
Araştırma Makalesi / Research Article

Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF)Yöntemiyle Kaplanmış Çelik ve Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Özelliklerinin Taguchi Metoduyla Optimizasyonu

Hatice VAROL ÖZKAVAK^{1*}, Şerife ŞAHİN ÖZCAN²

¹*Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Isparta*

²*Süleyman Demirel Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta*
(ORCID: 0000-0002-0314-0119) (ORCID: 0000-0003-3563-3628)

Öz

Bu çalışmada deney tasarımı yöntemlerinden biri olan Taguchi metodunun en küçük en iyi kombinasyonu kullanılarak, HVOF (Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt) yöntemiyle oluşturulan kaplamaların çelik ve alüminyum malzemeler üzerinde aşınma davranışına etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla altlık malzeme olarak Çelik alaşımları (AISI 1040, AISI 4340, AISI 304) ve Alüminyum alaşımları (AA2024, AA7075, AA6082); kaplama malzemesi olarak da WC/Co ve WC/CoCr seçilmiştir. Altlık malzeme seçiminde ekonomiklik; kaplama malzemesinde ise yüksek aşınma direncine sahip olma kriter olarak belirlenmiştir. HVOF yöntemiyle yapılan kaplamaların aşınma dayanımlarını belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılarak optimum uygun altlık malzeme ve kaplama malzemesi değerleri belirlenmiş ve varyans analizi kullanılarak doğrulama deneyleri yapılmıştır. Böylelikle çalışma sonucunda en iyi aşınma davranışı için S/N oranı -10,45, alt malzeme Al 2024, kaplama malzemesi WC-Co ve yük 30 N olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: HVOF metodu 1, Taguchi metodu 2, Aşınma 3.

Optimization of Wear Properties of Steel and Aluminum Alloys Coated with High Speed Oxy-Fuel (HVOF) Method by Taguchi Method

Abstract

In this study, it is aimed to determine the effect of HVOF (High Speed Oxy-Fuel) coatings on wear behavior on steel and aluminum materials by using the best combination of Taguchi method which is one of the experimental design methods. Steel alloys (AISI 1040, AISI 4340, AISI 304) and Aluminum alloys (AA2024, AA7075, AA6082) are used as base materials for this purpose; WC / Co and WC / CoCr were chosen as coating material. Economy in litter material selection; and high abrasion resistance was determined as the criterion. In order to determine the abrasion resistance of the coatings made by HVOF method, optimum suitable litter material and coating material values were determined by using Taguchi method and validation experiments were performed using variance analysis. As a result of this study, S / N ratio was found as -10,45, substrate Al 2024, coating material WC-Co and load 30 N for the best wear behavior.

Keywords: HVOF method 1, Taguchi method 2, Wear 3.

1. Giriş

Al alaşımları düşük korozyon ve aşınma direncine sahip olmanın yanında hafiflik ve yüksek dayanım gücünden dolayı uzay savunma ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [1-3]. Köprü, inşaat, petrol endüstrisi, borular, valfler, yağ endüstrisinde kullanılan tanklar, gaz türbinleri, ısı değiştiriciler gibi birçok endüstriyel alanda metal ve alaşımları kullanılmaktadır. Bu makine elemanlarında kullanılan metal ve alaşımlarında karşılaşılan en önemli sorun ise erozyon ve korozyon olmuştur [4].

Aşınma, erozyon ve korozyon gibi etkilere maruz kalan makine elemanlarını bu etkilerden korumak ve ekonomikliği sağlamak amacıyla malzemelere yüzey kaplama veya yüzey işlemleri

*Sorumlu yazar: haticevarol@isparta.edu.tr

Geliş Tarihi: 08.08.2019, Kabul Tarihi: 20.03.2020

uygulanmaktadır [3,4]. Malzemelere ısı işlem, ısıl-kimyasal işleme, iyon aşılma ve bitirme işlemleri yüzey işlemleri olarak uygulanırken termal, fiziksel, kimyasal ve elektriksel olarak yüzey kaplama işlemleri uygulanmaktadır [3,4]

Yüzey kaplama işlemlerinden olan termal kaplama işlemleri; Yüksek hız oksit yakıt (HVOF), alev püskürtme, tel ark püskürtme, patlatma tabancası, hava veya vakum ortamında plazma püskürtme ve radyo frekans (RF) plazma püskürtme olmak üzere birçok gruba ayrılmıştır [5]. Malzeme sınırlamasının az olması, işlem sırasında meydana gelen ısı girişinin malzeme yapısını bozmaması ve kolay uygulanabilirliği termal kaplamaların yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur [6].

Termal spreycaplama yöntemlerinden olan HVOF (Yüksek Hızlı Oksit Yakıt) ve HVAF (Yüksek Hızlı Hava Yakıt) birçok çalışmaya konu olmuştur. HVOF kaplama yönteminde toz haldeki kaplama malzemesi sıcak gaz ortamında ısıtılarak hazırlanan yüzey üzerine yüksek parçacık hızı ile püskürtülerek istenen kaplamaların elde edilmesini sağlayan yöntemdir [7,8]. HVOF kaplama yönteminde düşük alev sıcaklığı (3000K'den daha az) ve yüksek parçacık hızında (500m/s civarında) kullanılarak düşük poroziteli, yüksek yoğunluklu, düşük oksidasyon oranlı, yüksek sertlik ve bağ gerilmesinin yanında ekonomik ve esnek kaplamalar elde edilir [9]. HVAF yönteminde yanma için saf oksijen yerine basınçlı hava kullanılır. Yüksek hızlı hava yakıt yöntemi olan HVAF düşük gözeneklilik, yüksek sertlik ve yapışma dayanımı elde edilen kaplama yöntemidir. Bu yöntemle oksidasyon önemli ölçüde azaltılabilir [10].

