

# Ekstraksiyon Kromatografi İle Düşük Düzey Laboratuvar Atık Çözeltilerinden Uranyum Ayırımı

Ümran Hiçsönmez<sup>1\*</sup>, Meral Eral<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Celal Bayar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, 45140, Manisa, Tel: +90 236 2013170, umran.hicsönmez@cbu.edu.tr

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, 35100, İzmir, Tel: +90 232 3113451, meral.eral@gmail.com

\*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş / Recieved: 11 Ağustos (August) 2015

Kabul / Accepted: 5 Ekim (October) 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.10803>

## Özet

Ekstraksiyon kromatografisi, son yıllarda aktinitlerin ayırımı ve kazanımında uygulanmakta olan analitik bir tekniktir. Bu çalışmada, ekstraksiyon kromatografi tekniği ile düşük düzey radyoaktif atık çözeltilisindeki uranyum(VI)'nın önderişimi ve ayırımı için bir metod geliştirilmiştir. Çalışmanın ilk kısmında, standart uranyum çözeltisi ile denemeler yapılmış olup, uranyum, trioktilfosfin oksit (TOPO) ile yüklü silika jel kolonda ekstrakte edilmiştir. Belirlenen optimum koşullarda, 1 M HNO<sub>3</sub>+1 M NaNO<sub>3</sub> ortamında uranyumun ekstraksiyon verimi %99,5±1,5 bulunmuştur. Değişik elüsyon çözeltileri ile yapılan elüsyon denemelerinde en yüksek elüsyon verimleri; 0,5 M HCl çözeltisi için % 83,6, 0,5 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> çözeltisi için %84,3, 1 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> çözeltisi için %97,6 ve 9 M HClO<sub>4</sub> çözeltisi için %92,3 olarak saptanmıştır. Metod doğrudan düşük düzey laboratuvar atık çözeltilisine uygulandığında uranyum ekstraksiyon verimleri 3 M HNO<sub>3</sub> için %52,8; 1 M HNO<sub>3</sub>+1 M NaNO<sub>3</sub> için %67,3 olarak saptanmıştır. Atık çözeltilisine 1:1 HClO<sub>4</sub> ve %35' lik H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile önışlem yapıldığında, 1 M HNO<sub>3</sub>+1 M NaNO<sub>3</sub> ortamında uranyum ekstraksiyon verimi %95,7±2,3' ye ulaşmıştır. Kolondan önce, 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi ile toryum % 89,2±3,1 ve daha sonra 9 M HClO<sub>4</sub> çözeltisi ile uranyum %94,1±1,8 verim ile elüye edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Düşük-Düzey Radyoaktif Atık, Ekstraksiyon Kromatografisi, TOPO, Uranyum.

## The Separation Uranium From Low Level Radioactive Waste Solutions By Extraction Chromatography

### Abstract

In recent years, extraction chromatography is an analytical technique which is applied for the separation and recovery of actinides. In this study, a method for the preconcentration and separation uranium(VI) in low level radioactive waste solution has been developed using extraction chromatography. In the first stage of the work, experiments were performed by standart uranium solutions and uranium was extracted on silica gel column coated with trioctylphosphine oxide. At determined optimum conditions, the yield of the uranium extraction in 1 M HNO<sub>3</sub>+1 M NaNO<sub>3</sub> medium was found as 99.5±1.5%. Various stripping reactants tested in the experiments were as follows; 0.5 M HCl, 0.5 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 1 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and 9 M HClO<sub>4</sub>, 83.6%, 84.3%, 97.6% and 92.3%, respectively. By applying this method to the low-level laboratory waste solutions, uranium extraction yields in 3 M HNO<sub>3</sub> and 1 M HNO<sub>3</sub>+1 M NaNO<sub>3</sub> were found as 52.8%, 67.3%, respectively. After the pretreatment with 4 mL 1:1 HClO<sub>4</sub> and 6 mL 35% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, the uranium extraction yield reached to 95.7±2.3% in 1 M HNO<sub>3</sub>+1 M NaNO<sub>3</sub>. Firstly, thorium was eluted with 10 mL 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and then uranium was eluted with 20 mL 9 M HClO<sub>4</sub>. The recoveries were 89.2±3.1% and 94.1±1.8%, respectively.

