T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

MİKRODALGA IŞINIM VE ADSORPSİYON YÖNTEMLERİ İLE TUZLA JEOTERMAL KAYNAKLARINDAN BOR GİDERİM PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZİ HAZIRLAYAN
MEHMET OĞUZHAN ŞAHİN

Tez Danışmanı
PROF. DR. TİJEN ENNİL BEKTAŞ

İkinci Tez Danışmanı
DOÇ. DR. DENİZ ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

ÇANAKKALE – 2021

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

MİKRODALGA IŞINIM VE ADSORPSİYON YÖNTEMLERİ İLE TUZLA JEOTERMAL KAYNAKLARINDAN BOR GİDERİM PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZİ HAZIRLAYAN
MEHMET OĞUZHAN ŞAHİN

Tez Danışmanı
PROF. DR. TİJEN ENNİL BEKTAŞ

İkinci Tez Danışmanı
DOÇ. DR. DENİZ ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

Bu çalışma T.C. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2019-3086

ÇANAKKALE – 2021

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Mehmet Oğuzhan ŞAHİN
25/08/2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tezimin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca değerli fikirlerini ve tavsiyelerini benden bir an olsun esirgemeyen, anlayışlarını, yardımlarını ve desteklerini her daim arkamda hissettiğim saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Tijen Ennil BEKTAŞ'a ve ikinci saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL'e sonsuz teşekkürlerimi, sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımda bana yardım eden ve beraber çalışmaktan memnun olduğum arkadaşım Damla YILMAZ'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Sözlerini, bana yol gösterişlerini hep hatırladığım, bana belli bir yaştan sonra anne baba gibi olan, her zaman arkamda dağ gibi olduğunu hissettiren, gülmelerimizi, muhabbetlerimizi, anılarımızı her daim andığım ve hatırladığım, iyi ki onun kardeşi olmuşum dediğim, aramızdan ayrılığı çok erken olan çok değerli biraderim, ağabeyim, her şeyim olan Şehit Sahil Güvenlik Astsubayı Yavuz Gökhan ŞAHİN'e her daim rahmet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen hayatımın her evresinde bana destek olan moral ve motivasyonlarını eksik etmeyen iyi ki hayatımda var dediklerim babam Muharrem ŞAHİN, annem Fatma ŞAHİN, ablam Ebru ŞAHİN ve ailemizin değerlisi biricik yeğenim Aziz Gökhan ŞAHİN'e değerli ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazımı boyunca beni destekleyen, zorlandığım, yorulduğum anlarda devam etmemi sağlayan, sözleriyle ve sevgisiyle bana güç veren, hayatıma renk katan kız arkadaşım Müge ARIYEL'e sevgilerimi sunar ve teşekkür ederim.

Mehmet Oğuzhan ŞAHİN
Makine Mühendisi
Çanakkale, Ağustos 2021

ÖZET

MİKRODALGA IŞINIM VE ADSORPSİYON YÖNTEMLERİ İLE TUZLA JEOTERMAL KAYNAKLARINDAN BOR GİDERİM PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Oğuzhan ŞAHİN
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Prof. Dr. Tijen Ennil BEKTAŞ
İkinci Danışman: Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL
25/08/2021, 65

Çanakkale ilinin jeotermal enerji potansiyeli yüksek olup, 14 farklı jeotermal alan bulunmaktadır. Bu çalışmada, Çanakkale ilindeki en yüksek bor konsantrasyonu olan Tuzla jeotermal alanındaki jeotermal akışkandan borun çevreye olası olumsuz etkilerin önüne geçebilmek için adsorpsiyon yoluyla giderilmesi amaçlanmıştır. Adsorban olarak seçilen uçucu kül Çan 18 Mart termik santralinden elde edilmiştir. Jeotermal akışkandan bor giderimi için başlangıç pH, adsorban dozajı, temas süresi, sıcaklık ve adsorbanın tekrar kullanılabilirliği gibi çeşitli parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Yalancı birinci dereceden, yalancı ikinci dereceden ve parçacık içi kinetik modellerin deneysel verilere uygunluğu incelenmiştir. İzoterm çalışmalarından elde edilen veriler Langmuir, Freundlich ve Dubinin-Radushkevich modellerine uygulanmıştır. Uçucu külde kullanılarak yapılan adsorpsiyon deneylerinde maksimum bor giderim verimi % 94,17 bulunmuştur. Ayrıca jeotermal akışkandan bor gideriminde mikrodalga ışınımının etkisi çeşitli parametreler deneyler yapılarak araştırılmıştır. Mikrodalga deneylerinde kireçtaşı kullanılarak maksimum B giderim verimi % 90 bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, Bor, Uçucu Kül, Jeotermal Akışkan, Mikrodalga Işınımı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF BORON REMOVAL FROM TUZLA GEOTHERMAL FLUID BY MICROWAVE RADIATION AND ADSORPTION METHODS

Mehmet Oğuzhan ŞAHİN
Çanakkale Onsekiz Mart University
School of Graduate Studies
Master of Science Thesis in Energy Resources and Management
Advisor: Prof. Dr. Tijen Ennil BEKTAŞ
Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL
25/08/2021, 65

The geothermal energy potential of Çanakkale is high and there are 14 different geothermal fields. In this study, it is aimed to boron removal from the geothermal fluid in Tuzla geothermal field, which has the highest boron concentration in Çanakkale, by adsorption in order to prevent possible negative effects on the environment. Fly ash selected as an adsorbent was obtained from 18 Mart Çan thermal power plant. Various parameters such as initial pH, adsorbent dosage, contact time, temperature and reusability of adsorbent were experimentally investigated. The suitability of pseudo-first-order, pseudo-second-order and intraparticle kinetic models to the experimental data was investigated. The data obtained from the isotherm studies were applied to the Langmuir, Freundlich and Dubinin-Radushkevich models. In the adsorption experiments, the maximum boron removal efficiency was found to be 94,17 % using by fly ash. In addition, the effect of microwave radiation on boron removal from geothermal fluid was determined by different experiments. Maximum boron removal efficiency was found to be 90 % by using limestone in microwave experiments.

Keywords: Adsorption, Boron, Fly Ash, Geothermal Fluid, Microwave Radiation

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI ……. i
ETİK BEYAN …… ii
TEŞEKKÜR ……... iii
ÖZET ……..…….…….. iv
ABSTRACT ……... v
İÇİNDEKİLER ……..…… vi
SİMGELER ve KISALTMALAR ……. ix
TABLOLAR DİZİNİ ……..… xii
ŞEKİLLER DİZİNİ ……..……...…….…. xiii

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ 1

1.1. Genel Bilgi ……. 1
1.2. Tezin Amacı ……... 2

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3

2.1. Jeotermal Enerji ……. 3
2.1.1. Dünyadaki Durum …….. 4
2.1.2. Türkiye'deki Durum ……... 7
2.1.3. Tuzla Jeotermal Alanı …… 10
2.2. Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları …….. 13
2.2.1. Kaplıcalar …….. 13
2.2.2. Isıtma ……..…... 14
2.2.3. Elektrik Üretimi ……..…….. 15
2.2.4. Kimyasal Madde Üretimi ……..…… 16
2.3. Jeotermal Akışkandan Bor Giderimi Çalışmaları …….. 16
2.4. Bor Mineralinin Özellikleri ve Bileşikleri ……. 19

2.5. Türkiye'deki Bor Rezervleri ……..……... 19
2.6. Borun Kullanım Alanları ve Borun Çevresel Etkisi …….. 20
2.7. Bor Giderim Yöntemleri ……..…….. 23
2.7.1. Adsorpsiyon ……..…….. 25
2.8. Mikrodalga Enerjisi …… 27

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM 30

3.1. Tuzla Jeotermal Alanı …… 30
3.2. 18 Mart Çan Termik Santrali ....…….…….... 31
3.2.1. Uçucu Kül …….. 33
3.3. Laboratuvar Çalışmaları ……. 33
3.3.1. Adsorpsiyon Deneyleri ……... 34
3.3.2. Mikrodalga Işınım Yöntemi ……... 36

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI 38

4.1. Uçucu Külün Karakterizasyonu ……. 38
4.2. Deneysel Veriler …… 40
4.2.1. pH'ın Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler …….. 40
4.2.2. Adsorban Dozunun Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler 42
4.2.3. Adsorpsiyon İzoterm Modellerinin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler ……. 43
4.2.4. Temas Süresinin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler ……. 46
4.2.5. Kinetik Modellerin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler …. 48
4.2.6. Sıcaklığın Etkisi ve Termodinamik Hesaplamaların Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler …….. 51
4.2.7. Adsorbanın Tekrar Kullanabilirliğinin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler …… 53
4.3. Farklı pH'larda Mikrodalga Işınım Deney Verileri ……... 53

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER 55

KAYNAKÇA 57
ÖZGEÇMİŞ I

SİMGELER VE KISALTMALAR

$	Dolar
%	Yüzde oranı
µS	Mikrosiemens, elektrik iletkenliği
A.B.D.	Amerika Birleşik Devletleri
A.Ş.	Anonim Şirketi
B	D-R izotermi sabiti
b	Sorpsiyon denge sabiti 1/mg (Langmuir İzotermi)
B.D.T.	Bağımsız Devletler Topluluğu
C	Çözelti derişimi, mol/L
°C	Santigrat derece
C_e	Çözünen maddenin denge derişimi, mg/L
cm	Santimetre
dm^3	Desimetreküp
D-R	Dubinin Radushkevich izotermi
EPİAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
g	gram
G	Güney
GD	Güneydoğu
GHz	Gigahertz, frekans birimi
GWh	Gigawatt saat
ha	Hektar
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
j	Joule
K	Kuzey
k	Adsorpsiyon kapasitesi ile ilgili sabit, mg/g
K	Kelvin
K	Denge sabiti (sıcaklığın etkisi)
k_1	Yalancı birinci mertebe adsorpsiyon hız sabiti, dk
k_2	Yalancı ikinci mertebe hız sabiti, g/mg.dk
KB	Kuzeybatı
kcal	Kilokalori

kg	Kilogram
k_i	Tanecik içi difüzyon sabiti (mg/g $min^{1/2}$)
kj	Kilojoule
km	Kilometre
kWh	Kilowatt saat
L	Litre
LCD	Sıvı Kristal Ekran
m	Metre
M	Molar
m^2	Metrekare
mg	Miligram
MHz	Megahertz, frekans birimi
mL	Mililitre
MTA	Maden Tetkik ve Arama
mtep	Milyon ton eşdeğer petrol
MW	Megawatt
MWe	Megawatt elektrik
MWh	Megawatt saat
MWt	Megawatt ısı
n	Sorpsiyon şiddeti ile ilgili sabit, l/g
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
pH	Asitlik ve bazlık ölçü birimi
ppm	Milyonda bir birim
Q_0	Maksimum adsorpsiyon kapasitesi, mg/g
q_e	Denge anında birim adsorban başına adsorplanan miktar, mg/g
q_s	Adsorbantın maksimum kapasitesi
q_t	Herhangi bir anda (t) adsorplanan miktar, mg/g
R	Evrensel gaz sabiti ($8,314.10^{-3}$ kJ/mol.K)
rpm	Dakikadaki devir sayısı
SEM-EDX	Taramalı Elektron Mikroskobu
SWRO	Deniz Suyu İleri Ozmos yöntemi
T	Sıcaklık
TEAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

TJ	Terajoule
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri
TL	Türk Lirası
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UK	Uçucu Kül
UV	Ultra Viyole (mor ötesi) ışınım
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
ΔG	Gibbs enerjisi, kj/mol
ΔH	Entalpi değişimi, kj/mol
ΔS	Entropi değişimi, kj/molK
ε	Polanyi potansiyeli (Dubinin–Radushkevich izotermi)
μm	Mikrometre

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	1990-2011 Dünya Birincil Enerji Arzı Gelişimi (mtep cinsinden)	5
Tablo 2	Tuzla jeotermal alanından Haziran 2004'de alınan jeotermal su örneklerinin sıcaklık değeri ve B konsantrasyonu	13
Tablo 3	EPDK verilerine göre elektrik üretim alanları ve işletme kapasiteleri	15
Tablo 4	Bazı B giderim araştırmaları ve verimleri	24
Tablo 5	Mikrodalga enerjisinin kullanım alanları	28
Tablo 6	Tuzla jeotermal kaynağının fizikokimyasal parametreleri	31
Tablo 7	Uçucu külün kimyasal bileşimi	39
Tablo 8	Başlangıç pH'ın B giderimine etkisi (0,5 g adsorban, 50 mL jeotermal kaynak, 25 °C, 140 rpm ve 24 saat temas süresi)	41
Tablo 9	Uçucu kül dozunun B giderimine etkisi (pH 4, 50 mL jeotermal kaynak, 25 °C, 140 rpm ve 24 saat temas süresi)	42
Tablo 10	İzoterm sabitleri	44
Tablo 11	Temas süresinin B giderimi üzerine sonuçları	47
Tablo 12	Kinetik model katsayıları	49
Tablo 13	Termodinamik parametreler	52
Tablo 14	Uçucu külün tekrar kullanabilirliği	53
Tablo 15	Farklı pH'larda mikrodalga ışınım deneyleri sonuçları	53
Tablo 16	Kireçtaşının miktarının B giderimine etkisi	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Dünyada doğrudan enerji kullanımının yıllara bağlı olarak değişimi	6
Şekil 2	1950 ile 2015 arasında kurulu kapasite ve üretilen enerji kullanımı	7
Şekil 3	Türkiye'deki jeotermal kaynakların bölgesel dağılımı	8
Şekil 4	Türkiye'deki jeotermal kaynakların dağılımı	9
Şekil 5	Dünyadaki bazı önemli ülkelerin jeotermal kurulu güçleri	10
Şekil 6	Çanakkale ilindeki jeotermal alanlar ve Tuzla jeotermal alanının konumu	11
Şekil 7	Bor tüketiminin sektörlere göre 2019 yılındaki yüzdesi	20
Şekil 8	Adsorbent içindeki ve yüzeyindeki partikül ve film difüzyonu	26
Şekil 9	Örnekleme yapılan Tuzla jeotermal kaynağı	30
Şekil 10	18 Mart Çan termik santralinden görünüm	32
Şekil 11	Uçucu külün SEM görüntüsü ve EDX sonuçları	40
Şekil 12	Artan pH ile % B giderimi	41
Şekil 13	Artan adsorban dozunun % B giderimine etkisi	42
Şekil 14	Langmuir izotermi	45
Şekil 15	Freundlich izotermi	45
Şekil 16	D-R izotermi	46
Şekil 17	Artan zamanla B giderimi	47
Şekil 18	Yalancı birinci dereceden kinetik modeli	49
Şekil 19	Yalancı ikinci dereceden kinetik modeli	49
Şekil 20	Tanecik içi difüzyon modeli	50
Şekil 21	Uçucu kül ile B adsorpsiyonu için Van't Hoff grafiği	51

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez olarak iki gruba ayrılır. Yenilenemez enerji kaynaklarına; kömür, petrol, doğal gaz, nükleer vb. örnek verilebilir. Hidrolik, biyokütle, jeotermal enerji, rüzgâr, güneş, gel-git, dalga vb. kaynaklar da yenilenebilir enerji kaynakları olarak sınıflanır. Son yıllarda dünyada artan çevre sorunları nedeni ile fosil yakıtların tüketiminin yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim arttırmıştır. Kyoto protokolü içerisinde sera gazı etkisinin azaltması amacıyla dünya ülkeleri çevre dostu biyokütle, güneş, rüzgâr, jeotermal vb. sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmektedirler. Jeotermal enerjinin temiz, ucuz, çevre dostu ve yerli bir kaynak olması, elektrik üretimi, şehirlerin ısıtılması, endüstri-gıda sanayisinde kurutma süreçleri, termal kaplıca turizmi, seracılık, kültür balıkçılığı gibi farklı kullanım alanlarının bulunması sebepleri ile dünyada jeotermal enerjinin önemini arttırmıştır (Bulut, 2013).

Bor (B), doğal suda çözünen elementlerden olup çoğu bitkinin normal büyümesi için gerekli olan yedi temel mikro besin elementlerinden biridir. Bitkiler üzerinde hem beslenme hem de toksisite açısından belirgin bir etkiye sahiptir. B elementi, hayvanlar ve insanlar için de önemli bir mikro besin maddesidir. Ancak eksiklik ve fazlalık arasındaki aralık çok dardır. İçme suyundaki yüksek B konsantrasyonu (1 mg/L'den daha yüksek) insanlar için toksik olabilir (Liu vd., 2009).

B elementinin sudan uzaklaştırılması için farklı giderim yöntemleri bulunmaktadır. Bunların başlıcaları çökeltme-pıhtılaşma, ters ozmos, elektrodiyaliz, solvent ekstraksiyonu, membran filtrasyonu ve adsorpsiyondur. Bu yöntemler arasında adsorpsiyon, düşük B konsantrasyonunda oldukça kullanışlı ve ekonomik bir tekniktir (Liu vd., 2009).

B elementinin, metal hidroksit ile mineralizayonu, konsantre atık su için etkilidir. Fosforik asit ilavesi, kalsiyum hidroksit ve borik asitten oluşan çözeltilerin yeniden çözünmesini önleyebilir. Ayrıca çökeltiler geri kazanılabilir ve B endüstrileri için hammadde olarak kullanılabilir. Ancak bu teknik ile uzun bir reaksiyon süresi ve ısıtma

için çok fazla enerji gerektirir ve mikrodalga tekniği bu iki dezavantajla başa çıkmak için daha iyi bir alternatif olabilir (Tsai ve Lo, 2011).

Mikrodalga tekniği yıllar içinde geliştirilmiştir ve birçok uygulamada uzun süredir kullanılmaktadır. Mikrodalga radyasyonu, homojen ısıtma, hızlı başlatma-durdurma ve malzeme seçici ısıtma gibi birçok avantaj sunar. Sadece gıda hazırlama ve elektrik iletişim endüstrilerinde olmayıp aynı zamanda uçucu külün geri dönüşümü, kimyasal oksijen ihtiyacının ölçülmesi gibi uygulamalarla kullanılmaktadır (Tsai ve Lo, 2011).

1.2. Tezin Amacı

Dünyada artan nüfus ve daha çok enerji ihtiyacı duyulmasıyla beraber çok daha önem kazanan şeylerden biri yenilenebilir enerjilerden faydalanma oranını arttırmak diğeri de çevrenin korumasının gerekliliğidir. Mutzenberg (1997), Yalçın (2007), Baba vd. (2009) ve Karaca vd. (2013) çalışmalarında Tuzla jeotermal akışkanının yüksek konsantrasyonda B içerdiğini ifade etmişlerdir. Baba vd. (2009) tarafından yapılan araştırmada, Tuzla jeotermal akışkanın içerdiği yüksek B konsantrasyonu nedeni ile çevresindeki su kaynaklarının kirlenmesine sebep olduğu saptanmıştır.

Bu çalışmanın amacı Tuzla jeotermal akışkanından adsorpsiyon ve mikrodalga ışınımı yöntemleri ile B gideriminin araştırılmasıdır. Bu amaç ile adsorpsiyon deneylerinde adsorban olarak uçucu kül ve zeolit kullanılmıştır. Mikrodalga ışınımı deneylerinde ise uçucu kül ve kireçtaşı kullanılmıştır. Adsorpsiyon ile B gideriminde pH, adsorban dozu, adsorpsiyon izoterm modelleri, temas süresinin etkisi, kinetik modeller, sıcaklığın etkisi, adsorbanın tekrar kullanabilirliği gibi parametreler incelenmiştir. Maksimum B giderimi için uygun koşullar tespit edilmiştir.

Yıllardır kullandığımız mikrodalga teknolojisi ise adsorpsiyon konusunda, yeni kendine yer bulmaktadır. Mikrodalga ile zamandan ve enerjiden tasarruf etme imkânı da olduğu için birçok alanda kullanılmaktadır. Adsorpsiyonda mikrodalga yöntemi ile ilgili literatürde sınırlı çalışmalar olduğu için çalışmamızda buna da yer vererek verimli olup olmadığı araştırılmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Jeotermal Enerji

Jeotermal, İngilizce'deki "geo" ve "thermal" sözcüklerinin Türkçe'deki anlam karşılığı olan "yer" ve "ısı" kelimelerinin birleşiminden ortaya çıkan bir kavramdır. Yeraltının derinliklerindeki kayaçlarda biriken ısı enerjisi akışkanlar tarafından rezervuarlarda depolanır. Depolanan ısı enerjisinden oluşan sıcak su, kızgın su buharı ve gazlara bilim ve teknik açıdan jeotermal kaynak denir ("Jeotermal nedir?", 2017).

