



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



STRONSIYUM RADYONÜKLİTİNİN TUTULUMU İÇİN GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER TASARIMI

Yüksek Lisans Tezi

Ümitcan SEDİR

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2022

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**STRONSIYUM RADYONÜKLİTİNİN TUTULUMU
İÇİN GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER TASARIMI**

Ümitcan SEDİR

Danışman(lar) : Prof. Dr. Sabriye YUŞAN

Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme
Bilimi Ve Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2022

Ümitcan SEDİR tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Stronsiyum Radyonüklitinin Tutulumu için Geçirgen Reaktif Bariyer Tasarımı” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 16/09/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	:
Raportör Üye	:
Üye	:

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Stronsiyum Radyonüklitinin Tutulumu için Geçirgen Reaktif Bariyer Tasarımı” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

16 / 09 / 2022

Ümitcan SEDİR

ÖZET

STRONSIYUM RADYONÜKLİTİNİN TUTULUMU İÇİN GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER TASARIMI

SEDİR, Ümitcan

Yüksek Lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sabriye YUŞAN

Ağustos 2022, 86 sayfa

Bu tez çalışmasında, herhangi bir nükleer kaza durumunda ortaya çıkabilecek ve canlıları ve çevreyi olumsuz yönde etkileyebilecek uzun yarı ömürlü Sr-90 (28,1 yıl) radyonüklitinin sucul ve karasal ortamları kontamine etmeden tutulması adına doğal bariyer malzemeleri (zeolit, diatomit, sepiyolit ve kil) kullanılarak reaktif bir bariyer tasarımı yapılmıştır.

Doğal bariyer malzemelerinin ön hazırlık işlemleri (öğütme ve eleme) gerçekleştirilmesini takiben SEM-EDX, XRD, BET, FTIR, XRF/ICP-MS karakterizasyon analizleri ile bariyer malzemeleri yapısal olarak incelenmiştir.

Sr'un tutulumunu etkileyebilecek parametreler (pH, Sr derişimi, temas süresi, kontaminant çözelti hacmi, bariyer malzeme kalınlığı, diğer iyonların etkisi) incelenmiştir.

Tekli ve çoklu kutu modelleri ile prototip bir geçirgen reaktif bariyer (GRB) düzenek hazırlanmıştır ve Sr sulu çözeltisinin peristaltik pompa kullanılarak doğal bariyer malzemeleri ile etkileşimi sağlanmıştır. Doğal bariyer malzemelerinde tutulmuş olan Sr iyonu miktarı ölçülerek GRB'nin etkinliği incelenmiştir.

Daha sonra Tam Faktöriyel Deney Tasarımı (TFDT) metodu kullanılarak geçirgen reaktif bariyer sisteminin optimum çalışma koşulları incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Stronsiyum, Geçirgen Reaktif Bariyer, Tam Faktöriyel Deney Tasarımı

ABSTRACT**PERMEABLE REACTIVE BARRIER DESIGN FOR THE INVOLVEMENT OF STRONTIUM RADYONUCLIDE**

SEDİR, Ümitcan

Master Thesis, MSc in Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sabriye YUŞAN

August 2022, 86 pages

In this thesis, natural barrier materials (zeolite, diatomite, sepiolite and clay) were used to keep the long half-life Sr-90 (28.1 years) radionuclide, which may arise in the event of a nuclear accident and adversely affect living things and the environment, without contaminating aquatic and terrestrial environments.) was used to design a reactive barrier.

Following the preliminary preparation (grinding and screening) of the natural barrier materials, the barrier materials were structurally examined with SEM-EDX, XRD, BET, FTIR, XRF/ICP-MS characterization analyzes.

Parameters that may affect the uptake of Sr (pH, Sr concentration, contact time, volume of contaminant solution, barrier material thickness, effect of other ions) were investigated.

A prototype permeable reactive barrier (GRB) setup was prepared with single and multiple box models, and the interaction of the Sr aqueous solution with the natural barrier materials was provided using a peristaltic pump. The effectiveness of GRB was investigated by measuring the amount of Sr ion retained in natural barrier materials.

Then, the optimum operating conditions of the permeable reactive barrier system were investigated by using the Full Factorial Experimental Design (TFDT) method.

Key words: Strontium, Permeable Reactive Barrier, Full Factorial Experiment Design



ÖNSÖZ

Öncelikle ülkemizde mevcut ve bol bulunan doğal/ekonomik malzemelerin (Zeolit, kil, diatomit, sepiyolit) karakterizasyon çalışmaları yapılacak daha sonra ise geçirgen reaktif bariyer sisteminin hazırlanması ve sistemin bileşenlerinin çalışma performanslarını etkileyecek bazı deneysel parametrelerin etkilerini bir arada görmek amacıyla, ilk defa tam faktöriyel deneysel tasarım metodunun uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel tasarım metodunun bu alanda kullanımı ilk olup sistemin optimizasyonu ve istatistiksel değerlendirilmesi bu yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Doğal bariyer malzemelerin kullanımı ile elde edilen GRB dizaynının kontamine çözeltilerden Sr'un tutulumunun etkinliği çeşitli analitik yöntemler (ICP-OES, XRF) kullanılarak belirlenmiştir. Ülkemizde yapılacak olan nükleer santrallerden kaynaklanabilecek herhangi bir olası nükleer kaza sonucuna hazırlıklı olmak amacıyla, ilgili parametrelerin incelenip tasarlanan GRB sistemi, saha ölçekli geçirgen reaktif bariyer sistemi için önemli bir basamak oluşturacaktır.

İZMİR

19/07/2022

Ümitcan SEDİR



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	1
KABUL ONAY SAYFASI	3
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	5
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Radyoaktif Atık ve Sınıflandırılması.....	3
2.2. Radyo Aktif Atık Yönetimi	5
2.3. Kirlilik Giderimi Teknolojileri	5
2.4. Stronsiyum ve Radyolojik Özellikleri	6
2.5. Geçirgen Reaktif Bariyerler (GRB).....	7
2.5.1. GRB Tasarımı ve Konfrigasyonu	9
2.6. Geçirgen Reaktif Bariyerler için Reaktif Malzemeler ve Mekanizmalar	9
2.6.1. Taşınım Mekanizmaları	10
2.7. Zeolit ve Genel Özellikleri	10
2.8. Diatomitler ve Genel Özellikleri	11
2.9. Killer ve Genel Özellikleri	12
2.10. Sepiyolit ve Genel Özellikleri.....	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Bariyer Malzemelerinin Karakterizasyon Analizi	14
3.1.1. Bariyer malzemelerinin özgül ağırlık tayini.....	14
3.1.2. Bariyer malzemelerinin elementel bileşimleri.....	15
3.1.3. Bariyer malzemelerinin tanecik boyut dağılımı	15

3.1.4. BET yüzey alanı, gözenek hacmi ve çapının belirlenmesi	15
3.1.5. Bariyer malzemelerinin dinamik ağırlık değişimi ve şişme hacmi	15
3.1.6. Sabit seviyeli permeabilite ile hidrolik geçirgenliğin belirlenmesi	15
3.1.7. Difüzyon denklıkları	16
3.2. Tam Faktöriyel Deneysel Tasarımı	16
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	17
4.1. Malzemelerin Hazırlanması ve Karakterizasyon Deneyleeri	17
4.1.1. Tanecik boyut dağılımı ve elek analizi	17
4.1.2. Doğal malzemelerin özgül ağırlık değerlerinin (g/cm ³) piknometre ile belirlenmesi.....	20
4.1.3. Bariyer malzemelerinin dinamik ağırlık değişimi ve şişme hacminin belirlenmesi.....	21
4.1.4. Doğal bariyer malzemelerinin sabit seviyeli permeabilite ile hidrolik geçirgenliğin belirlenmesi.....	22
4.1.5. Bariyer malzemelerin FT-IR analiz sonuçları.....	23
4.1.6. Bariyer malzemelerin XRD analiz sonuçları	26
4.1.7. Bariyer malzemelerin SEM/EDX analiz sonuçları	28
4.1.8. Bariyer malzemelerin EDXRF analiz sonuçları.....	32
4.1.9. Bariyer malzemelerin BET yüzey alanı analiz sonuçları.....	33
4.2. Stronsiyum'un Doğal Bariyer Malzemelerle Tekli Kutu İçerisinde Tutulum Çalışmaları	33
4.2.1. Stronsiyum için doğal bariyer malzemelerle tekli kutu içerisinde tutulum çalışmaları	35
4.2.2. Parametrelerin Ortaklaşa Etkileri.....	51
2. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR DİZİNİ	58
KAYNAKLAR DİZİNİ (DEVAM).....	59
KAYNAKLAR DİZİNİ (DEVAM).....	60
KAYNAKLAR DİZİNİ (DEVAM).....	61
TEŞEKKÜR.....	63
ÖZGEÇMİŞ	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 GRB atık alanında uygulanması.....	8
Şekil 2.2 Klasik bir GRB sistemi şeması.....	9
Şekil 2.3 (a) Zeolit kristal yapısı, (b) zeolitin üç boyutlu kanal ve kafes yapısı (c) (SiO ₄) ve (AlO ₄)'ün zeolit halkasındaki yerleşimi (d) Si veya Al atomlarının tetrahedral yapıda yerleşimi.....	11
Şekil 2.4 Mikroskobik diatomit.....	12
Şekil 2.5 Sepiyolitin kafes ve kanal yapısı.....	13
Şekil 4.1 Diatomit 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi.....	18
Şekil 4.2 Sepiyolit 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi.....	18
Şekil 4.3 Zeolit 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi.....	18
Şekil 4.4 Kil 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi.....	19
Şekil 4.5 Elek sarsma cihazı.....	20
Şekil 4.6 Permeametre Kapları.....	22
Şekil 4.7 Buca Kil örneğinin FT-IR analiz spektrumu.....	24
Şekil 4.8 Zeolit örneğinin FT-IR analiz spektrumu.....	24
Şekil 4.9 Diatomit örneğinin FT-IR analiz spektrumu.....	25
Şekil 4.10 Sepiyolit örneğinin FT-IR analiz spektrumu.....	25
Şekil 4.11 Kil örneğinin XRD grafiği.....	26
Şekil 4.12 Zeolit örneğinin XRD grafiği.....	26
Şekil 4.13 Sepiyolit örneğinin XRD grafiği.....	27
Şekil 4.14 Diatomit örneğinin XRD grafiği.....	27
Şekil 4.15 Zeolite ait farklı büyütmelede SEM görüntüleri.....	28
Şekil 4.16 Zeolite ait EDX sonuçları.....	28
Şekil 4.17 Sepiyolite ait farklı büyütmelede SEM görüntüleri.....	29
Şekil 4.18 Sepiyolite ait EDX sonuçları.....	29
Şekil 4.19 Diatomite ait farklı büyütmelede SEM görüntüleri.....	30
Şekil 4.20 Diatomite ait EDX sonuçları.....	30
Şekil 4.21 Kile ait farklı büyütmelede SEM görüntüleri.....	31
Şekil 4.22 Kile ait EDX sonuçları.....	31
Şekil 4.23 3D yazıcıda hazırlanan tekli kolon.....	34
Şekil 4.24 Diatomit için Deneysel ve Öngörülen Değerlerin Grafiği.....	41
Şekil 4.25 Zeolit için Deneysel ve Öngörülen Değerler Grafiği.....	41
Şekil 4.26 Kil için Deneysel ve Öngörülen Değerlerin Grafiği.....	41
Şekil 4.27 Sepiyolit için Deneysel ve Öngörülen Değerlerin Grafiği.....	42
Şekil 4.28 Sr(II) 'nin diatomit üzerine tutulumuna Sr derişiminin etkisi.....	47

Şekil 4.29 Sr(II) 'nin sepiyolit üzerine tutulumuna pH'nin etkisi	47
Şekil 4.30 Sr(II) 'nin zeolit üzerine tutulumuna pH'nin etkisi	48
Şekil 4.31 Sr(II) 'nin diatomit üzerine tutulumuna pH'nin etkisi.....	48
Şekil 4.32 Sr(II) 'nin kil üzerine tutulumuna pH'nin etkisi	48
Şekil 4.33 Sr (II)'un zeolit üzerine tutulumuna partikül boyutunun etkisi	49
Şekil 4.34 Sr (II)'un kil üzerine tutulumuna partikül boyutunun etkisi.....	49
Şekil 4.35 Sr (II)'un kil üzerine tutulumuna akış hızının etkisi	50
Şekil 4.36 Sr (II)'un sepiyolit üzerine tutulumuna yatak hacminin etkisi	50
Şekil 4.37 Sr (II)'nin zeolit, kil ve sepiyolit üzerine tutulumuna pH ve partikül boyutunun etkisi.....	52
Şekil 4.38 Sr (II)'nin diatomit ve Sepiyolit üzerine adsorpsiyonuna pH ve başlangıç konsantrasyonunun etkisi.....	53
Şekil 4.39 Sr (II)'nin diatomit ve kil üzerine tutulumuna başlangıç konsantrasyonu ve partikül boyutunun etkisi.....	54
Şekil 4.40 Sr (II)'nin diatomit üzerine tutulumuna yatak hacmi ve başlangıç konsantrasyonunun etkisi	55
Şekil 4.41 Sr (II)'nin kil üzerine adsorpsiyonuna pH ve akış hızının etkisi	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Stronsiyum izotopları ve özellikleri	7
Çizelge 4.1 Lazer Parçacık Boyut Analizi Sonuçları	17
Çizelge 4.2 Elemelerde Kullanılan Elek Detayları	19
Çizelge 4.3 Bariyer Malzemelerinin Özgül Ağırlıkları	21
Çizelge 4.4 Bariyer malzemelerinin şişme derecesi, şişme sonrası hacim değişimi ve dinamik ağırlık değişimi	21
Çizelge 4.5 Bariyer Malzemelerin Permeametre Sonuçları	23
Çizelge 4.6 Zeolit EDXRF Analiz Sonuçları	32
Çizelge 4.7 Kil için EDXRF sonuçları	32
Çizelge 4.8 Diatomit için EDXRF sonuçları	32
Çizelge 4.9 Sepiyolit için EDXRF sonuçları	32
Çizelge 4.10 Bariyer Malzemelerin BET analiz Sonuçları	33
Çizelge 4.11 Her bir bariyer malzemesi ile stronsiyum tutulumu için çalışılacak koşullar	36
Çizelge 4.12 Stronsiyumun zeolit, diatomite, kil ve sepiyolit üzerine adsorpsiyonunda kullanılan bağımsız değişkenlerin seviye ve aralıkları.....	37
Çizelge 4.13 Beş bağımsız değişkenle TFDT (Full Factorial Design) modeline göre oluşturulan deney tasarımı.....	37
Çizelge 4.14 Sr tutulumu için Zeolit, Kil, Diatomit ve Sepiyolit için qe (mg/g) ve Kd (L/g) Değerleri	38
Çizelge 4.15 Beş bağımsız değişkenle tam faktoriyel deney tasarım (TFDT) modeline göre oluşturulan deney tasarımı.....	39
Çizelge 4.16 Zeolitin Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu.....	42
Çizelge 4.17 Diatomitin Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu.....	42
Çizelge 4.18 Kilin Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu.....	43
Çizelge 4.19 Sepiyolitinin Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu.....	43
Çizelge 4.20 Zeolit için etkenlerin ilgili p değerleri.....	43
Çizelge 4.21 Diatomit için etkenlerin ilgili p değerleri	44
Çizelge 4.22 Kil için etkenlerin ilgili p değerleri	45
Çizelge 4.23 Sepiyolit için etkenlerin ilgili p değerleri.....	46



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
<i>Sr</i>	Stronsiyum
C	Konsantrasyon
ρ	Yoğunluk (g/cm ³)
v	Hacim (mL)
m	Ağırlık (g)
K	Permeabilite (m/s)
Q	Deşarj edilen sıvı hacmi (m ³ /s)
L	Uzunluk (cm)
A	Kesit alanı (m ²)

Kısaltmalar

GRB	Geçirgen Reaktif Bariyer
IAEA	International Atomic Energy Agency
SEM	Scanning Electron Microscopy-
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis
XRD	X-ray Diffraction Instrument
BET	Brunauer-Emmett-Teller (BET)
FTIR	Fourier Transform Infrared

XRF	X-Ray Fluorescence
ICP	Inductively Coupled Plasma
TFDT	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı



1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın sonlarından bu yana, yüksek derecede toksik radyonüklitler ve fisyon ürünleri, nükleer testler, reaktör kazaları ve nükleer atık sızıntılarından çevreye salınan en önemli radyoaktivite kaynakları olmuştur. Ülkemizin çevresindeki Ermenistan, Bulgaristan, Ukrayna, Rusya ve İran olmak üzere 5 ülkede 7 nükleer santral bulunduğunu ve aynı anda ülkemizde de nükleer santrallerin kurulacağını göz önünde bulundurarak oluşabilecek tehlikeler dikkate alınmalıdır. İstenmeyen durumlar ortaya çıkmadan gerekli önlemler alınmalıdır. Radyoaktif kirlenme sonucunda çeşitli radyoaktif izotoplar su, toprak ve hava gibi çevreye yayılarak çevreyi ve insan sağlığını etkiler. Uzun yarı ömürleri ve yüksek fisyon potansiyelleri nedeniyle en etkili radyoizotoplardan birisi Sr-90'dır.

Nükleer kazadan sonra büyük miktarlarda salınan radyonüklitler çevreyi kirlenme eğilimindedir. Sezyum-137, Stronsiyum-90, Kobalt-60 ve Rutheryum-106 vb. (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am gibi transuranik radyonüklitleri içeren) radyonüklitlerin yayılımı ile yerüstü ve yeraltı su kaynakları kontamine olmaktadır. Nükleer santrallerin etrafındaki ana su kaynakları, uzun yarı ömürleri olan çeşitli radyonüklitlerle yoğun şekilde kirlenmiştir. Sedimentlerin ve toprağın ciddi şekilde kirlenmesini önlemek için su kütlelerinin arıtılması ve dekontaminasyonu önemlidir (Dubourg, 1998).

Nükleer endüstride, bertaraf alanlarından radyonüklitlerin sızıntısı nedeniyle yeraltı sularının kirlenmesi sorunu vardır. Özellikle radyoizotop fisyon ürünlerinin düşük konsantrasyonlarda bile ortamda bulunması ciddi bir risk oluşturmaktadır. Bu fisyon ürünlerinin yüksek oranda radyolojik bozunması canlı organizmalar için potansiyel bir biyolojik tehlike kaynağıdır. Sr-90, uzun yarılanma ömrü ve hepsinden önemlisi kalsiyuma kimyasal benzerliği nedeniyle vücutta yüksek tutulması nedeniyle endişe duyulan radyonüklitlerden biridir (Chicote vd., 2004).

Nükleer reaktör atığı Sr-90 içerir ve Sr-90 bu atığın en tehlikeli bileşenlerinden biri olarak kabul edilir. Reaktörde fisyon ile üretilen Sr-90, reaktör parçalarını ve sıvıları kirlitebilir. Sr-90 radyasyonla ayrıştığında Y-90'a, Y-90 ise stabil zirkonyuma dönüşür. Sr-90'a az miktarda da olsa herkes maruz kalmaktadır, çünkü doğada dağılılabılır ve besin zinciri yoluyla yayılabilir. Son 30 yıldır nükleer silah denemelerine ara verildiğinden, vücuda gıda yoluyla giren Sr-90 miktarı giderek azaldı. Bununla birlikte, nükleer tesislerde çalışan veya yaşayan insanlara maruz kalmak Sr-90 seviyelerini artırabilir.

Çevredeki toksik kirleticilerin nötralizasyonu için dünyada yerleşik tekniklerin iyileştirilmesi ve yeni arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi için çaba sarf edilmektedir. Ana teknolojiler arasında çökeltme, membran ayırma, iyon değişimi, kireç yumuşatma ve adsorpsiyon yer alır (El Afifi vd., 2016).

Yeraltı ve yüzey sularında bulunan kirleticilerin ortamdaki uzaklaştırılması ya da yayılmasını engellemek için alternatif bir yöntem olarak geçirgen reaktif bariyer teknolojisi geliştirilmiştir. Takip edilecek çevresel ortamlar toprak, yüzey ve yeraltı sularıdır. Kontamine olmuş bölgelerin hidrojeolojik/hidrolojik/çevresel koşulları, kirlenmenin meydana geliş biçimi, kirletici türlerinin, kimyasal, fiziksel ve biyolojik taşınım süreçlerinin çevresel ortamlardaki farklılıkları önemlilik arz eder. Farklı bölgeler için farklı temizleme yöntemleri gereklidir. Toprak ve yeraltı suyu temizleme teknikleri, yerinde yapılan (in-situ) arıtım/temizleme ya da yerinden alınarak yapılan (ex-situ) olarak gerçekleşir. Bu teknikler kirleticilerin giderim ya da bozunum/dönüşümünün mevcutluğunun olup olmamasına bağlı olarak kullanılır. Toprak harfiyatı veya yeraltı suyunun tahliyesinde kullanılan pompalama faaliyetinin zorunluluğu ex-situ yönteminde yüksek işletme maliyetine yol açmaktadır. Bu sebeple in-situ yöntemi geliştirilmekte ve yaygınlık kazanmaktadır. Geçirgen reaktif bariyer teknolojisi geleneksel yöntemlere alternatif olarak yüzey ve yeraltı sularında var olan toksik iyonların uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır. GRB'lerde aynı ya da farklı iki ya da daha çok reaktif bariyerlerden oluşan sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerin minimum işletme maliyeti, ucuz reaktif malzeme, minimum atık ve uzun süreli arıtım gibi pek çok etkileyici avantajları vardır. Reaktif madde olarak aktif karbon, turba, kireç taşı, zeolit, elementel demir, kireç, çitosan, algler, lağım çamuru, sepiyolit, saman, kil vb. kolay bulunabilir, uygun fiyatlı, doğal ve uygulanabilir maddeler GRB'lerde yaygın biçimde kullanılır (Conca vd., 2002; Faisal ve Abd Ali, 2017; Gibert vd., 2010; Gu vd., 2003; Mackey ve von Maubeuge, 2004). Reaktif bariyer malzemeleri yüksek hidrolik geçirgenliği sağlamalı, kirlilik oranını yüksek miktarda azaltmalı, hedef kirletici için seçiciliği yüksek olmalı, hızlı reaksiyona girmeli, stabil kalma süresi uzun olmalı, çevre için uygun olmalı, düşük maliyetli olmalı, homojen ve yeteri kadar kullanılabilirlik sağlamalıdır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyoaktif Atık ve Sınıflandırılması

Radyoaktivite kaynaklarının 1950'lerden beri kullanımı, radyoaktif atıkların yönetimi sorununa yol açmıştır. Düzenleyici kurum tarafınca belirlenmiş seviyeden yüksek konsantrasyonda radyonüklit içeren ya da bu radyonüklitler tarafından kontamine olmuş olan atıklar, radyoaktif atık olarak tanımlanmaktadır (IAEA, 2003b). Genelde radyoaktif atıklar katı, sıvı ve gaz olarak her herhangi bir formda bulunabilir.

Uranyum zenginleştirme, dönüştürme nükleer tesislerin işletilmesini de içeren nükleer yakıt çevrimi ar-ge tesisleri, laboratuvarlar, eğitim ve tıp alanlarındaki radyonüklitlerin üretim faaliyetleri ve uygulamaları radyoaktif atık kaynağıdır.

IAEA güvenlik standartlarındaki GSG-1 kodlu "Radyoaktif Atıkların Sınıflandırılması" başlıklı genel güvenlik kılavuzu, IAEA güvenlik standardıyla birlikte radyo aktif atıklarla ilgili uygun atık yönetim stratejilerinin uygulanması ve geliştirilmesini sağlamaya yardımcı olmaktadır, ülkeler arasındaki iletişimi ve bilgi alışverişini kolaylaştırmaktadır. Bu bağlamda fiziksel, kimyasal, biyolojik, radyolojik, önemlilik, kaynak radyoaktif atıkların sınıflandırılmasındaki önemli parametrelerdir.

