

## Elektrolitik Yöntemle Sert Krom Kaplanan Yapı Çeliğinde Kaplama Parametrelerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu

### *Optimization of Coating Parameters in Hard Chrome Coated Structural Steel by Electrolytic Method with Taguchi Method*

Hasan KIR<sup>1,a</sup>, Serkan APAY<sup>\*2,b</sup>

<sup>1</sup>EAE Technology A.Ş., İkitelli Organize Sanayi Bölgesi, 34490, İstanbul

<sup>2</sup>Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce

• Geliş tarihi / Received: 14.03.2019 • Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 17.09.2019 • Kabul tarihi / Accepted: 23.09.2019

#### Öz

Sert krom kaplama, metallere aşınma direnci, korozyon direnci ve dekoratif görüntü kazandırmak amacıyla yapılan bir yüzey kaplama işlemidir. Kaplama işlemi metallere birçok farklı kaplama metodu ile uygulanabilmektedir. Bunlar; kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD), diğer plazma kaplama yöntemleri, yüksek hızda oksijen-yakıt püskürtme (HVOF) ve elektrolitik kaplama yöntemleridir. Elektrolitik sert krom kaplamada kaplama parametreleri büyük önem taşımaktadır. Akım yoğunluğu, elektrolitik banyo sıcaklığı, anot katot arası mesafe, banyo pH oranı ve kaplama süresi önemli parametrelerdir. Bu çalışmada, yapı çeliğinin sertlik özelliklerine, elektrolitik yöntemle sert krom kaplama parametrelerinden akım yoğunluğu, banyo sıcaklığı ve anot katot mesafe değerleri incelenmiş ve optimum sertlik değerleri tespit edilmiştir. Taguchi L<sub>18</sub> ortogonal dizin sıralamasına göre uygulanmış deneysel çalışma sonucunun değerlendirilmesinde Sinyal/Gürültü (S/N) oranı temel alınmıştır. Kontrol faktörlerinin sonuçlara etkisi Varyans analizi (ANOVA) kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Taguchi yöntemi ile hesaplanan optimizasyon değerleri ile deneysel çalışmada kullanılan aynı değerlerde en yüksek sertlik değerine ulaşıldığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Elektrolitik Yöntem, Sertlik, Sert Krom Kaplama, Taguchi Metodu

#### Abstract

Hard chrome plating is a surface coating process to give metals wear resistance, corrosion resistance and decorative appearance. The coating process can be applied to metals with many different coating methods. These; chemical vapor deposition (CVD), physical vapor deposition (PVD), other plasma coating methods, high-speed oxy-fuel injection (HVOF) and electrolytic coating methods. Plating parameters are very important in electrolytic hard chromium plating. Current density, electrolytic bath temperature, distance between anode cathode, bath pH ratio and coating time are important parameters. In this study, hardness properties of structural steel, current density, bath temperature and anode- cathode distance values of hard chrome plating parameters were investigated by electrolytic method and optimum hardness values were determined. Signal/Noise (S/N) ratio was used in the evaluation of Taguchi L<sub>18</sub> orthogonal sequence. The effect of control factors on the results was calculated using Variance Analysis (ANOVA). As a result, it was observed that optimization values calculated with Taguchi method and highest hardness values were reached in the same values used in the experimental study.

**Keywords:** Electrolytic Method, Hardness, Hard Chrome Plating, Taguchi Method

\*<sup>b</sup>Serkan APAY; serkanapay@duzce.edu.tr, Tel: (0380) 542 11 33/2252, orcid.org/0000-0003-4624-9082