**Key Words:** Extraction Chromatography, Low-Level Radioactive Waste, TOPO, Uranium.

## 1 Giriş

Radyoaktif atıklar, nükleer yakıt çevrimi sırasında, endüstride ve kurumlarda ortaya çıkarlar. Endüstriyel atıklar, ilaç şirketlerinden ve izotop kullanan üreticilerden kaynaklanmaktadır. Kurumlar ise; üniversiteler, hastaneler ve araştırma laboratuvarlarını kapsamaktadır [1].

**Düşük düzey sıvı atıklar** (Low Level Waste, LLW), kimyasal çöktürme/flotasyon, buharlaştırma, iyon değiştirme ve solvent ekstraksiyon metodları ile işlenirler [2]. Bu çalışmada, ekstraksiyon kromatografi tekniği düşük düzey laboratuvar atık çözeltilerindeki uranyum ve toryum radyonüklidlerinin kazanımı ve uzaklaştırılması için uygulanmıştır.

Ekstraksiyon kromatografisinde, solvent ekstraksiyonunun ve iyon değiştiriminin avantajları birleşir. Bu teknik, solvent ekstraksiyonunun seçiciliğine ve kolon kromatografisinin kullanım kolaylığına sahiptir. Organik ve sulu faz (nötral ya da asidik) arasında ilgili katyonların dağılımı ilkesi ile radyonüklidlerin ayırımı ve kazanımını baz alır. Genellikle kullanılan asitlerin ve diğer reaktiflerin hacimleri, iyon değiştiriciden önemli derecede daha azdır. İşlemler; çoğunlukla kısa analiz zamanı, yüksek kazanımlar ve daha çok tekrarlanır sonuçlar eldesi bakımından daha iyidir. Ekstraksiyon kromatografisi ile kısa ya da uzun yarı ömürlü radyoizotopları zenginleştirmek, izole etmek, fisil materyallerin makro konsantrasyonlarından fisyon ürünlerin küçük miktarlarını ayırmak mümkün olmaktadır [3, 4].

Ekstraksiyon kromatografi tekniğinde ekstraktant olarak; asidik çözücüler (HDEDP vb.), aminler ve amonyum tuzları (Aliquat 336 vb.), P=O grupları olan organik moleküller (TBP vb.), şelat yapıcı taç eterler ve kaliksarenler, seyreltik sulu çözeltilerden metallerin ayırımı, kazanımı ve tayininde yaygın olarak kullanılmaktadır [3, 5-9].

Çalışmada, silika jelin TOPO/sikloheksan ile yüklenmesinden sabit faz elde edilmiştir.

TOPO/silika jel kolonda uranyumun

ekstraksiyonunu etkileyen parametrelerden; çözelti pH' si, HNO<sub>3</sub> konsantrasyonu, NaNO<sub>3</sub> miktarı ve akış hızı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük düzey laboratuvar atık çözeltilerinden uranyumun ayrılması ve kazanılması için uygulanmıştır.

## 2 Materyal ve Metod

Denemelerde materyal olarak, Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde spektrofotometrik ve potansiyometrik analiz çalışmaları sırasında toplanan uranyum ve toryum içeren sulu atık çözelti kullanılmıştır.

Uygun miktarda UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O (Merck)' in suda çözülmesi ile 0,1 M HNO<sub>3</sub> ortamında 1000 mgL<sup>-1</sup> uranyum stok çözeltisi hazırlanmıştır.

Silika jel 60 (70-230 mesh), dimetildiklorosilan buharlarına tabi tutularak hidrofobik hale getirilmiştir. Elde edilen hidrofobik silika jel 0,1 M TOPO/sikloheksan çözeltisi ile 1 saat mekanik olarak çalkalanarak yüklenmiştir (TOPO/silika jel).

Düşük düzey laboratuvar atık çözeltilerindeki uranyum konsantrasyonu, atık çözeltisi Dowex 1x8-100 (50-100 mesh) reçinesinden geçirildikten sonra [10] TOPO/DBM yöntemi ile spektrofotometrik olarak tayin edilmiştir [11].

