

## **Ultrasonik Muayene Prob Çaplarının Darbe Yankı Değerine Etkisinin Araştırılması**

Emre GÖRGÜN<sup>1\*</sup>

### **Öz**

Bu çalışmanın amacı ultrasonik muayene yönteminde kullanılan problemlerin kristal çapları ve frekans değerlerinin darbe yankı değeri ile ilişkisinin araştırılmasıdır. Ultrasonik muayene yöntemi tahribatsız muayene yöntemlerinden bir tanesi olarak bilinmektedir. Bu yöntem sayesinde muayenesi yapılacak malzemeye zarar vermeden malzeme içerisinde bulunan süreksizler tespit edilebilmektedir. Piezoelektrik malzemelerin ürettiği ses dalgalarının malzeme yüzeyine gönderilmesi ve tersinir olarak gelen ses dalgalarının okunması prensibi ile çalışmaktadır. İnsan kulağının duyamayacağı aralıklarda ses frekansları kullanılır, bu frekans değerleri malzemenin yapısına ve muayene edilecek ortama göre değişkenlik gösterirken genel olarak 1MHz ile 4MHz arasında değişmektedir. Çalışmamızda malzeme olarak tren tekerlekleri tercih edilmiştir. Tren tekerlekleri orta karbonlu çelik malzemeden dövme yöntemi ile üretilmektedir. İşletme sırasında dinamik zorlanmalara maruz kalan tren tekerleklerinin muayeneleri büyük önem arz etmektedir. Tren tekerlekleri üzerinde delik delme yöntemi ile 3mm çapında yapay hatalar oluşturulmuştur. Üzerinde yapay hataların bulunduğu tren tekerleklerine 3 farklı çap ve 3 farklı frekans değerlerine sahip problemler ile muayene gerçekleştirilmiştir. Problemlerin aynı baskı kuvveti ile malzeme yüzeyine temas etmesi için yaylı bir düzenek hazırlanmıştır. Toplam 6 farklı deney grubu ile 9 adet test gerçekleştirilmiş ve veri seti oluşturulmuştur. Problemlerden gelen verilen ses dalgaları db birimi olarak kaydedilmiştir. Literatürde prob seçiminde temel parametre her ne kadar problemlerin frekansı gibi görülse de farklı prob çaplarının muayene hassasiyetine etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Prob çapları ile gelen ses dalgaları arasındaki ilişkinin belirlenmesinde IBk algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma öznelik uzayındaki en yakın eğitim örneklerine dayanarak nesnelerin sınıflandırılması prensibine dayanmaktadır. IBk algoritması kullanılarak yapılan model de prob çapı ile darbe yankı değerinin arasında %89 gibi yüksek bir oranda ilişki bulunmuştur. Bu değer prob seçiminde ana parametre olarak kabul edilmeyen prob çaplarının darbe yankı değeri ile ilişkisinin gösterilmesi açısından önem arz etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Tahribatsız Muayene, Demiryolu Tekerleği, Demiryolları, Prob

## **Investigation of the Effect of Ultrasonic Inspection Probe Diameters on Impact Echo Value**

### **Abstract**

The aim of this study is to investigate the relationship between the pulse echo value of the probes used in the ultrasonic examination method. Ultrasonic inspection method is known as one of the non-destructive inspection methods. Thanks to this method, discontinuities in the material can be detected without damaging the material to be examined. It works with the principle of sending the sound waves produced by piezoelectric materials to the material surface and reading the sound waves coming reversibly. As the general working principle, sound frequencies are used in the ranges that the human ear cannot hear. These frequency values vary according to the structure of the material and the environment to be examined, but generally vary between 1MHz and 4MHz. In our study, train wheels were preferred as material. Train wheels are produced from medium carbon steel material by forging method. Inspections of train wheels, which are exposed to dynamic stresses during operation, are of great importance. The method of drilling holes on the train wheels with 3mm artificial errors were created. Inspection was carried out with total probes with 3 different diameters and 3 different frequency values on the train wheels on which artificial defects were found. A spring mechanism has been prepared for the probes to contact the material surface with the same pressure force. Experimental groups and a data set was created of 9 tests were carried out with 6 different. The sound waves given from the probes were recorded as db unit. Although the frequency of the probes is seen as the basic parameter in the selection of probes in the literature, it has been observed that different probe diameters have an effect on the inspection sensitivity. IBk algorithm was used to determine the relationship between probe diameters and incoming sound waves. This algorithm is based on the principle of classifying objects based on the closest training examples in the feature space. In the model made using the IBk algorithm, a high correlation of 89% was found in the probe diameter and pulse echo value. This value is important in terms of showing the relationship between the probe diameters, which cannot be considered as the main parameter, and the pulse echo value.

