış gerilmeler veya malzemede var olan kalıntı gerilmeler dalgaların yayılma hızlarını etkilemektedir. İlerleme hızındaki değişmelerin gerilme değeri ile doğru orantılı olduğu saptanmıştır. Boyuna veya enine dalgalar kullanılarak temel gerilmelerin büyüklüğü ve yönü belirlenebilmektedir. Böylece, tahribatlı gerilme-ölçüm üniteleri ve tahribatsız olan ancak uzun süren X-ışını kırınımı yöntemi yerine tahribatsız ve hızlı sonuç veren ultrasonik teknikler devreye girmektedir. Son araştırmalar ultrasonik dalga hızlarının ve zayıflama değerlerinin ölçülmesinde lazer teknolojisinin de kullanılabileceğini göstermiştir. Lazer ışınıyla ultrasonik dalgalarının karşılıklı etkileşimini temel alan akusto-optik teknikte, incelenen malzemeye gönderilen ve yansıyan ultrasonik dalgalar arasındaki faz kayması belirlenmektedir. Ultrasonik dalgalar incelenen malzemeye kritik bir açıyla çarptığında faz kayması, malzeme özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Kritik açı ve faz kayması, malzemeye çarpan ses demetine paralel gönderilen lazer ışını yardımıyla ölçülmektedir. Jominy-deneyi uygulanan C-45 çelik numunede, sertlik profili ile akusto-optik ölçüm sonuçları tam bir uyum göstermiştir (Gür 1999b).

3.4.6.5. Kırılma tokluğu ve akma dayancı değerlerinin saptanması

Uygun kalibrasyon eğrileri ve formüller yardımıyla malzemelerde kırılma tokluğu ve akma dayancı ultrasonik tekniklerle belirlenebilmektedir. Havacılıkta kullanılan malzemelerde, düzlemsel gerilme kırılma tokluğunun (K_{IC}) belirlenmesi için gereken tahribatlı testlerin ve deney numunelerinin hazırlama giderleri yüksektir. Ses zayıflama katsayısının ölçüldüğü ultrasonik teknikler sayesinde, çok daha hızlı ve ucuz bir kontrol mümkün olmaktadır. Bu, yaşlanma (martensit+yaşlanma) çelikleri ve titanyum alaşımları üzerinde yapılan deneylerle ispatlanmıştır.

Araştırmalar, ses zayıflama katsayısının yönsele özelliklerden etkilendiğini ve plastik şekil değiştirmenin başlangıç aşamalarında, çekme testleriyle elde edilen gerilme-gerinme eğrilerinden daha hassas sonuçlar verdiğini göstermiştir. Gerilme-gerinme eğrisi ile ses zayıflama katsayısı-gerinme eğrisi arasında bir ilişki bulunmaktadır. Uygun bir düzenek ve polarizasyon ile ultrasonik dalgalar ile birincil kayma (primary slip) sistemindeki dislokasyonlar arasında etkileşim olduğu görülmüştür. Zayıflama miktarı artan gerinme miktarı ile artmış, akma noktasında ise keskin bir düşme gözlenmiştir. Ancak, plastik deformasyon devam ettikçe bu değer tekrar artmaya başlamıştır.

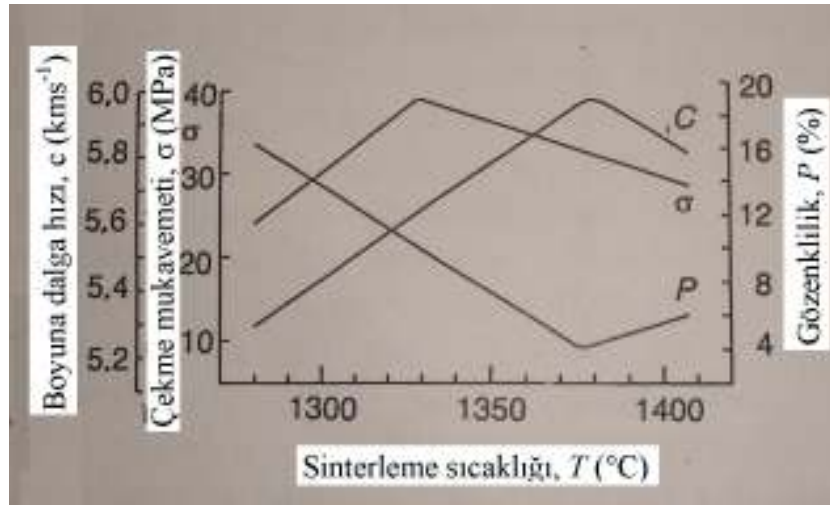
Ses zayıflama katsayısındaki değişimler, mikro çatlak oluşumuna da bağlı olduğundan, kullanım koşullarında değişken dış yüklere maruz kalan iş parçalarında yorulma çatlaklarının oluşumu, başlangıç aşamasında tespit edilebilir ve hasar oluşumlarına karşı bir erken uyarı sistemi geliştirilebilir (Gür 1999b).

3.4.6.6. Kompozit ve seramik malzemelerdeki uygulamalar

Ultrasonik metotlar seramiklerin mukavemetleri, poroziteleri, yapışma kalitesi (iki ya da daha fazla bileşenler) ve hataların tespiti için başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Blitz ve Simpson 1996).

Porselen elektrik yalıtkanları yüksek voltaj uygulamalarında kullanıldığı için % 100 kontrol edilmeleri gerekmektedir. Çünkü yapılan herhangi bir hata, felaketle sonuçlanabilmektedir (Blitz ve Simpson 1996).

Gözeneklilik; kilde pişme sırasında yer alan suyun buharlaşması ile oluşmaktadır. Pişmemiş kilde su içeriği % 16'dan 9'a düştüğünde ultrasonik dalga hızı 1800 ms^{-1} 'den 800 ms^{-1} 'in altına düşmektedir. 1000°C 'de pişirildiğinde ise, su tamamen uçarak yerine gözenekleri bırakmaktadır. Ultrasonik dalga hızı, malzemenin yapısının kristal şekle dönüşmesi nedeniyle, şaşırtıcı bir şekilde 2000 ms^{-1} 'lere çıkmaktadır. Isıtmaya devam edilirse, sinterleme sıcaklığına bağlı olarak gözenekler, feldispat ile kısmi olarak doldurulmakta ve yaklaşık 1380°C 'de minimum gözenek miktarı (% 4) elde edilmektedir. Ultrasonik hız bu sıcaklıkta en yüksek değere ulaşmaktadır. Şekil 3.9 ultrasonik dalga hızının, gözenekliliğin ve mekanik mukavemetin sıcaklıkla değişimini göstermektedir.



Şekil 3.9. Sinterlenmiş seramikte ultrasonik dalga hızının, gözenekliliğin ve mekanik mukavemetin sıcaklıkla değişimi (Blitz ve Simpson 1996)

Refrakter ve yapı seramiklerinin ultrasonik yöntemle mukavemet, gözeneklilik ve hatalar açısından incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Seramik karo ve tuğlalar nem içerikleri, donma dirençleri ve yüzeye tutunmaları açısından incelenmiştir. Normal problemlerde temas sıvısının kullanımı problemini çözmek amacıyla, problemler sentetik plastik ya da reçine ile kaplanmıştır. Bu maddeler pürüzlü yüzeyde iyi yeterli teması sağlamak için kullanılmışlardır.

Boyuna dalgaların pişmiş ürünlerdeki hızları 5000 ile 6000 ms^{-1} arasında değişirken bazı seramiklerdeki hızları bu değerlerin dışındadır. Yüksek boyunu dalga

hızına sahip (12000 ms^{-1} gibi) seramikler 1 mm dalga boyunda 12 MHz frekansa sahiptirler. Bu nedenle, küçük hataları görmek mümkün değildir. Problemin üstesinden gelebilmek için 100 MHz'lik frekansa sahip probalar kullanılmalıdır (Blitz ve Simpson 1996).

Kompozit malzemelerde, elastisite modülünün belirlenmesinde, yapı içindeki mikro-boşlukların neden olduğu ses zayıflamasının ölçülmesinde de ultrasonik dalga yayılma hızından yararlanılmaktadır. Fiber takviyeli kompozitlerdeki mikro-boşlukların dayanımın azalmasında önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, deneylerde dikkat edilmesi gereken nokta, fiber takviyeli kompozitlerin gösterdikleri kuvvetli yönsel özelliklere göre ultrasonik tekniğin uyarlanmasıdır. Ayrıca, ses zayıflama katsayısı tabakaların ara yüzeylerindeki kesme dayancı azaldığında artmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerde çevrimsel plastik gerinmeler ve termal genleşme; seramik malzemelerde ise termal etkiler, mikroyapı dönüşümleri ve mekanik işlemler sonucunda oluşan kalıntı gerilmeler, ultrasonik, akustik emisyon ve X-ışını kırınımı yöntemleri ile ölçülebilmektedir (Gür 1999b).

Ultrasonik hız ölçümleri; polikristalli malzemelerde gözenek miktarını belirlemek için kullanılmaktadır. Teorik olarak gözenekliliğin ultrasonik hıza bağlantısı fiziksel akustik teori ile tanımlanmaktadır. Bu teori; hız-elastik özellik ilişkilerini belirlemek için gözenekli malzemenin elastik özellikleri ile ilgilenmektedir. Bununla birlikte deneysel ve teoriğin kıyaslamasına literatürde çok fazla önemsenmemiştir (Phani 1996). Literatürdeki tek çalışma sinterlenmiş kil seramiklerin ve toz demir tabletlerin deneysel olarak ölçülen ultrasonik hızlarının teorik olarak hem elastisite hem de kırılma teorileriyle kıyaslanmasıdır. Teorik olarak tahmin edilen değerlerde yuvarlak şekilli olmayan gözenekler nedeniyle; büyük sapmalar gözlenmiştir. Çünkü teoriler yuvarlak gözeneklere bağlı olarak geliştirilmiştir. Bu nedenle; gözeneklerin yuvarlak olmayan şekillerinin hesaba katılmasının deneysel verileri açıklamak için, göz önünde tutulması önerilmektedir (Panakkal ve ark. 1990).

Alüminanın sinterlemesinde 1000°C 'de çok düşük bir yoğunlaşma ile elastisite, kütle ve kayma modülleri hızlı bir artış göstermektedir. Sinterlemenin başlangıç aşamasında gerçekleşen bu hızlı artışı göstermek için logaritmik skala

kullanılmıştır. Yarı sinterlenmiş bu bünyelerin sinterlenmenin başlangıç aşamasına bağlı olarak mukavemetlerinde ve tokluklarında önemli bir artış görülebilmektedir. Ultrasonik hız ölçümleri sinterleme sırasında taneler arası boyun büyümesini açıklamak için kullanılabilir (Green 1998).

Ultrasonik hız ölçümleri gözenekli, kısmı sinterlenmiş ve yoğun alümina bünyeler için uygulanmıştır. Ultrasonik hız ölçümü bazı durumlarda mikroyapısal özelliklerin değişimini belirlemek için kullanırken daha çok makroskopik bir özellik olarak düşünülmekte ve esas olarak elastik özelliklerin hesaplanması için kullanılmaktadır.

Ultrasonik hızın sinterleme sırasında tespit edilmesi yoğunlaşma hızının dolaylı olarak belirlenmesini sağlayabilir. Ham seramikler için ultrasoniğin yüksek şiddet kaybı nedeniyle göreceli olarak düşük frekansları (5 MHz) kullanmak gerekmektedir. Ham seramiklerin ultrasonik hızının yoğunluğun bir fonksiyonu olması beklenmektedir. Pişmiş seramiklerin yoğunlukları $> \% 90$ olduğu durumda yoğunluk ultrasonik hızı büyük oranda etkilemektedir.

Ultrasonik hızın dağılımı; gözenekli seramiklerde, gözeneklerin dağılımlarına ve malzeme içindeki morfolojilerine göre değişirken; yoğun seramiklerde temel olarak tane sınırlarına bağlıdır. Göreceli yoğunlukları $\% 70$ 'in üzerinde olan numunelerde ultrasonik hız lineer bir davranış göstermektedir (Kulkarni ve ark. 1994).

Seramik malzeme olan silisyum nitrürler ve karbürler, gelecekte üretilmesi planlanan yüksek sıcaklığa dayanıklı motorların malzemesi olarak düşünülmektedir. Bu malzemelerde çatlak başlangıç noktaları olan mikron boyutlarındaki boşluklar ve kalıntılar, yüksek frekanslı modern ultrasonik tekniklerle henüz oluşum aşamasında iken belirlenebilmektedir. Ayrıca, bu tekniklerin seramik ve grafit benzeri gevrek malzemelerin elastik sabitlerinin ölçülmesinde yararlı oldukları gözlenmiştir. Seramik parçaların üretimi sırasında hataların ve homojensizliklerin üretimin erken aşamalarında tespiti maliyeti düşürmek açısından önemlidir (Gür 1999b).

Gaz tirbün bileşenleri olarak kullanılan silisyum nitrürün sürünmesinde oluşan boşluklar ultrasonik hız ölçümüyle incelenmiştir. $\% 2,75$ uzamalara kadar,

çekme uzaması ve ultrasonik hız arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır (Lofaj ve ark. 2003).

Seramik malzemelerde özellikleri etkileyen en önemli parametrelerden birisi porozitedir. Porozite ile mukavemet, elastisite modülü, ultrasonik hız arasında ilişkiler kurulmaktadır. Boyuna dalga hızı Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$E = E_0 \exp(-bp) \quad (3.10)$$

$$\rho = \rho_0(1 - p) \quad (3.11)$$

Denklem 3.10 ve 3.11’de sıfır indisli semboller, gözeneksiz malzeme özelliklerini gösterir. E elastiklik modülü, ν poisson oranı ve ρ yoğunluktur. Basma dayanımı ve eğme dayanımı ile porozite arasında değişik formüller önerilmektedir. Ultrasonik hız, belirtilen formül gereği poroziteye bağlı değişmektedir. Mukavemet de poroziteye bağlı değişmektedir. Bu iki özellik arasında daha önce yapılmış çalışmalarda doğrusal ilişki ve logaritmik ilişki kurulmuştur. Mukavemet ve hız formülleri oranlanırsa eksponansiyel kısımlar da bulunmaktadır. Bu nedenle logaritmik ilişki araştırılabilir.

$$MOR = A \exp(V) \quad (3.12)$$

Daha önce yapılmış bir çalışmada, eğme dayanımı (MOR) ile, hız arasındaki ilişki için Denklem 3.12 önerilmektedir. Denklem 3.10’daki b ve Denklem 3.12’teki A malzemeye bağlı sabitlerdir. Yaman (1999), Morcast 145 ticari adı ile anılan dökülebilir refrakterlerin, hem kurutulmuş, hem de 1350°C’de pişirilmiş durumda basma dayanımı ve ultrasonik hız arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Her iki durumda da doğrusal ilişki kurulmuştur. Kurutulmuş ve pişirilmiş numunelerde ultrasonik hız farklılık göstermektedir (Yaman 1999).

Richard Haber ve Dale Niesz, doktora öğrencisi Raymond Brennan (2007) ile birlikte opak ve şeffaf zırh uygulamaları için silisyum karbür, bor karbür ve çeşitli oksit temelli sistemleri incelemişlerdir. Bu malzemeler zırh sistemlerinde ağırlığı azaltmak amacıyla kullanılırken yüksek sertlik, yüksek basma ve çekme mukavemeti ve yüksek gerilmelere iyi elastik dayanım da elde edilmektedir. Bununla birlikte porlar ve safsızlıklar gibi kritik boyutlu hataların zırh seramiklerinde bulunması, zırhın balistik testlerde parçalanmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, yoğun malzemelerde hataların yerini tespit etmek,

hataları karakterize etmek için ultrasonik muayene yöntemi kullanılmıştır. Yüksek frekanslı ultrasonik ile yoğun zırh seramiklerinde mikron boyutta hataların yerleri tespit edilebildiği gibi mikroyapısal değişiklikler de belirlenebilmektedir. Prob frekansı gibi ultrasonik parametreleri, toplanan ultrasonik sinyallerdeki (yansıtılan sinyal şiddetleri) ya da ultrasonik enerjinin malzemeden geçiş süresindeki, diğer bir deyişle uçuş süresindeki farklılıklara bağlı çizilen yüzeysel görüntü haritalarını elde etmek için gerekli sistem koşullarını belirlemek için analiz edilmiştir. Uçuş süresi taramaları kalınlıktaki, akustik dalga hızındaki, yoğunluktaki ve akustik dirençteki değişimleri belirlemek için kullanılırken; yansıtılan sinyal şiddetinin taranması bir test malzemesi boyunca zayıflama ya da kaybı analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır. Elastik özellik görüntüleme imkânları, tasarım uygulamaları için gerekli olan poisson oranı, elastisite modülü, kayma modülü ve kütle modülündeki farklılıkların belirlenmesi için geliştirilmiştir (Hayes 2007, Brennan 2007).

Zr-PBSN (Zirkonyum fosfat bağlı silisyum nitrür) füze başlıkları termografik ve ultrasonik tahribatsız muayene yöntemleriyle incelenmiştir. Füze başlıklarındaki bölgesel gözeneklilik değişimlerini belirlemek amacıyla; hazırlanan ultrasonik tarama sistemi ile ultrasonik dalgaların boyuna ilerleme hızları ölçülmüştür. Bu yöntemle çatlaklar, tabakalanmalar, safsızlıklar ve gözenek değişimleri tespit edilebilmektedir (Medding 1996).

Termal püskürtmeli seramik kaplamalarda; diğer seramik kaplamalarda olduğu gibi gözeneklilik önemli bir faktördür. Gözeneklilik miktarı kaplamanın performansını etkilemektedir. Ultrasonik hız ölçüm yöntemi; plazma püskürtmeli alümina kaplamaların gözenekliliğini ölçmek için geliştirilmiştir. Bu tekniğin kullanımını araştırmak amacıyla, farklı gözenek miktarlarına sahip alümina kaplamalar, plazma püskürtme ile üretilmiş, bu kaplamaların ultrasonik hızları ölçülmüş ve kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Ultrasonik hızın kaplamaların yoğunluğuna (Arşimet tekniği) bağlı olduğu bulunmuştur. Bu ilişki kaplamaların yoğunluğunu ölçmek amacıyla bir teknik geliştirilmesine temel oluşturmaktadır (Parthasarathi ve ark. 1997).

Gözenekli seramiklerin elastisite modüllerinin ölçümü ultrasonik dalgaların boyuna ilerleme hızına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan

metod; ultrasonik enine ve boyuna dalga hızları arasında polinomial bir bağlantıya dayanmaktadır (Phani 2007). Son zamanlarda yapılan bir çalışmada ultrasonik hızın gözeneklilikle değişimi, çeşitli gözenekli sinterlenmiş malzemeler için deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırma sonuçları; hem boyuna, hem enine ultrasonik hızların gözeneklilikle lineer olarak değiştiğini ve eğrilerin eğimlerinin malzemeye göre değiştiğini ortaya koymaktadır. Farklı çalışmalarda aynı malzemeye ait farklı eğimlerin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu farklılıkların nedeninin gözenek boyut dağılımı ve geometrisi olduğu saptanmıştır (Roth ve ark. 1990). Bentama ve ark. (2007) farklı gözenek miktarlarına sahip olabilmeleri amacıyla; değişik oranlarda kömür içeren kil membranları hazırlanmıştır. Membranların kalite kontrolü ultrasonik dalgalarla gerçekleştirilmiştir. Boyuna ultrasonik dalga hızı ile gözenek hacim oranı arasında kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Diaz ve Hampshire (2004), metal-seramik termal mühendislik bileşenleri, bio malzemeler ve filtre destekleri gibi birçok uygulama alanına sahip gözenekli silisyum nitrür seramik malzemeleri mısır kabuğu ilavesiyle $\sim 0^\circ$ dan, $0,25^\circ$ 'e değişen farklı gözenek miktarlarında üretmişlerdir. Elastisite modülü; ultrasonik dalgaların boyuna ve enine ilerleme hızları ile belirlenmiştir.

Al_2O_3 -grafit refrakterlerin ısı çok direnci $1500^\circ C$ 'de ergimiş demire daldırdıktan sonra ultrasonik darbe yankı metoduyla ölçülmüş, eş zamanlı olarak gerilme analizi metoduyla oluşan gerilmeler ölçülmüştür. Fiziksel özelliklerle oluşan gerilmeler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Oluşan gerilime bağlı olarak ultrasonik hız belirgin oranda düşmektedir. Çekme gerilmesi altında oluşan hasar, basma gerilmesi altında oluşandan daha fazladır (Matsuo ve ark. 2007).

Sinterlenmiş Al_2O_3 , $97(Ag_{28}Cu)_3Ti$ aktif dolgu bileşiği kullanılarak 304 paslanmaz çelik ile $1000^\circ C$ 'de kaplanmıştır. EPMA çalışmaları ara yüzeylerde gerçekleştirilmiştir. Ara yüzeylerin kalınlığı konsantrasyon penetrasyonu profili kullanılarak ölçülmüştür. Bağlantının kayma mukavemeti belirlenmiştir. Bağlantıların kalitesi ultrasonik teknik kullanılarak incelenmiştir. Bağlantıların mekanik özellikleri elde edilen ultrasonik sinyaller ile doğrulanmıştır (Kar ve ark. 2007).

Ultrasonik hız ölçümü hızlı pişirim sofra eşyası fırınlarındaki kordierit-müllit refrakter plakaların tahribatsız olarak kalite kontrolünde kullanılmıştır.

Çeşitli ısı çevrimlerden sonra oluşan iç çatlak/boşluklar ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir (Boccaccini ve ark. 2007).

3.4.7. Temassız ultrasonik teknikler

Ultrasonik dalgalar, çoğu sıvılarda ve katılarda şiddetlerini kaybetmeden oldukça uzun mesafeler kat eden ve hızları, ışık hızının beşte biri olan elastik dalgalardır. Dalgaların bu özelliklerinin yanı sıra, üretimlerinin, tespit edilmelerinin kolay olması, elektrik sistemleri ile etkileşimlerinin hassas olarak ölçülebilmesi gibi ölçme özellikleri de katı ve yarı-katı bünyelerdeki kusurları incelemek ve içyapıları görüntülemek için ultrasonik dalgaları önemli bir araç haline getirmektedir (Trigg ve ark. 1997).

Günümüzde temassız algılamayı gerektiren uygulamaların sayısı giderek artmaktadır. Bu uygulamalarda ışık ve ses, ayrı ayrı ve birlikte önemli roller oynamaktadır. Son zamanlardaki çalışmalar, ürettikten sonra yapılan kontrol testlerinden temassız problemlerle üretim bantlarında yapılan kontrole doğru kaymaktadır (Anonim 2008a).

Temassız ultrasonik tekniklerin tahribatsız muayene alanında kullanımı, yeni kontrol tekniklerinin ve daha yenilikçi cihazların üretilmesiyle gerçekleşmiştir. Özellikle seramik ve kompozit malzemelerin kullanımı ve akustik cihazlar üretmedeki yeni teknikler, incelenen yapılarla temas gerektirmeyen problemlerin uygulanabilir olmasını sağlamıştır (Anonim 2008b).

Tahribatsız ultrasonik muayenenin ham, kırılğan, sıvıya hassas ve gözenekli malzemelerde kullanımının artması 1983 yılında kuru-çift problemlerin gelişmesiyle başlamıştır. Böylece ham ve sinterlenmiş seramikler ve kompozitlerin incelenmesine olanak sağlanmıştır. 1993'te hava ortamında dalgaların temassız olarak ilerlemesi sağlanarak kullanım alanı kâğıt, plastik gibi düşük yoğunluklu malzemelerden yoğun seramikler, metaller ve biyolojik yapılara kadar genişletilmiştir (Bhardwaj 1997). Temassız ultrasonik yöntem, örnek hazırlamayı gerektirmeyen, çevreye zarar vermeyen, malzemenin plazma ve vakum altında olduğu durumlarda bile uygulanabilen bir metottur. Bu yöntemde direkt iletim ya da direkt yansıtma usulleriyle ölçümler yapılmaktadır. Direkt

iletim ile numunelerin kalınlıkları, hız, yoğunluk, hatalar ve mikroyapı karakterize edilmekte, direkt yansıtmayla ise ultrasonik enerjinin yansımından dolayı yüzey pürüzlülüğü karakterize edilmektedir. Uçak, uzay kompozitleri, ham seramikler, toz metaller, gözenekli malzemeler, köpükler, plastikler, lastikler, tahta, asfalt, takviyeli çimento, tekstil kumaşları, yiyecek ve ilaçlar temassız ultrasonik yöntemi ile incelenebilmektedir (Anonim 2008c, Blomme ve ark. 2002, Akseli 2009). Bu konuda araştırmalarını sürdürmekte olan Ultran Grubu (Amerika), ham ve sinterlenmiş seramik, refrakter ve filtreleri incelemeyi sağlayan temassız problemleri üretmektedir (Anonim 2007d).

Temassız ultrasonik testin (UT), ultrasesin bir piezoelektrik kristal ile üretildiği daha yaygın olarak kullanılan sistemlerle kıyaslandığında avantajları ve dezavantajları vardır.

Avantajları

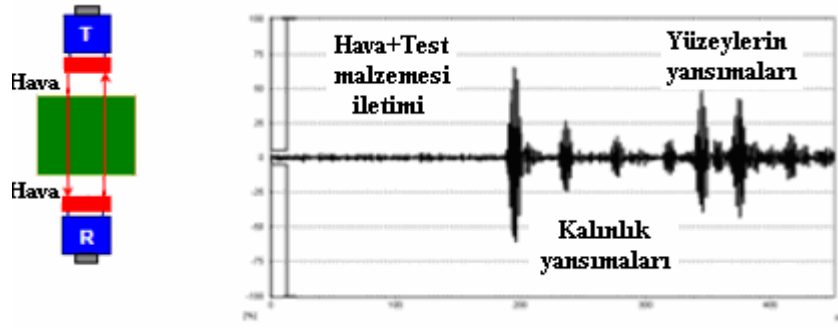
- Kuplaj malzemeye gerek yoktur. Bu nedenle tarama işleminin güvenilirliği artmaktadır.
- İncelenecek malzemenin yüzeyi herhangi bir hazırlama işlemini gerektirmemektedir.
- Yüzey sıcaklığı, temaslı problemler için çok yüksek olduğu durumlarda da kullanılabilir (Anonim 2008d).

Dezavantajları

- İletilen ultrasonik enerji göreceli olarak düşüktür.
- Elektro-magnetik akustik problemler sadece iletken malzemelere uygulanabilirken, lazerler plastik ve kompozitler ile kullanılamamaktadır (Anonim 2008d).

3.4.7.1. Doğrudan iletim

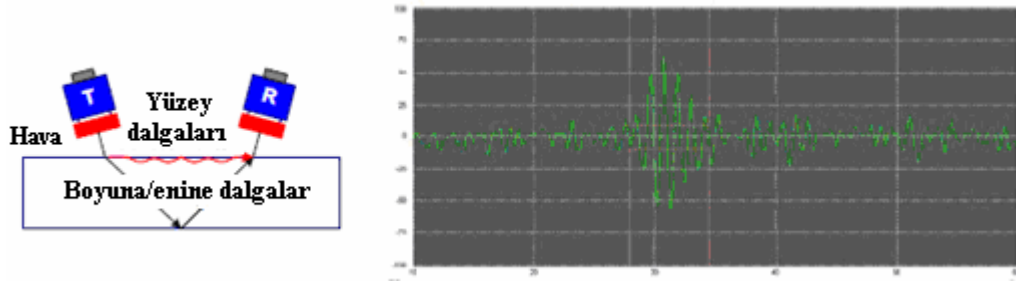
Hata, çatlak, tabakalanma gibi hatalar ve yöne bağlı özellikler gibi özellikler tespit edilebilmektedir (Rodríguez ve ark. 1999). Hız, dalga uçuş süresi, kalınlık ölçümleri yapılabilmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Doğrudan iletim yöntemi (Anonim 2007e)

3.4.7.2. Aynı tarafta verici-alıcı

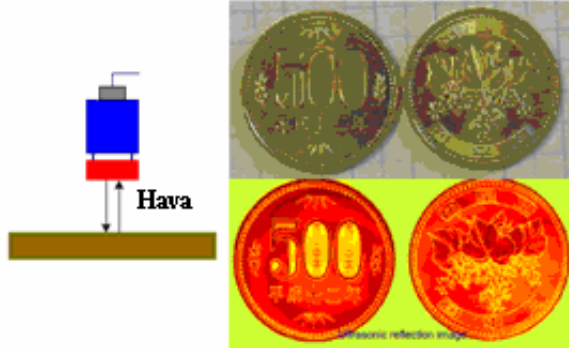
Süreksizliklerin yeri, hata, tabakalanma, korozyon tespit edilebilmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Aynı tarafta verici-alıcı yöntemi (Anonim 2007e)

3.4.7.3. Tek prob

Yüzey analizi, derinlik, nesneleri ayırt etme amaçlarıyla kullanılabilmektedir (Şekil 3.12) (Anonim 2007e).



Şekil 3.12. Tek prob yöntemi (Anonim 2007e)

3.4.8. Lazerle ultrasonik test

Uzak Doğu ve Avrupa ülkeleri arasındaki ticari rekabet, Avrupa seramik endüstrilerini işçi güvenliği için temiz teknolojiler kullanarak kalite kontrolünü bütün aşamalarda sağlamaya yöneltmiştir. Temassız ultrasonik proplar kullanılarak yoğunluk ölçümünde hem laboratuvar şartlarında, hem de fabrikada presleme sonrası kontrollerde önemli sonuçlar elde edilmiştir. Böylece kalite kontrolü yapılmasının yanında yoğunluk ölçmede kullanılan cıvanın da zararlı etkilerinden kaçınılmaktadır. Lazer ultrasonikleri ile ham seramik karolar için yoğunluk ölçümleri konusunda yapılan araştırmalar devam etmektedir (Pietroni 2008).

Yüksek güçle titreşen lazer, test malzemesinin yüzeyinde bir yeri ısıtmakta ve hızlı ısıl genişleme ultrasesi üretmektedir. Frekans, lazer titreşiminin zamanla artmasına bağlı olarak değişmektedir. Q-anahtarlama Nd:YAG lazerinin 5-10 ns'lik titreşimi, yaklaşık 15 MHz'e kadar geniş bir ultrases üretmektedir. Ultrases aynı zamanda optik olarak da tespit edilebilmekte, yüzeye gelen ultrasonik dalga interferometre kullanılarak tespit edilebilen küçük bir yer değiştirmeye sebep olmaktadır. 50 mJ'lük lazer 1,06 μm (kızıl ötesine yakın) de çalışmakta ve 1mm çapında Fiber Optik Launch Adaptörü (FOLA) içinden dağıtılmaktadır. Interferometre, Nd:YAG'ın frekansının iki katına sahip 60 mW yeşil lazer şeklindedir ve 532 nm'de, endüstriyel ortamda işlem görmemiş yüzeylerde çalışabilmektedir (Anonim 2008d).

3.5. Girdap Akımları Yöntemi

Yöntemin temeli elektromanyetik indüksiyonun temel prensipleri üzerine kurulmuştur ve iletken ferromanyetik ve ferromanyetik olmayan metalik malzemelerin fiziksel, yapısal ve metalurjik özelliklerinin değişimini belirlemeye yönelik olarak kullanılır (Kayalı ve ark. 1997). Girdap akımları yöntemi,

- Elektriksel iletkenlik, manyetik geçirgenlik, tane boyutu, ısıtma işlem koşulları, sertlik ve fiziksel özellikleri ölçmede,
- Malzeme bünyesindeki çatlak, boşluk ve inklüzyonları belirlemede,
- Farklı metal türlerini sınıflandırmada, yapısal mikroyapı özellik ve değişimlerini saptamada,
- İletken metal üzerindeki iletken olmayan kaplamaların ölçülmesinde kullanılır.

3.5.1. Girdap akımları ile muayenenin prensipleri

Girdap akımları testi, bir test bobini tarafından oluşturulan değişken manyetik alanın, iletken malzemeler üzerinde Eddy akımı denilen küçük dairesel akımlar oluşturması temeline dayanır. Malzemenin özellikleri bu oluşan akımı etkiler. Eddy akımları bir manyetik alan oluştururlar ve bu test bobini tarafından oluşturulan manyetik alanı etkiler.

Birincil manyetik alan: İletken bir malzemede Eddy akımlarının oluşabilmesi için zamanla değişen bir manyetik alana ihtiyaç vardır. Bu manyetik alan alternatif akım sağlayan bir bobinle sağlanabilir.

Eddy akımları: Test bobinindeki değişken manyetik alan iletkeni nüfuz ederek iletkenin yüzeyine paralel ancak uygulanan manyetik alana dik yönde dairesel şekilli Eddy akımlarını oluşturur. Eddy akımlarının akış yönü birincil manyetik alana zıt yönde ve onun değişimi ile aynı hızdadır. Eddy akımlarının şiddeti; birincil manyetik alanın büyüklüğünün, manyetik alanın değişim hızının (frekans), parçanın elektrik iletkenliğinin, parçanın manyetik permabilitesinin artması ile yükselecektir.

İkincil manyetik alan: Eddy akımlarının akış yönündeki değişim test bobininin oluşturduğu manyetik alana zıt yönde ikincil bir manyetik alan yaratır. İkincil manyetik alanın birincil manyetik alana zıt yönde olması toplam manyetik alanı etkiler ve test bobininden geçen akımı değiştirir. Akımdaki değişiklikler kontrol parçasındaki değişkenlerin (çatlak gibi) etkisini belirlemek için kullanılan ölçüm aleti tarafından algılanır.

3.5.2. Eddy akımlarının oluşumuna malzeme özelliklerinin etkisi

Elektriksel iletkenlik: İletkenlik, bir malzemede elektronların akış kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Eddy akımları bir iletken malzemeye uygulanan alternatif bir manyetik alan tarafından oluşturulan elektron akışıdır. Dolayısıyla malzemenin iletkenliği arttıkça oluşacak Eddy akımları da artacaktır.

Kimyasal bileşim, ısıtma işlemi, soğutma işlemi, sıcaklık ve kaplamalar iletkenin üzerinde etkisi olan değişkenlerdir.

Boyutsal faktörler: Test malzemesinin boyutları ve şekli, malzemedeki süreksizliklerin varlığı olarak iki grupta toplanır.

Malzeme kalınlığı: Eddy akımları kalın malzemeye geçemeyip daha çok yüzeyde toplanırlar. Bu nedenle belli bir nüfuziyet derinliği vardır. Standart derinlik, yüzeydeki akım yoğunluğunun % 37 olduğu derinliktir. Bu derinlik malzeme iletkenliğine ve alternatif akım frekansına bağlıdır.

Süreksizlikler: Malzemede Eddy akımlarının akışı çatlak, boşluk, safsızlık gibi süreksizliklerden etkilenir. Bunların varlığı akım akışının azalmasına ve test devresi empedansının değişmesine neden olur. Süreksizliğin derinliği, genişliği ve boyu yerinin belirlenmesinde kullanılır (Kayalı ve ark. 1997).

3.6. Diğer Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinin haricinde akustik emisyon, termografi, optik holografi gibi çeşitli yöntemler de bulunmaktadır (Armatlı 2001).

3.6.1. Akustik emisyon

Malzemeler gerilmelere veya çevresel etkilere maruz kaldığında, yapı içinde zamanla sönümlenen ses darbeleri yayılır. Buna akustik emisyon denir ve genellikle akustik yayılım ultrasoniktir. Süreksizliklerin oluşumu sırasında yaydıkları ultrasonik enerji, piezoelektrik sensörler tarafından algılanır ve enerjinin genlik ölçümü ile oluşan süreksizliğin boyutu hakkında bilgi edinilebilir. Akustik emisyon, yapıya uygulanan gerilme etkisiyle, deformasyon anında oluşan, elastik şekil değişim enerjisinin ses darbeleri veya çatlak oluşumu gibi plastik deformasyon esnasında oluşan darbelerdir.

Akustik emisyon tekniği sürekli kayıt sistemine dayanmaktadır. Genellikle, 30 kHz ile 30 MHz frekans aralığına sahip akustik yayınımlar algılanabilir (Armatlı 2001).

Seramik malzemelerde akustik emisyonların hızı ve şiddeti, çatlakların ve tabakalanmaların başlama ve ilerlemelerini tespit etmeyi sağlamaktadır. Akustik emisyon statik ve yorulma hatalarını tahmin etmek için de kullanılmaktadır (Kim ve Liaw 1998).

3.6.2. Termografi

Malzemenin termal özelliklerini etkileyen, yüzey ve içyapı süreksizlikleri, ısı dalgaları kullanılarak görüntülenebilir. Malzeme içindeki ısı dalgaları, yapının yüksek güçte bir aydınlatmaya maruz bırakılması ile sağlanır. Termal enerji yüzeyde geniş bir alana, homojen bir şekilde yayılır ve malzemenin içine doğru, sıcaklık basamağı oluşturur. Bu yayılım, termal dalgalar olarak tanımlanabilir. Termal dalgalar, malzemenin termal özelliklerinde herhangi bir heterojenlikle karşılaştığında saçılır veya yansır. Saçılmanın derinliğine bağlı olarak bir zaman gecikmesi oluşur ve bu gecikme, yüzeyde bölgesel soğumalara neden olmaktadır. Yüzey sıcaklık dağılımının ölçülmesi ile içyapı görüntüsü ve bölgesel termal özelliklerin ölçümü ile de hata derinliği belirlenebilir. Maruz kaldıkları sıcaklık değerine göre, renk değiştirebilen sıvı kristalleri yüzeye uygulanır (Armatlı 2001).

Termal kameraların üretim hattında kullanımı ile kritik üretim basamaklarından (şekillendirme, makinede işleme ya da bağlayıcı giderme) sonra ham seramiklerin yüzeylerinde sıcaklık farklılıkları ölçülebilmektedir. Modern termal kameralar sıcaklık farklılıklarını yüksek hassasiyette (0,1 K ya da daha iyi) ve yeterli bölgesel çözünürlükte ölçebilmektedir. Ham seramiklerde şekillendirme işlemi sırasında mikroyapıda oluşan yoğunluk farklılıkları ya da diğer homojensizlikler sıcaklık farklılıkları oluşturmaktadır. Termal kameraların potansiyel kullanım alanları arasında tuğla ve karoların ekstrüzyon ile şekillendirilmesi de bulunmaktadır (Rabe ve ark. 2003).

3.6.3. Optik holografi ile kontrol

Holografi yönteminde test parçası ile temas edilmeden, yüzeye açık süreksizlikler ve içyapı süreksizlikleri belirlenebilir. Korozyon ve diğer aşınma türleri, metalik malzemelerde ve kompozitlerde belirlenebilir. Test parçasından elde edilen kaydın, film üzerine aktarılması ile kalıcı veriler elde edilir. Holografi ile yüzey mikro çatlakları ve kompozitlerde tabaka ayrılmaları belirlenebilir. İki farklı holografi ölçüm yöntemi söz konusudur. Bunlardan biri, anında görüntü holografisidir. Bu yöntemde gerilimsiz obje görüntüsünün, gerilime maruz obje görüntüsü üzerine süperpoze edilmesi ile oluşan anlık görüntüsü alınır.

Diğer bir yöntem ise, çift poz ile elde edilen holografidir ve iki farklı gerilme için elde edilen kalıcı kayıt sisteminden oluşur. Holografi yönteminin önemli bir kısıtlaması, düşük güç kapasiteli, sürekli dalgalı gaz lazeri ile uzun poz süresi gerektirmesidir. Yüksek güç kapasiteli sistem, maliyetli ve hacimlidir. Ancak, küçük darbeli yakut lazerle, poz süresi azaltılabilir (Armatlı 2001).

4. SERAMİK KARO SEKTÖRÜNDE TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI

Seramik malzemeler yüksek sertliğe, düşük yoğunluğa, düşük ısı ve elektrik iletkenliğine, aşındırıcı ortamlarda yüksek dayanıma sahiptirler. Son yıllarda metallerle kıyaslandığında, sahip oldukları düşük özgül ağırlık, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda bile korozyon direnci gibi özelliklerinin mükemmel kombinasyonları ile özellikle dikkat çekmektedirler. Yüksek mukavemetli seramiklerin asıl dezavantajı kırılgenlikleridir ve bu nedenle plastik deformasyon nedeniyle hatalarda oluşan gerilmeleri azaltıcı yetenekleri bulunmamakta, hem de hata olasılığının artmasının bir sonucu olarak mukavemet değerleri geniş bir aralıkta dağılmaktadır. Güvenilirliğin elde edilmesi, seramiklerin yapı malzemesi olarak kullanımı için belirleyici rol oynamaktadır. Bu güvenilirlik, kalite güvence ölçümleri ile önemli ölçüde artırılabilir.

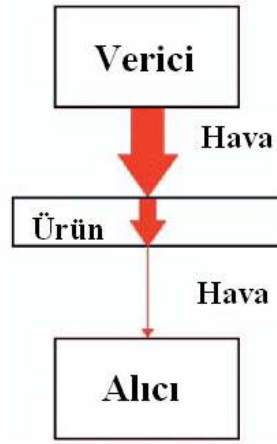
Tahribatsız muayenenin ilk olarak üretim aşamasında kullanılması üretimin en iyi yapılmasını, ikinci olarak üretimden sonra yapılması hatalı parçaların kullanım aşamasına geçmeden sınıflandırılmasını sağlamaktadır (Arnold ve Reiter 1991).

Pişmemiş karo gözenekliliğinin hem ham karonun (mekanik mukavemet, geçirgenliği gibi), hem de sinterlenmiş karonun (küçülmesi, su emmesi gibi) fiziksel özelliklere etkisi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Karoda en çok görülen hatalar üretim esnasında siyah bant (black core) oluşumu, düşük mukavemet ve yüksek oranda üretim süreci sırasında gözenek miktarındaki farklılıkların bir sonucu olarak boyut farklılıkları şeklindedir.

Yoğunluk ölçümü elle ya da yarı otomatik olarak yakın zamana kadar civa daldırma metodu ile yapılmaktaydı. Bu süresiz elle tahribatla ve sağlığa zararlı yöntemin yerini alacak metodlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Şu sıralar X-ışını absorpsiyonunun bu amaçla kullanımı umut verici sonuçlar vermiştir. Instituto de Tecnologia Ceramica'da yığinsal yoğunluğun X-ışını absorpsiyonu ile ölçümü için bir alet geliştirmiş ve patentini almıştır. Laboratuvar ölçeğinde bu alet, yeterli hassasiyette ölçümler yapabilmektedir (Gasch 2006).

X-ışını absorpsiyonu ile 120 cm X 120 cm ebatlı karoların yığmsal yoğunluk haritaları ölçülmüştür. X-ışını tüpü ve dedektör bölgesi sızıntıyı önleyici bir malzeme ile kaplanmıştır. Tasarlanan sistem Lambert-Beer yasasına göre çalışmakta ve tahribatsız olarak yığmsal yoğunluğun ölçülmesini ve preslemeden kaynaklanan üretim hatalarının da tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu metot ile aynı karonun hem ham, hem de sinterlenmiş yoğunluğunu kıyaslamaya imkan vermektedir. Bu kıyaslama presleme ve sinterleme aşamalarının sinterlenmiş karonun gözenekliliği üzerine ayrı ayrı etkilerini tanımlamayı sağlamaktadır (Amorós ve ark. 2009).

Seramik karo sektöründe, son zamanlarda üretim sürecinde kalite kontrol sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı seramik endüstrisinde kalite ve esnekliğin elde edilmesidir. Seramik karoların yoğunluklarının belirlenmesine; çatlak, tabakalanma, hata türü ve yerinin tespit edilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalarda temassız ultrasonik test metodu kullanılmaktadır. Ölçüm sistemi verici ve alıcı olarak görev yapan iki sensörden oluşmaktadır (Şekil 4.1). Ultrasesin ürün boyunca ilerleme zamanı (dalga uçuş süresi) belirlenebilmekte, ultrasonik hız ve kalınlık ölçümleri yapılabilmektedir. Temassız ultrasonik test metodu üretimin ara aşamalarında, kırılğan, sıvıya hassas, gözenekli malzemelerde ya da malzemeyle temasın mümkün olmadığı durumlarda malzemelerin kalitesi ve özellikleri hakkında bilgi edinmeyi sağlamaktadır. (Revel ve Tomasini, Cantavella ve ark. 2006, Rodríguez ve ark. 1999, Romagnoli ve ark. 2007, Revel 2007, Pietroni ve Revel 2008).



Şekil 4.1. Temassız ultrasonik ölçüm sistemi (Revel ve Tomasini)

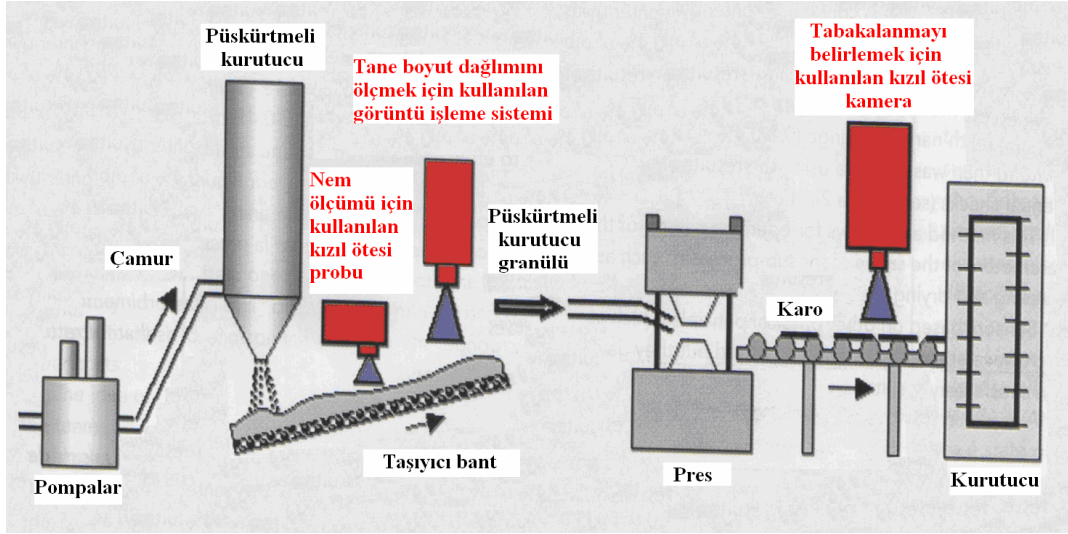
Üretim esnasında; ham karolarda üretim hattında ilerlerken, istenmeyen titreşimler nedeniyle mikro çatlaklar oluşmaktadır. Bu mikro çatlaklar karonun fırından çıkında kırılmasına neden olmaktadır. Genelde çatlak tespiti için bir kimyasal ürün kullanılmakta ve bu ürün çatlak içeren bölgede renk değiştirmektedir. Bu teknik tahribatlı ve otomatik olmayan bir yöntemdir. Bu nedenle üretim bantlarında uygulanması zordur. Bu problemi çözmek amacıyla, çatlakların ultrasonik olarak tespit edilmesi düşünülmektedir. Yüksek oranlarda gürültü nedeniyle, ultrasonik ölçümlerde sinyal işleme yönteminin kullanılması gerekmiştir. Bu yöntemle mikro çatlaklar % 70 oranda tespit edilebilmiştir (Rodríguez ve ark 1999).

Son yıllarda endüstriyel süreçlerin otomasyonu, yüksek kaliteli ürünlerin düşük maliyetlerle üretilmesi için, önemli bir faktör haline gelmiştir. Bu durum, kaynakların sıklıkla etkin olmayan bir şekilde yönetildiği ve sürekli teknik süreçlerin uygulama zorluğundan dolayı; otomasyon sistemlerinin kullanılmasını gerekli kılan seramik endüstrisi içinde geçerlidir. Kontrollerin genellikle üretim bantları dışında yapılması durma sürelerini artırmaktadır. Durma sürelerini en aza indirmek ve üretim bandında kontrol sağlayabilmek açısından otomatik kontrol metodları önemli bir rol üstlenmektedir. Bu metodlar, yüksek üretim standartlarına izin vermekte ve insan kaynaklarının kullanımını sınırlamakta, süreç kontrolünü iyileştirmekte ve deney verilerinin modern kalite sistemleri ile kısa sürede elde edilmesini sağlamaktadır.

Presleme için kullanılan granüllerin nem içeriği, son ürünün kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Yetersiz ya da fazla nem içeriği hem presleme sırasında (granüllerin akma davranışını kötüleştirme, kalıptan çıkma problemleri ya da tabakalanma) hem de sinterleme sırasında problemlere neden olabilmektedir. Granüllerin nem içeriği, çamurun akış hızı, basıncı ve hava sıcaklığı gibi püskürtmeli kurutucu parametreleri ile kontrol edilebilmektedir. Genelde nem içeriği, nem tayin cihazı kullanılarak, bantdan çeşitli sürelerde (yaklaşık 1 saatlik aralıklarla) alınan örneklerin neminin ölçülmesiyle belirlenmektedir. Bu kontrol metodunun süreksiz olması püskürtmeli kurutucu parametrelerin durma zamanlarını artırmakta ve etkinliğini azaltmaktadır. Üretim sürecinde normalde % 4-7 arasında değişen normal nem içeriğinin dışında birkaç saatlik üretim yapılması bir risk oluşturmaktadır. Püskürtmeli kurutucu granüllerinin sürekli olarak kontrol edilmesi, püskürtmeli kurutma sürecinin otomasyonu için gereklidir. Kızıl ötesi ölçüm aletleri içeren temassız optik problar bunu yapabilmektedir. Bu problar, kızıl ötesine yakın (750-2000 nm) bir absorpsiyon aralığına sahip olan suyun elektromanyetik radyasyonuna bağlı olarak ölçüm yapabilmektedir. Bünyede daha çok su bulunması sensöre dönen radyasyonun şiddetini azaltmaktadır. Porselen karo üretimi için farklı renklerde granüller kullanıldığında; analiz edilen her bir renge göre hassas kalibrasyonlar yapılmalıdır. Bu yöntem, nem içeriğini ölçmede % 0,2 hassasiyete sahiptir. Kızıl ötesi nem ölçüm aleti püskürtmeli kurutucunun çıkışındaki taşıyıcı banda yerleştirilebilmekte ve kısa sürede, sürekli bir şekilde püskürtmeli kurutucu granüllerinin nemini ölçebilmektedir (Şekil 4.2).

Malzeme ve süreçlerin kontrolü frit ve seramik karoların üretimini de içermektedir. Otomatik kontrolün zorlukları, ölçüm yapmak için uygun problemleri temin etmek, ya da etki eden değişkeni tanımlamaktır.

Orijinal olarak seramikler için tasarlanmamış problemlerin, seramik üretimi için seçimi, yeterli hassasiyet ve güvenilirlikle çalışması genellikle karmaşık bir süreçtir. Kızıl ötesi nem ölçüm aletleri orijinalde tütün yapraklarının nemini ölçmek için, radyo frekansına bağlı ölçüm aletleri ağaç ve alçıtaşı endüstrileri için, yoğunluk problemleri madencilik endüstrisinde kullanılmak için tasarlanmışlardır (Gasch 2006).



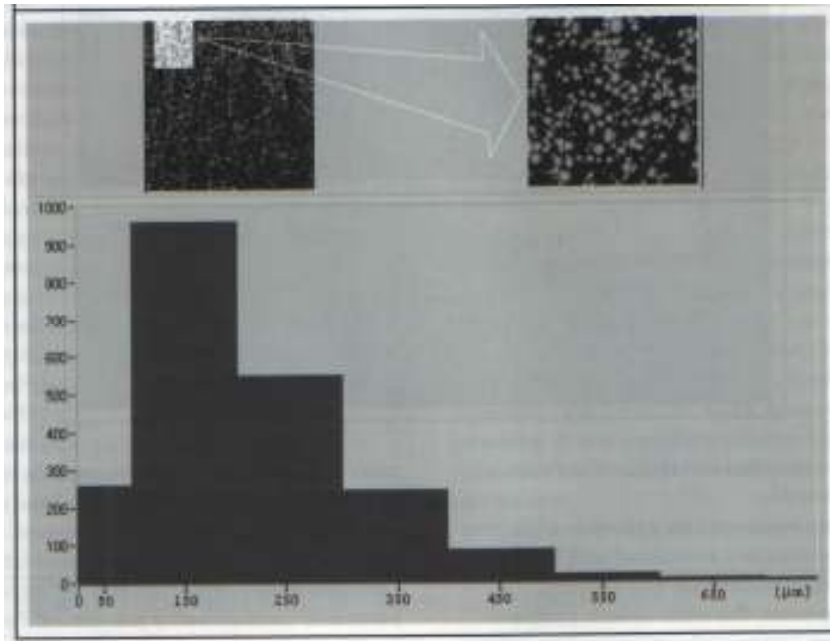
Şekil 4.2. Temassız problemlerin seramik karo üretiminde kullanımı (Paone ve ark. 2000)

Bu metot aynı zamanda presleme ve kurutma gibi sonraki süreçlerin parametrelerini de kontrol etme amacıyla kullanılabilir. Problar mikrodalga absorpsiyonu gibi diğer fiziksel özelliklere dayalı olarak da test edilmiştir. Ancak, daha az tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Üretimdeki diğer bir parametrede, preslenen granüllerin tane boyut dağılımıdır. Bu parametre günümüzde süreksiz olarak (birkaç saat içinde çeşitli aralıklarla) çeşitli mesh boyutlarına sahip elek serileri ile incelenen granüller için istatistiksel sonuçlar elde etmek amacıyla analiz edilmektedir. Nem içeriğinde olduğu şekilde sınırlılıkları bulunmaktadır. Sürecin süreksiz olarak kontrol edilmesine bağlı olarak analizi yapan kişi birkaç saat içerisinde yapılan üretim kalitesindeki önemli sapmaları göremeyebilir. Sonuç olarak, sürekli temassız kontrolün üretim süreçlerinde uygulanması püskürtmeli kurutma parametrelerinin daha iyi ve daha hızlı kontrolünü sağlamaktadır.

Çeşitli lazer problemler de sürekli ölçüm gerektiren yerler için kullanılmaktadır. Bu aletler ışığın kırınımı prensibine göre çalışmaktadır. Sistemlerin ana sınırı maliyetli olmalarıdır. Bu nedenle, bantta kullanılmaları belli bir dereceye kadar analiz eden kişiye bağlı olduğu için laboratuvar ölçeğinde tasarlanmaktadır. Bu aletler mükemmel sonuç vermelerine rağmen yapılan çalışmalar aynı hassasiyete sahip ancak daha ucuz maliyetlerde alternatifler bulmaya yöneliktir.

Yüksek çözünürlüklü CCD Tv kameraları ile püskürtmeli kurutucu granüllerinin görüntülerinin incelenmesi ve bu görüntülerin yazılım aracılığı ile tane boyut dağılımını belirlemek amacıyla kullanılması fikri üzerine çalışılmaktadır. Görüntüler Tv kameraları ya da digital fotografik kameralar ile elde edilmekte ve bilgisayarda işlemek için hazır hale gelmektedir. Bilgisayar programı taneleri saymaya ve boyutlarını 1 saniyenin altında ölçmeye uygundur. Şekil 4.3'te görüntü işleme programı ile elde edilmiş tane boyut dağılımı eğrisi görülmektedir. Sistem kıyaslama amacıyla digital bir mikroskop ile kalibre edilmektedir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi püskürtmeli kurutucunun çıkışına sistem yerleştirilebilmektedir. Ölçümler tamamlandıktan sonra parçacıklar bantta ilerlemekte ve yeni örnekler otomatik olarak ölçülmektedir. Ölçüm birkaç saniyede tamamlandığı için, sürekli olarak yapılabilmekte ve her 10-15 dakikada temsili örnekler istatistiksel olarak takip edilebilmektedir.



Şekil 4.3. Görüntü işleme programı ile elde edilmiş tane boyut dağılımı eğrisi (Paone ve ark. 2000)

Yapısal hatalar, seramik karoların üretiminde hem pişmemiş karoların (sürecin çeşitli aşamalarında kırılma ihtimali oluşturduğu için) ve hem de son ürünlerin mukavemetlerini düşürdükleri için ciddi bir problem oluşturmaktadır.

Bu hatalar çeşitli nedenlerle oluşabilmekte çatlaklar, kırılmalar ve tabakalanmalar olarak görülebilmektedir.

Tabakalanma porselen karo üretiminde kuru tozların basınç uygulandığında doğal olarak sebep oldukları bir problemdir. Şekil 4.4'te, kırılmış bir karoda havanın içerde kalması nedeniyle, paralel bir şekilde oluşmuş tabakalanma hatası görülmektedir. Karo gerilmeye maruz bırakıldığında; tabakalanma bir gerilme konsantrasyonu oluşturur ve hatanın ilerleyerek karonun kırılmasına sebep olur. Bu nedenle, karonun kullanım aşamasından önce tabakalanmanın tespit edilmesi gerekmektedir. Çünkü, döşendikten sonra kırılması durumunda oluşan maliyetler oldukça fazladır.

