

## TAGUCHI METODU KULLANILARAK SÜLFÜRİK ASİT ORTAMINDA LATERİTİK CEVHERDEN NİKEL ÇÖZÜNMESİNİN İNCELENMESİ

Tevfik Ağaçayak<sup>1\*</sup>, Ali Aras<sup>2</sup>

### ÖZET

Bu çalışmada, lateritik cevherden sülfürik asitli ortamda nikelin farklı koşullarda çözündürülmesi araştırılmıştır. Deneysel parametreleri olarak; süre, karıştırma hızı, sıcaklık, sülfürik asit derişimi ve tane boyutu seçilmiştir. Ortogonal dizi (OD) deneysel tasarım planı  $L_{16}$  olarak belirlenmiştir. Bu deneysel tasarım ile farklı şartlarda 16 adet liç deneyi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan elde edilen metal çözünme verimleri (MÇV) göz önüne alınarak, her test koşulunun sinyal/gürültü (S/G) oranları hesaplanarak anlamlılık analizleri (ANOM) ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda en yüksek MÇV'nin ve S/G oranının Test 10'da elde edildiği görülmüş ve doğrulama deneyi ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyon şartlarında yapılan liç testleri sonucunda (S/G) oranının 38,97 ve metal çözünme veriminin (MÇV) ortalama %88,97 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, deney sonuçlarına varyans analizi (ANOVA) uygulanmış ve her faktörün nikel çözündürülmesine olan katkısı belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Taguchi metodu, liç, lateritik nikel cevheri.

## INVESTIGATION OF NICKEL DISSOLUTION FROM LATERITIC ORE IN SULPHURIC ACID MEDIA USING TAGUCHI METHOD

### ABSTRACT

In this study, the dissolution of nickel from lateritic ore in sulphuric acid media using different conditions was investigated. Leaching time, stirring speed, temperature, sulphuric acid concentration and particle size were selected as experimental parameters. The orthogonal array (OA) experimental design plan was determined as  $L_{16}$ . 16 leaching experiments were carried out with this experimental design under different conditions. Considering the metal dissolution recoveries (MDR) obtained from the results, signal/noise (S/N) ratios of each test condition were calculated and the analysis of mean and optimization studies were performed. As a result of the optimization works it was seen that the maximum MDR and S/N ratio were obtained in Test 10. After, this results were compared with the verification experiment. As a result of the leaching tests performed under the optimization conditions, it was determined that the S/N ratio was 38.97 and the metal dissolution recovery (MDR) was 88.97%. In addition,

<sup>1</sup> Doç.Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 42075, Konya, e-mail:tevfik@selcuk.edu.tr, \*Sorumlu Yazar

<sup>2</sup> Dr.Öğr.Üyesi, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 42075, Konya

variance analysis (ANOVA) was applied to the test results and the percentage contributions of each factor for the extraction of nickel were determined

**Key words:** Taguchi method, leaching, lateritic nickel ore.

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan nikel yüksek sıcaklığa, oksidasyona ve alkalilere karşı korozyona dayanıklılığı sebebiyle alaşımlarda ve paslanmaz çelik üretiminde istenilen önemli metallere birisidir (Li ve ark., 2012; Park ve Nam, 2008). Ekonomik nikel yatakları genellikle magmatik sülfürler ve lateritler olmak üzere iki tip yataklanma gösterirler. Sülfürlü nikel cevherleri %0,15-8 Ni tenörü içerirken; mevcut bilinen yatakların %93'ü %0,2-2 Ni içerdiği bilinmektedir (Hoatson, 2006). Nikel içerikli lateritik cevherler ise ortalama %1-3 arasında nikel tenörüne sahiptirler (TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2012). Lateritik cevherleşmeler ekvatorial bölgelerde yaygın olarak bulunan oksit cevherleridir. Lateritik nikel yatakları ise ultramafik kayaların aşınması ile olivin, piroksen ve amfibol gibi mineralleri içeren cevherleşmeler olarak bilinmektedirler (Golightly, 1981).

