Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Ti6Al4V malzemesi için yüzey pürüzlülüğü verilerinden rezistans tahmini: Elektromekanik empedans spektroskopisine dayalı deneysel bir çalışma

Resistance estimation from surface roughness data for Ti6Al4V material: An experimental study based on electromechanical impedance spectroscopy

Gökhan Haydarlar[1,*], Mehmet Alper Sofuoğlu[2], Mesut Tekkalmaz[3]

[1] *Kafkas Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 36100, Kars, Türkiye*
[2,3] *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, Türkiye*

Öz

Elektromekanik Empedans Spektroskopi yöntemi, yapısal sağlık izleme uygulamaları arasında yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntemde, piezoelektrik sensörler yapısal durumu izlenmek istenen yapı üzerine entegre edilmektedir. Yapının empedans/admitans karakteristikleri empedans analizör kullanılarak belirlenmektedir. Yapıda hasar, kusur, aşınma vb. olduğunda empedans/admitans rezonans piklerinde değişimler meydana gelmektedir. Bu çalışmada Ti6Al4V malzemesi için tornalama prosesinde farklı işleme parametrelerinin sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğü verilerini kullanarak rezistans değerlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Taguchi L16 deney tasarımı kullanılarak deney planı oluşturulmuştur. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri tamamlandıktan sonra numunelere piezoelektrik sensörler yapıştırılmıştır ve rezistans ölçümleri 20 Hz-15 MHz frekans aralığında deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve rezistans arasındaki ilişki araştırılmıştır ve ampirik denklem önerilmiştir. Önerilen denklemin belirlilik katsayısı (R^2) 0.781 ve anlamlılık yüzdesi 0.0006 ($p<0.001$) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar önerilen denklemin rezistans değerlerini tahmin etmede kullanılabileceğini göstermiştir. Doğrulama deneyi gerçekleştirilerek önerilen denklemin doğruluğu test edilmiştir. Önerilen denklemin % 83.862 doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yüzey pürüzlülüğü, Rezistans, Piezoelektrik sensör

Abstract

Electromechanical Impedance Spectroscopy is one of the widely used techniques in structural health monitoring applications. In this method, piezoelectric sensors are integrated onto the structure whose structural condition is to be monitored. The impedance/admittance characteristics of the structure are determined using an impedance analyzer. When damage, defects, wear, etc. occur in the structure, changes occur in the impedance/admittance resonance peaks. This study aims to predict the resistance values of Ti6Al4V material using surface roughness data obtained from different machining parameters during the turning process. An experimental plan was created using Taguchi L16 experimental design. After completing surface roughness measurements, piezoelectric sensors were attached to the samples, and resistance measurements were experimentally performed in the frequency range of 20 Hz-15 MHz. The relationship between surface roughness and resistance was investigated, and an empirical equation was proposed. The coefficient of determination (R^2) of the proposed equation was calculated as 0.781, and the significance percentage as 0.0006 ($p<0.001$). These results indicate that the proposed equation can be used to predict resistance values. A validation experiment was conducted to test the accuracy of the proposed equation. It was determined that the proposed equation has an accuracy of 83.862%.

Keywords: Surface roughness, Resistance, Piezoelectric sensor

1 Giriş

Parçaların nihai şekil, ölçü toleransları ve yüzey kalitesi gereksinimlerini karşılamak amacıyla talaşlı imalat süreçleri yaygın biçimde kullanılmaktadır [1]. Bu süreçlerde yüzeyin oluşumu, kesici takım ile iş parçası arasındaki bağıl hareketlerin etkileşimiyle gerçekleşmektedir. Talaşlı imalat süreçleri içerisinde tornalama, endüstride geniş uygulama alanına sahip temel işlemlerden biridir [2]. Tornalama işlemi, silindirik formlu iş parçalarının işlenmesine olanak sağlamaktadır [3].

Yapısal sağlık izleme (YSİ), yapıların bütünlüğünün değerlendirilmesinde çok disiplinli yaklaşımları bir araya getiren etkili bir yöntemdir [4]. Elektromekanik Empedans Spektroskopi (EMES) yöntemi, YSİ uygulamaları arasında yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntemde, piezoelektrik sensörler yapısal durumu izlenmek istenen yapı üzerine entegre edilmekte ve yapıdaki değişimlere karşılık incelenen yapının empedans tepkisi incelenmektedir. Yapıda meydana gelen gerilme, çatlak, kusur, aşınma, yüzey pürüzlülüğü veya sertlik değişimleri ölçülen empedans değerlerinde değişimlere yol açmaktadır [5]. Empedans akıma karşı gösterilen direnç olarak tanımlanmaktadır. Gerçek ve sanal bileşenler içermektedir. Yapıların empedans karakteristikleri genellikle farklı frekans

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gokhan.haydarlar@kafkas.edu.tr (G. Haydarlar)
Geliş / Received: 06.02.2026 Kabul / Accepted: 26.02.2026 Yayımlanma / Published: 12.03.2026
doi: 10.28948/ngumuh.1883539

aralıklarında empedans analizör kullanılarak ölçülmektedir. Ölçüm sonucu elde edilen veriler herhangi bir dönüşüm yapmaya gerek kalmadan doğrudan yapısal durumu değerlendirmede kullanılabilmektedir [6].

