



SOL-JEL YÖNTEMİYLE SENTEZLENMİŞ ZrO_2-SiO_2 KOMPOZİT MİKROKÜRECİKLERİNİN Sr^{+2} ADSORPSİYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Süleyman İnan*, Hüseyin Tel, Yüksel Altaş, Meral Eral, Şenol Sert, Berkan Çetinkaya, Uğraş Kaplan

Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, 35100, Bornova-İZMİR

Toprak alkali bir metal olan Sr-90 yaklaşık 30 yıllık yarı-ömre sahip, nükleer güç reaktörlerinde kullanılmış yakıtlardan ortaya çıkan tipik bir fisyon ürünüdür. Sıvı radyoaktif atıklardan uzun yarı ömürlü toksik bir radyoizotop olan stronsiyumun uzaklaştırılması sağlık güvenliği açısından önemlidir. Ayrıca depolama problemlerini azaltır ve atıkların nihai elden çıkartılmasını kolaylaştırır. Stronsiyumun sıvı nükleer atıklardan uzaklaştırılmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Metal oksitler ile yapılan adsorpsiyon işlemi bunlardan biridir. Özellikle titanyum, silisyum ve zirkonyumun hidrate oksitleri ve bunların karışımları, Ti ve Zr fosfatlar, kristalin siliko-titanat (CST), vb. sorbentler, yüksek selektiviteleri, iyi termal ve radyasyon kararlılıkları, kuvvetli asidik ortamlarda dahi kimyasallara karşı kararlılıkları, yüksek sorpsiyon kapasiteleri, daha sonraki immobilizasyon adımına uyumluluğu ile önem kazanmış ve birçok çalışmaya konu olmuştur. Sentetik inorganik sorbentlerin en önemli dezavantajları, kolon uygulamaları için kullanımlarını sınırlayan, uygun olmayan granülometrik ve mekanik özellikleridir. Sol-jel tekniği kullanılarak bu kompozit sorbentlerin homojen ve üniform küresel partiküllerinin hazırlanması, endüstriyel ölçekte kolon uygulamaları için akış dinamiklerini iyileştirir ve pratik uygulamaları genişletir. Çalışmada, sol-jel tekniği kullanılarak Sr^{+2} adsorpsiyonunda kullanılmak üzere ZrO_2-SiO_2 kompozit mikrokürecikleri sentezlenmiştir. Sentezlenen sorbentin "Central Composite Design" (CCD) modeli kullanılarak optimum adsorpsiyon koşulları belirlenmiştir. Adsorpsiyona ait ΔH^0 , ΔS^0 ve ΔG^0 gibi termodinamik parametreler hesaplanmış, adsorpsiyonun Langmuir, Freundlich ve D-R izotermine uygunluğu incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ZrO_2 , SiO_2 , Central Composite Design, Sol-jel, Sr^{+2}

NOT: Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 106T680 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

* suleyman.inan@ege.edu.tr

INVESTIGATION ON THE UTILIZATION OF ZrO_2-SiO_2 COMPOSITE MICROSPHERES FOR Sr^{+2} SORPTION SYNTHESIZED VIA SOL-GEL METHOD

Sr-90 is a typical fission product with a half life of approximately 30 years. The removal of long lived radiotoxic strontium from liquid radioactive waste is an important issue for the health safety. Besides, it reduces the storage problems and facilitates the disposal of the waste. Several methods are utilized for the removal of strontium from liquid radioactive waste. One of the important methods is adsorption processes using metal oxides. Especially, sorbents such as hydrous oxides of titanium, silicium and zirconium and their mixtures, titanium and zirconium phosphates, crystalline silico-titanate(CST) have a good thermal and radiation stability, chemical stability even in strong acidic media, high sorption capacity and compatibility to immobilisation step. The major disadvantage of synthetic inorganic sorbents is their unsuitable granulometric and mechanical properties to use in column applications. Preparation of homogen and uniform spherical particles of these composite sorbents by sol-gel method improves the flow dynamics for column operation and extends its practical applications in industry. In this study, ZrO_2-SiO_2 composite microspheres were synthesized by sol-gel method. for the sorption of Sr^{2+} . The optimum Sr^{2+} adsorption conditions were determined by "Central Composite Design" (CCD). Thermodynamic parameters related to adsorption such as ΔH^0 , ΔS^0 and ΔG^0 were calculated. The adsorption data have been interpreted in terms of Langmuir, Freundlich and D-R isotherms.