Standart çözeltiler ile yapılan denemelerde uranyum, PAR yöntemi ile [12]; toryum ise, TOPO/Torin yöntemi ile spektrofotometrik olarak saptanmıştır [13]. Atık çözeltisinin Cl<sup>-</sup> içeriği titrimetrik olarak Fajans metodu ile tayin edilmiştir. Safsızlık oluşturan bazı elementlerin analizleri Varian marka Spectra-A-10 Puls model atomik absorpsiyon spektrofotometresi (AAS) ile yapılmıştır.

0,8x20 cm cam kolon TOPO/silika jel katısı ile doldurulmuştur. Kolonda düzenli akış peristaltik ATTO Model SJ-1211 Model pompa ile sağlanmıştır.

Dağılım katsayısı D<sub>u</sub> aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır:

$$D_u = \frac{V_{sulu}}{m} \left( \frac{C_b(sulu) - C_d(sulu)}{C_d(sulu)} \right) \text{ mLg}^{-1} \quad (2.1)$$

Burada,  $V_{sulu}$ = Sulu faz hacmi (mL),  $m$ = TOPO/silika jel miktarı (g),  $C_{b(sulu)}$ = Sulu fazdaki uranyumun başlangıçtaki konsantrasyonu,  $C_{d(sulu)}$ = Sulu fazdaki uranyumun denge konsantrasyonunu ifade etmektedir.

## 2.1 Kesikli (Batch) Sistem Denemeleri

Başlangıçta dağılma katsayısı hesaplamaları kesikli sistem denemeleri ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 25 mL 200 mgL<sup>-1</sup> uranyum içeren sulu çözelti %5,6 (gg<sup>-1</sup>) TOPO içeren 0,5 g kuru silika jel ile farklı sürelerde GFL marka 1083 model mekanik çalkalayıcıda dengeye getirilmiştir. Karışım Whatman No 44 kağıdı ile süzölmüş ve çözeltilerdeki ekstrakte edilmemiş uranyum tayin edilmiştir. TOPO yüklü ve yüksüz silika jelde çalkalama süresine bağlı olarak değişen uranyumun dağılma katsayısı Çizelge 1' de verilmiştir. Yüksüz hidrofobik olmayan silika jelin bir miktar uranyumu tuttuğu görülmektedir. Ancak, uranyum için ekstraksiyonu seçici yapmak amacı ile TOPO yüklendiğinde çalkalama süresi 1 saatten fazla olduğunda yüksek ekstraksiyon verimleri elde edilmektedir. Oysa TOPO/çözgen, solvent ekstraksiyonunda kullanıldığında 10 dakika gibi kısa bir sürede büyük yüzdelerde ekstrakte etme verimi göstermektedir [11, 13]. Kesikli sistemde, TOPO'nun ekstraksiyon veriminin solvent ekstraksiyonundakinden daha az olduğu anlaşılmaktadır.

## 2.2. Kolon Denemeleri

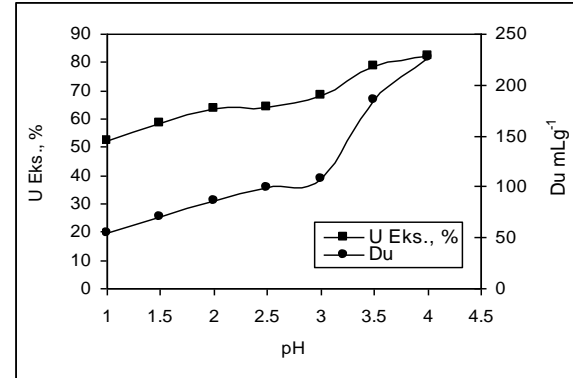
0,5 g TOPO/silika jel içeren 0,8 cm iç çaplı kolonlardan, 0,6 mLdak<sup>-1</sup> akış hızında 25 mL 200 mgL<sup>-1</sup> uranyum çözeltileri geçirilerek kolon denemeleri yapılmıştır. Tüm kolon denemeleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Uranyum ekstraksiyonuna pH etkisini incelemek için, çözelti pH' leri 1,0' den 4,0' e kadar değiştirilmiştir. Çözelti pH ayarlamaları 1 M HNO<sub>3</sub> ya da %20 NH<sub>3</sub> çözeltileri ile yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 1' de gösterilmiştir. pH=1 ile 3 arasında ekstraksiyon

veriminin fazla değişmediği, pH= 3' den sonra ise artış göstererek pH= 4' de %82' ye ulaştığı belirlenmiştir.