<sup>a</sup>orcid.org/0000-0001-5526-8467

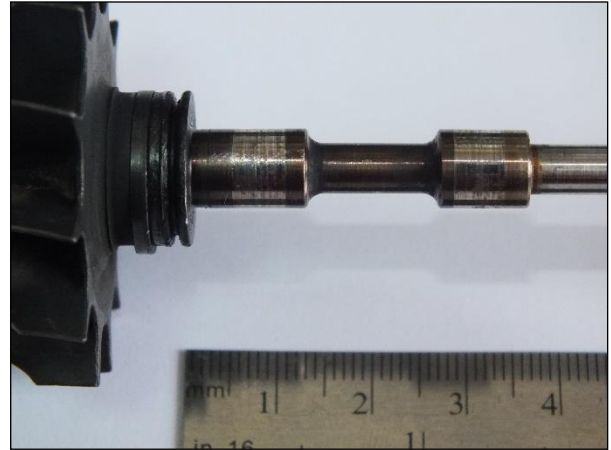
## 1. Giriş

Makine imalat endüstrisinde çelik malzemeler sahip oldukları özelliklerden dolayı yoğun olarak tercih edilmektedir. Bu malzemeler ya sahip olduğu mekanik özelliklerle ya da mekanik özellikleri iyileştirme sonrasında makine parçası olarak kullanılmaktadırlar. Mekanik özelliklerin değiştirilmesi sertlik, aşınma ve korozyon direncinin iyileştirilmesi olarak gerçekleştirilmektedir. İyileştirme işlemleri yüzey işlemleri olarak da bilinen kaplama yöntemleri ile yapılmaktadır. Bazı durumlarda yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ısıtma işlemleri ile yapılmaktadır. Hem ısıtma işlemlerinde hem de yüzey kaplamalarında amaç imalatı yapılacak parçanın çalışacağı ortama uygun hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Dekoratif amaçlı olarak yapılan kaplamalarda bulunmaktadır (Saraç, 1995; Perianu, 2016). Kaplama işlemleri, kimyasal çöktürme yöntemleri (PVD ve CVD), termal yöntemler (Plazma kaplama, HVOF vb.) ve sıcak daldırma ve elektrolitik olarak uygulanmaktadır (Lausmann, 1996; Bozyazı vd., 2004; Bolelli vd., 2006). Kimyasal ve termal kaplama yöntemleri ile kıyaslandığında elektrolitik kaplama yöntemi daha ekonomiktir (Borisenko vd., 2017).

Elektrolitik kaplama yöntemlerinden sert krom kaplama, makine parçaları, otomotiv araç gereçleri ve takım malzemelerinin ve aşınma karakteristiklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır (Browning, 1994; Chen vd., 1996; Rebholz vd., 1999). Aşınma, makine parçalarında ve birbirleri ile temas halinde çalışan otomobil parçalarında yüzeylerde oluşan, malzeme kaybı olarak görülen bir problemdir (Lindsay, 1999; Schlesinger vd., 2014). Yeterli yağlamanın olmadığı durumlarda, motor parçalarında bu aşınma türleri sıkça görülebilmektedir (İpek vd., 2006). Şekil 1'de yeterli yağlama olmadığı için aşınan turbo şarj mili görülmektedir. Turbo şarj mili gibi çeliklerde, geleneksel yöntemleri (ısıtma işlemleri vb. yöntemler) ile aşınma direnci kazandırılmaya çalışıldığında parçalarda boyut toleranslarını kaybolması ve istenen yeterlilikte sertlik değerlerine ulaşamaması gibi sorunlar ortaya çıkacaktır (Kahraman vd., 2013). Aşınan parçalarla ilgili olarak malzemenin tokluk ve sertlik gibi mekanik değerleri önemli unsurlardır (Doubek vd., 2011; Demirsöz vd., 2018).

Aşınma problemini en aza indirmek için genellikle uygulanan işlem aşınan yüzeyi, aşınmaya karşı dirençli hale getirmektir. Elektrolitik sert krom kaplama yapılan önceki çalışmalarda, numunelerde artan yüzey sertliği ile

aşınma direncinin de arttığı görülmüştür (Fedrizzi vd., 2002). Barbato ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, elektrolitik sert krom kaplanan 1045 çelik malzemede sertliğin arttığını görmüşlerdir (Salvador Barbato vd., 2008). Karuppasamy ve arkadaşları, 50CrMo4 şaft mili üzerine yapmış oldukları sert krom kaplama ile aşınma direncinin ve sertlik değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir (Karuppasamy vd., 2018). Almotairi ve arkadaşları, 416 kalite paslanmaz çelik mil üzerine sert krom kaplama yapmışlar ve milin korozyon direnci ile aşınma direncinde artış olduğunu görmüşlerdir (Almotairi vd., 2016).



Şekil 1. Yetersiz yağlama sonucu aşınmış turbo şarj mili

Bir ürün geliştirme işlemlerinde ön deneysel çalışmalar yapmak, üretim esnasındaki birçok problemi önceden görüp önlemini alma ve ürün kalitesini daha iyi hale getirmek için yapılmaktadır. Deneysel çalışmaları gerçekleştirmek için iyi bir deney tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı çalışmalarda deneysel parametrelerin çokluğu çalışma maliyetlerinde ciddi artışlara da neden olmaktadır. Bu maliyetler, Genichi Taguchi tarafından geliştirilen ortogonal dizileriyle birçok parametre içeren deneylerde kullanılan Taguchi yöntemi, daha az deneme ile daha iyi neticeler elde ederek azaltılmıştır (Gür vd., 2017). Taguchi yönteminin amacı, kontrol edilemeyen değişkenlerin seviyelerini pasif (deney harici) tutarak deneysel prosesler bütünü hazırlamaktır (Gür, 2013). Taguchi yöntemi ile hazırlanan deneysel düzeneklerde birçok deneyi yapmadan sonuçları görmek mümkündür. Ayrıca Taguchi yöntemi ile istenen deneysel sonuçlar, çalışmadaki deneysel parametreler optimize edilerek daha hızlı ve daha az deneme ile elde edilebilmektedir. Taguchi yöntemi, deneysel parametreleri optimize etmek için kullanılan uygun maliyetli ve güçlü bir metottur (Emre, 2015; Yıldırım vd., 2019).

