

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERMENCİK BÖLGESİNDE BULUNAN
JEOTERMAL KUYULARDA KABUK OLUŞUMU
VE ÖNLENMESİNDE KULLANILAN İNHİBİTÖR
ÇEŞİTLERİ

Mustafa Yasin ÖZBEK

Ocak, 2025

İZMİR

**GERMENCİK BÖLGESİNDE BULUNAN
JEOTERMAL KUYULARDA KABUK OLUŞUMU
VE ÖNLENMESİNDE KULLANILAN İNHİBİTÖR
ÇEŞİTLERİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Jeotermal Enerji Anabilim Dalı, Jeotermal Enerji Yüksek Lisans

Mustafa Yasin ÖZBEK

Ocak, 2025

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MUSTAFA YASİN ÖZBEK tarafından PROF. DR. CELALETTİN ŞİMŞEK yönetiminde hazırlanan “GERMENCİK BÖLGESİNDE BULUNAN JEOTERMAL KUYULARDA KABUK OLUŞUMU VE ÖNLENMESİNDE KULLANILAN İNHİBİTÖR ÇEŞİTLERİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Celalettin ŞİMŞEK

Danışman

Prof. Dr. Alper BABA

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat TOKCAER

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Abdullah SEÇGİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tüm yaşamım boyunca bana desteklerini esirgemeyen aileme ve bu yüksek lisans tezinin yazımı aşamasında bana destek veren danışmanım Prof. Dr. Celalettin Şimşek'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Mustafa Yasin ÖZBEK



GERMENCİK BÖLGESİNDE BULUNAN JEOTERMAL KUYULARDA KABUK OLUŞUMU VE ÖNLENMESİNDE KULLANILAN İNHİBİTÖR ÇEŞİTLERİ

ÖZ

Büyük Menderes grabeni Türkiye'nin batısında yer alan doğu-batı yönlü önemli bir çöküntü havzasıdır. Jeolojik yapının da etkisiyle yüksek sıcaklıklı jeotermal akışkanlara sahiptir. Bölgede yüksek sıcaklıkta jeotermal akışkan içeren, elektrik üretimi amaçlı çok sayıda sondaj açılmakta ve bunlara ek olarak re-enjeksiyon faaliyetleri ile jeotermal sistem döngüsel olarak çalıştırılmaktadır. Büyük Menderes grabeninde bulunan jeotermal rezervuarın temel kayaları Türkiye'nin de batı kısmının çoğunu oluşturan Menderes Masifi metamorfik kayaları, grabende temel kaya olarak bulunan en eski kayalardır. Bölgede açılan sondaj kuyuları rezervuar kayasını kesecek şekilde derinliği 1000 ile 3000 metreler arasında değişen jeotermal sondaj kuyuları açılmaktadır. Açılan sondajların sıcaklığı 140 ile 300 derece arasında değişmektedir.

Proje alanındaki jeotermal suyun içeriğinde bulunan kalsiyum, silisyum ve magnezyum elementleri işletme aşamasında hem jeotermal kuyularda hem de enerji santrali içindeki kritik noktalarda kabuklaşmalar meydana getirmektedir. Bu oluşan kabuklar enerji santrali işletmesinde ve jeotermal kuyuların işletmesinde büyük sorun oluşturmaktadır.

Yapılan bu çalışma işletme aşamasında kullanılan jeotermal suyun, üretim kuyularının içerisinden başlayarak enerji santrali boru hatları, ısı değiştiriciler ve son olarak re-enjeksiyon kuyuları da dahil olacak şekilde uygun şekilde şartlandırılarak jeotermal enerjinin en verimli şekilde kullanımını amaçlamaktadır.

Germencik bölgesi üretim kuyularından, enerji santrali boru hatları ve ısı değiştiricilerinden alınan su ve kabuk örnekleri kullanılarak karakterizasyon analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları doğrultusunda C, D, E ve F kuyularının ve bağlı oldukları enerji santralinde oluşan kabuğun silisyum kabuklaşması olduğu belirlenmiştir. Bunu önlemek amacıyla C kuyusu, D kuyusu ve bağlı oldukları enerji santralinde çalışmalar yapılmış ve üç farklı inhibitör kullanılmıştır. En fazla verimin alındığı "İnh1"

inhibitörü kullanılmış ve optimum dozaj miktarı olarak da 7 ppm belirlenmiştir. A ve B kuyusunun bağılı oldukları enerji santralinde stibnit kabuklaşması daha büyük sorun teşkil ettiği için bu santralde stibnit kabuklaşmasını önlemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Santral giriş boru hattında farklı miktarlarda amin bazlı inhibitör dozajlanmış en fazla verimin alındığı 4 ppm, optimum dozaj noktası olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Enerji, Büyük Menderes Grabeni, Kabuklaşma, İnhibitör



INHIBITORS TYPES FOR WELL SCALING AND PREVENTION IN GEOHERMAL WELLS IN GERMENCİK REGION

ABSTRACT

The Büyük Menderes graben is an important east-west oriented low-pressure area in western Türkiye. Due to its geological structure, there are high-temperature geothermal fluids here. In the region, many wells containing high temperature geothermal fluids are opened for power generation and furthermore, the geothermal system is operated cyclically with re-injection activities. The bedrock of the geothermal reservoir in the Büyük-Menderes graben are the metamorphic rocks of the Menderes Massif, which also make up most of the western part of Türkiye, and the oldest rocks found as bedrock in the graben. Geothermal wells are drilled in the region at a depth of 1000 to 3000 meters in such a way that they cut through the reservoir rock. The temperature of the boreholes varies between 140 and 300 degrees.

Calcium, silicon and magnesium elements present in the geothermal water in the project area lead to deposits in the geothermal boreholes and at critical points in the power plant during the operating phase. These deposits cause major problems in the operation of the power plant and the geothermal wells.

This study aims to utilize geothermal energy as efficiently as possible by conditioning the geothermal water used in the operational phase, starting with the production wells, through the power plant pipelines, the heat exchangers and finally the reinjection wells.

Certain analyses were carried out on water and equipment layer samples taken from production wells, power plant pipelines and heat exchangers in the Germencik region. The analysis results determined that there was silica scaling formed by the shell in wells C, D, E and F and the power plant they were connected to. In order to prevent this, studies were conducted in well C, well D and the power plant they were connected to and three different inhibitors were used. The “Inh1” inhibitor, which provided the highest efficiency, was used and the optimum dosage amount was determined as 7 ppm. In order to prevent stibnite scaling in the power plant where wells A and B were connected to, studies were conducted in this plant to prevent stibnite scaling in order

to make stibnite scaling a greater problem. Different lengths of amine-based inhibitor dosages in the power plant inlet pipeline were determined as the optimum dosage point of 4 ppm, where the highest efficiency was obtained.

Keywords: Geothermal Energy, Büyük Menderes Graben, Scaling, Inhibitor



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii

BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Amaç	1
1.2 Coğrafiik Özellikler.....	1
1.3 Ekonomik Durum.....	2
1.4 İklim ve Bitki Örtüsü.....	4
1.5 Önceki Çalışmalar.....	6

BÖLÜM İKİ – ÇALIŞMA SAHASININ JEOLojİSİ.....	9
2.1 Giriş.....	9
2.2 Stratigrafi.....	12
2.2.1 Menderes Metamorfitleri.....	12
2.2.1.1 Şistler ve Gnayslar.....	12
2.2.1.2 Neojen Kırıntılı Seriler.....	12
2.2.1.3 Kuvaterner Birimler.....	14
2.3 Yapısal Jeoloji.....	14

BÖLÜM ÜÇ – JEOTERMAL SİSTEM.....	17
3.1 Jeotermalin Tanımı.....	17

3.2 Jeotermal Sistem.....	17
3.3 Jeotermal Suların Kullanım Alanları.....	18
3.4 Çalışma Alanının Jeotermal Sistemi.....	20
BÖLÜM DÖRT – JEOTERMAL SİSTEMELERDE KABUKLAŞMA TURLERİ.....	22
4.1 Giriş.....	22
4.2 Kalsiyum Karbonat Kabuklaşması.....	24
4.3 Silisyum Kabuklaşması.....	27
4.4 Stibnit (Antimon Trisülfür) Kabuklaşması.....	31
BÖLÜM BEŞ – KABUKLAŞMA TURLERİNİN BELİRLENMESİ.....	34
5.1 Giriş.....	34
5.2 Materyal ve Metot.....	34
5.3 Çalışma Sahasından Alınan Jeotermal Su ve Kabuklaşma Analizleri.....	35
5.4 Kabuklaşmayı Önlemek Amacıyla Yapılan İnhibitör Çalışmaları.....	44
BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR.....	58

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Çalışma alanının yer bulduru haritası.....	2
Şekil 1.2 Türkiye’de bulunan jeotermal enerji santrallerinin haritası	3
Şekil 1.3 Aylık ortalama sıcaklık ve yağış grafiği.....	4
Şekil 1.4 Yıllara göre ortalama sıcaklık grafiği.....	5
Şekil 1.5 Yıllara göre ortalama yağış grafiği.....	5
Şekil 2.1 Büyük Menderes Grabeninin harita üzerinde gösterimi.....	9
Şekil 2.2 Germencik Bölgesi ve Büyük Menderes Havzasının jeolojik haritası.....	10
Şekil 2.2 Germencik Bölgesi ve Büyük Menderes Havzasının jeolojik haritası (devamı).....	11
Şekil 2.3 Aydın ili genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti.....	13
Şekil 2.4 Çalışma alanının ve çevresinin enine jeolojik kesiti.....	16
Şekil 3.1 İdeal jeotermal sistemin şematik sunumu.....	18
Şekil 3.2 Türkiye’deki jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası.....	19
Şekil 3.3 Çalışma alanının jeotermal modeli.....	21
Şekil 4.1 Çift çevrim jeotermal enerji santrali yüksek basınç ısı eşanjörü kalsiyum kabuklaşması.....	23
Şekil 4.2 Çift çevrim Jeotermal enerji santrali düşük basınç ısı eşanjörü silisyum kabuklaşması	23
Şekil 4.3 Çift Çevrim Jeotermal enerji santrali boru hattında oluşan kalsiyum ve silisyum yapıları kabuklaşma	24
Şekil 4.4 Kalsit çözünürlüğünün CO ₂ sıcaklığına ve basıncına bağlı değişimi	25
Şekil 4.5 Aydın ili Germencik ilçesinde bulunan bir termal işletmenin boru hattından alınan kalsit kabuklaşma örneği.....	26
Şekil 4.6 Bazı fosfonik asit bazlı kabuklaşma inhibitörlerinin şematik görünüşleri	27
Şekil 4.7 Kuvars ve amorf silika çözünürlüğünün sıcaklığa bağlı değişimi.....	28
Şekil 4.8 Germencik ilçesindeki enerji santrali yüzey boru hattından alınan kabuk numunesi.....	29
Şekil 4.9 Germencik ilçesinde bulunan özel bir jeotermal enerji santralinin düşük basınç ısı eşanjöründe kabuklaşan stibnit minerali	32

Şekil 5.1 Su ve kabuklaşma örneklerinin alındığı kuyuların konumları.....	37
Şekil 5.2 Laboratuvarda yapılan jeotermal su analizleri	37
Şekil 5.3 A kuyusunun kuyubaşından alınan kabuk örneğinin XRF analiz sonucu	39
Şekil 5.4 A ve B kuyularının bağlı olduğu enerji santralinin yüksek basınçlı ısı değiştiricisinin girişinde alınan kabuk örneğinin XRF analiz sonucu	41
Şekil 5.5 E ve F kuyularının bağlı olduğu enerji santralinin düşük basınç ısı değiştiricisinden alınan kabuklaşma örneğinin XRF analiz sonucu.....	42
Şekil 5.6 C kuyusundaki separatör sonrası üretim hattında takılı olan kupon [1] A ve B kuyularının bağlı olduğu santralin giriş hattında takılı olan kupon [2] E ve F kuyularının bağlı olduğu santralin re-enjeksiyon çıkış hattında takılı olan kupon [3].....	43
Şekil 5.7 İnh.1'in 10 ppm dozajda 15 günlük kupon görselleri	45
Şekil 5.8 İnh.2'nin 10 ppm dozajda 15 günlük kupon görselleri	45
Şekil 5.9 İnh.3'ün 10 ppm dozajda 15 günlük kupon görselleri	45
Şekil 5.10 İnh.1 inhibitörünün 15 günlük 14 ppm dozajdaki kupon görseli	46
Şekil 5.11 İnh.1 inhibitörünün 15 günlük 7 ppm dozajdaki kupon görseli	46
Şekil 5.12 İnh.1 inhibitörünün 15 günlük 4 ppm dozajdaki kupon görseli	46
Şekil 5.13 İnh.1 inhibitörünün 7 ppm dozajında kupon üzerinde görülen kabuklaşma yapısının XRF analiz sonuçları	47
Şekil 5.14 Çift çevrim tipi enerji santralinde bulunan ekipmanlar, jeotermal su, buhar ve yoğunlaşmayan gazlar akış şeması.....	48
Şekil 5.15 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinde jeotermal suyun santrale alındığı boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarında ve 30 gün sonunda yapılan kontrol görselleri	50
Şekil 5.16 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin yüksek basınçlı ısı değiştirici boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarındaki kontrol görselleri.....	50
Şekil 5.17 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin yüksek basınçlı ön ısıtıcı grubunun giriş boru hattında takılı olan, 7,5 ppm ve 4 ppm dozaj miktarlarındaki kupon kontrol görselleri.....	51
Şekil 5.18 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin düşük basınçlı ısı değiştiricinin çıkış boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarındaki kontrol görselleri	51
Şekil 5.19 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin düşük basınçlı ön ısıtıcı grubunun çıkış boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarındaki kontrol görselleri.....	52

Şekil 5.20 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralının re-enjeksiyon hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarında yapılan kontrol görselleri 52

Şekil 5.21 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralının fark basınç grafikleri....53



TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Jeotermal akışkanın sıcaklık değerlerine göre kullanım alanları.....	19
Tablo 5.1 Kimyasal analiz sonuçları.....	38



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

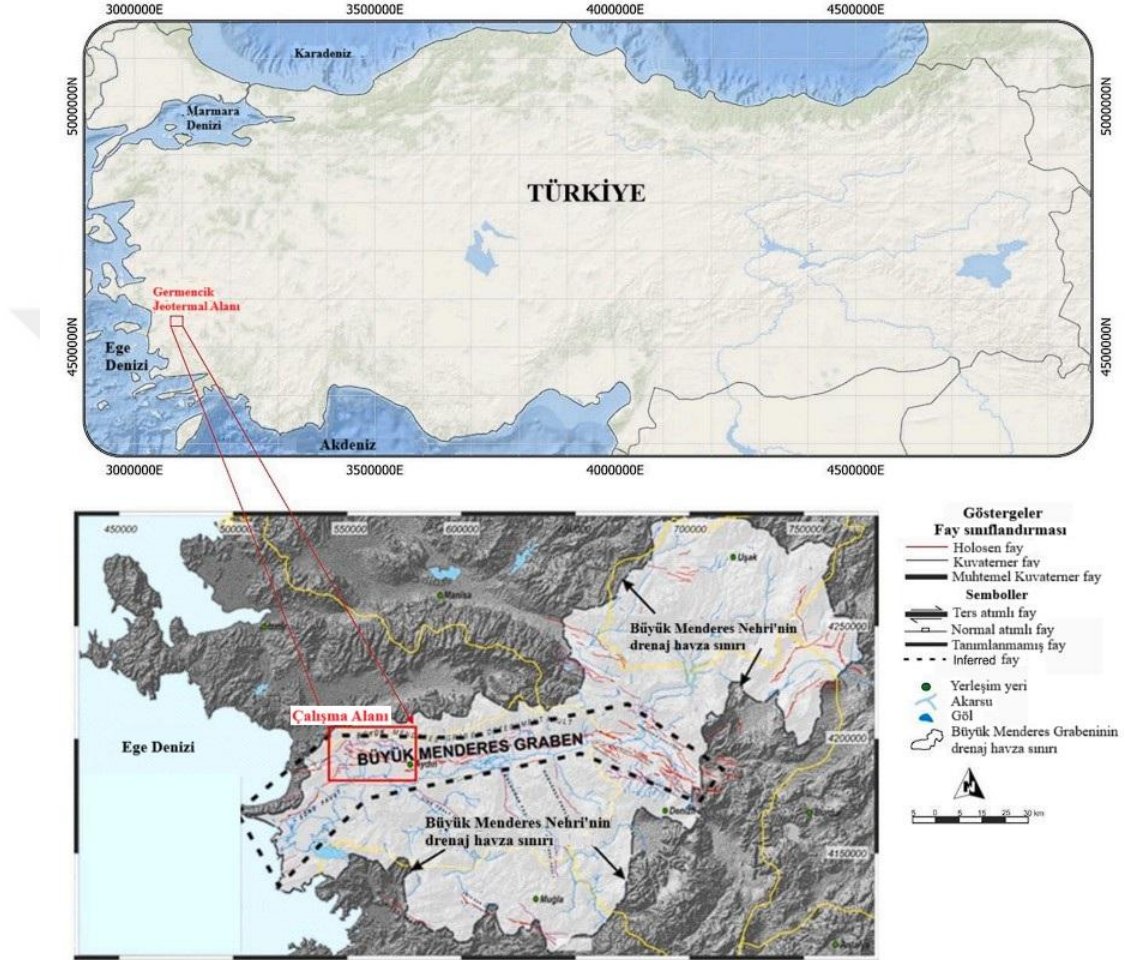
1.1 Amaç

Türkiye’ de bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji, son dönemde özellikle ülkenin batı kesiminde hızla gelişmektedir. Yapılan çalışma ve sondajlardan elde edilen verilere göre bölgenin yer altı potansiyeli elektrik üretimi ve tarımsal kullanım için oldukça yüksektir. Yerin belirli derinliklerinde bulunan rezervuarların tespiti ve açığa çıkarıldıktan sonra sürdürülebilir bir şekilde kullanımı oldukça önemlidir. Jeotermal kuyularda ve enerji santrallerinde oluşan kabuklaşmalar kuyuların ve enerji santrallerinin verimini düşürmekte, jeotermal kaynağın sürdürülebilir olmasından uzaklaştırmaktadır. Enerji santrallerinin ve jeotermal üretim kuyularını en verimli şekilde kullanmak için jeotermal suyun özelliklerini daha kuyu içerisinde iken kimyasal olarak kontrol altına alınması gerekmektedir. Kontrol altına alınan jeotermal suyun, yer üstü dolaşım ekipmanlarında da kontrolünü devam ettirmek kaynağın verimli kullanılması açısından oldukça önemlidir. Aksi takdirde, suyun kimyasal olarak kontrol altına alınmaması durumunda, jeotermal kuyu ve yer üstü ekipmanları kısa sürede kabuklaşma nedeni ile kullanılamaz duruma gelebilmektedir. Bu tez kapsamında, Germencik (Aydın) bölgesinde bulunan jeotermal kuyularından su örnekleri, sahada yer üstü boru hatları, re-enjeksiyon kuyuları ve kuyu başlarından kabuk örnekleri alınarak analiz edilmiş, bölgedeki kabuk tipleri belirlenmiş ve belirlenen kabuk tiplerine göre farklı inhibitör denemelerini değerlendirilmiştir.