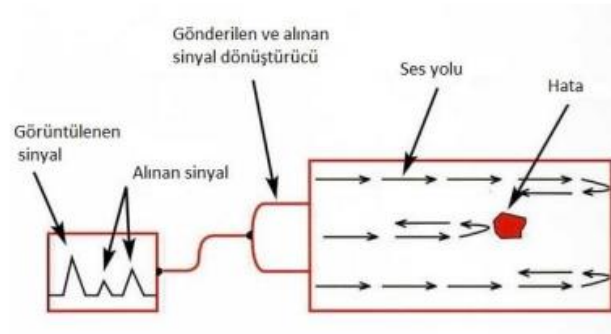
**Keywords:** Non-Destructive Testing, Rail, Wheel Defects, Railways, Probe

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Sivas, Ülke, emregorgun@cumhuriyet.edu.tr

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-1971-456X>

## 1. Giriş

Son yıllarda demiryolu trafiğinde yaşanan yoğunluklar ve demiryolu araçlarında artan yüklerle beraber güvenlik hususları ön plana çıkmış, periyodik muayeneler büyük önem kazanmaya başlamıştır. Daha önceleri kasnak geçme sistemi şeklinde imal edilen tekerlekler günümüzde artık monoblok dövme usulü ile imal edilmiş aksa sıkı geçme yöntemi ile montajı yapılarak son halini almıştır. Monoblok tekerlek takımlarının hacimsel kusurları için ultrasonik muayene yöntemi ön plana çıkmıştır. Ultrasonik muayene yöntemi tahribatsız muayene yöntemlerinden bir tanesi olduğu için muayene sonrasında malzeme işletmeye devam edebilmektedir. Genel prensip olarak ultrasonik yöntemle muayenede insan kulağının duyamayacağı frekansta ses dalgaları metal yüzey üzerine gönderilmekte ve metal yüzeyin sınırından geri dönerek tersinir olarak çalışmaktadır. Ultrasonik muayene cihazında kullanılan ses dalgalarının frekansları malzeme türüne göre değişmekte aynı zamanda problemlerin dalga türüne (boyuna dalga, enine dalga vd.) gibi opsiyonları muayene yöntemlerine göre değişmektedir (Türker ve ark., 2007).



Şekil 1. Ultrasonik muayenede hata tespiti (Özbek ve ark., 2019).

Prensip olarak tahribatsız muayene yöntemleri hacimsel ve yüzeysel muayene olmak üzere ikiye ayrılırlar (Tomlinson ve ark., 1980). Hacimsel muayene yöntemlerinden birisi olan ultrasonik muayene yöntemine göre alternatif olarak radyasyon muayene yöntemi gösterilmektedir (Park vd., 1996). Şekil 1’ de ultrasonik probun ürettiği ses dalgasının malzeme içerisinde yayılım davranışı gösterilmiştir. Çok kristalle muayene yöntemi olan phased array yöntemi ise ultrasonik muayene yönteminin bir alternatifi değil gelişmiş bir çeşidi olduğu söylenebilir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneysel Düzeninin Hazırlanması

Ultrasonik muayene yöntemi imalat kusurlarını bulmada çok önemli bir rol oynamaktadır. Ultrasonik muayene yönteminde muayene edilecek parçanın yüzeyine ses dalgaları darbe yöntemi

ile uygulanır (Karaböce ve ark., 2016). Bu darbeler test dalgasına dönüşür ve tekrar katı sınır yüzeyinden yeniden dönerek bir gelirim oluşturur (Rose ve ark., 1975). Muayene esnasında bir ses dalgası üretici bir görüntüleme cihazı ve prob ekipman olarak kullanılmaktadır (Emerson vd., 2002). Ultrasonik muayene uygulaması sırasında ses dalgasının frekansı darbe yankısı ve problemlerin konumlandırılması için bazı nümerik formüller kullanılmaktadır .