Dünyamızı çevreleyen yer kabuğunun merkezine yaklaştıkça, merkezdeki çekirdeğin yüksek sıcaklığı nedeniyle her 33 m de bir 1 °C'lik sıcaklık artışına jeotermal gradyen denmektedir. Yerin altındaki ısı, farklı iletim yollarıyla kayaçları, sıvı ve gaz formundaki akışkanları ısıtır. Bunun sonucunda ısınan sıvı ve gazlar jeotermal akışkan olarak adlandırılır. Ülkemizde 2007 yılında Resmi Gazete'de yayınlanan Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu Uygulama Yönetmeliği'ne göre "jeolojik yapıya bağlı olarak yerkabuğu ısısının etkisiyle sıcaklığı sürekli olarak bölgesel atmosferik yıllık ortalama sıcaklığın üzerinde olan, çevresindeki sulara göre daha fazla miktarda erimiş madde ve gaz içerebilen, doğal olarak çıkan veya çıkarılan su, buhar ve gazlar ile yeraltına insan düzenlemeleri vasıtasıyla gönderilerek yerkabuğu veya kızgın kuru kayaların ısısı ile ısıtılarak su, buhar ve gazların elde edildiği yerler" jeotermal kaynak olarak tanımlanmaktadır. Isı taşıyan akışkanlar meteorik kökenli, magmatik ve metamorfik kaynaklı sulardır. Derinlerde sokulumdan yayılan ısı ile daha soğumayı bitirmemiş akışkanlar genel olarak iletim yoluyla, yoğunluktan dolayı derinlerdeki ısıyı yukarıya çıkarır. Bu ısı rezervuarda kayaçların içerisinde toplanır. Öte yandan yüzeye de çıkarak sıcak su ve gaz çıkışları ile kaynak olurlar (Akkuş ve Alan, 2016).

İnsanın ömrü düşünülünce, jeotermal kaynaklar bitmeyecek gibi sınırsız olarak düşünülse de, beslenmeden fazla çekim yapıldığında tükenebilir. Bu yüzden sınırsız kaynaklar yerine yenilenebilir kaynaklar demek daha uygun olur. Bu yenilenme için de enerjisinden faydalanılmış akışkanın, rezervuara geri basılmasıdır. Akışkanın rezervuara

geri basılması olayına reenjeksiyon denir ve jeotermal kaynakların sürdürebilirliği için büyük önem taşır (Danışman, 2011).

Jeolojik özelliklere göre oluşan, doğrudan veya dolaylı olarak (başka enerji çeşitlerine dönüştürülmesi) faydalanılan bir enerji türü olan jeotermal enerji; yeryüzüne su, buhar ve gaz yoluyla taşınmasıyla kullanılır. Yerkabuğunun derinliklerinde mantodan kaynaklanan magmanın ısısından elde edilen kaynağın ısı enerjisidir. Bununla birlikte içerisinde akışkan içermeyip farklı yöntemlerle ısısından faydalanılan "Sıcak Kuru Kayalar" jeotermal kaynak sınıfına girer (Akkuş ve Alan, 2016).

Dünyada gittikçe artan enerji ihtiyacına karşılık verebilen ve fosil yakıtlara kıyasla çevresel etkilerinin az olması sebebiyle yıllar içinde jeotermal enerjinin önemi artmıştır.

2.1.1. Dünyadaki Durum

Dünyada jeotermal kaynaklar çoğunlukla levha sınırlarında görülür. Bunlara ek olarak volkanik faaliyetler sonucu ve tektonizmaya bağlı graben sınırlarında görülmektedir. Türkiye'deki kaynakların çoğunluğunu volkanik faaliyetler görülen yerler ve graben sınırlarında görmek mümkündür (Danışman, 2011).

Dünyada yıllar içinde enerji arzının artışını Tablo 1'de görebiliriz.

Tablo 1

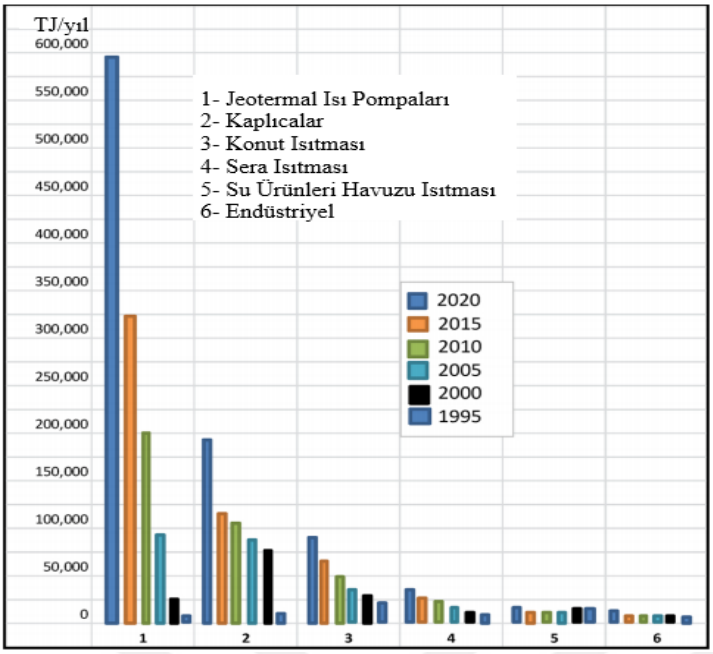
1990-2011 Dünya Birincil Enerji Arzı Gelişimi (mtep cinsinden) (IEA, 2013)

Ülke	**1990**	**2011**	**Artış (%)**
Çin	879	2743	212
Hindistan	317	750	137
Türkiye	**53**	**115**	**117**
Brezilya	138	267	94
A.B.D.	1915	2189	14
Japonya	439	461	5
OECD	4522	5304	17
Dünya	8769	13070	49

Jeotermal akışkanın içerdiği entalpiye göre jeotermal kaynak sınıflandırma yapılması en sık tercih edilen yöntemdir. Sıvının ne kadar ısı (termal enerji) içerdiğini ve onun yaklaşık değerini gösteren kavrama entalpi denir. Ülkelerin kendilerine göre farklı sınıflandırmaları olmasına karşılık sıcaklık içeriğine göre jeotermal enerji sahalarını 3 gruba ayırabiliriz:

1- Düşük Sıcaklıklı Sahalar (20-70 °C)
2- Orta Sıcaklıklı Sahalar (70-150 °C)
3- Yüksek Sıcaklıklı Sahalar (150 °C'den yüksek) (DPT, 2001)

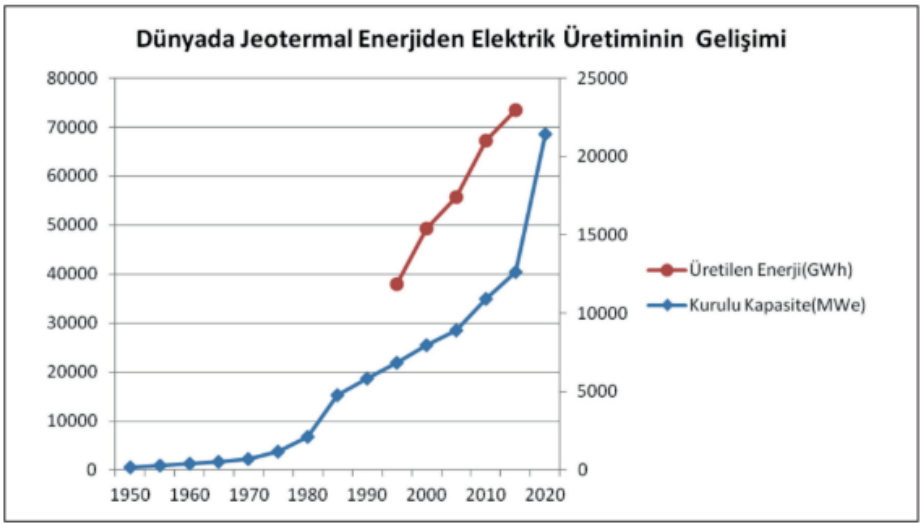
Dünyada jeotermal enerjinin doğrudan kullanılması Şekil 1'de gösterilmiştir. Doğrudan kullanım 2005'den sonra hızlı bir artış göstermiştir. Doğrudan kullanım kapasitesi 2020'de 107,727 MWt'a ulaşmıştır. Yıllık jeotermal enerji kullanımı 1,020,887 TJ (283,580 GWh) olmuştur. Çin, A.B.D., İsveç, Almanya ve Türkiye doğrudan kullanım kurulu kapasite büyüklüğünde (jeotermal ısı pompaları dahil) ilk 5 ülkedir. Bu ülkeler toplam 46,620 MWt kapasitesiyle, dünyadaki kapasitenin % 71,1'ini oluşturur. Yıllık enerji kullanımında dünyadaki ilk 5 ülke Çin, A.B.D., İsveç, Türkiye ve Japonya olup dünya kullanımının % 73,4'ünü kapsar (Lund ve Toth, 2020).



Şekil 1. Dünyada doğrudan enerji kullanımının yıllara bağlı olarak değişimi (Lund ve Toth, 2020)

Jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı ülke ekonomilerine ciddi oranda fayda sağlamaktadır. İzlanda, ısıtmada ihtiyaç duyulan enerjinin % 90'ını jeotermal enerjiden sağlamaktadır. Bunlara ek olarak, yerli ve yabancı turistlerin ziyaretleriyle kazanılan turizm gelirleri ülke ekonomisine fayda sağlar (Akkuş ve Alan, 2016).

Dünyada 78 ülke jeotermal enerjiden doğrudan faydalanmaktadır. Bu sayı, 1995 yılında 28, 2000'de 58, 2005'de ise 72 olarak kayıtlanmış olup son 15 yılda büyük artış yaşamıştır. Jeotermal enerjiden doğrudan faydalanmayla ülke ekonomisine en büyük katkı İzlanda ve Türkiye'de belirlenmiştir. Türkiye, son 5 yıl içerisinde çoğunlukla merkezi ısıtma sistemi olan kurulu kapasitesi 820 MWt değerinden 1,495 MWt değerine yükseltmiştir (Lund, 2006). Dünyada jeotermal enerjiden elektrik üretimi Şekil 2'de görüldüğü üzere yıllar içinde artış göstermekle beraber özellikle 1980'lerden sonra hızlı artış göstermiş ve son yıllarda önemli ölçüde artmıştır.

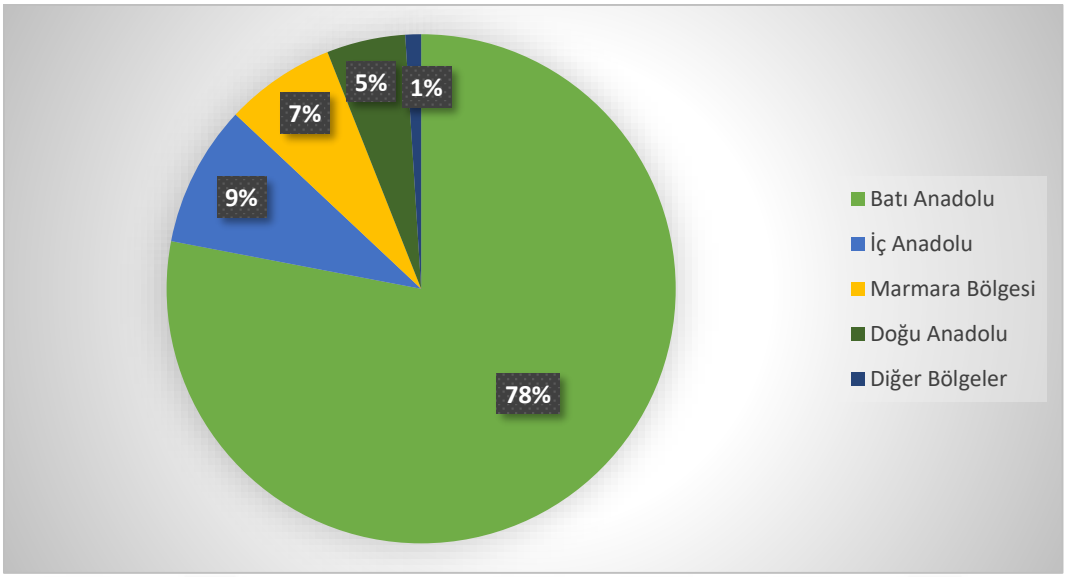


Şekil 2. 1950 ile 2015 arasında kurulu kapasite ve üretilen enerji kullanımı (Bertani, 2015)

Jeotermal enerjinin dolaylı olarak kullanılıp elektrik üretilmesinde ilk beş ülke; ABD, Filipinler, Endonezya, Meksika ve İtalya'dır (Geothermal Energy Association, 2014). Jeotermal ısı ve kaplıcalardaki ilk beş ülke ise Çin, Japonya, Türkiye, Brezilya ve Meksika'dır (Lund ve Toth, 2020). Dünyada, jeotermal enerjiden yararlanmak suretiyle elektrik santrali olan 27 ülke vardır. Bunlardan Yunanistan, Tayvan ve Arjantin'in ekonomi ve çevre etkenleri sebebiyle santralleri kapatmalarıyla, santrali olan ülke sayısı 24 olmuştur (Bertani, 2015).

2.1.2. Türkiye'deki Durum

Türkiye, jeolojik ve coğrafik konum özellikleriyle aktif bir tektonik kuşak içinde olduğundan dünyada jeotermal bakımından önemli konuma sahiptir. Ülkemizde her tarafa yayılmış doğal çıkış şeklinde çeşitli sıcaklıklarda jeotermal kaynaklar vardır. Bu potansiyel kaynakların dağılımını Şekil 3'te görebiliriz. Ülkemizdeki jeotermal kaynakların % 90'ı düşük ve orta sıcaklıklı olmasıyla doğrudan uygulamalar (ısıtma, kaplıca, çeşitli jeotermal uygulamalar vb.) içim uygundur. Kalan % 10'luk kısım ise dolaylı uygulamalar (elektrik üretimi) için uygun olmaktadır (MTA, 2021b).



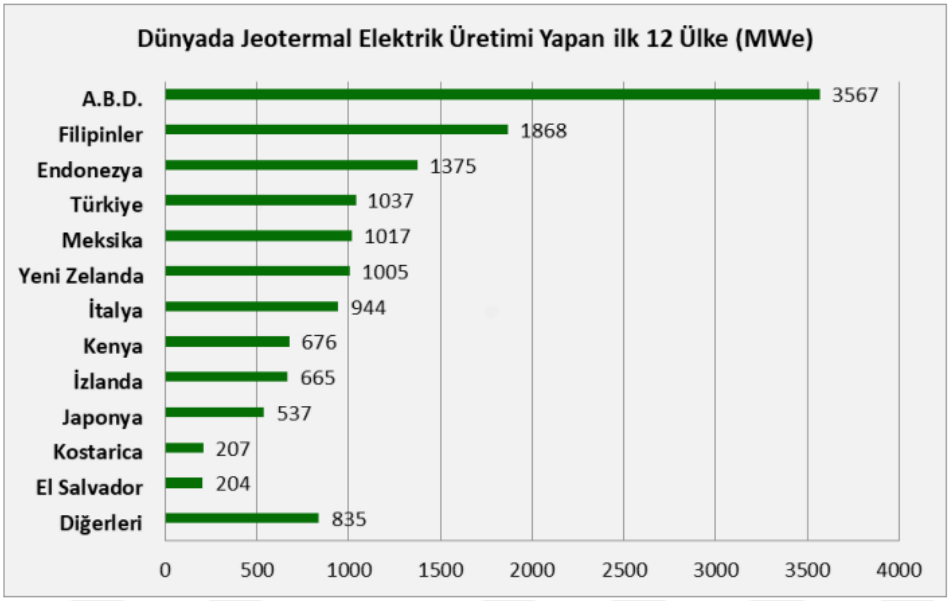
Şekil 3. Türkiye'deki jeotermal kaynakların bölgesel dağılımı (MTA, 2021b)

Ülkemizde yapılan çalışmalarla sıcaklıkları 20 ile 287 °C arasında değişen 460'tan fazla jeotermal alan ve 2000'den fazla sıcak ve mineralli su kaynağı (kaynak ve kuyu olarak) tespit edilmiştir. Mevcut durumda çalışan 17 bölgesel ısıtma sistemi olup, bazıları düşük sıcaklıkta (40-45 °C) su kullanarak 116.000 konuta eşdeğer hizmet vermektedir. Jeotermal ile ısıtılan seraların yüzey alanı 4,3 milyon m^2'yi bulmaktadır. 20 milyondan fazla yerli ve yaklaşık 20.000 yabancı ziyaretçi, son yıllarda artan yatırımlarla jeotermal suyun balneolojik kullanımından faydalanılmaktadır. Ülkemizde bazı yerlerde büyük kurulumlarla jeotermal ısı pompalarının sayısı artmış olup bugün toplamda 90 adet kapalı devre jeotermal ısı pompası sistemi bulunmaktadır (Mertoğlu, vd., 2020). Türkiye'de jeotermal enerji potansiyelini belirleme için MTA Genel Müdürlüğü 1962 yılında araştırma ve incelemelere başlamıştır. Doğrudan ve dolaylı (elektrik üretimi) kullanım için MTA tarafından yaklaşık 650 tane olmakla beraber, toplam 1250 civarında jeotermal sondaj kuyusu açılmıştır. 2007 ve Ocak 2016 yılları arasında elektrik üretim amacıyla 600 civarı jeotermal sondaj yapılmıştır. Ülkemizdeki jeotermal kaynakların dağılımı Şekil 4'te sunulmuştur (Kaya, 2018).



Şekil 4. Türkiye'deki jeotermal kaynakların dağılımı (MTA, 2021c)

Türkiye dünyada jeotermal enerji potansiyelinde 7. sıradadır. Fiili kullanılabilir kapasite 4.809 MWt olarak hesaplanmıştır. Bu kapasitenin 2.880 MWt'lık kısmı ispat edilmiş olup, 805 MWt konut ısıtması için, 612 MWt sera ısıtması için, 380 MWt kaplıca tesisleri ısıtmasında, 1.005 MWt kaplıca kullanımı için, 1,5 MWt meyve kurutması için ve 42,8 MWt ısı pompası uygulamalarında faydalanılmaktadır. Öte yandan elektrik üretim potansiyeli 600 MWe olarak kabul görmekteydi. Yeni gelişmelerle birlikte bu potansiyelin 1500-2000 MWe olacağı düşünülmektedir. İTÜ Enerji Enstitüsü, yeni saha ve sondaj aramalarıyla bu sayının 2000 MWe'lere yükselebileceğini öngörmektedir. Jeotermal elektrik santrallerin kurulu gücü 1000 MWe sayısını aşmıştır. Şekil 5'e göre dünyada jeotermal kurulu güç 14.000 MWe civarında olup, 2017 yılı verilerinde Türkiye dünyada 4. sırada bulunmaktadır (Kaya, 2018).