WC esaslı sermet karbür gibi birçok karbür kompozisyonlar HVOF gibi termal püskürtme yöntemleri kullanılarak son 20 yıldır başarılı bir şekilde kaplanmıştır. Günümüzde bu malzemeler havacılık sektörüne ait kritik parçaların (piston ve şaft vb.) üretiminde kullanılmaktadır [9]. HVOF kaplanmış WC-esaslı sermet malzemeler yeterli tokluk ve yüksek sertlik elde edilen mükemmel tribolojik özelliklere sahiptir [11]. WC-Co sermet yüzey kaplamaları yüksek sertlik, aşınma direnci, termal kararlılık ve korozyon direncine sahip oldukları için birçok mühendislik parçasında yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. WC-Co kaplamalar hava plazma püskürtme, düşük basınç plazma püskürtme, HVOF ve HVAF yöntemleri kullanılarak elde edilebilir [12]. WC-Co kaplamaların dezavantajı ekonomik olmamasıdır. WC-CoCr sermet kaplamaların yapısı sert WC fazı ve nispeten yumuşak CoCr metal anafazdan oluşmaktadır. HVOF yöntemi ile elde edilen WC/CoCr kaplamalar sert ve yoğun yapıda olup bu nedenle iyi tokluk ve yüksek korozyon direncine sahiptirler. Bu kaplamalarda kaplama yapısındaki WC parçacıkları aşınma direncini sağlarken, CoCr yapışma özelliği ile daha yoğun kaplamaların üretimini sağlar.

Konu ile ilgili literatür incelemeleri yapıldığında HVOF kaplama yönteminin birçok çalışmaya konu olduğu belirlenmiştir. Literatür incelemeleri yapılırken kaplama yönteminin yanında aynı zamanda işlem parametrelerinin optimizasyonunu içeren çalışmalar da incelenmiştir. Fang ve arkadaşları HVOF yöntemi kullanılarak hazırlanan WC-CrC-Ni kaplamaların yüzey özelliklerini ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi ve optimize edilmesi üzerine yaptıkları çalışma sonucunda WC-CrC-Ni kaplamasının aşınmaya karşı mükemmel önleyici performans gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [13]. Praveen ve arkadaşları Taguchi yöntemi kullanarak NiCrSiB-WC-Co HVOF kaplamaları erozyon aşınma davranışını optimize etme üzerine çalışmışlardır. Çalışmada alt malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Taguchi yöntemi ile kaplama işlem parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada en etkili parametreler sıra ile püskürtme mesafesi, toz besleme oranı, yakıt akış oranı ve oksijen akış oranı olarak belirlenmiştir [14]. Özbek ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, Woka 5810 tozları (%88 tungsten karbür -%12 kobalt) HVOF yöntemi ile kaplama yaparak yapılan kaplamaların aşınma performansı araştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, kaplamaların konvansiyonel muadillerine göre daha yüksek bir mikro sertlik ve daha iyi aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir [15]. Varis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada HVOF yöntemi ile Cr₃C₂-NiCr kaplanmış yapısal çeliğin yorulma performansını ele almışlardır. Çalışma sonucunda yüksek kinetik enerjili bir kaplama kullanarak; Cr₃C₂-NiCr kaplı yapısal çeliğin yorulma performansının benzer yüzey kalitesindeki kaplanmamış çelik ile karşılaştırıldığında, açıkça geliştiği belirlenmiştir [16]. Straffelini ve arkadaşları çalışmalarında değişik yüzey pürüzlülüklerine sahip dökme demir alt malzeme üzerine WC/CoCr kaplanmış ve kaplamaların aşınma davranışlarını incelemiştirler. Çalışma sonunda yüzey pürüzlülüğü düştükçe sürtünme yüzey kalınlığında artış meydana geldiği ve yüzey pürüzlülüğü azaldıkça tribolojik sistemin adesiv parçasında artış meydana geldiği belirlenmiştir [17]. Zoi ve arkadaşları WC-10Co-4Cr HVOF kaplanmış malzemelerin aşınma direnci ve artık gerilme üzerine aşındırma parametrelerinin (kesme hızı, besleme oranı, keme derinliği) etkisini çalışmışlardır. Yazarlar kesme derinliği, besleme

oranını artırarak ve kesme hızını düşürerek aşınma direncinin arttığını belirlemişlerdir [18]. Karaoğlanlı ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada değişik kompozisyonlarda ki HVOF kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışlarını belirlemeye çalışmışlardır. Kaplama malzemesi olarak NiCrBSi-WC(50/50), NiCr(80/20), WC(88/12) ve Cr3C2-NiCr(75/25) kullanılmıştır. Alt malzeme olarak paslanmaz çelik kullanmışlardır. Çalışma sonucunda WC/CoCr kaplanmış numunelerde yüksek aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir [19]. Vignesh ve arkadaşları çalışmalarında HVOF sprey parametrelerinin porozite ve sertlik üzerine etkisini ele almışlardır. Çalışmada değiştirilen parametreler; oksijen akış oranı, yakıt akış oranı, toz besleme oranı, taşıyıcı gaz oranı ve spray mesafesi olarak belirlenmiştir. Çalışmada değiştirilen parametreler sonucu minimum porozite ve maksimum sertlik eldesi amaçlanmıştır. Burada en etkili faktör olarak oksijen gaz akış oranı olduğu belirlenmiştir [20]. Kumar ve arkadaşları hidro türbin uygulamalarında kullanılan 16Cr5Ni çeliğini HVOF ve HVOF termal kaplama yöntemlerini kullanarak WC/CoCr malzeme ile kaplamışlardır. Çalışmada amaç çamur (ıslak kum) erozyonunun kaplama üzerine etkisinin analiz edilmesidir. Çalışma sonucunda; WC/CoCr kaplanmış numuneler arasında HVOF yapılan kaplamalar, HVOF kaplamalara göre daha iyi aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir [21]. Singh ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, T91 çelik kazan borusu NiCrAlY kaplama HVOF yöntemiyle kaplanmıştır. Çalışmada kaplanan ve kaplanmayan alt malzemenin yüksek sıcaklık oksidasyon davranışına göre karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma sonucunda NiCrAlY kaplanmış malzemenin düşük korozyon oranına yol açan Al₂O₃, Cr₂O₃, NiO ve CrO koruyucu oksitlerin oluşumu nedeniyle yüksek sıcaklıkta oksidasyon ve korozyona karşı daha iyi direnç gösterdiği, kaplanmamış çeliğin ise yayılma ve korunmasız Fe₂O₃ oksit skalasının soyulması şeklinde yüksek korozyon oranına sahip olduğu görülmüştür [22]. Sadeghimeresht ve arkadaşları çalışmalarında, yüksek hızlı hava yakıtı (HVOF) ve yüksek hızlı oksijen yakıtı (HVOF) teknikleri ile oluşturulan Fe bazlı kaplamaların mikro yapısal özellikleri ve korozyon davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Gözenekliliği azaltmak ve kaplamaların korozyon direncini arttırmak için farklı toz bileşimi setleri ve farklı tane boyutları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda HVOF kaplamaların HVOF kaplamalardan daha düşük gözeneklilik ve oksit içeriğine sahip olduğu görülmüştür [23].