Keywords: ZrO_2 , SiO_2 , Central Composite Design, Sol-gel, Sr^{+2}

P.S: This study is supported by TÜBİTAK with 106T680 code number.

1. GİRİŞ

Nükleer çağ ile birlikte homojen reaktörler için yakıt üretimi, kullanılmış yakıtların yeniden işlenmesi ve yüksek aktiviteli atıkların yönetimi gibi problemler ortaya çıkmıştır. Toprak alkali metal olan ^{90}Sr nükleer güç reaktörlerinin kullanılmış yakıtlarından çıkan ve yaklaşık 30 yıl ile göreceli uzun yarı-ömrü olan yüksek aktiviteli radyoaktif bir atıktır. Nükleer atık yönetiminde; radyoaktif sıvı atıklardan stronsiyum gibi uzun ömürlü, toksik radyoizotopların uzaklaştırılması, sağlık güvenliği ve çevrenin korunması açısından önemlidir, ayrıca depolama problemlerini azaltır ve atıkların nihai elden çıkartılmasını kolaylaştırır[1]. Diğer taraftan, değerlendirilebilir elementlerin nükleer atıklardan geri kazanımı bu elementlerin pahalı olmaları ve potansiyel uygulama alanlarının genişliği nedeni ile atık yönetimi uzmanlarının ilgisini çeken bir konu haline gelmiştir. Tüm bu nedenler radyasyona dayanıklı adsorbanlar ve iyon-değiştiricilere olan gereksinimi kaçınılmaz kılmıştır.

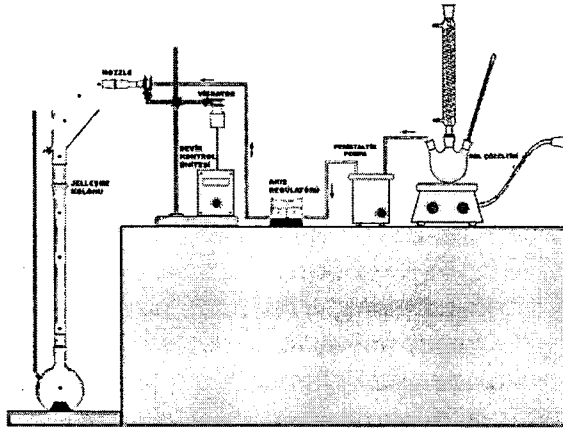
1950'lerin ilk yarısında radyasyonun çeşitli organik iyon-değiştiricilerde etkileri üzerine pekçok araştırma yapılmış ve inorganik iyon-değiştiriciler de mercek altına alınmıştır[2]. Bu bağlamda inorganik iyon değiştiriciler seçicilikleri ve uygunlukları nedeniyle fisyon atıklarının ayrılmasında önemli bir rol oynarlar. Fakat bu adsorbanlar genel olarak toz halinde bulunurlar ve kolon kromatografi uygulamaları gibi sürekli sistemler için uygun değildirler. Sorbent yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar ve matriksin yapısı inorganik sorbentlerin selektivitesini belirler. Yeni tip adsorbanların sentezlenmesi için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Kompozit adsorbanların sentezi de bunlardan biridir. Sol-jel tekniği kullanılarak bu kompozit sorbentlerin homojen ve üniform küresel partiküllerinin hazırlanması, endüstriyel ölçekte kolon uygulamaları için akış dinamiklerini iyileştirir ve pratik uygulamaları genişletir[3].

