

GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİ İLE PORSELEN KAROLARIN İNCELENMESİ

Elif EREN¹, Semra KURAMA¹, Şükrü GÖRGÜLÜ²

ÖZET : Bu çalışmada görüntüleme tekniği kullanılarak sinterlenmiş karolarda hata tespiti yapılmıştır. Çalışmada karakterizasyonda kullanılmak üzere iki tip hatalı karo hazırlanmıştır. Birinci grupta; karoların preslenmesinde tozların arasına kağıt konularak, ikinci grupta ise preslemeden kaynaklanan çatlak içeren hatalı karolar kullanılarak, numuneler hazırlanmıştır. Bu karolar görüntü analiz teknikleri ile incelenmek ve karşılaştırılmak üzere farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sonuçlarda referans olarak kullanılmak üzere bir de standart karolar hazırlanmıştır. Sinterlenme sonrasında porselen karonun kalınlığı boyunca ultrasonik dalgaların ilerleme süresi ve ultrasonik pik yükseklikleri darbe-yankı modunda çalışan temaslı bir prob ile ölçülmüştür. Ultrasonik A-tarama olarak bilinen bu metoda ek olarak yapılan ultrasonik C-tarama metodu ile de porselen karodaki hataların boyutu, yeri ve şekilleri görüntülenmiştir. Böylece, C-tarama ile görüntülenen karoların görüntü işleme metodu ile şiddet kayıpları belirlenerek hataların neden olduğu kayıplar ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, görüntü işleme metodu, mevcut C-tarama sisteminden elde edilen görüntülere uygulandığında, sadece elde edilen sinyal kaybı değerleri incelenerek hatalı karoları, hatasızlardan ayırmanın mümkün olduğu gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER : Porselen karo, hata, sinyal işleme, ultrasonik C-tarama.

INSPECTION OF PORCELAIN TILES WITH IMAGE PROCESSING TECHNIQUE

ABSTRACT : In this study, defects of sintered porcelain tiles were determined with image processing techniques. Two different types of defective tiles which would be characterized were produced in the study. In the production of defective tiles, a piece of paper was imbedded in porcelain tile granules before pressing the tile, and the other tile is pressed to purposely produce a tile containing pressing crack. These tiles were sintered at different temperatures for inspection with image analysis techniques and comparison. Standard tiles were also produced to utilize for reference at results. After sintering, the time of flight of ultrasonic waves and ultrasonic signal amplitudes were measured through the sintered porcelain tiles by a contact ultrasonic transducer operating on pulse-echo mode. In addition to this method known as ultrasonic A-scan, an immersion pulse-echo C-scan method was also used to determine the sizes, places and shapes of defects in porcelain tiles. Thus, image processing methods were used to determine attenuation losses of analyzed tiles. The visual analysis results gave an opportunity to differentiate defective tiles with only using image processing results.

KEYWORDS : Porcelain tile, defect, image processing, ultrasonic C-scan.

¹ Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, İki Eylül Kampüsü, 26555, ESKİŞEHİR

² Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, İki Eylül Kampüsü, 26555, ESKİŞEHİR

I. GİRİŞ

Tahribatsız Muayene Yöntemleri (TMY) bir nesne ya da malzemenin, analiz sonrasındaki kullanımına zarar vermeden, o nesne ya da malzemeyi incelemeyi sağlayan test teknikleridir [1].

Ultrasonik tahribatsız 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 malzemedeki süreksizliklere ilişkin bilgi vermektedir [2,3].

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 [4]. Kolaylıkla ölçülemeyecek küçük hatalardan gelecek pikler tespit edilemese bile, bu hataların ultrasonik dalgaların malzemedeki çıkış piklerinde oluşturdukları azalma, aynı özellikteki hatasız bir malzeme ile kıyaslanarak tespit edilebilmektedir [5].