Dünya nikel rezervinin yaklaşık olarak %70'ini lateritik cevherler oluştururken, %30'unu sülfürlü cevherler oluşturmaktadır (Dalvi ve ark., 2004; Soler ve ark., 2008). Nikel üretiminin ise %40'ının lateritik cevherlerden sağlandığı bilinmektedir (Luo ve ark., 2010). Artan nikel talebi göz önünde bulundurulduğunda, yeni prosesler geliştirilmesi ile üretimlerin lateritik cevherlerden sağlanması gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Lateritik cevherlerden nikel üretimi pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir (Deepatana ve ark., 2006). Lateritler içerisinde nikel bağımsız mineral olarak bulunmadığı gibi başta götit [FeO(OH)] olmak üzere demir içeren minerallerle bulunmaktadır. Bu nedenle, hidrometalurjik yöntemlerin kullanılması daha uygun olmaktadır (Dalvi ve ark., 2004). Literatürde, yüksek basınç veya atmosferik basınç (karıştırma veya yığın liçi) kullanarak farklı çözümlerde lateritik nikel cevherlerinden nikelin çözündürülmesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Sülfürik asitli ortamda yapılmış olan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Luo ve ark (2010) tarafından atmosferik basınç altında sülfürik asit kullanarak saprolitik lateritlerin liçi araştırılmıştır. Agacayak ve Zedef, (2012) sülfürik asitli ortamda karıştırma liçi kullanarak Karaçam (Eskişehir) lateritik nikel cevherlerinden nikelin çözündürülmesinin kinetiği üzerine çalışmışlardır. Georgiou ve Papangelakis, (1998) limonit içerikli lateritik cevherlerin başlıca sülfürik asit liçi üzerine çalışmalar yapmış ve bu cevherlerin çözünme kimyasını ve kinetiğini araştırmışlardır. Rubisov ve ark (2000) limonit ve saprolitlerin sülfürik asitli ortamda basınç liçi şartlarının belirlenmesi için çalışmalar gerçekleştirmişler ve çözünme kinetiğini belirlemeye çalışmışlardır. Stopic ve ark (2002) ise atmosferik şartlar altında sülfürik asitli ortamda Sırbistan lateritik cevherlerinden nikelin çözünme şartlarını ve kinetiğini belirlemişlerdir.

Liçi çalışmalarının ana amacı metal kazanımının yüksek bir verim ile sağlanmasıdır. Bu nedenle, liçi parametrelerinin optimizasyonunun yapılması ayrıca önem taşımaktadır. Çok fazla parametrenin kullanıldığı deneysel çalışmalarda, her bir faktörün etkisini tanımlayabilmek için çok fazla sayıda deney yapılması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda, Taguchi deneysel tasarımı (Taguchi, 1987) metodunun kullanılması ile maliyetler geleneksel deneysel tasarımı yöntemlerine kıyasla azalmakta ve istenilen seviyeye yakın performans sağlamaktadır. Bu

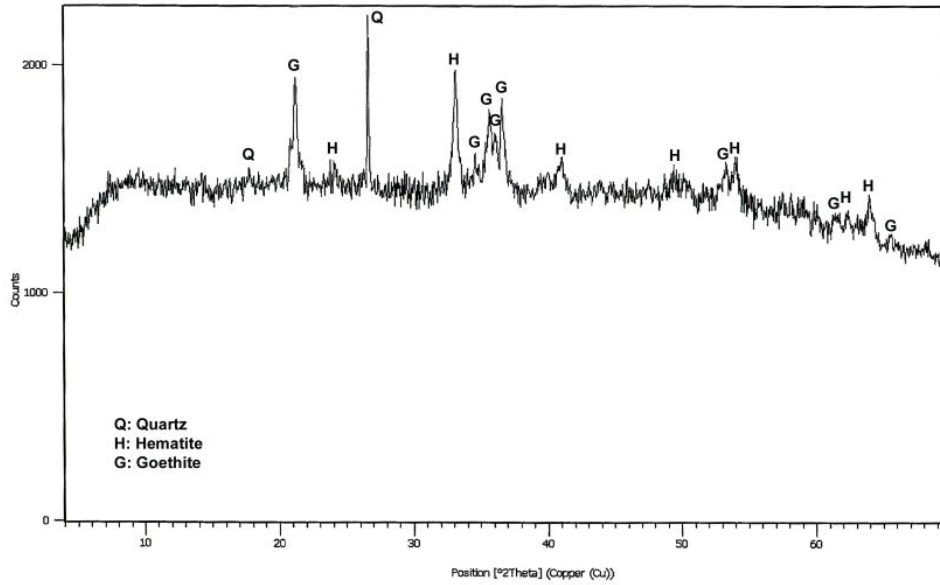
yöntemin, önemli avantajlarından biri laboratuvar çalışmalarından elde edilen optimum koşulların gerçek üretim koşullarına uyarlanmasıdır (Taguchi, 1987; Roy, 1995; Dönmez ve ark., 1998; Ata ve ark., 2001; Demir ve Dönmez, 2008; Safarzadeh ve ark., 2008). Taguchi yöntemi, hem liç çalışmaları hem de diğer bilimsel alanlarda optimizasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Ata ve ark., 2001; Copur, 2002; Abali ve ark., 2006; Moghaddam ve ark., 2006; Safarzadeh ve ark., 2008; Demir ve Dönmez, 2008; Bese ve ark., 2010; İlyas ve ark., 2010; Abali ve ark., 2011; Zolfaghari ve ark., 2011; Babaei-Dehkordi ve ark., 2013; Dogan ve Yartasi, 2014; Asl ve ark., 2015).