Çalışmada aşınma dayanımını iyileştirmek amacıyla T6 ısıl işlem uygulanmış halde piyasadan temin edilen Alüminyum alaşımı malzemeler (AA2024, AA7075, AA6082) ile Çelik alaşımı malzemeler (AISI 1040, AISI 4340 ve AISI 304) üzerine HVOF kaplama yöntemi kullanılarak WC/Co ve WC/CoCr kaplama malzemesi sabit kaplama parametreleri ile kaplanmıştır. Yapılan kaplamaların aşınma davranışları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Taguchi yöntemi ve varyans (ANOVA) analizi ile değerlendirilmiştir. Çalışmada belirlenen alt malzeme ekonomik ve aşınmaya dayanıklı yeni bir malzeme olarak literatüre katkı sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme seçimi ve kaplama işlem hazırlıkları

Bu çalışmanın deneysel aşamasında altlık malzeme olarak piyasadan T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış halde temin edilmiş AA2024, AA6082 ve AA7075 Al alaşımları ile yine piyasadan hazır halde temin edilmiş AISI 1040, AISI 4340 ve AISI 304 çelik alaşımları kullanılmıştır. Çalışmada ticari olarak temin edilen altlık malzemelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmekte olup bu değerler firmadan temin edilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum alt malzemelerin kimyasal kompozisyonu

| | Fe | Si | Cu | Cr | Mn | Mg | Zn | Zi+Ti | Diğer | Al |
|---------------|-----|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|
| AA2024 | 0,5 | 0,5 | 3,8-4,9 | 0,1 | 0,3-0,9 | 1,2-1,8 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | Kalanı |
| AA6082 | 0,5 | 0,7-1,3 | 0,1 | 0,15 | 0,4-1,0 | 0,6-1,2 | 0,2 | - | 0,15 | Kalanı |
| AA7075 | 0,5 | 0,5 | 1,2-2,0 | 0,18-0,28 | 0,3 | 2,1-2,9 | 5,1-6,1 | 0,25 | 0,15 | Kalanı |

Tablo 2. Çelik alt malzemelerin kimyasal kompozisyonu

| | C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | Mo |
|------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| AISI 1040 | 0,40 | 0,80 | 0,04 | 0,05 | - | - | - | - |
| AISI 4340 | 0,42 | 0,70 | 0,035 | 0,04 | 0,20 | 0,80 | 1,95 | 0,25 |
| AISI 304 | 0,08 | 2 | 0,045 | 0,03 | 1,00 | 19 | 9 | - |

Kaplama malzemesi olarak WC/Co ve WC/CoCr malzemeler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kaplama malzemeleri Oerlikon Metco tarafından aglomera sinterleme yöntemi ile üretilmiş tungsten karbür (% 10 kobalt, % 4 krom toz ve % 12 kobalt toz) tozlarıdır. Çalışmada kullanılan toz boyutları $35\pm 15\mu$ 'dir.

Termal kaplama işlemlerinde kaplama işlemi öncesi yüzey hazırlığı kaplamanın tüm yüzey boyunca homojen olması açısından önemlidir. Bu nedenle kaplama işlemi öncesinde farklı sertlik ve yüzey özelliklerine sahip numuneler 800 ve 1200 mesh zımpara ile zımparalanmıştır. Daha sonra numuneler asetonla temizlenmiş ve daha sonra Al_2O_3 (14 numara) ile kumlama işlemi uygulanmıştır. Kumlama işlemi altlık malzeme ile kaplama malzemesi arasında ara yüzey oluşumu özelliklerini iyileştirmek ve kaplamanın yüzeye tutunmasını sağlamak amacıyla yapılmaktadır.