M.C. Bhardwaj ve grubu yaptıkları çalışmada hataların tespit edilebilirliğini ham ve sinterlenmiş seramiklerde (14 mm kalınlığında bir ham porselen ve % 80 yoğunlukta sinterlenmiş bir $\text{NaZr}_2(\text{PO}_4)_3$ (NZP)seramik) 1,5 mm çapında silindirik delikler açarak göstermişlerdir. Sinyallerin hatalı bölgeden geçiş esnasında, hatasız bölgeye göre iletilen enerji miktarında bir azalma gözlenmiştir [6]. Bir diğer araştırmada Bhardwaj hatasız ve iç çatlaklar içeren ZrO_2 refrakterlerini incelemiştir [7]. Görünümleri benzer olan refrakter malzemeler, ultrasonik olarak incelendiğinde çatlak içeren refrakter malzemenin hatasız olandan ayırt edilebildiği ortaya konulmuştur. Refrakter yapısındaki çatlak, ultrasonik dalgaların şiddetinin azalmasında önemli rol oynamaktadır. Opak ve şeffaf zırh uygulamaları için silisyum karbür, bor karbür ve çeşitli oksit temelli sistemler de literatürde incelenmiştir [8]. 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 [8,9]. Zr-PBSN (Zirkonyum fosfat bağlı silisyum nitrür) füze başlıkları 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 [10].

Literatürde yapılan araştırmalarda geleneksel seramik malzemelerden biri olan porselen karoların, üretimden kaynaklı yapısal hatalarının tespitinde halen ultrasonik test yöntemlerinin kullanımının ulusal ve uluslararası boyutta mevcut olmadığı belirlenmiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalar ham seramiklerin yoğunluk ölçümüne yönelik olup, geri dönüşümü mümkün olmayan sinterlenmiş karolar üzerine çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ancak, ham seramiklerin bantlar üzerinde taşınımındaki titreşimler, ortamın tozu, ürünlerin kurutma işlemi sonrasında yüzey sıcaklıklarının bölgesel değişimi, karonun nem içeriği ve yüzey pürüzlülüğü ultrasonik ölçüm sisteminin kararlılığını ve tekrar edilebilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bir karo üretim prosesinde hammaddeler ve ham yığınsal yoğunluğunu etkileyen faktörler çok hassas kontrol edilse dahi, fırında oluşabilecek değişiklikler bir yarı mamül ürünün istenen standartlar dışında üretimi ile sonuçlanabilmektedir. Bu da, fırın çıkışında ilave bir kontrolü gerektirmekte olup, kontrolün sağlanması ile hatalı ya da standart dışı ürünlere anında müdahale sağlanabilecektir. Bu nedenle, porselen karo üretiminde enerji kaybı yoğun bölgelerin fırınlar olduğu göz önünde bulundurulduğunda, ultrasonik ölçüm sisteminin pişmiş karolarda kullanımının daha verimli olacağı düşünülmektedir. Bu amaçla, yapılan bu çalışmada ultrasonik test metodlarının kullanılması ile porselen karo hatalarının tahribatsız olarak belirlenmesi ve hatalı üretimden kaynaklanan maliyetlerin azaltılması hedeflenmiştir.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

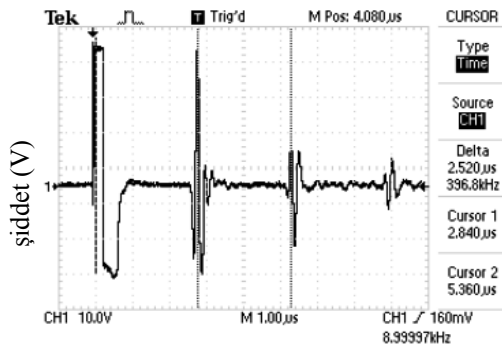
Bu çalışmada, hazırlanacak numuneler için Hitit Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş. granit bünye granülleri kullanılmıştır. Bu granüller endüstride kullanılan nem düzeyinde ağ. % 5,5–6,5 oranında nemlendirilmiştir. Nemlendirilen granüller 1 gece dinlendirildikten sonra 50 mm x 100 mm ebadında (kalın sabit tutularak) 40 ton'luk hidrolik mini preste (Gabrielli) 450 kg/cm² basınçla şekillendirilmiştir. Şekillendirilen karolar daha sonra etüvde 110 C sıcaklıkta kurutulmuştur.