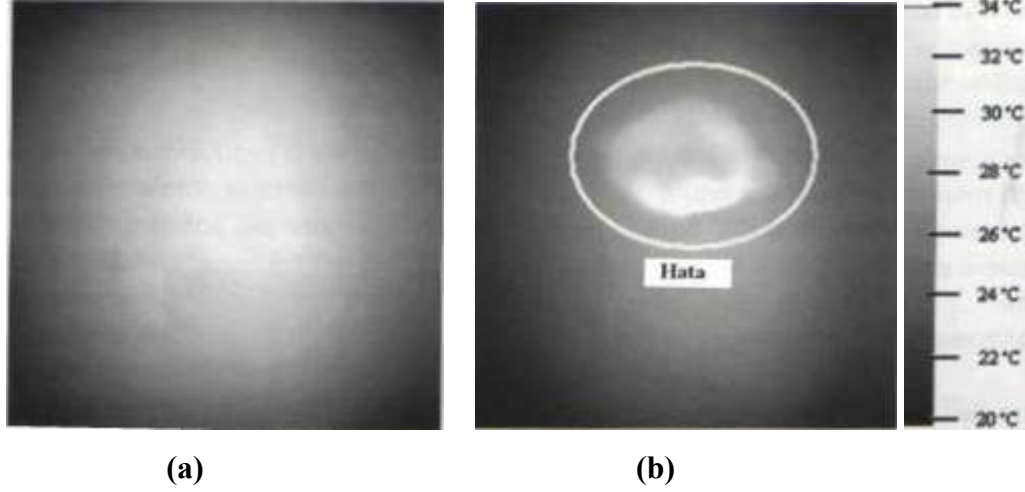


Şekil 4.4. Kırılmış bir karoda tabakalanma hatası (Paone ve ark. 2000)

Tabakalanma birçok faktörden dolayı oluşabilmektedir. Bu faktörlerden en önemlileri toz hazırlama ve preslemedir. Toz hazırlama safhasında en ciddi problemler homojen nem içeriğinin elde edilememesi, nem içeriği hataları ve çok ince tane boyutudur. Presleme aşamasında tabakalanma, havalandırma sürelerinin yetersiz olmaları nedeniyle, bütün havanın elimine edilememesidir. Yapısal hatalar presleme aşamasında tespit edilirse, daha sonraki aşamalara geçmeyip hammaddenin geri dönüşümü için kullanılabilir.

Temassız problemlerin tahribatsız olarak sıcaklık ölçeri olarak kullanılması; malzemenin içindeki ısı dalgalarının ilerlemesine bağlı olarak, alt yüzeyin karakteristiklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Malzeme içindeki bir süreksizlik, dalganın ilerlemesini yavaşlatarak bir sıcaklık farklılığı

yapı hatalarının diğer tiplerinin otomatik olarak tespit edilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır (Paone ve ark. 2000).



Şekil 4.6. Sağlam (a) ve tabakalanma içeren (b) ham karoların termografik görüntüleri (Paone ve ark. 2000)

Akustik rezonans analizi bir hacimde yer alan hataları hızlı ve düşük maliyetle yüzde yüz tespit etmeyi sağlayan tahribatsız bir muayene metodudur. Bir malzemede titreşim oluştuğunda, o titreşimin test parçası içindeki yayılması incelenir. Tekrar eden titreşimlerin şekli ve frekansı; o malzemenin doğal rezonsansıdır. Frekans seviyelerinde değişme ve gecikme tespit edilebilmektedir.

Malzemedeki titreşimler mikrofon aracılığı ile toplanmakta ve filtrelenerek bilgisayara aktarılmaktadır. Titreşimler incelenen malzemede bölgesel olarak bilgi vermemekte, malzemenin bütünü hakkında bilgi sağlamaktadır. Çatlaklar, malzeme hataları, yapısal farklılıklar ve sertlikteki değişiklikler güvenilir olarak ve malzemeye zarar vermeden incelenebilmektedir. Süreç hızlı ve çevreyi kirlilemeyen şekildedir. Bantta ölçüm yapabilmekte mümkündür. Seramik karoları, kiremitleri, seramik fren balatalarını, fırın refrakterlerini test etmek amacıyla kullanılabilmektedir.

Bu metodun hassas bileşenlerin çok küçük malzemelere uygulanması mümkün değildir. Yüzey hataları ya da çok küçük geometrik farklılıklar tespit edilememektedir. Bu nedenle, bu tür hataları tespit etmek amacıyla otomatik görüntü analiz sistemleri ile birlikte kullanılması önerilmektedir (Anonim 2007f).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Belirtilen amaçlar doğrultusunda yapılan çalışmaların kapsamı aşağıda belirtilmiştir.

5.1. Bünyelerin Hazırlanması

Geniş bir ürün yelpazesinde tahribatsız muayene metotlarından olan ultrasonik test metodunun kullanımını araştırmak amacı ile numune hazırlama aşamasında Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Graniser Granit ve Seramik A.Ş. bünye granülleri kullanılarak farklı gözenek miktarında, farklı kalınlıklarda, safsızlık, boşluk gibi hasarlar içeren ürünler hazırlanması hedeflenmiştir.

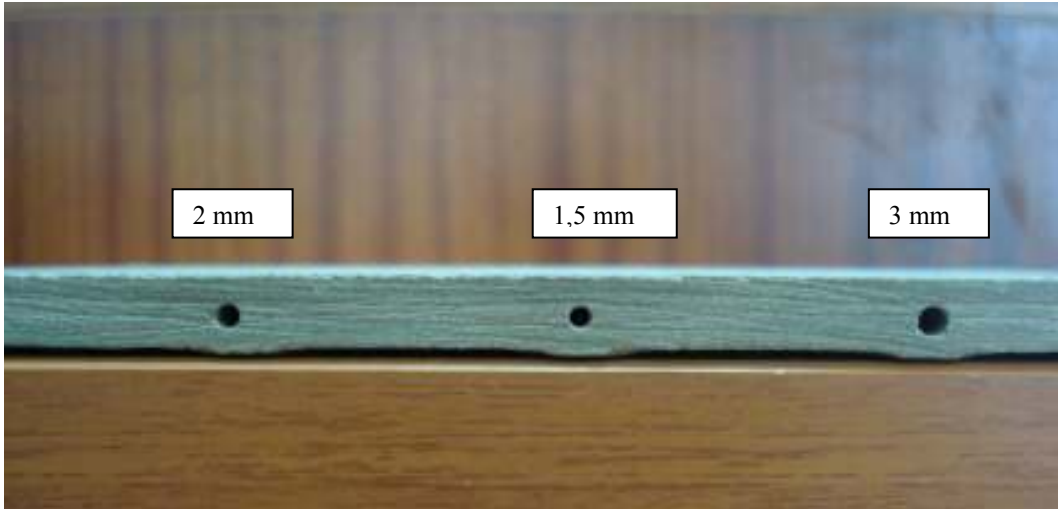
Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında farklı sıcaklıklarda sinterlemek amacıyla hazırlanacak numuneler için Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş. granit bünye granülleri kullanılmıştır. Bu granüller endüstride kullanılan nem düzeyinde ağ. % 5,5–6,5 oranında nemlendirilmiştir. Nemlendirilen granüller 1 gece dinlendirildikten sonra 50 mm X 100 mm ebatlarında 40 ton'luk hidrolik mini preste (Gabrielli) 450 kg/cm² basınçla şekillendirilmiştir. Şekillendirilen karolar etüvde 100°C sıcaklıkta kurutulmuştur.

Farklı kalınlıkta karolar için Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granülleri kullanılmıştır. Deneylerde üretilecek farklı kalınlıktaki numuneler için % 5,2 nemli yer karosu ve % 5,8 nemli granit bünye granülleri kullanılmıştır. Granüller, 50 mm X 100 mm ebatlarında Nasetti marka Vis 30 model hidrolik mini preste 216 kg/cm² basınçla şekillendirilmiştir. Farklı kalınlıktaki karolar, kalınlık oranı 1:2:3 (2,5 mm: 5 mm: 7,5 mm) olacak şekilde preslenmiştir.

Delikli karolar karo yapısında oluşacak açık porların tespiti ve hava boşluklarının olması halinde hata tespitinin yapılabilmesi için hazırlanmış numunelerdir. Küçük ebatla hazırlanacak delikli numuneler için ise % 4,7 nemli Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünye granülleri kullanılmıştır. Bu granüller, 50 mm X 100 mm ebatlarında Nasetti marka Vis 30 model hidrolik mini preste 216 kg/cm² basınçla şekillendirilmiştir. Delikli karoları hazırlamak

amacıyla 1 mm, 1,5 mm, 2 mm ve 3 mm'lik matkap uçları kullanılmıştır. Şekillendirilen karolar etüvde 100°C sıcaklıkta kurutmuştur.

Büyük ebatla delikli ürünler için Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş.'de üretim bantlarından alınan 330 mm X 330 mm ve 450 mm X 450 mm boyutlu ürünler kullanılmıştır. 450 mm X 450 mm boyutlu ürün dört parçaya bölünmüş ve tutaç aracılığıyla 1 mm, 1,5 mm, 2 mm'lik matkap uçlarıyla delinmiştir. 330 mm X 330 mm ürünler ise iki parçaya bölünmüş ve torna tezgâhına bağlanarak 1,5 mm, 2 mm ve 3 mm'lik matkap uçlarıyla delinmiştir. Şekil 5.1'de 330 mm X 330 mm karonun kenarına değişik çaplardaki matkap uçlarıyla açılan delikler gösterilmektedir.



Şekil 5.1. 330 mm X 330 mm karonun kenarına değişik çaplardaki matkap uçlarıyla açılan delikler

Ultrasonik süre ve hızın su emme ile değişimini incelemek amacıyla endüstriden temin edilen sırlı ve farklı su emmelere sahip karolar Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş.'de üretilmiştir.

Tüm hatalı karolar, 50 mm X 100 mm ebatlarında Gabrielli 40 tonluk hidrolik mini preste 450 kg/cm² basınçla şekillendirilmiştir. Safsızlık şeklinde hata oluşturmak amacıyla farklı çaplarda seramik ve metal bilyeler kullanılarak Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş. granit bünye granülleriyle hataları karolar üretilmiştir (Şekil 5.2). Boşluk şeklindeki hatalar ise karbon karası, kağıt, alüminyum folyo, PMMA, silgi ve PEG gibi ilavelerle oluşturulmuştur

(Şekil 5.3). Bu karoları üretmek için Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş.ve Graniser Granit ve Seramik A.Ş. granit bünye granülleri kullanılmıştır.

ZrO ₂ Bilye	 5 mm çaplı	 3 mm çaplı
Si ₃ N ₄ Bilye	 3 mm çaplı	
Çelik Bilye	 4 mm çaplı	 1 mm çaplı

Şekil 5.2. Hata oluşturmak amacıyla kullanılan seramik ve metal bilyeler

10 mm X 10 mm Alüminyum Folyo	
22 mm X 22 mm Alüminyum Folyo	
Karbon karası	
PMMA	
0,5-1-2 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi	
10 mm X 10 mm kağıt	
PEG	

Şekil 5.3. Boşluk oluşturmak amacıyla kullanılan ilaveler

5.2. Bünyelerin Sinterlenmesi

Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında hazırlanan numunelerin sinterlemesi için elektrikli rulo fırın (Nannetti ER-30) kullanılmıştır. Farklı sinterleme sıcaklıklarında ürün yoğunlukları ve poroziteleri de farklı olacağından ürünler, 1150–1230°C arasında 10°C'lik artışlarla farklı sıcaklıklarda sinterlenmişlerdir. Her bir sinterleme sıcaklığı için en az beş adet karo sinterlenmiştir.

Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granülleri ile üretilen farklı kalınlıktaki karolar ile delikli 50mm X 100 mm ebatlarındaki karoların

sinterlenmesinde fabrikada bulunan rulo fırınlar kullanılmıştır. Farklı kalınlıkta yer karosu numuneleri maksimum 1202°C’de 36 dakika, granit numuneler maksimum 1182°C’de 50 dakikada; delikli granit numuneler ise maksimum 1175°C’de 45 dakika sinterlenmiştir.

Endüstriden temin edilen karoların sinterlemesi için Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş.’de bulunan rulo fırınlar kullanılmıştır.

Hatalı karolar ise Protherm marka fırında 1220°C’de, ısıtma hızı 10°C/dk. ve maksimum sıcaklıkta bekleme süresi 10 dk. olacak şekilde sinterlenmiştir.

Üretim bantlarından alınan 200 mm X 200 mm ebatlı yer karoları ve 330 mm X 330 mm, 450 mm X 450 mm boyutlu granitler Çizelge 5.1’de belirtilen rejimlerde sinterlenmiştir. Hata oluşturmak amacıyla granitler ham iken matkapla delinmişlerdir. Daha sonra işletmede aynı ebatlarda üretilen diğer ürünlerle aynı rejimlerde sinterlenmiştir. Yer karoları ise farklı su emme (%)’leri oluşturmak amacıyla farklı rejimlerde sinterlenmiştir.

Çizelge 5.1. Sinterleme rejimleri

Kod	Ebat	Rejim
Rejim 1	200 mm X 200 mm	1200°C’de 42 dk.
Rejim 2	200 mm X 200 mm	1186°C’de 39 dk.
Rejim 3	200 mm X 200 mm	1203°C’de 37 dk.
Rejim 4	330 mm X 330 mm	1197°C’de 50 dk.
Rejim 5	450 mm X 450 mm	1202°C’de 37 dk.

5.3. Fiziksel Özelliklerin Karakterizasyonu

5.3.1. Yoğunluk, porozite ve su emme özelliklerinin Arşimet metodu ile karakterizasyonu

Gözeneklilik, tozların preslenmesi ile üretilen seramik bünyelerin çoğunda görülmektedir ve mukavemet, şeffaflık, ısıl ve elektriksel iletkenlikler gibi

özellikleri etkilemektedir. Gözenekliliği belirlemek, ürünün kalite kontrol değerlendirmelerinde büyük önem taşımaktadır.

Gözenekler bünyede gerilmelere neden olmada çatlaklar kadar etkin olmamalarına rağmen, çok kristalli seramiklerde hataların sıklıkla rastlanan kaynaklarından birisidir. Düşük gözenekli porselen karolarda bu nedenle teknolojik özellikleri (eğilme gerilmelerine dayanımını, yüzey sertliğini, düşük lekelenebilirliği, aşınma dayanımını) etkilemektedir.

Sinterleme süreci, gözeneklerin boyutlarını ve şekillerini belirlemektedir. Bir malzeme sinterlendiğinde, gözeneklerin boyutları küçülmekte ve şekilleri daha yuvarlak hale gelmektedir. Kapalı gözenekler, bünyenin içinde oluşmakta ve açık gözeneklerin aksine yüzeye bağlantıları bulunmamaktadır.

Kapalı gözenekler doğrudan ölçülememekte iken hacimlerinin dolaylı olarak belirlenmesi mümkün olmaktadır. Açık gözeneklerin toplam gözenekten çıkartılması ile kapalı gözeneklerin hacmi bulunmaktadır (Andreola ve ark. 2000).

Hazırlanan standart granit bünye granüllerinden üretilen 50 mm X 100 mm ebatlarındaki karoların yoğunluk, porozite (%) ve su emme (%) değerleri TS EN ISO 10545-3 standardına göre Arşimet metodu ile tespit edilmiştir. Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş.'de üretilen 50 mm X 100 mm ebatlarında kalınlığı farklı karoların su emme (%) değerleri Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği'ndeki hem su emme düzeneği, hem de vakumlu su emme cihazı ile belirlenmiştir.

$$\% \text{ Su emme} = [(W-D)/D] \times 100 \quad (5.1)$$

$$\text{Yığınsal yoğunluk } B = D/V \quad (5.2)$$

$$\text{Görünür yoğunluk } T = D/(D-S) \quad (5.3)$$

$$\% \text{ Görünür porozite } P = (W-D)/V \quad (5.4)$$

D: kuru ağırlık (g)

W: su emdirilmiş ağırlık (g)

S: su içindeki ağırlık (g)

Numune hacmi $V = (W-S)$

200 mm X 200 mm ebatlarındaki yer karoları ve endüstriden temin edilen karolar için su emme (%) analizleri fabrika koşullarında yapılmıştır.

5.3.2. Fiziksel özelliklerin ultrasonik test yöntemi ile karakterizasyonu

5.3.2.1. Ultrasonik süre ve hız ölçümü

Ultrasonik yöntemin kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla öncelikle temaslı ultrasonik yöntem denenmiştir. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresini ölçmek amacıyla Olympus Panametrics Model 5800 Computer Controlled Pulser/Receiver (darbe-yankı yöntemi, A-tarama) kullanılmıştır. Prob ile karolar arasında kuplaj malzeme olarak silikon yağı seçilmiştir.

Ultrasonik dalga ilerleme süresi ölçümleri, farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için 11 noktadan gerçekleştirilmiştir. İlerleme süreleri ile su emme cihazıyla belirlenen su emme (%) değerlerine karşı referans eğrisi, Arşimet yöntemi ile tespit edilen yığınsal yoğunluk, görünür yoğunluk ve porozite (%) miktarına karşı referans eğrileri çizilmiştir.

Malzeme boyunca ilerleyen ultrasonik dalgaların hızı,

$$V = \frac{2 \times d}{t} \quad (5.5)$$

formülüne göre hesaplanmıştır. Burada d: karonun kalınlığı (mm), t: dalga ilerleme süresi (nsn) ve V: boyuna dalgaların ilerleme hızı (m/sn)'dir (Medding 1996). Karo kalınlıkları mikrometre ile ölçülmüştür. Ultrasonik dalga hızının yığınsal yoğunluk, görünür yoğunluk, su emme (%), porozite miktarı ile değişimi tespit edilmiştir.

Farklı sıcaklıkta pişen birer numunenin 1978 yılında üretilmiş 22 kHz'lik Karl Deutsh marka ultrasonik cihazda karonun kalınlığına dik doğrultuda doğrudan iletim yöntemiyle ultrasonik süre ölçümü yapılmıştır. Karonun boyunun, süreye bölünmesi ile ultrasonik hızlar hesaplanmıştır. İki farklı cihazdan elde edilen hız değerleri karşılaştırılmıştır.

Endüstriden temin edilen karolar temaslı ultrasonik yöntem ile incelenerek ultrasonik dalgaların ilerleme süresi ölçülmüştür. İlerleme süreleri fabrikada

belirlenen su emme (%) değerlerine karşı referans grafiği çizilerek oluşturulmuştur. Bu yönde hızın hesaplanmasında dalga geçiş süresi ve bünye kalınlığı gerekmektedir. Ultrasonik dalga ilerleme süresi ve kalınlık ölçümleri farklı kalınlıktaki karolar için 15, 200 mm X 200 mm boyutta karolar için 17 farklı noktadan gerçekleştirilmiştir.

5.3.2.2. Ultrasonik pik şiddetinin ölçülmesi

Kolaylıkla ölçülemeyecek küçük hatalardan gelecek pikler tespit edilemese bile, bu hataların ultrasonik dalgaların malzemeden çıkış piklerinde oluşturdukları azalma, aynı özellikteki hatasız bir malzeme ile kıyaslanarak tespit edilebilmektedir. (The Institution of Metallurgist 1983).

Ultrasonik cihaz ile A-tarama yapılarak elde edilen sinyallerin karodan çıkış piklerinin yükseklikleri 50 mm X 100 mm boyuttaki karolar için, 330 mm X 330 mm boyuttaki karolar için ve 450 mm X 450 mm boyuttaki karolar için belirlenmiştir.

5.3.2.3. Ultrasonik C-tarama incelemeleri

Ultrasonik C-tarama incelenen numunenin bölgesel ve boyutsal görüntüsünü vermektedir. Görüntü, probun tarama şekline paralel şekildedir. C-tarama görüntüleri otomatik veri toplama sistemi ile toplanmaktadır. Su içinde gerçekleşen ultrasonik C-tarama analizleri için Hamburg-Harburg Teknik Üniversitesi'ndeki Dr. Hillger USPC 3040 DAC Industrie cihazı kullanılarak 6–12 MHz frekanslı, odak uzunluğu 15 mm ve prob çapı 6 mm olan ve darbe yankı modunda çalışan daldırma prob ile su içinde ultrasonik ölçümler yapılmıştır. Hata sinyallerinin toplandığı hata ekosu, karonun tabanına çarpan sinyallerin toplandığı geri yansıyan eko ve hatanın yerini belirleyen hata görüntüleri elde edilmiştir.

Stuttgart Üniversitesi'nde yapılan temassız C-tarama analizlerinde Graniser Granit Seramik A.Ş. granülleri ile üretilen 10 mm X 10 mm ebatlarında kâğıt hatası, 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren ve düşük

sıcaklıkta sinterlenmiş, su emme ve görünen porozite değerleri belirlenmiş olan numuneler incelenmiştir.

5.4. Helyum Piknometresi ile Teorik Yoğunluk Ölçümü

Helyum piknometresi ile teorik yoğunluk ölçümü için standart granit bünye granülleri ile hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen (1150–1230 °C arasında 10 °C’lik artışlarla) 50 mm X 100 mm karolardan her sıcaklık için üçer tanesi kullanılmıştır.

$$P(\%) = \frac{(d_t - d_b)}{d_b} \times 100 \quad (5.6)$$

Burada: P (%): toplam porozite (%), d_t : teorik yoğunluk (g/cm^3) ve d_b : yığinsal yoğunluktur (g/cm^3) (Andreola ve ark. 2000).

Denklem 5.6 ile toplam porozite (%) hesaplamalarında Arşimet metoduyla belirlenen yığinsal yoğunluk ve He piknometresiyle belirlenen teorik yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Toplam poroziteden (%), Arşimet metoduyla belirlenen görünen porozite (%) değerlerinin çıkartılması ile kapalı porozite (%) hesabı yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak yığinsal yoğunluk, teorik yoğunluk, toplam porozite, görünen porozite, kapalı porozitedeki değişimi belirlenmiştir.

5.5. Civa Porozimetresi ile Por Boyutunun Belirlenmesi

Gözenek boyut dağılımı; ham seramik bünyenin mikroyapısının kantitatif olarak gelişimini incelemek açısından önemli bir özelliktir. Gözenekli malzemeler, katalizörler, kayalar için gözenek boyut dağılımını belirlemeye yönelik test metodlarını içeren pek çok deney standardı mevcuttur. Bununla birlikte, özellikle gerekli olmasına rağmen, seramikler ya da ham seramik bünyeler için bir deney standardı bulunmamaktadır. Japon endüstriyel deney standardı; gözenek boyut dağılımını ölçmek amacıyla; civa porosimetresi metodunu geliştirmektedir. Civa porosimetresi metodunda; gözenekler, silindirik

bir gözenek modeli olarak farz edilir ve gözeneklerin boyutu Washburn denklemi ile hesaplanır.

$$D = 14 \gamma (\cos \theta / P) \quad (5.7)$$

Burada D civa ile dolan gözenegin boyutu, γ civanın yüzey gerilimi, θ civa ve malzeme arasındaki temas açısı ve P'de civanın dolmasına sebep olan mutlak basınçtır. Bu denklem; basıncı gözenek çapına dönüştürmek için kullanılabilir. Gözenek boyut dağılımı, basıncın bir fonksiyonu olarak gözeneklere dolan civanın hacminin ölçülmesiyle belirlenir (Oya ve ark. 2002).

Civa porozimetresi, civayı por ağı yapısına girmeye zorlayarak por boyut dağılımını ölçmeyi sağlamaktadır. 360–0,003 μm çaplı porlar, yığınsal ve iskelet yoğunluğu, porozite yüzdesi belirlenebilmektedir (Andreola ve ark. 2000). Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için Quantachrome Pore Master 60 porozimetresi ile por boyutu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için üç analiz gerçekleştirilmiştir. Civa porozimetresi, numune hücrelerini tam dolduramadığı için yoğunluk ve porozite yüzdesi belirlenememiştir.

5.6. Fleksimetre ile Piroplastik Deformasyonun Belirlenmesi

Vitrifikasyon boyunca camsı fazın oluşumuyla ilgili başlıca problem, yüksek sıcaklıklardaki düşük viskozite nedeniyle ürünün piroplastik olarak deformasyona uğramasıdır (Restrepo ve Dinger 1995). Piroplastik deformasyon, seramik bir ürünün pişirilmesi sırasında ağırlığına bağlı olarak eğilmesi olarak tanımlanabilir. Piroplastik deformasyonun şiddeti piroplastik deformasyon sabiti ile belirlenmektedir. Piroplastik sabit bir ürünün iki destek üzerinde pişirilmesi sırasında oluşan eğiliğin ölçülmesini içermektedir.

$$PI = \frac{sb^2}{l^4} \quad (5.8)$$

Burada s: maksimum deformasyon (cm), b: numunenin kalınlığı (cm) ve l: destekler arası mesafedir (cm). Piroplastik deformasyon seramik bünyenin pişirilmesi sırasında gerçekleşen vitrifikasyonun bir fonksiyonu olarak gerçekleşmektedir (Bernardin ve ark. 2006).

Hazırlanan karoların deforme olmadan sinterlenmesi için reçetelerin deformasyonlarının belirlenmesi gerekmektedir. Pişirme sırasında karşılaşılabilecek deformasyon sorunu için Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş.ve Graniser Granit ve Seramik A.Ş. granülleriyle 100 mm X 50 mm ebatlarında deformasyon çubukları hazırlanmıştır. Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında bulunan Misura ODLT temassız optik fleksimetre cihazında piroplastik deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.7. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu

Granüllerin preslenmesi ile üretilmeleri nedeni ile sinterlenen seramikler iç gözenekler içermektedir. Bunlar taneler arası porlar olarak sinterleme sırasında doldurulamayan gözeneklerdir. Daha fazla miktarda iç gözenek içeren malzemelerin mukavemetinin daha düşük olması beklenmektedir. Çünkü katı malzemenin yükü taşıyan kesit alanı daha küçüldüğü için, katı fazı etkileyen tüm yük artmaktadır. Gözenekler aynı zamanda ikinci faz olarak görev yapmaktadır (Riley 2009).

Boyuna ve enine dalga ilerleme süreleri ve kalınlıkları kullanılarak her sıcaklık için 3'er karonun ultrasonik hızları ve dinamik elastisite modülü hesaplanmıştır. Bu karoların mukavemetleri ve statik elastisite modülleri, üç noktalı eğme testi ile (model 5581, Instron) yükleme hızı 1 mm/dk. (TS EN ISO 10545-4) olacak şekilde ölçülmüştür.

Analizde kullanılan karoların içyapısının her yönde aynı özelliğe sahip olduğu kabul edilerek, standart hız-elastisite ilişkisi dinamik elastisite modülünü hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu denklemler:

$$E = \frac{v_l^2 \rho (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)} \quad (5.9)$$

$$\sigma = \frac{(1 - 2b^2)}{(2 - 2b^2)} \quad (5.10)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada v_l boyuna dalga hızı (m/s), v_s enine dalga hızı (m/s), E elastisite modülü (pascals), σ poisson oranı ve $b = v_s / v_l$ 'dir.

5.8. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Karakterizasyon

Malzeme özellikleri, mikroyapı ile belirlenmektedir. Tane boyut dağılımı, paketlenmeyi ve yoğunlaşmayı etkilemektedir. Malzemede kalan porozite, yapı hatasıdır ve mukavemeti azaltmaktadır. Porozite aynı zamanda ultrasonik dalgaların ilerleme süresini de etkilemektedir. Yüzdesel por hesabı seramiklerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Gregorova 2006, Correia ve ark. 2008). Sinterlenmiş karoların por dağılımı, boyut ve şekillerinin değişimi detaylı bir şekilde Zeiss Evo 50 EP taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile geri yansıyan elektron görüntüleri alınarak incelenmiştir.

Por alan yüzdesi için her numunenin parlatılmış yüzeylerinden 10'ar adet geri yansıyan elektron görüntüsü alınmıştır. Bu görüntüler Scandium görüntü işleme programı ile analiz edilmiştir. Bütün numuneler ve her numune için alınan 10 temsili geri yansıyan elektron görüntüsü için bu işlem tekrarlanmıştır.

Ayrıca bu karoların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile por boyutları da incelenmiştir.

Hataların yüzeye uzaklıklarını belirlemek için Zeiss Supra TM 50 VP taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ikincil elektron görüntüleri alınmıştır.

6.SONUÇLAR

6.1. Yoğunluk, Porozite ve Su Emme Ölçümü

Hazırlanan standart granit bünye granüllerinden üretilen 50 mm X 100 mm ebatlarındaki karoların yoğunluk, porozite (%) ve su emme (%) değerleri TS EN ISO 10545-3 standardına göre Arşimet metodu ile tespit edilmiştir. Kara ve arkadaşlarının çalışmasında (2006) yoğunlaşma derecesi için gerekli olan en yüksek sinterleme sıcaklığı ve bu sıcaklıkta bekleme süresi önemle vurgulanmaktadır. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen granit karoların yığinsal yoğunluk, görünen katı yoğunluğu, görünen porozite ve su emme analiz sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Artan yoğunlaşmaya bağlı olarak, yığinsal yoğunluk sıcaklıkla artmaktadır.

Çizelge 6.1. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen granit karoların yığinsal yoğunluk, görünen katı yoğunluğu, görünen porozite ve su emme analiz sonuçları

Sıcaklık (°C)	Yığinsal yoğunluk (g/cm ³)	Görünen katı yoğunluğu (g/cm ³)	Görünen porozite (%)	Su emme (%)
1150	2,07±0,007	2,53±0,012	17,99±0,48	8,69±0,25
1160	2,13±0,009	2,49±0,010	14,55±0,58	6,83±0,29
1170	2,18±0,004	2,47±0,002	11,64±0,28	5,33±0,14
1180	2,25±0,010	2,43±0,006	7,35±0,67	3,27±0,31
1190	2,28±0,005	2,40±0,003	4,85±0,27	2,12±0,12
1200	2,31±0,006	2,39±0,025	3,17±1,27	1,37±0,55
1210	2,31±0,011	2,37±0,014	2,45±1,05	1,06±0,46
1220	2,33±0,009	2,35±0,004	1,04±0,56	0,45±0,24
1230	2,33±0,003	2,34±0,002	0,31±0,07	0,13±0,03

200 mm X 200 mm ebatlarındaki yer karoları için su emme (%) analizleri fabrika koşullarında yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.2’de verilmiştir. En uzun sinterleme süresine sahip Rejim 1’de en düşük su emme (%) değeri elde edilmiştir. En düşük ikinci su emme değeri (%) ise sıcaklığı en yüksek Rejim 3’te elde edilmiştir.

Çizelge 6.2. Sinterleme rejimlerinin su emme değerleri üzerindeki etkisi

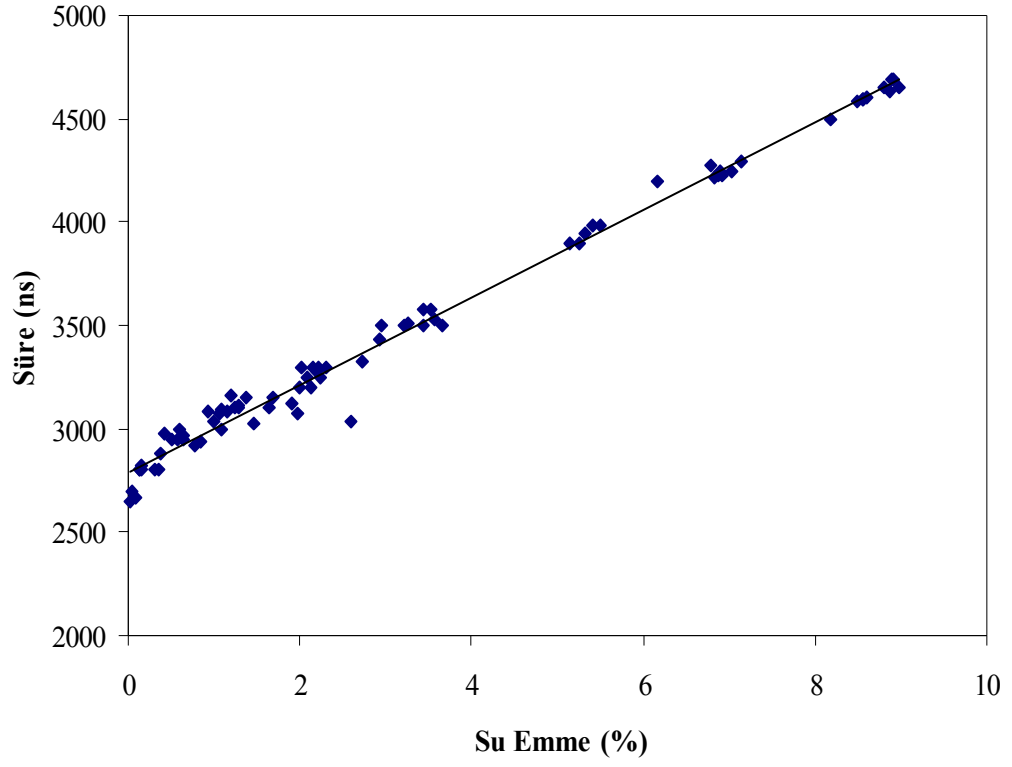
Sinterlendiği rejim	Su emme (%)
Rejim 1	0,89±0,04
Rejim 2	2,05±0,06
Rejim 3	1,69±0,05

6.2. Ultrasonik Süre ve Hız Ölçümleri

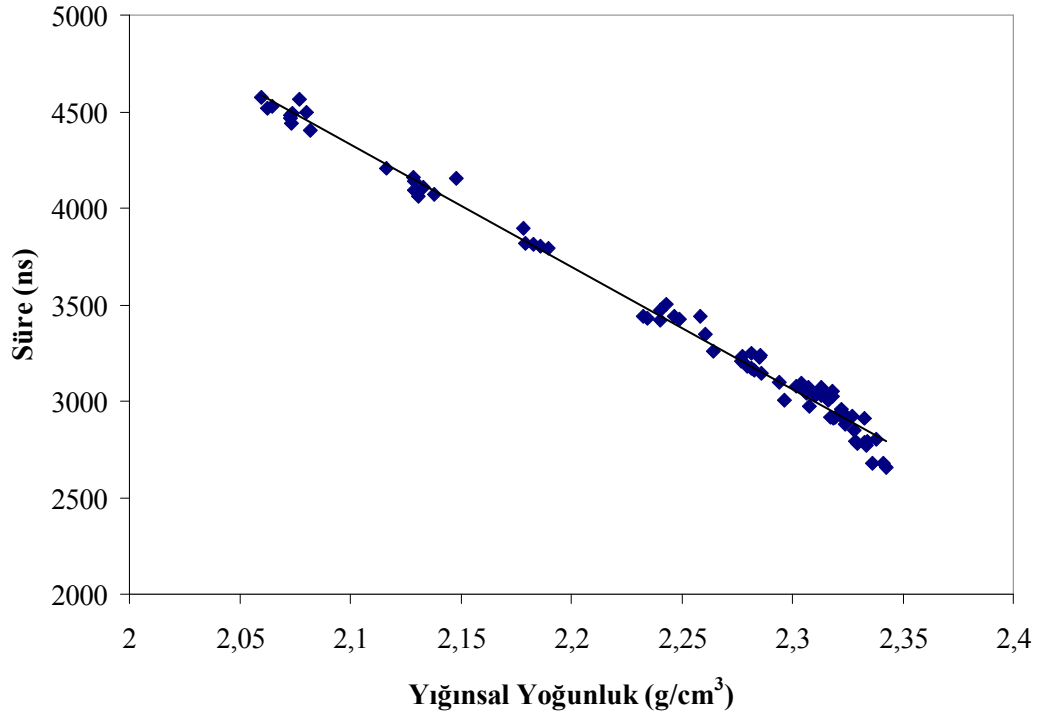
6.2.1.Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karoların ultrasonik süre ve hız ölçümleri

Ultrasonik dalga ilerleme süresi ölçümleri, farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için 11 farklı noktadan gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik dalgaların ilerleme süreleri ile su emme cihazıyla belirlenen su emme (%) değerlerine karşı referans eğrisi (Şekil 6.1), Arşimet yöntemi ile tespit edilen yığinsal yoğunluk (Şekil 6.2), görünür yoğunluk (Şekil 6.3) ve porozite (%) miktarına karşı referans eğrileri (Şekil 6.4) çizilmiştir. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin yığinsal yoğunlukla ters orantılı; görünür yoğunluk, görünür porozite (%) ve su emme (%) ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Denklem 5.5'e göre dalga ilerleme süresi ile ultrasonik dalga hızı ters orantılıdır. Dalga ilerleme süresi azaldıkça ultrasonik dalga hızı artmakta, dalga ilerleme süresi arttığında ise ultrasonik dalga hızı azalmaktadır.

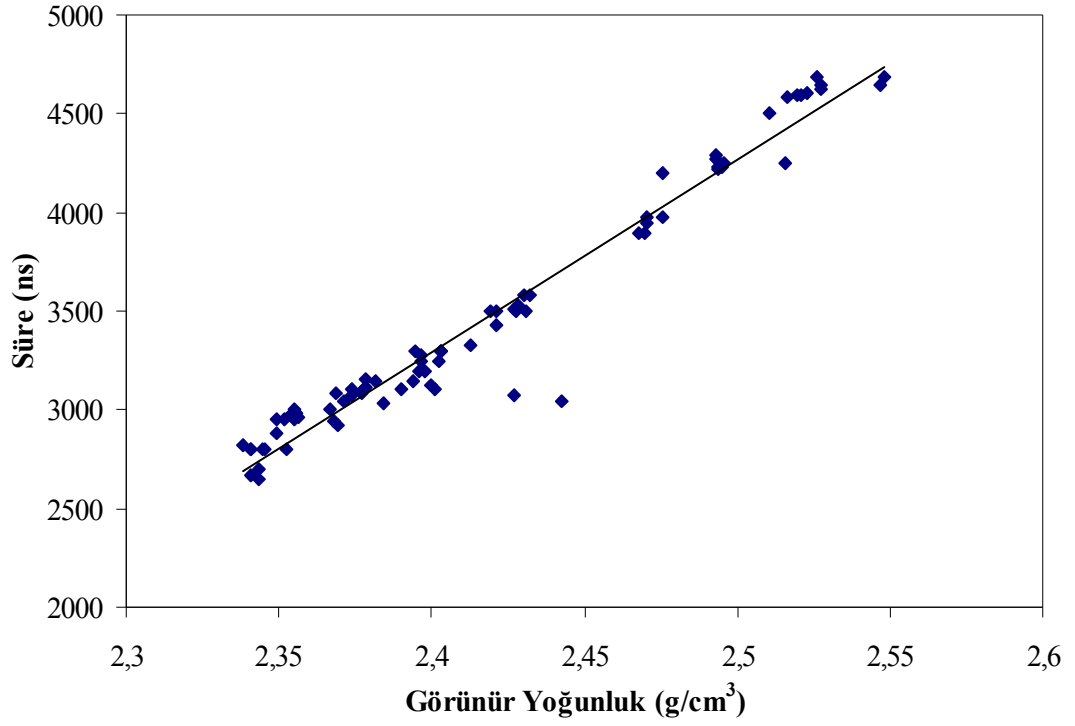
Karo kalınlıkları mikrometre ile ölçülmüştür. Ölçülen kalınlıklar ve ultrasonik süreler kullanılarak Denklem 5.5'e göre ultrasonik hızlar hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için yığinsal yoğunluk, görünen katı yoğunluğu, görünen porozite, su emme, kalınlık ultrasonik süre ve ultrasonik hız analiz sonuçları Çizelge 6.3'te, bu değerlerin ortalamaları Çizelge 6.4'te görülmektedir. Çizelge 6.3'teki No'lar, karolara preslendikten sonra verilen numaralardır.



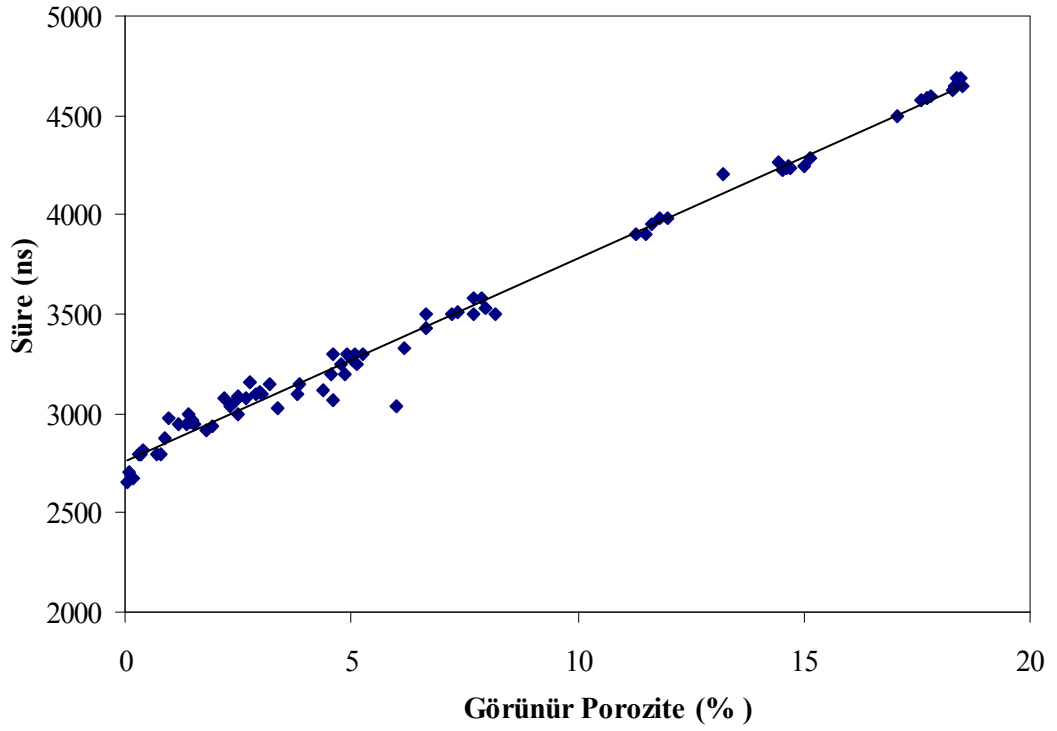
Şekil 6.1. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin su emme ile değişimi



Şekil 6.2. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin yığınsal yoğunluk ile değişimi



Şekil 6.3. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin görünür yoğunluk ile değişimi



Şekil 6.4. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin görünür porozite ile değişimi

Su emme cihazıyla belirlenen su emme (%) değerlerine karşı referans eğrisi (Şekil 6.5), Arşimet yöntemi ile tespit edilen yığınsal yoğunluk (Şekil 6.6), görünür yoğunluk (Şekil 6.7) ve porozite (%) miktarına karşı referans eğrileri (Şekil 6.8) ilerleme hızlarına karşı verilmiştir. Ultrasonik dalga hızı, yığınsal yoğunlukla doğru orantılı, görünür yoğunluk, görünür porozite (%) ve su emme (%) ile ters orantılıdır. Yığınsal yoğunluk arttıkça, ultrasonik dalgalarının ilerlemesini engelleyecek porlar azalmakta, dalgalar daha kısa sürede ve daha yüksek hızla ilerlemektedir. Görünür porozite (%) arttıkça ve görünür poroziteye bağlı su emme (%) arttığında, dalgaların ilerlemesi zorlaşmakta ve dalga ilerleme hızı düşmektedir.

Çizelge 6.3. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	No	Bulk Yoğunluk (g/cm ³)	Görünen Yoğunluk (g/cm ³)	Görünen Porozite (%)	Su Emme (%)	Süre (ns)	d (mm)	Hız (m/s)
1150	75	2,080	2,547	18,332	8,813	4496	7,686	3418
	76	2,082	2,510	17,058	8,193	4405,455	7,619	3460
	77	2,060	2,525	18,509	8,987	4574,545	7,74	3384
	78	2,077	2,548	18,482	8,898	4565,455	7,735	3388
	79	2,062	2,526	18,365	8,905	4520	7,713	3414
	80	2,065	2,527	18,302	8,864	4529,091	7,742	3420
	81	2,073	2,523	17,833	8,603	4480	7,761	3466
	82	2,073	2,516	17,605	8,491	4441,818	7,74	3486
	83	2,074	2,520	17,727	8,548	4492	7,332	3444
	84	2,073	2,520	17,729	8,553	4465,455	7,703	3450
1160	85	2,138	2,515	15,011	7,022	4074,545	7,67	3766
	86	2,116	2,493	15,126	7,148	4207,273	7,74	3680
	89	2,133	2,493	14,452	6,776	4110	7,653	3724
	90	2,148	2,475	13,230	6,159	4154,545	7,667	3692
	91	2,129	2,494	14,638	6,876	4092	7,695	3762
	92	2,129	2,495	14,680	6,895	4140	7,676	3710
	93	2,128	2,495	14,703	6,908	4161,818	7,708	3704
	94	2,131	2,494	14,547	6,827	4060	7,653	3770

Çizelge 6.3. (Devam) Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için deney sonuçları

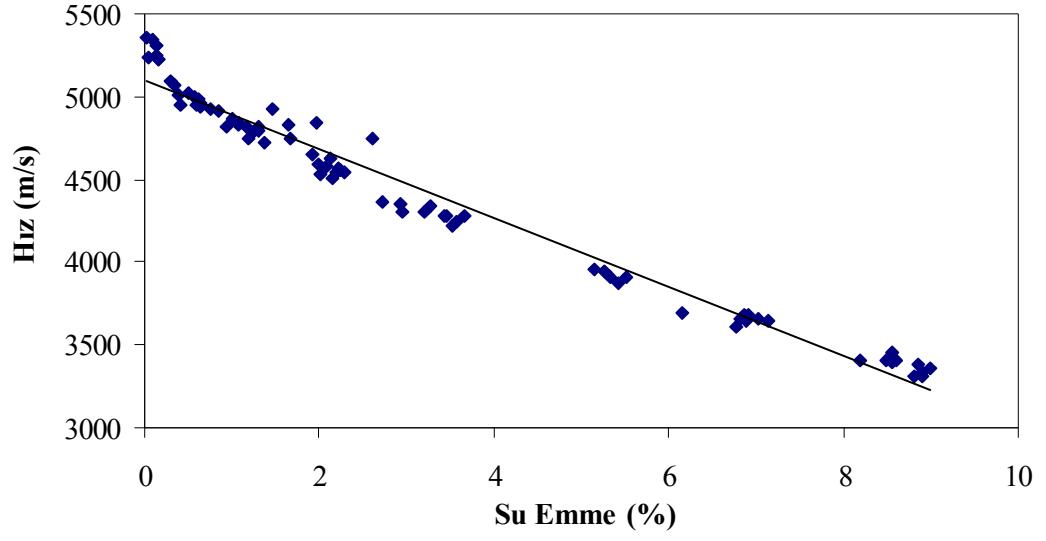
Sıcaklık (°C)	No	Bulk Yoğunluk (g/cm ³)	Görünen Yoğunluk (g/cm ³)	Görünen Porozite (%)	Su Emme (%)	Süre (ns)	d (mm)	Hız (m/s)
1170	95	2,190	2,468	11,282	5,153	3790,909	7,622	4022
	96	2,186	2,470	11,497	5,260	3801,818	7,619	4008
	97	2,183	2,471	11,639	5,332	3812	7,67	4024
	98	2,178	2,476	12,001	5,509	3898,182	7,689	3944
	99	2,179	2,470	11,799	5,415	3817,273	7,64	4004
1180	40	2,243	2,430	7,699	3,433	3503,636	7,556	4314
	61	2,249	2,427	7,350	3,268	3424,545	7,549	4410
	10	2,264	2,413	6,160	2,721	3260	7,195	4414
	41	2,240	2,432	7,879	3,517	3469,091	7,515	4334
	31	2,258	2,419	6,655	2,947	3438,182	7,465	4342
	66	2,233	2,431	8,162	3,656	3438,182	7,421	4318
	56	2,240	2,427	7,720	3,446	3420	7,424	4342
	52	2,235	2,428	7,980	3,571	3429,091	7,446	4344
	48	2,247	2,421	7,214	3,211	3440	7,48	4350
	44	2,260	2,421	6,634	2,935	3347,273	7,389	4416
1190	65	2,280	2,402	5,102	2,238	3181,818	7,37	4634
	55	2,281	2,398	4,859	2,130	3172,727	7,345	4630
	51	2,283	2,397	4,756	2,084	3158,182	7,41	4692
	47	2,285	2,395	4,595	2,011	3225,455	7,469	4632
	43	2,286	2,396	4,572	2	3147,273	7,31	4646
	13	2,294	2,340	4,389	1,913	3098,182	7,253	4682
	30	2,285	2,403	4,905	2,146	3240	7,46	4604
	34	2,277	2,403	5,233	2,298	3232,727	7,421	4592
	72	2,277	2,397	4,994	2,193	3205,455	7,408	4622
	42	2,282	2,403	5,056	2,216	3249,091	7,495	4614
1200	68	2,317	2,369	2,173	0,938	3025,455	7,386	4882
	46	2,315	2,374	2,464	1,064	3036,364	7,365	4852
	50	2,316	2,371	2,316	0,999	3005,455	7,342	4886
	54	2,313	2,377	2,685	1,161	3029,091	7,397	4884
	58	2,318	2,390	3,004	1,296	3053,333	7,352	4816
	9	2,322	2,368	1,946	0,838	2920	7,194	4928

Çizelge 6.3. (Devam) Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için deney sonuçları

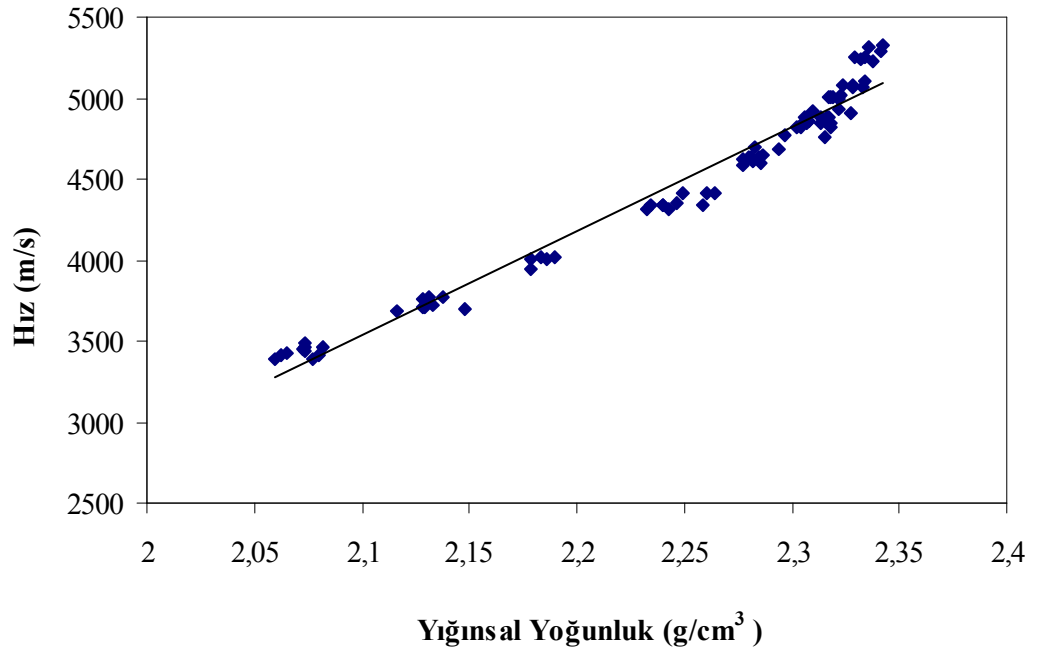
Sıcaklık (°C)	No	Bulk Yoğunluk (g/cm ³)	Görünen Yoğunluk (g/cm ³)	Görünen Porozite (%)	Su Emme (%)	Süre (ns)	d (mm)	Hız (m/s)
1200	39	2,310	2,401	3,796	1,643	3030,909	7,459	4922
	33	2,313	2,378	2,746	1,187	3074,545	7,449	4846
	7	2,316	2,427	4,580	1,978	3029,091	7,205	4758
	8	2,296	2,442	5,979	2,604	3005,455	7,172	4774
1210	67	2,318	2,377	2,501	1,079	3023,636	7,323	4844
	57	2,302	2,394	3,854	1,674	3078,182	7,419	4820
	53	2,307	2,378	2,989	1,296	3074,545	7,456	4850
	49	2,306	2,374	2,870	1,245	3054,545	7,407	4850
	45	2,307	2,366	2,491	1,080	2976	7,236	4864
	2	2,327	2,369	1,781	0,765	2920	7,166	4908
	38	2,304	2,384	3,352	1,455	3090,909	7,443	4816
	36	2,306	2,382	3,176	1,377	3040	7,424	4884
	5	2,328	2,345	0,710	0,305	2790,909	7,085	5078
	6	2,333	2,353	0,806	0,345	2774,545	7,085	5108
1220	60	2,324	2,352	1,193	0,513	2880	7,313	5078
	69	2,319	2,355	1,510	0,651	2914,545	7,297	5008
	63	2,317	2,349	1,350	0,582	2916,364	7,302	5008
	59	2,319	2,354	1,509	0,651	2910,909	7,29	5010
	11	2,328	2,349	0,890	0,382	2852	7,22	5062
	32	2,322	2,355	1,403	0,604	2959,091	7,398	5000
	71	2,333	2,356	0,968	0,415	2913,636	7,389	5072
	37	2,323	2,356	1,435	0,618	2941,818	7,375	5014
	3	2,341	2,343	0,097	0,041	2676,364	7,074	5286
	4	2,343	2,343	0,032	0,014	2656,364	7,079	5330
1230	70	2,334	2,341	0,314	0,135	2792,727	7,329	5248
	64	2,332	2,341	0,347	0,149	2785,455	7,299	5242
	62	2,329	2,338	0,376	0,161	2784	7,317	5256
	11	2,336	2,341	0,193	0,083	2680	7,115	5310
	35	2,338	2,345	0,316	0,135	2803,636	7,326	5226

Çizelge 6.4. Farklı tepe sıcaklıklarında sinterlenen granit karoların yığinsal yoğunluk, görünen katı yoğunluğu, görünen porozite, su emme, kalınlık, süre, hız ölçüm sonuçları

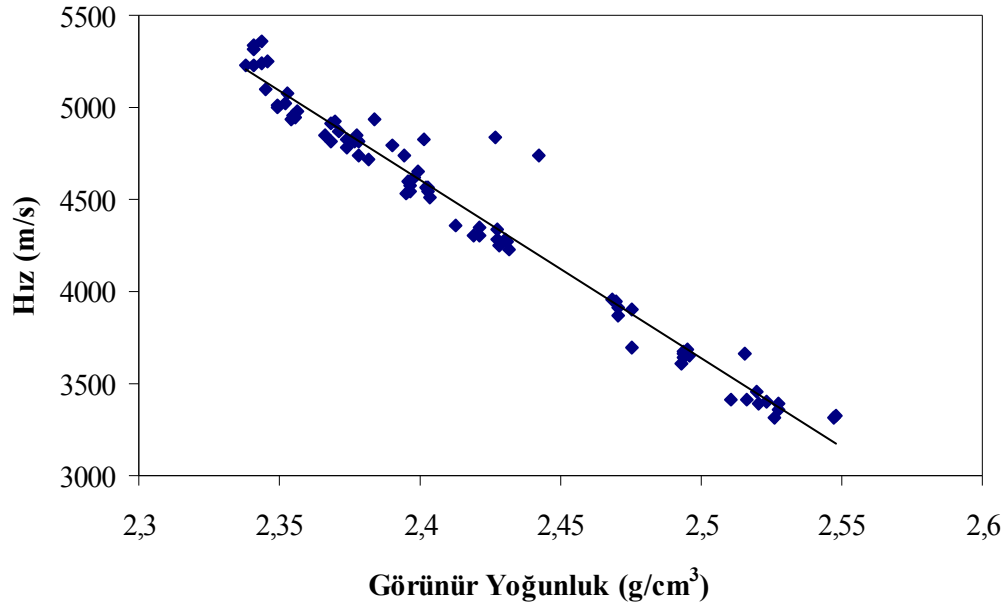
Sıcaklık (°C)	Yığinsal yoğunluk (g/cm ³)	Görünen katı yoğunluğu (g/cm ³)	Görünen porozite (%)	Su emme (%)	Kalınlık (mm)	Süre (s)	Hız (m/s)
1150	2,071±0,007	2,526±0,012	17,994±0,476	8,685±0,248	7,677±0,128	4496,982±52,698	3433,0±33,695
1160	2,131±0,009	2,494±0,010	14,548±0,579	6,826±0,293	7,683±0,030	4125,023±49,724	3726,0±35,553
1170	2,183±0,004	2,470±0,002	11,643±0,275	5,333±0,137	7,648±0,031	3824,036±42,659	4000,4±32,693
1180	2,246±0,010	2,425±0,006	7,345±0,668	3,270±0,312	7,444±0,103	3417,000±67,798	4358,4±39,562
1190	2,283±0,005	2,399±0,003	4,846±0,266	2,122±0,120	7,394±0,075	3191,091±48,230	4634,8±31,682
1200	2,313±0,006	2,389±0,025	3,168±1,266	1,370±0,552	7,332±0,105	3110,000 ±45,826	4787,1±43,781
1210	2,313±0,011	2,372±0,014	2,453±1,052	1,062±0,458	7,304±0,149	3070,000 ±60,828	4814,7±33,058
1220	2,326±0,009	2,351±0,004	1,038±0,555	0,447±0,239	7,274±0,117	2953,333±64,291	4971,2±37,156
1230	2,333±0,003	2,341±0,002	0,309±0,069	0,132±0,030	7,277±0,092	2769,164±50,446	5256,4±31,919



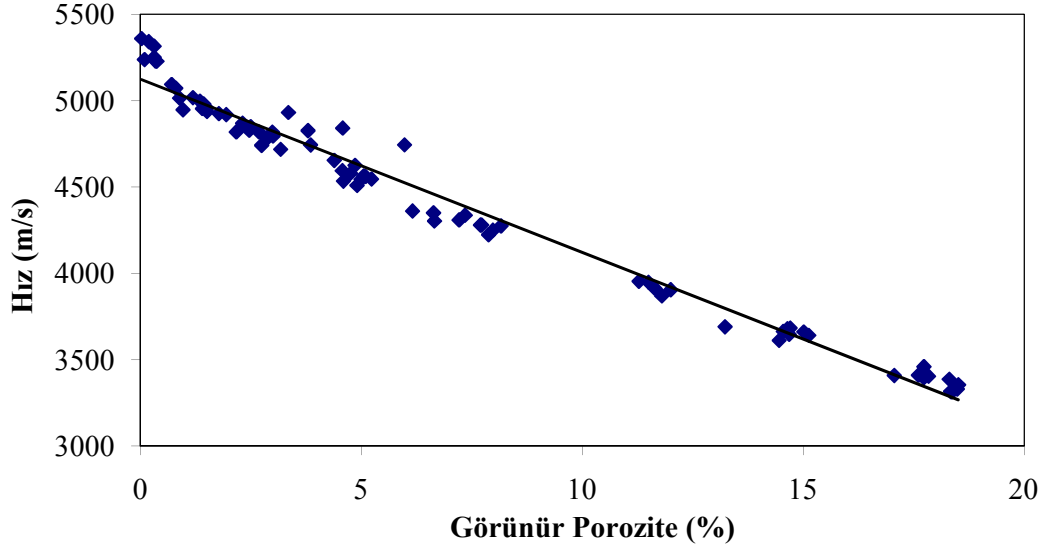
Şekil 6.5. Ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi



Şekil 6.6. Ultrasonik dalga hızının yığinsal yoğunluk ile değişimi



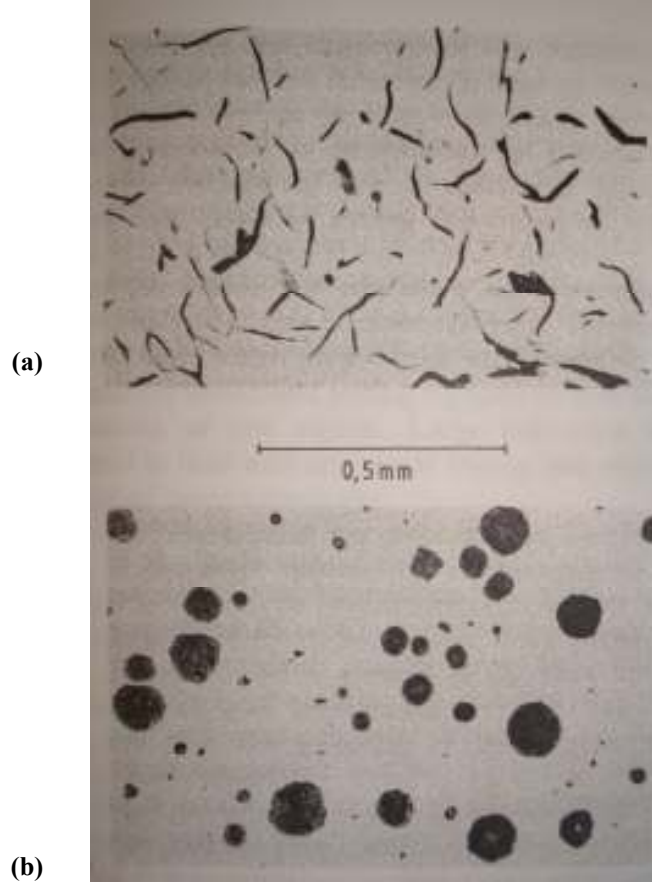
Şekil 6.7. Ultrasonik dalga hızının görünür yoğunluk ile değişimi



Şekil 6.8. Ultrasonik dalga hızının görünür porozite ile değişimi

Dökme demirin yüksek karbon içeriği, yapısında grafit oluşumuna neden olmaktadır. Grafitler lamel (Şekil 6.9.a) ya da küresel (Şekil 6.9.b) formda olabilirler. Dökme demirler grafitlerin şekline göre adlandırılırlar. Ultrasonik dalgalar, gri dökme demirde küresel grafitli dökme demire göre daha fazla

kırınımına uğramaktadır. Bu nedenle ultrasonik dalga hızı gri dökme demirde, küresel grafitli dökme demire göre daha düşüktür (Kuttruff 1991).