**Çizelge 1.** Uranyum dağılma katsayısına çalkalama süresinin etkisi. 25 mL 1 M HNO<sub>3</sub>' li 200 mgL<sup>-1</sup> uranyum çözeltisi

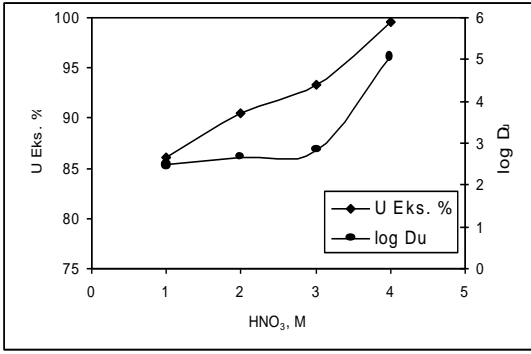
Silikajel	Süre, saat	Eks. olan U, %	D <sub>u</sub> , mLg <sup>-1</sup>
Yüksüz silika jel	1	45	40,71
0,1 M TOPO yüklü	1/2	42	39,61
0,1 M TOPO yüklü	1	78	178,03
Yüksüz silika jel	2	65	94,42
0,1 M TOPO yüklü	2	82	219,69
	4	86	303,11
0,1 M TOPO yüklü	8	91	509,28



**Şekil 1.** Sulu faz pH' sinin uranyum ekstraksiyonuna etkisi

Uranyum ekstraksiyon verimine HNO<sub>3</sub> konsantrasyonunun etkisini incelemek üzere, HNO<sub>3</sub> konsantrasyonu 1 M' dan 4 M' a kadar değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Şekil 2' de görüldüğü gibi artan HNO<sub>3</sub> konsantrasyonu ile uranyum ekstraksiyonu artmaktadır.

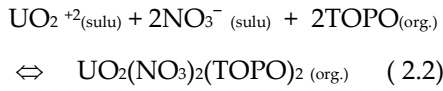
Literatürde TOPO tarafından uranyumun UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>TOPO kompleksi halinde ekstrakte olduğu belirtilmektedir [14].



**Şekil 2.** HNO<sub>3</sub> konsantrasyonunun uranyum ekstraksiyonuna etkisi.

Asidik çözeltideki uranyum(VI)'nın ekstraksiyonunda tuz reaktifinin etkisi araştırılmıştır. Na, Ca ve Al' un nitrat tuzları ilave edildiğinde aktinitlerin ekstraksiyonunun arttığı bilinmektedir. Çizelge 2' de görüldüğü gibi artan nitrat iyonu konsantrasyonu ile uranyum dağılma katsayısı artmıştır.

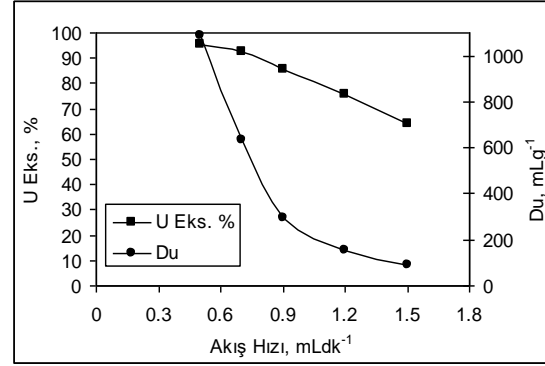
Artan nitrat konsantrasyonu, ekstraksiyon denge reaksiyonunu sağa kaydırduğunda uranyum(VI) ekstraksiyonunun arttığı söylenebilir [15];



**Çizelge 2.** Uranyum dağılma katsayısı üzerine tuz etkisi. Besleme çözeltisi; 25 mL 1 M HNO<sub>3</sub>' li 200 mgL<sup>-1</sup> uranyum çözeltisi

NaNO <sub>3</sub> , M	Toplam NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mmol	Eks. olan U, %	D <sub>u</sub> , mLg <sup>-1</sup>
0,1	27,5	88,7	393
0,5	37,5	95,3	1 014
1,0	50,0	99,8	29 362

Kolondaki hareketli fazın akış hızı, sabit ve hareketli faz arasındaki temas zamanını belirlediğinden, oldukça önemlidir [16]. 0,5 mLdak<sup>-1</sup> den 1,5 mLdak<sup>-1</sup> e kadar değişen akış hızları denenmiştir. Sonuçlar Şekil 3' de verilmiştir. Uranyum ekstraksiyon verimi 0,7 mLdak<sup>-1</sup> üzerindeki hızlarda %90' dan aşağıya düşmektedir.



