

Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Katı Malzemelerde Görgül Kip Analizi Tabanlı Foto Akustik Sinyal İşleme ile Kusur Tespiti

Zekeriya BALCI^{1*}, Ahmet MERT²

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Çaldıran Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Van, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1389-1784>, zekeryabalci@yyu.edu.tr

² Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4236-3646>, ahmet.mert@btu.edu.tr

Geliş/ Received: 18.01.2024;

Revize/Revised: 15.02.2024

Kabul / Accepted: 03.03.2024

ÖZET: Bu çalışmada, görgül kip ayrışımı (GKA) ve makine öğrenimi algoritması kullanılarak malzeme kusurlarının tespiti için bir fotoakustik (FA) sinyal işleme çerçevesi önerilmiştir. Zaman ve zaman-frekans düzleminde çıkarılan özellikler ve gelişmiş sinyal işleme yöntemlerinin yardımıyla kusurların başarılı bir şekilde tespit edilmesini sağlamıştır. Lazer, mikrofon ve veri toplama kartı tabanlı bir FA sistem kullanılarak alüminyum, demir ve ahşap malzemelerden FA sinyallerinden oluşan veritabanı elde edilmiştir. Her bir malzeme grubundan toplam 240 örnek (120 sağlam örnek ve 120 kusurlu örnek) ve toplam 720 örnek, GKA uygulandıktan sonra zaman ve zaman-frekans düzlemi özelliklerini çıkarmak için kullanılmıştır. Daha sonra k-en yakın komşu sınıflandırıcısı veri tabanındaki kusurlu ve sağlam malzemelerin tespiti için çıkarılan 14 özellik kullanılarak eğitilmiş ve test edilmiştir. Materyaller özelinde ve materyaller arası sınıflandırma yapılmış ve doğruluk oranları sırasıyla %100 ve %97.77 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotoakustik, Görgül kip ayrışımı, Destek vektör makinesi, K-en yakın komşu, Karar ağacı, Kusur tespiti.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: zekeryabalci@yyu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Defect Detection with EMD-Based Photoacoustic Signal Processing on Different Solid Materials

ABSTRACT: In this study, we propose a photoacoustic (PA) signal processing framework for material defect detection using empirical mode decomposition (EMD) and machine learning algorithms. The extracted time and time-frequency domain features enables to detect defects successfully with the help of the advanced processing methods. A database of the PA signals has been obtained from aluminum, iron and wood materials using a laser, microphone and data acquisition board-based PA apparatus. Within each material group, a total of 240 samples (120 intact samples and 120 defective samples), and a total of 720 samples are used to extract time and time-frequency domain features after applying the EMD. k-nearest neighbor classifier is then trained and tested using the extracted 14 features for detection of the defective and intact materials in the database. Inter-material and cross-material evaluations are performed, and the accuracy rates were 100% and 97.77% respectively.

Keywords: Photoacoustic, Empirical mode decomposition, Support vector machine, K-nearest neighbor, Decision tree, Non-destructive testing.

1. GİRİŞ

Son yıllarda giderek ilgi çeken Fotoakustik (FA) veya Optoakustik (OA), gelişmekte olan teknoloji tabanlı görüntüleme ve tahribatsız muayene yöntemidir (Chen ve Tian, 2021). Fotoakustik etkiye dayanan bu teknik Alexander Graham Bell tarafından 1880 yılında keşfedilmiştir (Bell, 1880). FA sistemin temel bileşenleri, ışık kaynağı, hedef nesne ve akustik algılayıcıdır. Lazer kaynağı, genellikle kısa darbeler halinde yollanan lazer ışığı üretir. Bu ışık, hedef nesne tarafından absorbe edildiğinde, termal enerjiye dönüşür ve enerji emiliminden ortaya çıkan termal genleşme ile ses dalgalarının oluşumuna yol açar. Akustik algılayıcı, bu ses dalgalarını algılayarak ilgili bilgileri toplar ve bu bilgiler daha sonra analiz için işlenir (Beard, 2002; Sun ve ark., 2014; Xu ve Wang, 2006).

FA biyomedikal alanında, 266nm lazer ve mikrofon ile insan nefesinden temel bileşen analizi ile astım teşhisi (V.R. ve ark., 2022), 1535 nm lazer ve odaklı ultrasonik transdüserle FA sinyaldeki lineerlik özelliğinden yararlanarak glikoz ölçümü (Yang ve ark., 2022), geniş dalga boyundaki lazerle FA sinyalin spektral özellikleri ve makine öğrenmesiyle moleküler meme kanseri tanıma (Li ve ark., 2023) ve FA veriden dalgacık dönüşümü elde edilen özellikler ve Resnet-18 ağı kullanılarak prostat kanseri teşhisi (Wu ve ark., 2022), kandaki oksijen, kandaki glukoz, lipit ve tümör takibi ile insan sağlığı görüntüleme (Jin ve ark., 2022), farklı diş örneklerinden alınan FA sinyale dayalı yeniden oluşturulan görüntüden yoğunluk analizi ile diş çürüğü tespiti (Tasmara ve ark., 2023) ve bir çok çalışmada yer bulmuştur (Nakazawa ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2023). FA yöntem metan (Strahl ve ark., 2023), ozon (Keeratirawee ve Hauser, 2021) ve SO₂F₂ (Zhang ve ark., 2022) gazı ve bir çok çevresel gaz izleme ve endüstriyel uygulamada giderek artan bir araştırma yöntemi olmuştur (Keeratirawee ve ark., 2022; Li ve ark., 2022; Liao ve ark., 2022).