1.2 Coğrafik Özellikler

Germencik ilçesi, Ege Bölgesinde Büyük Menderes Havzası içerisinde yer alan en önemli jeotermal sahalardan biridir. Büyük Menderese Havzasının yüz ölçümü 24.976 km²’dir. Germencik ilçe merkezi 27° 58’ 35’ doğu boylamı, 37° 14’ 52’ kuzey enlemi üzerinde bulunmaktadır. Germencik ilçesi ve çevresinin deniz seviyesinden yüksekliği 55 metredir. Çalışma alanının yer bulduru haritası Şekil 1.1’de sunulmuştur. Çalışma

alanı kuzey kesimlerinde D-B yönlü uzanan yükseltiler yer alır. Güney kesimlerini ise Büyük Menderes Nehrinin aktığı ova kesim oluşturur. Çalışma alanı ise hem ova hem de yükseltilere yakın kesimleri oluşturur.

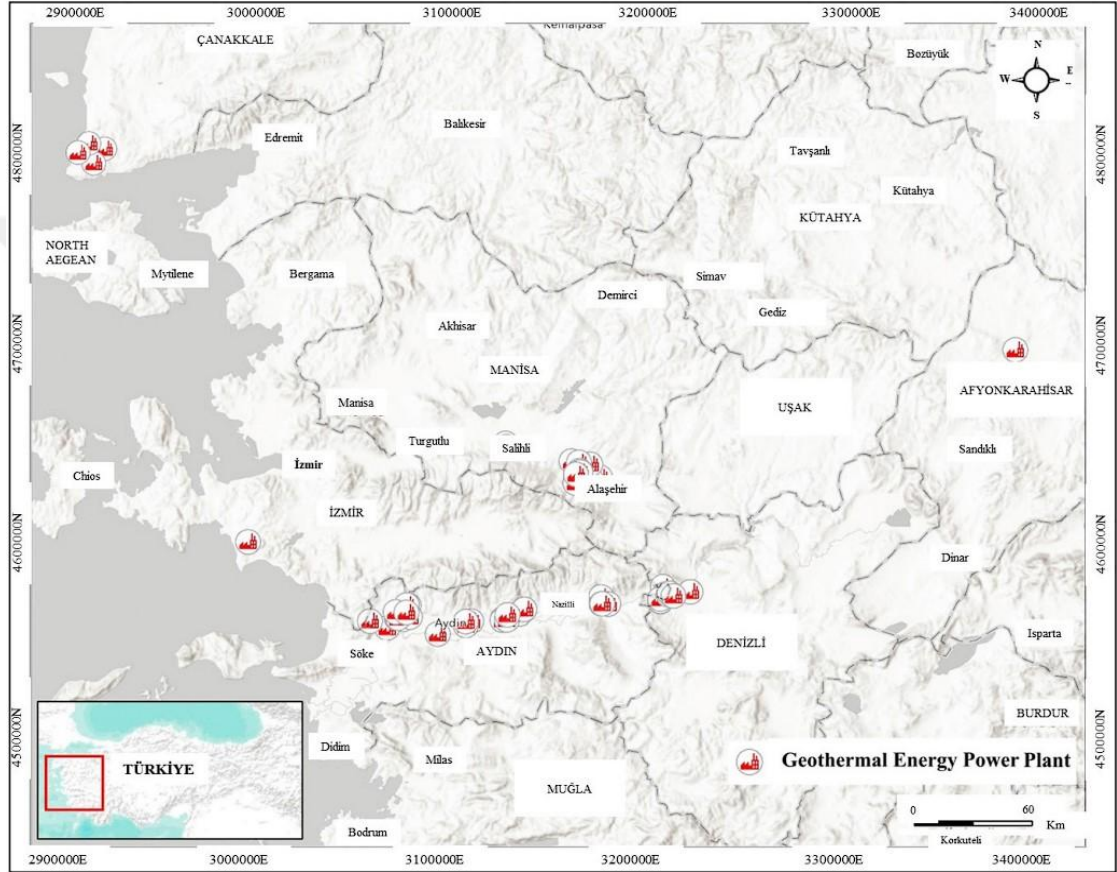


Şekil 1.1 Çalışma alanının yer bulduru haritası (Tonkul vd., 2021'den değiştirilerek)

1.3 Ekonomik Durum

Germencik ilçesi ve köylerinin geçim kaynağı tarımdır. Özellikle bölge ekonomisinde önemli yer tutan tarımsal aktivite ise incir ve zeytin yetiştiriciliğidir. Germencik ilçe ekonomisi bütünüyle tarıma bağlı olup, ova kesimde yapılan tarımın %50'sini incir ve zeytin alanları oluşturur. Bunlara ek olarak son zamanlarda gelişen sanayide önemli yer tutar. En önemli sanayi kuruluşları Çırçır fabrikaları ve incir

işleme tesisleridir. Bölge ekonomisi için diğer önemli sektörlerden biri ise jeotermal elektrik üretim tesisleridir. Germencik ilçesinde son 20 yılda yapılan jeotermal elektrik üretim santralleri ile enerji sisteme önemli katkısı bulunmaktadır. Bölgenin jeolojik yapısı dikkate alındığında, jeotermal enerji üretimine uygun yüksek entalpili sıcak su rezervuarları tespit edilmiştir. Yapılan 20'nin üzerinde jeotermal enerji üretim santralleri ile ülke ekonomisine önemli katkısı bulunmaktadır.



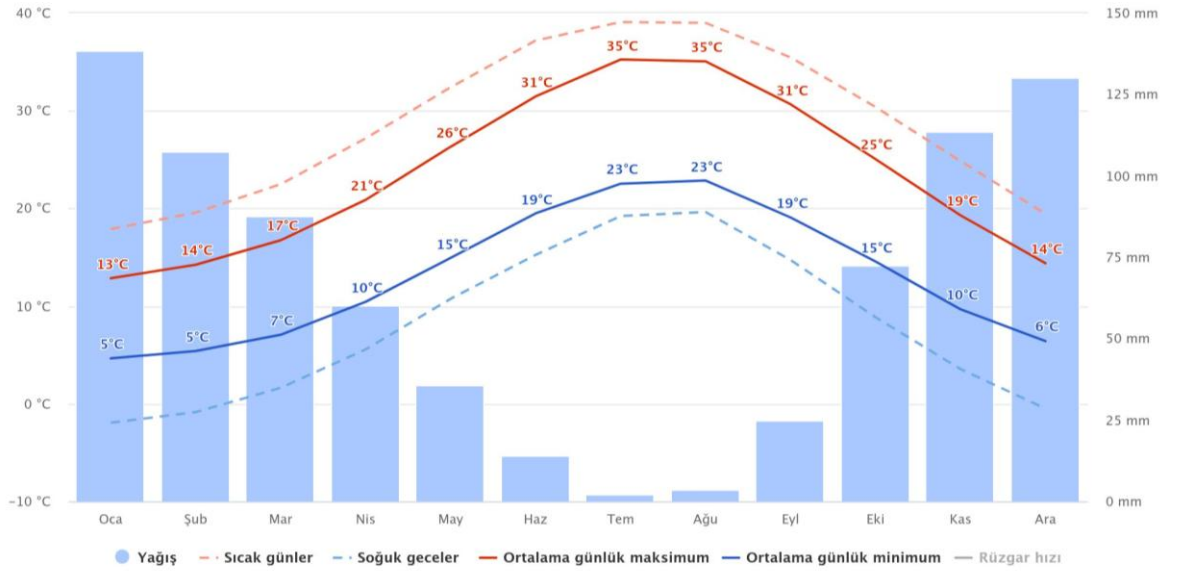
Şekil 1.2 Türkiye’de bulunan jeotermal enerji santrallerinin haritası (Şener vd., 2023)

Bölgede çok sayıda jeotermal santral bulunmakta olup, bu santrallerden üretilen elektrik, dağıtım sistemine katkıda bulunmaktadır. Jeotermal üretim ve re-enjeksiyon sondajları, santral ve dağıtım sistemleri başta olmak üzere bölgede yaşayan insanlar için önemli bir kazanç kapısını oluşturmaktadır. Jeotermal sistem ile tarım bölgede iç içedir. Belli mühendislik normları çerçevesinde yapıldığında her iki sektör de benzer

alanlarda faaliyet gösterebilmektedir. Bu nedenle Germencik bölgesi jeotermal ve tarımsal faaliyetler açısından önemli bir merkez konumundadır.

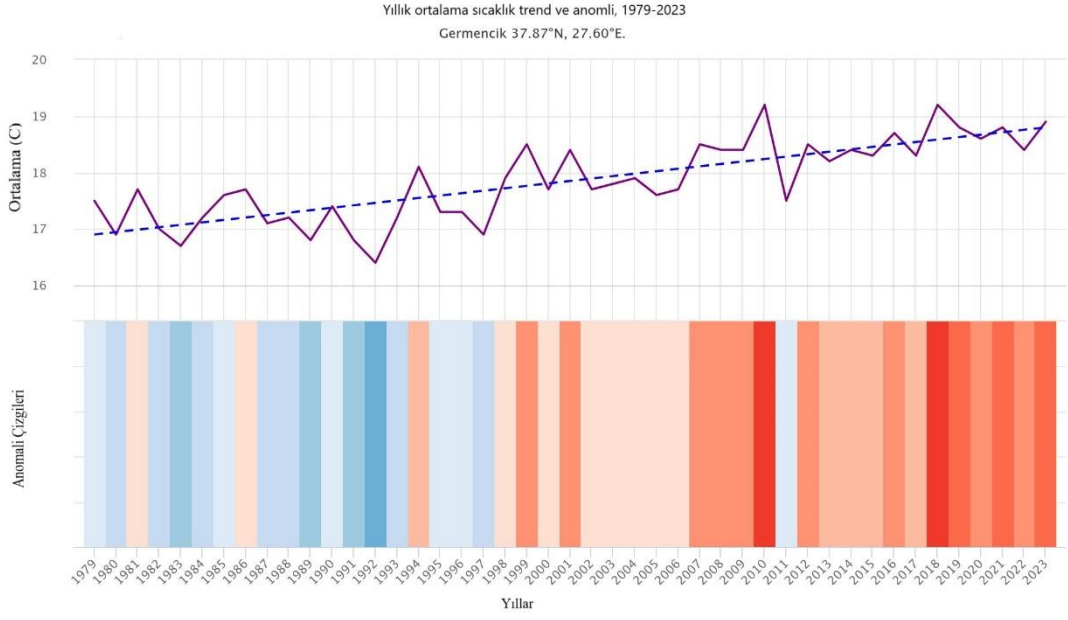
1.4 İklim ve Bitki Örtüsü

Germencik ilçesi tipik Akdeniz iklimi etkisi altındadır. Yazları sıcak, kışları yağışlı ve ılıman geçen bölgede en yüksek ortalama sıcaklık 18 °C ile Ağustos, en düşük sıcaklık ise 3 °C ile Ocak ayında gerçekleşmektedir (Şekil 1.2). Bölgede yağışlı dönemler Kasım ayı ile Nisan ayları arasındaki dönem, kurak dönemleri ise Mayıs ile Ekim ayları arasında gerçekleşir. Aylık yağışlar ise 3 mm ile 130 mm arasında değişmekte, en yüksek yağış Ekim ile Nisan ayları arasında, en düşük yağışlar ise Mayıs ile Eylül aylarında gerçekleşmektedir. Yıllık ortalama yağış miktarı ise 589.6 mm olarak gerçekleşmektedir.

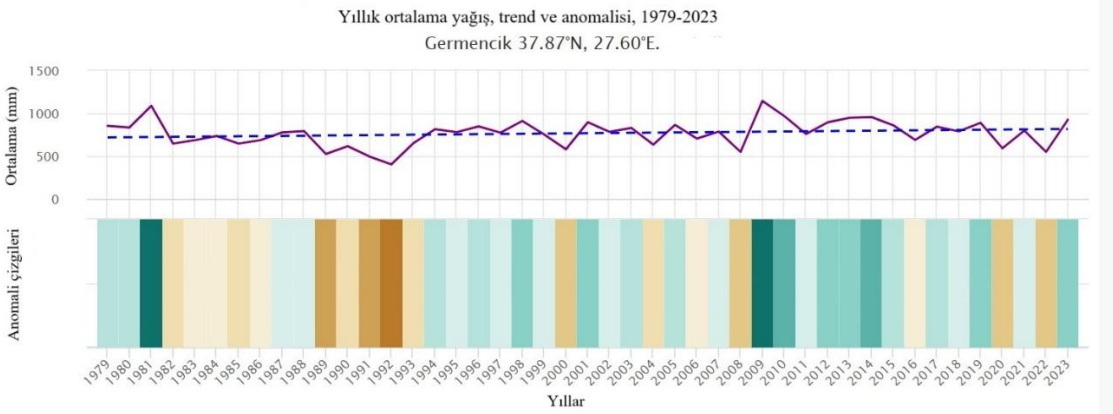


Şekil 1.3 Aylık ortalama sıcaklık ve yağış grafiği (<https://www.meteoblue.com>, 2024)

Bölgenin uzun dönem sıcaklık ve yağış eğilimine bakıldığında, son 44 yılın verilerine göre Germencik ilçesinin yıllık sıcak ortalaması 2 derece artmıştır (Şekil 1.3). Sıcaklık eğiliminin ise önümüzdeki dönemlerde artış göstereceği Şekil 1.3'deki grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 1.4 Yıllara göre ortalama sıcaklık grafiği (<https://www.meteoblue.com> 2024)



Şekil 1.5 Yıllara göre ortalama yağış grafiği (<https://www.meteoblue.com>, 2024)

Ortalama sıcaklıktaki artışın belirgin olmasına karşın, ortalama yıllık yağış miktarında sınırlı bir artış izlenmektedir (Şekil 1.4). Ortalama sıcaklığın artış göstermesine rağmen hemen hemen sabit kalan ortalama yağış miktarı yıl içerisinde belirli zamanlarda kuraklığa sebep olmakta ve bölgede iklim değişikliği etkisini göstermektedir.

1.5 Önceki Çalışmalar

Geçtiğimiz son 20-25 yılda Germencik bölgesinin jeotermal potansiyeli hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar hem yeraltı yapısını hem de jeotermal suyun kimyasını incelemek amacıyla taşımaktadır. Jeotermal suyun yeraltından başlayarak enerji santrali ve re-enjeksiyon sistemindeki etkileri araştırma konusu olmuştur. Jeotermal suyun kuyularda ve enerji santrali içinde oluşturduğu kabuklaşma ve bu kabuklaşmanın giderilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların en dikkat çekici olanı ve Aksoy (2007) tarafından yapılan çalışmada, ülkemizde bulunan bir jeotermal sahada iki yıl süren bir inhibitör çalışmasını içermektedir. Yapılan çalışma jeotermal kuyularda inhibitör kullanımının kuyularda ve enerji santrali içerisinde oluşacak kabuklaşma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda inhibitör kullanımının oluşacak kabuklaşmayı önlemek için en ekonomik ve en kolay yol olduğunu belirtmektedir.

Kılıçoğlu (2009) tarafından ise, jeotermal kuyularda oluşabilecek kalsiyum ve silisyum kabuklaşmalarına karşı kullanılacak inhibitör çeşitleri ve çalışma mekanizmaları hakkında bir çalışma yapılmıştır. Yaptığı çalışma neticesinde kalsiyum karbonat kabuklaşmalarını önlemede en etkili kimyasalın fosfonat bazlı inhibitörler ve asidik formda olan fosfonatlar olduğunu, polimer bazlı inhibitörlerin birden fazla kabuk tipinde etkili olduğunu belirtmektedir. Bu konuda Ar-Ge birimlerinin oluşturacağı inhibitör formülasyonunun sahadan alınan jeotermal suyun kimyasına göre oluşturulup, sahada dozaj optimizasyonu yapılarak en ekonomik ve en verimli şartlandırmanın yapılabileceğini belirtmektedir.

Bostanoğlu (1999) yaptığı çalışmada jeotermal sulardaki kabuk oluşumun önlenmesi ve kontrolüne değinmiştir. Kalsiyum karbonat kabuklaşmasının jeotermal akışkandaki CO₂'nin ayrışması sonucu oluşan pH artışı sebebiyle olduğunu ve kalsiyum karbonat kabuklaşmasının jeotermal suya asidik bir çözelti veya asit enjekte edilerek giderilebileceğini belirtmektedir. Silisyum kabuklaşmasını önlemek için ise jeotermal sudaki tuz konsantrasyonlarının, kimyasal enjekte edilerek jeotermal sudaki tuzların çözelti sınırlarının aşağısında tutularak önlenebileceğine değinmiştir.

Büyüksağış (2008) tarafından ise, Afyonkarahisar jeotermal ısıtma sisteminde oluşan kabuklaşma ve korozyon hakkında bir çalışma yapılmıştır. Yazar yaptığı

çalışmanın neticesinde, sistemde kabuklaşma ve korozyon olduğunu tespit etmiştir. Sistemde kullanılan kuyu suyuna Na_2CO_3 ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ilave edip kuyu suyunu yumuşatarak korozyonun önüne geçmeyi hedeflemiştir. Ayrıca jeotermal su kuyularında ve soğuk su kuyularında da jeokimyasal ve inhibitör testleri yapılması gerektiğini ve bu testler sonucu en verimli inhibitörün sistemde kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

Haklıdır (2012) jeotermal akışkan kaynaklı kabuklaşma oluşumu ve engellenmesinde kontrol parametrelerinin izlenmesinin önemi hakkında bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmaya göre sürekli inhibitör dozajının mekanik temizliğe göre daha pratik olduğunu, dozajlanacak inhibitörün seçiminde öncelikle jeotermal suyun kimyasal içeriğinin doğru şekilde belirlenmesi gerektiğini, belirlenen inhibitörün kuyu içinde korozyona sebep olmaması gerektiğini ve kuyuda doğru noktaya indirilip optimum değerde dozaj yapılması gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca dozajlanan inhibitör performansının kimyasal parametrelerle ve sistemde kabuklaşma oluşabilecek noktaların periyodik olarak takip edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Haklıdır ve Şengün (2016) yaptıkları çalışmada çoklu flaş ve geliştirilmiş jeotermal sistemlerde kabuklaşma önleyici kimyasalların performansının termodinamik etkilerini araştırmışlardır. Çoklu flaş enerji santrallerinde HPS, IPS, LPS gibi üç farklı tip separatör sistemi bulunduğunu, ayrışan buhar ve jeotermal suyun enerji üretim sürecinin başlangıcından re-enjeksiyon sürecine kadar yüksek basınç ve sıcaklık düşüşlerinin olduğu ve bu sıcaklık ve basınç düşüşlerinin kabuk oluşturmada etkin rol oynadığını belirtmektedirler. Kabuklaşma önleyici inhibitör kullanımının doğru şekilde yapıldığı takdirde (uygun dozaj sistemi, doğru dozaj noktası ve optimum dozaj miktarı) enerji santralının ve bu santralde kullanılan ekipmanların ömrünü uzatabileceğini belirtmektedirler. Geniş yelpazede bir kabuklaşma önleyici olan polimer tipi inhibitörlerin bazı durumlarda yeterli olmadığını, polimer ve fosfonat tipi karışım inhibitörlerin daha sağlıklı çalışacağını düşünmektedirler.