IAEA'nın temel aldığı iki parametre radyonüklitlerin yarılanma ömrü ve radyoaktif atık içerisindeki radyonüklit konsantrasyonudur. IAEA'nın parametrelerine göre radyoaktif atıklar altı kategori olarak sınıflandırılmıştır.

- i.) Muaf Atık (Exempt Waste, EW): Düzenleyici kontrolden muaf veya muafiyet koşullarını sağlayan atık türüdür. Ülkeden ülkeye bu muafiyet sınırları mevcut mevzuata göre değişmektedir (IAEA, 2009).
- ii.) Çok Kısa Yarı Ömürlü Atık (Very Short Live Waste, VSLW): Kullanımı yada boşaltımı düzenleyici mevzuatta belirlenen, bozunması için sınırlı süre depolanabilen atıklardır. Genellikle Tc-99m, I-131 gibi radyonüklitleri içeren araştırma ve tıp alanlarında kullanılan atıklardır. Ayrıca 100 gün veya daha az yarılanma ömrüne sahip atıklar içinde bu uygulanır (IAEA, 2009).
- iii.) Çok Düşük Düzeyli Atık (Very Low Level Waste, VLLW): Yapısında radyonüklitleri bulunduran cevher ve minerallerin

işlenmesi, nükleer tesislerin devre dışı bırakılması ya da işletilmesi gibi faaliyetler sonucunda oluşan mevzuatta belirlenmiş sınır değerlerin üzerinde radyonükleotit içeren atıklardır. Yüksek seviyede zırhlanmaya ve depolanmaya ihtiyaç duymazlar. Bu sebeple bu tür atıklar yer yüzeyindeki depolama tesislerinde bertaraf edilmeye uygundur (IAEA, 2009).

- iv.) Düşük Düzeyli Atık (Low Level Waste, LLW): Yarılanma ömrü uzun ve muafiyet sınırı üzerinde radyonüklit içeren atıklardır. Bu atıkların birkaç yüzyıl zarfında muhafaza edilmeli ve çevresel yalıtımı sağlanmalıdır. Pek çok farklı kaynaktan gelen atıklar bu kapsamdadır. Uzun yarılanma ömrüne sahip düşük aktivite konsantrasyonuna uzun yarılanma ömrüne sahip ve yüksek aktivite konsantrasyonu kısa yarılanma süresine sahip radyonüklitleri içeren malzemeler örnek gösterilebilir. Bu tür atıklar ısı kontrolü gerektirmez. Nakliyesi, atık yönetimi ve bertaraf edilmeleri koruma gerektirir. Kısa yarılanma ömrüne ve yüksek konsantrasyona sahip radyonüklitler yaklaşık olarak 300 yıl sonunda muaf atık seviyesine gelir (IAEA, 2009).
- v.) Orta Düzeyli Atık (Intermediate Level Waste, ILW): Bu tür atıklar uzun yarılanma ömrüne sahip olmaları dolayısıyla, izolasyon ve koruma mertebesi daha fazla olan atıklardır. 4 bin bq/g'den az bozunamayacak olan alfa yayan radyonüklitler bu sınıftadır. Birkaç yüz veya onlarca metre derinliklerde bertaraf edilmeleri ya da depolanmaları gerekir. Doğal ve mühendislik tasarımı bariyerler doğru biçimde seçildiği takdirde bu derinliklerde bertaraf ve muhafaza edilebilir. Radyo aktivite açısından %3 ila 5'ini ve tüm atık miktarına oranla hacimce %6 ila 7'sini orta düzeyli atıklar oluşturmaktadır (IAEA, 2009).
- vi.) Yüksek Düzeyli Atık (High Level Waste, HLW): Kullanılmış yakıt ve kullanılmış yakıtların yeniden işlenmesi sonucu oluşan uzun ve kısa yarılanma ömürlü fisyon ürünlerine sahip, 104 ila 106 TBq/m³ aktivite derişimine sahip atıklar yüksek düzeyli atıklardır. Bu tür atıkların radyoaktif bozunmaları devam ettiği için birkaç yüzyıl süresince de ısı üretmeye devam ederler. Bertarafları yapılmadan önce birkaç on yıl zarfında soğutulmalıdır. Radyo aktivite açısından %95'ini ve tüm atık miktarına oranla hacimce %0,1'ini yüksek düzeyli atıklar oluşturmaktadır (IAEA, 2009).

2.2. Radyo Aktif Atık Yönetimi

Radyoaktif atıkların, emniyetli ve güvenli biçimde yönetilmesi birkaç nesli alakadar eden, kuşaklar arası bir meseledir. Radyoaktif atık yönetiminin temel prensibi insanın, çevrenin, gelecek nesillerin ve ulusal sınırların korunmasıdır. Ulusal bir yasal çerçevede belirlenen temel olarak baz alınan dokuz prensip 1995 yılında IAEA tarafınca belirlenmiştir (IAEA, 1995).

Radyoaktif atık yönetiminde beş yaklaşım vardır.

- i.) Seyreltme ve Dağılma: aktivite derişiminin kabul edilebilir sınırlara getirilmesi sağlanarak seyreltip çevreye boşaltımıdır. Bu yaklaşıma özellikle düşük aktiviteli atıklar uymaktadır.
- ii.) Depolama ve Bekletme: Atık madde için hedeflenen prosedürlerin uygulanması amacıyla atık maddelerin kabul edilebilir aktivite konsantrasyonuna ulaşana kadar bozunması için depolanmasıdır.
- iii.) Konsantre etme ve muhafaza etme: Atık maddenin hacimsel olarak konsantre edilmesi ve saklama alanında bekletilmesidir. Özellikle yüksek aktiviteli atıklar için uygun bir yaklaşımdır.
- iv.) Azaltma, Yeniden İşleme ve Yeniden Kullanma: Atıkların tekrar işlenerek yakıt çevriminde kullanıldığı yaklaşımdır.
- v.) Ayırma ve Transmutasyon: hızlandırıcı teknolojiler yardımıyla yüksek yarı ömürlü izotopların kısa yarı ömürlü izotoplara dönüştürülmesidir (Nagasaki ve Nakayama, 2015).

2.3. Kirlilik Giderimi Teknolojileri

Kontamine olmuş toprak ve yeraltı suyunun temizlenmesi için geliştirilmiş teknikler kontaminasyon kaynağının bulunduğu yerde doğrudan uygulanıp uygulanmamasına bağlı olarak:

- a) Yerinde yapılan (İn-Situ),
- b) Yerinden alınarak yapılan (Ex-Situ)

olarak iki ana başlığa ayrılır.

- Kirlilik kaynağı yerinden alınarak giderilmesi ve/veya bertaraf edilmesine dayanan ekstraksiyon yöntemleri
- Kirliliğin artışıını sınırlamak veya önlemek için bulunduğu alanda yalıtılmasına dayanan izolasyon yöntemleri
- Kirliliğin var olduğu alandan taşınarak giderilmesini veya dönüştürülerek toksitesinin düşürülmesini amaçlayan yöntemler ise üç başlıkta toplanabilir.

Arıtma teknolojileri ile ilgili önemli faktörler;

- a) Etkinlik
- b) Uygulanabilirlik
- c) Maaliyet olmaktadır.

Yerinden alınarak (Ex-Situ) Yapılan Arıtma Yöntemi; Yoğun enerji gerektirmesi kontamine olmuş suyun pompalanması, toprak hafriyatı, atık yönetimi gerekliliği ve bunlara bağlı olarak yüksek maaliyete sebep olmaktadır.

Yerinde (İn-Situ) Yapılan Arıtma Yöntemi; Yoğun enerji gerektirmemesi kontamine olmuş suyun pompalanmaması, toprak hafriyatı , atık yönetimi gerektirmemesi ve bunlara bağlı olarak düşük maaliyete sebep olmaktadır. Yerinde yapılan arıtma teknikleri; fiziksel, kimyasal ve biyolojik teknikler olmak üzere üç kategoriye ayrılır.

- 1) Biyolojik İyileştirme
- 2) Hava Dağıtma
- 3) Geçirgen Reaktif Bariyerler, GRB (Permable Reaktive Barriers-PRB)

olarak sınıflandırılmaktadır.

2.4. Stronsiyum ve Radyolojik Özellikleri

Periyodik tablonun 2A grubunun 5. Periyodunda bulunan stronsiyum toprak alkali bir metaldir. Atom numarası 38 ve atom ağırlığı 87,62 akb'dir. 1798 yılında Martin Heinrich Klaproth tarafından Sr elementi keşfedilmiştir. %0,04 ortalama konsantrasyon ile yer kabuğunda en fazla var olan elementler arasında 15. sırada bulunur. Deniz suyunda ise en çok bulunan elementler arasında 10. sıradadır. Ve konsantrasyonu %0,0008'dir. Anhidrit stronsiyum, calcite, agonite içinde bol miktarda Sr bulunur. Sr yatakları dünyada en çok Meksika, Çin, İran İspanya Cezayir, Kıbrıs ,Fas, Arjantin ve Türkiye'de bulunmaktadır.

Sr, gümüş beyazı renkli fakat oksitlendiğinde çok çabuk sarı renk alır. Mg ve Ca'dan daha reaktif olmasına karşın Br'dan daha az reaktivlik gösterir. Yüksek kimyasal reaktivlik özelliği sebebi ile Sr birçok element ile reaksiyon oluşturmaktadır. Havada oksitlenme reaksiyonu hızlı gerçekleştiği için kerosen içerisinde muhafaza edilmelidir. Stronsiyumun. oksijen, azot, flor ve kükürt ile reaksiyonu sonucu oluşan bileşikler +2 değerlikli olup güçlü bir indirgen özellik göstermektedir. Stronsiyumun asitlerle kuvvetli reaksiyonu sonucu hidrojen çıkışı olur, Nitrik asitle sonucu azot oksitler oluşur ve reaksiyon çok hızlı gerçekleşir. Seyreltik sülfirik asitle reaksiyona girmesi sonucunda çözünmeyen sülfatlar oluşur. Bu sebeple bu reaksiyon çok yavaştır. Stronsiyumun çözünebilir tuzları klorür, bromür, iyodür, asetat, permanganat, nitrit, nitrat, bromat, perklorat, klorat ve sülfitten oluşur.

Stronsiyumun şu ana kadar keşfedilmiş 28 tane izotopu vardır. Doğal stronsiyum ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr ve ^{84}Sr kararlı izotopların birleşiminden oluşmaktadır. Bu izotoplar haricindeki izotoplar radyoaktiftir. ^{87}Sr yaş tayini çalışmalarında sıklıkla kullanılan ^{87}Rb 'nin bozunma ürünüdür Yarılanma ömrü 48,8 milyar yıldır. ^{90}Sr , oluşumu uranyum ve plütonyum nükleer reaktörleri ve silahlardaki fisyon sonucunda gerçekleşir. Fisyon ürünleri kütle numarası 88 üzerinde olan tüm stronsiyum radyo izotoplarını içerir. ^{90}Sr 29,1 yarılanma ömrü ile en uzun yarılanma ömrüne sahiptir. Yüksek enerji yayarak beta bozunumu ile ^{90}Y bozunur. Stronsiyuma ait izotopların özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.1 Stronsiyum izotopları ve özellikleri

İzotop	Doğada Bulunuşu	Yarılanma Süresi	Bozunma Ürünü	Bozunma Enerjisi
^{82}Sr	Yapay	23,56 gün	Rb-82	0,180 MeV
^{83}Sr	Yapay	32,41 saat	Rb-83	2,279 MeV
^{84}Sr	%0,56	Kararlı	-	-
^{85}Sr	Yapay	64,85 gün	Rb-85	1,065 MeV
^{86}Sr	%9,86	Kararlı	-	-
^{87}Sr	%7,02	Kararlı	-	-
^{88}Sr	%82,56	Kararlı	-	-
^{89}Sr	Yapay	50,52 gün	Y-89	1,497 MeV
^{90}Sr	Yapay	29,1 yıl	Y-90	0,549 MeV

İnsan vücudunda kemikler ve dişlerde biriken stronsiyum biyolojik ve kimyasal davranış biçimi olarak kalsiyuma benzemektedir. Sr iyonunun toksisitesi düşüktür. Doğal yollarla vücuda alımı da eşik değerler aşılmadığı müddetçe insana zarar vermez. Ancak radyoaktif olan ^{90}Sr 'ın kemiklerde birikmesi ve tutunması, kemik kanseri vb. bazı hastalıklara sebep olmaktadır.

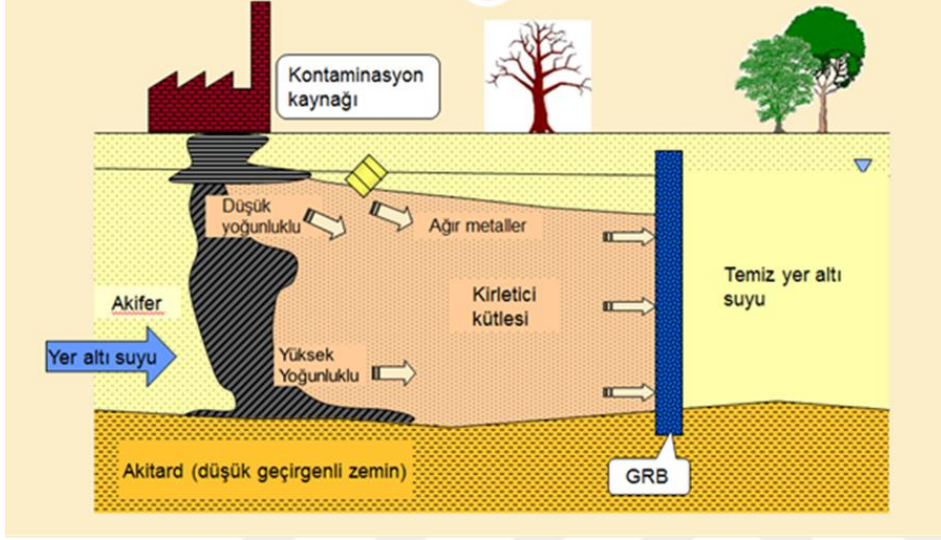
^{90}Sr 'ın doğaya yayılımı Çernobil nükleer santral kazası ve atom bombası denemeleri ile olmuştur. Stronsiyum oksit göz deri ve mukoza üzerinde ciddi tahriş edici etkisi bulunmaktadır. Stronsiyum, laktat büyüme durmasına sebep olur ve kemiklerdeki mineralizasyonu azaltır.

2.5. Geçirgen Reaktif Bariyerler (GRB)

Geçirgen reaktif bariyerler, reaktif malzemeler yardımıyla kirliliğin giderilmesi ya da etkisizleştirilmesine yarayan yeraltı sularının akış yönüne yerleştirilen pasif yerinde iyileştirme teknolojisidir. Kirleticinin giderimi amacıyla aktif karbon, zeolit, kireç taşı vb. reaktif doğal malzemeler kullanılmaktadır. Metaller, radyonüklitler, klorlu solventler gibi kirleticiler, bu reaktifler vasıtasıyla adsorpsiyon, absorpsiyon, biyosorpsiyon, degradesyon, oksidasyon, redüksiyon ve çökeltme yöntemleriyle giderilir. Geçirgen reaktif bariyerler bir bariyer sistemi parçasıdır. Geçirimsiz bariyerler, yeraltı suyunu reaktif kısma yönlendirmekte

kullanılır Geçirgen reaktif bariyerler, çoklu geçiş sistemi tekli geçiş sistemi gibi çeşitli birimlerde düzenlenebilmektedir. Geçirgen reaktif bariyerler kalıcı ya da yarı kalıcı değiştirilebilir olarak kirletici kütesinin akış yolu üzerine yerleştirilebilir.

Elementel demir, kireç taşı, kireç, çitosan, aktif karbon, zeolit, turba, saman, sepiyolit, kil, algler vb. kolay bulunabilir ucuz doğal maddeler geçirgen reaktif bariyer sistemlerinde en çok kullanılan malzemelerdir.



Şekil 2.1 GRB atık alanında uygulanması

Reaktif bariyer malzemeleri,

- Kontaminasyonu yüksek oranda azaltmalı
- Hedef kirletici için yüksek seçicilik göstermeli
- Hızlı reaksiyon oluşturmali
- Hidrolik geçirgenliği yüksek olmalı
- Stabil kalma süresi uzun olmalı
- Çevreye uygun olmalı
- Düşük maliyetli olmalı
- Homojen dağılım göstermeli
- Yeterli kullanılabilirlik göstermeli

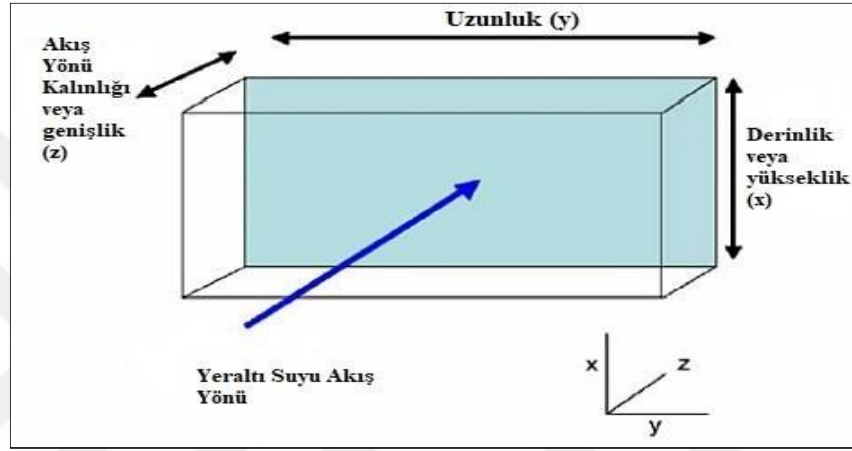
Reaktif maddeler genel olarak,

- Kimyasal çöktürme
- Oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonları
- Sorpsiyon reaksiyonu
- pH kontrolü
- Biyolojik degradasyon reaksiyonları vb.
- Yöntemlerle kirleticinin giderimini sağlayabilmektedir.

2.5.1. GRB Tasarımı ve Konfrigasyonu

GRB tasarımı; bariyer boyutları, yeraltı suyu akış yönü, kirlilik dağılımı tipi, yeraltı suyu hidrojeolojik özellikleri ve konfigürasyonu gibi çeşitli parametreleri içermektedir (Gavaskar, 1999).

Bariyer boyutlarının belirlenmesi fiziksel tasarımın en önemli parametresidir. Şekil 2.2’de klasik bir GRB sistemi için fiziksel boyutlar ve yeraltı suyu akış yönü gösterilmiştir. GRB’nin arıtımı sağlayabilmesi için mümkün olduğunca geniş olması gerekir. Birden fazla bariyer malzemesi kullanımında bariyer malzemeleri arasında boşluğu azaltmak için bitişik bölümlerin üst üste getirilmesi gerekmektedir (ITRC, 2005).



Şekil 2.2 Klasik bir GRB sistemi şeması

GRB’nin öncelikli amacı yeraltı suyunu belirli bir süre alıkoymak ve arıtım için reaktif ortamda yeterli geciktirme süresini sağlamaktır. Bu amaç için en önemli parametre alıkoyma bölgesi genişliğidir. Alıkoyma bölgesinin genişliği; akış bölgesinin genişliğini ifade ederken, akış hızı ile doğru, alıkonma süresi ile ters orantılıdır. GRB tasarımında temel amaç kontamine su akışında yeterli yakalama genişliğine ulaşma ve arıtım işlemi için yeterli alıkonma süresi arasında dinamik ve optimum bir dengenin kurulmasıdır.

2.6. Geçirgen Reaktif Bariyerler için Reaktif Malzemeler ve Mekanizmalar

GRB teknolojisinde reaktif malzemeler, bulunduğu ortam ile uyumlu olmalıdır. Kontaminasyon kaynağı ile herhangi bir reaksiyon sonucunda herhangi bir yan ürün oluşturmamalı veya olası bir kirliliğe sebep olmamalıdır. Reaktif malzeme seçiminde, kontaminasyon kaynağı ile etkileşimin yanı sıra hidrolik iletkenlik, jeoteknik koşullar, mekanik dayanıklılık, çevre ve ekosistem güvenliği gibi konularda önemli gereksinimlerdir (Roehl vd., 2005).

2.6.1. Taşınım Mekanizmaları

Kirletici hareketleri GRB sisteminde dört ana mekanizma olarak ayrılır. Bu mekanizmalar; doğrudan kirletici taşınımı olan konveksiyon, kirleticinin rastgele taşınımı anlamına gelen moleküler difüzyon ve mekanik dağılım, reaktif malzemede alıkoyma (geciktirme) taşınımı olan kirletici gecikmesidir. Kirletici uzaklaştırma mekanizmaları, reaktif malzeme, kirleticinin doğası ve yeraltı suyunun kimyasına bağlıdır.

Çeşitli ve farklı karakterlerdeki reaktif malzemelerle yapılan çalışmalarda, farklı kirletici türleri için adsorpsiyon, biyobozunma, indirgenme-yükseltgenme, iyon değişimi, çöktürme, sorpsiyon gibi arıtım mekanizmaları saptanmıştır. Zeolit ile yapılan çalışmalarda ⁹⁰Sr, giderimleri için sorpsiyon ve iyon değişimi baskın durumda olduğu kaydedilmiştir (Roehl vd., 2005).

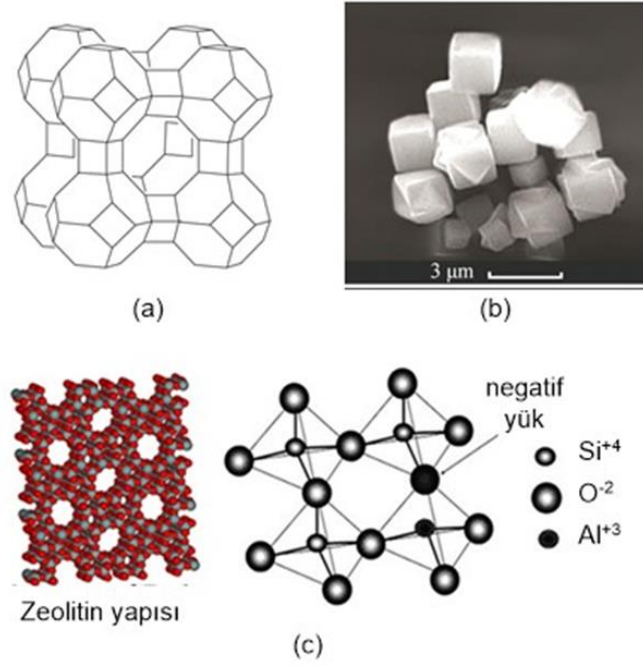
2.7. Zeolit ve Genel Özellikleri

1756 yılında stilbit mineralinin keşfi ile zeolitler keşfedilmiştir. Zeolitler; alkali ve toprak alkali metallerin kristalize hidratlı alümino-silikat mineralleridir. Zeolitlerin ideal kimyasal formülü; $M_x/n [Al_x Si_y O_2(x+y)].nH_2O$ 'dir.

Zeolitlerde altılı tetrahedrelerden oluşmuş ikinci yapı birimleri bulunmaktadır. Bu yapıların bir araya gelmesi ve çeşitli çokyüzlülerin oluşması sebebi ile zeolitlerin üç boyutlu, açık oyuk, kanal ve kafesler şeklinde mikroskobik boşluklara sahiptir ve oldukça gözenekli yapısı oluşmaktadır (Lobo, 2003).

0.2-0.8 nm gözenek boyutuna, 0.10-0.35 cm³/g gözenek hacmine sahiptir. Şekil 2.3 (a) Zeolit kristal yapısı, (b) zeolit üç boyutlu kanal ve kafes yapısı (c) (SiO₄) ve (AlO₄)'ün zeolit halkasındaki yerleşimi (d) Si veya Al atomlarının tetrahedral yapıda yerleşim görülmektedir.

