

UÇUCU KÜL ÖRNEĞİNDEN DEMİR VE ALÜMİNYUM GİDERİMİNDE TAGUCHİ YAKLAŞIMI

Emine SAYILGAN *
Kamuran KÜRKLÜ *

Alınma:06.06.2018; düzeltme: 19.10.2018; kabul:22.10.2018

Öz: Termik santrallerde oluşan uçucu küllerin büyük bir kısmı kül barajlarına akıtılarak depolanmaktadır. Depolanan küllerin içeriğinde bulunan metal/ağır metal miktarları oldukça fazla olup, çevresel risk oluşturmaktadır. Uçucu küllerle ilgili çalışmalar daha çok tarımsal alanlarda, inşaat sektöründe ve diğer endüstri kollarında kullanımı üzerinedir. Bu çalışma kapsamında Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül karakterizasyonunu müteakip farklı asidik/bazik liç şartlarında solüsyona alınabilirliği araştırılmıştır. Temin edilen uçucu külde 56.900 mg/kg demir, 39.400 mg/kg alüminyum içeriği tespit edildiğinden, bu çalışma kapsamında demir ve alüminyum elementlerinin farklı liç şartlarında giderim verimleri araştırılmıştır. Deneysel Taguchi deney tasarımına göre yürütülmüş olup, farklı katı/sıvı oranları, farklı asit/baz konsantrasyonları, farklı sıcaklık şartlarında çalışılmıştır. En etkili giderim verimleri, 1/5 katı/sıvı oranında, 1,5 M hidroklorik asit konsantrasyonunda, 75 °C'de elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Demir, Taguchi, Termik Santral, Uçucu kül

Removal of Iron and Aluminum from Fly Ash Sample with Taguchi Approach

Abstract: A large part of the fly ash formed in thermal power plants is stored in ash dams. The amount of metal / heavy metal in the contents of the stored ash is very high and poses an environmental risk. Studies about fly ashes is mostly concerned with the use in agricultural, construction and other industries. Within the scope of this study, firstly fly ash sample was obtained from Seyitömer Thermal Power Plant, then investigated for the availability to the solution under different asidic/basic leaching conditions. 56.900 mg/kg iron and 39.400 mg/kg aluminum content were determined in the supplied fly ash. Therefore, the recovery efficiencies of iron and aluminum elements under different leaching conditions were investigated. Experiments were carried out according to the Taguchi test design and different solid/liquid ratios, different acid/base concentrations, and different temperature conditions were studied. The most effective removal efficiencies were obtained at a concentration of 1.5 M hydrochloric acid at 75 ° C with 1/5 solid/liquid ratio.

Keywords: Aluminum, Fly Ash, Iron, Taguchi, Thermal Power Plant

1. GİRİŞ

Ülkemizin enerji ihtiyacını gidermek için kullanılan enerji kaynaklarından birisi de linyit kömürüdür. Linyit kömürünü enerji kaynağı olarak kullanan termik santrallerden kaynaklanan metal/ağır metal içerikli uçucu kül ve cürufur çevre sağlığı açısından oldukça zararlıdır. Termik santrallerde oluşan uçucu küllerin çok küçük bir bölümü çimento fabrikalarında katkı maddesi olarak kullanılmakta, geriye kalan kısım ise termik santral çevresinde yığılma usulü ile dağıtılarak ya da sulu sistem ile kül barajlarına akıtılarak depolanmaktadır.

* Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta
İletişim Yazarı: Emine Sayılğan (eminesayilgan@sdu.edu.tr)

Dünyada gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan ülkemizin enerji ihtiyacı giderek artmakta ve buna bağlı olarak çeşitli enerji üretim tesislerine olan ihtiyaçta giderek artmaktadır. Enerjide dışa bağımlılığı azalttığından ve daha ekonomik olmasından dolayı, tüm çevresel etkilerine rağmen termik santrallerde halen yakıt olarak kömür kullanılmaktadır. Ülkemizde termik santrallerde elektrik üretimi sırasında büyük miktarda uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Türkiye'deki termik santrallerde, yanma sonucu oluşan atıkların ancak %65 kadarı kül barajlarında depolanmaktadır. Geriye kalan atıklar, insan sağlığı ve çevre (toprak, hava ve su) için potansiyel tehlike oluşturmaktadır (Türkmenoğlu ve diğ., 2014). Bu küllerin depolanması, atılması veya bertaraf edilmesinde çok büyük zorluklarla karşılaşmakta ve bu durum çevreyi olumsuz etkilemektedir.