Havacılık alanında sıklıkla tercih edilen Ti6Al4V alaşımı, sahip olduğu mekanik ve termal özellikler nedeniyle talaşlı imalat açısından zor işlenen malzemeler arasında yer almaktadır. İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü değiştirdiği bilinmektedir. Taylan ve Oral [7] Ti6Al4V'nin tornalama prosesini farklı ilerleme hızı, kesme hızı ve soğutma basınçları kullanarak yüzey pürüzlülüğü açısından araştırmışlardır. İlerleme hızı ve soğutma basıncı artışının yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını belirlemişlerdir. Serin vd. [8] farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne ve özgül kesme enerjisine etkisini Ti6Al4V'nin tornalama prosesi için araştırmışlardır. Proses parametrelerine bağlı denklem türetmişlerdir. Kesme derinliği ve ilerleme hızı artışının yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını belirtmişlerdir. Zeyrek ve Er [9] farklı kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliğinin ve kesme sıvısı kullanımının yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve sıcaklık üzerindeki etkisini Ti6Al4V'nin tornalama prosesi için araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu ve kesme sıvısı kullanımının yüzey pürüzlülüğünü azalttığını tespit etmişlerdir. Oral vd. [10] Ti6Al4V'nin frezeleme işleminde farklı kesme hızı ve ilerleme hızlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisini takım titreşimi açısından incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda ilerleme hızı ve takım titreşimi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. Kaymak ve Öztürk [11] Ti6Al4V'nin frezeleme prosesini farklı kesici takımlar ve farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği için yüzey pürüzlülüğü açısından araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızının en etkili parametre olduğunu tespit etmişlerdir ve en düşük yüzey pürüzlülüğü sonucunu veren kesici takımı belirlemişlerdir. Altınsoy ve Üllen [12] yaptıkları çalışmada frezeleme ve delme işlemlerinde kullanılan kesme sıvısının yüzey pürüzlülüğünü olumlu etkilediğini belirtmişlerdir. Adıyaman ve Er [13] Ti6Al4V gibi işlenmesi zor malzemelerin en uygun işleme sıcaklıklarını belirlemek için en düşük yüzey pürüzlülüğü verilerini kullanarak makine öğrenmesi odaklı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda işleme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, iş parçası ve kesici takım malzeme bilgilerinin girilmesiyle işleme sıcaklıklarını tahmin etmişlerdir.

Literatürde EMES yönteminin imalat süreçlerinde uygulanabilirliğinin son yıllarda araştırılmaya başlandığı görülmüştür. Bu kısımda EMES yöntemi kullanarak imalat süreçlerini araştıran çalışmalar kısaca özetlenmiştir. Marchi vd. [14] real empedans sonuçlarını 10–100 kHz frekans aralığında taşlama işleminden önce ve sonra kaydetmişlerdir. Ortalama kareler sapmasının karekökü (RMSD) ve korelasyon katsayısı sapması metriği (CCDM) hasar metriklerini kullanarak EMES yönteminin yüzey durumunun değerlendirilmesinde alternatif yöntem olabileceğini göstermişlerdir. Junior vd. [15] takım aşınmasını tahmin etmek için EMES yöntemini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmaların sonucunda, CCDM hasar metriğinin takım aşınması tespitinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ferreira vd. [5] empedans verilerinin değişimini taşlama prosesi için incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülüğü değerleri ile RMSD arasında güçlü ilişkiler tespit etmişlerdir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerinin empedansta daha büyük değişimlere yol açtığını ve dolayısıyla daha yüksek RMSD değerlerinin elde edildiğini tespit etmişlerdir. Tekkalmaz vd. [16] AISI 1040 çeliğinde aşınma seviyelerini ve konumunu belirlemek için EMES yönteminin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Aşınma miktarının RMSD ile ve aşınma konumunun CCDM ile ilişkili olduğunun tespit etmişlerdir. Çakır vd. [17] Inconel 718 ve Ti6Al4V kullanarak farklı işleme sürelerinde kanal açma prosesi gerçekleştirmişlerdir. Takım aşınmasını geleneksel yöntemlerle ve EMES yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Empedans verileri kullanılarak hesaplanan RMSD ve CCDM değerlerinin aşınma seviyesinin tespitinde kullanılabileceğini belirlemişlerdir.

Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde EMES yönteminin talaşlı imalat süreçlerinde uygulanabilirliği konusunda az sayıda çalışma olduğu belirlenmiştir. İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştıran çalışmalar olmasına karşılık araştırmalarımız sonucunda yüzey pürüzlülüğü verilerini kullanarak empedansın real kısmını tahmin etmeye yönelik çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada Ti6Al4V iş parçasının tornalama prosesinde farklı işleme parametrelerinin sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğü verileri kullanılarak rezistans değerlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Önerilen yöntemin uygulamadaki temel avantajı; yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinden hareketle rezistans değerlerinin hızlı ve hesaplama açısından yalın bir model ile tahmin edilebilecek olmasıdır. Deneysel rezistans ölçümlerinin yapılamadığı durumlarda yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ölçülmesiyle önerilen model yardımıyla rezistans değerleri tahmin edilebilecektir. Yapının durumunda herhangi bir değişim olduğunda rezistans değerleri de değişeceği için rezistans değerlerinin önceden bilinmesi önemlidir. Elde edilen rezistans değerleri yapıların durumunu (hasar, kusur, aşınma, kalıntı gerilme vb.) değerlendirmede kullanılabilecektir.

