

Nikel kaplama prosesinde verimli olarak kullanılan nikel oranının yanıt yüzey yöntemi ile eniyilenmesi

Optimizing the efficiently used nickel ratio in nickel plating process by using response surface methodology

Aslan Deniz KARAOĞLAN^{1*} , Ayşe MERİÇ² 

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye.
deniz@balikesir.edu.tr, aysemeric12@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 13.04.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 17.12.2018
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.67864
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Nikel krom kaplama süreçlerinin önemli maliyet parametrelerinden biri olan nikelin verimli kullanımı rekabet için zorunludur. Bu çalışmada, metal üzerine nikel-krom kaplama yapan bir üreticinin nikel banyolarının verimliliğini arttırmak amacıyla, proses parametreleri eniyilenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, deney tasarımı ve eniyileme tekniklerinden biri olan yanıt yüzey yönteminden (YYY) yararlanılmıştır. Nikel banyolarında; iş parçasının yüzeyine yapılan nikel oranı maksimize edilirken; süreci etkileyen faktörler olarak, sıcaklık, nikel sülfat (NiSO_4) oranı, nikel klorür (NiCl_2) oranı, borik asit (H_3BO_3) oranı, pH ve parlattıcı oranı seçilmiştir. Çalışmanın sonunda, banyolardaki verimli kullanılan nikel oranı %80'den %95'e çıkarılmıştır.

Anahtar kelimeler: Nikel kaplama, Nikel banyolarındaki verimli kullanılan nikel oranı, Yanıt yüzey yöntemi (YYY)

Abstract

Efficient usage of nickel, one of the important cost parameters of nickel chrome plating processes, is compulsory for competing. In this study, it is aimed to optimize the process parameters of the nickel baths of a manufacturer that plates nickel-chromium on metal. For this purpose, response surface methodology (RSM), one of the experimental design and optimization techniques, has been used. In nickel baths; while the rate of nickel sticking to the surface of the workpiece is maximized; temperature, nickel sulfate (NiSO_4) ratio, nickel chloride (NiCl_2) ratio, boric acid (H_3BO_3) ratio, pH and polisher ratio were selected as factors affecting the process. At the end of the study, the efficiently used nickel ratio in the bathrooms was increased from 80% to 95%.

Keywords: Nickel plating, Ratio of efficiently used nickel in nickel baths, Response surface methodology (RSM)

1 Giriş

1930'larda nikel krom kaplamanın ticari boyut kazanmasından bu yana, kullanımı çok hızlı bir şekilde genişleme göstermiş ve üretim verimliliğini sağlayabilmek ve maliyetleri düşürebilmek için pek çok araştırma yapılmıştır. Nikelin metal, otomotiv ve mobilya sanayi başta olmak üzere pek çok kullanım alanı mevcuttur [1]. Bu çalışmada, mobilya sektöründe kullanılan yardımcı metal malzemelere uygulanan nikel kaplama işlemi üzerine yoğunlaşmıştır.

Literatürde bu konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan seçilmiş örnekler izleyen paragrafta özetlenmiş olup; bu çalışmalar yüzey kalitesi, korozyon, aşınma direnci, sertlik, kaplama banyosunun kararlılığı gibi çok farklı çıktıları tek tek veya bir kısmını birlikte eniyileme üzerine yoğunlaşmaktadır. Çıktılar üzerinde etkili faktör olarak çoğunlukla pH ve banyo karışım reçeteleri kullanılmıştır. Nikel kaplama ile ilgili detaylı bilgi için Loto [2] ve Zhang ve diğ. [3] tarafından sunulan literatür taramalarını gözden geçirmek okuyucular için yararlı olacaktır. Nikel kaplama prosesi oldukça eski ve yaygın bir proses olmakla birlikte, akademik çalışmalar çoğunlukla nikelin, banyodan sonra geri kazanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Proses esnasında işlem gören metal parça üzerine kaplanan nikel miktarını maksimize etme üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmanın konusu ile ilgili seçilmiş makalelerden biri Idhayachander ve Palanivelu [4]'ün çalışmasıdır. Yazarlar, nikelin elektrolitik geri kazanımı üzerinde çalışırken faktör olarak mevcut yoğunluk, zaman, karıştırma ve karışımın pH değerlerini kullanmıştır. Çalışmanın sonunda 5 A/dm² akım yoğunluğunda mevcut verimlilik maksimum %80.18 olarak gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışma ise Li ve diğ. [5]'ne aittir.

Yazarlar, banyoda fosfor giderimi ve bunun yanında nikel kazanımı üzerine çalışmış, faktör olarak karışımın pH değerini kullanmışlardır. Çalışmanın sonunda fosfor geri kazanım verimliliği %94.8 olarak ölçülürken, nikel kazanımı %62 olarak gözlemlenmiştir.