Sinterleme işlemi, laboratuvar tipi fırında (Protherm plf 150/9) 1220°C, 1210°C ve 1190°C'de, 10°C/dk.'lık ısıtma hızı ile sinterleme sıcaklığına çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yapay hata oluşumu için preslemede 10 mm x 10 mm boyutlarda kağıt porselen karo granüllerinin arasına yerleştirilmiştir. Çatlak hatası ise preslemede oluşturulmuştur. Bu hatalı numuneler sırası ile **KI** ve **ÇI** olarak adlandırılmıştır. **KI** numunesinin yapısında oluşan hatanın ultrasonik ölçüm yöntemi ile incelenmesi için standart bir karo (**SKI**) hazırlanmış olup, her iki numune 1220°C'de sinterlenmiştir. Çatlak içeren karo (**ÇI**) çatlak oluşumunu arttırmak ve belirginleştirmek amacı ile 1210°C'de sinterlenirken, bu karoda oluşan hatanın incelenmesinde referans olarak kullanılmak üzere hazırlanan standart karo (**SÇI**) daha düşük sıcaklıkta (1190°C'de) sinterlenmiştir.

Numunelerin ultrasonik testlerinde Olympus Panametrics Model 5800 Computer Controlled Pulser/Receiver (darbe-yankı yöntemi, A-tarama) kullanılmıştır. Ultrasonik (boyuna) dalgaların ilerleme süresi 1,27 cm çapında, merkez frekansı 5 MHz olan prob ile ölçülmüştür. Prob ile karolar arasında kuplaj malzeme olarak gliserin seçilmiş olup, ultrasonik dalga ilerleme süresi ± 40 sn hassasiyette ölçülmüştür. Ultrasonik C-tarama analizleri Dr. Hillger USPC 3040 DAC Industrie cihazı kullanılarak 6-12 MHz frekanslı, odak uzunluğu 15 mm, prob çapı 6 mm olan ve darbe yankı modunda çalışan daldırma prob ile su içinde yapılmıştır. Ultrasonik C-tarama incelenen numunenin bölgesel ve boyutsal görüntüsünü vermektedir. Görüntü, probun tarama şekline paralel olarak tespit edilmektedir. Karonun tabanına çarpan sinyallerin toplandığı geri yansıyan eko görüntülerinde değer skalasında göreceli sinyal kaybı değerleri; 0 dB (en yüksek şiddet) değerinden, negatif dB (göreceli olarak düşük şiddet) değerlerine değişmektedir. 0 dB değeri 'iyi' ya da 'yoğun' bölgeleri göstermektedir.

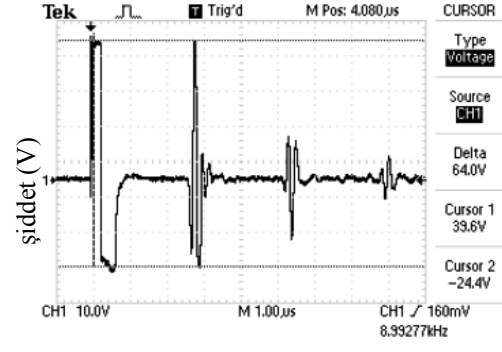
III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Ultrasonik olarak hataların tespit edilebilirliğini incelemek amacıyla porselen karolarda presleme sırasında çeşitli hatalar oluşturulmuştur. Bunlardan, kağıt kullanılarak oluşturulan hatada, bünyedeki kağıdın sinterleme işleminde yanması sonrasında yapıda gaz oluşumu nedeni ile bir porozite meydana gelmiştir. Şekil 1; 1220°C'de sinterlenen karoda (**SKI**) iletilen ultrasonik sinyalleri göstermektedir. Karoda dalga ilerleme süresi 2,52 μ s (Şekil 1.a) ve geri yansıyan ekonun şiddeti 64 V'tur (Şekil 1.b). Şekil 2 (a, b); kağıt hatası bulunan karonun (**KI**) hata içermeyen bölgesinde iletilen ultrasonik sinyalleri göstermektedir. Hatasız bölgede dalga ilerleme süresi ve geri yansıyan eko şiddetinin 1220°C'de sinterlenen hatasız karo (**SKI**, standart) ile aynı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2 (b, d); kağıt içeren karoda (**KI**) hatalı bölgede iletilen ultrasonik sinyalleri göstermektedir. Dalga ilerleme süresinin hatasız bölgedeki ile aynı olduğu görülmektedir. Bu da kağıt hatasının kullanılan probun çapından daha küçük olması ve bu nedenle hatanın dalga ilerleme süresini değiştirmemesi olarak açıklanmaktadır. Ancak gerilim farkındaki değişimler dalga ilerleme süresinin aksine farklılık göstermektedir. Hatalı bölgeden gelen sinyaller incelendiğinde, geri yansıyan ekonun şiddetinin 41,6 V'a düştüğü tespit edilmektedir.



