



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

**ADSORPSİYON YÖNTEMİ İLE KESTANBOL JEOTERMAL KAYNAĞINDAN
BOR GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİLEK DEMİR

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. DENİZ ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

ÇANAKKALE -2024



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

**ADSORPSİYON YÖNTEMİ İLE KESTANBOL JEOTERMAL KAYNAĞINDAN
BOR GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİLEK DEMİR

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. DENİZ ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

ÇANAKKALE -2024



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Dilek DEMİR tarafından Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL yönetiminde ve **30/04/2024** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “Adsorpsiyon Yöntemi İle Kestanbol Jeotermal Kaynağından Bor Gideriminin Araştırılması” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

.....

(Danışman)

Prof. Dr. Tijen Ennil BEKTAŞ

.....

Prof. Dr. Alper BABA

.....

Tez No :.....

Tez Savunma Tarihi : 30/04/2024

Prof. Dr. Ahmet Evren ERGİNAL

Enstitü Müdürü

.../.../2024

ETİK BEYAN

Bu tez çalışmasını, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na tam uygun bir şekilde hazırladım. Sunulan verileri, bilgileri ve dokümanları, akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettim. Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun bir şekilde sundum. Tez çalışmasında kullandığım eserlere uygun atıflarda bulunarak kaynakları doğru bir şekilde belirttim. Kullandığım verilerde herhangi bir değişiklik yapmadım ve bu tezde sunulan çalışmanın özgün olduğunu beyan ederim. Ayrıca, çalışmamda aleyhime doğabilecek hak kayıplarını kabul ederek, bu taahhüdü ve beyanı yaparım.

(İmza)

Dilek DEMİR

30/04/2024

TEŞEKKÜR

Bu tezin tasarım, deney ve yazım süreçlerindeki tüm çalışmalarım boyunca benden yardımlarını esirgemeyen ve her türlü desteği sağlayan saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL'e, arazi çalışmalarındaki örnek alımı sırasında yardımcı olan Prof. Dr. Mehmet Ali YÜCEL'e, adsorpsiyon kinetiklerin yorumlanmasındaki desteği için değerli hocam Prof. Dr. Fatma TOMUL'a, deneyler sırasında çalkamalı inkübatörün kullanılmasına izin veren Prof. Dr. Necati Barış TUNCEL'e, değerli görüş ve katkıları için Prof. Dr. Tijen Ennil BEKTAŞ ve Prof. Dr. Alper BABA'ya, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen kız kardeşim Derya KARAOSMANOĞLU'na, bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olup, tez çalışmam boyunca da her an yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Dilek DEMİR

Çanakkale, Nisan 2024

ÖZET

ADSORPSİYON YÖNTEMİ İLE KESTANBOL JEOTERMAL KAYNAĞINDAN BOR GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Dilek DEMİR

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

30/04/2024, 74

Alp-Himalaya orojenik dağ kuşağında bulunan Türkiye, genç volkanizma ve yoğun tektonik aktivite nedeni ile jeotermal enerji potansiyeli bakımından zengindir. Türkiye'nin kuzeybatısındaki Çanakkale ilinde bulunan Kestanbol jeotermal alanında, sıcaklığı 75 °C olan bir jeotermal sondaj ve sıcaklıkları 58-69 °C arasında değişen birçok jeotermal çıkış vardır. Jeotermal sondajdan taşınan akışkan termal otelde ısıtma ve balneolojik uygulamalarda kullanıldıktan sonra Ilıca Dere'ye deşarj edilmektedir. Kestanbol jeotermal akışkanı yüksek konsantrasyonda bor (11,88 mg/l) içermektedir. Bu çalışmada ilk kez adsorpsiyon yöntemi ile uçucu kül kullanılarak Kestanbol jeotermal akışkanından bor giderimi araştırılmıştır. Bunun için, jeotermal sondajdan alınan su örnekleri laboratuvarında farklı deneysel koşullarda (sıcaklık, pH, karışım süresi, adsorban miktarı) kesikli adsorpsiyon deneyleri yapılmış ve bu koşulların jeotermal sudan bor giderimine olan etkisi incelenmiştir. Optimum adsorban miktarının 24 saat sonunda oda sıcaklığında 9 g ve 10 g uçucu kül/100 ml jeotermal su olduğu ve %90'ın üzerinde giderim sağlandığı tespit edilmiştir. Bor giderim verimi artan uçucu kül miktarı ve temas süresi ile artmış, fakat artan sıcaklık ile azalmıştır. Adsorpsiyon dengesini açıklamak için Langmuir ve Freundlich modelleri kullanılmıştır. Sözde birinci derece, sözde ikinci derece, parçacık içi difüzyon ve Elovich modelleri ile kinetik parametreler belirlenmiştir. Ayrıca adsorpsiyon sürecinin doğasını açıklamak için termodinamik çalışmalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal akışkan, kirlilik, adsorpsiyon, bor.

ABSTRACT

BORON REMOVAL FROM KESTANBOL GEOTHERMAL WATER USING ADSORPTION

Dilek DEMİR

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Energy Resources and Management

Advisor: Assoc. Prof. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

04/30/2024, 74

Turkey, located in the Alpine-Himalayan orogenic mountain belt, is among the richest countries in the world in terms of geothermal energy potential due to its young volcanism and intense tectonic activities. In the Kestanbol geothermal field located in the south of Çanakkale, there is a geothermal borehole with a temperature of 75 °C and many geothermal springs with temperatures varying between 58 and 69 °C. The fluid carried from the geothermal drilling is discharged to Ilıca Stream after being used in heating and balneological applications in the thermal hotel. Kestanbol geothermal fluid contains a high concentration of boron (11.88 mg/L). In this study, boron removal from Kestanbol geothermal fluid was investigated for the first time using fly ash by the adsorption method. Batch adsorption tests were performed in the lab on water samples from geothermal drilling under various conditions, including temperature, pH, mixing time, and adsorbent amount. The batch experiments examined the impact of these parameters affected the removal of boron from geothermal water. After 24 hours, it was determined that the optimum amount of adsorbent was 9 g and 10 g of fly ash/100 mL of geothermal water at room temperature, with over 90% removal achieved. Boron removal increased with fly ash amount and contact time, but decreased with increasing temperature. Langmuir and Freundlich models were used to describe the adsorption equilibrium. Kinetic parameters were determined using quasi-first-order, quasi-second-order, intra-particle diffusion, and Elovich models. Additionally, thermodynamic studies have been conducted to elucidate the nature of the adsorption process.

Keywords: Geothermal fluid, pollution, adsorption, boron.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1

1.1. Enerji	1
1.2. Jeotermal Enerji.....	2
1.3. Jeotermal Enerji ve Çevre	12
1.4. Bor Minerali ve Giderim Yöntemleri.....	16
1.4.1. Adsorpsiyon.....	19
1.5. Tezin amacı.....	22

İKİNCİ BÖLÜM

23

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Bor Mineralinin Adsorpsiyon Yöntemi ile Giderilmesi Çalışmaları.....	23
2.2. Kestanbol Jeotermal Alanında Yapılan Jeolojik ve Hidrokimyasal Çalışmalar....	27

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

30

MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanının Konumu ve Arazi Çalışmaları.....	30
3.2. Laboratuvar Çalışmaları.....	34
3.2.1. Jeotermal Suyun ve Uçucu Küllerin Karakterizasyonu.....	34
3.2.2. Adsorpsiyon Deneyleri.....	35
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	42
ARAŞTIRMA BULGULARI	
4.1. Uçucun Külün Karakterizasyonu	42
4.2. Kestanbol Jeotermal Akışkanının Hidrokimyası.....	43
4.3. Adsorpsiyon Deneyleri Sonuçları.....	45
4.3.1. Adsorban miktarının etkisi.....	45
4.3.2. pH etkisi.....	47
4.3.3. Sıcaklığın etkisi ve adsorpsiyon termodinamiği.....	50
4.3.4. Adsorpsiyon İzotermi.....	52
4.3.5. Temas Süresinin Etkisi ve Adsorpsiyon Kinetiği.....	55
4.4. Kontrol deneyleri sonuçları deneyleri	58
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKÇA	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bor	B
WHO	World Health Organization
İEA	International Energy Agency
TES	Dünya Toplam Enerji Arzı
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
BNGF	Balçova Narlıdere Jeotermal Sahası
%	Yüzde oranı
MTA	Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü
EPA	United States Environmental Protection Agency
GW	Gigawatt
MWt	Megawatt ısı
MW	Megawatt
mg	Miligram
mA	Mili Amper
GB	Gigabayt
EC	Elektriksel iletkenlik
pKa	Asit-baz titrasyonlarından veya iletkenlik ölçmelerinden tayin edilebilen asit ayrışma sabitinin (-) logaritması.
mV	Milivolt
mS/cm	Milisiemens/santimetre
mg/l	Miligram/litre

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Jeotermal enerjinin doğrudan ve dolaylı kullanımı	7
Tablo 2	Jeotermal kaynakların uygulama alanları	8
Tablo 3	Kurulu güç ve üretim değerleri	9
Tablo 4	Jeotermal santral sayısının yıllara göre değişimi	9
Tablo 5	B ve B bileşiklerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri	17
Tablo 6	B giderim yöntemlerinin karşılaştırılması	19
Tablo 7	Kestanbol jeotermal alanının hidrokimyasal analiz sonuçları	44
Tablo 8	Uçucu kül dozuna bağlı pH, EC ve B derişimi	46
Tablo 9	pH değişiminin B derişimine etkisi	49
Tablo 10	Sıcaklığın B derişimine etkisi	51
Tablo 11	Uçucu kül ie B gideriminin termodinamik parametreleri	52
Tablo 12	Langmuir ve Freundlich model parametreleri	54
Tablo 13	Uçucu kül ile B adsorpsiyonu için kinetik parametreler	57
Tablo 14	Kontrol deneyleri sonuçları (pH, EC, tuzluluk ve B)	58
Tablo 15	Farklı sıcaklıklardaki kontrol deneyi sonuçları	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	İdeal bir jeotermal sistem	3
Şekil 2	Türkiye jeotermal kaynak dağılımı haritası	10
Şekil 3	Jeotermal akışkanın içerdiği kirleticiler	13
Şekil 4	Jeotermal kaynakların sıcaklık dağılımları haritası	18
Şekil 5	Çanakkale ilindeki aktif faylar	30
Şekil 6	Herodes Atticus hamamı	31
Şekil 7	Kestanbol jeotermal alanındaki termal otelden görünüm	33
Şekil 8	Arazi çalışmaları	33
Şekil 9	Kestanbol jeotermal sondajından örnek alımı	34
Şekil 10	Örneklerin hazırlanması	36
Şekil 11	Çözeltilerin orbital çalkalayıcıda çalkalanması	37
Şekil 12	Çözeltinin pH ölçümü	37
Şekil 13	ICP- MS analizi öncesi örneklerin filtrelenmesi	38
Şekil 14	Çalkalanmalı inkübatörde farklı sıcaklıklarda karıştırılması	39
Şekil 15	ICP- MS cihazı	40
Şekil 16	Uçucu küllerin SEM görünümü	43
Şekil 17	SEM ve EDX analiz sonucu	43
Şekil 18	Jeotermal sondajdan toprağa sızan sular	44
Şekil 19	Adsorban miktarı- B derişimi üzerine etkisi	45
Şekil 20	Uçucu kül ile B giderimi üzerine PH etkisi	48
Şekil 21	Uçucu külde biriken B elementinin SEM ve EDX analizi	49
Şekil 22	Uçucu kül ile B adsorpsiyonu üzerine sıcaklığın etkisi	50
Şekil 23	İzotermilerin karşılaştırılması	54
Şekil 24	Temas süresinin etkisi	55
Şekil 25	Uçucu kül ile B adsorpsiyon kinetiğinin karşılaştırılması	57
Şekil 26	Zamana bağlı uçucu kül liçinin PH değışimi	59
Şekil 27	Zamana bağlı uçucu kül liçinin B konsantrasyonu değışimi	59
Şekil 28	Artan sıcaklığa bağlı olarak liçteki B değışimi	60

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Enerji

Enerji, toplumsal gelişme ve ekonomik kalkınmanın temel unsurlarından biri olup, temel ihtiyaçların karşılanması ile yaşamın sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Ulaşım, ısınma, aydınlatma ve beslenme gibi hayati ihtiyaçlar, etkin bir şekilde enerji kullanımına dayanmaktadır. Bir ülkenin ekonomik gelişmişlik düzeyi değerlendirilirken enerji üretimi, tüketimi ve dağılımı değerlendirilmektedir. Ülkelerin ekonomik büyümleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olan enerji, ülkeler arasındaki sorunların en temel sebeplerinden biridir (Çağlayan, 2013; Karadağ, 2023).

Enerji, kimyasal, nükleer, mekanik (potansiyel ve kinetik), termal, jeotermal, hidrolik, güneş, rüzgar, elektrik enerjisi gibi değişik şekillerde bulunabilmekte ve uygun yöntemlerle birbirine dönüştürülebilmektedir. Evrenin bir bileşenidir ve birçok fiziksel ve biyolojik süreçte yer alır. Enerji, fizik de dâhil olmak üzere mühendislik ve ekonomi gibi birçok çalışma alanının merkezinde yer almaktadır. Yenilenemeyen enerji, doğal kaynaklardan elde edilen, sonlu bir enerjidir. Dolayısıyla yenilenemeyen enerji kaynakları sürdürülebilir değildir. Ayrıca, kaynakların yetersiz olması gibi birçok dezavantaja sahiptir (Yılmaz, 2023).

Doğal kaynaklar, doğada yer alan ve insan ihtiyaçlarını karşılayacak biçimde yararlanılabilen varlıkların tümü olarak ifade edilebilir. Bunlar: toprak, su, madenler, fosil yakıtlar, ormanlar, bitkiler ve hayvan sürüleri olarak ele alınabilir. Bu sayılanlar içinde hayvan sürüleri, ormanlar, bitkiler ve toprak, yenilenebilir doğal kaynaklardır. Öte yandan madenler ve fosil yakıtlar ise yenilenemeyen kaynaklardır. Yani tükenmiş bir mineral kaynağı veya bir varil petrol bir daha geri çevrilemez. İnsanlar, doğal kaynaklara pek çok ihtiyacını karşılamak için kullanmaktadırlar. Günümüzde doğal kaynakların, toplumların iktisadî ve sosyal kalkınmasındaki öneminin farkına varılmıştır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerin zenginliklerinin önemli bir kısmını doğal kaynaklar oluşturmaktadır (Güler, 2019).

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynaklarının katkısıyla küresel elektrik üretiminde yenilenebilir enerji oranında belirgin bir artış yaşanmıştır. 2020 yılı, yenilenebilir enerji

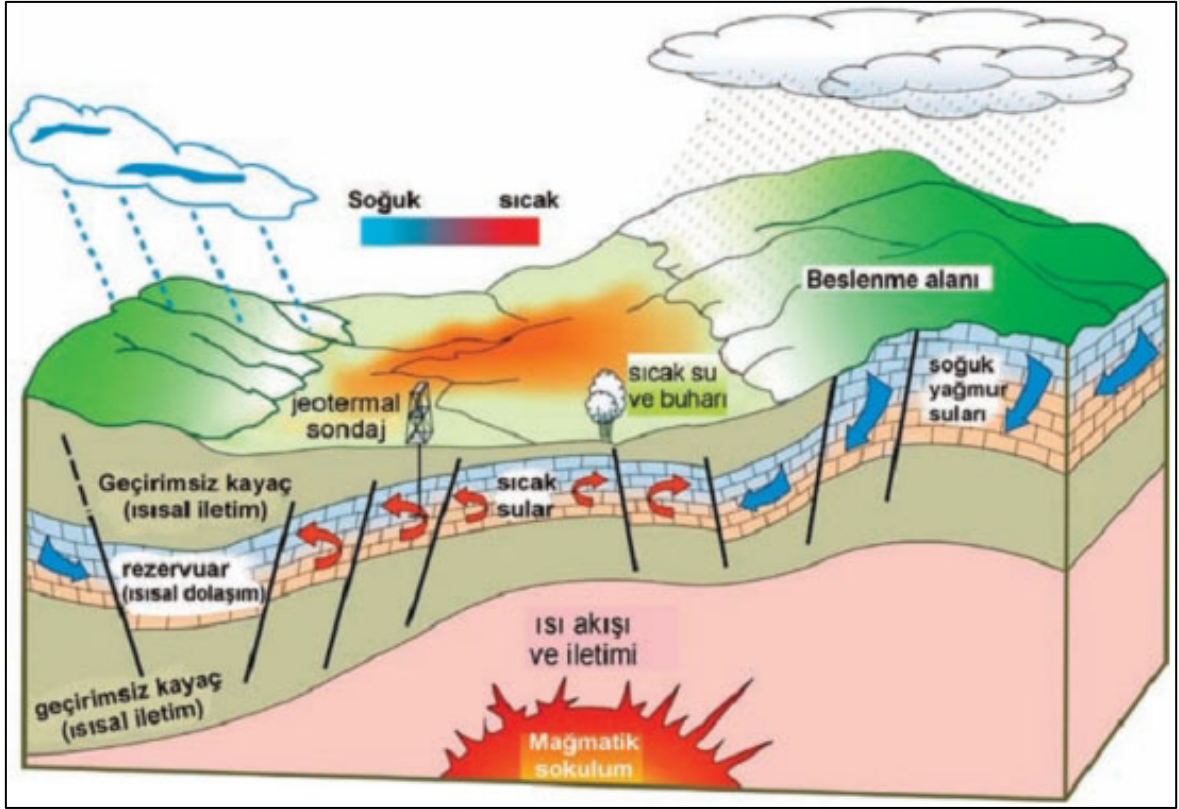
kaynaklarında rekor bir büyümeyi işaret etmiştir. Bu büyüme, elektrik enerjisine olan talepteki düşüşle aynı döneme denk gelmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak, toplam enerji üretiminde yenilenebilir enerjinin payı %28'e yükselmiştir. Bu artışla birlikte, yenilenemeyen enerji kaynaklarından elde edilen elektrik üretimi de azalmıştır (IEA, 2022).

Dünyanın toplam enerji arzı (TES), 1971 ile 2018 arasında yaklaşık 2,6 kat artmıştır. Bu enerji tüketiminin büyük bölümü Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Çin ve Rusya gibi gelişmiş ülkelere aittir. Öte yandan, fosil yakıtlardan biri olan petrol istikrarını korumasına rağmen tüketim oranı %44'ten %32'ye gerilerken, doğal gaz %16'dan %23'e yükselerek üçüncü sırada yer almaktadır. 2021 yılı itibarıyla petrol, kömür ve doğal gaz hâlâ dünyanın birincil enerji kaynaklarıdır ve toplam enerji tüketiminin yaklaşık %80,2'sine karşılık gelmektedir. 2019 yılı sonunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım düzeyi ise %11,2 civarındadır (Şener, vd., 2023; REN21, 2021).

2011-2020 yılları arasında dünya genelinde, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimi %9,7 artarak 2.799 GW'a ulaşmıştır. Türkiye'de ise aynı dönemde, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji yılda %11,1 artarak 49,6 GW'a çıkmıştır. 2020 itibarıyla, Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimi açısından Avrupa'da 5. sırada yer alırken, dünya genelinde 12. sırada bulunmaktadır. Hidroelektrik enerji üretimi açısından Norveç'ten sonra Avrupa'da 2. sırada yer almaktadır (Yılmaz, 2022).

1.2. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğunun derinliklerinde biriken ısınn doğrudan kullanılmasıyla ortaya çıkan önemli bir enerji kaynağıdır (Şekil 1). Yeryüzündeki bu jeotermal enerjinin sıcaklığı bölgesel atmosferik sıcaklıkların üzerindedir. Bu enerji formu, çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda bulunan erimiş mineral, tuzlar ve gazlar içeren sıcak su ve buhar ile tanımlanır (Kahraman, 2022).



Şekil 1. İdeal bir jeotermal sistem

Mühendis gelişim

Jeotermal enerji, yer altındaki sıcak su ve buharın kullanılmasıyla elde edilen bir enerji formudur. Bu özellikleri, jeotermal enerjiyi çevresel etkileri minimize eden ve enerji ihtiyacını sürdürülebilir bir şekilde karşılayan önemli bir enerji kaynağı haline getirir. Jeotermal enerjinin yerel ekonomilere katkı sağlaması ve istihdam yaratması da bu enerji türünün avantajları arasında yer alır (Doğdu, 2021).

Jeotermal enerjinin dünyadaki genel dağılımına bakıldığında, özellikle levha sınırlarının bulunduğu alanlar öne çıkmaktadır. Alp-Himalaya orojenik dağ kuşağının Güney ve Güneydoğu Asya ile Amerika kıtası üzerindeki bölgeler, jeotermal enerji potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Bu bölgeler, jeotermal enerjinin farklı kullanım alanlarına ev sahipliği yapmaktadır. Türkiye ve dünyanın jeotermal enerji potansiyeli bakımından zengin olan bölgelerinde, bu kaynaktan konut ısıtması, seracılık ve özellikle elektrik üretimi gibi farklı alanlarda yararlanılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde, jeotermal enerji özellikle elektrik üretimi için tercih edilen bir kaynaktır. Soğuk kuşaklarda bulunan gelişmiş ülkeler, jeotermal enerjiyi yolların, kaldırımların ve pistlerin ısıtılmasında da kullanarak enerjiyi etkili bir şekilde değerlendirmektedir. Dünyanın en büyük jeotermal santralleri, ABD'deki Geysers

Kompleksi, İtalya'daki Lardello, Meksika'daki Cerro Prieto, İzlanda'daki Hellisheidi, Filipinler'deki Malaya, Kenya'daki Olkaria, Filipinler'deki Makban, ABD'deki Saltonsea ve Endonezya'daki Darajat gibi bölgelerde bulunmaktadır. Bu santraller, jeotermal enerjinin potansiyelini en iyi şekilde değerlendiren ve sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunan örneklerdir (Sehatek, 2022).

2022 yılında dünya genelindeki jeotermal enerji kurulu güç 16,1 GWe seviyesine ulaşmıştır. Jeotermal enerjinin elektrik üretiminde öncü olan ilk 5 ülke ise sırasıyla ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda'dır. ABD'nin jeotermal enerji alanında öncü olması, ülkenin yenilenebilir enerji kaynaklarına verdiği önemi ve bu alandaki yatırımları göstermektedir. Endonezya ve Filipinler gibi Asya ülkeleri, jeotermal potansiyeli olan bölgelerde bu kaynağı etkili bir şekilde kullanarak sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunmaktadır. Türkiye'nin de bu listeye dahil olması, ülkenin jeotermal enerjiye olan yatırımlarının ve bu alandaki büyüme potansiyelinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Jeotermal enerji, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak ön plana çıkarken, küresel anlamda enerji dönüşümü ve çevresel sürdürülebilirlik adına olumlu bir gelişme olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, jeotermal enerjinin elektrik dışı kullanımı 2022 itibarıyla 107.000 megavat termal güç (MWt) seviyesini aşmış durumdadır. Bu alandaki doğrudan kullanım uygulamalarında öne çıkan ilk 5 ülke ise ABD, Çin, İsveç, Türkiye ve Almanya'dır. Jeotermal enerjinin elektrik dışı kullanımı, ısınma, sera ısıtma, endüstriyel prosesler ve diğer termal uygulamalar gibi çeşitli alanlarda gerçekleşmektedir, bu da jeotermal enerjinin sadece elektrik üretiminde değil, aynı zamanda farklı sektörlerde de geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (MTA, 2023a).