Bu çalışmada, lateritik cevherden sülfürik asitli ortamda nikelin farklı koşullarda çözündürülmesi Taguchi ( $L_{16}$ ) deneysel tasarım metodu kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel tasarım parametreleri olarak, süre, karıştırma hızı, sıcaklık, sülfürik asit derişimi ve tane boyutu kullanılmış olup ve her bir faktörün dört farklı seviyesi incelenmiştir. Deneysel başarıları metal çözünme verimlerinin (MÇV) yüzdesi ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmalara ilaveten, deney sonuçlarına varyans analizi (ANOVA) uygulanmış ve her faktörün nikel çözündürülmesine olan katkısı belirlenmiştir.

## 2. MALZEME ve YÖNTEM

### 2.1. Numune Hazırlama

Liç deneylerinde kullanılan, lateritik nikel cevheri Gördes (Manisa) bölgesinden temin edilmiştir. Cevher numunesi, çeneli kırıcı ile kırılarak, daha sonra çubuklu değirmen ile -212  $\mu\text{m}$  tane boyutuna indirilmiştir. Bruker marka D8 Advance model X-Işını Difraktometresi kullanılarak mineralojik analiz gerçekleştirilmiştir. XRD sonuçlarına göre, cevher numunesinin götit, hematit ve kuvars içerdiği görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Cevher numunesine ait XRD sonuçları.

Deneylerde kullanılmak üzere, yaş eleme yapılarak 4 farklı tane boyutunda elenmiştir. Elenmiş numuneler etüvde 105°C’de, 24 saat kurutulmuştur. Temsili bir miktar numune alınarak, kral suyunda çözülmüştür. Nikel ve demir içerikleri GBC marka SensAA model atomik absorpsiyon spektrometre cihazı ile ölçülmüştür. Her bir fraksiyona ait nikel ve demir tenörleri Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Cevher numunesine ait nikel ve demir tenörleri.

Tane Boyutu, µm	Ni, %	Fe, %
-212+106	1,05	36,01
-150+106	1,02	37,03
-106+75	1,00	36,40
-75+53	1,01	38,25

## 2.2. Liç Deneyleri

Liç deneyleri, sıcaklığı ayarlanabilen sıcak su banyosu içerisine yerleştirilmiş 1 L’lik beher kullanarak 500 mL’lik farklı derişimler de hazırlanmış sülfürik asit çözeltileri ile gerçekleştirilmiştir. Çözeltiyi karıştırmak için Heidolph marka RZR 2021 model mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Deneysel parametreler karıştırma hızı (0-500 dev/dak), sıcaklık (30-90° C), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> konsantrasyonu (0,5-3,0 M), tane boyutu (75- 212 µm) ve liç süresi (30-240 dakika) olarak seçilmiştir.