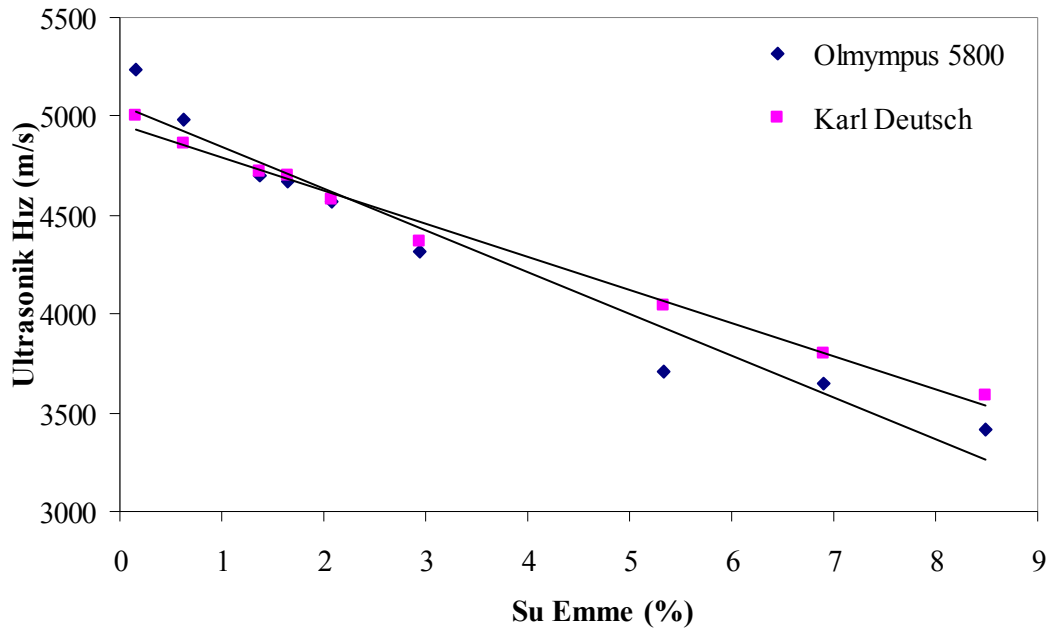


Şekil 6.9. (a) Gri dökme demir, (b) Küresel grafitli dökme demir mikroyapıları (Kuttruff 1991)

Birbiriyle bağlantılı gözeneklerin ultrasonik hıza etkisi gri dökme demirdeki grafitlerin etkisine benzer şekildedir. Yapıdaki küresel grafitlerin ve küresel gözeneklerin ultrasonik ses karşısında, sesi yavaşlatma miktarları da benzerdir. Sinterlemenin artması ile bağlantılı gözeneklerin miktarı azalmakta ve gözenekler küresel hale gelmektedir. İzole olmuş küresel gözenekler ise küresel grafitli dökme demirdeki grafitlerin etkisine benzer şekilde davranmaktadır. Küresel gözeneklerin en çok olduğu 1230°C’de sinterlenen karoların ultrasonik hızlarının, kalibrasyon eğrilerinden sapması bu durumun bir sonucudur.

Farklı sıcaklıkta pişen birer numunenin 1978 yılında üretilmiş 22 kHz’lik Karl Deutchsh marka ultrasonik cihazda karonun kalınlığına dik doğrultuda

doğrudan iletim yöntemiyle ultrasonik süre ölçümü yapılmıştır. Karonun boyunun, süreye bölünmesi ile ultrasonik hızlar hesaplanmıştır. İki farklı cihazdan elde edilen hız değerleri Şekil 6.10'da görülmektedir. Kullanılan cihazlar farklı olduğu gibi, kullanılan proplar ve temas sıvıları da farklıdır. Karl Deutsch marka ultrasonik cihazda temas sıvısı olarak gres yağı kullanılmıştır. Bu farklılıklar nedeniyle elde edilen hız değerlerinde farklılık görülmüştür. Ancak her iki cihaz için elde edilen sonuçlara göre su emme (%) azaldıkça ultrasonik hız değeri artmaktadır.



Şekil 6.10. Farklı iki cihaz için ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin su emme ile değişimi

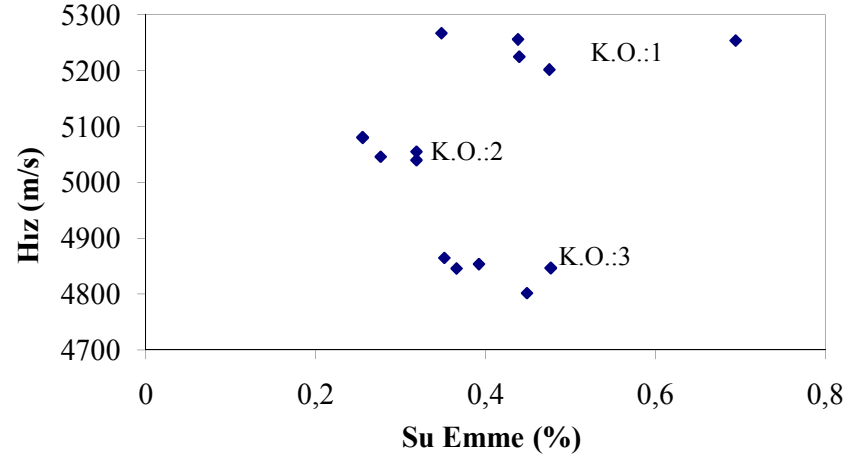
6.2.2. Farklı kalınlıklarda preslenen karoların ultrasonik süre ve hız ölçümleri

Farklı kalınlıklarda preslenmiş 50 mm X 100 mm boyutta granit karolar için Türk Standartları'na (TS-EN 14411) göre belirlenen su emme değerleri (%) ve vakumlu su emme cihazıyla belirlenen su emme (%) değerleri ile ultrasonik dalga hızı ve ultrasonik dalga ilerleme süresinin değişimi eğrileri Şekil 6.11–5.14'te verilmektedir. Ultrasonik dalga ilerleme süresi ve kalınlık ölçümleri farklı kalınlıktaki karolar için 15 noktadan gerçekleştirilmiştir. Granit karolar için

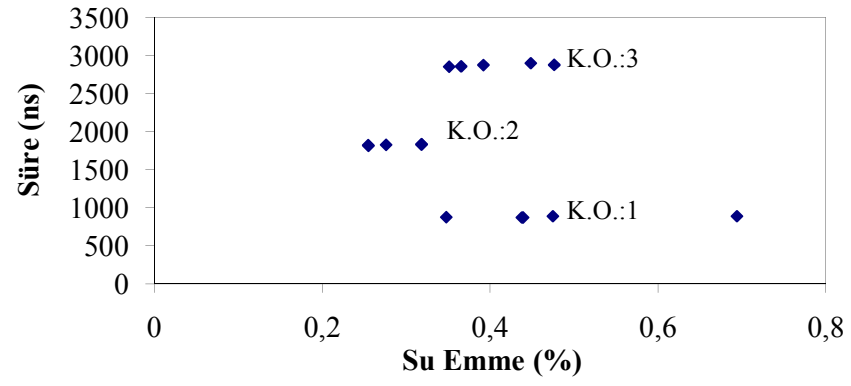
kalınlık oranına bağlı olarak su emme ve ultrasonik hız değerleri izelge 6.5'te verilmektedir.

Çizelge 6.5. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için deney sonuçları

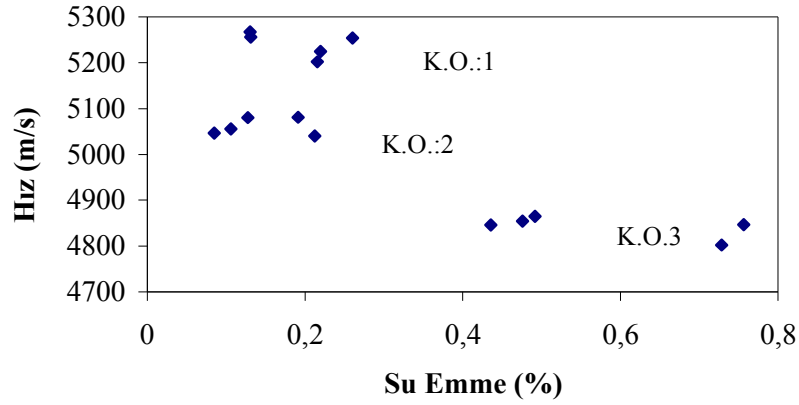
Kalınlık Oranı	Su emme (%)	Vakumlu Su Emme Cihazı ile Elde edilen Su Emme (%)	Süre Değerinin Ortalaması (ns)	Hız Değerinin Ortalaması (m/s)	Aynı Kalınlıktaki Karoların Hız Değerlerinin Ortalaması (m/s)
3	0,39	0,48	2876,67	4854	4842,8±24
	0,45	0,73	2901,33	4802	
	0,48	0,76	2877,33	4847	
	0,37	0,44	2859,33	4846	
	0,35	0,49	2854,67	4865	
2	0,26	0,13	1812,67	5080	5060,4±19,1
	0,32	0,21	1832,67	5040	
	0,32	0,11	1830,67	5055	
	0,28	0,09	1827,33	5046	
	0,26	0,19	1820	5081	
1	0,44	0,13	869,33	5256	5240,8±26,7
	0,35	0,13	872	5267	
	0,69	0,26	887,33	5254	
	0,44	0,22	868,66	5225	
	0,48	0,22	887,33	5202	



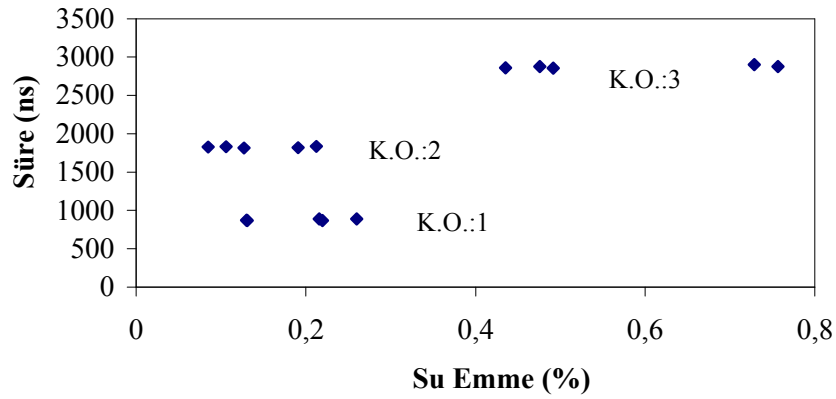
Şekil 6.11. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)



Şekil 6.12. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)



Şekil 6.13. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga hızının vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)



Şekil 6.14. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga ilerleme süresinin vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)

Kalınlığa bağlı olarak ultrasonik hızın değişimlerinin ortalaması Çizelge 6.6'da verilmektedir. Kalınlık değişimi ile ultrasonik hızda oluşan değişim, Şekil 6.15'te görülmektedir. Kalınlık oranındaki artışa bağlı olarak ultrasonik dalgaların ilerleme süreleri artmakta, ilerleme hızları ise azalmaktadır. Kalınlığın artması, ultrasonik dalgaların ilerleyebilmek için daha fazla yol almasını gerektirmektedir. Bu nedenle artan kalınlıkla birlikte dalgaların ilerleme sürelerinin artması beklenen bir sonuçtur. Ultrasonik hızın ise kalınlıktan bağımsız olarak su emmeye

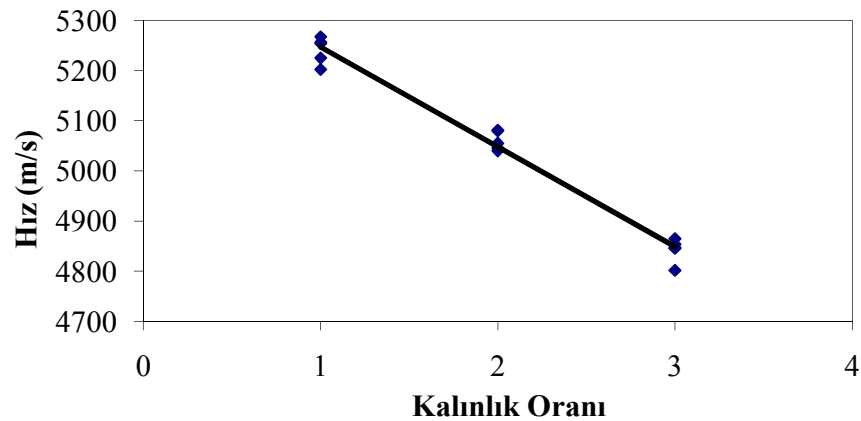
bağlı bir şekilde değişeceği düşünülmüştür. Şekil 6.11 ve 6.14'te kalınlıktaki düşüş ile ultrasonik hızda artış gerçekleştiği görülmektedir. Bu artışın nedeni de üretim sırasında gerçekleşen farklılıklar ile açıklanabilir. Farklı kalınlıkta karolar hazırlayabilmek için pres kalıbına konan granül miktarları değiştirilmiş, ancak presleme basıncı tüm karolar için sabit tutulmuştur. Daha az miktardaki granüller de fazla miktardaki granüllerle aynı basınçta preslenerek şekillendirilmişlerdir. Sinterleme esnasında da tüm karolar aynı şartlarda sinterlenerek eşit miktarda ısı almışlardır. Presleme ve sinterleme esnasında oluşan bu farklılıklar ultrasonik hızın kalınlığa bağlı değişmesine sebep olmuştur.

Çizelge 6.6. Kalınlık oranına bağlı olarak granit karolarda (50 mm X 100 mm) ultrasonik hızın değişimi

Kalınlık oranı (K.O.)	Su emme [#] (%)	Su emme [*] (%)	Ultrasonik süre (ns)	Ultrasonik hız (m/s)
3	0,41±0,05	0,58±0,15	2873,87±18,40	4842,8±24,04
2	0,28±0,03	0,14±0,06	1824,67±8,26	5060,4±19,11
1	0,48±0,13	0,19±0,06	876,93±9,58	5240,8±26,68

*Vakumlu su emme cihazı ölçüm sonuçları

Arşimet yöntemi ile ölçülen değerler



Şekil 6.15. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm granit karolar için ultrasonik dalga hızının kalınlık oranı ile değişimi

Çizelge 6.7. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için deney sonuçları

Kalınlık Oranı	Su emme (%)	Vakumlu Su Emme Cihazı ile Elde edilen Su Emme (%)	15 Süre Değerinin Ortalaması (ns)	15 Hız Değerinin Ortalaması (m/s)	Aynı Kalınlıktaki Karoların Hız Değerlerinin Ortalaması (m/s)
3	3,92	4,84	3662,22	3934,92	3920,86±44,71
	4,26	5,08	3742,22	3877,87	
	3,76	4,70	3631,11	3952,87	
	3,84	4,77	3620	3968,93	
	4,17	5,04	3733,33	3869,73	
2	2,46	3,67	2126,67	4452,41	4471,35±14,69
	2,37	3,60	2102,67	4489,94	
	2,36	3,57	2110,67	4461,32	
	2,31	3,52	2102,67	4475,17	
	2,38	3,65	2100	4477,93	
1	2,35	3,10	1016	4753,38	4757,21±16,96
	2,01	2,92	1008	4775,79	
	2,18	3,14	1014	4766,91	
	2,17	3,09	1020,67	4730,90	
	2,14	2,98	1014	4759,08	

Granit karolar için yapılan deneyler, 50 mm X 100 mm boyutta farklı kalınlıktaki yer karoları için de tekrarlanmıştır. Yer karoları için kalınlık oranına bağlı olarak su emme ve ultrasonik hız değerleri Çizelge 6.7’de verilmektedir. Kalınlık oranına bağlı olarak ultrasonik hızın değişimlerinin ortalaması Çizelge 6.8’de verilmektedir. Sinterleme sıcaklığı daha düşük ve bünye farklı olduğu için granit karolara göre daha gözenekli ve su emmesi fazla ürünler elde edilmiştir. Bu nedenle granit karolar için elde edilen hız değerlerinden daha düşük hız değerleri elde edilmiştir. Ancak granit karolarda da gözlenen kalınlık arttıkça hızın azalması durumu yer karoları için de söz konusudur. Bu durumun nedeni de tüm karoların aynı basınçla preslenmesi ve aynı şartlarda sinterlenmesidir.

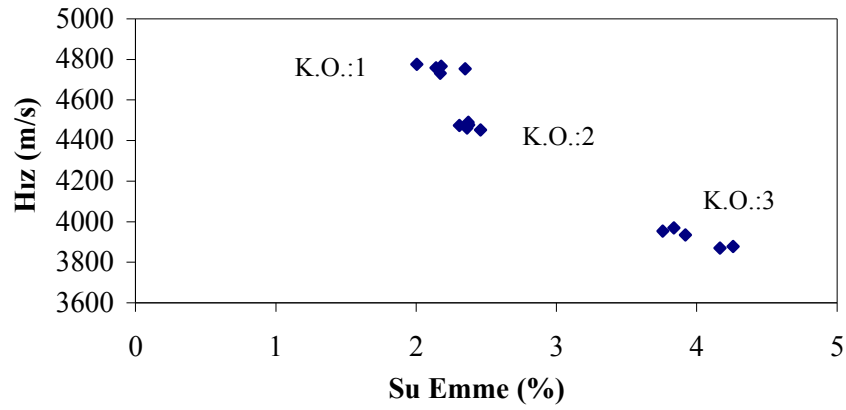
Çizelge 6.8. Kalınlık oranına bağı olarak yer karolarında (50 mm X 100 mm) ultrasonik hızın değışimi

Kalınlık oranı (K.O.)	Su emme [#] (%)	Su emme [*] (%)	Ultrasonik süre (ns)	Ultrasonik hız (m/s)
3	3,99±0,22	4,89±0,17	3677,78±57	3920,86±44,71
2	2,38±0,05	3,60±0,06	2108,53±10,90	4471,35±14,69
1	2,17±0,12	3,05±0,09	1014,53±4,56	4757,21±16,96

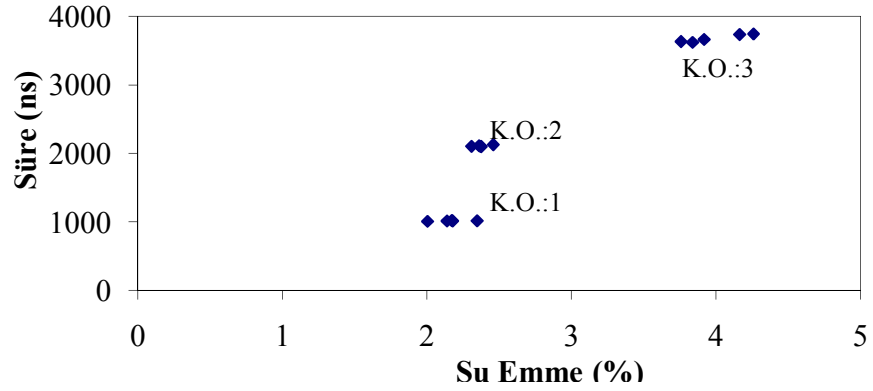
*Vakumlu su emme cihazı ölçüm sonuçları

Arşimet yöntemi ile ölçülen değerler

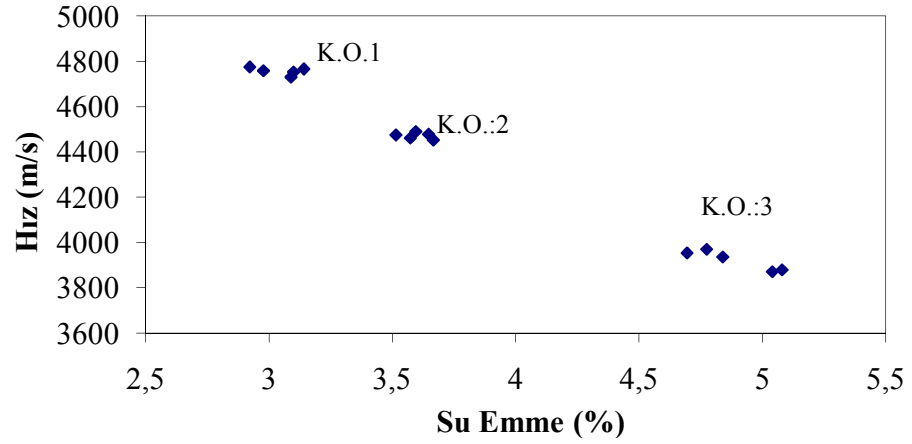
Türk Standartları'na göre belirlenen su emme (%) değerleri ve vakumlu su emme cihazıyla belirlenen su emme (%) değerleri ile ultrasonik dalga hızı ve ultrasonik dalga ilerleme süresinin değışimi eğrileri (Şekil 6.16–5.19) çizilmiştir. Kalınlığa bağı ultrasonik hızın değışim eğrisi Şekil 6.20'de görölmektedir.



Şekil 6.16. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga hızının su emme ile değışimi (K.O.: Kalınlık Oranı)



Şekil 6.17. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)

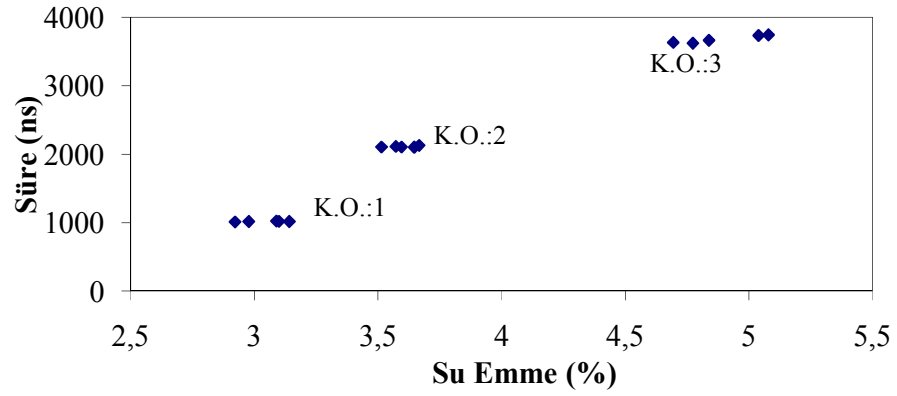


Şekil 6.18. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga hızının vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)

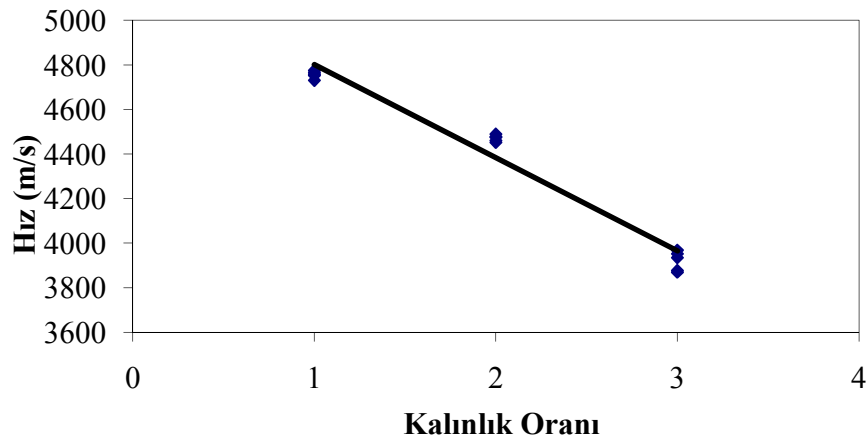
Vakumlu su emme cihazıyla belirlenen su emme (%) değerleri, küçük porlara su girmesini kolaylaştırdığı için Türk Standartları'na göre belirlenen su emme (%) değerlerine göre daha yüksektir. Bu yöntemde, basınç farkı ile oluşan kapiler etki, küçük porlara su dolmasına neden olmaktadır (Reed 1995). Standartlara göre uygulanan yöntemde ise sadece kaynatma yapılmakta ve su küçük porlara girememektedir. Peake ve Ford (1982), tuğlalar için vakumlu su emme yönteminde genellikle daha yüksek su emme (%) değerleri elde edildiğini ancak 5 saat kaynatma testine tabi tutulmuş düşük su emmeli tuğlalarda vakumlu su emme ile elde edilen su emme (%)'lerinden daha yüksek değerler elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte yazarlar, düşük su emmeli

tuğlaların vakumlu su emme testinde bekleme süreleri arttığında su emme'nin de arttığını belirtmişlerdir.

Kalınlık oranı azaldıkça su emme (%) değerleri azalmaktadır. Kalınlığı daha düşük olan numuneler, aynı sıcaklıkta sinterlenen daha kalın numunelere göre daha fazla sinterlenmektedir. Bu nedenle, düşük kalınlıktaki numunelerin su emmeleri (%) daha düşük olmaktadır. Yer karoları, granit bünyelere göre daha gözenekli olduğu için NDT ile ayrımı daha mümkündür. Çünkü su emmeleri arasında belirgin farklar bulunmaktadır. Vakumlu su emme cihazı ile ölçülen su emme (%) -hız ve su emme (%) -süre grafiklerinde, kalınlığa bağlı elde edilen değerlerin kümелendiği görülmektedir.



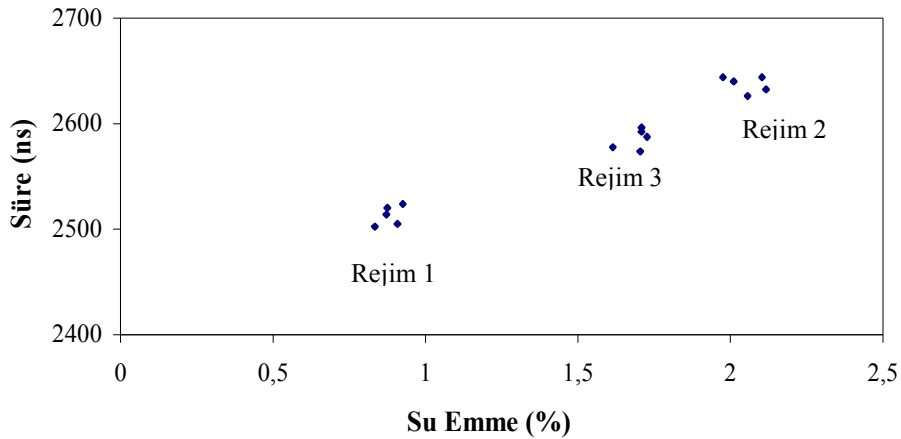
Şekil 6.19. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga ilerleme süresinin vakumlu su emme cihazı ile belirlenen su emme ile değişimi (K.O.: Kalınlık Oranı)



Şekil 6.20. Farklı kalınlıklarda 50 mm X 100 mm yer karoları için ultrasonik dalga hızının kalınlık oranı ile değişimi

6.2.3. Endüstriden temin edilen karoların ultrasonik süre ve hız ölçümleri

Endüstriden temin edilen 200 mm X 200 mm boyutta farklı rejimlerde pişirilen karolar temaslı ultrasonik yöntem ile incelenerek ultrasonik dalgaların ilerleme süresi ölçülmüştür. Ultrasonik dalga ilerleme süresi ölçümleri 17 farklı noktadan gerçekleştirilmiştir. Sinterleme rejimine bağlı olarak yer karolarının su emme, ultrasonik süre, ultrasonik hız analiz sonuçları Çizelge 6.9’da, bu değerlerin ortalamaları Çizelge 6.10’da verilmektedir. Ultrasonik dalgaların ilerleme hızı ve süreleri ile fabrikada belirlenen su emmeye (%) karşı referans eğrilerinin çizilmesi (Şekil 6.21 ve 6.22) gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik hızı hesaplamak için karolar kesilerek kalınlıkları mikrometre ile ölçülmüştür. Su emme değeri (%) arttıkça ultrasonik hız düşmektedir. En yüksek su emmelerin (%) görüldüğü Rejim 2, en düşük ultrasonik hız değerlerine sahiptir. Süre ölçümüne bakılarak rejimlere bağlı olarak ilerleme süresinin su emme (%) ile değişimi görülebilmektedir. Dalga ilerleme süresinin su emme (%) değerleri arttıkça arttığı gözlenmektedir. Bu sonuç, laboratuvar şartlarında üretilen karolarda elde edilen dalga ilerleme süresi-su emme (%) sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.



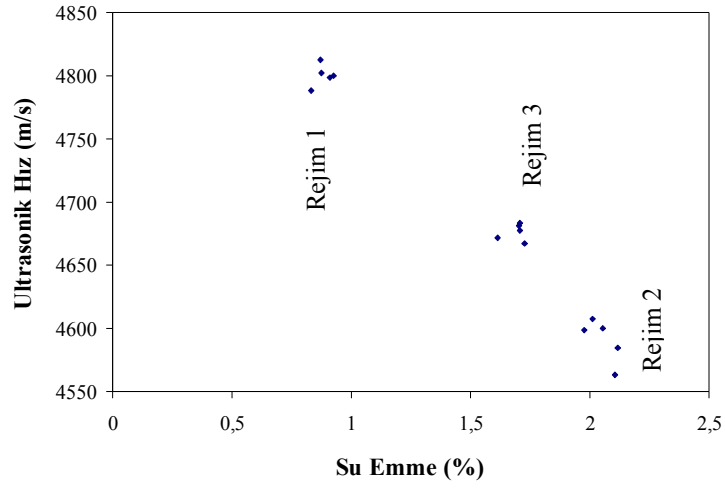
Şekil 6.21. Farklı rejimlerde pişen 200 mm X 200 mm karolar için ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi

Çizelge 6.9. Farklı rejimlerde pişen 200 mm X 200 mm karolar için su emme, ultrasonik süre ve hız sonuçları

Sinterlendiği Rejim	Su Emme (%)	Süre (ns)	Hız (m/s)
Rejim 1	0,925	2512,94	4799,66
Rejim 1	0,833	2497,65	4787,78
Rejim 1	0,909	2496,47	4798,75
Rejim 1	0,871	2508,24	4812,73
Rejim 1	0,875	2512,941	4802,42
Rejim 2	2,056	2616,47	4600,24
Rejim 2	2,011	2629,41	4607,32
Rejim 2	2,104	2630,59	4563,25
Rejim 2	1,976	2632,94	4598,62
Rejim 2	2,116	2624,71	4584,39
Rejim 3	1,709	2589,41	4677,58
Rejim 3	1,614	2570,59	4671,75
Rejim 3	1,705	2570,59	4681,57
Rejim 3	1,727	2580,00	4667,27
Rejim 3	1,708	2583,53	4683,45

Çizelge 6.10. Sinterleme rejimine bağlı olarak yer karolarının (200 mm X 200 mm) su emme, ultrasonik süre, ultrasonik hız analiz sonuçlarının ortalamaları

Sinterlendiği Rejim	Su emme (%)	Ultrasonik süre (ns)	Ultrasonik hız (m/s)
Rejim 1	0,88±0,04	2505,65±8,08	4800,27±8,92
Rejim 2	2,05±0,06	2626,82±6,52	4590,77±17,49
Rejim 3	1,69±0,05	2578,82±8,24	4676,32±6,76

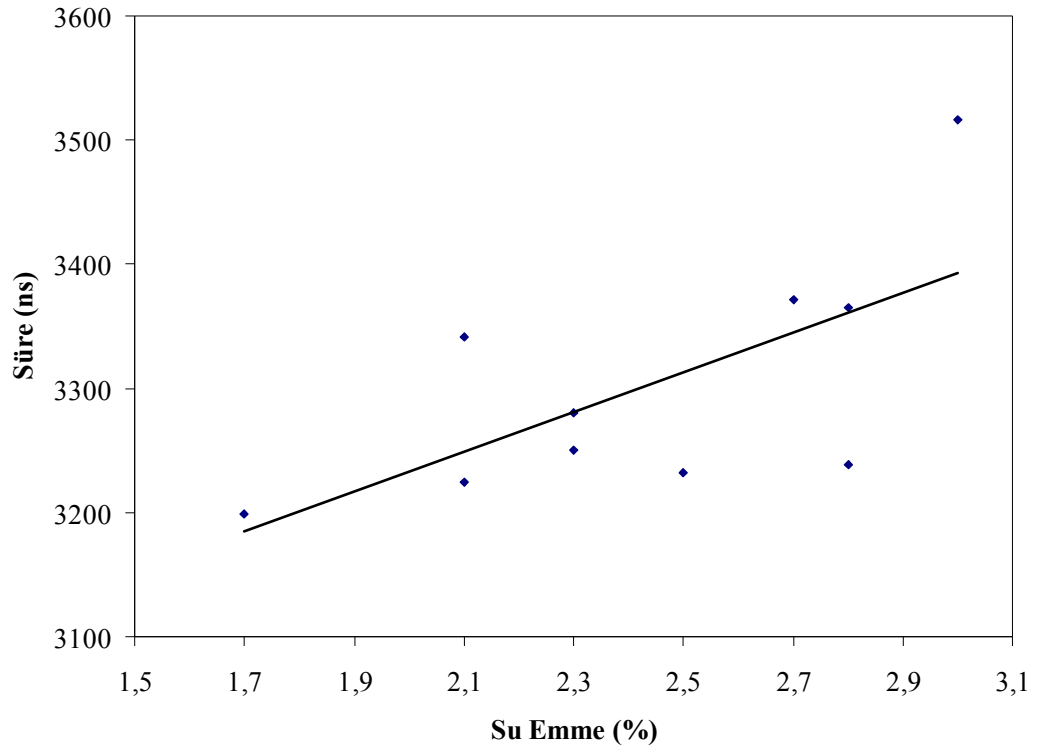


Şekil 6.22. Farklı rejimlerde pişen 200 mm X 200 mm karolar için ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi

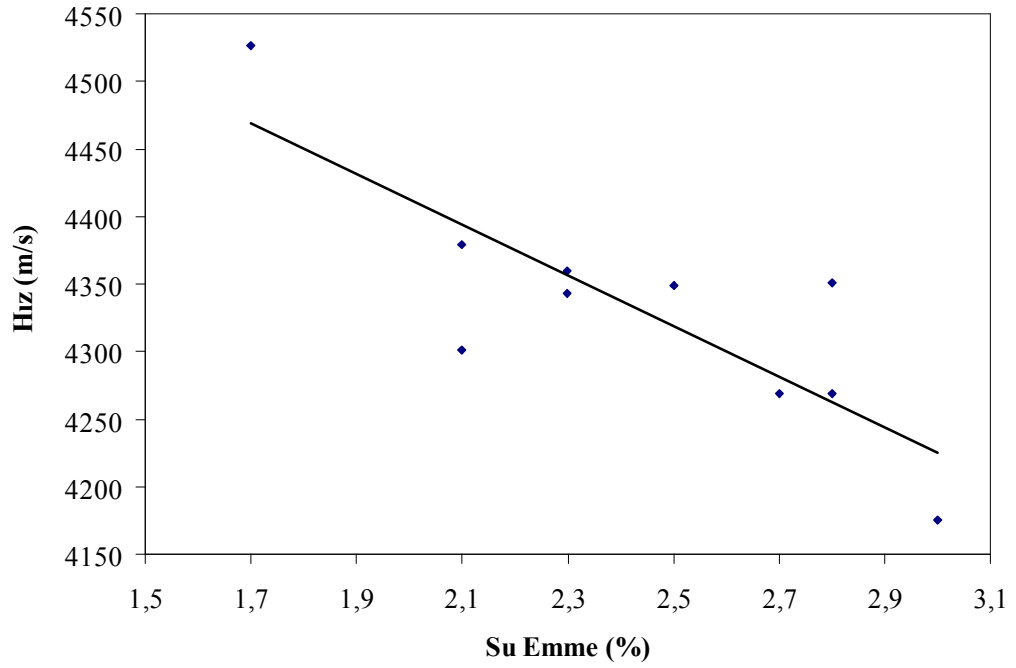
Endüstriden temin edilen 300 mm X 300 mm ve 330 mm X 330 mm boyutta farklı su emmelerde karolar temaslı ultrasonik yöntem ile incelenerek ultrasonik dalgaların ilerleme süresi ölçülmüştür (Çizelge 6.11). Ultrasonik dalga ilerleme süresi ölçümleri 10 noktadan gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik dalgaların ilerleme süreleri ve hızı ile fabrikada belirlenen su emmeye (%) karşı referans eğrileri çizilmiştir (Şekil 6.23-6.26). Ultrasonik hızı hesaplamak için karolar kesilerek kalınlıkları mikrometre ile ölçülmüştür. Su emme (%) değerinin artmasına bağlı olarak hem yer karoları, hem de granitler için ultrasonik dalga ilerleme süresi artmakta, ultrasonik hız ise azalmaktadır.

Çizelge 6.11. Endüstriden temin edilen karoların su emme ve dalga ilerleme süresi sonuçları

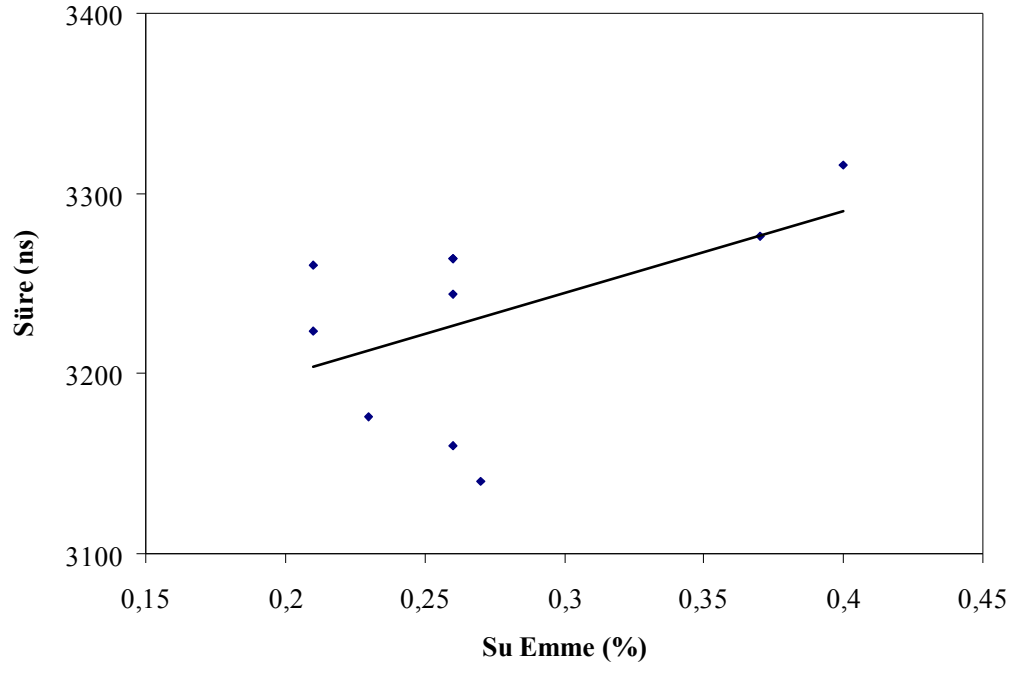
Karolar	No	Su emme (%)	Süre (ns)	Hız (m/s)
Yer Karosu 300mmx300mm	8	3	3516,67	4175,69
	7	2,1	3341,67	4301,35
	6	2,7	3371,67	4269,17
	10	2,5	3231,67	4349,17
	12	2,1	3225	4379,03
	11	2,8	3238,33	4350,57
Yer Karosu 330mmx330mm	1	2,3	3280	4359,59
	2	2,8	3365	4268,76
	3	2,3	3250	4343,65
	16	1,7	3198,33	4526,79
Granit 330mmx330mm	17	0,21	3260	4519,26
	14	0,27	3140	4537,89
	15	0,23	3176	4591,59
	13	0,26	3160	4603,73
	20	0,26	3264	4457,62
	5	0,21	3224	4496,44
	19	0,4	3316	4450,88
	18	0,37	3276	4405,92
	9	0,26	3264	4473,78
	4	0,26	3244	4457,71



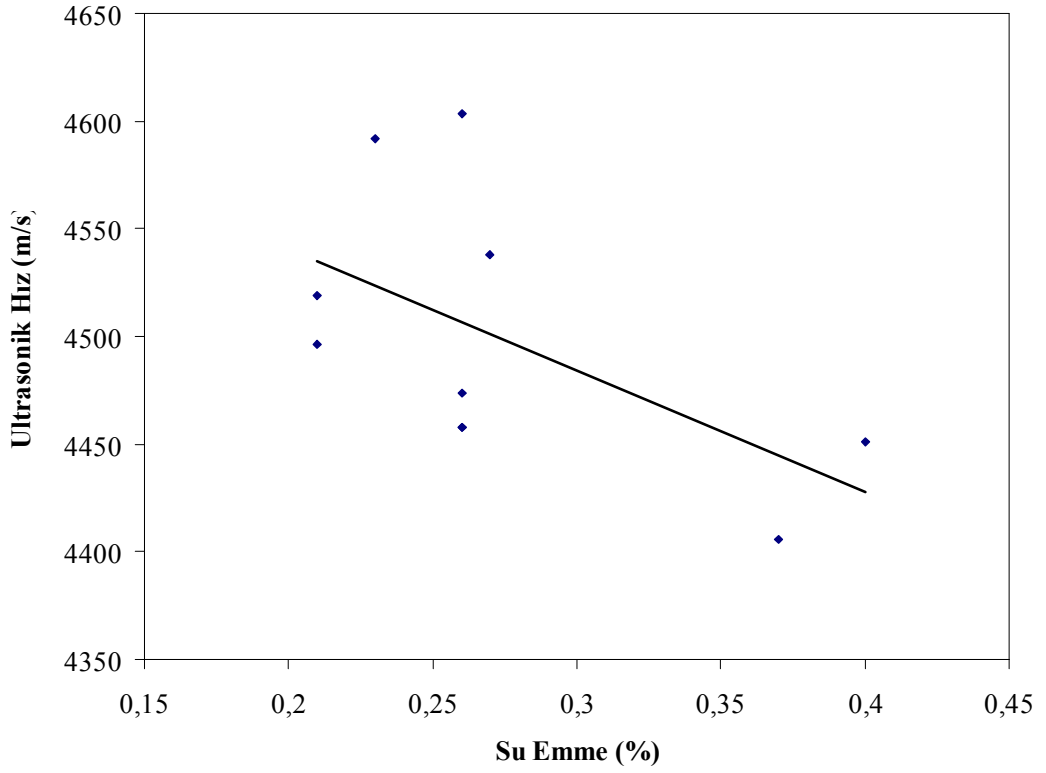
Şekil 6.23. Yer karolarının ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi



Şekil 6.24. Yer karolarının ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi



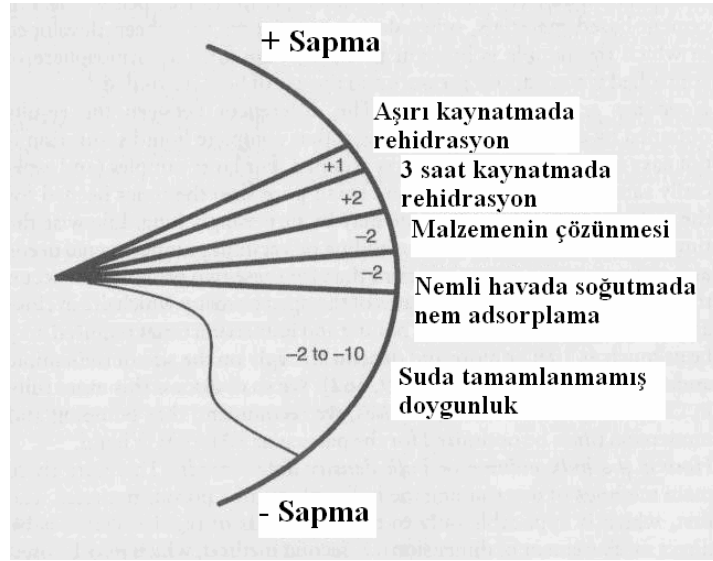
Şekil 6.25. Granit karolarda ultrasonik dalga ilerleme süresinin su emme ile değişimi



Şekil 6.26. Granit karolarda ultrasonik dalga hızının su emme ile değişimi

Çizelge 6.12. Granitlerin su emme (%) sonuçları

Karo	Fabrika koşullarında belirlenen su emme (%)	Seramik Araştırma Merkezi laboratuvarında belirlenen su emme (%)
4	0,26	0,34
5	0,21	0,20
9	0,26	0,30
13	0,26	0,24
14	0,27	0,30
15	0,23	0,23
17	0,21	0,21
18	0,37	0,29
19	0,40	0,45
20	0,26	0,35



Şekil 6.27. Tuğlaların su emmesi (%)’sinin kaynatma metodu ile belirlenmesinde görülen hataların analizi (Washburn ve Footitt 1921)

Seçilen 8 adet granit karonun su emme (%) değerleri çok dar bir aralıkta değişmekte olup (% 0,21–0,27), bu değişim de karoların ultrasonik olarak ayrılmasını güçleştirmektedir. Granit karoların su emme (%)’leri Seramik Araştırma Merkezi’nde tekrar ölçülmüş (Çizelge 6.12), ortam şartlarına göre test sonuçlarının değiştiği görülmüştür. Washburn ve Footitt (1921), tuğlanın su emme

(%)’sinin kaynatma yöntemi ile belirlenmesini araştırmışlar ve hata yüzdesini ortaya koymuşlardır (Şekil 6.27). Bu araştırmada, numunenin testin başlangıcındaki kuru hali ve su ile temas süresine dikkat çekmişlerdir.

6.3. Fleksimetre ile Piroplastik Deformasyonun Belirlenmesi

Hazırlanan karoların deforme olmadan sinterlenmesi için granüllerin deformasyonlarının belirlenmesi gerekmektedir. Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında bulunan Misura ODLT temassız optik fleksimetre cihazında analizler gerçekleştirilmiştir. Piroplastik deformasyon sabitleri de elde edilen analiz sonuçlarına göre Denklem 5.7 kullanılarak hesaplanmıştır. Standart granit bünyesi ve Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünyesi için piroplastik deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Standart granit bünyesi için çizilen piroplastik deformasyon eğrisi Şekil 6.28’de, Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünyesi için çizilen piroplastik deformasyon eğrisi Şekil 6.29’da görülmektedir. Hazırlanan granit bünyeler için fleksimetre ölçüm sonuçları, Çizelge 6.13’te verilmektedir. Piroplastik deformasyon sıcaklığı standart granit bünye için 1219°C, Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünyesi için 1195°C’dir. Ancak Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünyesinin piroplastik deformasyon sabiti, piroplastik deformasyon sıcaklığı standart granit bünyeye göre daha düşük bir sıcaklık olmasına rağmen standart granit bünyenin piroplastik deformasyon sabitinin iki katıdır. Bu nedenle yapılan pişirimlerde Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünyesi 1195°C’nin 5°C üzerindeki sıcaklıklarda sinterlenmiş, çok daha yüksek sıcaklıklara çıkılmamıştır.

Çizelge 6.13. Granit bünyeler için fleksimetre ölçüm sonuçları

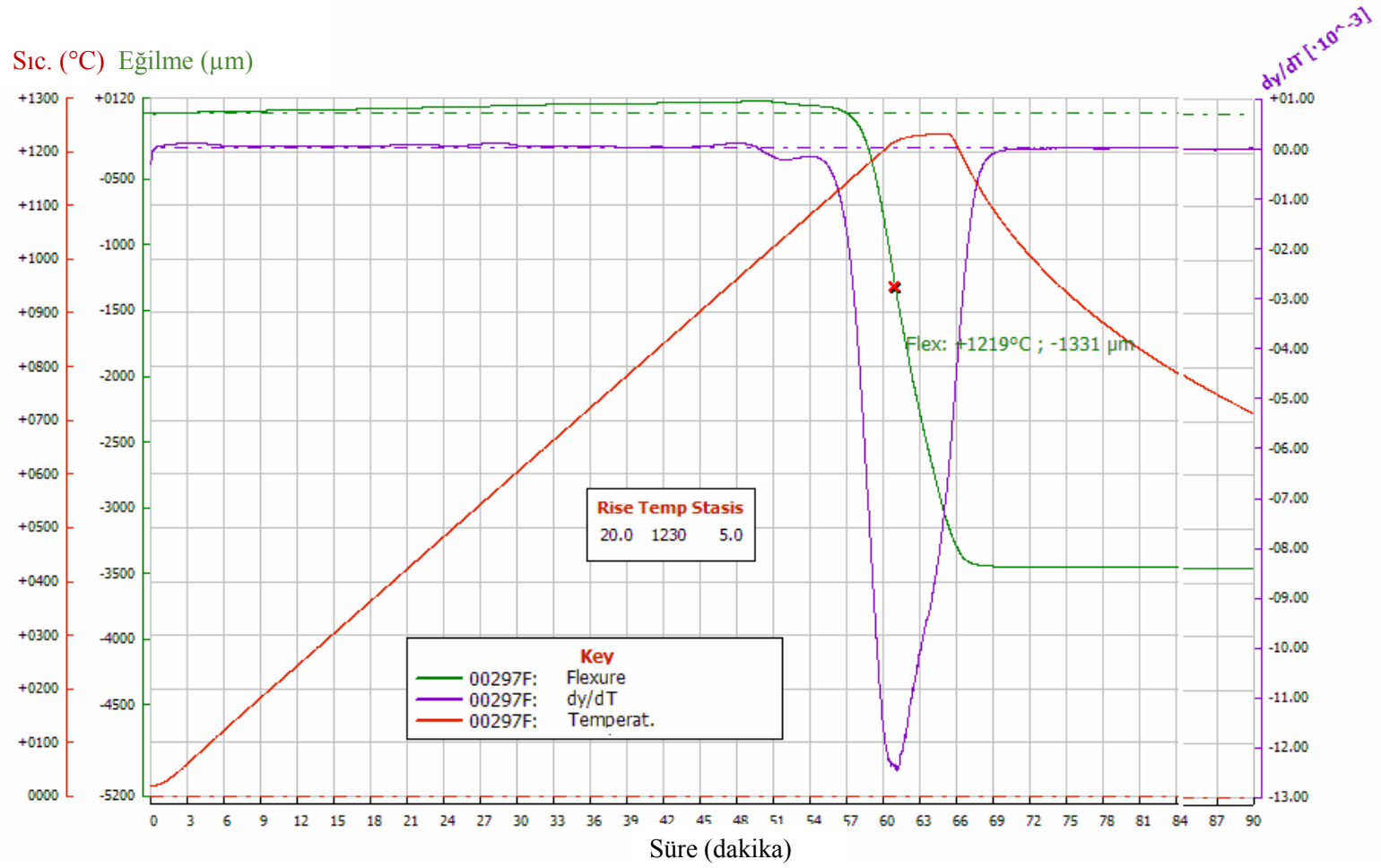
	Kalınlık (cm)	Destekler arası mesafe (cm)	Piroplastik deformasyon sıcaklığı (°C)	Maksimum deformasyon (cm)	Piroplastik deformasyon sabit (cm ⁻¹)
Standart granit bünye	0,51	7	1219	0,1331	1,4x10 ⁻⁵
Graniser granit bünye	0,531	7	1195	0,2347	2,8x10 ⁻⁵

6.4. Civa Porozimetresi ile Por Boyutunun Belirlenmesi

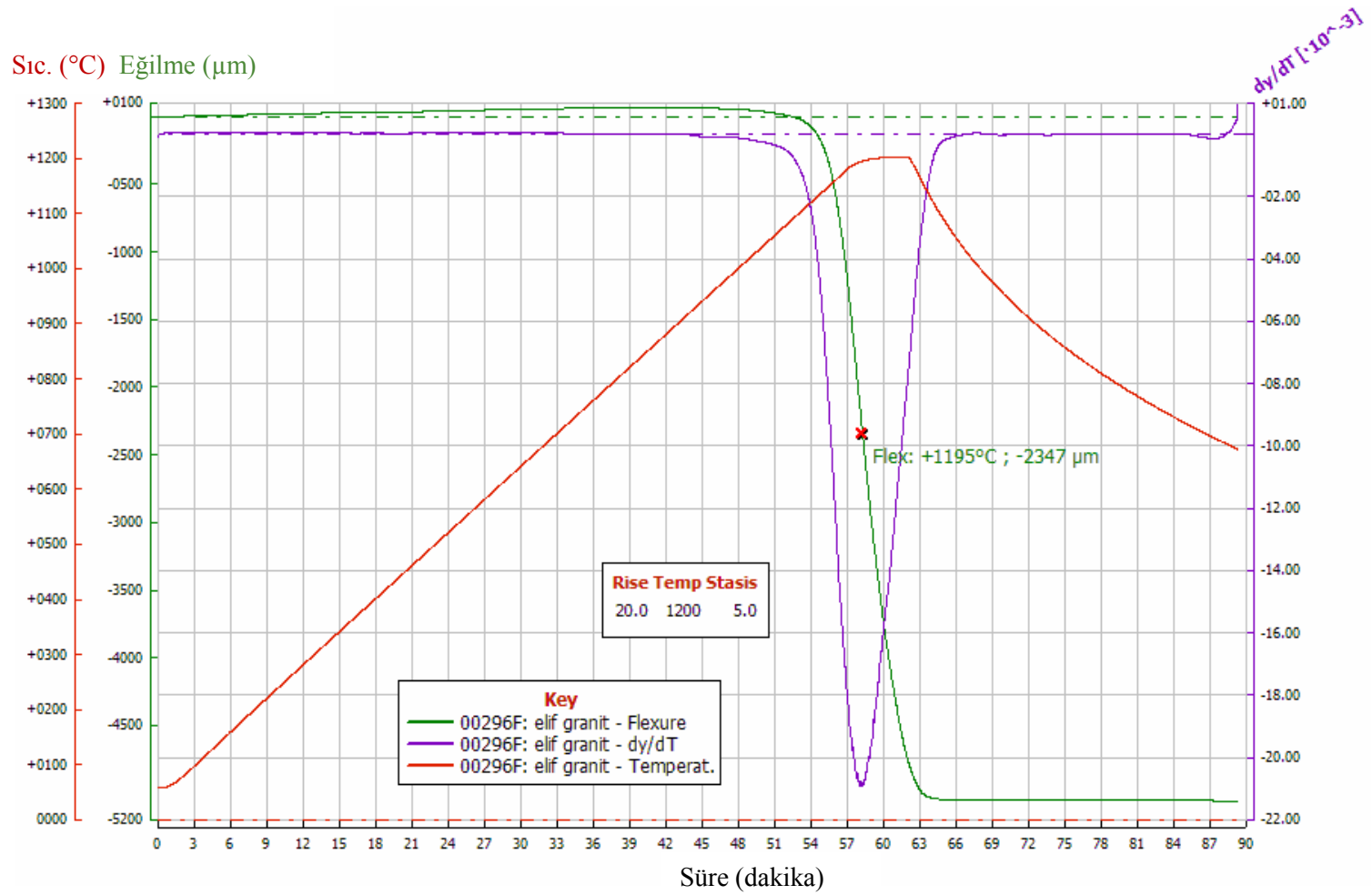
Civa porozimetresi, numune hücrelerini tam dolduramadığı için yoğunluk ve porozite yüzdesi belirlenememiştir.