2.2. HVOF Kaplama İşlemi ve Aşınma Deneyleri

Çalışmada termal kaplama yöntemi olarak HVOF kaplama tercih edilmiştir. HVOF kaplama sisteminde Metco Diamond Jet 2700 tip tabanca kullanılmıştır. Kaplama işlem parametreleri sabit olup Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Kaplama parametreleri

| Kaplama Malzemesi | Propan basıncı (MPa) | Hava basıncı (MPa) | Oksijen basıncı (MPa) | Alt malzeme sıcaklığı (°C) | Püskürtme mesafesi (mm) | Toz besleme oranı (g/dk) |
|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| WC/Co | 0,7 | 0,6 | 1,03 | 80-90 | 200 | 32 |
| WC/CoCr | 0,75 | 0,6 | 1,03 | 80-90 | 200 | 32 |

**Şekil 1.** UTS Tribometer marka aşınma testi cihazı [24]

Kaplama işlemi yapılan malzemelerin aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla aşınma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler ASTM G133 standardına göre lineer ileri geri hareket eden bilyeli düz tribotester cihazı (Model: UTS Tribometer T10) kullanılarak yağlamasız ortamda yapılmıştır (Şekil 1). Deneylerde 6 mm çapında AISI 52100 çelik bilye karşı malzeme olarak kullanılmıştır. Deneyler 180mm/s kayma hızında ve 1000 m kayma mesafesinde yapılmıştır [24]. Deney sırasında numuneye 3 farklı yük (10N, 20N ve 30N) uygulanmıştır. Spesifik aşınma oranı Eş. 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{sp} = \Delta m/d.F.S \quad (1)$$

Eşitlik 1’de verilen W_{sp} : spesifik aşınma oranı (mm^3/Nm), Δm : kütle kaybı (g)
 d :yoğunluk(g/cm^3),
 F : normal yük (N) ve S :kaytma mesafesi (m)’dir.

2.3. Taguchi metodu ve varyans analizi

Deneyisel çalışmalarda işlem parametrelerinin sonuçlara etkisinin belirlenebilmesi için klasik ve istatistiksel metodoloji deney tasarımı yöntemleri kullanılmakta olup Taguchi yöntemi bunlardan en yaygın olanıdır [8, 25, 26].

Taguchi metodu üründe ve süreçte, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin en uygun kombinasyonunu seçerek ürün ve süreçteki değişkenliği en aza indiren bir deneysel tasarım yöntemidir [27]. Taguchi yönteminde deneylerden elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek analiz yapılır. S/N oranı hesaplanmasında karakteristik tipine bağlı “nominal en iyi, en büyük en iyi ve en küçük en iyi” metotları kullanılır. En küçük en iyi olduğu durumda Eş. 2, en büyük en iyi olduğu durumda Eş. 3 ve Nominal en iyi olduğunda Eş. 4’te verilen formüller kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır.

$$S_N = -10 \log \frac{1^n}{n_{i=0}} y_i^2 \quad (2)$$

$$S_N = -\log \frac{1^n}{n_{i=0}} \frac{1}{y_i^2} \quad (3)$$

$$y = \frac{1^n}{n_{i=0}} y_i \quad (4)$$

$$S^2 = \frac{1^n}{n_{i=0}} y_i - y^2 \text{ dir.}$$

Varyans analizi (ANOVA) girdiler ve çıktılar arasında olası ilişki şiddetinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Deneyisel çalışmalarda sonuçların yorumlanmasında en önemli nokta deneylerde kullanılan işlem parametreleri ile deney sonrası elde edilen sonuçlar arasındaki ilişkinin belirlenmesidir [28].

Bu çalışmada Taguchi yöntemi kullanılarak HVOF yöntemi ile WC/Co ve WC/CoCr ile kaplanan alt malzemelerin aşınma davranışlarının belirlenmesi amaçlanmış olup bu yöntem için kullanılan işlem parametreleri Tablo 4’te, Taguchi L_{18} ($6^1 3^2$) ortogonal dizisi Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Deneyler için seçilen işlem parametreleri

| Seviye | Alt Malzeme Türü (A) | Kaplama Malzemesi Türü (B) | Uygulanan Yük(N) (C) |
|----------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| Seviye 1 | AA 2024 | Kaplamasız | 10 N |
| Seviye 2 | AA 6082 | | |
| Seviye 3 | AA7075 | WC-Co | 20 N |
| Seviye 4 | AISI 304 | | |
| Seviye 5 | AISI 1040 | WC-CoCr | 30 N |
| Seviye 6 | AISI 4340 | | |

Tablo 5. Deney tasarımı planı

| Proses Parametre Düzeyleri | | | |
|----------------------------|------------------|---------------|---------------|
| Deney No | Alt Malzeme Türü | Kaplama Cinsi | Uygulanan Yük |
| 1 | 1 | 1 | 10 |
| 2 | 1 | 2 | 20 |
| 3 | 1 | 3 | 30 |
| 4 | 2 | 1 | 10 |
| 5 | 2 | 2 | 20 |
| 6 | 2 | 3 | 30 |
| 7 | 3 | 1 | 10 |
| 8 | 3 | 2 | 20 |
| 9 | 3 | 3 | 30 |
| 10 | 4 | 1 | 10 |
| 11 | 4 | 2 | 20 |
| 12 | 4 | 3 | 30 |
| 13 | 5 | 1 | 10 |
| 14 | 5 | 2 | 20 |
| 15 | 5 | 3 | 30 |
| 16 | 6 | 1 | 10 |
| 17 | 6 | 2 | 20 |
| 18 | 6 | 3 | 30 |

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın deneysel kısmında kaplama öncesi kaplama malzemesinin yüzeye tutunma kabiliyetini arttırmak için zımparalama, parlatma ve kumlama işlemi uygulanarak yüzey hazırlığı yapılmış ve daha sonra kaplama işlemi numunelere uygulanmıştır. Kaplanmış haldeki numunelere ait fotoğraflar Şekil 2’de verilmektedir.