süre (μ s)

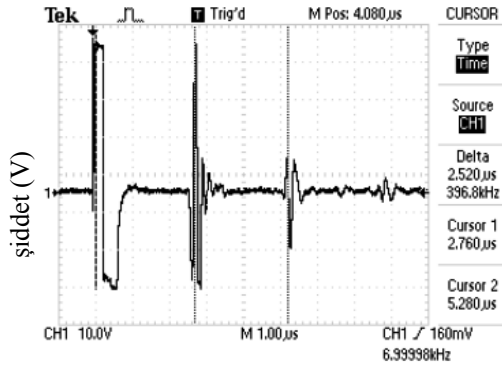
(a)



süre (μ s)

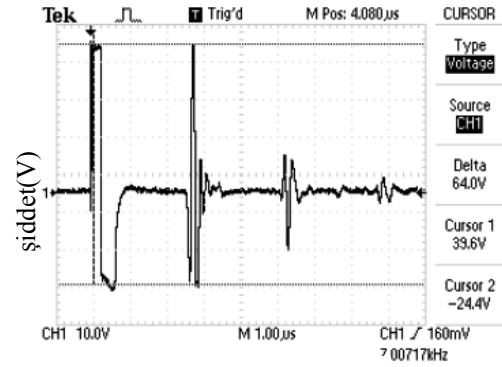
(b)

Şekil 1. 1220°C'de sinterlenen standart karo (SKI) için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) şiddet değerleri.



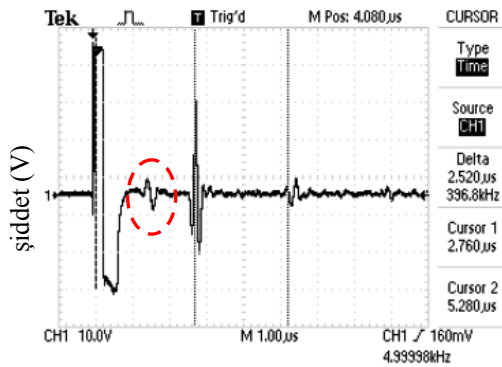
süre (μ s)

(a)



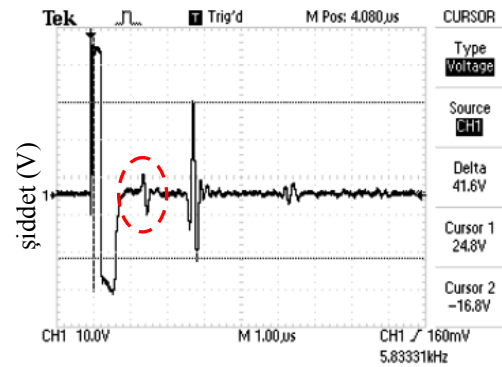
süre (μ s)

(b)



süre (μ s)

(c)

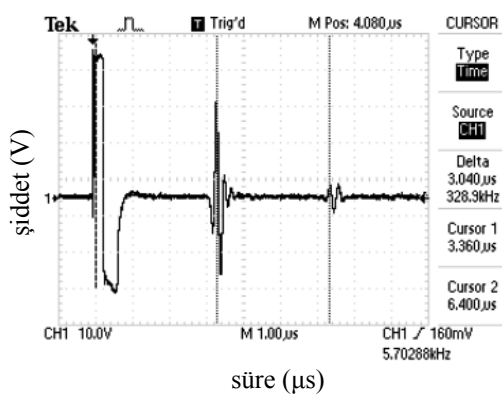


süre (μ s)