2 Materyal ve metot

Rezistans değerlerinin yüzey pürüzlülüğü değerleriyle ilişkisinin araştırılması çalışmanın temel hedefidir. Yüzey pürüzlülüğü değişimlerini belirlemek için tornalama işlemi tercih edilmiştir. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V iş parçası olarak seçilmiştir. İş parçasının çapı 100 mm ve boyu 250 mm'dir. Ti6Al4V'nin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V kimyasal bileşimi [18]

C	Fe	N	O_2	Al	V	H_2	Ti
0.10	0.40	0.05	0.20	5.50-6.75	3.50-4.50	0.015	Kalanı

Kesici takım ortoganal ve kesme uzunluğu 10 mm olarak belirlenmiştir. Her kesim için yeni uç kullanılmıştır. Takım tutucu ve kesici ucun genel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

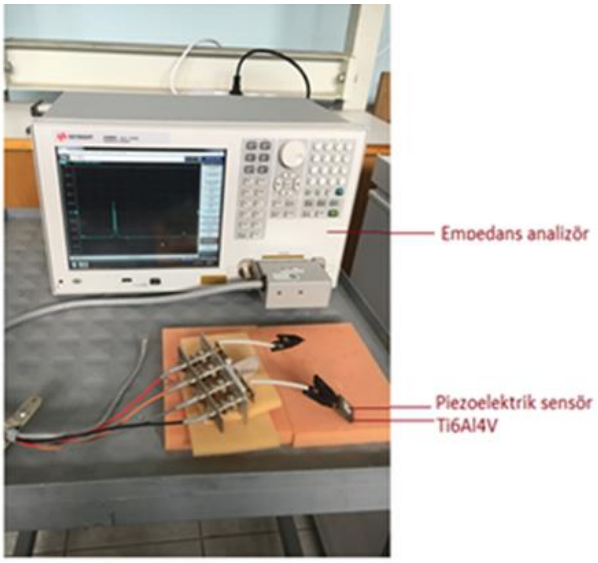
Tablo 2. Takım tutucu ve kesici ucun özellikleri

Takım tutucu kesiti	25 mm × 25 mm
Takım tutucu kodu	TAKIMSAŞ SVJBR 2525 M16
Kesici uç malzemesi ve kaplaması	WC+TiAlN
Kaplama yöntemi	PVD
Kesici uç kodu	GRRENLEAF VBMT 332 A FF G-925
Talaş açısı	0°
Boşluk açısı	7°

Tornalama işlemi yüzey bitirme olarak planlandığı için kesme derinlikleri ve devir başına ilerleme düşük tutulurken, kesme hızı ise yüksek tutulmuştur. Tablo 3'de deney parametreleri düzeyleri ile beraber verilmiştir. Bu seviyelerin belirlenmesinde Greenleaf firmasının kataloglarından [19] yararlanılmıştır.

Taguchi L16 deney tasarımı kullanılarak deney planı oluşturulmuştur (Tablo 4).

Tornalama işlemleri Taksan firmasına ait üniversal torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Tornalama işlemleri tamamlandıktan sonra GOLDSAN 4050T6H40 EDM cihazı kullanılarak tel erozyon tezgahında iş parçası 20x20x5 mm^3 boyutlarına getirilmiştir. Farlı parametrelere göre işlenmiş yüzeylerden 16 dilim elde edilmiştir. Daha sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri MITITUYO SJ 400 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler 72°'lik açılara karşılık gelen kısımlardan ve yüzeyden alınmıştır. Çıktı olarak Ra değerleri kaydedilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri tamamlandıktan sonra numunelerin empedans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numunelere piezoelektrik sensörler kurulum prosedürleri [20] uygulanarak yapıştırılmıştır. PI CERAMIC firmasının PIC255 ürün kodlu 10x10x0.5 mm^3 boyutundaki sensörleri kullanılmıştır. Daha sonra numunelerin empedans ölçümleri KEYSIGHT E4990A empedans analizör cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde empedansın real kısmının sonuçlarına odaklanılmıştır. Frekans aralığı kalınlık modlarını içeren 20 Hz-15 MHz olarak seçilmiştir. Şekil 1'de rezistans ölçümlerinin gerçekleştirildiği deney sistemi verilmiştir. Son olarak rezistans ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki araştırılmıştır. Sinyal Gürültü Oranı (SGO) analizi ve ANOVA gerçekleştirilerek sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 1. Rezistans ölçümleri

Tablo 3. Parametreler ve seviyeleri

Parametreler/düzeyler	1	2	3	4
Kesme derinliği (mm)	0.1	0.2	0.3	0.5
Devir başına ilerleme (mm/devir)	0.083	0.167	0.333	0.5
Kesme hızı (m/dk)	40	60	80	100

Tablo 4. Deney planı

Deney no	Kesme hızı	Devir başına ilerleme	Kesme derinliği
1	1	4	4
2	2	3	4
3	3	2	4
4	4	1	4
5	1	3	3
6	2	4	3
7	3	1	3
8	4	2	3
9	1	2	2
10	2	1	2
11	3	4	2
12	4	3	2
13	1	1	1
14	2	2	1
15	3	3	1
16	4	4	1

3 Bulgular ve tartışma

Tablo 5'de yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) µm cinsinden verilmiştir.