Çalışmada, sol-jel tekniği kullanılarak, büyük hacimli, asidik veya bazik nükleer atık çözeltilerinden Sr^{+2} iyonlarını ayırabilecek ve immobilize edebilecek, yüksek kapasiteli, kimyasal ve radyasyona karşı kararlılığı iyi ve kinetiği hızlı, homojen ve üniform yapıda $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ kompozit sorbent kürecikleri hazırlanmıştır. Sentezlenen $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ karışık oksit küreciklerinin stronsiyuma karşı adsorpsiyon davranışları "central composite design" (CCD) modeli ile belirlenmiştir. Sr^{+2} alım denemeleri merkez noktalarda 7 tekrar ile dört farklı parametrenin (pH, stronsiyum derişimi, sıcaklık ve temas süresi) incelenmesi ile gerçekleştirilmiş, ikili etkileşimler incelenmiş ve yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Sorpsiyon verileri, Langmuir, Freundlich ve Dubinin Radushkevich denklemlerine uyarlanmış ve sorpsiyon sistemi için termodinamik parametreler belirlenmiştir.

2. DENEYSEL

2.1. $\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$ Mikroküreciklerinin Sentezi

$\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$ kaynak solü 0.25M Zr ve 0.25M Si (toplam metal konsantrasyonu 0.5M) içerecek şekilde ZrCl_4 ve Na_2SiO_3 'den hazırlanmıştır. 11.6g ZrCl_4 ve 11.1g Na_2SiO_3 200mL deiyonize suda çözülerek geri soğutucu sistem altında 70°C 'da sabit sıcaklıkta şiddetli karıştırma altında 3M NH_4OH ile kısmi olarak nötralize edilmiştir. 40mL 3M NH_4OH sarfiyatı sonucu sol çözeltisi elde edilmiştir.



Şekil 1. Sol-jel çöktürme düzeneği.

Jelleştirme basamağı Şekil 1.'de görülen düzenek vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Nozzle jelleştirme kolonu üzerinde yatay olarak konumlandırılmıştır. Jelleştirme kolonu iki fazdan oluşmaktadır. Üst faz önsertleşmeyi sağlamak üzere NH_4OH ile doyurulmuş metilzobütiletan (MIBK) ve alt faz $8\text{M NH}_4\text{OH}$ 'dır. Hazırlanan $\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$ karışık oksit solü, peristaltik pompa vasıtası ile titreşimli nozzle'a gönderilmiştir. Nozzle'dan çıkan küresel formdaki damlacıklar NH_4OH ile doyurulmuş metilzobütiletan fazına çarpılmaktadırlar. Çarpma anında biçimlerinde deformasyon olan kürecikler metilzobütiletan fazında

şekillerini toplayarak tekrar küresel forma dönüşmüşler ve NH_4OH ile kısmen sertleşerek deformasyona karşı belli bir direnç kazanmışlardır. Daha sonra NH_4OH fazına ulaşan kürecikler $8\text{M NH}_4\text{OH}$ ile sertleşerek jel formuna dönüşmüşlerdir.

Sentezlenen mikrokürecikler jelleştirme kolonunda 24 saat yaşlandırılmış, deiyonize su ile yıkanarak etüvde 60°C 'da 72saat ve daha sonra vakumlu etüvde 60°C 'da 2 saat süre ile kurutulmuşlardır.

2.2. Stronsiyum Alım Denemeleri

Çalışmanın bu basamağı $\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$ mikroküreciklerinin Sr^{2+} adsorpsiyon koşullarının incelenmesini hedeflemektedir. Bu amaçla çözelti pH'sı, çalkalama sıcaklığı, başlangıç konsantrasyonu ve çalkalama süresinin stronsiyum alımına etkisi incelenmiştir. Denemeler "Deneysel Tasarım" metodu kullanılarak "Central Composite Design" ile tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. 31 adet belirlenen konsantrasyonlarda ve pH'larda 30mL Sr^{2+} çözeltisi hazırlanmış ve 0.1g adsorban eklenmiştir. Çözeltiler GFL1086 model termostatlı çalkalayıcıda 150rpm hızında belirlenen sıcaklıklarda ve sürelerle çalkalanmışlardır. Karışımlar 307 nolu filtre kağıdı ile süzülüş ve süzüntüler Perkin Elmer Optima 2000 DV ICP-OES ile analiz edilmiştir.