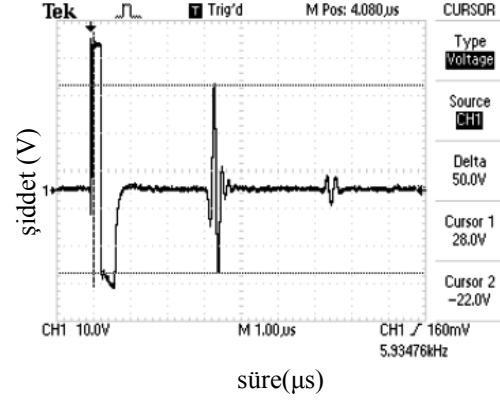
(d)

Şekil 2. 1220°C'de sinterlenen kağıt hatası içeren karo (KI) için (a, b) hatasız bölge, (c, d) hatalı bölge sinyalleri. Hata ekosu c ve d'de yuvarlak içinde görülebilmektedir.

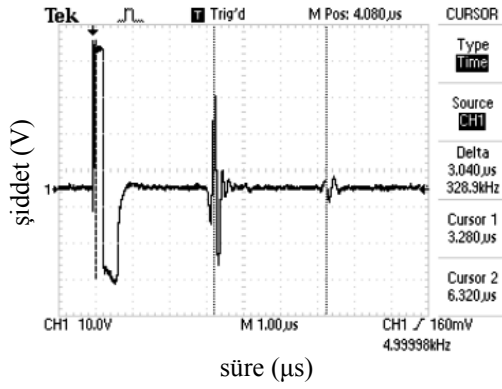
Çatlak içeren karonun (**ÇI**), hata içermeyen bölgedeki ultrasonik sinyallerin ilerlemesi Şekil 3'de görülmektedir. Hatasız bölgedeki ultrasonik dalga ilerleme süresi 3,04 µs (Şekil 3.a) ve geri yansıyan ekonun şiddet değeri 50 V'tur (Şekil 3.b). Çatlak içeren bölgede ultrasonik sinyallerin ilerlemesi incelendiğinde bu bölgedeki dalga ilerleme süresinin hatasız bölgedeki ile benzer olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.c ve d). Bu numunede (**ÇI**) gözlenen sonuç, kağıt içeren numunede (**KI**) olduğu gibi, porozite nedeni ile benzerlik göstermektedir. Hata boyutunun prob çapından daha küçük olması ultrasonik dalga ilerleme süresini değiştirmemektedir. Şekil 3 (c, d)'de çatlığa bağlı olarak oluşan bir hata ekosu görülmemektedir. Ancak, hatasız bölgede 50 V olarak gözlenen geri yansıyan eko şiddetinin, bu bölgede 46 V'a düştüğü tespit edilmiştir. Sinterleme sıcaklığı düştükçe gözenek miktarı artmaktadır. 1190 °C'de sinterlenen karo, en gözenekli karodur. 1190°C'de sinterlenen karonun görünen porozitesi % 4,60 iken 1210°C'de sinterlenen karo için bu değer % 3,85'tir. Ultrasonik dalgaların ilerleme süresinin, 1190°C'de sinterlenen **SÇI** karosunda, daha yüksek sıcaklıkta sinterlenen karolara göre en yüksek değerde elde edilmesi beklenen bir sonuçtur. Bu numunenin düşük sıcaklıkta sinterlenmesi nedeni ile ultrasonik dalgaların ilerlemesi yapısındaki porozite miktarının artması ile engellenmektedir. Bunun sonucu olarak dalgaların ilerlemesi daha uzun sürede gerçekleşmektedir. 1190°C'de sinterlenen karodaki (**SÇI**) ultrasonik sinyallerin ilerlemesi incelendiğinde düşük sıcaklıkta sinterlenen bu karonun dalga ilerleme süresinin 3,24 µs (Şekil 4.a) ve geri yansıyan eko şiddetinin 44 V olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.b).