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları

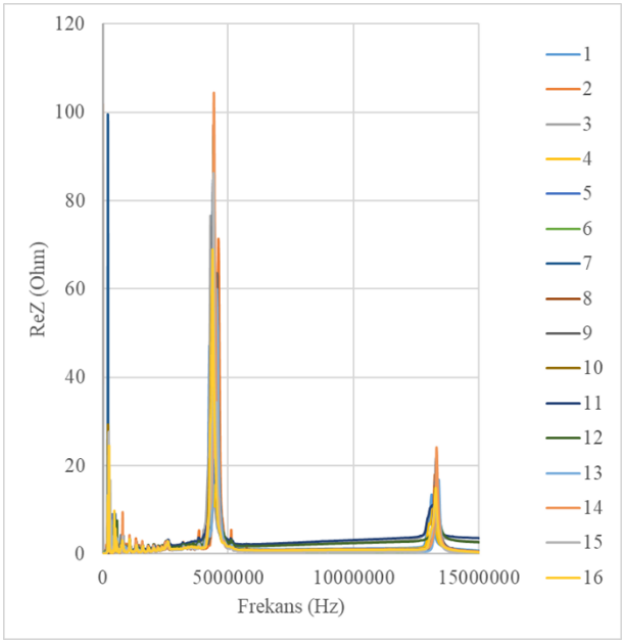
Deney no	Ra (µm)
1	2.416
2	1.187
3	1.320
4	0.384
5	1.306
6	2.960
7	0.472
8	1.295
9	1.435
10	0.356
11	2.344
12	1.221
13	0.424
14	1.325
15	1.245
16	2.590

Tablo 5 incelendiğinde işlem parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının değiştiği görülmektedir. En küçük en iyidir yaklaşımıyla SGO analizleri geçekleştirilmiştir. SGO analizi sonucunda elde edilen grafikler Şekil 2'de verilmiştir.

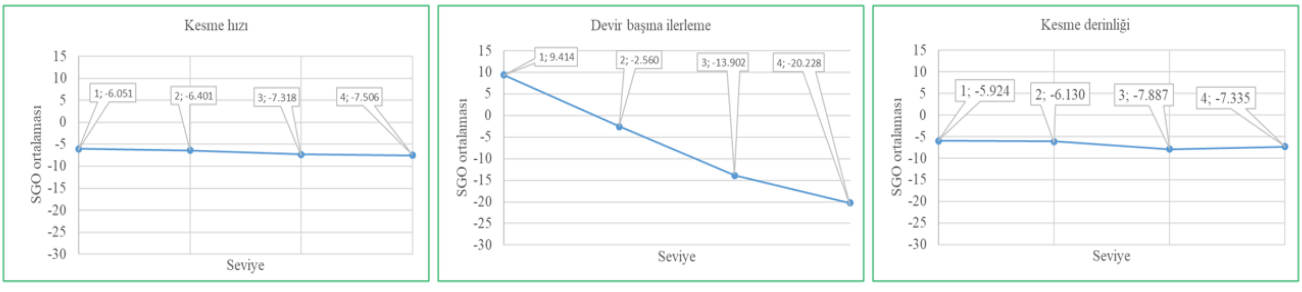
SGO analizi sonucunda delta değerleri; kesme hızı için 1.455, devir başına ilerleme için 29.642 ve kesme derinliği için 1.963 olarak hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde devir başına ilerleme en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık kesme hızı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Devir başına ilerlemenin en düşük olduğu (0.083 mm/dev) durumda en düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edilebileceği ve devir başına ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı Şekil 2'de görülmektedir. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir [7-9].

Rezistans ölçüm sonuçları Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde 4-6 MHz ve 12-14 MHz frekans aralığında rezonans piklerinin oluştuğu görülmektedir. En yüksek rezonans pikleri 4-6 MHz aralığında oluştuğu görülmektedir. EMES yöntemi frekansa duyarlı bir ölçüm tekniği olup, farklı frekans bölgelerinde farklı hassasiyet seviyeleri gösterebilmektedir. Daha büyük daha iyidir yaklaşımıyla iki rezonans pikinin SGO değerlerinin karşılaştırılması doğru frekans aralığının seçilmesinde kriter olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım daha yüksek SGO değerlerinin yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı rezistans değişimlerini daha kararlı ve belirgin olarak yansıtacağı için seçilmiştir. 4-6 MHz frekans aralığındaki 1. rezonans pikinin SGO değeri 37.048 ve 12-14 MHz frekans aralığındaki 2. rezonans pikinin SGO değeri 22.756 olarak hesaplanmıştır. 1. rezonans pikinin SGO değerinin daha yüksek olması sebebiyle 4-6 MHz frekans aralığındaki ölçüm sonuçlarına odaklanılmıştır.

İşlem parametrelerine bağlı olarak frekans ve genlik değerlerinin değiştiği görülmektedir. İşlem parametrelerinin rezistans sonuçlarına etkisini belirlemek için en küçük en iyidir yaklaşımıyla SGO analizleri geçekleştirilmiştir. SGO analizi sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4'de verilmiştir.