Işık vd. (2023) jeotermalde görülen kabuklaşmaya ilişkin yaptıkları çalışmada rezervuar kayasının kimyasından bağımsız olarak enerji santrallerinde bir miktar kabuklaşma olabileceğinin gözlemlemişlerdir. Türkiye'nin batısında bulunan jeotermal sistemler, özellikle kuzey-batı Ege bölgesinde çok mineralli, içindeki

çözünmüş katı madde oranı 5000 ppm miktarını aşan kireçlenmeye ve korozyona neden olabilecek jeotermal suların bulunduğunu belirtmişlerdir. Jeotermal suda bulunan mineral konsantrasyonu çokluğunun yanında enerji santrallerinin de tuzlu su ürettiği, bunun sonucu olarak da rezervuarın zamanla değiştiğine değinmişlerdir. Bu değişim sonucunda jeotermal suyu şartlandırmada kullanılan inhibitör, antiskalant ve diğer kimyasalların da zaman içerisinde yenilenmesi gerektiğini ve bu yönde çalışmaların sürdüğünü belirtmişlerdir.

Demir vd. (2014) tarafından yapılan bu çalışmada, Türkiye'nin kuzey-batısında bulunan çok yüksek tuzlu jeotermal sistemde oluşan kabuklaşma türlerini ele almışlardır. Yapılan çalışmada kuyu içinde ve yüzey boru hatlarında PbS ve CaCO₃ kabuklaşmaları görüldüğü buna karşılık olarak sülfür bazlı kabuklaşmaların sadece kuyu içinde oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri kabuklaşma numunelerinin analiz sonuçlarında, kabuklaşma içeriğinin saponit benzeri amorf yapı, katmanlı çift hidroksit ve NaCl olduğunu belirtmişlerdir. Bu kabuk oluşumlarını en aza indirmek için yeni yöntemlerin araştırıldığını ve inhibitör moleküllerinin geliştirilmesiyle ilgili çalışmaların devam ettiğini belirtmişlerdir.

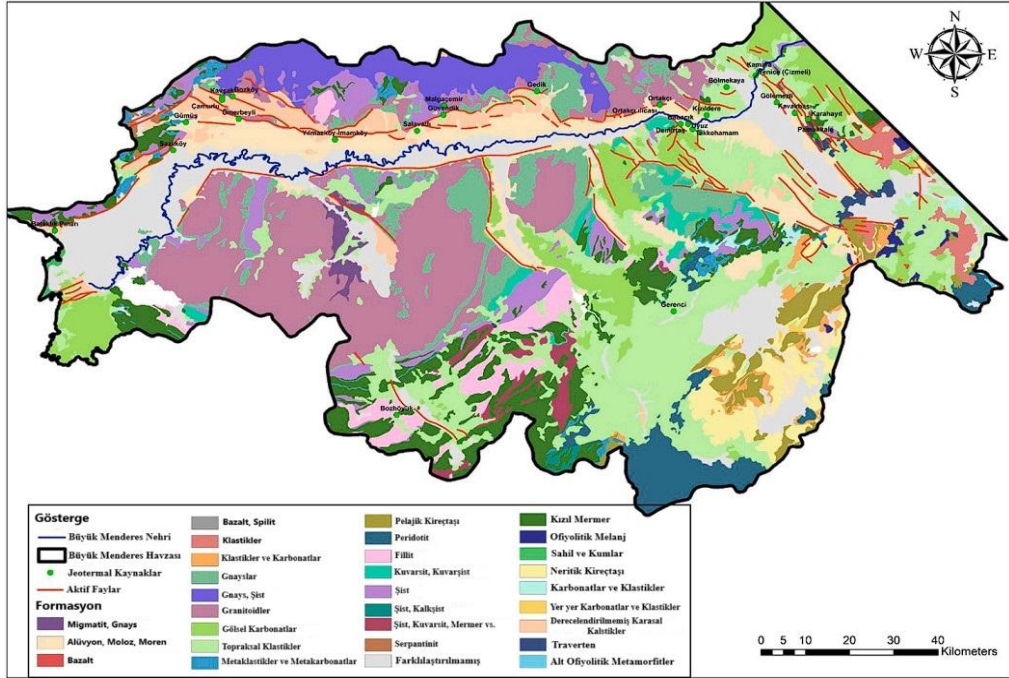
Yukarıda yapılan çalışmalar sonucuna göre, jeotermal elektrik üretim tesislerinde uygun inhibitörlerin kullanılması kuyu ve elektrik üretim sisteminin performansını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu yoldan hareketle, yapılan bu tez kapsamında, ülkemizin önemli jeotermal elektrik üretim santrallerinin bulunduğu Germencik jeotermal sahasında, kuyularda ve yer üstü üretim tesislerinde kabuklaşma türlerinin belirlenmesine dönük çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar ışığında inhibitör kullanılmasının avantajları değerlendirilmiştir.

BÖLÜM İKİ

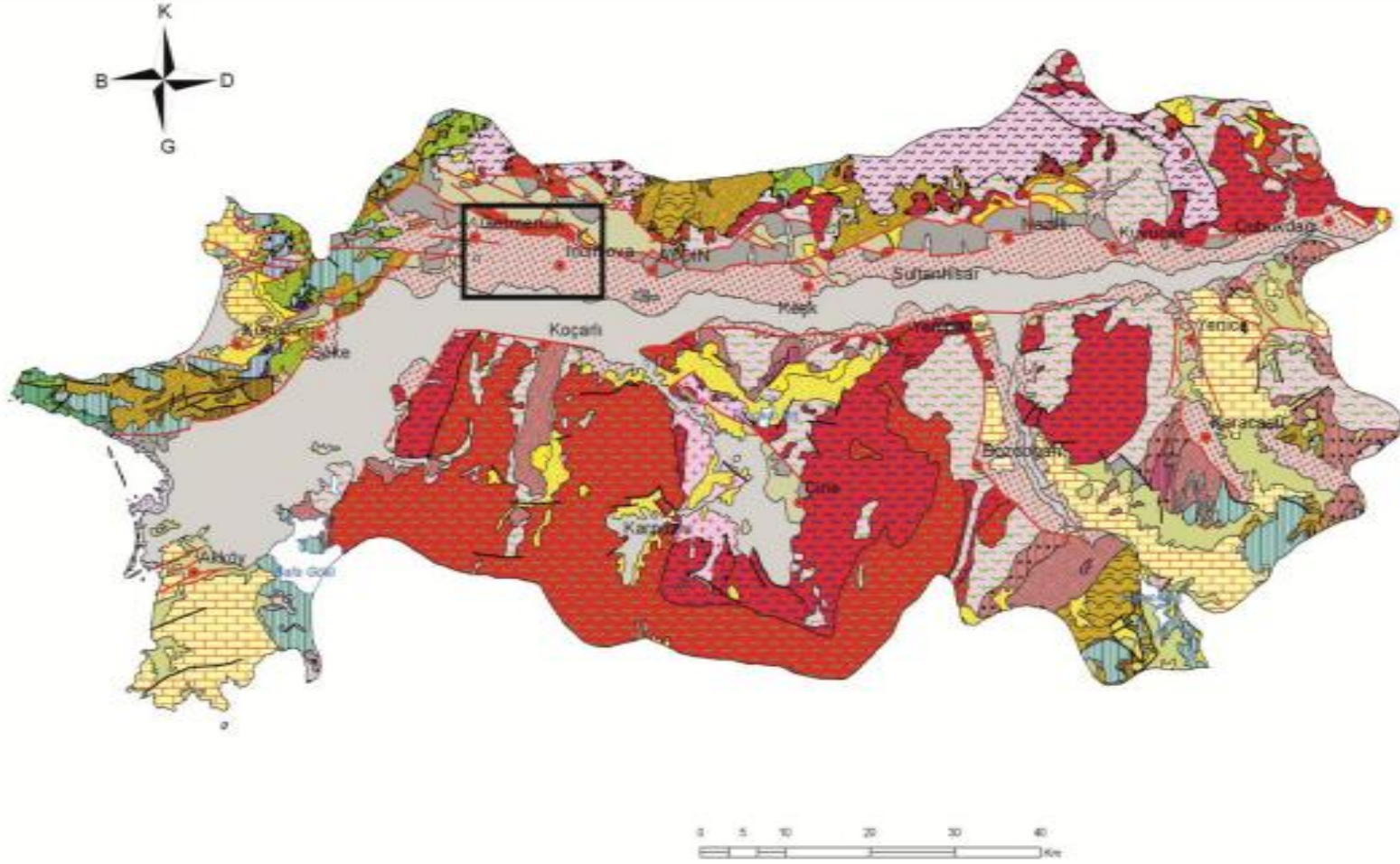
ÇALIŞMA SAHASININ JEOLojİSİ

2.1 Giriş

Büyük Menderes Grabeni, yaklaşık 160 km uzunluğunda ve ortalama 10 km genişliğinde bir çöküntü alanıdır. Batı Anadolu'daki en büyük doğu-batı yönlü grabenlerinden birini oluşturur (Şekil 2.1). Türkiye'nin batı kısmının çoğunu oluşturan Menderes Masifi metamorfik kayaları, graben sistemin temel kayasını oluşturur (Bozkurt, 2000). Menderes Masifi, Kuzey Menderes Masifi, Orta Menderes Masifi ve aktif Büyük Menderes çöküntüsünü içeren Güney Menderes Masifi olmak üzere üç alt masif olarak ayrılmıştır (Yılmaz vd., 2000; Bozkurt, 2001). Menderes Masifi üzerine Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı kırıntılı birimler uyumsuzlukla gelmektedir (Bozkurt ve Oberhänsli., 2001; Gürer vd., 2009). Ege Bölgesindeki graben yapıları ve Metamorfik temelin dağılımları Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1 Büyük Menderes Grabeninin harita üzerinde gösterimi (Yalcin vd., 2023' den değiştirilerek)



Şekil 2.2 Germencik Bölgesi ve Büyük Menderes Havzasının jeolojik haritası (Parkın, 2012)

SEDİMENTER KAYALAR / SEDIMENTARY ROCKS

KUATERNER QUATERNARY		Açınmazlıklar Unconsolidated
KUATERNER QUATERNARY		Akdeniz yelkenli, yamaç malozu, menden vb. Akdeniz fan shape oolite, menden etc.
KUATERNER QUATERNARY		Plaj ve kumal Beach and dune
PLEYİSTOSEN PLEISTOCENE		Açınmazlıklar Unconsolidated
PLİYOSEN-KUATERNER PLIOCENE-QUATERNARY		Açınmazlıklar Unconsolidated
PLİYOSEN PLIOCENE		Karasal karbonatlar Continental carbonate rocks
PLİYOSEN PLIOCENE		Açınmazlıklar Unconsolidated
ÜST MİYOSEN - PLİYOSEN UPPER MIOCENE - PLIOCENE		Karasal karbonatlar (yer yer kırıklılar) Continental carbonate rocks (occasional fractures)
ÜST MİYOSEN UPPER MIOCENE		Açınmazlıklar Unconsolidated
ORTA MİYOSEN MIDDLE MIOCENE		Açınmazlıklar Unconsolidated
ORTA - ÜST MİYOSEN MIDDLE - UPPER MIOCENE		Karasal karbonatlar Continental carbonate rocks
ALT - ORTA MİYOSEN LOWER - MIDDLE MIOCENE		Karasal karbonatlar Continental carbonate rocks
ALT MİYOSEN LOWER MIOCENE		Açınmazlıklar (yer yer denizal) Unconsolidated (occasional marine)
ÜST KRİTASE UPPER CRETACEOUS		Merik kıvrımları Meric folds
REŞİYEN - ALT ÜYAS RHACIYAN - LOWER LIAS		Karasal karbonatlar Continental carbonate rocks

VOLKANİK KAYALAR / VOLCANIC ROCKS

ÜST MİYOSEN UPPER MIOCENE		Buzul Glacial
------------------------------	--	------------------

PLUTONİK KAYALAR / PLUTONIC ROCKS

MİYOSEN MIOCENE		Granitoid Granitoid
TRİYAS TRIASSIC		Granitoid Granitoid
PALEOZOYİK VEYA PREKAMBİYEN PALEOZOIC AND/OR PRECAMBRIAN		Metagranit Metagranit
PREKAMBİYEN PRECAMBRIAN		Metagranit Metagranit

METAMORFİK KAYALAR / METAMORPHIC ROCKS

ÜST PALEOSEN - EÖSEN UPPER PALEOGENE - EOCENE		Metafilt / Metaflysch
ÜST KRİTASE UPPER CRETACEOUS		Metafilt / Metaflysch
ORTA JURA - KRİTASE MIDDLE JURASSIC - CRETACEOUS		Mermer / Marble
JURA - KRİTASE JURASSIC - CRETACEOUS		Mermer / Marble
ORTA TRİYAS - JURA MIDDLE TRIASSIC - JURASSIC		Mermer / Marble
TRİYAS - JURA TRIASSIC - JURASSIC		Silt, melankonglomera vb. Silt, melankonglomera etc.
ALT TRİYAS LOWER TRIASSIC		Kalkiyat, plit. Kalkiyat, plit.
PERMİYEN-KARBONİFER PERMIAN-CARBONIFEROUS		Silt, kavaşit, mermer vb. Silt, kavaşit, mermer etc.
ÜST PALEOZOYİK UPPER PALEOZOIC		Mermer / Marble

ÜST PALEOZOYİK UPPER PALEOZOIC		Filit, plit Filtite, schist
ÜST PALEOZOYİK UPPER PALEOZOIC		Şist Schist
ÜST PALEOZOYİK UPPER PALEOZOIC		Kuvarit, kuvarşist Quartzite, quartzschist
PALEOZOYİK PALEOZOIC		Mermer Marble
PALEOZOYİK PALEOZOIC		Kuvarit, kuvarşist Quartzite, quartzschist
PALEOZOYİK PALEOZOIC		Şist Schist
PREKAMBİYEN PRECAMBRIAN		Gneys Gneiss
PREKAMBİYEN PRECAMBRIAN		Gneys, plit Gneiss, schist
PREKAMBİYEN PRECAMBRIAN		Gneys, migmatit Gneiss, migmatite

OFİYOLİTİK KAYALAR / OPHIOLITIC ROCKS

MESOZOYİK MESOZOIC		Peridotit Peridotite
MESOZOYİK MESOZOIC		Serpantin (yer yer metasepantin) Serpentine (metasepentine nspace)

İŞARETLER / SYMBOLS

	Dokanak Contact
	Aktif fay Active fault
	Ters fay (Bindirme) Reverse fault
	Sürüklenme Overthrust
	Tanımlanmış fay Unroofed fault
	Yerleşim merkezi Urban center
	Çalışma alanı

Şekil 2.2'nin devamı

2.2 Stratigrafi

İnceleme alanının genel jeolojik haritası ve stratigrafik düşey kesiti Şekil 2.2 ve 2.3'de sunulmuştur. Büyük Menderes Havzasında bulunan Germencik jeotermal sahasının temelinde Paleozoyik yaşlı Menderes Masifi metamorfileri bulunur. Menderes Metamorfileri üzerinde Neojen ve Pliyosen yaşlı birimler uyumsuzlukla örter (Karahana, 2009; Parkın, 2012). En üstte ise Büyük Menderes Grabeni boyunca geniş yayılım gösteren Kuvaterner yaşlı birimler yer alır (Şekil 2.3). Aşağıda litolojik birimler ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

2.2.1. *Menderes Metamorfileri*

2.2.1.1. *Şistler ve Gnayslar*

Çalışma alanının temelini Paleozoyik yaşlı Menderes Metamorfileri oluşturur. (Erdoğan ve Güngör, 1992; Deniz, 2002). Metamorfik kayalar ağırlıkla şist, gnays, meta granitler ve üst kesimlerde mermerlerden oluşur. Şistler, genellikle kuvars şist, kalk şist, mika şistlerden oluşur ve ardalımalı bir yapı gösterir. Şistlerin üst kesimlerine doğru farklı tabaka kalınlıkları ile mermerler geçiş gösterir. Mermerler, genel görünüşleri itibari ile masif, kalın tabakalı, gri beyazımsı renkte olup, iri kristalli bir yapı sunar (Karahana, 2009). Çalışma alanının kuzeyinde yüksek kesimlerde yüzlek veren birim graben, alanın temelinde açılan sondajlarda kesilmektedir. Şekil 2.3'de metamorfik temel kayaların özellikleri sunulmuştur.

2.2.1.2. *Neojen Kırıntılı Seriler*

Çalışma alanının Menderes Masifi Metamorfileri üzerine açılmal uyumsuzlukla Neojen yaşlı birimleri gelmektedir (Karahana, 2009). Bilgiç (2015) tarafından Neojen Kırıntılı birimler gelir. Neojen birimleri alttan itibaren çakıltaşı-kumtaşı-kiltası ardalımasından oluşur. Üst kesimlere doğru killi kireçtaşları yer alır. Birim içerisinde yer alan linyitli zonlardan alınan fosillere göre Orta Miyosen yaşlı verilmiştir (Sözbilir ve Emre,1991). Orta Miyosen yaşlı kömürlü birimlerin üstünde Üst Miyosen yaşlı kırmızımsı renkli çakıltaşı kumtaşlarından oluşan çökeller Konaklı Formasyonu yer alır.

		SENOZOYİK					Ölçeksiz		
ÜST SİSTEM	SİSTEM	ALT SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİMGE	KALINLIK (m)	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	
PALEOZOYİK	KUVATERNER	Holosen	Aydın	Aydın	Qaly	150		Alüvyon-Alüvyon Yelpazesi, Traverten	
						150		Taraça	
						300		Gevşek tutturulmuş Çakıltaşı yer yer killi Örtü Kayaçlar	
		TERSİYER	NEOJEN	Pliyosen	Arzular	PI	450		Kumtaşı-Silttaşı Killaşı
				Üst Miyosen	Konaklı	ÜM	400		Kırmızı bordo renkli Çakıltaşı-Kumtaşı Killaşı
				Orta Miyosen	Hasköy	OM	200		Marn-Kumtaşı Kömür seviyeli Taban konglomerası
	Menderes Masifi	PzMrş	PzGny	250	1000	?		Allohton Gnays, Altere Kuvarsit bantlı Allohton Topluluk	
								Mermer-Şist-fillit ardanması Kuvarsit bantlı Çekirdek seri	
								Çeşitli şist(Mikaşist-kuvarsit-kloritşist) Gnays Örtü seri	

Şekil 2.3 Aydın ili genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti (Parkın, 2012)

Konaklı formasyonu kırmızımsı bordo, kahve renkli, gri renkli çakıltaşı, kumtaşı kıltaşı birimleri gelmiştir. Birim yer yer gevşek olmakla birlikte genelde sıkı tutturulmuştur. Birim içindeki çakıllar kuvars, şist ve gnays tanelerinden ibaret olup genelde iyi yer yer kötü boylanmalıdır. Kumtaşı ve kıltaşı seviyeleri gri yeşilimsi renkli olup ince şist ve kuvars tanelidir (Karahana,2009; Parkın, 2012, Bilgiç, 2015). Üst Miyosen yaşlı serilerin üzerine kırıntılı birimlerden oluşan Pliyosen yaşlı Arzular Formasyonu gelir (Şekil 2.3). Gri, yeşilimsi, kırmızımsı renkli olan birimde üst seviyelerde kıltaşı, yer yer çakıllı ve killi seviyeler görülürken alt kısımlara doğru kahverengimsi renkli kumtaşları hakimdir (Karahana, 2009; Parkın 2012, Bilgiç, 2015).