Termik Santrallerde linyit kömürünün yakılması sonucunda büyük miktarlarda katı yanma ürünleri oluşmaktadır. Bu ürünlerin %80 gibi büyük bir çoğunluğunu, baca tarafından çekilen gazlarla beraber yukarı sürüklenen ve uçucu kül adı verilen çok ince boyutlu (1-150 µm) kül tanecikleri oluşturmaktadır. Uçucu küllerin kimyasal bileşenleri, kullanılan kömürün cinsine ve kömürde bulunan minerallere bağlı olarak değişmektedir. Birçok uçucu külün %85'inden fazlası SiO₂, CaO, Fe₂O₃, MgO, Al₂O₃ ve SO₃'ten oluşmaktadır. Ayrıca, uçucu küllerin bünyesinde; Sb, As, Be, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Ag, Zn, vb. elementler bulunmakta, kömürün yanması esnasında radon, uranyum ve toryum gibi radyoaktif elementler açığa çıkmaktadır (Türkmenoğlu ve diğ., 2014).

Türkiye'deki termik santrallerde yıllık toplam kömür ve linyit tüketimi 2001 yılı verilerine göre; 55 milyon ton olup 13 milyon ton kül oluşmuştur (Özdemir, 2001). 2014 yılında 64,7 milyon ton olan toplam linyit arzının miktar olarak %88,8'i elektrik üretimi amacıyla termik santrallerde tüketilmiştir. Hesaplamalar sonucunda yaklaşık olarak 14 milyon ton kül oluşmuştur (Anonim, 2015).

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün içerdiği minerallerin tam yanma sonucu bazı değişikliklere uğramasıyla oluşan ve çıkan gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen partikül halindeki bir atıktır (Shibaoka ve diğ., 1977; Ulubaş, 2000). Çok hafif olan uçucu küller, bacanın üst kısmında elektrofiltre veya siklon adı verilen toz tutucularda biriktirilip, periyodik olarak santral dışına alınmaktadır (Toroz, 1987; Ulubaş, 2000). Baca gazları ile sürüklenen ve hava ile teması sonucu ani soğuma ile puzolanik özellik kazanan uçucu küllerin tanecik boyutları, yaklaşık 1-100 µm arasında değişim göstermektedir. Genel olarak tanecikler, ergime sonucu oluşan küresel bir yapıya sahiptirler (Ulubaş, 2000).

Kömür yanma artıklarının atıldığı alanlarda meydana gelebilecek olan problemlerden birisi atıklardaki zararlı kirleticilerin yağmur ve/veya sızıntı sebebiyle suda çözünerek yeraltı suyundaki ve/veya yüzeysel sulardaki önemli kirlenmelerdir. Bu endişeler kömür yanma atıklarındaki As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg ve Se gibi potansiyel toksik eser elementlerin ve çözünebilir tuzların derişimlerdeki yükselmeden kaynaklanmaktadır (USEPA, 1988; Şengül, 2002). Bunun yanında kül birikim alanlarının ve tarımsal toprakların tam olarak izlenmesi oldukça masraflı ve zor olduğundan bu bölgelerdeki durumu ortaya çıkaracak veriler oldukça azdır. Atık küllerin yeraltı sularına etkisi daha çok laboratuvarlarda yapılan liç çalışmalarıyla belirlenmektedir, fakat gerçek çalışma şartlarında oluşabilecek farklı koşullar dikkate alındığında oluşabilecek sonuçları, laboratuvar çalışmaları ile yeraltı sularına metal geçişini simüle etmek gerçeğe pek uygun olmayabilmektedir (Theis ve diğ., 1989; Hjelmar, 1990; Murarka ve diğ., 1993; Şengül, 2002). Sınırlı sayıda yapılan yeraltı suyu kirlenmesi çalışmalarında, kül atık alanlarına yakın olan yerlerde yeraltı suyu kirlenmesi gözlenmiştir (Theis ve diğ., 1989; Sakata, 1987; Spencer ve diğ., 1987). Küllerin atık alanının yakın çevresindeki toprak ve yeraltı sularıyla etkileşime girmeleri nedeniyle atık alanında oluşan toksik metal liçi, laboratuvar ortamındakinden çok daha az olmaktadır (Şengül, 2002). Liç çalışmaları ile farklı katı atık örneklerinden, metallerin/ağır metallerin su ortamına salınımı belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada Seyitömer Termik Santrali'nden uçucu kül numunesi temin edilerek, farklı asidik/bazik ortamlarda alüminyum ve demir elementlerinin liç edilebilirliği araştırılmıştır. Farklı asit/baz konsantrasyonları, farklı çalışma sıcaklıkları ve farklı uçucu kül miktarları Taguchi deneysel tasarımı dikkate alınarak test edilmiş ve değerlendirilmiştir.