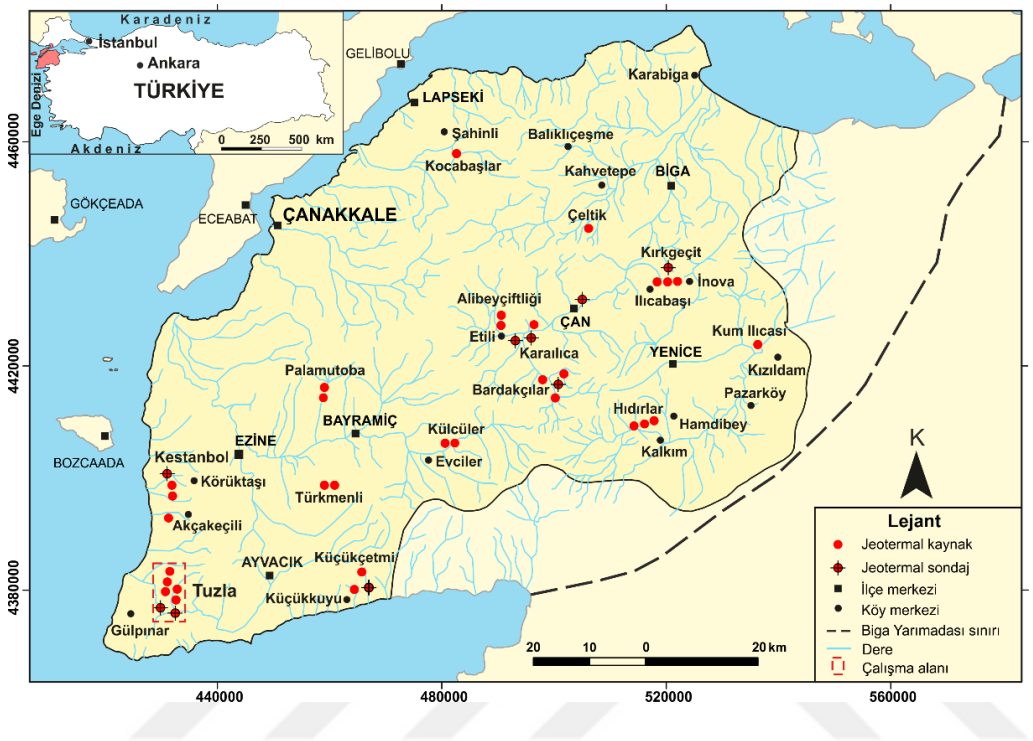
Şekil 5. Dünyadaki bazı önemli ülkelerin jeotermal kurulu güçleri (Kaya, 2018)

2.1.3. Tuzla Jeotermal Alanı

Çanakkale ili sınırları içerisinde yüzey sıcaklıkları 23-96,2 ºC arasında değişen 14 jeotermal alan bulunmaktadır (Şanlıyüksel Yücel vd., 2013; Marmara vd., 2020). Bu jeotermal alanlardaki jeotermal akışkanın bir kısmı doğal olarak bir kısmı ise sondaj ile yüzeye ulaşmaktadır. Çanakkale ilindeki Tuzla, Kestanbol, Çan, Karaılıca, Palamutoba, Alibeyçiftliği, Çeltik jeotermal akışkanlarının B konsantrasyonu Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (2008) ve İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (2013)'te belirlenen limit değerden (1 mg/L) yüksektir (Karaca vd., 2013). Baba ve Armannsson (2006) Tuzla jeotermal akışkanının içerdiği yüksek B konsantrasyonu nedeniyle toprakta ve yeraltı suyunda kirlenmeye sebep olduğunu ifade etmiştir.

Bu çalışma kapsamında Çanakkale'deki jeotermal alanlar arasında en yüksek B konsantrasyonuna sahip olması nedeni ile Tuzla jeotermal akışkanı seçilerek örneklenmiştir. Tuzla jeotermal alanı, Çanakkale ili Ayvacık ilçesine yaklaşık 20 km uzaklıkta olup, Tuzla köyündedir (Şekil 6). Tuzla köyünün kuzeydoğusundaki Tuzla tepe ile doğusundaki Himmetgediği tepe arasındaki vadi boyunca ve Tuzla tepenin batı yamacında birçok noktadan jeotermal kaynak çıkışları gözlenmektedir. Tuzla jeotermal

alanında en yüksek kuyu içi sıcaklık değeri 175 °C olarak tespit edilmiştir (Çam vd., 2013).



Şekil 6. Çanakkale ilindeki jeotermal alanlar ve Tuzla jeotermal alanının konumu (Karaca vd., 2013)

Tuzla jeotermal alanının temelini Paleozoyik yaşlı Karadağ grubu olarak adlandırılan kristalen şist, kristalize kireçtaşı ve kontak metamorfik kayaçlardan oluşan şistler ve granodiyorit türü plütonik kayaçlar oluşturur (Duru vd., 2012). Tuzla jeotermal kaynaklarının kuzeydoğusunda yüzlek veren Üst Oligosen-Alt Miyosen yaşlı Hallaçlar volkanitleri geniş alanda alterasyona uğramış andezitik, dasitik, riyolitik özellikte lav ve piroklastiklerden oluşmaktadır (Çam vd., 2013). Üst Oligosen-Alt Miyosen yaşlı kuvars monzonit, monzonit, monzonit porfir ve granit türü kayaçlardan oluşan Kestanbol Plütonu, kendisinden yaşlı birimleri keserek bölgeye yerleşmiştir (Gözler vd., 1984). Hallaçlar volkanitlerini ve Kestanbol plütonunu üzerleyen Alt Miyosen yaşlı Ezine volkaniti gri, yeşilimsi renkte andezit, trakiandezit ve piroklastiklerden oluşmaktadır. Jeotermal alanın güneyinde yer alan Orta Miyosen yaşlı Çamkalabak ignimbiriti kendisinden daha yaşlı volkanik birimler üzerine uyumsuz olarak gelir (Çam vd., 2013). Oligo-Miyosen

volkanizmasının ürünü olan birimlerin üzerine uyumsuz olarak Miyosen yaşlı gölsel ve lagünel çökellerden oluşan Gülpınar formasyonu ile Pliyosen yaşlı akarsu ve yelpaze çökellerinden oluşan Bayramiç formasyonu gelmektedir (Ilgar vd., 2009). Tüm birimler Kuvaterner yaşlı alüvyon tarafından uyumsuzlukla örtülmüştür. Tuzla jeotermal sistemi K-G ve KB-GD doğrultu atımlı faylarla kontrol edilmektedir (Çam vd., 2013).

Tuzla jeotermal alanında yapılan sondajlara göre bölgede iki rezervuar kayaç saptanmıştır. Genel olarak, kırıklı-çatlaklı volkanitler birinci rezervuar ve metamorfik kayaçlar ile kireçtaşları ikinci rezervuar kayaçlarını oluşturmaktadır. Kestanbol plütonu jeotermal sistemin ısıtıcı kayasını oluşturmaktadır (Gevrek vd., 1986). Rezervuar kayaçlarını üzerleyen Miyosen yaşlı birimler ise geçirimsiz örtü kayaç özelliği taşımaktadır. Yapılan jeolojik ve hidrojeolojik çalışmalara göre; Tuzla jeotermal akışkanı, fosil ve güncel deniz suyu, yağmur ve kar yağışında yeraltına süzülen meteorik ve denizel kökenli suların jeotermal gradyan ile ısınması, kırıklar ve fay hatları boyunca yükselmeleri sonucu oluştuğunu göstermektedir (Koç vd., 2015).

Mützenberg (1997) tarafından Tuzla jeotermal akışkanının Na^+ ve Cl- konsantrasyonu sırasıyla 22250 ve 44140 mg/L olarak tespit edilmiştir. Bu da deniz suyu NaCl konsantrasyonunun neredeyse iki katıdır ve tuzlu su olarak adlandırılır. Tuzla Çayı'ndan alınan numunelerde yüksek B ve Cl^- saptanmış olup, 2004 yılında Tuzla jeotermal alanındaki farklı jeotermal kaynaklardan alınan örneklerin sıcaklık ve B konsantrasyonu Tablo 2'de verilmiştir (Baba vd., 2009). Mützenberg'in (1997) verilerine göre Tuzla sahasındaki 100 °C'de jeotermal akışkanın pH'ı 6,2 olarak, sudaki B konsantrasyonu 15,2 mg/L olarak belirtilmiştir (Yalçın, 2007). ENDA Holding bünyesinde Ayvacık/Tuzla Köyünde kurulan ''Tuzla Jeotermal Enerji A.Ş.'inde üretilen enerji YEKDEM kapsamında EPİAŞ'a satılmaktadır ("Tuzla Jeotermal Enerji A.Ş.", t.y.). Tuzla jeotermal alanında elektrik üretiminin yanı sıra sağlık ve turizm için bir adet kaplıca bulunmaktadır ("Çanakkale'deki yenilenebilir enerji", t.y.).

Tablo 2

Tuzla jeotermal alanından Haziran 2004'de alınan jeotermal su örneklerinin sıcaklık değeri ve B konsantrasyonu (Baba vd., 2009)

Örnek Numarası	**Sıcaklık (°C)**	**B (mg/L)**
4	86,4	32
11	54,9	11,1
12	54,7	24,7
13	77	20,11
22	36,9	25,95
23	60,8	13,63

2.2. Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları

Jeotermal kaynaklardan elektrik ve ısı enerji elde edilmesinde faydalanılmaktadır. Ayrıca, tropik bitki ve balık yetiştiriciliğinde, hayvan çiftliklerinde ve yol ve havaalanı pistlerinin ısıtmasında, yüzme havuzlarında, termal tedavi merkezlerinde ve termal turizmde jeotermal kaynaklar kullanılır. Bunlara ek olarak yiyecek kurutulma işlemi ve sterilizasyonda, kerestecilik ve ağaç kaplama işlemlerinde, kâğıt ve dokumada ağartma malzemesi olarak, derilerin kurutulmasında ve işlenmesinde, şeker, ilaç, pastörize süt fabrikalarında, soğutma tesislerinde kullanılır. Jeotermal akışkandan kimyasal madde de elde edilebilmektedir (DPT, 2001).

2.2.1. Kaplıcalar

İnsanoğlu eski çağlardan itibaren jeotermal akışkanları bileşimindeki kimyasallara göre birçok hastalığın tedavisi için kullanmıştır. Araştırmaların ışığında, insanlar 10 bin yıldan beri jeotermal akışkandan tedavi amacıyla faydalandığı açığa tespit edilmiştir. Kaplıcalar tedavi amaçlı kullanılmasının yanı sıra turizm açısından da önemli bir ekonomik faaliyet kolu olmuştur. Termal turizmin ülkelerin ekonomisine kattığı değeri şu sayılarla görebiliriz; Almanya ve Macaristan'a yılda 12 milyon, Rusya'ya 8 milyon,

Fransa'ya 1 milyon ve İsviçre'ye 800 bin kişi gitmiştir. 126 milyon nüfusa sahip Japonya'nın Beppu şehrine kaplıca için yılda 13 milyon civarı kişi gelmektedir (Kalkınma Bakanlığı, 2018b).

Ülkemizde son yıllarda yüksek standartlara sahip tesisler açılmış olup bu alanda önemli gelişim göstermiştir. Türkiye kaynak zenginliği açısından jeotermal sularıyla dünyada ilk 7 içinde yer alırken; debi ve sıcaklıkları, çeşitli kimyasal ve fiziksel özellikleriyle Avrupa'daki termal sulardan daha üstün özellikleri vardır. Türkiye'deki 350 adet kaplıcaya yılda 16 milyon kişi gelerek tedavi ve tatil amacıyla yararlanmaktadır (Kalkınma Bakanlığı, 2018b).

2.2.2. Isıtma

Binaları ve kentleri, merkezi sistem ile ısıtma için ve sıcak kullanma suyu olarak 40 °C'den fazla sıcaklığı olan jeotermal akışkanlar kullanılır. Bunun uygulamalarını İzlanda, Fransa, Japonya, Yeni Zelanda, Türkiye, B.D.T., Macaristan, Kanada, Çin, Meksika, Arjantin, Kuzey Avrupa ülkelerinde görebiliriz (DPT, 2001).

Seraların ısıtılmasıyla turfanda sebzecilik, meyvecilik, çiçekçilik yapılmaktadır. Dünyada jeotermalin doğrudan kullanımının önemli bölümü sera ısıtması için kullanılmaktadır. Macaristan, İtalya, Türkiye, ABD, Japonya, Doğu Avrupa Ülkeleri, Yeni Zelanda ve İzlanda'da 30 °C'den fazla sıcaklıktaki jeotermal akışkan kullanılarak seraların ısıtılması sağlanır (DPT, 2001).

Dünyada 12 bin dönüm, Türkiye'de ise yaklaşık 3,5 bin dönüm, jeotermal enerjiyle ısıtılan sera bulunmaktadır. 2015 yılı itibariyle Türkiye jeotermal enerjiyle sera ısıtmasında dünyada 1. sıraya yerleşmiştir. İzmir-Dikili'de 880, Manisa-Salihli'de 250, Kütahya Simav'da 310, Denizli-Kızıldere'de 153, Şanlıurfa-Karaali'de 424 ve diğer bölgelerde ise 885 dönüm sera alanı jeotermal enerjiyle ısıtılmaktadır (Kalkınma Bakanlığı, 2018b).

2.2.3. Elektrik Üretimi

Türkiye'de jeotermal enerjiden dolaylı olarak faydalanma yolu olan elektrik üretimi ilk olarak 1974 yılında Denizli-Kızıldere'de MTA Genel Müdürlüğü tarafından 0,5 MWe gücüne sahip türbin ile deneme amacıyla başlanmıştır. 1984 yılında TEAŞ tarafından ticari anlamda elektrik üretimi 20 MWe kurulu güce sahip olan Kızıldere jeotermal santralinde yapılmıştır. Ülkemizde 15 jeotermal alanda 27 jeotermal santral 635,148 MW elektrik üreterek ekonomiye katkı sağlamaktadır. Elektrik üretim alanları ve işletme kapasitelerinin Tablo 3'te verilmiştir (Akkuş ve Alan, 2016).

Tablo 3

EPDK verilerine göre elektrik üretim alanları ve işletme kapasiteleri (Akkuş ve Alan, 2016)

İl / İlçe	**Saha Adı**	**Firma**	**İşletme Kapasitesi (Mwe)**
Denizli/Sarayköy	Kızıldere	Zorlu Elek. Üret.	95
Manisa/Alaşehir	Alaşehir		45
Denizli/Sarayköy	Kızıldere	Bereket Enerji Üret.	6,85
Aydın/Germencik	Ömerbeyli	Gürmat Elek. Üret.	162,3
Aydın/Germencik	Hıdırbeyli/Bozköy	Maren	92
Aydın/Kuyucak	Pamukören	Çelikler Jeot. Enerji	67,53
			22,51
Aydın/Germencik	Gümüşköy	Gümüşköy Jeot. Enerji	13,2
Manisa/Alaşehir	Alaşehir	Türkerler Jeot. Enerji	24
Aydın/Sultanhisar	Salavatlı	Menderes Geot. Elek.	51,451
Çanakkale/Ayvacık	Tuzla	Tuzla Jeot. Enerji	7,5
Çanakkale	Babadere	MTN Enerji	8
Aydın	Yılmazköy	Kipaş Enerji	24
Denizli/Sarayköy	Tosunlar	Akça	3,807
Aydın	Umurlu	Karkey	12
Toplam Üretim			**635,148**

2.2.4. Kimyasal Madde Üretimi

Jeotermal akışkanlardan ticari değeri olan CO_2 (karbon dioksit), KCl (potasyum klorür), LiCl (lityum klorür), silisyum, çinko, lityum, magnezyum, manganez, B, tungsten, sezyum, rubidyum, potasyum, kurşun, bakır, gümüş, baryum, stronsiyum vb. bileşik ve minerallerinin üretilmesi mümkündür. Türkiye'de Denizli-Sarayköy'de bulunan jeotermal elektrik santralinde 1986'dan beri yan ürün olarak CO_2 elde edilmekte ve tesiste sıvı karbondioksit ve kuru buz üretimi de yapılmaktadır. Yıllık 160.000 ton üretimi olan tesis, Türkiye'nin meşrubat üretimi için ihtiyaç olan sıvı karbon dioksit ihtiyacının yarısını karşılamaktadır (Kalkınma Bakanlığı, 2018b).

2.3. Jeotermal Akışkandan Bor Giderimi Çalışmaları

Ban vd. (2019), laboratuvar ölçekli deniz suyu ileri osmoz (SWRO) yöntemiyle pH 5, 8 ve 11'de, çalışma basıncı 50 ve 60 barda ve B konsantrasyonu 5,0 mg/L olan suda B giderim çalışmasını yürütmüşlerdir. Bu koşullarda % 82,2, % 82,6 ve % 95,3 B giderimi saptanmıştır.

Chang vd. (2020), ince filmli transistörlü sıvı kristal ekran (TFT-LCD) ile atık sudan ileri osmoz yoluyla iyodür geri kazanımı ve B giderme çalışmasını yapmıştır. CTA membranı kullanarak 1 M $MgCl_2$ ile pH 7'de % 62 B giderimine ulaşmıştır. TFC-AIM membranı ile pH 11'de % 98,4 B giderimi sonucu elde edilmiştir.

Çengeloğlu vd. (2008), SWHR, BW-30 ve AG membranlarıyla ters osmoz metoduyla sudan B giderim çalışmasını yapmışlardır. B giderimi; membran tipi, işletme suyu pH'ı ve işletme basıncı ile değişiklikler göstermiştir. Elde edilen sonuçlardan etkili B gideriminin pH 11'de olduğu görülmüştür. SWHR membranıyla en düşük B konsantrasyonu yaklaşık % 99 olarak çıkmıştır. Çalışma basıncının artması bütün membranlarda B giderimini arttırmıştır.

Çermikli vd. (2020), yaptıkları çalışmada NMD ile işlevselleştirilmiş yeni B seçici iyon değişim reçineleri (1JW, 2JW ve 2PTN) ile jeotermal sudan B ve arseniğin uzaklaştırılmasında adsorpsiyon membran filtrasyon sistemini kullanmışlardır. Sonuçları B seçici Dowex XUS 43594.00 reçinesi ile elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. B

konsantrasyonları 2 g/L reçine konsantrasyonu kullanılarak düşürülmüş ve Dowex XUS 43594.00, 1JW ve 2PTN reçineleri için sırasıyla bor giderim yüzdesi %95,3, %66,3 ve %61,2 olarak saptanmıştır.

Demey vd. (2014), yaptıkları çalışmada deniz suyundan sürekli kolon modu sorpsiyonunda B giderimi için yeni bir düşük maliyetli kitosan/$Fe(OH)_3$ bazlı sorbent sentezlemişlerdir. Sorbentin deniz suyu ile sürekli sistemde stabil olduğu bulmuşlardır. Deneylerle bu sorbentin yeniden kullanabilir olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca B giderimi için etkili bir sorbent olan nikel ve kitosan içeren adsorban [ChiNi(II)] üretmişlerdir. Birkaç kolon modu çalışması dönüsünden sonra % 90'lık B giderimi tespit edilmiştir.

Jarma vd. (2020), nanofiltrasyon ve ters osmoz membranlarını kullanarak, kullanılmış jeotermal sudan arsenik ve B uzaklaştırmayı araştırmışlardır. En düşük bor giderimi % 26 ile CK-NF membranında olmuştur. Diğer membranlarda B giderimi; NF90'da % 54, XLE-RO membranı ile % 60 olmuştur. Bu membranlar kullanılarak yapılan B giderim çalışmasında elde edilen sonuçlar yeterli olmamıştır. Ürün suyundaki yüksek B konsantrasyonu nedeniyle tarımsal sulamada kullanılamayacağı belirtilmiştir.

Kluczka vd. (2007), sudan B ayırmak için emdirilmiş aktif karbon kullanmışlardır. Statik sistemde en iyi emici madde, tartarik asit ile emdirilen aktif karbonlardır. Dinamik sistemdeyken, mannitol ile emdirilmiş aktif karbonların, B adsorpsiyon kapasitesi vurgulanmıştır.

Kluczka vd. (2015), uçucu kül bazlı yeni bir zeolit sentezlemişlerdir. B adsorpsiyon kapasitesi 2,3 mg/g olup B giderimi % 93 olarak tespit edilmiştir.

Köse vd. (2011), zeytin küspesinden hazırlanan aktif karbonu kullanarak sulu çözeltilerden B adsoprsiyonunu araştırmıştır. Maksimum B giderimi başlangıç pH'ı 5,5'de elde edilmiştir. B adsorpsiyonu sıcaklık arttıkça azalmıştır. Bunu da sıcaklık arttıkça borik asidin çözünürlüğünün artmasıyla açıklamış. Adsorpsiyonun fiziksel olduğunu belirtmiştir. Kullandıkları aktif karbon adsorbanı, adsorpsiyon kapasitesi olarak Dowex 2x8 reçineye göre yaklaşık 4-5 kat daha az olduğu tespit edilmiştir.

Öztürk vd. (2008), pH 9'a ayarlı 5 mg/L H_3BO_3 çözeltisini kullanarak ters osmoz yöntemiyle B giderimini incelemişlerdir. B giderimini % 69 olarak hesaplamışlardır.

Öztürk ve Köse (2008), iyon değiştirici Dowex 2x8 anyon değiştirme reçinesi kullanarak sulu çözeltilerden B giderimini incelemişlerdir. Sorpsiyon prosesi ile birlikte, pH, temas süresi, sıcaklık, çözeltinin başlangıç B konsantrasyonu ve reçine dozajı gibi parametreler üzerindeki rolünü araştırmışlardır. Maksimum B giderimini pH 9'da elde etmişlerdir. Başlangıçta reçinenin üzerine emilim hızı çok yüksek olup daha sonra yavaş oran izleyerek platoya yaklaşmıştır. Sıcaklık arttıkça B sorpsiyonu azalmıştır. Başlangıç B konsantrasyonu artmasıyla emilen B miktarının artmıştır. Reçine dozajındaki artış, artan sorbent yüzey alanı ve dozaja bağlı olarak B giderim yüzdesini arttırmıştır.