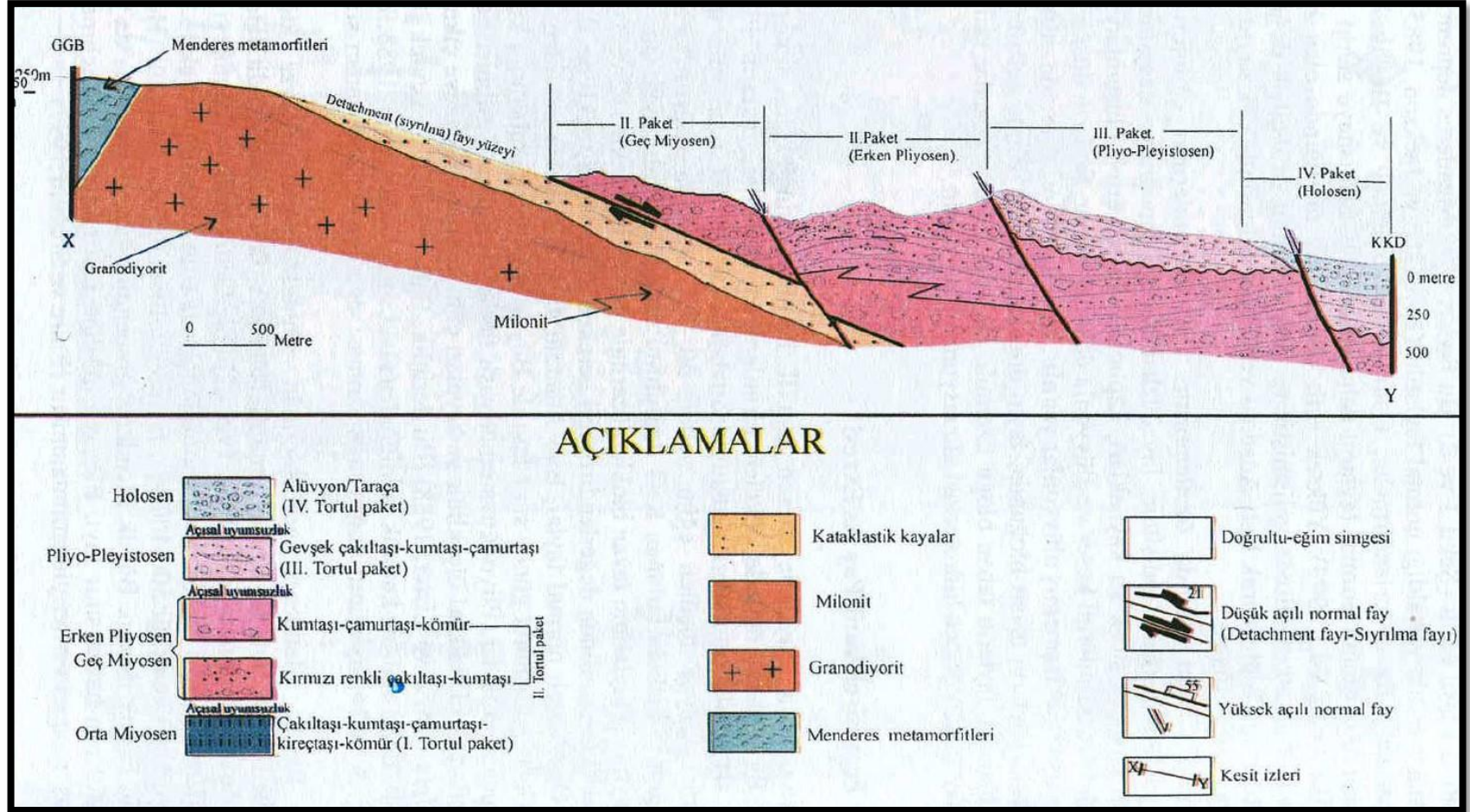
2.2.1.3. Kuvaterner Birimler

Bölgede Pliyosen yaşlı birimlerin üzerinde Pleistosen yaşlı Umurlu Formasyonu ile Holosen yaşlı, taraça, traverten, alüvyon yelpazesi birimleri yer alır (Karahana, 2009). Pleistosen yaşlı kırıntılı birimlerden oluşmuştur. Kırıntılı birimler kuvars, şist ve daha az miktarda gnays ve mermer çakılları içermektedir. Kahverengimsi, sarımsı, renkli olup kötü boylanmalıdır. Alt kısımlara doğru killi birimlere geçiş gösterirler. Birim genelde yatay ve yataya yakın tabakalıdır (Karahana,2009; Parkın, 2012, Bilgiç, 2015). Holosen birimler en genç birim olup alüvyon, alüvyon yelpazesi, yamaç molozu traverten ve taraçalardan meydana gelir. Taraçalar Aydın şehrinde net olarak görüldüğünden Aydın formasyonu olarak adlandırılmıştır (Karahana, 2009).

2.3. Yapısal Jeoloji

Aydın'ın doğusundan Denizli'ye doğru kuzey-güney ve doğu-batı fay grupları gelişmiştir. Kuzey-güney doğrultulu faylar Nazilli'nin kuzeyinde, Kuyucak'ın batısında ve Atça-Kılavuzlar arasında bulunmaktadır (Sözbilir, 2001). Yüzeyde görülen bu fayların uzunluklarının 3-5 km arasında değiştiğini, kuzey-güney faylarının sedimanter gruba ait çökellerin oluşumunu kontrol etmesinden dolayı Erken-Orta Miyosen dönemde oluştuklarını ifade etmiştir. İkinci grup fayların kabaca doğu-batı yönünde geliştiği ve Büyük Menderes grabeninde basamaklar halinde gelişen güneye eğimli normal bir fay olduğu söylenmektedir. Bu fayların oluşum dönemi geç

Miyosen' den başlayıp günümüze kadar devam etmektedir (Sözbilir, 2001). Büyük Menderes Grabeninin en güneyindeki fayın düşen bloğunda Holosen yaşlı alüvyonlar bulunduğundan, bu alüvyon tabaka ile dokanak yapan faylar bölgedeki en genç faylardır (Sözbilir, 2001). Şekil 2.4'de gösterildiği üzere, bu en genç faylar boyunca gelişen fay diklikleri, Kuyucak-Nazilli-Sultanhisar arasında kuzey-güney yönlü dereler ile kesilerek ilerlemiş ve Nazilli fayını oluşturmuştur. Nazilli fayı da boyu 10 kilometreyi aşmayan uzantı faylar şeklinde Aydın-İncirliova-Germencik güzergahı boyunca ilerlemiştir (Sözbilir, 2001). Hakyemez vd. (1999) yılında yaptıkları sedimantolojik çalışmalar sonucunda, Büyük Menderes grabeninin Holosen tabakasının kuzey kanadının güney kanadına göre daha çok geliştiğini, böylelikle grabenin kuzey kanadının tektonik olarak daha aktif olduğunu belirtmişlerdir. Bölgenin genel yapısal özellikleri Şekil 2.4'de sunulmuştur. Şekil 2.4'de görülen düşey fay sistemleri bölgedeki jeotermal sistemin çalışmasında en önemli yapısal unsurları oluşturmaktadır.



Şekil 2.4 Çalışma alanını ve çevresinin enine jeolojik kesiti (Sözbilir vd., 2001)

BÖLÜM ÜÇ

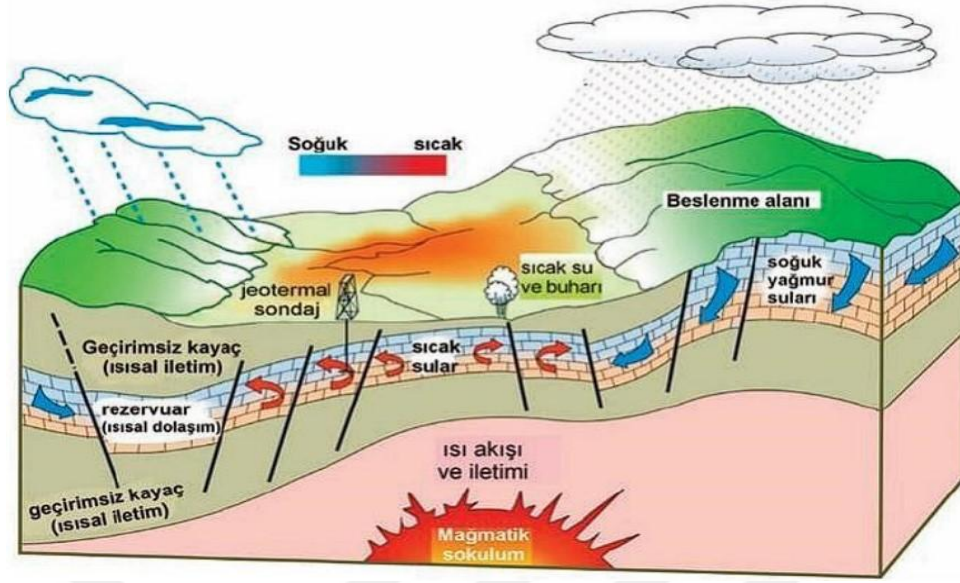
JEOTERMAL SİSTEM

3.1 Jeotermalin Tanımı

Jeotermal enerji yerin derinliklerinde gelen ısınmış ve yüksek entalpili akışkanlardan oluşan enerjidir. Jeotermal kaynaklar, Dünya yüzeyinin altında değişen sıcaklıklarda ve derinliklerde var olan sıcak su rezervuarlarıdır (JEDMSK, 2007). Derinliklerde yer alan jeotermal sular ya kendiliğinden ya da açılan derin sondajlar vasıtası ile üretilmektedir. Üretilen sıcak sular ise çok farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Başta, elektrik üretimi, doğrudan kullanım ve ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmaktadır.

3.2 Jeotermal Sistem

Jeotermal sistemlerin birkaç jeolojik ve mühendislik sınıflandırması vardır. Özellikle ülkemizde jeotermal sular için çıkartılan Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli sular Kanununa göre bir jeotermal sistem, “*Jeotermal alan oluşumunu sağlayan; beslenme alanı, akışkan, ısı kaynağı, rezervuar ve/veya zonu, örtü kaya ve boşalım alanının tümünü kapsayan, jeotermal kaynak ve/veya doğal mineralli suların çıktığı ve/veya üretildiği, kendine özgü jeolojik yapısı, hidrojeolojik ve kimyasal özellikleri olan sistemi*” olarak tanımlanır ((JEDMSK, 2007). Tanımlanan jeotermal sistem ise Şekil 3.1’de sunulmuştur. Belirtilen bu sistem bölgenin jeolojik ve yapısal özelliklerine göre değişkenlik sunmaktadır. Bu bağlamda kapsamlı çalışmalarla ortaya konulmasına gerek duyulmaktadır.

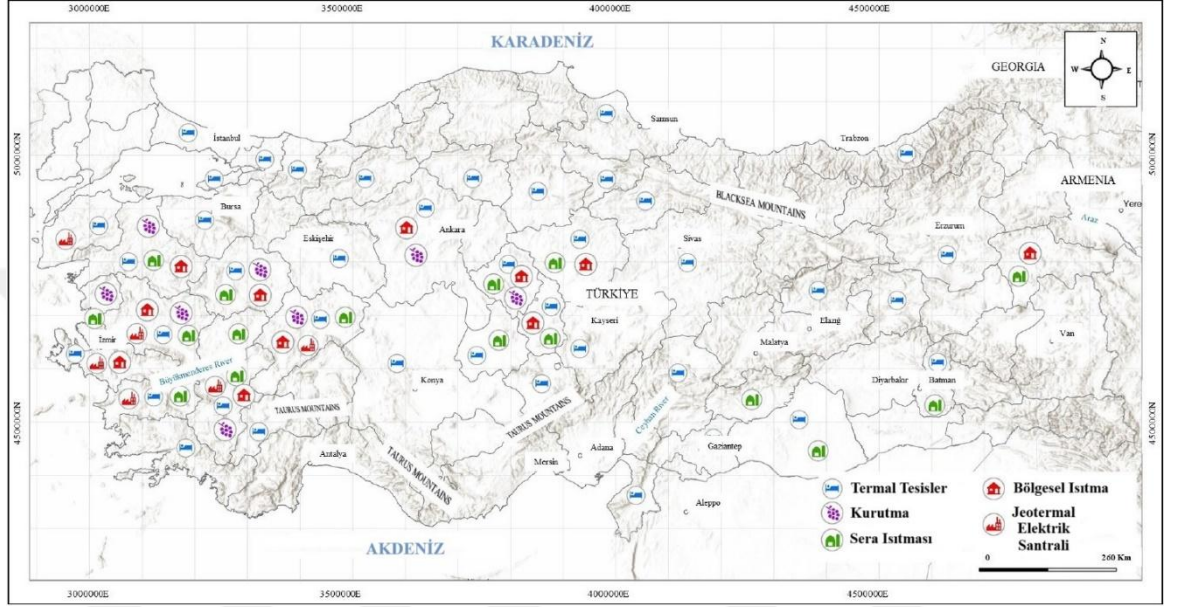


Şekil 3.1 İdeal jeotermal sistemin şematik sunumu (Kahraman, S. 2022)

3.3 Jeotermal Suların Kullanım Alanları

Türkiye jeolojik ve coğrafik konumu itibarı ile aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer aldığı için jeotermal açıdan dünya ülkeleri arasında zengin bir konumdadır. Ülkemizde bulunan jeotermal sahaların dağılımları ve kullanım alanları Şekil 3.2’de sunulmuştur. Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından Avrupa’nın birinci ülkesi ve kurulu güç bakımından ise dünyanın dördüncü ülkesi konumundadır. Jeotermal enerjiden elektrik üretiminde ilk beş ülke; ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda şeklindedir (Mertoğlu vd, 2000; Aghahoseini ve Breyer, 2020). Yapılan çalışmalarda, en önemli jeotermal sistemlerin Ege bölgesinde olduğunu göstermektedir (www.mta.gov.tr, 2022). Türkiye’de yapılan son çalışmalar ile sıcaklığı 30°C ve üzeri olan 415 jeotermal saha bulunmaktadır. Jeotermal sahaların sayısı hem doğal kaynakları hem de sondajlı kuyuları içermektedir. Doğal kaynak ve kuyu dibi sıcaklık dağılımlarına göre %84’ü orta ve düşük sıcaklıklı alanlardan, %16’sı ise yüksek sıcaklıklı alanlardan oluşmaktadır. Batı Anadolu neotektonik bölgesi jeotermal kaynakları ve çok sayıda sıcak su kaynağı ile ünlüdür. Manisa, Denizli, Aydın, İzmir ve Muğla çevresindeki jeotermal alanlar bu bölgedeki temel kaynakları oluşturur.

Jeotermal sular üretim sıcaklıklarına göre, termal turizm, elektrik üretimi, seracılık ve ısıtma maçlı kullanılmaktadır. Son yıllarda ise, özellikle ülkemizdeki elektrik ihtiyacının artması nedeni ile Ege bölgesinde sıcaklığı yüksek jeotermal sistemlerin araştırılması hız kazanmıştır. Jeotermal suların sıcaklıklarına bağlı kullanım alanları Tablo 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.2 Türkiye’de jeotermal enerji kaynaklarının doğrudan ve dolaylı kullanımı. (Şener vd., 2022)

Tablo 3.1. Jeotermal akışkanın sıcaklık değerlerine göre kullanım alanları (Rinehart, 1980, Öznen vd, 2018)

Sıcaklık (°C)	Kullanım Alanı
180 (°C)	Elektrik üretimi, yüksek konsantrasyonlu çözeltilerin buharlaştırılması, amonyak emilimi ile soğutma, kâğıt sanayi
170 (°C)	Elektrik üretimi, ağır su ve hidrojen sülfid prosesleri, diatomik malzeme kurutma
160 (°C)	Elektrik üretimi, kereste ve balık unu kurutulması
150 (°C)	Elektrik üretimi, Bayer yöntemi ile alüminyum eldesi
140 (°C)	Elektrik üretimi, çiftlik ürünlerinin yüksek oranda kurutulması
130 (°C)	Elektrik üretimi, şeker rafinasyonunda buharlaşma, buharlaşma ve kristalleşme ile tuzların ekstraksiyonu
120 (°C)	Distilasyon ile temiz su eldesi, tuz elde edilmesi, şeker sanayi, damıtma prosesleri
110 (°C)	Çok yönlü buharlaştırma, çimento kurutulması
100 (°C)	Organik malzemelerin kurutulması, yosunlar, otlar, sebzeler vb.
90 (°C)	Stok balıklarının kurutulması, yoğun buz çözme işlemleri
80 (°C)	Alan ısıtma (konut, sera vb.)

Tablo 3.1 (devamı)

70 (°C)	Soğutma (düşük sıcaklık limiti)
60 (°C)	Hayvancılık, alan ısıtma (kümes, ahır vb.)
50 (°C)	Mantar yetiştiriciliği, balneolojik banyolar
40 (°C)	Toprak ısıtma
30 (°C)	Yüzme havuzları, sıcak su, banyolar, fermantasyon işlemleri, buz çözücü
20 (°C)	Balık yetiştiriciliği

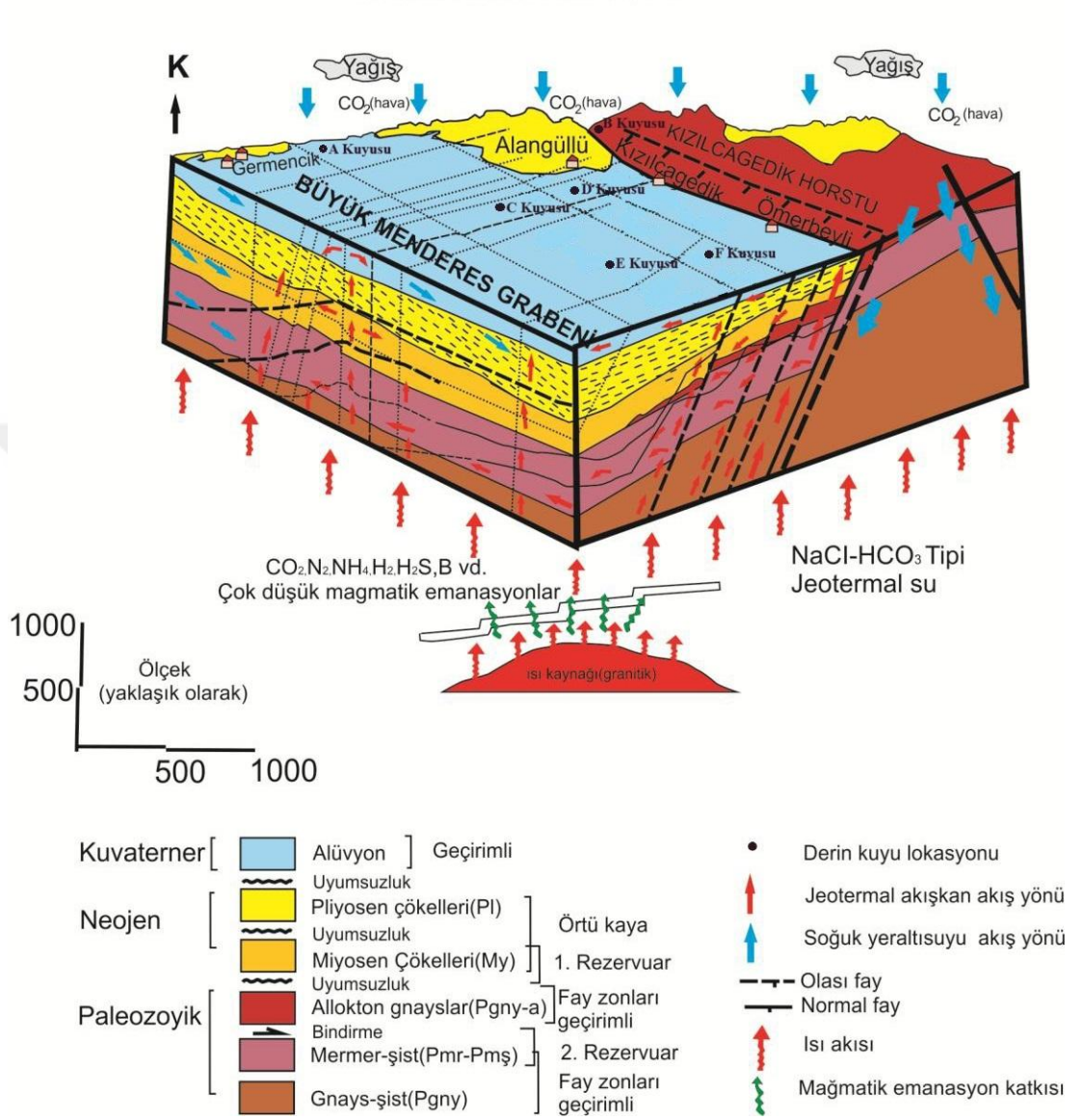
3.4. Çalışma Alanının Jeotermal Sistemi

Aydın-Germencik-İncirliova jeotermal alanı Menderes Grabeninin batı kesimlerinde yer almakta ve doğu-batı hattı boyunca uzanmaktadır. Bölgede, oluşan düşey fay sistemleri ve Menderes Masifinin genişleme tektoniği etkisi altında sürekli yükselmesi nedeniyle, doğu-batı grabenleri oluşmuş ve basamaklı bir fay sistemi gelişmiştir. Menderes Grabeninde kıtasal kabuğun incelmeye ve zayıf zonlar boyunca yükselmesi sonucu olarak yüzeye yakın magmatik aktivite, jeotermal sistemin ısı kaynağını oluşturmaktadır. Çok derin graben fayları üst litosferden ısı aktararak rezervuar kayalarını ısıtır. Menderes Masifinde gabro yığınlarının ve granitik pegmatit dayklarının varlığı, yüzeye yakın derinliklerde ısı kaybetmemiş asidik magmatik kayaların varlığına işaret etmektedir (Karahana, 2009).