Taguchi deneysel tasarımı ile farklı değişkenler ve farklı seviyeleri ile deney planı oluşturulmaktadır. Bu yöntemle deney sayısında azalma sağlanmakta, sonuca daha kolay ve hızlı ulaşılması hedeflenmektedir. Taguchi yönteminin özelliği, geliştirilmiş olan ortogonal dizinler sayesinde deney tasarımı çalışmalarında faktör ve seviyelerinin eş zamanlı olarak değiştirilmesini sağlaması ve bu sayede birden fazla faktör ve seviyeyi ölçebilmesidir (Taylan, 2009). Yıldız (2013), yapmış olduğu çalışmada boyar maddenin perlit, silika ve diatomit gibi oksit mineralleri yüzeyine adsorpsiyonunda, Taguchi deney tasarımı dikkate alınarak değişkenlerin etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışma sonrasında, 1 saat reaksiyon süresi sonrasında oksit minerallerinin yüzeyine adsorbe olan boyar madde miktarlarının; azalan boyar madde derişimi, artan pH, sıcaklık ve adsorbent miktarı ile arttığını tespit etmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Uçucu Kül Karakterizasyonu ve Ön İşlemler

Uçucu kül numunesi Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Seyitömer Termik Santrali, Kütahya'nın Seyitömer ilçesinde, bölgedeki linyit yataklarının değerlendirilmesi amacıyla Türkiye Elektrik Kurumu'nun uyguladığı proje uyarınca yapılmıştır. Santral yılda 5,5 milyon ton linyit yakarak 4x150 MW elektrik enerjisi üretecek şekilde planlanmıştır. Santral, Kütahya ilinin 28 km kuzey doğusunda yer almaktadır (Türkmenoglu, 2010).

Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül numunesinde ilk olarak nem analizi gerçekleştirilmiştir. Nem analizi, Antalya Büyükşehir Belediyesi Akredite Hava Kirliliği Laboratuvarında 107 °C de 24 saat bekletilerek Memmert cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Nem analizinden sonra numune 0,200 mm gözenek çaplı elekten elenmiştir. Numunede kükürt analizi Antalya Büyükşehir Belediyesi Hava Kirliliği Laboratuvarında LECO SC-144DR cihazı ile, uçucu madde ve kül analizleri ise Antalya Büyükşehir Belediyesi Hava Kirliliği Laboratuvarında LECO TGA701 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Etüvde (Nüve) 105 °C'de kurutulan numunenin element içerikleri ICP-OES (Agilent 5100) cihazı ile ALS Çek Cumhuriyeti Laboratuvarında yapılmıştır.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, Taguchi deneysel tasarım yöntemi dikkate alınarak, 3-seviye 3-faktör olacak şekilde 9 deney olarak (L9) tasarlanmıştır. Orijinal kül numunesi karakterizasyonu sonucunda, yüksek oranda Al ve Fe elementleri tespit edildiğinden, deneysel çalışmalar sonucunda Fe ve Al elementlerinin giderimi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar 50 mL numune hacminde, 2 saat bekleme süresinde, 150 rpm'de yürütülmüştür. Literatür araştırmaları sonucunda 5 dakika ile 24 saat gibi geniş çalışma sürelerinde çalışıldığından bekleme süresi olarak 2 saat seçilmiştir (Meer ve Nazir, 2017). Taguchi deney tasarımı örneği Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1'de, 1 nolu deney şartlarında, 1/5 katı/sıvı oranında, 0,5 M asit konsantrasyonunda, 25 °C sıcaklıkta çalışılmıştır. 2 saat reaksiyon süresi sonunda, solüsyon 14-18 µm gözenek çaplı beyaz bant filtre kağıdı (S&H Labware) ile süzülmüştür. Daha sonra HNO₃ solüsyonu ile pH değerleri 2 civarına getirilerek buzdolabında saklanarak, numunelerdeki Al ve Fe konsantrasyonları Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde ICP-OES cihazında (Perkin Elmer Optima 2100 DV) ölçülmüştür.