Zeolit yapısındaki kafes ve kanallarda katyonlar ve su molekülleri bulunmaktadır. Güçlü şekilde bağlanmamış olan su ve katyonlar zeolit çerçevesinden çıkarılabilir ve başka bir iyonla yer değiştirilebilir. (Pabalan ve Bertetti, 2001).



Şekil 2.3 (a) Zeolit kristal yapısı, (b) zeolitin üç boyutlu kanal ve kafes yapısı (c) (SiO₄) ve (AlO₄)'ün zeolit halkasındaki yerleşimi (d) Si veya Al atomlarının tetrahedral yapıda yerleşimi

Zeolitlerin temel fiziksel ve kimyasal özellikleri şunlardır: İyon değişimi, adsorpsiyon ve ilgili moleküler elek yapıları, silika içeriği ve çökelmiş zeolitlerdeki küçük kristallerin parlak rengi, parlaklığı ve gözenek yapısı, zeolitlerin çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

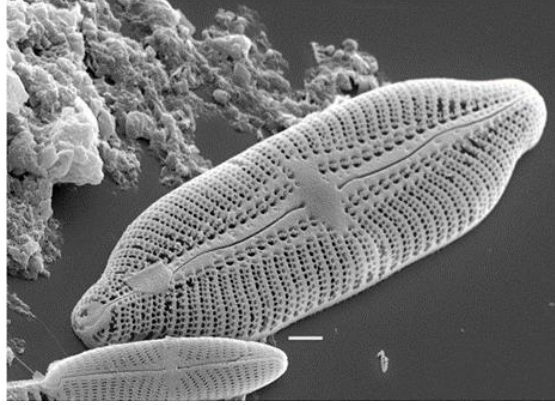
Ayrıca klinoptilolitin gübre formülasyonlarında taşıyıcı olarak kullanılması, amonyumun bitkiler tarafından daha verimli kullanılmasına ve yüksek amonyum seçiciliği nedeniyle gübre tasarrufuna neden olur.

2.8. Diatomitler ve Genel Özellikleri

Diatomit, fiziksel ve kimyasal özelliklerinde benzersiz olan, küresel olarak bol miktarda bulunan silisli tortul bir kayadır. Kimyasal olarak, diatomit esas olarak silisyum dioksit, SiO₂.nH₂O'dan oluşur. Yüksek geçirgenlik, yüksek gözeneklilik, küçük parçacık boyutu, geniş yüzey alanı ve düşük ısı iletkenliği gibi özelliklere sahiptir. Diatomit, atık sudan kirleticilerin uzaklaştırılması için özellikle iyi ve düşük maliyetli bir malzemedir (Al-Ghouti vd., 2009).

Diatomit, %80-90 boşluk içeren bir yapı içinde, genellikle 10-200 mm arasında değişen çeşitli şekil ve boyutlarda parçacıklardan oluşur. Diatomlar, kısmen silikondan oluşan karmaşık cam benzeri bir dış hücre

duvarına sahip mikroskobik tek hücreli alglerdir. Bu duvarların yapısına bağlı olarak farklı tipte diatomlar tanımlanabilir (İbrahim, 2012).



Şekil 2.4 Mikroskobik diatomit

Diatomit birçok özelliğinden dolayı birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Diatomit birçok alanda filtre yardımcısı, fonksiyonel katkı maddesi, zirai ilaç, emici, aşındırıcı ve silika kaynağı olarak kullanılmaktadır (Engh ve Staff, 2000).

2.9. Killer ve Genel Özellikleri

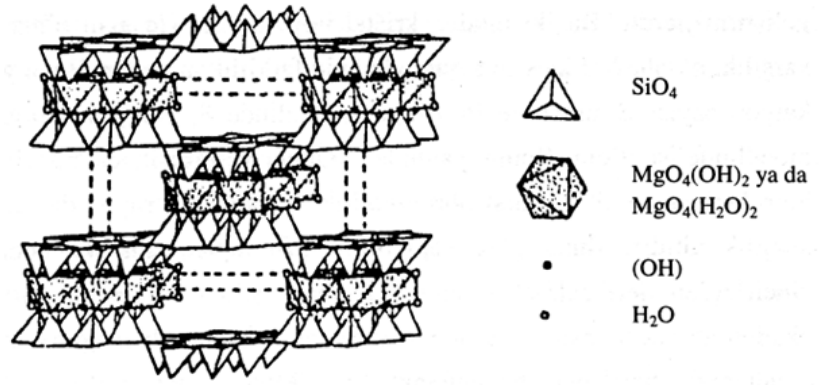
Kil esas olarak simektitten (montmorillonit) oluşur [$5Al_2O_3 \cdot 2MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 6H_2O$ (Na_2O , CaO)], volkanik kül, tuf ve "bentonit" olarak tanımlanan, alüminyum ve magnezyum açısından zengin lavların kimyasal aşınmasıyla oluşur.

Bilimsel olarak; yumuşak, esnek, gözenekli, açık renkli, özellikle alüminyum ve magnezyumca zengin, kolloidal silika içeren ve genellikle volkanik kül ve tuf gibi camsı magmatik kayaların kimyasal bozunma sonucu çözünmesiyle oluşan simektit mineralleridir.

2.10. Sepiyolit ve Genel Özellikleri

Sepiyolit iyi bilinen bir mineraldir. İlk olarak 1758'de Cronsted tarafından keşfi yapılan ve paligorskit grubunun doğal bir kil minerali olan sepiyolit, magnezyum hidrosilikattan ($Si_{12}Mg_9O_{30}(OH)_6(OH_2) \cdot 6H_2O$) oluşur (Nagy ve Bradley, 1955).

Gözenekli bir yapıya sahiptir ve ortalama mikropor çapı 15 Å, mezopor çapı ise 15-45 Å arasındadır. Özgül ağırlığı 2-2,3 g/cm³ civarındadır (İMİB, 1999).



Şekil 2.5 Sepiyolitin kafes ve kanal yapısı

Başlıca kullanım alanları; koku giderici olarak çiftliklerde, atık su artıma, deterjan ve temizlik maddelerinde olarak gösterilebilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Ağır metal ve kirleticilerin gideriminde doğal minerallerin kullanımı oldukça önem kazanmıştır. Geniş malzeme çeşitliliği, kolay erişilebilirlik, düşük maliyet, yüksek verimlilik gibi avantajlara sahiptir.

Bu çalışmada ülkemizdeki yataklardan çıkarılmış zeolit (Manisa-Gördes), diatomit (Erzurum-Şenkaya), sepiyolit (Eskişehir) ve kili (İzmir-Manisa) temin edilerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.1. Bariyer Malzemelerinin Karakterizasyon Analizi

Doğal bariyer malzemesi olan zeolit, diatomit, sepiyolit ve kil SEM-EDX, XRD, BET, FTIR, XRF gibi yöntemler yardımıyla yapısal olarak analiz edilmiştir. Bariyer malzemesi olarak kullanılacak dört malzeme içinde tanecik boyut dağılımı, özgül ağırlık, elementel kompozisyon, geçirgenlik, yüzey alanı, şişme hacmi ve benzeri özellikleri incelenmiştir.

- Tanecik boyut dağılımının belirlenmesi elek analizi ve lazerli partikül analizi ile tayin edilmiştir.
- Özgül ağırlığın (g/cm^3) belirlenmesinde piknometre ile özgül ağırlık tayini yöntemi kullanılmıştır.
- Elementel bileşimlerin belirlenmesinde XRF ve ICP kullanılmıştır.
- BET yüzey alanı, gözenek hacmi ve çapı analiz edilmiştir.
- Şişme hacimleri belirlenmiştir.
- Sabit seviyeli permeabilite testi ile malzemelerin hidrolik geçirgenliği saptanmıştır.

3.1.1. Bariyer malzemelerinin özgül ağırlık tayini

0,5 mm'den ince partikül boyutuna sahip malzeme 10-20 g alınır ve kuru ağırlığı tartılır. Özgül ağırlık tayini için kullanılacak piknometre de tartılarak ağırlığı (A) tayin edilir. 10-20 g alınan kuru örnek piknometreye eklenir. Ağırlığı (B) tartılır. Sonra su eklenerek çalkalanır bu sayede hava kabarcıklarının çıkışı sağlanır. Ardından tartılarak ağırlığı (C) saptanır. Piknometre tamamen boşaltılarak sadece su ile doldurulur ve ağırlığı (D) tartılır. Bu sayede özgül ağırlık tayini için gerekli tüm ölçümler yapılmış olur. Aşağıda yer alan formülde yerine konularak her bir doğal bariyer malzemesi için özgül ağırlık tayin edilebilir.

A :Şişe+kapak, B: Şişe+kapak+toz, C: Şişe+kapak+toz+su, D: Şişe+kapak+su, ρ : Kullanılan sıvının özgül ağırlığı (saf su için 1) (Kaftelen, 2013).

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{(B - A)}{(D - A) - (C - B)} \times \rho$$

3.1.2. Bariyer malzemelerinin elementel bileşimleri

SEM-EDX ve XRF cihazları ile tayin edilmiştir.

3.1.3. Bariyer malzemelerinin tanecik boyut dağılımı

İstanbul Üniversitesi'nde bulunan lazerli partikül analiz cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

3.1.4. BET yüzey alanı, gözenek hacmi ve çapının belirlenmesi

Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkezi Analiz Laboratuvarında BET Micrometrics 3 Flex Marka cihazla gerçekleştirilmiştir.

3.1.5. Bariyer malzemelerinin dinamik ağırlık değişimi ve şişme hacmi

Bariyer malzemelerinin şişme özelliklerini inceleyebilmek amacıyla aşağıda verilen özellikler incelenmiştir. Doğal bariyer malzemelerinden belli bir miktar, öncelikle 25 mL saf su içerisinde 25°C sıcaklıkta 1 saat karıştırılmıştır ve 1 saat bekletilerek aşağıdaki formülasyon ile şişme özellikleri hesaplanmıştır.

$$\text{Şişme derecesi} = \frac{V_{\text{şişmiş bariyer}}}{V_{\text{kuru bariyer}}}$$

$$\text{Şişme sonrası hacim değişimi (\%)} = \frac{V_{\text{şişmiş bariyer}} - V_{\text{kuru bariyer}}}{V_{\text{şişmiş bariyer}}} \times 100$$

$$\text{Dinamik ağırlık değişimi (\%)} = \frac{m_{\text{şişmiş bariyer}} - m_{\text{kuru bariyer}}}{m_{\text{şişmiş bariyer}}} \times 100$$

3.1.6. Sabit seviyeli permeabilite ile hidrolik geçirgenliğin belirlenmesi

Belirli bir hacimdeki topraktan geçen belli miktardaki sıvının miktarı o toprağa ait permeabilite (hidrolik geçirgenlik) değerini göstermektedir. Partikül şekli ve hacmi, partikül şekli, sıvının özgül ağırlığı ve permeabilitesi, sıvı sıcaklığı, gözenekler arasında hava kabarcıkları permeabiliteyi etkilemektedir.

Sabit seviyeli permeabilite testinde hidrolik yük sabit seviyede tutularak sızan sıvı miktarı belirli aralıklarla ölçülür. Darcy eşitliği ile malzemelerin permeabilitesi hesaplanır.

$$k = Q L / h A$$

K: permeabilite değeri (m/s), Q : deşarj edilen sıvı hacmi (m³/s), L: örneğin uzunluğu (m), h: hidrolik basınç (m) ve A: örneğin kesit alanı (m²) (Munro vd., 2004)

3.1.7. Difüzyon denklileri

Çalışmada kullanılacak her bir doğal bariyer malzemesinin etkinliğinin incelenmesi adına Fick'in 2. kanunu kullanılarak difüzyon kat sayısı hesaplanmıştır (García-Gutiérrez vd., 2001).

$$D = \frac{\ln [\Delta C_0 / \Delta C]}{\beta t}$$

ΔC : Zamana göre her bir kutu arasındaki konsantrasyon farkı,
 ΔC_0 : Başlangıç konsantrasyonu,

$$\beta = \frac{A}{d(1/V_a + 1/V_i)}$$

V_a, V_i :kutuların hacmi,
A: Her bir kutudaki malzemenin kesit alanı,
d: Her bir kutudaki malzemenin kalınlığı.
 β : Sabit

3.2. Tam Faktöriyel Deney Tasarımı

Bu çalışmada deney tasarımının deneysel durumlara ve parametrelere uygulanabilecek “İki Seviyeli Tam Faktöriyel Deney Tasarımı” metodu kullanılmıştır.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Malzemelerin Hazırlanması ve Karakterizasyon Deneyleri

4.1.1. Tanecik boyut dağılımı ve elek analizi

Belirli bir miktar numunede tanelerin boyutları ve boyut miktarına göre dağılımı arasındaki ilişkinin saptanabilmesi adına elek analizi ile hangi boyutta ne kadar miktarda malzeme bulunduğu saptanmıştır.

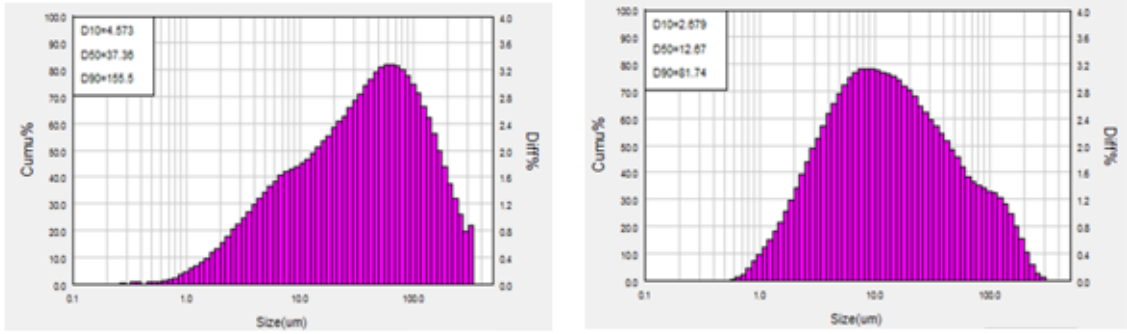
Elek analizi işlemleri Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde ve lazer parçacık boyutu analizörü ile tanecik boyut dağılımı İTÜ Enerji Enstitüsü'nde yapılmıştır. Analizörün algılama aralığı %1 doğrulukla 0,1 ile 340 μm arasındadır. Analiz sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Lazer Parçacık Boyut Analizi Sonuçları

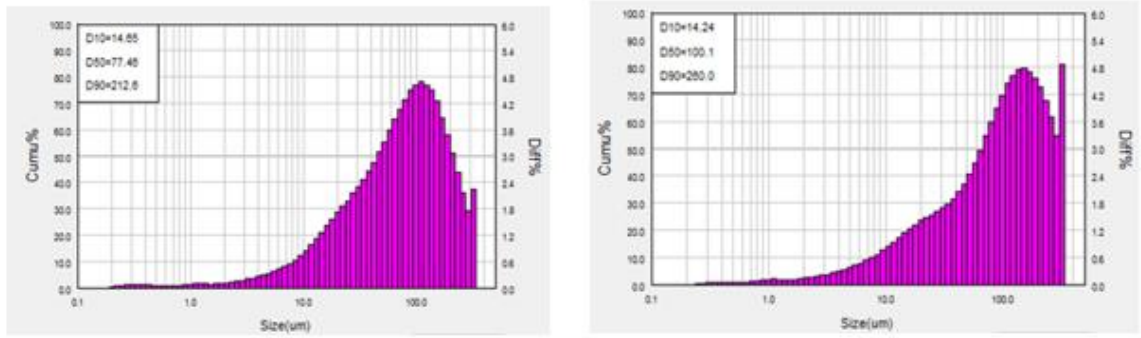
Bariyer malzeme	Boyut (μm)	D10	D50	D90
Diatomit	250	4,573	37,38	155,50
Diatomit	500	2,679	12,67	81,74
Sepiyolit	250	14,65	77,46	212,60
Sepiyolit	500	14,24	100,1	260,0
Zeolit	250	18,98	138,1	297,1
Zeolit	500	127	221,2	325,4
Kil	250	0,646	13,28	43,40
Kil	500	0,828	19,10	70,89

Doğal bariyer malzemesinin partikül dağılımı gösteren Gauss eğrisinin D10, D50 ve D90 değerlerinin karşılıkları Çizelge 4.2'de verilmiştir. D90 değeri partiküllerin %90'ının bulunduğu boyutu değerinin göstermektedir. Benzer

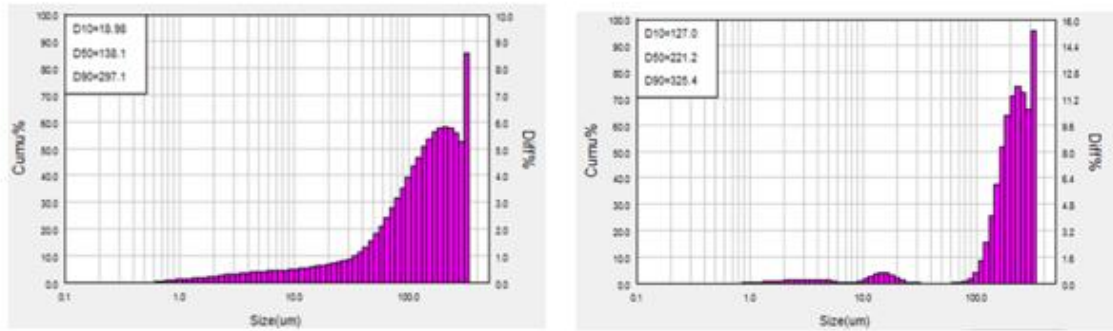
şekilde D50 partiküllerin %50'sinin içerdiği boyutu ve D10 ise %10'unun içerdiği boyutu göstermektedir.



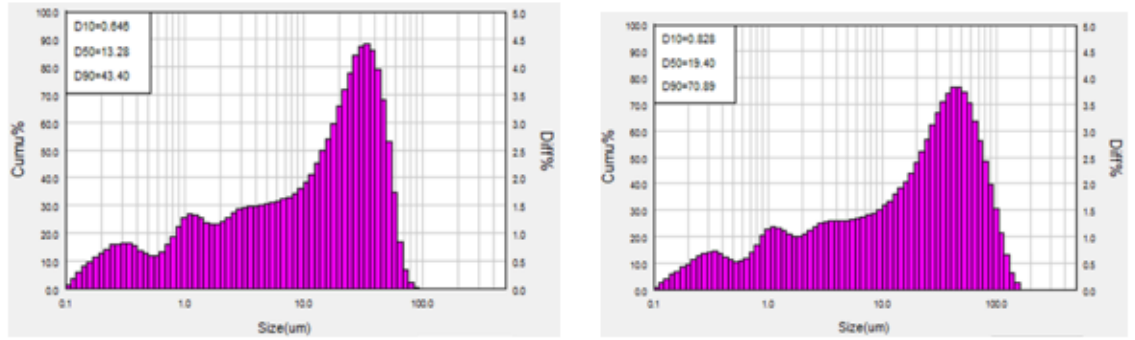
Şekil 4.1 Diatomit 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi



Şekil 4.2 Sepiyolit 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi



Şekil 4.3 Zeolit 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi



Şekil 4.4 Kil 250 µm (a) ve Diatomit 500 µm (b) için partiküllerin frekans dağılım eğrisi

Çok ince partikül boyutlarının permeabiliteye olumsuz etkisi nedeni ile 3 farklı elek kullanılmıştır. Retsch marka elek sarsma cihazı kullanılmıştır Çizelge 4.2’de kullanılan elek detayları verilmiştir.

Çizelge 4.2 Elemede Kullanılan Elek Detayları

Elek (Mesh no)	Açıklık Tanecik boyutu
18	1 mm
35	500 µm
60	250 µm

Eleme işlemlerinde; 15 dakikalık eleme süresi ve 80 şiddetinde eleme genliği kullanılmıştır. Ön denemeler neticesinde (permeabilite testi dikkate alınarak) 1 mm ve 0,5 mm partikül boyutunda malzemelerin kullanımına karar verilmiştir.



Şekil 4.5 Elek sarsma cihazı

4.1.2. Doğal malzemelerin özgül ağırlık değerlerinin (g/cm³) piknometre ile belirlenmesi

0,5 mm'den ince partikül boyutuna sahip malzeme 10-20 g alınır ve kuru ağırlığı tartılır. Özgül ağırlık tayini için kullanılacak piknometre de tartılarak ağırlığı (A) tayin edilir. 10-20 g alınan kuru örnek piknometreye eklenir. Ağırlığı (B) tartılır. Sonra su eklenerek çalkalanır bu sayede hava kabarcıklarının çıkışı sağlanır. Ardından tartılarak ağırlığı (C) saptanır. Piknometre tamamen boşaltılarak sadece su ile doldurulur ve ağırlığı (D) tartılır. Bu sayede özgül ağırlık tayini için gerekli tüm ölçümler yapılmış olur. Aşağıda yer alan formülde yerine konularak her bir doğal bariyer malzemesi için özgül ağırlık tayin edilebilir.

A :Şişe+kapak, B: Şişe+kapak+toz, C: Şişe+kapak+toz+su, D: Şişe+kapak+su, ρ : Kullanılan sıvının özgül ağırlığı (saf su için 1) (Kaftelen, 2013).

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{(B - A)}{(D - A) - (C - B)} \times \rho$$

Bu eşitliğe göre elde edilen bariyer malzemelerinin özgül ağırlıkları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Bariyer Malzemelerinin Özgül Ağırlıkları

Bariyer Malzemesi	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Zeolit	2,15
Diatomit	1,82
Kil	2,35
Sepiyolit	2,07

4.1.3. Bariyer malzemelerinin dinamik ağırlık değişimi ve şişme hacminin belirlenmesi

Bariyer malzemelerinin şişme özelliklerini inceleyebilmek amacıyla aşağıda verilen özellikler incelenmiştir. Doğal bariyer malzemelerinden belli bir miktar, öncelikle 25 mL saf su içerisinde 25°C sıcaklıkta 1 saat karıştırılmıştır ve 1 saat bekletilerek aşağıdaki formülasyon ile şişme özellikleri hesaplanmıştır.

$$\text{Şişme derecesi} = \frac{V_{\text{şişmiş bariyer}}}{V_{\text{kuru bariyer}}}$$

$$\text{Şişme sonrası hacim değişimi (\%)} = \frac{V_{\text{şişmiş bariyer}} - V_{\text{kuru bariyer}}}{V_{\text{şişmiş bariyer}}} \times 100$$

$$\text{Dinamik ağırlık değişimi (\%)} = \frac{m_{\text{şişmiş bariyer}} - m_{\text{kuru bariyer}}}{m_{\text{şişmiş bariyer}}} \times 100$$

Çizelge 4.4 Bariyer malzemelerinin şişme derecesi, şişme sonrası hacim değişimi ve dinamik ağırlık değişimi

Bariyer Malzemesi	Şişme Derecesi	Şişme Sonrası Hacim Değişimi (%)	Dinamik Ağırlık Değişimi (%)
Zeolit	1,515	33,81	33,81
Diatomit	1,497	33,17	33,17
Kil	1,438	30,46	30,46
Sepiyolit	1,467	31,79	31,79

4.1.4. Doğal bariyer malzemelerinin sabit seviyeli permeabilite ile hidrolik geçirgenliğin belirlenmesi

Belirli bir hacimdeki topraktan geçen belli miktardaki sıvının miktarı o toprağa ait permeabilite (hidrolik geçirgenlik) değerini göstermektedir. Partikül şekli ve hacmi, partikül şekli, sıvının özgül ağırlığı ve permeabilitesi, sıvı sıcaklığı, gözenekler arasında hava kabarcıkları permeabiliteyi etkilemektedir.