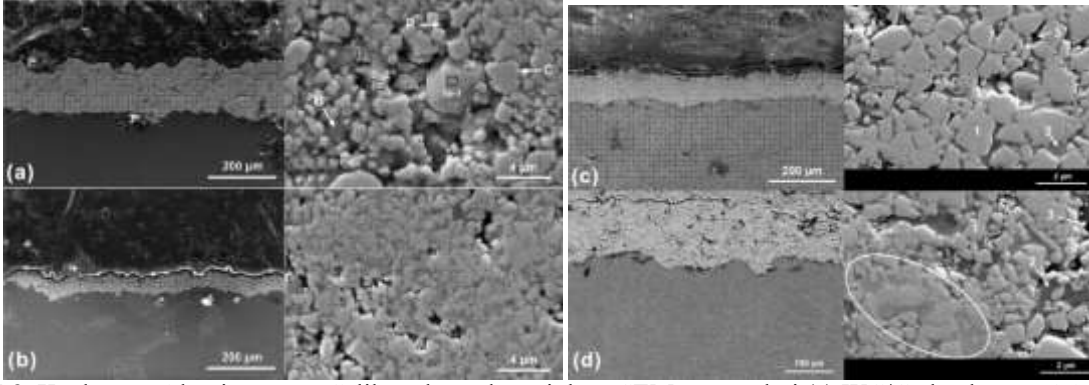


Şekil 2. Kaplanmış numunelerin makro görüntüleri

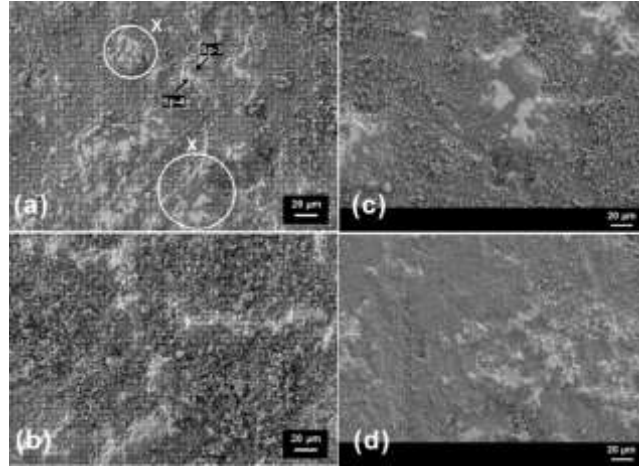
Ayrıca kaplama öncesi ve sonrası SEM incelemeleri yapılmıştır. Kaplama sonrası kaplama kalınlıkları ölçümü yapılarak ve detaylı SEM incelemeleriyle kaplamanın kalitesi belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 3). Ayrıca aşındırma işlemi sonrası da SEM incelemeleri yapılmıştır (Şekil 4).

Deneysel çalışmaların tercih edildiği durumlarda sistemi etkileyen faktör sayısı ne kadar fazla olursa deney sayısı da o kadar artmaktadır. Bu artış maliyetin artmasına da neden olmaktadır. Ayrıca deney yapılırken geçen zaman ve harcanan emek de kayıp olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu kayıpları ortadan kaldırmak amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmaktadır. Taguchi metodunda sonuçlar S/N oranına göre analiz edilir. Çalışmada aşınma davranışı üzerinde işlem parametrelerinin etki seviyeleri %99 güven aralığında Varyans analizi (ANOVA) kullanılarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada Al alaşımından (Al 2024, Al 7075, Al 6082) ve Çelik alaşımlarından (AISI 1040, AISI 4340 ve AISI 304) hazırlanmış altlık malzeme üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen aşınma değerleri ile hesaplanan sinyal/gürültü (S/N) oranları Tablo 6’da verilmektedir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri SurfTest SV-2100m4p marka cihazda yapılmıştır.



Şekil 3. Kaplanmış Alüminyum ve Çelik malzemelere ait bazı SEM görüntüleri (a) WC/Co kaplanmış AA 2024 numunesi (b) WC/CoCr kaplanmış AA 2024 numunesi (c) WC/Co kaplanmış AISI 4340 numunesi (d) WC/CoCr kaplanmış AISI 4340 numunesi



Şekil 4. Aşınma deneyi sonrası Alüminyum ve Çelik malzemelere ait bazı SEM görüntüleri (a) WC/Co kaplanmış AA 2024 numunesi (b) WC/CoCr kaplanmış AA 2024 numunesi (c) WC/CoCr kaplanmış AISI 4340 numunesi (d) WC/Co kaplanmış AISI 4340 numunesi

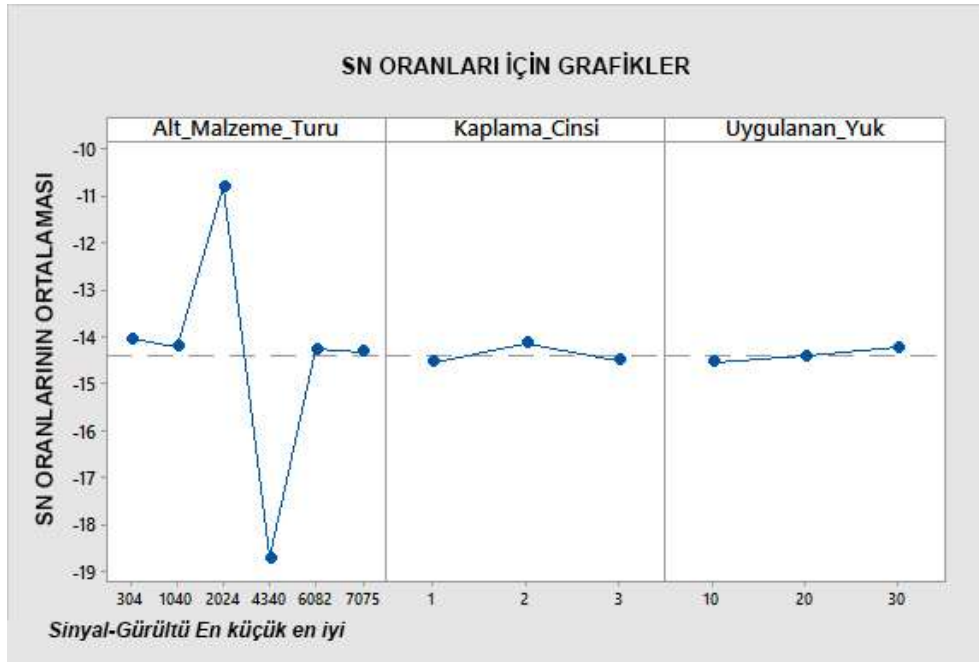
Tablo 6. Aşınmaya ilişkin analiz sonuçları