Tablo 1. Deneysel çalışmalar kullanılan Taguchi deney tasarımı örneği

Deney No	A	B	C
	Katı/Sıvı Oranı (g/mL)	Reaktant (M) Kons.	Sıcaklık (°C)
1	1 (1/5)	1 (0,5)	1 (25)
2	1 (1/5)	2 (1)	2 (50)
3	1 (1/5)	3 (1,5)	3 (75)
4	2 (1/10)	2 (1)	1 (25)
5	2 (1/10)	3 (1,5)	2 (50)
6	2 (1/10)	1 (0,5)	3 (75)
7	3 (1/15)	3 (1,5)	1 (25)
8	3 (1/15)	1 (0,5)	2 (50)
9	3 (1/15)	2 (1)	3 (75)

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Karakterizasyon çalışmaları

Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül numunesinin elek analizleri sonucunda numunenin %98 oranında 0,200 mm gözenek çaplı elekten geçtiği gözlenmiştir ve tüm deneysel çalışmalar 0,200 mm'den küçük partikül boyutundaki kül numunesi ile yapılmıştır.

Uçucu kül numunesinin nem içeriği, kükürt, uçucu madde ve kül analiz sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Uçucu kül numunesinin fiziksel özellikleri

	Kükürt (%)	Nem (%)	Uçucu Madde (%)	Kül (%)
Seyitömer Termik Santrali Uçucu Kül Numunesi	0,4922±0,014	0,185±0,005	1,05±0,05	99,33±0,04

Tablo 2'de elde edilen sonuçlar neticesinde, numunenin nem içeriği çok düşük olduğundan, uçucu madde miktarı %1 civarında tespit edilmiş olup, numune %99 oranında kül ihtiva etmektedir. Numunenin element içerikleri ICP-OES cihazı ile belirlenmiştir. Tablo 3'de uçucu külün element analizi gösterilmektedir.

Tablo 3'e göre Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilen uçucu külde alüminyum, kalsiyum, demir, magnezyum ve potasyum elementlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında, Türkmenoğlu (2010)'un tez çalışmasında Seyitömer

ve Tunçbilek Termik Santralleri uçucu küllerinin ağır metal (Pb, Cd, Cr ve Cu) konsantrasyonları araştırılmış ve konsantrasyonlar bu çalışma ile tutarlıdır.

Tablo 3. Seyitömer Termik Santrali uçucu kül element içerikleri

Element	Uçucu Kül Konsantrasyonu (mg/kg)	Element	Uçucu Kül Konsantrasyonu (mg/kg)
Alüminyum	39400	Mangan	852
Antimon	<0,50	Civa	<0,20
Arsenik	78,1	Molibden	7,25
Baryum	534	Nikel	1010
Berilyum	1,93	Fosfor	467
Bizmut	<1,0	Potasyum	11800
Bor	459	Selenyum	<2,0
Kadmiyum	1,25	Silikon	138
Kalsiyum	30100	Gümüş	<0,50
Krom	187	Sodyum	2250
Kobalt	39,4	Stronsiyum	142
Bakır	75,4	Sülfür	4800
Demir	56900	Telluriyum	<1,0
Kurşun	36,4	Talyum	<0,50
Lityum	56,8	Kalay	1,4
Magnezyum	20000	Titanyum	833
Çinko	78,9	Vanadyum	116

3.2. Deneysel çalışmalar

Bu çalışma kapsamında Taguchi deney şartlarına göre oluşturulan deneysel çalışmalarda HCl, HNO₃, CH₃COOH, NaOH gibi farklı reaktantların uçucu külden Fe ve Al giderimine etkileri incelenmiştir. Tablo 4’de yapılan çalışmalarda elde edilen Fe ve Al giderimleri gösterilmiştir.