Sabit seviyeli permeabilite testinde hidrolik yük sabit seviyede tutularak sızan sıvı miktarı belirli aralıklarla ölçülür. Darcy eşitliği ile malzemelerin permeabilitesi hesaplanır.

$$k = Q L / h A$$

K: permeabilite değeri (m/s), Q: deşarj edilen sıvı hacmi (m^3/s), L: örneğin uzunluğu (m), h: hidrolik basınç (m) ve A: örneğin kesit alanı (m^2) (Munro vd., 2004)

Denemeler Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde gerçekleştirilmiştir. Orijinal permeametre kabının hacminin çok fazla olmasından dolayı ve buna bağlı olarak fazla miktarda malzeme sarfiyatı olacağı için 2,25 cm yarıçapında ve taban alanı $15,90 \text{ cm}^2$ olacak şekilde modifiye bir permeametre kabı hazırlanmış ve denemelerde kullanılmıştır.



a) Orijinal Permeametre Kabı b) Modifiye Permeametre Kabı

Şekil 4.6 Permeametre Kapları

Çizelge 4.1 Bariyer Malzemelerin Permeametre Sonuçları

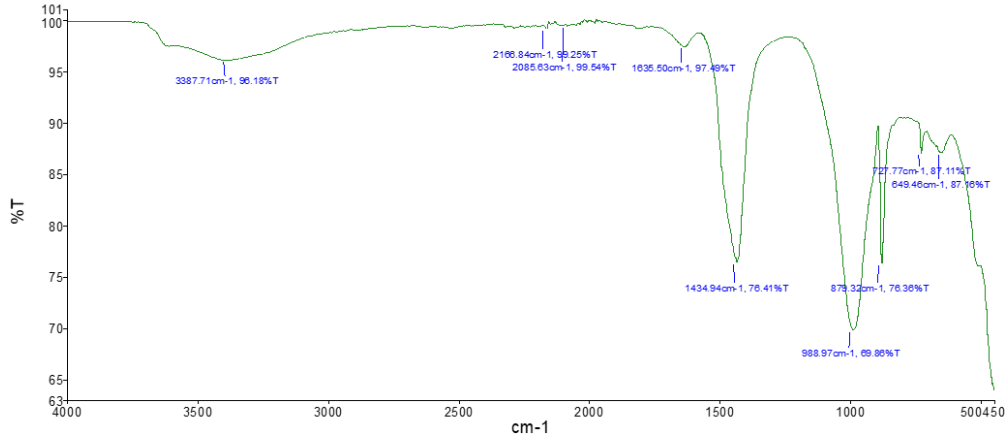
Bariyer Malzemesi	1 mm Partikül Boyutu İçin Geçirgenlik (m/s)	0.500 mm Partikül Boyutu İçin Geçirgenlik (m/s)
Zeolit	$1,11 \times 10^{-2}$	$4,69 \times 10^{-3}$
Diatomit	$1,57 \times 10^{-3}$	$8,58 \times 10^{-4}$
Kil	$4,12 \times 10^{-4}$	$4,87 \times 10^{-4}$
Sepiyolit	$5,63 \times 10^{-5}$	$4,23 \times 10^{-5}$

Hidrolik geçirgenlik, malzeme miktarı kimyasal bileşim, boyut dağılımı, partikül şekli ve temas süresine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Yerçekimi nedeni ile GRB sisteminde sıvı yüksek kottan alçak kota doğru hareket eder. Bariyer malzemesi geçirgenliğinin akiferinkinden daha büyük olması gerekir. (Kacimov vd., 2011). Eğer bu koşula uyulmaz ise sıvı GRB sisteminden doğrudan geçip gidecektir. Bu nedenle partikül boyutu seçimi tıkanma olmayacak derecede küçük ve sıvı temasını da optimum düzeyde tutacak seviyede yapılmalıdır. (Puls vd., 1999).

Çizelge 4.5’de malzemelere ait k katsayıları incelendiğinde sepiyolitın permeabilitesi en düşük seviyede gözlemlenmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında permeabilite değerleri büyükten küçüğe zeolit, diatomit, kil ve sepiyolit olarak sıralanmıştır.

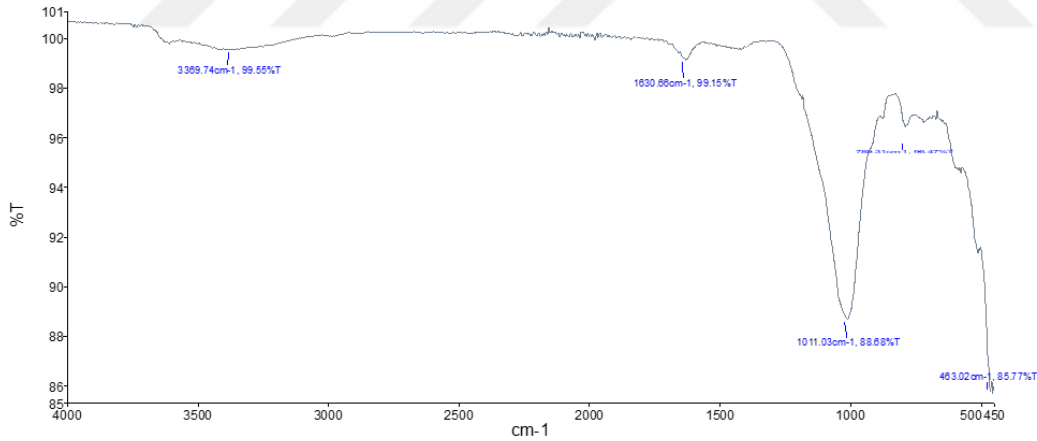
4.1.5. Bariyer malzemelerin FT-IR analiz sonuçları

FT-IR analizleri Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü’nde bulunan PERKIN ELMER SPECTRUM TWO model FTIR-ATR cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7 Buca Kil örneğinin FT-IR analiz spektrumu

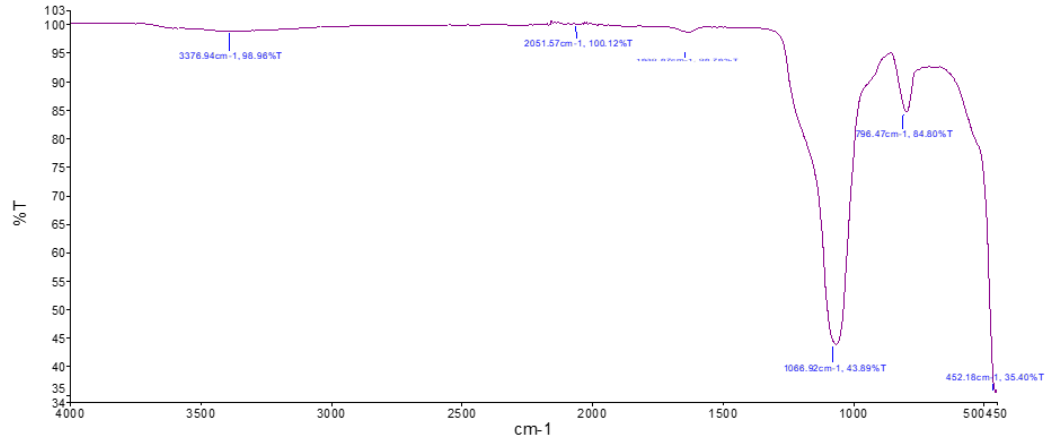
3387 cm^{-1} 'deki bant, OH grubunun karakteristik titreşim bandını işaret eder. 2316-2085 cm^{-1} 'de görülen pikler, atmosferik CO_2 'ye refere edilebilir (Goes vd., 2014). 1635 cm^{-1} 'deki absorpsiyon bandı, kil içinde adsorbe edilen su ile ilişkilendirilebilir (C. W. Lopes vd., 2011). 1434 cm^{-1} civarındaki absorpsiyon bandı kalsit titreşimi ile ilgilidir (Goes vd., 2014). 988 cm^{-1} bölgesinde pik Si-O'ya karşılık gelirken, 879 ve 727 cm^{-1} 'e yakın farklı Si-O ve Si-O-Al titreşimlerindeki kuvars tepe noktalarını göstermektedir (Rezende vd., 2018).



Şekil 4.8 Zeolit örneğinin FT-IR analiz spektrumu

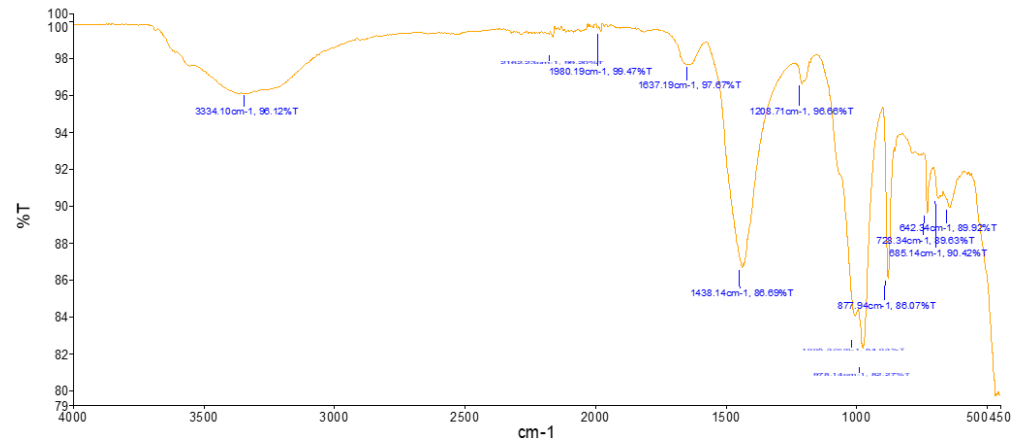
3369 cm^{-1} 'de hidroksil fonksiyonel grubun simetrik ve asimetric gerilme titreşimleriyle ilişkili bandın gözleendiği görülmüştür. Si-O bağının titreşiminden kaynaklı 1630 cm^{-1} 'de bulunan bant meydana gelmiştir. 1011 cm^{-1} 'de bulunan keskin pikler Al-O bağları ile tanımlanabilir. SiO_2 'nin allotropik fazı, 797 cm^{-1} 'de gözlenen yoğunluk ile tanımlanır. 750 cm^{-1} 'deki absorpsiyon pikleri, SiO_4 simetrik gerilme titreşimine bağlanabilir. 463 cm^{-1} civarındaki bant, SiO_4 gruplarının eğilme titreşimi veya 4 üyeli silikat

halkalarının titreşim modlarıyla ilgilidir (Byrappa ve Kumar, 2007; Ruiz-Baltazar vd., 2015).



Şekil 4.9 Diatomit örneğinin FT-IR analiz spektrumu

Diatomit örneğinin FTIR spektrumunda, 3376 cm^{-1} 'deki geniş bant, absorbe edilen suyun H-O-H titreşimine atfedilir. 1647 cm^{-1} 'deki spektral bantlar, diatomitin silika matrisinde tutulan su moleküllerinin bükülmesini yansıtır. $\sim 1066\text{ cm}^{-1}$ bandı Si-O-Si titreşiminden kaynaklanır. $\sim 796\text{ cm}^{-1}$ bandı, OH titreşimi kaynaklıdır. 452 cm^{-1} civarındaki bant Si-O-Si eğilme titreşimlerinden kaynaklanır (Ilia vd., 2009; Yusan vd., 2012).

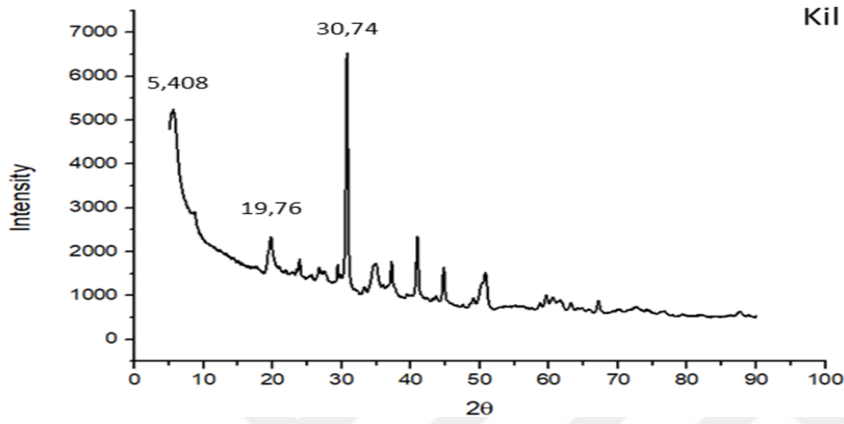


Şekil 4.10 Sepiyolit örneğinin FT-IR analiz spektrumu

3334 cm^{-1} 'deki band zeolitik suyun titreşimine atfedilir. Zeolitik suyun titreşiminden dolayı 1637 cm^{-1} 'de bir pik oluşmuştur. Silikatın $1200\text{--}450\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bantlar sepiyolit karakterist pikleridir (Karakehya ve Bilgiç, 2020; Vicente-Rodríguez vd., 1996).

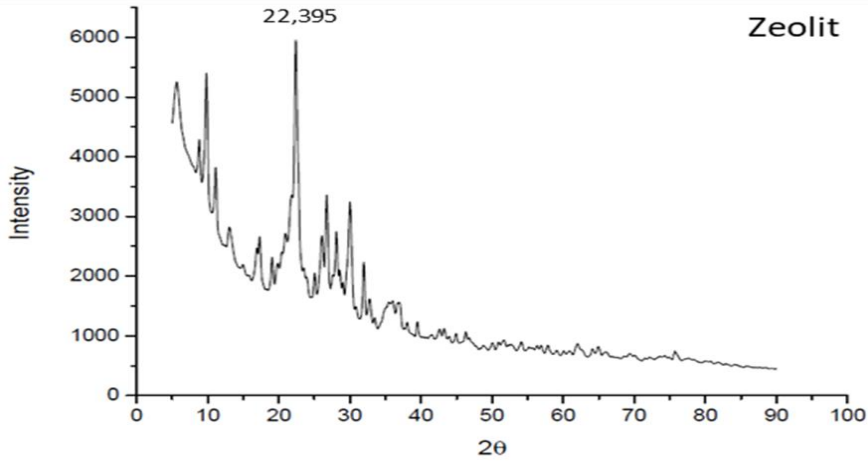
4.1.6. Bariyer malzemelerin XRD analiz sonuçları

XRD analizleri, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarındaki Panalytical Empyrean marka cihaz ile tayin edilmiştir.



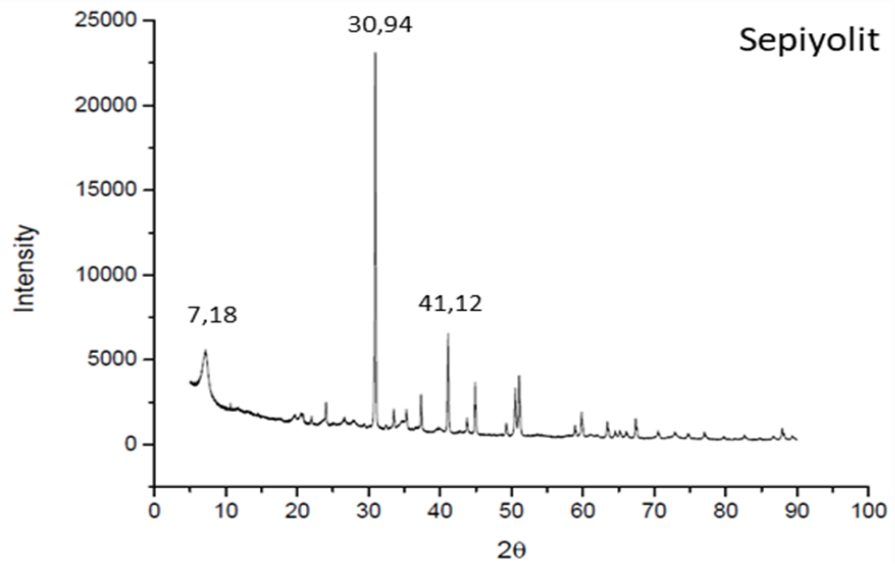
Şekil 4.11 Kil örneğinin XRD grafiği

Buca kili yüksek miktarda dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, simektit ve mika mineralleri içermektedir.



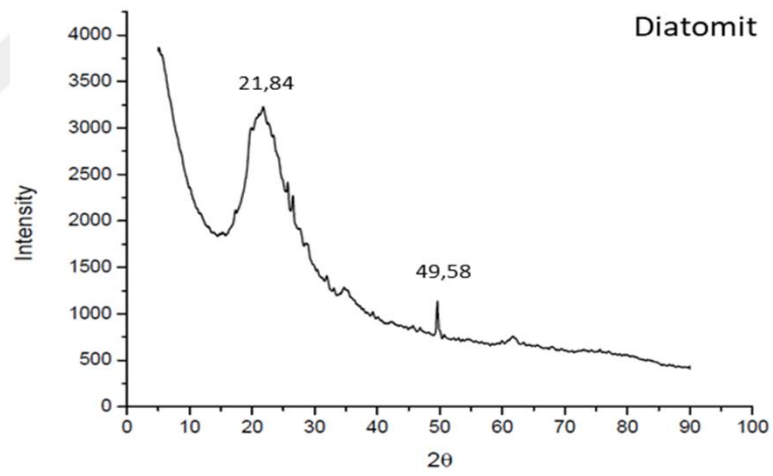
Şekil 4.12 Zeolit örneğinin XRD grafiği

Gördes zeoliti XRD analizine göre, klinoptilolit/hölandit zeolit mineraliyle birlikte opal-CT, kuvars, feldispat (albit), simektit ve mika (biyotit) mineralleri bulunmaktadır.



Şekil 4.13 Sepiyolit örneğinin XRD grafiği

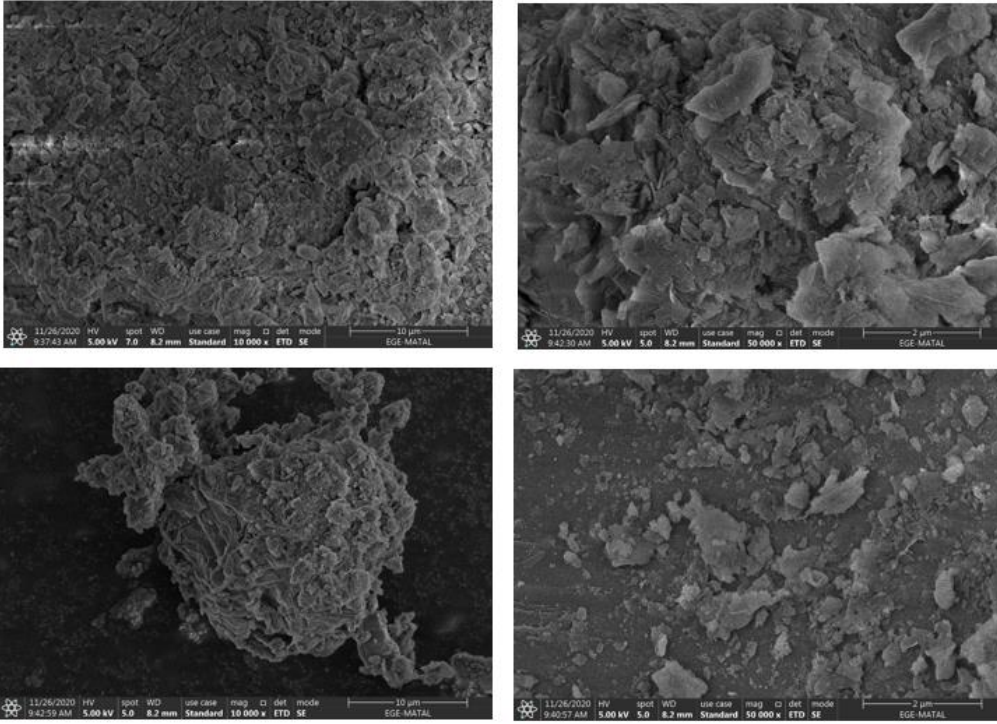
Sepiyolit örneğinde, sepiyolit ve dolomit mineralleri tespit edilmiştir.



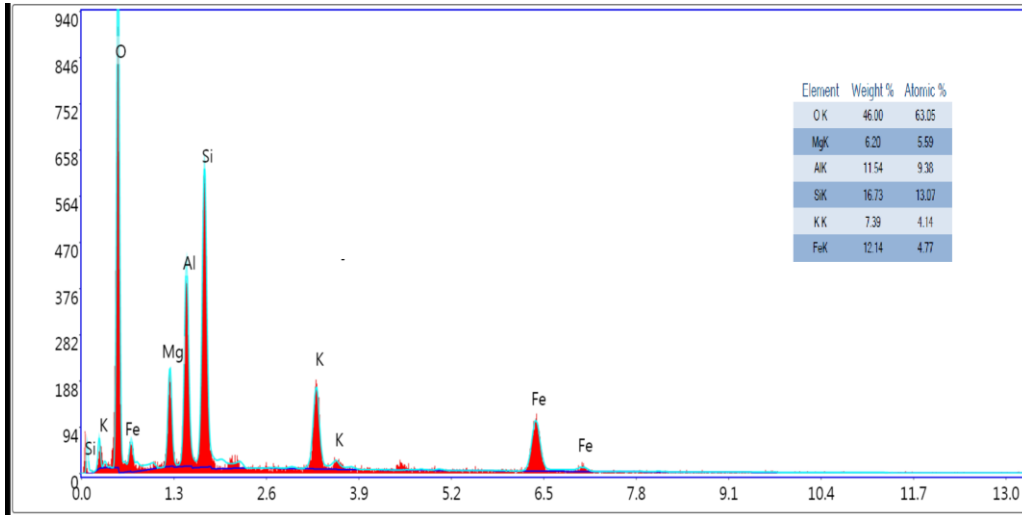
Şekil 4.14 Diatomit örneğinin XRD grafiği

Diatomit örneğinde diatomeleri temsil eden amorf yapıyla birlikte kristobalit, simektit, kuvars ve feldispat (albit) mineralleri tespit edilmiştir.