Jeotermal enerji, ilk çağlardan itibaren insanların ilgisini çekmiştir. Tarih boyunca ısınma, yiyecek pişirme, banyo ve sağlık gibi çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. Örneğin, Pamukkale'deki sıcak su kaynakları, Romalılar dönemine kadar uzanan bir geçmişe sahiptir ve Hiyeropolis harabelerinde ve binaların içinde ısıtma amaçlı kullanıldığı düşünülmektedir. Jeotermal enerji, yerkürenin iç çekirdek bölgesindeki akkor haldeki ısının yerkabuğuna kadar yayılmasıyla oluşur. Bu süreç, jeotermal gradyanı meydana getirir. Bu ısı enerjisi, bazen yerkabuğuna sokulan ve mantodan kaynaklanan magma intrüzyonlarıyla kabuk içinde ısı anomalilerine neden olabilir. Meteorik suların derinlere süzülerek dolaşıma girmesi de bu

bölgedeki ısıyı alabilir. Jeotermal enerji, doğal olarak oluşan bu sıcaklık farklarından faydalanarak çeşitli enerji uygulamaları için kullanılmaktadır (Kahraman, 2022).

Günümüzde, petrol, kömür, ve doğalgaz gibi fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve iklim değişiklikleri ile mücadele amacıyla, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Türkiye, enerji politikalarında güneş, rüzgar, biyokütle ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını artırarak enerji arz güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir. Bu çerçevede, Türkiye'nin enerji politikalarını desteklemek amacıyla pek çok yasa ve yönetmelik hayata geçirilmiştir. Bu düzenlemelerle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden önemli adımlar atılmıştır (Çetin, 2018).

Jeotermal kaynakların araştırılması, elde edilmesi, işletilmesi gibi süreçlerin doğru tanımlanması oldukça önem arz etmektedir. Çünkü bu enerji türü uluslararası konjüktür, kriz, savaş gibi etmenlerden etkilenmez ve konutlarda kullanım rahatlığına sahiptir. Ayrıca ihracı mümkün değildir (Çağlayan, 2013). Jeotermal enerji, modern enerji ihtiyaçlarımızı karşılarken çevre dostu bir seçenek sunan önemli bir kaynaktır. Türkiye'nin jeolojik ve coğrafi konumu, jeotermal potansiyeli açısından bir avantaj sunmaktadır. Ülkemiz, aktif tektonik kuşaklardan biri üzerinde yer alması nedeniyle volkanik aktivite ve magmatik oluşumları içermektedir. Bu durum, ülkemizin jeotermal açıdan dünyada zengin bir konumda bulunmasına olanak tanır. Jeotermal enerjinin bu zenginliği, ülkenin enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve çevresel etkileri minimize etmek adına büyük bir potansiyele işaret etmektedir (MTA, 2023b).

Jeotermal alanlar, ülkeler ve kökenlerine göre farklı sınıflandırmalara tabi olabilir, ancak genellikle yaygın sıcaklık değerlerine göre tasnif edilir. Türkiye'deki jeotermal alanlar genellikle üç sahada değerlendirilir (Akkuş, 2020):

- Düşük Entalpili Sahalar: 20°C ile 70°C arasında sıcaklıklara sahip olanlar.
- Orta Entalpili Sahalar: 70°C ile 150°C arasında sıcaklıklara sahip olanlar.
- Yüksek Entalpili Sahalar: 150°C'den daha yüksek sıcaklıklara sahip olanlar.

Bu sınıflandırma, jeotermal alanların sıcaklık aralıklarına göre gruplanmasına ve kullanım potansiyellerine yönelik bir genel bakış sağlamaya yardımcı olur.

Türkiye'nin jeotermal potansiyeli farklı bölgelerde dağılmış durumdadır. Bu potansiyelin % 78'i Batı Anadolu'da, % 9'u İç Anadolu'da, % 7'si Marmara Bölgesi'nde, % 5'i Doğu Anadolu'da ve % 1'i diğer bölgelerde yer alır. Türkiye'nin jeotermal kaynaklarının % 90'ı düşük ve orta sıcaklıklarda olduğu için doğrudan uygulamalarda (ısıtma, termal turizm, endüstriyel uygulamalar vb.) kullanılabilir. Geri kalan %10'luk kısım ise yüksek sıcaklıklarda olduğu için dolaylı uygulamalar için (elektrik enerjisi üretimi) uygundur (Tablo 1). Bu jeotermal potansiyel, Türkiye'nin enerji çeşitliliğini artırmak ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından yararlanmak adına önemli bir kaynaktır (MTA, 2023c).

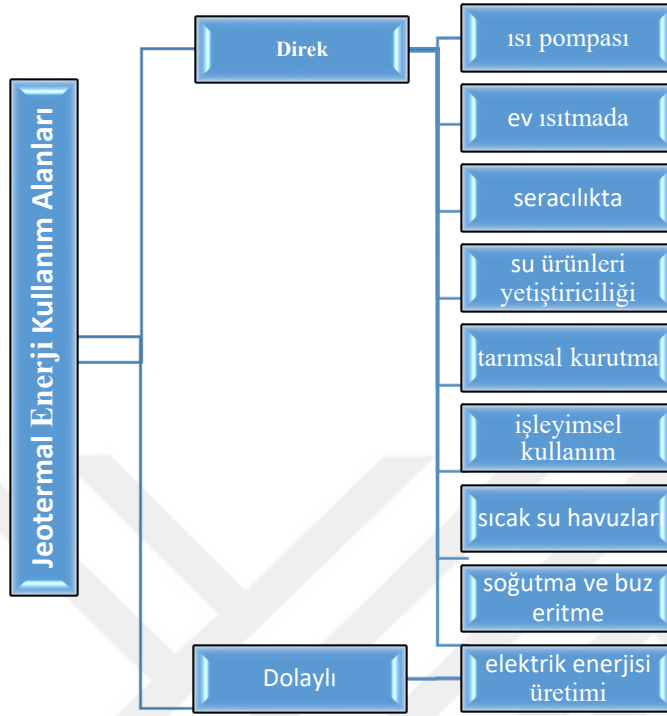
Jeotermal kaynaklardan elde edilen faydalar şu alanlarda görülmektedir (Kahraman, 2022):

1. Elektrik enerjisi üretimi,
2. Merkezi ısıtma, soğutma (air-conditioning), sera ısıtması gibi uygulamalar,
3. Endüstriyel amaçlar için kullanım, proses ısısı, kurutma gibi işlemler,
4. Kimyasal madde ve mineral, karbondioksit, gübre, lityum, ağır su, hidrojen üretimi,
5. Kaplıca amaçlı kullanım (termal turizm),
6. Düşük sıcaklıklarda (30°C) kültür balıkçılığı gibi tarım uygulamaları,
7. Mineralli su olarak içilebilir olması.

Bu farklı uygulama alanları, jeotermal enerjinin çeşitli sektörlerde kullanılabilirliğini ve çeşitli ihtiyaçları karşılayabilme kapasitesini göstermektedir. Jeotermal kaynakların bu geniş yelpazede kullanılabilmesi, sürdürülebilir enerji çözümlerine katkı sağlar (Kahraman, 2022). Tablo 1'de jeotermal kaynakların kullanım alanları gösterilmiştir.

Tablo 1

Jeotermal enerjinin doğrudan ve dolaylı kullanım alanları



Dinçer, 2018

Ülkemizde elde edilen jeotermal enerjiden çeşitli alanlarda faydalanılmaktadır (Tablo 2). Bu çeşitli uygulama alanları, jeotermal enerjinin Türkiye'de enerji üretimi, tarım, turizm ve endüstri gibi farklı sektörlerde kullanıldığını göstermektedir. Jeotermal enerji, sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olarak çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dağıstan, 2022).

Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli, Kasım 2019 itibariyle 1498 MWe elektrik üretim kapasitesine sahiptir ve bu alandaki gelişmelerle birlikte 2000 MWe'ye ulaşması öngörülmektedir. Jeotermal enerjiye yönelik yapılan ilave geliştirme çalışmaları, yeni sahaların keşfi ile ülkede jeotermal enerji üretim potansiyelinin artması öngörülmektedir. Türkiye'de jeotermal enerji, 19 yerleşim biriminde merkezi konut ısıtması, 23 sahada seracılık ve yaklaşık 350 termal tesisin tedavi ve termal turizm amacıyla kullanılmasıyla çeşitli sektörlerde değerlendirilmektedir. Bu durum, ülkenin sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik çeşitlendirme çabalarını göstermektedir (Çelmen, 2020). EPDK'nin

2022 yıl sonu verilerine göre jeotermal enerji, toplam kurulu gücün 1,85'ini oluşturmaktadır (Tablo 3). Toplam elektrik üretiminde ise %3,36'sını oluşturmaktadır.

Tablo 2

Jeotermal enerjinin sıcaklığına göre uygulama alanları

20°-50°	50°-80°	80°-120°	120°-160°	160°-220°	>220°
Balık yetiştiriciliği	Konut ısıtma	Temiz su elde etme	Flaş çevrimler	İkili (binary) çevrimler	Hidrojen üretimi
Yüzme havuzu	Hava kurutma	Gıda kurutma	Konut soğutma	Kalina çevrimi	Alternatif yakıt üretimi
Kaplıca	Sera ısıtma	Deri ve kürk işleme	Direkt buhar eldesi	Yüksek kapasitede çiftlik ürünlerinin kurutulması	Konvansiyonel güç üretimi
Fermantasyon	Tahıl kurutma	Tekstil ürünlerinin yıkama ve boyama işlemleri	Damıtma yoluyla temiz su eldesi	Gıda ürünlerinin konservelenmesi	Kojenerasyon
Su ürünleri yetiştiriciliği	Meyve kurutma	Kâğıt işleme	Şeker rafine işleminde buharlaşma	Amonyaklı absorpsiyon soğutma	
Toprak ısıtması	Sebze kurutma		Endüstriyel iklimlendirme	Kimyasal üretim	
Mantar yetiştiriciliği					
Isı pompaları					

Dinçer, 2018

Tablo 3

2022 yıl sonu itibariyle kaynak türünde kurulu güç ve üretim değerleri

Kaynak türü	Toplam kurulu güç (MW)	Oran (%)	Toplam enerji üretimi (MWh)	Payı (%)
Hidroelektrik santralleri	31.571,48	30,41	67.194.934,69	20,71
Rüzgar Santralleri	11.396,17	10,98	35.140.858,14	10,83
Solar enerji sistemleri	9.425,44	9,08	15.435.661,31	4,76
Jeotermal Enerji	1.691,34	1,63	10.918.764,88	3,36
Biyokütle Enerjisi	1.921,31	1,85	9.080.038,21	2,80
Yenilenebilir enerji	56.005,73	53,95	137.770.257,22	42,45

EPDK, 2022, düzenlenmiştir

EPDK'nin 2022 faaliyet raporuna göre, YEKDEM'in kurduğu jeotermal santral sayısının yıllar içerisinde artış gösterdiği görülmektedir (Tablo 4). MTA'nın 2023 yılında yayımladığı, Türkiye üzerinde jeotermal kaynakların dağılımını gösterildiği haritada Çanakkale ilinin jeotermal enerji bakımından zengin olduğu görülmektedir (Şekil 2).

Tablo 4

Yıllar itibariyle lisanslı YEKDEM santral sayısı

Enerji türü	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Solar	-	-	2	3	9	17	32	36
Hidroelektrik	126	388	418	447	463	463	449	426
Rüzgar	60	106	141	151	160	165	204	224
Biyokütle	34	42	57	70	100	126	191	293
Jeotermal	14	20	29	37	45	50	53	57
Toplam	234	556	647	708	777	821	929	1.036

EPDK, 2022, düzenlenmiştir



Şekil 2. Türkiye jeotermal kaynakların dağılımı ve uygulama haritası.

MTA, 2023d

Dünya’da jeotermal enerjiden elektrik üretimi ilk kez 1904 yılında İtalya’da bulunan Larderello jeotermal alanında gerçekleştirilmiştir. Ancak, dünya genelinde jeotermal enerjiden elektrik üretimine yönelik araştırma ve çalışmalar 1950’li yıllardan itibaren yoğunluk kazanmıştır. Bunun başlıca nedeni jeotermal kaynaktan üretilen enerjinin, fosil yakıtlardan elde edilen enerji türlerine göre daha temiz bir enerji kaynağı olduğunun farkına varılmasıdır. Jeotermal santrallerde, karbon dioksit emisyonu kömür ve petrol santrallerine göre çok daha düşüktür. Kömür ve petrol santrallerine kıyasla 1000-2000 kat daha az emisyon üretirler ve aynı şekilde sülfür dioksit gazı da atmosfere çok az miktarda salınmaktadır (Kahraman, 2022).

Jeotermal enerji, doğrudan ya da diğer enerji türlerine dönüştürülebilen ve bu hâliyle değerlendirilebilen doğal bir kaynaktır. Türkiye’nin jeolojik yapısının çeşitliliği dikkate alındığında, jeotermal sistemler genç tektonik ve volkanik aktif kayalara bağlı olarak gelişmiştir. Batı ve İç Anadolu özellikle jeotermal kaynaklar açısından zengin bölgelerdir. En yüksek kuyu dibi sıcaklığına sahip jeotermal kuyu İç Anadolu’da açılmış ve 3845 metre derinlikte kuyu taban sıcaklığı 341°C olarak ölçülmüştür. 2022 yılında Türkiye’nin elektrik üretim kapasitesi 1663 MWe ve toplam kurulmuş olan doğrudan ısı kullanımı 5113 MWt’a ulaşmıştır (Şener, vd., 2023; REN21, 2021).

Doğal kaynaklar yerinde ve bilinçli kullanıldığında ülkelerin refah seviyesi artmaktadır. Ancak, bu kaynakların hızlı bir şekilde tükenmesi ve üretim-tüketim döngüsünden kaynaklanan atıkların kontrolsüz bir biçimde doğaya bırakılması, çevre kirliliğinin oluşmasına neden olmaktadır. Jeotermal kaynaklar, fosil yakıtlarla kıyaslandığında çevreye daha az zarar veren yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bununla birlikte, jeotermal kaynakların kullanımının ardından ortaya çıkan suların çevreye deşarjı ile birtakım sorunlar yaşanmaktadır.

Jeotermal sular, kullanıldıktan sonra bir kısmı yeniden yer altına enjekte edilirken (reenjeksiyon), önemli bir bölümü çevresindeki soğuk su kaynaklarıyla karışarak sulama, içme gibi amaçlarla kullanılan sulara karışabilmektedir. Bu durum, jeotermal suların tatlı su kaynaklarının kalitesini bozmasına hatta kullanılamaz hale gelmesine neden olabilmektedir (Torunlar vd., 2019). Jeotermal enerji kullanımının çevresel etkilerini azaltmak için daha etkili yöntemlerin geliştirilmesi ve atık su yönetiminin daha dikkatli bir şekilde yapılması önemli bir konudur. Atık jeotermal sular, içerisinde çeşitli elementleri barındırdığından, bu suların kullanımının ardından yüzey ve yeraltı sularına karıştırılmaması gereklidir. Çünkü bu tür sular, içerdikleri elementler nedeniyle tatlı su kaynaklarına, tarım arazilerine, bitkilere, insanlara ve hayvan sağlığına büyük bir risk oluşturabilir. Özellikle tarımsal sulama için kullanılacak yüksek konsantrasyonda farklı element içeren bu jeotermal suların, tarım alanlarını tahrip etmeden arıtılarak kullanılması önemlidir (Torunlar vd., 2019). Jeotermal kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılması ve çevresel etkilerinin en aza indirilmesi, jeotermal atık sularının yönetimi açısından özenle planlanmalı ve uygulanmalıdır.

Suların arıtılması için geliştirilen çeşitli metotlar bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında adsorpsiyon, elektrodializ, membran filtrasyon yöntemleri, iyon değişimi ve kimyasal çöktürme yer almaktadır. Özellikle B elementinin arıtılmasında, adsorpsiyon yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, su içinde bulunan kirleticilerin bir adsorban tarafından emilmesini sağlayarak temizlenmesini amaçlar. Bu sayede, özellikle jeotermal suların içerdiği B, As, Fe, Al gibi yüksek konsantrasyonu zararlı olan elementlerin su kalitesini olumsuz etkilemesini engellemek ve çevresel riskleri azaltmak mümkün olmaktadır (Girgin, 2019).

Günümüzde etkili atık su yönetimi için su kaynaklarının arıtılmasında çevre dostu, uygun maliyetli ve daha az karmaşık bir arıtma sistemine sahip olma gibi önemli faktörlere dikkat edilmesi gerekmektedir. Adsorpsiyon, atık suların arıtılmasında etkili bir yöntemdir. Yapılan çalışmalar, adsorpsiyon yönteminin B giderimindeki etkinliğini kanıtlamıştır. Bu çalışmalarda, B adsorpsiyonunun etkinliğinin kullanılan adsorbanın türüne bağlı olduğu ortaya konmuştur. Bu nedenle, düşük B konsantrasyonlarında adsorpsiyon yöntemi, B giderme yöntemleri içinde uygun ve ekonomik özellikleri ile öne çıkmaktadır. Literatürde birçok adsorban malzeme bulunmaktadır. Ancak, atık olarak kabul edilen materyallerin kullanımı, atık yönetimi ve arıtma süreçleri açısından yenilikçi bir yaklaşımı temsil etmektedir. Özellikle B giderimi için yapılan deneysel çalışmalarda çevre dostu ve ekonomik arıtma çözümleri bulunmaktadır (Çelebi, 2020).

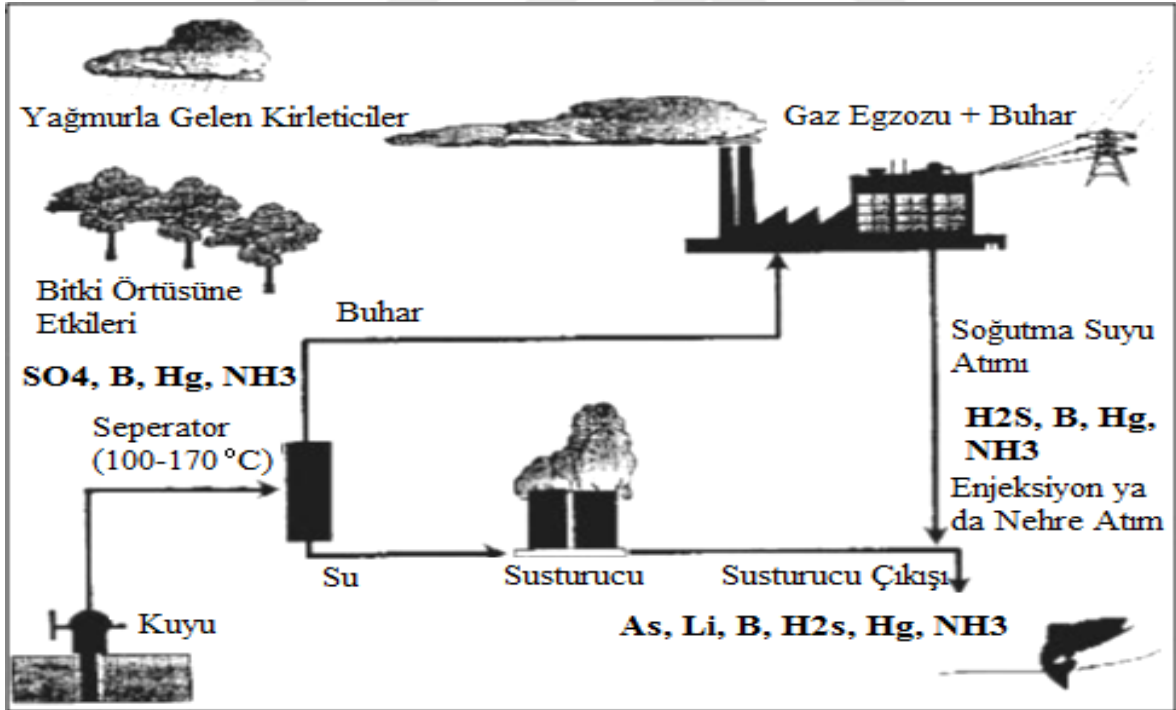
Adsorpsiyon, B elementinin giderilmesi için pahalı kimyasallara ihtiyaç duymadan, düşük maliyetlerle uygulanabilen bir işlemdir. Ayrıca, düşük B derişimine sahip sularda da kullanılabilirliği, adsorpsiyon yöntemini diğer arıtma metotlarından ayıran önemli bir özelliktir. Diğer giderme yöntemlerinin genellikle düşük giderim verimleri ve arıtma işlemi sırasında potansiyel olarak zararlı atıkları ortaya çıkarması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Adsorpsiyon, bu dezavantajları azaltarak etkili bir B giderme süreci sağlar. Bu nedenle, adsorpsiyon, B giderimi için en çok araştırılan ve tercih edilen işlemlerden biridir (Türker ve Baran, 2017; Wolska ve Bryjak, 2013).

Uçucu kül, büyük bir özgül yüzey alanına ve geniş bir tane dağılımına sahip olan bir malzemedir. Bu özellikleri, uçucu külü kaliteli bir adsorban haline getirir. Bu durum, içerdiği karbon yüzdesi ve tanecikler arası boşluk hacmi sayesinde. Ayrıca, uçucu külün ekonomik olması ve adsorpsiyon işlemlerinde, özellikle ağır metallerin gideriminde, ticari kullanımı daha yaygın ve maliyetli olan aktif karbon gibi adsorban maddelerine bir alternatif sunmaktadır (Çınar, 2014).

1.3. Jeotermal Enerji ve Çevre

Jeotermal alanlarda sıcaklık, su-kayaç arasındaki etkileşimi belirleyen önemli bir faktördür. Ayrıca bu etkileşimlerin sonucunda ortaya çıkan yüksek element konsantrasyonları, jeotermal kaynakların özelliklerini belirler. Sıcaklık, reaksiyon hızını

artırıcı bir faktördür ve ortam sıcaklığındaki her 10 °C'lik artış, reaksiyon hızını 2-3 katına çıkarabilir. Bu durum, yüksek sıcaklıklı jeotermal akışkanların içerdikleri yüksek element konsantrasyonlarına sebep olur (Aslan, 2010). Jeotermal suların kontrolsüz kullanımının ardından, sıklıkla bu suların ya doğrudan tarım alanlarına yönlendirildiği ya da tarımsal sulama için kullanılan su kaynaklarına ve derelere deşarj edildiği gözlemlenmektedir. Jeotermal suların kontrolsüz deşarjı, toprakta tuz birikimine neden olarak tarım alanlarını verimsizleştirebilir. Ayrıca, bu suların içerdikleri yüksek element konsantrasyonları, sulama sistemlerinde ve su kaynaklarında olumsuz etkilere yol açabilir. Jeotermal kaynakların etkin ve çevre dostu bir şekilde yönetilmesi, çeresindeki soğuk su kaynaklarının ve yüzey sularının, tarım arazilerinin korunması ve çevre sorunlarının önlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, jeotermal suların kontrollü ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılması, çevresel etkilerin minimize edilmesi için önemlidir (Karatepe vd., 2023). Jeotermal akışkandaki kirleticilerin içinde B elementinin yanı sıra As, Li, Hg gibi bir çok ağır metallerde bulunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Jeotermal akışkanın içerdği kirleticiler.

Aslan, 2010

Elmacı (1995) yaptığı çalışmasında, topraktaki yüksek B konsantrasyonunun, toprağın gözenekliliğini azalttığı ve bitki köklerinin hava almasını engellediğini belirtmiştir.

Bu durum, bitkilerin kök sistemi için uygun bir büyüme ortamının oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca bitkilerde su ve besin alımı sorunları yaşanabilir, bu da bitkilerin kurumasına neden olabilir.