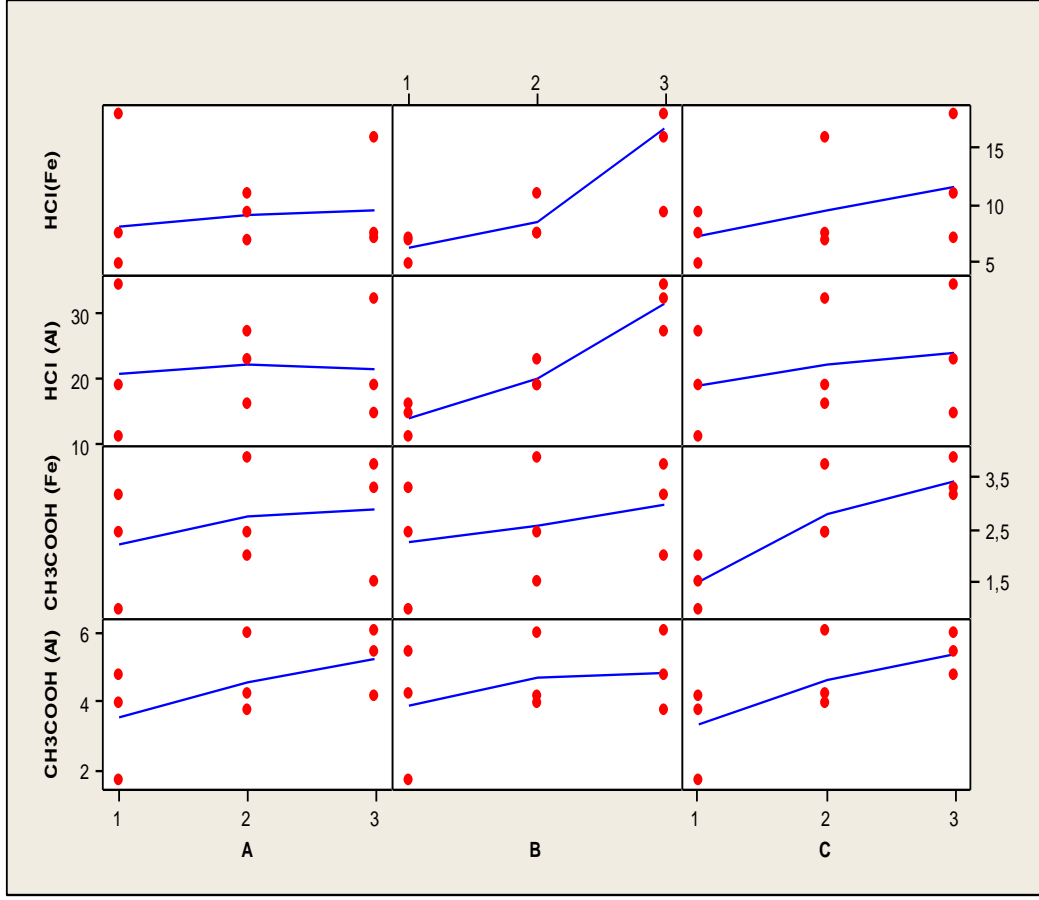
Tablo 4’e göre çalışılan reaktantlar arasında en etkili giderim verimleri HCl ve HNO₃ ile elde edilmiştir. CH₃COOH ile yapılan giderim deneyleri sonucunda Fe ve Al giderim verimleri %10’dan daha düşük elde edilmiştir. NaOH ile ise Fe giderimi elde edilememiş, Al giderimi ise %10’dan daha düşük elde edilmiştir. HCl ve HNO₃ ile yapılan Fe ve Al giderim deneylerinde, 75 °C’de yapılan deneylerde daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir. Tüm deneysel çalışmalarda maksimum giderim verimlerinin %35 civarında olması, seçilen deney süresinin (2 saat) yeterli olmaması ve seçilen reaktant konsantrasyonlarının düşük (0,5-1,5 M) olması sebebiyle olabilir. Bu konuda yapılan literatür çalışmaları irdelendiğinde farklı termik santraller uçucu külleri ile yapılan çalışmalarda değişken olarak farklı asitler (hidroklorik asit, nitrik asit, perklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit, hidrojen peroksit, kral suyu), 25-100 °C sıcaklıklarda, 1/4-1/20 katı/sıvı oranlarında, 1-24 saat deney sürelerinde çalışıldığı belirlenmiştir. (Toraman, 1995; Kadioğlu, 2005; Topal vd., 2011). Al ve Fe giderimi üzerine yapılan çalışmalar irdelendiğinde, Al ve Fe elementlerinin kimyasal liç yöntemi ile diğer elementlere göre daha düşük oranlarda liç edilebildiği gözlenmiştir (Meer ve Nazir, 2017). Fedje vd. (2010)’nin yapmış olduğu çalışmada 3 M HNO₃ ile 24 saat süre sonunda %67 Al, %48 Fe giderimi bulunmuştur. Huang vd. (2011)’nin yapmış oldukları çalışmada, 0,1 M HCl ile 1 saat reaksiyon süresi sonunda yaklaşık %42 Al, %3 Fe giderimi elde edilebilmiştir. Navarro vd. (2007)’nin, 2 M NaOH ile yapılan çalışmalarda 24 saat reaksiyon süresi sonunda %54 Al giderimi olurken; Fe giderimi elde edilememiştir. Tarafımızdan yapılan deneysel çalışmalar sonucunda benzer sonuçlar elde edilmiştir, tüm deneysel sonuçlarda Al giderimi, Fe giderimine göre daha etkilidir.