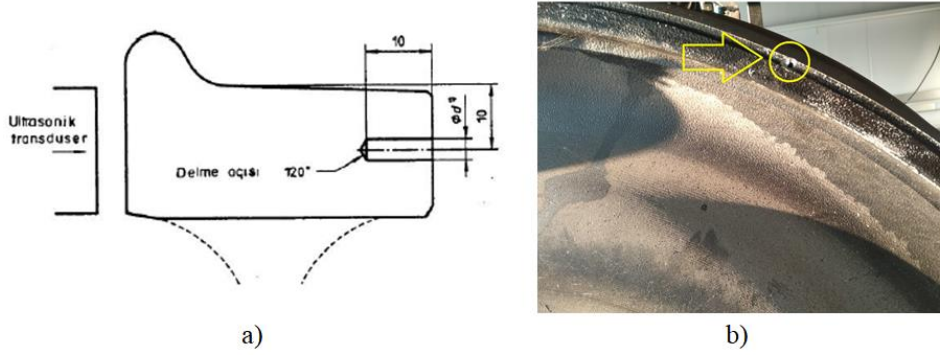
Ultrasonik hata dedektörleri el ile taşınabilir portatif cihazlar ve bilgisayara entegre sistem olmak üzere ikiye ayrılır(Bahonar ve ark., 2022). Bu çalışmada ultrasonik hata dedektörü olarak bilgisayarın ana kartına PC Express slot bağlantısı yöntemi ile bağlanan OPCARD-2.2 ultrasonik hata dedektörü modeli kullanılmıştır (Sekhar ve ark., 2021).



**Şekil 2.** a) OPCARD ver. 2.2 PCI Ultrasonik test kartı, b) OPCARD ver. 2.2 PCI Ultrasonic testing card bağlantı şeması.

Şekil 2' de görüldüğü üzere, bu çalışmada kullanılan OPCARD 2-2 ultrasonik hata dedektörü standart olarak tek prob ile çalışmaya uygun olup ekstra olarak multiplexer bağlanmıştır (Rhodes ve ark., 1979). Multiplexer sayesinde 16 tane ultrasonik probun sıralı olarak çalışması ve 16 kanaldan veri alınması mümkün kılan bir ekipman kullanılmıştır (Zhao ve ark., 2021). Bu çalışmada OPMUX ver 12.0 Ultrasonic Multiplexer kullanılmıştır (Vogt ve ark., 2014).

Bu deneysel çalışmada tren tekerleklerinin üzerine delik delme yoluyla yapay hatalar oluşturulmuştur ve yapay hatalara hacimsel muayene gerçekleştirilmiştir (Chaplin, 2017). Muayene yöntemi olarak konvansiyonel ultrasonik muayene yöntemi seçilmiştir (Özbek ve ark.,2019). Konvansiyonel yöntemle hataların tespit edilmesinde farklı frekans ve çap değerlerinde problemler kullanılmış ve bu problemlerin ölçüm karakteristikleri karşılaştırılmıştır (Mohseni ve ark., 2021). Demiryolu tekerleklerinin üzerine hatalar açılırken TS ISO 5948 standardı göz önüne alınmıştır. Standarda uygun şekilde 3 mm çapında yivli matkap uçları kullanılarak bir matkap yardımıyla referans hata delikleri açılmıştır. Şekil 3'te deliklerin yerleri şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.** a) TS ISO 5948 Standardına göre kalibrasyon blokları, b) TS 9911 / ISO 5948 Standardına uygun açılmış yapay hata.

Muayene sırasında demiryolu tekerleğinin yan yüzeyine problar oturtulmuştur. Prob ve test numunesi arasında bağlantıyı sağlamak amacıyla coolant sıvısı olarak makine yağı tercih edilmiştir (Bahonar ve ark., 2022). Ultrasonik muayene yönteminde prob baskı kuvvetinin muayene hassasiyetini etkileyeceği gözönüne alınarak baskı aparatları kullanılmış ve Şekil 4’te görüldüğü üzere her probun yüzeye aynı baskı kuvveti ile temas etmesi sağlanmıştır.