Menderes Masifini oluşturan kırıklı kayalar ve karstik mermerler ile bazı bölgelerde Neojen yaşlı konglomeralar jeotermal sistemin rezervuarlarını oluşturur. Neojen kilitaşı ve çamurtaşı gibi geçirimsiz kayalar ise örtü kayalarıdır. Grabenin yapısına bağlı olarak yüzeye yakın alanlarda magmatik sokulumlar ısı kaynağı oluşturur.

Şekil 3.3'te daha önce yapılan çalışmalarda jeotermal sistemin kavramsal modeli oluşturulmuştur. Jeotermal rezervuar kayası olan Menderes Metamorfiteilerinin üzerinde kalın bir Neojen örtü kayası bulunmaktadır. Bu sistemi kesen faylar boyunca, meteorik sular yeraltına süzülürler. Süzülen meteorik sular graben tektoniğine bağlı olarak konveksiyon ısı akımları ile ısınıp tektonik boşluklar boyunca tekrar yükselerek yeryüzüne ulaşırlar (Yurttaş, 2008). Yapılan modelde görüleceği üzere, çalışma alanındaki jeotermal sistem Ege Bölgesindeki jeotermal sistemlerin tipik yapısını yansıtmaktadır. Graben alanına açılan jeotermal kuyular derinlerde düşey fay

sistemlerini kesecek şekilde planlanmakta ve buradan jeotermal akışkanın üretimi yapılmaktadır.



Şekil 3.3 Çalışma alanının jeotermal modeli (Parkın, 2012'den değiştirilerek)

BÖLÜM DÖRT

JEOTERMAL SİSTEMLERDE KABUKLAŞMA TÜRLERİ

4.1 Giriş

Jeotermal akışkanın dolaşım hatlarındaki mineral birikimi jeotermal enerji santralının herhangi bir noktasında meydana gelebilir. Jeotermal suyun yüzeye ulaşana kadar izlediği yoldaki sıcaklık değişimleri minerali aşırı doygunluğuna ulaştırabilir ve bu da kabuklaşmaya neden olabilir. Basıncıdaki bir azalma sıvıda çözülmüş gazların salınmasına neden olabilir ve bu jeotermal sudaki bileşen konsantrasyonlarının ve pH'ının değişmesine neden olur ve kabuklaşmaya yol açabilir. Jeotermal su boru hatları boyunca enerji santralının farklı kısımlarına hareket ettiğinde, mineral çökeltme reaksiyonları meydana gelebilir ve bu boru hatları boyunca kabuklaşma oluşabilir (Tassew, 2001).

Kabuklaşma, jeotermal üretimi yapılan kuyularda, boru hatlarında ve enerji santralinde kullanılan ekipmanlarda kapasite kaybına yol açar ve bu da jeotermal santralin verimliliğini azaltmaktadır (Phillips vd., 1979). Ayrıca, kabuklaşma tüm enerji santralini kapsayacak kadar büyük ise, enerji santralini tekrar tam kapasiteyle çalışır duruma getirmek için hatları ve ekipmanları temizlemek amacıyla önemli bir çalışma gerekebilir. Bu durum santralin bakım maliyetlerini artırır ve santral kapasitesini azaltır (Villaseñor ve Calibugan, 2011).

Kabuklaşma, belirli mineraller (örneğin kalsit) açısından aşırı doymuş sıvıları tutan büyük hacimli tankların (ısı eşanjörleri, akümülatör, separatör vb.) içinde de meydana gelebilir. Jeotermal ayırıcılar ve ısı eşanjörleri, normalde tuttıkları büyük hacimli sıvılar nedeniyle bir miktar kabuklaşmaya sahip olması beklenmektedir. Burada kabuklaşmanın oluşması için daha uzun süre kalması gerekmektedir. Türbinler de ise buhar ile tuzlu su taşınımı meydana geldiğinden kabuklaşma meydana gelebilir. İkili enerji santrallerinde ve doğrudan kullanım uygulamalarında, mineral kabuklaşması genellikle ısı değiştiricisinde önemli bir sorun haline gelebilmektedir. Isı değiştirici ve boru hatlarındaki kabuklaşma genellikle boruların uzunluğu boyunca sıcaklıktaki önemli düşüş nedeniyle meydana gelir. Bu kabuklaşma boru hatlarının iç

yüzeylerinde veya ısı değiştiricilerin serpantinlerinde termal direncini artırır ve mevcut çapını azaltır. Bu ap dūřümü enerji verimini dūřürmektedir (Zarrouk vd., 2014). Germencik bölgesindeki jeotermal enerji santrallerinde meydana gelen ısı eşanjöründe kalsit ve silisyum kabuklaşmaları Őekil 4.1 ve Őekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.1 ift çevrimli jeotermal enerji santrali yüksek basınç ısı eşanjörü kalsiyum kabuklaşması



Őekil 4.2 ift çevrimli jeotermal enerji santrali dūřük basınç ısı eřanjörü silisyum kabuklařması

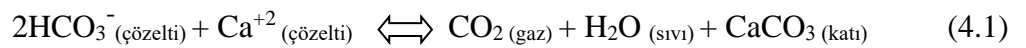
Şekil 4.3’de ise jeotermal enerji santralinde boru hatları içerisinde kalsit ve silisyum kabuklaşmasına ait örnek sunulmaktadır. Sistem içerisinde meydana gelen bu kabuklaşmalar sistemin performansını önemli oranda etkilemektedir.



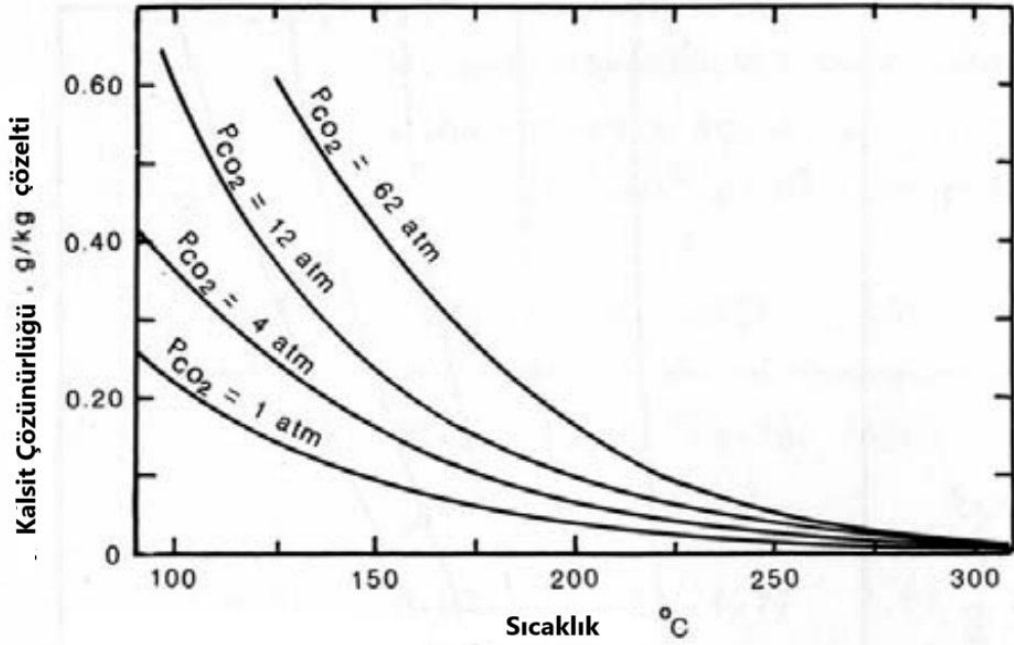
Şekil 4.3 Çift çevrimli jeotermal enerji santrali boru hattında oluşan kalsiyum ve silisyum yapıları kabuklaşma

4.2 Kalsiyum Karbonat Kabuklaşması

Kalsit veya aragonit (CaCO_3) kabuklaşması, yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde sık rastlanan kabuklaşma türüdür. Kalsit kabuklaşması, kalsiyum çözünürlüğünün azalması nedeniyle üretim kuyularında buharlaşma noktasının yakınında oluşur. CO_2 kısmi basıncı düşerken CO_2 buhar fazına geçer ve jeotermal suyun pH’ı artar. Jeotermal su kalsiyum bakımından doymuş hale gelir ve kalsit minerali kabuklaşmaya başlar. Bahsedilen kabuklaşmanın kimyasal reaksiyonu aşağıdaki gibidir (Tassew, 2001).



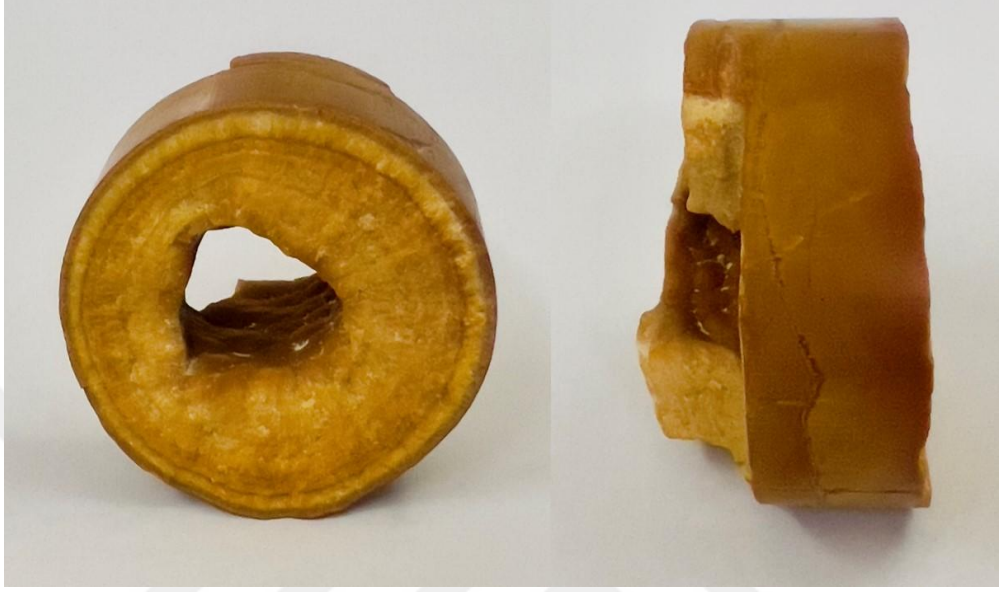
Kalsiyum çözünürlüğü CO_2 (P_{CO_2}) basıncı ve sıvının sıcaklığı ile değişir. Şekil 4.4, Fournier (1985) tarafından P_{CO_2} ve sıcaklık fonksiyonu olarak kalsiyum çözünürlük eğrisini göstermektedir. Bu eğriden, aynı sıcaklık koşulu altında kalsit çözünürlüğünün P_{CO_2} artışına göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Ngothai vd., 2010)



Şekil 4.4 Kalsit çözünürlüğünün CO_2 sıcaklığına ve basıncına bağlı değişimi (Ngothai vd, 2010).

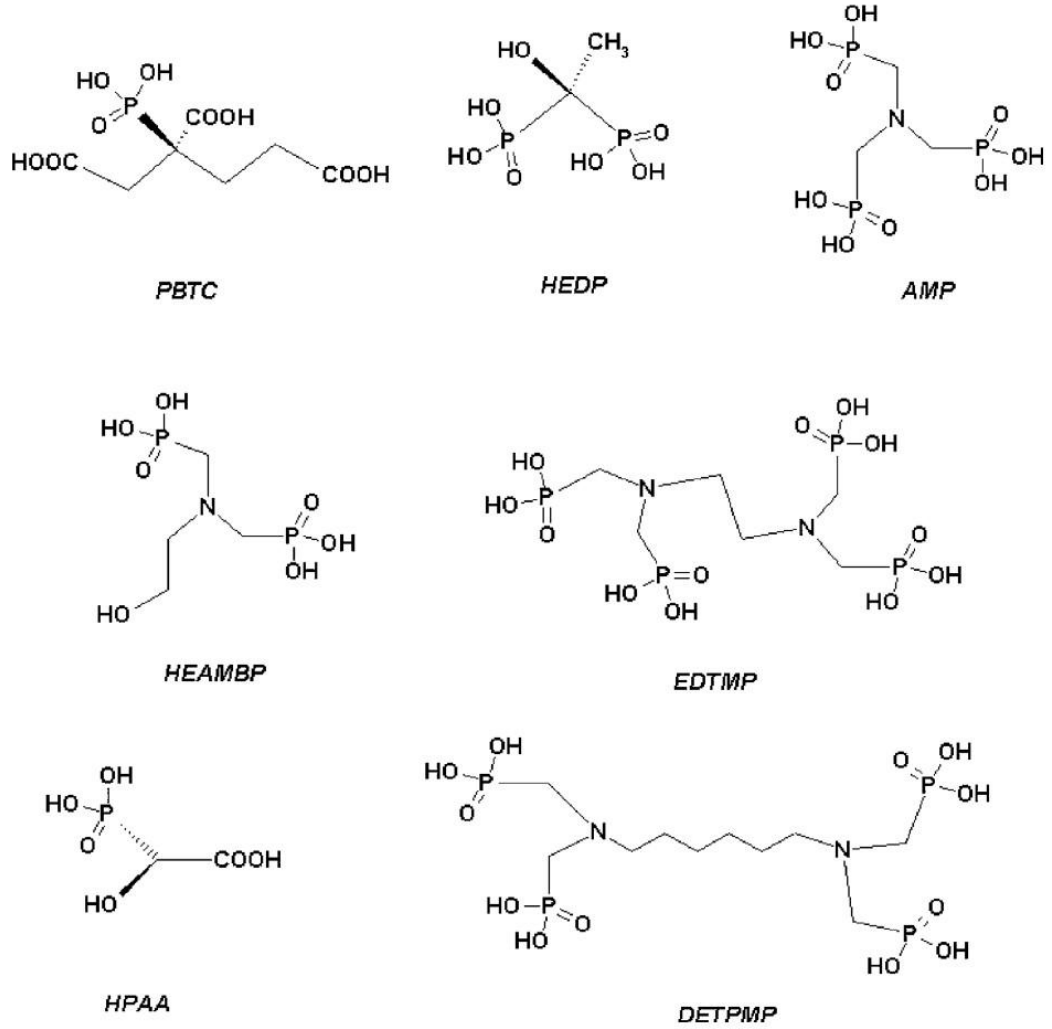
Bu durum buharlaşma noktasında kireçlenmenin yaygın olarak gözlemlenmesinin nedenini açıklamaktadır. Buhar salınımının meydana geldiği buharlaşma sırasında P_{CO_2} 'nin azalmasına neden olur, bu nedenle kalsit çözünürlüğü düşer ve kalsit orada kabuklaşmaya başlar. Yüksek kalsiyum veya hidrokarbonat konsantrasyonuna sahip birçok jeotermal sahada kalsit kabuklaşması sorunları yaşanır. (Ngothai vd., 2010). Türkiye'de, özellikle Büyük Menderes ve Gediz Havzalarında bulunan jeotermal sahalarda kalsit kabuklaşması önemli bir sorundur. Çalışma alanında jeotermal enerji santralinde boru hattından alınan kalsit kabuklaşma örneği

Şekil 4.5’de sunulmuştur. Kalsit kabuklaşması boru hatlarını tamamen tıkadığından jeotermal akışkanın dolaşımını önemli ölçüde engellemektedir.



Şekil 4.5 Aydın ili Germencik ilçesinde bulunan bir termal işletmenin boru hattından alınan kalsit kabuklaşma örneği.

Kalsiyum kabuklaşmalarını önlemek için kullanılan en yaygın yöntem fosfonik asit ve fosfonat bazlı inhibitörlerdir. Fosfonatlar çalışma prensibi gereği kalsit kristallerinin yapılarına nüfuz ederek yapıyı bozar ve sert kabuk oluşmasını engeller. Yapılan son araştırmalarda üretilen inhibitörlerin temel hammadde olarak kullandığı fosfotalar aşasındaki şekilde gösterilmiştir (Kılıçcıoğlu, 2009).