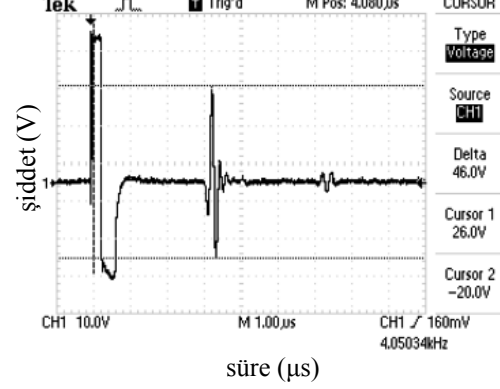
(a)



(b)

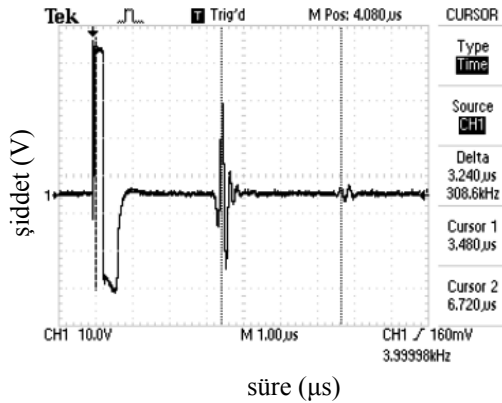


(c)

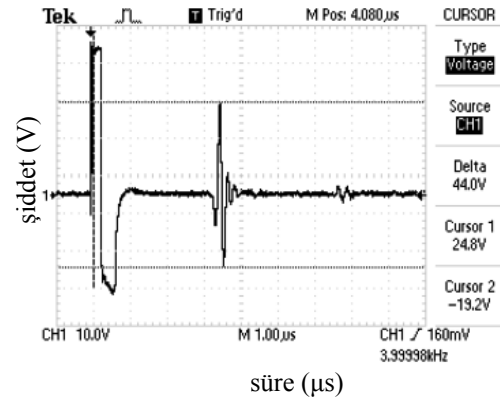


(d)

Şekil 3. 1210°C'de sinterlenen çatlak hatası içeren karo (ÇI) için (a, b) hatasız bölge, (c, d) hatalı bölge sinyalleri.



(a)



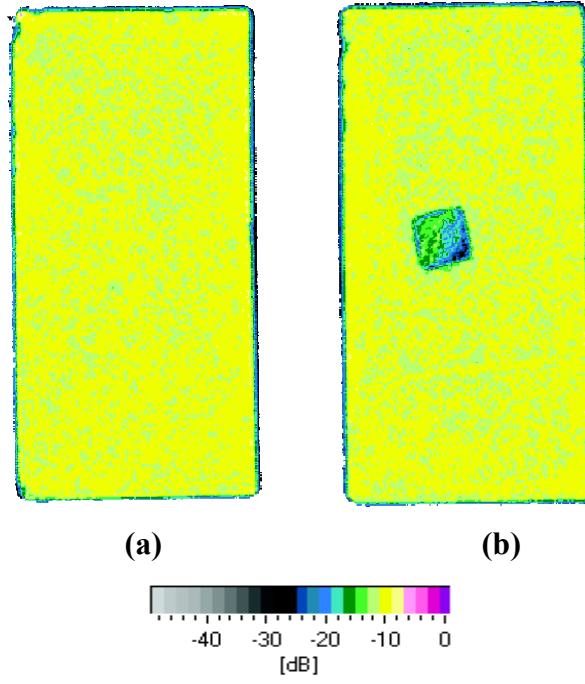
(b)

Şekil 4. 1190°C'de sinterlenen standart karo (SÇI) için sinyallerin (a) dalga ilerleme süresi, (b) şiddet değerleri.