Literatürde yer alan benzer çalışmalarda ise ağırlıklı olarak nikel kaplama süreçlerinde nikel kaplama kalınlığının eniyilenmesine yönelik çalışmalar yer almaktadır. Khoo ve diğ. [6], elektroliz nikel kaplama prosesi için bulanık mantık ile çalışan kontrolör geliştirmiş ve pH seviyesi, banyo sıcaklığı gibi pek çok parametreyi aynı anda analiz ederek nispeten kararlı bir nikel kaplama kalınlığı elde etmeye çalışmışlardır. Jayakrishnan ve diğ. [7] nikel krom kaplama prosesinde metalin parça yüzeyine dağılımı ve süreç iyileştirmesi üzerine çalışmışlardır. Wu ve diğ. [8], elektroliz kaplama banyosu bileşimi ve proses parametrelerini kullanarak kaplama oranı ve fosfor içeriğinin (P%) simülasyonu ve tahmini için bir yapay sinir ağı geliştirmişlerdir. İyileştirilmiş süreç parametrelerine dayanarak, geri yayılım öğrenme algoritması ile üç katmanlı yapay sinir ağına (YSA) dayanan model, ortogonal deneylerden elde edilen veri setleri kullanılarak eğitilmiş ve işlem parametrelerinin ve performansının eniyilenmesi sağlanmıştır. Tian ve diğ. [9] kullanılan sülfür miktarı ve farklı kaplama koşullarının nikel kaplama süreci üzerine etkilerini incelemiştir. Khedekar ve diğ. [10] Taguchi L16 ortogonal dizisinden yararlanarak deney tasarlamış ve genetik algoritma kullanarak solisyon yoğunluğu ve işlem süresi proses parametrelerini için nikel krom kaplama kalınlığını eniyilemeye çalışmışlardır.

Literatür taraması göstermiştir ki, nikelin farklı yöntemlerle verimli bir şekilde nikel banyosundan geri kazanımı üzerine

yapılmış çalışmalar [2],[3] bulunmakla beraber; proses sonunda banyodan geri kazanılması gereken (kullanılmadan kalan) nikel miktarını azaltacak şekilde proses parametrelerinin eniyilenmesi üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada süreci etkileyen faktörlerden sıcaklık, nikel sülfat (NiSO₄) oranı, nikel klorür (NiCl₂) oranı, borik asit (H₃BO₃) oranı, pH ve parlatici oranının eniyi değerleri belirlenerek; nikel banyolarında iş parçasının yüzeyine yapışan nikel oranı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan nikelin verimli geri kazanımından ziyade, kullanılmadan banyoda kalan (başka bir deyişle geri kazanılacak) miktarı minimize edecek süreç parametrelerinin değerlerini belirlemek bu çalışmanın yenilikçi yönünü oluşturmaktadır. Banyoda kalan miktarın minimize edilmesi daha fazla ürünün nikel ile kaplanabileği veya parçaların üzerine kaplanan nikel miktarının daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca çalışmada kullanılan girdi faktörleri listesi de literatürdeki diğer çalışmalara göre farklıdır.

İzleyen bölümde yanıt yüzey yöntemi ve üzerinde çalışılan üretim sistemi açıklanmış; 3. Bölümde deneysel veriler sunulmuştur. Son bölümde ise tartışma ve sonuçlar verilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Yanıt yüzey yöntemi (YYY)

Deney tasarımı yöntemleri, ortogonal (dik) dizilerden yararlanarak çıktı (yanıt) üzerinde etkili faktörlerin (girdi değerkenleri) ve seviyelerinin kombinasyonlarını belirleyerek deney tasarlamayı, tasarlanan deneylerden elde edilen çıktılarla faktörler arasındaki matematiksel ilişkiyi kurmayı ve kurulan matematiksel ilişkiyi kullanarak tahminleme, eniyileme ve süreçler hakkında çıkarımlar yapmayı sağlayan istatistiksel ve matematiksel yöntemlerin bir birleşimidir [11]-[14].

Yaygın olarak kullanılan deney tasarımı yöntemleri yanıt yüzey yöntemi (YYY), faktöriyel tasarım ve Taguchi yöntemidir. Taguchi yöntemi sinyal/gürültü (S/N) oranı adı verilen ve kontrol edilebilen değerkenlerin çıktı üzerindeki etkisini, kontrol edilemeyen değerkenlerin çıktı üzerine olan etkisine oranlayarak kararlı sistemler tasarlamak için faktör değerlerini arayan bir yöntemdir. Bu yöntemde amaç, kontrol edilebilen değerkenlerin çıktı üzerine etkisinin maksimum olduğu, kontrol edilemeyen değerkenlerin etkisinin ise minimum olduğu sistemleri tasarlayabilmektir [12],[15]. Yöntem, faktörlerin deney tasarımı aşamasında kullanılan seviye değerlerinin en iyi kombinasyonunu bularak optimum çıktı değerini elde etmeyi amaçlar. Örneğin Tablo 1'deki sıcaklık faktörü için 45 ve 60 °C değerlerinden biri en iyi çözümdedir yer alır (örneğin 48 °C gibi bir ara değer bulunamaz). Taguchi bu ana değerleri kullanıp, ara değerlere yer vermediğinden dolayı en iyi çözüme yakın sonuç verir. Taguchi yönteminde seçilen faktörler nicel olabileceği gibi nitel değerkenlerde olabilir ve faktör seviyelerinin eşit olmasına gerek yoktur [12],[15].