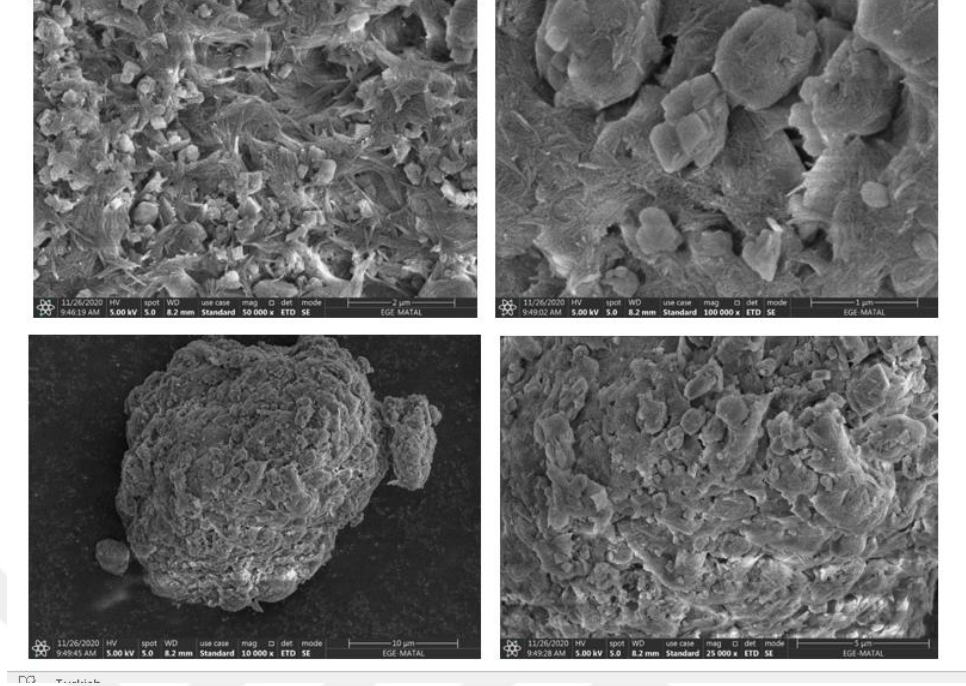
4.1.7. Bariyer malzemelerin SEM/EDX analiz sonuçları



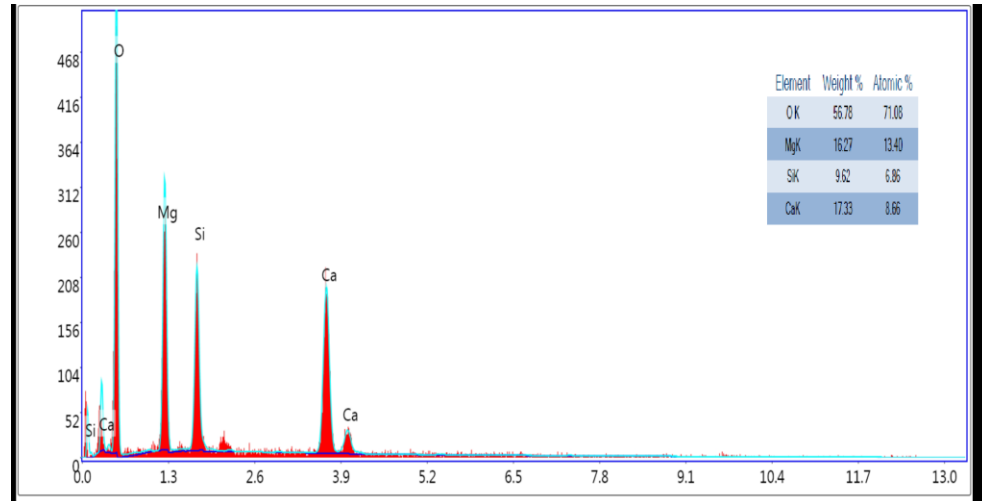
Şekil 4.15 Zeolite ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



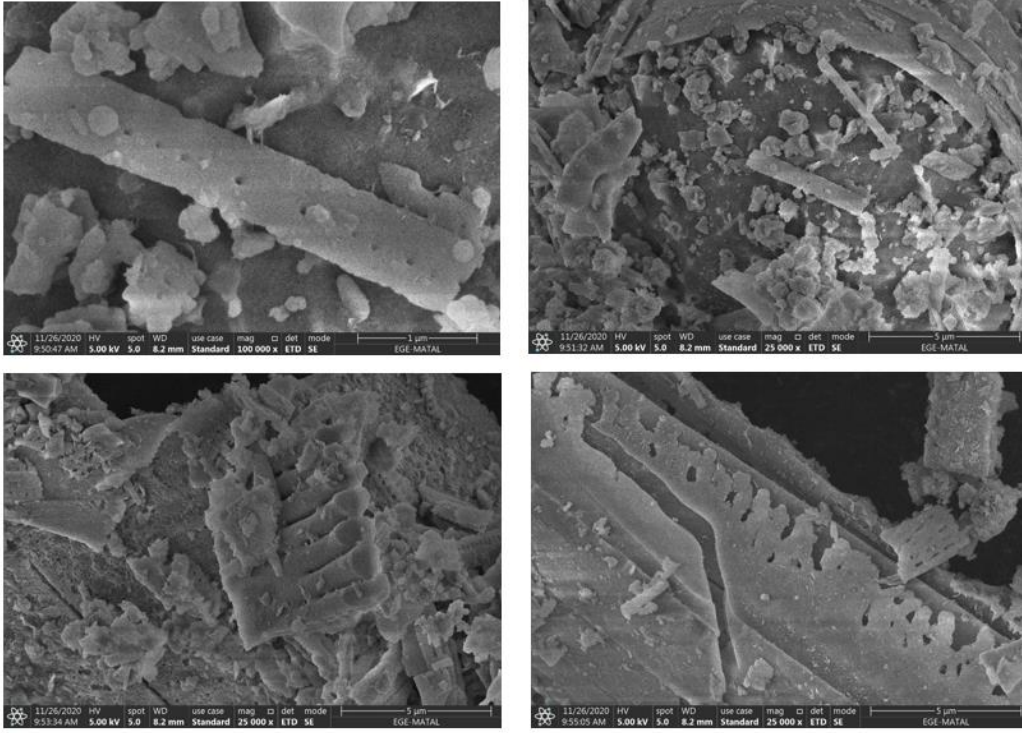
Şekil 4.16 Zeolite ait EDX sonuçları



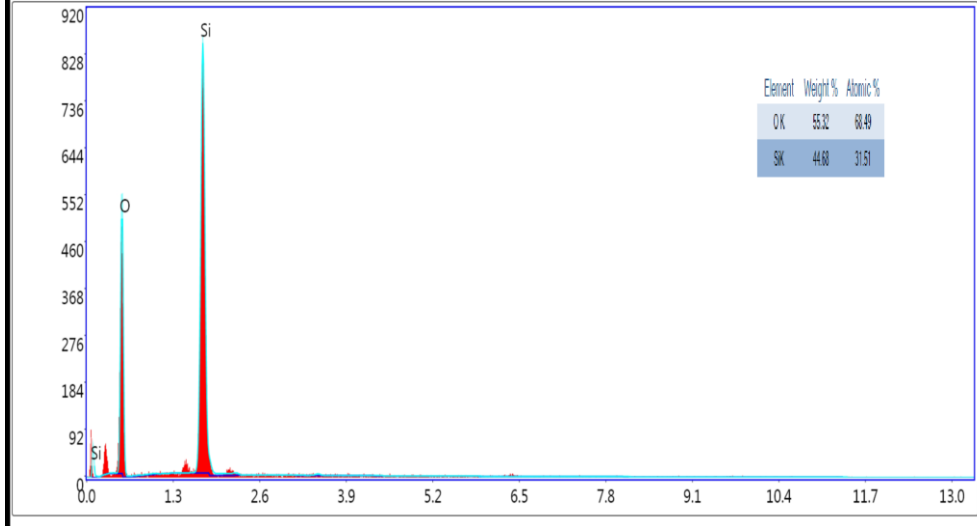
Şekil 4.17 Sepiolite ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



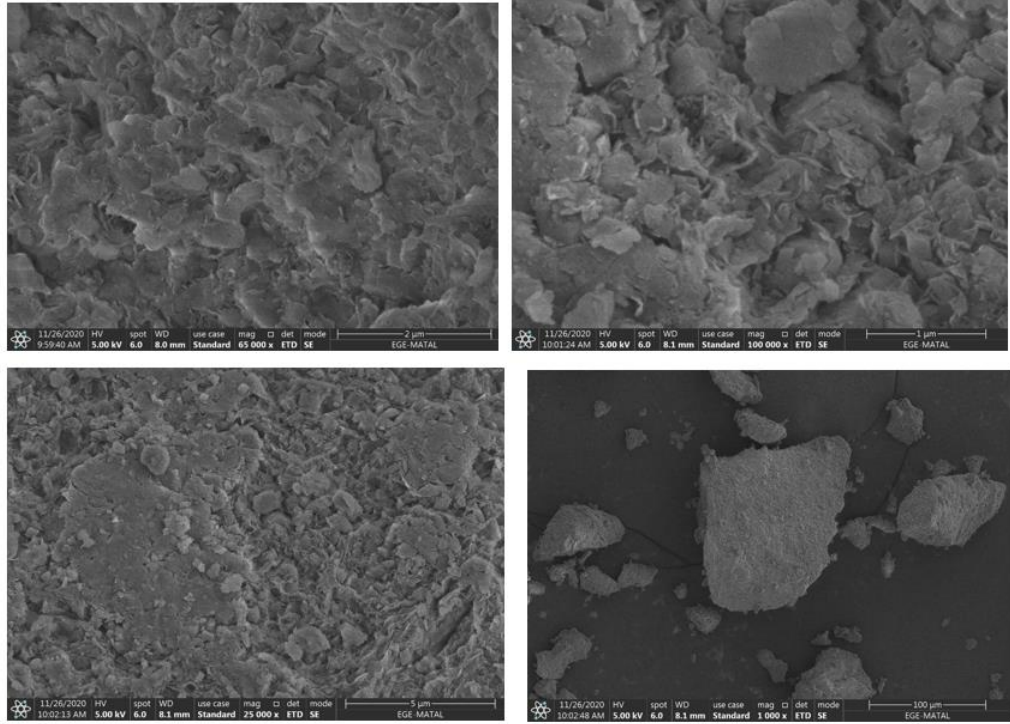
Şekil 4.18 Sepiolite ait EDX sonuçları



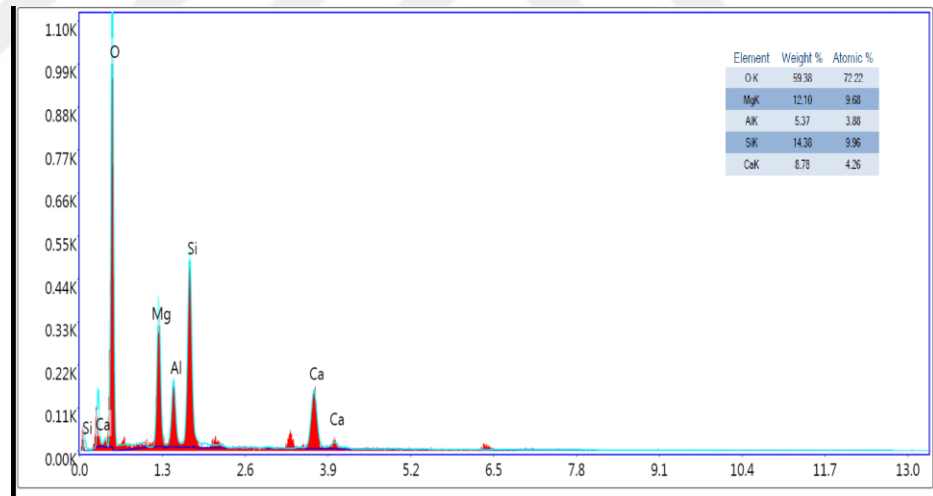
Şekil 4.19 Diatomite ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



Şekil 4.20 Diatomite ait EDX sonuçları



Şekil 4.21 Kile ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



Şekil 4.22 Kile ait EDX sonuçları

Zeolit örneğinin SEM görüntülerinde, klinoptilolit minerali 50000 kez büyütülerek çekilen SEM fotoğrafından tabakalı (levha) yapıdaki kristaller olarak görülmektedir (Dikmen ve Orhun, 2013; Jansen, 2001).

Sepiyolitin SEM görüntülerinde ise amorf tabaka yüzeylerinin birbirine içine geçmesi sonucu kümelenmiş demetler halinde olduğu doğrulanmıştır (Çınar ve Çelik, 2011).

Diatomitin SEM çalışmalarında diatomeler gözlenmiştir (A. Yıldız vd., 2016).

Kilin SEM görüntülerinde smektitik bir bileşime sahip kil minerallerinin karakteristiği olan, çoğunlukla girdap özelliği ve yumuşak kenarları olan ince yassı/pulsu şekiller alır (Xu vd., 2017).

4.1.8. Bariyer malzemelerin EDXRF analiz sonuçları

Çalışmada kullanılan örneklerin EDXRF analizleri Ege Üniversitesi MATAL'da bulunan RIGAKU marka EDXRF spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.6 Zeolit EDXRF Analiz Sonuçları

Komponent	MgO	CaO	Y ₂ O ₃	ThO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SnO ₂	K ₂ O
% Kütle Bileşim	0,61	9,09	0,0366	0,0229	7,12	0,438	0,0463	12,2
Komponent	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	SrO	SO ₃	Rb ₂ O	BaO	As ₂ O ₃
% Kütle Bileşim	56	10,7	3,12	0,168	0,111	0,133	0,163	0,0494

Çizelge 4.7 Kil için EDXRF sonuçları

Komponent	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SrO	Y ₂ O ₃
% Kütle Bileşim	41,1	0,446	34,6	2,78	16,3	0,0093	3,75	0,316	0,0027
Komponent	SnO ₂	ZrO ₂	Cs ₂ O	BaO	MnO	NiO	Rb ₂ O	ZnO	Rb ₂ O
% Kütle Bileşim	0,0059	0,503	0,0067	0,0265	0,0763	0,009	0,133	0,0101	0,0259

Çizelge 4.8 Diatomit için EDXRF sonuçları

Komponent	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃
% Kütle Bileşim	1,94	77,2	2,01	3,77	11,2	0,0649	0,0792	0,0113
Komponent	SnO ₂	ZrO ₂	Cs ₂ O	BaO	V ₂ O ₅	MnO	GeO ₂	
% Kütle Bileşim	0,0217	2,53	0,187	0,312	0,109	0,528	0,0722	

Çizelge 4.9 Sepiyolit için EDXRF sonuçları

Komponent	MgO	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
% Kütle Bileşim	11,7	15,6	0,333	60,2	3,58	0,063
Komponent	ZnO	Rb ₂ O	SrO	SnO ₂	ZrO ₂	BaO
% Kütle Bileşim	0,0183	0,0227	3,06	0,0678	5,13	0,151

Bariyer malzemelerinin EDXRF sonuçları literatürde ile uyumlu olduğu görülmektedir (Nayak ve Singh, 2007; Suna ve Bayat, 2019; A. Yıldız vd., 2016).

4.1.9. Bariyer malzemelerin BET yüzey alanı analiz sonuçları

BET yüzey alanı analizleri Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkezi Analiz Laboratuvarında BET Micrometrics 3 Flex Marka cihazla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.10 Bariyer Malzemelerin BET analiz Sonuçları

Örnek	BET Yüzey Alanı (m ² /g)	Pore Hacmi (cm ³ /g)	Por Boyutu (Å)
Kil	110,9851	0,153868	55,455
Sepiyolit	80,2362	0,152794	76,172
Zeolit	41,9409	0,058412	55,709
Diatomit	33,5619	0,041922	49,964

Bariyer malzemeler için elde edilen BET sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir (Panda vd., 2010; Yates, 1968; A. Yıldız vd., 2016; D. Yıldız, 2020).

4.2. Stronsiyum'un Doğal Bariyer Malzemelerle Tekli Kutu İçerisinde Tutulum Çalışmaları

Bu çalışmada ⁹⁰Sr radyoaktif izotopunu, radyoaktif olmayan doğal izotopunu ⁸⁸Sr ile simüle edilmiştir. Bunun sebebi radyoaktif malzemelerle çalışma yapmanın güçlüğü ve maliyetinin yüksek olmasıdır.

Stronsiyum nitrat: (Sr(NO₃)₂, M= 211,63 g/mol, Merck) kullanılmıştır.

Her bir doğal bariyer malzeme için stronsiyum iyonlarını içeren çözelti incelenmiştir. Tekli kutu olacak şekilde çözelti ortamından alım gerçekleştirilmiştir. Bariyer malzeme kalınlığı, temas süresi, çözelti pH'ı, çözültideki Sr konsantrasyonu, kontaminant çözelti hacmi bu amaçla

incelenmiş olup bariyerden geçen stronsiyum içeriği Perkin Elmer Optima 2000 DV ICP-OES cihazında, katı madde de tutulan stronsiyum içeriği EDXRF cihazı ile analiz edilmiştir.

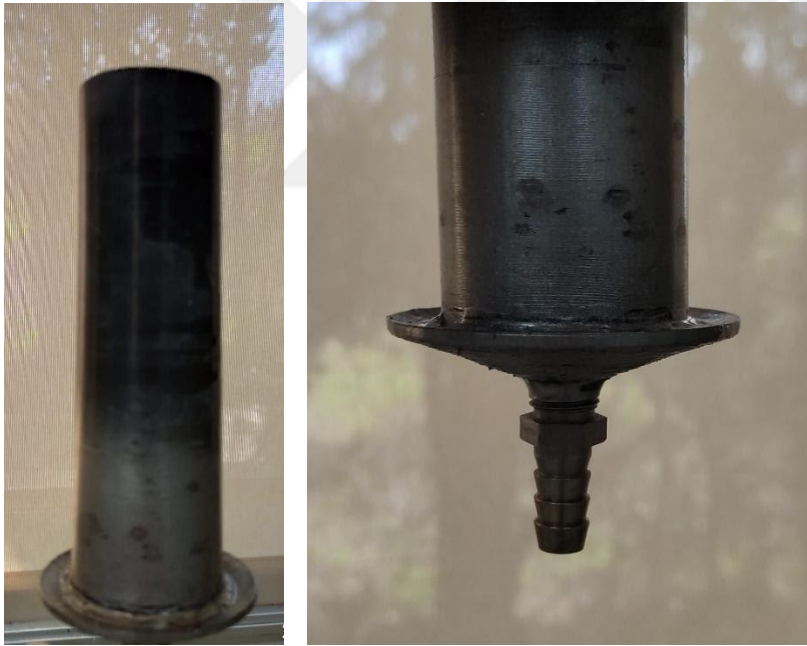
Bariyer malzemeler tarafından adsorplanan stronsiyum miktarı aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\% \text{Adsorpsiyon verimi} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100$$

$$K_d = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times \frac{V}{m} \quad (\text{mL/g})$$

$$q_e = C_i - C_e \times \frac{V}{m} \quad (\text{mg/g})$$

burada, C_i başlangıçtaki, C_e dengedeki stronsiyum ve sezyum miktarı (μg), q_e bariyer malzemenin alım kapasitesini (mg/g), V çözelti hacmi (mL), m ise bariyer malzeme miktarını (g) göstermektedir.



Şekil 4.23 3D yazıcıda hazırlanan tekli kolon

Silindirik kesitli kolon malzemelerin daha iyi ıslanmasını sağladığı için kare kesitli kolon kullanımından vazgeçilmiştir. Bu amaçla silindirik kesitli kolon tasarımı yapılarak 3D yazıcı vasıtasıyla elde edilmiştir. Konik yapılı taban sayesinde suyun tabandan tahliyesi daha hızlı gerçekleşmiştir.

Tasarlanan silindirik kolon için;

Yarı çap: 2 cm; Yükseklik: 15 cm; Kolon Taban Ölçüsü: 4,55 cm*4,55 cm

Kolon deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla gerekli deney sistemi ve peristaltik pompa hazırlanmıştır. Kullanılan bariyer malzemeleri belirlenmiş olan miktarlarda tartım işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tartımı yapılan malzemelerin en az 24 saat olacak şekilde saf su ile ıslatma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kolon deneyleri için peristaltik pompa 5 farklı akış kademesinde çalıştırılmıştır. Bu değerler;

1.Kademe	2.Kademe	3.Kademe	4.Kademe	5.Kademe
2,5 ml/dk	5 ml/dk	7,5 ml/dk	10 ml/dk	12,5 ml/dk

İki farklı yükseklik değerinde bariyer malzemeler kolon içerisine doldurulmuştur. Bu malzemeler için iki farklı yatak hacmi belirlenmiştir. Bu değerler;

Yükseklik: 3,5 cm	Yatak Hacmi: 72,46 cm ³
Yükseklik: 7 cm	Yatak Hacmi: 144,92 cm ³

Kolona besleme tek noktadan ve çok noktadan olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön denemeler sonucunda tek noktadan çözelti beslemesine karar verilmiştir.

1 mm ve 0.5 mm parçacık boyutlarına sahip Zeolit, Sepiyolit, Kil, Diatomit kolon deneylerinde kullanılmıştır.

4.2.1. Stronsiyum için doğal bariyer malzemelerle tekli kutu içerisinde tutulum çalışmaları

Hazırlanan Sr çözeltisi deney şartları sağlandıktan sonra belirlemiş olduğumuz, 2,5 ml/dk ve 7,5 ml/dk debilerde peristaltik pompa ile bariyere beslenmiştir. Tahliye olan sıvılar ve Sr ile etkileşmiş olan bariyer malzemesi ayrılarak ICP-OES ve EDXRF için analize gönderilmiştir.

Sr'un tutulmasında etken olan deneysel parametrelerin (pH, Sr ve Cs derişimi, temas süresi, kontaminant çözelti hacmi, bariyer malzeme kalınlığı) incelenmiş olup, Tam Faktöriyel Deney Tasarım 32 adet deney sayısı elde edilmiş ve gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.11 Her bir bariyer malzemesi ile stronsiyum tutulumu için çalışılacak koşullar

pH	Partikül Boyutu (mm)	Yatak Hacmi (cm³)	Akış Hızı (ml/dk)	Konsantrasyon (ppm) Ci (mg/L)
10	0,5	36	7,5	150
2	1	36	2,5	25
10	0,5	72	7,5	150
2	0,5	72	2,5	25
2	0,5	72	7,5	25
2	0,5	36	2,5	150
2	0,5	36	2,5	25
2	1	36	7,5	150
10	1	36	2,5	25
10	1	36	7,5	25
2	1	36	2,5	150
10	0,5	72	2,5	150
10	0,5	36	2,5	150
2	1	72	2,5	25
2	1	72	7,5	25
10	0,5	36	7,5	25
2	0,5	72	2,5	150
10	1	72	2,5	25
10	0,5	72	7,5	25
10	1	36	2,5	150
2	1	72	7,5	150
2	0,5	36	7,5	25
2	0,5	36	7,5	150
10	0,5	72	2,5	25
10	1	72	7,5	150
10	1	72	2,5	150
10	1	36	7,5	150
10	1	72	7,5	25
2	0,5	72	7,5	150
2	1	72	2,5	150
2	1	36	7,5	25
10	0,5	36	2,5	25

Çizelge 4.12 Stronsiyumun zeolit, diatomite, kil ve sepiyolit üzerine adsorpsiyonunda kullanılan bağımsız değişkenlerin seviye ve aralıkları

Değişkenler	Değişken Kodlar	Seviye ve Aralıklar	
		-1	+1
Başlangıç pH	X ₁	2	10
Partikül Boyutu (mm)	X ₂	0,5	1
Yatak Hacmi (cm ³)	X ₃	36	72
Akış Hızı (ml/dk)	X ₄	2,5	7,5
Başlangıç Konsantrasyonu (mg/L)	X ₅	25	150

Çizelge 4.13 Beş bağımsız değişkenle TFDT (Full Factorial Design) modeline göre oluşturulan deney tasarımı

Değişken Kodları						Değişken Kodları					
Deneme No	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Deneme No	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	1	-1	-1	1	1	17	-1	-1	1	-1	1
2	-1	1	-1	-1	-1	18	1	1	1	-1	-1
3	1	-1	1	1	1	19	1	-1	1	1	-1
4	-1	-1	1	-1	-1	20	1	1	-1	-1	1
5	-1	-1	1	1	-1	21	-1	1	1	1	1
6	-1	-1	-1	-1	1	22	-1	-1	-1	1	-1
7	-1	-1	-1	-1	-1	23	-1	-1	-1	1	1
8	-1	1	-1	1	1	24	1	-1	1	-1	-1
9	1	1	-1	-1	-1	25	1	1	1	1	1
10	1	1	-1	1	-1	26	1	1	1	-1	1
11	-1	1	-1	-1	1	27	1	1	-1	1	1
12	1	-1	1	-1	1	28	1	1	1	1	-1
13	1	-1	-1	-1	1	29	-1	-1	1	1	1
14	-1	1	1	-1	-1	30	-1	1	1	-1	1

15	-1	1	1	1	-1	31	-1	1	-1	1	-1
16	1	-1	-1	1	-1	32	1	-1	-1	-1	-1

Adsorpsiyon denemeleri sonucunda adsorpsiyon yüzdeleri (%) verilmiş olup, dağılma katsayıları (K_d), alım kapasitesileri (q_e) hesaplanarak sonuçlar Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14 Sıratutulumu için Zeolit, Kil, Diatomit ve Sepiyolit için q_e (mg/g) ve K_d (L/g) Değerleri