Banuelos vd. (1999), B elementinin, yüksek konsantrasyonlarda biriktiğinde çoğu bitki türü için toksik olduğunusaptanmıştır. Şili’de yaptıkları çalışmada, B’un 20-40 mg/l’de mısırın (*Zea mays* L.), havucun (*Daucus carota*), domatesin (*Lycopersicum esculentum*) ve yoncanın (*Medicago sativa* L.) çimlenmesini engellediğini kanıtlamıştır.

Birkle ve Merkel (2000), 1994 Kasım ile 1996 Mayıs tarihleri arasında Meksika'daki Los Azufres jeotermal sahasının çevresel sorunlar hakkında çalışmıştır. Araştırmacılar, jeotermal sahanın yaklaşık 10 km çevresinde iz element derişimlerinde (özellikle F, Mn, Fe, B ve As) artış tespit etmişlerdir. B elementi konsantrasyonu oldukça yüksek olup, 125 mg/l olarak belirlenmiştir. Ayrıca, jeotermal akışkanın toprakların tuzlanmasına sebep olduğu ve içme ve sulama amaçlı kullanılan nehir suyundaki toksik elementlerin insanın canlı dokularında birikerek halk sağlığını tehdit ettiğini ortaya koymuştur.

Tarcan (2002), jeotermal alanlardaki akışkanların yüksek oranlarda çözünmüş madde içermelerinin çevresel sorunlara yol açtığı belirtmiştir. Türkiye'deki jeotermal akışkanların yüksek iyon derişimleri nedeniyle yüzey veya yeraltı sularına karışarak tarım alanlarında önemli üretim kayıplarına yol açmaktığı vurgulanmıştır. Jeotermal kaynakların tarım üzerindeki etkileri, özellikle sulama sularındaki yüksek iyon konsantrasyonlarından kaynaklanan olumsuz etkileri içermektedir. Bu durum, jeotermal suların çevresel etkilerine ve tarım üzerindeki potansiyel zararlarına dikkat çekmektedir.

Badruk (2014), yüksek B derişimi, sulama sularında toprağın gözenekliliğini azaltabilir ve bitki köklerinin hava almasını engelleyerek kurumalarına neden olabilir. Bu durum, bitkilerin normal gelişimini ve büyümesini olumsuz etkileyebilir. Bor, bitkiler için esansiyel bir mikroelementtir, ancak aşırı miktarda bulunması bitkilere zarar verebilir. Bu nedenle, sulama suyundaki B konsantrasyonunun uygun seviyelerde tutulması önemlidir, aksi takdirde toprak ve bitki sağlığı üzerinde olumsuz etkiler gözlenebilir.

Dinç (2005), jeotermal suların bitkiler üzerinde genetik materyali etkileyen ve hücre ölümüne neden olan olumsuz etkilerini saptanmıştır. Bu etkiler, atık sulardaki kimyasal bileşenlerin bitkilerin genetik materyali üzerinde ve hücre yapısında değişikliklere neden olabileceğini işaret edebilir. Bu tür araştırmalar, jeotermal atık sularının çevresel etkilerini ve bitki sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmeye yönelik önemli bilgiler sağlar.

Baba ve Ármannsson (2006), Türkiye'deki jeotermal enerji potansiyelin yüksek olduğunu ifade etmiştir. Jeotermal suların yüksek konsantrasyonda As, B, Cd ve Pb içerdiğini belirtmiştir. Ayrıca yüksek element içeriğinin kabuklaşma ve korozyon sorunlarına neden olabileceğini saptamıştır. Jeotermal deşarjların reenjeksiyon yapılmadığı için toprakta ve çevresindeki su kaynaklarında kirlenmeye neden olduğunu, bu olumsuz etkilerden kaçınmak için standart bir prosedür olarak jeotermal alanlarda reenjeksiyonun uygulanması gerekliliğini vurgulanmıştır.

Kiracı (2014), B elementinin bitkiler üzerinde yaprak dökümü, meyvelerde olgunlaşmadan dökülme, lekelenme ve çürüme gibi etkilere sebep olduğunu belirtmiştir. Yüksek B konsantrasyonunun bitki büyümesi ve gelişimi üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceğini kanıtlamıştır.

Cao vd. (2017), yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerin derin dolaşım ve yoğun su-kayaç etkileşimi nedeniyle yüksek konsantrasyonda element içerdiğini ifade etmiştir. Yapılan çalışmada Qinghai eyaletindeki jeotermal sularında F, B ve As ve diğer toksik içeriklerin WHO tarafından önerilen değerleri onlarca kat aştığı belirtilmiştir. Ayrıca Qinghai eyaletindeki bazı jeotermal sahaların yerleşim alanlarına yakın olduğu ve jeotermal suların doğrudan yüzey sularına deşarj edildiğini için çevresel etkilerinin araştırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Ar (2019), jeotermal suların çilek bitkisi üzerine etkilerini araştırmıştır. Jeotermal suyun B oranı arttırıldıkça çilek bitkisinde meyve kaybı, yapraklarda çürüme ve büyümede gerilik gibi olumsuz etki saptanmıştır.

1.4. Bor Minerali ve Giderim Yöntemleri

B elementi, periyodik cetvelin 3A grubunda yer alır ve yüksek iyonlaşma potansiyeline sahip olduğu için yarı metal olarak sınıflandırılır. Yerkabuğundaki B konsantrasyonu ortalama olarak 10 mg/kg'dır. B elementi genel anlamda ülkelerin ekonomileri içerisinde değeri yüksek bir elementtir. B yatakları genellikle Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitelerin yoğun olduğu bölgelerde bulunmaktadır. B bitki büyümesi üzerinde önemli bir rol oynar ve bitkilerin sağlıklı gelişimi için gereklidir. Ancak, aşırı miktarda B toksik etkilere neden olabilir. Bu nedenle, B elementinin bitki beslenmesinde dengeli bir şekilde kullanılması önemlidir (Başkan ve Atalay, 2013).

B bileşikleri, içerdikleri Ca, Mg, Na elementlerine göre adlandırılmaktadır. Bu bileşiklerin içerdikleri elementlere göre farklı isimlendirmeleri şu şekildedir: Na içerenler "Tinkal" (boraks), Ca içerenler "Kolemanit," Na-Ca içerenler ise "Üleksit" (Tablo 5). B bileşikleri arasında, boratlar, endüstriyel uygulamalarda, tarım sektöründe ve kimyasal üretimde çeşitli alanlarda kullanıldıkları için ticari açıdan önemli bileşiklerdir (Sönmez, 2014).

Borik asit, 9,2 pKa değerine sahip çok zayıf bir asittir. Bu asidin özellikleri, çözelti içindeki pH değerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Aşağıda belirtilen durumlar borik asidin farklı formlarda bulunmasına işaret eder:

pH < 7: Bu durumda, borik asit çözünmeyen formda bulunur.

pH > 10,5: bu durumda borik asit çözünmüş borat formunda bulunur. pH değeri, bir çözeltinin asidik, nötr veya alkalın olma derecesini belirler, bu da borik asidin hangi formda bulunacağını etkil eder (Kabay vd., 2010).

Türkiye topraklarında B elementinin bulunma miktarı, diğer birçok ülkeye kıyasla oldukça yüksektir. B, Türkiye'de içme suyu kaynaklarını ve sulama sularını önemli ölçüde etkileyen toksik elementlerden biridir. Ancak, yüksek B konsantrasyonları, içme suyu ve tarımsal sulama suyu kalitesi açısından sorun oluşturabilir. Bu nedenle, içme suyu kaynaklarının ve tarımsal sulama sularının B içeriğinin düzenli kontrol edilmesi ve gerektiğinde ise artırılması önemlidir. B elementinin etkili bir şekilde giderilmesi, su

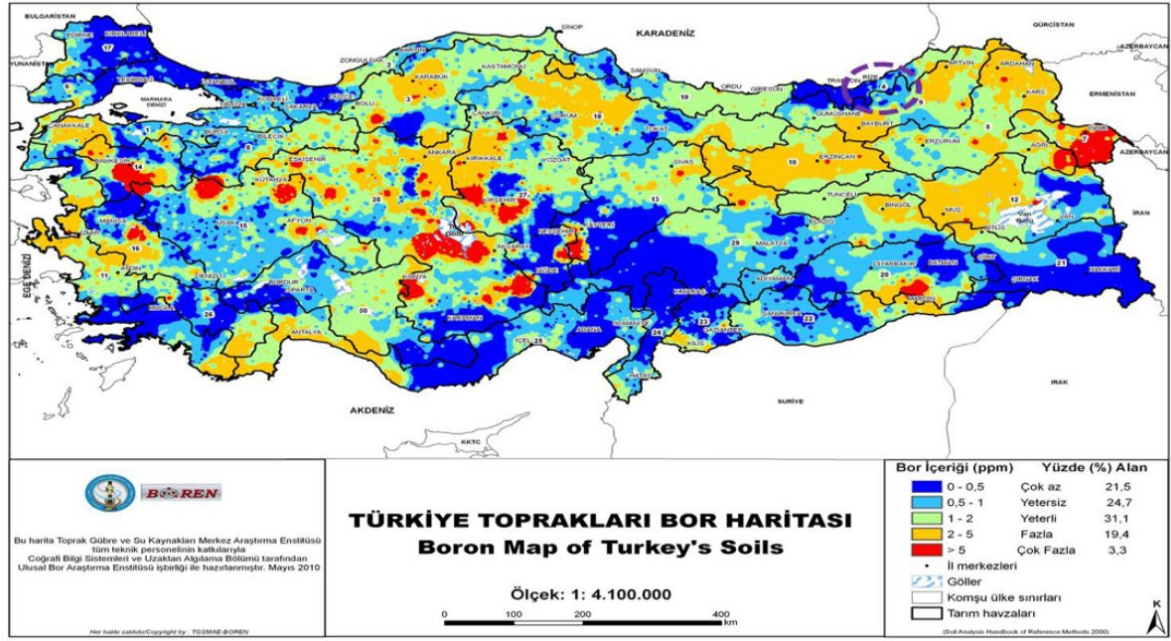
kaynaklarının kalitesini artırmak ve sağlıklı tarım ürünleri elde etmek adına önemlidir (Sönmez, 2014). Eti maden toprağın B içeriği üzerine yaptığı çalışmalar sonucunda ortaya çıkan haritada Çanakkale ilindeki topraklarda B elementinin yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4).

Tablo 5

B elementi ve bazı B bileşiklerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri

	Bor	Borik Asit	Boraks	Pentahidrat	Susuz Boraks	Bor Oksit
Molekül Formülü	B	H ₃ BO ₃	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O	Na ₂ B ₄ O ₇	B ₂ O ₃
Molekül Ağırlığı	10,81	61,83	381,43	291,35	201,27	69,62
Bor İçeriği (%)	100	17,48	11,34	14,85	21,49	31,06
Fiziksel Görüntü	Siyah kristal ya da sarı-kahverengi amorf toz	Beyaz ya da renksiz kristal granül veya toz	Beyaz ya da renksiz kristal granül	Beyaz ya da renksiz kristal granül	Beyaz ya da renksiz cam Granül	Beyaz ya da renksiz cam Granül
Özgül Ağırlık (20°)	2,34	1,51	1,73	1,81	2,37	2,46
Sudaki Çözünürlüğü (%)	Çözünmez	472 20° 27,53 100°	4,71 20° 65,63 100°	3,6 20° 50,15 100°	2,48 20° 34,5 100°	borik aside hidratlaşır
Buhar Basıncı	1,56x10 ⁻⁵ atm 2140 C°	-	-	-	-	-

EPA, 2004



Şekil 4. Türkiye topraklarındaki B dağılımı.

ETİ Maden, 2023

Önceki çalışmalarda B elementi uzun yıllar boyunca toksik bir element olarak değerlendirilmemiş ve uluslararası standartlarda içme sularındaki B elementine ilişkin öneriler 1984 yılına kadar yapılmamıştır. Ancak, 1993 yılında WHO tarafından içme sularındaki B elementi için standartlar belirlenmiş ve bu standartlara göre önerilen maksimum konsantrasyon 0,3 mg/l olarak belirlenmiştir. Laboratuvar çalışmalarında B elementinin hayvanlarda pek çok zararlı etkiye sebep olduğu görülerek bu standartlar öne çıkmıştır. Ancak, sulardan B elementinin giderimi için kullanılan proseslerin performanslarının düşük olması nedeniyle 1998 yılında bu değer 0,5 mg/l olarak revize edilmiştir. Günümüzde WHO tarafından B toksisitesi ve su kalitesi standartları gereği içme suyu için onay verilen maksimum B konsantrasyonu seviyesi 2,4 mg/l'dir. Sulama amaçlı ise bu oran, 1 mg/l olarak belirlenmiştir (WHO, 2011). Ülkemizde İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmeliğe göre içme suyu kalitesini düzenlemek ve insan sağlığını korumak amacıyla onay verilen maksimum B konsantrasyonu 1 mg/l olmalıdır. Dünyanın çeşitli bölgelerine ait içme suyunda izin verilen maksimum B konsantrasyonları: Suudi Arabistan'da 0,5 mg/l, ABD'de 0,6-0,9 mg/l değerleri arasında, Avrupa Birliği devletleri, Güney Kore, Türkiye ve Japonya'da 1 mg/l, Yeni Zelanda'da 1,4 mg/l, İsrail'de 1,5 mg/l, Avusturalya'da 4 mg/l, Kanada'da ise 5 mg/l olarak belirlenmiştir (Hilal vd., 2011). Bor

giderimi için farklı pek çok metot kullanılmakla birlikte bu metotların avantaj ve dezavantajları Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6

B giderim yöntemlerinin kıyaslanması

Yöntem	Olumlu	Olumsuz
Kimyasal çöktürme ve filtrasyon	Kolay ekonomik	Yüksek derişimlerde ayrılması zor
Adsorpsiyon	Sorbentlerin aktif karbon kullanımı	Bazı metaller için uygun değil
İyon değişimi	Etkili arıtım ve saf atık metallerin kazanımı	Partiküllerin hassas ve reçinelerin ekonomik olmaması
Ters osmoz	Geri dönüşüm için saf atık eldesi	Yüksek basınç Membran boyutu Ekonomik olmaması
Elektrokimyasal yöntemler	Metallerin kazanımı	sadece yüksek derişimlerde etkili ekonomik olmaması
Buharlaştırma	Saf atık elde etme	Çok enerji tüketimi Ekonomik değil

Hamutoğlu vd., 2012

1.4.1.Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, bir yüzey veya ara kesitte maddenin toplanarak derişimini arttıran bir süreçtir. Bu süreç, genellikle farklı iki faz arasında gerçekleşir (sıvı-sıvı, gaz-katı, sıvı-katı gibi). Adsorplanan madde, yüzeye tutunan maddeyi ifade ederken, bu maddelerin üzerinde tutunduğu yüzeye ise adsorban denir. Adsorpsiyon, çeşitli uygulama alanlarında kullanılan etkili bir ayırma ve arıtma yöntemidir (Şengül ve Küçükgül, 1990). Adsorpsiyon, düşük kirletici konsantrasyonlarında diğer giderme yöntemlerine göre daha kullanışlı ve ekonomik bir yöntemdir (Başkan ve Atalay, 2014).

Adsorpsiyon, atık suların temizlenmesi ve tarımsal/endüstriyel kullanım için yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif karbon, silika jel, uçucu kül, kil mineralleri, sentetik reçineler,

polimerler gibi çeşitli malzemeler, kirleticileri adsorbe ederek veya yüzeylerine bağlayarak atık sulardan ayrılmasına yardımcı olurlar (Bayar, 2001). Scheele'in 1773 yılında yaptığı deney ile ilk kez gazlardaki adsorpsiyon gözlemlenirken, Lowitz'in 1785 yılında yaptığı deney ile ilk kez sıvılardaki adsorpsiyon gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, adsorpsiyonun keşfedilmesine ve anlaşılmasına katkıda bulunmuştur (Xıyılı, 2015). Atık sular içindeki toksik elementlerin adsorpsiyon yöntemiyle giderimi, etkin ve ekonomik bir yaklaşım sunmaktadır, çünkü adsorbanın türü bu süreci destekleyen önemli bir faktördür. Bu süreç, ara yüzeylerde gerçekleşen iki farklı fazı birbirinden ayıran bir tutunma olayına dayanmaktadır.

Adsorplanan moleküller ile adsorplayıcı yüzey arasındaki çekim kuvvetlerinin türüne bağlı olarak üç farklı adsorpsiyon tipi bulunmaktadır.

Fiziksel Adsorpsiyon: Katı yüzey ile adsorplanan madde molekülleri arasındaki fiziksel çekim kuvvetleri sonucu oluşur (Sönmez, 2014). Fiziksel adsorpsiyonda adsorplanan moleküllerini adsorplayıcı yüzeyine bağlayan kuvvetler, zayıf Van der Waals kuvvetleridir. Çekim kuvvetleri zayıf olduğu için desorpsiyon daha kolay ve hızlıdır. Fiziksel adsorpsiyon genellikle düşük sıcaklıkta gözlenir ve buna bağlı olarak düşük enerjili bir adsorpsiyon ile karakterize edilir. Fiziksel adsorpsiyon tersinir olup, proses çok çabuktur. Sıcaklık arttıkça fiziksel adsorpsiyon genellikle azalmaktadır (Berkem ve Baykut, 1984; Hamutoğlu vd., 2012; Sönmez, 2014).

Kimyasal adsorpsiyon: Adsorplanan molekülleri ile adsorplayıcı yüzey molekülleri ya da atomları arasındaki kimyasal bağdan kaynaklanır (Sönmez, 2014). Kimyasal etkileşim söz konusu olduğu için daha güç desorpsiyon olur. Kimyasal olarak adsorplanmış moleküller ara yüzeyde serbest olarak hareket edemez. Bu tür adsorpsiyonda adsorplanan, adsorplayıcı üzerindeki aktif merkezlerle kuvvetli bağlar oluşturur. Adsorplayıcı ve adsorplanan arasındaki bağ, kimyasal tepkimelerde olduğu gibi sıcaklık artışıyla daha da kuvvetlenir (Çokadar vd., 1999; Sönmez, 2014).

İyonik Adsorpsiyon: Adsorplanan ve adsorplayıcı arasındaki elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisi ile iyonların yüzeydeki yüklü bölgelere tutunması olayıdır (Sönmez,

2014). Adsorplayıcı ve adsorplanan maddenin zıt elektrik yüklerine sahip olması ve yüzeylerin birbirini çekmesi gereklidir (Hamutoğlu vd., 2012).

Adsorpsiyon prosesini etkileyen en önemli parametreler aşağıda özetlenmiştir.

Adsorbanın yüzey alanı: Adsorpsiyonun bir yüzeye tutunma süreci olup, yüzey alanı arttıkça adsorpsiyon da artar. Özellikle adsorplayıcı maddenin partikül boyutunun küçük, yüzey alanının geniş ve gözenekli bir yapıda olmasının, adsorpsiyonu artırır. Bu durum, adsorpsiyon sürecinin etkinliğini belirleyen önemli faktörler arasındadır. Bu nedenle, adsorpsiyon üzerine yapılan çalışmalarda, adsorbanın yüzey alanının belirlenmesi önemlidir (Sabah vd., 2002; Aras, 2007).

Adsorbanın partikül boyutu: Adsorplayıcı maddenin partikül boyutu, adsorpsiyon hızını etkiler. Partikül boyutu küçüldükçe, yüzey alanı artmakta ve adsorplanan miktar da artmaktadır. Örneğin atık su arıtımında kullanılan toz aktif karbonların adsorpsiyon hızı, granül aktif karbonların adsorpsiyon hızından daha yüksektir (Çınar, 2014).

Adsorban molekülünün büyüklüğü: Adsorban molekülünün büyüklüğü, özellikle gözenekli yapıya sahip olması önemlidir. Adsorplayıcının gözenek büyüklüğüne en uygun büyüklükte olan molekül daha iyi adsorplanır. Örneğin büyük gözenekli aktif karbon partiküllerinin küçük tane boyutuna dönüştürülmesi ile adsorpsiyon için uygun hale getirilen ince gözenekleri ortaya çıkarır. Bu süreç, karbonun adsorpsiyon kapasitesini artırır. Mikro gözeneklerin hacmindeki artış, adsorban içinde daha fazla yer kaplamasına neden olarak yüzey alanını artırır (Çınar, 2014).

Adsorbanın çözünürlüğü: Adsorbanın çözünürlüğü, adsorpsiyon dengesini düzenlemede önemli bir faktördür. Çözünen maddenin adsorpsiyon hızı ile sıvı fazdaki çözünürlüğü arasında ters bir ilişki vardır. Çözünürlük arttıkça, adsorban ile çözelti arasındaki bağ kuvvetlenir ve adsorpsiyon miktarı azalır (Çınar, 2014).

Ortam pH'ı: Adsorpsiyon sürecini etkileyen önemli faktörlerden biri çözeltinin pH değeridir. H^+ ve OH^- iyonlarının kuvvetli adsorplanmalarından dolayı diğer iyonların

adsorpsiyonu çözeltinin pH değerinden etkilenir. Çözeltideki pH değeri nötr olduğunda adsorpsiyon hızı artar. Ortamda fazlaca hidrojen veya hidroksil iyonu bulunursa bu iyonlar adsorplanan madde iyonları ile yüzeye tutunma yarışına girerler (Sönmez, 2014).

Sıcaklık: Sıcaklığın artmasıyla, çözeltinin yoğunluğuna bağlı olarak adsorban moleküllerinin adsorban partikülünün gözeneklerine doğru, sınır tabakasından difüzyon oranı artar. Adsorplama işlemi, sıcaklığa bağlı olarak endotermik veya ekzotermik olarak değişir. Genel olarak sıcaklık arttıkça reaksiyon hızının da artmaktadır (Sönmez, 2014).

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu yüksek lisans tezinin amacı, adsorpsiyon yöntemi ile ilk kez Kestanbol jeotermal akışkanından B elementi gideriminin araştırılmasıdır. Yöntemde adsorban madde olarak uçucu kül kullanılmıştır. Bu amaç ile farklı parametrelerin (adsorban miktarı, sıcaklık, temas süresi ve pH) adsorpsiyona etkisi incelenmiştir. Jeotermal sudan maksimum bor giderimi için uygun koşullar tespit edilmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Bor Mineralinin adsorpsiyon Yöntemi ile Giderilmesi Çalışmaları

Kentsel, tarımsal ve sanayi kökenli atık sularından bor elementini uzaklaştırmak amacıyla magnezyum oksit kullanılmıştır. Magnezyum oksitin B bileşiklerini tutma süreci detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, magnezyum oksitin çözelti içindeki özelliği ve temas süresinin B tutma sürecinde tesirli olduğu belirlenmiştir. Kullanılan reaktifin önemli bir alkalileştirici kapasiteye sahip olduğu da tespit edilmiştir. Ayrıca, çeşitli değişkenler arasındaki ilişkilerin detaylı incelenmesi sonucunda, belirli koşulların optimize edilmesiyle %95'in üzerinde bir B giderimine ulaşmak mümkün olmuştur (Garcı'a-Soto ve Camacho, 2006).

Adsorban olarak uçucu kül, doğal zeolit ve demineralize linyit kullanılarak B elementinin sulu çözeltilerden uzaklaştırılması incelenmiştir. Araştırmada, farklı kapasitelerde olan adsorban maddeler kullanılmıştır. Uçucu kül ile gerçekleştirilen deneylerde B giderimi %90 oranında sağlanmıştır. Bu sonuçlar, uçucu külün, diğer adsorban maddeler olan doğal zeolit ve demineralize linyit ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir B giderim verimine sahip olduğunu kanıtlamıştır (Yüksel ve Yürüm, 2010).