Bu çalışmada, elektrolitik yöntemle sert krom kaplanan yapı çeliğinde kaplama parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonu incelenmiştir. Optimizasyon işleminde sertlik değeri “en büyük-en iyi” kontrol karakteristiğine göre yapılmıştır. Kaplama parametrelerinin deneysel çalışmada etki değerleri Varyans analizi (ANOVA) kullanılarak saptanmıştır.

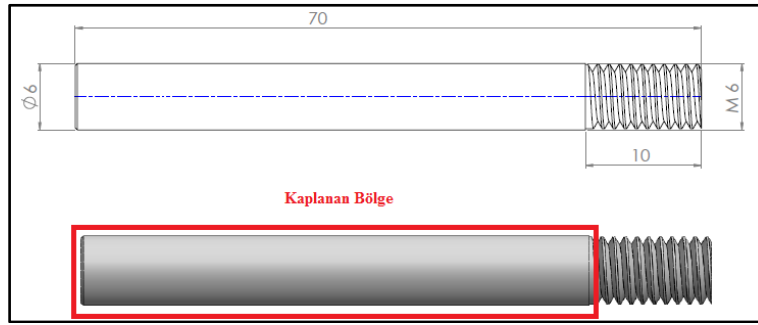
## 2. Deneysel Çalışmalar

Elektrolitik yöntemle sert krom kaplanan silindirik numunelerde kaplama parametrelerinin etkisini incelemek için endüstride kolaylıkla

bulunan, mekanik özellikleri düşük, 6 mm çapında yapısal düşük karbonlu mil kullanılmıştır. Mil numuneleri deneysel kaplama işlemine hazırlamak için CNC torna tezgâhı ile Şekil 2’de verilen ölçülere getirilmiştir. Bu ölçüler otomobillerde kullanılan turbo şarj mili ölçülerine yakındır. Deneylerde kullanılan yapı çeliğine ait kimyasal bileşim Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yapı çeliğinin kimyasal analizi (% Ağırlık)

C	Mn	Si	S	P	Fe
0.11	0.66	0.19	0.033	0.028	Kalan



**Şekil 2.** Elektrolitik sert krom kaplanan numune

Krom kaplama tankı polimerden olup içerisine elektrikli titan muhafazalı ısıtıcı yerleştirilmiş anot ve katot çubukları için lama kesitli bakır malzeme kullanılmıştır. Anotlarda ise % 7 kalay, %93 kurşun uzun şerit malzeme ve güç kaynağı olarak Mersan marka 15 volt 300 amperlik redresör kullanılmıştır. Sert krom kaplama banyosuna ait kimyasal değerler; Kromik asit ( $\text{CrO}_3$ ) 250 gr/lt Sülfürik asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 25 gr/lt gaz kesici 100 cc’lik köpük malzeme şeklindedir.

Elektrolitik sert krom kaplama öncesinde, kaplanacak malzeme, polisajlama işlemiyle üzerindeki pislik ve kirden arındırılıp temiz bir yüzey elde edilmiştir. Polisaj işleminden sonra elektrolitik yağ alma işlemi ile yüzeydeki yağ kalıntıları temizlenmiştir. Yağ alma işleminden çıkan malzemeler sırayla daldır-çıkart yöntemiyle önce saf suya sonra % 5 sülfürik asitli suya ve sonrasında da tekrar saf suya daldırılıp kaplama banyosuna girmeye hazır hale getirilmiştir. Numunelerin yağ alma temizle işlemlerinde, kaplama öncesi kaplamaya hazırlama işlemlerinde ve sert krom kaplama işlemlerinde Şekil 3’te görülen numune bağlama aparatı kullanılmıştır. Sert krom kaplama işlemlerinde değişken parametre olarak; akım yoğunluğu, anot- katot arası mesafe ve banyo sıcaklığı kullanılmıştır.

Numunelerin banyo içinde bekleme süreleri 1 saat olarak, ayrıca banyo pH değeri 5.1 olarak sabit tutulmuştur.

Deneylerde kullanılan numuneler, kaplama açısından sorun olmayan ve hatasız kaplanmış parçalardan seçilmiş ve tüm deneysel çalışmalar bu numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 2’de verilmiştir. Sert krom kaplama işleminden sonra banyodan çıkan numuneler iki aşamalı su ile yıkama ve su ile durulama aşamasından geçirilerek kurutma işlemine geçilmiştir.