Polowczyk vd. (2013), uçucu külün (partikül boyutu 1,0-1,6 mm) B adsorpsiyon kabiliyetini araştırmışlardır. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi 6,9 mg/g (0,0025 adsorban-çözünen oranı) ve maksimum giderim % 90 (0,75 adsorban-çözünen oranı) olarak saptanmıştır.

Thakur vd. (2013), çeşitli sulu çözeltilerden B seçici sorbent olarak NMDG (N-metil-D-glukamin) ile işlevselleştirilmiş polipropilen tabaka geliştirdiler. Geniş bir pH aralığında (4-8) sulu çözeltilerden B uzaklaştırmak için kimyasal olarak kararlı ve etkili olduğunu bulmuşlardır. Genellikle doğal deniz suyu koşullarında yer alan klorür, fosfat, nitrat ve sülfat gibi diğer rakip iyonların mevcudiyetinde sulu bir çözeltiden yaklaşık % 80-87'lik bir B giderimi elde etmiştir.

Yüksel ve Yürüm (2010), çözeltilerden B uzaklaştırmak için sırasıyla uçucu kül, zeolit ve demineralize linyit kullanmışlardır. Uçucu külde B adsorpsiyonu yalancı ikinci derece kinetik model için uygundu.

Zerze vd. (2013), yaptıkları çalışmada şetatlama polimeri sentezlemişlerdir. Bu polimer ile ve ultrafiltrasyon yöntemiyle B konsantrasyonunu 10 mg/L'den 0,4 mg/L'ye düşürülebileceği ve B giderim verimini pH 9'da % 96 olarak yaptıkları deneylerle gözlemlemişlerdir.

Şahin vd. (2021), Tuzla jeotermal akışkanından B gideriminde akışkan yataklı 18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerinin etkinliğini araştırmıştır. Kesikli testler sonucunda oda sıcaklığında, pH 4'te 50 mL jeotermal akışkandan 2,5 g uçucu kül kullanılarak % 88 B giderimi sağlamıştır. Uçucu küllerin bor giderimde etkin bir adsorban olduğunu, termodinamik sonuçlara göre B adsorpsiyon sürecinin spontane ve ekzotermik olduğunu ifade etmiştir.

2.4. Bor Mineralinin Özellikleri ve Bileşikleri

Periyodik tabloda 3A grubunda bulunan B elementinin atom numarası 5 olup yarı metal özelliğine sahiptir. B elementinin 2 tane kararlı izotopları vardır ve bunların kütle numaraları 10 ve 11'dir. Elementel B, yüksek bir erime noktasına, iyi bir sertliğe sahip olup oldukça zayıf bir elektrik iletkenidir (Wolska ve Bryjak, 2013).

B, kayalarda, toprakta ve suda bulunmaktadır. Yüzey sularında, yer altı sularında, acı sularda, kaplıcalarda ve özellikle jeotermal veya tektonik alanlarda B minerali bulunur. Doğadaki dağılımı yaygın olmasına rağmen sadece düşük ve çok düşük konsantrasyonlarda bulunur. Yer kabuğundaki ortalama B içeriği 10 mg/L'dir. Topraktaki ortalama konsantrasyonu 10-20 mg/L'dir. Deniz suyu, 0,5 ile 9,6 mg/L B içerirken ortalama değeri 4,6 mg/L'dir. Tatlı sudaki B konsantrasyonu genellikle 0,01 ile 1,5 mg/L aralığındadır. B, doğada çoğunlukla farklı miktarlarda kalsiyum, sodyum veya magnezyum içeren 200'den fazla mineral olarak bulunur. Bunların arasında en popüler olanlar: boraks, tinkal, kolemanit, üleksit ve kernittir (Wolska ve Bryjak, 2013).

2.5. Türkiye'deki Bor Rezervleri

Dünyadaki B rezervlerinin % 73'ünü barındıran Türkiye, 2017 yılında dünyanın B ihtiyacının % 57'sini karşılamıştır. Türkiye'de B ürünlerini iç tüketimde arttırmak için ürün geliştirme çalışmalarıyla savunma (bor karbür, yakıt katkıları vb.) ve nükleer sektörleri tarafından ihtiyaç duyulan B ürünlerinden elde edilen ürünler için üretim teknolojilerine de önem verilmesi ülkemiz için son derece önemlidir (Kalkınma Bakanlığı, 2018a). Türkiye'de bilinen B rezervleri Kırka/Eskişehir, Bigadiç/Balıkesir, Kestelek/Bursa ve Emet/Kütahya'da bulunmaktadır. Ülkemizde rezerv açısından en çok B minerallerinden tinkal ($Na_2O.2B_2O_3.10H_2O$) ve kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_2O$) bulunmaktadır (Eti Maden, 2020).

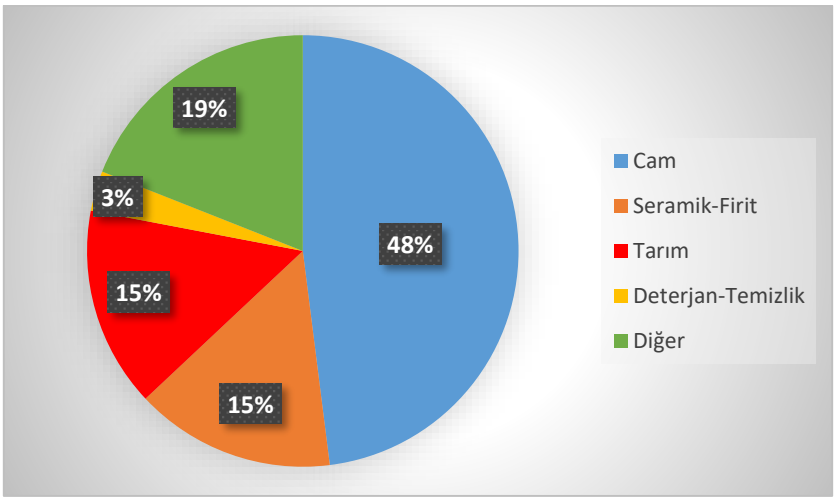
Ülkemizde B ürünlerinin en çok tüketildiği sektörler cam ve seramik üzerinedir. Cam sektörünün ürünleri inşaat, otomotiv, beyaz eşya, gıda, içki, meşrubat, ilaç, kozmetik, turizm (lokanta gibi), mobilya, elektrik ve elektronik gibi birçok sektöre ve ev kesimine

hizmet vermektedir. Düz cam faaliyetlerini etkileyen unsurlarda; inşaat sektörü için güneş enerjisine yönelik yüksek performanslı camlar ve otomotiv sektöründe yeni girilen projeleri görebiliriz (Eti Maden, 2020).

2018 yılı verilerine göre cam sektöründe 15,5 milyar TL üretim değerimiz olup üretim kapasitemiz 4,0 milyon tonu bulmuştur (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020). Türkiye'nin 2018 yılındaki inşaat seramikleri ihracatı 857,1 milyon $ olup, seramik kaplama malzemelerinde 597,7 milyon $'lık ve seramik sağlık gereçlerinde 259,4 milyon $ değerinde ihracat olmuştur (TSF, 2019).

2.6. Borun Kullanım Alanları ve Borun Çevresel Etkisi

B ve bileşikleri uzun zamandır bilinmekte ve kullanılmaktadır. Babillerin 4000 yıl önce altın endüstrisi için Uzak Doğu'dan B ithal ettiği ve eski Mısır'da mumyalama, arıtma ve metalürjik uygulamalar için boraks kullanıldığı sanılmaktadır. (Sökmen ve Büyükakıncı, 2018) Boraksın 8. yüzyılda Mekke ve Medine civarında kullanıldığı ve mineralin Arap tüccarlar tarafından getirildiği, 875 yılında da Arapların B tuzlarından ilaç ürettikleri bilinmektedir. B tüketimi sektörlere göre Şekil 7'de verilmiştir (Woods, 1994).



Şekil 7. Bor tüketiminin sektörlere göre 2019 yılındaki yüzdesi (Eti Maden, 2020)

B tüketiminin fazla olduğu sektörler cam, seramik, tarım ve diğer alanlar Şekil 2-9'da görülmektedir. B minerallerinin en çok tüketildiği alan cam sektörüdür. B, ergimiş haldeki cam ara mamulüne katıldığı zaman akışkanlığı artırmakta, son ürünün yüzey sertliğini ve dayanıklılığını yükseltmektedir (Eti Maden, 2020).

B bileşiklerinin kullanım alanları birçok sektöre yayılmıştır. Seramik sanayinde, seramik sırlarda kullanılan bor oksit oranı ağırlıkça % 8-24 arasında değişmektedir. Sırlardaki bor oksidin sağladığı faydalar; cam ve malzeme arasında ısısal bakımdan uyum sağlamak ve sırın ısısal genleşme katsayısını düzenlemektir. Çimento üretiminde % 8 oranında kolemanit katılarak tüketilen B, klinker pişirme sıcaklığını düşürür ve çimentonun özelliklerini iyileştirir. Borlu çimento; mukavemet, su ve gaz geçirgenliği, hidratasyon ısısı gibi parametreler bakımından portland çimentosuna göre daha iyi özellikler göstermektedir (Eti Maden, 2020).

Tarım sektöründe ise B, bitkilerin büyümesinde, gelişmesinde, ürün vermesinde ve çekirdek oluşturmasında büyük bir etkisi vardır. Tarım ve ormancılıkta yaygın olarak kullanılan B ürünleri temel olarak; gübre, mikro besleyici (düşük konsantrasyonlarda direkt veya karışım olarak), herbisit (yabani/istenmeyen bitki kontrolü, yüksek konsantrasyon uygulaması), ahşap koruma (yüksek konsantrasyon uygulaması) amaçlı kullanılmaktadır (Eti Maden, 2020).

Uzun yıllar boyunca B, toksik bir element olarak düşünülmemiştir. 1958, 1963 ve 1971 yıllarında Uluslararası İçme Suyu Standartlarında WHO (Dünya Sağlık Örgütü) B'dan hiç bahsedilmemiştir. İçme suyunda B'dan ilk kez 1984 yılında yayınlanan içme suyu kalitesi belgesinde bahsedilmiştir ve herhangi bir işlem yapılmasına gerek görülmemiştir. 1993 yılında WHO tarafından içme suyundaki B konsantrasyonu için geçici bir kılavuz tanıtılmıştır. Hayvanlar üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarında B miktarının birkaç zararlı etkisi olduğu öne sürülerek 1993 yönergelerindeki önerilen kılavuz değer 0,3 mg/L olmuştur. Su arıtımında B gideriminin zorluklarından dolayı 1998'deki kılavuzda bu değer 0,5 mg/L'ye çıkarılmıştır (Hilal vd., 2011).

Dünya Sağlık Örgütü, içme suyundaki B değeri için 0,5 mg/L kılavuz değeri oluşturmuştur. Bu değer şu an revizyon aşamasındadır ve 2,4 mg/L değerine çıkarılması planlanmaktadır (Cortes vd., 2011).

Sulama sularındaki B, yüksek değerlerde olması bitkilerin ölümüne yol açar. Bu yüksek değer aynı zamanda toprağı da kuraklaştırır. Toprağın kullanılamaz hale geldiği durumlar da ortaya çıkabilir. Sulama suyu olarak jeotermal suyun kullanılması içerisindeki B miktarına bağlı olarak çevreye olumsuz etki bırakır. Jeotermal sular, yeraltı sularıyla karışabilir ve bunun sonucunda tarımsal araziler olumsuz etkilenir (Demirçivi, 2008).

Bitkinin büyümesi için B gereksinimi olduğu uzun süredir bilinmektedir. Ancak biyokimyasal olarak rolü şu an bile tam olarak anlaşılamamıştır. Borun 3 ana süreçte yer aldığına dair ortak bir fikir birliği vardır. Bunlar; hücre duvarı yapısını sürdürmek, membran fonksiyonunu sürdürmek ve metabolik aktiviteleri desteklemektir. Bitkilerde B eksikliği büyümeyi ve çiçek gelişimini engellemekle birlikte az sayıda meyve ve tohumun oluşmasına neden olur (Kot, 2015). Borun, bitkilere faydası olduğu gibi gereken miktardan fazla alındığı zaman bitki için zararlı olmaktadır. Örneğin, ayçiçeği bitkisi için 0,5 mg/L gelişimi için olumlu etki yaparken bu değer 1 mg/L olduğu zaman bitki için olumsuz bir etki bırakır.

Rainey vd. (1999), yaptıkları araştırmada; insanlarda ağırlıklı ortalama B alımı erkekler için günde 1,17 mg ve kadınlar için günde 0,96 mg olurken vejetaryen yetişkinler için bu alım miktarı erkeklerde günde 1,47 mg ve kadınlarda günde 1,29 mg şeklinde raporlamıştır. Samman vd. (2011), Amerikan diyetinden günlük B alınımının yaklaşık 1 mg/gün olduğunu tahmin etmişlerdir. En çok B katkısı olan kahve ve süt bor oranı düşük olsa da tüketilen hacim nedeniyle toplam B alımının % 12'sini oluşturmaktadır. B alımı için kabul edilebilir güvenli aralık günde 1 ile 13 mg arasındadır ve fındık, kuru meyveler ve şarap bakımından zengin bir diyetle günlük günde 20 mg'a kadar alım elde edilebilir. B bileşikleri; makyaj, cilt ve saç bakım ürünleri, deodorantlar, nemlendirici kremler ve tıraş kremleri gibi kozmetik ürünlerde % 5'e varan konsantrasyonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak B bileşikleri borosilikat cam, sabunlar ve deterjanlar, yapıştırıcılar, porselen, emaye, deriler, halılar, yapay değerli taşlar gibi çok çeşitli tüketici ürünlerinde borik asit, boraks ve diğer boratlar şeklinde bulunabilir. Tüketici ürünlerinden maruz kalınan tahmini B değeri günlük 0,1 mg şeklindedir. İnsanlarda yetersiz B alımının, birkaç zara bağlı hormonun azalmasına neden olduğu bulunmuştur. B eksikliğinin belirtilerini sıralamak zordur. Çünkü hayvanlarda yapılan çoğu çalışmada, besinsel bordaki değişikliklere tepkiyi arttırmak için stres faktörleri kullanılmıştır. Bir yetişkin için oral

yoldan alınan borik asidin ölümcül dozu 15 veya 20 gramdan biraz daha fazladır ve bir bebek için bu değer 5-6 gramdır (Kot, 2015).

Borun insanın vücuduna gıda, hava ve deri gibi yollarla alımı vardır. Vücuda giren B neredeyse tamamı ilk 24 saatte idrar yoluyla atılır. Atılmayan çok az bir kısım ise kemiklerde, tırnaklarda, saçta, dişlerde, kıllarda, karaciğerde ve dalakta birikme yapar. Yüksek dozda bor alındığında bu durum kusma, ishal, baş dönmesi, titreme gibi belirtilere neden olabilir. Aynı zamanda B; kalsiyum, D vitamini ve bazı minerallerin vücutta düzenlenmesini sağlar. Yapılan çalışmalarda yeterli miktarda alınan borun beyin fonksiyonlarına olumlu etkileri gözlenmiştir. Ayrıca B içeren gıda tüketiminin, kemik erimesini engelleyebileceği de gözlenmiştir (Demirçivi, 2008).

Farelerde yapılan deneylerle borun hayvanlara etkisi gözlemlenmiştir. İçme sularına katılan 0,84 mg/kg borda herhangi bir zarar olmamıştır. Miktarı arttırmayla ve süreci uzatmayla beraber farelerin başta üreme organları olmak üzere çeşitli sistemlerini olumsuz olarak etkilemiştir. Borun hayvanlardaki öldürücü dozu; hayvan cinsine, kilogramına ve vücut ağırlığına göre değişmektedir. Yapılan çalışmalar ışığında hayvanların çoğunda bora karşı hassasiyetin yüksek olduğu tespit edilmiştir (Demirçivi, 2008).

2.7. Bor Giderim Yöntemleri

Yüzey sularından ve deniz suyundan B giderilmesi için yapılan araştırmalar etkili teknolojilerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Doğal ve atık sulardaki yüksek B oranı, sulu ortamdan borun etkili bir şekilde uzaklaştırılması işleminin geliştirilmesi ve başlatılmasında araştırmanın önemini belirler. Uygun bir giderim yönteminin seçilmesindeki en büyük zorluk, borun suda birkaç kimyasal bileşikte olması ve konsantrasyonunun yerden yere göre değişmesidir (Wolska ve Bryjak, 2013). Atık sulardan B konsantrasyonunu azaltmak için birçok yöntem vardır. Bunlardan bazıları; adsorpsiyon, elektrodiyaliz, hidrotermal mineralizasyon, kimyasal çöktürme, ters osmoz ve nanofiltrasyon, organik çözücülerle ekstraksiyon ve termal yöntemlerdir (Demirçivi, 2008). Yapılan araştırmaların ışığında B giderim yöntemleri ve verimleri Tablo 2-4'de gösterilmiştir.

Tablo 4

Bazı B giderim araştırmaları ve verimleri (Sönmez, 2014)

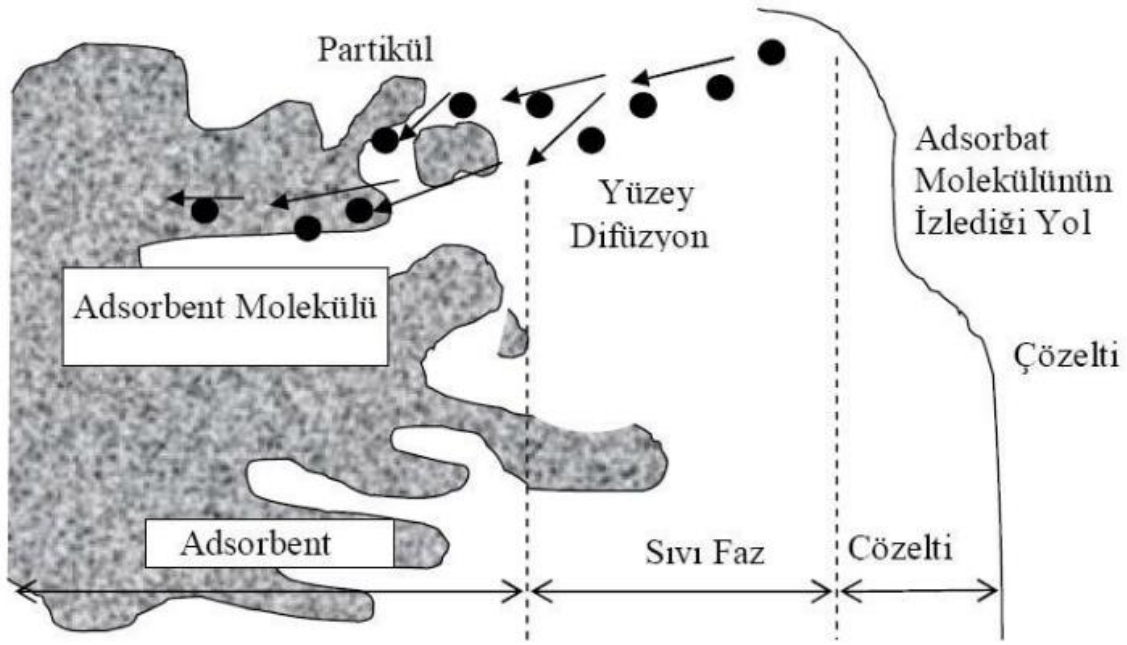
Yöntem	**Araştırma Parametreleri**	**Verim**	**Referans**
Kimyasal Koagülasyon (KK) + Eektrokoagülasyon (EK)	B= 500-1000 mg/L, optimum pH= 8	KK ile % 24 EK ile % 94	Yılmaz vd., 2007
Elektrokoagülasyon	B= 100-1000 mg/L, optimum pH= 8, sıcaklık 25 °C	% 97	Yılmaz vd., 2005
İyon Değişimi	B= 600 mg/L, optimum pH= 8, sıcaklık 25 °C, Reçine türü: Dowex 2x8 anyon değiştirici reçine	% 50	Öztürk ve Köse, 2008
Adsorpsiyon	B= 10 ppm, optimum pH= 10, sıcaklık 25 °C, denge zaman = 24 saat, adsorban madde ve miktarı; Uçucu kül (UK) 100 g/L, zeolit (Z) 50 mg/L, demineralize linyit (DL) 50 mg/L	UK ile > % 90 Z ile < % 20 DL ile < % 20	Yüksel ve Yürüm, 2010
Adsorpsiyon	B= 10-200 mg/L, optimum pH= 7, sıcaklık 25 °C, denge zamanı = 20 dakika, adsorban madde ve miktarı: nötralize edilmiş kırmızı çamur 6 g/L	% 90	Çengeloğlu vd., 2007
Ters Osmoz	B = 24.8 ve 9.4 mg/L, optimum pH= 11, sıcaklık 34 °C	% 99	Çengeloğlu vd., 2008
Ters Osmoz	B = 5 mg/L, optimum pH= 9 sıcaklık 21,9 °C	% 69	Öztürk vd., 2008

2.7.1. Adsorpsiyon

Boru, sulu çözeltiden ayırmanın en etkili yöntemi adsorpsiyon tekniğidir. Çünkü işlem gereksinimleri basittir ve düşük B konsantrasyonlu sulu ortamda kullanılabilir. B adsorpsiyonunda çeşitli sorbentler, polisakkaritler, oksitler, sentezlenmiş kil ve uçucu kül üzerinde gerçekleştirilebilir (Wang vd., 2014).