Sulardan B giderimi için tercih edilen yöntem, alüminyum bazlı adsorban maddelerin kullanılmasıdır. Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve SiO_2 gibi adsorban maddelerin seçilmiş olması, bu materyallerin B adsorpsiyon kapasitelerini değerlendirmek amacını taşımaktadır. Araştırmada, pH, adsorban madde miktarı ve sıcaklığın B giderim verimine olan etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, en etkili B giderim veriminin alüminyum oksit adsorbanında olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, pH, adsorban madde miktarı ve sıcaklığın bu süreç üzerindeki etkileri de incelenerek optimize edilmiş ve uygun koşullar belirlenmiştir (Irawan vd., 2011).

Sulu çözeltilerden B gideriminde, 1-1,6 mm büyüklüğündeki uçucu kül partiküllerinin etkisinin belirlenmesi amacıyla Zgierz (Polonya) santralinden elde edilen uçucu kül partikülleri kullanılmıştır. Bu partiküller, kömür ve biyokütle yakılarak

üretilmiştir. Çeşitli faktörlerin, pH, sıcaklık, adsorban madde miktarı, başlangıç B konsantrasyonu ve temas süresi gibi parametrelerin, uçucu küllerin B giderimine olan etkisinin detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan çalışmaya göre, çözelti pH değerinin yaklaşık 8,5 olduğunda, B gideriminde %90'a varan bir etkinin gözlemlendiği ifade edilmiştir (Polowczyk vd., 2013).

Şahin (2021), Tuzla jeotermal akışkanından adsorpsiyon ve mikrodalga ısınımı yöntemleri ile B giderimini araştırmıştır. Bu amaç ile adsorpsiyon deneylerinde adsorban olarak uçucu kül ve zeolit kullanılmıştır. Mikrodalga ısınımı deneylerinde ise uçucu kül ve kireçtaşı kullanmıştır. Adsorpsiyon ile B gideriminde pH, adsorban dozu, temas süresinin etkisi, sıcaklığın etkisi ve adsorbanın tekrar kullanılabilirliğini incelenmiştir. Maksimum B giderimi için uygun koşullar tespit edilmiştir.

Yılmaz vd. (2005), Amberlite IRA-743 spesifik reçinesinin başarılı bir B adsorbanı olarak kullanıldığını ortaya koymuştur. Bu reçine, N-metil-D-glukamin yapısına sahip olup, içerdiği hidroksil grupları sayesinde borat iyonları ile şelat oluşturarak etkili bir B giderimi sağlamaktadır. Amberlite IRA-743'ün bu özellikleri, reçinenin borat iyonlarına karşı özgül bir seçiciliğe sahip olduğunu ve B adsorpsiyonunu etkili bir şekilde gerçekleştirebildiğini göstermektedir. Çalışma sonuçlarına göre, bu reçine kullanılarak elde edilen B giderimi %90'ın üzerindedir.

Çengeloğlu vd. (2007), alüminyum üretim prosesi atığı olarak bilinen nötralize kızıl çamurun B giderimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Kesikli sistem çalışmaları sonucunda atık sudan B %90 oranında giderilmiştir. Bu çalışma, atık malzemelerin geri dönüştürülmesi ve B gideriminde kullanılması açısından potansiyel bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Demirçivi (2008), HDTMA ile modifiye edilmiş doğal zeolitin, çeşitli konsantrasyonlardaki B çözeltilerinde giderim performansını incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre, özellikle yüksek konsantrasyonlardaki (40 mg/l) başlangıç çözeltileri için pH 8,5'te %85 civarında etkili bir bor adsorpsiyon verimi elde edildiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, HDTMA ile modifiye edilmiş doğal zeolitin, B giderimi konusunda başarılı bir adsorban madde olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Ülkemizde bol miktarda

bulunan doğal zeolitin modifiye edilerek bu alanda kullanılması, ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif oluşturabilir.

Öztürk ve Köse (2008), Dowex 2X8 anyon değişim reçinesinin sulu çözeltilerden B elementinin giderimindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, adsorpsiyon süresi, pH değeri, başlangıç B derişimi, adsorban miktarı ve sıcaklık gibi çeşitli faktörlerin sulu çözeltideki B'un giderilmesine olan etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, sıcaklık ve başlangıç B derişiminin yüksek olmasının B giderim yüzdesini azalttığı gözlemlenmiştir. Ancak, adsorban miktarının artmasıyla birlikte B giderim yüzdesinin arttığı belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, pH değerinin 9 olduğu koşullarda maksimum B giderimi elde edilmiştir. Bu durum, pH'ın bu seviyede optimum olduğunu ve B reçine üzerine daha etkili bir şekilde adsorbe edildiğini göstermektedir. Dowex 2X8 reçinesinin B giderimi için etkili bir adsorban madde olduğu ve uygun koşullarda kullanıldığında yüksek verim elde edilebileceği belirlenmiştir.

Reinert vd. (2011), doğal kil minerali kullanılarak B giderimi üzerine atık sudan B giderimini araştırmıştır. Başlangıç B konsantrasyonlarını 1-100 mg/l arasında değiştirilen değerleri içermektedir. Doğal kil minerali, aluminasilikat içeriğine sahip olup, N-metil-D-glukamin yapısıyla modifiye edilmiştir. Bu işlem sonucunda, kil mineralinin B giderim verimliliği %80'e ulaşmıştır. Bu bulgular, doğal kil mineralinin B gideriminde etkili bir adsorban madde olarak kullanılabileceğini ve özellikle N-metil-D-glukamin yapısıyla modifiye edilmesinin bu etkinliği artırdığı tespit edilmiştir.

Gazi ve Shahmohammadi (2012), B giderimi amacıyla kullanılan glisidol ile modifiye edilmiş amin içerikli kitosanın etkisini değerlendirmiştir. Yapılan çalışmada, başlangıç konsantrasyonu 100 mg/l B olan çözeltide %96 oranında giderim elde edilmiştir. Bu sonuçlar, glisidol ile modifiye edilmiş amin içerikli kitosanın B giderimi konusunda oldukça başarılı bir adsorban madde olabileceğini işaret etmektedir.

Sönmez (2014), sulardan B giderimi için adsorpsiyon yöntemini kullanmıştır. Adsorpsiyon yöntemi için GDH (Granül Demir Hidroksit) adlı bir adsorban madde kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, GDH ile maksimum B giderimi verimi yaklaşık

%96'dır. Bu sonuçlar, GDH kullanımının B giderimi için etkili bir adsorban madde olduğunu göstermektedir.

Soylu ve Gökkuş (2017), zeolit türlerinin su ve atık su uygulamalarında, sertlik giderimi ve ağır metal giderimi alanında önemli bir potansiyel taşıdığı vurgulanmaktadır. Yapılan vurgu, Türkiye'de bulunan zeolit madenlerinin rezervlerinin, kullanım alanlarının ve teknolojik özelliklerinin araştırılmasının büyük bir öneme sahip olduğunu belirtmektedir. Bu araştırmalar, yerel kaynakların daha etkili ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyabilir ve aynı zamanda su ve atıksu yönetimi gibi alanlarda çözümler sunabilir. Doğal zeolit potansiyelinin belirlenmesi, ülkedeki su kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin artmasına katkıda bulunabilir. Bu tür çalışmaların, doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi ve çevre kirliliğinin azaltılması amacıyla atılan önemli adımlar olduğu düşünülebilir.

Kartikaningsih vd. (2017), elektrokoagülasyon yöntemi ile metalik Ni köpüğü elektrot kullanarak, B elementini çözeltiden uzaklaştırmayı amaçlamışlardır. Deneysel sonuçlar, giderme veriminin pH 8-9'da maksimuma çıktığını ve pH değeri bu aralığın üzerine çıktığında giderimin azaldığını ortaya koymuştur. Başlangıçta elektrotların çevresinde arıtılmış atık suda ölçülen B oranı 10 mg/l iken, bir süre sonra arıtılmış atık sudaki B elementinin %99,2'sinin uzaklaştırıldığı ve elektrolit çevresinde 0,1 mg/l daha az B içerdiği gözlemlenmiştir.

Öztürk ve Kavak'ın (2005), adsorban olarak uçucu kül kullanılarak B giderimi üzerine bir araştırma yapılmıştır. Uçucu kül, yapısında metal oksitleri bulunduran bir yanma prosesi atığıdır. Bu çalışmada, asidik bir ortamda metal oksitlerinin pozitif yüklü hale gelerek, negatif yüklü borat iyonlarıyla elektrostatik etkileşimde bulunduğu ve bu süreç sonucunda uçucu kül yüzeyine adsorplanarak ortamdan uzaklaştırıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan kesikli ve sürekli testlerde, %90'a varan oranda B giderimi elde edildiğini göstermektedir. Bu bulgular, uçucu külün etkili bir şekilde B adsorpsiyonu gerçekleştirebileceğini ve B gideriminde potansiyel bir adsorban madde olarak kullanılabileceğini vurgulanmıştır.

Bada ve Potgieter-Vermaak (2008), organik atıkların temizlenmesinde etkili bir adsorban olarak uçucu külün adsorpsiyon kapasitesini artırmayı amaçlamıştır. Uçucu kül, HCl ile kimyasal işleme tabi tutulduktan sonra elde edilen külün spesifik yüzey alanının başlangıçta 2,9969 m²/g olan değeri kimyasal işlem sonrasında 5,4116 m²/g'a çıkarmıştır. Bu, uçucu külün adsorpsiyon özelliklerinin optimize edilmesi yoluyla organik atıkların etkili bir şekilde temizlenmesine katkı sağlayabilecek önemli bir gelişmedir. Elde edilen sonuçlar, uçucu külün adsorpsiyon kapasitesinin belirli yüzey alanındaki artışla, organik atıkların gideriminde daha etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

2.2. Kestanbol Jeotermal Alanında Yapılan Jeolojik ve Hidrojeokimyasal Çalışmalar

Ölmez (1976), hazırladığı MTA raporunda 1975 yılında Kestanbol jeotermal alanında 290 m derinlikli jeotermal sondaj yapıldığını ve sondajda 100-139 m ile 237-290 m derinlik arasında 2 rezervuar bulunduğunu belirtmiştir. Kuyu sıcaklığının 76 °C ve debinin ise 25 l/s olduğunu ifade etmiştir. Jeotermal suyun akifer kayacının altere gnays ve altere siyenit olmasına karşın Na⁺ ve Cl⁻ içeriğinin birbirine uygun yüksekliği rezervuara karışan deniz suyu girişimi ile ilişkilendirmiştir.

Çağlar ve Demirörer (1999), Kestanbol jeotermal alanı ve çevresinde jeotermal aktivite ile ilişkili fay zonlarını belirlemek amacıyla jeoelektrik yöntemi kullanmıştır. Jeotermal alanda iki fay zonu ve kırıklı çatlaklı farklı jeolojik birimlerin bulunduğu belirlenmiştir. Hazırladıkları iki boyutlu jeoelektrik model ve rezistivite haritaları ile jeotermal alanın güneybatısında geçirimli bir zonun varlığı tespit edilmiş ve yeni sondaj lokasyonu önerilmiştir.

Baba ve Ertekin (2007), Kestanbol jeotermal alanının Türkiye'deki en önemli jeotermal alanlardan biri olduğunu belirtmiştir. Jeotermal kaynak sıcaklığının 66-76,2 °C arasında değiştiğini saptamıştır. NaCl su tipinde olduğunu ve $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ içeriğine göre deniz suyu ile meteorik suların karışımı neticesinde oluştuğunu belirtmiştir. Jeotermal suyun yüksek konsantrasyonda içerdiği Na, Cl, As, B ve Se nedeni ile soğuk su akiferi ile karışmamasının gerektiğini ve çevresel etkilerinin incelenmesinin önemini vurgulamıştır.

Farklı jeotermometre yöntemleri kullanarak yaptıkları hesaplamalarda rezervuar sıcaklığının 100-150 °C arasında değiştiğini saptanmıştır.

Tokçaer (2007), doktora tez çalışmasında Batı Anadoluda bulunan jeotermal kaynakların yüksek konsantrasyonda B içerdiğini belirtmiştir. Jeotermal sulardaki B kökenini saptayabilmek amacıyla jeotermal alanların jeolojisi ve jeotermal suların kimyası ile $\delta^{11}\text{B}$ izotop değerlerini birlikte değerlendirilmiştir. Tüm jeotermal sularda B-Cl ve B-EC arasında anlamlı ilişki olduğunu ifade etmiştir. NaCl su tipindeki jeotermal sularda yüksek pozitif $\delta^{11}\text{B}$ içeriğini denizel karışım ile ilişkilendirmiştir.

Yalçın (2007), Biga Yarımadası'ndaki 20 jeotermal ve 8 soğuk su kaynağında fizikokimyasal parametreleri ölçmüş ve yaptığı su örneklemeleri ile hidrokimyasal ve izotopik karakterizasyonunu belirlemiştir. Biga Yarımadası'nda 4 farklı su tipi tanımlamış, su kimyasını etkileyen süreçleri değerlendirmiş, bu kimyasal farklılığı genellikle su-kayaç etkileşimi ile ilişkilendirmiştir. Kestanbol jeotermal sularının NaCl su tipinde olduğunu belirtmiştir. Jeotermal suyun yüksek NaCl içeriğini derinlerdeki sıcak fosil deniz suyu ile ilişkilendirmiştir.

Karaca vd. (2013), Çanakkale ilinde 14 jeotermal alandaki jeotermal kaynak ve sondajlarda (38 su noktasında) fizikokimyasal parametre ölçümleri yapmış, su örnekleri olarak kimyasal karakterizasyonunu ve duraylı izotop içeriğini belirlemiştir. Kestanbol jeotermal sularının yüksek Cl^- (13353 mg/l), Na^+ (7452 mg/l), B (15017 $\mu\text{g/l}$), Ba (1733 $\mu\text{g/l}$), Fe (11417 $\mu\text{g/l}$), Li (12467 $\mu\text{g/l}$) ve Mn (1678 $\mu\text{g/l}$) içerdiğini saptamıştır.

Çandar (2014), yüksek lisans tez çalışmasında Kestanbol ve Tuzla jeotermal kaynaklarının jeolojik, hidrokimyasal ve izotopik özelliklerini belirlemiştir. Bu amaç ile 9 su noktasında fizikokimyasal parametre ölçümü ve su örnekleme yapmıştır. Ayrıca jeotermal alanlardaki korozyon ve kabuklaşma sorunlarını incelemiştir. Kestanbol jeotermal sondajından alınan kabuk örneğinde XRD analizleri ile pignit ve kalsit-magnezyen mineralleri saptanmıştır.

Marmara vd. (2020), Kestanbol jeotermal alanındaki jeotermal sondaj ve jeotermal kaynakların hidrojeokimyasal karakterizasyonu belirlemiş ve jeotermal suların çevreye olan etkisini incelemiştir. Çalışmada su örneklerinin yanı sıra dere sedimanı, toprak örnekleri ve

jeotermal sondajın çevresindeki kabuklaşmadan örnekler alınmış, mineralojik ve kimyasal karakterizasyonu belirlenmiştir. Jeotermal sularının sıcaklığının 59-74 °C arasında olduğu ve jeotermal suların NaCl su tipinde olduğu saptanmıştır. Jeotermal suların yüksek EC değeri (35,5 mS/cm) ve toplam çözünmüş katı madde içeriğinin yanı sıra Na^+ , Cl^- , B ve Fe konsantrasyonunun Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'ne göre çok kirlenmiş su (IV. sınıf) kalitesinde olduğu saptanmıştır. Jeokimyasal analiz sonuçlarına göre kabuk, toprak ve dere sedimentindeki As, Fe ve Mn konsantrasyonunun Dünya kıtasal kabuk ortalama değerinden yüksek olduğu ifade etmiştir. Jeotermal suların çevreye deşarj edilmemesi önerilmiştir.

Şanlıyüksel Yücel vd. (2021), Kestanbol jeotermal alanının hidrojeokimyasal ve izotopik özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra, sismik aktivitenin jeotermal suyun hidrokimyasındaki değişimler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma dönemi olan bir yıl boyunca Kestanbol jeotermal alanının yakın çevresinde Mw 3,5 ve üzeri büyüklükte meydana gelen 20 depremin jeotermal suların fizikokimyasal ve kimyasal bileşimlerinde sebep olduğu değişimler takip edilmiştir. Depremlerin öncesinde ve sonrasında jeotermal suların sıcaklığı, EC ve pH değerlerindeki değişimler belirlenmiştir. Mw 5 büyüklüğündeki Ayvacık-Tartışık depremi sonrasında jeotermal suyun EC değeri ve sıcaklığının azaldığı, pH değerinin ise arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca deprem sonrasında jeotermal sulardaki Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} ve Cl^- konsantrasyonunun azaldığı, SO_4^{-2} , HCO_3^- , B, Ba, Fe ve Mn konsantrasyonunun ise arttığı saptanmıştır. Bu çalışmada aktif tektoniğin jeotermal suların hidrokimyasal ve izotopik özelliklerini etkilediği saptanmıştır. Bu nedenle jeotermal suların uzun dönemde hidrokimyasal ve izotopik karakterizasyonunun (özellikle Cl^- ve $\delta^{18}\text{O}$ içeriğinin) düzenli olarak izlenmesinin önemi vurgulanmıştır.

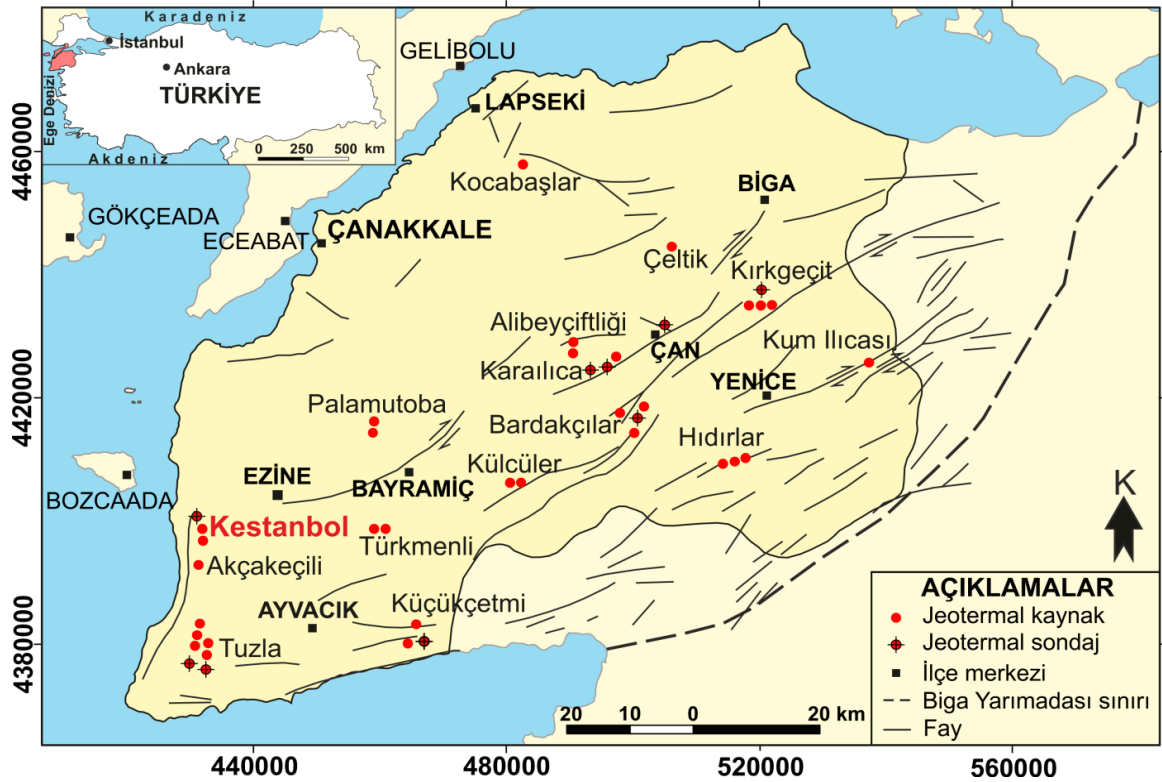
Yücel ve Şanlıyüksel Yücel (2023), Kestanbol jeotermal alanı ve yakın çevresini (10 ha alanı) insansız hava aracı (İHA) RGB ve termal kamera görüntüleri ile yüksek çözünürlüklü olarak modellemiştir. Jeotermal alanın İHA görüntü alımı sırasında yüzey sıcaklık değerlerinin 15-75 °C arasında olduğunu saptamıştır. Jeotermal kaynak çıkışlarının KD-GB gidişli fay ile uyumlu olduğunu ifade etmiştir. İHA kullanarak kısa sürede ve düşük maliyette jeotermal alanların izlenmesi ve modellenmesinin jeotermal enerjinin sürdürülebilir gelişimi açısından önemini vurgulamıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanının Konumu ve Arazi Çalışmaları

Kestanbol jeotermal alanı, Çanakkale'nin yaklaşık 50 km güneybatısında, Ege Denizi'ne 3,5 km uzaklıkta bulunmaktadır (Şekil 5). Jeotermal alan deniz seviyesinden 30-40 m yüksekliktedir (Şanlıyüksel Yücel vd., 2021). Jeotermal alanda MTA tarafından 1975 yılında açılan bir jeotermal sondaj ve birden çok jeotermal çıkış bulunmaktadır. Sondajının sıcaklığı 75 °C olup, bu sıcaklık değerine göre Koçak (2002) sınıflamasında jeotermal alan orta sıcaklıktaki jeotermal alanlar (70-150 °C) sınıfına dahil edilmektedir. 38,43 km²'lik geniş bir havzadan beslenen bu jeotermal alanda, Körüktaş, Uluköy ve Akçakeçili köyleri yer almaktadır (Marmara vd., 2020). Kestanbol jeotermal alanı tarihi boyunca birçok farklı uygarlığa ev sahipliği yapmıştır, bu da alanın zengin kültürel mirasını ortaya koymaktadır (Baba ve Ertekin, 2007; Marmara vd., 2020).



Şekil 5. Çanakkale ilindeki aktif faylar ve jeotermal alanlar

Şaroğlu vd., 1992; Marmara vd., 2020

Kestanbol jeotermal alanı antik kent Alexandreia Troas'a yaklaşık 5 km uzaklıktadır (Şekil 6). Tarih boyunca farklı isimlerle anılan bu antik kent, Piri Reis'in "Kitab-ı Bahriye"sinde geçen "Eski İstanbul" veya "Eski İstanbulluk" olarak da bilinir. Yunanlılar tarafından "Troy" olarak adlandırılan kent, daha önce Miletliler tarafından "Troas" veya "Troad" olarak anılmıştır. Tarihi, M.Ö. 310 yılına kadar uzanan bu jeotermal alan, Helenistik Çağ'da Antigonos Monophthalmos tarafından kurulmuştur (Demirsoy vd., 2018). Antik kentte Kestanbol adıyla bilinen tarihi kaplıcanın Hz. İsa dönemine kadar dayandığı söylenmektedir. Efsaneye göre, Hz. İsa'nın havarilerinden Saint-Paul buraya gelmiş ve ölü bir adamı kaplıcaya koyarak diriltmiştir. Kaplıca çevirisinin "*Dert ve devayı yaratan ve her türlü hastalıklara şifa veren Allah, bu kaplıca ziyaretçilerini hemen sağlıklarına kavuştursun.*" olarak yer aldığı bir kitabe bulunmaktadır (Demirsoy vd., 2017).