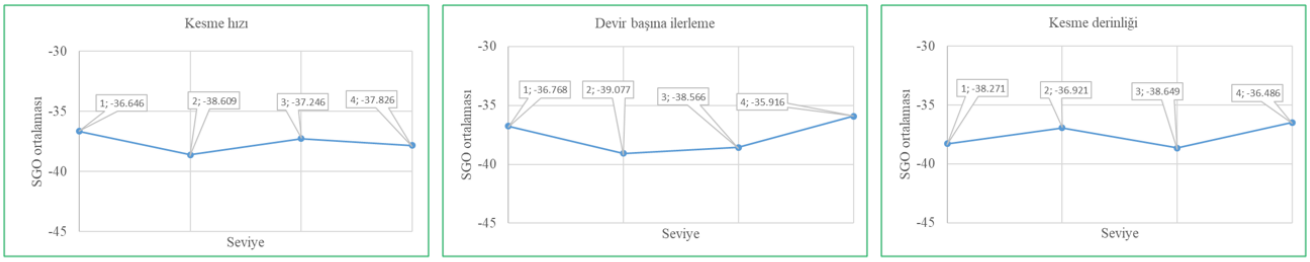


Şekil 3. Rezistans ölçüm sonuçları



a b c

Şekil 2. SGO analiz sonuçları (a) Kesme hızı (b) Devir başına ilerleme (c) Kesme derinliği



a b c

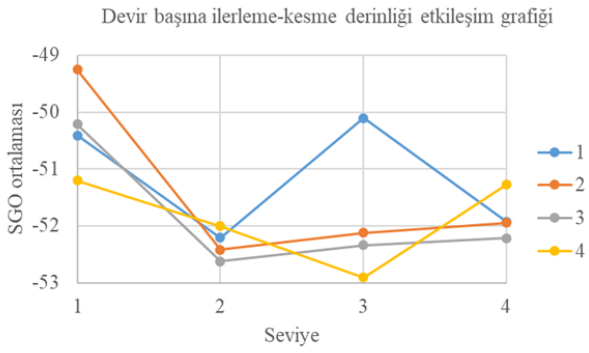
Şekil 4. SGO analiz sonuçları (a) Kesme hızı (b) Devir başına ilerleme (c) Kesme derinliği

SGO analizi sonucunda delta değerleri; kesme hızı için 1.963, devir başına ilerleme için 3.161 ve kesme derinliği için 1.727 olarak hesaplanmıştır. Rezistans değerleri üzerinde devir başına ilerleme en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Kesme hızı ve kesme derinliğinin de önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Kesme hızı ve kesme derinliği açısından işlem parametrelerine duyarlılığın düşük olduğu Şekil 4'de görülmektedir. Devir başına ilerlemenin; 0.083 mm/dev'den 0.167 mm/dev'e çıkması durumunda SGO değerlerinin azaldığı (rezistans değerlerinin arttığı) ve 0.167 mm/dev'den 0.5 mm/dev'e çıkması durumunda SGO değerlerinin arttığı (real empedans değerlerinin azaldığı) tespit edilmiştir. İlerleme hızı arttıkça iş parçası üzerinde genellikle daha düşük çekme kalıntı gerilmelerinin oluşması beklenmektedir [21,22]. Çekme gerilmelerinin azalması incelenen yapının katılığının da azalmasına sebep olacaktır. İncelenen yapıların boyutlarının aynı olması dikkate alındığında katılık ve mikrosertliğin doğrusal olarak değişmesi beklenmektedir. Çekme gerilmelerinin azalması durumunda ise rezistans değerleri genellikle azalacaktır [23]. Bu kapsamda devir başına ilerleme arttıkça SGO değerlerinin genellikle artması beklenen bir durumdur. Mikrosertlik ölçümlerinin gerçekleştirilmesinin sonuçların değerlendirilmesi açısından yararlı olacağı düşünülmüştür. Numunelerin mikrosertlik ölçümleri 100 gf yük altında ve 10 saniye bekleme süresi şartlarında FUTURE TECH FM 700 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 20x20 mm^2'lik yüzeyin ortasından alınmıştır. Tablo 6'da elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 6. Mikrosertlik ölçüm sonuçları

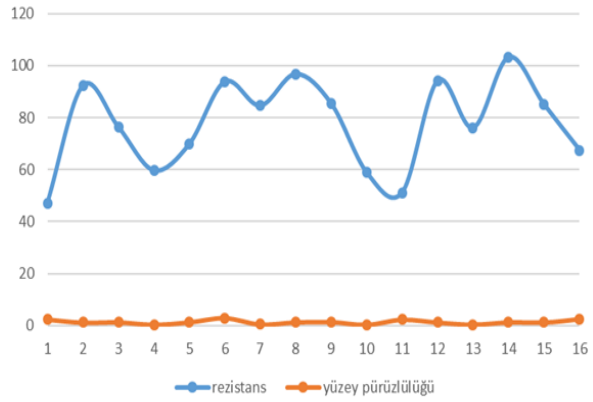
Deney no	Mikrosertlik (HV)
1	366.3
2	408.2
3	395.9
4	394.8
5	414.2
6	442.0
7	320.0
8	403.6
9	417.9
10	407.8
11	398.4
12	427.6
13	331.5
14	290.3
15	324.1
16	363.2