Adsorpsiyon işleminde, yığın sıvıdan (sıvı veya gaz) gelen moleküller tercihen katı bir yüzeye bağlanır. Bu yüzey olayları herhangi bir katı-akışkan ara yüzünde meydana gelebilir. Katı faza adsorban denir. Adsorban üzerinde adsorbe edilmiş durumda olan bileşene adsorplanan denir. Artık, radikal olarak iyileştirilmiş özelliklere sahip yeni adsorbanlar sürekli olarak üretilmektedir. Bu durum ayırma sürecinin maliyetini düşürmeyle sonuçlanabilir. Adsorpsiyonun en yaygın güncel uygulamaları; sıvı ve gaz karışımlarının, dökme kimyasalların, izomerlerin ve havanın ayrılması ve saflaştırılmasıdır. Adsorpsiyon, adsorban yüzey ile adsorbat molekülleri arasında var olan çekici kuvvetler sayesinde oluşur. Çekici kuvvetlerin temel türleri van der Waals kuvvetleri, elektrostatik kuvvetler ve kimyasal bağlanmadır (Venkatesan, 2013).

Adsorpsiyonda sıvı içinde çözünmüş moleküller bu işlem sırasında adsorban ile tutularak çözeltiden uzaklaştırılır. Sıvının içindeki büyük moleküller, adsorbanın gözeneklerindeki geniş yüzeylere tutunur. Adsorban maddeye olan çözünmüş maddelerin akışı, çözeltideki çözünmüş maddenin adsorplanan madde konsantrasyonuyla dengeye gelene kadar sürer. Denge halinde çözünmüş maddenin transferi durarak kararlı hal oluşur (Sönmez, 2014). Adsorbent içindeki ve yüzeyindeki partikül ve film difüzyonu Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Adsorbent içindeki ve yüzeyindeki partikül ve film difüzyonu (Baran, 2012)

Adsorpsiyon işlemini etkileyen önemli bazı parametreler bulunmaktadır. Bunları; yüzey alanı, adsorban ile adsorplanan maddenin cinsi ve özellikleri, temas süresi, sıcaklık ve pH şeklinde sayabiliriz. Adsorbanın yüzey alanı arttıkça adsorplanan madde miktarı da artar. Adsorplama ile temas süresi göz önüne alındığı zaman, başlangıçtaki yüksek yüzey alanı sayesinde adsorplama miktarı artar. Ancak süre ilerlediği zaman azalan yüzey alanı sebebiyle adsorban miktarı azalır ve bu durum da adsorplama oranı düşmeye başlar. Eğer adsorbanların gözenek boyutu büyük veya çoksa denge noktasına daha geç ulaşılır. Adsorpsiyon işleminde sıcaklık ile süreç ekzotermik ya da endotermik olarak gözlenir. Genellikle sıcaklığın artışıyla reaksiyon hızı da artar. Sıcaklık önemli bir parametre olup adsorplama hızını ve miktarını da etkiler. pH parametresine bakacak olursak H^+ ve OH^- iyonlarının kuvvetli adsorplanmaları ile diğer iyonların adsorpsiyon işlemi çözeltinin pH değerinden etkilenir. Ortamda hidrojen ya da hidroksil iyonundan fazla bulunması halinde bu iyonlar, adsorplanan madde iyonları ile yüzeye tutunma rekabetine girmesiyle daha az adsorpsiyona sebep olabilir (Sönmez, 2014).

2.8. Mikrodalga Enerjisi

Mikrodalga ışıması, 0,3 ile 300 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik ışımadır. Dalga boyları 0,001 ile 1 m arasında olan kızılötesi dalgalar ile radyo dalgaları arasındaki elektromanyetik spektrumda bulunurlar. Ev uygulamaları için onaylanmış ticari mikrodalga fırınlar, telekomünikasyon ve cep telefonu frekanslarıyla etkileşimi önlemek için 2,45 GHz frekansında çalışır. Bildirilen mikrodalga kimyası deneylerinin çoğu 2450 MHz'de (karşılık gelen dalga boyu 12,24 cm) gerçekleştirilmiştir (Gude, vd., 2013).

Konvansiyonel ısıtmada, numune hacmine aktarılan ısı, kabın yüzeyinin sıcaklığını ve ardından iç malzemelerin sıcaklığını arttırmak için kullanılır. Buna "duvardan ısıtma" da denir. Geleneksel enerji kaynağıyla sağlanan enerjinin büyük bir kısmı, malzemelerin iletimi ve konveksiyon akımları yoluyla çevreye gider. Mikrodalgalar, bir enerji kaynağı olarak, moleküler yapıyı değiştirmeden moleküler düzeyde malzemelerle etkileşime girerek ısı üretirler. Mikrodalga ısıtma, temassız ısıtma (malzeme yüzeylerinin aşırı ısınmasının azaltılması) ısı transferi yerine enerji transferi (nüfuz edici radyasyon), azaltılmış termal gradyanlar, malzeme seçici ve hacimsel ısıtma, hızlı başlatma ve durdurma gibi geleneksel ısıtmaya göre çeşitli avantajlar sunmaktadır (Gude, vd., 2013).

Mikrodalga fırında, mikrodalgalar magnetron denilen bir güç kaynağı tarafından üretilir. Bu güç kaynağı, mikrodalga fırında pişirilen yiyecekler tarafından emilen mikrodalgalar yayar. Magnetronun ürettiği mikrodalgalar küçük bir anten ile dağıtıcılar vasıtasıyla fırın boşluğuna taşınır. Mikrodalga fırının içinde üretilen elektromanyetik alan, yiyecek içindeki su ve iyonlar gibi polar moleküllerin dönmesini ve çarpışmasını sağlar. Su molekülleri ile temsil edilen gıdanın içindeki ana moleküler dipol, gıdanın içinde çok hızlı döner (saniyede yaklaşık 2450 milyon kez). Mikrodalga ve madde arasındaki etkileşimin, polar olmayan moleküllerin moleküler polarizasyonu ve ardından dipolün dönüşü olduğu iyi bilinmektedir. Bu durumun sonucunda, mikrodalgaların frekansını takiben sürtünmeden dolayı ısı ortaya çıkar ve böylece sıcaklık artışı olur. Bir madde tarafından emilen mikrodalgaların miktarı esas olarak malzemenin özelliklerinin yanı sıra her bir ışınımın ışınım sürelerine ve enerji yoğunluğuna bağlıdır. Sabit bir mikrodalga frekansı olan bir mikrodalga fırın için, sabit bir zamandaki ışınım sürelerinin sabit olduğu düşünülebilir. Böylece her bir ışınımın enerji yoğunluğu ve malzemenin özellikleri, emilen mikrodalgaların miktarını etkileyen ana faktörler haline gelir. Ancak, ışınımın enerji

yoğunluğu malzemenin özellikleriyle ters orantılıdır (Calabro ve Magazu, 2012; Ma vd., 2009). Mikrodalga enerjisinin kullanım alanları Tablo 5'te detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 5

Mikrodalga enerjisinin kullanım alanları (Doğan, 2019)

Kullanım Alanı	**Kullanım İçerikleri**
Gıda endüstrisi	Pişirme, kurutma, haşlama-pastörizasyon, sterilizasyon, buz çözme vb.
Metalürji endüstrisi	Kavurma, ergitme, asit ile mineralin ekstraksiyonu, oksit minerallerin karbotermik indirgenmesi, minerallerin öğütülmesi vb.
Çevre alanında	Kirletilmiş katıların temizlenmesi, hastane, nükleer ve fabrika atıklarının işlenmesi, minerallerin işlenmesi ve aktif karbonun rejenerasyonu vb.
Seramik endüstrisi	Termal gerilim, kirliliklerin giderilmesi, sinterleşme ve kurutma işlemleri vb.
Kâğıt sanayisi	Kurutma amaçlı
Tekstil endüstrisi	Kurutma, ağartma ve boyama amaçlı
Maden alanında	Cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemlerinde
Çimento sanayisi	Çimentonun iyileştirilmesinde, beton ve kayaların kırılmasında
Kimya alanında	Tuzlar, kuru biyolojik malzemeler, boyalar, seramik ve porselen, mermer, deri, elyaf, boyanmış kumaş, selüloz mamuller, kimyasal reaksiyonların hızlandırılması vb.

Mikrodalga ile ısıtma ve geleneksel ısıtma ile adsorpsiyon seçiciliği üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Adsorban üretim prosesinde yüksek verim ve enerji tasarrufu amacıyla umut vaat eden yöntem kullanılarak araştırma yapılmıştır. Adsorpsiyonda, mikrodalgadan avantajlı kullanımını öngörmede iyi bir yöntem olduğu desteklenmektedir. Yapılan bir çalışmada, yüzey alanının iyileştirilmesi, gözenek dağılımı, saflık ve Metilen Mavisi adsorpsiyon kapasitesinin geliştirilmesi amaçlanarak mikrodalgalardan

faydalanılmıştır. Geleneksel yönteme göre kısa sürede homojen ısıtma sağlaması ve ısı iletimi olmadan hızlı hacimsel ısıtma yapması nedeniyle mikrodalga ile ısıtma tercih edilmiştir. Mikrodalga ısıtması kullanılarak adsorpsiyonun kapasitesi ve verimini arttırmak amaçlanmaktadır. Adsorbentlere mikrodalga ışıması olduğunda gözenek yapısının iyileşebilmesi ve spesifik yüzey alanını arttırabilmesi mümkündür (Doğan, 2019).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tuzla Jeotermal Alanı

Tuzla jeotermal alanında 2 jeotermal enerji santrali, 1 jeotermal tesis ve onlarca doğal jeotermal çıkış bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan jeotermal akışkan örnekleri Tuzla jeotermal alanındaki bir jeotermal kaynaktan temin edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Örnekleme yapılan Tuzla jeotermal kaynağı

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, 27 Ağustos 2019 tarihinde jeotermal akışkanın fizikokimyasal parametreleri (sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik ve tuzluluk) arazide kaynak başında WTW 340i multiparametre ölçer ile ölçülmüştür. Kullanılacak tüm

ekipmanların ölçüm öncesinde kalibre edilmesine dikkat edilmiştir. Tuzla jeotermal kaynağının yüzey sıcaklığı 92,2 °C, pH'ı 8,07, elektriksel iletkenlik değeri 76,1 mS/cm ve tuzluluk değeri % 56 olarak ölçülüp Tablo 6'da verilmiştir. Bu kapsamda çoklu parametreli ölçere ait proplar ölçüm öncesi saf su ile yıkanarak temizlenmiş, tampon solüsyonları ile kalibrasyonları yapılmıştır.

Tablo 6

Tuzla jeotermal kaynağının fizikokimyasal parametreleri

x (m)	**y (m)**	**İletkenlik (mS/cm)**	**Tuzluluk (‰)**	**pH**	**Sıcaklık (°C)**	**Bor (mg/L)**
429471	4380090	76,1	56	8,07	92,2	10,3

Su örnekleme için ilk kez kullanılan sert plastik su kapları sahaya götürülmüştür. Suların örneklemesi sırasında, örnek kapları doldurulmadan önce örnekleme yapılan sularla üç kez çalkalanmıştır. Tüm örnekler su kabında hava kalmayacak şekilde doldurularak buzdolabında saklanmıştır (+4 ºC).

3.2. 18 Mart Çan Termik Santrali

Toplam dünya kömür rezervinin yaklaşık % 2,1'i Türkiye'de bulunmakta olup, linyit açısından önemli bir yere sahiptir. Linyitlerin % 79'unun 2500 kcal/kg ısıl değerin altında olması daha çok termik santrallerde kullanımını ön plana çıkartmıştır. Son yıllarda gerçekleştirilen linyit üretiminin % 85'i termik santrallerde tüketilmektedir. 2019 yılında linyite dayalı termik santrallerin kurulu gücü 8,515 MW olup, bu güç toplam kurulu gücün % 23,6'sına karşılık gelmektedir (MTA, 2021a).

Uçucu kül, kömür yakıtlı termik santrallerde ortaya çıkan endüstriyel bir atıktır. Kullanılan kömürün karakterizasyonu, öğütülme tekniği, yakma ünitesi ve elektrostatik toz tutucu içindeki ayırma gibi prosesler uçucu küllerin karakterizasyonunun değişkenlik göstermesine sebep olur. TÜİK verilerine göre Türkiye'de 2018 yılında termik santrallerde yaklaşık 23,4 milyon ton uçucu kül oluşmuş, % 87,5'i kül dağı, kül barajı veya düzenli

depolama tesislerinde bertaraf edilirken % 12,4'ü lisanslı atık işleme tesislerine gönderilmiş ve maden/taş ocaklarının geri doldurulmasında kullanılmıştır (TÜİK, t.y.).

100 milyon tondan fazla linyit rezervi bulunan Çan kömür havzası Türkiye'nin kuzeybatısında Çanakkale ilinde yer almaktadır (MTA, 2021a). Erken-Orta Miyosen yaşlı Çan formasyonu (Hazarfen, 1976) linyitleri yüksek kükürt oranı ve düşük kalorifik değeri ile karakteristiktir (Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017). Çan ilçe merkezinde bulunan kömür ocağı 1970'li yıllardan beri açık ocak madenciliği ile TKİ Kurumu Çan Linyitleri İşletmesi tarafından işletilmektedir.

18 Mart Çan termik santrali Çan ilçesine bağlı Kulfal ve Yaya köyleri arasında bulunmaktadır (Şekil 10). Santral sahası toplam alanı kül stok sahası ile birlikte toplam 160 ha'dır (Şengüler, t.y.). Santralin kapasitesi 2x160 MW olup, Türkiye'deki ilk akışkan yataklı termik santraldir. Termik santralde Çan formasyonu linyitleri kullanılmaktadır, santral 2600 kcal/kg ısıl değere sahip linyit için planlanmıştır. Günlük 590 bin konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek elektrik üretimi yapmaktadır (“18 Mart Çan Termik Santrali”, t.y.).



Şekil 10. 18 Mart Çan termik santralinden görünüm

3.2.1. Uçucu Kül

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında kullanılan uçucu kül 18 Mart Çan termik santralinden temin edilmiştir. Uçucu külün tane boyut dağılımı Mastersizer 3000 PSA Hydro (Malvern Panalytical) markalı lazer difraksiyonu partikül boyut analiz cihazı ile Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Kimya Bölümü Polimer laboratuvarında belirlenmiştir. Uçucu külün spesifik yüzey alanı sıvı azot ortamında azot gazı adsorpsiyonu tekniğine dayalı olarak Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Quadrasorb SI, Quantachrome) yöntemi ile belirlenmiştir. Uçucu külün kristal yapısını ve elemental içeriği termal alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) (JEOL JSM-7100F) ve X-ışını spektroskopisi (EDX) (Oxford Instruments X-Max) analizleri ile saptanmıştır. BET ve SEM-EDX analizleri Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yaptırılmıştır. Uçucu külün mineralojik bileşimi X-ışını kırınım (XRD) Philips PW 1830 Ni filtreli Cu X-ışın tüplü cihazı ile Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Mineraloji ve Petrografi Araştırma Birimi'nde yaptırılmıştır. Uçucu külün majör ve iz element bileşimi $LiBO_2$ füzyon metodu ve STD SO-18 standart materyali kullanılarak indüktif olarak eşleştirilmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) (PerkinElmer NexION 2000) ile Bureau Veritas laboratuvarında saptanmıştır.

3.3. Laboratuvar Çalışmaları

Deneysel çalışmada ilk adımda Tuzla jeotermal akışkanının B konsantrasyonu saptanmıştır. Adsorban olarak uçucu kül, zeolit ve kireçtaşı kullanılmıştır. Zeolit, B giderimi yapmadığı için deneylerde uçucu kül ile devam edilmiştir. Jeotermal akışkan ve uçucu kül ile hazırlanan çözeltinin en uygun giderim verimini bulmak için birçok parametre üstünde deneyler yapılmış, farklı parametrelerin B giderimi üzerine etkileri incelenmiştir. Bu aşamalarda NaOH (sodyum hidroksit), H_2SO_4 (sülfürik asit), H_3PO_4 (fosforik asit) kimyasalları kullanılmıştır. Adsorpsiyon deneylerinde adsorban olarak uçucu kül ve mikrodalga ışınım deneylerinde ise kireçtaşı kullanılmıştır. Parametreler üzerinde çalışırken hazırlanan çözeltiler filtre kâğıdından süzülerek berrak kısımda B belirleyici B Test Kiti kullanılmıştır. Sonrasında B konsantrasyonu, UV Spektrofotometre cihazı

kullanılarak Karmin metoduna göre analiz edilmiştir. Adsorpsiyon deneylerinde çalkalamalı su banyosu cihazı kullanılmıştır. Mikrodalga ışınım deneylerinde Arçelik marka ev tipi mikrodalga fırından faydalanılmıştır.

3.3.1. Adsorpsiyon Deneyleri

Laboratuvar çalışmalarına ilk önce adsorpsiyon yöntemi ile başlanmıştır. Adsorban olarak uçucu kül ve zeolit kullanılmıştır. Jeotermal akışkanın başlangıç B konsantrasyonu 10,3 mg/L olarak bulunmuştur. B analizleri, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında spektrofotometre (Hach Lange DR 5000) ile Karmin Yöntemine göre yapılmıştır. Bu yöntem için sülfürik asit ve B test kitleri kullanılmıştır. Ön deneme olarak uçucu kül ve zeolit için 0,5 g adsorban ve 50 ml jeotermal örnek 25 °C'de su banyosunda 24 saat 140 rpm'de çalkalanarak temasta tutulmuştur. 24 saat sonunda örnekler filtre kâğıdından süzülerek berrak kısımda B analizi yapılmıştır. Çözeltide kalan B konsantrasyonu uçucu kül için 4,7 mg/L zeolit için ise 10 mg/L olarak bulunmuştur. Sonuçlara göre zeolitin kil içeriğinden dolayı sudan boru hiç gidermediği tespit edilmiş ve çalışmalara uçucu kül ile devam edilmiştir. Jeotermal akışkanın Al, Fe ve Zn konsantrasyonları sırasıyla 0,028, 13,375 ve 0,324 mg/L'dir.

pH'ın Etkisi

Çözeltinin başlangıçtaki pH değişiminin B giderimine etkisi çalışılmıştır. Farklı başlangıç pH değerlerinde denemeler yapılmıştır. Bu amaçla 50 mL jeotermal akışkan ve 0,5 g uçucu kül ile karıştırılarak H_2SO_4 ve NaOH (1 M ve 0,5 M) çözeltileriyle 2, 4, 6, 8, 9, 10 ve 12 değerlerine ayarlanmıştır. Farklı pH'lardaki çözeltiler su banyosunda 25 °C'de 24 saat çalkalanmıştır. Sonrasında filtre kâğıdından süzülen berrak kısımdan numuneler alınıp analiz edilerek UV spektrofotometre cihazında B konsantrasyonu saptanmıştır.

Adsorban Dozunun Etkisi

Optimum başlangıç pH'nı belirledikten sonra adsorban dozunun etkisi çalışılmıştır. Bu amaçla jeotermal akışkanın pH'ı 4'e ayarlanarak 0,25, 0,5, 0,7, 0,8, 0,9, 1,25 ve 2,5 g uçucu kül 50 mL suya ilave edilmiştir. 25 °C ve 140 rpm hızda 24 saat su banyosunda çalkalanmıştır. 24 saatin sonunda örnekler filtre kâğıdından süzülerek, berrak kısımdan alınan numuneler ile UV spektrofotometre ile B konsantrasyonu belirlenmiştir.

Adsorpsiyon İzoterm Modelleri

Jeotermal akışkandan B gideriminde uygun izoterm modelini belirlemek için farklı uçucu kül dozları ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere Freundlich, Langmuir ve Dubinin- Radushkevich izoterm modelleri uygulanmıştır.