Deneme No	Zeolit q_e (mg/g)	Diyatomit q_e (mg/g)	Kil q_e (mg/g)	Sepiyolit q_e (mg/g)	Zeolit K_d (L/g)	Diyatomit K_d (L/g)	Kil K_d (L/g)	Sepiyolit K_d (L/g)
1	1.3499	3.7497	1.2794	0.5774	134.991	374.975	0.058	0.007
2	0.2249	0.6247	0.1796	0.0639	22.491	62.475	0.025	0.003
3	1.3499	3.7497	1.4666	0.9456	134.991	374.975	0.439	0.026
4	0.2249	0.6112	0.2499	0.1165	22.491	1.109	24.990	0.010
5	0.2249	0.6116	0.2499	0.1216	22.491	1.147	24.990	0.011
6	1.3499	3.6381	1.3111	0.5725	134.991	0.813	0.069	0.007
7	0.2249	0.6247	0.2391	0.0197	22.491	62.475	0.211	0.0008
8	0.8999	3.5379	1.0229	0.5253	0.018	0.417	0.021	0.0060
9	0.2249	0.5289	0.2257	0.1194	22.491	0.137	0.093	0.011
10	0.2249	0.5273	0.2441	0.1193	22.491	0.135	0.413	0.011
11	1.0962	3.6366	1.0941	0.6833	0.039	0.802	0.027	0.010
12	1.3499	3.7497	1.4940	0.9260	134.991	374.975	2.507	0.024
13	1.3499	3.7497	1.3503	0.8786	134.991	374.975	0.090	0.012
14	0.2136	0.6247	0.2044	0.1048	0.169	62.475	0.044	0.008
15	0.1976	0.6247	0.0946	0.0948	0.065	62.475	0.006	0.007
16	0.2249	0.5296	0.2499	0.1600	22.491	0.138	24.990	0.028
17	1.3499	3.6508	1.4855	0.8834	134.991	0.920	1.029	0.020

18	0.2249	0.5294	0.2463	0.1621	22.491	0.138	0.680	0.029
19	0.2249	0.5292	0.2499	0.1646	22.491	0.138	24.990	0.031
20	1.3499	3.7497	1.3129	0.4565	134.991	374.975	0.070	0.004
21	1.1552	3.6522	1.0212	0.8387	0.053	0.934	0.021	0.017
22	0.2249	0.6247	0.2499	0.0148	22.491	62.475	24.990	0.0006
23	1.3398	3.6516	1.1056	0.5341	1.191	0.928	0.028	0.006
24	0.2249	0.5293	0.2499	0.1680	22.491	0.138	24.990	0.035
25	1.3499	3.7497	1.3092	0.7477	134.991	374.975	0.068	0.012
26	1.3499	3.7497	1.4254	0.7319	134.991	374.975	0.191	0.012
27	1.31122	3.4475	1.2637	0.5824	0.304	0.284	0.053	0.007
28	0.2249	0.5295	0.2337	0.1559	22.491	0.138	0.143	0.025
29	1.3499	3.6539	1.1952	0.9186	134.991	0.951	0.039	0.023
30	1.30936	3.6530	1.2925	0.7565	0.289	0.942	0.062	0.012
31	0.2124	0.6247	0.1031	0.0981	0.152	62.475	0.007	0.007
32	0.2249	0.5297	0.2499	0.1389	22.491	0.139	24.990	0.017

Çizelge 4.15 Beş bağımsız değişkenle tam faktoriyel deney tasarım (TFDT) modeline göre oluşturulan deney tasarımı

Deneme No	Kodlanmış Değerler					Zeolit		Diatomit		Kil		Sepiyolit	
	X1	X2	X3	X4	X5	Cevap Değerleri		Cevap Değerleri %Ads		Cevap Değerleri %Ads		Cevap Değerleri %Ads	
						Deneysel Değerler	Öngörülen Değerler	Deneysel Değerler	Öngörülen Değerler	Deneysel Değerler	Öngörülen Değerler	Deneysel Değerler	Öngörülen Değerler
1	1	-1	-1	1	1	100	101,315	100	99,089	85,293	82,739	46,38	53,505
2	-1	1	-1	-1	-1	100	99,356	100	100,309	71,84	68,171	30,8	32,794
3	1	-1	1	1	1	100	99,290	100	100,610	97,776	94,340	75,953	72,762
4	-1	-1	1	-1	-1	100	98,591	97,796	98,752	100	103,079	56,16	53,595
5	-1	-1	1	1	-1	100	98,738	97,868	97,406	100	96,362	58,64	56,510
6	-1	-1	-1	-1	1	100	99,069	97,017	97,325	87,406	84,688	45,986	48,168
7	-1	-1	-1	-1	-1	100	100,804	100	99,346	95,648	98,559	9,52	8,151
8	-1	1	-1	1	1	66,66	68,560	94,345	93,759	68,193	65,276	42,2	49,703
9	1	1	-1	-1	-1	100	101,069	84,636	84,999	90,316	94,380	57,56	55,318
10	1	1	-1	1	-1	100	101,603	84,38	83,469	97,64	94,135	57,52	64,457
11	-1	1	-1	-1	1	81,206	81,977	96,978	97,015	72,94	76,416	54,886	52,078
12	1	-1	1	-1	1	100	98,039	100	99,939	99,602	102,479	74,38	72,877

13	1	-1	-1	-1	1	100	101,356	100	100,363	90,02	93,133	70,573	68,143
14	-1	1	1	-1	-1	94,944	96,193	100	99,390	81,776	79,455	50,52	52,459
15	-1	1	1	1	-1	87,84	89,262	100	100,062	37,84	40,720	45,72	48,476
16	1	-1	-1	1	-1	100	98,557	84,748	85,313	100	102,747	77,132	70,821
17	-1	-1	1	-1	1	100	101,536	97,356	96,746	99,038	95,760	70,96	72,711
18	1	1	1	-1	-1	100	98,326	84,708	84,647	98,552	100,478	78,124	76,433
19	1	-1	1	1	-1	100	100,837	84,684	84,420	100	103,243	79,36	81,738
20	1	1	-1	-1	1	100	98,804	100	99,291	87,526	83,655	36,673	39,729
21	-1	1	1	1	1	85,573	84,278	97,394	97,678	68,08	65,007	67,373	63,803
22	-1	-1	-1	1	-1	100	101,867	100	100,106	100	97,648	7,16	13,223
23	-1	-1	-1	1	1	99,25	97,510	97,378	97,618	73,706	75,865	42,906	36,029
24	1	-1	1	-1	-1	100	101,834	84,696	84,411	100	97,316	80,98	83,297
25	1	1	1	1	1	100	100,870	100	99,045	87,28	89,958	60,06	63,877
26	1	1	1	-1	1	100	101,801	100	100,407	95,026	92,907	58,793	59,670
27	1	1	-1	1	1	97,132	95,657	91,933	93,190	84,246	87,558	46,786	39,036
28	1	1	1	1	-1	100	99,003	84,732	85,341	93,484	90,999	75,16	72,157
29	-1	-1	1	1	1	100	101,135	97,439	97,501	79,68	83,511	73,786	76,730
30	-1	1	1	-1	1	96,989	95,613	97,414	97,678	86,166	88,680	60,766	59,641
31	-1	1	-1	1	-1	94,444	92,417	100	100,240	41,24	44,350	47,28	40,591
32	1	-1	-1	-1	-1	100	98,771	84,752	84,735	100	96,694	66,972	68,588

Çizelge 4.12 ve 4.13'e göre yapılan deney tasarımı sonucunda elde edilen verilerle, en küçük kareler yöntemi ile regresyon işlemi yapılmıştır. Beş değişken iki seviyeli bu tasarımın sonucunda elde edilen polinomal denkleme göre, aşağıdaki eşitlik bize cevap yüzey grafiklerinin elde edilmesini sağlamıştır.

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{15}X_1X_5 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{25}X_2X_5 + b_{34}X_3X_4 + b_{35}X_3X_5 + b_{45}X_4X_5$$

Zeolit için; Sadece anlamlı olan katsayılar için model aşağıdaki gibidir.

$$y = + 97 + 2,82 X_1 - 2,95 X_2 + 2,77 X_1X_2$$

Diatomit için; Sadece anlamlı olan katsayılar için model aşağıdaki gibidir.

$$y = + 95,01 - 3,18 X_1 + 2,95 X_5 + 4,22 X_1X_5 + 0,50 X_2X_3 - 0,47 X_2X_5 + 0,50 X_3X_5$$

Kil için; Sadece anlamlı olan katsayılar için model aşağıdaki gibidir.

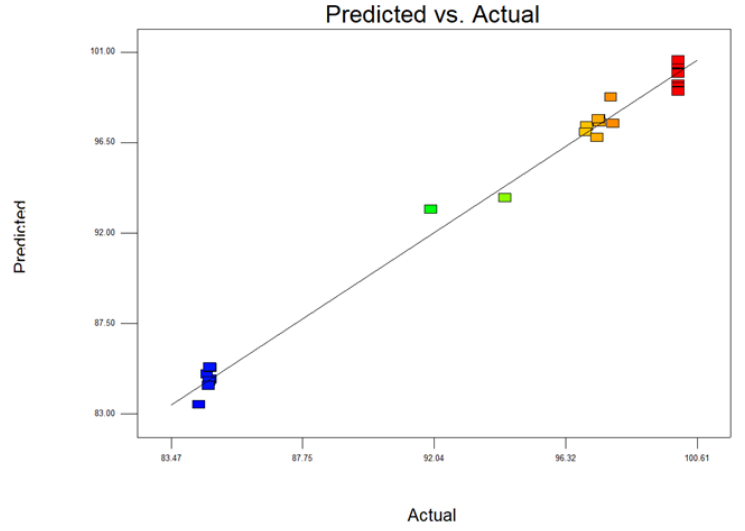
$$y = + 86,57 + 7,60 X_1 - 7,69 X_2 - 4,42 X_4 + 5,27 X_1X_2 + 3,45 X_1X_4 + 3,75 X_2X_5$$

Sepiyolit için; Sadece anlamlı olan katsayılar için model aşağıdaki gibidir.

$$y = + 56,47 + 8,68 X_1 + 10,20 X_3 - 4,23 X_1X_2 - 8,01 X_1X_5$$

Design-Expert® Software
Ads. Diatomite

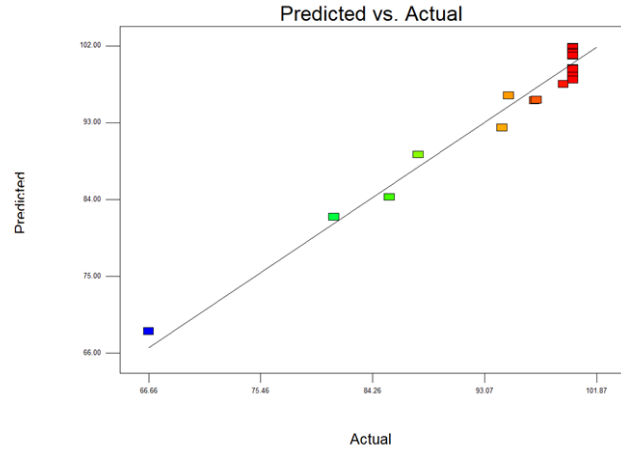
Color points by value of
Ads. Diatomite:
100
84.38



Şekil 4.24 Diatomit için Deneysel ve Öngörülen Değerlerin Grafiği

Design-Expert® Software
Ads. Zeolit

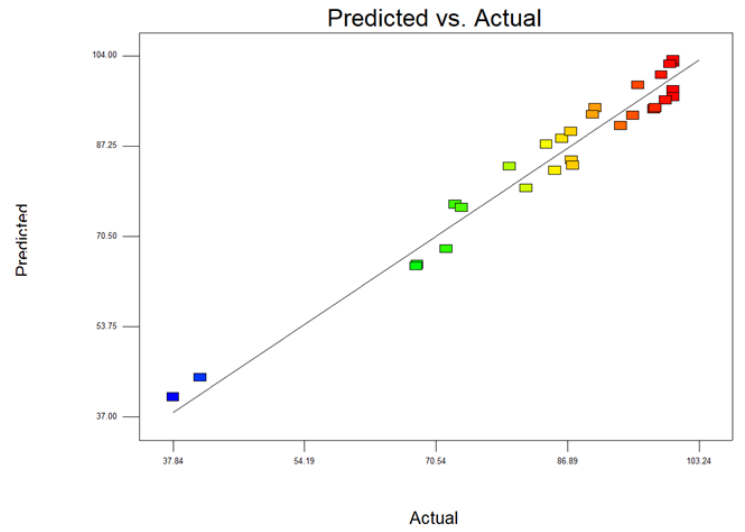
Color points by value of
Ads. Zeolit:
100
66.66



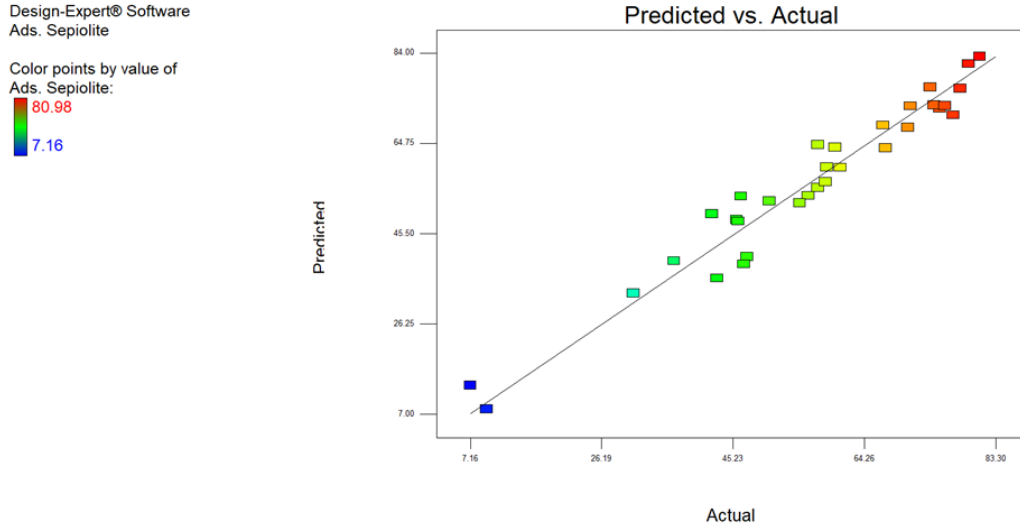
Şekil 4.25 Zeolit için Deneysel ve Öngörülen Değerlerin Grafiği

Design-Expert® Software
Ads. Kil

Color points by value of
Ads. Kil:
100
37.84



Şekil 4.26 Kil için Deneysel ve Öngörülen Değerlerin Grafiği



Şekil 4.27 Sepiyolit için Deneysel ve Öngörülen Değerlerin Grafiği

Uygulanan modelin %95 güven aralığı içerisindeki ANOVA (analysis of variance) analizi incelenmiş ve model ile deneysel bulguların uyumuna bakılmıştır. Anlamlılık F değerinin 0,05'den küçük olması (%95 güven aralığında) modelin istatistiksel olarak önemli olduğunu göstergesidir (Garg et al., 2008). Modelin önemlilik F değerinin $p < 0,05$ ve model F değerinin zeolit için 4,31, diatomit için 53,46, kil için 6,07 ve sepiyolit için 7,03 olarak elde edilmesi, regresyonunun istatistiki olarak yüksek değer gösterdiğini belirtmektedir. Belirlilik katsayısı (R^2) değerinin zeolit için %80, diatomit için %98, kil için %85 ve Sepiyolit için %87 olarak belirlenmesi, ayrı ayrı bu 4 cevap değişkenlerindeki değişmelerin ele alınan faktörler ve etkileşimleri tarafından yüksek seviyede açıklandığını ifade etmektedir. (Çizelge 4.16-4.19).

Çizelge 4.16 Zeolitin Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu

ANOVA (Zeolit)					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F değeri önemliliği</i>
Regresyon	15	1288,61	85,91	4,31	< 0.0030
Artık Değerler	16	318,68	19,92		
Toplam	31	1607,29			

$R^2=0,8017$, Ayarlı $R^2=0,6158$

Çizelge 4.17 Diatomitin Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu

ANOVA (Diatomite)					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F değeri önemliliği</i>

Regresyon	15	1217,55	81,17	53,46	< 0.0001
Artık Değerler	16	24,30	1,52		
Toplam	31	1241,84			

$R^2=0,9804$, Ayarlı $R^2=0,9621$

Çizelge 4.18 Kilin Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu

ANOVA (Kil)					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F değeri</i> <i>önemliliği</i>
Regresyon	15	6773,90	451,59	6,07	< 0.0004
Artık Değerler	16	1190,30	74,39		
Toplam	31	7964,19			

$R^2=0,8505$, Ayarlı $R^2=0,7104$

Çizelge 4.19 Sepiyolit Stronsiyum (Sr) alımında regresyon modelinin ANOVA tablosu.

ANOVA (Sepiyolit)					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F değeri</i> <i>önemliliği</i>
Regresyon	15	9264,5	617,63	7,03	< 0.0002
Artık Değerler	16	1405,1	87,82		
Toplam	31	10669,6			

$R^2=0,8683$, Ayarlı $R^2=0,7448$

Regresyon analizi sonucunda elde edilen katsayıların istatistiksel önem değerlendirilmesi “P” değerleri ile yapılmıştır. Düşük “P” değeri ilgili katsayının önemlilik değerini arttırmaktadır (Can vd., 2006).

Çizelge 4.20’de verilen sonuçlardan, ana etkilerden partikül boyutu ve pH’nin zeolit ile yapılan adsorpsiyon prosesinde anlamlı bir değişikliğe yol açtığı gözlemlenmiştir. pH’nin pozitif, partikül boyutu ise negatif yönde ve anlamlı bir değişikliğe yol açarken; başlangıç konsantrasyonu, yatak hacmi ve akış hızının ise istatistiksel olarak anlamlı bir değişikliğe yol açmadığı görülmüştür. Zeolit için faktörlerin değerlerine bakıldığında etki sıralamasının en fazla partikül boyutu (-2,95), sonra pH (+2,82) olarak gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.20 Zeolit için etkenlerin ilgili p değerleri

ZEOLİT	
Source	p-value
Model	0,0030

A-pH	0,003
B-Partikül Boyutu	0,002
C-Yatak Hacmi	0,307
D-Akis Hızı	0,114
E-Konsantrasyon	0,063
AB	0,003
AC	0,420
AD	0,167
AE	0,096
BC	0,334
BD	0,126
BE	0,071
CD	0,839
CE	0,065
DE	0,512

Zeolite için etkileşimli etkilerin katsayıları incelendiğinde ikili etkileşimlerden pH ve partikül boyutunun anlamlı ($p < 0,05$) ve pozitif yönde etki ettiği; bunun yanında diğer ikili etkileşimlerin istatistiksel olarak önemlilik göstermediği görülmüştür.

Çizelge 4.21'de verilen sonuçlardan, ana etkilerden başlangıç konsantrasyonu ve pH'nin DIATOMİT ile yapılan adsorpsiyon prosesinde anlamlı bir değişikliğe yol açtığı gözlemlenmiştir. pH negatif, başlangıç konsantrasyonu ise pozitif yönde ve anlamlı bir değişikliğe yol açarken; partikül boyutu, yatak hacmi ve akış hızının ise istatistiksel olarak anlamlı bir değişikliğe yol açmadığı görülmüştür. Diatomit için faktörlerin mutlak değerlerine bakıldığında etki sıralamasının en fazla pH (-3,18) sonra başlangıç konsantrasyonu (+2,95) gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.21 Diatomit için etkenlerin ilgili p değerleri

DIATOMİT	
Source	p-value
Model	0,0001
A-pH	0,000
B-Partikül Boyutu	0,316
C-Yatak Hacmi	0,273
D-Akis Hızı	0,153

E-Konsantrasyon	0,000
AB	0,180
AC	0,224
AD	0,389
AE	0,000
BC	0,035
BD	0,120
BE	0,047
CD	0,143
CE	0,036
DE	0,167

Diatomit için etkileşimli etkilerin katsayıları incelendiğinde ikili etkileşimlerden pH ve başlangıç konsantrasyonu, partikül boyutu ile yatak hacmi ve yatak hacmi ile konsantrasyonun anlamlı ($p<0,05$) ve pozitif yönde etki ettiği; partikül boyutu ve konsantrasyonun anlamlı ($p<0,05$) ve negatif yönde etki ettiği; bunun yanında diğer ikili etkileşimlerin istatistiksel olarak önemlilik göstermediği görülmüştür.

Çizelge 4.22'de verilen sonuçlardan, ana etkilerden akış hızı, partikül boyutu ve pH'nin KİL ile yapılan adsorpsiyon prosesinde anlamlı bir değişikliğe yol açtığı gözlemlenmiştir. pH pozitif, partikül boyutu ve akış hızının ise negatif yönde ve anlamlı bir değişikliğe yol açarken; yatak hacmi ve başlangıç konsantrasyonunun ise istatistiksel olarak anlamlı bir değişikliğe yol açmadığı görülmüştür. Kil için faktörlerin mutlak değerlerine bakıldığında etki sıralamasının en fazla partikül boyutu (-7,69) sonra pH (+7,60) ve akış hızı (-4,42) olarak gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.22 Kil için etkenlerin ilgili p değerleri

KİL	
Source	p-value
Model	0,0004
A-pH	0,000
B-Partikül Boyutu	0,000
C-Yatak Hacmi	0,128
D-Akis Hızı	0,010
E-Konsantrasyon	0,356
AB	0,003
AC	0,921
AD	0,037
AE	0,236
BC	0,844
BD	0,166
BE	0,026
CD	0,315
CE	0,336
DE	0,911

Kil için etkileşimli etkilerin katsayıları incelendiğinde ikili etkileşimlerden pH ve partikül boyutu, pH ve akış hızı, partikül boyutu ve başlangıç

konsantrasyonunun anlamlı ($P<0,05$) ve pozitif yönde etki ettiği; bunun yanında diğer ikili etkileşimlerin istatistiksel olarak önemlilik göstermediği görülmüştür.

Çizelge 4.23'de verilen sonuçlardan, ana etkilerden yatak hacmi ve pH'nin SEPIYOLİT ile yapılan adsorpsiyon prosesinde anlamlı bir değişikliğe yol açtığı gözlemlenmiştir. pH ve yatak hacmi pozitif yönde ve anlamlı bir değişikliğe yol açarken; partikül boyutu, başlangıç konsantrasyonu ve akış hızının ise istatistiksel olarak anlamlı bir değişikliğe yol açmadığı görülmüştür. Sepiyolit için faktörlerin mutlak değerlerine bakıldığında etki sıralamasının en fazla yatak hacmi (+10,20) sonra pH (+8,68) gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.23 Sepiyolit için etkenlerin ilgili p değerleri

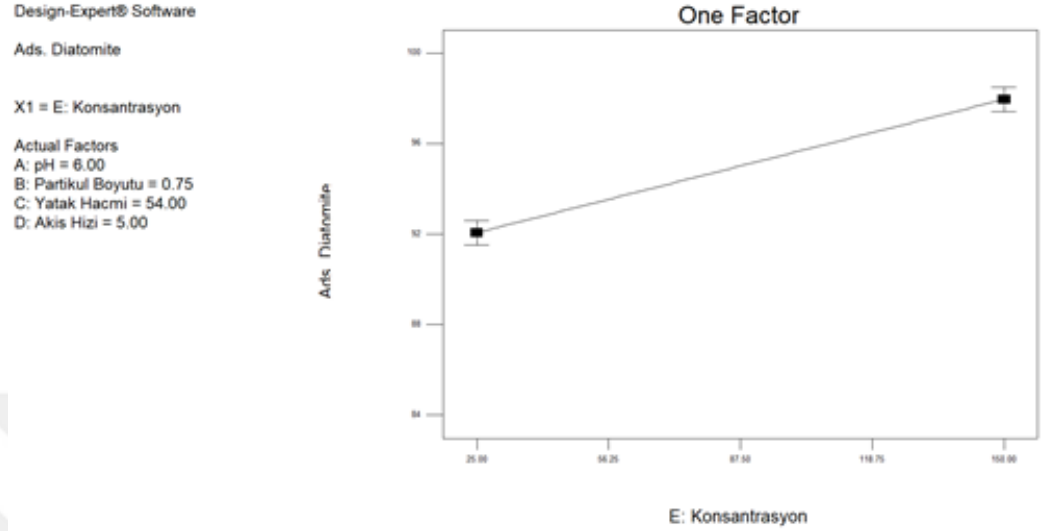
SEPIYOLİT	
Source	p-value
Model	0,0002
A-pH	0,000
B-Partikül Boyutu	0,227
C-Yatak Hacmi	0,000
D-Akis Hızı	0,996
E-Konsantrasyon	0,361
AB	0,021
AC	0,151
AD	0,836
AE	0,000
BC	0,147
BD	0,602
BE	0,150
CD	0,839
CE	0,780
DE	0,520

Sepiyolit için etkileşimli etkilerin katsayıları incelendiğinde ikili etkileşimlerden pH ve partikül boyutu, pH ve başlangıç konsantrasyonunun anlamlı ($P<0,05$) ve negatif yönde etki ettiği; bunun yanında diğer ikili etkileşimlerin istatistiksel olarak önemlilik göstermediği görülmüştür.