Şekil 6. Antik kentin en büyük yapılarından biri olan Herodes Atticus Hamamları
Demirsoy vd., 2017

Kestanbol kaplıcası; Antik çağ, Bizans ve Osmanlı dönemi boyunca işlevini ve önemini koruyan bir şifa kaynağıdır (Demirsoy vd., 2018). 1895 yılında alınan su numuneleri, Paris Tıp Mektebi'nde değerlendirilmek üzere Fransa'ya gönderilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları o dönemde en çok bilinen diğer kaplıcaların özellikleriyle karşılaştırıldığında oldukça önemli bir jeotermal alan olduğu Osmanlı yönetimi tarafından fark edilmiştir. Haftanın belirli günleri İstanbul ile Ezine arasında ulaşımı sağlamak üzere

vapur seferleri düzenlenmiş, şehre uzaklığı nedeniyle bölgenin çeşitli sakinlerine hitap edecek sosyal tesisler kurulmuştur. Kestanbol kaplıcası tarih boyunca bir dizi doğal afetin etkisi altında kalarak zarar görmüş ve farklı zaman dilimlerinde koruma önlemleri alınmıştır. 1894 yılında II. Abdülhamit Dönemi'nde, antik kent bölgesinde yer alan Kestanbol kaplıcası, kapsamlı bir restorasyon sürecinden geçirilmiş ve bu çalışmaların ardından banyo ve tedavi birimleriyle tekrar hizmete açılmıştır. Ancak I. Dünya Savaşı sırasında tesis harabe hâline gelmiştir. Daha sonra, 1935 yılında Ezine Belediyesi tarafından tekrar kullanıma açılmış ve 1963 yılında modern bir şekilde inşa edilmiştir. Bu restorasyon ve modernizasyon çalışmaları, Kestanbol kaplıcalarının tarih içindeki önemini ve değerini korumasına yardımcı olmuştur (Demirsoy vd., 2017). Kestanbol jeotermal kaynakların çevresindeki kayaç ve topraktaki yüksek düzeyde radyoaktivite içermesiyle dikkat çekmektedir. Radonlu suların hücre yenilenmesini artırdığı ve yaraların iyileşme sürecini desteklediği düşünülmektedir. Ayrıca, farklı kürler ile faydalanabilen Kestanbol kaplıcasının romatizmal hastalıklar, kireçlenme, bazı kemik tüberkülozları, küçük çocuklardaki lenf adenopati, üst solunum yolları ve akciğer hastalıklarında etkili olduğu kanıtlanmıştır (Demirsoy vd, 2018).

Kestanbol jeotermal alanında 4 Temmuz 2023 ve 30 Ekim 2023 tarihlerinde arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 7 ve 8). MTA tarafından 290 m derinlikte açılan jeotermal sondajdan fizikokimyasal parametre ölçümü yapılmış ve su örneği alınmıştır. Ekim ayında WTW 340i multiparametre ölçer ile jeotermal suyun sıcaklığı 75,3 °C, pH değeri 6,55, elektriksel iletkenlik değeri 31,2 mS/cm ve tuzluluk değeri ‰ 20,2 olarak ölçülmüştür. Jeotermal su 2×500 ml'lik sert plastik kaplara 0,45 µm filtre ile filtrelenip, kation analizleri için derişik HNO₃ eklenerek pH değeri 2'nin altına düşürülmüştür. Anyon analizleri için ise örneklere asit ilave edilmemiştir. Ayrıca adsorpsiyon deneylerin de kullanmak amacıyla jeotermal sondajdan 30 l jeotermal su örneği alınmıştır (Şekil 9). Uçucu kül örneği ise Çanakkale'nin Çan ilçesindeki akışkan yataklı 18 Mart Çan termik santralinden temin edilmiştir. Termik santralde Çan kömür havzası linyitleri kullanılmaktadır.



Şekil 7. Kestanbol jeotermal alanındaki termal otelden görünüm.



Şekil 8. Arazi çalışmasından görünüm.



Şekil 9. Kestanbol jeotermal sondajından örnek alımı.

3.2. Laboratuvar çalışmaları

3.2.1. Jeotermal Suyun ve Uçucu Küllerin Karakterizasyonu

Jeotermal suyun kimyasal karakterizasyonu Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Maden Analizleri ve Teknolojileri Dairesi'nde indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) ile belirlenmiştir. Uçucu kül örneğinin kimyasal karakterizasyonu (majör oksit, iz element % S ve % C tayini) ICP-MS ve Leco cihazları ile Bureau Veritas Laboratuvarı'nda Ankara'da belirlenmiştir. Uçucu külün mineralojik bileşimi MTA'da X-ışını difraktometresinde toz difraksiyon (XRD) yöntemiyle tespit edilmiş ve difraktogram üzerinden ASTM standartlarına uygun olarak ayrıntılı mineralojik tanımlamaları yapılmıştır. Uçucu külün tane boyutu dağılımı lazer kırınım yöntemi ile Malvern Mastersizer 2000 markalı lazer kırınım cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Uçucu külün morfolojik analizleri ve element içeriğinin belirlenmesi için yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM, JEOL JSM-7100F) ve X-ışını spektroskopisi (EDX, Oxford Instruments X-Max) analizleri Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve

Araştırma Merkezi'nde (ÇOBİLTUM) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca adsorpsiyon deneyleri sonrasında uçucu kül örnekleri kurutulmuş, morfolojisi ve element içeriğindeki değişimleri belirlemek amacıyla ÇOBİLTUM'da SEM-EDX analizi yaptırılmıştır.

3.2.2. Adsorpsiyon deneyleri

Ön denemelerde farklı termik santrallerin uçucu külleri denenmiş fakat en iyi B giderimi sağlayan akışkan yataklı 18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri olması nedeniyle bu küller kullanılarak deneylere devam edilmiştir.

Bu çalışmada kesikli (batch) adsorpsiyon deneyleri ile uçucu kül adsorbanının farklı koşullar (adsorban dozu, süre, pH ve sıcaklık) altında jeotermal sudan bor giderimine olan etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan tüm deneyler 3 kere tekrarlanmış ve aritmetik ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Deneylerden önce, adsorbanda herhangi bir kimyasal veya fiziksel işlem yapılmamıştır. Adsorban miktarının bor giderimindeki etkisini belirlemek için hassas terazide (Radwag, PS750) 0,5, 1, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 g olarak tartılan uçucu kül 250 ml'lik erlene koyulmuş, küllerin üzerine 100 ml jeotermal su eklenmiştir (Şekil 10). Çözeltiler oda sıcaklığında (24 ± 2 °C) 24 saat süreyle orbital çalkalayıcıda (Biosan, PSU 20i) 150 rpm hızda karıştırılmıştır (Şekil 11). Bu sürenin sonunda çözeltiler çalkalayıcıdan alınarak pH değeri WTW pH 7110 ile (Şekil 12), EC ve tuzluluk değeri WTW 340i ile ölçülmüştür. Sonrasında çözeltiler 0,45 µm filtre ile filtrelenip HNO₃ ile asitlendirilerek (pH < 2) 50 ml'lik sert plastik kaplara B analizi için hazırlanmıştır (Şekil 13).

İzoterm verileri farklı katı/sıvı (adsorban miktarı/100 ml çözelti) oranlarında gerçekleştirilen deneysel verilerin değerlendirilmesi ile elde edilmiştir. Deneysel denge verilerinin değerlendirilmesinde doğrusal olmayan Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri ve model eşitlikleri kullanılmıştır.



Şekil 10. Örneklerin adsorpsiyon deneylerine hazırlanması.



Şekil 11. Çözeltinin orbital çalkalayıcıda çalkalanması.



Şekil 12. Çözeltinin pH ölçümü.

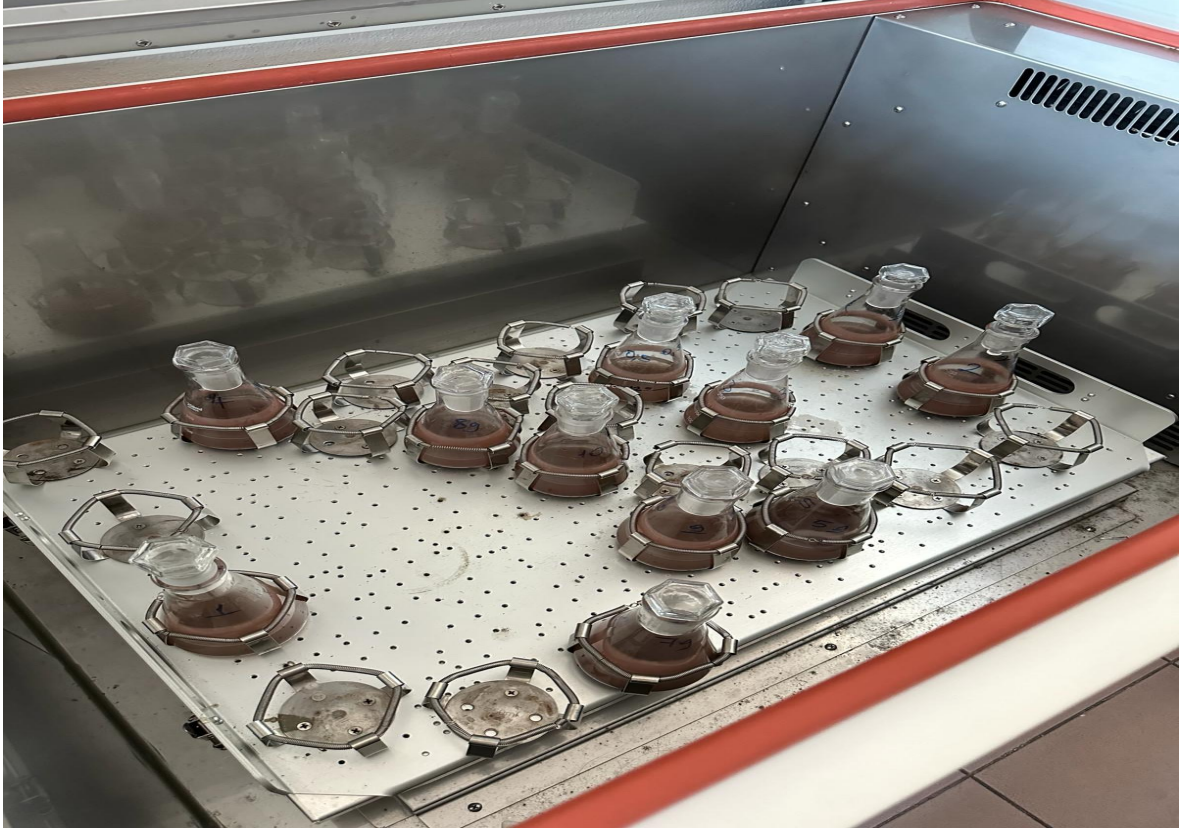


Şekil 13. Örneklerin ICP-MS analizi öncesi filtrelenmesi.

pH'in bor giderimine etkisini belirlemek amacıyla jeotermal suyun pH değeri (6,5) 0,1 M HNO₃ kullanılarak 2 ve 4'e ve 0,1 M NaOH kullanılarak 8 ve 10'a ayarlanmıştır. Optimum giderim sağlanan 9 ve 10 g uçucu kül üzerine pH değeri 2, 4, 8 ve 10 olan 100 ml jeotermal su eklenmiş, çözeltiler oda sıcaklığında 24 saat süreyle orbital çalkalayıcıda karıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda çözeltiler çalkalayıcıdan alınarak pH, tuzluluk ve EC değeri ölçülmüştür. Sonrasında çözelti 0,45 µm filtre ile filtrelenip HNO₃ ile asitlendirilerek (pH < 2) 50 ml'lik sert plastik kaplara B analizi için hazırlanmıştır.

Sıcaklığın bor giderimine etkisini belirlemek amacıyla 9 ve 10 g uçucu kül ile 100 ml jeotermal su (pH = 6,5) çalkalamalı inkübatör (Jeio Tec IS-971-R) kullanılarak 150 rpm hızda 24 saat süreyle 35 °C, 45 °C ve 55 °C'de çalkalanmıştır (Şekil 14). Bu sürenin sonunda çözeltiler çalkalayıcıdan alınarak pH, tuzluluk ve EC değeri ölçülmüştür. Sonrasında çözelti

0,45 µm filtre ile filtrelenip HNO₃ ile asitlendirilerek (pH< 2) 50 ml'lik sert plastik kaplara B analizi için hazırlanmıştır.



Şekil 14. Çalkalamalı inkübatörde örneklerin farklı sıcaklıklarda karıştırılması.

Temas süresinin bor giderimine etkisinin belirlenmesi amacıyla 9 ve 10 g uçucu kül ile 100 ml jeotermal su (pH = 6,5) orbital çalkalayıcıda 150 rpm'de 1, 2, 4, 8, 12, 16 ve 24 saat süreyle çalkalanmıştır. Bu farklı sürelerin sonunda çözeltiler çalkalayıcıdan alınarak pH değeri ve EC değeri ölçülmüştür. Sonrasında çözeltiler 0,45 µm filtre ile filtrelenip HNO₃ ile asitlendirilerek (pH< 2) 50 ml'lik sert plastik kaplara B analizi için hazırlanmıştır.

Uçucu külün bor liçindeki sürenin ve sıcaklığın etkisinin belirlenmesi amacıyla kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. 9 ve 10 g uçucu kül 100 ml saf su ile orbital çalkalayıcıda 150 rpm'de 1, 2, 4, 8, 12, 16 ve 24 saat süresince çalkalanmıştır. Bu sürenin sonunda çözeltilerin pH, tuzluluk ve EC değeri ölçülmüştür. Sonrasında çözeltiler 0,45 µm filtre ile filtrelenip HNO₃ ile asitlendirilerek (pH< 2) 50 ml'lik sert plastik kaplara ICP-MS cihazı ile B analizi için hazırlanmıştır. Ayrıca sıcaklığın etkisinin belirlenmesi amacıyla 9 ve 10 g uçucu kül 100 ml saf su ile çalkalamalı inkübatörde 150 rpm hızda 24 saat süreyle

35 °C, 45 °C ve 55 °C'de çalkalanmıştır. Bu sürenin sonunda çözeltilerin pH, tuzluluk ve EC değeri ölçülmüştür. Sonrasında çözeltiler 0,45 µm filtre ile filtrelenip HNO₃ ile asitlendirilerek (pH< 2) 50 ml'lik sert plastik kaplara ICP-MS cihazı ile B analizi için hazırlanmıştır.

Çözeltilerdeki bor konsantrasyonu Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ICP-MS cihazı (Thermo iCAP RQ) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 15). Bor alt dedeksiyon limiti 0,8 µg/l'dir.



Şekil 15. ICP-MS cihazından (Thermo iCAP RQ) görünüm.

Adsorbanın adsorpsiyon kapasitesinin ve giderim yüzdesinin belirlenmesinde aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) * V}{m} \quad (3.1)$$

$$\% \text{ Bor giderimi} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) * 100 \quad (3.2)$$

Bu bağıntılardaki;

q_e = Adsorban birim gramı başına tuttuğu madde miktarı veya adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

C_0 = Bor başlangıç konsantrasyonu (mg/l)

C_e = Adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan bor konsantrasyonu (mg/l)

V = Kullanılan çözelti hacmi (l)

m = Kullanılan adsorbanın miktarı (g)



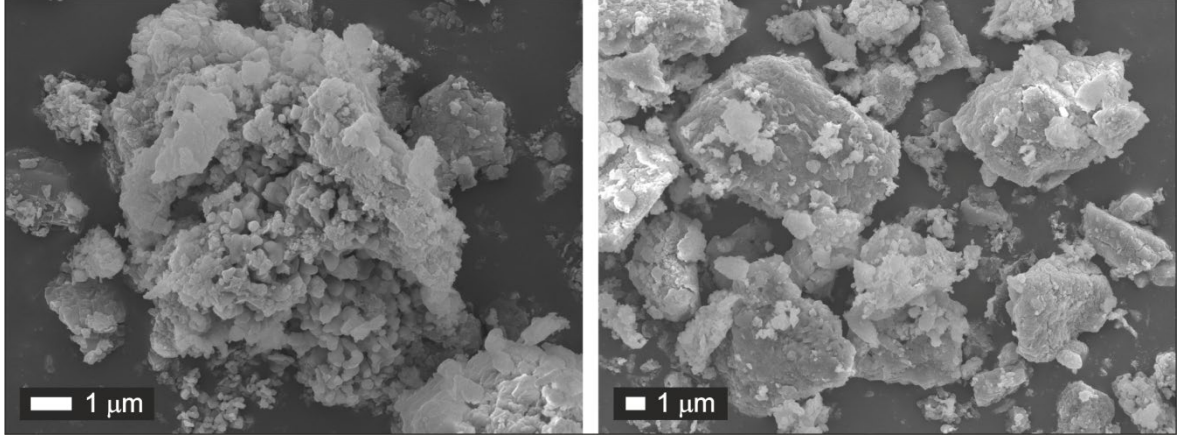
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

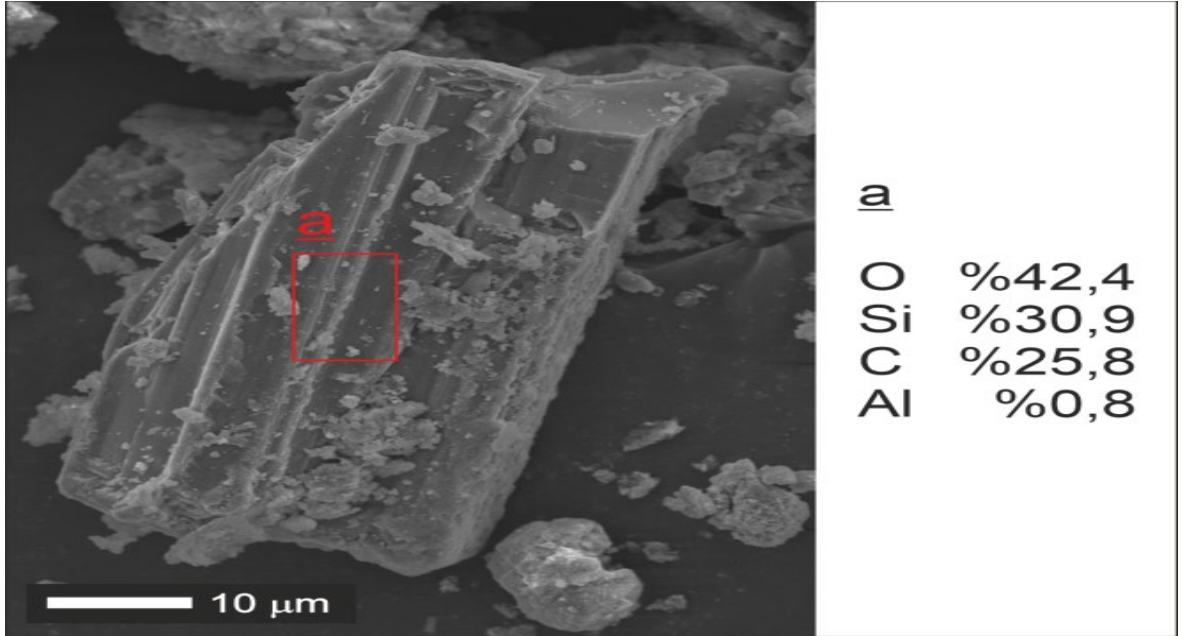
4.1. Uçucu Külün Karakterizasyonu

Uçucu kül, kazanlarda kömürün yakılması sonucunda açığa çıkan baca gazları içerisinde sürüklenen toz parçacıkların elektrostatik veya mekanik filtreler yardımıyla toplanması ile elde edilen bir yan üründür. Kullanılan kömürün tipi, kömür taşıma, depolama ve yakma sistemleri ve süreleri, kömür pulverizasyon derecesi, kül toplama ve emisyon kontrol sistemleri gibi birçok faktör uçucu küllerin karakterizasyonunu belirler. Uçucu külün kimyasal bileşimi aluminosilikat cam, kuvars, mülit, demir spinel ve tuz fazları, Ca silikat-oksihidroksitler ve karbon içeriğinin kısmi oranda ayrıştırılabilir bir karışımından oluşur. Karbon içeriği adsorpsiyon kapasitesi ve kirlilik kontrolü uygulamalarında avantaj sağlar (Akgül ve Yoncacı, 2021).

18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri koyu gri renktedir, külün rengi kullanılan kömür türü ve yanma özelliklerine bağlıdır. Tam bir yanma olmadığında ortaya çıkan uçucu kül, içindeki yanmamış karbon nedeniyle siyah renk alır. Uçucu küllerin tane boyutu 0,87 μm ile 272 μm arasındadır. D_{10} , D_{50} ve D_{90} değerleri sırasıyla 7,33 μm , 42,6 μm ve 205 μm 'dur. Külün spesifik yüzey alanı 14,4 m^2/g 'dir. Küllerin mineralojik bileşimi anhidrit, kalsit, hematit, manyetit, kuvars, kristobalit, kireç, illit ve plajiyoklaz minerallerinden oluştuğunu göstermiştir. Küllerin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı % 62,5, CaO içeriği ise % 20,94'dür. Küllerin toplam S ve C içeriği sırasıyla % 4,25 ve % 1,93'dür. Ateşte zayıf değeri % 7'dir. Uçucu küllerin SEM görüntülerinde düzensiz şekilli, köşeli taneli ve mikro gözenekli yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 16). EDX analizi uçucu kül yüzeyindeki baskın elementlerin O, Si, C ve Al olduğunu göstermektedir (Şekil 17).



Şekil 16. Uçucu küllerin SEM görüntüsü.



Şekil 17. Uçucu küllerin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.

4.2. Kestanbol Jeotermal Akışkanının Hidrokimyası

Kestanbol jeotermal sondaj ve kaynaklarda ölçülen sıcaklık değerleri 58-75 °C arasındadır. Jeotermal akışkanın pH ve EC değerleri sırasıyla 6,4-6,7 ve 31-35,5 mS/cm olarak belirlenmiştir. Kestanbol jeotermal akışkanı NaCl su tipindedir. Jeotermal suda ayrıca B, Fe, Ba, Mn konsantrasyonu TS 266 limit değerinden oldukça yüksektir. Kestanbol jeotermal sularında farklı araştırmacıların yaptığı kimyasal analiz sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur. Jeotermal sular Na^+ , Cl^- , B ve Fe içeriğine göre Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'nde (YSKY, 2021) IV. su kalite sınıfında (çok kirlenmiş su) yer almaktadır.

Jeotermal kaynaklardaki Mn içeriği III. su kalite sınıfında, Ba içeriği ise II. su kalite sınıfındadır. Bu çalışmada jeotermal sondajdan alınan su örneğinin Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ ve B içeriği sırasıyla 6846 mg/l, 12896 mg/l, 105 mg/l ve 11,88 mg/l olarak belirlenmiştir.

Tablo 7

Kestanbol jeotermal akışkanının hidrokimyasal analiz sonuçları (mg/l)

Element	Ölmez	Yalçın	Baba ve Ertekin	Karaca vd.	Şanlıyüksel Yücel vd.			TS266	YSKY, Su kalite sınıfı
	1976	2007	2007	2013	2021			(üst limit)	
Na ⁺	5100	6220	7316	6788	5921	6893	6130	200	IV
Cl ⁻	9700	12230	13321	13285	11389	13339	11921	250	IV
SO ₄ ²⁻	170	88	150	150	90	100	90	250	I
B	11	9,7	12,72	13,96	10,66	11,76	10,43	1	IV
Ba	-	-	1,34	1,57	1,24	1,55	1,41	0,3	II
Fe	4,4	4,9	10,01	11,41	6,8	8,8	3,06	0,2	IV
Mn	-	1,2	1,51	1,67	1,1	1,45	1,34	0,05	III



Şekil 18. Jeotermal sondajdan toprağa karışan suların görünümü.