Temas Süresinin Etkisi

Temas süresinin B adsorpsiyonuna etkisini gözlemlemek için 2,5 g adsorban, 20 °C'de pH 4'te çalışılmıştır. Bu amaçla hazırlanan çözelti 30, 60, 120, 180, 240, 300, 420 ve 960 dakika boyunca temas süresine tabii tutulmuştur ve adsorpsiyon sürecine etkisi incelenmiştir.

Kinetik Modeller

Adsorpsiyon kinetiği, adsorpsiyon dengesinin kurulması için gereken zamanı belirleyen teorik temeldir. Bir adsorpsiyonun kütle transferi ve kimyasal tepkime gibi mekanizmalarını tespit etmek için uygulanan pek çok kinetik model geliştirilmiştir. Bu çalışmada Lagergreen'in yalancı 1. ve 2. dereceden ve tanecik içi difüzyon kinetik modelleri üstünde durulmuştur.

Sıcaklığın Etkisi ve Termodinamik Hesaplamalar

Sıcaklığın borun adsorpsiyon ile giderimi üzerine etkisini belirlemek için üç farklı sıcaklıkta çalışıldı. İlk olarak 25 °C'de 50 mL jeotermal su ve 2,5 g uçucu kül 24 saat çalkalamalı su banyosunda tutuldu. Su banyosundan alınan numuneler süzüldü ve çözeltide kalan B konsantrasyonunu tayin etmek için numuneler UV spektrofotometresinde analiz edildi. Aynı işlemler 35 °C ve 45 °C'de gerçekleştirildi. Farklı sıcaklıklarda elde edilen veriler adsorpsiyon işleminin serbest Gibbs enerjisi (ΔG), entalpi değişimi (ΔH) ve entropi (ΔS) değişiminin hesaplanmasında kullanıldı.

Adsorbanın Tekrar Kullanılabilirliğinin İncelenmesi

Jeotermal sudan B giderimi için kullanılan uçucu külün adsorpsiyon sonrasında kireçtaşı ($CaCO_3$) çözeltisi ile muamele edilerek tekrar kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla 0,5 M ve 1 M derişimlerinde kireçtaşı çözeltileri hazırlanmıştır. Optimum koşullarda yapılan adsorpsiyon işlemi sonunda uçucu kül jeotermal sudan filtrelenerek ayrılmış ve elde edilen uçucu kül numuneleri 100 mL 0,5 ve 1 M kireçtaşı çözeltileri ile 25 °C'de 2 saat çalkalamalı su banyosunda tutulmuştur. Süreç sonunda çözelti filtre kâğıdından süzülerek kâğıt üzerinde kalan adsorban oda koşullarında kurutulmuştur. Daha sonra jeotermal su örnekleri ile adsorban 2. kez adsorpsiyon işlemine tabi tutulmuştur. Süzülerek çözelti fazı analiz edildi ve uçucu kül ise tekrar kireçtaşı çözeltileri ile işleme alınmıştır. Bir döngü adsorpsiyon + kireçtaşı çözeltisi ile işlem + adsorpsiyon uygulamalarından oluşmaktadır.

3.3.2. Mikrodalga Işınım Yöntemi

Mikrodalga ışınım ile jeotermal sudan B giderim denemeleri yapılmıştır. Bu amaçla kullanılan uçucu külün farklı pH'larda ve farklı dozlarda yapılan çok sayıda denemelerinde herhangi bir B giderimi sağlanamamıştır. Bunun üzerine $CaCO_3$ ile denemeler yapılmıştır. 100 mL jeotermal suya 2,5 g $CaCO_3$ ve 1,5 ml H_3PO_4 ilave edilmiştir. H_3PO_4, oluşan kalsiyumborat kristallerinin bozulmamasını sağlamıştır. Bu çözeltinin pH'ları farklı

değerlere ayarlanarak mikrodalga fırında düşük güçte 10 dakika tutulmuş sonrasında numuneler filtre kâğıdından süzülerek süzüntünün analizi yapılmıştır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Uçucu Külün Karakterizasyonu

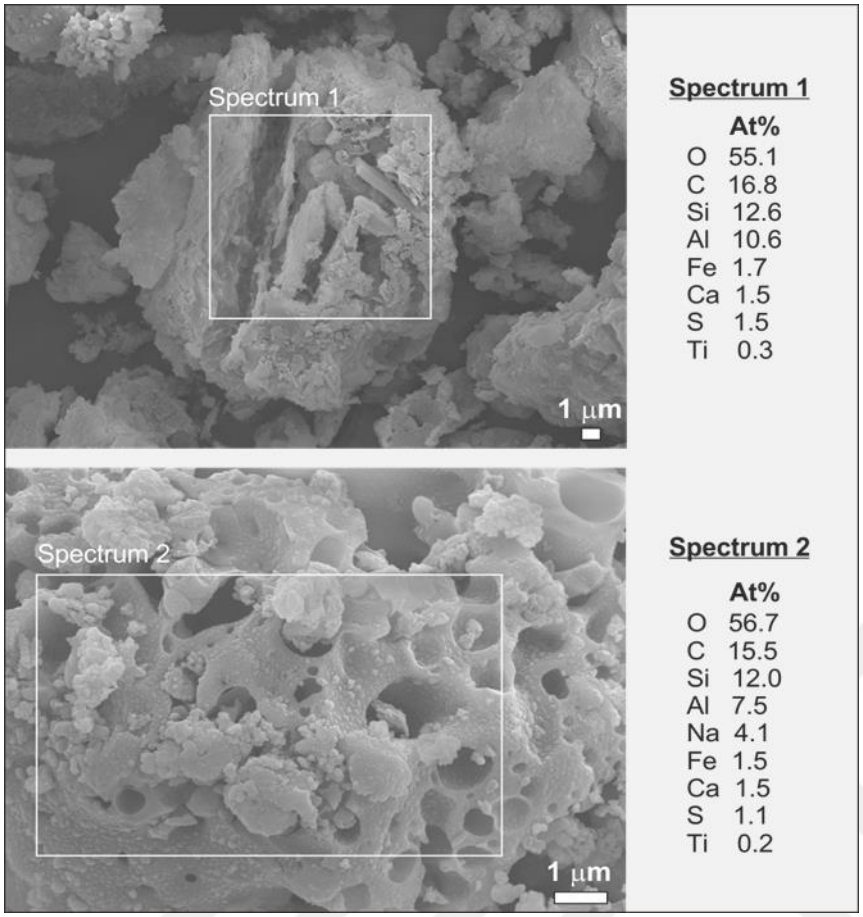
Uçucu külün tane boyutu 1,45 ve 186 μm arasında olup, yüzey alanı 14,6 m^2/g'dır. Başlıca bileşenleri SiO_2 (% 32,16), CaO (% 29,05), $A1_2O_3$ (% 19,22) ve Fe_2O_3 (% 7,03) olan uçucu külün ateşte zayiatı % 4,7 olup kimyasal bileşimi Tablo 7'de verilmiştir. ASTM C-618'e göre C sınıfı uçucu küldür. Külün toplam kükürt ve karbon içeriği sırasıyla % 5,88 ve % 1,43'dir. Uçucu külün içerdiği metal konsantrasyonu ICP-MS sonuçlarına göre Al> Fe> Mn> Zn> Cr> Cu> Pb> Co> Ni olarak saptanmıştır. Uçucu külün mineralojik bileşimi anhidrit, kireç, hematit, kristobalit, kuvars, kalsit ve feldspat minerallerinden oluşmaktadır. SEM analizlerinde uçucu kül düzensiz şekilli, köşeli taneli ve yer yer mikro gözenekli yapıdadır (Şekil 11). EDX analizleri ile uçucu külün O, C, Si, Al, Fe, Ca, S, Na ve Ti elementlerinden oluştuğu belirlenmiştir.

Tablo 7

Uçucu külün kimyasal bileşimi

Bileşenler	**Birim**	**Uçucu kül**	**Kıtasal Kabuk***
SiO_2	wt.%	32,16	59,3
Al_2O_3		19,22	15,36
CaO		29,05	5,08
Fe_2O_3		7,03	7,15
K_2O		0,66	3,12
MgO		0,57	3,47
MnO		0,13	0,01
Na_2O		0,49	3,81
P_2O_5		0,24	0,25
TiO_2		0,55	0,73
A.Z.		4,7	-
Toplam		94,8	98,28
S		5,88	0,026
C		1,43	0,02
Ba	mg/kg	398	425
Cd		0,1	0,2
Co		17,7	25
Cr		40,2	100
Cu		30,3	55
Ni		15,6	75
Pb		12,3	12,5
Zn		55	70

**Krauskopf ve Bird (1995), A.Z. = Ateşte zayiat*



Şekil 11. Uçucu külün SEM görüntüsü ve EDX sonuçları

4.2. Deneysel Veriler

Jeotermal sudan adsorpsiyon ile B giderim deneyleri yapılmıştır. Adsorpsiyon ile B giderimine etki eden parametreler incelenmiş olup elde edilen deneysel sonuçlar izleyen bölümlerde verilmiştir.

4.2.1. pH'ın Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler

Başlangıç pH değerinin B giderimine etkisini gözlemek için 25 °C'de 24 saat temas ile elde edilen sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Artan pH ile giderim ilk başta yükselmiş ve

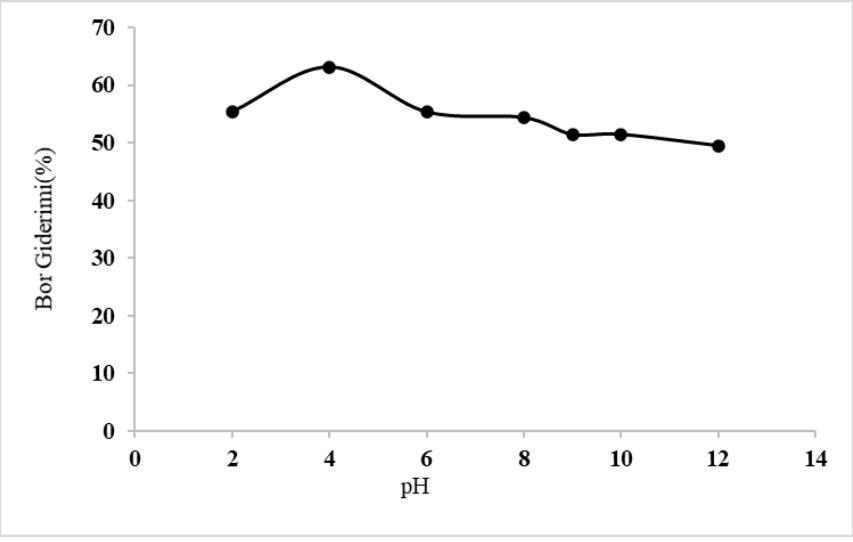
sonrasında giderim düşerek hemen hemen aynı değerlerde kalmıştır. pH_{son} değerleri hepsinde 12 civarlarında olup iletkenlik değerleri de 90 civarlarında ölçülmüştür.

Tablo 8

Başlangıç pH'ın B giderimine etkisi (0,5 g adsorban, 50 mL jeotermal kaynak, 25 °C, 140 rpm ve 24 saat temas süresi)

pH	**C (mg/L)**	**Giderim (%)**	**pH_{son}**	**İletkenlik (mS/cm)**
2	4,6	55,34	12,9	87,6
4	3,8	63,11	12,23	85,9
6	4,6	55,34	12,33	90
8	4,7	54,37	12,01	88,3
9	5	51,46	12,39	90,4
10	5	51,46	12,49	90,6
12	5,2	49,51	12,61	90,7

Şekil 12'de de görüldüğü üzere en yüksek B giderimi pH 4'de elde edilmiştir. Bundan dolayı diğer parametrelerde pH 4 değeri ayarlanarak çalışılmıştır.



Şekil 12. Artan pH ile % B giderimi

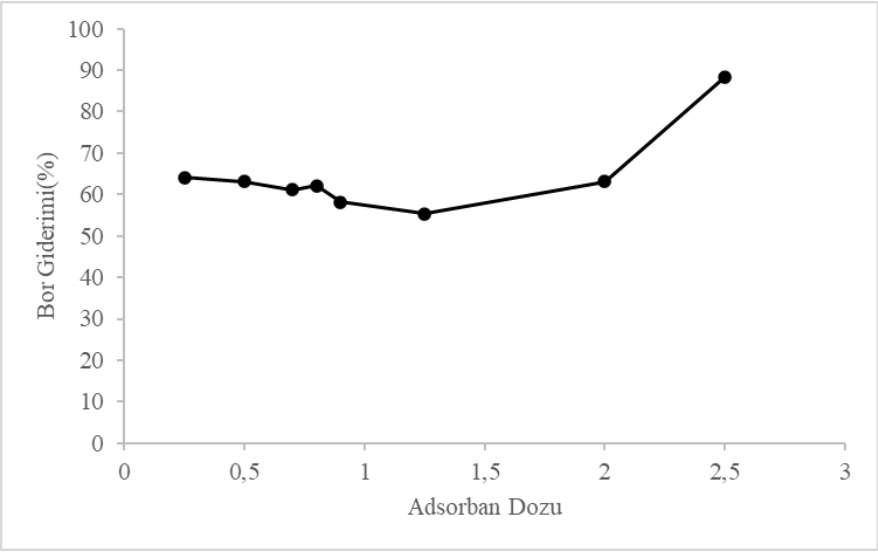
4.2.2. Adsorban Dozunun Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler

Adsorban dozunun B giderimine etkisi 25 °C'de 24 saat temas süresine tabii tutularak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir. Şekil 13'te 2,5 g UK/50mL için en iyi giderim bulunmuştur.

Tablo 9

Uçucu kül dozunun B giderimine etkisi (pH 4, 50 mL jeotermal kaynak, 25 °C, 140 rpm ve 24 saat temas süresi)

Adsorban dozu (g)	**C (mg/L)**	**Giderim (%)**	**pH_{son}**	**İletkenlik (mS/cm)**
0,25	3,7	64,08	12,03	73,6
0,5	3,8	63,11	12,23	85,9
0,7	4	61,17	12,3	77,5
0,8	3,9	62,14	12,42	78,3
0,9	4,3	58,25	12,44	78,4
1,25	4,6	55,34	12,49	79
2,5	0,6	94,17	12,55	83,8



Şekil 13. Artan adsorban dozunun % B giderimine etkisi

4.2.3. Adsorpsiyon İzoterm Modellerinin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler

Langmuir modeline göre, sorbent yüzeyinde sabit sayıda aktif sorpsiyon merkezi vardır ve bu merkezlerin hepsi aynı enerji düzeyindedir. Sorplanan bileşenler sorbent yüzeyinde doygun tek bir tabaka oluşturur. Ayrıca bu modele göre sorpsiyon dengesi dinamik bir dengedir ve yüzeye tutunmuş moleküller birbirleriyle etkileşim göstermezler. Sorpsiyon ısısına bağlı olarak değişen heterojen yüzey enerjileri için Freundlich modeli tanımlanmıştır. Bu model Langmuir sorpsiyon eşitliğindeki enerji ile ilgili terimin (Qo), yüzey örtüsünün (q) bir fonksiyonu olarak değiştiği özel bir durumu ifade eder.

Üç izoterme ait denklemler aşağıda verilmiştir.

Langmuir izotermi

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_o b} + \frac{C_e}{Q_o} \qquad (1)$$

C_e: Denge derişimi, mg/L

q_e: Denge anında birim adsorban başına adsorplanan miktar, mg/g

Q_0: Maksimum sorpsiyon kapasitesi, mg/g

b: Sorpsiyon denge sabiti, l/mg

Freundlich izotermi

$$log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \qquad (2)$$

q_e: Denge anında birim sorban başına sorplanan miktar, mg/g

k: Sorpsiyon kapasitesi ile ilgili sabit, mg/g

n: Sorpsiyon şiddeti ile ilgili sabit, l/g

Dubinin–Radushkevich izotermi

$$lnq_e = lnq_s + B\varepsilon^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon = RTln\left[1 + \frac{1}{C_e}\right] \quad (4)$$

C_e = Sorblama sonrası çözeltide kalan maddenin derişimi (mg/dm^3)

ε = Polanyi potansiyeli

q_s = Sorbantın maksimum kapasitesi

B = D-R izotermi sabiti

R = Evrensel gaz sabiti (8,314.10^{-3} kJ/mol.K)

T = Sıcaklık (K)

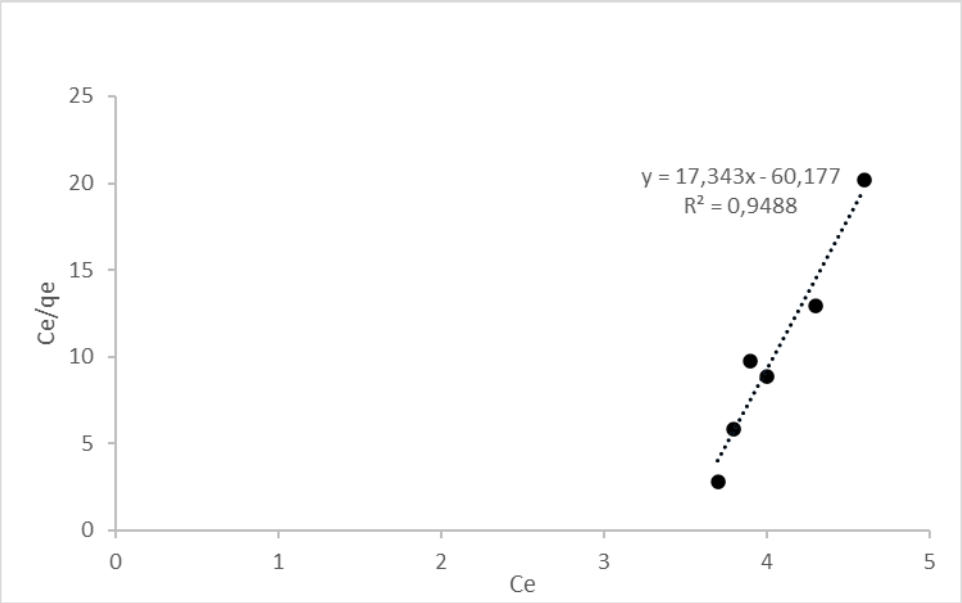
Verilen izoterm formülleri ışığında, üç izoterm model için hesaplanan izoterm sabitleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10

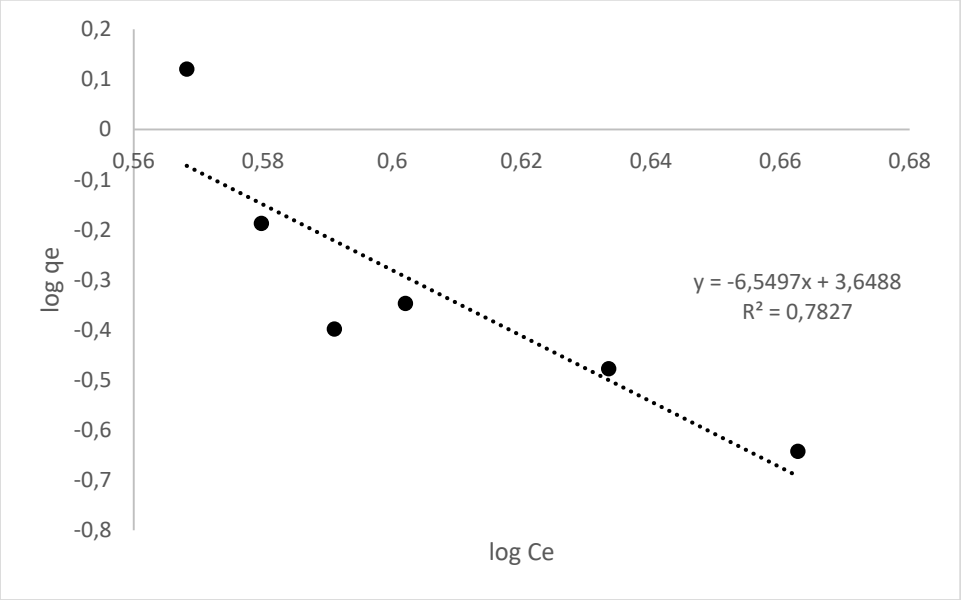
İzoterm sabitleri

	Q_o (mg/g)	**b (L/mg)**	**R^2**
Langmuir izotermi	0,058	-0,286	0,95
	K (mg/g)	n (1/g)	R^2
Freundlich izotermi	4365	-0,15	0,78
	q_s (mg/g)	B (mol^2/kJ^2)	R^2
D-R izotermi	1,7x10^{-8}	-2x10^{-6}	0,80

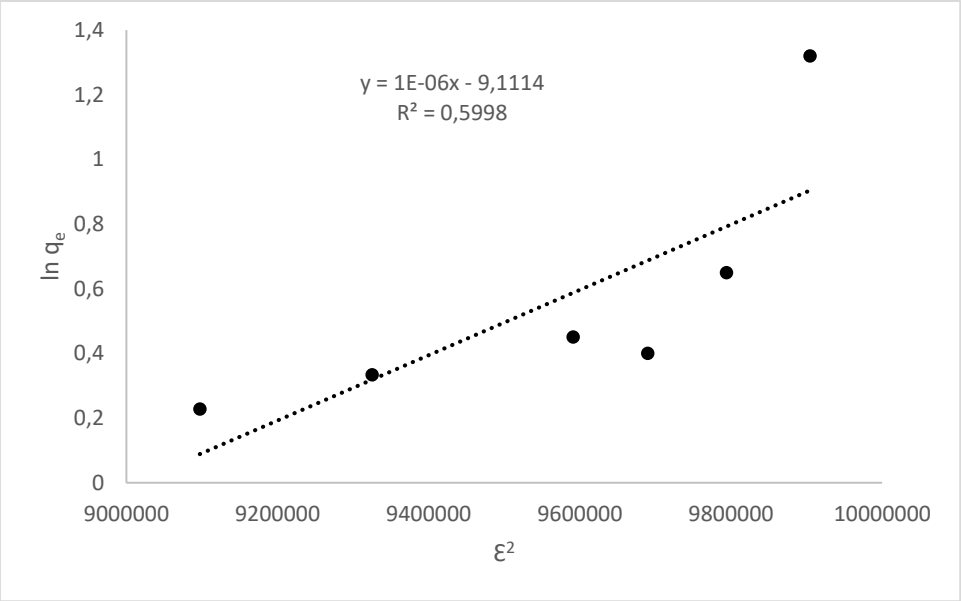
Şekil 14, 15 ve 16'da regresyon katsayısına göre (R^2= 0,95) deneysel verilerin en çok Langmuir izotermine uyduğu görülmüştür. Buna göre uçucu külün üzerinde B'un tek tabaka olarak tutunduğu saptanmıştır.