4.2.1.1. Derişimin etkisi

Regresyon analizi sonucu diatomit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna başlangıç Sr(II) derişiminin etkisi önemli bulunmuştur ($P<0,05$). Zeolit için derişime ait katsayının sıfırdan küçük olması (-1,58) konsantrasyonun adsorpsiyon üzerine kümülatif etkisinin negatif olduğunu göstermektedir. Diatomite için derişime ait katsayının sıfırdan büyük olması (+2,95) konsantrasyonun adsorpsiyon üzerine kümülatif etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir.

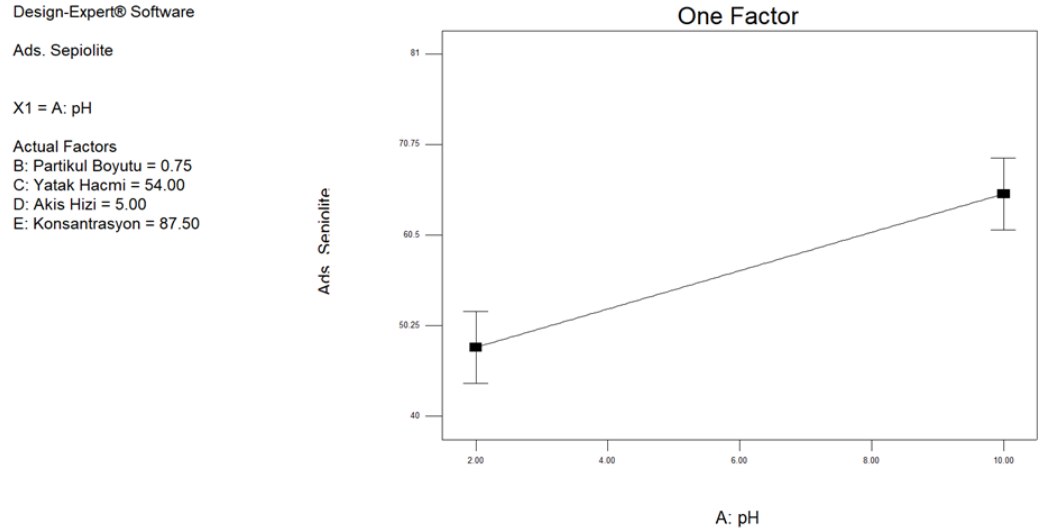
Zeolit, kil ve sepiyolit için derişimin katsayısına bakıldığında ise başlagıç Sr(II) konsantrasyonunun adsorpsiyona etkisi önemli bulunmamıştır ($P>0.05$). Şekil 4.28’de diatomit üzerine Sr(II) adsorpsiyonunun 25-150 ppm aralığında derişim artışı ile arttığı görülmektedir.



Şekil 4.28 Sr(II) ‘nin diatomit üzerine tutulumuna Sr derişiminin etkisi

4.2.1.2. pH’nin etkisi

Regresyon analizi sonucu çalışmada kullanılan; zeolit, kil ve sepiyolit malzemeleri için pH’nin istatistiksel olarak anlamlı ($p<0,05$) ve pozitif yönde etkisi; diatomit için ise pH’nin anlamlı ($p<0,05$) ve negatif yönde etkisi olduğu görülmüştür.



Şekil 4.29 Sr(II) ‘nin sepiyolit üzerine tutulumuna pH’nin etkisi

Design-Expert® Software

Ads. Zeolit

X1 = A: pH

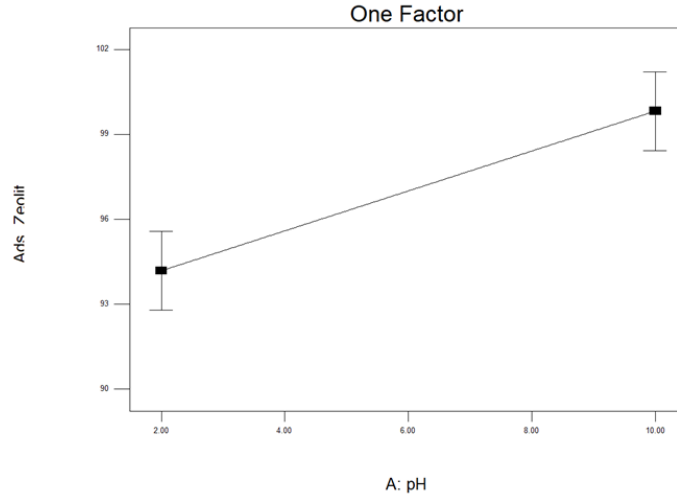
Actual Factors

B: Partikül Boyutu = 0.75

C: Yatak Hacmi = 54.00

D: Akis Hizi = 5.00

E: Konsantrasyon = 87.50



Şekil 4.30 Sr(II) 'nin zeolit üzerine tutulumuna pH'nin etkisi

Design-Expert® Software

Ads. Diatomite

X1 = A: pH

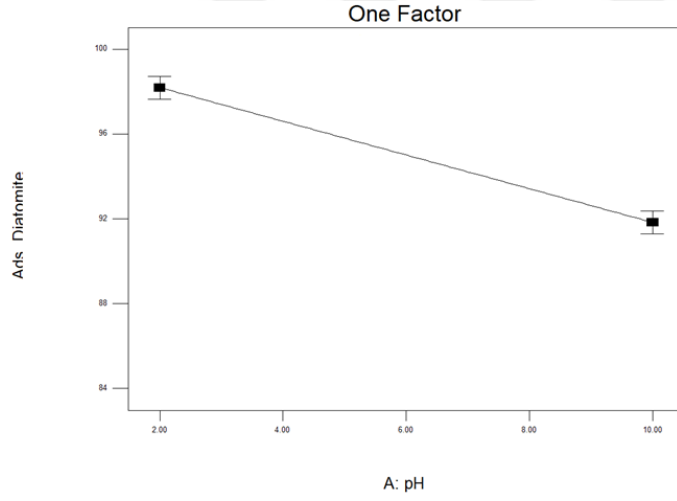
Actual Factors

B: Partikül Boyutu = 0.75

C: Yatak Hacmi = 54.00

D: Akis Hizi = 5.00

E: Konsantrasyon = 87.50



Şekil 4.31 Sr(II) 'nin diatomit üzerine tutulumuna pH'nin etkisi

Design-Expert® Software

Ads. Kil

X1 = A: pH

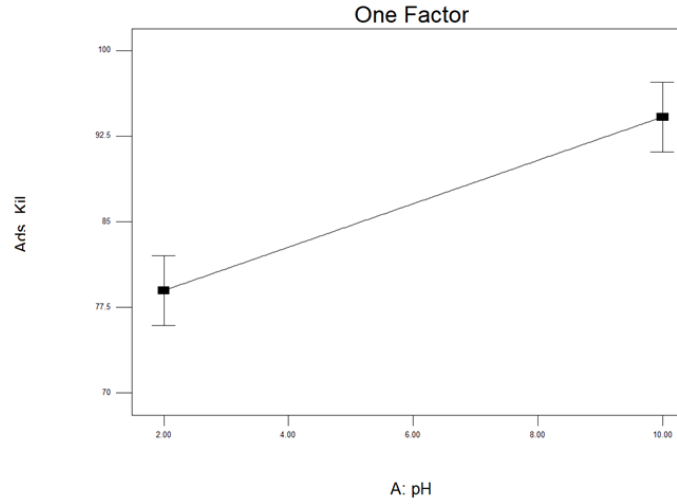
Actual Factors

B: Partikül Boyutu = 0.75

C: Yatak Hacmi = 54.00

D: Akis Hizi = 5.00

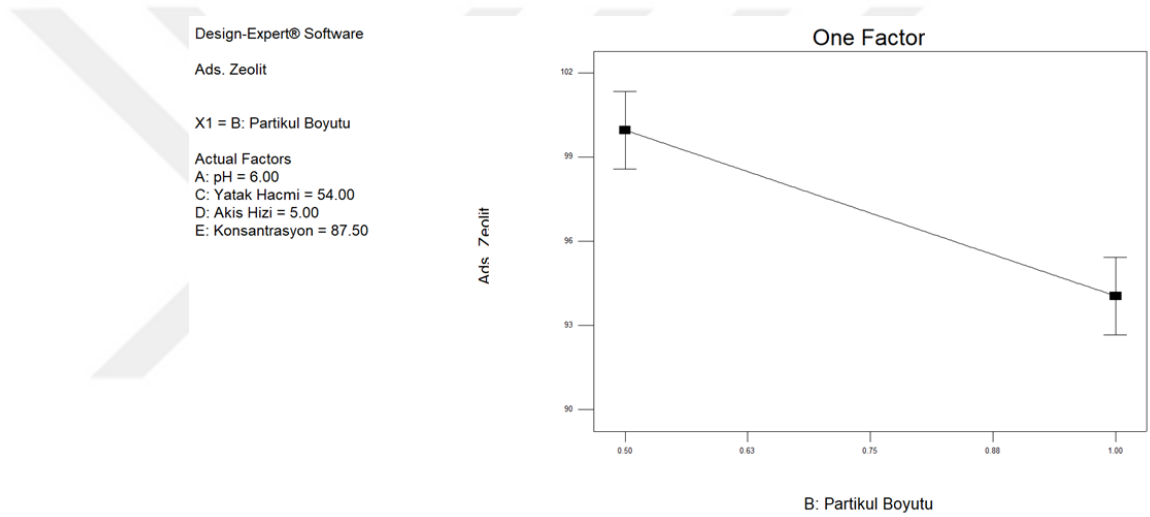
E: Konsantrasyon = 87.50



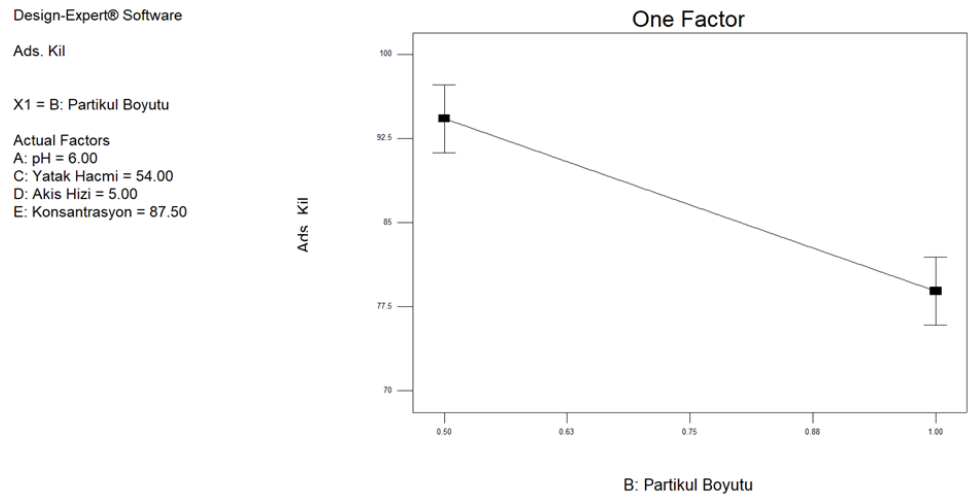
Şekil 4.32 Sr(II) 'nin kil üzerine tutulumuna pH'nin etkisi

4.2.1.3. Partikül boyutunun etkisi

Regresyon analizi sonucu zeolit ve kil gerçekleştirilen Sr(II) adsorpsiyonuna, belirlenen çalışma aralığında partikül boyutunun etkisi önemli bulunmuştur ($p < 0,05$). Diatomit ve Sepiyolit ile gerçekleştirilen Sr(II) adsorpsiyonuna partikül boyutunun etkisi önemli bulunmamıştır ($p > 0,05$). Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de zeolit ve kil üzerine Sr(II) adsorpsiyonunun 0,5–1 mm partikül boyutu aralığında, partikül boyutu artışı ile adsorpsiyon üzerindeki değişim görülmektedir.



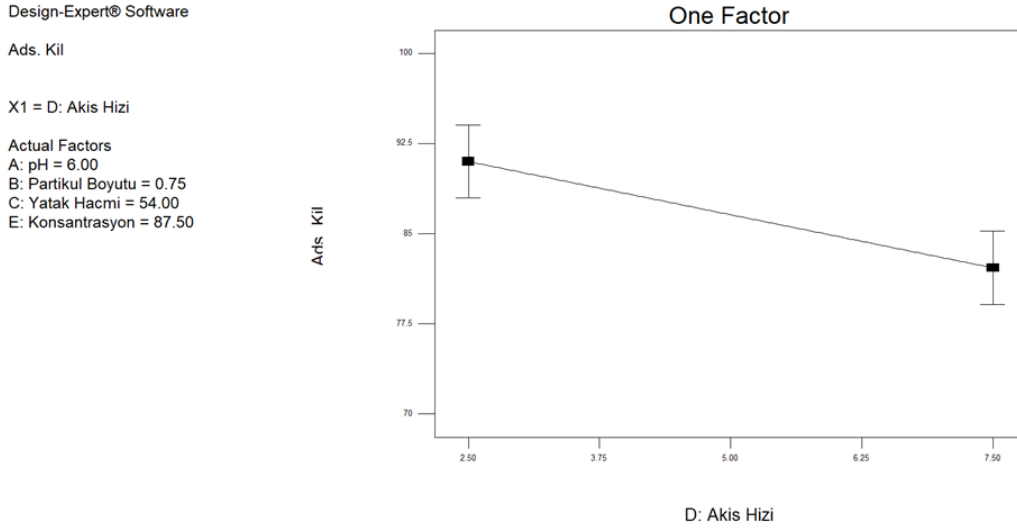
Şekil 4.33 Sr (II)’un zeolit üzerine tutulumuna partikül boyutunun etkisi



Şekil 4.34 Sr (II)’un kil üzerine tutulumuna partikül boyutunun etkisi

4.2.1.4. Akış hızının etkisi

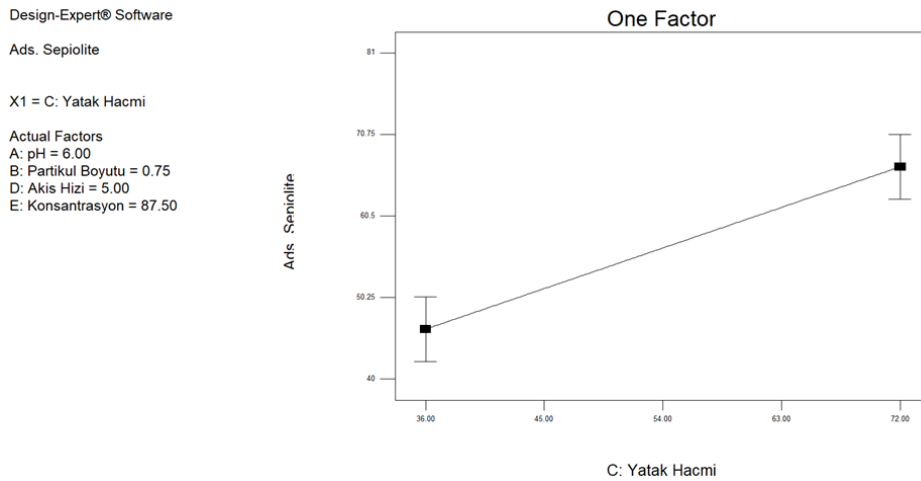
Regresyon analizi sonucu kil üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna akış hızının etkisi (Şekil 4.35) önemli bulunmuştur, ($p < 0,05$). Şekil 4.35’de kil üzerine Sr(II) adsorpsiyonunun 2,5-7,5 ml/dk aralığında akış hızı artışı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4.35 Sr (II)'un kil üzerine tutulumuna akış hızının etkisi

4.2.1.5. Yatak hacminin etkisi

Regresyon analizi sonucu sepiyolit üzerine Sr (II) adsorpsiyonuna yatak hacminin etkisi (Şekil 4.36) önemli bulunmuştur ($p < 0,05$). Şekil 4.36’da sepiyolit üzerine Sr(II) adsorpsiyonunun 36-72 cm³ aralığında yatak hacmi artışı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4.36 Sr (II)'un sepiyolit üzerine tutulumuna yatak hacminin etkisi

4.2.2. Parametrelerin Ortaklaşa Etkileri

4.2.2.1. pH ve partikül boyutunun etkisi

Regresyon analizi sonucu zeolit, kil ve sepiyolit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna çözelti pH ve partikül boyutunun birlikte etkisi önemli bulunmuştur ($p < 0,05$). pH ve partikül boyutuna ait katsayının zeolit ve kil için sıfırdan büyük olması (+2,77 ve +5,27), bu ikili etkileşimin etkisinin adsorpsiyon üzerine etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir. Bu katsayının Sepiyolit için sıfırdan küçük olması (-4,23) bu ikili etkileşimin adsorpsiyon üzerine etkisinin negatif olduğunu göstermektedir.

Design-Expert® Software

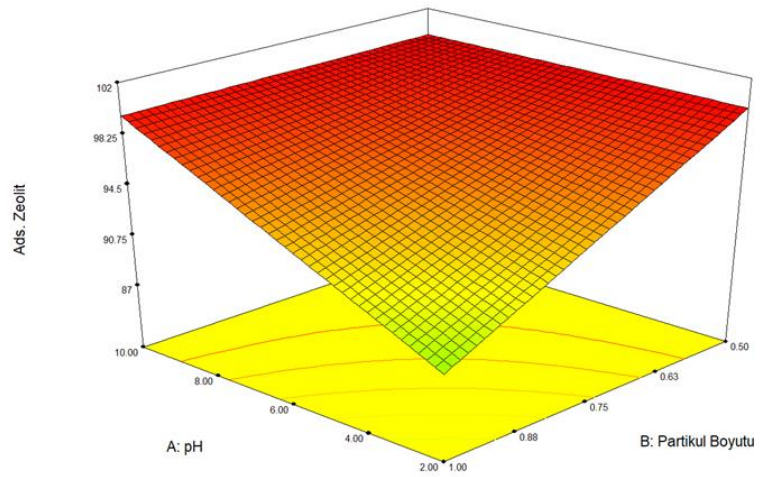
Ads. Zeolit



X1 = A: pH
X2 = B: Partikül Boyutu

Actual Factors

C: Yatak Hacmi = 54.00
D: Akis Hizi = 5.00
E: Konsantrasyon = 87.50



Design-Expert® Software

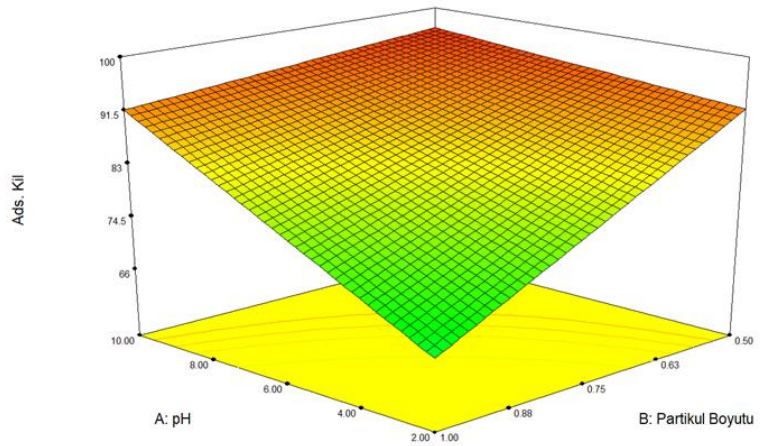
Ads. Kil



X1 = A: pH
X2 = B: Partikül Boyutu

Actual Factors

C: Yatak Hacmi = 54.00
D: Akis Hizi = 5.00
E: Konsantrasyon = 87.50



Design-Expert® Software

Ads. Sepiolite

80.98

7.16

X1 = A: pH

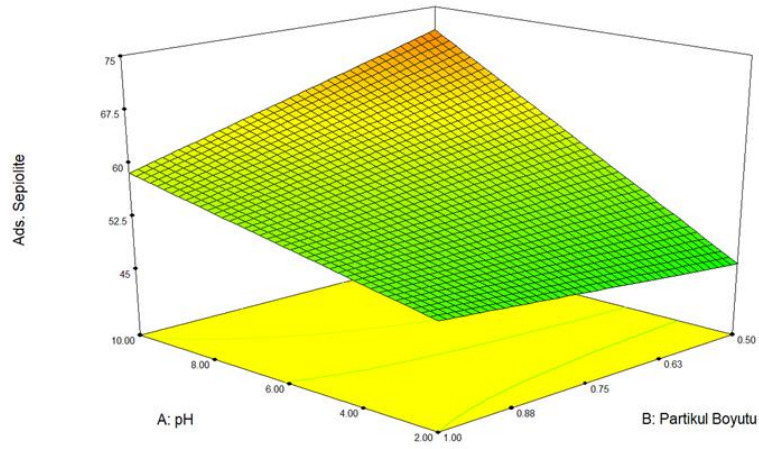
X2 = B: Partikül Boyutu

Actual Factors

C: Yatak Hacmi = 54.00

D: Akis Hizi = 5.00

E: Konsantrasyon = 87.50



Şekil 4.37 Sr (II)'nin zeolit, kil ve sepiyolit üzerine tutulumuna pH ve partikül boyutunun etkisi

Regresyon analizi sonucu pH ve partikül boyutu ikili etkileşiminin diatomit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna önemli etkisi bulunmamıştır ($p>0,05$).

4.2.2.2. pH ve konsantrasyonun etkisi

Regresyon analizi sonucu diatomit ve sepiyolit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna çözelti pH ve başlangıç konsantrasyonunun birlikte etkisi önemli bulunmuştur ($p<0,05$). pH ve başlangıç konsantrasyonuna ait katsayının diatomit için sıfırdan büyük olması (+4,22), bu ikili etkileşimin etkisinin adsorpsiyon üzerine etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir. Bu katsayının sepiyolit için sıfırdan küçük olması (-8,01) bu ikili etkileşimin adsorpsiyon üzerine etkisinin negatif olduğunu göstermektedir.