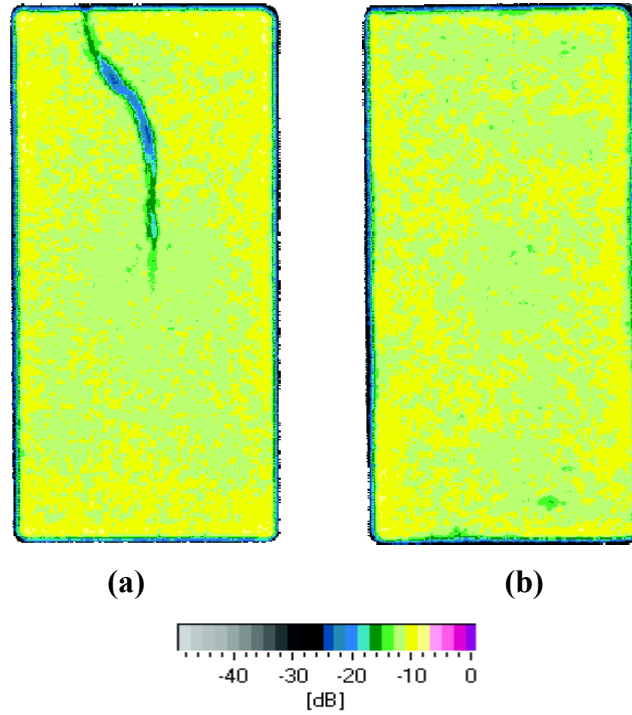
Ultrasonik geri yansıyan ekolardan toplam dB olarak hata hesabı MATLAB programı kullanılarak “görüntü işleme yöntemleriyle” belirlenmiştir. Sinyal değişimi, 0’dan -50 dB’e kadar değişen bir skalaya göre ifade edilmiş, incelenen her karonun skaladaki dB değerleri için gerçekleşen yüzdeler belirlenmiştir. Ortalama toplam kayıp (%), hata yüzdesi ile dB değerinin çarpımı sonucu hesaplanmıştır. Çizelge 1’de incelenen karolar için dB’lere göre hata yüzdelerinin (%) değişimi verilmektedir. 1220°C’de sinterlenen hatasız ve kâğıt hatası içeren karoların ultrasonik geri yansıyan eko görüntüleri Şekil 5’te verilmektedir. Şekil 5.a’daki hatasız karonun sinyal kaybı -10,51 dB’dir. Ancak hataya bağlı olarak sinyal kaybı daha fazla olmaktadır. Şekil 5.b’de kâğıt hatası için sinyal kaybı -10,81 dB’dir. Kâğıt hatası, düşük dB’lerde kayba neden olarak karonun ortalama toplam sinyal kaybının (%) standart karoda gerçekleşen ortalama toplam sinyal kaybına (%) göre daha fazla olmasına neden olmuştur. Şekil 6.a’da 1210°C’de sinterlenen ve görünen porozitenin % 3,85 olduğu karo görülmektedir. Bu karonun sinyal kaybı -11,26 dB iken, 1190°C’de sinterlenen (Şekil 6.b) ve görünen porozitenin % 4,60 olduğu karoda sinyal kaybı -11,17 dB’dir. Düşük sıcaklıkta sinterlenerek su emmesi daha fazla olan karoda ortalama toplam sinyal kaybının (%) daha fazla olması beklenmektedir. Çünkü porozitenin artması daha fazla sinyal kaybına yol açmaktadır. Ancak, karodaki çatlak hatası nedeniyle (Şekil 6.a) sinyal kaybının, hatasız ve daha düşük sıcaklıkta sinterlenmiş karoya (Şekil 6.b) göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Standart iki karonun ortalama toplam sinyal kayıpları (%) incelendiğinde 1190°C’de sinterlenen karonun sinyal kaybının daha fazla gözenekli olması nedeniyle 1220°C’de sinterlenen karodan daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca hatasız karolarda -16 dB’nin altında hiç sinyal kaybının görülmediği tespit edilmiştir.

Çizelge 1. dB’lere göre hata yüzdelerinin (%) değişimi.

Karo dB	-50 to -30	-28	-26	-24	-22	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0
Standart (SKI) (1220°C)	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,13	25,6	73,9	0,32	0	0	0	0
Kâğıt hatası içeren (KI) (1220°C)	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
Standart (SÇI) (1190°C)	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,46	57,9	41,5	0,14	0	0	0	0
Çatlak hatası içeren (ÇI) (1210°C)	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 5. (a)Standart (SK1), (b) 10 mm X 10 mm ebatlarında kağıt içeren (K1) karolar için geri yansıyan ekolar.



Şekil 6. (a) 1210°C'de sinterlenen ve çatlak içeren (Ç1), (b) 1.190°C'de sinterlenen (SÇ1) karolar için geri yansıyan ekolar.