İşlem parametrelerinin mikrosertlik sonuçlarına etkisini belirlemek için en küçük en iyidir yaklaşımıyla SGO analizleri geçekleştirilmiştir. SGO analizi sonucunda delta değerleri; kesme hızı için 0.900, devir başına ilerleme için 0.686 ve kesme derinliği için 2.045 olarak hesaplanmıştır. Mikrosertlik üzerinde kesme derinliğinin en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde devir başına ilerleme-kesme derinliği etkileşim grafiğinin çizilmesinin sonuçların yorumlanmasını kolaylaştıracaktır. Şekil 5'de SGO analizi sonucu elde edilen etkileşim grafiği verilmiştir. Gösterge numaraları kesme derinliğini, seviyeler ise devir başına ilerlemeyi temsil etmektedir. Şekil 5 incelendiğinde devir başına ilerleme arttıkça mikrosertlik değerlerinin genellikle azaldığı görülmektedir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda da tüm seviyelere aynı eğilimin gözlemlenmediği tespit edilmiştir [21-22]. Bu durumun işlem parametrelerinin yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak mikrosertlik değişimine bağlı olarak elde edilen SGO analiz sonuçlarının rezistans için elde edilen SGO analiz sonuçlarını desteklediği tespit edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde devir başına ilerleme 1. seviyeden 2. seviyeye çıkması durumunda SGO değerlerinin azalmasının sebebinin ise; piezoelektrik sensörü numuneye eklerken kullanılan yapıştırıcı katmanın kalınlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bu durumun tüm seviyelerde aynı eğilimin gözlemlenmemesine sebep olduğu düşünülmektedir. Rezistans ölçümlerinin deneysel yapıldığı çalışmalarda tüm seviyelerde lineer değişim olmaması beklenen bir durumdur [23-26]. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir [5,21-23].



Şekil 5. SGO etkileşim grafiği

Daha sonra yüzey pürüzlülüğü değerleri ile rezistans değerleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ile rezistans değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerini kullanarak rezistans değerlerini tahmin etmek için ampirik denklem önerilmiştir (Denklem (1)). 3 no'lu deneyin sonuçları doğrulama amaçlı kullanılmıştır. Bu veriler denklem türetilirken değerlendirmeye alınmamıştır. Önerilen denklem için hesaplanan istatistiksel verilerin özeti ve ANOVA sonuçları Tablo 7-8'de verilmiştir. Önerilen denklemin tahmin kabiliyetini değerlendirmek amacıyla artık analizi gerçekleştirilmiştir. 15 deney için artık hata değerleri hesaplanarak önerilen modele ait istatistiksel performans göstergeleri kök ortalama kare hatası (RMSE), normalize edilmiş kök ortalama kare hatası (NRMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) elde edilmiştir.



Şekil 6. Yüzey pürüzlülüğü-rezistans değişim grafiği

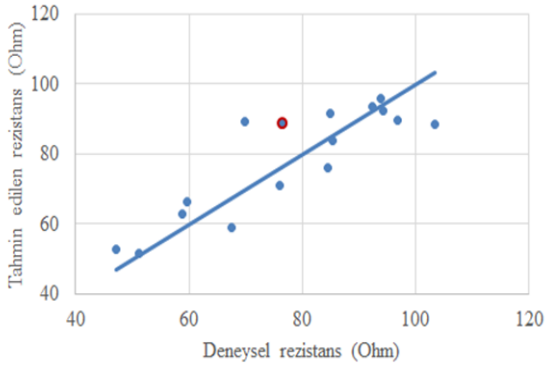
$$y = 37.488Ra^3 - 182.32Ra^2 + 244.57Ra - 2.5934 \quad (1)$$

Tablo 7. İstatistiksel verilerin özeti

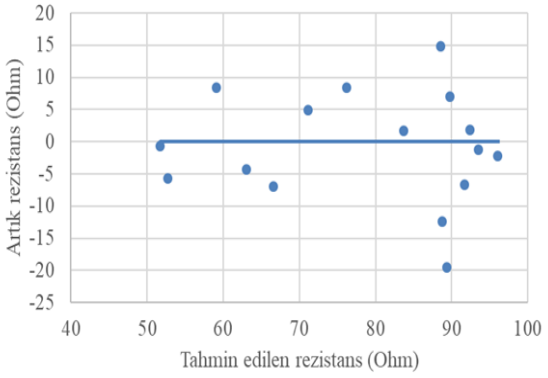
R	R^2	Düzeltilmiş R^2	RMSE	NRMSE	MAPE
0.884	0.781	0.764	8.043	10.35	8.385

Model performansını görsel olarak değerlendirmek amacıyla tahmin edilen ve deneysel direnç değerlerinin karşılaştırıldığı bir grafik oluşturulmuştur (Şekil 7). 3 no'lu deney farklı renk ile Şekil 7'de belirtilmiştir. Veri noktalarının büyük çoğunluğunun 45° referans doğrusu etrafında toplanması, deneysel sonuçlar ile model tahminleri arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Deney 3'e ait veriler yalnızca bağımsız bir doğrulama noktası olarak değerlendirilmiştir. Bu deneyin grafikte ayrı olarak gösterilmesi, önerilen modelin eğitim veri seti dışındaki veriler için de tahmin yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Artık grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Artık değerleri deneysel rezistans değerlerinden tahmin edilen rezistans değerlerinin çıkartılması sonucu elde edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, artık hataların sıfır referans doğrusu etrafında rastgele dağıldığı görülmektedir. Hesaplamalar sonucunda artık değerlerin yaklaşık −20 Ohm ile +15 Ohm aralığında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 7. Deneysel-tahmin edilen rezistans grafiği



Şekil 8. Artık grafiği

Artıkların hem pozitif hem de negatif bölgede yer alması, modelin sistematik olarak aşırı tahmin veya eksik tahmin eğilimi göstermediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca artık değerlerin tahmin edilen rezistans büyüklüğüne bağlı olarak düzenli bir artış ya da azalış eğilimi sergilememesi, hataların belirli bir rezistans seviyesinde yoğunlaşmadığını göstermektedir. Bazı deney noktalarında artık hataların diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak bu sapmaların belirli bir rezistans seviyesinde yoğunlaşmadığı, hataların genel olarak rastgele dağıldığı anlaşılmaktadır.