Stronsiyum adsorpsiyon verimleri;

$$Eff\% = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100$$

C_i : Başlangıç Konsantrasyonu
 C_e : Denge Konsantrasyonu

eşitliğine göre hesaplanmıştır.

Sr^{2+} alım denemeleri merkez noktalarda 7 tekrar ile dört farklı parametrenin incelenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen değişken aralıkları ve seviyeleri Çizelge 1.'de verilmiştir. Optimum koşulların belirlenmesinde kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir. Denklemde a_0 kesişme terimini, a_i lineer etkileri, a_{ii} ikinci dereceden etkileri, a_{ij} ise incelenen parametreler arasındaki ikili etkileşimleri göstermektedir.

$$y_i = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ii} X_{ii}^2 + \sum a_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Çizelge 1. Değişken aralık ve seviyeleri

pH	X ₁	2	4	6	8	10
Sıcaklık (°C)	X ₂	20	30	40	50	60
Konsantrasyon (ppm)	X ₃	10	30	50	70	90
Temas süresi (dak)	X ₄	30	120	210	300	390

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Çizelge 2’de, “Central Composite Design” modeli ile belirlenen 31 adet denemenin koşullarını gösteren matris ve elde edilen % verim değerlerine karşılık CCD modeli ile hesaplanan % değerleri gösterilmiştir. Modelde 16 adet faktöriyel nokta, 9 adet star noktaları (1 adet merkez nokta) ve 6 tekrar noktası yer almaktadır [4].

Çizelge 2. Dört bağımsız değişken için “Central Composite Design” modeli

No	pH	Sıcaklık (°C)	Konsantrasyon (ppm)	Temas süresi (dak)	DeneySEL % Verim	Öngörülen % Verim
1	1	1	1	1	61.29	69.20
2	1	1	1	-1	39.26	54.82
3	1	1	-1	1	79.31	86.62
4	1	1	-1	-1	69.33	66.87
5	1	-1	1	1	51.28	55.27
6	1	-1	1	-1	61.52	63.21
7	1	-1	-1	1	78.67	79.72
8	1	-1	-1	-1	78.86	82.27
9	-1	1	1	1	56.46	54.97
10	-1	1	1	-1	50.73	40.34
11	-1	1	-1	1	76.87	65.84
12	-1	1	-1	-1	47.89	45.82
13	-1	-1	1	1	51.89	45.01
14	-1	-1	1	-1	58.08	52.69
15	-1	-1	-1	1	76.53	62.89
16	-1	-1	-1	-1	82.44	65.19
17	α	0	0	0	89.35	66.41
18	$-\alpha$	0	0	0	4.74	35.10
19	0	α	0	0	75.85	70.48
20	0	$-\alpha$	0	0	63.13	75.92
21	0	0	α	0	46.40	40.19
22	0	0	$-\alpha$	0	56.49	70.12
23	0	0	0	α	71.93	74.61
24	0	0	0	$-\alpha$	57.80	62.54
25	0	0	0	0	63.11	66.74
26	0	0	0	0	70.95	66.74
27	0	0	0	0	67.38	66.74
28	0	0	0	0	63.10	66.74
29	0	0	0	0	67.06	66.74
30	0	0	0	0	70.63	66.74
31	0	0	0	0	64.97	66.74

İkinci dereceden polinomal eşitlik esas alınarak ZrO_2-SiO_2 karışık oksit kürecikleri üzerine Sr^{+2} adsorpsiyonuna pH, sıcaklık, başlangıç Sr^{+2} konsantrasyonu ve temas süresinin etkisi analiz edilmiştir. Bağımsız değişkenlerin regresyon analizi Çizelge 3'de gösterilmiştir. R Kare değerinin 0.59 olması öngörülen değerler ile deneysel değerlerin %59 oranında benzeştiğini göstermektedir.