**Şekil 4.** Probların sabit baskı uygulaması için tekerleğe konumlandırılmış prob tutucu

## 2.2. Kullanılan Makine Öğrenmesi Yöntemi

IBk algoritması öznitelik uzayındaki en yakın eğitim örneklerine dayanarak nesnelere sınıflandıran, en basit örüntü tanıma yöntemlerinden birisidir (Gentleman ve ark., 2008). Bu algoritma verilen “k” değeri kadar en yakın komşunun sınıfına göre sınıflandırma işlemi yapmaktadır (Caruana ve ark., 2006). IBk algoritmasında bir vektörün sınıflandırılması, sınıfı bilinen vektörler kullanılarak yapılmaktadır (Bilgin, 2017).

Model başarımının ölçülmesinde kullanılan en popüler ve basit yöntem, modele ait doğruluk oranıdır (Caruana ve ark., 2006). Doğru sınıflandırılmış örnek sayısının doğru pozitif+doğru negatif (TP +TN), toplam örnek sayısına doğru pozitif+doğru negatif+yanlış pozitif+yanlış negatife (TP+TN+FP+FN) oranıdır (Afrin ve ark., 2015). Hata oranı ise bu değer 1’e tamlayanıdır. Diğer

bir ifadeyle yanlış sınıflandırılmış örnek sayısının (FP+FN), toplam örnek sayısına (TP+TN+FP+FN) oranıdır (Nizam ve ark., 2014).

$$\text{Hata Oranı} = \frac{(FP+FN)}{(TP+FP+FN+TN)} \quad (1)$$

$$\text{Doğruluk} = \frac{(TP+TN)}{(TP+TN+FP+FN)} \quad (2)$$

Kesinlik, sınıfı 1 olarak tahmin edilmiş True Pozitif (TP) örnek sayısının, sınıfı 1 olarak tahmin edilmiş tüm örnek sayısına (TP+FP) oranıdır (Nizam ve ark., 2014).

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{(TP+FP)} \quad (3)$$

Doğru sınıflandırılmış pozitif örnek (TP) sayısının, toplam pozitif örnek sayısına (TP+FN) oranıdır (Nizam ve ark., 2014).

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{(TP+FN)} \quad (4)$$

Kesinlik ve duyarlılık ölçütleri tek başına anlamlı bir karşılaştırma sonucu çıkarmamıza yeterli değildir. Her iki ölçütü beraber değerlendirmek daha doğru sonuçlar verir. Bunun için f-ölçütü (F) tanımlanmıştır. F-ölçütü, kesinlik (K) ve duyarlılığın (D) harmonik ortalamasıdır (Nizam ve ark., 2014).

$$F = \frac{2DK}{(D+K)} \quad (5)$$

Gözlemciler arası varyasyon, iki veya daha fazla bağımsız gözlemciler tarafından aynı şeyi değerlendiriyor olduğu her durumda ölçülebilir (Nizam ve ark., 2014). Kappa katsayısı -1 ile +1 arasında değişir. Tam uyum söz konusu olduğunda K=1 olur. Gözlenen uyumun şansa bağlı uyuma eşit ya da ondan büyük olması durumunda  $K \geq 0$  iken, gözlenen uyumun şansa bağlı uyumundan küçük olması durumunda  $K < 0$  olur. Kappa katsayısının yorumlanabilir aralığı 0 ile +1 arasında olup, negatif ( $K < 0$ ) değerlerinin güvenilirlik açısından bir anlamı yoktur. 0.4 üzerindeki bir kappa skoru makul bir anlaşmayı ifade eder. Kappa değeri şu şekilde hesaplanır (Nizam ve ark., 2014).

$$K = \frac{(P_0 - P_c)}{(1 - P_c)} \quad (6)$$

(Po kabul edilen oran, Pc kabul edilmesi beklenen)