Ayrıca, 25 °C'de 2 saat reaksiyon süresinde kral solüsyonu (HCl:HNO₃ 3:1) ile yapılan deneysel çalışmalarda %11,83 Fe, %6,10 Al, %28,01 Ca, %19,54 Mg giderimleri elde edilmiştir. Bu çalışmalar ışığında, demir ve alüminyumun çözeltilmeye alınması için, daha yüksek sıcaklıklarda daha uzun reaksiyon süreleri gerekmektedir.

Araştırılan parametrelerin etkisini belirlemek amacıyla oluşturulan matriks grafiklerinde HCl ve HNO₃ için benzer grafikler elde edildiğinden, Şekil 1'de hidroklorik asit ve asetik asit için matriks grafikleri gösterilmiştir.

Tablo 4. Farklı reaktantlarla yapılan liç çalışmaları sonucunda Fe ve Al giderimleri

Deneysel Sayısı	HCl (M)		HNO ₃ (M)		CH ₃ COOH (M)		NaOH (M)	
	Fe(%)	Al(%)	Fe(%)	Al(%)	Fe(%)	Al(%)	Fe(%)	Al(%)
1	4,61	11,14	4,98	11,81	0,96	1,70	<1	<1
2	7,39	18,98	6,83	19,39	2,44	3,98	<1	1,37
3	18,03	34,51	10,31	31,80	3,18	4,83	<1	6,04
4	6,82	15,93	6,64	16,03	2,45	4,26	<1	0,08
5	10,82	22,79	8,59	22,73	3,90	6,03	<1	2,88
6	9,17	27,25	7,70	23,53	1,98	3,77	<1	2,81
7	6,99	14,75	6,67	15,53	3,31	5,53	<1	0,48
8	7,43	18,90	6,66	17,09	1,52	4,23	<1	0,28
9	16,00	32,35	10,41	28,94	3,78	6,14	<1	9,63



Şekil 1:

HCl ve CH₃COOH reaktantlarının Fe ve Al giderim verimlerine olan etkileri

Şekil 1'e göre HCl ile Al ve Fe giderimi incelendiğinde, en önemli parametrenin asit konsantrasyonu (B) olduğu, sıcaklığın da (C) pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Birlikte katı/sıvı oranının (A) giderim verimlerine çok etki etmediği gözlenmektedir. CH₃COOH ile Al ve Fe giderimlerine bakıldığında, en önemli etkinin sıcaklık (C) olduğu, katı/sıvı oranı (A) ve asetik asit konsantrasyonunun (B) az da olsa pozitif etki ettiği görülmektedir.

Taguchi metoduna göre tasarlanan deneysel çalışmalar sonucunda test edilen parametrelerle ilgili model analizleri grafikler Minitab 14 programı ile yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, optimizasyon işlemi demir ve alüminyum elementlerinin giderim verimlerinin yüksek olması tercih edildiğinden dolayı, büyük değer iyi yaklaşımı kullanılmıştır. S/N (sinyal/gürültü) oranı büyük olan değer en iyi olarak analiz edilmiştir. Bu yaklaşıma ait denklem 1 numaralı eşitlikte verilmiştir.