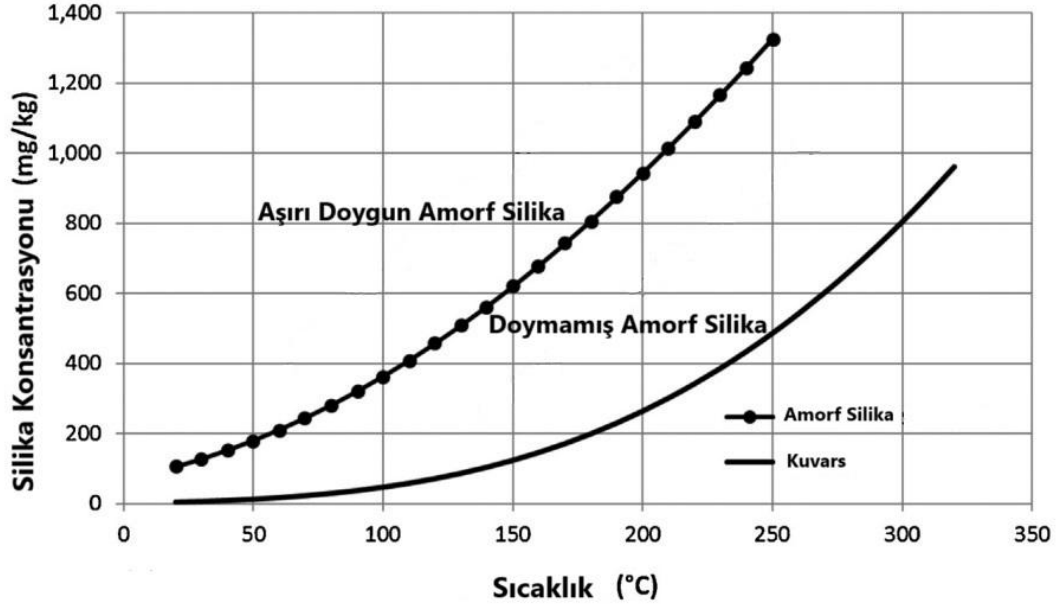


Şekil 4.6 Bazı Fosfonik Asit Bazlı Kabuklaşma İnhibitörlerinin Şematik Görünümleri (Amjad vd., 1994)

4.3 Silisyum Kabuklaşması

Jeotermal sistemlerin verimini etkileyen önemli diğer etkenlerden biri ise çevrimdeki jeotermal sudaki amorf silikanın çökerek kabuklaşmasıdır (Gunnarsson vd., 2005). Silisyum kabuklaşması, enerji üretiminin verimliliğini ve re-enjeksiyon kuyularının ömrünü ciddi şekilde kısaltır. Re-enjeksiyon kuyularının daralması ve boru hatlarındaki tıkanıklıklar gibi çeşitli operasyonel sorunların en temel sebebi silisyum kabuklaşmasıdır. Silisyum kabuklaşma potansiyeli, amorf silikanın çözünürlüğüne, sıcaklığa, pH'a, diğer mineral ve etkisine bağlıdır (Chan, 1989).

Birçok gelişmiş jeotermal sahada, orta ve yüksek sıcaklıklı yeraltı suları genel olarak amorf silikaya göre yetersiz şekilde doygunudur. Ancak, jeotermal su elektrik üretimi için çıkarılıp soğutulduğunda, amorf silikanın çözünürlüğü azalır, böylece jeotermal su aşırı doymuş hale gelir ve silisyum kabuklaşması oluşur.



Şekil 4.7 Kuvars ve amorf silika çözünürlüğünün sıcaklığa bağlı değişimi (Zarrouk vd.,den değiştirilerek 2014)

Gunnarsson vd. (2005) yaptıkları çalışmada, amorf silikanın aşırı doymuş çözeltilerde iki şekilde kabuklaştığını belirtmişlerdir. İlk olarak, monomerik silikanın doğrudan yüzeylere çökmesidir. İkincisi, silikanın polimerize olma ve uzun süreler boyunca süspansiyonda kalan kolloidler oluşturma eğilimidir. Polimerik silikanın çözeltilerden çökme olasılığı monomerik silikadan daha düşüktür. Silikanın jeotermal suda çözünerek monosilik asit (monomerik silika) oluşturması aşağıdaki kimyasal reaksiyona göre gerçekleşir.



Jeotermal sistemlerin çoğunda karbondioksit, CO₂ (sıvı) ve HCO₃⁻ formlarında bulunur. Çözünmüş CO₂ jeotermal sıcak su rezervlerinde mevcuttur. Jeotermal akışkanın sıcaklığı, kuyudan yüzeye doğru hareket ederken azalır ve basınç azalması nedeniyle CO₂ buhar fazına geçer. Jeotermal akışkandaki CO₂ miktarı azaldığında, su asitliğini kaybeder, silikatın çözünürlüğü azalır ve akışkan aşırı doymuş hale gelir. Buhar ayrıldığında, tuzlu suyun sıcaklığı düşer ve daha da doymuş hale gelir. Bu durumda, zaten kararsız olan silika içeriği daha da kararsız hale gelir (Demadis, 2010; Işık vd., 2023).

Sistemden CO₂ uzaklaştırıldıktan sonra sistemin pH'ı yükselir ve jeotermal sudaki temel iyonlar (Fe²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ gibi) hidroksit formunda çöker. Dahası, artan pH ve Fe²⁺, Fe³⁺ ve Al³⁺ iyonlarının varlığı silika polimerizasyonunu tetikler ve metal hidroksitler, çözülmesi çok zor olan metal silikat bileşikleri oluşturmak için silika polimerleriyle etkileşime girer. Bu bileşikler, amorf formda çeşitli oligomerik yapılardan oluşur ve kolloidal silika ile benzerliklere sahiptir (Gallup vd., 2003; Işık vd., 2023). Silisyum ve metal silikat kabuklaşmaları, üstesinden gelinebilecek en zor kabuklaşma sorunudur ve diğer kabuk türlerine göre karmaşıktır. Bunun nedeni, silisyum kabuklaşmasının birçok kimyasala karşı inert olması ve mekanik temizlemeye dirençli olmasıdır. Aşağıdaki Şekil 4.7'de, Germencik bölgesinde işletilen bir enerji santrali yüzey boru hattından alınan kabuklaşma numunesi gösterilmiştir. Kabuk yüksek miktarda silika, metal silikat ve az miktarda da kalsiyum kabuklaşması ihtiva etmektedir.



Şekil 4.8 Germencik bölgesinde enerji santrali yüzey boru hattından alınan kabuk numunesi.

Silisyum kabuklaşması genelde yüzey boru hatlarında, re-enjeksiyon kuyularında ve ısı değiştiricilerde yaygın olarak gözlenir. Enerji santralinde en büyük verim kaybı ısı değiştiricilerde oluşan silisyum kabuklaşmasından kaynaklanmaktadır. Isı değiştiricilerdeki silisyum kabuklaşmasının temizlemenin en yaygın yolu su jeti ile temizlemektir. Isı değiştiriciler normalde 41–83 MPa basınçlarda su jeti ile temizlenir (Gawlik vd., 2000). Burada yüksek basınçlı su, ısı değiştiricinin boru yüzeyinde biriken kabuklaşmayı temizler. Bazı metal silikat kabuklaşmalarının yoğun olduğu durumlarda su jeti basıncı 83 MPa üzerine çıkarılabilir. Bu gibi durumlarda ısı değiştirici içindeki tüplerde hasar meydana gelebilir. Isı değiştirici içindeki tüplerde hasarı en aza indirmek için su jeti basıncının 125 MPa ile sınırlandırılması gerekmektedir (İnanlı vd., 2011).

Dünya jeotermal endüstrisinde ısı değiştiriciler ve diğer ekipmanlarda kabuklaşmayı gidermek için en yaygın kullanılan su jeti ile temizleme yöntemidir. Ancak su jeti ile temizleme pahalı olmasının yanında enerji santralinde birkaç günlük duruşa sebep olduğu için üretim kayıplarını da beraberinde getirmektedir (Brown, 2011b). Gawlik ve Kelley (2000) tarafından yapılan çalışmada, enerji santrallerinin temel materyali olan karbon-çelik boruları aşındırıcı tuzlu sulardan korumak ve kabuk oluşumunu önlemek için jeotermal ısı eőanjörlerinde kullanılmak üzere formüle edilen polimer bazlı kaplama sistemleri kullanmayı denemişlerdir. Bahsedilen kaplamanın kullanılması ile ekipmanların su jeti ile temizliği oldukça kolaylaşmıştır. Ancak, kullanılan kaplamanın daha sonra tekrar edilebilecek olan su jeti temizliğine dayanacak yapıda olması gerektiğini yazarlar belirtmektedir (Gawlik vd., 2000).

Jeotermal sektöründe kabuklaşmayı temizlemek için kullanılan diğer yöntem ise kimyasal temizliktir. Çift çevrim enerji santrallerinde yüksek sıcaklıkta kostik soda (NaOH) sirkülasyonu, ısı eşanjörü ve yüzey boru hatlarında oluşan magnezyum-demir silikatlarını gidermede başarılıdır (İnanlı vd., 2011). %2-5 derişimli Hidroflorik (HF) asit çözeltisi silisyum kabuklaşmasını gidermek için etkili olabilmektedir. Ancak, Hidroflorik asidin metal silikat kabuklarını temizlemedeki düşük etkisi göz önüne alındığında farklı kombinasyonlar ile temizlik yapılması gerekmektedir.

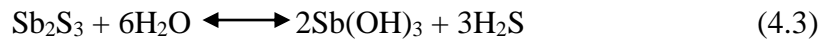
Filipinler'deki Mak-Ban (Bulalo) jeotermal sahasında, çift çevrim enerji santralindeki silisyum kabuklaşmasını önlemek veya en aza indirmek için jeotermal

suya kontrollü miktarda konsantre sülfürik (H₂SO₄) asit enjekte edilerek başarılı sonuçlar alındığı belirtilmiştir (Gallup, 2011). Benzer şekilde, Japonya'daki Hatchobaru'da, konsantre sülfürik asit doğrudan jeotermal suya enjekte edilmiş ve pH 5-6' da iken silisyum kabuklaşma oranının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

Yukarıdaki çözüm yöntemlerinin dışında silika inhibitörü kullanılarak kabuklaşmanın önüne geçilmesi günümüzde üzerinde en çok çalışılan konudur. Silika polimerizasyon hızını geciktirme ve polimerize silikayı dağıtma yeteneğine sahip olan, akrilik asit ve hidroksipolietoksi alilelerin bir kopolimeri olan kabuklaşma önleyicinin (GEO980) potansiyel kullanımını araştırılmış ve araştırma sonucunda ısı değiştiricilerde kabuklaşma ve re-enjeksiyon kuyularında tıkanma meydana gelmediğini belirtilmiştir (Gill, 2011). Ayrıca ülkemizde geliştirilen Geo-Treat 1221-1222-1223 silika inhibitörlerinin, silika ve metal silikat kabuklaşmalarında önleyici olarak kullanıldığı saha çalışmaları devam etmekte ve yararlı sonuçlar alındığı belirtilmektedir.

4.4 Stibnit (Antimon Trisülfür) Kabuklaşması

Antimon, kimyasal formülü Sb₂S₃ olan mineral formda stibnit olarak yeryüzünde bulunur. Dünya kabuğundaki antimon konsantrasyonu yaklaşık 0,2-0,3 ppm'dir. Kirlenmemiş doğal sularda çözülmüş antimon konsantrasyonları 1 µg/l' den azdır, ancak antropojenik kaynaklar nedeniyle konsantrasyonlar 100 katına kadar çıkabilir (Filella, 2001). Stibnit çözünürlüğü aşağıdaki kimyasal reaksiyon ile açıklanır.



Antimon hidroksit, serbest hidrojen iyonları ve H₂SbO₃⁻ anyonu oluşturmak üzere ayrışır. Bu ayrışmanın derecesi pH arttıkça artar, aynı şekilde stibnitin çözünürlüğü de artar (Brown, 2011). Yukarıdaki denge denklemi hidrojen sülfür konsantrasyonlarının artmasının, stibnit kabuklaşmasının miktarını da artırdığını ileri sürmektedir. Aşağıda Zotov ve diğerleri (2003) tarafından elde edilen verilerle oluşturulan ve stibnit

çözünürlüğünün sıcaklığa bağlılığını açıklayan çözünürlük denklemi bulunmaktadır (Wilson, 2007).

$$\text{Log K} = -7640.3/T + 7.213 \quad (4.4)$$

Dünyada ve Türkiye’ deki jeotermal sektöründe stibnit kabuklaşmasının yaygın olmamasının sebeplerinden biri çift çevrim enerji santrallerinin sayısının fazla olmamasıdır. Son yıllarda artan çift çevrim enerji santrallerinin sayısı ile birlikte stibnit kabuklaşmasının da en az silisyum ve kalsiyum kabuklaşmaları kadar verimi azaltan bir sorun olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi ise çift çevrim enerji santrallerinde jeotermal suyun ani bir şekilde sıcaklığı kaybetmesidir. Özetle stibnitin çözünürlüğü sıcaklık ve pH ile artarken, H₂S konsantrasyonunun artmasıyla azalır. Şekil 4.8’de Germencik ilçesinde bulunan özel bir jeotermal enerji santralinde kabuklaşan stibnit mineralinin görseli sunulmuştur.



Şekil 4.9 Germencik ilçesinde bulunan özel bir jeotermal enerji santralinin düşük basınç ısı eşanjöründe kabuklaşan stibnit minerali.

Stibnit kabuklaşmasını engellemek için uygulanacak yöntemlerden biri jeotermal su sıcaklığını stibnitin doygunluğa ulaştığı sıcaklığın üzerinde tutmaktır. Bu yöntem enerji santrali verimini düşüreceği için uygulanabilir bir yöntem değildir. Diğer bir yöntem ise düşük pH durumunu engellemektir. Jeotermal sudan ayrılan CO₂, pH’ın

düşmesine neden olur. Bu durum CO₂, diğer yoğuşmayan gazlardan temizlenip tekrar enerji santrali brine girişinden enjekte edilip pH yükseltilebilirse ısı değiştiricilerde stibnit oluşumun önüne geçilebilir. pH yükseltimi yüksek sıcaklıkta kostik soda (NaOH) enjekte edilerek de uygulanabilir (Brown, 2011).

Son yirmi yıldır yapılan araştırmalarda kalsit antiskalantı gibi bir antiskalant, stibnit için geliştirilememiştir. Fakat Aydın ili Germencik ilçesinde bulunan bir özel işletmede kullanılan Geo-Treat 2208 inhibitörünün stibnit kabuklaşmasını yavaşlattığı belirtilmiştir. Stibnit kabuklaşmasının temizliğinde en yaygın şekilde kullanılan yöntem ise mekanik temizliktir. “**4.3 Silisyum Kabuklaşması**” bölümünde de bahsedildiği gibi su jeti ile temizlik günümüzde en çok kullanılan yöntem olmakla birlikte enerji santrali verimliliği açısından dezavantajları bulunmaktadır. Su jeti uygulaması yaklaşık 3-4 gün sürmektedir ve enerji santrali durdurularak yapılır ve bu da üretim kaybına sebep olmaktadır.

BÖLÜM BEŞ

KABUKLAŞMA TÜRLERİNİN BELİRLENMESİ

5.1 Giriş

Germencik ilçesi doğu-batı yönünde uzanan Büyük Menderes grabeninin kuzey tarafında yer almaktadır. Bu alan hazne sıcaklığı bakımından Türkiye'deki en sıcak bölgelerinden birini oluşturur. Üzerinde çalışılacak su numuneleri, halen aktif olarak kullanılan, kuyubaşı sıcaklıkları 150-180 santigrat derece arasında değişen altı farklı derin jeotermal kuyulardan alınmıştır. Bu sıcak suların oluşum mekanizması jeotermal alanların çoğunda olduğu gibi meteorik suların derinlere süzülerek ısınması ve faylara bağlı olarak yüzeye ulaşması şeklindedir. Jeotermal sistemin birinci kısmını Neojen yaşlı çakıltaşları, kuvars-şist gibi kırıklı kayalar ile karstik mermerler ise ikinci kısmını oluşturmaktadır. Neojen yaşlı kiltası gibi geçirimsiz kayalar ise örtü kaya görevi yaparak jeotermal sisteme katkı sağlamaktadır. Jeotermal sistemin ısı kaynağı ise graben tektoniğine bağlı olarak yüzeye yaklaşmış magmatik kütleler olarak belirtilmektedir (Filiz vd., 1999). Bölgenin jeolojik özellikleri ve su kayaç etkileşimi jeotermal suyun kimyasını denetlemektedir. Bu nedenle çalışma alanında belirlenen farklı jeotermal santrallerden kabuk örnekleri alınarak analiz edilmiştir.

5.2 Materyal ve Metot

Bu saha çalışmasında kullanılan su örneklemeleri ve kabuklaşma örnekleri, Germencik ilçe sınırları içerisinde bulunan özel sektör firmalarının üretim kuyularından alınmıştır. Bu firmalara ait üretim kuyularının harita üzerinde gösterimi Şekil 5.1'de belirtilmiştir. Su örnekleri alınırken üretim kuyusu yüzey boru hattına jeotermal suyu soğutması amacıyla numune eşanjörü bağlanmış, jeotermal su numune eşanjörü içerisinde belirli bir süre akıtılmış ve numune alınmıştır. Alınan jeotermal su numunelerinin ihtiyaç duyulan kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla; pH ve iletkenlik ölçümü için "WTW pH/Cond 3320" cihazı, toplam sertliğin belirlenmesi için "BRAND Titrette" cihazı, silisyum ölçümü içinse "HACH LANGE DR 3900"

cihazı kullanılmıştır. Sonuçları teyit etmek için özel bir kimyasal firmanın ICP cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır.

Kabuklaşma örnekleri ise yine aynı bölgedeki jeotermal üretim ve yer üstü ekipmanlarından elde edilmiştir. Kabuk örnekleri kuyu içine inhibitör enjekte etmede kullanılan difüzör üzerinden, üretim kuyusu separatör öncesi ve sonrası yüzey boru hatlarından, enerji santrali giriş/çıkış filtre gruplarından, ısı eşanjörlerinden ve re-enjeksiyon kuyusu yüzey boru hatlarından alınmıştır. Kabuk örneklerinin ihtiva ettiği elementler “HITACHI X-MET 8000” XRF cihazı ile analiz edilmiştir.

İnhibitör performansını ve dozaj optimizasyonunu kontrol edebilmek amacıyla kuyu başı, separatör öncesi ve separatör sonrası kabuk kuponları takılmış, ayrıca santralde bulunan ısı değiştiricilerin fark basınçları sürekli takip edilmiştir.

İnhibitörü dozajlamak için çalışma yapılan özel firmaların kendi dozajlama sistemleri kullanılmıştır. Doğru dozajlama yapıp yapılmadığı hem sahada mezürle ölçme yöntemiyle hem de bilgisayar ortamında kayıt altına alınan trend verileri takip edilerek yapılmıştır.

5.3 Çalışma Sahasında Jeotermal Su ve Kabuklaşma Analizleri

Çalışma alanındaki sıcak sular jeotermal alanların çoğunda olduğu gibi meteorik suların derinlere süzülerek, ısınması ve genç faylara bağlı olarak yüzeye çıkan devirli sistem olarak tanımlanmaktadır. Yapılan izotop analizlerinde, bölgedeki sıcak suların yüksek entalpili, meteorik kökenli yaşlı sular olarak sınıflandırılmıştır (Filiz vd., 1999). Yazarlar, yaptıkları çalışmada, yeraltı suyu hareketi boyunca karışık su tipindeki soğuk sular jeotermal sistemlerde ısınıp, su-kayaç arasında gelişen çeşitli tepkimeler ile ilksel yapılarını yitirerek, Na-HCO₃-Cl karakterli su tipine dönüştüklerini belirtirler.

Tonkul vd., (2021) yaptıkları çalışmada Germencik jeotermal alanında bulunan kuyulardan aldıkları su örneklerinin kimyasal analizlerini yapmışlardır. Yapılan kimyasal analiz sonuçlarında bölgedeki jeotermal su tipinin Na-Cl-HCO₃ olduğunu belirtmişler ve bu jeotermal suların rezervuar kayaçları olan mermer, kuvarsit ve mikaşist birimlerinde yer aldıklarını vurgulamışlardır.