Bu durum, önerilen ampirik modelin genel eğilimi başarılı şekilde temsil ettiğini, gözlenen farkların ise büyük ölçüde deneysel ölçümlerdeki doğal değişkenlikten kaynaklandığını göstermektedir. Sonuç olarak artık analizi, modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu ve istatistiksel açıdan kabul edilebilir bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Tablo 8. ANOVA sonuçları

	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamının ortalaması	Test istatistiği	Anlamlılık yüzdesi
Model	3461.105	3	1153.702	13.076	0.0006<0.001
Hata	970.528	11	88.230		
Toplam	4431.633	14			

Anlamlılık yüzdesinin 0.001'den küçük olması önerilen denklemdeki değişkenler arasında yüksek seviyede anlamlı fark olduğunu göstermiştir. R^2 (belirlilik katsayısı) değerinin 0.7'den büyük olması, RMSE sonucunun deneysel ölçüm sonuçlarının ortalama değerine bölünmesiyle elde edilen NRMSE değerinin yüzde 10 seviyesine yakın olması ve MAPE değerinin yüzde 10'dan düşük olması önerilen denklemin rezistans değerlerini tahmin etmede başarılı sonuçlar vereceğini ortaya koymuştur. Model doğruluğunun daha güvenilir biçimde değerlendirilmesi amacıyla determinasyon katsayısına (R^2) ek olarak düzeltilmiş belirlilik katsayısı (düzeltilmiş R^2) da hesaplanmıştır. Elde edilen R^2 değeri modelin direnç değerlerindeki değişimin önemli bir kısmını açıkladığını gösterirken, düzeltilmiş R^2 değerinin 0.764 olarak bulunması model karmaşıklığının etkisini de dikkate alan daha gerçekçi bir performans değerlendirmesi sunmaktadır. Bu sonuç, önerilen denklemin genel eğilimi doğru şekilde temsil edebildiğini göstermektedir. Ayrıca model performansı RMSE ve MAPE metrikleri ile desteklenmiştir. Bu çoklu değerlendirme yaklaşımı, önerilen denklemin hem istatistiksel olarak anlamlı hem de mühendislik uygulamaları açısından kabul edilebilir doğrulukta tahminler ürettiğini göstermektedir. 3 no'lu deney sonuçları önerilen denklemin doğruluğunu test etmek için kullanılmıştır. 3 no'lu deneyin yüzey pürüzlülüğü değeri olan 1.32 Denklem (1)'de yazılarak rezistans değerleri hesaplanmıştır. Tablo 9'da elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 9. Sonuçların karşılaştırılması

Deneysel	Önerilen denklem	% fark
76.449	88.786	16.138

Önerilen denklemin %16.138'lik bir farkla sonuçları doğru tahmin ettiği tespit edilmiştir. Geliştirilen ampirik model, belirli bir frekans aralığında elde edilen EMES verileri esas alınarak ve yalnızca Ti6Al4V malzemesi için oluşturulmuştur. Malzemelerin Elastisite modülü, yoğunluk ve poisson oranındaki farklılıklar empedans spektrumunun frekans konumunu ve tepe davranışını doğrudan etkileyeceğinden, modelin farklı malzemelere doğrudan genellenmesi sınırlıdır. Seçilen frekans bandı dışındaki bölgelerde empedans cevabının duyarlılığı değişebileceği için modelin geçerliliği kullanılan frekans aralığı ile ilişkilidir. Bununla birlikte, önerilen ampirik model yüzey pürüzlülüğü değerleri girdi olarak kullanılarak rezistansın tahmin edilmesine dayanmaktadır. Model, farklı malzemeler ve frekans aralıkları için ilgili deneysel verilerle yeniden düzenlenerek uygulanabilir. Bu nedenle çalışma, evrensel bir model sunmaktan ziyade, farklı üretim koşulları ve farklı malzemeler için uyarlanabilir bir modelleme yaklaşımı ortaya koymaktadır.

4 Sonuçlar

EMES yöntemi yapılardaki değişimi tespit etmek için kullanılan bir yöntemdir. Real empedans değerleri (rezistans) genellikle verilerin yorumlanmasında tercih edilmektedir. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü değerlerini kullanarak rezistans değerlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede deneysel EMES ölçümü yapmadan rezistans değerlerinin tahmin edilmesi mümkün olacaktır.

Yapılan çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülüğü ve rezistans sonuçları üzerinde en etkili parametrenin devir başına ilerleme olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızı ve kesme derinliğinin; yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi oldukça sınırlı iken rezistans sonuçları üzerinde ikinci derece yüksek etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve rezistans arasındaki ilişki araştırılmıştır ve ampirik denklem önerilmiştir. Önerilen denklemin belirlilik katsayısı (R^2) 0.781 ve anlamlılık yüzdesi 0.0006 ($p<0.001$) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar önerilen denklemin rezistans değerlerini tahmin etmede kullanılabileceğini göstermiştir. Doğrulama deneyi gerçekleştirilerek önerilen denklemin doğruluğu test edilmiştir. Önerilen denklemin % 83.862 doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir. Önerilen denklem sayesinde rezistans değerlerinin tahmin edilmesi için alternatif bir yöntem sunulmuştur.

İleriki çalışmalarda farklı frekans aralıklarında deneylerin yapılarak yüzey pürüzlülüğü ile rezistans arasındaki ilişkinin araştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından "221M419" no'lu proje ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Komisyonu tarafından "202015A226" no'lu proje olarak desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

[1] E. Ezugwu, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(12-13), 1353-1367,2005. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.