Çizelge 3. Bağımsız Değişkenlerin Regresyon Analizi

<i>Regresyon İstatistikleri</i>					
Çoklu R	0.77				
R Kare	0.59				
Ayarlı R Kare	0.23				
Standart Hata	14.03				
Gözlem	31				
	df	SS	MS	F	Anl. F
Regresyon	14	4521.52	322.97	1.64	0.17
Fark	16	3149.86	196.87		
Toplam	30	7671.38			

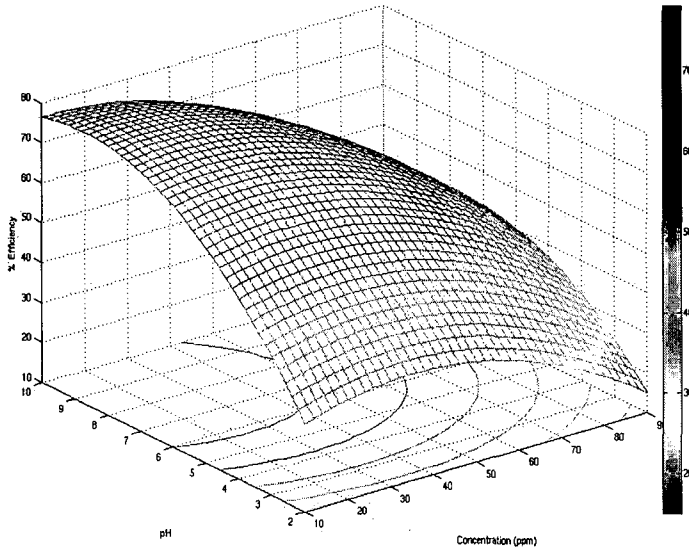
	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Kesişme	66.74	5.30	12.59	0.00
X_1	7.83	2.86	2.73	0.01
X_2	-1.36	2.86	-0.48	0.64
X_3	-7.48	2.86	-2.61	0.02
X_4	3.02	2.86	1.05	0.31
X_1X_1	-4.00	2.62	-1.52	0.15
X_2X_2	1.61	2.62	0.61	0.55
X_3X_3	-2.90	2.62	-1.10	0.29
X_4X_4	0.46	2.62	0.17	0.86
X_1X_2	0.99	3.51	0.28	0.78
X_1X_3	-1.64	3.51	-0.47	0.65
X_1X_4	-0.06	3.51	-0.02	0.99
X_2X_3	1.75	3.51	0.50	0.62
X_2X_4	5.58	3.51	1.59	0.13
X_3X_4	-1.35	3.51	-0.38	0.71

Çizelge 3'de ayrıca ZrO_2-SiO_2 karışık oksit kürecikleri üzerine Sr^{+2} adsorpsiyonunda incelenen bağımsız değişkenlere ait katsayılar ve P-değerleri verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak oluşturulan ve optimum koşulların saptanmasında ve cevap yüzey grafiklerinin oluşturulmasında kullanılan ikinci dereceden polinomal denklem Eş. 2'de gösterilmiştir.

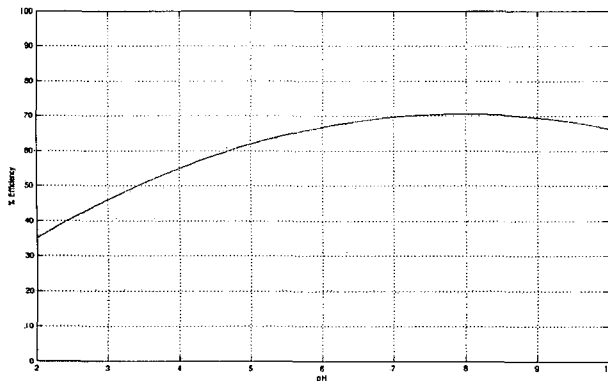
$$y = 66.74 + 7.83*X_1 - 1.36*X_2 - 7.48*X_3 + 3.02*X_4 - 4.00*X_1^2 + 1.61*X_2^2 - 2.90*X_3^2 + 0.46*X_4^2 - 0.99*X_1X_2 - 1.64*X_1X_3 - 0.06*X_1X_4 + 1.75*X_2X_3 + 5.58*X_2X_4 - 1.35*X_3X_4 \quad (2)$$