Tokcaer (2023) yaptığı çalışma sonucunda ise batı Anadolu'da, sıcaklıkları 150 derece ve üstünde olan jeotermal suların genellikle Na-HCO₃ ile Ca-Na-HCO₃ tipinde olduklarını belirtmiştir. Bu kimyasal su tiplerinin belirlenmesinde, genellikle en önemli faktörün rezervuar koşullarındaki su-kayaç etkileşimi olduğunu ve bu etkileşim sonrasında jeotermal suda bulunan iyonların değişim reaksiyonlarıyla su tipinin değişim gösterdiğini belirtmiştir.

Bu bilgiler ışığında, bölgedeki sıcak suların su kayaç etkileşimi yüksek olması dikkate alındığında içerdiği çözünmüş madde miktarının fazla olması kabuklaşma yapabilecek bir özelliğe sahip suları oluşturur. Bu yoldan hareketle, Germencik bölgesinde faaliyet gösteren enerji santrallerinde bulunan 6 farklı kuyudan jeotermal su ve üretim sistemlerinden kabuk örnekleri alınmıştır.

Çalışma alanında su ve kabuk örnekleri Germencik ilçesinde doğu-batı doğrultusunda bulunan üç farklı özel sektör jeotermal enerji firmasının işletme sistemlerinden alınmıştır. Bunlardan A ve B örneklemeleri ilçenin batısında bulunan enerji santralinden, C ve D örneklemeleri ilçenin merkezinde bulunan enerji santralinden, E ve F örneklemeleri ise ilçenin doğusunda bulunan enerji santralinden alınmıştır. Şekil 5.1'de gösterildiği üzere 6 kuyu noktasından sıcak su örneği, ayrıca bu kuyulardan ve yer üstü ekipmanlarından ise kabuk örnekleri alınmıştır. Firmaların isimlerinin gizli tutulması nedeni ile örnekleme noktalarına harfli isimlendirme verilmiştir. Alınan su örneklerinin kimyasal analizleri laboratuvarda yapıldıktan sonra, sonuçları kontrol etmek amacıyla özel bir firmaya gönderilip ICP analizleri de yapılmıştır.



Şekil 5.1 Su ve Kabuklaşma örneklerinin alındığı kuyuların konumları



Şekil 5.2 Laboratuvarında yapılan jeotermal su analizleri

Sahadan alınan jeotermal suların kimyasına dönük yapılan analiz sonuçları Tablo 5.1’de sunulmuştur. Yapılan analizlerde Ca^{++} ve SiO_2 konsantrasyonları diğer parametrelere göre oldukça yüksektir. Özellikle E santralinden alınan kuyudaki jeotermal suların içerisindeki Ca^{++} konsantrasyonu diğer kuyulara göre yüksek iken, SiO_2 konsantrasyonu kısmen daha düşüktür. E ve F kuyusunda klorür konsantrasyonu 376 ile 511 mg/l olarak belirlenmiştir. Bu değerler diğer örnekleme noktalarına göre daha düşüktür. Alınan örnekler kuyu başına yakın noktalardan alınmış olup, bu noktaya kadar olan süreçte kimyasal olarak kısmen değişiklik sunabilmektedir. Alınan örneklerin elektriksel iletkenlik değeri 5250 ile 7132 $\mu S/cm$ arasında değişmekte olup, tuzlu su özelliğindedir. Yüksek elektriksel iletkenlik değerleri, bölgedeki jeotermal suların su kayaç etkileşiminin uzun olması nedeni ile iyonca zengin olduğunu göstermektedir. İyon açısından zenginleşen sular ise işletim sırasında önemli oranda kabuklaşma sorunu yaratabilecek bir özellik kazanmaktadır.

Tablo 5.1 Jeotermal suların kimyasal analiz sonuçları

	A Kuyusu	B Kuyusu	C Kuyusu	D Kuyusu	E Kuyusu	F Kuyusu
Al (mg/l)	0,438	0,463	0,341	0,530	0,405	0,376
Ca⁺⁺ (mg/l)	3,075	4,107	2,174	3,308	10,386	2,121
Mg⁺⁺ (mg/l)	0,036	0,062	0,050	0,082	1,136	0,211
Cl⁻ (mg/l)	1476	1645	1856	1863	376	511
P (mg/l)	1,290	1,406	1,276	1,363	0,095	0,046
Ca (Sertlik)	7,569	9,813	5,438	8,227	25,764	5,292
Mg (Sertlik)	2,695	4,144	0,205	0,335	4,684	0,868
Ba (mg/l)	0,643	0,789	0,342	0,277	0,734	0,930
M Alkalite	2160	2203	980	995	3160	3195
Toplam Sertlik	10,264	13,957	5,643	8,562	30,448	6,160
Sr (mg/l)	0,226	0,234	0,507	0,516	Okunmadı	0,393
Mn (mg/l)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn (mg/l)	0,851	0,690	0,291	0,171	1,797	1,570
Cu (mg/l)	0,022	0,022	0,021	0,021	0,020	0,020
SiO₂ (mg/l)	301,563	334,937	279,512	305,066	164,204	169,709
Sb (mg/l)	0,965	1,283	0,898	0,728	0,116	0,450
pH	7,90	7,82	8,53	8,10	7,40	7,59
EC ($\mu S/cm$)	7132	6992	6840	6740	5250	5520

Sıcak sulardaki Mn konsantrasyonu analizi yapan ICP cihazının deteksiyon limitlerinin çok altında olduğundan okuma yapılamamıştır. Tablo 5.1’de sunulan jeotermal su kimyası sonuçlarına göre, jeotermal su işletmeye alınıp enerji üretimine başlandığında oluşmuş kalsiyum ve silisyum kabuklaşmalarının destekler niteliktedir. Üretim kuyularında oluşan buharlaşma ile jeotermal akışkandan ayrılan CO₂ kalsit kabuklaşmasına, işletmeye alınan jeotermal suyun sıcaklık düşümü de silisyum kabuklaşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Yukarıda belirtilen jeotermal su, kimyası belirlendikten sonra sahadan alınan kabuk örnekleri üzerinde yapılan analizler ile karşılaştırılmıştır. “Metot ve Yöntemler” başlığı altında açıklandığı şekilde, enerji santrali ve üretim kuyularından alınmış kabuklaşma numuneleri üzerinde XRF analizleri yapılmıştır (Şekil 5.3 ve 5.4).

Symbol	Ca / %	Sr / %	Si / %	Mg / %	S / %	Ba / %
Conc.	30,915	11,159	9,333	5,987	2,322	1,982
Symbol	Al / %	Fe / %	Sb / %	K / %		
Conc.	1,156	1,087	0,336	0,214		



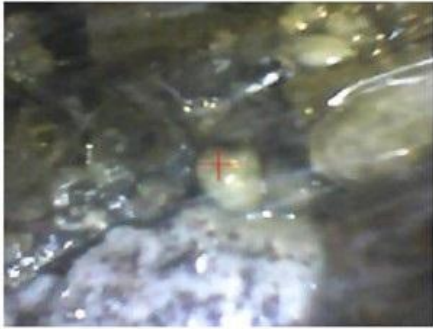
Şekil 5.3 A kuyusunun kuyu başından alınan kabuk örneğinin XRF analiz sonucu.

A kuyusunun kuyu başından alınan kabuk örneği ile, A ve B kuyularının bağlı olduğu enerji santralinin yüksek basınçlı ısı değiştiricisinin girişinden alınan kabuk örneğinin XRF analiz sonuçları değerlendirildiğinde, oluşan kabuklaşmanın içeriğinin büyük kısmını kalsiyum ve silisyum oluşturmaktadır. Elde edilen kabuk numunesinin üretim kuyularından sürüklenip gelen kalsit kabuğu ve ısı düşüşü sonucu oluşan silika kabuk oluşumu olduğu belirlenmiştir.

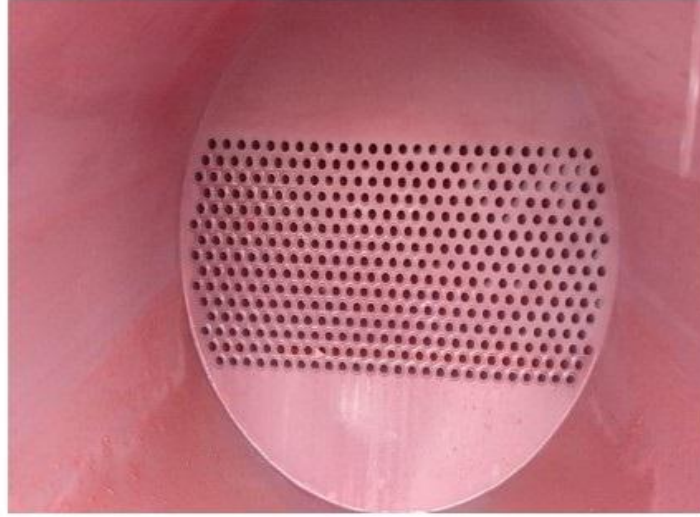
Ayrıca çalışma alanında bulunan üretim kuyuları ve enerji santralleri on yıldan fazla süredir işletilmekte, bunun sonucu olarak bölgedeki CO₂ miktarı ve jeotermal suyun santrale giriş sıcaklığı düşmektedir. Kimyasal analiz sonuçlarında da değinildiği üzere jeotermal suda bulunan antimon elementinin stibnit olarak kabuklaşması için uygun ortam oluşmuş bulunmaktadır. Bu kapsamda, Şekil 5.5’de analiz sonucu verilen E ve F kuyularının bağlı olduğu enerji santralinin düşük basınçlı ısı değiştiricisinden alınan kabuklaşma örneğinin XRF sonucu bulunmaktadır. Yapılan analizlerde stibnit kabuklaşması belirlenmiştir.



Element	Fe %	Ca %	Si %	Sr %	S %	Sb %	Pd %	Ba %	Mg %
±	23,741	15,329	7,599	7,578	4,968	3,222	1,948	1,447	1,444
Element	K %	V %	Al %	Mn %	Cr %	As %	Zr %	Sn %	Cu %
±	0,835	0,552	0,378	0,284	0,116	0,087	0,072	0,066	0,064
Element	Ag %	U %	Cd %	P %	Ni %	Zn %	Co %	Au %	Pb %
±	0,0060	0,0056	0,0443	0,0137	0,0187	0,0023	0,0014	0,0103	0,0048
Element	0,062	0,052	0,031	0,028	0,027	0,026	0,021	0,014	0,011
±	0,0053	0,0023	0,0066	0,0084	0,0054	0,0030	0,0049	0,0036	0,0026
Element	Nb %	Ta %	Hg %	Tl %	Th %				
±	0,011	0,010	0,008	0,007	0,006				
±	0,0015	0,0079	0,0032	0,0028	0,0020				
Tenörler: Eşleşme Yok									



Şekil 5.4 A ve B kuyularının bağlı olduğu enerji santralinin yüksek basınçlı ısı değiştiricisinin girişinde alınan kabuk örneğinin XRF analiz sonucu.



Element	Sb %	S %	Pd %	Ca %	Fe %	Si %	Cr %	As %	Ba %
±	79,740	6,382	2,675	1,665	0,521	0,295	0,293	0,100	0,070
	0,0502	0,0090	0,0043	0,0038	0,0128	0,0060	0,0251	0,0016	0,0210
Element	Tl %	Sn %	Au %	Ag %	Mn %	Cu %	Sr %	Hg %	Ni %
±	0,060	0,029	0,026	0,025	0,024	0,018	0,016	0,013	0,012
	0,0023	0,0063	0,0026	0,0014	0,0133	0,0031	0,0005	0,0022	0,0039
Element	Cd %	Se %	Zn %	Pb %	Mo %	Th %	Rb %	Zr %	U %
±	0,012	0,012	0,011	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
	0,0028	0,0009	0,0020	0,0017	0,0005	0,0009	0,0005	0,0004	0,0008
Element	Cl %								
±	0,000								
	0,0000								

Tenörler: Eşleşme Yok



Şekil 5.5 E ve F kuyularının bağlı olduğu enerji santralinin düşük basınç ısı değiştiricisinden alınan kabuklaşma örneğinin XRF analiz sonucu.

Yüzey boru hatları (akümülatör, separatör hatları da dahil) ve ısı değiştiricilerden alınan kabuklaşma örneklerinin yanında kuyu yüzey boru hatlarında, ısı değiştiricilerin bağlantı boru hatlarında ve enerji santralinin giriş/çıkışında bulunan kuponların kontrolleri belirli periyotlarla yapılmıştır. Ortalama 15-16 günde bir yapılan kupon kontrollerinin ve kupon yüzeyinde bulunan kabuklaşmanın XRF analizleri sonuçları da oluşan yapıların yüksek miktarda kalsiyum ve silisyum içerdiğini göstermektedir.

Kuyulardan alınan jeotermal su örneklerinin kimyasal analizinde antimon elementi okunmasına karşın kuyu kuponlarında bulunan kabuklaşmalarda eser miktarda antimon gözlenmiştir. Fakat separatörden sonra tek faz ile santrale giren ve soğuyan jeotermal su, özellikle yüksek basınç ısı değıştircilerinin bitiş kısımlarında, düşük basınç ısı değıştircilerinin büyük bölümünde ve ön ısıtıcıların hemen hemen hepsinde stibnit kabuklaşması meydana getirmiştir. Şekil 5.6’da bahsedilen bölgelerden alınmış kuponların göstermektedir.



Şekil 5.6 C kuyusundaki separatör sonrası üretim hattında takılı olan kupon [1] A ve B kuyularının bağlı olduğu santralin giriş hattında takılı olan kupon [2] E ve F kuyularının bağlı olduğu santralin re-enjeksiyon çıkış hattında takılı olan kupon [3]

Germencik bölgesinde jeotermal suların kimyasal özelliği ve oluşturduğu kabuk kimyasına bakıldığında, sistem içerisinde önemli oranda bulunan Ca^{++} , SiO_2 ve stibnit kabuklaşması en önemli kabuklaşmaları oluşturur.

5.4 Kabuklaşmayı Önlemek Amacıyla Yapılan İnhibitör Çalışmaları

Çalışma sahasında yapılan kimyasal analizler, XRF sonuçları ve kupon kontrollerinden alınan verilerle, kuyularda ve yüzey boru hatlarında oluşabilecek kalsiyum ve silisyum kabuklaşmasını önlemek, enerji santrali girişinden ise ısı değiştiricilerde oluşabilecek stibnit kabuklaşmasını önlemek için inhibitör dozajlaması yapılmıştır. Deneme süresi boyunca tarafımca kalsiyum ve silisyum kabuklaşmasının önlenmesi için inhibitör kullanılmıştır. Bu kalsiyum ve silisyum kabuklaşmasını önlemek için kullanılacak inhibitör, kuyu içinden, kuyu başındaki yüzey boru hattından ve santral girişinden farklı miktarlarda dozajlanmıştır. Belirli bir dozaj miktarı belirlenip bu miktar iki veya üçe bölünerek dozajlama yapılmıştır. Örneğin kuyu içinden 4 ppm, kuyu başından 2 ppm ve santral girişinden 4 ppm yani toplamda 10 ppm olacak şekilde aynı inhibitörün dozajı yapılmıştır. Stibnit kabuklaşmasını önlemek amacıyla santral jeotermal su giriş hattından farklı miktarlarda inhibitör dozajı yapılmıştır.

Hem kalsiyum ve silisyum kabuklaşmaları hem de stibnit kabuklaşması için farklı miktarlarda dozaj miktarı belirlenmiş, belirli aralıklarla yapılan kupon kontrolleri neticesinde dozaj optimizasyonu yapılarak inhibitörün en verimli çalıştığı dozaj aralığı belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma alanı olarak C kuyusu ve D kuyusu ve bağlı oldukları enerji santrali seçilmiştir. Çalışma yöntemi olarak, özel firmadan alınan üç farklı inhibitör 10 ppm dozaj miktarı ile sırasıyla 15'şer gün kuyu içinden dozajlanmıştır. Kullanılan inhibitörler içerik olarak fosfat ve silika dispersantı ihtiva etmekte ve CaCO_3 , CaSO_4 , SiO_2 ve MgSiO_3 kabuklaşmalarını önlemek amacıyla kullanılmıştır. Daha kolay anlaşılması bakımından kullanılan inhibitörlere "İnh.1, İnh.2 ve İnh.3" adları verilerek 15'şer gün boyunca kuyu içinden dozajlanmıştır. İnhibitör dozajı 15 günün sonunda durdurularak kuyularda bulunan kuponlar sökülerek kontrol edilmiştir (Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9).



Şekil 5.7 İnh.1' in 10 ppm dozajda 15 günlük kupon görselleri.



Şekil 5.8 İnh.2'nin 10 ppm dozajda 15 günlük kupon görselleri.



Şekil 5.9 İnh.3'ün 10 ppm dozajda 15 günlük kupon görselleri.



Şekil 5.10 İnh.1 inhibitörünün 15 günlük 14 ppm dozajdaki kupon görseli.



Şekil 5.11 İnh.1 inhibitörünün 15 günlük 7 ppm dozajdaki kupon görseli.



Şekil 5.12 İnh.1 inhibitörünün 15 günlük 4 ppm dozajdaki kupon görseli.

XRF ANALİZ SONUÇLARI

Element	Fe %	Si %	Mg %	Al %	Ca %	Mn %	Cu %	Zn %	Co %
	26,927	15,555	14,176	0,803	0,338	0,177	0,091	0,038	0,017
±	0,0243	0,0203	0,1451	0,0145	0,0010	0,0027	0,0015	0,0008	0,0008
Element	P %	As %	Sb %	Ni %	Sr %	Mo %	Tl %	Hg %	S %
	0,013	0,011	0,009	0,006	0,006	0,002	0,001	0,001	0,000
±	0,0017	0,0003	0,0005	0,0009	0,0001	0,0001	0,0003	0,0004	0,0019

Tenörler: Eşleşme Yok



Şekil 5.13 İnh.1 inhibitörünün 7 ppm dozajında kupon üzerinde görülen kabuklaşma yapısının XRF analiz sonuçları

Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilen kupon kontrolleri neticesinde en iyi sonuç veren “İnh.1” inhibitörü seçilerek dozaj optimizasyonuna geçilmiştir. Yine 15’şer günlük periyotlarla 14 ppm, 7ppm ve 4 ppm dozaj yapılmış, 15 günün sonunda kuponlar sökülerek kontrolleri yapılmıştır. Bu denemede elde edilen kupon durumları Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de sunulmuştur. Yaklaşık 90 gün süren bu çalışmada kullanılan üç farklı inhibitörden CaCO₃, CaSO₄, SiO₂, MgSiO₃ kabuklaşmalarına karşı en iyi verimi İnh.1 inhibitörü vermiştir (Şekil 5.13).

İnh.1 inhibitörünün dozaj optimizasyonunda farklı dozaj miktarları test edilmiş hem işletme ekonomisi hem de performans olarak en uygun dozaj miktarının 7 ppm olduğuna karar verilmiştir. İnh.1 inhibitörünün 7 ppm dozajında kupon üzerinde görülen kabuklaşma miktarı azalmıştır. Fakat kabuklaşmada içerik olarak hala silisyum, magnezyum ve alüminyum elementleri gözlenmiştir. İlerleyen dönemlerde jeotermal suyun ihtiva ettiği metal elementlerinin silisyum ile bağ kurarak kabuklaşmasını önlemek amacıyla inhibitör üzerinde ARGE yapılmalı, değişen

Şekil 5.14' te de gösterilen jeotermal su yüksek basınçlı ısı değiştiricilere dağıtılmadan, jeotermal suyun enerji santraline ilk girdiği yzney boru hattında bir dozaj noktası belirlenerek dozaj sistemi kurulmuştur. Özel sektörde hizmet veren bir kimyasal firmasından Amin bazlı stibnit kabuklaşma önleyici inhibitör alınarak dozajlanacak miktarlar belirlenmiştir. Doğru bir dozaj optimizasyonu yapabilmek için dört farklı dozaj miktarı belirlenmiş ve çalışma başlatılmıştır.