## 2.3. Taguchi Metodu ile Deneysel Tasarımı

Taguchi metodu 1950 yıllarında Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş en iyiyi belirleme tekniği olarak bilinmektedir ( Taguchi, 1987). Bu metod uygulanırken bir tür kesirli faktöriyel tasarımı yapılmaktadır. Gerçekleştirilen tasarımlar ile yapılan deneylerin tüm kombinasyonlarının denenmesi yerine, ortogonal dizin çizelgesi kullanılarak çok daha az sayıda deney yapılmakta ve en iyi performans karakteristiğini veren faktör seviyeleri bulunabilmektedir (Düzyol, 2016). Ortogonal dizinler bir sayı matrisi olarak tasarlanmakta olup, satırların her biri seçilmiş faktörlerin seviyesini, her sütun ise dikkate alınan faktörleri ifade etmektedir (Mezarcıöz ve Oğulata, 2010). Bu dizinler Latin kare tasarımından türetildiği için L, Latin kare tasarımını temsil eder ve L<sub>a</sub>(b<sup>c</sup>) şeklinde gösterilir. Burada; “a” deney sayısını, “b” her sutundaki seviye sayısını, “c” ise faktör sayısını ifade etmektedir (Singh, ve ark., 2002). Bu çalışmada, Taguchi metodu ile optimizasyon şartlarını belirlemek için faktör sayısı 5 ve her bir parametre içinde 4 farklı seviyenin incelenmesi düşünülmüştür. Buna bağlı olarak, L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>) ortogonal plan tablosu Çizelge 2’de verilmiştir.

Çok parametrelili çalışmalar için özellikle S/G (sinyal/gürültü) oranlarının belirlenmesi gereklidir. S/G analizi, deneysel sonuçlarındaki değişimden yararlanarak en sağlıklı grubu belirler. Deneysel tasarımda sunulan bir faktöre cevaben kalite özelliklerinde meydana gelen değişiklik istenen etkinin işaretidir. Gürültü ise deneylerde tasarlanmamış dış faktörlerin sonuç üzerindeki etkisidir. Sinyal-gürültü oranı (S/G) kalite karakteristiğinin gürültü faktörlerine duyarlılığını gösterir (Roy, 1995). Genellikle, performans özelliklerine bağlı olarak üç farklı S/G denklemi kullanılmaktadır. Bunlar en küçük-en iyi, en büyük-en iyi ve hedef değer-en iyi olarak tanımlanmaktadır (Roy, 1995; Atıl ve Ünver, 2000; Zolfaghari ve ark., 2011). Bu

çalışmada istenilen en yüksek metal çözünme verimini (MÇV) belirlemek için “en büyük en iyi” durumunu veren S/G oranı, Eşitlik 1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.**  $L_{16}(4^5)$  ortogonal plan tablosu

Test	Faktörler ve Seviyeleri				
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum \left( \frac{1}{MÇV_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Burada n deneylerin tekrar sayısını ve  $MÇV_i$  i'inci tekrarlanmış olan deney sonuçlarından elde edilen metal çözünme verimini tanımlamaktadır. Yapılan deneyler iki kez yapılmış olup, deneyler için seçilen faktörler ve seviyeleri Çizelge 3’de verilmiştir.

**Çizelge 3.** Deneysel faktörler ve seviyeleri.

Faktörler	Tanımı	Birimler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Liç süresi	dak	30	60	120	180
B	Karıştırma hızı	devir/dak	0	100	300	500
C	Sıcaklık	°C	30	50	70	90
D	Sülfürik asit derişimi	M	0,5	1,0	2,0	3,0
E	Tane boyutu	µm	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

#### 3.1. Taguchi Metodu ile Optimizasyon Çalışmaları

Lateritik cevherden nikel çözünmesinin optimizasyonu için, Çizelge 3’de belirlenen şartlara uygun olarak 16 test gerçekleştirilmiştir. Deneysel tekrarlar ve metal çözünme verimleri (MÇV) göz önüne alınarak, her test koşulunun S/G oranları belirlenmiş ve en yüksek S/G değeri kalın olarak gösterilmiştir (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Taguchi L<sub>16</sub> (4<sup>5</sup>) deney tasarım tablosu ve her bir test sonucunun S/G oranı.