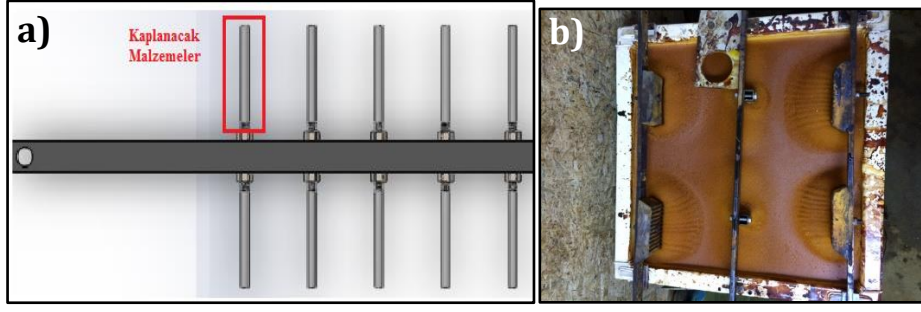
**Tablo 2.** Deneylerde kullanılan sert krom kaplama parametreleri

Akım Yoğunluğu ( $\text{Amp}/\text{dm}^2$ )	Kaplama Banyo Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	Anot-Katot Arası Mesafe (mm)
25	40	100
40	50	200
55	60	

Doğru deney tasarımının kurulması, deneysel çalışmalarda elde edilecek sonuçların doğruluğu için önem arz etmektedir. Elektrolitik yöntemle sert krom kaplamanın gerçekleştirildiği bu çalışmada, deneysel düzenek ve sonuç analiz

yöntemi olarak Taguchi  $L_{18}$  ortogonal dizin kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, sonuçları analiz edebilmek için Sinyal/Gürültü (S/N) oranı olarak

bilinen bir istatistiksel performans ölçüsü kullanılmaktadır. Bu orandaki “S” Sinyal oranını, “N” ise gürültü oranını ifade etmektedir.



Şekil 3. a) Numune bağlantı aparatı ve b) kaplama banyosu

Deney sonucuna etki eden oranlardan, sinyal oranı sistemde gerçek değeri, gürültü oranı ise deney düzeneğine katılamayan fakat deney sonucuna etki eden oranları tanımlamaktadır. Gürültü kaynakları, elde edilmek istenen performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına sebep olan tüm değişkenlerdir (Kara vd., 2017). S/N oranlarının hesaplanmasında karakteristik tipine bağlı nominal en iyi, en büyük en iyi ve en küçük en iyi metotları kullanılmaktadır (Masmıati vd., 2015). Bu çalışma, kalite karakteristiği olarak ele alınan kaplama sertlik değerinin yüksek olması arzu edildiğinden S/N oranlarının hesaplanmasında “en büyük en iyi” yaklaşımı dikkate alınmıştır. S/N oranlarının hesaplanmasında eşitlik 1’de verilen denklem kullanılmıştır. Burada; “ $y_i$ ” ölçülen sertlik değerini, “ $i$ ” gözlem değerini, “ $n$ ” bu çalışma için geçerli deneyleri ifade etmektedir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

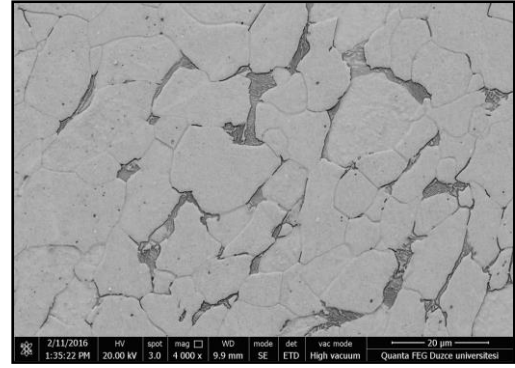
Yapısal çeliğin elektrolitik yöntemle yapılan sert krom kaplanmasında kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Kontrol faktörleri ve seviyeleri

Sembol	Kontrol Faktörleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Anot Katot Mesafesi (mm)	100	200	-
B	Akım Yoğunluğu (Amp/dm <sup>2</sup> )	25	40	55
C	Banyo Sıcaklığı (°C)	40	50	60

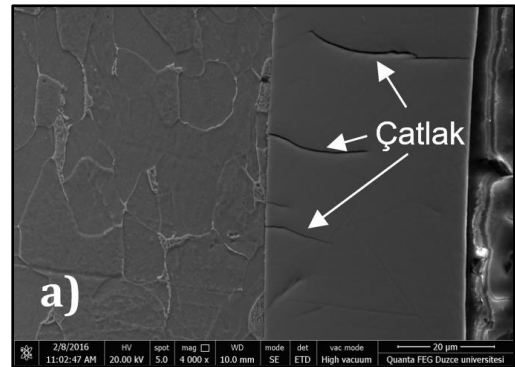
### 3. Bulgular ve Tartışma

Deneylerde kullanılan yapı çeliğine ait mikroyapı görüntüsü Şekil 4’te verilmiştir. Yapı incelendiğinde, düşük karbonlu çeliklerde görülen ferrit + sementit yapıdan oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4. Yapı çeliği malzemesi içyapısı

Mikro yapılarda kaplama bölgesinde oluşan mikro çatlaklara ait görüntüler ise Şekil 5’de verilmiştir. Yapılan literatür çalışmaları göstermiştir ki sert krom kaplama yapılan numunelerde kaplama bölgesinde mikro çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlak oluşumunun başlıca nedeni kaplama işlemi sonrasında meydana gelen, kaplamada ani sertlik artışıdır. Bu neden benzer çalışmalardaki bulgular ile paralellik göstermektedir.