Ortalama por çapının sıcaklıkla değişimi Çizelge 6.14’te görülmektedir. En çok yoğunlaşma sinterlemenin ara evresinde görülmektedir. Bu evrede malzeme taşınımı gerçekleşirken porlar da yapı içinde tane kenarlarında birbirlerine bağlı kanallar oluştururlar (Rahaman 2003). 1170°C’ye kadar gerçekleşen por çapındaki artışın oluşan bu kanallara bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. 1170°C’den sonra gerçekleşen por çapındaki düşüşün ise sinterlemenin en son evresinde yoğunlaşmanın bir sonucu olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Por çapındaki bu düşüşün nedeni tanelerin sıvı faz yardımı ile porun bulunduğu bölgelere taşınmasıdır (Rahaman 2003).

Civa porozimetresi sadece açık gözenek dağılımını ölçmektedir. Ancak ultrasonik hız, açık ve kapalı bütün gözeneklere bağlı değişmektedir. Bu nedenle civa porozimetresi ile ölçülen por boyutu ile ultrasonik hız arasında bir ilişki yoktur.



Şekil 6.28. Standart granit bünyesi için piroplastik deformasyon eğrisi



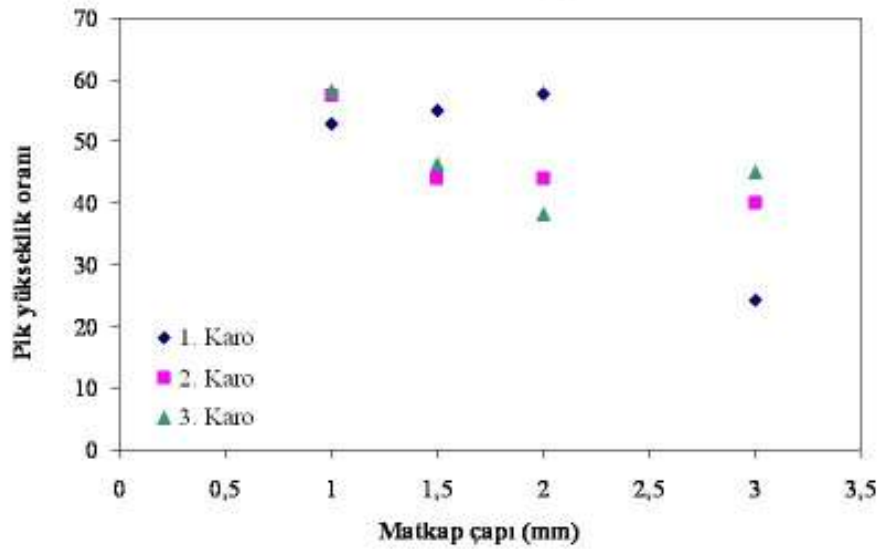
Şekil 6.29. Graniser Granit ve Seramik San. Tic. A.Ş. granit bünyesi için piroplastik deformasyon eğrisi

Çizelge 6.14. Ortalama por çapının fırın tepe sıcaklıkları ile değişimi

Sıcaklık (°C)	Ortalama por çapı (µm)
1150	0,423±0,038
1160	0,458±0,052
1170	0,507±0,010
1180	0,397±0,068
1190	0,306±0,056
1200	0,273±0,021
1210	0,229±0,045
1220	0,105±0,017
1230	0,044±0,035

6.5. Ultrasonik Pik Şiddetlerinin Ölçülmesi

50 mm X 100 mm boyutta hazırlanan granit karolar matkap uçlarıyla el ile, 450 mm X 450 mm ebatlarında granit karonun parçaları ise matkap uçları tutaca takılarak delinmiştir. Ultrasonik cihaz ile elde edilen sinyallerin karodan çıkış piklerinin yükseklikleri 50 mm X 100 mm boyuttaki karolar için Çizelge 6.15’te, 450 mm X 450 mm boyuttaki karolar için Çizelge 6.16’da verilmektedir.



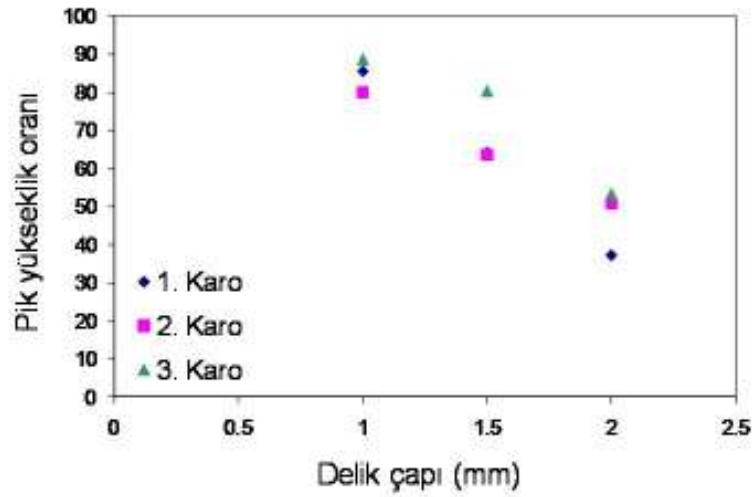
Şekil 6.30. 50 mm X 100 mm boyutta delikli granit karolar için matkap çapına göre ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin oranındaki değişim

Çizelge 6.15. 50 mm X 100 mm boyutta delikli granit karolar için ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin yüksekliklerindeki değişim

Karo	Matkap çapı (mm)	Hatasız bölge pik yüksekliği (V)	Hatalı bölge pik yüksekliği (V)	Hatalı b. p. yüksekliğinin hatasız b. p. yüksekliğine yüzdesel oranı
1	1	8,64	4,56	52,77
	1,5	16	8,8	55
	2	25	14,4	57,6
	3	17,4	4,20	24,13
2	1	8,64	4,96	57,41
	1,5	12	5,28	44
	2	16,8	7,4	44,05
	3	19	7,6	40
3	1	4,4	2,56	58,18
	1,5	16	7,4	46,25
	2	24,6	9,4	38,21
	3	12	5,4	45

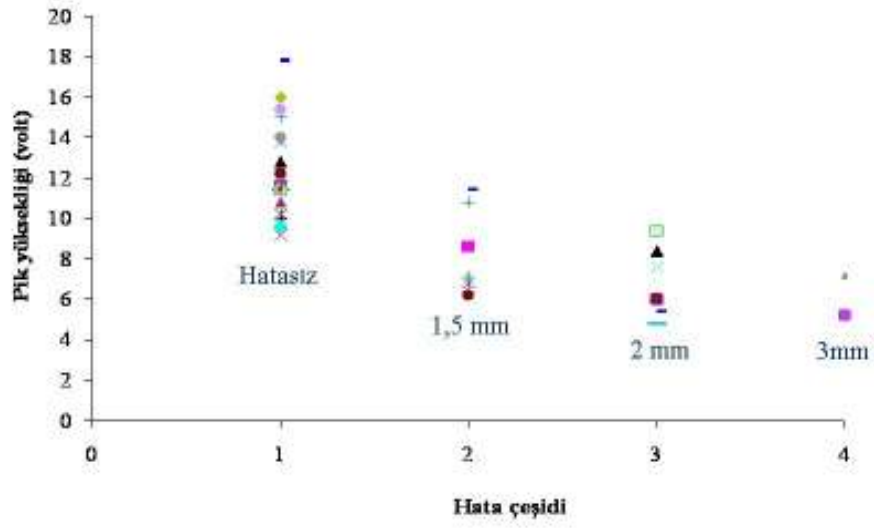
Çizelge 6.16. 450 mm X 450 mm boyutta delikli granit karolar için ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin yüksekliklerindeki değişim

Karo	Matkap çapı (mm)	Hatasız bölge pik yüksekliği (V)	Hatalı bölge pik yüksekliği (V)	Hatalı b. p. yüksekliğinin hatasız b. p. yüksekliğine yüzdesel oranı
1	1	12,6	10,8	85,71
	1,5	16,8	10,8	64,28
	2	16,6	6,2	37,35
2	1	12	9,6	80
	1,5	13,2	8,4	63,64
	2	10,6	5,4	50,94
3	1	16	14,2	88,75
	1,5	9,2	7,4	80,43
	2	14,6	7,8	53,42

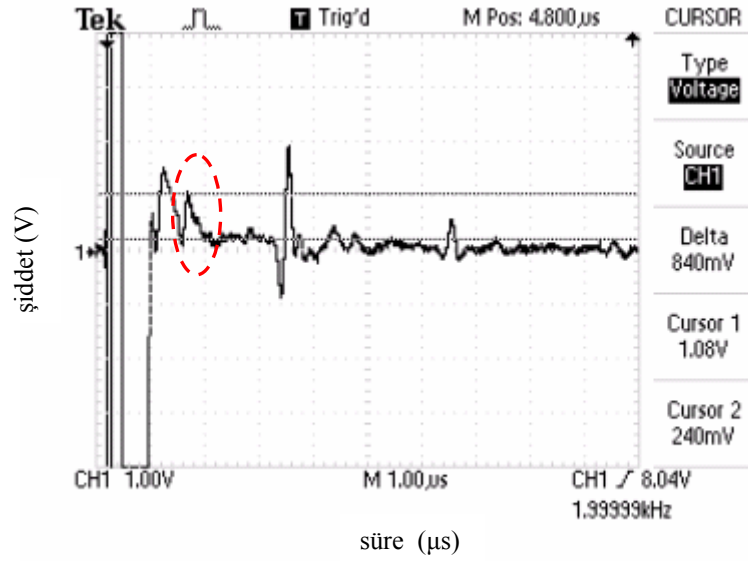


Şekil 6.31. 450 mm X 450 mm boyutta delikli granit karolar için matkap çapına göre ultrasonik dalgaların karodan çıkış piklerinin oranındaki değişim

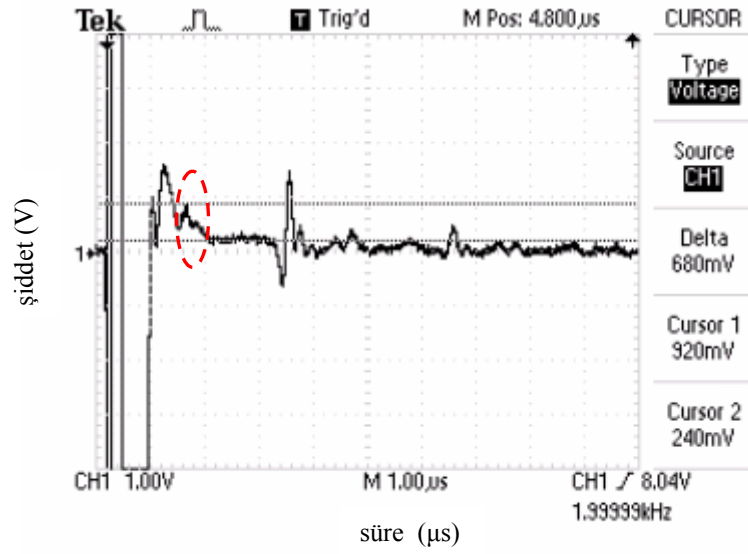
330 mm X 330 mm'lik granit karolar için 32 hatasız noktadan ölçülen ultrasonik dalgaların karodan çıkış pik yükseklikleri $12,07 \pm 2,12$ voltur. Açılan 3 büyük deliğin ortalama karodan çıkış pik yükseklikleri $5,87 \pm 1,15$ volt; 11 orta boy deliğin ortalama karodan çıkış pik yükseklikleri $6,67 \pm 1,39$ volt; 7 küçük deliğin ortalama karodan çıkış pik yükseklikleri $8,29 \pm 2,07$ voltur (Şekil 6.32). Hatanın boyutu arttıkça iletilen ultrasonik dalgaların enerji miktarı azalmaktadır. Oluşan hataların ultrasonik pik yükseklikleri ise hata boyutu arttıkça artmaktadır. Şekil 6.33'te 330 mm X 330 mm'lik granit karonun 3 mm'lik matkap ucuyla delinen bölgesinden alınan sinyallerin voltaj değerleri görülmektedir. Hata pikinin şiddeti 840 milivoltur. 2 mm'lik matkap ucuyla delinen bölgede hata pikinin şiddeti 680 milivolt (Şekil 6.34), 1,5 mm'lik matkap ucuyla delinen bölgede ise hata pikinin şiddeti ise 440 milivoltur (Şekil 6.35).



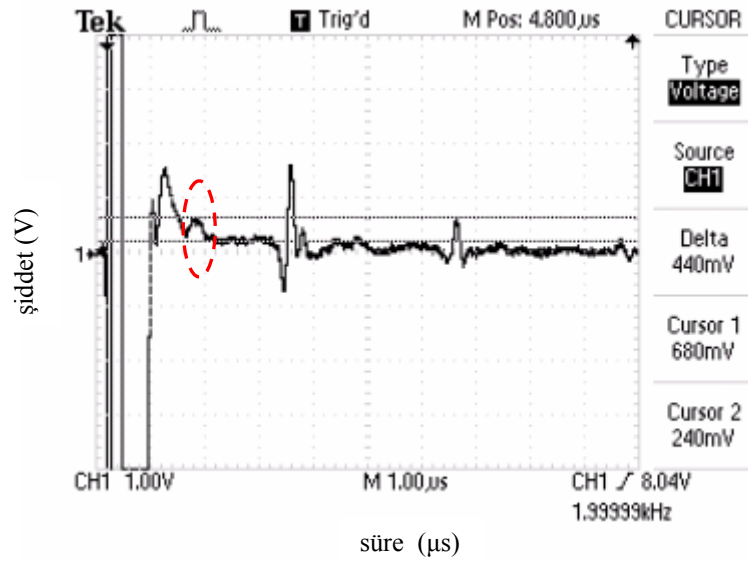
Şekil 6.32. 330 mm X 330 mm granit karolar için matkap çapına göre ultrasonik dalgaların karodan çıkış pik yüksekliklerinin değişimi (1: Hatasız karo, 2: 1,5 mm matkap ucuyla delinen, 3: 2 mm matkap ucuyla delinen, 4: 3 mm matkap ucuyla delinen)



Şekil 6.33. 330 mm X 330 mm'lik granit karonun 3 mm'lik matkap ucuyla delinen bölgesi için sinyallerin voltaj değerleri



Şekil 6.34. 330 mm X 330 mm’lik granit karonun 2 mm’lik matkap ucuyla delinen bölgesi için sinyallerin voltaj değerleri



Şekil 6.35. 330 mm X 330 mm’lik granit karonun 1,5 mm’lik matkap ucuyla delinen bölgesi için sinyallerin voltaj değerleri

6.6. Helyum Piknometresi ile Yoğunluk Ölçümü

He piknometresi ile teorik yoğunluk ölçümü için standart granit bünye granülleri ile hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen (1150–1230°C arasında 10°C’lik artışlarla) 50 mm X 100 mm karolar kullanılmıştır.

Denklem 5.6 ile toplam porozite (%) hesaplamalarında Arşimet metoduyla belirlenen yığinsal yoğunluk ve He piknometresiyle belirlenen teorik yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Toplam poroziteden (%), Arşimet metoduyla belirlenen görünen porozite (%) değerlerinin çıkartılması ile kapalı porozite (%) hesabı yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak yığinsal yoğunluk, teorik yoğunluk, toplam porozite, görünen porozite, kapalı porozitedeki değişimi Çizelge 6.17’de verilmektedir. Artan sıcaklıkla sinterleme artmakta ve yığinsal yoğunluklarda artış gerçekleşmektedir. Seramik malzemelerin yoğunluğu, malzemeyi oluşturan fazların oranlarına ve yoğunluklarına bağlıdır. Kuvarsın yoğunluğu $2,65 \text{ g/cm}^3$ iken, camsı silikanın ise $2,20 \text{ g/cm}^3$ ’tür (Reed 1995). Kristal faz oranı da yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça azalmakta, camsı faz oranı ise artmaktadır. Artan sıcaklık ile daha fazla kristal camsı faza geçmekte ve teorik yoğunluklar azalmaktadır.

Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolar için yığinsal yoğunluk, teorik yoğunluk ve toplam porozitenin hız ile değişimi Çizelge 6.18’de verilmektedir.

Çizelge 6.17. Fırın tepe sıcaklığına bağlı olarak yığinsal yoğunluk, teorik yoğunluk, toplam porozite, görünen porozite ve kapalı porozitedeki değişim

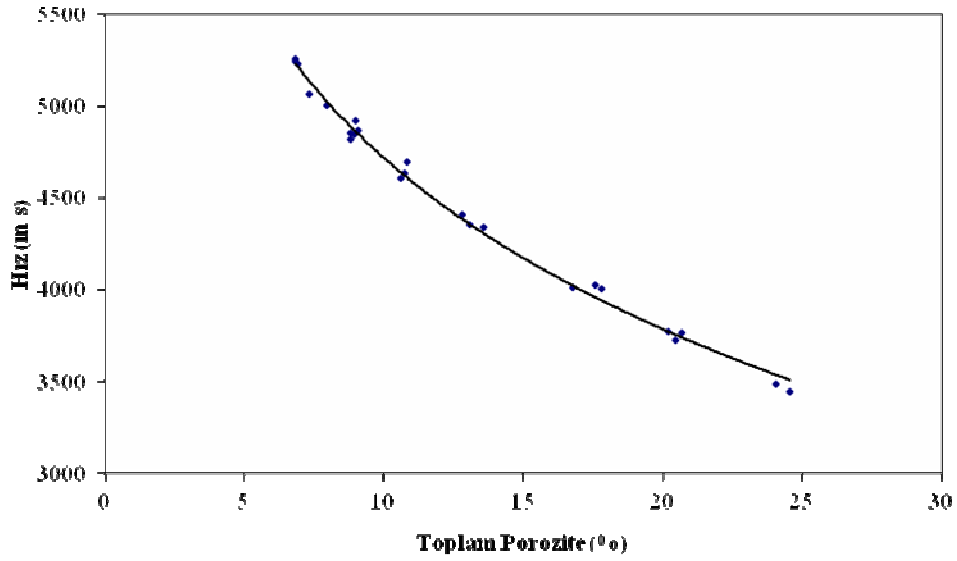
Sıcaklık (°C)	Yığinsal yoğunluk (g/cm ³)	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Toplam porozite (%)	Görünen porozite (%)	Kapalı porozite (%)
1150	2,07±0,0003	2,58±0,008	24,29±0,37	17,67±0,09	6,62±0,28
1160	2,13±0,002	2,57±0,005	20,43±0,26	14,55±0,09	5,89±0,24
1170	2,18±0,003	2,56±0,008	17,37±0,54	11,65±0,15	5,76±0,40
1180	2,25±0,005	2,54±0,004	13,14±0,38	7,43±0,26	5,71±0,23
1190	2,28±0,002	2,53±0,002	10,74±0,11	4,84±0,08	5,90±0,19
1200	2,31±0,004	2,52±0,002	8,91±0,11	3,18±0,55	5,99±0,30
1210	2,31±0,0002	2,51±0,004	8,93±0,18	2,74±0,35	6,19±0,53
1220	2,33±0,004	2,50±0,005	7,63±0,43	1,15±0,36	6,49±0,07
1230	2,33±0,005	2,49±0,006	6,86±0,04	0,35±0,03	6,51±0,06

Ultrasonik dalga hızının toplam porozite ile değişimi Şekil 6.36’da, teorik yoğunlukla değişimi Şekil 6.37’de verilmektedir. Artan sıcaklıkla sinterleme artmakta, yığinsal yoğunluklarda artış ve toplam gözenekliliklerde (%) düşüş

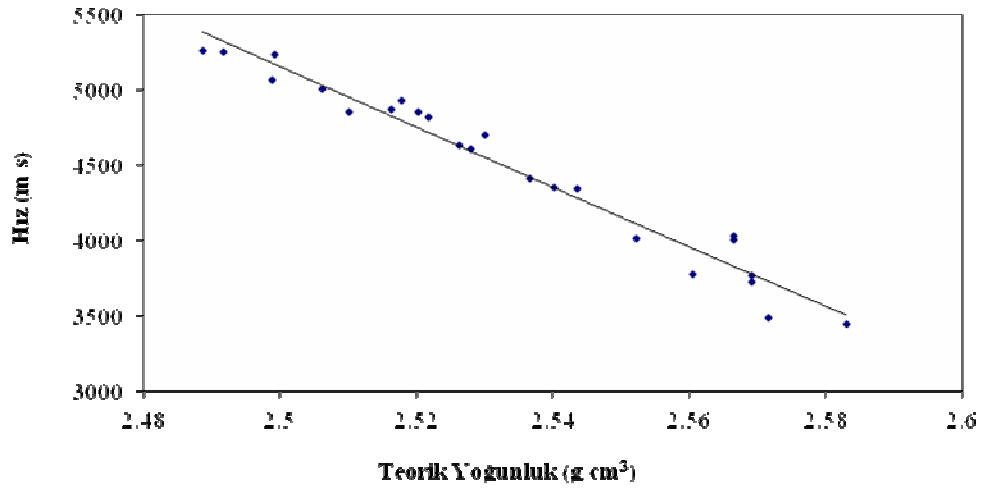
gerçekleşmektedir (Şekil 6.38). Her sıcaklık değerinde % 100 yoğunlaşma için gerekli olan teorik yoğunluklar ise sıcaklıkla azalmaktadır.

Çizelge 6.18. Farklı tepe sıcaklıklarına bağlı olarak yığınsal yoğunluk, teorik yoğunluk, toplam porozitenin hız ile değişimi

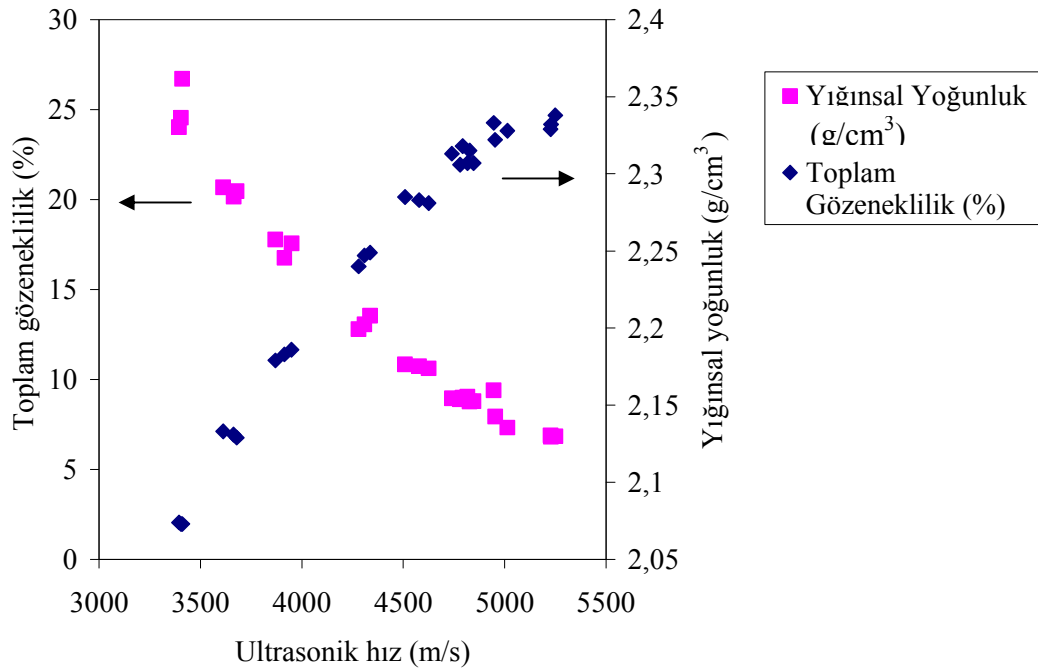
Sıcaklık (°C)	Yığınsal yoğunluk (g/cm ³)	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Toplam porozite (%)	Hız (m/s)
1150	2,07±0,0003	2,58±0,008	24,29±0,37	3433,0±33,70
1160	2,13±0,002	2,57±0,005	20,43±0,26	3726,0±35,55
1170	2,18±0,003	2,56±0,008	17,37±0,54	4000,4±32,69
1180	2,25±0,005	2,54±0,004	13,14±0,38	4358,4±39,56
1190	2,28±0,002	2,53±0,002	10,74±0,11	4634,8±31,68
1200	2,31±0,004	2,52±0,002	8,91±0,11	4787,1±43,78
1210	2,31±0,0002	2,51±0,004	8,93±0,18	4814,6±33,06
1220	2,33±0,004	2,50±0,005	7,63±0,43	4971,1±37,16
1230	2,33±0,005	2,49±0,006	6,86±0,04	5256,4±31,92



Şekil 6.36. Ultrasonik dalga hızının toplam porozite (%) ile değişimi



Şekil 6.37. Ultrasonik dalga hızının teorik yoğunluk ile değişimi



Şekil 6.38. Ultrasonik dalga hızının yığınsal yoğunluk ve toplam gözeneklilik ile değişimi

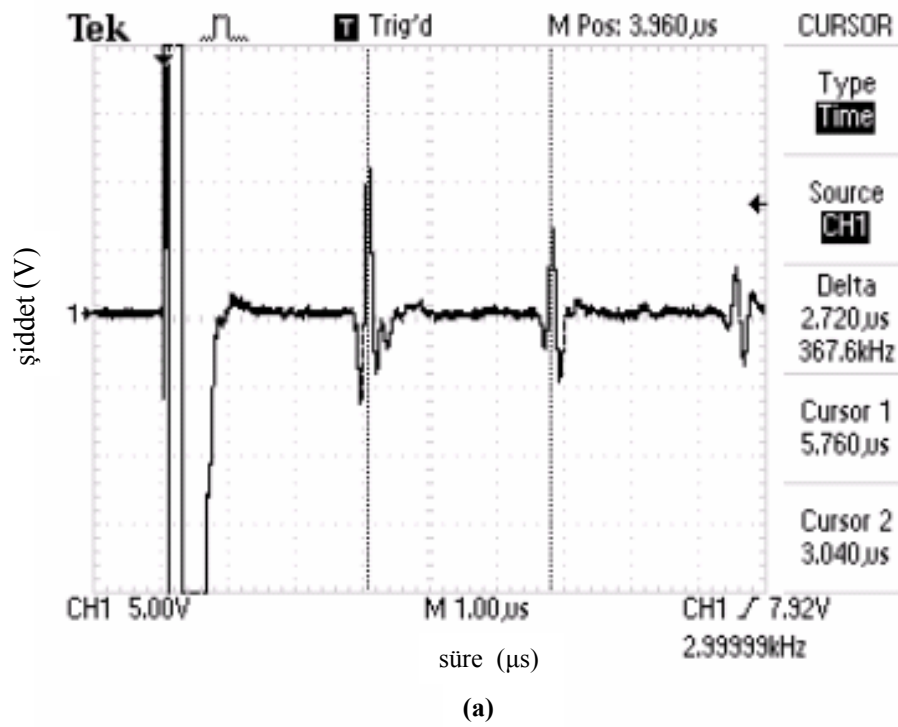
6.7. Hatalı Karoların Ultrasonik A-tarama ile İncelenmesi

Hatalar, preslenecek granüllerin miktarsal olarak yarısı pres kalıbına doldurulduktan sonra yerleştirilmiş ve granüllerin kalan kısmı üzerine ilave edilmiştir. Sinterlenen karolar boyuna ultrasonik dalgalarla 5 MHz'lik normal

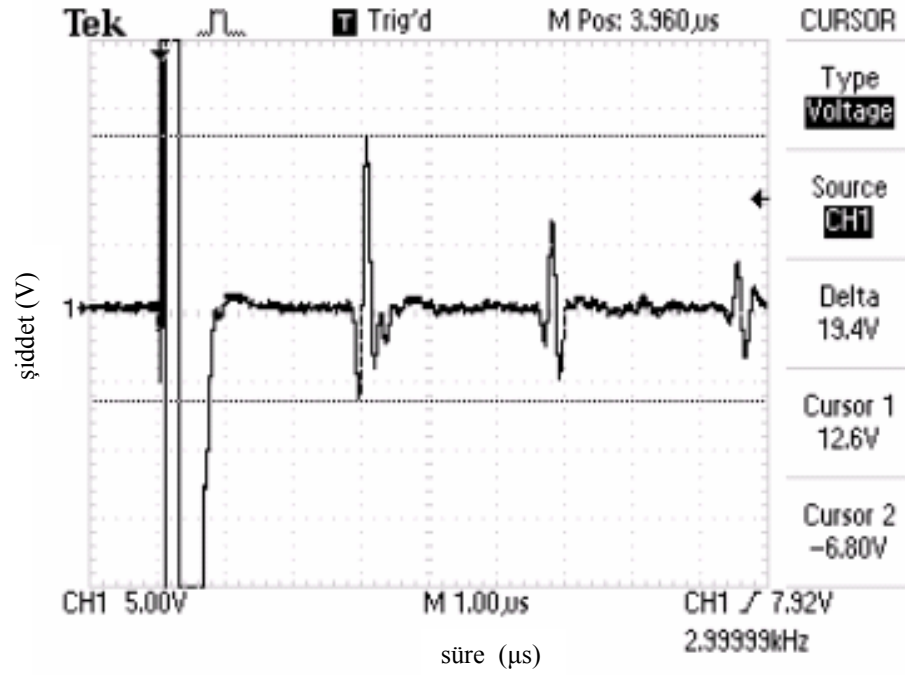
prob kullanılarak incelenmiştir. Yapılan ultrasonik A-tarama kalınlık boyunca çizgi incelemesi yapmayı sağlamaktadır. Hatalı karolar için şiddet-dalga ilerleme süresi grafikleri çizilmiştir.

6.7.1. Safsızlık şeklindeki hatalar

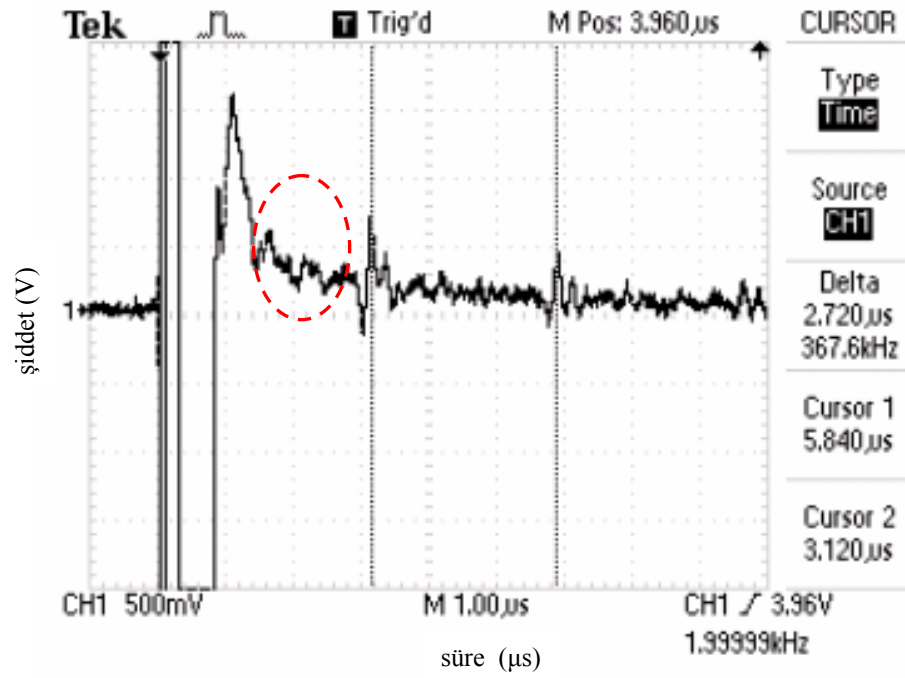
Farklı çaplarda seramik ve metal bilyeler kullanılarak Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş. granülleriyle hatalı karolar üretilmiştir.



Şekil 6.39. (a), (b) hatasız bölge için, (c), (d) 5 mm çapta ZrO₂ bilye içeren bölge için, (e), (f) 3mm çapta ZrO₂ bilye içeren bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi ve voltaj değerleri

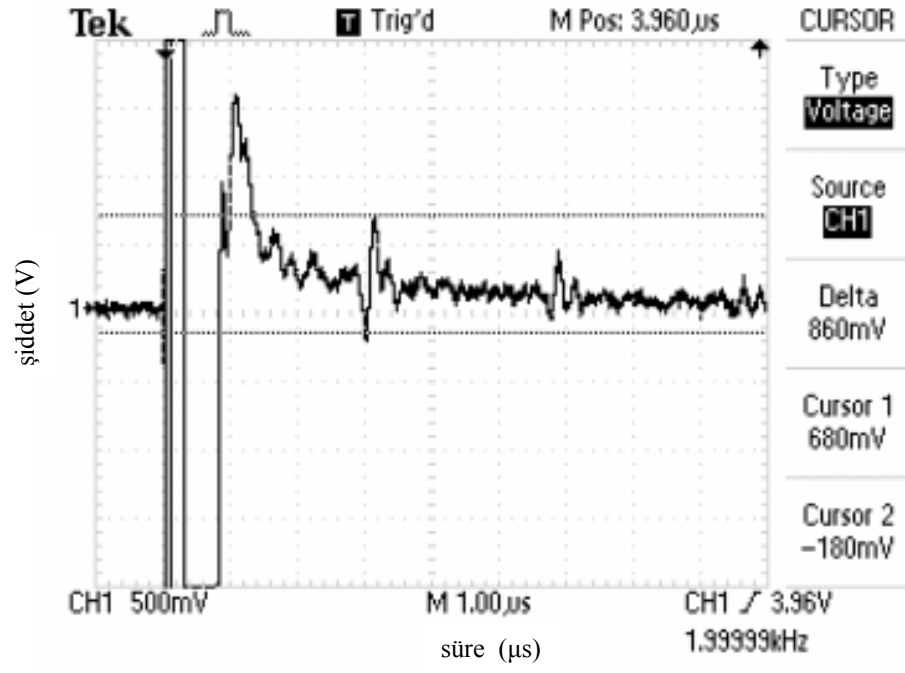


(b)

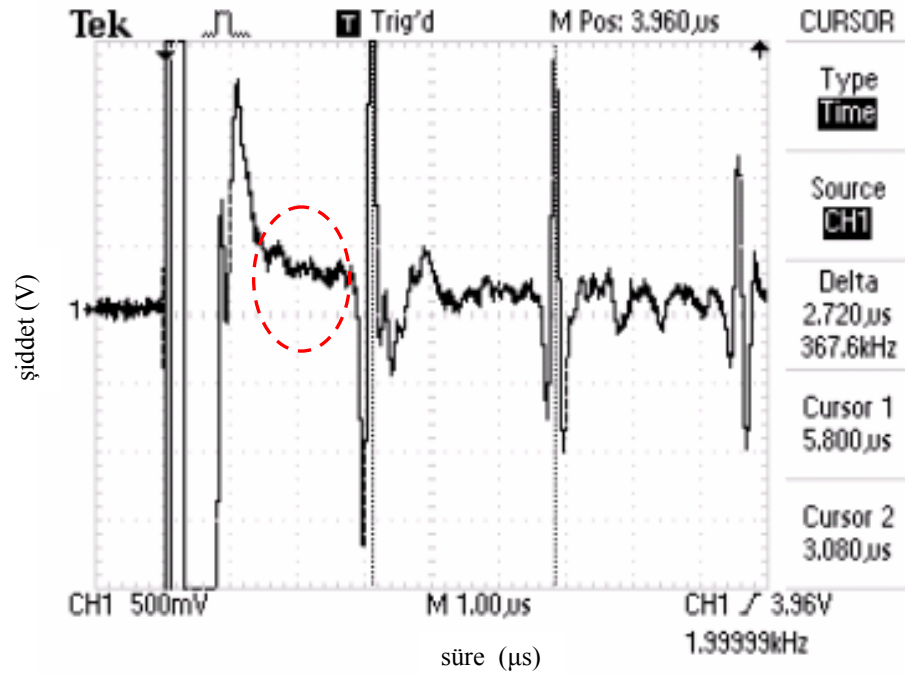


(c)

Şekil 6.39. (a), (b) hatasız bölge için, (c), (d) 5 mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için, (e), (f) 3mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi ve voltaj değerleri

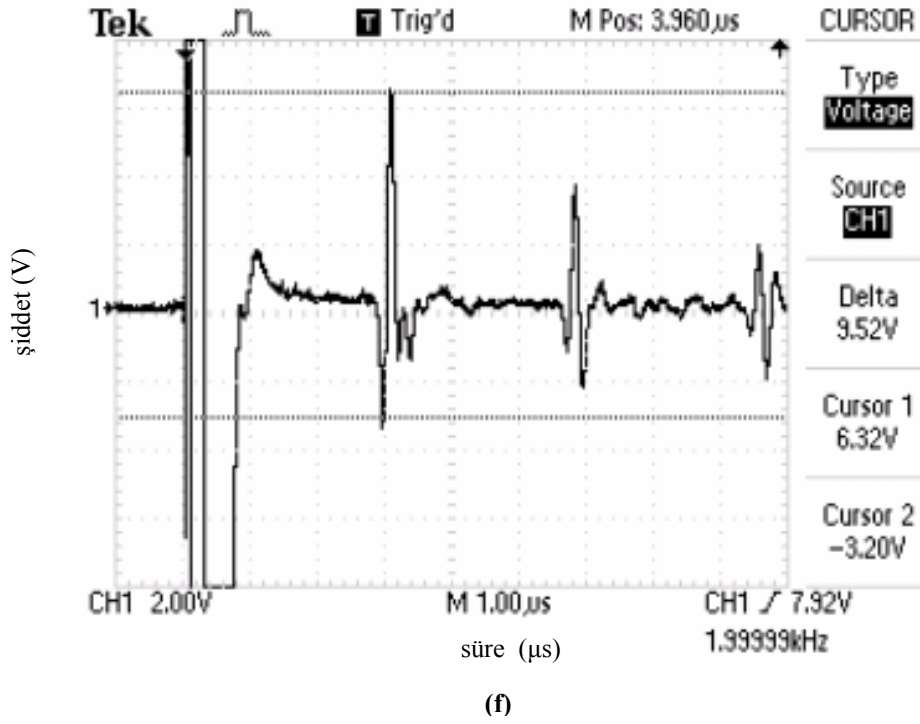


(d)



(e)

Şekil 6.39. (a), (b) hatasız bölge için, (c), (d) 5 mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için, (e), (f) 3mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi ve voltaj değerleri

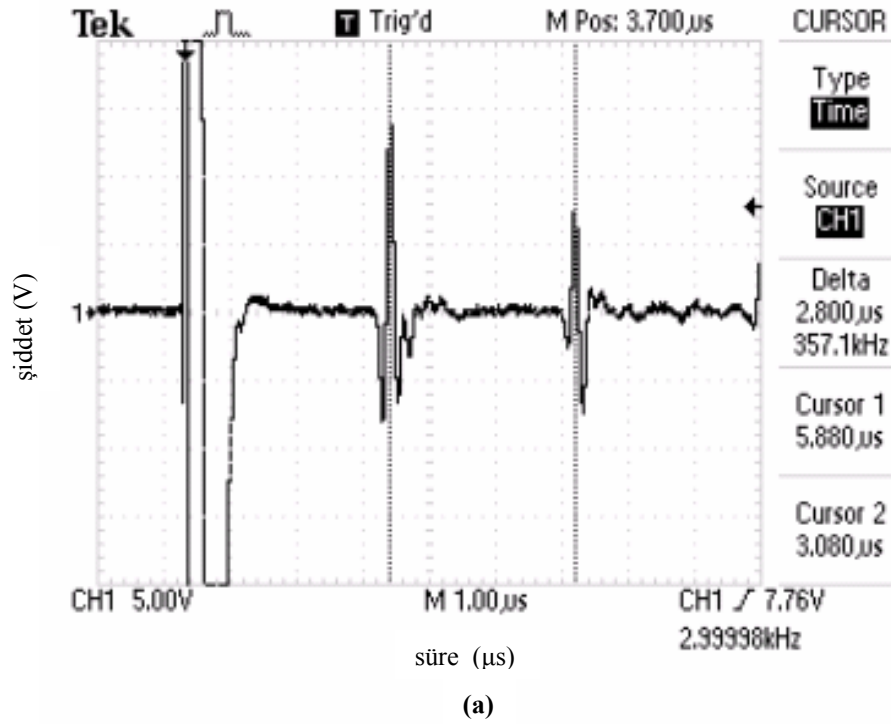


Şekil 6.39. (a), (b) hatasız bölge için, (c), (d) 5 mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için, (e), (f) 3mm çapta ZrO_2 bilye içeren bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi ve voltaj değerleri

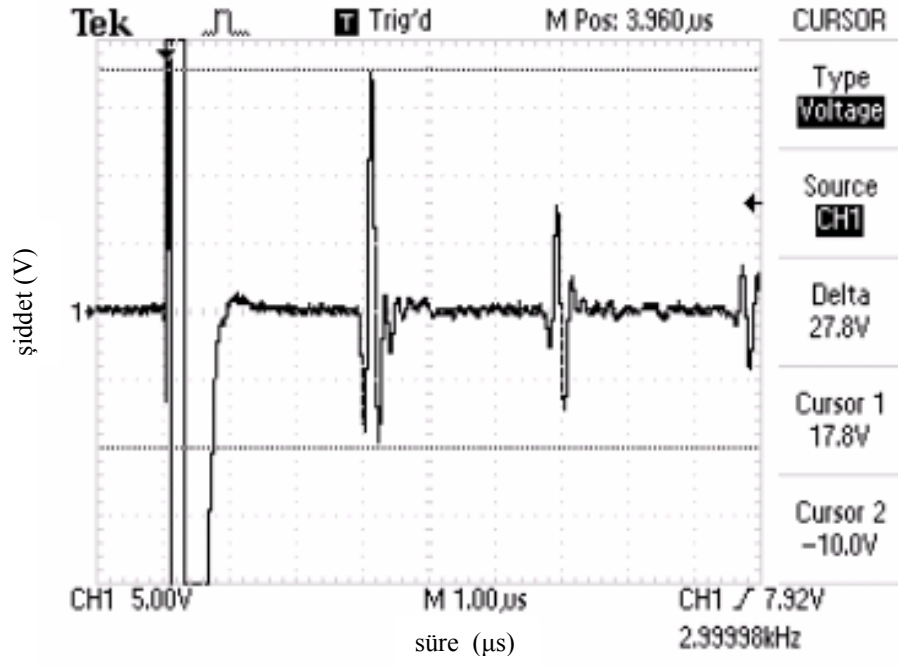
Karoya presleme işleminde çapları farklı olan 2 farklı bilye koyulmuş, karonun sağlam ve hata içeren bölgeleri boyuna ultrasonik dalgalarla 5 MHz'lik normal prob kullanılarak incelenmiştir. Şekillerde elde edilen dalga ilerleme süresi ve voltaj değerleri, grafiklerin 'delta' kısımlarında belirtilmektedir. Şekil 6.39.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi 2,72 μs 'dir. Karoya 5 mm ve 3 mm çaplarında ZrO_2 bilye koyularak oluşturulan hatalar prob çapından küçük hatalardır. Bu nedenle başlangıç ve çıkış pikleri arasındaki sürede değişiklik görülmemektedir (Şekil 6.39.c ve e). Bu durum, prob çapından küçük olan bütün hatalarda görülmektedir. Prob çapından küçük hatalar, dalga ilerleme hızını değiştirmemektedir. Bundan dolayı oluşturulan prob çapından küçük diğer hatalarda, hatalı bölgelerin dalga ilerleme süresi grafikleri gösterilmemiştir.

Karonun içinde oluşturulan hatalar küre şeklindedir. Küre yüzeyi ultrasonik dalgaların gönderilme yönünde konveks şekildedir. Yüzeye gelen dalgalar farklı derinliklere kadar inmekte ve farklı açılar oluşturarak geri yansımaktadır. Dolayısı ile bu derinliklerden yansıyan dalgalar da farklı pikler

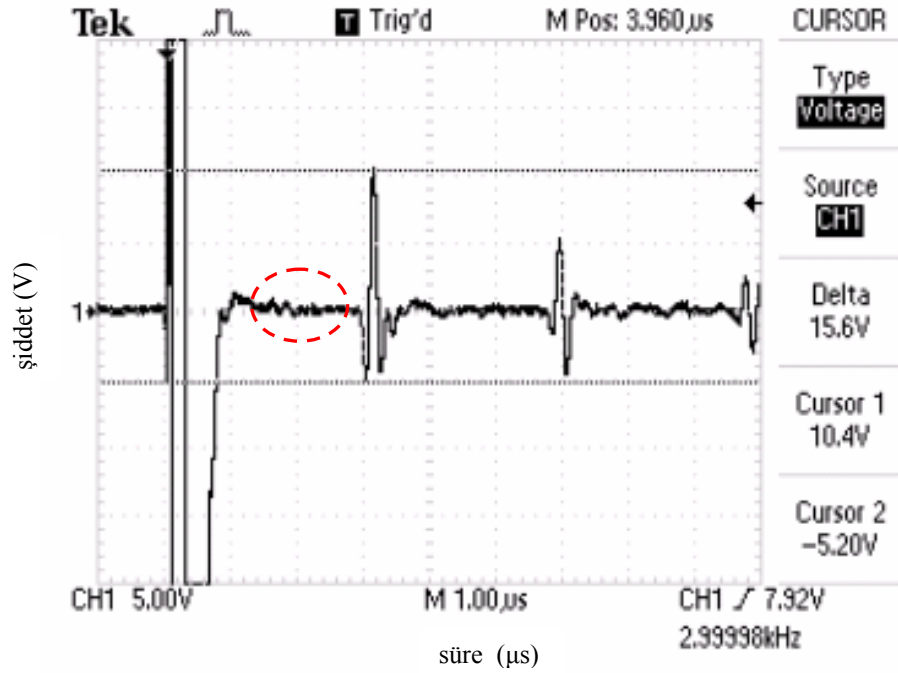
oluşturmaktadırlar. Ultrasonik muayenede normal prob kullanımı durumunda hata görüntüsünün hata konumu ve şekline bağlı yansımalarının görüntüleri arasında yer alan küresel hatalar Kayalı ve ark. (1997) çalışmasında gösterilmektedir. Şekil 6.39.c ve e’de yuvarlak içine alınmış kısımlarda bilyelerin oluşturduğu pikler görülmektedir. Hatasız bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri 19,4 voltur (Şekil 6.39.b). Oluşturulan hataların boyutlarına bağlı olarak başlangıç pikinin yüksekliği, 5 mm ZrO₂ bilye içeren bölge için 860 mV iken 3mm ZrO₂ bilye içeren bölge için 9,52 voltur (Şekil 6.39.d ve f). Hata boyutunun artması, başlangıç pikinin voltaj değerini önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 6.40. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 3mm çapında Si₃N₄ bilye içeren bölge için (c), (d) voltaj değerleri

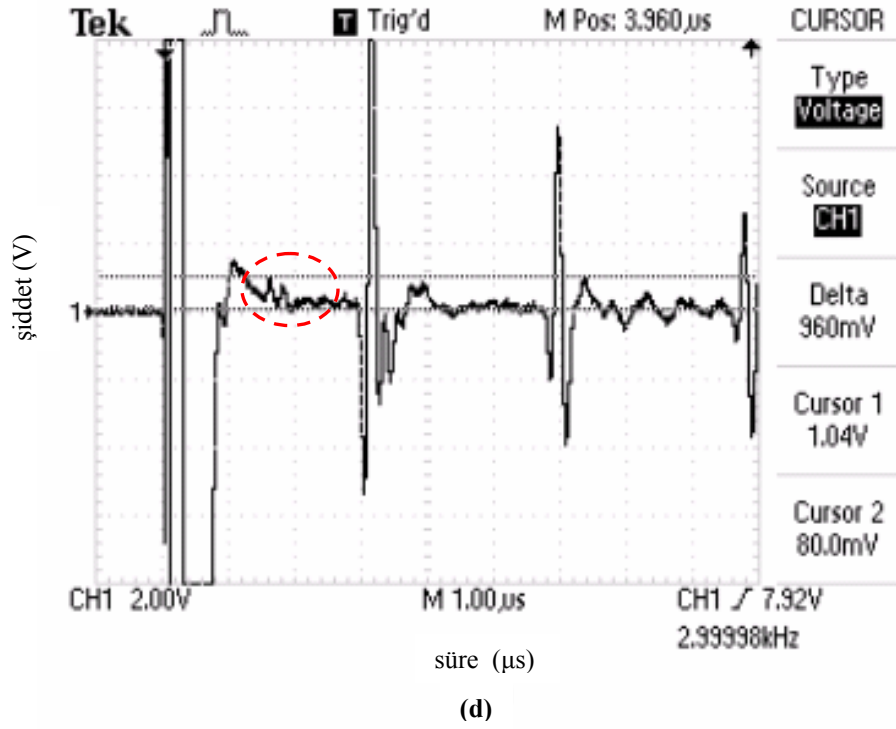


(b)



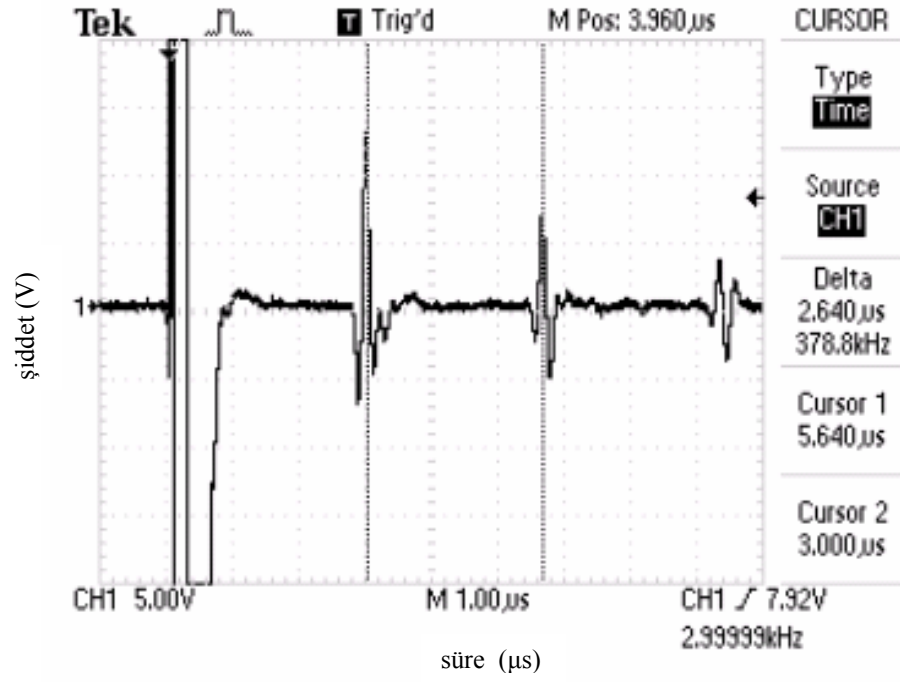
(c)

Şekil 6.40. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 3mm çapında Si_3N_4 bilye içeren bölge için (c), (d) voltaj değerleri

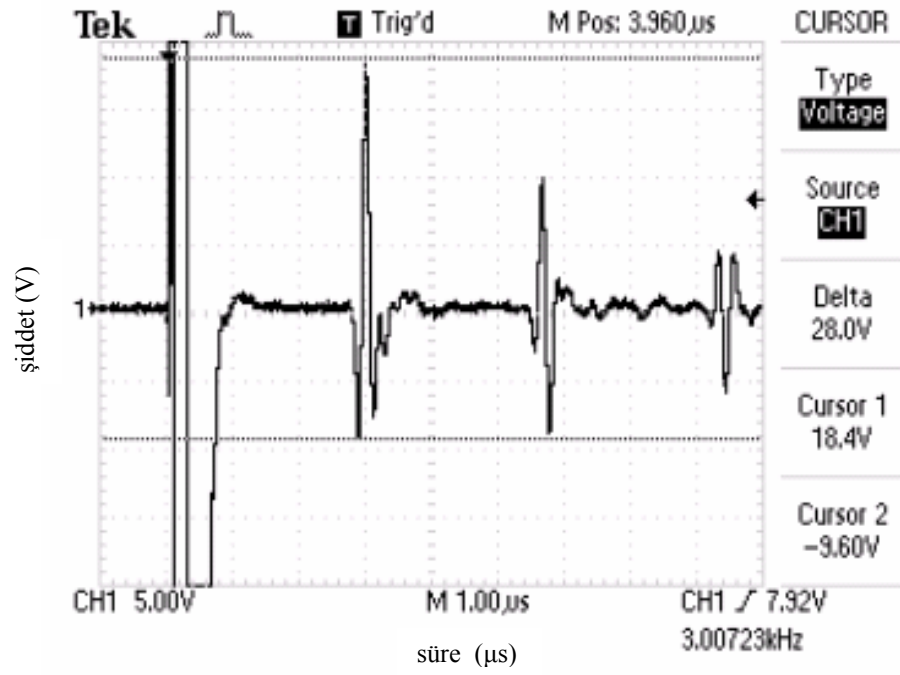


Şekil 6.40. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 3mm çapında Si_3N_4 bilye içeren bölge için (c), (d) voltaj değerleri

Şekil 6.40.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,8 \mu\text{s}$ 'dir. Hatasız bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri 27,8 voltuttur (Şekil 6.40.b). Oluşturulan hatanın boyutuna bağlı olarak başlangıç pikinin yüksekliği, 3 mm çapında Si_3N_4 bilye içeren bölge için 15,6 voltuttur (Şekil 6.40.c). Hataya bağlı olarak başlangıç pikinin voltaj değerini azaltmaktadır. Oluşan en yüksek hata piki 960 mV'dir (Şekil 6.40.d). Pik şekilleri incelendiğinde, küresel Si_3N_4 bilyenin yüzeylerinden ultrasonik dalgaların farklı açılarla yansımalarının sonucu olarak çok sayıda hata pikinin oluştuğu gözlenmektedir. Bu bölge Şekil 6.40.c ve d'de yuvarlak içinde gösterilmektedir.