Test	Faktör					Ortalama MÇV,%	S/G
	A	B	C	D	E		
1	30	0	30	0,5	-212+150	5,80	15,26
2	30	100	50	1	-150+106	7,84	17,89
3	30	300	70	2	-106+75	14,28	23,09
4	30	500	90	3	-75+53	24,65	27,84
5	60	0	50	2	-75+53	3,22	10,15
6	60	100	30	3	-106+75	2,25	7,04
7	60	300	90	0,5	-150+106	23,14	27,29
8	60	500	70	1	-212+150	8,36	18,44
9	120	0	70	3	-150+106	19,19	25,66
10	120	100	90	2	-212+150	<b>55,86</b>	<b>34,94</b>
11	120	300	30	1	-75+53	9,34	19,41
12	120	500	50	0,5	-106+75	3,13	9,90
13	180	0	90	1	-106+75	40,23	32,09
14	180	100	70	0,5	-75+53	15,54	23,83
15	180	300	30	3	-212+150	12,12	21,67
16	180	500	50	2	-150+106	20,53	26,25

DeneySEL sonuçlardan elde edilen optimum koşulları belirlemek için ANOM istatistiksel yöntemi kullanılmıştır. Anlamlılık analizi için her bir faktörün (F) herhangi bir seviyedeki (i) ortalama S/G oranları Eşitlik (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$(M)_F^i = \frac{1}{n_{Fi}} \sum_{j=1}^{n_{Fi}} \left[ \left( \frac{S}{G} \right)_F^i \right]_j \quad (2)$$

Burada,  $n_{Fi}$  i'ninci seviyedeki faktörün görüş sayısını ifade ederken;  $\left[ \left( \frac{S}{G} \right)_F^i \right]_j$  ise F faktörünün i'ninci seviyedeki S/G oranının j'inci görülümünü ifade etmektedir.  $(M)_F^i$  ise her bir faktörün (F) herhangi bir seviyedeki S/G oranlarının hesaplanması ile bağımsız tepkisini göstermektedir (Çizelge 5).

**Çizelge 5.** S/G oranlarının Metal Çözünme Verimine (MÇV) tepkisi

Faktör/Seviye	$[(S/G)_{Faktör}^{Seviye}]_j$				$(M)_{Faktör}^{Seviye}$
	j=1	j=2	j=3	j=4	
A/1	15,26	17,89	23,09	27,84	21,02
A/2	10,15	7,04	27,29	18,44	15,73
A/3	25,66	34,94	19,41	9,90	22,48
A/4	32,09	23,83	21,67	26,25	<b>25,96</b>
B/1	15,26	10,15	25,66	32,09	20,79

B/2	17,89	7,04	34,94	23,83	20,93
B/3	23,09	27,29	19,41	21,67	<b>22,86</b>
B/4	27,84	18,44	9,90	26,25	20,61
C/1	15,26	7,04	19,41	21,67	15,85
C/2	17,89	10,15	9,90	26,25	16,05
C/3	23,09	18,44	25,66	23,83	22,76
C/4	27,84	27,29	34,94	32,09	<b>30,54</b>
D/1	15,26	27,29	9,90	23,83	19,07
D/2	17,89	18,44	19,41	32,09	21,96
D/3	23,09	10,15	34,94	26,25	<b>23,61</b>
D/4	27,84	7,04	25,66	21,67	20,55
E/1	15,26	18,44	34,94	21,67	22,58
E/2	17,89	27,29	25,66	26,25	<b>24,27</b>
E/3	23,09	7,04	9,90	32,09	18,03
E/4	27,84	10,15	19,41	23,83	20,31

Çizelge 4’de görüldüğü gibi, optimizasyon çalışmaları sonucunda en yüksek MÇV’nin ve S/G oranının Test 10’da elde edildiği görülmüştür. Çizelge 5’deki optimizasyon çalışmaları doğrultusunda belirlenen parametreler ile tekrar doğrulama deneyi yapılarak Test 10 ile karşılaştırılmıştır. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak S/G oranı ve MÇV hesaplanarak Çizelge 6’da verilmiştir.