**Şekil 3.** Çözelti akış hızının uranyum ekstraksiyonuna etkisi

Uranyumun geri kazanımı için, 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 0,5, 1,0 ve 2,0 M HCl; 0,5 ve 1 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>; 7 ve 9 M HClO<sub>4</sub> çözeltileri denenmiştir. Farklı elüsyon reaktiflerinin 20 mL' si, uranyum ekstrakte edilmiş olan 0,5 g TOPO/silika jel kolonundan 0,8 mLdak<sup>-1</sup> elüsyon akış hızında geçirilmiş ve daha sonra her çözeltideki uranyum konsantrasyonları ölçülmüştür. Uranyum elüsyon verimleri Çizelge 3' de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Bazı elüsyon reaktifleri ile uranyumun elüsyon verimleri

Elüsyon Reaktifi	Konsantrasyon, M	Elüsyon Verimi, %
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,5	32,7
	0,5	83,6
	1,0	56,8
HCl	2,0	42,4
	0,5	84,3
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1,0	97,6
	7,0	76,8
HClO <sub>4</sub>	9,0	92,3

Standart Th çözeltileri ile ilgili parametrelerin kolon ve elüsyon denemeleri daha önceki bir çalışmada incelenmiştir [17].

### 2.3 Laboratuvar Atık Çözeltisinden Uranyumun Ayrımı ve Kazanımı

Kullanılan laboratuvar atık çözeltisinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4' de verilmiştir. Laboratuvar atık çözeltisinden uranyumun TOPO/silika jel kolonunda ekstraksiyonu için, iki ayrı besleme çözeltileri hazırlanmıştır;

- 1) 3 M HNO<sub>3</sub> ortamında 25 mL laboratuvar atık çözeltisi,

- 2) 1 M HNO<sub>3</sub> ortamında, 2 g NaNO<sub>3</sub> ilave edilmiş 25 mL laboratuvar atık çözeltisi.

**Çizelge 4.** Laboratuvar atık çözeltisinin analiz sonuçları

Element	Metod	Konsantrasyon
Na	Alev fotometresi	19,20 mgmL <sup>-1</sup>
As	AAS	1,14 mgmL <sup>-1</sup>
Fe	AAS	0,10 mgmL <sup>-1</sup>
Zn	AAS	0,80 mgmL <sup>-1</sup>
Cr	AAS	<6 µgmL <sup>-1</sup>
U	UV-Görünür Spektrofotometri (Dowex 1x8-100 ile ayırma)	242,5±10,1 mgL <sup>-1</sup>
Th	UV-görünür Spektrofotometri	95,7±8,9 mgL <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	Titrimetrik	%13,12±0,40

İki farklı besleme çözeltisi ayrı ayrı 1 g TOPO/silika jel kolonlarından 0,6 mLdak<sup>-1</sup> akış hızlarında geçirilmiştir. Bu koşullarda ekstraksiyon verimleri sırası ile %52,8 ve %67,3 olmuştur.

Her iki çözelti için de uranyum ekstraksiyon verimlerinin düşük olmasının nedeninin, atık çözeltisinin 1) çoğunlukla uranium(VI) ve az miktarda uranium(IV) ihtiva etmesi 2) organik komplekslerin mevcut olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uranyumun iyonik değerliğini yükseltmek ve mevcut organik kompleksleri parçalamak amacı ile 25 mL besleme çözeltilerine 4 mL 1:1 HClO<sub>4</sub> ve değişen miktarlarda %35 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave edilmiştir. Çizelge 5' de görüldüğü üzere uygulanan ön işleme ekstraksiyon verimi %90' ın üzerine çıkarılmıştır.