Şekil 5. Numunelere ait mikro çatlak görüntüsü

### 3.1. Sertlik Optimizasyonu

Yapısal düşük karbonlu çeliğe elektrolitik yöntemle yapılan sert krom kaplama işleminin

Taguchi  $L_{18}$  deneysel tasarımına göre gerçekleştirilen optimizasyon deneyi sertlik ve aşınma sonuçları ve hesaplanan S/N oranları tahmin değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Deney tasarımı, sertlik ve S/N oranları

No	(A) Anot Katot Mesafesi (mm)	(B) Akım Yoğunluğu (Amp/dm <sup>2</sup> )	(C) Banyo Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HV <sub>0.1</sub> )	S/N Oranı (dB)	Tahmin Edilen Sertlik Değeri (HV <sub>0.1</sub> )
1.	100	25	40	743.0	57.4198	743.01
2.	100	25	50	751.6	57.5197	752.01
3.	100	25	60	765.1	57.6744	764.66
4.	100	40	40	860.2	58.6920	862.21
5.	100	40	50	869.5	58.7854	871.21
6.	100	40	60	887.6	58.9643	883.86
7.	100	55	40	789.2	57.9437	785.95
8.	100	55	50	797.3	58.0324	794.95
9.	100	55	60	802.0	58.0835	807.60
10.	200	25	40	738.2	57.3635	740.11
11.	200	25	50	748.8	57.4873	749.11
12.	200	25	60	764.0	57.6619	761.76
13.	200	40	40	855.6	58.6454	858.85
14.	200	40	50	866.7	58.7574	867.85
15.	200	40	60	884.9	58.9379	880.50
16.	200	55	40	788.3	57.9338	784.35
17.	200	55	50	794.6	58.0030	793.35
18.	200	55	60	800.8	58.0705	806.00

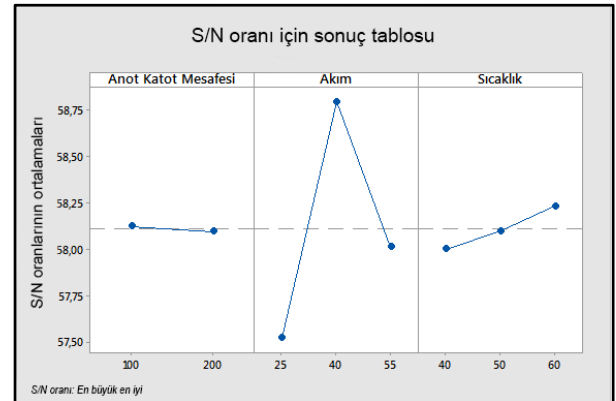
Taguchi metodunda, kalite karakteristiklerine ait optimum faktörler ve bu faktörlere ait seviyelerin belirlenmesinde S/N yanıt tablosu kullanılmakta olup sertlik üzerinde her kontrol faktörünün etkisini gösteren S/N yanıt tablosu Tablo 5’de verilmiştir. Tablodaki S/N içerisindeki en yüksek değer o faktöre ait optimum seviyeyi göstermektedir.

**Tablo 5.** Deney tasarımı, sertlik ve S/N oranları

Seviye	(A)Anot Katot Mesafesi (mm)	(B) Akım Yoğunluğu (Amp/dm <sup>2</sup> )	(C) Banyo Sıcaklığı (°C)
1	58.12	57.52	58.00
2	58.10	58.80	58.10
3	-	58.01	58.23
Delta	0.03	1.28	0.23
Sıralama	3	1	2

Tablo 5’de verilen değerler dikkate alındığında, optimum kaplama sertliğine ait seviyeleri veren S/N oranları **A1B2C3** olmuştur. Diğer bir ifadeyle anot-katot mesafesi, akım yoğunluğu ve banyo sıcaklığı için sırasıyla 58.12 (Seviye 1), 58.80 (Seviye 2) ve 58.23 (Seviye 3) optimum değerler olmuştur. Bu tablo seviye değerleri kullanılarak

oluşturulan ana etki grafiği Şekil 6’da verilmiştir. Deney tasarımı, sertlik ve S/N oranları tablosunda (Tablo 4) olduğu gibi Şekil 6’da verilen ana etki grafiğinde de en büyük S/N değerleri, kaplamada kullanılan parametrelere ait optimum seviyeleri göstermektedir. Bu değerlere göre elektrolitik sert krom kaplama işleminde, anot-katot mesafesi, akım yoğunluğu ve banyo sıcaklığı için sırasıyla optimum değerler 100 mm mesafede, 40 amper değerinde ve 60 °C sıcaklığında yapılan işlem olarak belirlenmiştir.