Regresyon analizi sonucu ZrO_2-SiO_2 karışık oksit kürecikleri üzerine Sr^{+2} alımında pH (P-değeri=0.01) ve başlangıç konsantrasyonunun (P-değeri=0.02) istatistiksel olarak önemli olduğu görülmüştür. pH'ya ait katsayının sıfırdan büyük olması (7.83) pH'nın adsorpsiyon üzerine kümülatif etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir. Başlangıç Sr^{+2} konsantrasyonuna ait katsayının sıfırdan küçük olması (-7.48) Başlangıç Sr^{+2} konsantrasyonunun adsorpsiyon üzerine kümülatif etkisinin negatif olduğunu göstermektedir. Çalkalama süresi ve sıcaklığa ait P-değerlerinin 0.05'ten büyük olması adsorpsiyon üzerine önemli bir etkilerinin olmadığını göstermektedir.

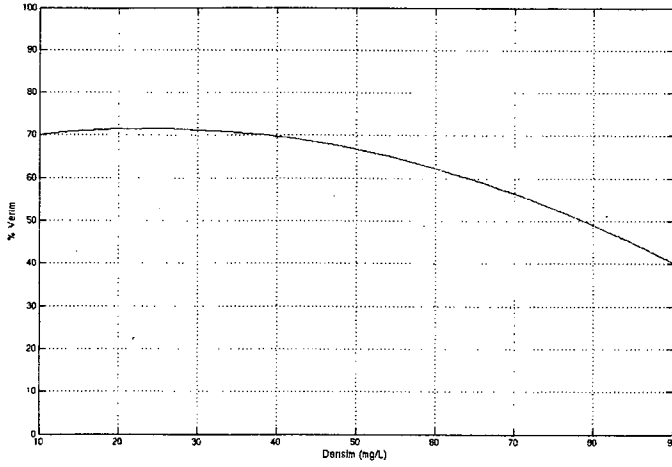
$ZrO_2 - SiO_2$ karışık oksit mikrokürecikleri üzerine maksimum Sr^{2+} adsorpsiyon verimi %76 olarak bulunmuştur. Şekil 2'de gösterilen Sr^{2+} adsorpsiyonu yüzey grafiğinde, maksimum adsorpsiyonun pH 10 ve başlangıç konsantrasyonu 10ppm'de olduğu görülmektedir. Şekil 3'de pH ile adsorpsiyon verimindeki artış, Şekil 4'de ise başlangıç konsantrasyonu artışı ile adsorpsiyon verimindeki düşüş görülmektedir.



Şekil 2. Sr^{+2} adsorpsiyonunun başlangıç konsantrasyonu ve pH'ya bağlı değişimini gösteren yüzey grafiği.



Şekil 3. Sr^{+2} adsorpsiyonunun pH ile değişimi.