Son yıllarda FA yöntem tahribatsız muayenede (NDT) (Arslan ve Toplan, 2023; Kot ve ark., 2021), malzeme kusur tespiti ve analizinde popülaritesi giderek artan bir yöntem olmuştur (Chen ve Tian, 2021). Araştırmacılar (Jeon ve ark., 2016; Setiawan ve ark., 2018; Zakrzewski ve ark., 2010), metallerdeki yüzey kusurlarını FA yöntem ile görüntülemek ve çatlak tespiti için çalışmalar yapmışlardır. Zakrzewski ve ark. (2010) lazer kaynaklı FA görüntülemeye ek olarak piezoelektrik transdüserle metal plakaya farklı frekanslarda yükleme yaparak, doğrusal olmayan çatlak görüntüleme üzerine çalışmışlardır. Doğrusal olmayan sistem etkileri sonucu oluşan karışık

frekanstaki akustik sinyal, bir ivmeölçer tarafından algılanmıştır ve çatlakların doğrusal ve doğrusal olmayan fotoakustik görüntülenmesine katkı sağlayan çeşitli fiziksel mekanizmalar incelenmiştir. Setiawan ve ark. (2018), lazer ve mikrofondan oluşan deneysel sistemleri ile elde edilen FA sinyale yazılım tabanlı Fourier dönüşümü uygulamışlardır. Sinyal genliğini ölçme yoluyla mikro çatlakları tespit etmeye çalışmışlardır. Sistemin, yüzeyinde mikro çatlakları olan bir nesnenin fotoakustik görüntüsünü üretebilecek yetenekte olduğunu belirtmişlerdir. Jeon ve ark. (2016) ise metal plakadan elde edilen FA sinyaller kullanılarak oluşturulan görüntü üzerinde kenar belirleme ve ikilik resimde uzunluk ölçümü ile görüntü işleme tabanlı metal plakada çatlak tespiti yapmışlardır. Shiraishi ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada kaynak kusurları FA yöntem ile araştırmışlardır. Wang ve ark. (2019) kompozit malzemeler için FA yöntem ile tahribatsız muayene yöntemi önermişlerdir. Piko saniye darbeleri lazer, ultrasonik algılayıcı, veri işleme ve hesaplama alt sistemlerinden oluşan FA görüntüleme sisteminin CFRP kompozitlerin hasar tespiti için son derece yüksek çözünürlüklü yeni bir temaslı olmayan yaklaşım sağlayabildiğini rapor etmişlerdir.

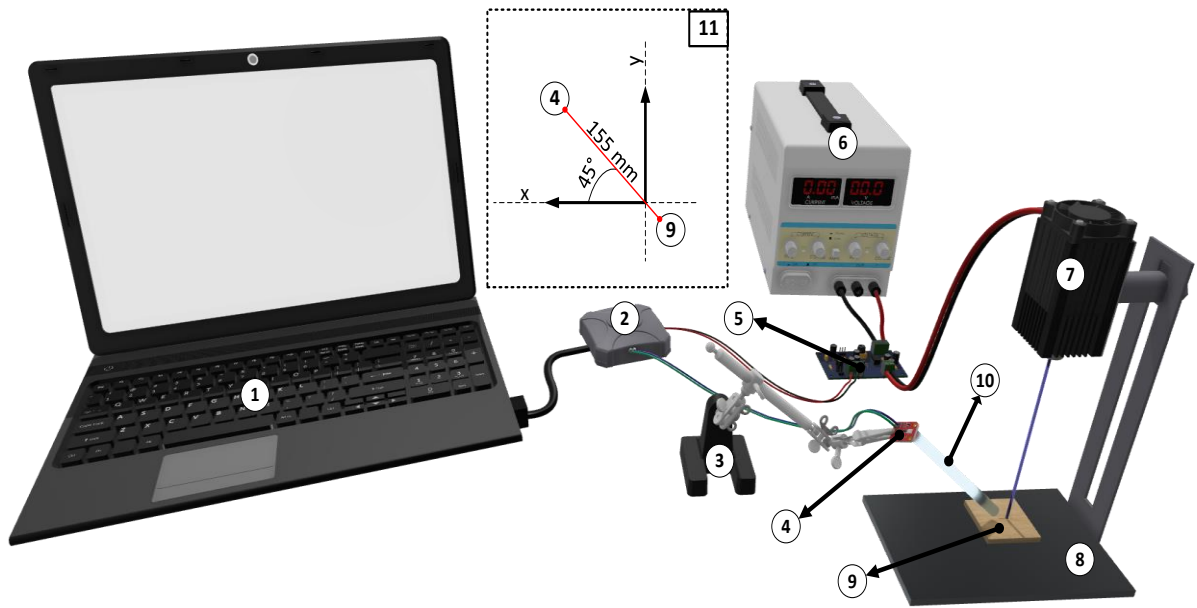
Sun ve ark. (2014), Vangi ve ark. (2021), Yan ve ark. (2012) FA ile tren raylarındaki yüzey kusurlarının tespiti ve görüntülenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Sun ve ark. (2014) ultrasonik algılayıcı, 532nm ve 160mJ gücündeki lazer den oluşan sistem ile tren raylarından elde ettikleri FA sinyalleri kullanarak gerçek zamanlı FA görüntüleme sistemi önermişlerdir. FA sinyal kullanılarak yeniden oluşturulan görüntüye göre, ray kusurunun görünümü, uzanma eğilimi ve derinliği gibi hasar bilgileri etkili bir şekilde tanımlanabileceğini rapor etmişlerdir. Vangi ve ark. (2021) 20W 445nm lazer ve dar bant piezoelektrik kontak probu ile oluşturdukları çalışma düzenekleri ile FA sinyal parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Lazer darbe sayısının, lazer darbe süresinin ve darbeler arası sürenin FA sinyal kalitesi üzerinde etkisinin olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada kusurlu bölgenin belli uzağında da sinyal karakteristiğinin korunduğu rapor edilmiştir. Yan ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada 850 nm lazer ve piezo transdüser ile tren rayındaki kusurların görüntülenmesi üzerine çalışmışlardır. Ayrıca modülasyon frekansının, FA görüntü rekonstrüksiyonu kalitesi üzerinde etkisinin olduğunu rapor etmişlerdir.