| Proses Parametre Düzeyleri | | | | | | |
|----------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------------------|--|
| Deney No | Alt Malzeme Türü | Kaplama Cinsi | Uygulanan Yük | Aşınma Değerleri(g) | Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı (dB) | |
| 1 | 1 | 1 | 10 | 5,20 | -14,32 | |
| 2 | 1 | 2 | 20 | 4,89 | -13,78 | |
| 3 | 1 | 3 | 30 | 5,01 | -13,99 | |
| 4 | 2 | 1 | 10 | 5,35 | -14,56 | |
| 5 | 2 | 2 | 20 | 5,00 | -13,97 | |
| 6 | 2 | 3 | 30 | 5,06 | -14,08 | |
| 7 | 3 | 1 | 20 | 3,49 | -10,85 | |
| 8 | 3 | 2 | 30 | 3,33 | -10,45 | |
| 9 | 3 | 3 | 10 | 3,56 | -11,02 | |
| 10 | 4 | 1 | 30 | 8,69 | -18,78 | |
| 11 | 4 | 2 | 10 | 8,52 | -18,60 | |
| 12 | 4 | 3 | 20 | 8,72 | -18,81 | |
| 13 | 5 | 1 | 20 | 5,29 | -14,46 | |
| 14 | 5 | 2 | 30 | 4,88 | -13,76 | |
| 15 | 5 | 3 | 10 | 5,34 | -14,55 | |
| 16 | 6 | 1 | 30 | 5,15 | -14,23 | |
| 17 | 6 | 2 | 10 | 5,12 | -14,18 | |
| 18 | 6 | 3 | 20 | 5,32 | -14,51 | |

Tablo 6 L_{18} ortogonal diziliminde optimum aşınma değerleri için en iyi aşınma davranışı -10,45 S/N oranı bulunmuştur. Bu değer için Tablo 7'de A3B2C3 deney parametrelerine yani Al 2024 alt malzeme, WC-Co kaplama cinsi ve 30 N yük için en iyi aşınma davranışı elde edilmiştir.

Tablo 7. Faktör seviyeleri için ortalama sinyal/gürültü (S/N) oranları

| Kontrol Faktörleri | | | |
|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| Düzyey | Alt Malzeme Türü (A) | Kaplama Cinsi (B) | Uygulanan Yük (C) |
| 1 | -14,03 | -14,54 | -14,54 |
| 2 | -14,21 | -14,13 | -14,40 |
| 3 | -10,78 | -14,50 | -14,22 |
| 4 | -18,73 | | |
| 5 | -14,26 | | |
| 6 | -14,31 | | |
| Delta | 7,96 | 0,41 | 0,32 |
| Rank | 1 | 2 | 3 |



Şekil 5. S/N oranı için sonuç tablosu

Taguchi tasarımlarında en çok tercih edilen istatistik değerlerden biri S/N oranı olup bu oran sağlam tasarımın performansını ölçmek için kullanılmaktadır. En yüksek S/N oranı deney tasarımında istenen optimum nokta olan en küçük değere hesaplanmış kütle kaybına karşılık gelmektedir [31]. Yapılan deneysel çalışmada optimum sonucu elde etmek için kullanılan parametre seviyelerinin en yüksek S/N oranı olan seviyeler dikkate alınmaktadır. Aynı şartlarda yapılacak olan deneysel çalışmalarda optimum aşınma davranışı belirlenirken Tablo 8 ve Şekil 5'teki değerler göz önünde bulundurulacaktır. Ayrıca Tablo 7 incelendiğinde en iyi aşınma davranışı A3B2C3 (Al 2024 alt malzeme, WC-Co kaplama malzemesi ve 30N yük) olduğu belirlenmiştir.

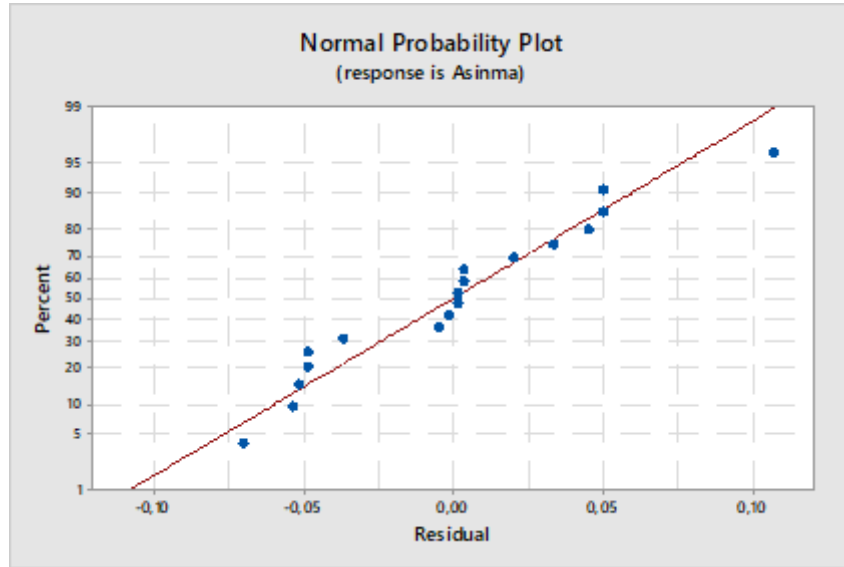
Yapılan Taguchi analizinde aşınma davranışı açısından en iyi sonucun A3B2C3 olduğu belirlenmiş olup bu sonuç tek başına yeterli değildir. Elde edilen sonuçların belirlenen bu parametrelerin birbiri ile ilişkileri ve deney sonucuna olan katkılarının (% olarak) belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla çalışmada Varyans analizi de yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları Tablo 8'de verilmektedir.