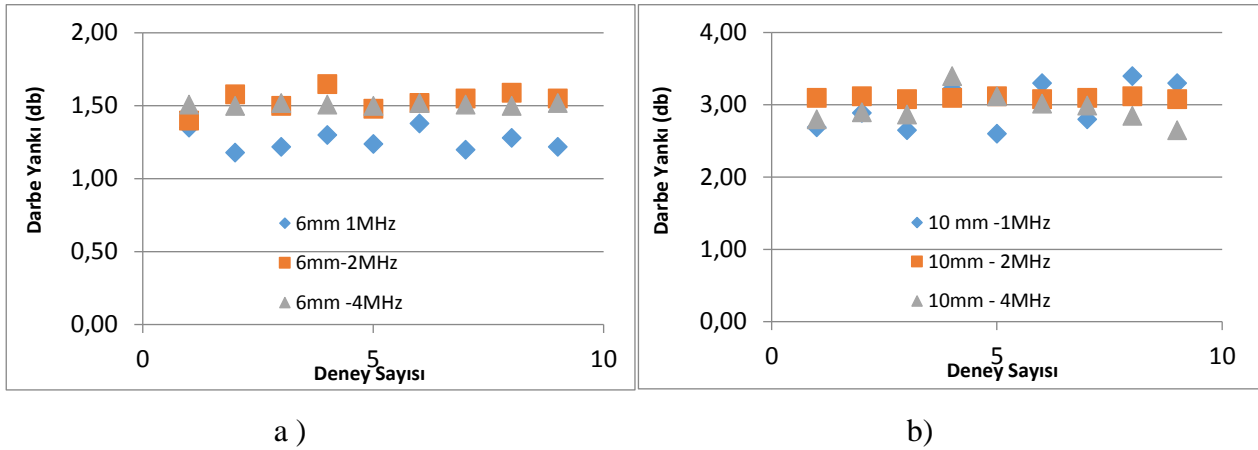
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada 1MHz, 2 MHz ve 4 MHz olmak üzere üç farklı frekans değeri aynı zamanda 6 mm ve 10 mm olmak üzere iki farklı çap değerindeki problar kullanılmıştır. Ölçümler 6 gruba ayrılmış olup her bir değer ayrı ayrı yorumlanmıştır.

**Tablo 1.** Darbe yankı ölçüm sonuçları.

Frekans (MHz)	Çap (mm)	Deney1 (db)	Deney2 (db)	Deney3 (db)	Deney4 (db)	Deney5 (db)	Deney6 (db)	Deney7 (db)	Deney8 (db)	Deney9 (db)
1.00	6.00	1.35	1.18	1.22	1.30	1.24	1.38	1.20	1.28	1.22
1.00	10.00	2.69	2.89	2.65	3.22	2.60	3.30	2.80	3.40	3.30
2.00	6.00	1.40	1.58	1.50	1.65	1.48	1.52	1.55	1.59	1.55
2.00	10.00	3.10	3.12	3.08	3.10	3.12	3.08	3.10	3.12	3.08
4.00	6.00	1.51	1.50	1.52	1.51	1.50	1.52	1.51	1.50	1.52
4.00	10.00	2.80	2.90	2.87	3.40	3.12	3.02	2.99	2.85	2.65

Tablo 1’ de görüldüğü üzere prob çapının artması ile tüm frekans gruplarının darbe yankı ses şiddetinin miktarında oransal artışlar gözlemlenmiştir. Ölçüm sonucunda 1 MHz frekans ve 6 mm çap değerine sahip P1-6L prob grubunun darbe yankı şiddeti aritmetik ortalama olarak 1.26 db ölçülmüş, 1 MHz frekans ve 10 mm çap değerine sahip P1-10L prob grubunun darbe yankı şiddeti aritmetik ortalama olarak 2.98 db ölçülmüş, 2 MHz frekans ve 6 mm çap değerine sahip P2-6L prob grubunun darbe yankı şiddeti aritmetik ortalama olarak 1.54 db ölçülmüş, 2 MHz frekans ve 10 mm çap değerine sahip P2-10L prob grubunun darbe yankı şiddeti aritmetik ortalama olarak 3.10 db ölçülmüş, 4 MHz frekans ve 6 mm çap değerine sahip P4-6L prob grubunun darbe yankı şiddeti aritmetik ortalama olarak 1.51 db ölçülmüş ve son olarak 4 MHz frekans ve 10 mm çap değerine sahip P4-10L prob grubunun darbe yankı şiddeti aritmetik ortalama olarak 2.96 db ölçülmüştür. Şekil 5’de görüldüğü üzere çap artışı ve frekans artışı ile ses şiddetinde anlamlı artışlar gözlemlenmiştir. Frekans değerindeki artışlar ile darbe yankı değerleri arasındaki doğrusal artışların olması beklenirken prob kristal çaplarında darbe yankı değerleri ile anlamlı ilişkileri olduğu gözlemlenmiştir. Ultrasonik yöntemle muayene sırasında, muayene hassasiyeti bakımından darbe yankı değerinin önemi düşünüldüğünde ölçüm hassasiyetini artırmanın bir yolu olarak çap artışlarının yapılmasının faydalı olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 5. a) Prob ölçüm sonuçları(6mm) b) Prob ölçüm sonuçları(10mm).