IV. TARTIŞMA

Hataların tespit edilmesi ve karakterizasyonu tahribatsız muayene tekniklerinden ultrasonik ile gerçekleştirilmiştir. A-tarama metodu kullanılarak farklı hatalar tespit edilebilmiştir. A-taramada hatanın şekli ve boyutu hatanın tespit edilebilmesini sağlayan temel faktörlerdendir. Çatlak hatasını A-tarama ile tespit etmek oldukça zor iken kağıt hatası kolay bir şekilde tespit edilebilmiştir. Çatlak hatası, kağıt hatasına göre prob alanının daha az bir kısmını kaplamaktadır. Bu nedenle çatlak hatası içeren karoda herhangi bir hata ekosu tespit edilememiştir. Çatlak hatası ancak geri yansıyan ekodaki düşüşe bağlı olarak belirlenmiştir. Kağıt hatası içeren numunede ise hem hata ekosu tespit edilmiş, hem de geri yansıyan ekoda düşüş gözlenmiştir. Hata varlığında elde edilen ultrasonik dalga ilerleme süreleri hataların prob çapından daha küçük hatalar olmaları sebebiyle hatasız bölgelerin ultrasonik dalga ilerleme süreleriyle aynıdır. Sinterleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak standart karolardaki porozite miktarının değiştiği, yüksek sıcaklıklarda sinterlemenin düşük miktarda poroziteye neden olması ile karoda ultrasonik dalgaların daha kısa sürede ilerlemesini sağladığı belirlenmiştir.

Mevcut hataların, ultrasonik C-tarama metodu kullanılarak yerleri ve şekilleri tespit edilebilmiştir. Sinyal kayıpları, ultrasonik dalgaların hatalara bağlı olarak yansımaları ve kırınımı sonucunda gerçekleşmektedir. Kağıt hatası bu nedenle aynı sıcaklıkta sinterlenen standart karoya göre daha fazla bir sinyal kaybına neden olmaktadır. Çatlak içeren karoda gözlenen sinyal kaybı ise daha düşük sıcaklıkta sinterlenen standart bir karoya göre daha fazladır. Ayrıca sinterleme sıcaklığındaki düşüş standart karolardaki porozite miktarını da arttırmaktadır. Porozite miktarındaki artış ortalama toplam sinyal kaybında (%) artış ve buna bağlı olarak da düşük sıcaklıkta sinterlenen karolarda daha fazla ortalama toplam sinyal kaybına (%) neden olmaktadır. Ayrıca hata içermeyen standart karolarda belirli bir dB değerinin altında sinyal kaybının görülmediği tespit edilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] H.M. Elbehiery, A.A. Hefnawy and M.T. Elewa, "Quality Control Enhancement via Non-destructive Testing for Green Ceramic Tiles", Proceedings of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 27-30 December 2003, Vol. 3, pp. 1130-1133.
- [2] A.F. Grandt Jr., "Fundamentals of Structural Integrity Damage Tolerant Design and Nondestructive Evaluation", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2004.
- [3] H. Kuttruff, "Ultrasonics-Fundamentals and Applications", Elsevier Applied Science, New York, 1991.

- [4] Gür, C.H., “Tahribatsız Tekniklerin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesindeki Yeri”, 1. Uluslararası Tahribatsız Muayene Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Türkiye Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası, 29 Eylül-1 Ekim 1999, Ankara, ss. 357-372.
- [5] The Institution of Metallurgist, “*Ultrasonic Non-destructive Testing*”, The Institution of Metallurgist, No. 9, Chamelon Press Limited, London, 1983.
- [6] M.C. Bhardwaj, I. Neeson, G. Stead, “Introduction to contact-free ultrasonic characterization and analysis of consolidated materials”, *NDTnet*, Vol. 5, No. 6, 2000.
- [7] M.C. Bhardwaj, “Non-contact ultrasonic characterization of ceramics and composites”, *Nondestructive Evaluation of Ceramics*, Vol. 89, pp. 267-281, 1997.
- [8] B. Hayes, “Special report/R and D overview: advancing ceramic and glass technology”, *Ceramic Industry*, Vol. 157, No. 8, pp. 24-28, 2007.
- [9] R.E. Brennan IV., “*Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Armor Ceramics*”, Phd. Thesis, Rutgers, The State University of New Jersey, Graduate Program in Materials Science and Engineering, Graduate School-New Brunswick, New Jersey, 2007.
- [10] J.A. Medding, “*Nondestructive Evaluation of Zirconium Phosphate Bonded Silicon Radomes*”, M.S Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Material Science and Engineering, Virginia, 1996.