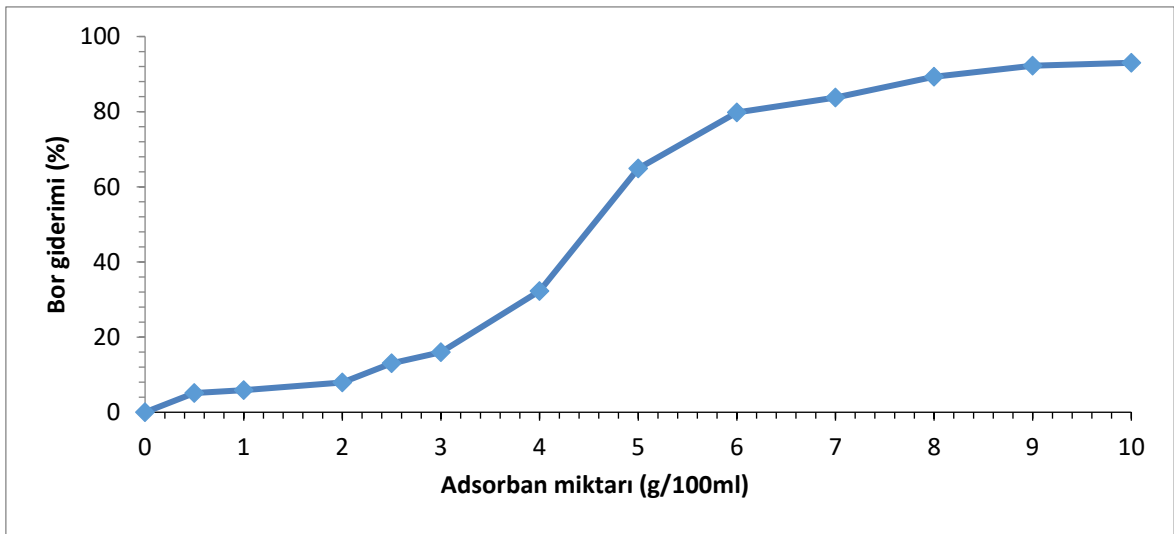
Tokçaer (2007), Kestanbol jeotermal alanındaki jeotermal suyun B konsantrasyonunu 12,26 mg/l, $\delta^{11}\text{B}$ içeriğini ise ‰ 10,68 olarak saptamıştır. Kestanbol jeotermal sahasındaki kuyu litolojisine göre jeotermal suların granitik kayalardan çok

metamorfikler ve ofiyolitler ile etkileşimde olmaları nedeniyle fillosilikat minerallerinden, özellikle beyaz mika ve serpantin grubu minerallerden, önemli miktarda B çözdüklerini ifade etmiştir. Kestanbol graniti yer yer önemli miktarda, aksesuar mineral olarak turmalin içeriyor olmasına karşın B için kaynak olabilecek özellikte olmadığını ifade etmiştir. Ayrıca jeotermal akışkanının yüksek $\delta^{11}\text{B}$ değerine sahip deniz suyu-kayaç etkileşimine girdiğini belirtmiştir.

4.3. Adsorpsiyon Deneyleri Sonuçları

4.3.1. Adsorban Miktarının Etkisi

Adsorban miktarı, herhangi bir kirletici başlangıç derişimi için adsorbanın kirletici giderme potansiyelini belirleyen önemli bir parametredir. Uçucu kül kullanarak gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmalarında bor adsorpsiyonuna (giderim verimine) uçucu kül miktarının etkisi 0,5-10 g/100 ml adsorban miktarı/çözelti oranı aralığında, jeotermal suyun bor konsantrasyonu olan 11,88 mg/l B başlangıç derişimi için 24 saatlik karıştırma süresinde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 19'da gösterilmiştir. Ayrıca uçucu kül dozuna bağlı olarak pH, EC, tuzluluk değerleri ve B konsantrasyonunun değişimi de Tablo 8'de özetlenmiştir.



Şekil 19. Uçucu kül miktarının jeotermal sudan bor giderimine etkisi.

Tablo 8

Uçucu kül miktarına bağlı olarak pH, EC ve tuzluluk değerlerinin ve B konsantrasyonunun değişimi (100 ml jeotermal su, 24±2 °C, 150 rpm ve 24 saat temas süresi)

Uçucu kül miktarı (g)	pH	EC (mS/cm)	Tuzluluk (‰)	B (mg/l)
0	6,55	32,9	20,5	11,88
0,5	7,59	34,3	21	11,27
1	7,74	34,6	21,5	11,18
2	7,85	35,1	22	10,94
2,5	8,23	35,2	22,1	10,33
3	8,38	36	22,3	9,98
4	9,12	36,2	22,4	8,05
5	9,49	36,3	22,5	4,17
6	9,68	36,3	22,7	2,4
7	9,79	36,4	23	1,93
8	10,07	36,4	22,8	1,27
9	10,41	36,1	22,6	0,92
10	10,55	36,2	22,7	0,83

Adsorban miktarının artışına paralel olarak bor giderim veriminin de arttığı ve çalışılan adsorban miktarları için en yüksek bor giderim verimine (% 93) en yüksek adsorban miktarı/çözelti oranı olan 10 g/100 ml’de ulaşıldığı gözlenmiştir. Adsorban miktarındaki artışa bağlı olarak adsorpsiyon verimindeki artış yüksek adsorban miktarlarında adsorpsiyon için elverişli aktif yüzeylerin artışı ile açıklanabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen maksimum bor giderme veriminin, Yüksel ve Yürüm (2010) tarafından Kemerköy (Milas, Muğla) termik santralinden alınan, Ulatowska (2020) tarafından Boruta (Zgierz, Polanya) termik santralinden alınan uçucu kül örnekleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür. Diğer taraftan uçucu kül miktarının, adsorban miktarı/çözelti oranı 3 g/L değerine kadar artmasına bağlı olarak EC ve tuzluluk değerlerinin her ikisinin de önemli düzeyde olmasa bile arttığı ancak adsorban miktarı/çözelti oranındaki daha fazla artışın EC ve tuzluluk değerleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir (Tablo 8). Uçucu kül miktarının artmasıyla pH ve EC değerlerinin artması, uçucu külün jeotermal suyun pH'ını ve EC'sini yükselttiğini göstermektedir. Bu durum, uçucu külün bazik bir karaktere sahip olduğunu ve jeotermal suyun alkali-toprak metal içeriğiyle etkileşime girdiğini düşündürmektedir. Tuzluluk değerindeki azalma ilk bakışta çelişkili görünse de, bu durum

borun uçucu kül tarafından tutulmasıyla açıklanabilir. Bor, suda çözünür bir tuz olduğu için, uçucu kül tarafından adsorbe edildiğinde çözeltideki tuz konsantrasyonu da azalır. Deney sonuçları, uçucu külün Kestanbol jeotermal sudan bor giderimi için etkili bir adsorban olduğunu göstermektedir. Uçucu kül miktarının artışına bağlı olarak B konsantrasyonunda azalma gözlenmiş, 24 saat sonunda oda sıcaklığında pH 10-11 aralığında 9 g ve 10 g uçucu kül miktarı ile TS266'da B için belirlenen limit değer olan 1 mg/l'nin altında B konsantrasyonu saptanmıştır. Bu bulgular, jeotermal su arıtma proseslerinde uçucu kül kullanımının potansiyelini ortaya koymaktadır.

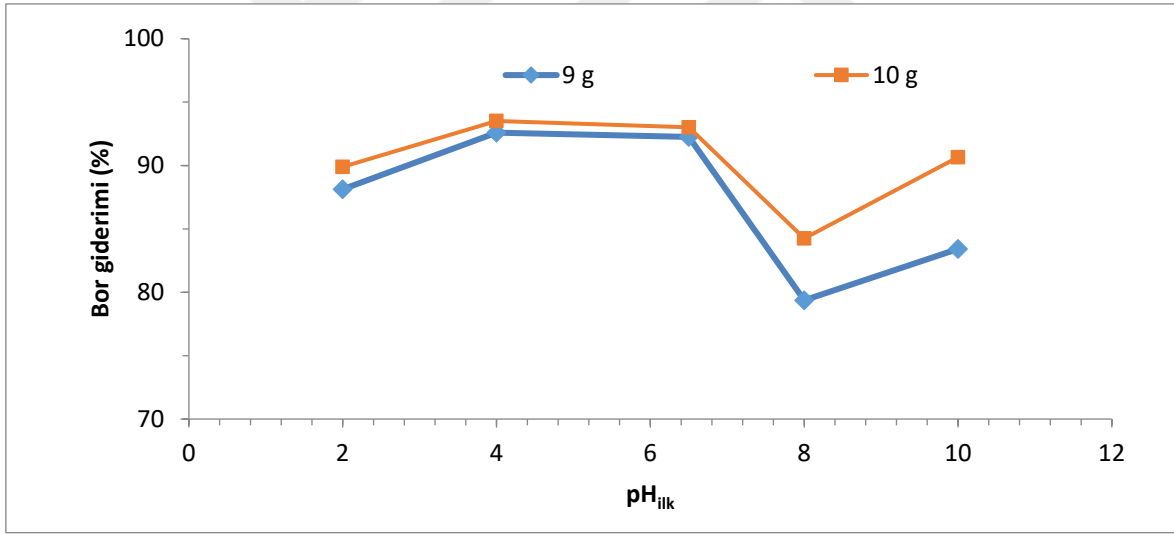
4.3.2. pH etkisi

Adsorbanın yüzey yükü ve kirleticinin iyonlaşma derecesi ortamın pH'ına bağlı olarak değişebileceğinden, pH adsorpsiyon süreçlerini etkileyebilen en önemli parametrelerden biridir. Sulu çözeltilerde B, çözeltinin pH'ına ve bor derişimine bağlı olarak değişik formlarda bulunabilir. Asidik çözeltilerde B, $B(OH)_3$ (borik asit) formunda bulunurken, bazik çözeltilerde $B(OH)_4^-$ (borat) iyonları formunda bulunabilir ve 10'un üzerindeki pH'larda bu formu baskın olmaya başlar. Ayrıca düşük B derişimlerinde (<216 mg/l) $B(OH)_3$ ve $B(OH)_4^-$ (borat) varlığı gözlenirken, yüksek derişimlerde (>290 mg/l) bor içeren çözeltilerde $B_2O(OH)_6^{2-}$, $B_3O_3(OH)_4^-$, $B_4O_5(OH)_4^{2-}$ ve $B_5O_6(OH)_4$ türleri de gözlenmektedir (Guan, 2016; Ulatowska, 2020).

Uçucu kül ile bor giderimine pH'ın etkisi 5 farklı pH değerinde (2, 4, 6,5, 8 ve 10), 11,88 mg/l B içeren jeotermal su ile 25 °C sıcaklıkta iki farklı adsorban miktarı/çözelti oranı için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 20'de gösterilmiştir. 24 saatlik adsorpsiyon süreci sonunda gözlenen pH, EC, tuzluluk değerleri ve B konsantrasyonu değişimi Tablo 9'da verilmiştir. Şekil 20 incelendiğinde, pH 4 ve orijinal çözelti pH'sı olan pH 6,5'te B gideriminin her iki uçucu kül miktarı için en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. 9 g/100 ml uçucu kül miktarı için maksimum bor giderim verimi pH 4'te % 92,59 ve pH 6,5'te % 92,29 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, 10 g/100 ml uçucu kül miktarı için maksimum bor giderim verimi pH 4'te % 93,51 ve pH 6,5'de % 93,01 olarak elde edilmiştir. Bu pH değerlerinden daha düşük (pH 2) ve daha yüksek (pH 8 ve pH 10) pH değerlerinde bor giderim veriminin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca başlangıç

pH değerinin artışıyla birlikte son pH, EC, tuzluluk değerlerinde ve B konsantrasyonunda değişiklikler olduğu gözlenmiştir (Tablo 9).

Düşük pH'ta baskın bor türü, nötr olan H_3BO_3 'tür. Birçok adsorban yüzey, özellikle net negatif yüklü olanlar, H_3BO_3 gibi nötr moleküllere karşı daha zayıf çekim sergiler. Bu, asidik pH'ta daha düşük bor adsorpsiyonuna yol açabilir. pH arttıkça, borik asit ayrışır ve negatif yüklü borat anyonları daha bol hale gelir. Bu negatif yüklü türler, elektrostatik çekim yoluyla adsorban yüzeyindeki pozitif yüklü bölgelerle daha olumlu etkileşime girebilir. Bu davranış genellikle daha yüksek pH'ta B adsorpsiyonunun artmasına neden olur. Adsorpsiyon süreci sonucunda ortam pH değerlerinin özellikle düşük başlangıç değerleri için önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir (Tablo 9). Bu sonuçlar, asidik pH'ta maksimum adsorpsiyon giderimi elde edilmesine rağmen uçucu kül üzerinde bor adsorpsiyonunun başlangıç pH'sına bakılmaksızın alkali pH'ta arttığını göstermektedir (Kluczka, 2015).



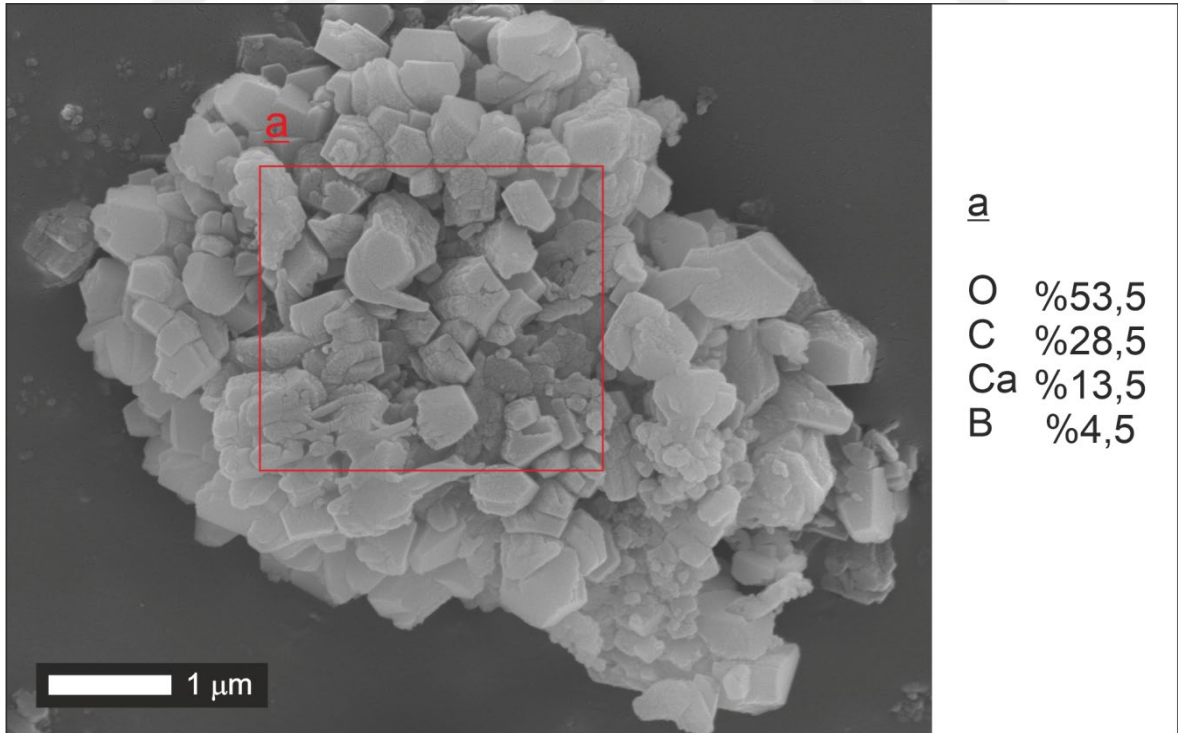
Şekil 20. Uçucu kül ile bor giderimi üzerine pH'ın etkisi.

Tablo 9

pH değişiminin pH, EC, tuzluluk ve B konsantrasyonu üzerine etkisi

Uçucu kül miktarı (g)	Süre (saat)	pH _{ilk}	pH _{son}	EC (mS/cm)	Tuzluluk (‰)	B (mg/l)
9	24	2	9,83	36,6	23	1,41
		4	10,03	36	22,4	0,88
		6,5	10,41	36,1	22,6	0,92
		8	9,77	35,5	22,3	2,45
		10	9,75	33,8	21	1,97
10	24	2	10,2	37,5	23,8	1,2
		4	10,33	36,6	23,2	0,77
		6,5	10,55	36,2	22,7	0,83
		8	10,03	35,4	22,2	1,87
		10	10,17	33,1	20,6	1,11

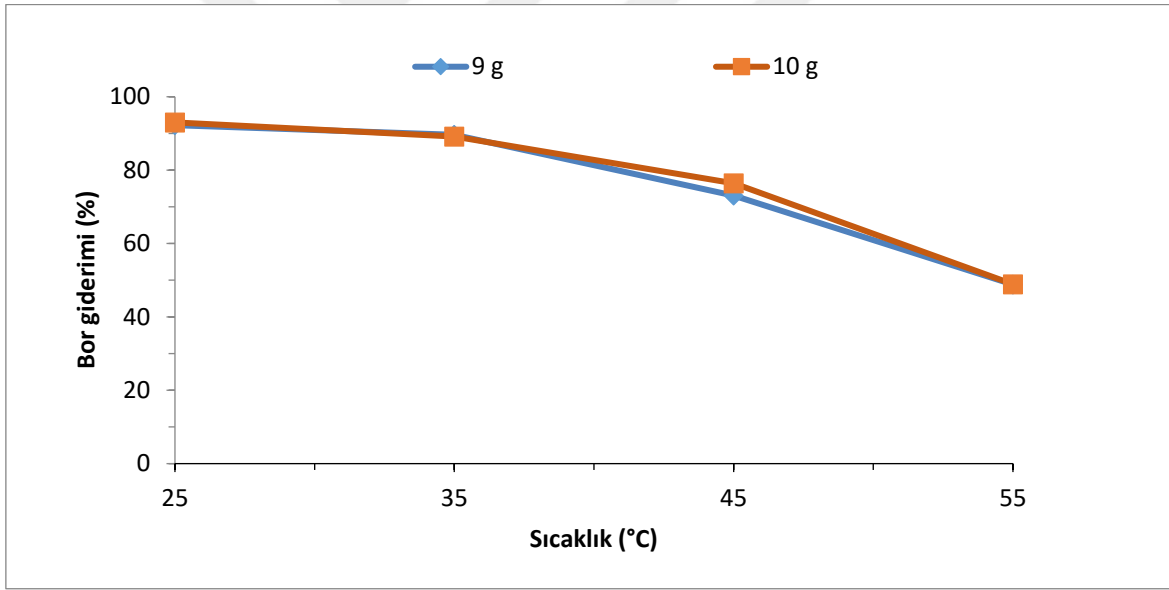
9 g uçucu kül/100 ml jeotermal su kullanılarak 24 saat sürede pH 6,5'de gerçekleştirilen adsorpsiyon deneyleri sonrasında kurutulan uçucu külün SEM-EDX sonuçlarında CaCO₃ yüzeyinde % 4,5 oranında B elementi tespit edilmiştir (Şekil 21).



Şekil 21. Adsorpsiyon deneyi sonucunda uçucu küldeki CaCO₃ yüzeyinde biriken B elementinin SEM görüntüsü ve EDX analizi.

4.3.3. Sıcaklığın Etkisi ve Adsorpsiyon Termodinamiği

Bor giderimi üzerine sıcaklığın etkisi 25-55°C sıcaklık aralığında 9 ve 10 g adsorban/100 ml çözelti oranında, diğer deneysel koşullar sabit tutularak incelenmiştir. Sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edilen giderim verimleri Şekil 21’de gösterilmiş, sıcaklık artışına bağlı olarak 24 saat sonunda adsorpsiyon ortamında gözlenen değişimler Tablo 10’da özetlenmiştir. Şekil 22’de de görüldüğü gibi sıcaklık artışı ile adsorpsiyon veriminin önemli ölçüde değiştiği, 25 °C’de % 92 olan giderim veriminin 55 °C’de yaklaşık % 49’a azaldığı görülmüştür. Sıcaklığın 25 °C’den 55 °C’ye yükseltilmesi ile çözeltide kalan bor derişiminin TS266’da izin verilen limitlerin çok üstüne çıktığı (9 g/100 ml için 0,92 mg/l’den 6,08 mg/l’ye, 10 g/100 ml için ise 0,83 mg/l’den 6,07 mg/l’ye), EC ve tuzluluk değerlerinin ise sıcaklık artışından etkilenmediği görülmüştür (Tablo 10).



Şekil 22. Uçucu kil ile bor adsorpsiyonu üzerine sıcaklığın etkisi.

Tablo 10

Sıcaklığın B konsantrasyonu ve adsorpsiyon ortamının özellikleri üzerine etkisi

Uçucu kül miktarı (g)	Süre (saat)	Sıcaklık (°C)	pH	EC (mS/cm)	Tuzluluk (‰)	B (mg/l)
9	24	25	10,41	36,1	22,6	0,92
		35	10,64	35,7	22,5	1,23
		45	10,52	35,7	22,5	3,2
		55	10,23	35,5	22,4	6,08
10	24	25	10,55	36,1	22,7	0,83
		35	10,6	35,6	22,5	1,29
		45	10,67	35,8	22,6	2,8
		55	10,19	36	22,7	6,07

Adsorpsiyon sürecinin termodinamiğini belirlemek için K_c ve ΔG aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak belirlendikten sonra, van't Hoff eşitliği (eşitlik 6) esas alınarak $1/T$ değerlerine karşı $\ln K_c$ değerlerinin grafiğe geçirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimi ve kayma değerlerinden ΔH ve ΔS değerleri hesaplanmıştır (Kluczka, 2015). Elde edilen sonuçlar Tablo 11’de özetlenmiştir. 328 K sıcaklığın dışındaki bütün sıcaklıklarda negatif Gibbs serbest enerji değerleri uçucu kül ile B adsorpsiyonunun kendiliğinden gerçekleştiğine işaret eder. Negatif ΔH° değerleri adsorpsiyonun ekzotermik olduğunu, negatif ΔS° değerleri ise adsorpsiyon sürecinde sıvı/katı ara yüzeyinde düzensizliğin azaldığına işaret etmektedir.

$$K_c = \frac{(C_0 - C_e)}{C_e} \quad (4.1)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (4.2)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (4.3)$$

$$\ln K_c = \frac{-\Delta H^\circ}{R} \times \frac{1}{T} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (4.4)$$

Tablo 11

Uçucu kül ile bor gideriminin termodinamik parametreleri

T (K)	K_C	van't Hoff eşitliği	Termodinamik parametreler		
			ΔG° (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol K)
9 g adsorban miktarı/100 ml çözelti					
298	11,913	$y = 8486,8x - 25,752$	-6,14	-70,56	-0,214
308	8,659	$R^2 = 0,9445$	-5,53		
318	2,713		-2,64		
328	0,954		0,129		
10 g adsorban miktarı/100 ml çözelti					
298	13,313	$y = 8575,9x - 25,977$	-6,41	-71,30	-0,216
308	8,209	$R^2 = 0,9550$	-5,39		
318	3,243		-3,11		
328	0,957		0,119		

Termodinamik parametreler, adsorpsiyon sırasındaki enerji değişiklikleri hakkında da bilgi sağlar. Bu enerji değişiklikleride adsorpsiyon sürecinde etkin olan kuvvetlerin niteliği ile ilgili bilgiler verir. Bu çalışmada termodinamik analiz sonucu elde edilen entalpi değişim değeri ($\Delta H=70,56$ kJ/mol>40 kJ/mol) sürecin kimyasal adsorpsiyon olduğuna işaret eder.