Bu çalışmaya özgü 450 nm dalga boyuna sahip lazer ve mikro-elektromekanik mikrofon, veri toplama kartı ile sinyal işleme algoritması tasarlanmıştır. Alüminyum, demir ve tahta malzemeleri üzerinde tasarlanan düzenek denenerak elde edilen FA sinyalleri gelişmiş sinyal işleme teknikleri ile incelenerek, oluşan sağlam ve kusurlu sinyallerindeki ayırt edici özellikler belirlenmeye çalışılmıştır. GKA yöntemi uygulanması ile elde edilen Özgül Kip Fonksiyonu (ÖKF) kullanılarak, zaman ve zaman-frekans düzlemindeki özelliklerin çıkarılması ve bu özelliklerle eğitilen sınıflandırıcılarla tahribatsız kusur tespiti gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Yukarıda verilen literatürde FA ile kusur tespiti çalışmalarında genel olarak bir malzeme özelinde ve görüntüleme üzerine çalışmaların yoğunlaştığı görülmüştür. Bu çalışmadaki amaç GKA ile FA sinyaldeki taban kaymasının elimine edilmesi ve FA sinyal işleme ile farklı malzemeler için ortak bir kusur tespiti çerçevesinin oluşturulmasıdır. Çalışmada ilk önce üç malzemedan elde edilen ham FA sinyallere GKA uygulanmıştır. Daha sonra birinci ÖKF'ler üzerinden zaman ve zaman-frekans düzleminde 14 adet özellik çıkarılmıştır. Son olarak çıkarılan özellikler ile k-NN sınıflandırıcısı eğitilerek önerilen yöntemin başarımı incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

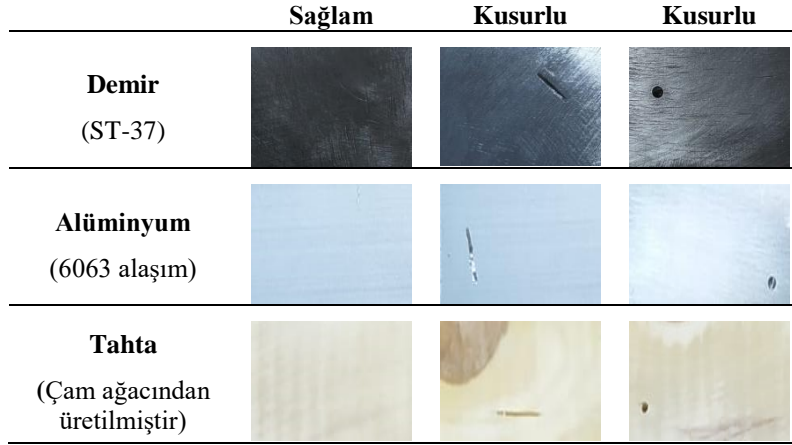
2.1 Çalışma Düzenegi

Bu çalışmada kullanılan çalışma düzeneginin 3B tasarımı şekil 1’de verilmiştir. Çalışma düzenegi 15W gücünde 450nm dalga boyunda ayarlanabilir odağa sahip lazer modülü, mikrofon (SparkFun Analog MEMS Mikrofon Breakout - ICS-40180), osiloskop (Analog Discovery 2: 100MS/s USB Oscilloscope, Logic Analyzer and Variable Power Supply), Stylogiannis ve ark. (2018)’deki şarj deşarj topolojisi temel alınarak KiCad ortamında tasarlanmış lazer sürücü ve lazer sabitleme tablasından oluşmaktadır. Şekil 1’de verilen çalışma düzeneginde (10) numarası ile belirtilen bileşen (125x7.67mm içi boş silindir) ile akustik sinyalin kaynağı ile mikrofonun ses girişi arasındaki mesafe artırılmıştır. Bu sayede anahtarlardan kaynaklanan parazit ile akustik sinyal arasında faz farkı oluşturularak, gürültünün ve malzemeden yansıyan ışımaların FA sinyali üzerindeki etkisi azaltılmaya çalışılmıştır.



Şekil 1. Çalışma düzenegi (1- Bilgisayar, 2- Osiloskop, 3- Kısaç, 4- Mikrofon, 5- Lazer sürücü, 6- Güç kaynağı, 7- Lazer, 8- Lazer sabitleme tablası, 9-Örnek materyal, 10- 125x7.67mm içi boş silindir, 11- Malzeme ve mikrofon arası açı ve uzaklık)

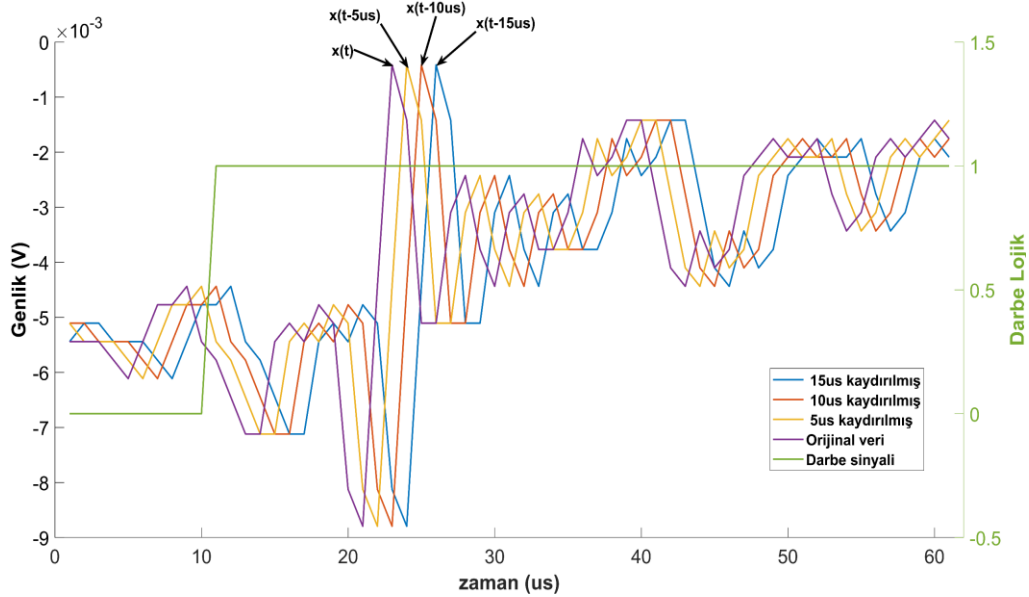
Bu çalışmada alüminyum, demir ve tahta malzemeleri denek olarak kullanılmıştır. Üç malzeme içinde kusurlu ve sağlam örnekler oluşturulmuştur. Malzeme kusurları kesik ve delik olarak malzemelerde yapay olarak üretilmiştir. Kesik kusuru için 22mmx0.8mm dairesel testere, delik kusuru için 2.30mm matkap ucu kullanılarak çeşitli derinliklerde kusurlar oluşturulmuştur. Kullanılan örnek malzemelerin yüzeyi çevreleyen kenarları 50mm olacak şekilde kare biçiminde ebatlanmıştır. Tüm malzemelerin kusurlu ve sağlam görsellerini içeren görseller şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Malzeme örnekleri

2.2 Veri Toplama ve Veri Artırımı

Şekil 2’de görselleri verilen üç farklı malzemeden sağlam ve kusurlu olmak üzere, her bir malzeme türünden 60 adet örnek olacak şekilde toplamda 180 adet örnek alınmıştır. Veriler kusurların bulunduğu bölgeden ve kusurdan en fazla 2mm uzaklıkta olacak şekilde alınmıştır. Bu örnekler 5 μ s, 10 μ s ve 15 μ s kaydırılarak orijinal örneklerden faz farkı oluşturulmuştur ve örnek gurupları kullanılarak veri artırımı yapılmıştır.