**Şekil 6.** S/N oranları için ana etki grafiği

### 3.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Bu deneyde kullanılan bütün kontrol faktörlerinin, birbirleri ile olan etkileşimleri, bu faktörlerin performans karakteristiğini ne kadar etkilediği, deneysel çalışmadaki parametreler farklılıkların performans karakterini ne ölçüde değiştirdiği ve bu değişim sebeplerinin belirlenebilmesi için istatistiksel Varyans analizi (ANOVA) uygulanmaktadır (Kara vd., 2017). Tablo 6'da, kaplama sertliği üzerine etki eden kontrol faktörlerinin, etki seviyelerini belirlemek amacıyla uygulanan ANOVA sonuçları verilmiştir. Bu tablo üzerinde deneysel çalışmadaki değişkenlerin önem seviyesini gösteren F değerleri ve katkı oranları yüzdesi (PCR) görülmektedir. ANOVA işlemi %95 güvenirlilik ve %5 önem seviyelerinde uygulanmıştır. Deneyde kullanılan kontrol

faktörlerin etki düzeylerinin belirlenmesinde, etki değeri en fazla olan F değeri sonuca en çok etki eden değer olarak belirlenir. Bu değer belirlenmesinde F değeri sonuçları birbirleri ile kıyaslanmaktadır. ANOVA sonuçları incelendiğinde kaplama sertliğini etkileyen en önemli parametre % 96.44 oranla akım yoğunluğu olmuştur. Banyo sıcaklığı ise % 3.18'lik oranla akım yoğunluğundan sonra ikinci etkili parametredir. Kaplama sertliği üzerinde diğerlerine göre daha düşük etkiye sahip parametre % 0.07 oranla anot katot arası mesafe olarak görülmüştür. Burada, her bir değişkenin sonuçlar üzerindeki serbestlik derecesini gösteren DF değerleriyle, kareler toplamı (SS), kareler ortalaması (MS), F değerleri ve yüzde katkı oranları (PRC) görülmektedir.

**Tablo 6.** Sertlik Değeri S/N oranları için Varyans analizi(ANOVA) sonuçları

Kaplama Parametreleri	(DF) Serbestlik Derecesi	(SS) Kareler Top.	(MS) Kareler Ort.	F-Değeri	(PRC) Katkı Oranı
Anot Katot Mesafesi	1	0.000000	0.000000	2.76	% 0.07
Akım Yoğunluğu	2	0.000020	0.000010	1882.58	% 96.44
Banyo Sıcaklığı	2	0.000001	0.000000	62.13	% 3.18
Hata	12	0.000000	0.000000	-	% 0.31
Toplam	17	0.000021			% 100.00

### 3.2. Doğrulama Testi

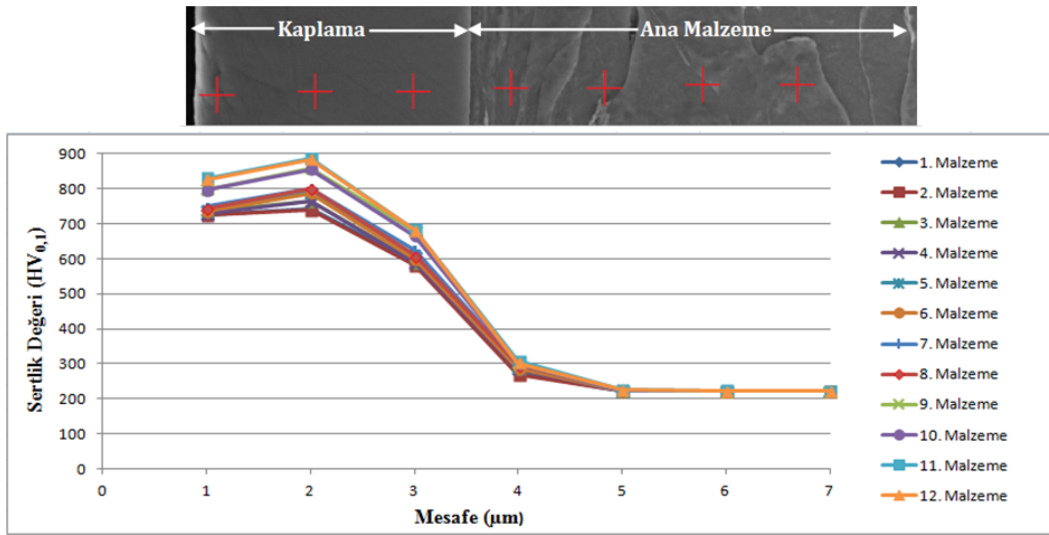
Taguchi tekniği ile optimizasyonda son aşama, optimum kaplama parametre seviyelerini kullanarak kaplama karakteristiklerinin gelişimini tahmin etme ve sonuçların karşılaştırılmasıdır. Taguchi metodu ile hesaplanan optimum değerler yapılan deney tasarımında yer aldığı için doğrulama deneyleri yapılmamıştır. Doğrulama deneyi yerine hesaplanan ve doğrulanan kaplama seviyelerinin deneysel sonuçları karşılaştırılması Tablo 7'de verilmiştir. Bu çalışma ile yapı çeliği üzerine elektrolitik yöntemle sert krom kaplamada, kaplama sertlik miktarının kaplama parametrelerinin değişimi ile değiştiği Taguchi deneysel tasarım ve optimizasyon metodu kullanılarak ispat edilmiştir. Taguchi optimizasyonunun kaplama çıktılarının performans karakteristiklerinin belirlenmesinde uygulanan basit ve güvenilir bir yöntem olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır.