Tablo 1: Kaplanan nikel oranını etkileyen faktörler.

| Faktör Adı | Kısaltma | Birimi | Min. | Maks. |
|--------------------|----------------|--------|------|-------|
| Sıcaklık | X ₁ | °C | 45 | 60 |
| Nikel Sülfat oranı | X ₂ | g/l | 70 | 85 |
| Nikel Klorür oranı | X ₃ | g/l | 14 | 20 |
| Borik Asit oranı | X ₄ | g/l | 37 | 45 |
| pH | X ₅ | | 4 | 5.5 |
| Parlatici oranı | X ₆ | g/l | 2 | 10 |

Bir diğer yaygın kullanılan deney tasarımı yöntemi olan faktöriyel tasarımda da yine faktörler nicel veya nitel olabilir ancak faktörler sadece 2 seviyeli olabilir. Taguchi yönteminin tersine faktöriyel tasarımda girdiler ile çıktılar arasındaki ilişki lineer regresyon denklemleri ile ifade edilebilir. YYY'de ise sadece nicel değerkenler için modelleme yapılabilir [11],[16]. Faktöriyel tasarım ve YYY, faktörler ile çıktı arasındaki matematiksel ilişkiyi regresyon denklemleri ile hesapladıkları için en iyi çözümleri faktörlerin ara değerli kombinasyonları ile birlikte hesaplar. Taguchi'de anlatılan sıcaklık değerkeni örneğini yeniden ele alacak olursak, faktöriyel tasarım ve YYY ile 45 ve 60 °C arasında faktör seviyeleri olan bir faktör için 48 °C gibi bir ara değer bulmak mümkündür. Ancak faktöriyel tasarım faktörlerle çıktı arasındaki ilişkiler doğrusal olduğunda, YYY ise aradaki ilişki parabolik olduğunda kullanılabilir yöntemlerdir [11]-[14]. YYY'nin matematiksel formülü Denklem (1)'de verildiği gibidir:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (1)$$

Burada, Y çıktıyı, Y girdi değerkenlerini (faktörler), X_iX_j çarpımları değerkenler arasındaki etkileşimleri; β katsayıları model parametrelerini, ε ise hata terimini göstermektedir. Regresyon modeli Denklem (2)'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır:

$$Y = \beta X + \epsilon \quad (2)$$

Burada, Y çıktı matrisini, X girdi matrisini, β model parametrelerini gösteren matrisi, ε ise artık terimleri (residual) gösteren matrisi temsil etmektedir. X matrisinin 1. sütunu sabit terimi (β₀)'ı temsil etmek üzere 1'ler sütunundan oluşurken, diğer sütunları ise Denklem (1)'de verilen sırada faktör değerlerinden oluşur. Y matrisi ise çıktı değerlerinin yer aldığı bir sütun vektördür. Model parametrelerini içeren β matrisi ise Denklem (3)'te verildiği şekilde hesaplanmaktadır:

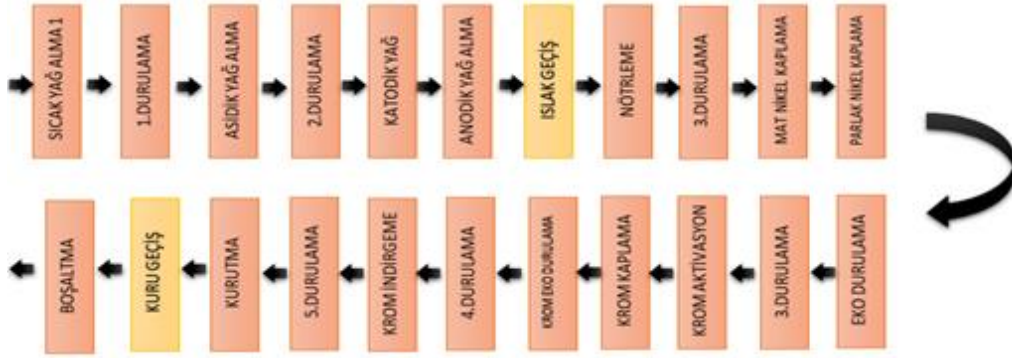
$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y^T \quad (3)$$

Denklemde verilen T transpoz alma işlemine ifade etmektedir. Bu aşamadan sonra elde edilen bu matematiksel ilişki kullanılarak 'Gradient Search' metodu yardımıyla eniyileme yapılabilir [11],[13],[14]. Yapılan çalışmada Nikel miktarı (Y) ile faktörler (X) arasındaki ilişkinin bulunması amaçlanmıştır. X ve Y matrislerini oluşturmada kullanılan veriler 3. Bölümde verilmiştir. Modelleme Minitab istatistiksel analiz programı yardımıyla yapılmış olup, eniyileme aşamasında ise aynı programın 'Response Optimizer' modülü kullanılmıştır.

2.2 Ele alınan üretim sistemi

Bu çalışmada metal sanayinde faaliyet gösteren bir firmadaki nikel krom kaplama sürecinde kullanılan nikel banyolarının verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Firma; mobilya, otomotiv, inşaat sektörlerine hem ürün üretimi hem de kaplama işlemi yapmaktadır. Ticari gizlilik nedeniyle firma tanıtımı yapılmamıştır. Firmanın iş aķıřı Şekil 1'de verilmiştir.

Üretim sisteminde işlem görececek olan parçalar öncelikle askılara alınarak banyolara girmeye hazır hale getirilir. Daha sonra parçalar ilk banyo olan sıcak yağ alma banyosuna alınarak parçalar yüzeylerindeki kirlerden arındırılır ve durulanır. Asidik yağ alma; kaynak yanıkları ve sıcak yağ almadan oluşan lekeleri temizler ve yüzeyin parlamasını sağlar.



Şekil 1: Kaplama prosesinin iş akış şeması.