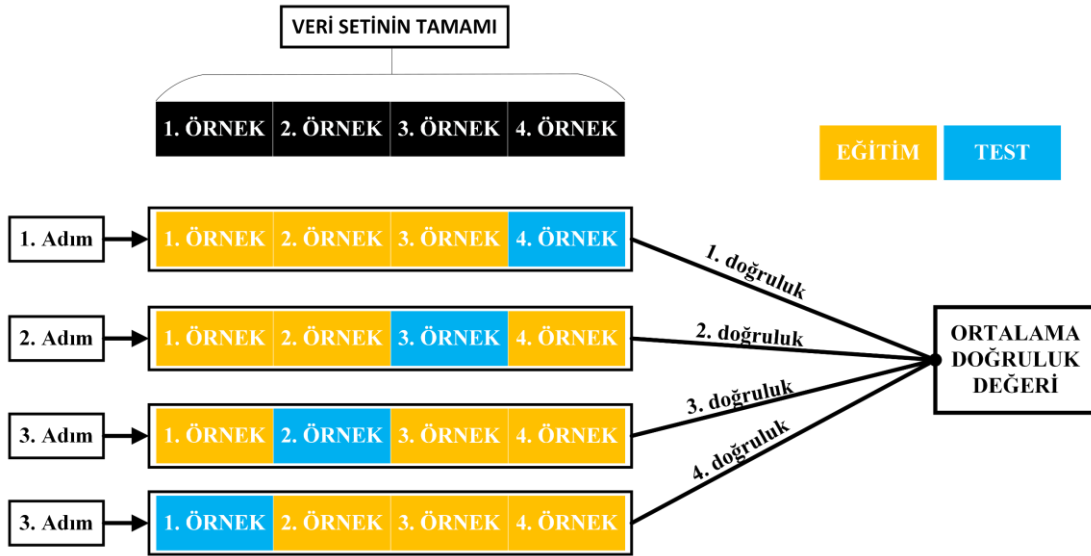
Şekil 3. Orijinal veri ve veri artırımı ile elde edilen veri grafikleri

Malzemelerden alınan örnek bir FA sinyal için veri artırımı sonucu elde edilen sinyallerin grafiği Şekil 3’te verilmiştir. Burada darbe sinyali ile lazer sistemi tetiklenmektedir ve oluşan FA sinyal mikrofona aracılığıyla alınmıştır. Şekil 3’te verilen orijinal sinyalin (mor) 5 μ s, 10 μ s ve 15 μ s kaydırılması sonucu veri gurubu 4 kat artırılmıştır. Orijinal ve veri artırımı sonucu elde edilen örnekleri içeren malzeme gurubu örnek sayıları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Malzeme guruplarına ait örnek sayıları

	Sağlam	Kusurlu	Toplam
Demir	120	120	240
Alüminyum	120	120	240
Tahta	120	120	240
Toplam	360	360	720

Veri artırımı ile az sayıdaki orijinal veri artırılmasına ek olarak eğitim aşamasında başarıyı arttırmak için bu çalışmada birini dışarıda bırak çapraz doğrulama (BDBÇD) yöntemi uygulanmıştır. Veri setinin az veya kısıtlı olduğu durumlarda etkili olan bu yöntem, bir çok çalışmada sınıflandırıcıların performans değerlendirmesinde uygulanmıştır (Wong, 2015).



Şekil 4. Dört örnekten oluşan bir modelin birini dışarıda bırak çapraz doğrulama blok şeması

Bu çapraz doğrulama yöntemi her bir iterasyonda veri setinin bir örneğini test için ayırır ve kalan örneklerle modeli eğitir, ardından ayırdığı örneği kullanarak modelin performansını değerlendirir. Dört örnekten oluşan bir modele BDBÇD yönteminin uygulanışını temsil eden şematik gösterim şekil 4'te verilmiştir. Bu çalışmada veri artırımı ve BDBÇD yönteminin uygulanması ile malzemeler başarılı bir şekilde sınıflandırılmıştır.

2.3 Görgül Kip Ayırışımı ve HD

Görgül Kip Ayırışımı, doğrusal ve durağan olamayan sinyalleri fiziksel olarak anlamlı bileşenlere ayırmak için, Huang ve arkadaşları (Huang ve ark. 1998) tarafından önerilen veri uyarlamalı sinyal işleme yöntemidir. Bu yöntem, bir sinyali farklı salınım ve çözünürlükteki Özgül Kip Fonksiyonu (ÖKF) $\varphi_k(t)$ ve kalıntı veya artık $r(t)$ adı verilen bileşenlere ayırır. Tasarım gereği, ÖKF lokal maksimum ve minimum noktalarının sıfır geçiş noktasına eşit veya farkının en fazla bir olması, lokal maksimum ve minimum zarflarının ortalamasının sıfır olması gerekmektedir. GKA'nın ana bölümü ÖKF'lerin elde edildiği eleme sürecidir. Eleme sürecinin adımları, örnek bir $x(t)$ sinyali için aşağıdaki gibidir.

- $x(t)$ sinyalinin yerel maksimum ($M(i)$, $i = 1, 2, 3, \dots$) ve minimum ($m(j)$, $j = 1, 2, 3, \dots$) noktaları bulunur.
- İnterpolasyon ile yerel maksimum ve minimum noktalarını kesen zarf bulunur. $e_{min}(t)$, $e_{max}(t)$.