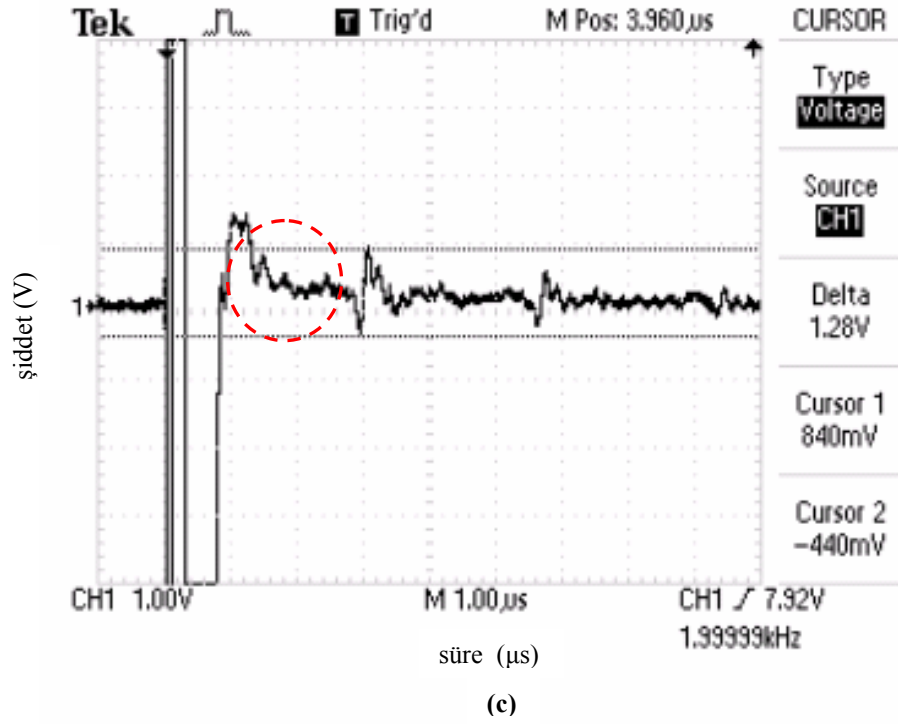


(a)



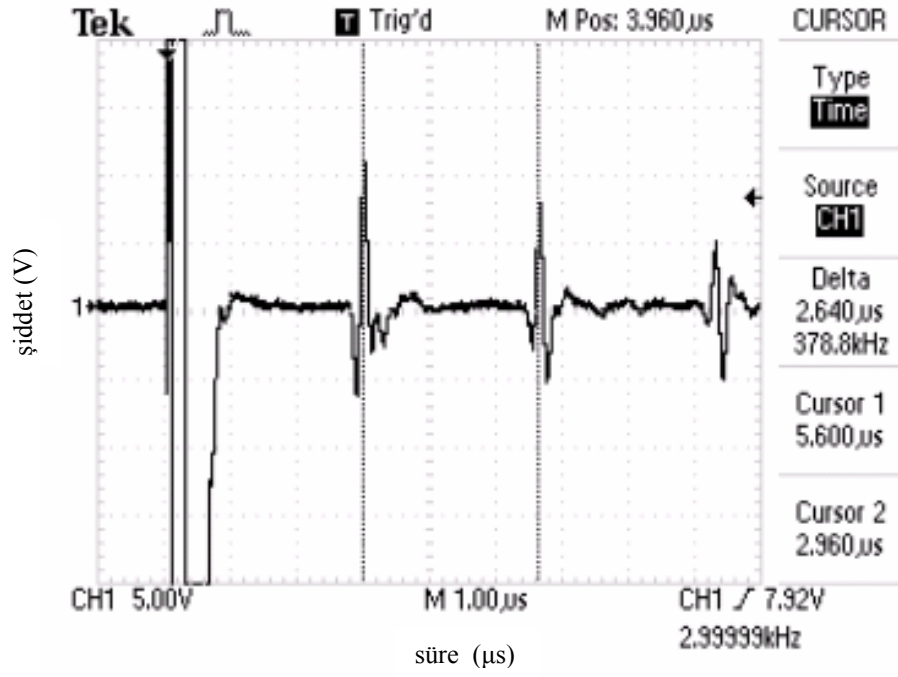
(b)

Şekil 6.41. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 4mm çapında çelik bilye içeren bölge için (c) voltaj değerleri

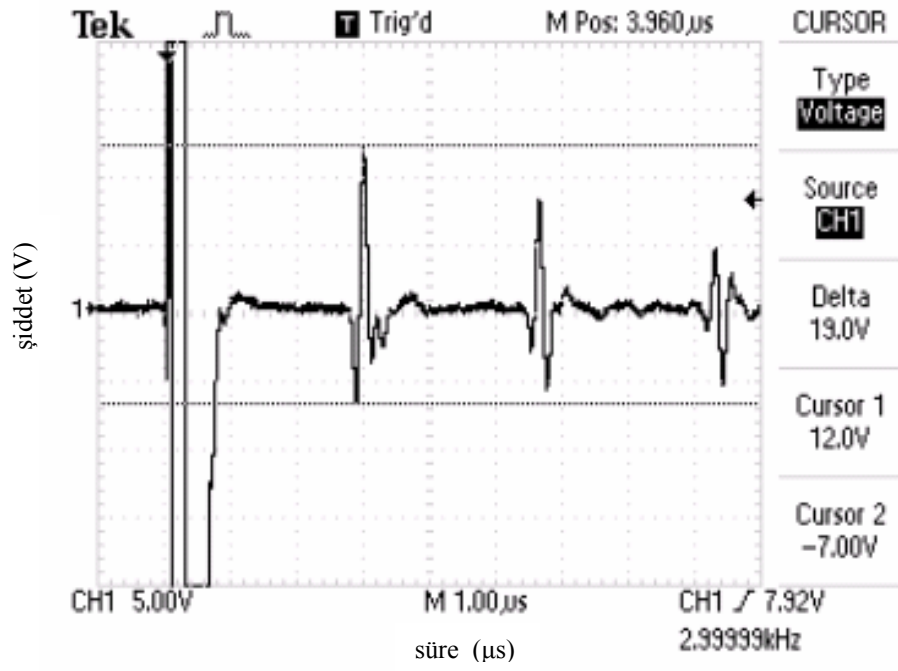


Şekil 6.41. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 4mm çapında çelik bilye içeren bölge için (c) voltaj değerleri

Şekil 6.41.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi 2,64 μ s'dir. Oluşturulan hata prob çapından küçük hatadır. Hatasız bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri 28 voltuttur (Şekil 6.41.b). Başlangıç pikinin yüksekliği, 4mm çapında çelik bilye içeren bölge için 1,28 voltuttur (Şekil 6.41.c). Hata bulunması başlangıç pikinin voltaj değerini azaltmaktadır. Çelik bilye küresel bir hata olduğu için yüzeyinden ultrasonik dalgaları farklı açılarla yansıtmakta ve çok sayıda hata piki oluşmaktadır.

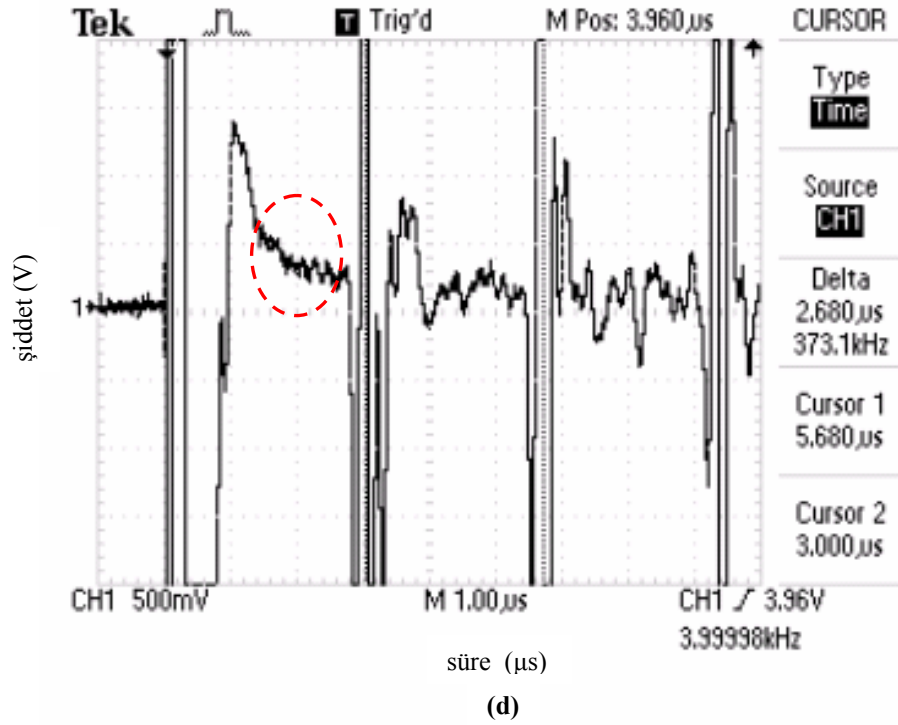
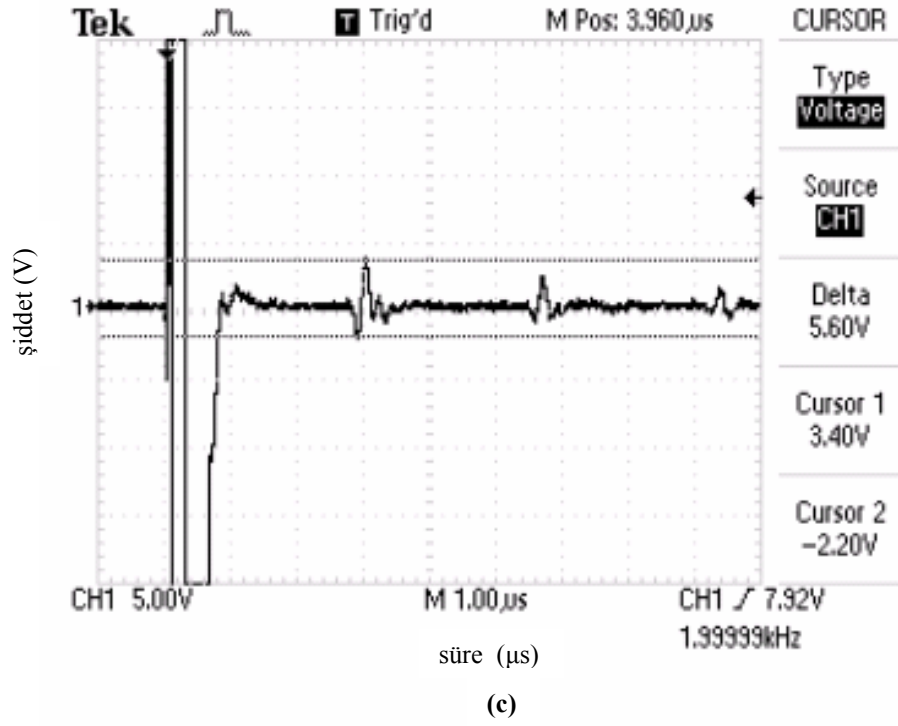


(a)

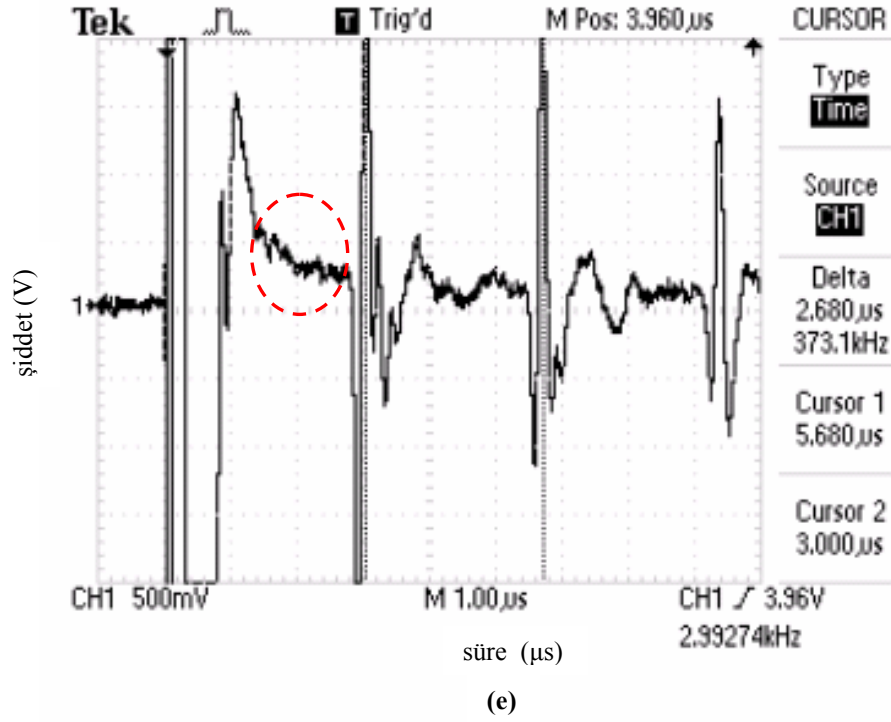


(b)

Şekil 6.42. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm çapında çelik bilye içeren bölge için (c) voltaj değeri; (d) hatasız bölge piklerinin, (e) hatalı bölge piklerinin düşük voltajdaki görüntüsü



Şekil 6.42. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm çapında çelik bilye içeren bölge için (c) voltaj değeri; (d) hatasız bölge piklerinin, (e) hatalı bölge piklerinin düşük voltajdaki görüntüsü



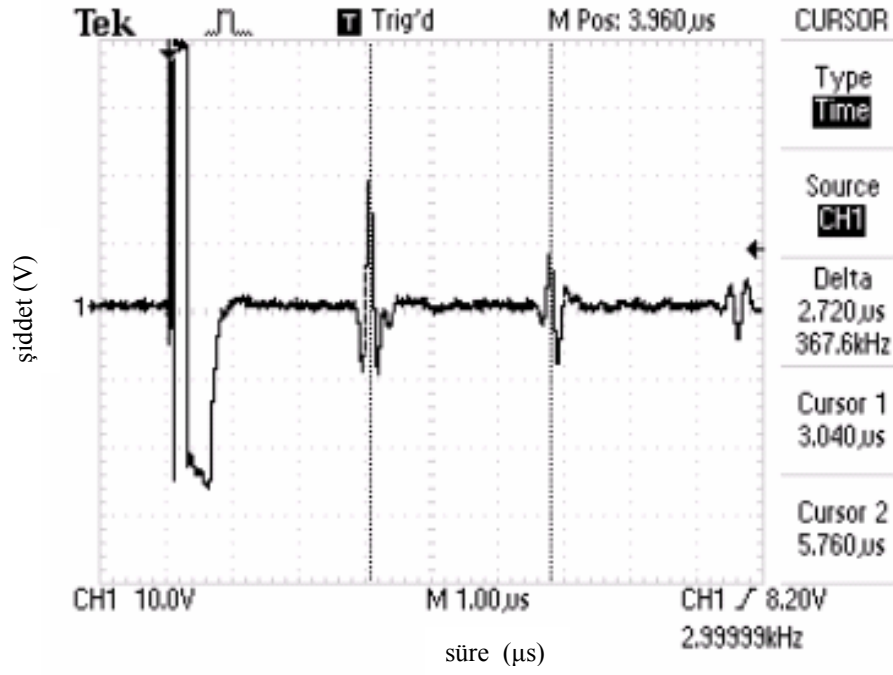
Şekil 6.42. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm çapında çelik bilye içeren bölge için (c) voltaj değeri; (d) hatasız bölge piklerinin, (e) hatalı bölge piklerinin düşük voltajdaki görüntüsü

Şekil 6.42.a’da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,64 \mu s$ ’dir. Hatasız bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri 19 voltur (Şekil 6.42.b). Başlangıç pikinin yüksekliği, 1 mm çapında çelik bilye içeren bölge için 5,6 voltur (Şekil 6.42.c). Hata bulunması başlangıç pikinin voltaj değerini azaltmaktadır. Ancak başlangıç piki voltaj değerindeki azalma miktarı 4 mm’lik çelik bilye hatası bulunması durumuna göre daha az orandadır. Hata boyutunun azalmasına bağlı olarak hata pikleri, hatalı ve hatasız bölge pik görüntülerden ayırt edilememektedir. Hatasız bölge pikleri Şekil 6.42.d’de, hata piklerinin bulunması gereken bölge ise 6.42.e’de işaretlenmiştir.

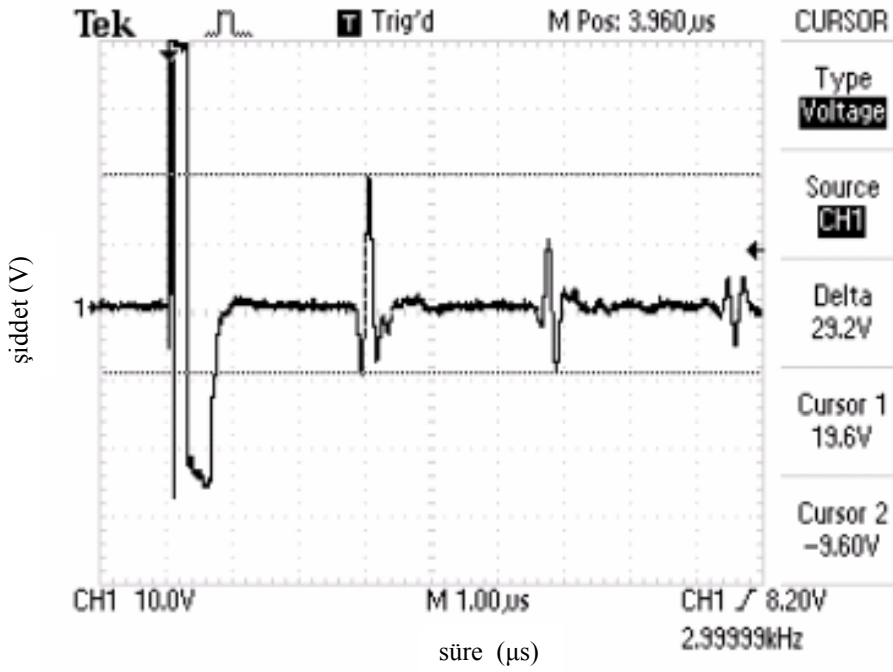
6.7.2. Boşluk şeklindeki hatalar

Karbon karası, kâğıt, PMMA, silgi ve PEG gibi ilavelerle boşluk oluşturularak Hitit Seramik granülleriyle hataları karolar üretilmiş ve bu karolar

temaslı ultrasonik cihazla 5 MHz'lik prob kullanılarak boyuna dalgalarla incelenmiştir.

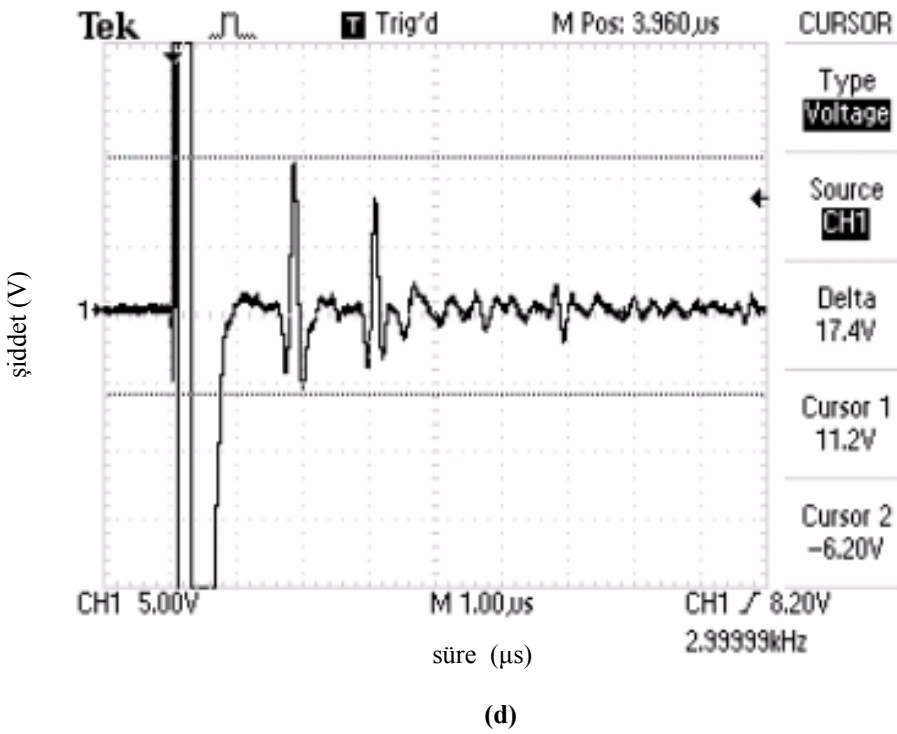
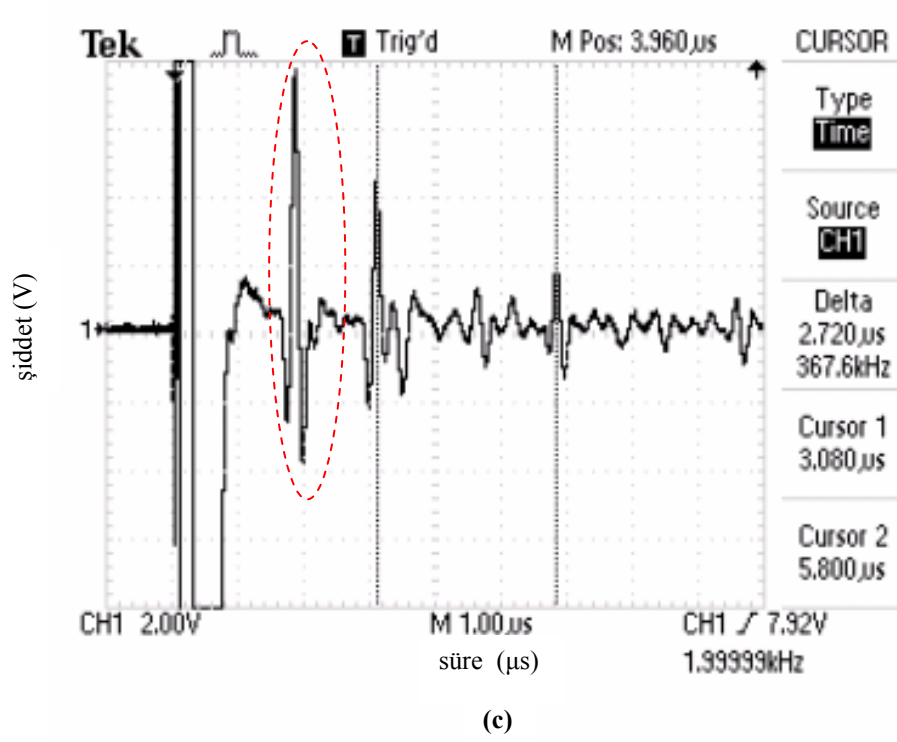


(a)

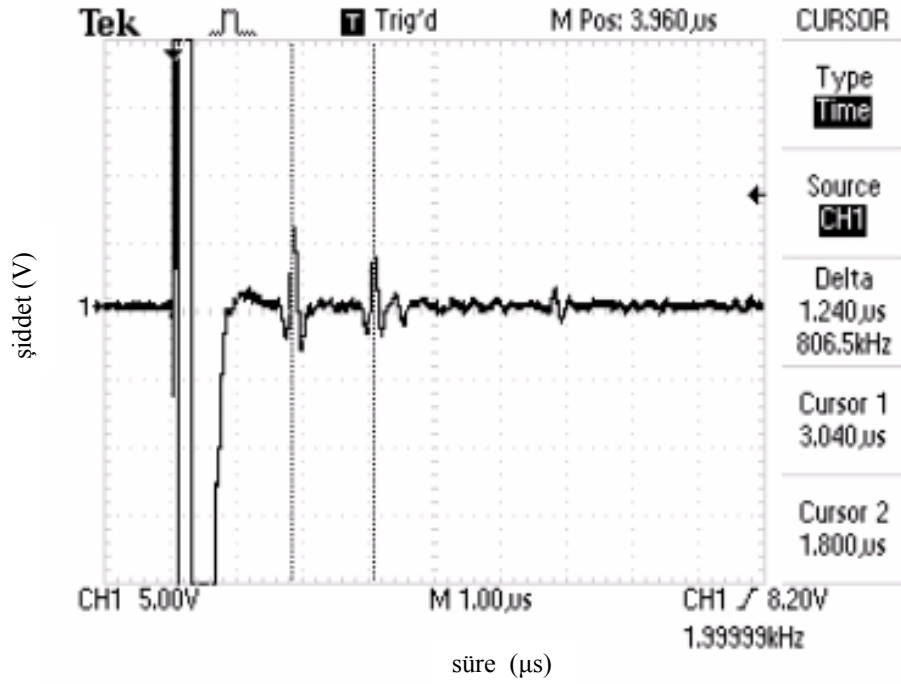


(b)

Şekil 6.43. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; karbon karası içeren bölge için (c) ve (e) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri



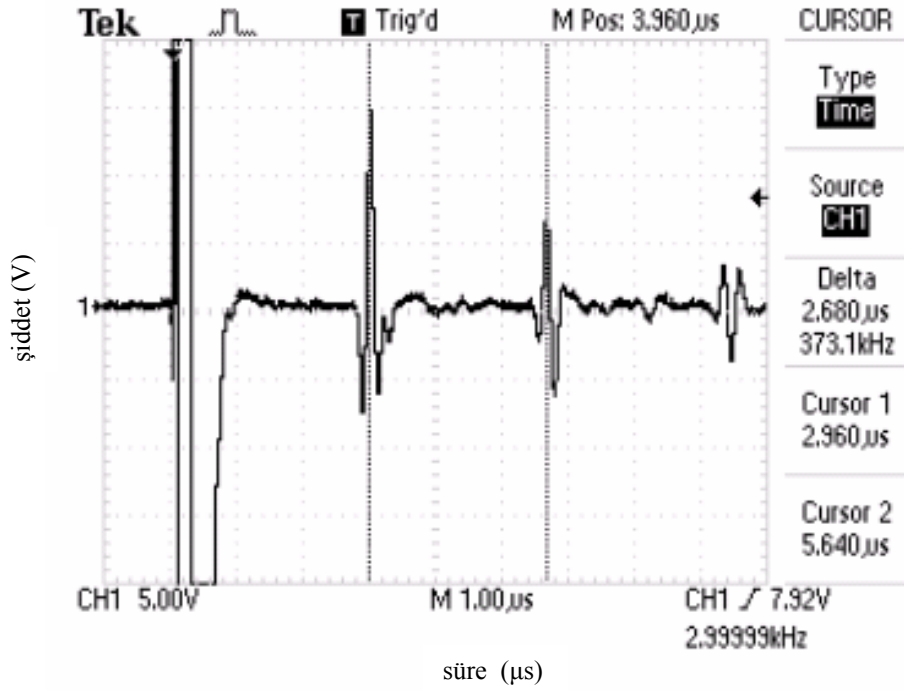
Şekil 6.43. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; karbon karası içeren bölge için (c) ve (e) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri



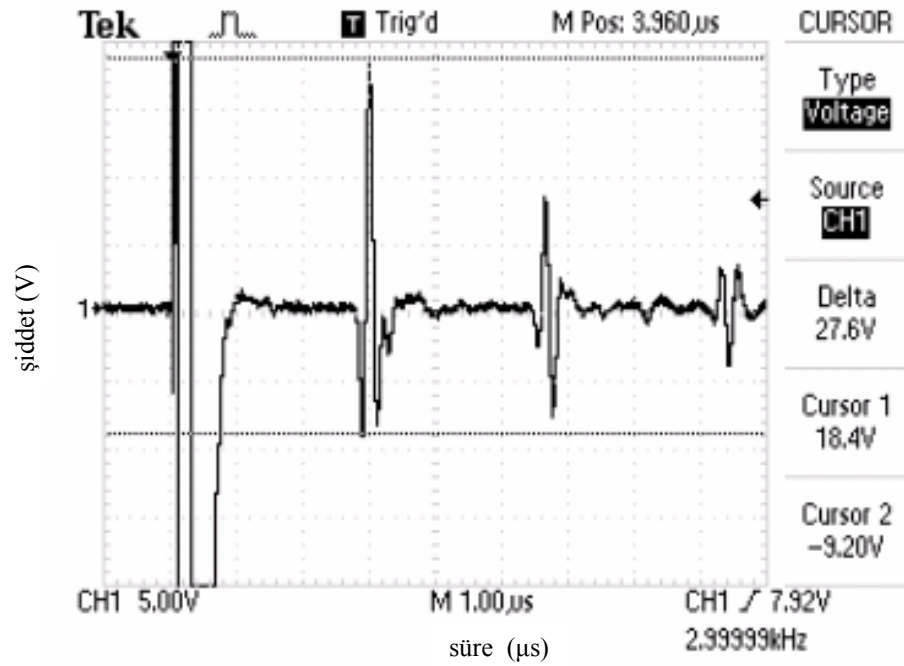
(e)

Şekil 6.43. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; karbon karası içeren bölge için (c) ve (e) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri

Şekil 6.43.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,72 \mu\text{s}$ 'dir. Hatanın bulunduğu yere kadar olan dalga ilerleme süresi $1,24 \mu\text{s}$ 'dir (Şekil 6.43.e). Hatanın bulunmadığı bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri $29,2$ voltur (Şekil 6.43.b). Oluşturulan hatanın bulunduğu bölgede, hata pikinin yüksekliği başlangıç pikinin yüksekliğinden daha fazladır. Hata pikinin yüksekliği $17,4$ voltur (Şekil 6.43.d). Karbon karası tablet halinde hazırlanamamıştır. Spatül ile yerleştirilen karbon karası granüller içinde az miktarda da olsa farklı kalınlıklar oluşturmuştur. Bu nedenle hata piklerinin şekilleri incelendiğinde, hata piki ile beraber küçük piklere de rastlanmaktadır. Hata pikleri Şekil 6.43.c'de işaretlenmiştir.

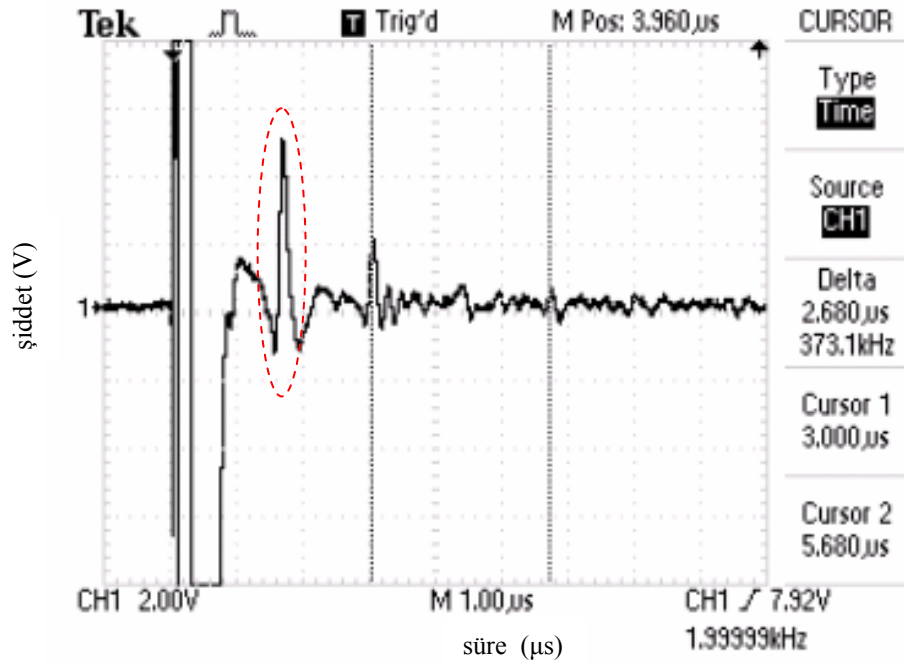


(a)

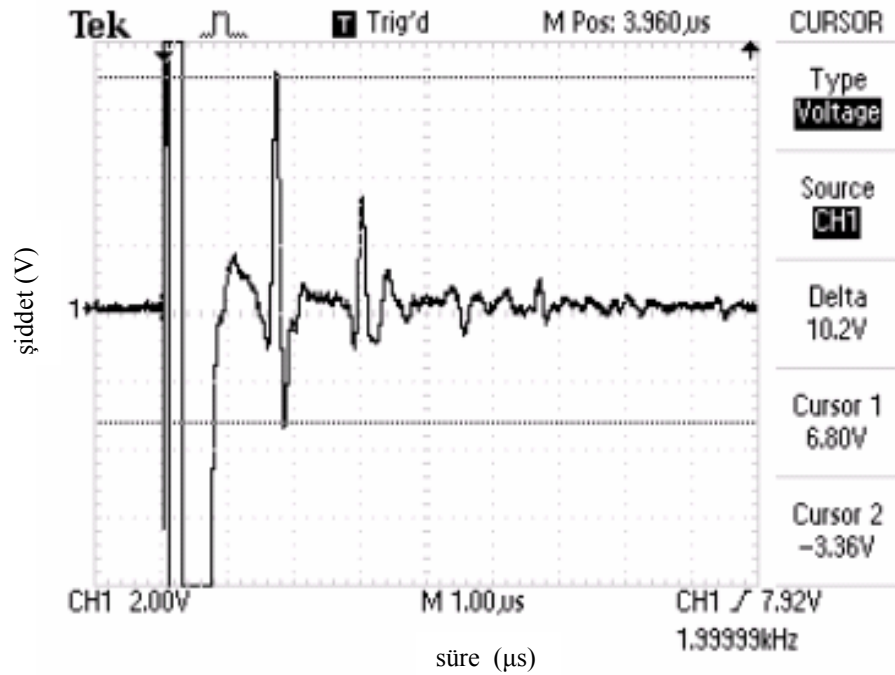


(b)

Şekil 6.44. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından küçük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri



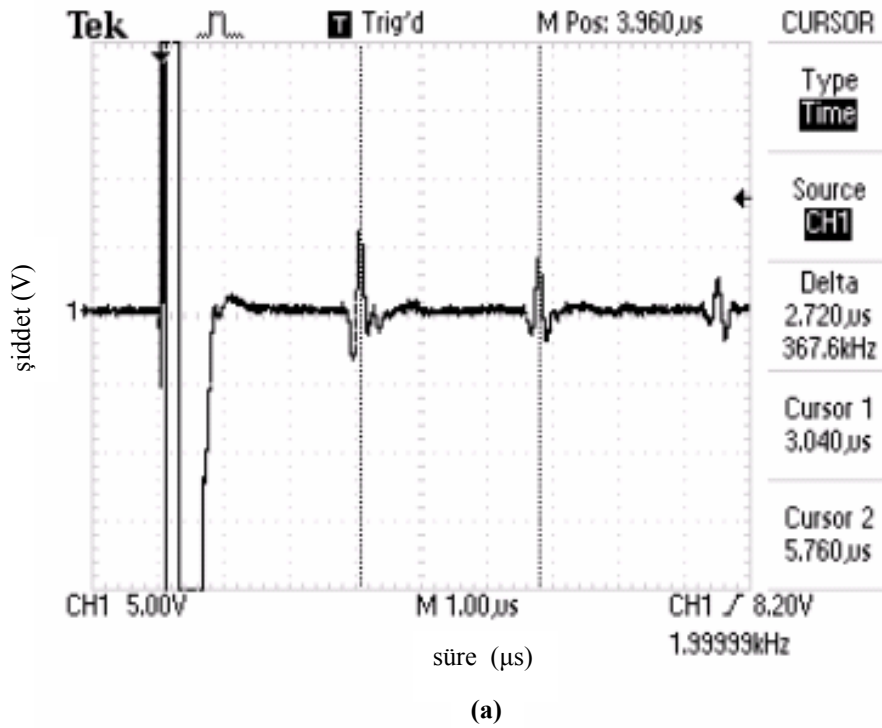
(c)



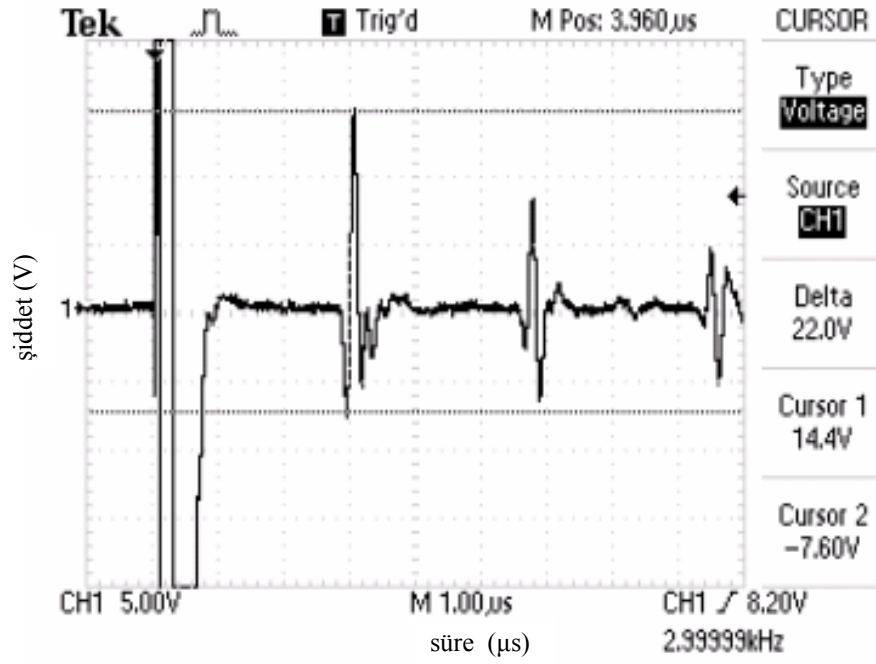
(d)

Şekil 6.44. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından küçük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri

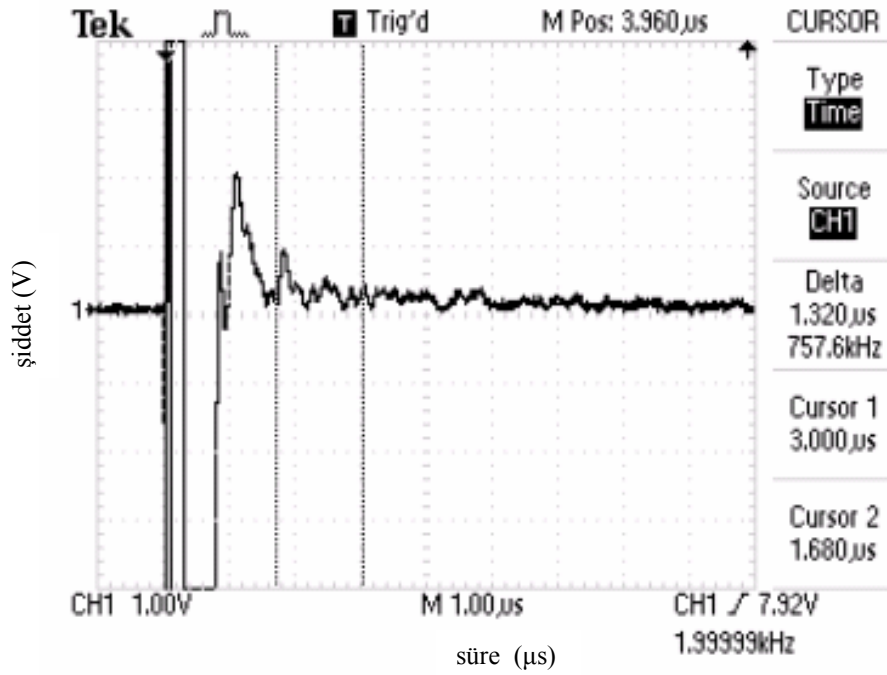
Şekil 6.44.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,68 \mu\text{s}$ 'dir. Oluşturulan hata prob çapından daha küçük bir hatadır. Bu nedenle başlangıç ve çıkış pikleri arasındaki dalga ilerleme süresi değişmemiştir (Şekil 6.44.c). Hata piki de bu şekilde işaretlenmiştir. Hatanın bulunmadığı bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri $27,6 \text{ volt}$ tur (Şekil 6.44.b). Oluşturulan hatanın bulunduğu bölgede hata pikinin yüksekliği başlangıç pikinin yüksekliğinden daha fazladır. Hata pikinin yüksekliği $10,2 \text{ volt}$ tur (Şekil 6.44.d).



Şekil 6.45. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından büyük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c), (d) ve (e) dalga ilerleme süresi, (f) voltaj değerleri

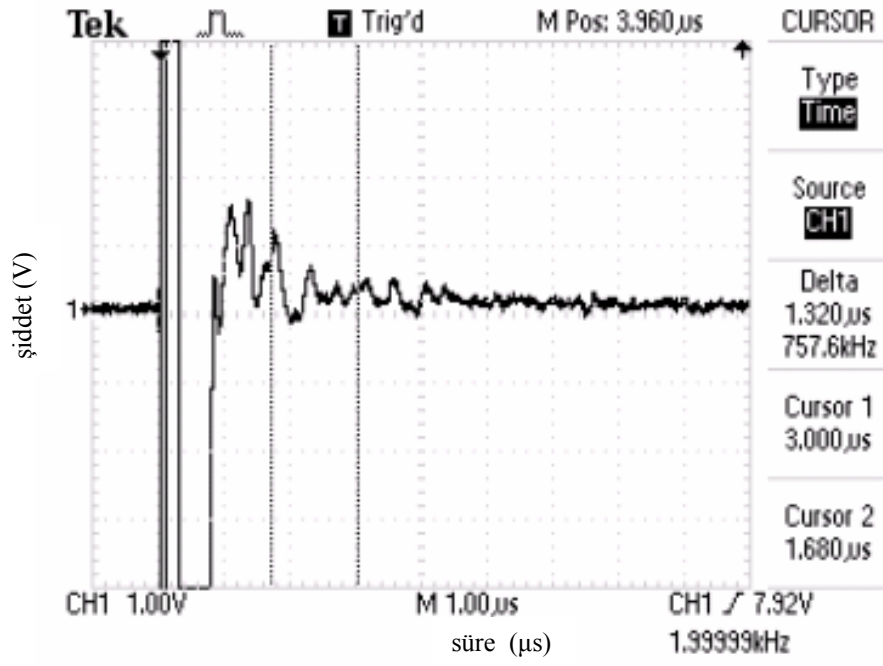


(b)

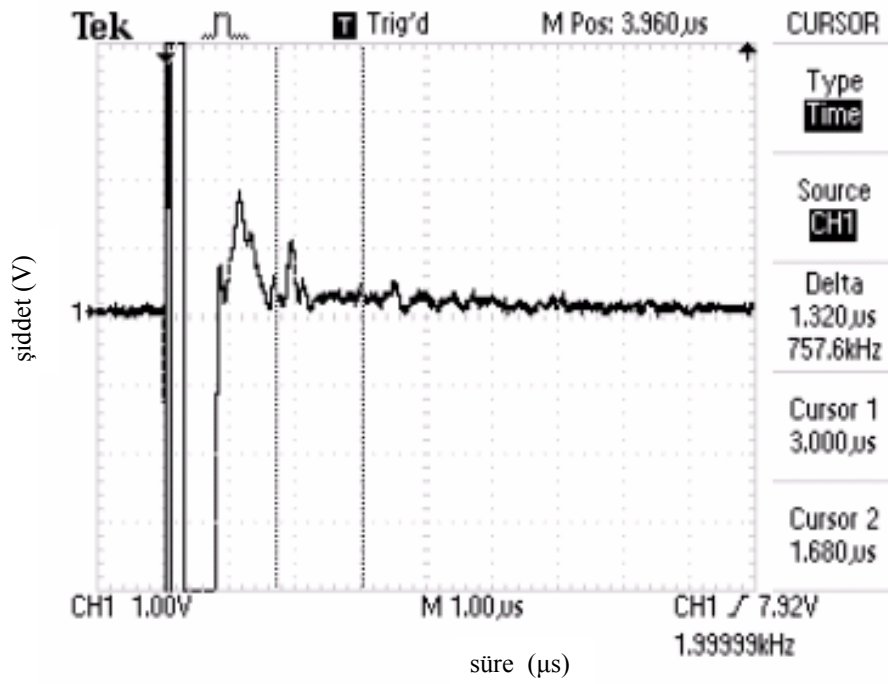


(c)

Şekil 6.45. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından büyük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c), (d) ve (e) dalga ilerleme süresi, (f) voltaj değerleri

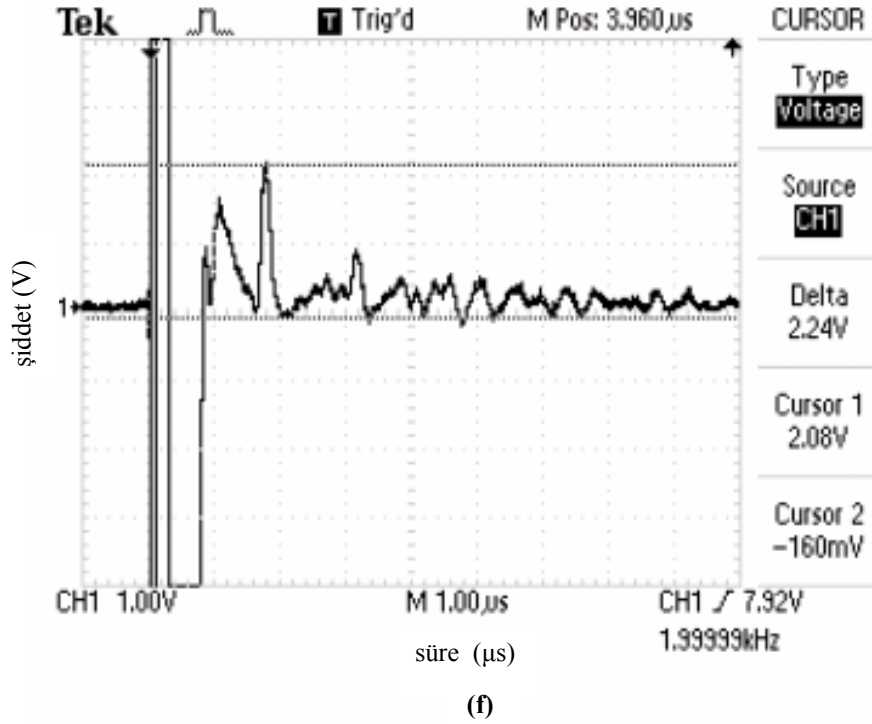


(d)



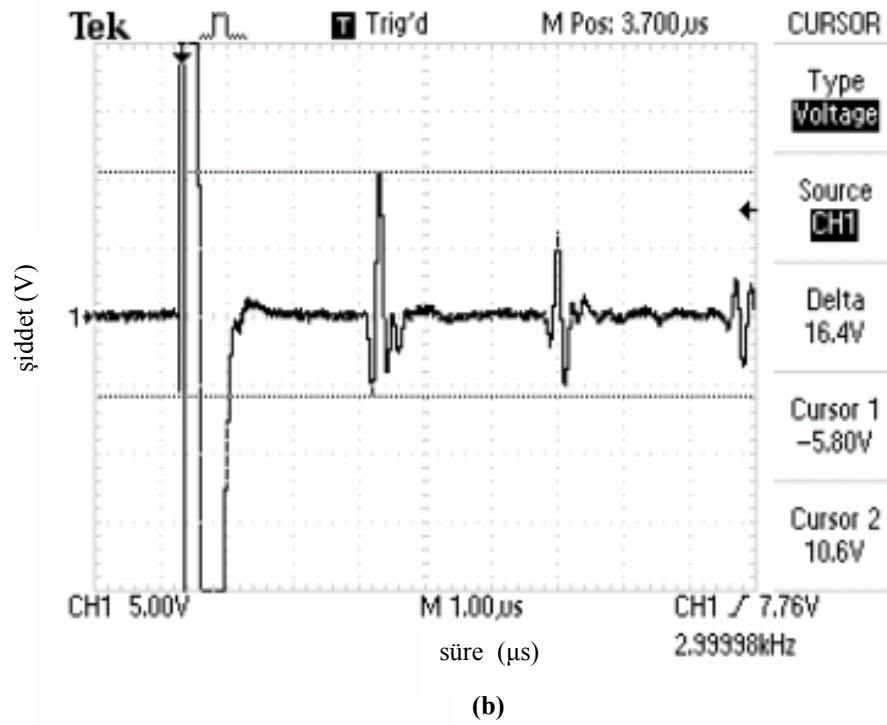
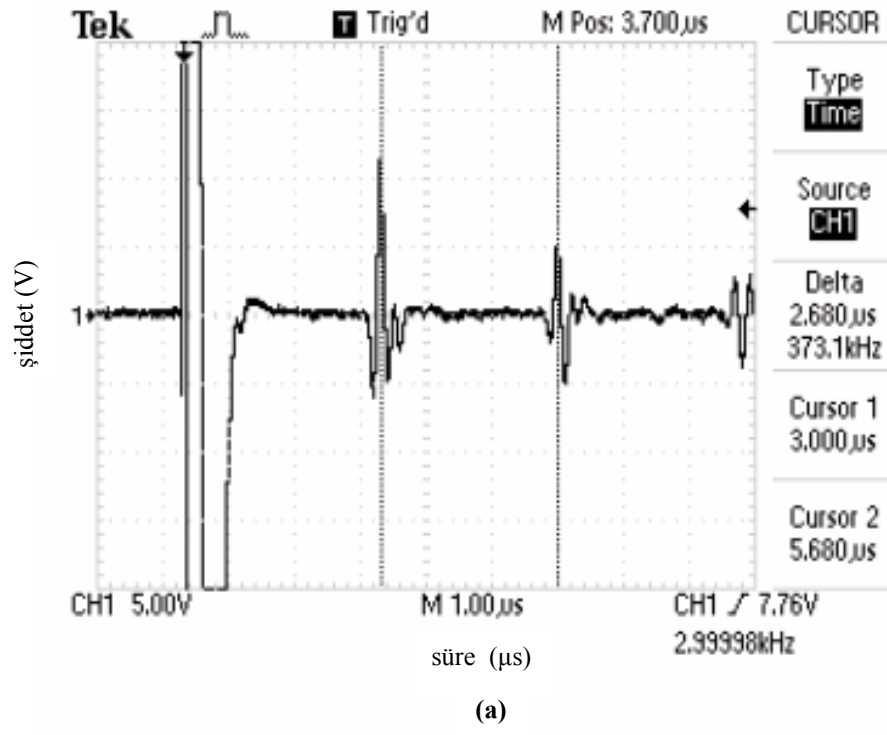
(e)

Şekil 6.45. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından büyük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c), (d) ve (e) dalga ilerleme süresi, (f) voltaj değerleri

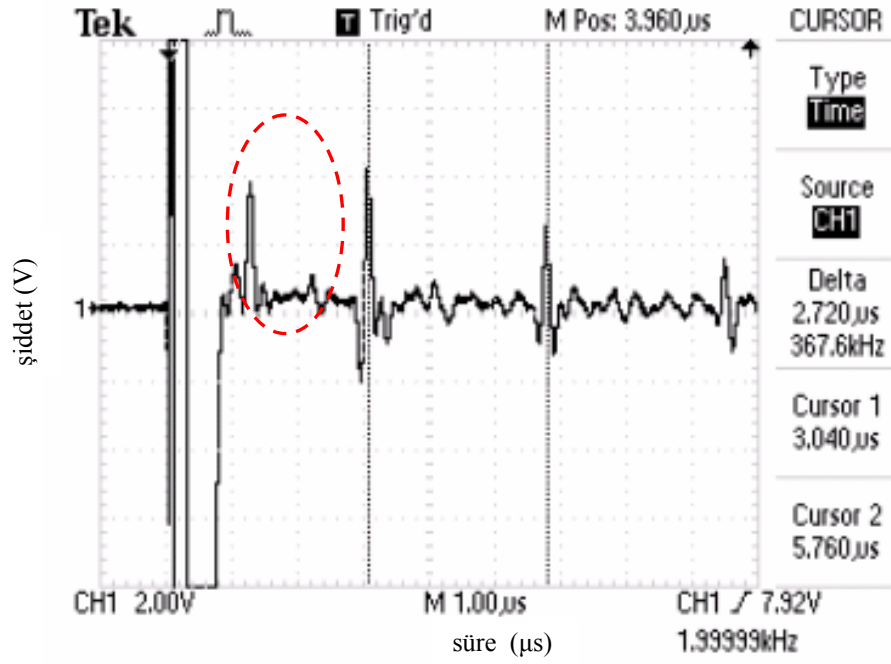


Şekil 6.45. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; prob çapından büyük bir hata oluşturacak şekilde PMMA içeren bölge için (c), (d) ve (e) dalga ilerleme süresi, (f) voltaj değerleri

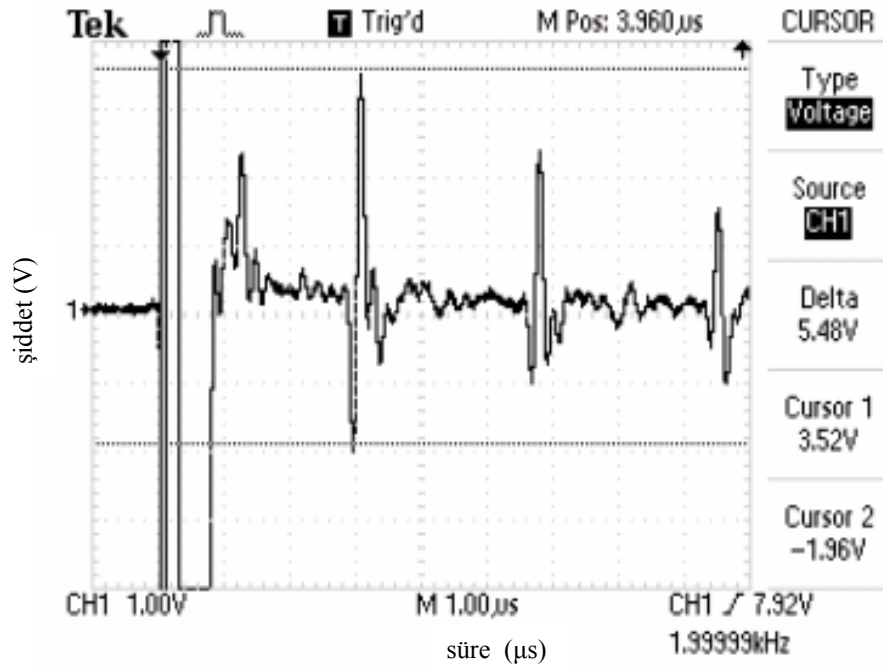
Şekil 6.45.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi 2,72 μ s'dir. Oluşturulan hata, ultrasonik dalgaların ilerlemesini engellemektedir. Bu nedenle başlangıç ve çıkış pikleri arasındaki dalga ilerleme süresi hatalı bölgede ölçülememiştir. Proben konumu değiştirildiğinde oluşan hata piklerinin şekilleri de değişmektedir (Şekil 6.45.c, d ve e). Bu durum PMMA küreciklerinin, granüllerin arasında çok fazla dağılmasının bir sonucu olarak farklı yüksekliklerden sinyal alınmasından kaynaklanabilir. Hatanın bulunmadığı bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri 22 voltuttur (Şekil 6.45.b). Oluşturulan hatanın bulunduğu bölgede ölçülen en yüksek hata pikinin yüksekliği 2,24 voltuttur (Şekil 6.45.f).