2. durulamada asidik yağ almadan sonra parçalar asitten arınması için durulama banyosunda durulanır. Katodik ve Anodik yağ alma aşamasında, banyoda parça sayısına ve kaplama kalitesine göre elektrik akımı verilir. Asidik olan Nötrleme banyosunun ardından 3. durulama ile anodik ve katodik yağ alma işlemlerinden kalma kimyasallar temizlenir. Mat nikel kaplama aşamasında hazırlık işlemleri biter ve kaplama işlemine başlanır.

Bu banyonun içinde parlatici yoktur. Parlak nikel kaplama işlemi, mat nikel kaplama işlemi ile başladığı için bu aşamada kaplama kolaylaşır. Ardından parçalar kuru geçişe girer ve boşaltma istasyonlarında işlem sonlanır. Bu çalışma kaplama sürecinin parlak nikel banyolarında gerçekleştirilmiştir. Parlak nikel banyolarında iş akışında açıklandığı gibi birçok farklı kimyasal bulunmaktadır. Bu kimyasallardan en önemli ve en maliyetli olanı nikelidir. Nikel banyolarında iş parçalarına yapışan nikel oranı krom kaplama için çok önemli bir faktördür.

Nikel banyosu oluşturulurken kaplanacak iş parçasına göre havuz içinde kullanılacak nikel miktarı iş emri ile önceden belirlenmektedir. Yapılan çalışmada banyoda hurdaya çıkan nikel miktarını azaltmak, banyodaki nikeli daha çok iş parçası üzerinde kullanmak amaçlanmıştır. Hurdaya çıkan nikel miktarını azaltmak (havuzda iş parçası üzerine kaplanmadan kalan ve sonra kullanılmadan sistemden atılan çözelti içindeki nikel) aynı miktarda nikelde daha çok iş parçası kaplayabilme anlamına gelmektedir. İş parçası sayısı sabit olsa dahi, bu durumda iş parçasının üzerine yapışan nikel miktarı daha fazla olacak ve ürün kalitesi artacaktır. Bu da önemli bir hammadde olan nikelin daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada aynı miktarda nikelde daha fazla iş parçası kaplayabilme ve fire oranını düşürme olanağı sağlanmış ve daha az hammadde firesi verilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi kaplama kalınlığı proses başlamadan önce planlanmakta ve buna uygun miktarda nikel banyo çözeltisine katılmaktadır. Ancak elde edilmek istenen bu kaplama kalınlığına ulaşabilmek için iş parçasının banyoda durması gereken süre ve banyonun bileşenleri değişmektedir. Kaplama işlemi sonunda kontrol edilemeyen faktörlerin de etkisiyle kaplama kalınlıkları değişkenlik gösterebilmektedir. Her ne kadar kaplanmak istenen ideal nikel miktarı parça yüzeyine %100 tutunmasa da, kalite alt tolerans limitlerini sağlayan iş parçaları yine de müşteriye sevk edilebilmektedir (mevcut durumda tutunma oranı %80'dir). Müşteri memnuniyeti ve kalite düzeyinin artırılabilmesi için istenilen kalınlıkta ve kalitede kaplama yapılması firma için önem arz etmektedir. Üretim sisteminde her bir iş emri için ayrı banyo reçetesi hazırlanmakta ve

banyoya ilgili iş emrindeki tüm iş parçaları gruplar halinde girmektedir. Aynı iş emrindeki iş parçaları için kaplama kalınlığı ve gereken nikel miktarı aynıdır. Bu durumda banyoya giren iş parçalarının üzerinde tutunması istenen nikel miktarı (beklenen değer) ile gerçekte kaplanan miktar (gözlenen) arasında düşük fark olması, başka bir deyişle kullanılmadan atılan nikel oranının düşük olması istenmektedir. Çünkü sonraki iş emirlerinde havuz niteliğini kaybettiği için boşaltılarak temizlenmekte ve yeni reçete oluşturulmaktadır. Boşaltılan havuzda kalan nikel ise hurdaya ayrılmaktadır. Aynı iş parçaları için hazırlanan banyodaki nikelin parça üzerine tam verimle yapışması kaplama kalitesini arttırmaktadır. Aynı zamanda, nikelin kullanılmadan atılması yerine parça üzerine daha çok kaplanabilmesi ile birlikte kalite düzeyi arttırılacak, katma değer yaratılacak ve fire nikel miktarı düşürülecektir. Bu durum hammadde maliyetlerini de düşürecektir.

Bu sebeple bu çalışmanın amacı, nikel banyolarındaki iş parçasına yapışan nikel miktarını arttırmak ve maliyetleri düşürmektir. Mevcut proseste banyoda bulunan nikel %80 verimle kullanılmaktadır. Başka bir deyişle banyoda kullanılan nikelin %80'ni iş parçasına yapışmakta, kalan %20'lik kısmı verimsiz kullanılmakta, başka bir deyişle hurdaya çıkmaktadır. Banyodaki verimli kullanılan nikel miktarının maksimize edilmesi, iş parçasının üzerine yapılan kaplamanın nikel miktarının arttığını gösterir ki, bu da yüzey kalitesini ve kaplamanın ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. Sıcaklık (°C), nikel sülfat oranı (gram/litre: g/l), nikel klorür oranı (g/l), borik asit oranı (g/l), pH, parlatici oranı (g/l) faktörlerinin değerlerinin az veya çok olması kaplama işlemi gerçekleştirildikten sonra yüzeyde soyulmalar, çatlama v.b. kalite sorunlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Çatlama veya soyulma görülen ürünler hurdaya çıkarılmaktadır. Bu parametrelerin oranlarının ayarlanamaması günlük kaplama miktarını azaltmakta, birim maliyetleri yükseltmekte ve rekabetin yoğun olduğu sektörde firmanın rekabet edebilirliğini güçleştirmektedir. Bu sebeple parametrelerin eniyelenmiş değerlerinin araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı hurdaya çıkan nikel oranını en küçükleyen (başka bir deyişle ürünler üzerine kaplanan nikel miktarını en büyükleyen) faktör seviyelerinin değerlerinin araştırılmasıdır. Çalışmada sinema koltuklarının montajlandığı metal ayakların kaplama işlemine ait veriler kullanılmıştır. Ürün hakkında detaylı bilgiler ticari gizlilik nedeniyle açıklanmamıştır.