- iii. Zarfların ortalaması hesaplanır $m(t) = (e_{min}(t) + e_{max}(t))/2$
- iv. $m(t)$ ÖKF şartlarını sağlıyorsa $\varphi_k(t) = m(t)$ olarak sakla. Sağlamıyorsa $m(t)$, $x(t)$ 'den çıkarılır, $x(t) = x(t) - m(t)$.
- v. Durdurma kriteri (Mert ve Akan, 2018) $x(t)$ için sağlamıyorsa $r(t) = m(t)$ olarak atanır.

GKA'da eleme süreci $r(t)$ artık fonksiyonu elde edilene kadar özyinelemeli olarak uygulanır. Orijinal sinyal ÖKF'lerin ve artık sinyalin toplamına eşittir ve eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$x(t) = r(t) + \sum_k \varphi_k(t) \quad (1)$$

Bu şekilde elde edilen ÖKF'lere, Hilbert dönüşümü (HD)(Huang ve ark. 1998) uygulanması sonucu ÖKF'lerden anlık frekans ve genlik bilgileri elde edilir. Bu sayede ÖKF'ler üzerinde zaman-frekans düzleminde analiz gerçekleştirilir.

Bir $x(t)$ sinyaline HD uygulanırsa eşitlik (2)'deki gibi analitik bir sinyal elde edilir (Huang ve ark. 1998);

$$y(t) = \alpha(t) + j\beta(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (2)$$

burada $\alpha(t)$ ve $\beta(t)$ HD çiftini, $A(t)$, $y(t)$ 'nin genliğini ve $\phi(t)$ ise fazını ifade eder ve (3) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$\phi(t) = \arctan(\beta(t) / \alpha(t)) \quad (3)$$

Anlık frekans $\omega(t)$ ise, anlık faz $\phi(t)$ 'nin türevi alınarak elde edilir.

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

Böylece sinyalin barındırdığı $\omega(t)$ ve $A(t)$ bileşenleri ile zaman-frekans düzleminde analiz gerçekleştirilir. GKA ve anlık frekans kombinasyonu bu yöntemi, zaman-frekans analizi için güçlü bir sinyal işleme çerçevesi kılmaktadır.

2.3 Özellik Çıkarımı

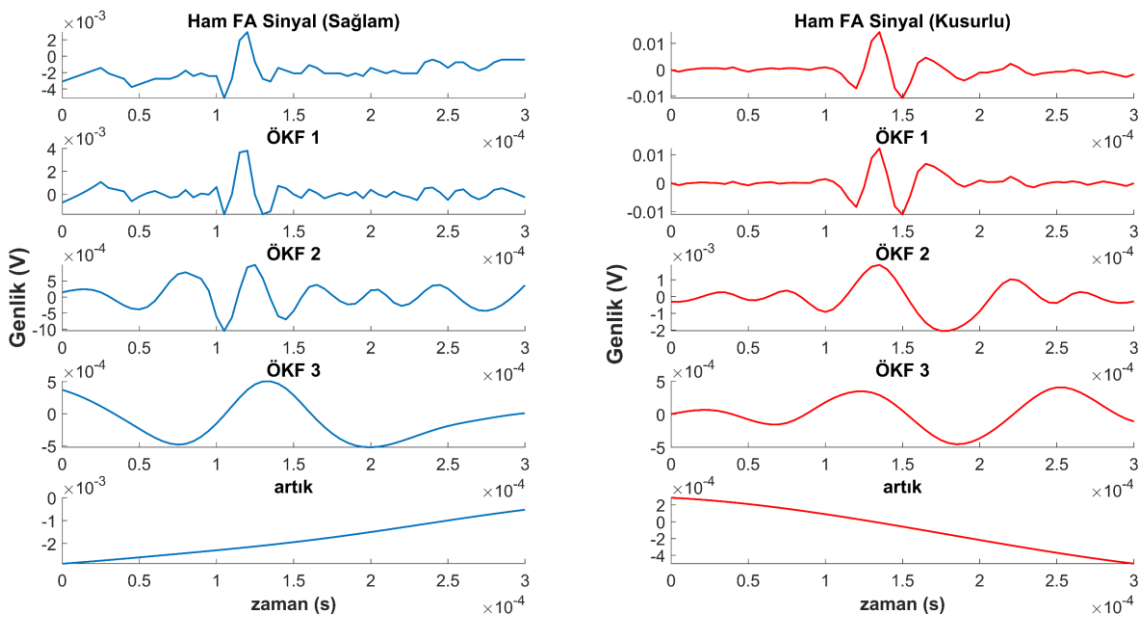
Alüminyum, demir ve tahta örneklerine ait tüm veri setine GKA uygulanarak ÖKF'ler her bir örnek için elde edilmiştir. Zaman ve zaman-frekans düzleminde çıkarılan özellikler çizelge 2'de verilmiştir. Zaman düzlemindeki özellikler ÖKF 1'den, zaman-frekans düzlemindeki özellikler ise ÖKF 1'in HD'si alındıktan sonra elde edilen anlık genlik $A(t)$ ve anlık frekans $\omega(t)$ kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 2. Öznitelikler

Zaman Düzlemi	Zaman-frekans Düzlemi
ÖKF 1'den çıkarılan özellikler	$A(t)$ ve $\omega(t)$ 'den çıkarılan özellikler
Tepe genlik	Tepe genlik
Tepeden tepeye genlik	Eğim
Form faktör (a)	Standart sapma
Hjorth parametreleri (etkinlik (b), hareketlilik (c), karmaşıklık (d))	Ortalama genlik
Entropi (e)	Aktif sinyal süresi
	Tepe frekans
	Ortalama frekans
$\sigma^2(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2$	
$x' = f'(n) = \frac{dx}{dn}$	
$x'' = f''(n) = \frac{d^2x}{dn^2}$	
$a = \sqrt{\frac{\sigma^2\left(\frac{x''}{x'}\right)}{\sigma^2\left(\frac{x'}{x}\right)}} \quad b = \sigma^2(x) \quad c = \sqrt{\frac{\sigma^2(x')}{\sigma^2(x)}} \quad d = \frac{\text{hareketlilik}(x')}{\text{hareketlilik}(x)} \quad e = -\sum x_i \log x_i$	