[2] A. Šalak, K. Vasilko, M. Selecká, and H. Danninger, New short time face turning method for testing the machinability of PM steels. Journal of Materials Processing Technology, 176(1-3), 62-69, 2006. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.014.

[3] B. E. Clancy and Y. C. Shin, A comprehensive chatter prediction model for face turning operation including tool wear effect. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(9), 1035-1044, 2002. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00036-6.

[4] W. Staszewski, C. Boller and G. R. Tomlinson, Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing, John Wiley & Sons, 2004.

[5] F. I. Ferreira, P. R. de Aguiar, R. B. da Silva, M. J. Jackson, R. de Souza Ruzzi, F. G. Baptista and E. C. Bianchi, Electromechanical impedance (EMI)

measurements to infer features from the grinding process The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106(5-6), 2035-2048,2020. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04733-8.

[6] V. Giurgiutiu, Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors, Elsevier, 2007.

[7] F. Taylan ve N. Oral, Tİ-6AL-4V ELI malzemesinin tornalama işleminde yüksek basınçlı jet soğutmanın yüzey pürüzlülüğüne etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 10(1), 31-46, 2018.

[8] G.Serin, M.Kahya, M. Özbayoğlu ve H.Ö. Ünver, Ti6Al4V malzemesinin tornalama işleminde özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi ve yapay sinir ağları temelli tahmin modeli geliştirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24 (2), 2019. https://doi.org/10.17482/uumfd.301128.

[9] A. O. Er ve K. Zeyrek, Ti-6Al-4V Alaşımının tornalanmasında minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi ile kesme sıvısı uygulamanın işlenebilirliğe etkilerinin araştırılması. International Journal of Engineering Research and Development, 13(2), 653-665, 2021. https://doi.org/10.29137/umagd.907630.

[10] O. Oral, O. Çolak ve M. Bayhan, Ti6Al4V malzemesinin frezelenmesinde takım titreşiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(1), 381-390, 2020. https://doi.org/10.29130/dubited.533362.

[11] B. Kaymak ve F. Öztürk, Investigating the influence of machining parameters and tool coatings on surface qualtiy of titanium parts in aerospace industry. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(1), 27-35, 2025. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1525630.

[12] Ş. Altınsoy ve N. B. Üllen, Ti6Al4V alaşımının delme ve frezeleme proseslerinde işleme parametrelerinin talaş formları, yüzey Pürüzlülüğü ve kesici takımların aşınması üzerine etkileri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 37(1), 233-249, 2025. https://doi.org/10.35234/fumbd.1546406.

[13] E. Adıyaman ve A. O. Er, İşlenmesi zor malzemelerin tornalanması için en uygun işleme sıcaklıklarının makine öğrenmesi İle belirlenmesi. İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 5(1), 46-64, 2024. https://doi.org/10.52795/mateca.1463257.

[14] M. Marchi, F. G. Baptista, P. R. de Aguiar and E. C. Bianchi, Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements. Measurement Science and Technology, 26(4), 045601, 2015. https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/4/045601.

[15] P. O. Junior, P. Aguiar, R. Ruzzi, S. Conte, M. Viera, F. Alexandre and F. Baptista, Tool condition monitoring in grinding operation using piezoelectric impedance and wavelet transform, The 6th International Electronic Conference on Sensors and Applications, p.10, MDPI, 2019.

[16] M. Tekkalmaz, Ü. Er, F. H. Cakir and F. Bozkurt, A new approach to monitor wear tracks propagation on-site with electromechanical impedance technique. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 33(2), 342-351, 2022. https://doi.org/10.1177/1045389X211014951.

[17] F. H. Çakir, Ü. Er and M. Tekkalmaz. Monitoring the wear of turning tools with the electromechanical impedance technique. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 34(11), 1341-1352, 2023. https://doi.org/10.1177/1045389X221135027.

[18] Akyay Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, Titanyum Gr5 (Ti-6Al-4V), https://www.akyaymetal.com.tr/titanyum-gr5-ti-6al-4v/, Accessed 5 November 2025.

[19] Greenleaf Corporation, Catalogs, https://www.greenleafcorporation.com/assets/catalogs/2023/GreenleafCatalogMetric.pdf, Accessed 16 December 2024.

[20] V. Giurgiutiu, Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors, Second edition, Elsevier, 2014.

[21] R. Pawade, S. S. Joshi and P. Brahmankar, Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(1), 15-28, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.004.

[22] D. Ulutan and T. Ozel, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51(3), 250-280, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003.

[23] D. Ai, H. Luo, C. Wang and H. Zhu, Monitoring of the load-induced RC beam structural tension/compression stress and damage using piezoelectric transducers. Engineering Structures, 154, 38-51, 2018. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.046.

[24] D. Ai, H. Luo and H. Zhu, Numerical and experimental investigation of flexural performance on pre-stressed concrete structures using electromechanical admittance. Mechanical Systems and Signal Processing, 128, 244-265, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.03.046.

[25] V. G. M. Annamdas, Y. Yang and C. K. Soh, Influence of loading on structures actuated with piezoceramic transducers. Smart Structures, Devices, and Systems III, Adelaide, Australia, 2007.

[26] Y. Y. Lim and C. K. Soh, Damage detction and characterization using EMI technique under varying axial load. Smart Structures and Systems, 11(4), 349-364, 2013. https://doi.org/10.12989/sss.2013.11.4.349.