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

Burada:

S/N: Sinyal gürültü oranı ,

n: Deney sayısı,

y_i: Her bir gözlemin ölçülen değerini göstermektedir.

Tablo 5'de Al ve Fe giderimine etki eden her bir faktörün S/N analizi ve her deneysel çalışma şartları için regresyon analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 5. Faktör seviyelerinin S/N yanıt tablosu ve R² değerleri

Seviyeler	Fe			Al			Fe			Al		
	A (Kati/sıvı oranı)	B HCl	C Sıcaklık	A (Kati/sıvı oranı)	B HCl	C Sıcaklık	A (Kati/sıvı oranı)	B CH ₃ COOH	C Sıcaklık	A (Kati/sıvı oranı)	B CH ₃ COOH	C Sıcaklık
1	18,59	15,61	16,65	25,75	22,79	25,06	5,81	5,94	3,07	10,09	10,68	9,55
2	18,87	18,49	19,38	26,64	26,08	26,60	8,51	7,73	9,02	13,24	13,37	13,455
3	19,46	22,82	20,90	26,37	29,89	27,10	8,52	9,17	10,7	14,38	13,65	14,71
Delta (Δ) (Maks-Min)	0,87	7,20	4,25	0,88	7,10	2,04	2,71	3,23	7,68	4,28	2,97	5,15
Sıralama	3	1	2	3	1	2	3	2	1	2	3	1
R ²	0,947			0,985			0,991			0,983		

Tablo 5’de incelenen üç farklı faktör için elde edilen en büyük S/N değeri, o faktörün en iyi, Fe ve Al giderimlerinin ise en yüksek olduğu koşulları göstermektedir. Örneğin, HCl ile Fe gideriminin araştırıldığı şartlarda, katı/sıvı oranının üçüncü seviyede (A3), HCl konsantrasyonunun üçüncü seviyede (B3) ve sıcaklığın üçüncü seviyede (C3) olduğu şartlarda maksimum Fe giderimi elde edilmiştir. Aynı örnek için delta değerlerine bakıldığında, en etkili faktörler sırasıyla HCl konsantrasyonu ($\Delta=7,20$), sıcaklık ($\Delta=4,25$) ve en az etkili faktör olarak katı/sıvı oranı ($\Delta=0,87$) olarak tespit edilmiştir. Alüminyum giderimi için sadece HCl veya sadece CH_3COOH kullanıldığı durumlarda da genel olarak 3. seviye koşullarında optimum şartlar elde edilmiştir. 3. seviye koşulları, düşük katı/sıvı oranı (1/15), yüksek reaktant konsantrasyonu (1,5 M) ve yüksek sıcaklık (75 °C) değerlerini temsil ettiğinden, sonuçlar beklenen düzeydedir.

4. SONUÇLAR

Termik santrallerinde linyit kömürünün yanmasıyla, çok miktarda atık ürün, uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Uçucu küller içerdikleri elementler sebebiyle çevresel tehlike arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında Seyitömer Termik Santrali’nden temin edilen uçucu kül numunesinden alüminyum ve demir giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla Taguchi metodu uygulanarak, katı/sıvı oranı, farklı reaktantlar ve sıcaklık olmak üzere üç farklı değişkenin giderime olan etkileri tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en etkili reaktant olarak hidroklorik asit ve nitrik asit tespit edilmiş olup, asetik asit ve sodyum hidroksit ile istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmiş olmakla beraber, asetik asit ve sodyum hidroksit ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda düşük giderim verimleri elde edilmiştir. Optimum giderim şartları demir için yaklaşık %20, alüminyum için ise yaklaşık %35 olarak, 1,5 M HCl konsantrasyonunda, 75 °C sıcaklıkta elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 5008-YL1-17 nolu SDÜ BAP projesi tarafından desteklenmiştir. SDÜ BAP Yönetim Birimi Başkanlığı’na destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Anonim, (2015). <http://www.tuik.gov.tr/HbPrint.do?id=10732> (Erişim tarihi: 03.04.2018)
2. Fedje, K.K., Ekberg, C., Skarnemark, G. ve Steenari, B.M. (2010) Removal of hazardous metals from MSW fly ash—an evaluation of ash leaching methods. *J Hazard Mater* 173(1), 310–317. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.08.094
3. Hjelmar, O. (1990) Leachate from land disposal of coal fly ash, *Waste Manage, Res.*, 8, 429-449. doi:10.1016/0734-242X(90)90019-J
4. Huang, K., Inoue, K., Harada, H., Kawakita, H. Ve Ohto, K. (2011) Leaching of heavy metals by citric acid from fly ash generated in municipal waste incineration plants. *J Mater Cycles Waste Manag* 13(2), 118–126. doi:10.1007/s10163-011-0001-5
5. Kadioğlu, A.S. (2005) Yatağan Termik Santrali Uçucu Küllerindeki Metallerin Farklı Çözelti Ortamlarındaki Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
6. Meer, I. ve Nazir, R. (2017) Removal techniques for heavy metals from fly ash, *J Mater Cycles Waste Manag*, doi:10.1007/s10163-017-0651-z.
7. Murarka, İ.P., Mattigod, S.V. ve Keefer, R.F. (1993) An Overview of Electric Power Research Institute (EPRI) research related to effective management of coal combustion