3 Deneysel çalışma

Çalışmada nikel maddesinin daha verimli kullanılması sağlanarak kaplamanın yzey kalitesini arttırmak ve maliyetleri dűřürmek amaçlanmıştır. Çıktı değişkeni olarak banyo sűrecinde parça yzeyine kaplanabilen nikel miktarı (g/l) alınmıştır. Çıktı değişkeninin maksimize edilmesi ile doğru orantılı olarak, kullanılmadan banyoda kalan nikel miktarı minimize edilmiş olacak ve verimlilik arttırılacaktır. Kaplamada kullanılan nikel miktarı üzerinde etkili faktűrler ve seviyeleri geçmiş tecrűbelerden yararlanılarak belirlenmiştir. Tablo 1’de faktűrler ve seviyeleri verilmiştir.

Faktűrler ve seviyeleri belirlendikten sonra ortogonal dizilere dayalı deney tasarımı yapılarak (gűzlenecek faktűr deđerleri kombinasyonunun belirlenmesi), her bir deney kombinasyonu için çıktı deđerinin ۆlulmesi gerekmektedir. Ancak çalıřma ۆretim devam ettiđi sűrekli akıř ۆzelliđinde bir sistemde gerçekleřtirilmiř olup, ۆretim akıřının bozulmaması için girdi deđerlerinin minimum ve maksimum sınırlarına dikkat edilerek 58 adet gűzleme ait veriler modelleme amacıyla kullanılmıřtır. Deneysel tasarım Central Composite Design (CCD) modeline gűre gerçekleřtirilmiřtir. Tablo 2’de bu tasarıma gűre yapılmıř deneylere ait tasarım noktaları ve deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiřtir. Tablo 2’de verilen gűzlem deđerleri kullanılarak Denklem (1-3)’te verilen forműller yardımıyla Denklem (4)’te verilen matematiksel iliřki Minitab istatistiksel analiz programı yardımıyla hesaplanmıřtır. Ardından bu matematiksel modelde Tablo 2’de verilen X_i deđerlerini yerine konarak (\hat{Y}_i) deđerleri hesaplanmıřtır. Gűzlenen (Y_i) ve matematiksel modelden tahmin edilen (\hat{Y}_i) çıktı deđerleri Tablo 2’de verilmiřtir. Tabloda gűzlenen çıktı deđerleri, orijinal gűzlem deđerlerinin virgűlden sonra 2 haneye yuvarlanmıř hali olarak okuyucuya sunulmuřtur. Minitab ۆzet analiz raporu ařađıdaki gibidir:

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|----------------|----|---------|---------|---------|--------|-------|
| Regression | 12 | 1464,65 | 1464,65 | 122,054 | 209,88 | 0,000 |
| Linear | 6 | 1367,12 | 120,10 | 20,017 | 34,42 | 0,000 |
| Square | 6 | 97,53 | 97,53 | 16,255 | 27,95 | 0,000 |
| Residual Error | 45 | 26,17 | 26,17 | 0,582 | | |
| Total | 57 | 1490,82 | | | | |

R-Sq = 98,24% R-Sq(pred) = 97,15% R-Sq(adj) = 97,78%

Minitab analiz raporları incelendiđinde regresyon denkleminin %5 anlam dűzeyinde anlamlı olduđu gűrűlmektedir (P= 0.000 < $\alpha=0.05$). $R^2=$ %98.24 olarak hesaplanmıřtır. Buna gűre Denklem (4)’te verilen matematiksel modelde yer alan sıcaklık, nikel sűlfat oranı, nikel klorűr oranı, borik asit oranı, pH ve