4.3.4. Adsorpsiyon izotermi

Bir adsorbentin maksimum adsorpsiyon kapasitesi adsorbentlerin önemli kalite parametrelerinden biridir. Maksimum adsorpsiyon kapasitelerini belirlemek için adsorpsiyon izotermi kullanılmaktadır. Adsorpsiyon izotermi adsorpsiyon sistemlerinin tasarımı için temel bir gereksinim olmakla birlikte adsorban ve kirletici arasındaki etkileşimi açıklamak için kullanılmaktadır. Uçucu kül ile bor adsorpsiyonunun izoterm verileri Langmuir ve Freundlich model eşitlikleri ile analiz edilmiştir. Langmuir ve Freundlich model eşitlikler:

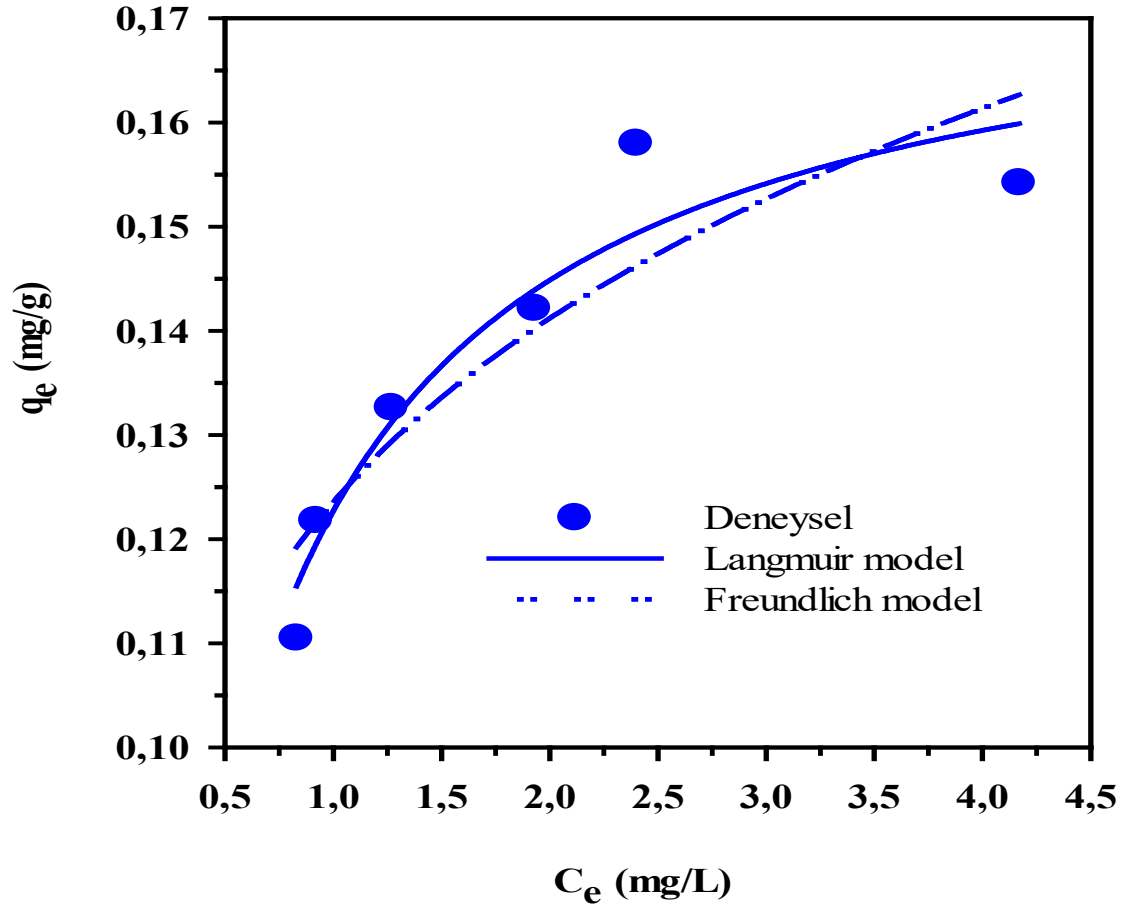
$$q_e = \frac{C_e q_m K_L}{1 + C_e K_L} \quad \text{Langmuir} \quad (4.5)$$

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{Freundlich} \quad (4.6)$$

Langmuir izoterm modeli, adsorpsiyonun adsorban yüzeyindeki homojen yüzeylerde tek tabaka olarak gerçekleştiği ve adsorplanan moleküller arasında bir etkileşim olmadığı varsayımına dayanır. Langmuir izoterm model eşitliğindeki q_e (mg/g) dengede adsorplanan bor miktarını, q_m (mg/g) *maksimum adsorpsiyon kapasitesini* ve K_L (l/mg) denge sabitini ifade eden sabitlerdir.

Freundlich izoterm modeli ise adsorpsiyonun, adsorban yüzeyinde homojen olmayan adsorpsiyon ısı dağılımlı heterojen yüzeylerde gerçekleştiğini ve tek tabaka oluşumu ile sınırlı olmadığı varsayımına dayanmaktadır.

Freundlich izoterm model eşitliğindeki K_F (mg/g)/(mg/l)^{1/n} adsorpsiyon kapasitesi ile ilgili Freundlich sabitini, n adsorbentin yüzeyindeki sitelerin heterojenliğini gösteren sabitlerdir. Deneysel veriler ile model eşitlikler arasındaki uygunluk korelasyon katsayısı (R^2) ile belirlenmiştir. Göreceli olarak yüksek R^2 değerine sahip modelin adsorpsiyon izoterm modelini daha iyi ifade ettiği esas alınmıştır. Modeller arasında R^2 değerlerinin karşılaştırılmasının yetersiz kaldığı durumlarda q_e değerleri dikkate alınmaktadır. Hesaplanan q_e değeri deneysel q_e değerine yakın olan model deneysel verilerle en uyumlu model olarak kabul edilmektedir. Deneysel ve model eşitliklerden elde edilen adsorpsiyon izotermi Şekil 23’de verilmiştir. Doğrusal olmayan regresyon analizi ile elde edilen model parametreleri Tablo 12’de özetlenmiştir.



Şekil 23. Uçucu kül ile bor adsorpsiyonu için adsorpsiyon izotermelerinin karşılaştırılması.

Tablo 12

Langmuir ve Freundlich model parametreleri

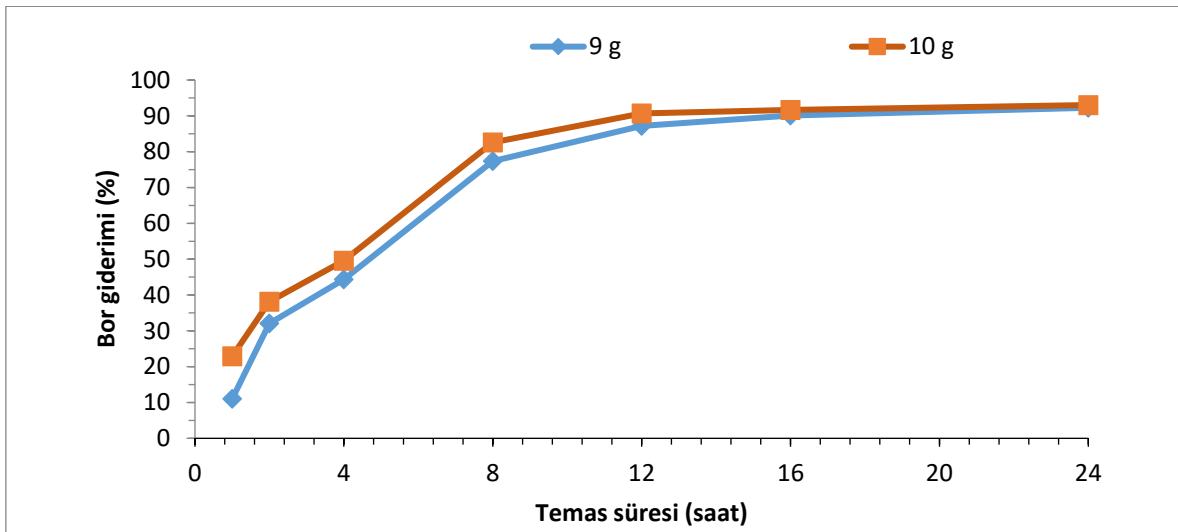
q_m , den.	Langmuir			Freundlich		
	q_m	K_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
0,158	0,177	2,269	0,917	0,124	0,193	0,825

Langmuir eşitliğinden hesaplanan maksimum adsorpsiyon kapasitesini gösteren q_m değerinin deneysel olarak elde edilenle büyük ölçüde tutarlı olduğu görülmektedir. Uçucu

kül üzerindeki bor adsorpsiyonunun deneysel verileri Langmuir modeline Freundlich modelinden daha iyi uymaktadır. Uyum iyiliğinin bir ölçüsü olan ve Tablo 13'te rapor edilen R^2 değeri, deneysel verilerin Langmuir modeli tarafından iyi temsil edildiğini doğrulamaktadır.

4.3.5. Temas Süresinin Etkisi ve Adsorpsiyon Kinetiği

Uçucu kül ile bor giderme hızını belirlemek için B adsorpsiyonu ve temas süresi arasındaki ilişki incelenmiştir. Uçucu kül ile B adsorpsiyonu için temas süresinin etkisi, 1-24 saat arasında, orijinal jeotermal su bor başlangıç konsantrasyonunda (11,88 mg/l), iki farklı adsorban miktarı/100 ml çözelti oranında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 24'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 25 °C'de gerçekleştirilen adsorpsiyon sürecinde temas süresinin artması ile bor giderme veriminin arttığı ve 12 saat sonunda 9 ve 10 g adsorban miktarları için sırasıyla % 87 ve % 90 olan giderme verim değerlerinin 24 saat sonunda % 92 ve % 93 seviyelerine ulaştığı görülmüştür. 12 saatlik adsorpsiyon sürecinde adsorpsiyon hızının yüksek olması adsorban yüzeyindeki adsorpsiyon için elverişli aktif sitelerin çokluğu ve uçucu kül yüzeyi ve bor arasındaki güçlü etkileşim ile açıklanabilir. Uçucu kül örneğinde var olan adsorpsiyon için elverişli sitelerin bor ile kaplı olmasından dolayı 12 saatten sonra adsorpsiyon hızı azalmaktadır. Böylece zamanla azalan aktif sitelerin dolması katı ve yığın fazlardaki tanecikler arasındaki itme kuvvetlerinden dolayı zorlaşmaktadır.



Şekil 24. Uçucu kül ile bor adsorpsiyonuna temas süresinin etkisi.

Adsorpsiyon kinetiğinin incelenmesi adsorpsiyon hızına etki eden adsorpsiyon basamaklarının anlaşılması için önemlidir. Ayrıca adsorpsiyon kinetiği katı-sıvı arayüzeyinde kirletici maddenin giderilmesi için gerekli zamanı tanımlanması açısından da önemlidir. Kirletici madde gideriminin kinetiğine ilişkin bilgiler, optimum çalışma koşullarının belirlenmesi ve adsorpsiyon sistemlerinin tasarımı içinde gereklidir. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen kinetik verileri analiz etmek için sözde birinci derece, sözde ikinci derece, parçacık içi difüzyon ve Elovich kinetik modeller kullanılmıştır (Wang ve Guo, 2023). Bu modeller aşağıdaki eşitlikler ile verilmiştir:

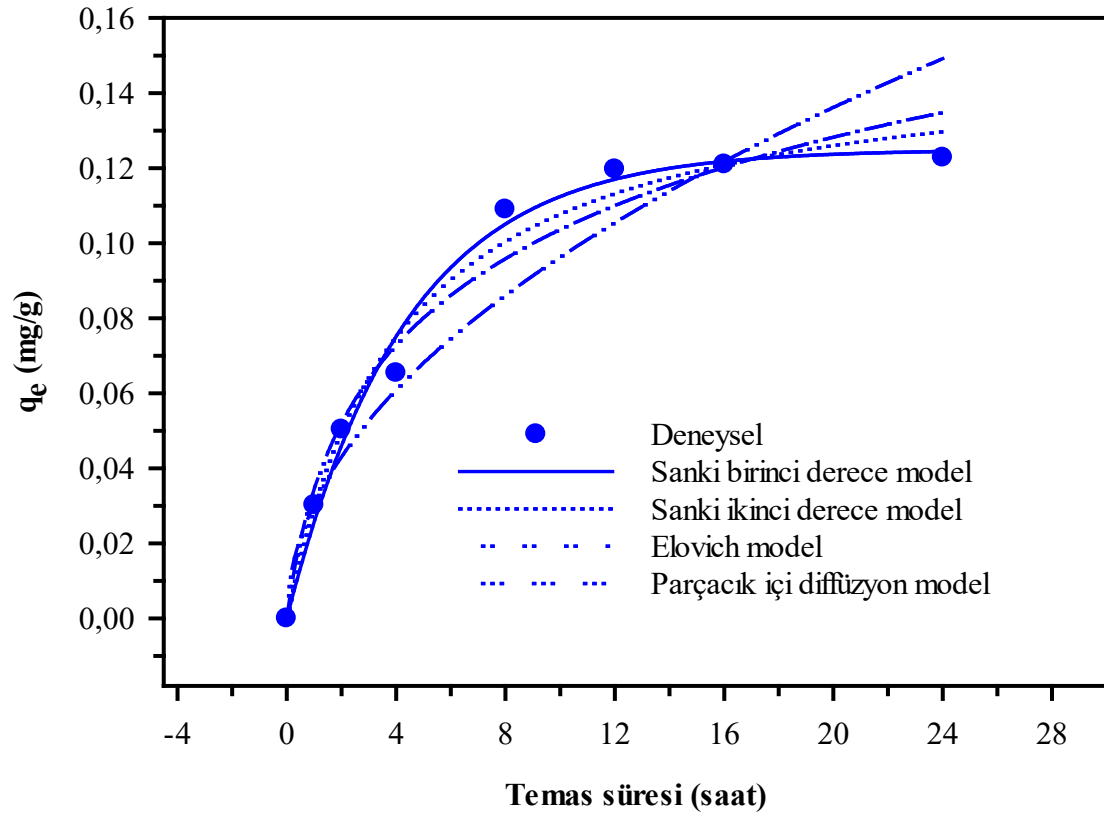
$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (\text{sözde birinci derece}) \quad (4.7)$$

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (\text{sözde ikinci derece}) \quad (4.8)$$

$$q_t = k_i t^{0.5} \quad (\text{parçacık içi difüzyon}) \quad (4.9)$$

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta \alpha t) \quad (\text{Elovich}) \quad (4.10)$$

Bu eşitliklerde, q_t (mg/g) ve q_e (mg/g), dengede ve herhangi bir t anında adsorplanan madde miktarını ifade eder. k_1 (1/min), k_2 (g/mg min) ve k_i (mg/g min^{0.5}) sözde birinci, sözde ikinci ve parçacık içi difüzyon hız sabitleridir. Elovich eşitliğindeki α (mg/g min) başlangıç adsorpsiyon hızı ile ilişkili bir parametredir. β (g/mg) ise örtülü yüzey ile ilişkili bir sabittir. Sözde birinci derece, sözde ikinci derece, parçacık içi difüzyon ve Elovich kinetik modellerin karşılaştırılması Şekil 25'te gösterilmiş, model parametreleri Tablo 13'te verilmiştir.



Şekil 25. Uçucu kül ile bor adsorpsiyon kinetiğinin karşılaştırılması.

Tablo 13

Uçucu kül ile bor adsorpsiyonu için elde edilen kinetik parametreler

$q_{e-den..}$	Sözde birinci derece			Sözde ikinci derece			Parçacık içi difüzyon		Elovich		
	q_e	k_1	R^2	q_e	k_2	R^2	k_i	R^2	α	β	R^2
0,122	0,125	0,230	0,99	0,152	1,616	0,983	0,031	0,906	0,057	26,88	0,969

Kinetik denklemlerden elde edilen korelasyon katsayılarının sözde birinci derece denklemi için daha yüksek olması borun uçucu kül ile adsorpsiyonunun sözde birinci derece kinetik modele uyduğunu göstermektedir (Tablo 13). Ayrıca model eşitliklerden hesaplanan

teorik q_e değerinin, deneysel ($q_{e, \text{den.}}$) değerine oldukça yakındır. Bu durum elde edilen deneysel verilerin sözde birinci derece kinetik modele daha iyi uyduğunu göstermektedir.

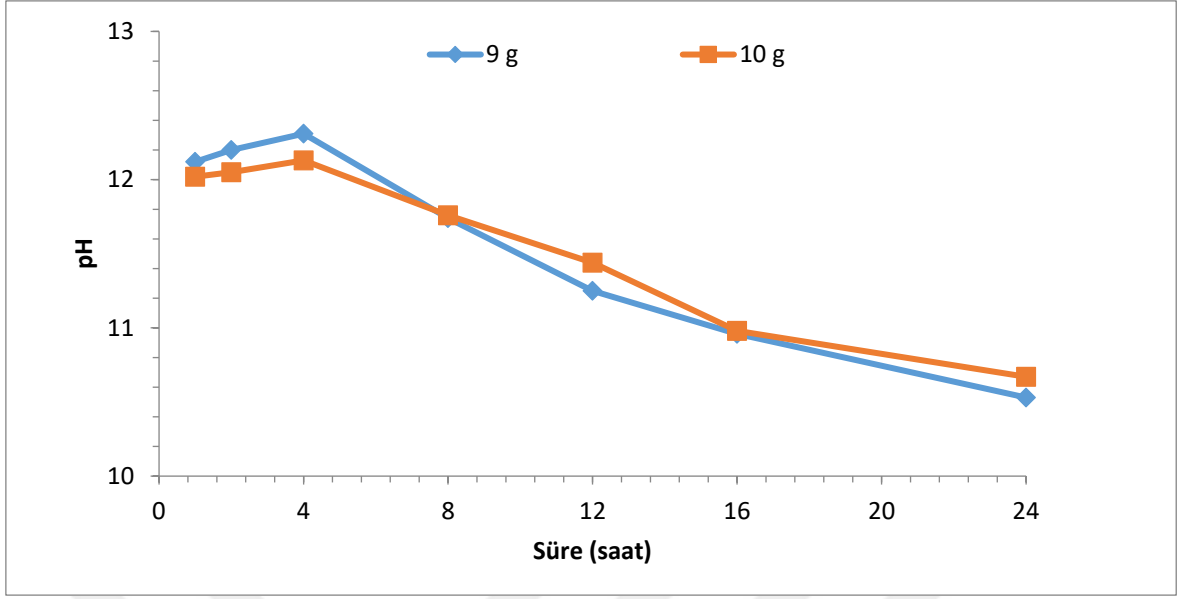
4.4. Kontrol deneyleri sonuçları

Kontrol deneyleri kapsamında uçucu külden suya geçen bor konsantrasyonu belirlemek amacıyla optimum giderimin saptandığı oda sıcaklığında, 9 ve 10 g kül dozunda 100 ml saf su ile karıştırılarak 1, 2, 4, 8, 12, 16 ve 24 saatlerde yapılmıştır (Tablo 14). Şekil 26’da uçucu kül liçinin zamana bağlı pH değişimi gösterilmiştir. Bir saatin sonundan kül içinde ölçülen pH değeri 9 ve 10 g uçucu kül miktarı için sırasıyla 12,12 ve 12,02 olup bu değer 4 saatin sonunda 12,31 ve 12,13’e ulaşmış, sonrasında pH değeri azalarak 24 saatin sonunda 10,53 ve 10,67 olarak ölçülmüştür. Şekil 27’de ise uçucu külden saf suya geçen bor miktarı gösterilmiştir. İlk 4 saatte suya her iki adsorban miktarı içinde bir miktar bor geçişi olmaktadır, fakat geçen bor 4 saatten sonra küle geri adsorplanmaktadır.

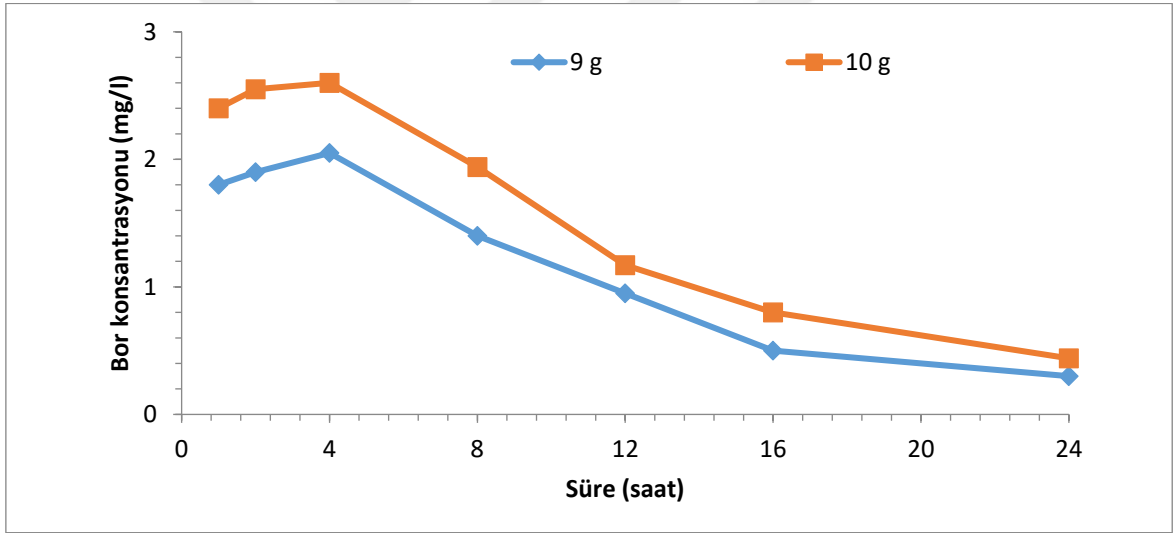
Tablo 14

Farklı sürelerde gerçekleştirilen kontrol deneyleri sonucunda elde edilen pH, EC ve tuzluluk değerleri ve B konsantrasyonu

Sıcaklık (°C)	Uçucu kül miktarı (g)	Kullanılan su	Süre (saat)	pH	EC (mS/cm)	Tuzluluk (‰)	B (mg/l)
25	9	Saf su (100 ml)	1	12,1	6,99	3,8	1,8
			2	12,2	7,44	4,2	1,9
			4	12,3	8,66	4,8	2,05
			8	11,7	4,5	2,3	1,4
			12	11,3	3,69	1,9	0,95
			16	11	3,03	1,5	0,5
			24	10,5	2,91	1,4	0,3
25	10	Saf su (100 ml)	1	12	6,96	3,8	2,4
			2	12,1	7,53	4,1	2,55
			4	12,1	8,72	4,9	2,6
			8	11,8	4,62	2,4	1,94
			12	11,4	3,95	2	1,17
			16	11	3,27	1,7	0,8
			24	10,7	2,96	1,4	0,44



Şekil 26. Zamana bağlı uçucu kül liçinin pH değişimi.