Tablo 8. Aşınma direnci için Varyans analizi (S/N oranına göre)

| Varyans Kaynağı | Serbestlik Derecesi | Kareler Toplamı | Katkı Oranı | Ortalama Kareler Toplamı | F | p |
|------------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------------------|---------|-------|
| Alt Malzeme Türü | 5 | 43,7137 | 99,27% | 8,74275 | 1921,48 | 0,000 |
| Kaplama Cinsi | 2 | 0,2046 | 0,46% | 0,10232 | 22,49 | 0,001 |
| Uygulanan Yük | 2 | 0,0796 | 0,18% | 0,03982 | 8,75 | 0,010 |
| Hata | 8 | 0,0364 | 0,08% | 0,00455 | | |
| Toplam | 17 | 44,0344 | 100,00% | - | | |

S=0,0674537 R-Sq=99,92 R-Sq(adj)=99,882

Tablo 8 incelendiğinde; alt malzeme türü, kaplama cinsi ve uygulanan yük parametrelerine ilişkin p değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu ($p < 0,05$) ve en yüksek F değerinin alt malzeme türü parametresine ait olduğu görülmektedir. Elde edilen bulgular, alt malzeme türü, kaplama cinsi ve uygulanan yük parametrelerinin aşınma üzerindeki etkisinin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Varyans analizinden elde edilen bulguların anlamlı olup olmadığını belirleyebilmek amacıyla artıkların normal olasılık diyagramı incelenmiştir. Aşınma için çizdirilen grafik Şekil 6'da gösterilmektedir.

**Şekil 6.** Aşınmanın sonuç değişken olduğu durum için artıklara ait normal olasılık diyagramı**Tablo 9.** Deney sonucu ve Taguchi tahmini arasındaki hata

| A (Alt malzeme) | B (Kaplama cinsi) | C (Uygulanan yük) | Deney Sonucu | Taguchi Tahmini | Mutlak Fark | % Mutlak Hata |
|--------------------|----------------------|----------------------|--------------|-----------------|-------------|---------------|
| 2 | 3 | 30 | 5,06 | 5,11 | 0,05 | 1,02 |
| 6 | 3 | 20 | 5,32 | 5,27 | 0,05 | 0,93 |

Taguchi metoduna göre, optimal sonuçları verecek parametrelerin tahmininden sonra, optimizasyonda son aşama olarak doğrulama deneyleri yapılmakta ve yapılan optimizasyonun doğruluğu kontrol edilmektedir. Önceden tespit edilen aşınma sonuçları için rastgele seçilen iki adet kontrol deneyleri sonucunda elde edilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak sonuçların güvenilirliği belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre en iyi aşınma değerlerinin elde edilmesinde, optimize edilmiş aşınma parametreleri Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8 incelendiğinde deney sonucu 5,32 elde edilirken Taguchi tahmini 5,27 elde edilmiş olup değerlerin birbirine çok yakın olması Taguchi metodunun yapılan çalışmada başarılı bir şekilde uygulanabildiğini göstermektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada HVOF yöntemiyle kaplanmış malzemelerin aşınma davranış optimizasyonu (kaplama malzemesi ve altlık malzeme açısından) Taguchi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir.

Dizilime göre deneyler yapılarak S/N oranları elde edilmiştir. En küçük en iyi S/N denklemi kullanılmış ve S/N oranında en büyük değer aranmıştır. Aranan en büyük değer aşınma davranışı en iyi özellikte olan kaplama parametrelerini vermiştir. Bu çalışmada en iyi aşınma davranışı -10,45 S/N oranında, Al 2024 alt malzeme, WC-Co kaplama malzemesi ve 30 N yük parametrelerine sahip numunelerden elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Aşınma için tüm deneylerin hata yüzdeleri ortalaması dikkate alındığında; Taguchi metodu ile elde edilen tahmini sonuçların hatası %1 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda Taguchi tahmininin yaklaşık %99 doğrulukta olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

5036-YL1-12 no'lu proje ile deneylerimiz için maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) yönetim birimi başkanlığına teşekkür ederiz

Yazarların Katkısı

Bu makalenin hazırlanmasında tüm yazarlar eşit oranda katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] ASM International Handbook Committee, 2005. ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 10th Edition, Ohio.
- [2] Davis J.R. 2001. Alloying: Understanding the Basics, ASM International, 1st Edition Ohio.
- [3] Alcotec, Understanding The Alloys of Aluminum. 2018 <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/techknowledge/understanding-the-alloys-of-aluminum.cfm> (Erişim Tarihi: 26.09.2018).
- [4] Islak S., Özorak C., Küçük Ö., Akkaş M., Sezgin T.S. 2015. Microstructure And Hardness Properties of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed WCCo-SiC Coatings. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences, 1 (1): 1-7.
- [5] Varol Özkavak H. 2013. Plazma ile Polimer Kaplanmış Metalik Malzemelerin Bazı (Tribolojik) Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [6] Herman H., Sampath S., McCune R. 2000. Thermal Spray: Current Status And Future Trends. Mat. Res. Soc. Bull., 25 (7): 17-25.
- [7] Pawlowski L. 2008. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. 2nd ed., New Jersey, ABD: Wiley&Sons Ltd, 7: 291-381.
- [8] Praveen A.S., Sarangan J., Suresh S., Channabasappa B.H. 2016. Optimization and Erosion Wear Response of NiCrSiB/WC-Co HVOF Coating Using Taguchi Method. Ceramic International, 42 (1): 1094-1104.
- [9] Özbek Y.Y., Canikoğlu N., İpek M. 2016. The Mechanical Properties and Wear Resistance of HVOF Sprayed WC-Co Coatings. Acta Physica Polonica A, 129 (4): 600-603.