Şekil 6.46. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; altıgen şeklinde bir PEG tableti içeren bölge için (c) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri

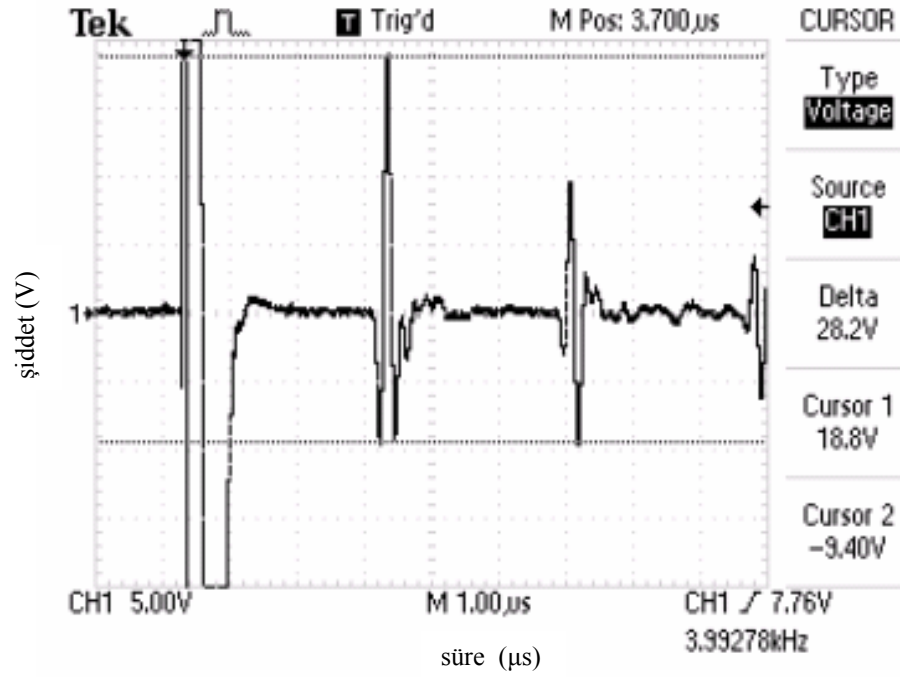


(c)

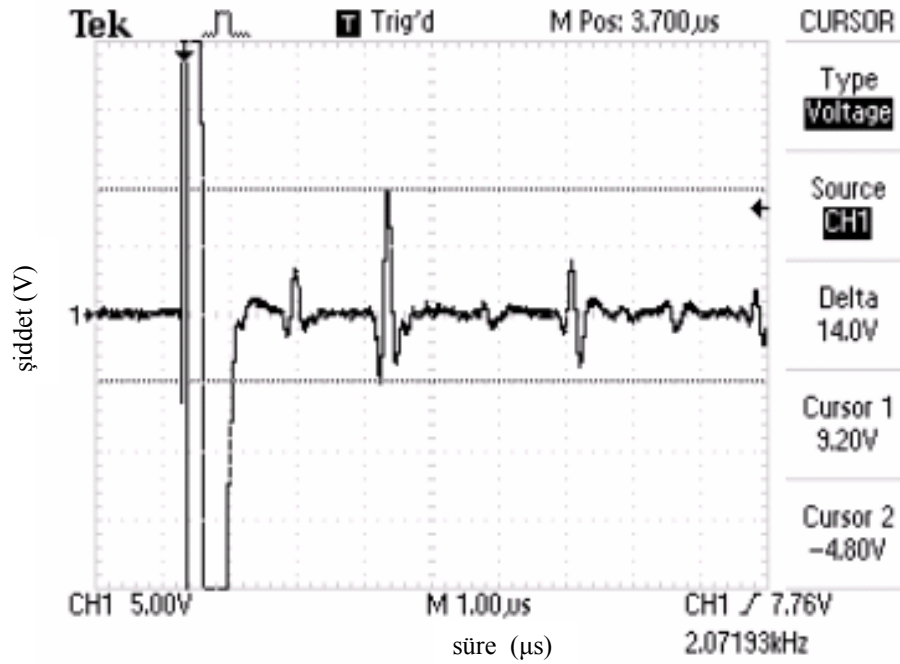


(d)

Şekil 6.46. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; altıgen şeklinde bir PEG tableti içeren bölge için (c) dalga ilerleme süresi, (d) voltaj değerleri

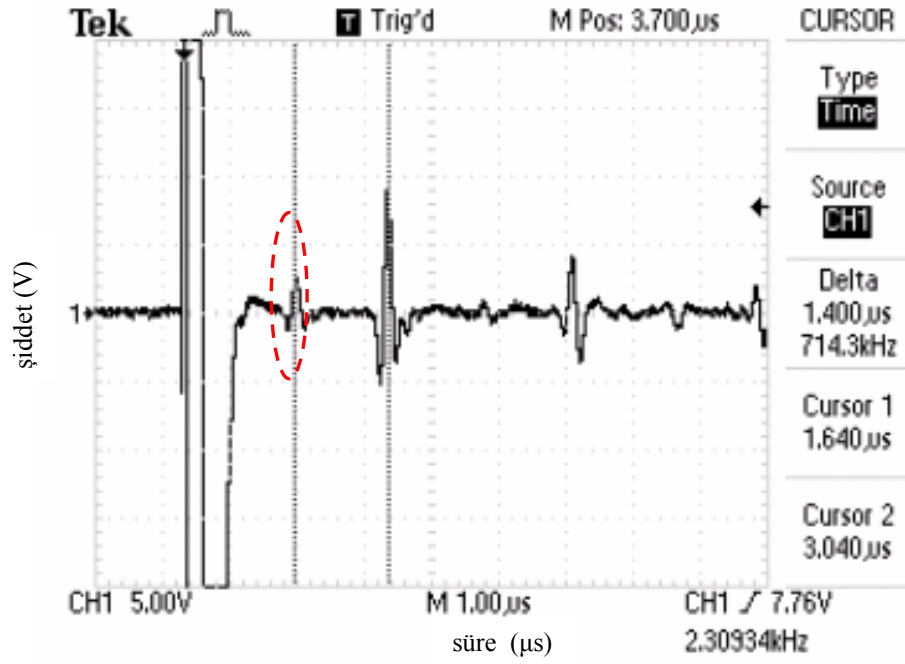


(b)

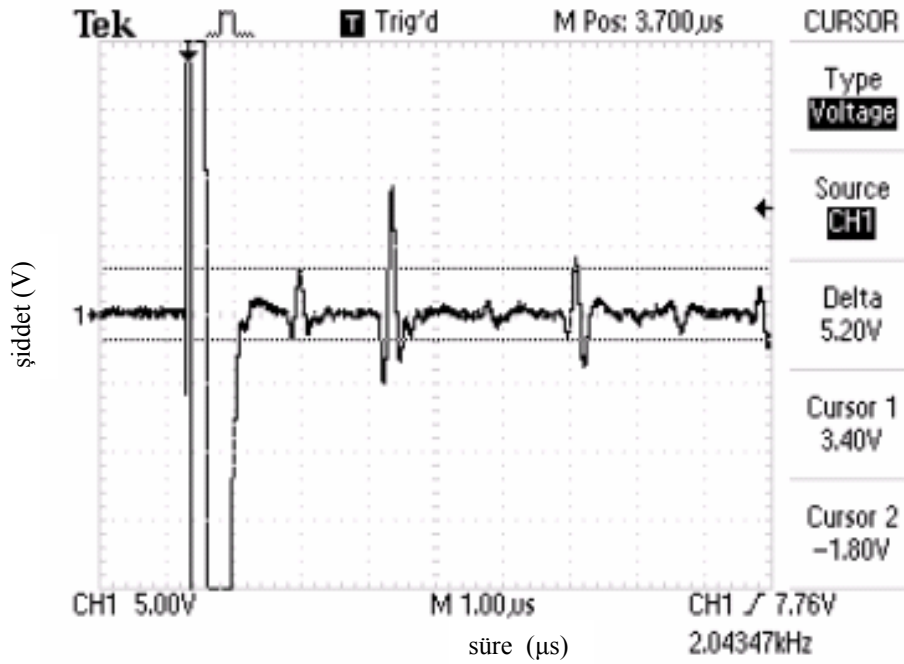


(c)

Şekil 6.47. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 0,5 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri



(d)

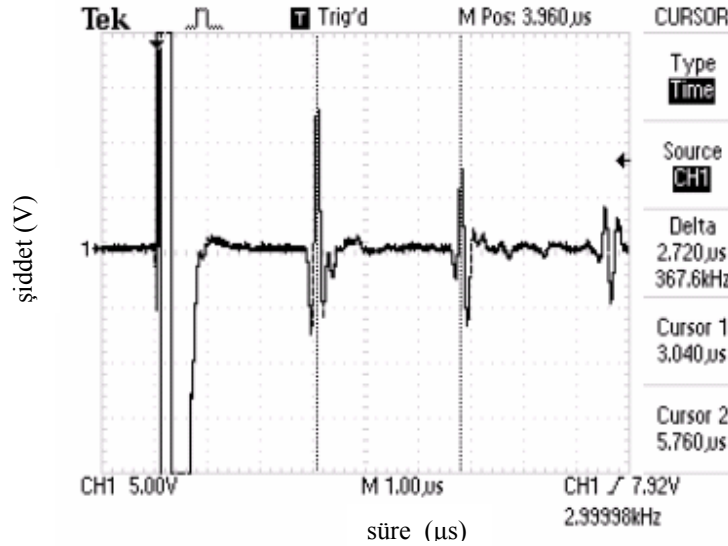


(e)

Şekil 6.47. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 0,5 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri

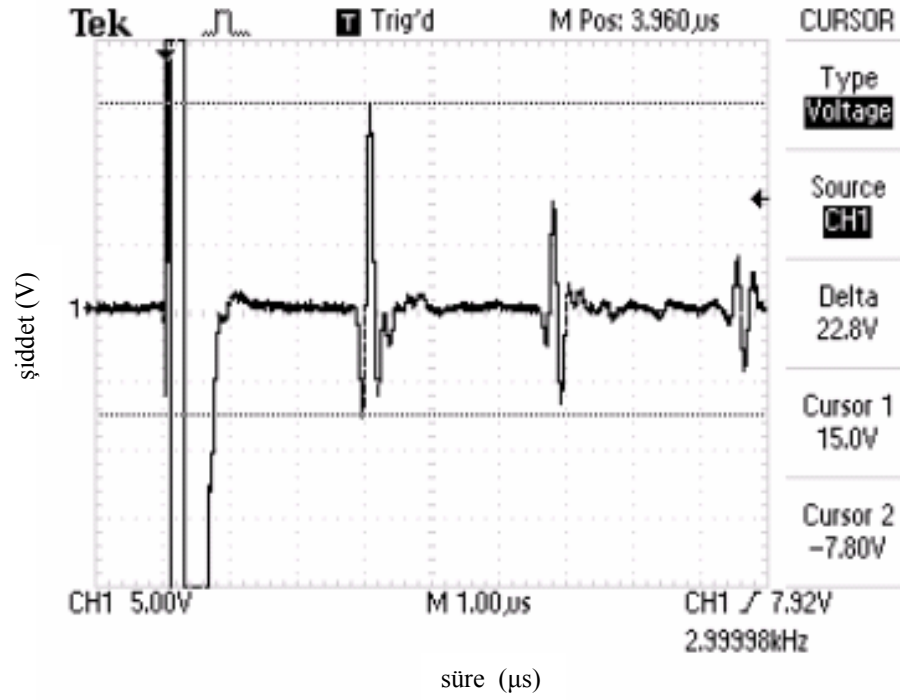
Şekil 6.47.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,72 \mu\text{s}$ 'dir. Hatanın bulunduğu yere kadar olan dalga ilerleme süresi $1,4 \mu\text{s}$ 'dir (Şekil 6.47.d). Oluşan hata da bu şekilde işaretlenmiştir. Hatanın bulunmadığı bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri $28,2 \text{ volt}$ tur (Şekil 6.47.b). Oluşturulan hatanın bulunduğu bölgede, hata pikinin yüksekliği başlangıç pikinin yüksekliğinden daha düşük şiddete sahiptir. Hata pikinin yüksekliği $5,2 \text{ volt}$ tur (Şekil 6.47.e). Silgi hatası içeren bölgede başlangıç pikinin yüksekliği 14 volt tur (Şekil 6.47.c).

Şekil 6.48.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,72 \mu\text{s}$ 'dir. 1 mm kalınlığında $6,8 \text{ mm}$ çapında silgi hatası içeren bölge için hatanın bulunduğu yere kadar olan dalga ilerleme süresi $1,36 \mu\text{s}$ 'dir (Şekil 6.48.d). Hata piki bu şekilde gösterilmektedir. Hatanın bulunmadığı bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri $22,8 \text{ volt}$ tur (Şekil 6.48.b). Silgi hatası içeren bölgede hata pikinin yüksekliği $6,16 \text{ volt}$ tur (Şekil 6.48.e). Bu bölgede başlangıç pikinin yüksekliği $9,36 \text{ volt}$ tur (Şekil 6.48.c). Silgi kalınlığının artırılması ile oluşturulan hata piki, $0,5 \text{ mm}$ silgi hatasının oluşturduğu hata piki ile kıyaslandığında kalınlıktaki artışa bağlı olarak oluşan hata pikinin şiddetinin arttığı görülmektedir. Benzer şekilde hatalı bölgelerdeki başlangıç piklerinde de hata kalınlığındaki artışa bağlı olarak azalma gözlenmektedir.

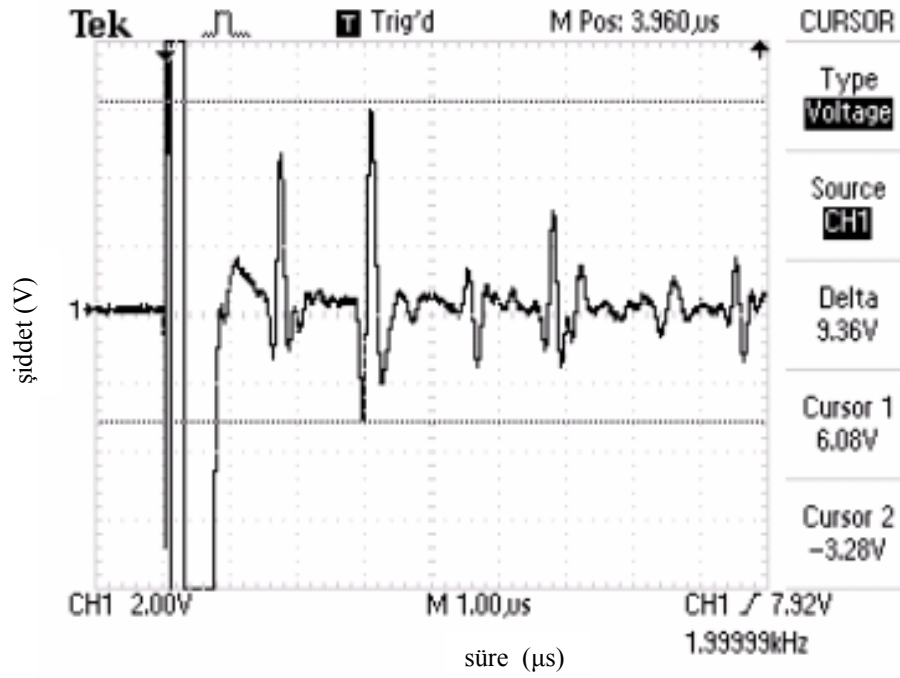


(a)

Şekil 6.48. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm kalınlığında $6,8 \text{ mm}$ çapında silgi hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri

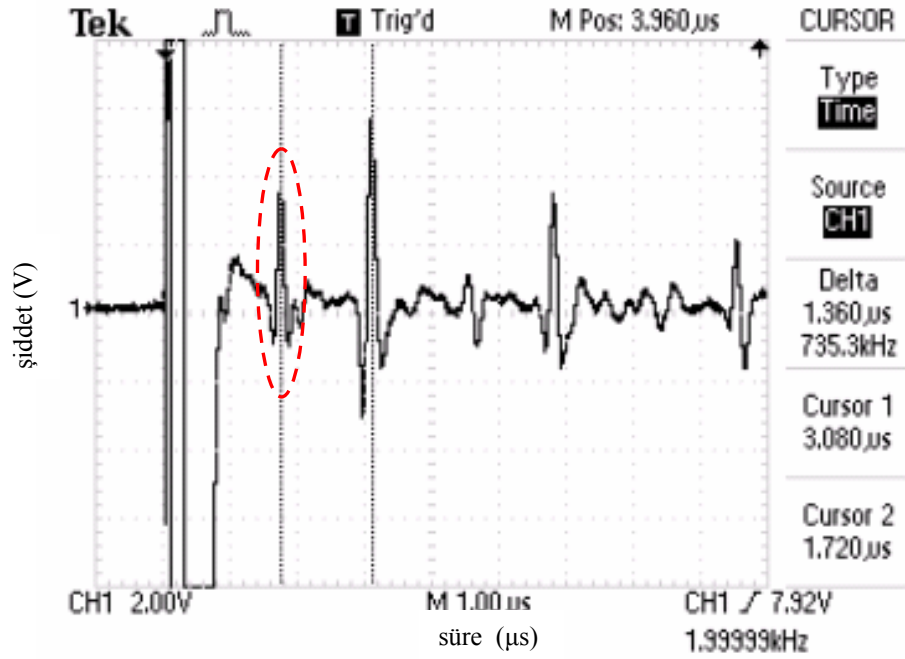


(b)

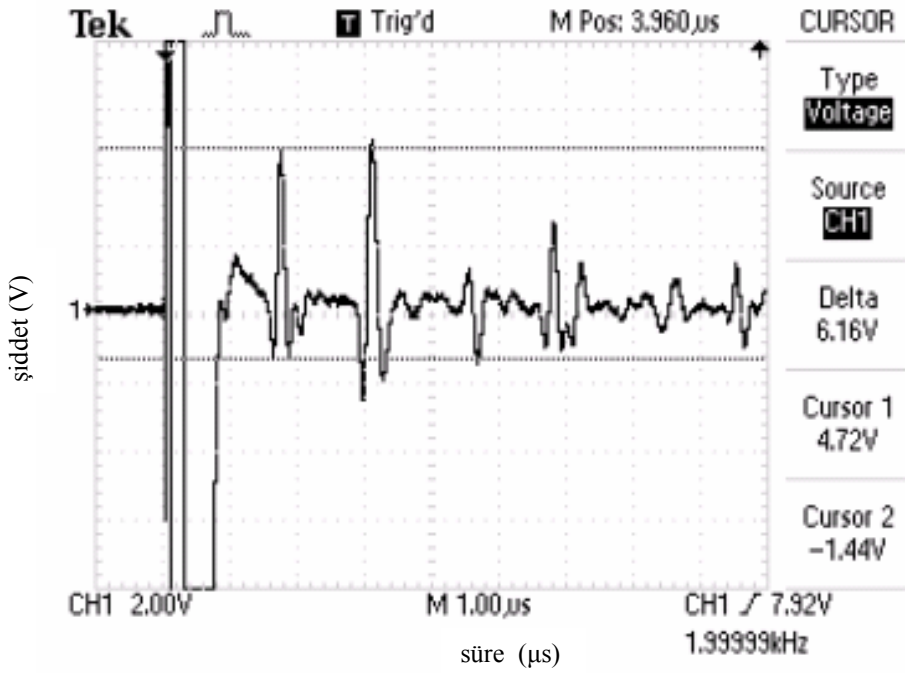


(c)

Şekil 6.48. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri

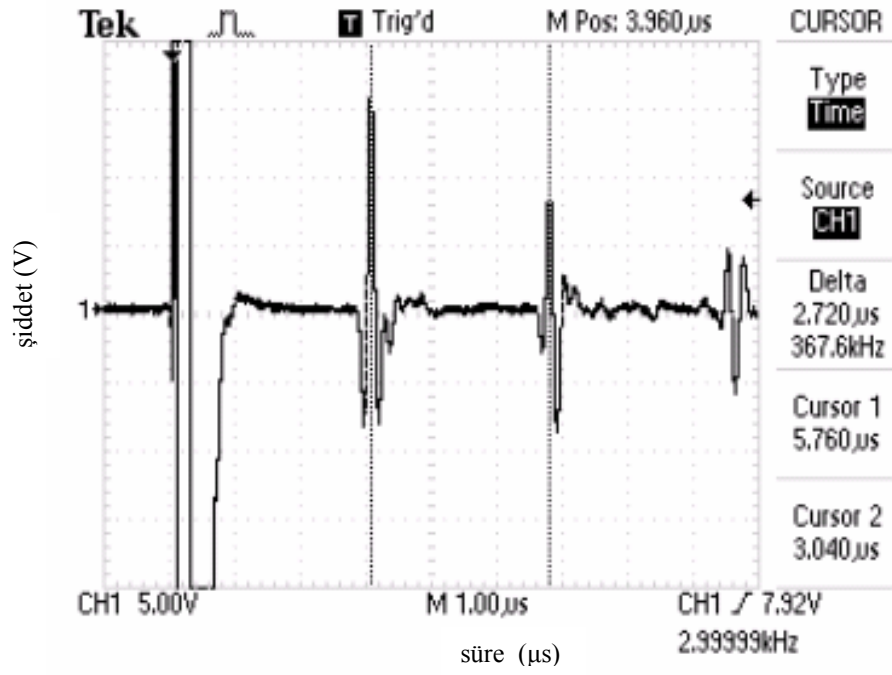


(d)

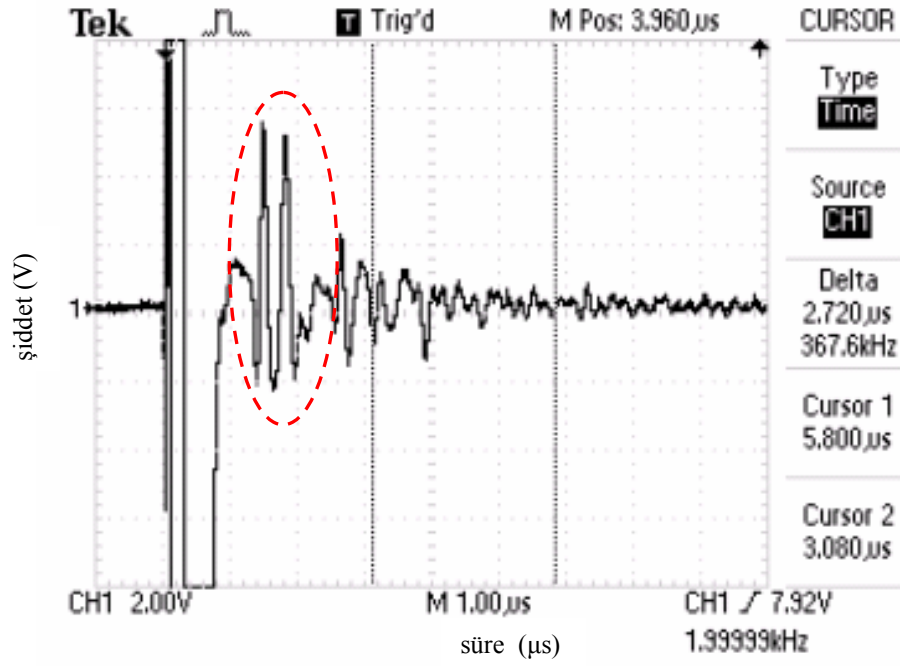


(e)

Şekil 6.48. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 1 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri

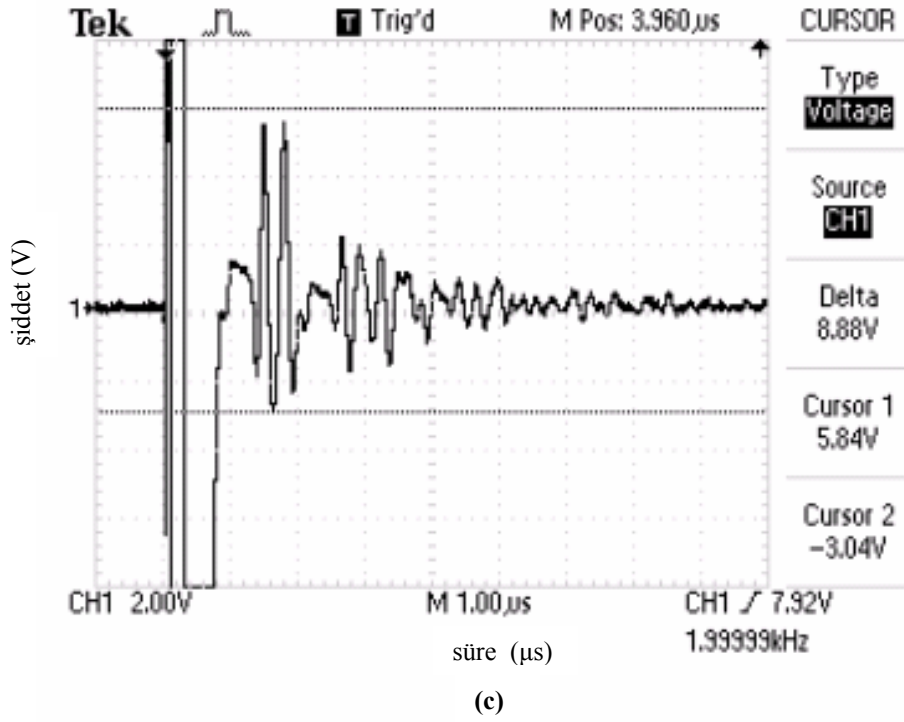


(a)



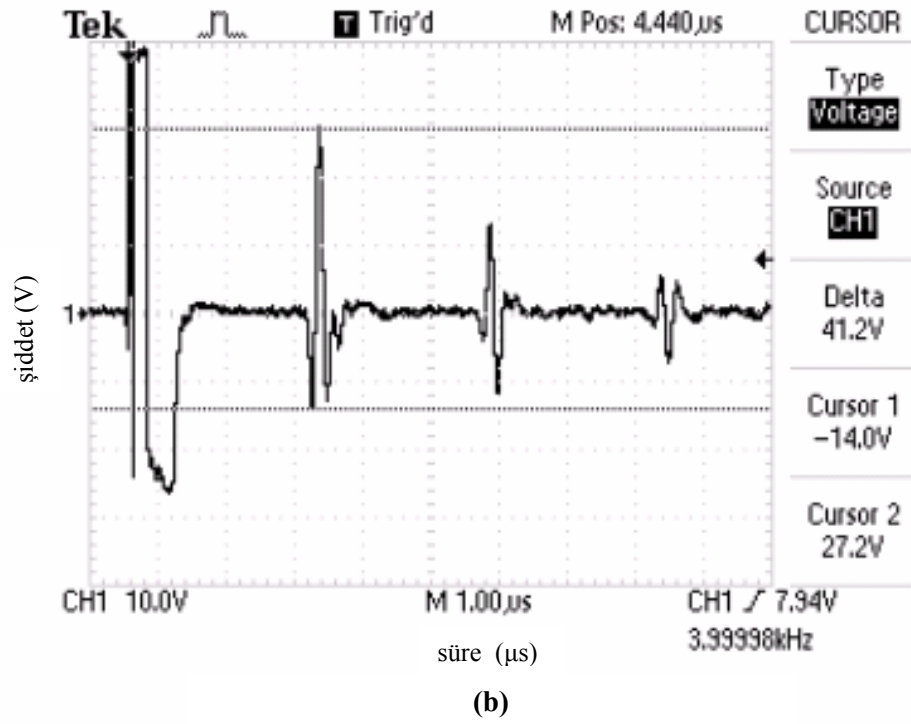
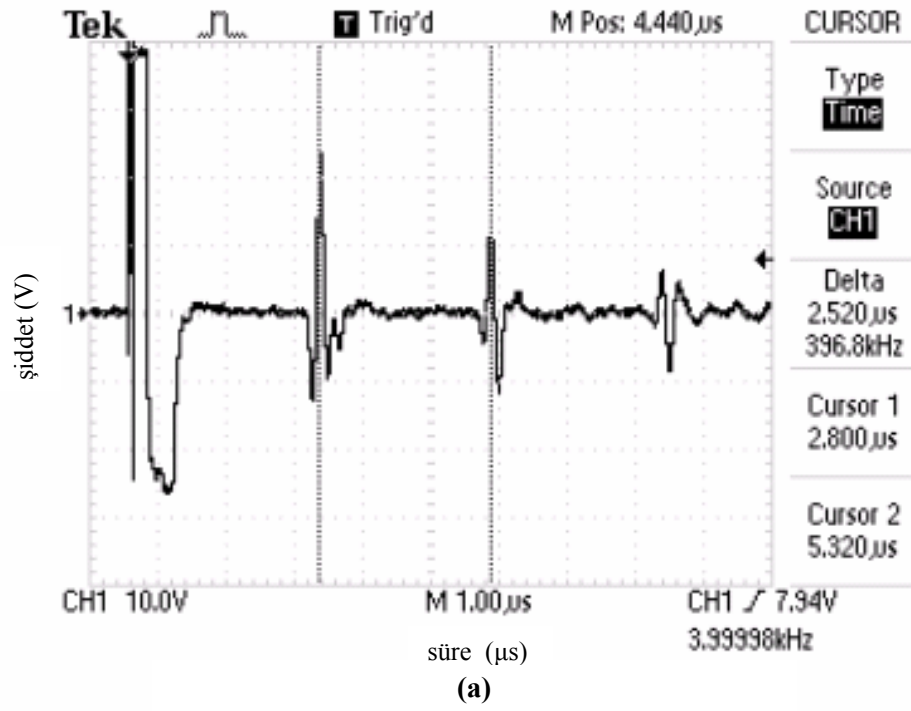
(b)

Şekil 6.49. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi değeri; 2 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (b) dalga ilerleme süresi, (c) voltaj değerleri

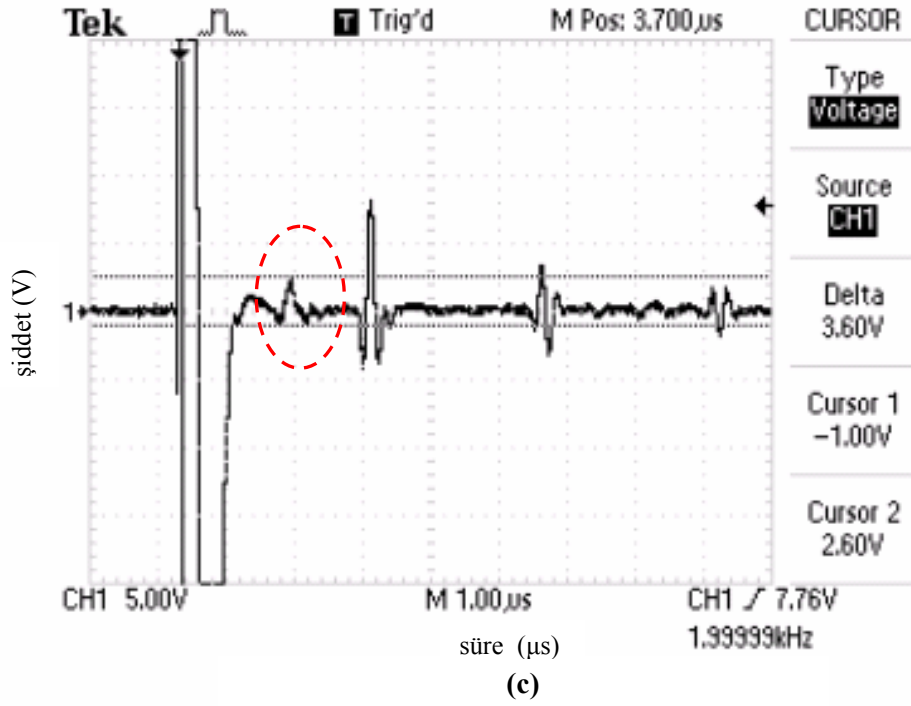


Şekil 6.49. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi değeri; 2 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için (b) dalga ilerleme süresi, (c) voltaj değerleri

Şekil 6.49.a’da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,72 \mu\text{s}$ ’dir. 2 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası içeren bölge için dalga ilerleme süresi ölçülemedi (Şekil 6.49.b). Şekilde de iki büyük hata görülmektedir. Numuneye presleme aşamasında yerleştirilen silgi, sinterleme esnasında bünyenin delinmesine yol açmıştır. Oluşan bölgeden elde edilen en yüksek hata pikinin şiddeti 8,88 voltur (Şekil 6.49.c). Hata pikleri incelendiğinde, delinme ile oluşan farklı kalınlıkların birçok hata piki oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.



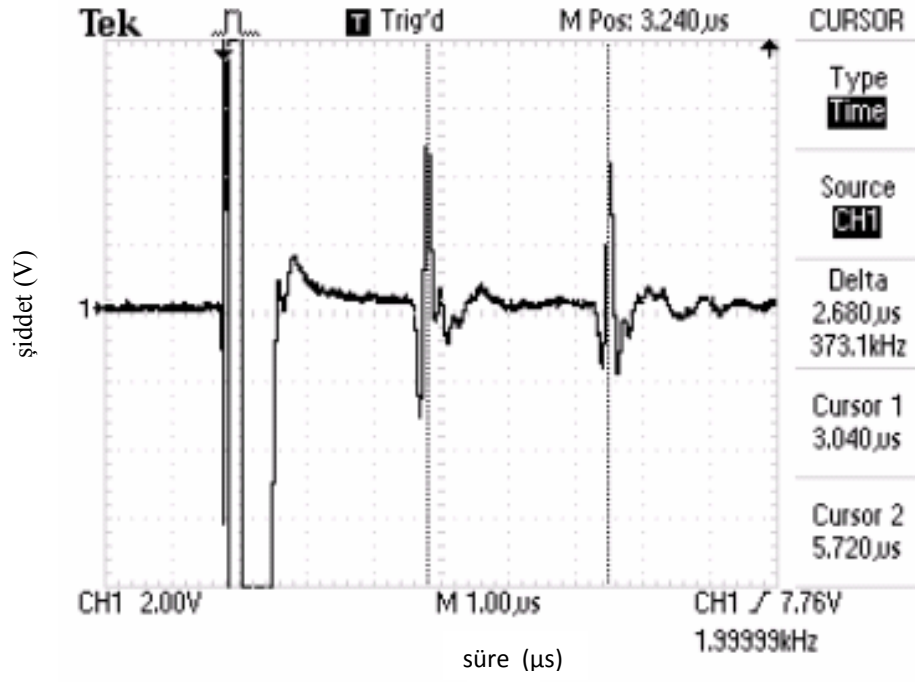
Şekil 6.50. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt hatası içeren bölge (c) voltaj değeri



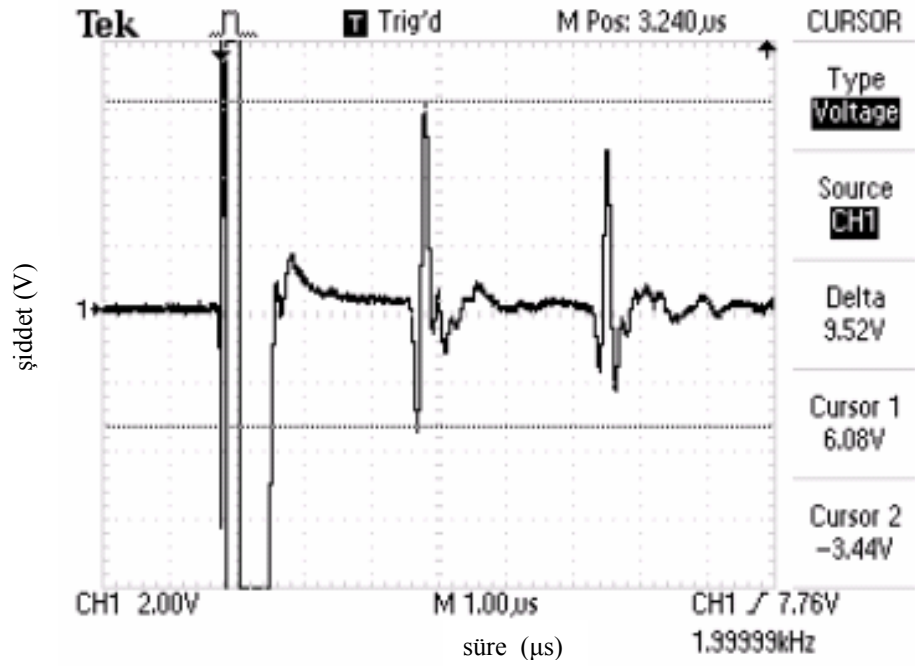
Şekil 6.50. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt hatası içeren bölge (c) voltaj değeri

Şekil 6.50.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi $2,52 \mu s$ 'dir. Hatasız bölgedeki başlangıç piki ise 41,2 voltur (Şekil 6.50.b). Kâğıdın yanması sonucunda bünyede farklı boyutlarda gözenekler oluştuğu düşünülmektedir. Bu bölgeden elde edilen en yüksek hata pikinin şiddeti 3,6 voltur (Şekil 6.50.c).

22 mm X 22 mm ve 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyolar hata oluşturmak amacıyla kullanılarak Graniser Granit ve Seramik Tic. A.Ş. granülleriyle karolar üretilmiş ve bu karolar temaslı ultrasonik cihazla 5 MHz'lik prob kullanılarak boyuna dalgalarla incelenmiştir.

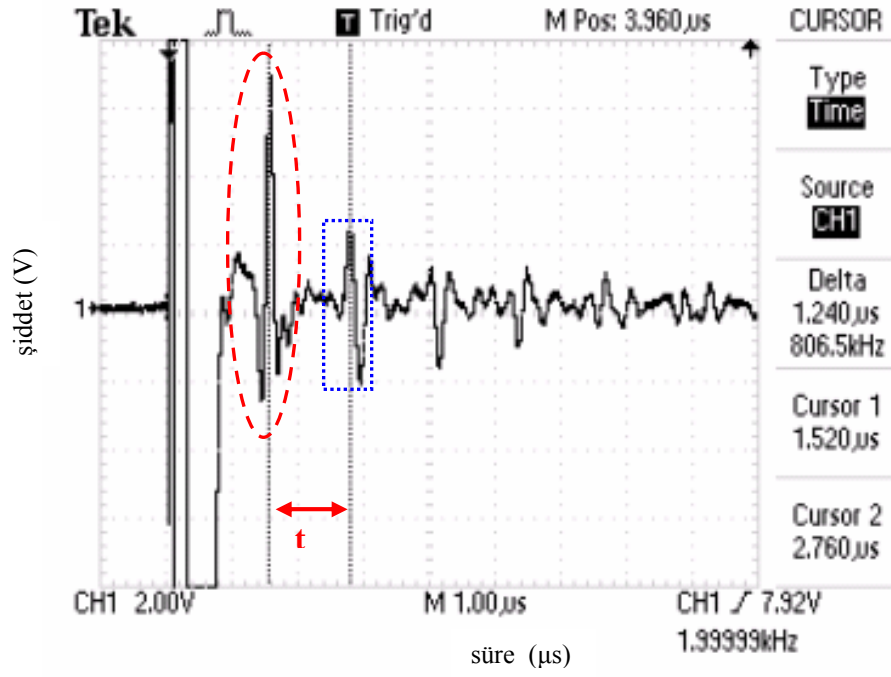


(a)

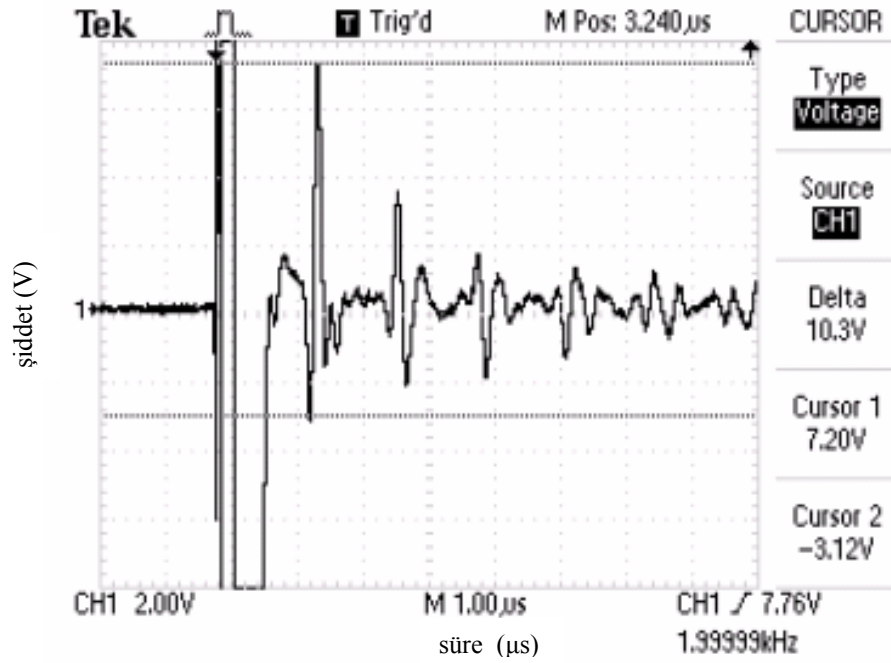


(b)

Şekil 6.51. Hatasız bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi (a), voltaj (b) değerleri; 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren bölge için dalga ilerleme süresi (c), voltaj (d) değerleri



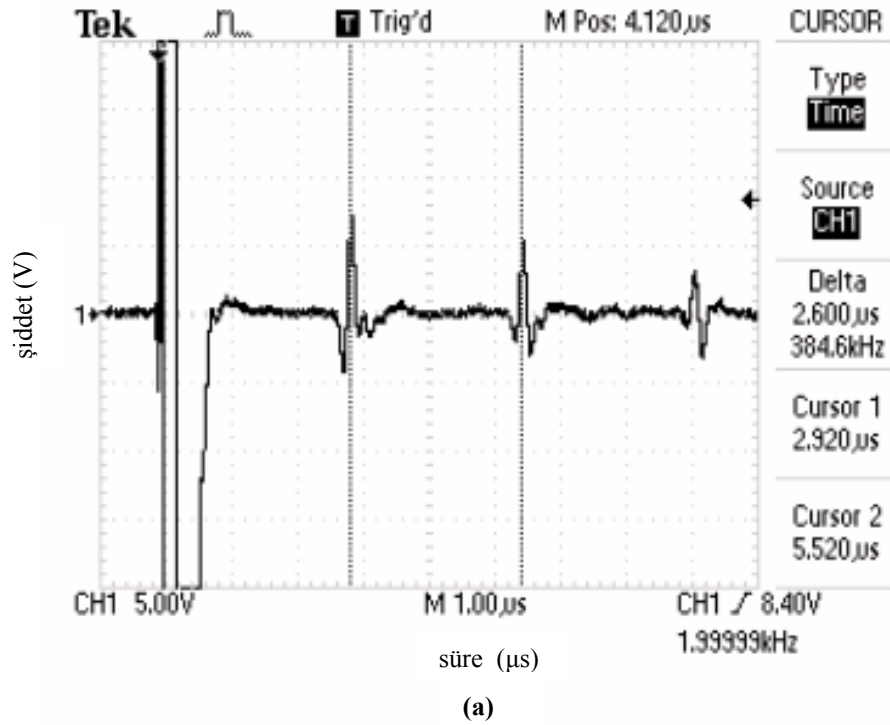
(c)



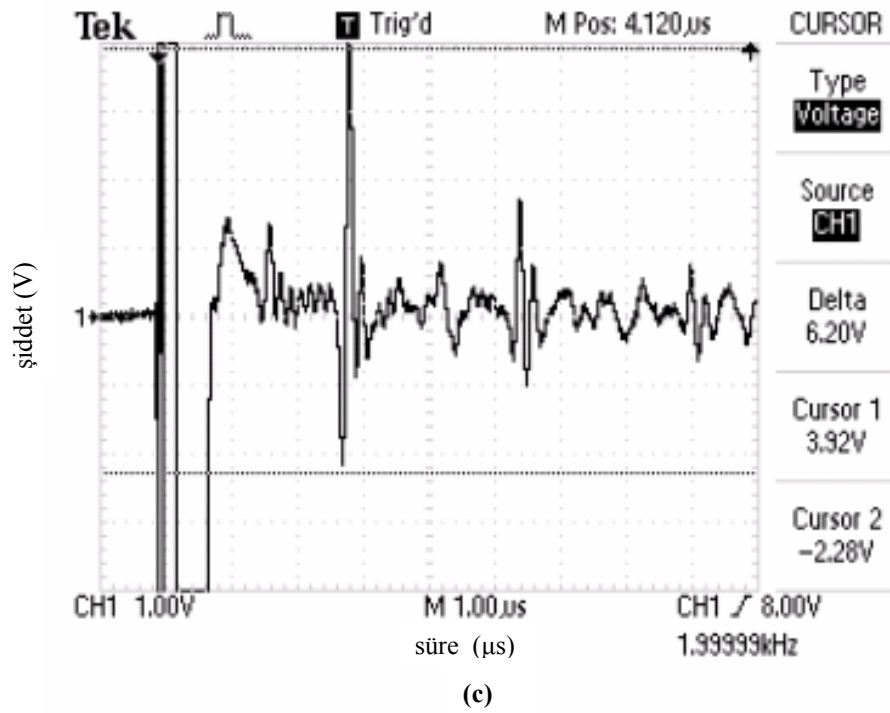
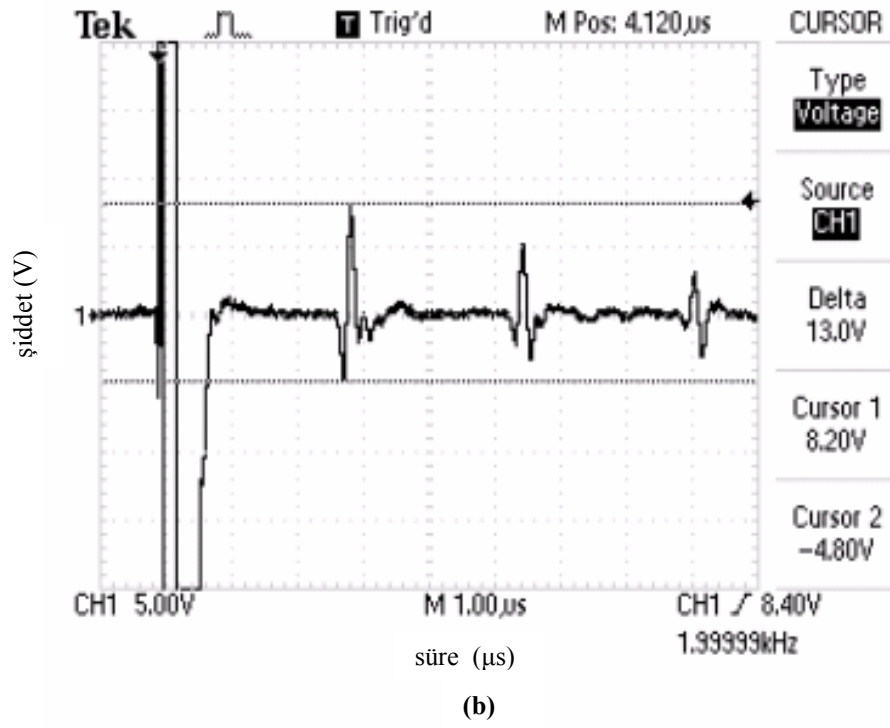
(d)

Şekil 6.51. Hatasız bölge için sinyallerin dalga ilerleme süresi (a), voltaj (b) değerleri; 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren bölge için dalga ilerleme süresi (c), voltaj (d) değerleri

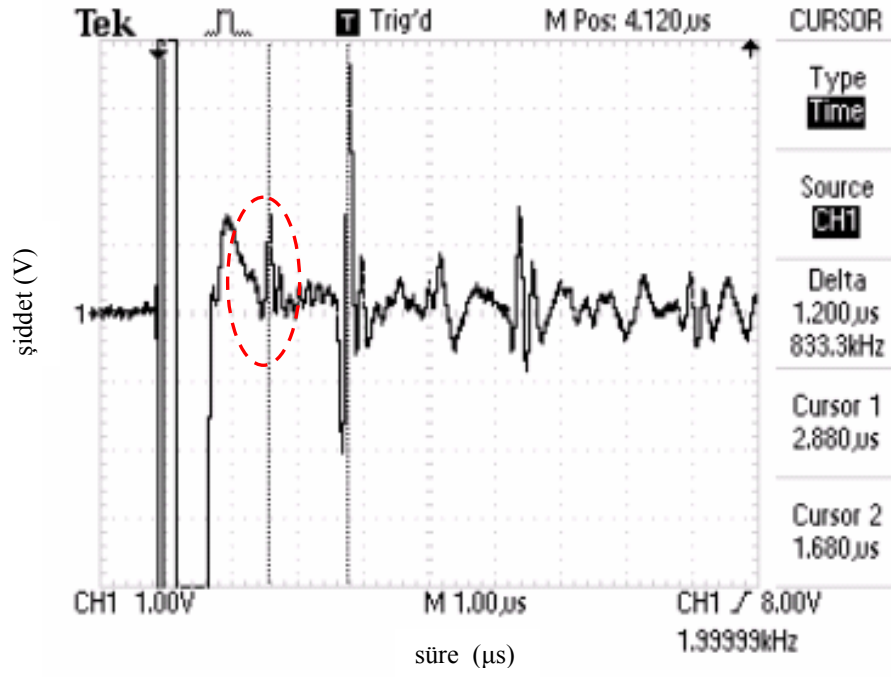
Şekil 6.51.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi 2,68 μs 'dir. Oluşturulan hata, prob çapından daha büyük bir hatadır. Bu nedenle başlangıç ve çıkış pikleri değişmiştir. Şekil 6.51.c'de başlangıç piki elips, çıkış piki dikdörtgen içinde ve dalga ilerleme süresi ise t ile gösterilmektedir. Hata, ultrasonik sinyalleri yansıtmaktadır. Hataya çarpan dalgaların tamamı geri yansımakta ve proba geri dönmektedir. Hatanın bulunduğu yere kadar olan dalga ilerleme süresi 1,24 μs 'dir. Hatanın bulunmadığı bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri 9,52 voltur (Şekil 6.51.b). Oluşturulan hata pikinin yüksekliği ise 10,3 voltur (Şekil 6.51.d). Alüminyumun ergime sıcaklığı 660,32 $^{\circ}\text{C}$ 'dir (Anonim 2010d). Alüminyum hatası içeren karonun sinterleme sıcaklığı ise 1200 $^{\circ}\text{C}$ 'dir ve bu sıcaklıkta yapıdaki alüminyum ergimiştir. Ayrıca Medding'in (1996) çalışmasında seramik diskler içine yerleştirilen alüminyumun ultrasonik C-taramaları sonucunda yüksek şiddette yansıtma oluşturduğu belirtilmektedir.



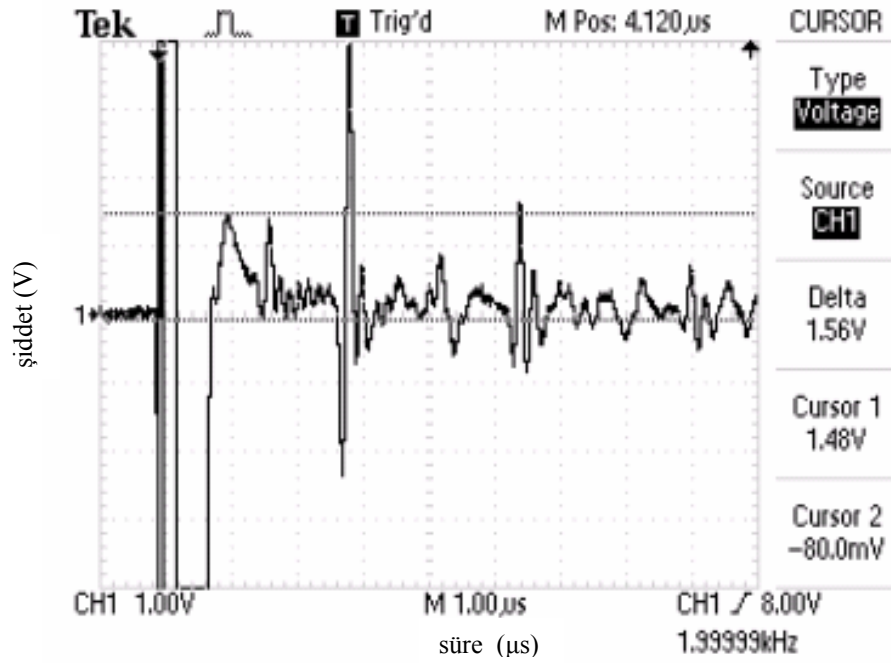
Şekil 6.52. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri



Şekil 6.52. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri



(d)



(e)

Şekil 6.52. Hatasız bölge için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) voltaj değerleri; 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren bölge için (c) ve (e) voltaj, (d) dalga ilerleme süresi değerleri

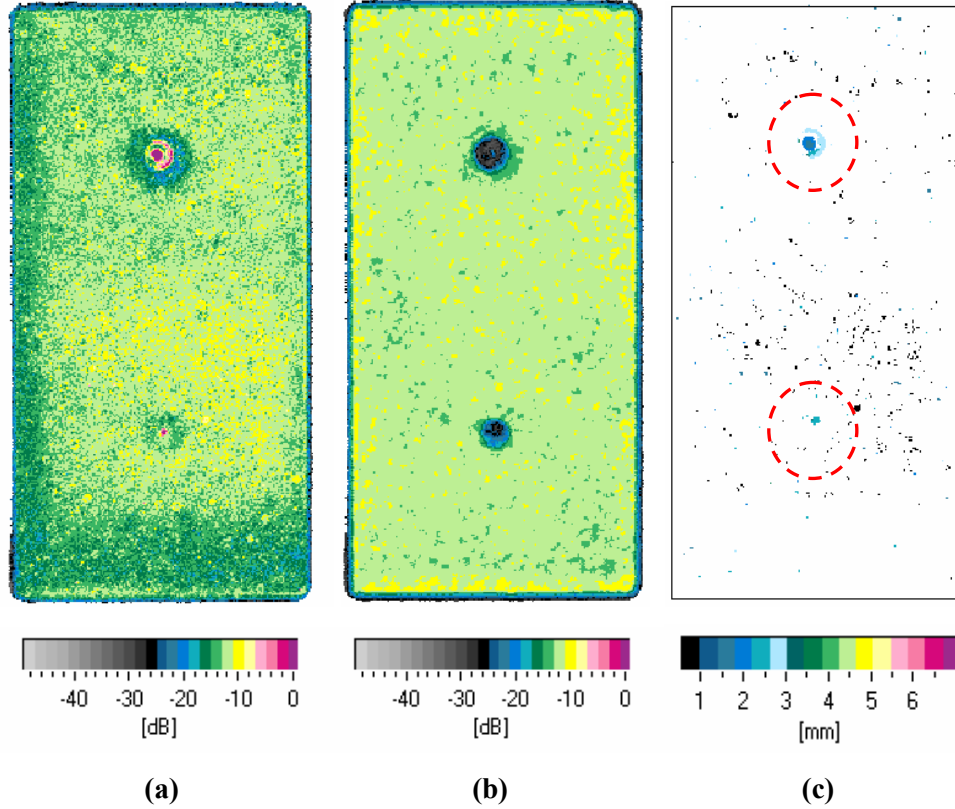
Şekil 6.52.a'da hatasız bölge için dalga ilerleme süresi 2,6 μ s'dir. Hata, ultrasonik sinyallerin bir kısmını yansıtmaktadır. Hataya çarpan dalgalar geri yansımakta ve proba geri dönmektedir. Hatanın bulunduğu yere kadar olan dalga ilerleme süresi 1,2 μ s'dir (Şekil 6.52.d). Hatanın bulunmadığı bölgenin başlangıç pik yüksekliği değeri 13 volttur (Şekil 6.52.b). Oluşturulan hatanın bulunduğu bölgede başlangıç pikinin yüksekliği ise 6,2 volttur (Şekil 6.52.c). Folyo hatası nedeniyle başlangıç pikinin şiddeti düşmüştür. 10mm X 10 mm ebatta alüminyum folyonun oluşturduğu hata piki 22mm X 22 mm ebatta alüminyum folyonun oluşturduğu hata pikinden çok daha düşük şiddettedir. 1cm² alana sahip alüminyum folyonun oluşturduğu hata pikinin yüksekliği 1,56 volttur (Şekil 6.52.e). Hata piklerinin şekilleri incelendiğinde, hata piki ile beraber küçük piklere de rastlanmaktadır. Alüminyumun ultrasonik dalgaları yansıtması bu pikleri oluşturmuş olabilir.

6.8. Ultrasonik C-tarama İncelemeleri

Ultrasonik C-tarama incelenen numunenin bölgesel ve boyutsal görüntüsünü vermektedir. Görüntü, probun tarama şekline paralel şekildedir. C-tarama görüntüleri otomatik veri toplama sistemi ile toplanmaktadır. Ultrasonik C-tarama analizleri için Dr. Hillger USPC 3040 DAC Industrie cihazı kullanılarak 6-12 MHz frekanslı, odak uzunluğu 15 mm ve prob çapı 6 mm olan ve darbe yankı modunda çalışan daldırma prob ile su içinde ultrasonik ölçümler yapılmıştır. Hata sinyallerinin toplandığı hata ekosu, karonun tabanına çarpan sinyallerin toplandığı geri yansıyan eko ve hatanın yerini belirleyen hata görüntüleri elde edilmiştir. Ultrasonik sinyallerdeki şiddet kaybı 0 dB'den (yüksek şiddet) - dB değerlerine (göreceli olarak düşük şiddet) değişmektedir. 0 dB hata ekosu için yapıda bulunan hatayı gösterirken, geri yansıyan eko için 'iyi' ya da 'yoğun' bölgeleri göstermektedir.

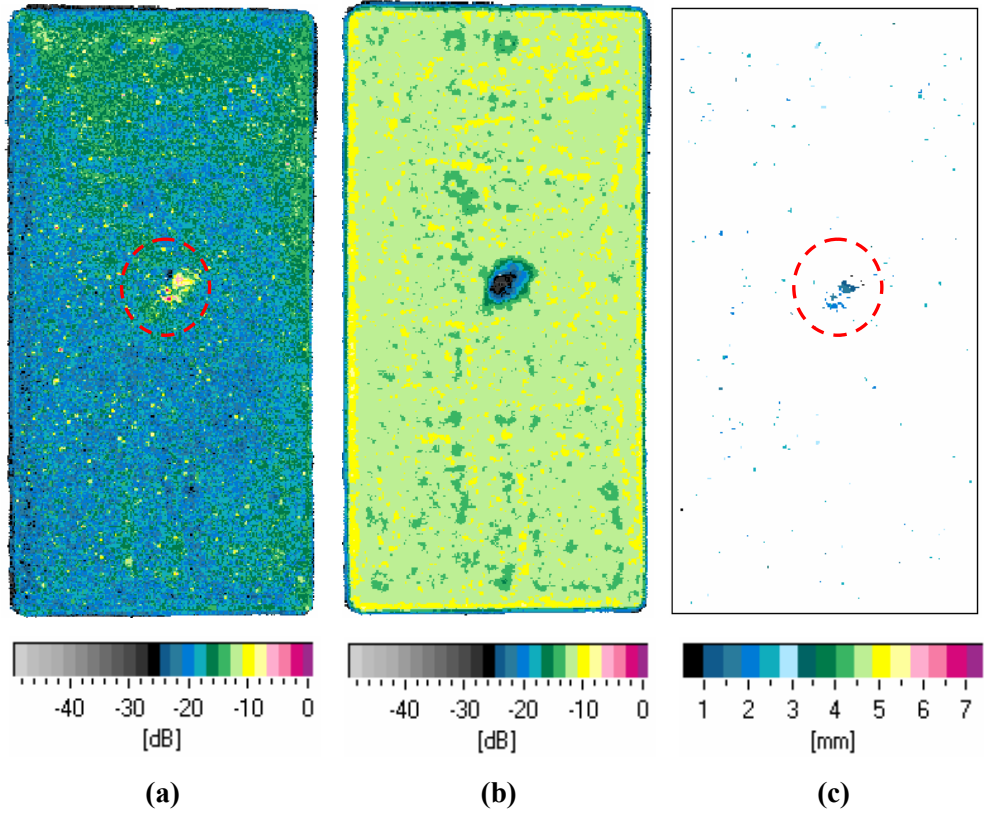
6.8.1. Safsızlık şeklindeki hatalar

Farklı çaplarda seramik ve metal bilyeler kullanılarak Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş. granülleriyle hatalı karolar üretilmiştir. Eren ve Kurama'nın (2010b) çalışmasında seramik Si_3N_4 bilyenin etkisi incelenmiştir.