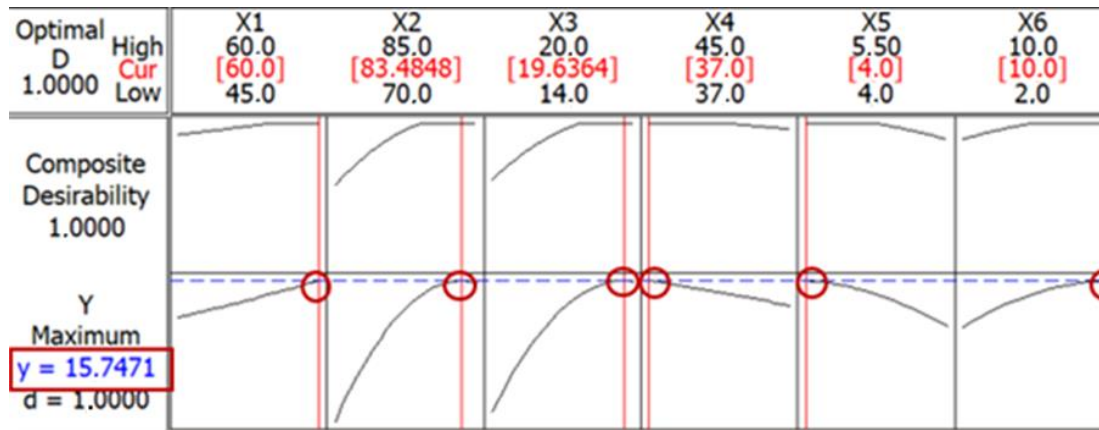
parlatıcı oranı; çıktıdaki deđerimin %98.24’űnű açıklamaktadır. Geriye kalan %1.76’lık deđerim modelde yer almayan bařka faktűrlerden kaynaklanmaktadır. Belirleme katsayısının deđerini oldukça iyi olup Denklem (4)’te verilen modelin çıktıdaki deđerimi iyi bir řekilde açıklama yeteneđine sahip olduđunu gűstermektedir. Benzer řekilde $R^2(\text{adjusted})=$ %97.78 olarak hesaplanmıřtır. $R^2(\text{adjusted})$ deđerine ise t-testi yardımıyla modeldeki her bir parametrenin anlamlı olup olmadıđına bakılıp, anlamsız parametreler Denklem (4)’ten çıkarıldıktan sonra yeni bulunan matematiksel denklemin yardımıyla hesaplanan R^2 deđerini gűstermektedir. R^2 ve $R^2(\text{adjusted})$ deđerleri birbirlerine yakın olduđundan dolayı (fark= %0.47) modelin indirgenmesine gerek duymamıřtır. Minitab raporuna gűre $R^2(\text{prediction})=$ %97.15 olarak bulunmuřtur. Bu sonuç ise matematiksel model belirlenirken kullanılmayan veriler (Tablo 2’de verilen gűzlem deđerleri yerine, Tablo 3’te verilen dođrulama deneylerine ait gűzlem deđerleri) kullanılarak tahminde bulunulması durumunda modelin R^2 deđerini gűstermektedir. R^2 deđerlerine gűre yapılan analiz modelin kullanılabilir olduđunu gűstermektedir. Tabloda verilen Y_i ve \hat{Y}_i sırasıyla gűzlenen ve matematiksel modelden tahmin edilen nikel miktarlarını gűstermektedir.

Tablo 2’de verilen veriler yardımıyla, faktűrler ve çıktı değerini olan kaplamada kullanılabilen nikel miktarı arasında kurulan matematiksel model aşağıdaki Denklem (4)’te verilmiştir:

$$Y = -322.894 - 0.406X_1 + 6.385X_2 + 8.254X_3 - 0.054X_4 - 0.317X_5 + 0.618X_6 + 0.004X_1^2 - 0.039X_2^2 - 0.220X_3^2 + 0.002X_4^2 + 0.094X_5^2 - 0.042X_6^2 \quad (4)$$

Denklem (4)’űn performansını test etmek amacıyla yapılan dođrulama deneyleri ařađıdaki Tablo 3’te verilmektedir. Tablo 3’te verilen dođrulama deneyleri, matematiksel modelin genel olarak iyi bir performans sergilediđini ve dolayısıyla modelin eniyileme amacıyla kullanılabileceđini gűstermektedir. Eniyileme ařamasında Minitab istatistiksel analiz programının “Response Optimizer” modűlűnden yararlanılmıřtır. řekil 2’de eniyileme amacıyla elde edilen grafik verilmiřtir.

Eniyileme ařamasında “Gradient Descent” yűntemine gűre gradyan arama yapılmıř, hedef deđer olarak Minitab’da maksimizasyon seçeneđi seçilmiř ve sonuçlar řekil 2’de sunulmuřtur. řekil 2 incelendiđinde “Desirability function” deđerlerinin tepe noktalarıda olduđu ve sonuun istenilen maksimizasyonu sađladıđı gűrűlmektedir.



řekil 2: Minitab ‘Response Optimizer Modűlű’ eniyileme grafiđi.

Tablo 2: Gözlenen değerler tablosu.