- residues. in R.F. Keefer and K. Sajman (ed.) Trace elements in coal and coal combustion residues. Advances in Trace Substances Research book series. Lewis Publishers, Chelsea, MI.
8. Navarro, R., Guzman, J., Saucedo, I., Revilla, J. ve Guibal, E. (2007) Vanadium recovery from oil fly ash by leaching, precipitation and solvent extraction processes. Waste Manag 27(3), 425–438. doi:10.1016/j.wasman.2006.02.002
 9. Özdemir, O. (2001). Tunçbilek termik santrali uçucu küllerinin karakterizasyonu ve yan ürünlerinin eldesi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Enstitüsü, İstanbul.
 10. Sakata, M. (1987) Movement and neutralization of alkaline leachate at coal ash disposal sites. Environ. Sci. Technol. 21(8), 771–777. doi:10.1021/es00162a007
 11. Shibaoka, M., Ramsden, A.R. (1977) *Microscopic Investigation of the Behaviour of Inorganic Materyal In Coal During Combustion*, Proceedings of the International Conference on Ash Deposits and Corrosion Due to Impurities in Combustion Gases (R.W. Breyers, ed.), New Hampshire.
 12. Spencer, L.L.S., Drake, L.D. (1987) Hydrogeology of an alkaline fly ash landfill in eastern Iowa. doi:10.1111/j.1745-6584.1987.tb02881.x
 13. Şengül, Ü. (2002). Kangal Termik Santralinde Uçucu Kül Atımının Çevresel Etkileri. Çevkor.
 14. Taylan, D. (2009) Taguchi deney tasarımı uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Ens, Isparta.
 15. Theis, T.L., Ripp, J.A. ve Villaume, J.F. (1989) Physical and chemical characteristics of unsaturated pore water and leachate at a fly ash disposal site. in: 43rd Purdue Industrial Waste Conf. Proc. Lewis Publishers, Chelsea, MI, p. 161-172.
 16. Topal, M., Arslan Topal, E.I., Aslan, S. ve Kılıç, M. (2011) Termik Santral Uçucu Külü, Cürufu Ve Arıtma Çamurundan Ağır Metallerin Liçlenebilirliği. SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 15(2), 97-104.
 17. Toraman, Ö.Y. (1995) Afşin-Elbistan Termik Santral Uçucu Küllerinden Liç Yöntemiyle Metal Oksitlerin Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
 18. Toroz, H. (1987). Afşin- Elbistan termik santrali uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen. Bil. Ens, İstanbul.
 19. Türkmenoglu, M. (2010) Uçucu Küllerin Liç Karakteristiklerinin ve Çevreye Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
 20. Türkmenoğlu, M., Anıl, M. ve Erkuş, F.Ş. (2014) Ege bölgesindeki termik santrallerden alınan uçucu küllerin liç karakteristiklerinin belirlenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, , 29(2), 131-140.
 21. Ulubaş T. (2000). Uçucu küllerin ağır metal (Cu^{2+} , Pb^{2+}) gideriminde kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
 22. USEPA (1988) Wastes from the combustion of coal by electric utility power plants. USEPA Rep. 530-SW-88-002. Washington, DC.
 23. Yıldız, 2013. Maxılın Yellow 4GL Boyar Maddesinin Bazı Oksit Mineralleri Yüzeyine Adsorpsiyonuna ait Deneysel Dizaynı ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, FBE Kimya Anabilim Dalı, 74 s.