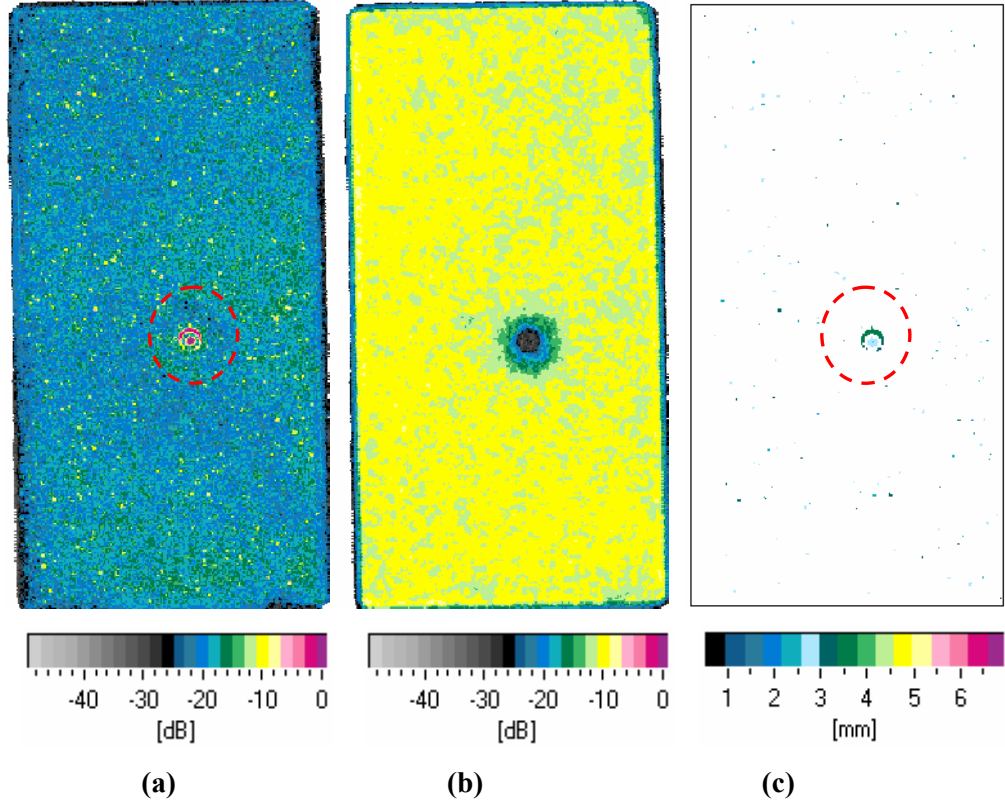
Şekil 6.53. 5 mm ve 3 mm çaplarında ZrO_2 bilyeler içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geriyansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.53.a'da hata ekosunda her iki ZrO_2 bilye de görülmektedir. Bilyeler küresel hatalar oluşturdukları ve ultrasonik dalgaların saçılmasına sebep oldukları için oluşturdukları sinyal kayıpları da sabit değildir. Bu durum büyük bilye için açıkça görülmektedir. Şekil 6.53.b'de geriyansıyan ekoda hataların -25 dB'in altında bir kayıba sebep olduğu görülmektedir. Şekil 6.53.c'deki hata yeri görüntüsünde büyük bilyenin 1,75–3 mm'de, küçük bilyenin ise 2,25–2,5 mm arasında yer aldığı görülmektedir.



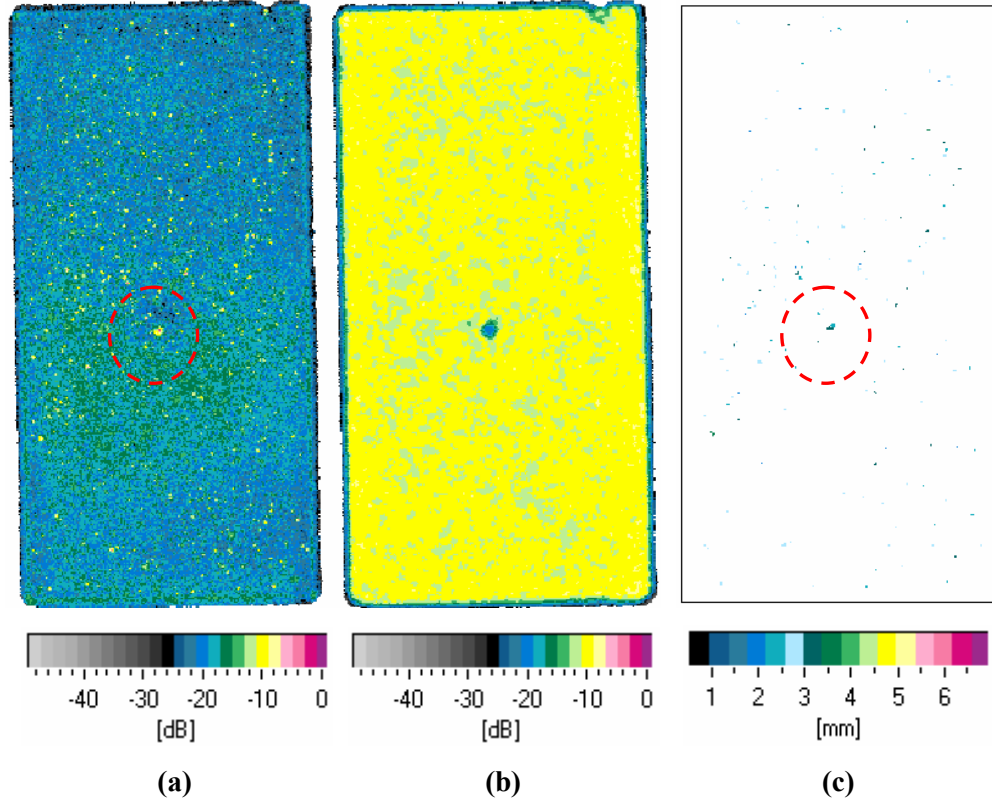
Şekil 6.54. 3 mm çapında Si₃N₄ bilye içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.54.a’da hata ekosunda Si₃N₄ bilye görülmektedir. Bilyeler küresel hatalar oluşturdukları ve ultrasonik dalgaların saçılmasına sebep oldukları için oluşturdukları sinyal kayıpları da sabit değildir. Bu nedenle bilyenin oluşturduğu yankı düzensizdir. Şekil 6.54.b’de geri yansıyan ekoda hatanın -20 ile -25 dB’in altında bir kayıba sebep olduğu görülmektedir. Şekil 6.54.c’deki hata yeri görüntüsünde bilyenin 2 mm’de yer aldığı görülmektedir.



Şekil 6.55. 4 mm çaplı çelik bilye içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.55.a’da hata ekosunda 4 mm çaplı çelik bilye görülmektedir. Bilyeler küresel hatalar oluşturdukları ve ultrasonik dalgaların saçılmasına sebep oldukları için oluşturdukları sinyal kayıpları da sabit değildir. Bu nedenle bilyenin oluşturduğu yankı düzensizdir. Şekil 6.55.b’de geri yansıyan ekoda hatanın -20 ile -25 dB’in altında bir kayıba sebep olduğu görülmektedir. Şekil 6.55.c’deki hata yeri görüntüsünde bilyenin 2,5–3 mm’de yer aldığı görülmektedir.

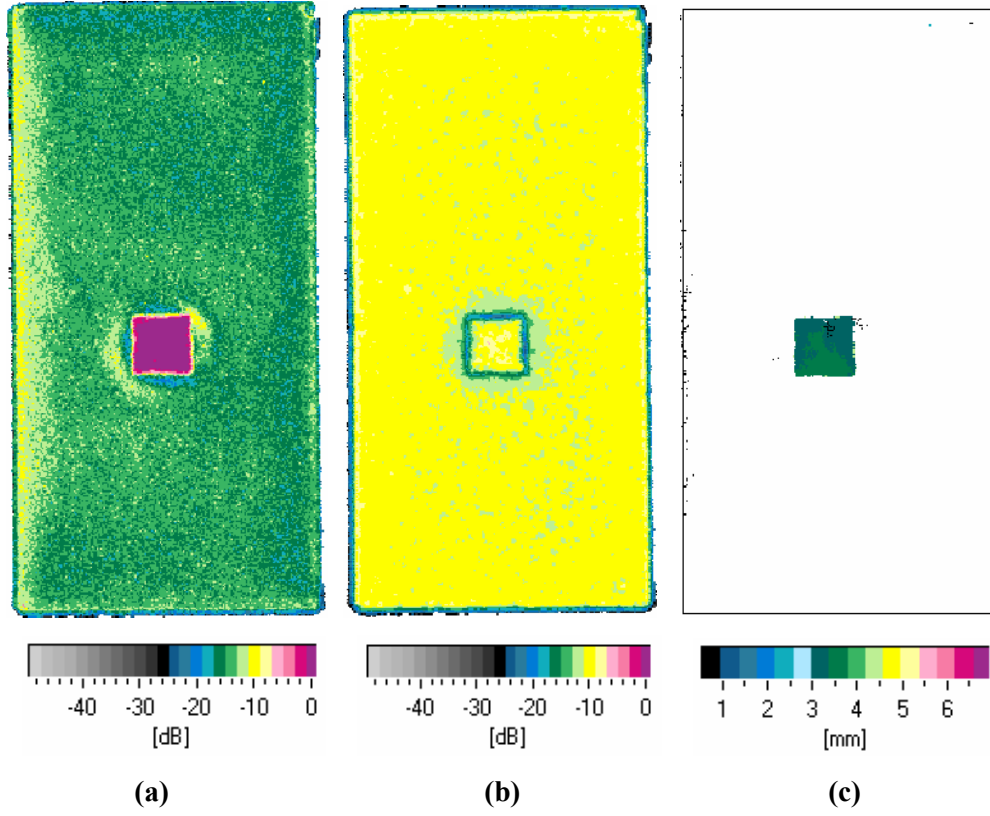


Şekil 6.56. 1 mm çaplı çelik bilye içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geriyanıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.56.a’da hata ekosunda 1 mm çaplı çelik bilyenin oluşturduğu yankı güçlüğüle fark edilmektedir. Şekil 6.56.b’de geriyanıyan ekoda hatanın -20 dB bir kayıba sebep olduğu görülmektedir. Şekil 6.56.c’deki hata yeri görüntüsünde bilyenin yeri tespit edilememiştir.

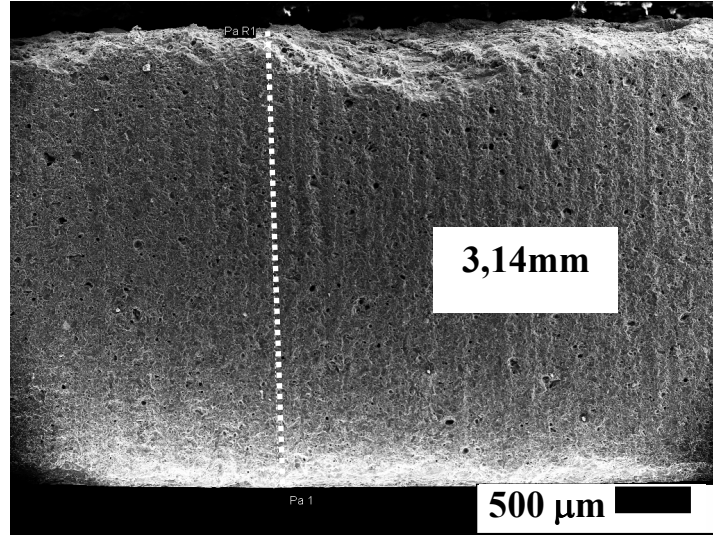
6.8.2. Boşluk oluşturan hatalar

10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt, 22 mm X 22 mm ve 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyolar, karolarda sıklıkla rastlanan hatalardan ‘black core’ hatasını temsil etmesi amacıyla plastik parçalar hata oluşturmak amacıyla kullanılarak Graniser Granit ve Seramik Tic. A.Ş. granülleriyle karolar üretilmiş ve bu karolar 1200°C’de Nabertherm marka Ls 12–13 model tost fırında sinterlenerek 6–12 MHz frekanslı daldırma prob kullanılarak incelenmiştir.

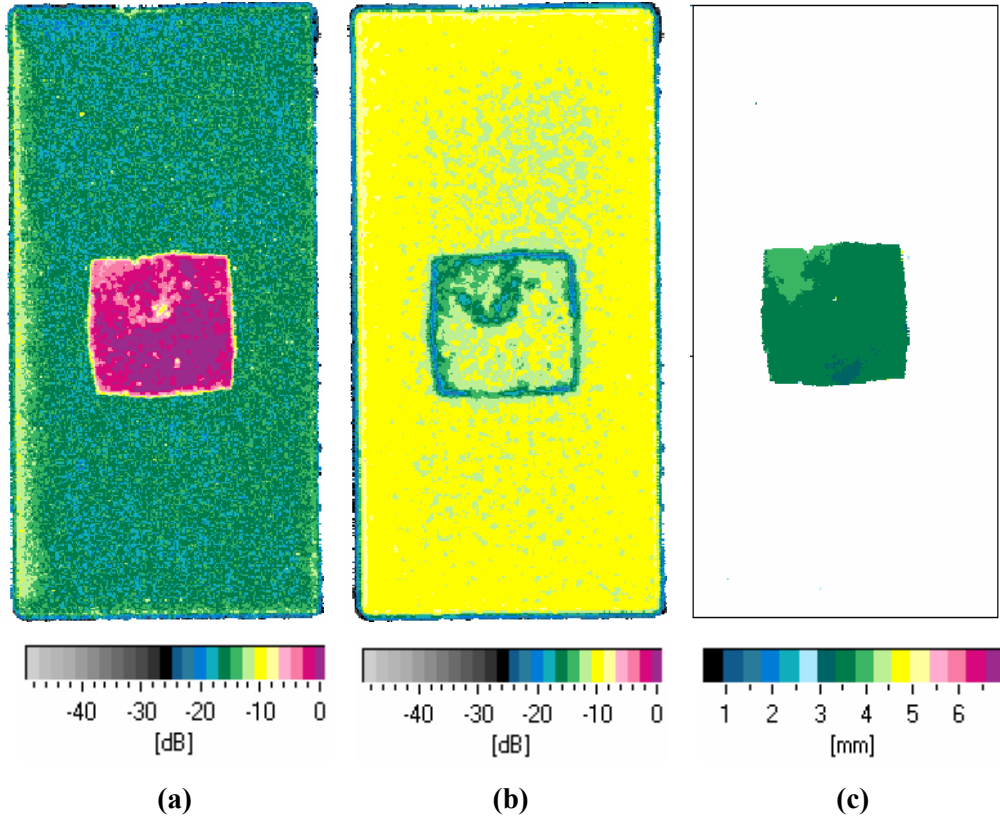


Şekil 6.57. 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.57.a'da hata ekosunda 10mm x 10mm kâğıt hatası görülmektedir. Şekil 6.57.b'de geri yansıyan eko da kâğıt hatası için -20 dB'dir. Kâğıdın oluşturduğu hatanın yüzeye yakınlığı 3–3,5 mm arasında değişmektedir (Şekil 6.57.c). Hatanın yüzeye uzaklığı elektron mikroskobu ile de ölçülmüş (Şekil 6.58) ve elde edilen 3,14 mm'nin ultrasonik C-tarama ile elde edilen değer aralığında yer aldığı görülmüştür.

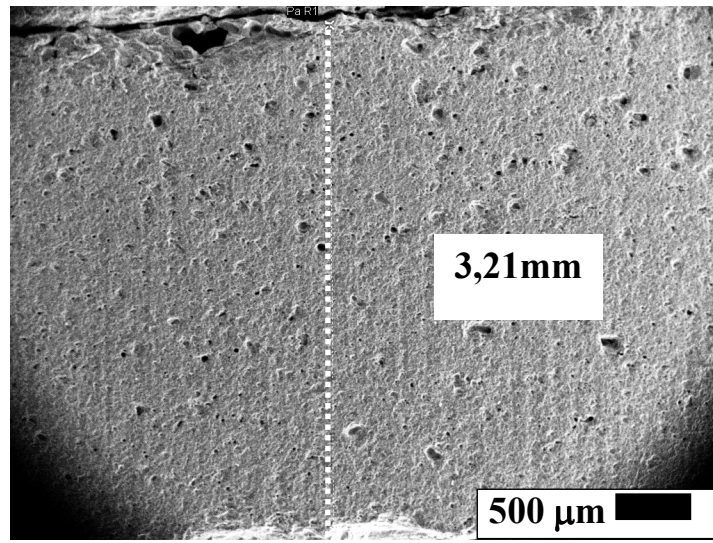


Şekil 6.58. Kağıt hatası içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE)görüntüsü



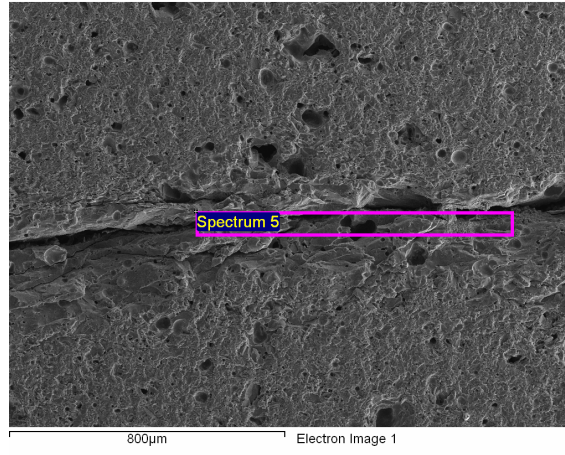
Şekil 6.59. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.59.a'da hata ekosunda 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası görülmektedir. Folyo presleme yönüne dik şekildedir. Bu nedenle gönderilen dalgalar direkt yansımışlardır. Ancak folyonun sinterleme sıcaklığında ergimesi nedeniyle hata ekosunda farklılıklar meydana gelmiştir. Şekil 6.59.b'de geri yansıyan ekoda hatanın kenarları için -20 dB'dir. Karonun içinde hatanın üst kısmında oluşturduğu eko da görülmektedir. Şekil 6.59.c'deki hata yeri görüntüsünde folyonun 3-4 mm'de yer aldığı görülmektedir. SEM'de ölçülen 3,21 mm'de bu aralığın içindedir (Şekil 6.60).

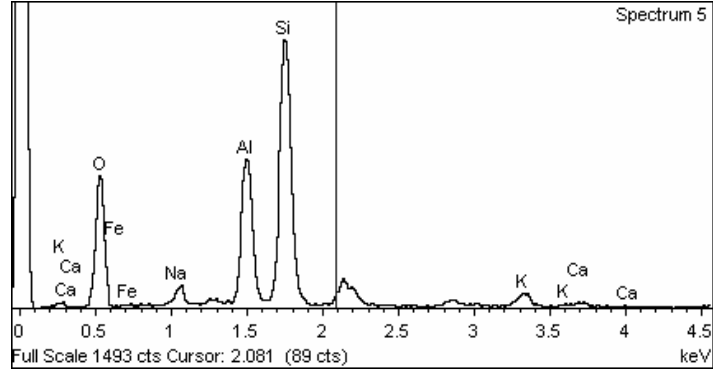


Şekil 6.60. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü

22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren karonun hatalı kısmından seçilen bölge Şekil 6.61.a'da, bu bölgeden yapılan EDX analizi Şekil 6.61.b'de verilmektedir. EDX analizi, alüminyumun sinterleme sıcaklığında eriyerek bünye içine penetre olduğunu göstermektedir. Alüminyum folyo hatası için başka bir bölgeden nokta analizi yapılmıştır (Şekil 6.62.a). Yapılan EDX analiz sonucunda (Şekil 6.62.b), kuvars taneleri üstünde alüminyumun ergidikten sonra tekrar katılaştığı görülmektedir.

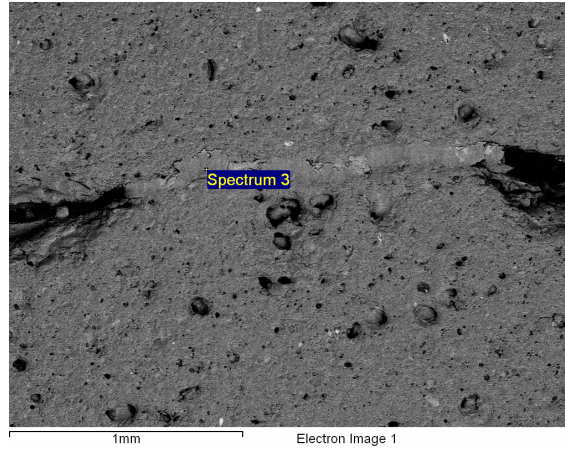


(a)

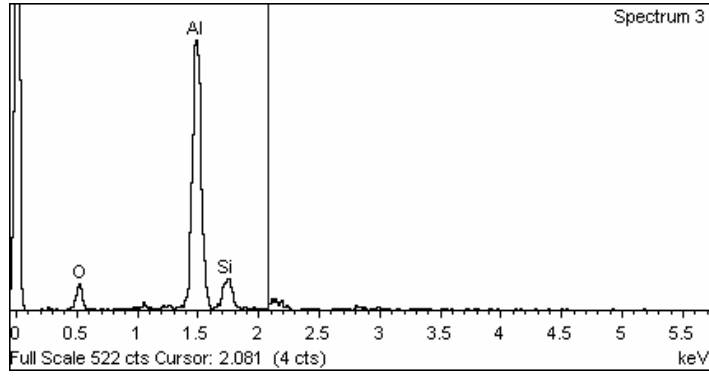


(b)

Şekil 6.61. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen temsili geri yansıyan elektron (BE) görüntüsü (a), bu bölgeden yapılan EDX analizi (b)



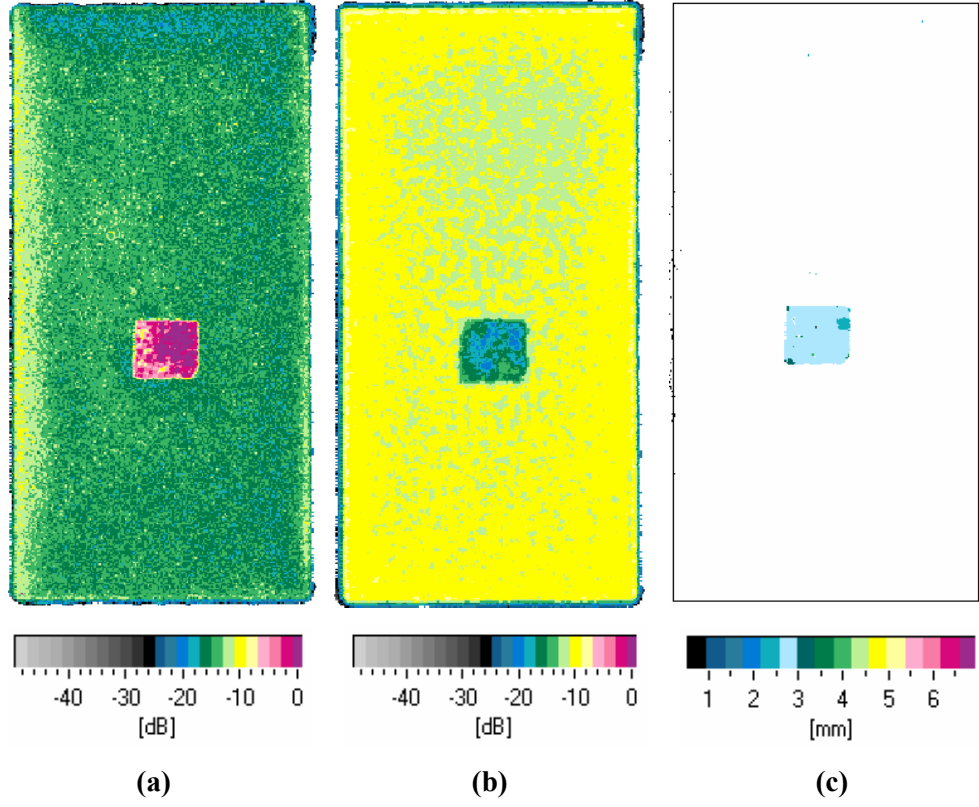
(a)



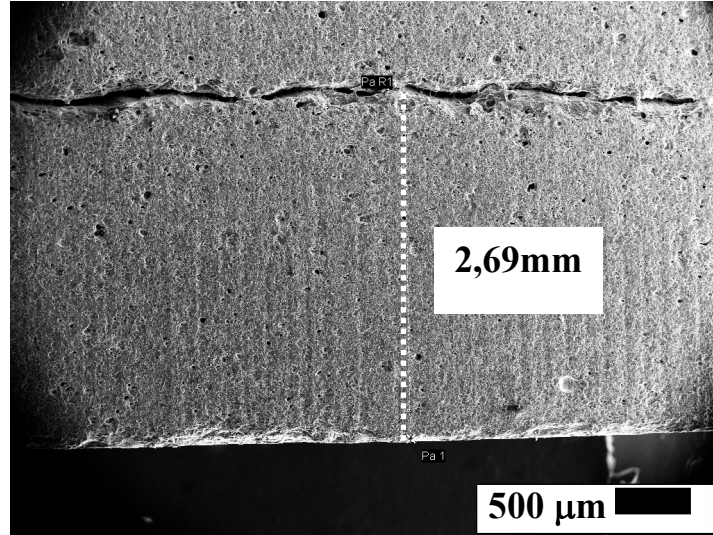
(b)

Şekil 6.62. 22 mm X 22 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen geri yansıyan elektron (BE) görüntüsü (a), bu bölgeden yapılan EDX analizi (b)

Şekil 6.63.a'da hata ekosunda 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası görülmektedir. Folyo presleme yönüne dik şekildedir. Bu nedenle gönderilen dalgalar direkt yansımışlardır. Ancak folyonun sinterleme sıcaklığında ergimesi nedeniyle hata ekosunda farklılıklar meydana gelmiştir. Şekil 6.63.b'de geri yansıyan eko da hata için -15 ile -20 dB'dir. Şekil 6.63.c'deki hata yeri görüntüsünde folyonun 2,5–3 mm'de yer aldığı görülmektedir. Şekil 6.64'teki SEM görüntüsünde ölçülen 2,69 değeri bu sonucu desteklemektedir.

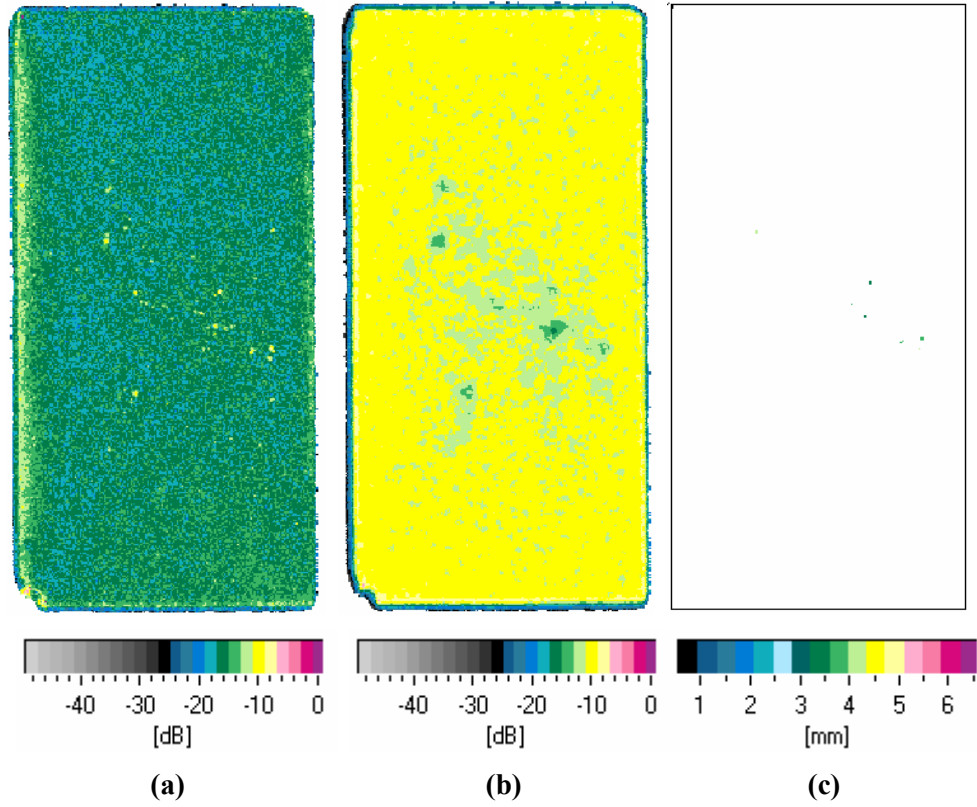


Şekil 6.63. 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

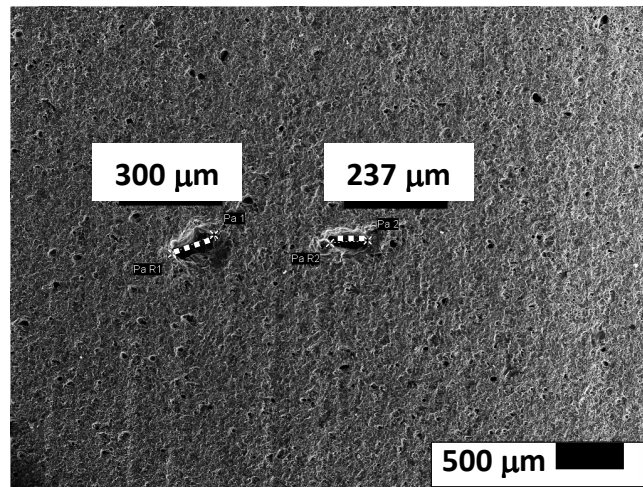


Şekil 6.64. 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü

Şekil 6.65.a'da hata ekosunda ve Şekil 6.65.c'de hata ekosunda plastik hatalar görülememektedir. Ancak Şekil 6.65.b'de geri yansıyan ekoda plastik hatası görülmektedir. Şekil 6.66'teki SEM görüntüsünde ölçülen plastik boyutları 300 ve 237 μm 'dur. Ölçülen bu boyutlar cihazın çözünürlüğü dahilindedir (Kurama ve Eren 2010).

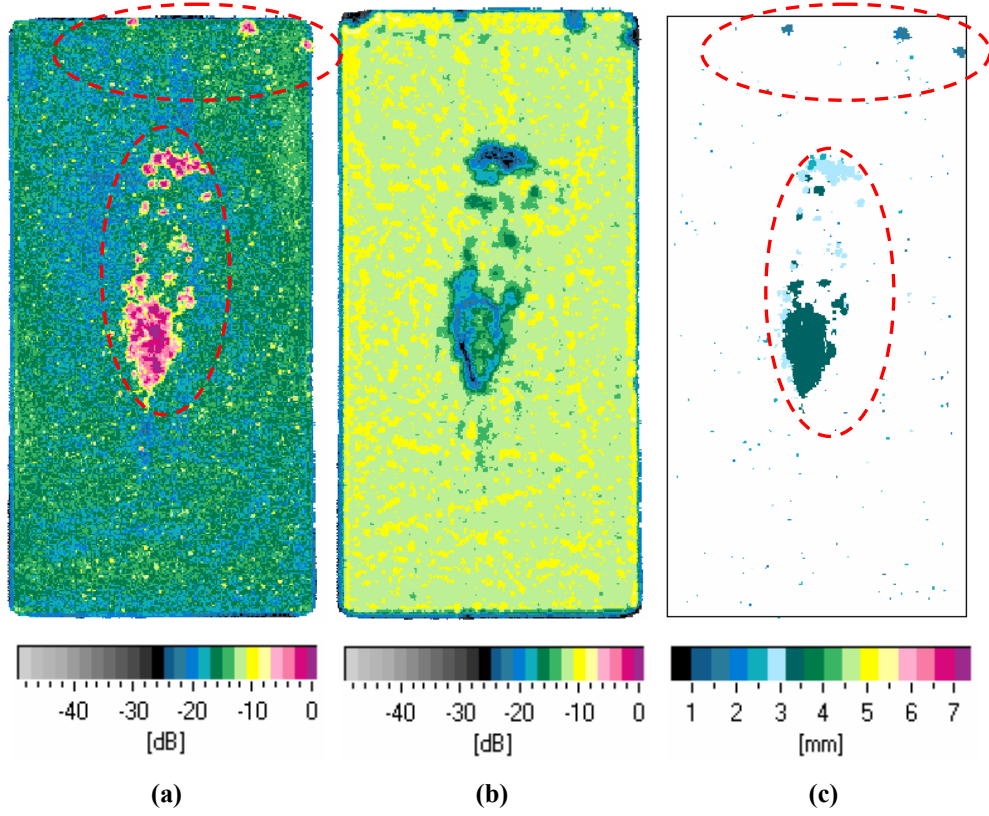


Şekil 6.65. Plastik içeren karo için (a) hata ekosunu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü



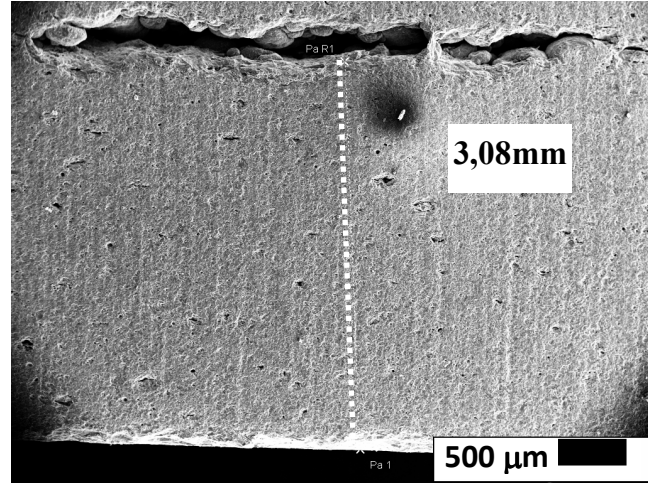
Şekil 6.66. Plastik içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü

Karbon karası, kâğıt, PMMA, silgi ve PEG gibi ilavelerle boşluk oluşturularak Hitit Seramik granülleriyle hataları karolar üretilmiş ve bu karolar 6–12 MHz frekanslı daldırma prob kullanılarak incelenmiştir.

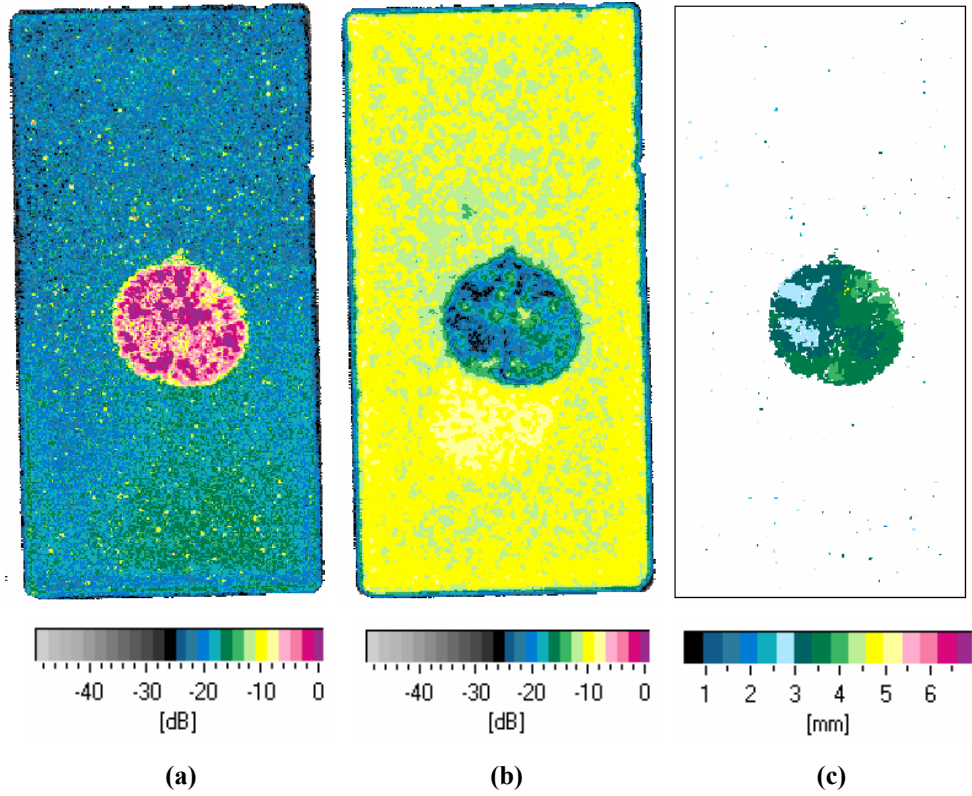


Şekil 6.67. Karbon karası içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.67.a’da hata ekosunda karbon karası hatası görülmektedir. Karbon karasının karo içinde düzensiz bir şekilde dağılması nedeniyle hata ekosunda farklılıklar meydana gelmiştir. Şekil 6.67.b’de geri yansıyan eko karbon karası hatası için -20 dB’dir. Karonun içinde hatanın üst kısmındaki bölümün oluşturduğu eko da görülmektedir. Şekil 6.67.c’deki hata yeri görüntüsünde farklı kalınlıklarda yer aldığı görülmektedir. Hatanın yüzeye uzaklığı 3,08 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.68). Bu değer, ultrasonik C-tarama ile belirlenen hata yeri değeri arasındadır.



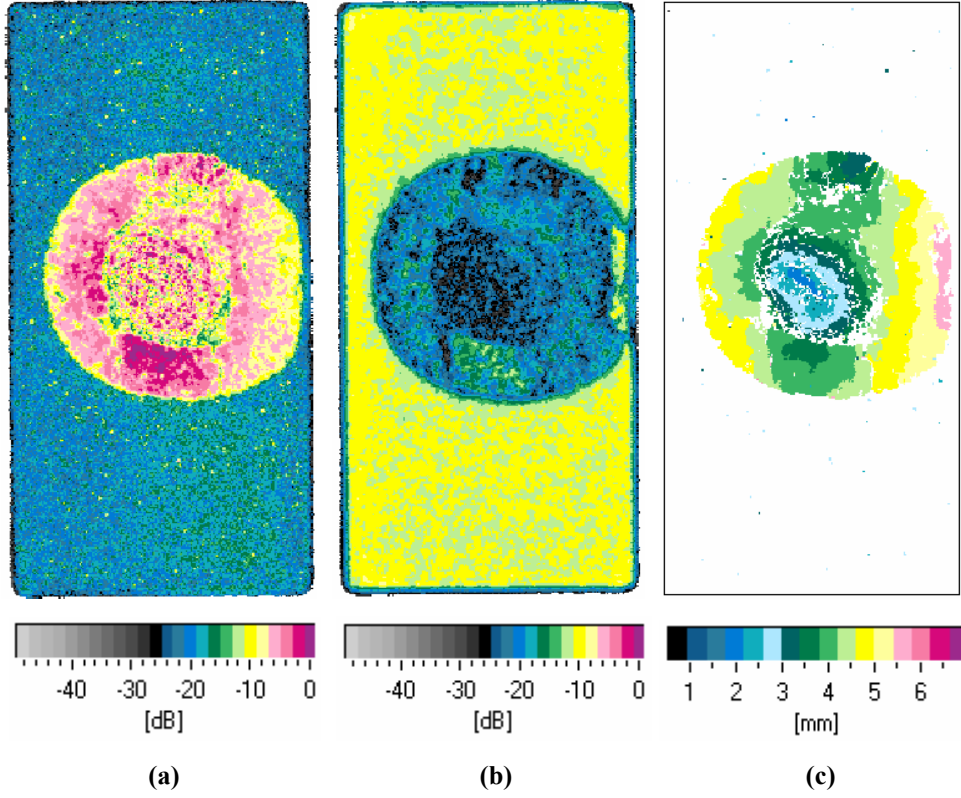
Şekil 6.68. Karbon karası içeren karo için çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü



Şekil 6.69. PMMA taneleri içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

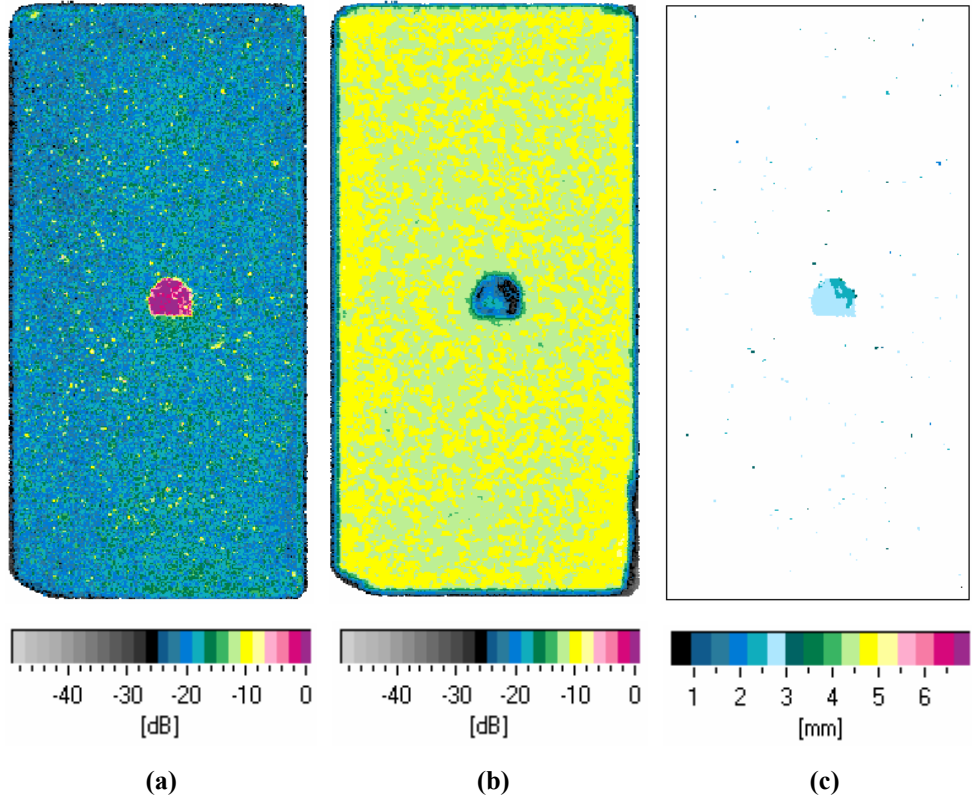
Şekil 6.69.a'da hata ekosunda karonun içine yerleştirilen PMMA tanelerinden oluşan hata görülmektedir. PMMA'nın karo içinde düzensiz bir şekilde dağılması nedeniyle hata ekosunda farklılıklar meydana gelmiştir. Şekil

6.69.b’de geri yansıyan eko PMMA hatası için -20 dB’dir. Şekil 6.69.c’deki hata yeri görüntüsünde PMMA’nın 2,5 mm’den 4 mm’ye değişen kalınlıklarda yer aldığı görülmektedir.



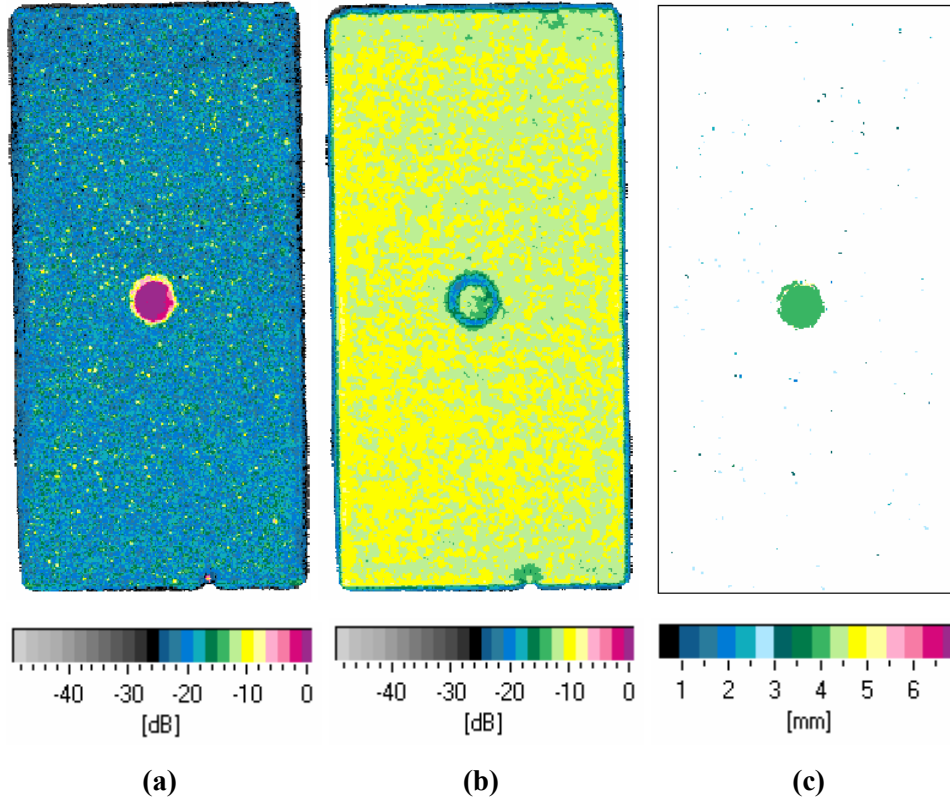
Şekil 6.70. PMMA içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.70’de yer alan PMMA taneciklerine göre Şekil 6.69’da daha fazla miktarda PMMA tanecikleri kullanılmıştır. Şekil 6.70.a’da hata ekosunda karonun içine yerleştirilen PMMA tanelerinden oluşan hata görülmektedir. PMMA’nın karo içinde düzensiz bir şekilde dağılması nedeniyle hata ekosunda farklılıklar meydana gelmiştir. Şekil 6.70.b’de geri yansıyan eko PMMA hatası için -20 dB’dir. Şekil 6.70.c’deki hata yeri görüntüsünde PMMA’nın 2 mm’den 6 mm’ye değişen kalınlıklarda yer aldığı görülmektedir.



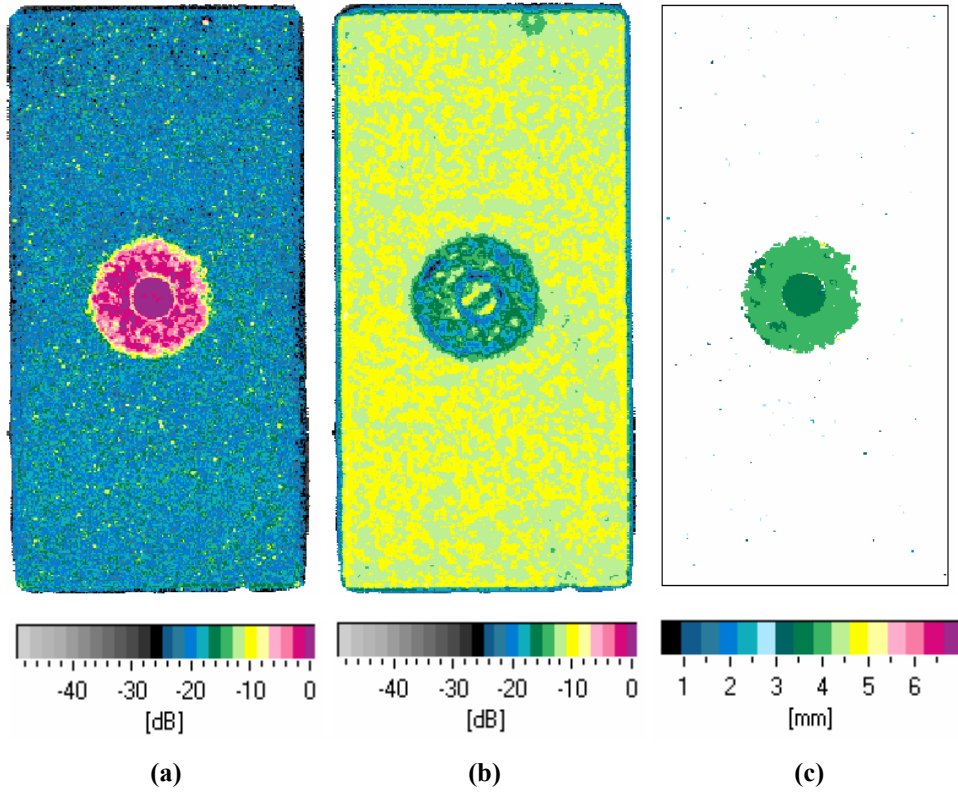
Şekil 6.71. PEG içeren karo için (a) hata ecosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.71.a'da hata ekosunda karonun içine yerleştirilen PEG'in oluşturduğu hata görülmektedir. Şekil 6.71.b'de geri yansıyan eko PEG hatası için -20'den -30 dB'e değişmektedir. Şekil 6.71.c'deki hata yeri görüntüsünde PEG'in 2,5 mm'den 3 mm'ye değişen kalınlıklarda yer aldığı görülmektedir.



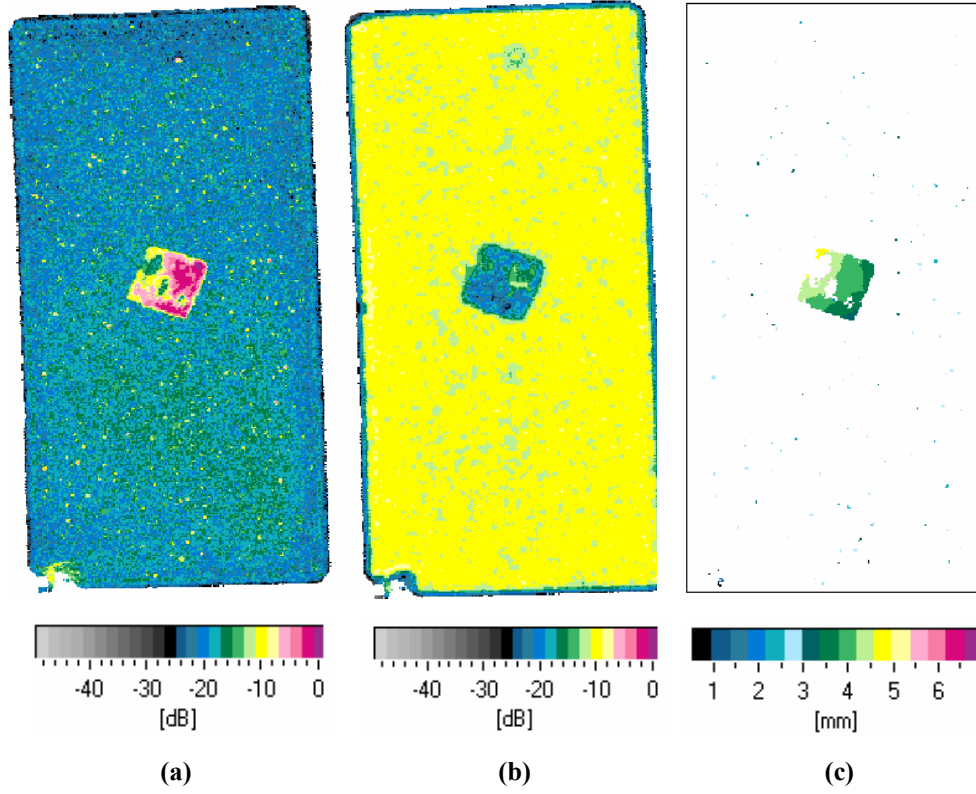
Şekil 6.72. 0,5 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.72.a’da hata ekosunda 0,5 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası görülmektedir. Silgi presleme yönüne dik şekildedir. Bu nedenle gönderilen dalgalar direkt yansımışlardır. Şekil 6.72.b’de geri yansıyan ekoda hatanın kenarları için -20 dB’dir. Karonun içinde hatanın üst kısmındaki kısmın oluşturduğu eko da görülmektedir. Şekil 6.72.c’deki hata yeri görüntüsünde silginin 4 mm’de yer aldığı görülmektedir.



Şekil 6.73. 1 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi içeren karo için (a) hata ekosu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

Şekil 6.73.a’da hata ekosunda 1 mm kalınlığında 6,8 mm çapında silgi hatası görülmektedir. Silgi presleme yönüne dik şekildedir. Bu nedenle gönderilen dalgalar direkt yansımışlardır. Şekil 6.73.b’de geri yansıyan ekoda hatanın kenarları için -20 dB’dir. Karonun içinde hatanın üst kısmındaki kısmın oluşturduğu eko da görülmektedir. Silginin oluşturduğu hatanın yüzeye yakınlığı 3,75–4,25 mm arasındadır (Şekil 6.73.c).

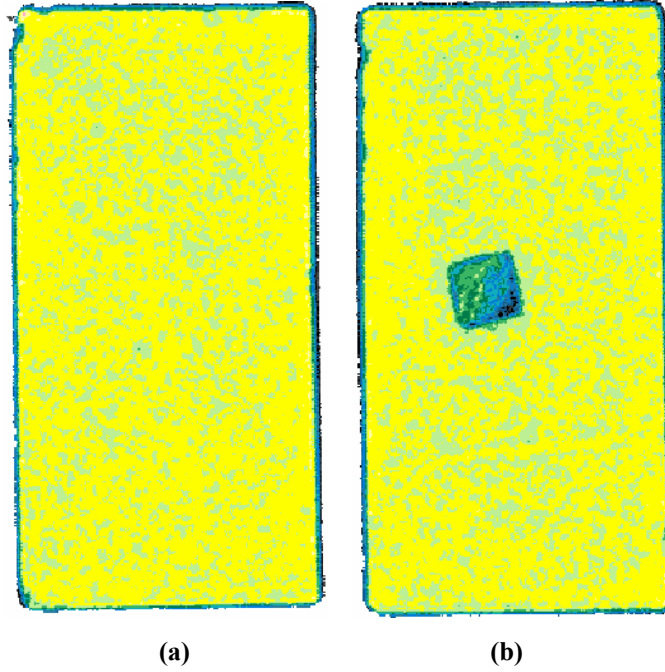


Şekil 6.74. 10 mm X 10 mm ebatlarında folyo içeren karo için (a) hata ekosunu, (b) geri yansıyan eko, (c) hata yeri görüntüsü

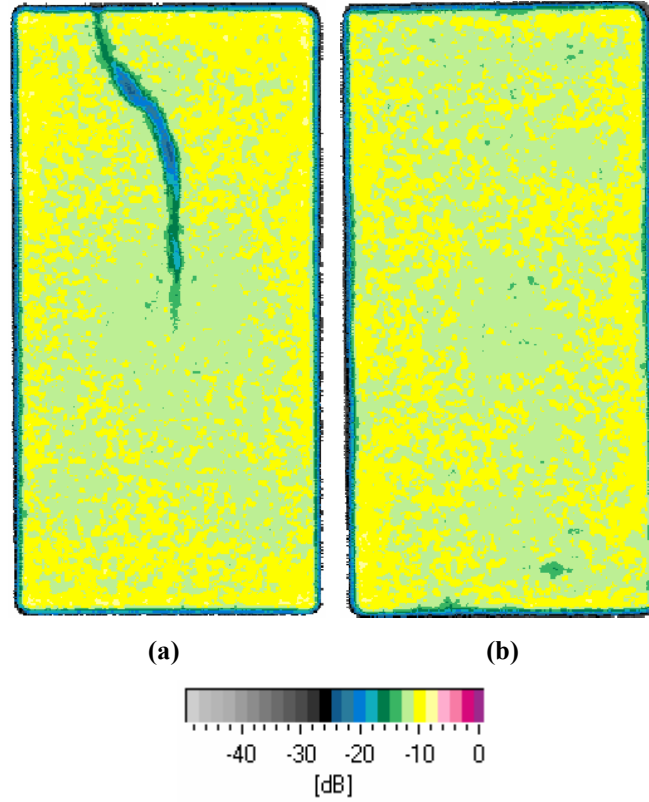
Şekil 6.74.a'da hata ekosunda 10mm x10mm folyo hatası görülmektedir. Folyo presleme yönüne dik yerleştirilmesine rağmen presleme esnasında yerini değiştirmiştir. Bu nedenle gönderilen dalgalar direkt yansımamışlardır. Şekil 6.74.b'de geri yansıyan eko da folyo hatası için -20 dB'dir. Folyonun oluşturduğu hatanın yüzeye yakınlığı 3–5 mm arasında değişmektedir (Şekil 6.74.c).

Ultrasonik geri yansıyan ekolardan toplam dB olarak hata hesabı MATLAB programı kullanılarak 'görüntü işleme yöntemleriyle' belirlenmiştir. Sinyal değişimi, 0'dan -50 dB'e kadar değişen bir skalaya göre ifade edilmiş, incelenen her karonun skaladaki dB değerleri için gerçekleşen yüzde kayıplar belirlenmiştir. Ortalama toplam kayıp (%), hata yüzdesi ile dB değerinin çarpımı ile bulunmuştur. Çizelge 6.19'da incelenen karolar için dB'lere göre hata yüzdelерinin (%) değişimi verilmektedir. 1220°C'de sinterlenen hatasız ve kâğıt hatası içeren karoların ultrasonik geri yansıyan eko görüntüleri Şekil 6.75'te verilmektedir. Şekil 6.75.a'daki hatasız karonun sinyal kaybı -10,51 dB'dir.