**Çizelge 6.** Nikel çözünmesi için optimum deney şartları.

Testler	A	B	C	D	E	Ortalama MÇV, %	S/G
Test 10	120	100	90	2	-212+150	55,86	<b>34,96</b>
Optimizasyon	180	300	90	2	-150+106	88,97	<b>38,97</b>

Sonuç olarak, optimum koşulların S/G oranının, test 10’un S/G oranının değerinden daha büyük olduğu ve MÇV’nin ortalaması %55,86’dan %88,97’ye yükseldiği görülmektedir. Optimizasyon ile Test 10 karşılaştırıldığında sıcaklığın ve asit derişiminin değişmediği, bunun yanında ise liç süresinin ve karıştırma hızının arttığı ve tane boyutunun ise küçüldüğü göze çarpmaktadır. Bu nedenle yapılan tüm çalışmalar sonucunda her bir faktörün çözünme verimine katkısını belirlemek için istatistiksel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

### 3.2. Her Bir Faktörün Çözünmeye Katkısının Belirlenmesi

Deneyisel çalışmalarda belirlenen faktörlerin, nikel çözünmesine etkisini araştırmak amacıyla elde edilen sonuçlara varyans analizi (ANOVA) istatistiksel yöntemi uygulanmıştır. Her bir faktörün katkının yüzdesini belirlemek için, K’inci seviyedeki belirli bir faktörün deney

sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge 4'deki  $\overline{M\check{C}V}_i$  değerleri kullanılarak elde edilmiş ve Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7.** Nikel çözünmesi için K'inci seviyedeki belli bir faktörüne bağlı olarak deney sonuçlarının ortalaması ve toplam  $\overline{M\check{C}V}$  ( $\overline{M\check{C}V}_T$ ) ortalamaları.

Seviye	$\overline{M\check{C}V}_K^A$	$\overline{M\check{C}V}_K^B$	$\overline{M\check{C}V}_K^C$	$\overline{M\check{C}V}_K^D$	$\overline{M\check{C}V}_K^E$	$\overline{M\check{C}V}_T$
1	13,14	17,11	7,38	11,90	20,53	<b>16,59</b>
2	9,24	20,37	8,68	16,44	17,67	
3	21,88	14,72	14,34	23,47	14,97	
4	22,10	14,17	35,97	14,55	13,19	

Bundan sonra, faktörlerin toplam karelerinin toplamı,  $SS_F$ , her faktör için Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra toplam kareler toplamı  $SS_T$  Eşitlik (4) kullanılarak belirlenmiştir.

$$SS_F = \frac{mn}{S} \sum_{k=1}^S (\overline{M\check{C}V}_k^F - \overline{M\check{C}V}_T)^2 \quad (3)$$

$$SS_T = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n M\check{C}V_i^j \right)^2 - mn(\overline{M\check{C}V}_T)^2 \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki m ve n sırasıyla deney sayısını ve tekrar sayısını;  $\overline{M\check{C}V}_T$ , toplam  $\overline{M\check{C}V}$ 'nin ortalamasını temsil etmektedir.  $\overline{M\check{C}V}_K^E$  ise K'inci seviyede belirli bir faktörün deney sonuçlarının ortalama değerini ifade etmektedir.  $SS_F$  ve  $SS_T$  değerleri kullanılarak varyans hatası ( $V_h$ ) Eşitlik 5'deki formül ile belirlenmiştir.

$$V_h = \frac{SS_T - \sum_{F=A}^E SS_F}{m(n-1)} \quad (5)$$

Son olarak, nikelin çözünmesine katkıda bulunan, her bir faktörün yüzdesi  $\rho_F$  Eşitlik (6) yardımıyla hesaplanmıştır. Burada,  $SD_F$  ise, seviye sayısından bir çıkarılarak üretilir.

$$\rho_F = \frac{SS_F - (SD_F V_h)}{SS_T} \times 100 \quad (6)$$

Elde edilen değerlerin tümü Çizelge 8'de verilmiştir. Çizelge 8'den görüldüğü gibi, önem sırasına göre; faktörlerin çözünmeye etkisinin sıcaklık, liç süresi süresi, asit konsantrasyonu, tane boyutu ve karıştırma hızı olduğu saptanmıştır.