**Tablo 7.** Doğrulama deney sonuçları

Tahmin Edilen Sonuçlar	Deneysel Sonuçlar	Fark
A1B2C3	A1B2C3	-
Sertlik 883.8 HV <sub>0.1</sub>	Sertlik 887.6 HV <sub>0.1</sub>	3.8
S/N 58.9362 dB	S/N 58.9643 dB	0.0281

### 3.3. Kaplama Sertliği Sonuçları

Kaplanan numunelerin yüzey sertliği DIGIROK marka cihazda, Vickers sertlik ölçüm metoduyla ölçülmüştür. Ölçme işlemi için, piramit şeklindeki elmas uca tatbik edilecek yük 100g olarak belirlenmiştir. Bu yük, 10 saniye kaplama üzerine uygulanarak piramit ucun kaplama üzerine iz bırakması sağlanıp, bırakılan izlerin mesafeleri mikroskopta incelenip sertliği ölçülmüştür. Ölçümler kaplama üst noktasından başlamış ve ana malzemeye doğru her 10 mikronluk mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara ait veri grafiği ve değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Sertlik diyagramı sonuçları incelendiğinde ana malzemedeki, kaplamaya doğru gidildikçe sertlikte artış olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, ana malzeme içerisinde bulunan karbon atomlarının kaplama içine doğru nüfuz etmesi ve o noktalarda krom karbür çökelekleri oluşturabileceği ve kaplamanın hızlı soğumasının neden olduğu düşünülmektedir. Kaplama en uç noktasına doğru gidildikçe ise sertlik miktarında çok az bir azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Numunelerde mikro sertlik ölçümü sonuçları

#### 4. Sonuçlar

Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Deneysel çalışmalarda, Taguchi  $L_{18}$  deney tasarımı ve optimizasyonu düşük karbonlu yapı çeliğinin elektrolitik sert krom kaplanması işlemi için başarılı bir şekilde uygulanmıştır.
2. En iyi kaplama sertlik değerine, 40 Amp/dm<sup>2</sup> akım yoğunluğu, 60 °C sıcaklık ve 100 mm anot-katot arası mesafede ulaşılmıştır.
3. Kaplama banyo sıcaklığının artması ile birlikte numunelerde sertlik değerinin ve aşınma değerinin arttığı tespit edilmiştir.
4. ANOVA sonuçlarına göre, sertlik değeri üzerindeki en etkili parametrenin % 96.44 oranla akım yoğunluğu olduğu % 3.18'lik oranla banyo sıcaklığı ve % 0.07 oranla anot katot arası mesafe parametrelerinin bunu takip ettiği görülmüştür.
5. Optimum sert krom kaplama şartlarındaki sertlik değeri, sırasıyla tahmin edilen ve deneysel çalışma sonucu 883.8 HV<sub>0.1</sub> ve 887.6 HV<sub>0.1</sub> olarak bulunmuştur.

#### Teşekkür

Yazarlar bu çalışmayı, 2015.07.04.392 nolu projesi ile destekleyen Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (DÜBAP) birimine teşekkür eder.

#### Kaynaklar

Almotairi, A., Warkentin, A. ve Farhat, Z., 2016. Mechanical damage of hard chromium coatings

on 416 stainless steel. Engineering Failure Analysis, 66, 130-140.

Bolelli, G., Cannillo, V., Lusvarghi, L., ve Ricco, S., 2006. Mechanical and tribological properties of electrolytic hard chrome and HVOF-sprayed coatings, 200, 2995-3009.