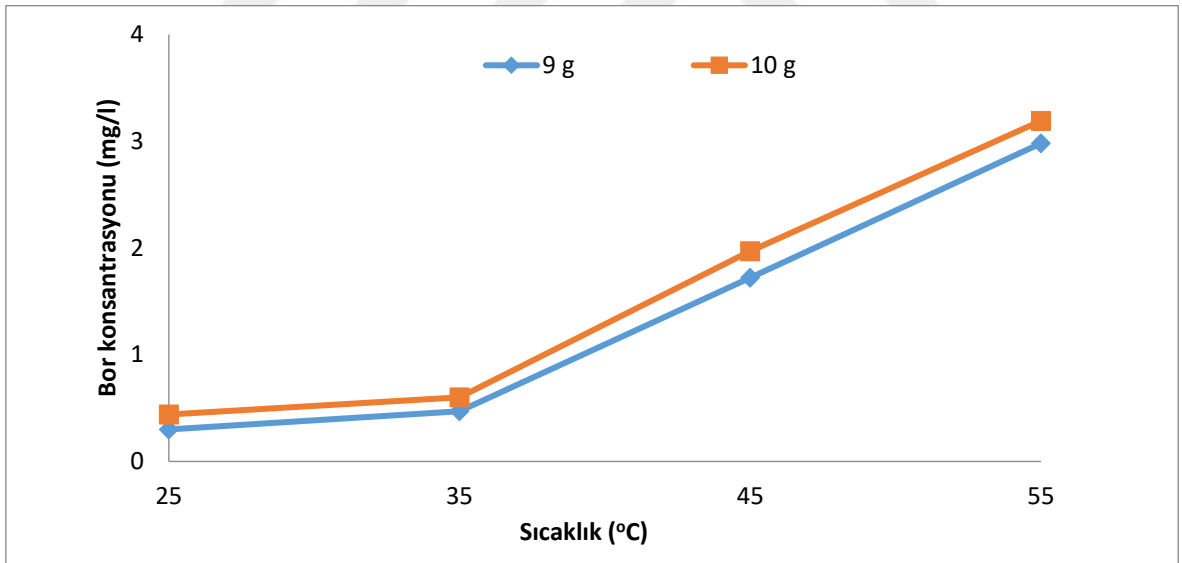
Şekil 27. Zamana bağlı uçucu kül liçinin B konsantrasyonu değişimi.

Uçucu külden saf suya B liçinde sıcaklığın etkisini belirlemek için farklı sıcaklıklarda kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir (Tablo 15). Sıcaklık arttıkça (25 °C de 0,44 mg/l olan B konsantrasyonu 55 °C de 3,19 mg/l'ye yükselmiştir) suya liç olan B konsantrasyonun da arttığı saptanmıştır (Şekil 28).

Tablo 15

Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen kontrol deneyleri sonucunda elde edilen pH, EC ve tuzluluk değerleri ve B konsantrasyonu

Uçucu kül miktarı (g)	Süre (saat)	Kullanılan su	Sıcaklık (°C)	pH	EC (mS/cm)	Tuzluluk (‰)	B (mg/l)
9	24	Saf su (100 ml)	25	10,5	2,91	1,4	0,3
			35	11,5	3,35	1,7	0,47
			45	10,8	2,7	1,3	1,82
			55	10,4	2,48	1,1	2,98
10	24	Saf su (100 ml)	25	10,7	2,96	1,4	0,44
			35	11,3	3,1	1,5	0,6
			45	10,9	2,8	1,3	1,97
			55	10,6	2,5	1,2	3,19



Şekil 28. Artan sıcaklığa bağlı olarak liçteki B konsantrasyonu değişimi.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bor, yeryüzünde yüzden fazla minerali bulunan, farklı kullanım alanları olan, önemli bir elementtir. Bor bileşikleri toprak, kayaç, yüzey ve yeraltı suyu, deniz suyu, bitki ve hayvanlarda doğal olarak bulunmaktadır. Ülkemizin jeolojik yapısı nedeni ile artan su-kayaç etkileşimi sonucunda jeotermal sularda da B yüksek konsantrasyonda bulunmaktadır. Bu çalışmada limit değerlerin oldukça üzerinde B içeren Kestanbol jeotermal akışkanından (11,88 mg/l) adsorpsiyon yöntemi ile bor giderimi araştırılmıştır. Adsorban olarak 18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri kullanılmıştır.

Uçucu küllerin adsorpsiyon kapasitelerini belirlemek için sıcaklık, katı/sıvı oranı, temas süresi ve pH gibi farklı parametrelerde kesikli adsorpsiyon deneyleri yürütülmüştür. Uçucu küllerin bileşimindeki Ca buffer etkisi göstererek tüm deneyler bazik ortamda gerçekleştirilmiştir. En iyi B giderim için pH aralığı 10-11 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül bor adsorpsiyonu için etkili bir adsorbandır, bor giderim yüzdesinin adsorban miktarının ve temas süresinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Yeterli yüzey alanı ve zaman verildiğinde % 90 ve üzeri adsorpsiyon elde edilebilmiştir. Artan sıcaklıkla ise uçucu küllerin B giderim verimi azalmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda uçucu küllerin bor gideriminde etkin olduğu, çok bulunan ve atık malzeme olduğundan maliyeti düşüreceği ve bor ön arıtma sistemleri için kullanılabileceği tespit edilmiştir. Kestanbol jeotermal akışkanında yüksek oranda bulunan bor gideriminin uçucu kül kullanılarak yapılabileceği ve Ilıca Dere'ye karışan jeotermal akışkanın çevreye verdiği zararın minimum düzeye indirilebileceği saptanmıştır. Farklı deney koşullarında, özellikle temas süresi arttıkça uçucu külün adsorpsiyon özellikleri farklı olabilir. Sürekli testler ile uçucu küllerin bor giderimindeki etkisi daha uzun süre takip edilebilir. Ayrıca uçucu küllerin Kestanbol jeotermal akışkanında yüksek konsantrasyonda bulunan diğer elementlerin (Fe, Mn vb.) giderimi üzerindeki etkisi belirlenebilir.

KAYNAKÇA

Akkuş, İ. (2020). “Türkiye’de Jeotermal Enerji Gerçeği: Potansiyel ve Sorunlara Genel Bir Bakış”. *TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştay ve Paneli*. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.

Ar, M. (2019). Jeotermal akışkanların sulama suyuna karışmasının çilek bitkisi üzerine etkisi. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Aydın.

Aras, G. (2007). Uranyumun aktifleştirilmiş kil tarafından adsorpsiyonu. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Arıkan, T. (2019). “Sulu çözeltideki bor iyonlarının sepiyolit ile giderimi” *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(2), 333-338. DOI:10.18016.ksutarimdog.v22i42694.498284.

Aslan, E. (2010). Alangüllü (Aydın) jeotermal kaynağının kimyasal özellikleri ve çevreye olan etkilerinin uzaktan algılama ve CBS kullanılarak belirlenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Baba, A. and Ármannsson, H. (2006). “Environmental impact of the utilization of geothermal areas”. *Energy Sources*, 1(3), 267-278. DOI: 10.1080/15567240500397943.

Baba, A. ve Ertekin, C. (2007), “Determination of the source and age of the geothermal fluid and its effects on groundwater resources in Kestanbol (Çanakkale-Turkey)”, *GQ07: Securing Groundwater Quality in Urban and Industrial Environments (Proc. 6th International Groundwater Quality Conference held in Fremantle, Western Australia, 2–7 December*.

Bada, S. O. and Potgieter-Vermaak, S. (2008). “Evaluation and treatment of coal fly ash for adsorption application”. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 7(12), 37-48.

Badruk, M. (2014). “Jeotermal enerji uygulamalarında çevre sorunları”. *Jeotermal Enerji Semineri* (345-356).

Bayar, D. (2001). Sulu çözültiden adsorpsiyonla bor giderim ve deney tasarımı. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

Bilici Başkan, M. ve Atalay, N. (2013). “İçme ve sulama sularında bor kirliliği ve bor giderme yöntemleri”. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 78-84. doi: 10.5505/pajes.2014.47955.

Birkle, P. and Merkel, B. (2000). “Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufers, Michoacan Mexico”. *Water Air and Soil Polution*, 124 (3), 371-410. DOI: 10.1023/A:1005242824628.

BGS, British Geological Survey, 2023. <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/geothermal-energy/>

Cao, Y., Guo, Q., Zhuang, Y., Yua, Z., Guoa, W., Zhangb, C., Zhub, M., Zhaoa, Q. and Ren, T. (2017). “Removal of harmful constituents from geothermal water by selected anion clays”. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 161-164.

Çağlar, I. and Demirörer, M. (1999). “Geothermal exploration using geoelectric methods in Kestanbol Turkey”. *Geothermics*, 28(6), 803–819. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00044-9).

Çağlayan, A. (2013). “Jeotermal Enerji ve Jeotermal Kaynak Çalışmalarında Jeoloji Mühendisliği”. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 15, 159-164.

Çandar, Ö. (2014). Çanakkale-Tuzla yöresi jeotermal sularının kabuklaşma ve korozyon özelliklerinin incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Çokadar, H., İleri, R., Ateş A. ve İzgi, B. (1999). “Bakır (II) iyonunun sulu ortamdan granül aktif karbon ile giderilmesi”. *Arıtım Dünyası*, 13, 77–83.

Çokadar, H., İleri, R., Ateş, A. ve İzgi, B. (2003). “Ni (II) iyonunun sulu ortamdan granül aktif karbon (GAK) ile giderilmesi”. *Ekoloji Çevre Dergisi*, 12(46), 38–42.

Coşkun, S. (1998). Sulardan kurşunun kil mineralleri kullanılarak adsorpsiyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Celebi, H. (2020). “Doğal kabak çekirdeği kabuğunun bor adsorpsiyon kapasitesi”. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (4), 1698-1710.

Çelmen, O. (2020). “Türkiye Jeotermal Enerji Kaynak Potansiyeli ve MTA Genel Müdürlüğü Çalışmaları”, *TÜBA–Jeotermal Enerji Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli Sunum Dokümanları ve Notları*, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Çengeloğlu, Y., Tor, A., Arslan, G., Ersoz, M. and Gezgin, S. (2007). “Removal of boron from aqueous solution by using neutralized red mud”. *Journal of Hazardous Materials*, 142 (1-2), 412-417. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.037>.

Çetin, A. (2018). “Sığ Jeotermal Sistemler”. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 25, 15-25.

Çınar, E. (2014). Farklı bölgelerden alınan uçucu küllerin ağır metal iyonlarını adsorblama özelliklerinin farklı bağlayıcılar kullanılarak geliştirilmesi.Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Dağıstan, H. (2008). “Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları”. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 5, 8-10.

Dağıstan, H. (2022). “Türkiye Jeotermal Kaynak Aramaları, Kullanımı ve Sürdürülebilirliğinin Sağlanması”. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*. 1-9.

Demir, E. ve Yalçın, H. (2014). “Adsorbentler: Sınıflandırma, Özellikler, Kullanım ve Öngörüler”. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi* 7 (2), 70-79.

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

Demirsoy, N., Başaran C., H. ve Sandalcı, S. (2017). *Kestampolis kaplıcaları, Kestampolis'in nitelikli suların tedavileri ve şifaları üzerine bilgiler ve bu termal sularının kimyasal tahlili*. Nobel Tıp Kitapevleri: İstanbul.

Demirsoy, N., Başaran, C., H. ve Sandalcı, S. (2018). “Historical Kestanbol hot springs: “The water that resurrects”, Tarihi Kestanbol Kaplıcaları: “Ölü Diriltten Su”, *Lokman Hekim Dergisi*, 8 (1), 23-32.

Dinç, F. (2005). Jeotermal kaynaklardan çıkan atık suların genotoksik özelliklerinin bitkisel test sistemleri ile araştırılması. Adnan Menderes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Aydın.

Dinçer, I. (2018). “Comprehensive energy systems”. *Elsevier*, 1, 1085-1144.

Doğdu, N. (2021). “5686 sayılı Kanun ve değişen uygulama yönetmeliği'ne göre jeotermal kaynak koruma alanlarının belirlenmesi ve yapılan çalışmalar”. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 32, 55-61.

Elmacı, Ö.L. (1995). Güney Marmara bölgesi sanayi domates alanlarındaki toprak, sulama suyu ve domates (*Lycopersicum Esculentum*) meyvelerinde ağır metal içeriklerinin belirlenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.

EİE, (1979). *Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanılma olanakları*. EİE yayını : Ankara.

EİE, (1982). *Türkiye uçucu küllerinin özellikleri*, 82-21-28. EİE yayını: Ankara.

EPA, (2004). *Toxicological review of boron and compounds*. CAS No. 7440-42-8 .

Eroğlu, V. (2008). “Ülkemizde termal, maden suları kaynakları ve kullanımı”. *Termal ve Maden Suları Konferansı*, 24-25 Nisan, Afyonkarahisar.

Eşder, T. (1981). “Türkiye jeotermal enerji kaynakları ve seracılıktaki önemi”. 81-108. *I. Türkiye Seracılık Kongresi*, Etibank Matbaası: Antalya.

Gazi, M. and Shahmohammadi, S. (2012). “Removal of trace boron from aqueous solution using iminobis-(propylene glycol) modified chitosan beads”. *Reactive and Functional Polymers*, 72(10), 680-686. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2012.06.016>.

Garcia-Soto, M.M.F. and Camacho, E.M. (2006). “Boron removal by means of adsorption with magnesium oxide”. *Separation and Purification Technology*, 48(1), 36-44. DOI: 10.1016/j.seppur.2005.07.023.

Girgin, H. D. (2019). Atık sulardan bor ayırımı için kompozit kriyojel sisteminin sentezi ve karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Guan, Z., Lv, J., Bai, P. and Guo, X. (2016). “Boron removal from aqueous solutions by adsorption – A review”. *Desalination*, 383: 29-37. doi:10.1016/j.desal.2015.12.026

Güler, M. (2019). “Doğal kaynaklar ve kalkınma”. *Kapak*, 58-59. Eskişehir Ticaret Odası.

Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A. B., Cansaran Duman, D. ve Aras, S. (2012). “Biyosorpsiyon, adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları”. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69 (4), 235-253.

Hilal, N., Kim, G.J. and Somerfield, C. (2011). “Boron removal from saline water: A comprehensive review”. *Desalination*, 273(1), 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.012>.

Irawan, C., Liu, J.C. and Wu, C.C. (2011). “Removal of boron using aluminum-based water treatment residuals (Al-WTRs)”. *Desalination*, 276(1), 322–327. DOI: 10.1016/j.desal.2011.03.070.

IEA, (2022). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>, Erişim Tarihi: 22.02.2022.

Kabay, N., Guler, E. and Bryjak, M. (2010). “Boron in Seawater and Methods for its Separation- A Review”. *Desalination*, 261(3), 212–217. DOI: 10.1016/j.desal.2010.05.033.

Kahraman, S. (2022). “Türkiye’de jeotermal enerji ve elektrik üretimi”. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 33, 29-34.

Karaca, Z., Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M.A., Kamacı, C., Çetiner, Z.S., Erenoğlu, R.C. ve Akçay, Ö. (2013). “Çanakkale ili (Biga yarımadası) Jeotermal kaynakları ve özelliklerinin belirlenmesi”. *Güney Marmara Kalkınma Ajansı*, 22-24.

Karagülle, M.Z. and Doğan, M.B. (2002). *Kaplıca tıbbı ve Türkiye kaplıca rehberi*. Nobel Tıp Kitapevi: İstanbul.

Karatepe, V., Elveren, M. and Osma, E. (2023). “Investigation of the effects geothermal and mineral water on barley (*Hordeum vulgare* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.)”. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi- C Yaşam Bilimleri ve Biyoteknoloji*, 12(1), 19-29. <https://doi.org/10.18036/estubtdc.1195951>.

Karadağ, N. (2023), Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarının durumu, gelecek öngörüsü ve özelinde güneş enerjisinin incelenmesi. Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.

Kartikaningsih, D., Huang, Y.H. and Shih, Y.J. (2017). “Electro-oxidation and characterization of nickel foam electrode for removing boron”. *Chemosphere*, 166, 188-191. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.091.

Kiracı, A. (2014). Azap Gölü'nün Sedimentlerindeki ve Sularındaki Ağır Metal Miktarlarının Belirlenmesi. Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aydın.

Koçak, A. (2002). “Jeotermal uygulamalar ve MTA jeotermalde yer bilimsel uygulamalar yaz okulu ders notları”. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeotermal Enerji ve Araştırma Merkezi*, 119–131.

Kluczka, J., Trojanowska, J. and Zolotajkin, M. (2015). “Utilization of fly ash zeolite for boron removal from aqueous solution”. *Desalination and Water Treatment*, 54(7), 1839–1849. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.892033>

Marmara, H., Şanlıyüksel Yücel, D., Özden, S. ve Yücel, M.A. (2020). “Kestanol jeotermal akışkanının hidrokimyasının ve çevresel etkilerinin belirlenmesi”. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(1), 97-116. <https://doi.org/10.25288/tjb.604842>.

MTA a, b, c (2023). “Türkiye jeotermal enerji potansiyeli ve arama çalışmaları”. MTA, Erişim: Ekim 2023, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/jeotermal-enerji-arastirmalari>

MTA, d (2023). “Türkiye jeotermal enerji potansiyeli ve arama çalışmaları”. MTA, Erişim: Ekim 2023, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita> .

Ölmez, E. (1976). “Çanakkale-Ezine Kestanol-1 sıcak su sondajı kuyu bitiş raporu”. MTA, Rapor No: 5595, Ankara.

Öztürk, N. ve Kavak, D. (2005). “Adsorption of boron from aqueous solutions using fly ash: batch and column studies”. *Journal of Hazardous Materials*, 127(1-3), 81- 8. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.06.026.

Öztürk, N ve Köse, T.E. (2008). “Boron removal from aqueous solutions by ionexchange resin: batch studies”. *Desalination*, 227(1), 233–240. DOI: 10.1016/j.desal.2007.06.028.

Parab, H., Joshi, S., Shenoy, N., Verma, R., Loli, A. and Sudersanan, M. (2005). “Uranium removal from aqueous solution by coir pith: equilibrium and kinetic studies”. *Bioresource Technology*, 96(11), 1241-8. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.10.016.

Polat, H., Polat, M. ve Şekeroğlu, K. (2008). “Uçucu Kül ve Doğal Zeolitin Beraber Kullanılarak Borun Atık Sulardan Uzaklaştırılması”. *Tübitak, Proje No: 105M366*, İzmir.

Polowczyk, I., Ulatowska, J., Kozlecki, T., Bastrzyk, A. and Sawinski, W. (2013). “Studies on removal of boron from aqueous solution by fly ash agglomerates”. *Desalination*, 310, 93-101.

Reinert, L., Ohashi, F., Kehal, M., Bantignies, J.L., Goze-Bac, C. and Duclaux, L. (2011). “Characterization and boron adsorption of hydrothermally synthesised allophones”. *Applied Clay Science*, 54(3), s 274-280. DOI: 10.1016/j.clay.2011.10.002.

Sabah, E., Turan, M. and Çelik, M.S. (2002). “Adsorption mechanism of cationic surfactants onto acid and heat activated sepiolites”. *Water Resources*, 36, 3957-3964.

Sehatek, (2022). <https://sehatek.com.tr/blog/jeotermal-enerji-nedir-kullanim- alanlari-nelerdir>.

Sönmez, N.A. (2014). Sulardan adsorpsiyon yöntemi ile bor giderimi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

Soylu, M. ve Gökkuş, Ö. (2017). “Türkiye’deki doğal zeolitler ve iyon değişimi uygulamaları”. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), s 11- 20. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.297064>.

Şahin, M.O. (2021). Mikrodalga ışınlam ve adsorpsiyon yöntemleri ile Tuzla jeotermal kaynaklarından bor giderim performanslarının incelenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale.

Şener, M.F., Uzelli, T., Akkuş, İ., Mertoğlu, O. and Baba, A. (2023). “The potential, utilization, and development of geothermal energy in Türkiye”. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 171, 69-90. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1229381>.

Şengül, F., Küçükgül, E.Y. (1990). “Çevre mühendisliği fiziksel ve kimyasal temel işlemler ve süreçler”. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları*: İzmir.

Şanlıyüksel Yücel, D., Özden, S. ve Marmara, H. (2021). “Hydrogeochemical and isotopic monitoring of the Kestanbol geothermal field (Northwestern Turkey) and its relationship with seismic activity”. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30, 1112-1133. doi:10.3906/yer-2105-15.

Tarcan G (2003). “ *Jeotermal Su Kimyası, Jeotermalde Yerbilimsel Uygulamalar*”. Yaz Okulu Ders Kitabı– Jenarum, DEÜ Mühendislik Fakültesi, İzmir, Yayın No: 306, s.198–245.

Tokçaer, M. (2007), Batı Anadolu jeotermal akışkanlarında borun kimyasal döngüsü ve izotop fraksiyonlaşması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi., İzmir.

Torunlar, H., Toğaç, M.G., Özdoğan, D. K., Depel, G. ve Dereköy, N. (2019). “Jeotermal kaynakların tarımsal sulama suyu kirliliği ve kalitesi üzerine etkilerinin belirlenmesi”. *Toprak Su Dergisi*, özel sayı, 32- 45. <https://doi.org/10.21657/topraksu.654783>.

Türker, O.C. and Baran, T. (2017). “Evaluation and Application of an Innovative Method Based on Various Chitosan Composites and Lemna gibba for Boron Removal from Drinking Water”. *Carbohydrate Polymers*, 15:166, 209-218. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.02.106.

Ulatowska, J., Polowczyk, I., Bastrzyk, A., Koźlecki, T. and Sawiński, W. (2020). “Fly ash as a sorbent for boron removal from aqueous solutions: Equilibrium and thermodynamic studies”. *Separation Science and Technology*, 55(12), 2149-2157.

Yalçın, T. (2007). “Geochemical characterization of the Biga Peninsula thermal waters (NW Turkey)”. *Aquat Geochem*, 13(1), s75–93. DOI 10.1007/s10498-006-9008-2.

Yılmaz, A.E., Boncukçuoğlu, R., Yılmaz, M.T. and Kocakerim, M.M. (2005). “Adsorption of boron from boron-containing wastewaters by ion exchange in a continuous reactor”. *Journal of Hazardous Materials*, 117(2-3), s 221-226. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.09.012.

Yılmaz, N. (2022). Türkiye’deki yenilenebilir enerji kaynakları ve diğer enerji kaynaklarının durum analizi, çevresel etkileri, karşılaştırılması. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

Yılmaz, S. (2023). Analysis of firmness in renewable energy sources with energy storage. Özyeğin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Yingkai, X. and Lan, W. (2001). “The effect of pH and temperature on the isotopic fractionation of boron between saline brine and sediments”. *Chemical Geology*, 171(3), 253–261. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00251-5).

Yücel, M.A., Şanlıyüksel Yücel, D. (2023). "UAV-based RGB and TIR imaging for geothermal monitoring: a case study at Kestanbol geothermal field, Northwestern Turkey". *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 541. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11182-0>.

Yüksel, S. ve Yürüm, Y. (2010). “Removal of boron from aqueous solutions by adsorption Using fly ash, zeolite and demineralized lignite”. *Separation Science and Technology*, 45(1), 105–115. DOI: 10.1080/01496390903256042.

Wang, J. and Guo, X. (2023). “Adsorption kinetics and isotherm models of heavy metals by various adsorbents: An overview”. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(21), 1837-1865.

Wolska, J. and Bryjak, M. (2013). “Methods for boron removal from aqueous solution- a Review”. *Desalination*, 310, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.08.003>.

“*Guidelines for Drinking-Water Quality. 4th ed. Geneva*” (2011). WHO (World Health Organization) Switzerland.

Xiyili, H. (2015). Uçucu kül ile ağır metallerin giderimi için optimum koşulların belirlenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim dalı, Yüksek Lisans Tezi.