Ancak hataya bağılı olarak sinyal kaybı daha fazla olmaktadır. Şekil 6.75.b’de kâğıt hatası için sinyal kaybı -10,81 dB’dir. Şekil 6.76.a’de 1210°C’de sinterlenen ve su emmesi % 1,67 olan karo verilmektedir. Bu karonun sinyal kaybı -11,26 dB iken, 1190°C’de sinterlenen (Şekil 6.76.b) ve su emmesi % 2,01 olan karonun sinyal kaybı -11,17 dB’dir. Düşük sıcaklıkta sinterlenerek su emmesi daha fazla karoda sinyal kaybının daha fazla olması beklenmektedir. Ancak karodaki çatlak hatası nedeniyle (Şekil 6.76.a) sinyal kaybı, hatasız ve daha düşük sıcaklıkta sinterlenmiş karoya (Şekil 6.76.b) göre daha fazla olmaktadır.



Şekil 6.75. Hatasız (a),10 mm X 10 mm ebatlarında kâğıt içeren (b) karolar için geri yansıyan ekolar



Şekil 6.76. 1210°C’de sinterlenen (a), 1190°C’de sinterlenen (b) karolar için geri yansıyan ekolar

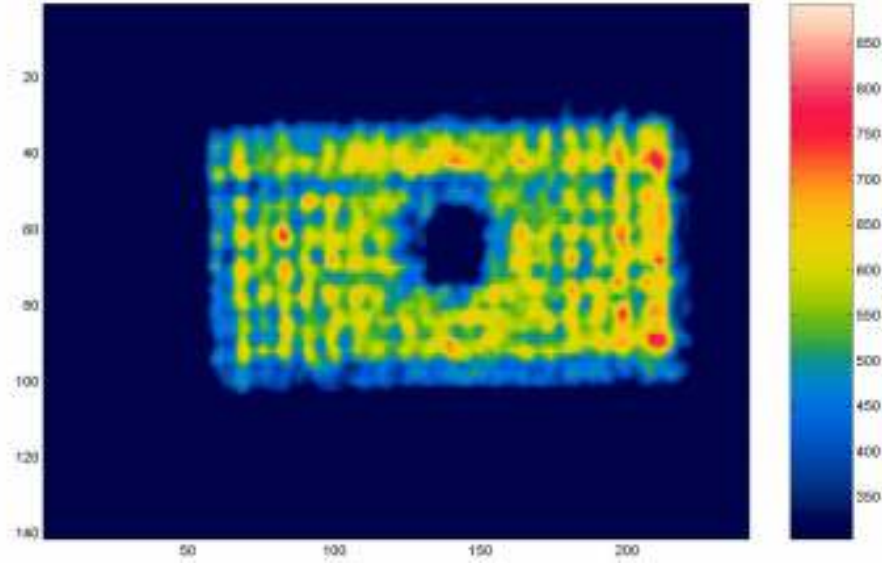
6.9. Temassız Prob C-tarama Görüntüleri

C taramada kusurlar görüntüde oluşan kontrast farkından yararlanılarak bulunmaktadır. Bu tarama sonucu, parçanın içindeki kusurların büyüklüğü, biçimi ve derinliği tespit edilebilmektedir (Nutku 2003). Stuttgart Üniversitesi’nde yapılan C-tarama analizlerinde Graniser Granit Seramik A.Ş. granülleri ile üretilen 10 mm X 10 mm ebatlarında kâğıt hatası, 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren numuneler ve düşük sıcaklıkta pişirilmesi nedeniyle su emmesi % 2,02 ve görünür porozitesi % 4,69 olan numune incelenmiştir. Kâğıt ve folyo hatası içeren numuneler 1200°C’de, diğer numune ise 1140°C’de sinterlenmiştir. Şekil 6.77’de 10 mm X 10 mm ebatlarında kâğıt hatası sonucunda oluşan gözeneklilik numunenin ortasında görülmektedir. Ayrıca presleme hatası nedeni ve bunun sonucunda oluşan yoğunluk farklılıkları nedeniyle numunenin sağ tarafında ultrasonik dalgaların oluşturduğu renk şiddetinde farklılıklar (kırmızı bölgelerin fazla olması) görülmektedir.

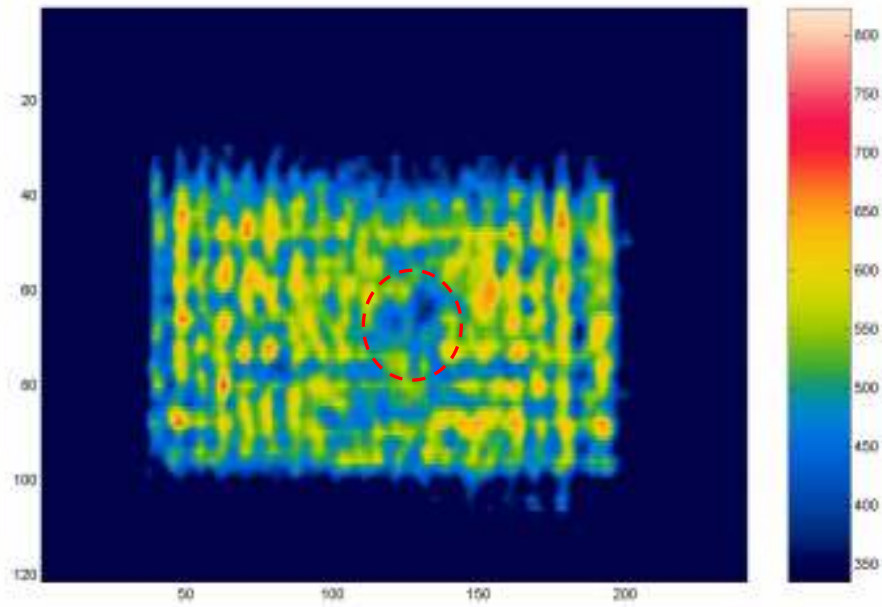
Çizelge 6.19. Farklı karolarda dB'lere göre hata yüzdelerinin (%) değişimi

db Karolar	-50	-48	-46	-44	-42	-40	-38	-36	-34	-32	-30	-28	-26	-24	-22	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0
1220 °C'de sinterlenen hatasız karo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,13	25,6	73,9	0,32	0	0	0	0
1220 °C'de sinterlenen kağıt hatası bulunan karo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,06	0,12	0,19	0,34	0,61	0,66	0,96	29,8	67,1	0,15	0	0	0	0
1190 °C'de sinterlenen hatasız karo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,46	57,9	41,5	0,14	0	0	0	0
1210 °C'de sinterlenen çatlak içeren karo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,26	0,36	0,46	0,88	1,6	52,3	43,4	0,62	0	0	0	0

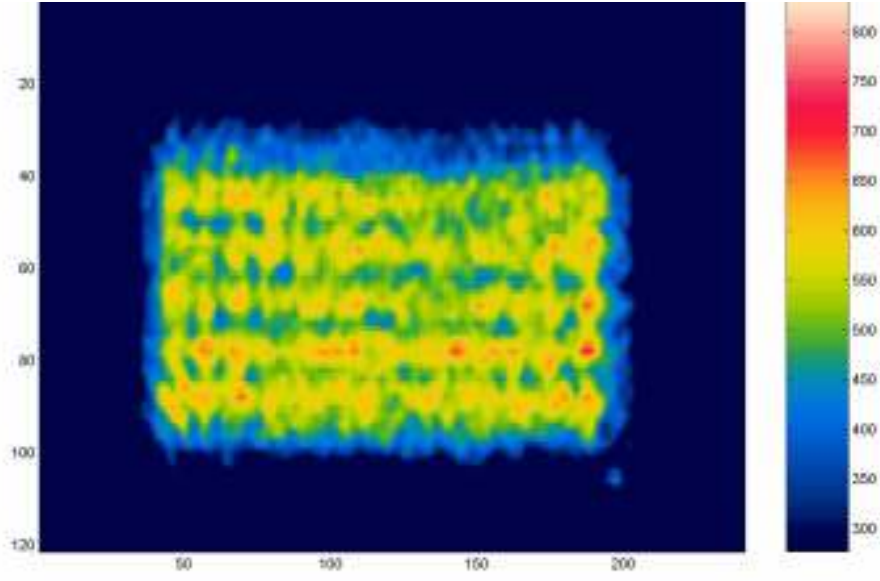
Şekil 6.78’de 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası numunenin ortasında kısmen seçilebilmektedir. Ultrasonik dalga şiddetinin düşük olduğu bu bölge şekil üzerinde yuvarlak içine alınmıştır. Şekil 6.79’da gözenek miktarındaki artışa bağlı olarak yeşil ve sarı bölgelerin daha fazla bulunduğu ve bu kısımların homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.



Şekil 6.77. 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt hatası içeren numunenin C-tarama ultrasonik görüntüleri



Şekil 6.78. 10 mm X 10 mm ebatlarında alüminyum folyo hatası içeren numunenin C-tarama ultrasonik görüntüleri



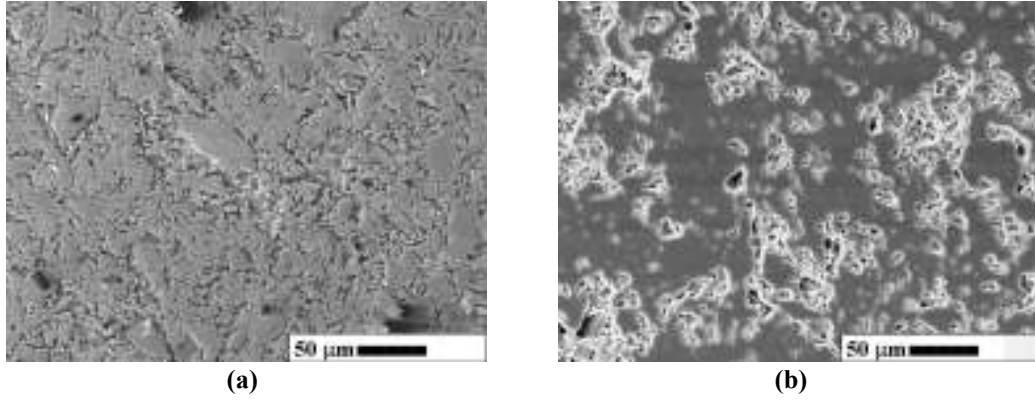
Şekil 6.79. Gözenek miktarı fazla olan numunenin C-tarama ultrasonik görüntüleri

6.10. SEM ile Karakterizasyon

Farklı sıcaklıklarda sinterlenen karolardan elde edilen numuneler parlatılmış ve bu yüzeylerden Zeiss Evo 50 EP taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile temsili ikincil elektron görüntüleri çekilmiştir. Çizelge 6.20’de Image J 1.40 programı ile parlatılmış yüzeyden hesaplanan ortalama por boyutları verilmektedir. Ortalama por boyutu için en az 200 por boyutu ölçülmüştür.

Çizelge 6.20. Ultrasonik hız ile ortalama por boyutunun değişimi

Sıcaklık (°C)	Ortalama por çapı (µm)	Ultrasonik hız (m/s)
1180	2,99±2,21	4367,33±37,16
1190	3,36±4,38	4642±45,21
1200	4,57±4,91	4861,33±54,64
1210	3,11±3,79	4857±9,90
1220	2,64±3,61	5031±43,84
1230	5,25±6,91	5241,33±15,01



Şekil 6.80. Parlatılmış yüzeyinden çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü.

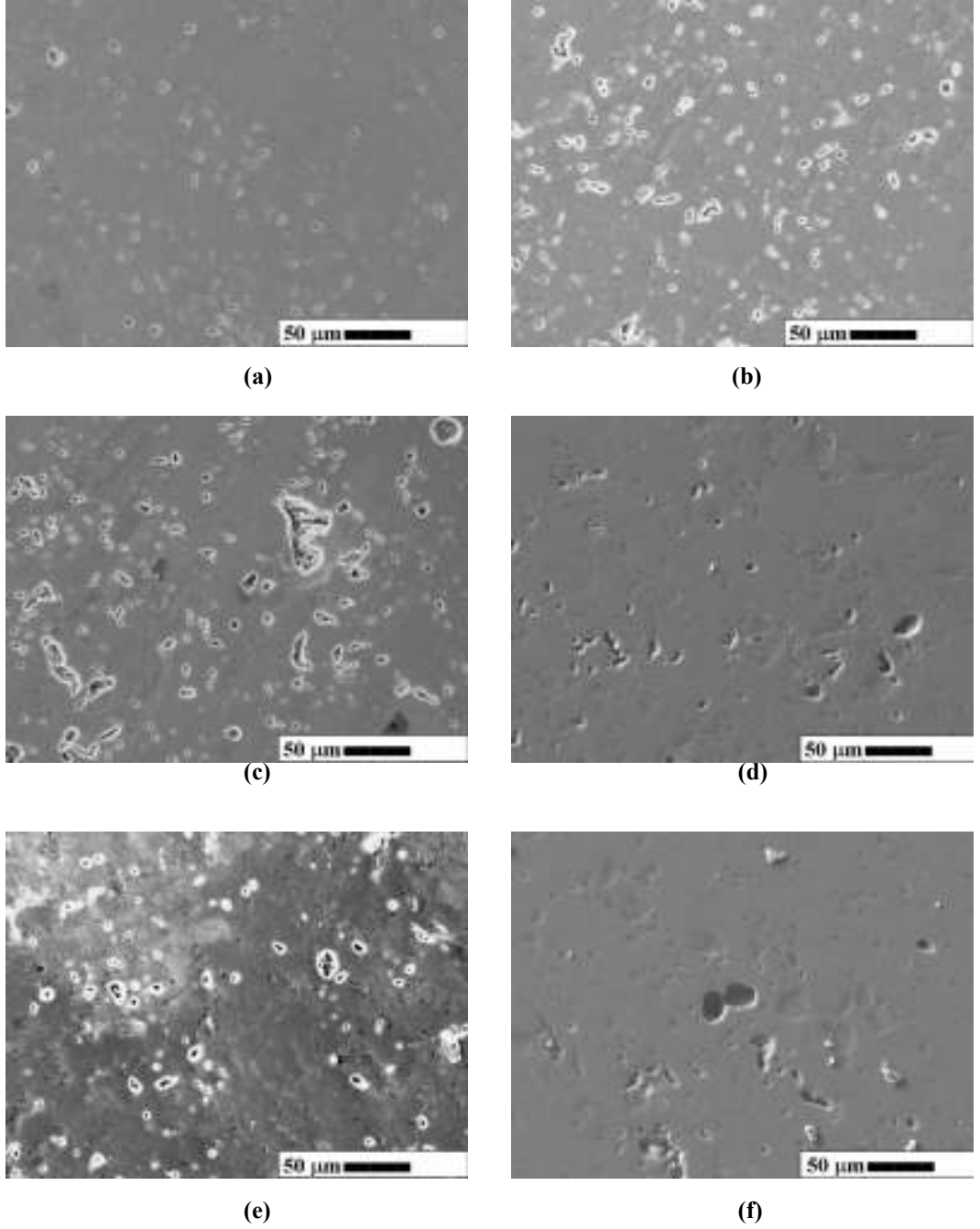
(a) 1150°C’de, (b) 1170°C’de sinterlenmiş numuneler

Artan sıcaklıkla yoğunlaşma artmaktadır. En yüksek gözenek miktarının en düşük sıcaklıkta olduğu görülmektedir. Şekil 6.80.a’da birbiriyle bağlantılı ve düzensiz şekilli porlar görülmektedir. Artan sıcaklıkla porlar yuvarlaklaşmaya başlamaktadır (Şekil 6.80.b).

Daha yüksek sıcaklığa çıkıldıkça porlar kapalı gözenek halini almaya başlamaktadır (Şekil 6.81). 20–25 µm boyutlarında büyük porlar gözlenmektedir (Eren ve ark. 2008).

Malzeme özellikleri mikroyapı ile belirlenmektedir. Tane boyut dağılımı, paketlenmeyi ve yoğunlaşmayı etkilemektedir. Malzemede kalan porozite, yapı hatasıdır ve mukavemeti azaltmaktadır. Porozite aynı zamanda ultrasonik dalgaların ilerleme süresini de etkilemektedir. Yüzdesel por hesabı seramiklerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Gregorova 2006, Correia ve ark. 2008). Sinterlenmiş karoların por dağılımı, boyut ve şekillerinin değişimi detaylı bir şekilde Zeiss Evo 50 EP taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile geri yansıyan elektron görüntüleri alınarak incelenmiştir.

Por alan yüzdesi için her numunenin parlatılmış yüzeylerinden 10’ar adet geri yansıyan elektron görüntüsü alınmıştır. Bu görüntüler Scandium görüntü işleme programı ile analiz edilmiştir. Bütün numuneler ve her numune için alınan 10 temsili geri yansıyan elektron görüntüsü için bu işlem tekrarlanmıştır.



Şekil 6.81. Parlatılmış yüzeyinden çekilen temsili ikincil elektron (SE) görüntüsü.

(a) 1180°C’de, (b) 1190°C’de, (c) 1200°C’de, (d) 1210°C’de, (e) 1200°C’de, (f) 1230°C’de sinterlenmiş numuneler

Artan sıcaklıkla hammaddeler reaksiyona girmekte ve yeni kristal fazlar oluşmaktadır. Hammaddelerin ergime süreci, artan sıcaklıkla birlikte viskozitesi düşen ve porlara girerek onları ortadan kaldıran bir camsı fazın oluşumunu

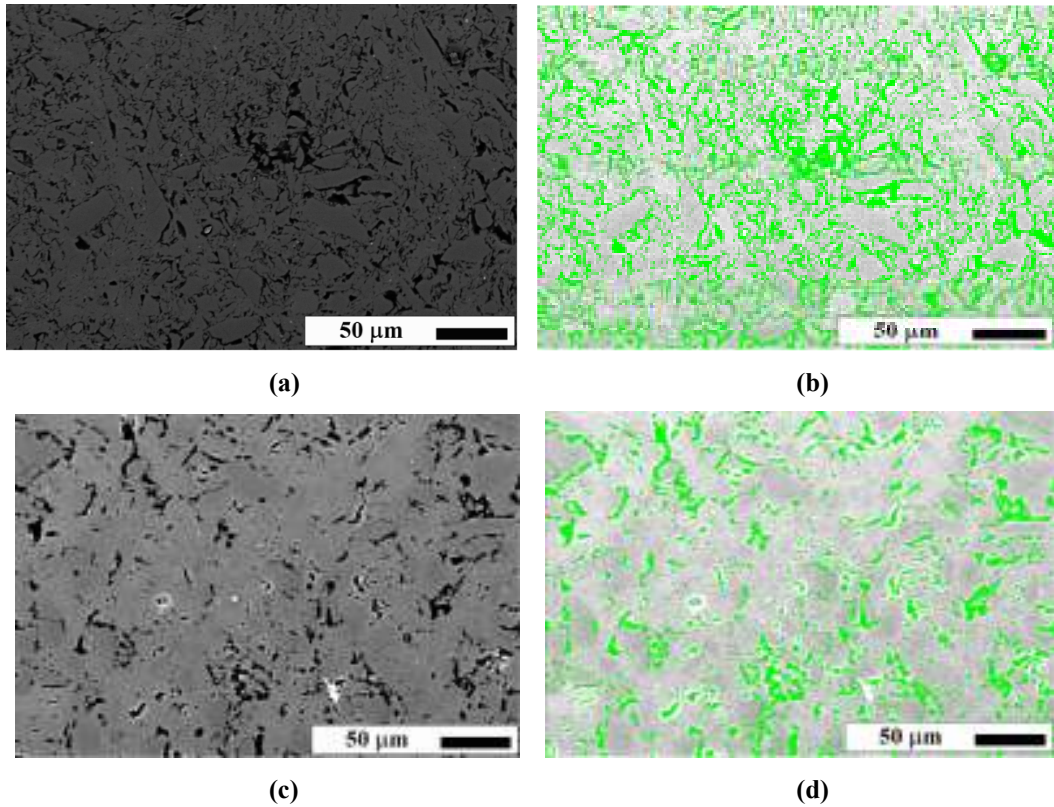
içermektedir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça toplam porozite oluşan sıvı faz nedeniyle azalmaktadır (Jazayeri ve ark. 2007). Görüntü analiz programı ile elde edilen sonuçlar Çizelge 6.21’de verilmektedir. Sıcaklık arttıkça por %’si değerleri azalmaktadır. Elde edilen por %’si değerleri, He piknometresi ile elde edilen toplam porozite %’si ile paralellik göstermektedir. Ancak parlatma nedeniyle oluşabilen tane çıkması, elde edilen görüntülerin iki boyutlu olması gibi faktörler nedeniyle % 2’ye yakın bir fark söz konusudur (Eren ve Kurama 2010b). 1150°C, 1190°C, 1230°C için alınan geri yansıyan elektron görüntüleri Şekil 6.82’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.21. Por alan %’sinin sinterleme sıcaklığı ile değişimi

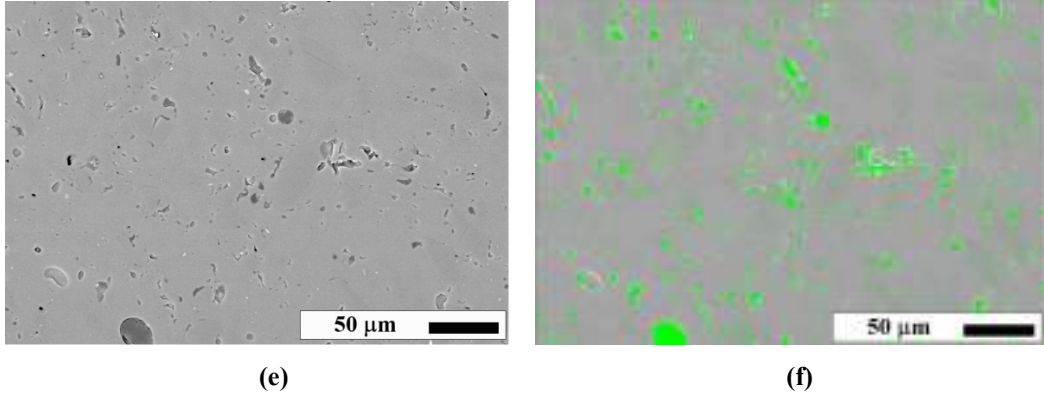
Sinterleme sıcaklığı (°C)	Por alan %’si
1150	24,52±2,07
1160	20,85±1,83
1170	17,58±1,02
1180	14,25±0,83
1190	12,72±1,32
1200	10,40±0,86
1210	10,32±1,03
1220	7,61±0,78
1230	6,45±1,07

Sinterlenmiş porselenin gözenekli yapısı ham mikroyapının ve ısıl işlemin bir sonucudur. Optimum sinterleme sıcaklığı görünen gözenekliliğin hiç kalmadığı ve kapalı gözenekliliğin artmaya başlamadığı sıcaklıktır. Porselen karolar için optimum sinterleme sıcaklığı 1190 ve 1220°C’ler arasındadır. Ürünün bu sıcaklıklardaki gözenekli yapısı onun teknik özelliklerini belirlemektedir. Sinterleme sırasında 900–1000°C’lerde, önemli bir oranda sıvı faz oluşmaya başlamaktadır. Artan sıcaklık oluşan sıvı fazın miktarını arttırmakta ve poroziteyi düşürmektedir (Riley 2009). Görüntü işleme programı ile incelenen SEM görüntülerinden 1150°C’de (Şekil 6.82.a), birbirine bağlantılı porlar görülmektedir. Bu sıcaklıktaki toplam gözenek miktarı ise % 24,52’dır. Bu miktar, sinterlemenin başlangıç evresinin 1150°C’den önce tamamlandığını

göstermektedir. Çünkü sinterlemenin başlangıç evresi yoğunluk değeri teorik yoğunluğun $\sim 0,65$ 'ine ulaştığında tamamlanmaktadır. Sinterlemenin ara evresinde porlar denge durumundaki şekillerini kazanmaktadır ve porlar hala bağlantılıdır. Yoğunlaşmanın porların kesit alanında gerçekleşen bir küçülme ile olduğu farz edilmektedir (Panakkal ve ark. 1990). Ara evrede 1180°C 'lerde, porlar arasındaki bağlantılar kaybolacak şekilde porlar kapanmaya başlamaktadır (Riley 2009). Şekil 6.82.c bu yorumu 1190°C için desteklemektedir. Buna ilaveten por alan yüzdesi % 10 civarındadır. Ara evre, yoğunluk teorik yoğunluğun $\sim 0,9$ 'una ulaştığında tamamlanmaktadır. 1230°C 'de (Şekil 6.82.e), izole porlar bulunmakta ve en düşük toplam gözenek miktarı elde edilmektedir. En düşük gözenekliliğe ulaşıldığında sinterleme süreci tamamlanmaktadır (Jazayeri ve ark. 2007).



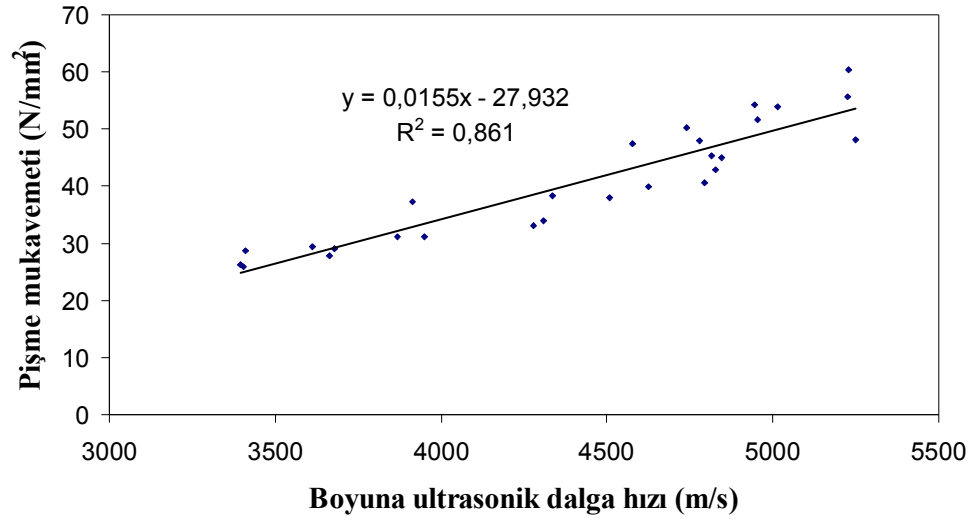
Şekil 6.82. (a) 1150°C , (c) 1190°C , (e) 1230°C 'ler için karoların parlatılmış yüzeylerinden çekilen temsili geri yansıyan elektron (BE) görüntüsü ve bu görüntüler için por alan %'si (b) 1150°C , (d) 1190°C , (f) 1230°C



Şekil 6.82. (a) 1150°C, (c) 1190°C, (e) 1230°C'ler için karoların parlatılmış yüzeylerinden çekilen temsili geri yansıyan elektron (BE) görüntüsü ve bu görüntüler için por alan %'si (b) 1150°C, (d) 1190°C, (f)1230°C

6.11. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu

Her sıcaklık için üçer karonun boyuna ultrasonik dalga ilerleme süreleri 5 MHz frekansa sahip prob ve enine ultrasonik dalga ilerleme süreleri 2,25 MHz frekansa sahip prob ile ölçülmüştür. Karo kalınlıkları kullanılarak Denklem 5.5 yardımı ile ultrasonik boyuna ve enine dalga ilerleme hızları hesaplanmıştır. Dinamik elastisite modülü Denklemler 5.9 ve 5.10 kullanılarak belirlenmiştir. Dinamik elastisite modülü belirlenen karoların mukavemetleri ve statik elastisite modülleri, üç noktalı eğme testi ile ölçülmüştür. Mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi Çizelge 6.22'de verilmektedir. Her sıcaklık değeri için dinamik ve statik elastisite modülleri paralel olarak değişmektedir. Ancak mikroyapısal faktörler hem mukavemet değerlerini, hem de statik elastisite modüllerini etkilemektedir. Bu nedenle statik elastisite modülleri, dinamik elastisite modüllerinden daha küçük bulunmuştur (Eren ve Kurama 2010c). Pişme mukavemetinin boyuna dalga hızı ile değişimi Şekil 6.83'te verilmektedir. Mukavemeti yüksek olan numunelerin boyuna dalga hızı da yüksektir.



Şekil 6.83. Mukavemetin boyuna dalga hızı ile değişimi

Çizelge 6.22. Mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi

Sic.. (°C)	d (mm)	t _{boyuna} (ns)	t _{enine} (ns)	v _{boyuna} (m/s)	v _{enine} (m/s)	Mukavemet (N/mm2)	Dinamik E (GPa)	E (GPa)
1150	7,81±0,02	4590±10	6753,33±46,19	3403,05±8,15	2313±16,94	26,98±1,50	26,98±0,17	14,19±0,35
1160	7,74±0,04	4240±26,46	6206,67±11,55	3651,08±35,30	2494,08±7,27	28,75 ±0,89	28,16±0,43	16,18±0,62
1170	7,71±0,02	3943,33±40,41	5866,67±57,74	3910,66±39,77	2628,56±23,60	33,23± 3,54	32,81±0,69	19,56±1,20
1180	7,55±0,06	3503,33±5,77	5266,67±28,87	4308,25±28,09	2865,94±36,74	35,14±2,77	40,68±0,79	24,34±1,64
1190	7,43±0,02	3250±50	4933,33±76,38	4570,85±58,33	3011,20±38,03	41,77±4,95	46,23±1,13	28,59±1,11
1200	7,44±0,04	3110±45,83	4783,33±15,28	4787,14±43,78	3112,19±10,56	44,58±5,07	50,85±0,43	29,68±3,57
1210	7,39±0,11	3070±60,83	4766,67±104,08	4814,68±33,06	3101,01±22,41	46,09±1,63	50,82±0,71	30,72±1,70
1220	7,34±0,11	2953,33±64,29	4540±79,37	4971,18±37,16	3233,59±10,15	53,24±1,47	55,16±0,62	32,25±5,32
1230	7,35±0,03	2806,67±11,55	4383,33±28,87	5235,17±12,87	3352,14±12,44	54,66±6,16	60,43±0,20	35,97±2,41

7. GENEL SONUÇLAR

Tez çalışmasının başında hedeflendiği üzere farklı sıcaklıklarda sinterlenerek farklı yoğunluk, porozite ve su emme değerlerine sahip karoların hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Karoların geleneksel test yöntemi (Arşimet Metodu) ile yoğunluk, porozite ve su emme değerleri ölçülmüştür. Laboratuvar koşullarında üretilen karolar için temaslı ultrasonik yöntem ile ultrasonik süre ölçümleri yapılarak ultrasonik dalgaların ilerleme süresi ve hızı ile yığınsal ve görünen yoğunluk, porozite ve su emme miktarındaki değişimi gösteren referans eğrileri çıkartılmıştır. Bu eğriler geleneksel metoda alternatif olarak ultrasonik hız ölçümü ile numunenin yığınsal ve görünen yoğunluk, porozite ve su emme değerlerinin ölçümüne olanak sağlamaktadır. Böylece yaklaşık 8 saat süren geleneksel test metodu yerine bir karonun 5 dakikada yoğunluk, porozite ve su emme değerleri belirlenebildiği görülmüştür.

Granit karo granüllerinden hazırlanmış karolarla yapılan laboratuvar çalışmalarında, ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin yığınsal yoğunlukla ters orantılı, görünür yoğunluk, görünür porozite (%) ve su emme (%) ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Dalga ilerleme süresi ile ultrasonik dalga hızı ters orantılıdır. Bu nedenle ultrasonik dalga hızı, yığınsal yoğunlukla doğru orantılı, görünür yoğunluk, görünür porozite (%) ve su emme (%) ile ters orantılıdır. Yığınsal yoğunluk arttıkça, ultrasonik dalgalarının ilerlemesini engelleyecek porlar azalmakta, dalgalar daha kısa sürede ve daha yüksek hızla ilerlemektedir. Görünür porozite (%) arttıkça ve görünür poroziteye bağlı su emme (%) arttığında, dalgaların ilerlemesi zorlaşmakta ve dalga ilerleme hızı düşmektedir.

Fabrika koşullarında üretilen ve su emmeleri ölçülen 200mmX200mm boyutlarında hazırlanan yer karoları için ultrasonik dalga ilerleme süresine ve hızına göre su emmenin değişimini gösteren referans eğrileri çizilmiştir. Dalga ilerleme süresinin su emme (%) değerleri arttıkça arttığı gözlenmektedir. Ultrasonik hız ile su emme değişiminde doğrusal bir değişim elde edilmiştir. Elde edilen referans eğrileri uygun programlar eşliğinde kullanıldığında, fabrikada geleneksel test metoduna gerek kalmadan ultrasonik hız ölçümü ile su emmenin belirlenmesini sağlayacaktır.

Endüstriden temin edilen yer karosu ve granit karoların dalga ilerleme süresine karşı su emme değişimleri (%) incelenmiştir. Dalga ilerleme süresinin su emme (%) değerleri arttıkça arttığı, ultrasonik hızın ise su emme (%) değerleri arttıkça azaldığı gözlenmektedir. Bu sonuç, laboratuvar şartlarında üretilen karolarda elde edilen dalga ilerleme süresi-su emme (%) ve dalga ilerleme hızı-su emme (%) sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.

Farklı kalınlıkta hazırlanan karoların su emmesi (%) için uygulanan geleneksel yöntem ve vakum yöntemi ile farklı sonuçlar elde edilmiştir. Vakum uygulanması ile su, daha küçük porlara infiltre olabilmektedir. Bu nedenle su emme (%) değerlerinde farklılık gözlenmektedir. Yer karosu bünyesi ile hazırlanmış farklı kalınlıktaki numunelerde, bu fark açıkça görülmektedir.

Ultrasonik hızın toplam porozite ile değişimini belirlemek amacı ile He piknometresi ile teorik yoğunluk ve toplam porozite (%) ölçülmüştür. Ultrasonik hızın toplam porozite (%) ile logaritmik olarak, teorik yoğunluk ile lineer olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Ortalama por boyutu ile ultrasonik hız arasında bir bağlantı kurulamamıştır. Bu nedenle por %'si incelenmiştir.

Seramiklerin fiziksel özelliklerinden biri olan yüzdesel por hesabı seramiklerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla sinterlenmiş karoların por %'si taramalı elektron mikroskobunda (SEM) mevcut olan görüntü programı ile incelenmiştir. Karoların parlatılmış yüzeyinden geri yansıyan elektronlarla elde edilen elektron mikroskobu görüntülerinden gerçekleştirilen görüntü analizi ile elde edilen por %'sinin He piknometresi ile belirlenen hacimsel toplam porozite ile paralellik gösterdiği bulunmuştur.

Delikli numunelerde, iletilen ultrasonik dalgaların enerjisinin azalması sebebiyle ultrasonik pik şiddeti azalmaktadır. Delik çapındaki artış ultrasonik dalga enerjisinin iletilmesini engellemekte, buna bağlı olarak da geri yansıyan pik şiddetindeki azalmaların miktarı artmaktadır.

Hatalı numunelerden küresel safsızlıklar içerenlerde ultrasonik dalgaların farklı yönlere yansıtılması nedeni ile geri yansıyan pik şiddeti çok fazla düşmektedir. Alüminyum folyo içeren hatalı numunelerde, alüminyumun ergimesi ve ultrasonik dalgaları yansıtması sebebiyle birden fazla hata piki gözlenmektedir.

Prob çapından daha buyk ebatta hata oluşturulduğunda, dalgalar numunenin tüm kalınlığı boyunca ilerleyememekte, hatadan geri yansımaktadır. Boşluk oluşturan hatalarda, hatanın yüzeye paralel olup olmaması ve numune içinde dağılımına göre hata piklerinde farklılıklar görülmektedir.

Ultrasonik C-tarama yapılarak hatalara bağlı olarak oluşan değişimler incelenmiştir. Ultrasonik C-tarama ile kâğıt, farklı boyutlarda alüminyum folyo gibi farklı hatalar incelenerek hata boyutu ve yeri ile ilgili detaylı bilgi elde edilmiştir. Ultrasonik C-tarama analizi hatayı tespit etmenin yanında, hatanın numune içinde hangi pozisyonda bulunduğu, hatanın şeklinin de nasıl olduğunu göstermiştir. Hata şekli ve yerini belirlemede ultrasonik C-taramanın güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiş ve hata yeri bilgisi, yapılan SEM analizleri ile desteklenmiştir.

Temassız ultrasonik C-tarama analizleri sonucunda kâğıt hatası net bir şekilde görülebilirken, alüminyum folyo yapıya infiltre olduğu için alüminyum folyo hatası güçlükle görülebilmektedir. Temassız proba gözenek miktarı fazla olan numunenin incelenmesi sonucunda, yüksek sıcaklıklarda sinterlenen hatalı numunelere göre gözenek miktarının fazla olmasına bağlı olarak oluşan ultrasonik kaybın daha fazla olduğu grlmştir.

Laboratuvar ve fabrika koşullarında üretilen 50mmX100mm boyutlarındaki karolar için mevcut laboratuvar şartlarında temassız ultrasonik yöntem ile ultrasonik süre ölçümü yapılmaya çalışılmıştır. Ancak kullanılan problemlerle ultrasonik sinyallerin karolardan geçişi sağlanamamıştır.

Çalışma sonunda geleneksel yöntemle ölçüm yapmaya gerek kalmadan elde edilen ultrasonik hız-yığınsal yoğunluk, ultrasonik hız-görünür yoğunluk, ultrasonik hız-görünür porozite (%), ultrasonik hız-su emme (%) kalibrasyon eğrileri kullanılarak ve sadece hız ölçümü yapılarak fiziksel özelliklerden yoğunluklar, porozite ve su emme belirlenebileceği ortaya konulmuştur. Bu eğriler fabrika koşullarına da uyarlanabilecektir. Ayrıca hata tespiti açısından ultrasonik yöntem güvenilirdir. Bunlara ek olarak, bu proje temassız problemlerin ülkemizde kullanımının denendiği ilk çalışma olması açısından önemli bir nalışmadır.

8. ÖNERİLER

Ülkemizde temassız problemlerin kullanımı ile ilgili daha önce araştırma yapılmamış olup, temassız problemlerle seramiklerde hata tespitine yönelik bilgi mevcut değildir. Bu çalışmada, laboratuvar şartlarında denenen temassız problemler, seramik karolardan ultrasonik sinyallerin geçişini sağlayamamıştır. Bu nedenle karolardan sinyal geçişini sağlayacak temassız problemlerin geliştirilmesi amacı ile detaylı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu problemlerin karo üretim bantlarında kullanımının yaygınlaştırılması, yoğunluk, porozite ve su emme açısından kalite kontrolün % 100 olarak yapılmasını sağlayacaktır.

Her bir sistemi fırın çıkışına koymak yaklaşık 60000 \$'a mal olmakta, fabrikadaki 9 fırın çıkışına yerleştirilmesi ise $60000 \times 9 = 540000$ \$'lık bir maliyet doğurmaktadır. Ortam koşullarının da sistemin çalışmasını etkilediği ve bakım maliyetleri göz önüne alındığında laboratuvar ölçeğinde istatistiksel olarak testleri gerçekleştirmenin daha ekonomik ve etkin olacağı düşünülmüştür. Ancak fabrikanın yıllık üretimi 23 milyon m² şeklindedir ve incelenmesi gereken numune sayısı

$$\frac{n}{N} < 0,05 \quad (7.1)$$

olmalıdır (Özmen 2000). Burada $N = 23000000$ m² anakütle hacmi, n ise örneklem hacmidir. $0,04 < 0,05$ olduğu için ,

$$\frac{n}{N} = 0,04 = \frac{n}{23000000} \longrightarrow n = 920000 \text{ m}^2$$

şeklinde bulunmaktadır.

23 milyon m²'lik bir üretim sistemine en az 920000 m²'lik miktarın incelenmesi gerekmektedir. Böyle bir miktarın incelenmesi de yaklaşık saatte 100 m²'lik inceleme anlamına gelmektedir. Laboratuvar ölçeğinde bu incelemeyi yapabilmek için çok fazla insan istihdam edilmesi gerekecektir. İnsan kaynağının fabrikaya maliyeti otomatik sistem kurmaktan daha maliyetlidir. Bu nedenle bütün karoları kontrol eden sistemin üretim bantlarında kullanılması uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- Akseli, I. (2009), *Nano/micro/meso scale interactions in mechanics of pharmaceutical solid dosage forms*, Doctor of Philosophy Thesis, Clarkson University, Mechanical and Aeronautical Engineering, New York, A.B.D.
- Amorós, J.L., Boix, J., Llorens, D., Mallol, G., Fuentes, I. ve Feliu, C. (2009), “Measurement of bulk density distribution in large ceramic tiles by a non-destructive method”, *Shaping 4 Fourth International Conference on Shaping of Advanced Ceramics*, Madrid, İspanya, s6-4.
- Andreola, F., Leonelli, C., Romagnoli, M. ve Miselli, P. (2000), “Techniques used to determine porosity”, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **79**, 49-52.
- Anonim (2007a), Sacmi Floor Tile Technology.
- Anonim (2007b), Sacmi Wall Tile Technology.
- Anonim (2007c), www.cen.bris.ac.uk/projects/eqteach97/waves2.htm
- Anonim (2007d), <http://www.ultrangroup.com/Applications/PDF/Concrete.pdf>
- Anonim (2007e), The Ultram Group, Application Note AN-305-4, Non-Contact Ultrasound: Concrete, Highway, Bridges, Air Strips Analysis.
- Anonim (2007f), “Quality is something you can hear”, *Ceramic Forum International*, **84**, 26-28.
- Anonim (2008a), http://www.sensortec.dk/02_sensor_knowledge/non_invasive.html
- Anonim (2008b), <http://www.ingegraf.es/XVIII/PDF/Comunicacion17236.pdf>
- Anonim (2008c), <http://machinedesign.com/ContentItem/58401/UltrasoundscansINTHINAIR.aspx>
- Anonim (2008d), http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/pdfs/ndt_ultratest.pdf
- Anonim (2010a), http://www.serfed.com/tr/content.php?cat_id=13
- Anonim (2010b), “Türkiye seramik sanayi buluşması Eskişehir’de gerçekleşti”, *Kutso Bülten*, **7**, 10-12.
- Anonim (2010c), Seramik Kaplama Malzemeleri Sektörü Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı.
- Anonim (2010d), <http://tr.wikipedia.org/wiki/Aluminyum>

- Armatlı, M. (2001), *Uçak bakımında tahribatsız kontrol yöntemleri*, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları, No: 1327, Eskişehir.
- Arnold W. ve Reiter H. (1991), “Nondestructive testing of ceramic engineering components by X-ray and ultrasonic techniques”, *Advanced Ceramics: Proceedins of an International Symposium on Advanced Ceramics* (Ed: Ganguly, G., Roy, S.K. ve Roy, P.R.), Trans Tech Publications, İsviçre, **56-57**, 393-410.
- Bentama, J., Ghzizal, A.E. ve Ferrandis J-Y. (2007), “Ultrasonic waves for characterisation of clay membranes”, *Desalination*, **206**, 1-8.
- Bernardin, A.M., De Medeiros, D.S. ve Riella, H.G. (2006), “Pyroplasticity in porcelain tiles”, *Mat. Sci. Eng. A*, **427**, 316–319.
- Bhardwaj, M.C. (1997), “Non-contact ultrasonic characterization of ceramics and composites”, *Nondestructive Evaluation of Ceramics, Ceramic Transactions*, Westerville, A.B.D., 267-281.
- Bhardwaj, M.C., Neeson, I. ve Stead, G. (2000), “Introduction to contact-free ultrasonic characterization and analysis of consolidated materials”, *NDTnet*, **5**.
- Biffi, G. (1999), *Porcelain stoneware: production manual and methods of use*, Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.P.A., Faenza, İtalya.
- Blitz, J. ve Simpson, G. (1996), *Ultrasonic methods of non-destructive testing*, Chapman&Hall, Cambridge, İngiltere.
- Blomme, E., Bulcaen, D., Declercq, F. ve Lust, P. (2002), “Air-coupled ultrasonic evalution of coated textiles”, *IEEE Ultrasonics Symposium*, 757-760.
- Boccaccini, D.N., Romagnoli, M., Veronesi, P., Cannio, M., Leonelli, C., Pellacani, G., Husovic, T.V. ve Boccaccini, A.R. (2007), “Quality control and thermal shock damage characterization of high-temperature ceramics by ultrasonic pulse velocity testing”, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **4**, 260-268.
- Brennan, IV., R.E. (2007), *Ultrasonic nondestructive evaluation of armor ceramics*, Doctor of Philosophy Thesis, Rutgers, The State University of New Jersey, Graduate Program in Materials Science and Engineering, Graduate School-New Brunswick, New Jersey, A.B.D.

- Business Communications Co. Inc. (2000), “NDT equipment market in growth mode”, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **79**, 53.
- Cantavella, V., Llorens, D., Mezquita, A., Moltó, C., Bhardwaj, M.C., Vilanova, P., Ferrando, J. ve Maldonado-Zagal, S. (2006), “Use of ultrasound techniques to measure green tile bulk density and optimise the pressing process”, *IX World Congress on Ceramic Tile Quality*, Castellon, İspanya, p.bc 161-174.
- Correia, S.K., Hotza, D. ve Segadaes, A.M. (2008), “Predicting porosity content in triaxial porcelain bodies as a function of raw materials content”, *J. Mater. Sci.*, **43**, 696-701.
- Diaz, A. ve Hampshire, S. (2004), “Characterisation of porous silicon nitride materials produced with starch”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **24**, 413-419.
- Dondi, M., Raimondo, M. ve Zanelli, C. (2003), “Sintering mechanisms of porcelain stoneware tiles”, CNR-ISTEC, İtalya.
- Elbehery, H.M., Hefnawy, A.A. ve Elewa, M.T. (2003), “Quality control enhancement via non-destructive testing for green ceramic tiles”, *Proceedings of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1130-1133.
- Eren, E., Kurama, S. ve Cifci, M. (2008), “Porosity characterization of porcelain bodies”, *ASNT Fall Conference & Quality Testing Show*, The American Society for Nondestructive Testing Inc., Charleston, SC, A.B.D, 118-122.
- Eren, E. ve Kurama S. (2010a), “Ultrasonic characterization of defective porcelain tiles”, *50 Congreso SECV Libro Resúmenes*, Madrid, İspanya, 30.
- Eren, E. ve Kurama S. (2010b), “Using ultrasonic test method for porosity characterization of porcelain bodies”, *ICCPS-11 International Conference on Ceramic Processing Science Abstract Booklet*, Zurich, İsviçre, 195.
- Eren, E. ve Kurama S. (2010c), “Using ultrasonic test method in characterization of physical and mechanical properties of porcelain tile”, *12th International Ceramics Congress (CIMTEC 2010) Abstracts Book*, Montecatini Terme, Tuscany, İtalya, 158.
- Gasch, J.G.M. (2006), “Control and automation in the ceramic industry: evolution and perspectives”, *Qualicer*, Castellon, İspanya, con 45-68.

- Grandt, Jr., A.F. (2004), *Fundamentals of structural integrity damage tolerant design and nondestructive evaluation*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, A.B.D.
- Green, D.J. (1998), “Comment on correlation between surface area reduction and ultrasonic velocity in sintered zinc oxide powders”, *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**, 1698.
- Gregorova, E. (2006), “Characterization of porous ceramics by image analysis and mercury porosimetry”, *Ceramics*, **97**, 219–230.
- Gür, C.H. (1999a), “Türkiye’de tahribatsız muayenenin gelişimi ve metalurji mühendisleri odası-tahribatsız muayene komisyonu”, *Metalurji*, **123**, 12–17.
- Gür, C.H. (1999b), “Tahribatsız tekniklerin malzeme özelliklerinin belirlenmesindeki yeri”, *1. Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Türkiye Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası, Ankara, 357–372.
- Hayes, B. (2007), “Special report/R and D overview: advancing ceramic and glass technology”, *Ceramic Industry*, **157**, 24–28.
- Hellier, C.J. (2001), *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill, New York, A.B.D.
- Ibáñez, A., Pena, P., Sandoval, F. ve Peña, J.M.G. (1992), “Modification of the inert component in wall tile bodies”, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **71**, 1661-1668.
- İşleyici, U. (2005), *Effect of surface roughness on ultrasonic*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Jazayeri, S.H., Salem, A., Timellini, G. ve Rastelli, E. (2007), “A kinetic study on the development of porosity in porcelain stoneware tile sintering”, *Bol. Soc. Esp. Ceram.*, **46**, 1-6.
- Kar, A., Sagar, S.P. ve Ray, A.K. (2007), “Characterisation of the ceramic-metal brazed interface using ultrasonic technique”, *Mater.Lett.*, **61**, 4169-4172.
- Kara, A., Özer, F., Kayaci, K. ve Özer, P. (2006), “Development of multipurpose tile body: phase and microstructural development”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **26**, 3769-3782.

- Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoglu, H. (1997), *Hasar Analizi Seminer Notları*, T.M.M.O.B. Metalurji Mühendisleri Odası, 8-36.
- Kim, J. ve Liaw, P.K. (1998), “The nondestructive evaluation of advanced ceramics and ceramic-matrix composites”, *JOM*, **50**.
- Kobayashi, Y., Ohira, O., Ohashi, Y. ve Kato, E. (1992), “Effect of firing temperature on bending strength of porcelains for tableware”, *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**, 1801-1806.
- Kurama, S. ve Eren, E. (2010), “Ultrasonic C-scan imaging of porcelain tiles”, *29th European Conference on Acoustic Emission Testing 2010 Abstract Booklet*, Vienna, Avusturya, 22.
- Kulkarni, N., Moudgil, B. ve Bhardwaj, M. (1994), “Ultrasonic characterization of green and sintered ceramics: I, time domain”, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **73**, 146-153.
- Kuttruff, H. (1991), *Ultrasonics-fundamentals and applications*, Elsevier Applied Science, New York, A.B.D.
- Küçüker, A.S. (2009), *Porselen karo üretiminde öğütme verimliliği ve üretim süreçlerine etkileri*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Lewis, W.J., Lewis, B.J., Jaansalu, K.M., Black, D.R. ve Smith, C.J. (1994), “Suitability of neutron radiography for the inspection of advanced ceramic composites”, *Nondestructive Testing and Evaluation*, **11**, 155-164.
- Lofaj, F., Blessing, G.V. ve Wiederhorn, S.M. (2003), “Ultrasonic velocity technique for nondestructive quantification of elastic moduli degradation during creep in silicon nitride”, *J. Am. Ceram. Soc.*, **86**, 817-822.
- Matsuo, Y., Okajima, T., Furushima, R., Yasuda K., Shiota, T., Ikemoto, T., Goto, K. ve Matsui, T. (2007), “Damage evaluation of alumina-graphite refractories subjected to thermal shock and mechanical stress using ultrasonic pulse-echo method”, *J. Tech. Assoc. Refract. Japan*, **27**, 133.
- Medding, J.A. (1996), *Nondestructive evaluation of zirconium phosphate bonded silicon radomes*, Master of Science Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Material Science and Engineering, Virginia.

- Netzelmann, U., Reiter, H., Shi, Y., Wang, J. ve Maisl, M. (1997), “Ceramic automotive valves-changes and limitations of nondestructive testing”, *NDTnet*, **2**.
- Nutku, F. (2003), *Toz metalürjisi ile üretilen parçaların tahribatsız muayenesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Panakkal, J.P., Willems, H. ve Arnold, W. (1990), “Nondestructive evaluation of elastic parameters of sintered iron powder compacts”, *J. Mater. Sci.*, **25**, 1397-1402.
- Paone, N., Revel G.M. ve De Andrede, R.M. (2000), “Non-contact sensor in the ceramic industry”, *Ceramic World Review*, **35**, 136-141.
- Parthassarathi, S., Tittmann, B.R. ve Onesto, E.J. (1997), “Ultrasonic technique for measuring porosity of plasma-sprayed alumina coatings”, *Journal of Thermal Spray Technology*, **6**, 486-488.
- Phani, K.K. (1996), “Porosity-dependence of ultrasonic velocity in sintered materials – a model based on the self-consistent spheroidal inclusion theory”, *J. Mater. Sci.*, **31**, 272-279.
- Phani, K.K. (2007), “Estimation of elastic properties of porous ceramic using ultrasonic longitudinal wave velocity only”, *J. Am. Ceram. Soc.*, **90**, 2165-2171.
- Pietroni, P. ve Revel, G.M. (2008), “Laser ultrasonics for quality control in the ceramic industry”, *Xth World Congress on Ceramic Tile Quality*, Castellón, İspanya, p.bc 345-358.
- Rabe, T., Rudert, R., Goebbels, J. ve Harbich, K.W. (2003), “Nondestructive evaluation of green components”, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **82**, 27-32.
- Rahaman, M.N. (2003), *Ceramic processing and sintering*, 2nd Edition, Marcel-Dekker, Inc., New York, A.B.D.
- Reed, J.S. (1995), *Principles of ceramic processing*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, A.B.D.
- Reed, J.S. (2000), “From batch to pressed tile: mechanics and system microstructural changes”, *VI World Congress on Ceramic Tile Quality*, Castellon, İspanya, con 23-42.

- Restrepo, J.J. ve Dinger, D.R. (1995), "Control of pyroplastic deformation in triaxial porcelain bodies using thermal dilatometry", *Interceram*, **44**, 391-398.
- Revel, G.M. ve Tomasini, E.P., "Non-Contact Ultrasonic Sensor for On-Line Density Measurement on Green Ceramic Tiles, Dipartimento di Meccanica, Universita degli Studi di Ancona, Via Brece Bianche, I-60131, Ancona, Italy.
- Revel, G.M. (2007), "Measurement of the apparent density of green ceramic Tiles by a non-contact ultrasonic method", *Experimental Mechanics*, **47**, 637-648.
- Riley, F.L. (2009), *Structural ceramics, fundamentals and case studies*, Cambridge University Press, Cambridge, İngiltere.
- Rodríguez, M.A., Vergana, L. ve Miralles, R. (1999), "Nondestructive evaluation of microcracks in ceramics with controlled probability of false alarm", *Res. Nondestr. Eval.*, **11**, 15-24.
- Romagnoli, M., Burani, M., Tari, G. ve Ferreira, J.M.F. (2007), "A non-destructive method to asses delamination of ceramic tiles", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **27**, 1631-1636.
- Roth, D.J., Stang, D.B, Swickard, S.M. and DeGuire, M.R. (1990), NASA Technical Memorandum 102501.
- Salem, A., Jazayeri, S.H., Tucci, A. ve Timellini, G. (2003), "Influence of firing temperature and soaking time on sintering of porcelain stoneware tiles", *Ceramic Forum International*, **80**, 66-70.
- Shilling, C.H. ve Gray, J.N. (1997), "Needs and opportunities for nde in ceramic processing", *Nondestructive Evaluation of Ceramics, Ceramic Transactions*, Westerville, A.B.D., 1-19.
- Smith, E.H. (1998), *Mechanical Engineers Reference Book*, Elsevier Butterworth-Heinemann Ltd., Bath, İngiltere.
- Suzuki, M. (2007), "Principle of X-ray micro computed tomography and application for refractories research", *J. Tech. Assoc. Refract. Japan*, **27**, 78-83.

- Oya, M., Takahashi, M., Iwata, Y., Jono, K., Hotta, T., Yamamoto, H., Washio, K., Suda, A., Matuo, Y., Tanaka, K. ve Morimoto, M. (2002), “Mercury intrusion porosimetry determines pore-size distribution”, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **81**, 52-56.
- Özmen, A. (2000), *Uygulamalı araştırmalarda örnekleme yöntemleri*, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları, No: 1257, Eskişehir.
- The Institution of Metallurgist (1983), *Ultrasonic non-destructive testing*, The Institution of Metallurgist, No:9, Chamelon Press Limited, London, İngiltere.
- Topuz, A. (2003), *Tahribatsız Muayeneler*, Fatih Gençlik Vakfı Matbaası, İstanbul.
- Trigg, G.L., Vera, S. ve Greulich W. (1997), *Encyclopedia of applied physics: testing equipment-mechanical to topological phase effects*, **21**, Wiley-VHC, New York, A.B.D.
- Ülker, A. (1995), *Characterization of directivity patterns of ultrasonic non-destructive testing probes*, Master of Science Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, Ankara.
- Washburn, E.W. ve Footitt, E.E. (1921), “Porosity: III. water as an absorption liquid”, *J. Am. Ceram. Soc.*, **4**, 527-537.
- Werr, U. (2002), “Problems and potential solutions in the characterization of traditional ceramic green bodies”, *Ceramic Forum International*, **79**, 29-34.
- Vieira, C.M.F., Peçanha, Jr., L.A. ve Monteiro, S.N. (2006), “Effect of kaolinitic clays from state of Rio de Janeiro in the composition of whiteware floor tile bodies”, *Cerâmica*, **52**, 138-145.
- Yaman, C. (1999), “Ultrasonik hız ölçme yöntemleriyle seramik malzemelerde özellik belirlenmesi”, *1. Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Türkiye Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası, Ankara, 381–386.
- Zanelli, C., Dondi, M. ve Raimondo, M. (2003), “Phase transformations during liquid phase sintering of porcelain stoneware tiles: a petrological approach”, CNR-ISTEC, İtalya.