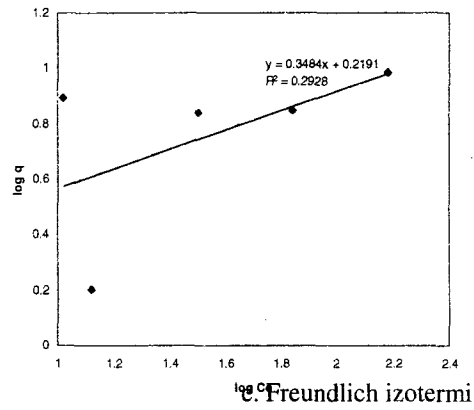
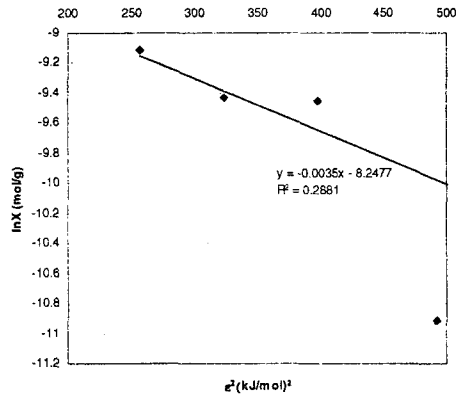
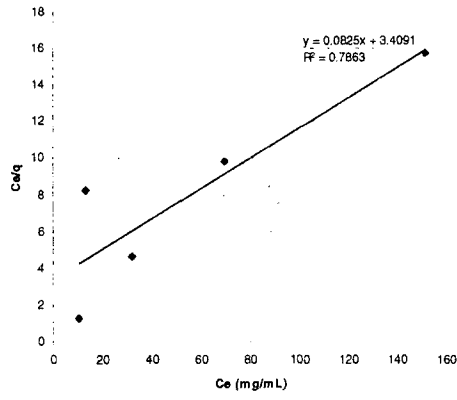
Şekil 4. Sr²⁺ adsorpsiyonunun başlangıç konsantrasyonu ile değişimi.

Adsorpsiyon İzotermi

ZrO₂ – SiO₂ mikrokürecikleri üzerine Sr²⁺ adsorpsiyon davranışını açıklamak üzere Çizelge 4.'de verilen başlangıç konsantrasyonlarından hareketle Sr²⁺ denge konsantrasyonlarına karşı ZrO₂ - SiO₂ mikroküreciklerinin gram başına adsorpsiyon izotermi oluşturulmuştur.

Çizelge 4. Sr²⁺ adsorpsiyonunda konsantrasyon etkisi

Konsantrasyon (ppm)	pH	Sıcaklık (°C)	Temas Süresi (dak)	Denge Konsantrasyonu (ppm)	q (mg/g)
18.50	9	30	60	13.19	1.59
55.20	9	30	60	32.04	6.89
92.95	9	30	60	69.38	7.05
183.80	9	30	60	151.57	9.62



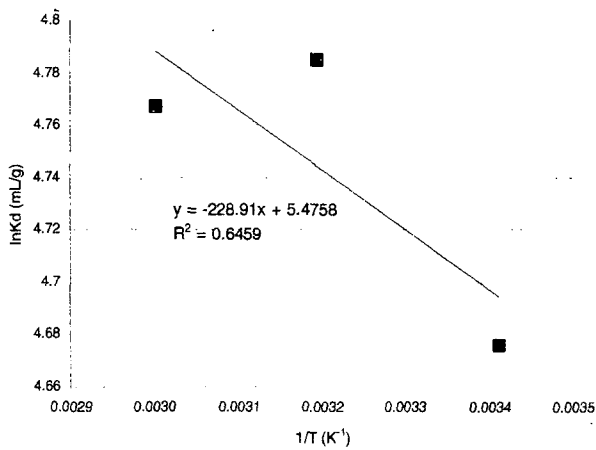
Stronsiyum için 20-200mg/L konsantrasyon aralığında Langmuir, Dubinin-Radushkevich(D-R) ve Freundlich adsorpsiyon izotermi incelenmiştir. Adsorpsiyon izotermi sırası ile Şekil 5.a, 5.b, 5.c'de gösterilmiştir. Adsorpsiyon izotermi incelenmesinden Sr^{2+} adsorpsiyonunun Langmuir izotermine uygun olduğu bulunmuştur.