| Deney No | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | Y _i (g/l) | \hat{Y}_i (g/l) |
|----------|----|----|----|----|-----|----|----------------------|-------------------|
| 1 | 45 | 70 | 14 | 37 | 4 | 2 | 0.25 | 0.48 |
| 2 | 55 | 70 | 14 | 37 | 4 | 2 | 0.53 | 0.79 |
| 3 | 60 | 70 | 14 | 37 | 4 | 2 | 0.45 | 1.27 |
| 4 | 45 | 80 | 14 | 37 | 4 | 2 | 6.30 | 6.51 |
| 5 | 45 | 85 | 14 | 37 | 4 | 2 | 6.66 | 6.63 |
| 6 | 45 | 70 | 18 | 37 | 4 | 2 | 4.80 | 5.30 |
| 7 | 45 | 70 | 20 | 37 | 4 | 2 | 5.65 | 5.07 |
| 8 | 45 | 70 | 14 | 40 | 4 | 2 | 0.51 | 0.83 |
| 9 | 45 | 70 | 14 | 45 | 4 | 2 | 0.60 | 1.50 |
| 10 | 45 | 70 | 14 | 37 | 5 | 2 | 0.96 | 1.01 |
| 11 | 45 | 70 | 14 | 37 | 5.5 | 2 | 0.65 | 1.35 |
| 12 | 45 | 70 | 14 | 37 | 4 | 6 | 0.83 | 1.61 |
| 13 | 45 | 70 | 14 | 37 | 4 | 10 | 0.90 | 1.39 |
| 14 | 45 | 70 | 14 | 37 | 4 | 2 | 0.98 | 0.48 |
| 15 | 45 | 70 | 14 | 37 | 4 | 2 | 2.01 | 0.48 |
| 16 | 55 | 80 | 14 | 37 | 4 | 2 | 6.70 | 6.81 |
| 17 | 55 | 80 | 18 | 37 | 4 | 2 | 11.50 | 11.64 |
| 18 | 55 | 80 | 18 | 40 | 4 | 2 | 12.01 | 11.99 |
| 19 | 55 | 80 | 18 | 40 | 5 | 2 | 12.56 | 12.52 |
| 20 | 55 | 80 | 18 | 40 | 5 | 6 | 13.38 | 13.64 |
| 21 | 55 | 80 | 18 | 40 | 5 | 6 | 14.36 | 13.64 |
| 22 | 60 | 85 | 14 | 37 | 4 | 2 | 7.10 | 7.42 |
| 23 | 60 | 85 | 20 | 37 | 4 | 2 | 13.25 | 12.01 |
| 24 | 60 | 85 | 20 | 45 | 4 | 2 | 14.23 | 13.03 |
| 25 | 60 | 85 | 20 | 45 | 5.5 | 2 | 13.05 | 13.89 |
| 26 | 60 | 85 | 20 | 45 | 5.5 | 10 | 13.95 | 14.81 |
| 27 | 60 | 85 | 20 | 45 | 5.5 | 10 | 15.00 | 14.81 |
| 28 | 45 | 80 | 18 | 37 | 4 | 2 | 11.10 | 11.33 |
| 29 | 45 | 85 | 20 | 37 | 4 | 2 | 11.10 | 11.22 |
| 30 | 45 | 80 | 18 | 40 | 4 | 2 | 11.61 | 11.68 |
| 31 | 45 | 85 | 20 | 45 | 4 | 2 | 12.00 | 12.24 |
| 32 | 45 | 80 | 18 | 40 | 5 | 2 | 12.16 | 12.21 |
| 33 | 45 | 85 | 20 | 45 | 5.5 | 2 | 12.60 | 13.11 |
| 34 | 45 | 80 | 18 | 40 | 5 | 6 | 13.02 | 13.34 |
| 35 | 45 | 85 | 20 | 45 | 5.5 | 10 | 13.50 | 14.02 |
| 36 | 45 | 80 | 18 | 40 | 5 | 6 | 13.96 | 13.34 |
| 37 | 45 | 85 | 20 | 45 | 5.5 | 10 | 14.55 | 14.02 |
| 38 | 45 | 70 | 18 | 40 | 4 | 2 | 6.35 | 5.65 |
| 39 | 45 | 70 | 20 | 45 | 4 | 2 | 5.55 | 6.09 |
| 40 | 45 | 70 | 18 | 40 | 5 | 2 | 5.96 | 6.18 |
| 41 | 45 | 70 | 20 | 45 | 5.5 | 2 | 7.23 | 6.96 |
| 42 | 45 | 70 | 18 | 40 | 5 | 6 | 6.68 | 7.31 |
| 43 | 45 | 70 | 20 | 45 | 5.5 | 10 | 7.05 | 7.87 |
| 44 | 45 | 70 | 18 | 40 | 5 | 6 | 7.66 | 7.31 |
| 45 | 45 | 70 | 20 | 45 | 5.5 | 10 | 8.10 | 7.87 |
| 46 | 45 | 70 | 14 | 40 | 5 | 2 | 1.06 | 1.36 |
| 47 | 45 | 70 | 14 | 45 | 5.5 | 2 | 4.20 | 2.37 |
| 48 | 45 | 70 | 14 | 40 | 5 | 6 | 1.88 | 2.49 |
| 49 | 45 | 70 | 14 | 45 | 5.5 | 10 | 2.10 | 3.28 |
| 50 | 45 | 70 | 14 | 40 | 5 | 6 | 2.86 | 2.49 |
| 51 | 45 | 70 | 14 | 45 | 5.5 | 10 | 5.23 | 3.28 |
| 52 | 45 | 70 | 14 | 37 | 5 | 6 | 2.30 | 2.14 |
| 53 | 45 | 70 | 14 | 37 | 5.5 | 10 | 1.50 | 2.26 |
| 54 | 45 | 70 | 14 | 37 | 5 | 6 | 2.35 | 2.14 |
| 55 | 45 | 70 | 14 | 37 | 5.5 | 10 | 3.24 | 2.26 |
| 56 | 45 | 70 | 14 | 37 | 4 | 6 | 1.80 | 1.61 |
| 57 | 45 | 70 | 14 | 37 | 4 | 10 | 1.95 | 1.39 |
| 58 | 60 | 85 | 20 | 45 | 5.5 | 10 | 15.00 | 14.81 |

Tablo 3: Doğrulama deneyleri.