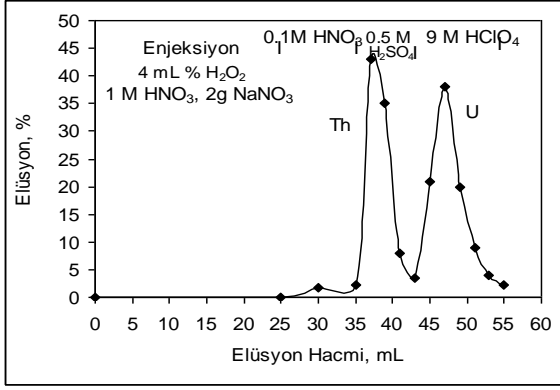
**Çizelge 5.** Ön işlem uygulanan laboratuvar atık çözeltilerindeki uranyumun ekstraksiyon verimleri

İlave Edilen %35 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , mL	U Eks., %
2	72,2
4	93,6
6	95,7

Hazırlanan laboratuvar atık çözeltisi kolondan geçirildikten sonra, kolon 10 mL 0,1 M HNO<sub>3</sub> ile yıkanmıştır. Elüsyon eğrisinden görüldüğü üzere (Şekil 4) önce 8 mL 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile toryum, daha sonra 12 mL 9 M HClO<sub>4</sub> çözeltisi ile de uranyum elüye edilebilmiştir. Elüsyon verimleri toryum için %89,6 ve uranyum için %94,3 olmuştur. Fraksiyon çözeltilerinin analiz sonuçları (0,1 M HNO<sub>3</sub> yıkama çözeltisinin ve 9 M HClO<sub>4</sub> sıyırma çözeltisinin analiz sonuçları) Çizelge 6' da verilmiştir. Laboratuvar atık çözeltisindeki safsızlıkların iz miktarda olduğu, uranyum ve toryumun ayrılarak konsantre edilebildiği anlaşılmaktadır.

**Çizelge 6.** Ekstraksiyon kromatografisinden sonra alınan analiz sonuçları

Element	Kolondan Geçen Atık Çözeltisi, mgL <sup>-1</sup>	Yıkama Çözeltisi 0.1 M HNO <sub>3</sub> mgL <sup>-1</sup>	Elüsyon Çözeltisi 20 mL 9 M HClO <sub>4</sub> mgL <sup>-1</sup>
Na	27 960	660	620
As	700	690	60
Fe	10	30	20
Zn	530	510	220
U	---	---	286
Th	---	---	213 (10 mL 0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )



**Şekil 4.** TOPO/silika jel kolonunda toryum ve uranyum elüsyon eğrisi

### 3 Sonuç ve Tartışma

Seyreltik sulu çözeltilerdeki radyonüklidlerin tayini, kazanımı ve saflaştırılması için önkonsantre etme işlemine ihtiyaç olmaktadır. Ekstraksiyon kromatografisi, benzer özelliklerdeki elementlerin ayrımı için uygun bir metod olup; radyokimyanın, analitik kimyanın ve nükleer teknolojinin değişik alanlarında uygulamalar bulmuştur. Bu yöntem basit, kolay ve hızlıdır [18].

Çalışmamızda, uranyum dağılım katsayısının 4 M HNO<sub>3</sub> ortamında kuvvetlice arttığı görülmüştür. 1 M HNO<sub>3</sub>+1 M NaNO<sub>3</sub> ortamında uranyum ekstraksiyon verimi % 99,8±1,5 olmuştur. Uranyumun elüsyonu; 0,5 M HCl, 0,5 M ve 1 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ve 9 M HClO<sub>4</sub> ile başarılı olmuştur. Elüsyon verimleri sırası ile %83,6, %84,3, %97,6 ve %92,3 dür. Laboratuvar atık çözeltilisine, 4 mL 1:1 HClO<sub>4</sub> ve %35 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave edildikten sonra 1 M HNO<sub>3</sub> ve 1 M NaNO<sub>3</sub> ortamı sağlandığında uranyumun ekstraksiyon veriminin arttığı gözlenmiştir. Önce atık çözeltilisindeki toryum 8 mL 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılarak %89,2±3,1, daha sonra uranyum; 12 mL 9 M HClO<sub>4</sub> kullanılarak %94,1±1,8 elüsyon verimi ile elüye edilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilmiş olan metod, benzer kompozisyondaki atık çözeltilerine uygulandığında uranyum ve toryumun çevreye verebileceği tehlikelerinden kaçınılabilmek mümkün olabilecektir. İlaveten, toryum ve

uranyum birbirinden ayrılarak küçük hacimlerde kazanılmış olacaktır.