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Deneysel çalışmalardan elde edilen bulguların yorumlanması için yapılan IBk analizi sonucunda Tablo 3' te görüldüğü üzere % 89 başarı oranında bir tahmin gerçekleştirmiştir. Yapılan tahmin alınan darbe yankı değerine göre prob çapının belirlenmesi hedef alan bir modeldir (MeeraGandhi, 2010).

Ultrasonik yöntemle muayene sırasında, muayene hassasiyeti bakımından daha yüksek ses dalgalarının ölçüm hassasiyeti açısından önemi düşünüldüğünde benzer bir muayene türünde bu çalışmanın referans teşkil edebileceği düşünülmüştür. Demiryolu tekerleklerine halihazırda uygulanan bir tahribatsız muayene yöntemi olarak ultrasonik yöntemle muayenede aynı frekansa sahip problemler içerisinde büyük çaplı muayene problemlerinin verdiği sonuçların daha yüksek eko verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

**Tablo 2.** Darbe yankı ölçüm sonuçları.

Doğru Sınıflandırılmış Örnekler	16	% 89
Kappa Değeri	0.7778	
Ortalama Mutlak Hata	0.1302	
Karekök Ortalama Hata	0.3254	
Bağıl Mutlak Hata	% 260313	
Kök Ortalama Kare Hata	% 650843	
Toplam Örnek Sayısı	18	

IBk algoritmasında sınıf olarak darbe yankı değeri seçilmiş prob çapı ve prob frekans değerleri üzerinden darbe yankı değerlerinin tahmin modeli oluşturulmuştur (Townsend, 1971). Prob çapı ve darbe yankı değeri arasında Tablo 3'te belirtilen 6 ve 10 değerleri mm birimi olarak prob çaplarını temsil etmektedir.

**Tablo 3.** Darbe yankı ölçüm sonuçları.

	TP Oranı	FP Oranı	Hassasiyet	Geri Çağırma	F-Ölçüsü	MCC	ROC Bölgesi	PRC Bölgesi	Sınıf
	0.778	0.000	1.000	0.778	0.875	0.798	0.901	0.895	6
	1.000	0.222	0.818	1.000	0.900	0.798	0.901	0.838	10
W. Avg.	0.889	0.111	0.909	0.889	0.888	0.798	0.901	0.867	

Tablo 4' te gösterilen matris IBk modelinin tahmin başarısını göstermekte olup toplam 18 tahminden 16 tanesinin doğru 2 tanesinin ise yanlış olduğunu göstermektedir (Visa vd., 2011).

**Tablo 4.** Karışıklık Matrisi.

a	b	<-- Sınıflandırma
7	2	a=6
0	9	b=10

Ultrasonik muayenede muayene hassasiyetindeki ana unsurlardan bir tanesi gönderilen ses yankısının hangi oranda aldığıdır (Kalmegh, 2019). Ultrasonik ana ölçüm parametresi olan prob frekansı muayenenin yapısı gereği belirli sınırlar içerisinde bulunmaktadır (Bojović, 2002). Bu çalışma ultrasonik muayene hassasiyeti ile prob çapı arasında ilişki olduğunu göstermektedir. IBk algoritması ile yapılan bu çalışmada prob frekansından bağımsız olarak prob çapındaki artışların ölçüm hassasiyetine ve alınan darbe yankı değerinde önemli artışlara neden olduğunu göstermiştir. Özellikle yüksek frekanslı problemlerle yapılan ve prob frekansının artırılmasının mümkün olmadığı malzeme muayenelerinde, ölçüm hassasiyetinin artırılması için prob çapının artırılmasının olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

### Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



## Kaynaklar

- Afrin, F., & Nahar, I. (2015). Incremental learning based intelligent job search system [PhD Thesis]. BRAC University.
- Bahonar, M., & Safizadeh, M. S. (2022). Investigation of real delamination detection in composite structure using air-coupled ultrasonic testing. *Composite Structures*, 280, 114939.
- Bilgin, M. (2017). Gerçek veri setlerinde klasik makine öğrenmesi yöntemlerinin performans analizi. *Breast*, 2(9), 683.
- Bojović, N. J. (2002). A general system theory approach to rail freight car fleet sizing. *European Journal of Operational Research*, 136(1), 136-172.
- Caruana, R., & Niculescu-Mizil, A. (2006). An empirical comparison of supervised learning algorithms. *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*, 161-168.
- Chaplin, R. (2017). *Industrial Ultrasonic Inspection: Levels 1 and 2*. FriesenPress.
- Emerson, R., Pollock, D., McLean, D., & Fridley, K. (2002). Ultrasonic inspection of large bridge timbers. *Forest Products Journal*, 52(9), 88.
- Gentleman, R., & Carey, V. J. (2008). *Unsupervised machine learning. Bioconductor case studies (ss. 137-157)*. Springer.
- Kalmegh, S. (2019). Effective classification of Indian News using Lazy Classifier IB1And IBk from weka. *Journal of information and computing science*, 6, 160-168.
- Karaböce, B., Özdingiş, M., Durmuş, H. O., & Çetin, E. (2016). Portable ultrasonic wattmeter for ultrasonic prob calibration. *2016 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)*, 1-4.
- MeeraGandhi, G. (2010). Machine learning approach for attack prediction and classification using supervised learning algorithms. *Int. J. Comput. Sci. Commun*, 1(2), 247-250.
- Mohseni, E., Javadi, Y., Sweeney, N. E., Lines, D., MacLeod, C. N., Vithanage, R. K., Qiu, Z., Vasilev, M., Mineo, C., & Lukacs, P. (2021). Model-assisted ultrasonic calibration using intentionally embedded defects for in-process weld inspection. *Materials & Design*, 198, 109330.
- Nizam, H., & Akın, S. S. (2014). Sosyal medyada makine öğrenmesi ile duygu analizinde dengeli ve dengesiz veri setlerinin performanslarının karşılaştırılması. *XIX. Türkiye’de İnternet Konferansı*, 1(6).
- Park, M. H., Kim, I. S., & Yoon, Y. K. (1996). Ultrasonic inspection of long steel pipes using Lamb waves. *NDT & E International*, 29(1), 13-20.
- Rhodes, J. D., & Levy, R. (1979). A generalized multiplexer theory. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 27(2), 99-111.
- Rose, J. L., & Meyer, P. A. (1975). Model for ultrasonic field analysis in solids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 57(3), 598-605.
- Sekhar, A. V., Kityk, A. V., Jedryka, J., Rakus, P., Wojciechowski, A., Reddy, A. S. S., Raju, G. N., & Veeraiah, N. (2021). Investigations on the influence CuO doping on elastic properties of Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-MgO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glass system by means of acoustic wave propagation. *Solid State Communications*, 330, 114270.
- Tomlinson, J. R., Wagg, A. R., & Whittle, M. J. (1980). Ultrasonic inspection of austenitic welds.
- Townsend, J. T. (1971). Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Perception & Psychophysics*, 9(1), 40-50.
- Türker, M., Ertürk, A. T., & Güven, E. A. (t.y.). *Metalik Malzemelerin Ultrasonik Yöntem ile Muayenelerinde Karşılaşılan Saçılma Kayıpları*.
- Visa, S., Ramsay, B., Ralescu, A. L., & Van Der Knaap, E. (2011). Confusion matrix-based feature selection. *MAICS*, 710, 120-127.
- Vogt, K., Fradin, F. Y., Pearson, J. E., Sebastian, T., Bader, S. D., Hillebrands, B., Hoffmann, A., & Schultheiss, H. (2014). Realization of a spin-wave multiplexer. *Nature communications*, 5(1), 1-5.
- Zhao, K.-R., Wang, L., Liu, P.-F., Hang, X.-M., Wang, H.-Y., Ye, S.-Y., Liu, Z.-J., & Liang, G.-X. (2021). A signal-switchable electrochemiluminescence biosensor based on the integration of spherical nucleic acid and CRISPR/Cas12a for multiplex detection of HIV/HPV DNAs. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 346, 130485.