- [10] Guo R.Q., Zhang C., Chen Q., Yang Y., Li N., Liu L. 2011. Study of Structure and Corrosion resistance of Fe- Based Amorphous Coatings prepared by HVAF and HVOF. *Corrosion Sciences*, 53 (1): 2351-2356.
- [11] Bolelli G., Lusvarghi L., Barletta M. 2009. HVOF-Sprayed WC-CoCr Coatings on Al Alloy: Effect of coating Thickness on the Tribological Properties. *Wear*, 267 (1): 944-953.
- [12] Geng Z., Hou S., Shi G., Duan D., Li S. 2016. Tribological Behaviour at Various Temperatures of WC-Co Coatings Prepared Using Different Thermal Sparying Techniques. *Tribology International*, 104 (1): 36-44.
- [13] Fang W., Cho T.Y., Yoon J.H., Song K.O., Hur S.K., Youn S.J., Chun H.G. 2009. Processing Optimization, Surface Properties and Wear Behavior of HVOF Spraying WC-Cr-Ni Coating. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3561-3567.
- [14] Praveen A.S., Sarangan J., Suresh S., Channabasappa B.H. 2016. Optimization and Erosion Wear Response of Nicrsib/WC-Co HVOF Coating Using Taguchi Method. *Ceramics International*, 42: 1094-1104.
- [15] Özbek Y.Y., Canikoğlu N., İpek M. 2017. The Surface Properties of WC-Co-Cr Based Coatings Deposited by High Velocity Oxygen Fuel Spraying. *Acta Physica Polonica Series*, 131 (1): 186-189.
- [16] Varis T., Suhonen T., Calonius O., Čuban J., Pietola M., 2016. Optimization of HVOF Cr₃C₂-Nir Coating for Increased Fatigue Performance. *Surface&Coatings Technology*, 305 (1): 123-131.
- [17] Straffelini G., Federici M., Menapace C., Moscatelli A., Gialanella S. 2016. Effect of Roughness on the Wear Behavior of HVOF Coatings Dry Sliding Against A Friction Material. *Wear*, 368-369: 326-334.
- [18] Zoei M.S., Sadeghi M.H., Salehi M. 2016. Effect of Grinding Parameters on the Wear Resistance and Residual Stres of HVOF-Deposited WC-10Co-4Cr Coating. *Surface&Coatings Technology*, 307: 886-891.
- [19] Karaoğlanlı A.C., Oge M., Doleker K.M., Hotamis M. 2017. Comparison of Tribological Properties of HVOF Sprayed Coatings with Different Composition. *Surface&Coatings Technology*, 318: 299-308.
- [20] Vignesh S., Shanmugam K., Balasubramanian V., Sridhar K. 2017. Identifying the Optimal HVOF Spray Parameters to Attain Minimum Porosity and Maximum Hardness in Iron Based Amorphous Metallic Coatings. *Defence Technology*, 13: 101-110.
- [21] Kumar R.K., Kamaraj M., Seetharamu S., Anand Kumar S. 2017. A Pragmatic Approach And Quantitative Assessment Of Silt Erosion Characteristics of HVOF and HVAF Processed WC-CoCr Coatings and 16Cr5Ni Steel for Hydro Turbine Applications. *Materials and Design*, 132: 79-95.
- [22] Singh G., Bala N., Chawla V. 2017. High Temperature Oxidation Behaviour of HVOF Thermally Sprayed Nicraly Coating on T-91 Boiler Tube Steel. *Materials Today: Proceedings*, 4: 5259-5265.
- [23] Sadeghimeresht E., Markocsan N., Nylén P. 2017. Microstructural Characteristics and Corrosion Behavior of HVAF- and HVOF-Sprayed Fe-Based Coatings. *Surface&Coatings Technology*, 318: 365-373.
- [24] Şahin Ş. 2019. Taguchi Yöntemi Kullanılarak WC/Co, WC/CoCr HVOF Kaplamanın Optimizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [25] Şirin E., Şirin Ş., Turgut Y., Korkut İ. 2015. AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3 (1): 132-144.
- [26] Turgut E., Dikici A. 2011. Optimization of design parameters of co-axial heat exchanger with with Taguchi method. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 278-281.
- [27] Düzyol S. 2016. Taguchi Deneysel Tasarım Metodu Kullanılarak Karadon (Zonguldak) Kömürünün Yağ Aglomerasyonu Davranışının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2): 77-84.

- [28] Yalçın N., Kayır Y., Erkal S. 2017. AA 2024 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Yaşlandırma Yöntemlerinin İşlenebilirliğe Etkisinin Taguchi ve ANOVA ile Araştırılması. Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 20 (4): 743-751.
- [29] Yaka H., Akkuş H., Uğur L. 2016. AISI 1040 Çeliğinin Tornalamasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. CBÜ Fen Bilimleri Dergisi, 12 (1): 283-288.
- [30] Bilici M.K., Bakır B., Bozkurt Y., Çalış İ. 2016. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Tekniği ile Birleştirilen Farklı Alüminyum Levhaların Taguchi Analizi. Pamukkale Üniversite Müh. Bil. Dergisi, 22 (1): 17-23.
- [31] Gür A.K., Kaya S. 2017. PTA Kaplamalarda Abrasive Aşınma Davranışının Değerlendirilmesinde; Bir Taguchi Yaklaşımı. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29 (2): 195-202.