Şekil 14. Langmuir izotermi



Şekil 15. Freundlich izotermi



Şekil 16. D-R izotermi

4.2.4. Temas Süresinin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler

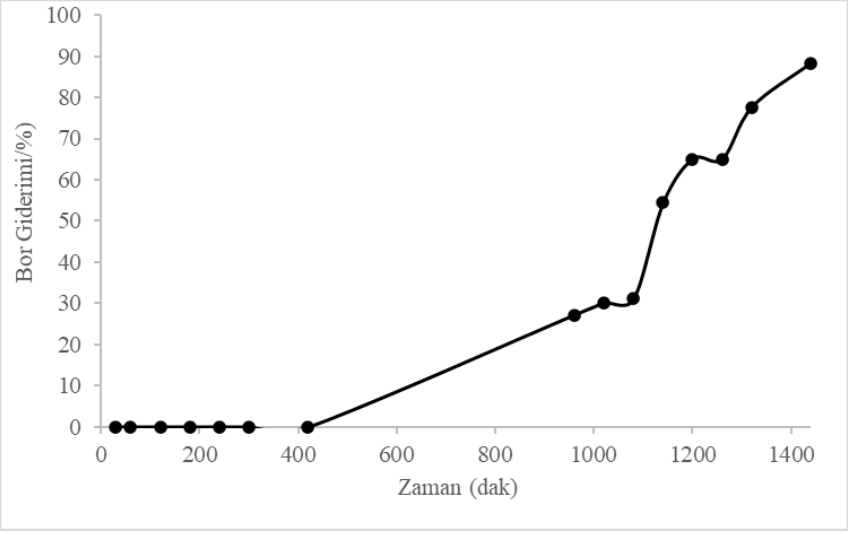
Adsorpsiyonla B gideriminde bir diğer parametre olan temas süresinin etkisi 25 °C'de incelenmiş olup elde edilen veriler Tablo 10'da verilmiştir. Deneylere ilk başta 30 dk ile başlanmış olup 960 dk'ya kadar herhangi bir giderim olmamış olup sonrasında artan süre ile birlikte giderim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Hilal vd. (2011), yaptıkları çalışmada tarım ürünleri için B tolerans limit değerlerine göre 1,2 mg/L B konsantrasyonu birçok tarım ürünü için toksik etkide değildir. En yüksek giderim 1440 dk'da olmuş olup derişim 1,2 mg/L'ye düşünce istenen aralık elde edildiği için daha fazla süre için denenmemiştir.

Tablo 11 ve Şekil 17'de görüldüğü üzere 960. dakikaya kadar herhangi bir giderim olmamıştır. Bu süreden sonra giderim zamana bağlı olarak artmıştır. 24 saatte elde edilen % 88 giderim ile B derişimi 1 mg/L'nin altına düşmüş ve deneylerde daha uzun süreler denenmemiştir.

Tablo 11

Temas süresinin B giderimi üzerine sonuçları

t (dakika)	C (mg/L)	Giderim (%)
0	10,3	0
30	10,3	0
60	10,3	0
120	10,3	0
180	10,3	0
240	10,3	0
300	10,3	0
420	10,3	0
960	7,5	27
1020	7,2	30
1080	7,1	31
1140	4,7	54
1200	3,6	65
1260	3,6	65
1320	2,3	78
1440	1,2	88



Şekil 17. Artan zamanla B giderim grafiği

4.2.5. Kinetik Modellerin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler

Lagergreen'in yalancı birinci dereceden kinetik modeli; adsorpsiyonun hızının adsorban yüzeyindeki boşluk sayısıyla doğrusal olarak orantılı olduğunu öne sürmektedir.

$$log(q_e - q_t) = logq_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (5)$$

q_e ve q_t: Denge anında ve herhangi bir anda t (dk) adsorplanan miktar, mg/g

k_1: Yalancı birinci mertebe adsorpsiyon hız sabiti, dk

Adsorpsiyon hızı ikinci mertebe ise, yalancı ikinci mertebe kimyasal sorpsiyon kinetik hız denklemi şu şekildedir:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

k_2: Yalancı ikinci mertebe hız sabiti, g/mg.dk

Çözeltiden adsorpsiyon yüzeyine ve oradan da difüzyon ile adsorban taneciğinin iç gözeneklerine taşınan çözünen molekülleri için adsorpsiyon çok basamaklı olur. Bu durumda tanecik içi difüzyon modeli aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$q = kt^{1/2} \quad (7)$$

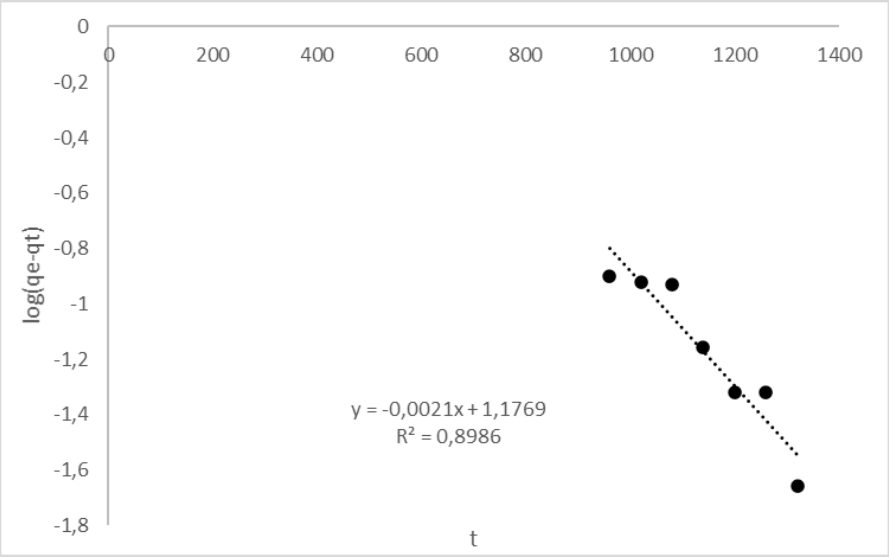
k_i: Tanecik içi difüzyon sabiti (mg/g $dk^{1/2}$)

Formüller ışığında kinetik modeller için hesaplanan sabitler Tablo 12'de verilmiştir.

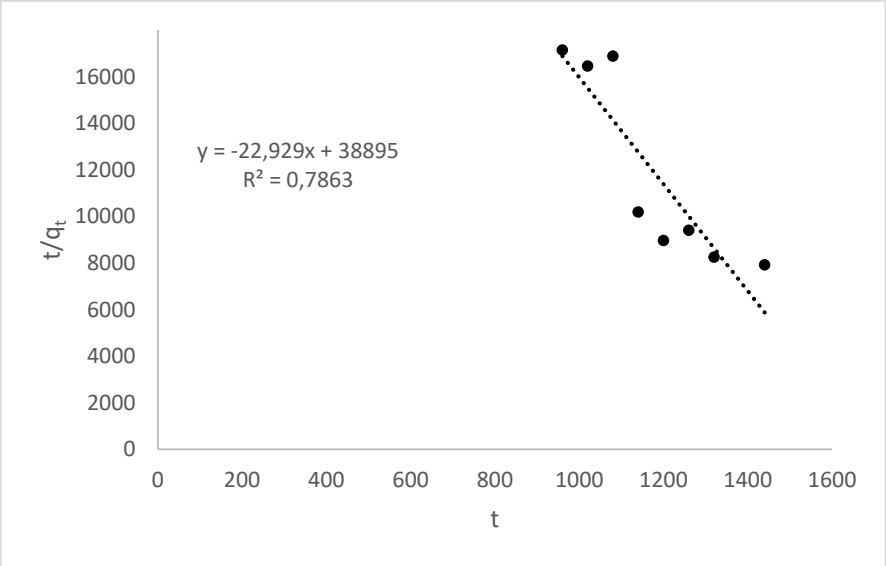
Tablo 12

Kinetik model katsayıları

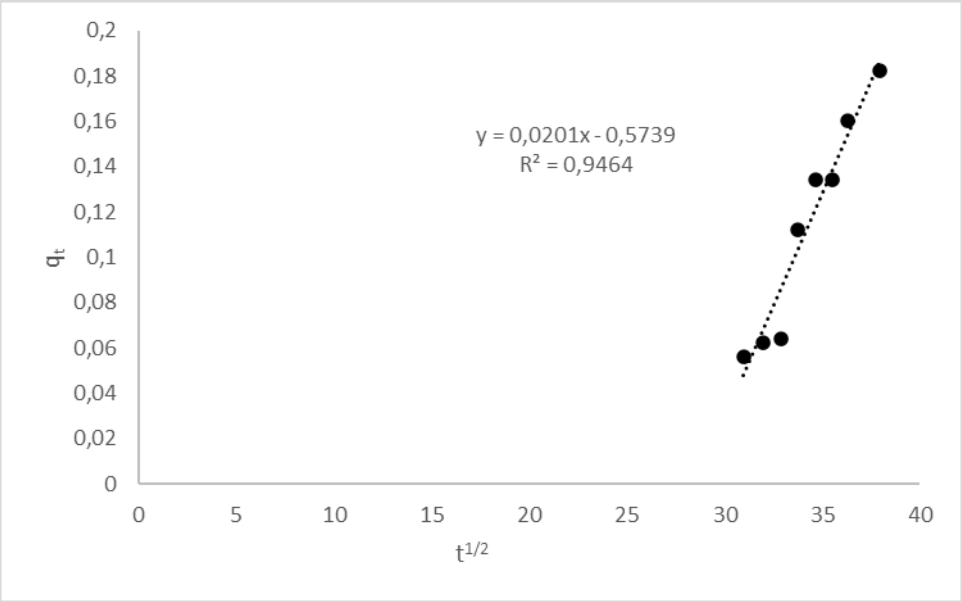
Yalancı birinci derece			**Yalancı ikinci derece**			**Tanecik içi difüzyon**	
k_1 (dk^{-1})	q_e (mg/g)	R^2	k_2(g/mg dk)	q_e (mg/g)	R^2	k_i (mg/g $dk^{1/2}$)	R^2
0,0048	3,24	0,9	0,8902	9,9701	0,78	0,02	0,95



Şekil 18. Yalancı birinci dereceden kinetik modeli



Şekil 19. Yalancı ikinci dereceden kinetik modeli



Şekil 20. Tanecik içi difüzyon modeli

Şekil 18, 19 ve 20'de deneysel verilerin yalancı birinci derece ve tanecik içi difüzyon modeline daha çok uyduğu görülmektedir. Borun adsorpsiyon mekanizmasının fiziksel adsorpsiyon olduğunu ve uçucu külün yüzeyinde ve gözeneklerinde difüzyon taşınımı ile adsorpsiyonun gerçekleştiğini söyleyebiliriz.

4.2.6. Sıcaklığın Etkisi ve Termodinamik Hesaplamaların Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler

Aşağıdaki formüller ΔG, ΔH ve ΔS değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır.

$$\Delta G^o = -RTlnK \tag{8}$$

$$K = \frac{C_s}{C_e} \tag{9}$$

$$lnK = \frac{\Delta S^o}{R} - \frac{\Delta H^o}{RT} \tag{10}$$

K: Denge sabiti

ΔH: Entalpi değişimi, kj/mol

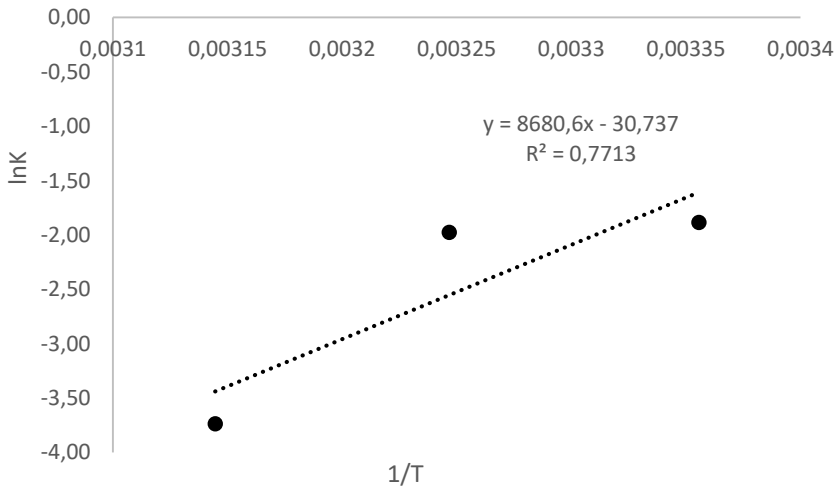
ΔS: Entropi değişimi, kj/molK

ΔG: Serbest Gibbs enerjisi, kj/mol

R: İdeal gaz sabiti, 8,314 j/molK

T: Sıcaklık, Kelvin

Şekil 21'de lnK-1/T grafiği çizilerek grafiğin eğiminden ΔH adsorpsiyon entalpisi ve grafiğin kesim noktasından ΔS adsorpsiyon entropisi hesaplanmıştır.



Şekil 21. Uçucu kül ile B adsorpsiyonu için Van't Hoff grafiği

Termodinamik parametreler Tablo 13'de verilmiştir. 25, 35 ve 45 °C'de elde edilen veriler ile hesaplanan "Serbest Gibbs Enerjisi"; ΔG'ler negatif değer bulunmuştur. ΔG<0 olması adsorpsiyon işleminin kendiliğinden gerçekleştiğinin göstergesidir. Adsorpsiyon entalpi değişimi; ΔH -72,17 kj/mol olarak hesaplanmıştır. Adsorpsiyon ısısı da denilen adsorpsiyon entalpisinin eksi işaretli olması adsorpsiyon olayının daima ısı salan yani ekzotermik olduğunu göstermektedir. Adsorpsiyon ısısı -20 kj/mol civarında olan

etkileşmeler sonundaki tutunmalara fiziksel adsorpsiyon, -200 kj/mol civarında olan etkileşmeler sonundaki tutunmalara ise kimyasal adsorpsiyon denir. Buna göre uçucu kül ile B adsorpsiyonunun fiziksel adsorpsiyon olduğu söylenebilir. Adsorpsiyon işleminde entropi değişimi; ΔS -255,5 j/molK olarak bulunmuştur. Adsorpsiyon işleminde çözelti içinde düzensiz halde bulunan tanecikler katı yüzeyinde tutunarak daha düzenli hale geldiğinden dolayı adsorpsiyon sırasındaki entropi değişimi yani adsorpsiyon entropisi ΔS'de negatif değer bulunmuştur.

Tablo 13

Termodinamik parametreler

T (℃)	**Ce (mg/L)**	**K**	**ΔG° (kJ/mol)**	**ΔH° (kJ/mol)**	**ΔS° (j/mol K)**
25	1,2	0,15	-4,67	-72.17	-255,5
35	1,3	0,14	-5,06		
45	4,7	0,02	-9,87		

4.2.7. Adsorbanın Tekrar Kullanılabilirliğinin Bor Giderimine Etkisinden Elde Edilen Veriler

Bu döngüler sonucunda elde edilen B giderim yüzdeleri Tablo 14'deki gibi bulunmuştur. Sonuçlara göre uçucu kül doğal hali ile % 88 B giderim verimi elde edilirken 1. döngüde 0,5 M $CaCO_3$ çözeltisi ile muamele sonucu B giderimi % 95'lere kadar çıkmıştır. Bunun nedeni adsorpsiyon mekanizmasının yanında adsorban yüzeyinde kalan kalsiyum iyonları ile çöktürme mekanizmasının da etkili olabileceği düşünülmektedir. Ancak 2. döngüde artık uçucu kül kendi özelliğini kaybettiği için hiç B gidermediği bulunmuştur.

Tablo 14

Uçucu külün tekrar kullanılabilirliği

	B Giderimi (%)	
	0,5 M $CaCO_3$ Çözeltisi	**1 M $CaCO_3$ Çözeltisi**
1. Döngü	95	74
2. Döngü	0	0

4.3. Farklı pH'larda Mikrodalga Işınım Deney Verileri

Kireçtaşı kullanılarak pH 5, 8,10,11 ve 13'te hazırlanan çözeltilerden B gideriminin etkisini gözlemlemek için mikrodalga ışınım deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 15'de verilmiştir. Buna göre pH 5 ve 8 değerinde B giderimi olmamış olup sonrasında giderim artarak pH 11 den sonra düşüşe geçmiştir. En yüksek B giderimi pH 11 değerinde elde edilmiştir. Bu çalışma için 100 mL jeotermal suya 2,5 g $CaCO_3$ ve 1,5 mL H_3PO_4 ilave edilmiştir. pH 11'e ayarlandıktan sonra mikrodalga fırında düşük güçte 10 dakika tutulmuştur. Numuneler filtre kâğıdından süzülmüş ve süzüntünün analizi yapılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 16'da verilmiştir. Adsorban dozu 0,5 ve 1 g değerlerinde B giderimi olmamıştır. Sonrasında artan dozla beraber B gideriminde artış gözlenmiş olup en yüksek giderim 2,5 g'da elde edilmiştir.

Tablo 15

Farklı pH'larda mikrodalga ışınım deneyleri sonuçları

pH	**C (mg/L)**	**Giderim (%)**	**pH_{son}**	**İletkenlik (µS/cm)**
5	10,3	0	4,4	124
8	10,3	0	4,3	128,2
10	2,8	72,8	7,2	115
11	1	90	7,75	115
13	1,1	89,3	11,2	113

Tablo 16

Kireçtaşının miktarının B giderimine etkisi

Adsorban dozu (g)	**C (mg/L)**	**Giderim (%)**	**pH_{son}**	**İletkenlik (µS/cm)**
0,5	10,3	0	2,45	131
1	10,3	0	2,51	124,6
1,5	9,5	7,8	3,07	129,4
2	6,6	35,9	4,07	123
2,5	1	90	7,75	115

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında yüksek B konsantrasyonuna sahip Tuzla jeotermal kaynağından adsorpsiyon ile B giderimi ve bu sürece etki edebilecek olan mikrodalga yöntemi uygulanmıştır. Jeotermal akışkandan adsorpsiyon yöntemi ile B gideriminde adsorban olarak 18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri kullanılmıştır. Uçucu kül atık bir yan ürün olması ve ücretsiz olarak temin edilebildiğinden diğer malzemelere göre daha ekonomiktir. Ayrıca yanma sonucu oluşan atık malzemeyi kullanmak çevre açısından da önem taşımaktadır.