Borisenko, N., Zein El Abedin, S. ve Endres, F., 2017. Electrodeposition from Ionic Liquids. Electrodeposition from Ionic Liquids. Wiley, doi: 10.1002/9783527622917.

Bozyazı, E., Ürgen, M., ve Çakır, A.F., 2004. Comparison of reciprocating wear behaviour of electrolytic hard chrome and arc-PVD CrN coatings. Wear, 256, 832-839.

Browning, M.E., 1994. ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering. American Society for Metals, 118p.

Chen, A., Qiu, X., Sridharan, K., Horne, W.G., Dodd, R.A., Hamdi, A.H., Conrad, J.R., 1996. Chromium plating pollution source reduction by plasma source ion implantation. Surface and Coatings Technology, 82, 305-310.

Demirsöz, R., Polat, R., Türk, A. ve Erdoğan, G., 2018. Yüksek fırın granüle cürufunun sert kaplama uygulanmış ve uygulanmamış çeliklere karşı erozif aşındırma davranışının incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34 (1), 103-114.

Doubek, P. ve Filípek, J., 2011. Abrasive and erosive wear of technical materials. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 59, 13-21.

Emre, H.E., 2015. Taguchi Yöntemi ile Nokta Direnç Kaynaklı TWIP Çeliklerin Dayanım

- Optimizasyonu. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 293-304.
- Fedrizzi, L., Rossi, S., Bellei, F. ve Deflorian, F., 2002. Wear–corrosion mechanism of hard chromium coatings. *Wear*, 253, 1173-1181.
- Gür, A.K., 2013. Investigating the Wear Behaviour of FeCrC/B4C Powder Alloys Coating Produced by Plasma Transferred Arc Weld Surfacing Using the Taguchi Method. *Materials Testing*, 55, 462-467.
- Gür, A.K. ve Kaya, S., 2017. PTA Kaplamalarda Abrasive Aşınma Davranışının Değerlendirilmesinde; Bir Taguchi Yaklaşımı. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 29 (2), 195-202.
- İpek, R. ve Erdoğan, M., 2006. Motor yağı takviyelerinin, aşınma mekanizmalarına etkisinin deneysel araştırılması. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12, 67-78.
- Kahraman, F., Gençer, G.M. ve Karadeniz, S., 2013. Plazma nitrürlenmiş X40CrMoV5-1 yüksek alaşımlı çeliğin aşınma davranışının incelenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 28(1), 7-14.
- Kara, F., Özbek, O., Kam, M. ve Saruhan, H., 2017. AISI 4140 ıslah çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve titreşimin Taguchi metodu ile optimizasyonu, *International Academic Research Congress*, Ekim 2017, Antalya, Türkiye, s. 1132-1140.
- Karuppasamy, S., Sivan, V., Natarajan, S., Kumaresh Babu, S.P., Duraiselvam, M. ve Dhanuskodi, R., 2018. Establishment of Wear Resistant HVOF Coatings for 50CrMo4 Chromium Molybdenum Alloy Steel as an Alternative for Hard Chrome Plating. *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 100 (4), 635-645.
- Lausmann, G.A., 1996. Electrolytically deposited hardchrome. *Surface and Coatings Technology*, 86, 814-820.
- Lindsay, J.H., 1999. Decorative and Hard Chromium Plating. *Plating & Surface Finishing*, 1, 46-48.
- Masmiati, N. ve Sarhan, A.A.D., 2015. Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress – Taguchi approach. *Measurement*, 60, 267-275.
- Perianu, I.A., 2016. HVOF Thermal Spray Alternative for Hard Chrome Plating Process. *Advanced Materials Research*, 1138, 139-146.
- Rebholz, C., Ziegele, H., Leyland, A. ve Matthews, A., 1999. Structure, mechanical and tribological properties of nitrogen-containing chromium coatings prepared by reactive magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 115, 222-229.
- Salvador Barbato, R., Jilberto Ponce, F., Marcelo Jara, L., Jacqueline Cuevas, S. ve Rodrigo Egana, A., 2008. Study of the effect of temperature on the hardness, grain size, and yield in electrodeposition of chromium on 1045 steel. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 53, 1429-1432.
- Saraç, A.S., 1995. *Metal Kaplama ve Elektrokimyasal Teknolojiler*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 83s.
- Schlesinger, M. ve Paunovic, M., 2014. *Modern Electroplating*, Fifth Edition, Wiley. ISBN: 978-0-470-16778-6, New York, 205p.
- Yıldırım, M.S., Gülenç, B., Kahraman, N., Durgutlu, A., Kaya, Y. ve Çakıroğlu, R., 2019. Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Titanyum Levhaların Çekme-Makaslama Dayanımlarının Taguchi Metoduyla Optimizasyonu. *Journal of Polytechnic*, 22 (2), 567-573.