| Deney No | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | Y_i (g/l) | \hat{Y}_i (g/l) |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------------|
| 1 | 55 | 70 | 20 | 37 | 4 | 2 | 5.350 | 5.378 |
| 2 | 55 | 80 | 14 | 45 | 5 | 6 | 8.675 | 9.492 |
| 3 | 55 | 85 | 18 | 37 | 5.5 | 2 | 12.250 | 12.623 |
| 4 | 45 | 70 | 20 | 40 | 5 | 2 | 6.006 | 5.951 |
| 5 | 60 | 70 | 18 | 45 | 4 | 2 | 5.850 | 7.111 |
| 6 | 45 | 70 | 14 | 41 | 5 | 10 | 2.831 | 2.398 |
| 7 | 55 | 80 | 18 | 37 | 4.5 | 6 | 12.325 | 13.006 |
| 8 | 60 | 80 | 14 | 45 | 5 | 10 | 8.856 | 9.758 |

Şekil 2’de gösterilen eniyileme grafiğine göre $X_1:60$, $X_2:83.49$, $X_3:19.64$, $X_4:37$, $X_5:4$, $X_6:10$ değerlerindeyken, çıktı değişkeni olan ve kaplanan nikel miktarını gösteren $\hat{Y}_i:15.747$ g/l ile maksimum değerindedir. Sonucun doğrulanması için yapılan gerçek denemede ise bu değer $Y_i:15.690$ olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi sonuçlar birbiri ile örtüşmektedir. Faktörlerin en iyi seviye değerleri bulunarak parça üzerine kaplanabilen nikel oranı maksimize edilmiştir ve böylece çözelti içinde kullanılmadan kalan nikel miktarı minimize edilerek daha verimli bir sistem elde edilmiştir.

4 Sonuç ve tartışma

Nikel maddesinin verimli kullanımı kaplama prosesinin verimliliği üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Yapılan çalışmada krom kaplama prosesinde kalite standartlarını korumak suretiyle, kullanılan verimli hammadde miktarını arttırmak ve fire oranını düşürmek amaçlanmıştır. Parlak Nikel banyolarındaki verimli kullanılan nikel miktarına etki eden 6 faktör belirlenmiştir. Bu faktörlerin seviyeleri belirlenmiş ve 58 tane deney yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda banyolardaki Nikelin %80’i verimli kullanılırken bu oran %95.74’e çıkarılmış ve maksimize edilmiştir. Yapılan çalışmalar Minitab programı ile analiz edilmiş ve R^2 değeri %98.24 bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar uygulanabilir olup, üretim sürecinin verimliliğini pozitif yönde etkileyecektir. Gelecek çalışma olarak, ortogonal dizilerden yararlanılarak çok tekrarlı deneylerle veri tablosu (Tablo 2) güncellenecek ve eniyileme çalışması yenilenecektir.

5 Kaynaklar

[1] Çiçek Ö. Nikel Kaplama Banyolarında Titanyum Sepetlerin Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006. (Yayınlanmamış Lisansüstü Tez).

[2] Loto CA. “Electroless nickel plating-a review”. *Silicon*, 8(2), 177-186, 2016.

[3] Zhang HY, Zou JJ, Lin NM, Tang B. “Review on electroless plating ni-p coatings for improving surface performance of steel”. *Surface Review and Letters*. 21(4), Article Number: 1430002, 2014.

[4] Idhayachander R, Palanivelu K. “Electrolytic recovery of nickel from spent electroless nickel bath solution”. *E-Journal of Chemistry*, 7(4), 1412-1420, 2010.

[5] Li LY, Takahashi N, Kaneko K, Shimizu T, Takarada T. “A novel method for nickel recovery and phosphorus removal from spent electroless nickel-plating solution”. *Separation and Purification Technology*, 147, 237-244, 2015.

[6] Khoo LP, Yeong HY, Tang LE. “Application of fuzzy-reasoning to a surface-treatment process”. *Journal of Manufacturing Systems*, 14(1), 11-19, 1995.

[7] Jayakrishnan S, Dhayanand K, Krishnan RM, Sekar R, Sriveeraraghavan S. “Metal distribution in electroplating of nickel and chromium”. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 76, 90-93, 1998.

[8] Wu YT, Shen B, Lui L, Hu WB. “Artificial neural network modelling of plating rate and phosphorus content in the coatings of electroless nickel plating”. *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1-3), 207-213, 2008.

[9] Tian D, Li N, Xiao N, Wang FF, Yu SY, Li Q, Gao W, Wu G. “Replacement deposition of Ni-S films on Cu and their catalytic activity for electroless nickel plating”. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(3), 95-101, 2013.

[10] Khedekar D, Gosavi V, Gogte, Brahmanekar P. “Optimization of process parameters of nickel-chromium electroplating for thickness variation using genetic algorithm”. *2nd International Conference on Communication and Signal Processing (ICCASP)*, Lonere, India, 26-27 December 2016.

[11] Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*. 5th ed. New York, USA, John Wiley&Sons Inc, 2001.

[12] Şirvancı M. *Kalite için Deney Tasarımı ‘Taguchi Yaklaşımı’*. Birinci Baskı, İstanbul, Türkiye, Literatür Yayıncılık, 1997.

[13] Karaoglan AD, Demir MM, Çarkacı MM. “Yonga levha üretim süreçlerinde pres süresinin enküçüklenmesi”. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 658-664, 2018.

[14] Karaoglan AD, Celik N. “A new painting process for vessel radiators of transformer: Wet-on-Wet (WOW)”. *Journal of Applied Statistics*, 43(2), 370-386, 2016.

[15] Taguchi G. “The system of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize cost”. 1st ed. New York, USA, American Supplier Institute Inc, 1987.

[16] Myers RH, Montgomery DA. *Response Surface Methodology*. 5th ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc., 2001.