Adsorpsiyon deneylerinde farklı parametrelerde çalışılmıştır ve maksimum B adsorpsiyonu miktarı başlangıç pH değeri 4'te elde edilmiştir. B giderim verimi 25 °C'de, başlangıç pH'ı 4 değerinde ve 50 mL çözelti için 2,5 g uçucu külde % 94,17 olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçlara göre, Langmuir izoterm modeli bu işlem için en uygun model olarak saptanmıştır. Uçucu kül ile B giderimi için düşünülen kinetik modeller arasında, deneysel verilere en iyi şekilde tanecik içi difüzyon modeli uymuştur. Termodinamik çalışmalardan elde edilen parametreler ($\Delta G°$ ve $\Delta H°$) uçucu kül üzerine B adsorpsiyonunun kendiliğinden ve ekzotermik bir süreç olduğunu göstermiştir.

Mikrodalga ışınımının B giderimine etkisi için uçucu kül üzerinde farklı pH ve dozlarda yapılan çok sayıda denemeden sonuç alınamamıştır. Bu yüzden deneylere $CaCO_3$ ile devam edilmiştir. En iyi sonuç 100 mL jeotermal suda 2,5 g kireçtaşı, 1,5 mL H_3PO_4 pH 11'de ve mikrodalgada 10 dakika tutularak % 90 giderim elde edilmiştir. Mikrodalga ışınımı bu alan için literatürde az yer kapsamakla beraber son zamanlarda deneysel olarak uygulanmaya başladığı için cazip hal almıştır. Bundan sonraki çalışmalarda bu yöntem farklı adsorbanlar kullanılarak suda bulunan farklı iz elementler ve B giderimi verimleri araştırılabilir.

Laboratuvar ölçekli uygulanan bu yöntemin doğal koşullar altında denenmesi göz önüne alındığında uçucu kül ile yüksek B giderimi elde edilen adsorpsiyon yöntemi için ekonomik koşullar düşünüldüğünde uygun bir çözüm olabilecektir.

Bu çalışma kapsamında Tuzla jeotermal kaynağından B giderimi başarılı sonuçlar vermiştir. Bu tezin devam çalışması olarak B giderilmiş jeotermal akışkan ile bitki gelişimi

takip edilebilir. Bunun iyi sonuçlar vermesi halinde, Tuzla jeotermal alanında uygulanabilir. Tarımsal sulamada bitkiler için farklı B tolerans limitleri olmakla beraber 1 ile 1,5 mg/L arası kabul edilebilir limit değerlerinde olup bitkilerde toksik etkiye neden olmamaktadır. Bu yüzden B giderilmiş jeotermal su ile tarımsal sulama yapılarak ekonomik katkısı bulunabilecektir.

KAYNAKÇA

18 Mart Çan Termik Santrali, (t.y.). Erişim: 3 Haziran 2021, https://www.enerjiatlasi.com/komur/18-mart-can-termik-santrali.html.

Akkuş, İ. ve Alan, H. (2016). Türkiye'nin jeotermal kaynakları, projeksiyonlar, sorunlar ve öneriler raporu. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Yayın No: 123, s. 3-6.

Baba, A. ve Armannsson, H. (2006). Environmental impact of the utilization of geothermal areas. Energy Source Part B: Economics, Planning and Policy, 1(3), s. 267-278.

Baba, A., Yüce, G., Deniz, O. ve Uğurluoğlu, D.Y. (2009). Hydrochemical and isotopic composition of Tuzla geothermal field (Canakkale-Turkey) and its environmental impacts. Hydrochemical and Isotopic Composition of Tuzla Geothermal Field (Canakkale- Turkey) and its Environmental Impacts, Environmental Forensics, 10(2), s. 144-161, DOI: 10.1080/15275920902873418.

Ban, S. H., Im, S. J., Cho, J. ve Jang, A. (2019). Comparative performance of FO-RO hybrid and two-pass SWRO desalination processes: Boron removal. Desalination, 471, 114114, s. 1-9. doi:10.1016/j.desal.2019.114114.

Baran, E. (2012). Tekli ve ikili sistemde zeolit yüzeyine malachite green ve R-rhodamine B'nin adsorpsiyonunun araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. T.C. Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Kilis.

Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and status: an overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6, s. 3-65.

Bertani, R. (2015). Geothermal power Generation in the World 2010-2014 Update Report Proceedings. World Geothermal Congress.

Bulut, M. (2013). Ege bölgesinde yeni bir orta-yüksek entalpili jeotermal alan (Akyar) Menderes-Seferihisar-İzmir, Batı Anadolu, Türkiye. MTA Dergisi, 147, s. 153-167.

Calabrò, E. ve Magazù, S. (2012). Comparison between conventional convective heating and microwave heating: An FTIR spectroscopy study of the effects of microwave

oven cooking of bovine breast meat. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 4, s. 433-439. http://dx.doi.org/10.4236/jemaa.2012.411060.

Chang, H. M., Chen, S. S., Cai, Z. S., Chang, W. S., Ray, S. S., Nguyen, N. C., Li, C. W. ve Paswan, M. (2020). Iodide recovery and boron removal from thin-film transistor liquid crystal display wastewater through forward osmosis. Journal of Cleaner Production, 120587, s. 1-10. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120587

Cortes, S., Reynaga-Delgado, E., Sancha, A. M., ve Ferreccio, C. (2011). Boron exposure assessment using drinking water and urine in the North of Chile. Science of The Total Environment, 410-411, s. 96–101. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.08.073.

Çam, D., Bülbül, E., Kılınç, O., Şan, Ö. (2013). Jeotermal akışkanların köken ilişkisi: Tuzla ve Babadere (Çanakkale) sahaları örneği. MTA Genel Müdürlüğü.

Çanakkale Çan Kulfal Köyü Nüfusu (t.y.). Erişim: 5 Haziran 2021, https://www.nufusune.com/8346-canakkale-can-kulfal-koy-nufusu.

Çanakkale'deki Yenilenebilir Enerji Faaliyetlerinin Teşvik Edilmesi ve Yatırım Potansiyelinin Arttırılması (t.y.) Erişim: 16 Haziran 2021, http://www.canakkaleolay.com/arsiv.php?haberid=27565.

Çengeloglu, Y., Arslan, G., Tor, A., Kocak, I. ve Dursun, N. (2008). Removal of boron from water by using reverse osmosis. Separation Science and Technology. 64, s. 141-146.

Çermikli, E., Şen, F., Altıok, E., Wolska, J., Cyganowski, P., Kabay, N., Bryjak, M., Arda, M. ve Yüksel, M. (2020). Performances of novel chelating ion exchange resins for boron and arsenic removal from saline geothermal water using adsorption-membrane filtration hybrid process. *Desalination*, *491*(May), 114504. s. 1-7. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114504.

Danışman, M. A. (2011). Jeotermal nedir ne değildir. Jeofizik Bülteni, 68, s. 4-7.

Demey, H., Vincent, T., Ruiz, M., Sastre, A. M. ve Guibal, E. (2014). Development of a new chitosan/Ni(OH)2-based sorbent for boron removal. Chemical Engineering Journal, 244, s. 576–586. doi:10.1016/j.cej.2014.01.052.

Demirçivi, P. (2008). Atık sulardan kesikli ve sürekli sistemlerle bor giderimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Doğan, H. (2019). Mikrodalga enerjisi kullanılarak yeni adsorbentlerin sentezi ve tetrasiklin giderimi. Yüksek Lisans Tezi. T.C. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas.

DPT (2001). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı: Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu Jeotermal Enerji Çalışma Grubu Raporu. Ankara. (DPT.2609 - ÖİK.620) ISBN: 975-19-2825-7.

DPT (2008). Dokuzuncu Kalkınma Planı Kimya Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Bor-Soda Külü-Krom Kimyasalları Çalışma Grubu Raporu. Ankara. Yayın No: DPT: 2776-ÖİK: 705, ISBN 978-975 – 19 – 4353-8.

Duru M., Pehlivan Ş., Aral İ. O., Şentürk Y., Yavaş F. ve Kar H. (2012). Biga Yarımadasının Tersiyer Öncesi Jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Özel Yayınlar Serisi, No 28: s. 7-74.

Eryıldız, B. (2019). Su-atık sulardan bor giderimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü (2020). Bor Sektör Raporu. Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Mayıs 2020. s. 15-25.

Geothermal 101 Basics of Geothermal Energy, (April 2014). Geothermal Energy Association. s. 20-22. https://geothermal.org/sites/default/files/2021-02/Geothermal_101-Basics_of_Geothermal_Energy.pdf.

Gevrek, A.İ., Şener, M. ve Ercan, T. (1986). Çanakkale-Tuzla jeotermal alanının hidrotermal alterasyon etüdü ve volkanik kayaçların petrolojisi. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 103-104, s. 55–81.

Gözler, M. Z., Ergül, E., Akçaören, F., Genç, Ş., Akat, U. ve Acar, Ş. (1984). Çanakkale boğazı doğusu-Marmara Denizi güneyi-Bandırma-Balıkesir-Edremit ve Ege Denizi arasındaki alanın jeolojisi ve kompilasyonu. MTA Rapor No: 7430. (yayımlanmamış)

Gude, V., Patil, P., Martinez-Guerra, E., Deng, S. ve Nirmalakhandan, N. (2013). Microwave energy potential for biodiesel production. Sustainable Chemical Processes, 1(1), s. 5. doi:10.1186/2043-7129-1-5.

Güler, E., Kaya, C., Kabay, N. ve Arda, M. (2014). Boron removal from seawater: state-of-the-art review. Desalination, 356, s. 85–93. doi:10.1016/j.desal.2014.10.009.

Hezarfen C. (1976). Çanakkale-Çan Kömür Yatağı Fizibilite Araştırması. 1. Baskı, Ankara, Türkiye, MTA Yayınları.

Hilal, N., Kim, G. J. ve Somerfield, C. (2011). Boron removal from saline water: A comprehensive review. Desalination, 273(1), s. 23–35. doi:10.1016/j.desal.2010.05.012.

IEA, (2013). World Energy Outlook. International Energy Agency. ISBN: 978-92-64-20130-9.

Ilgar A., Demirci, E. S. ve Demirci Ö. (2009). Biga Yarımadası Tersiyer Sedimanter İstifinin Stratigrafisi. Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi, MTA Rapor No: 11101, s. 79-86. Ankara.

İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. (2013). Resmi Gazete. Resmi Gazete Sayısı: 28580.

Jarma, Y. A., Karaoğlu, A., Tekin, Ö., Baba, A., Ökten, H. E., Tomaszewska, B., Bostancı K., Arda M. ve Kabay, N. (2020). Assessment of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for simultaneous removal of arsenic and boron from spent geothermal water. Journal of Hazardous Materials, 124129. s. 1-18. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124129.

Jeotermal Nedir? (2017, 26 Eylül). Erişim adresi: https://www.enerjiportali.com/jeotermal-nedir-jeotermal-enerji-nedir/

Kalkınma Bakanlığı (2018a). On Birinci Kalkınma Planı Kimya Sanayii ve Madencilik Politikaları Raporu. Ankara. Yayın No: KB: 3011 - ÖİK: 792. s. 45-48.

Kalkınma Bakanlığı (2018b). On Birinci Kalkınma Planı Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Ankara. Yayın No: KB: 3041 - ÖİK: 822. s. 52-56.

Karaca Z., Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M. A., Kamacı, C. ve Çetiner Z. S. (2013). Çanakkale ili (Biga Yarımadası) Jeotermal Kaynakları ve Özelliklerinin

Belirlenmesi, Biga Yarımadası Jeotermal Bilgi Sistemi. Güney Marmara Kalkınma Ajansı Raporu s. 57.

Kaya, T. (2018). Jeotermal Enerji. TMMOB Oda Raporu, Türkiye'nin Enerji Görünümü 2018, s. 383-389.

Kluczka, J., Ciba, J., Trojanowska, J., Zolotajkin, M., Turek, M. ve Dydo, P. (2007). Removal of boron dissolved in water. Environmental Progress, 26, s. 71–77.

Kluczka, J., Trojanowska, J., Zołotajkin, M. (2015). Utilization of fly ash zeolite for boron removal from aqueous solution. Desalination, Water Treatment, 54, s. 1839–1849.

Koç G. A., Çelik A., Demir, M. M. ve Baba, A. (2015). Aşırı tuzlu jeotermal akışkanın hidrojeokimyasal özellikleri ve kabuk oluşumu. Jeotermal Kaynaklar Sempozyumu ve Sergisi. Ankara. s. 193-205.

Kot, F.S. (2015). Chapter 1- boron in the environment. Boron Separation Processes, s. 1-33.

Köse, T. E., Demiral, H. ve Öztürk, N. (2011). Adsorption of boron from aqueous solutions using activated carbon prepared from olive bagasse. Desalination and Water Treatment, 29(1-3), s. 110–118. doi:10.5004/dwt.2011.2091.

Krauskopf, K. B. ve Bird, D. K. (1995). Introduction to Geochemistry. Third Edition, McGraw-Hill, New York, s. 647.

Liu, H., Qing, B., Ye, X., Li, Q., Lee, K. ve Wu, Z. (2009). Boron adsorption by composite magnetic particles. Chemical Engineering Journal, 151(1-3), s. 235–240. doi:10.1016/j.cej.2009.03.001.

Lund, J. W. (2006). Geothermal energy focus. Refocus, 7(6), s. 48–51. doi:10.1016/s1471-0846(06)70660-6.

Lund, J. W. ve Bertani, R. (2010). Dünyada Jeotermal Enerji Kullanım Raporu. Dünya Jeotermal Kongresi, (WGC2010)-Endonezya-Bali. www.jkbb.org.tr/WGC.doc.

Lund, J. W. ve Boyd T. L. (19-25 April 2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia.

Lund, J. W. ve Toth, A. N. (2020). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. Geothermics, 101915. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101915.

Ma, S. J., Zhou, X. W., Su, X. J., Mo, W., Yang, J. L. ve Liu, P. (2009). A new practical method to determine the microwave energy absorption ability of materials. Minerals Engineering, 22(13), s. 1154–1159. doi:10.1016/j.mineng.2009.05.003.

Marmara, H., Şanlıyüksel Yücel, D., Özden S. ve Yücel, M. A. (2020). Kestanbol jeotermal akışkanının hidrokimyasının ve çevresel etkilerinin belirlenmesi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 63(1), s. 97-116.

Mertoğlu, O., Şimşek, S. ve Başarır, N. (2020). Geothermal energy use: projections and country update for Turkey. World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland.

MTA (2021a). Kömür Arama Araştırmaları. Erişim: 8 Haziran 2021, https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari.

MTA (2021b). Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Arama Çalışmaları. Erişim: 11 Nisan 2021, https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/jeotermal-enerji-arastirmalari.

MTA (2021c). Türkiye Jeotermal Kaynaklar Dağılımı ve Uygulama Haritası. Erişim: 11 Nisan 2021, https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/jeotermal-harita/images/1.jpg.

Mützenberg, S. (1997). Nature and origin of the thermal springs in the Tuzla area, Western Anatolia, Turkey. (Active Tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Poly-Project, Editörler: Schindler, C., Pfister, M.). VDF Hochschul Verlag AG an der ETH Zurich, s. 301–320.

Öztürk, N. ve Köse, T. E. (2008). Boron removal from aqueous solutions by ıon-exchange resin: batch studies. Desalination, 227, s. 233-240. doi:10.1016/j.desal.2007.06.028.

Öztürk, N., Kavak D. ve Köse T. E. (2008). Boron removal from aqueous solution by reverse osmosis. Desalination, 223, s. 1-9. doi:10.1016/j.desal.2007.01.078.

Polowczyk, I., Ulatowska, J., Koźlecki, T., Bastrzyk, A. ve Sawiński, W. (2013). Studies on removal of boron from aqueous solution by fly ash agglomerates. Desalination, 310, s. 93–101.

Rainey, C. J., Nyquist L. A., Christensen R. E., Strong P. L., Culver B. D. ve Coughlin J. R. (1999). Daily boron intake from the American diet. Journal of the American Dietetic Association, 99(3), s. 335-340. doi:10.1016/s0002-8223(99)00085-1.

Samman S., Foster M. ve Hunter D. (2011). The role of boron in human nutrition and metabolism. In: Hosmane NS, editor. Boron science: new technologies and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, s. 73-82.

Sökmen, N. ve Büyükakıncı B. Y. (2018). The usage of boron/boron compounds in the textile ındustry and its situation in Turkey. CBU İnternational Conference on İnnovations in Science and Education. Mart 21-23, Prague, Czech Republic. s. 1158-1163. http://dx.doi.org/10.12955/cbup.v6.1309.

Sönmez, N. A. (2014). Sulardan adsorpsiyon yöntemi ile bor giderimi. Yüksek Lisans Tezi. T.C. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

Su Kirliliği Kontrolü ve Yönetmeliği. (2008). Resmi Gazete. Resmi Gazete Sayısı: 25687.

Şahin, M. O., Bektaş, T. E. ve Şanlıyüksel Yücel D. (2021). Effectiveness of fly ash in boron removal from Tuzla (Çanakkale) geothermal fluid. Environmental Research and Technology, 4(1), s. 102-107. https://doi.org/10.35208/ert.842192.

Şanlıyüksel Yücel, D. ve Yücel, M. A. (2017). Determining hydrochemical characteristics of mine lakes from abandoned coal mines and 3D modelling of them using unmanned aerial vehicle. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 23 (6), s. 780-791.

Şanlıyüksel Yücel, D., Karaca, Z. ve Yücel, M. A. (2013). Determining hydrogeochemical characteristics of geothermal resources in Biga Peninsula (city of Canakkale), NW Turkey. 40th International Association of Hydrogeologists Congress, 15-20 September 2013, Perth, Australia, 261.

Şengüler İ. (t.y.). Ülkemiz Enerji Bütünlemesinde Marmara ve Trakya Bölgesi Kömürlerinin Yeri. Erişim: 5 Haziran 2021, https://www.emo.org.tr/ekler/c1690de2b615cc3_ek.pdf.

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2020). Cam Sektörü Raporu. Sanayi Genel Müdürlüğü Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi. s. 10-14.

Thakur, M. ve Sohal, B. S. (2013). Role of Elicitors in Inducing Resistance in Plants against Pathogen Infection: A Review. ISRN Biochemistry, 2013, s. 1–10. doi:10.1155/2013/762412.

Tsai, H. C. ve Lo, S. L. (2011). Boron removal and recovery from concentrated wastewater using a microwave hydrothermal method. Journal of Hazardous Materials, 186(2-3), s. 1431–1437. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.12.010.

TSF (Türkiye Seramik Federasyonu) (2019). Seramik Sektörü Yerli Katma Değer Raporu. 8. Dönem (Haziran 2017-Haziran 2019) Faaliyet Raporu. s. 17.

Tuzla Jeotermal Enerji A.Ş. (t.y.). Erişim: 15 Haziran 2021, https://www.tuzlajes.com.tr/tuzla-jeotermal-enerji-as.aspx.

TÜİK (t.y.). Erişim adresi: http://tuikweb.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=30674.

Venkatesan, S. (2013). Adsorption. Separation and Purification Technologies in Biorefineries, s. 101–148. doi:10.1002/9781118493441.ch5.

Verel, A. R. (2003). Jeotermal enerjinin tanıtımı ve kullanımı. Elektrik Mühendisliği Dergisi, Ankara 418, s. 58.

Wang, B., Guo, X. ve Bai, P. (2014). Removal technology of boron dissolved in aqueous solutions – a review. Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. C. 444, s. 338-344.

Wolska, J. ve Bryjak, M. (2013). Methods for boron removal from aqueous solutions - A review. *Desalination*, *310*, s. 18–24. https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.08.003.

Woods, W. G. (1994). An Introduction to boron: history, sources, uses, and chemistry, environmental health perspectives. Environmental Health Perspectives, California. 102, s. 5-11.

Yalçın, T. (2007). Geochemical characterization of the Biga Peninsula thermal waters (NW Turkey). Aquatic Geochemistry, 13(1), s. 75–93. DOI 10.1007/s10498-006-9008-2.

Yüksel, S. ve Yürüm, Y. (2010). Removal of Boron from aqueous solutions by adsorption using fly ash, zeolite, and demineralized lignite. Sep. Sci. Technol. 45 (2010) s. 105–115.

Zerze, H., Ozbelge, H. O., Bicak, N., Aydogan, N. ve Yilmaz, L. (2013). Novel boron specific copolymers with quaternary amine segments for efficient boron removal via PEUF. Desalination, 310, s. 169–179. doi:10.1016/j.desal.2012.07.035.