**Çizelge 8.** Her bir faktörün çözünmeye katkı yüzdeleri.

Faktörler	Birim	$SD_F$	$SS_F$	$\rho_F$ (%)	$SS_T$	$V_h$
Liç süresi	dak	3	994,1536	15,76	6273,896	1,82
Karıştırma hızı	devir/dak	3	191,2968	2,96		
Sıcaklık	°C	3	4224,3128	67,24		
Sülfürik asit derişimi	M	3	588,1168	9,29		
Tane boyutu	µm	3	246,9952	3,85		
Hata			29,0209	0,38		



#### 4. SONUÇLAR

Gördes (Manisa) lateritik nikel içerikli cevherinden sülfürik asitli ortamda nikelin çözündürülmesi, Taguchi deney tasarımı metodu uygulanarak araştırılmıştır. Liç testleri sonucunda elde edilen çözünme verimlerinin (MÇV) S/G oranları hesaplanarak anlamlılık analizleri (ANOM) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, optimizasyon çalışmaları doğrultusunda belirlenen parametreler ile tekrar doğrulama deneyi yapılarak Test 10 ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyon deneylerinden elde edilen değerlerin daha önceden tasarlanmış deneysel parametrelerin arasında en iyi sonuçları verdiği saptanmıştır. Belirlenen optimum koşullar; liç süresi, karıştırma hızı, sıcaklık, sülfürik asit derişimi ve tane boyutu sırasıyla 180 dak, 300 devir/dak, 90°C, 2 M ve 150x106 µm olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda yapılan liç testleri sonucunda MÇV ortalama %88,97 olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda her bir faktörün çözünme verimine katkısını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) istatistiksel yöntemi uygulanmıştır. Her bir faktörün nikel çözünmesine yüzde olarak katkısı sıcaklık (%67,24), liç süresi (%15,76), asit derişimi (%9,29), tane boyutu (%3,85) ve karıştırma hızı (%2,96) için belirlenmiştir. Sonuç olarak, Taguchi deney tasarımı ile yapılan çalışmalarda maliyet ve zaman açısından oldukça etkin olduğu ve farklı şartlarda daha az deney yapılarak optimum sonuçlara ulaşılabilceği görülmüştür.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] Abali, Y., Bayca, S. U., Arisoy, K. and Vaizogullar, A.I., 2011, Optimization of dolomite ore leaching in hydrochloric acid solutions, *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 46, 253–262.
- [2] Abali, Y., Copur, M. and Yavuz, M., 2006, Determination of the optimum conditions for dissolution of magnesite with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions, *Ind. J. of Chem. Technol.*, 13, 391–397.
- [3] Agacayak, T. and Zedef, V., 2012, Dissolution kinetics of a lateritic nickel ore in sulphuric acid medium, *Acta Montanistica Slovaca*, 17 (1), 33–41.
- [4] Asl, M.S., Kakroudi, M. G., Golestani-Fard, F. and Nasiri H., 2015, A Taguchi approach to the influence of hot pressing parameters and SiC content on the sinterability of ZrB<sub>2</sub>-based composites, *Int. J. of Refract. Met. and Hard Mater.*, 51, 81–90.
- [5] Ata, O. N., Colak, S., Ekinci, Z. and Çopur, M., 2001, Determination of the optimum conditions for leaching of malachite ore in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions, *Chem. Eng. Technol.*, 24 (4), 409–413.
- [6] Atil, H. and Unver, Y., 2000, A different approach of experimental design: Taguchi Method, *Pakistan J. of Bio. Sci.*, 3 (9), 1538–1540.
- [7] Babaei-Dehkordi, A., Moghaddam, J. and Mostafaei, A., 2013, An optimization study on the leaching of zinc cathode melting furnace slag in ammonium chloride by Taguchi design and synthesis of ZnO nanorods via precipitation methods, *Mater. Res. Bull.*, 48, 4235–4247.
- [8] Bese, A. V., Borulu, N., Copur, M., Colak, S. and Ata, O. N., 2010, Optimization of dissolution of metals from Waelz sintering waste (WSW) by hydrochloric acid solutions, *Chem. Eng. J.*, 162, 718–722.
- [9] Copur, M., 2002, An optimization study of dissolution of Zn and Cu in ZnS concentrate with HNO<sub>3</sub> solutions, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 16 (4), 191–197.
- [10] Dalvi, A. D., Bacon, W. and Osborne, R. C., 2004, The past and the future of nickel laterites. *PDAC 2004 International Conference Trade Show and Investors Exchange*, Toronto.
- [11] Deepatana, A., Tang, J. A. and Valix, M., 2006, Comparative study of chelating ion exchange resins for metal recovery from bioleaching of nickel laterite ores, *Miner. Eng.* 19, 1280–1289.