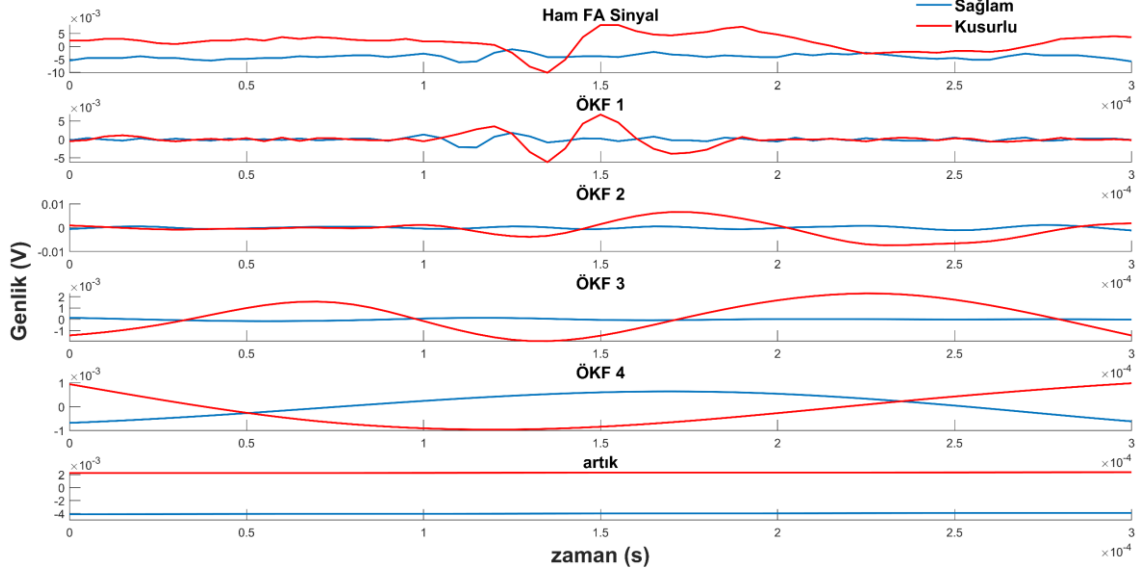
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Öznitelikler alüminyum, demir ve tahta malzemelerinden alınan FA verilerine GKA ve HD uygulanarak elde edilen ÖKF'ler üzerinden elde edilmiştir. Bir örneğe ait ham FA sinyali ve ÖKF bileşenleri şekil 5'te verilmiştir. Şekildeki grafikler malzemeye ait FA sinyalin farklı frekanslardaki salınımlarını ifade etmektedir. Şekillerde ilk ÖKF'lerin yüksek frekans bileşenlerini barındırdığı, son ÖKF'ye doğru gidildikçe bileşenlerin periyotunda artma eğilimi olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Ham sinyal ve GKA bileşenleri

Şekil 6’da bir örnekten alınan ham FA sinyal ve GKA uygulanması sonucu elde edilen ÖKF grafikleri verilmiştir. Şekilde ham veriye ait grafikte sağlam ve kusurlu sinyaller arasında taban kayması olduğu görülmektedir. GKA uygulandıktan sonra elde edilen ÖKF sinyallerinde, ham sinyalde bulunan taban kayması önemli ölçüde kusurlu ve sağlam sinyaller arasında azaldığı şeklindeki grafiklerde gözükmemektedir. Özellikle ilk ÖKF’lerin ham sinyalde bulunan taban kaymasına, azaltıcı yönde etkisi daha baskın olduğu görülmüştür.



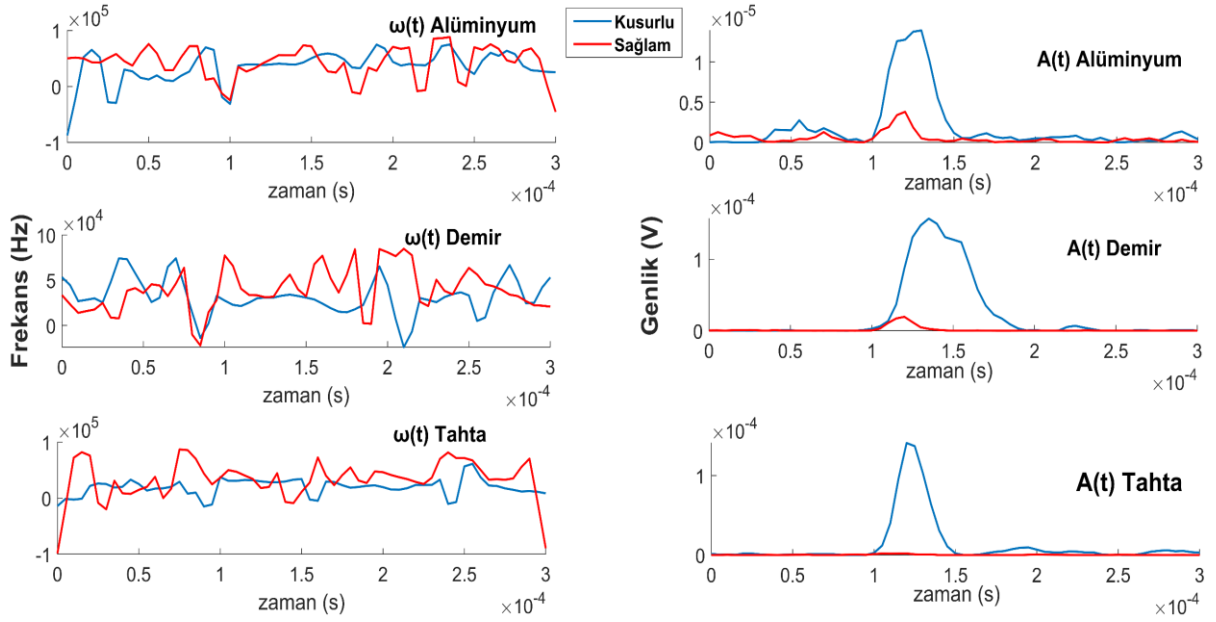
Şekil 6. GKA’nın FA sinyal üzerindeki taban kayması etkisi

Her bir malzeme ve sinyal için farklı sayıda ÖKF üretilmektedir. Ham sinyal birçok bileşen barındırabileceğinden bu sinyali temsil eden ÖKF veya orijinal sinyale en yakın ÖKF’nin belirlenmesi amacıyla ham sinyal ile ÖKF’ler arasındaki korelasyon katsayıları (Fisher, 1915) hesaplanmıştır. Korelasyon katsayıları çizelge 3’te verilmiştir. Ham sinyal ile birinci ÖKF arasındaki korelasyon katsayısı tüm örneklerde bire yakın çıkmıştır. Bu sonuçlar birinci ÖKF’nin sinyal analizi için daha uygun olduğunu göstermiştir ve özellik çıkarımı için ÖKF 1 kullanılmıştır.