Bu çalışma Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu BAP tarafından desteklenmiştir (Proje No 1998 NBE-002).

### 4 Kaynaklar

- [1] Murray, R.L., Nuclear Energy, Elsevier Inc., Sixth Edition, USA, 2008; 363-365 pp.
- [2] IAEA-Bulletin, 34, 3, Vienna, 7-11, 1992.
- [3] Braun, T.; Ghersini, G. Extraction Chromatography, Elsevier Sci. Pub.; B.V., Amsterdam, 1975.
- [4] Madic, C.; Bourges, J.; Koehly, G. Ten Years of Experience in Extraction Chromatographic Processes for the Recovery, Separation and Purification of Actinide Elements, Technical Committee Meeting on Inorganic Ionexchangers and Adsorbents for Chemical Processing in the Nuclear Fuel Cycle; Vienna, 12-15 Jun 1984; 157-171, 1984.
- [5] Pietrelli, L.; Salluzzo, A.; Troiani, F. Actinides Removal by Means of Octy(phenyl)-N,N-Diisobutyl Carbamoyl Methyl Phosphine Oxide (CMPO) Sorbed on Silica, New Separation Chemistry Techniques for Radioactive Waste and Other Specific Applications, Eds.; Cecille, L.; Casarci, M.; Pietrelli, L., Elsevier App. Sci. Pub. Co.; London, 87-94, 1991.
- [6] Pilviö, R.; Bickel, M. Actinide Separations by Extraction Chromatography, Applied Radiation and Isotopes. 2000; 53, 273-277.
- [7] Horwitz, E.P.; McAlister, D.R., Dietz, M.L. Extraction Chromatography Versus Solvent Extraction: How Similar are They?, Separation Science and Technology. 2006; 41, 2163-2182.
- [8] Xu, Y.; Kim, S.; Ito, T.; Tokuda, H.; Hitomi, K.; Ishii, K. Adsorption Behavior of Platinum Group Metals onto a Silica-based (Crea+Dodec)/SiO<sub>2</sub>-P Extraction Resin from Simulated High Level Liquid Waste, Separation Science and Technology. 2015; 50, 260-266.

[9] Sankhe, R.H.; Sengupta, A.; Mirashi, N. N. Simultaneous recovery of plutonium and americium from assorted analytical waste solutions using extraction chromatography, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014; 302, 617–622.

[10] Korkish, J.; Dimitriadis, D. Anion-exchange Separation and Spectrophotometric Determination of Thorium in Geological Samples, *Talanta*. 1973; 20, 1199-1205.

[11] Kaner, J.; Byn, T. Analytical Chemistry of Uranium, *Israel Prog. for Scientific Translation*. 1963; 254-255.

[12] Leib, G.; A Guide to Practical Radiochemistry, Translated from the Russian, *Mir Publishers; Moscow*, 1984, 2, 45-46.

[13] Ross, W.J; White, J.C. Extraction and Determination of Thorium from Sulphate and Phosphate Solutions with Tri-n-octylphosphine Oxide, *Analytical Chemistry*. 1959; 31 (11), 1847-1850.

[14] Pearson, S.; Bowen, H.J.M. A Note on Absorption and Desorption of Uranium by Polyurethane foam, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters*. 1985; 96 (5), 499-502.

[15] Benedict, M.; Pigford, T.H.; Lewi, H.W. *Nuclear Chemical Engineering*, McGraw-Hill Book Company; New York, 1981; 158-168 pp.

[16] Skoog, D.A.; West, D.M.; Holler, J.F. *Fundamentals of Analytical Chemistry*, Sixth Edition, Saunders College Publishing; London, 1992; 665-689 pp.

[17] Hiçsönmez, Ü.; Eral, M. Investigation of thorium (IV) separation from cerium (IV) on a silica gel column coated with tri-octylphosphine oxide, *Journal of Alloys of Compounds*. 1998; 271-273, 620-624.

[18] Ito, T.; Nagaishi, R.; Kimura, T.; Kim, S. Study on radiation effects on (MOTDGA–TOA)/SiO<sub>2</sub>-P adsorbent for separation of platinum group metals from high level radioactive waste, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015; 305, 419–427.