- [12] Demir, F. and Donmez, B., 2008, Optimization of the dissolution of magnesite in citric acid solutions, *Int. J. Miner. Process.*, 87, 60–64.
- [13] Dogan, T. H. and Yartasi, A., 2014, Optimization of dissolution of ulexite in phosphate acid solutions, *J. Chem. Soc. Pak.*, 36 (4), 601–605.
- [14] Dönmez, B., Celik, C., Colak, S. and Yartasi, A., 1998, The dissolution optimization of copper from anode slime in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions, *Ind. & Eng. Chemistry Res.*, 37 (8), 3382–3387.
- [15] 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.
- [16] Georgiou, D. and Papangelakis, G. V., 1998, Sulphuric acid pressure leaching of a limonitic laterite: chemistry and kinetics, *Hydrometallurgy*, 49, 23–46.
- [17] Golightly, J. P., 1981, Nickeliferous laterite deposits, *Econ. Geol.*, 75 (1), 710–735.
- [18] Hoatson, D. M., Subhash, J. and Jaques, A. L., 2006, Nickel sulphide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential. *Ore geology reviews*, 29, 177–241.
- [19] Ilyas, S., Bhatti, H. N., Bhatti, I. A., Sheikh, M. A. and Ghauri, M. A., 2010, Bioleaching of metal ions from low grade sulphide ore: Process optimization by using orthogonal experimental array design, *African J. of Biotechnol.*, 9 (19), 2801–2810.
- [20] Luo, W., Feng, Q., Ou, L., Zhang, G. and Chen, Y., 2010, Kinetics of saprolitic laterite leaching by sulphuric acid at atmospheric pressure, *Miner. Eng.*, 23 (6), 458–462.
- [21] Mezarciöz, S. ve Oğulata, R. T., 2010, Süprem Kumaşlarda Patlama Mukavemeti Değerinin Taguchi Ortogonal Dizayna Göre Optimizasyonu, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 320–328.
- [22] Moghaddam, J., Sarraf-Mamoory, R., Abdollahy, M., and Yamini, Y., 2006, Purification of zinc ammoniacal leaching solution by cementation: Determination of optimum process conditions with experimental design by Taguchi's method, *Sep. Purif. Technol.*, 51, 157–164.
- [23] Roy, R. K., 1995, *A Primer on the Taguchi Method*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- [24] Rubisov, D. H., Krowinkel, J. M., and Papangelakis, V. G., 2000, Sulphuric acid pressure leaching of laterites universal kinetics of nickel dissolution for limonites and limonitic/saprolitic blends, *Hydrometallurgy*, 58 (1), 1–11.
- [25] Safarzadeh, M. S., Moradkhani, D., Ilkhchi, M. O., and Golshan, N. H., 2008, Determination of the optimum conditions for the leaching of Cd–Ni residues from electrolytic zinc plant using statistical design of experiments, *Sep. Purif. Technol.*, 58, 367–376.
- [26] Soler, J. M., Cama, J., Galí, S. Meléndez, W., Ramírez, A., and Estanga, J., 2008, Composition and dissolution kinetics of garnierite from the Loma de Hierro Ni-laterite deposit, Venezuela, *Chem. Geo.*, 249 (1/2), 191–202.
- [27] Stopic, S., Friedrich, B. and Fuchs, R., 2002, Kinetics of sulphuric acid leaching of the Serbian nickel laterite ore under atmospheric pressure, *Metalurgica J. of Metall.*, 8 (3), 235–244.
- [28] Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design*. Quality Resources, New York.
- [29] TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2012, *Nikel Raporu*, Ankara.
- [30] Zolfaghari, G., Esmaili-Sari, A., Anbia, M., Younesi, H., Amirmahmoodi, S. and Ghafari-Nazari, A., 2011, Taguchi optimization approach for Pb(II) and Hg(II) removal from aqueous solutions using modified mesoporous carbon, *J. of Hazard. Mater.*, 192, 1046–1055.