Çizelge 3. Ham sinyal ve ÖKF’ler arası korelasyon katsayısı değerleri

	Korelasyon Katsayısı		
	ÖKF 1	ÖKF 2	ÖKF 3
Alüminyum	0.5949	0.5667	-
Demir	0.9617	0.1718	0.0815
Tahta	0.9274	0.5079	0.2841

GKA ile elde edilen birinci ÖKF’lere HD uygulanarak ÖKF’lere ait anlık frekans $\omega(t)$ ve anlık genlik $A(t)$ izgeleri elde edilmiştir. Alüminyum, demir ve tahta örneklerine ait anlık genlik ve anlık frekans grafikleri şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Materyallerin $A(t)$ ve $\omega(t)$ grafikleri

Şekil 7’de verilen grafikler ışığında malzeme sınıflarının anlık genlik izgesinin, anlık frekans izgesine göre sağlam ve kusurlu örnekler üzerinde ayırt ediciliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Malzemelere ait özelliklerin çıkarılmasının ardından, sınıflandırıcı eğitimlerine geçilmiştir. Bu çalışmada, diğer bazı sınıflandırma algoritmalarına kıyasla daha az karmaşık bir yapıya sahip olduğu, bu nedenle daha hızlı eğitildiği ve daha az kaynak tüketiminden dolayı (Kumar ve Sowmya, 2021), k-En Yakın Komşu (k-NN) (Zhang ve ark., 2018) sınıflandırıcı olarak belirlenmiştir ve çıkarılan bu 14 adet özellikle eğitilmiştir. k-NN için 1 komşuluk parametre olarak girilmiştir. Sınıflandırıcı eğitimi için çapraz doğrulama yöntemi olarak birini dışarıda bırak çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır.

Çizelge 4. Sınıflandırıcı için kusurlu örnekleri tespit etme doğruluk değerleri

	Materyal	Kusurlu Materyal Tespit Etme Doğruluk Değeri (%)
Sınıf içi	Alüminyum	100
	Demir	100
	Tahta	100
Tüm materyallerin dahil olduğu durum	(Alüminyum + Demir + Tahta)	97.77

k-NN için eğitim sonucu doğruluk değerleri çizelge 4’te verilmiştir. Tablodaki değerler ışığında her bir malzeme gurubu için sınıf içi eğitim sonucu sınıflandırma doğruluk değerlerinin, tüm malzemelerin dahil olduğu sınıf içi eğitim sonucu doğruluk değerlerinden daha yüksek başarımda bir doğrulukla sınıflandırma yaptığı görülmüştür. Sınıf içi doğruluk değeri üç farklı materyalin de kendi özelinde kusurlu örneklerinin tespitini, tüm materyallerin dahil olduğu durum ise üç farklı materyalin de dahil olduğu, materyal türü farketmeksizin kusurlu örneğin tespit edildiği durumu ifade etmektedir.

Bu çalışmada uyguladığımız yöntem ile hem ham sinyal üzerindeki gürültü giderilerek faydalı sinyalin salınımı elde edilmiştir, hem de sinyalden özellik çıkarımı yapılmıştır. Literatürde bir malzeme özelinde yapılan çalışmaların aksine, uygulanan yöntem ile şekil 2’de verilen farklı kusurların bulunduğu ve farklı malzemeler için ortak bir sınıflandırma çerçevesi geliştirilmiştir (Jeon ve ark., 2016; Setiawan ve ark., 2018; Sun ve ark., 2014; Vangi ve ark., 2021; Yan ve ark., 2012;

Zakrzewski ve ark., 2010). Çizelge 4’te verilen sınıflandırıcı doğruluk değerleri uyguladığımız yöntemin başarımını desteklemektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, FA yöntemi kullanarak malzemelerde kusur tespiti için bir yöntem önerilmiştir. Kusurlu malzeme sinyal değişimlerini zaman ve zaman-frekans düzleminde analiz etmek için düşük maliyetli FA sistem geliştirilmiştir. Malzemelerden elde edilen FA sinyallere GKA analizi uygulanarak, sinyalin bilgilendirici salınımlarını ifade eden ÖKF’ler elde edilmiştir. Böylece, makine öğrenimi algoritmaları yardımıyla malzeme sınıf içi ve malzemeler arası, FA tabanlı kusur tespiti başarıyla gerçekleştirilmiştir. 14 adet özellik, sinyallerin en bilgilendirici ÖKF’lerinden çıkarılmış ve k-en yakın komşu algoritması bu özelliklerle eğitilmiştir. Önerilen yöntem alüminyum, demir ve tahta malzemeleri üzerinde test edilmiş, tek bir malzeme için sınıf içi ve tüm malzemelerin dahil olduğu sınıf içi sınıflandırma doğruluk değerleri sırasıyla %100 ve %97.77 doğruluk değeriyle gerçekleşmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi tarafından “210D003” kodlu proje ile desteklenmiştir.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Ahmet MERT çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, Zekeriya BALCI veri toplama, veri analizi, tasarım süreçlerinin geliştirilmesi ve yorumlama süreçlerinde çalışmaya katkı sağlamışlardır.

8. KAYNAKLAR

- Arslan, M., Toplan, N., AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi. *J. Mater. Mechat. A* 4, 333–354, 2023.
- Beard P.C., Photoacoustic imaging of blood vessel equivalent phantoms. *Biomedical Optoacoustics III* 4618, 54–62, 2002.
- Bell A.G., On the production and reproduction of sound by light. *American Journal of Science* 3(20), 305–324, 1880.
- Chen S.L., Tian C., Recent developments in photoacoustic imaging and sensing for nondestructive testing and evaluation. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 4, 6, 2021.
- Fisher R.A., Frequency Distribution of the Values of the Correlation Coefficient in Samples from an Indefinitely Large Population. *Biometrika* 10, 507–521, 1915.

- Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., Liu H.H., The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London Series A* 454, 903–998, 1998.
- Jeon S., Kim J., Yun J.P., Kim C., Non-destructive photoacoustic imaging of metal surface defects. *J. Opt.* 18, 114001, 2016.
- Jin Y., Yin Y., Li C., Liu H., Shi J., Non-Invasive Monitoring of Human Health by Photoacoustic Spectroscopy. *Sensors* 22, 1155, 2022.
- Keeratirawee K., Furter J.S., Hauser P.C., Low-cost electronic circuitry for photoacoustic gas sensing. *HardwareX* 11, e00280, 2022.
- Keeratirawee K., Hauser P.C., Photoacoustic detection of ozone with a red laser diode. *Talanta* 223, 121890, 2021.
- Kot P., Muradov M., Gkantou M., Kamaris G.S., Hashim K., Yeboah D., Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring. *Applied Sciences* 11, 2750, 2021.
- Kumar V.P., Sowmya I., A review on pros and cons of machine learning algorithms. *Journal of Engineering Sciences* 12, 272–276, 2021.
- Li C., Qi H., Zhao X., Guo M., An R., Chen K., Multi-pass absorption enhanced photoacoustic spectrometer based on combined light sources for dissolved gas analysis in oil. *Optics and Lasers in Engineering* 159, 107221, 2022.
- Li J., Chen Y., Ye W., Zhang M., Zhu J., Zhi W., Cheng Q., Molecular breast cancer subtype identification using photoacoustic spectral analysis and machine learning at the biomacromolecular level. *Photoacoustics* 30, 100483, 2023.
- Liao Z., Zhang J., Gan Z., Wang Y., Zhao J., Chen T., Zhang G., Thermal runaway warning of lithium-ion batteries based on photoacoustic spectroscopy gas sensing technology. *International Journal of Energy Research* 46, 21694–21702, 2022.
- Mert A., Akan A., Emotion recognition from EEG signals by using multivariate empirical mode decomposition. *Pattern. Anal. Applic.* 21, 81–89, 2013.
- Nakazawa H., Tokumine J., Lefor A.K., Yamamoto K., Karasawa H., Shimazu K., Yorozu T., Use of a photoacoustic needle improves needle tip recognition in a video recording of simulated ultrasound-guided vascular access: A pilot study. *J. Vasc. Access* 0, 11297298221122137, 2022.
- Setiawan A., Suparta G.B., Mitrayana M., Nugroho W., Surface Crack Detection with Low-cost Photoacoustic Imaging System. *IJTech* 9, 159, 2018.
- Shiraishi D., Kato R., Endoh H., Hoshimiya T., Destructive Inspection of Weld Defect and its Nondestructive Evaluation by Photoacoustic Microscopy. *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 07HB13, 2010.
- Strahl T., Steinebrunner J., Weber C., Wöllenstein J., Schmitt K., Photoacoustic methane detection inside a MEMS microphone. *Photoacoustics* 29, 100428, 2023.
- Stylogiannis A., Prade L., Buehler A., Aguirre J., Sergiadis G., Ntziachristos V., Continuous wave laser diodes enable fast optoacoustic imaging. *Photoacoustics* 9, 31–38, 2018.

- Sun M., Lin X., Wu Z., Liu Y., Shen Y., Feng N., Non-destructive photoacoustic detecting method for high-speed rail surface defects. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 12-15 Mayıs, 2014, Montevideo.
- Tasmara F.A., Widyaningrum R., Setiawan A., Mitrayana M., Photoacoustic imaging of hidden dental caries using visible–light diode laser. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 24, e13935, 2023.
- Vangi D., Banelli L., Gulino M.S., Interference-based amplification for CW laser-induced photoacoustic signals. *Ultrasonics* 110, 106270, 2021.
- V.R. N., Mohapatra A.K., Nayak R., V.K. U., Kartha V.B., Chidangil S., UV laser-based photoacoustic breath analysis for the diagnosis of respiratory diseases: Detection of Asthma. *Sensors and Actuators B: Chemical* 370, 132367, 2022.
- Wang S., Tran T., Xiang L., Liu Y., 2019. Non-Destructive Evaluation of Composite and Metallic Structures using Photo-Acoustic Method. *AIAA Scitech 2019 Forum*. 7-11 Ocak, 2019, San Diego.
- Wong T.T., Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation. *Pattern Recognition* 48, 2839–2846, 2015.
- Wu S., Liu Y., Chen Y., Xu C., Chen P., Zhang M., Ye W., Wu D., Huang S., Cheng Q., Quick identification of prostate cancer by wavelet transform-based photoacoustic power spectrum analysis. *Photoacoustics* 25, 100327, 2022.
- Xu M., Wang L.V., Photoacoustic imaging in biomedicine. *Review of Scientific Instruments* 77, 041101, 2006.
- Yan L., Gao C., Zhao B., Ma X., Zhuang N., Duan H., Non-destructive Imaging of Standard Cracks of Railway by Photoacoustic Piezoelectric Technology. *Int. J. Thermophys.* 33, 2001–2005, 2012.
- Yang L., Chen C., Zhang Z., Wei X., Glucose Determination by a Single 1535 nm Pulsed Photoacoustic Technique: A Multiple Calibration for the External Factors. *J Healthc Eng* 2022, 9593843, 2022.
- Zakrzewski J., Chigarev N., Tournat V., Gusev V., Combined Photoacoustic–Acoustic Technique for Crack Imaging. *Int. J. Thermophys.* 31, 199–207, 2010.
- Zhang S., Li X., Zong M., Zhu X., Wang R., Efficient kNN Classification With Different Numbers of Nearest Neighbors. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 29, 1774–1785, 2018.
- Zhang Y., Wang M., Yu P., Liu Z., Optical gas sensing of sub-ppm SO₂F₂ and SOF₂ from SF₆ decomposition based on photoacoustic spectroscopy. *IET Optoelectronics* 16, 277–282, 2022.
- Zhang Z., Jin H., Zhang W., Lu W., Zheng Z., Sharma A., Pramanik M., Zheng Y., Adaptive enhancement of acoustic resolution photoacoustic microscopy imaging via deep CNN prior. *Photoacoustics* 30, 100484, 2023.