Design-Expert® Software

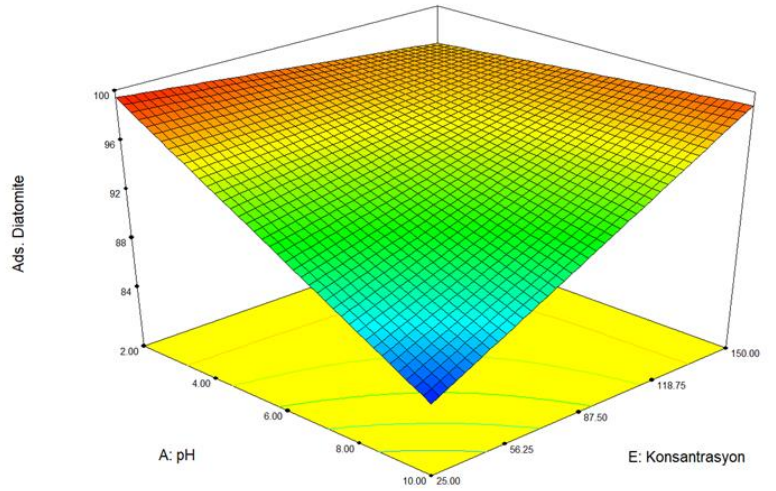
Ads. Diatomite



X1 = A: pH
X2 = E: Konsantrasyon

Actual Factors

B: Partikül Boyutu = 0.75
C: Yatak Hacmi = 54.00
D: Akis Hizi = 5.00



Design-Expert® Software

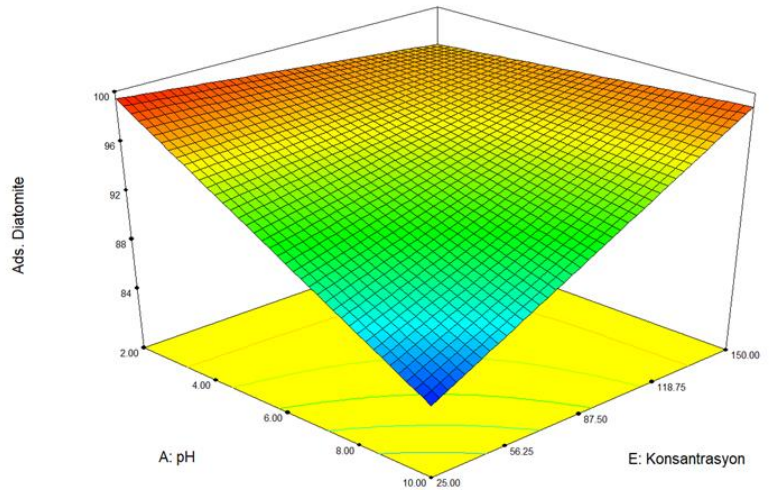
Ads. Diatomite



X1 = A: pH
X2 = E: Konsantrasyon

Actual Factors

B: Partikül Boyutu = 0.75
C: Yatak Hacmi = 54.00
D: Akis Hizi = 5.00



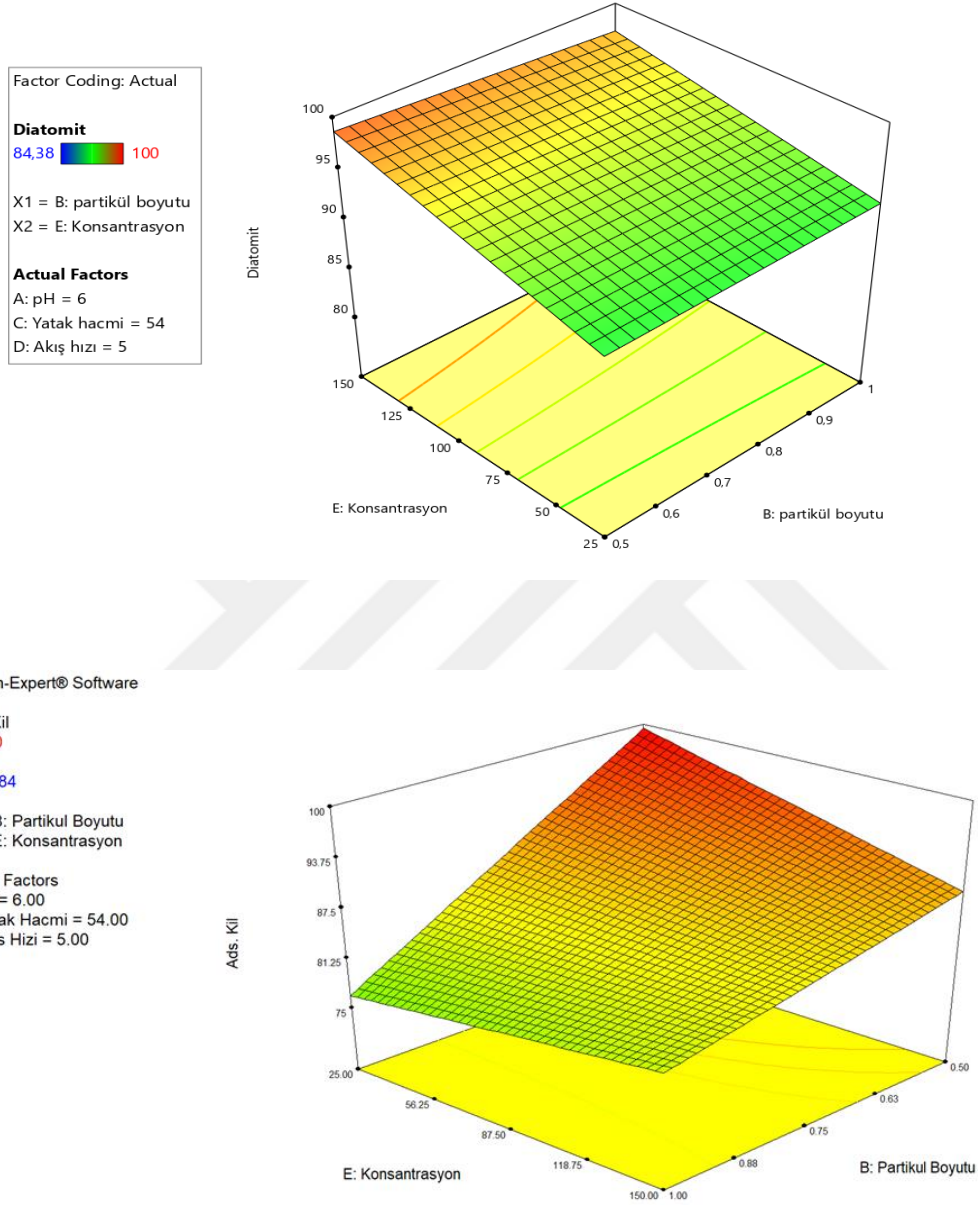
Şekil 4.38 Sr (II)'nin diatomit ve Sepiyolit üzerine adsorpsiyonuna pH ve başlangıç konsantrasyonunun etkisi

Regresyon analizi sonucu pH ve başlangıç konsantrasyonu ikili etkileşiminin zeolit ve kil üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna önemli etkisi bulunmamıştır ($p>0,05$).

4.2.2.3. Partikül boyutu ve başlangıç konsantrasyonunun etkisi

Regresyon analizi sonucu diatomit ve kil üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna partikül boyutu ve başlangıç konsantrasyonunun birlikte etkisi önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Partikül boyutu ve başlangıç konsantrasyonuna ait katsayının diatomit için sıfırdan küçük olması (-0,47), bu ikili etkileşimin etkisinin adsorpsiyon üzerine etkisinin negatif olduğunu göstermektedir. Bu katsayının kil için sıfırdan büyük olması (+3,75) bu ikili etkileşimin

adsorpsiyon üzerine etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir. Bunun sonucu olarak, 0,5-1 mm ve 25-150 mg/L sınırları içerisindeki değişimlerin, diatomit ve kil üzerine adsorpsiyona istatistiksel olarak önemli etkilerde bulunduğu kararna varılmıştır ($p \leq 0,005$).

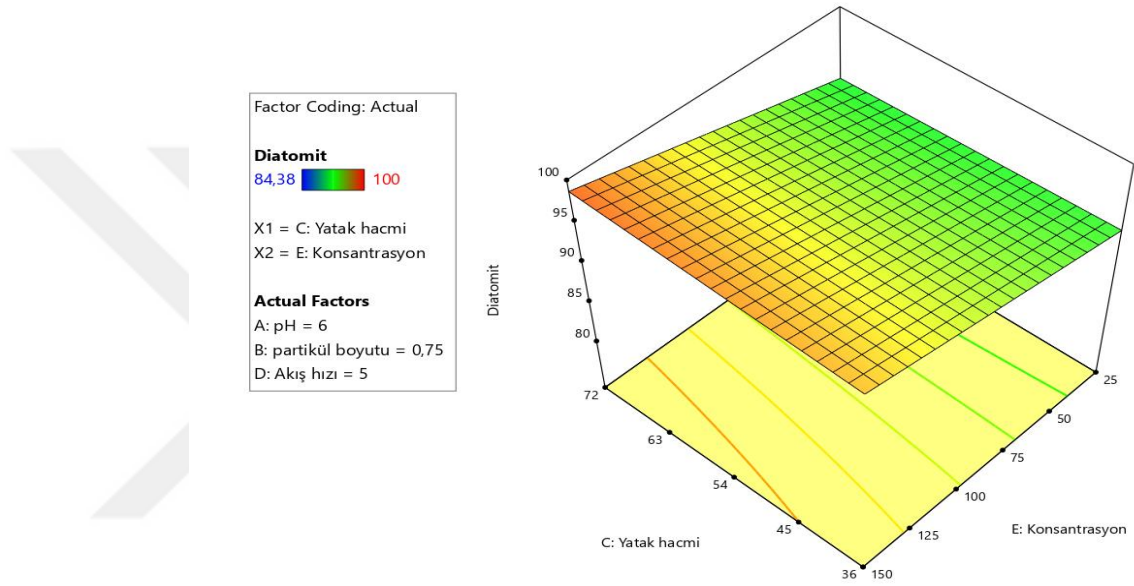


Şekil 4.39 Sr (II)'nin diatomit ve kil üzerine tutulumuna başlangıç konsantrasyonu ve partikül boyutunun etkisi

Regresyon analizi sonucu partikül boyutu ve başlangıç konsantrasyonu ikili etkileşiminin zeolit ve sepiyolit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna önemli etkisi bulunmamıştır ($p > 0,05$).

4.2.2.4. Yatak hacmi ve konsantrasyonun etkisi

Regresyon analizi sonucu diatomit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna yatak hacmi ve başlangıç konsantrasyonunun birlikte etkisi önemli bulunmuştur, ($p < 0,05$). Yatak hacmi ve başlangıç konsantrasyonuna ait katsayının diatomit için sıfırdan büyük olması (+0,50), bu ikili etkileşimin etkisinin adsorpsiyon üzerine etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir. Bunun sonucu olarak, 36-72 cm³ ve 25-150 mg/L sınırları içerisindeki değişimlerin, diatomit üzerine adsorpsiyona istatistiksel olarak önemli etkilerde bulunduğu kararına varılmıştır ($p < 0,05$).



Şekil 4.40 Sr (II)'nin diatomit üzerine tutulumuna yatak hacmi ve başlangıç konsantrasyonunun etkisi

4.2.2.5. pH ve Akış Hızının Etkisi

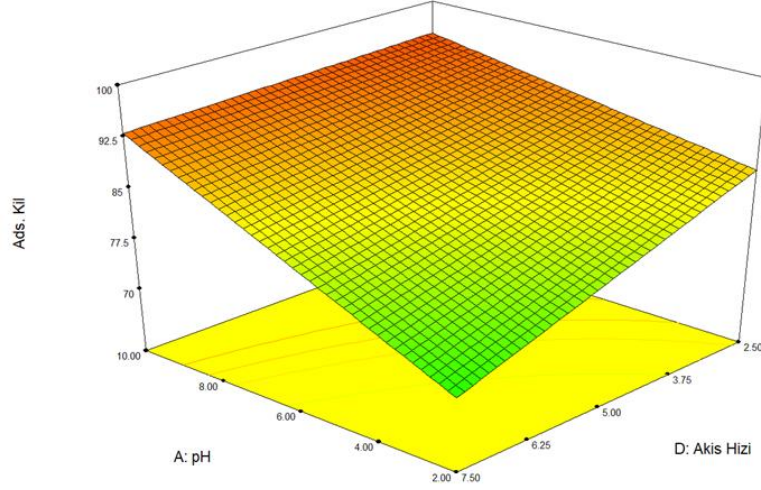
Regresyon analizi sonucu kil üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna pH ve akış hızının birlikte etkisi önemli bulunmuştur, ($p < 0,05$). pH ve akış hızına ait katsayının kil için sıfırdan büyük olması (+3,46), bu ikili etkileşimin etkisinin adsorpsiyon üzerine etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir. Bunun sonucu olarak, 2-10 pH ve 2,5-7,5 ml/dk sınırları içerisindeki değişimlerin, kil üzerine adsorpsiyona istatistiksel olarak önemli etkilerde bulunduğu kararına varılmıştır ($p < 0,05$).

Design-Expert® Software

Ads. Kil
100
37.84

X1 = A: pH
X2 = D: Akis Hizi

Actual Factors
B: Partikül Boyutu = 0.75
C: Yatak Hacmi = 54.00
E: Konsantrasyon = 87.50



Şekil 4.41 Sr (II)'nin kil üzerine adsorpsiyonuna pH ve akış hızının etkisi

Zeolit, diatomit, kil ve Sepiyolit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna ilişkin verilen ikili etkileşimlerin dışındaki diğer ikili etkileşimler anlamlı bulunmamıştır ($p > 0,05$) ve bu nedenle bunlara ilişkin grafikler verilmemiştir.

Zeolit, diatomit, kil ve Sepiyolit üzerine Sr(II) adsorpsiyonuna ilişkin verilen ikili etkileşimlerin dışındaki diğer ikili etkileşimler anlamlı bulunmamıştır ($P > 0,005$) ve bu nedenle bunlara ilişkin grafikler verilmemiştir.

2. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bariyer malzemesi olarak kullanılan zeolit, kil, diatomit ve sepiyolit gibi doğal malzemelerin fiziksel ön hazırlık işlemi sonunda SEM-EDX, XRD, BET, FTIR, XRF/ICP-MS gibi karakterizasyon yöntemleri ile yapısal olarak incelenmiş ve her bir bariyer malzemenin tanecik boyut dağılımı, özgül ağırlık, kimyasal bileşim, geçirgenlik, yüzey alanı, şişme hacmi ve benzeri özelliklerinin ayrı ayrı ortaya konmuştur.

Sr'un tutulmasında etken olan deneysel parametrelerin (pH, Sr derişimi, temas süresi, kontaminant çözelti hacmi, bariyer malzeme kalınlığı, diğer iyonların etkisi) incelenmiş deney parametreleri optimize edilmiştir.

Stronsiyum iyonlarının sulu ortamlardan bariyer malzemeler ile tutulum koşullarının TFDT ile optimize edilmiştir.

Kutu modeli ile prototip bir düzenek hazırlanarak her bir komponentin bariyer malzemesi olarak etkinliğinin incelenmiştir. Sucul ortamlar için,

belirli süre peristaltik pompa ile etkileştirilen bariyer malzemelerinden çıkış havuzuna transfer olan çözeltiler ve aynı zamanda her bir katı bariyer malzemesinden örnekleme yapılarak Sr iyonlarının alıkonma miktarları ve transfer olan Sr konsantrasyonları saptanmıştır.

Bu parametreler: partikül boyutu, başlangıç konsantrasyonu, yatak hacmi, pH, akış hızı ve derişimin etkisidir. Ayrıca optimizasyon çalışmalarında kullanılan parametreler: hidrolik iletkenlik, kullanılan malzemenin miktarı, kimyasal kompozisyonu, tane şekli ile tane büyüklüklerinin dağılımı, su içeriği ve temas süresi olarak sayılabilir.

Elde edilen tüm verilerden çıkılarak saha çalışmasında kullanılacak sistemin ölçeklendirme (scale-up) hesaplamalarının yapılması ve verilerin çeşitli istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek değerlendirilmesi, parametrelerin deney üzerindeki etkisinin hesaplanmasında Varyans Analizi (ANOVA) ve Regresyon analizinden yararlanılmıştır.

Yapılmış olan yüksek lisans tez çalışması ile sahip olduğumuz ulusal kaynakların kullanımlarına öncelik vermek, bu kaynakların ekonomik olarak kullanılmasında ileri ve yeni teknolojileri geliştirmek ve kullanmak, herhangi bir nükleer kaza durumunda ortaya çıkan radyoaktif kontaminasyonu/ atıkları çevre koruma ilkeleri kapsamında yönetmek, nükleer güvenlikle ilgili yapılacak çevre koruma çalışmalarına büyük oranda katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Dubourg, M. 1998. "Review of advanced methods for treating radioactive contaminated water". *Radioprotection*, 33(1), 35–46.
- Chicote, E., Moreno, D. A., Garcia, A. M., Sarro, M. I., Lorenzo, P. I., Montero, F. 2004. "Biofouling on the walls of a spent nuclear fuel pool with radioactive ultrapure water". *Biofouling*, 20(1), 35–42.
- El Afifi, E. M., Attallah, M. F., Borai, E. H. 2016. "Utilization of natural hematite as reactive barrier for immobilization of radionuclides from radioactive liquid waste". *Journal of environmental radioactivity*, 151, 156–165.
- Conca, J., Strietelmeier, E., Lu, N. 2002. "Groundwater Remediation of Trace Metals, Radionuclides, and Nutrients with Permeable Reactive Barriers" (ss. 221–252). Academic San Diego, CA.
- IAEA. 2003b. "IAEA radioactive waste management glossary". 2003 Edition, International Atomic Energy Agency, (IAEA), IAEA STI/PUB/1155, Vienna, 61 p.
- IAEA. 2009. "Classification of Radioactive Waste". Vienna: International Atomic Energy Agency, (IAEA), IAEA Safety Standards Series, General Safety Guide No. GSG-1, Vienna, 48 p.
- IAEA. 1995. "Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals". International Atomic Energy Agency, (IAEA), Safety Series No. 111-F, Vienna, 24 p.
- Nagasaki, S., Nakayama, S. 2015. "Radioactive waste engineering and management". Springer.
- Gavaskar, A. R. 1999. "Design and construction techniques for permeable reactive barriers". *Journal of hazardous materials*, 68(1–2), 41–71.
- ITRC. 2005. "Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned/New Directions". PRB-4, Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). Permeable Reactive Barriers Team, Washington D.C.
- Roehl, K. E., Meggyes, T., Simon, F. G., Stewart, D. I. 2005. "Regulatory and economic aspects". *Long-Term Performance of Permeable Reactive Barriers*, 311.
- Lobo, R. F. 2003. "Introduction to the structural chemistry of zeolites". *Handbook of zeolite science and technology* (ss. 80–112). CRC Press.
- Pabalan, R. T., Bertetti, F. P. 2001. "Cation-exchange properties of natural zeolites". *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 45(1), 453–518.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Al-Ghouti, M. A., Khraisheh, M. A. M., Ahmad, M. N. M., Allen, S. 2009. "Adsorption behaviour of methylene blue onto Jordanian diatomite: a kinetic study". *Journal of hazardous materials*, 165(1–3), 589–598.
- Ibrahim, S. S. 2012. "Diatomite ores: Origin, characterization and applications". *Journal of International Environmental Application and Science*, 7(1), 191–199.
- Engh, K. R., Staff, U. by. 2000. "Diatomite". *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 1–11.
- Nagy, B., Bradley, W. F. 1955. "The structural scheme of sepiolite". *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 40(9–10), 885–892.
- Munro, L. D., Clark, M. W., McConchie, D. 2004. "A Bauxsol™-based permeable reactive barrier for the treatment of acid rock drainage". *Mine Water and the Environment*, 23(4), 183–194.
- Garcia-Gutiérrez, M., Missana, T., Mingarro, M., Samper, J., Dai, Z., Molinero, J. 2001. "Solute transport properties of compacted Ca-bentonite used in FEBEX project". *Journal of Contaminant Hydrology*, 47(2–4), 127–137.
- Kaftelen, H. 2013. "Seramik tozların piknometre yöntemi ile yoğunluklarının tayini", *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü*.
- Puls, R. W., Blowes, D. W., Gillham, R. W. 1999. "Long-term performance monitoring for a permeable reactive barrier at the US Coast Guard Support Center, Elizabeth City, North Carolina". *Journal of Hazardous Materials*, 68(1–2), 109–124.
- Kacimov, A. R., Klammler, H., Il'yinskii, N., Hatfield, K. 2011. "Constructal design of permeable reactive barriers: groundwater-hydraulics criteria". *Journal of Engineering Mathematics*, 71(4), 319–338.
- Goes, J. R., Azevedo, T. F., Dutra, T. X. C., Santos, V. B., Severo Junior, J. B., Barreto, L. S. 2014. "Evaluation of the potenciality of clays from the Calumbi and Riachuelo geological formation in Sergipe, Brazil, for application in ceramic tiles". *Cerâmica*, 60, 211–217.
- Rezende, J. C. T., Ramos, V. H. S., Oliveira, H. A., Oliveira, R. M. P. B., Jesus, E. 2018. "Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using clay from Calumbi geological formation, N. Sra. Socorro, SE State, Brazil". *Materials Science Forum* (C. 912, ss. 1–6). *Trans Tech Publ*.
- Byrappa, K., Kumar, B. V. S. 2007. "Characterization of zeolites by infrared spectroscopy". *Asian journal of chemistry*, 19(6), 4933.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ilia, I., Stamatakis, M., Perraki, T. 2009. "Mineralogy and technical properties of clayey diatomites from north and central Greece". *Open Geosciences*, 1(4), 393–403.
- Yusan, S., Gok, C., Erenturk, S., Aytas, S. 2012. "Adsorptive removal of thorium (IV) using calcined and flux calcined diatomite from Turkey: Evaluation of equilibrium, kinetic and thermodynamic data". *Applied Clay Science*, 67–68, 106–116.
- Karakehya, N., Bilgiç, C. 2020. "Eskişehir Lületaş Atıklarından Sütunlanmış Kil Üretimi ve Karakterizasyonu". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(2), 487–493.
- Dikmen, Z., Orhun, Ö. 2013. "The Preparation Of Magnetically Modified Synthetic And Natural Zeolites And Comparison Of Their Some Physical Properties". *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 14(1), 75–90.
- Çınar, M., Çelik, M. S. 2011. "Yüksek viskoziteli endüstriyel uygulamalarda sepiyolit in öğütme mekanizması". *İTÜDERGİSİ/d*, 5(2).
- Yıldız, A., Gürel, A., Dursun, Y. G. 2016. "Physicochemical properties and uses of Karacaören area (Nevşehir) diatomite". *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 152(152), 165–180.
- Xu, G., Feng, Q., Deconinck, J. F., Shen, J., Zhao, T., Young, A. L. 2017. "High-resolution clay mineral and major elemental characterization of a Permian-Triassic terrestrial succession in southwestern China: Diagenetic and paleoclimatic/paleoenvironmental significance". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 481, 77–93.
- Nayak, P. S., Singh, B. K. 2007. "Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR". *Bulletin of Materials Science*, 30(3), 235–238.
- Suna, A. C., Bayat, B. 2019. "Sepiyolit in Adana Organize Sanayi Bölgesi (AOSB) Atıksuyunda Koagülant Olarak Kullanımının Araştırılması". *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 39(2), 53–63.
- Panda, A. K., Mishra, B. G., Mishra, D. K., Singh, R. K. 2010. "Effect of sulphuric acid treatment on the physico-chemical characteristics of kaolin clay". *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 363(1–3), 98–104.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yates, D. J. C. 1968. "Studies on the surface area of zeolites, as determined by physical adsorption and X-ray crystallography". Canadian Journal of Chemistry, 46(10), 1695–1701.

Yıldız, D. 2020. "Çeşitli Aktivasyon Yöntemlerinin Sepiyolitın Yüzey Özelliklerine Etkisi". Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(2), 107–116.

Garg, U. K., Kaur, M. P., Garg, V. K., Sud, D. 2008. "Removal of nickel (II) from aqueous solution by adsorption on agricultural waste biomass using a response surface methodological approach". Bioresource technology, 99(5), 1325–1331.





TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecimde gerek değerli fikirleri, gerek tecrübesiyle derslerde ve laboratuvar çalışmalarında her daim yanımda olan, teşvik ve desteğiyle beni yönlendiren, çalışmamda bana her türlü olanağı sunarak çalışma kolaylığı sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Sabriye YUŞAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince tecrübesini ve güler yüzünü ve değerli fikirlerini benden esirgemeyen sevgili hocam Sayın Prof. Dr. Şule AYTAŞ'a, ICP-OES analizlerini özveriyle gerçekleştiren hocam Sayın Doç. Dr. Şenol SERT'e ve BET yüzey ölçümü analizlerini yapan Sayın Dr. Berkan ÇETİNKAYA'ya, bana destek veren değerli aileme ve hiçbir aşamada yardımını esirgemeyen eşim Gülser BAYKAL SEDİR'e, Nükleer Teknoloji Ana Bilim Dalında yüksek lisans/doktora tez çalışmalarını yapan tüm arkadaşlarıma manevi destekleri için teşekkür ederim.

19 / 09 / 2022

Adı-Soyadı