D-R parametreleri incelendiğinde Sr^{2+} için serbest enerji değeri $E=11.95\text{kJ/mol}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerin iyon değiştirme reaksiyonuna ait enerji

aralığına (8-16kJ/mol) girdiği saptanmıştır. Buna dayanarak stronsiyum alımında etkin olan mekanizmanın iyon-değiştirme olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.(a-c) Sr^{2+} adsorpsiyonuna ilişkin adsorpsiyon izotermi

Termodinamik Parametreler



$ZrO_2 - SiO_2$ karışık oksit mikrokürecikleri üzerine Sr^{2+} adsorpsiyonuna ilişkin hesaplanan $1/T$ ve $\ln K_D$ değerleri ile oluşturulan ve $1/T$ ile $\ln K_D$ arasındaki değişimi gösteren grafik Şekil 6.'da gösterilmiştir. Bu grafiğin eğimi ve y eksenini kestiği noktalardan hesaplanan ΔH^0 , ΔS^0 ve ΔG^0 termodinamik parametreler Çizelge 5.'de verilmiştir.

Şekil 6. $\ln K_D$ ile $1/T$ arasındaki değişim.

Çizelge 5. ZrO₂ – SiO₂ mikroküreciklerinin Sr²⁺ adsorpsiyonuna ilişkin termodinamik parametreler

ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol.K)	ΔG° (kJ/mol)		
		293K	303K	313K
1.903	0.046	-11.44	-12.35	-13.26

İncelenen sıcaklık aralığında elde edilen tüm ΔG° değerlerinin sıfırdan küçük olması ve ΔS° 'nin pozitif olması Sr²⁺ adsorpsiyonunun kendiliğinden ve istemli olarak gerçekleştiğini belirtir. Stronsiyum için ΔH° 'ın sıfırdan büyük olması adsorpsiyonun endotermik yapıda olduğunu gösterir.

4. TARTIŞMA VE YORUM

Çalışmamızda zirkonyum dioksidin mükemmel özellikleri göz önünde tutularak zirkonyum bazlı ZrO₂-SiO₂ (karışım mol oranı 1/1) sol-jel kürecikleri hazırlanmıştır. Küreciklerin hazırlanmasında vibrasyon nozzle ve çöktürme kolonundan oluşan sol-jel düzeneği tesis edilmiş ve yöntem geliştirilmiştir. Hazırlanan ZrO₂-SiO₂ karışık oksit küreciklerinin, sulu çözeltilerden Sr⁺² iyonunu ayırma etkinliği deneysel tasarım yaklaşımı ile incelenmiştir. Bu yaklaşım adsorpsiyonda etkin parametrelerin kimyasal, zaman ve diğer tüm giderlerden tasarruf edilerek incelenmesini sağlamış, ayrıca adsorpsiyonda etkin parametrelerin ikili etkileşimlerini de aydınlatmıştır. pH 10 ve başlangıç konsantrasyonu 10ppm'de ZrO₂-SiO₂ karışık oksit küreciklerinin % 76 verim ile Sr⁺² iyonlarını ayırdığı görülmüştür. D-R parametrelerinin incelenmesi sonucu Sr⁺² için serbest enerji değeri E=11.95kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Bu değer ion değiştirme reaksiyonuna ait enerji aralığına (8-16kJ/mol) girdiği saptanmıştır. Buna dayanarak stronsiyum alımında etkin olan mekanizmanın iyon-değiştirme olduğu anlaşılmıştır. Tüm bu sonuçlardan hareketle ZrO₂-SiO₂ karışık oksit küreciklerinin nükleer atık yönetiminde temel kullanım gerekliliklerini sağladığı ve sulu çözeltilerden Sr⁺² iyonunu etkin bir şekilde ayırabileceği görüşündeyiz.

5. KAYNAKLAR

- [1] S.P. Mishra, Diwakar Tiwari, Inorganic ion exchangers in radioactive waste management Part XII: Removal behavior of stannic and zirconium phosphates for strontium, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.253, No. 3 (2002) 421-426.
- [2] L. Szirtes, K. Lazar, E. Kuzmann, Effect of ionizing radiation on various zirconium phosphate derivatives, Radiation Physics and Chemistry, 55 (1999) 583-587.
- [3] Development and testing of inorganic sorbents made by the internal gelation process for radionuclide and heavy metal separations. Oak Ridge National Lab., TN.; Department of Energy, Washington, DC. Nov. 1995.
- [4] Douglas C. Montgomery, 2001, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons.,684p.