İlk olarak enerji santrali girişinden 20 ppm inhibitör dozajlanmaya başlanmış 30 gün sonra kuponlar sökülerek kontrol edilmiştir. 20 ppm dozajda yapılan kupon kontrollerinde jeotermal suyun hızlı soğuduğu düşük basınç ısı değiştirici giriş/çıkışında ve enerji santralinin çıkışında bulunan kuponda stibnit kabuklaşması gözlemlenmeye devam edilmiştir. 30 günün ardından dozaj 10 ppm miktarına düşürülmüş ve tekrar 30 gün sonra kupon kontrolleri yapılmıştır. Yapılan kupon kontrollerinde kupon üzerinde bulunan stibnit kabuk miktarı önemli ölçüde azalmış fakat hafif de olsa stibnit yapısı gözlenmiştir. 10 ppm dozajının ardından 7,5 ppm dozaj miktarı 30 gün boyunca enjekte edilmiş 30 günün sonunda belirli noktalardaki kuponlar sökülerek kontrolleri yapılmıştır. 7,5 ppm dozajda kupon üzerinde oluşan kabuk yapısının miktarı 10 ppm dozajdaki yapıyla hemen hemen aynı seviyede gözlenmiştir.

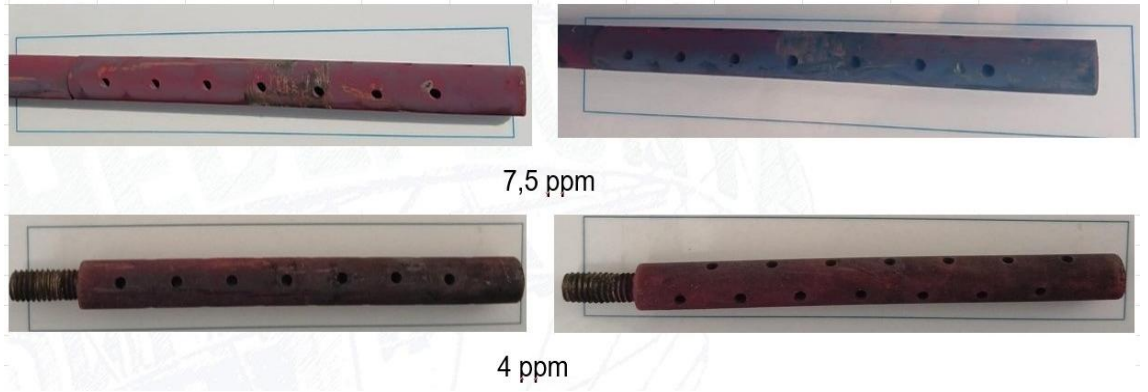
Son olarak 4 ppm inhibitör 30 gün süreyle dozajlanmış, 30 günün sonunda kuponlar sökülerek kontrolleri yapılmıştır. 4 ppm dozajda, kupon üzerinde oluşan stibnit kabuk miktarı yok denecek kadar az miktardadır. Hatta kuponun metal olan malzeme yzneyi kontrollerde görülebilmektedir. Aşağıdaki enerji santrali giriş boru hattında, yüksek basınçlı ısı değiştirici girişinde, yüksek basınç ön ısıtıcı grubunun re-enjeksiyon çıkışında, düşük basınç ısı değiştirici çıkışında, düşük basınç ön ısıtıcı grubunun çıkışında ve enerji santrali çıkışı re-enjeksiyon boru hattında takılı olan kuponların uygulanan dozaj miktarlarındaki durumları Şekil 5.15 ve Şekil 5.20 arasında sunulmuştur.



Şekil 5.15 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinde jeotermal suyun santrale alındığı boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarında ve 30 gün sonunda yapılan kontrol görselleri.



Şekil 5.16 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin yüksek basınçlı ısı değiştirici boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarındaki kontrol görselleri. (4 ppm dozajı sonunda yaşanan vana arızası nedeniyle kupon sökülememiştir.)



Şekil 5.17 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralının yüksek basınçlı ön ısıtıcı grubunun giriş boru hattında takılı olan, 7,5 ppm ve 4 ppm dozaj miktarlarındaki kupon kontrol görselleri. (Kupon noktası performans çalışması başlatıldıktan sonra yapıldığı için 20 ppm ve 10 ppm dozajlarda kontrol yapılamamıştır.)



Şekil 5.18 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralının düşük basınçlı ısı değişiricinin çıkış boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarındaki kontrol görselleri.

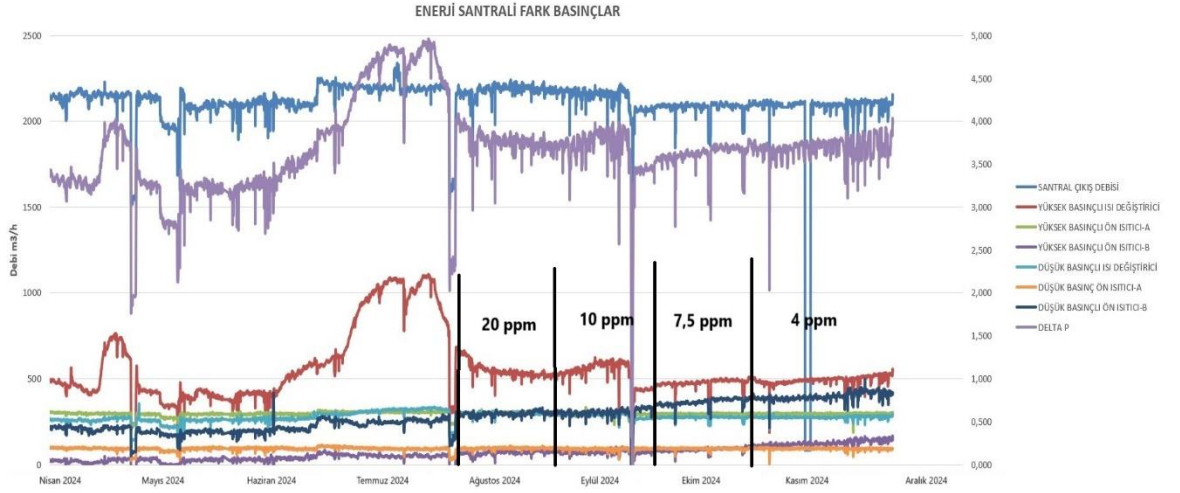


Şekil 5.19 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin düşük basınçlı ön ısıtıcı grubunun çıkış boru hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarındaki kontrol görselleri.



Şekil 5.20 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin re-enjeksiyon hattında takılı olan kuponun farklı dozaj miktarlarında yapılan kontrol görselleri.

Yapılan çalışma esnasında alınan verilere ve yorumlamaya katkı sağlaması için fark basınçlar da kayıt altına alınmıştır. Temmuz 2024 sonunda başlayıp Kasım 2024 sonlarına doğru bitirilen çalışmada, fark basınçlar altında yapılan deneylerin sonuçlarında önem taşımaktadır. Özellikle, 20 ppm ve 10 ppm dozajlarda ısı değiştiricilerin genelinde hafif bir artış olmuştur. Toplam debideki hafif düşüşün yanında fark basınçlarda çok bir artış gözlenmemiştir. 7,5 ppm ve 4 ppm dozajlarda ise toplam debide hafif bir artış gözlenmiştir. Bunun yanında fark basınçlarda debi artışı oranında artmıştır. Basınçlardaki fark değişimleri Şekil 5.21’de sunulmuştur.



Şekil 5.21 A ve B kuyusunun bağlı olduğu enerji santralinin fark basınç grafikleri.

Kullanılan inhibitör performans ve ekonomik açıdan değerlendirildiğinde 20 ppm ve 10 ppm dozajların verdiği katkının ekonomik olmayacağı düşünülmektedir. Ancak, 7,5 ppm dozajın sağladığı katkı ekonomik olarak belirli bir fark basınç noktasına kadar tolere edilebilir. Fakat enerji santrali dizaynındaki fark basınç limitlerine ulaştığında daha fazla fark basınç artmayacağı için jeotermal su alamama noktasına gelecektir. Bu noktadan sonra kullanılan 7,5 ppm dozajın da verimli olmayacağı düşünülmektedir.

Gerek kupon kontrol sonuçları gerekse de fark basınç verileri göz önüne alındığında, öte yandan performans ve ekonomik kıstas yapıldığında 4 ppm dozaj en verimli dozaj miktarı olarak düşünülmektedir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Aydın-Germencik jeotermal alanı Menderes Grabeninin batı kesimlerinde yer almakta ve doğu-batı hattı boyunca uzanmaktadır. Bölgede, doğu-batı yönünde oluşan düşey fay sistemleri ve Menderes Masifinin genişleme tektoniği etkisi altında sürekli yükselmesi nedeniyle, doğu-batı yönlü graben sistemleri oluşmuştur. Menderes Grabeninde kıtasal kabuğun incilmesi ve yüzeye yakın magmatik aktivite, jeotermal sistemin ısı kaynağını oluşturmaktadır. Jeotermal rezervuar kayası olan Menderes Metamorfikleri oluşturur. Birim ağırlıklı şist, gnays, meta granitler ve üst kesimlerde mermerlerden oluşur. Şistler, genellikle kuvars şist, kalk şist, mika şistlerden oluşur ve ardalı bir yapı gösterir. Şistlerin üst kesimlerine doğru farklı tabaka kalınlıkları ile mermerler geçiş gösterir. Mermerler ise sıcak su dolaşımına izin veren kırıklı rezervuar kayası özelliğindedir. Rezervuar kayası üzerinde kalın bir Neojen örtü kayası bulunmaktadır. Neojen Kırıntılı birimleri, kumtaşı-çakıltası ve kömürlü kiltaşları ardalı birimlerden oluşur. Kırıntılı Birimlerin kalınlığı ortalama 1.000 m'lik bir kalınlık sunar.

Graben sistemini kesen faylar boyunca, meteorik sular yeraltına süzülürler. Süzülen meteorik sular graben tektoniğine bağlı olarak konveksiyon ısı akımları ile ısınıp tektonik boşluklar boyunca tekrar yükselerek yeryüzüne çıkan döngüsel bir sisteme sahiptir. Bölgede yapılan önceki çalışmalarda, jeotermal suların uzun dolaşım ve su kayaç etkileşimi uzun süren suları oluşturduğu ortaya konulmuştur.

Çalışma alanında jeotermal suların kimyasal özelliklerinin belirlenmesi, üretim kuyularında ve yer üstü enerji santrallerinde oluşan kabukların özelliklerinin belirlenmesi için kimyasal analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde, sıcak suların Ca^{++} ve SiO_2 konsantrasyonları diğer parametrelere göre oldukça yüksektir. Özellikle E santralinden alınan kuyudaki jeotermal suların içerisindeki Ca^{++} konsantrasyonu diğer kuyulara göre yüksek iken, SiO_2 konsantrasyonu kısmen daha düşüktür. E ve F kuyusunda klorür konsantrasyonu 376 ile 511 mg/l olarak belirlenmiştir. Alınan örneklerin elektriksel iletkenlik değeri 5250 ile 7132 $\mu S/cm$ arasında değişmekte olup, tuzlu su özelliğindedir. Yüksek elektriksel iletkenlik değerleri, bölgedeki jeotermal

suların su kayaç etkileşiminin uzun olması nedeni ile iyonca zengin olduğunu göstermektedir. İyon açısından zenginleşen sular ise işletim sırasında önemli oranda kabuklaşma sorunu yaratabilecek bir özellik kazanmaktadır.

Bu jeotermal sistemde yaygın olarak karşılaşılan kabuklaşma türleri silika (amorfsilika, kuvars, metal silikatlar vb.) kalsiyum (kalsit, aragonit vb.) ve antimon (stibnit) kabuklaşmalarıdır. Yüksek sıcaklıklı rezervuardan gelen jeotermal akışkan yüzeye doğru gelirken basıncını ve bir miktar ısınıyı kaybeder. Kaybedilen basınçtan dolayı jeotermal akışkan içerisindeki çözülmüş halde bulunan CO₂ açığa çıkar. Bunun sonucu olarak jeotermal akışkandaki kalsiyum konsantrasyonu artarak kuyu içinden başlayarak kabuklaşma meydana getirir. Yüzeye doğru gelirken basıncı azalan jeotermal su içerisinde çözülmüş CO₂ açığa çıkarak buhar fazına geçer. Buhar fazına geçen CO₂ sebebiyle pH yükselir ve suda bulunan silisyumun çözümlülüğü azalarak doymun hale gelir. Silisyum bakımından doymun hale gelen jeotermal su yüzeye geldikten sonra enerji santralinde bulunan belirli ekipmanlardan geçerek enerji üretimine katkı sağlar. Bu ekipmanlar jeotermal suyun ısınıyı kullanır ve suyun ısıyı önemli ölçüde düşer. Silisyum bakımından doymun olan jeotermal su, enerji santralindeki ekipmanlarda ısınıyı kaybederken doymunluğu iyice artar ve silisyum kabuğu oluşturur. Farklı miktarlarda elementler ihtiva eden jeotermal suyun içinde antimon elementi de bulunmaktadır. Yeryüzünde stibnit minerali olarak da bulunan antimon trisülfürün çözümlülüğü sıcaklık ve pH arttıkça artar, H₂S konsantrasyonu arttıkça azalır. Yüzeye geldiğinde ve enerji santrali ekipmanlarında kullanıldığında sıcaklığı azalan jeotermal suyun bir miktar pH yükselmesi de olur. Fakat çalışma alanındaki jeotermal suda bulunan yüksek miktardaki H₂S stibnitin kabuklaşmasında önemli rol oynar. Sıcaklığı düşen ve içindeki H₂S miktarı artan jeotermal akışkan enerji santralindeki düşük sıcaklıklı ekipmanlarda stibnit kabuklaşması oluşturur.

Yapılan bu çalışmada Germencik jeotermal sahasından alınan su örneklerinin kimyasal analizinde kalsiyum, silisyum ve stibnite sıkça rastlanmıştır. Ayrıca analizlerde saptanan magnezyum ve alüminyum elementleri silisyum ile bağ kurup magnezyum silikat ve alüminyum silikat kabukları oluşturmuşlar, bu oluşan kabuk yapıları da çalışma sahasında gözlemlenmiştir. Çalışma sahasının belirli yerlerinden ve enerji santralinin belirli noktalarından alınan kabuk örnekleri XRF cihazıyla analiz edilmiş, elde edilen sonuçların yapılan kimyasal analiz sonuçlarıyla aynı paralellikte

olduğu gözlemlenmiştir. Jeotermal suyun sıcak olduğu fakat kalsiyum doygunluğunun yüksek olduğu kuyu içi buharlaşma noktası ve kuyu başlarında kalsit kabuklaşması tespit edilmiştir. Jeotermal suyun ısını kaybetmediği enerji santrali ekipmanlarında ve jeotermal akışkanın jeotermal su ve buhar+yoğuşmayan gazlar olarak iki faza ayrıldığı separatörlerde de silisyum kabuklaşmaları tespit edilmiştir. Silisyum kabuklaşmalarının jeotermal suyun ihtiva ettiği metal element miktarına bağlı olarak bazı yerlerde magnezyum silikat ve alüminyum silikat şeklinde oluştuğu tespit edilmiştir. Stibnit kabuklaşmalarına kuyu başlarında ve santral giriş boru hatlarında rastlanmamış, enerji santralinin düşük basınçlı ısı değiştiricilerinde, yüksek basınçlı ön ısıtıcı grubunun çıkış kısmında, düşük basınçlı ön ısıtıcı grubunun büyük kısmında ve santral çıkış re-enjeksiyon boru hatlarında sıklıkla rastlanmıştır.

Yukarıda bahsedilen kabuklaşma türlerinin oluşumlarını önlemek amacıyla Germencik bölgesinde inhibitör çalışmaları yapılmıştır. Kalsiyum kabuklaşmalarını önlemek için genellikle fosfonat bazlı inhibitörler kullanılmış ve başarı sağlanmıştır. Bu bölge için kalsit çökelimleri inhibitör kullanılarak büyük oranda engellenebilmektedir. Silika ve metal silikat kabuklarını önlemek için de inhibitör çalışmaları yapılmış ve kabul edilebilir bir başarı sağlanmıştır. Stibnit kabuklaşmalarını önlemek amacıyla inhibitör çalışmaları yapılmış ve kabuk oluşum hızını azaltmada başarı sağlanmıştır. Fakat stibnit kabuk oluşumunun önüne tamimiyle geçilememiştir. Stibnit kabuk oluşumunu en az indirecek miktarda inhibitör kullanılmış bu miktar işletme bakımından ekonomik olmamıştır.

Dünya genelinde ve özellikle Türkiye’de bulunan jeotermal sahalarda oluşan kalsiyum kabuklaşmalarını önlemek amacıyla kullanılan inhibitörler hem ekonomik açıdan hem de performans açısından yeterli görülmekte ve Türkiye’deki tüm jeotermal enerji santrallerinde kullanılmaktadır. Fakat silisyum kabuklaşma dinamikleri ve mekanizması bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Bu yüzden belirli bir bölgede verimli olarak çalışan silika önleyici inhibitörler farklı bir bölgede aynı faydayı göstermemektedir. Bu yüzden silikayı önleyecek olan inhibitörler üzerinde çalışmalar devam etmekte ve yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Stibnit kabuklaşma sorunu hem ülkemizde hem de dünyadaki bazı (İzlanda) jeotermal sahalarda giderek artmaktadır. Stibnit kabuklaşmasını tamamen önleyebilen bir teknoloji hala gelişmemiştir. Enerji santrallerindeki ısı aktarımının önüne geçen en büyük problem stibnit kabuklaşması

olduğundan inhibitör denemeleri ve teknoloji geliştirme çabaları halen devam etmektedir. Bu konu üzerinde detaylı araştırmaların devam ettirilmesinde büyük yarar bulunmaktadır.



KAYNAKLAR

- Aghahosseini, A. ve Breyer, C. (2020). From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential, *Applied Energy*, 279, 115769, ISSN 0306-2619.
- Aksoy, N., “Jeotermal Sahalarda Kabuklaşma ve Çözüm Yöntemleri” Teskon Bildiri Kitapçığı, (2007).
- Amjad, Z. ve Hooley, J. P. (1994). Effect of antiscalants on the precipitation of calcium carbonate in aqueous solutions. *Tenside Surfactants Detergents*, 31(1), 12-17.
- Bilgiç, M. (2015). *Salavatlı (Aydın) jeotermal alanının hidrojeokimyasal ve jeotermal enerji potansiyelinin değerlendirilmesi* (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Bostanoğlu, Y. (1999). Jeotermal sularda kabuk oluşumunun önlenmesi ve kontrolü (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Bozkurt, E. (2001). Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, western Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 728-744.
- Bozkurt, E., (2000). Timing of Extension on the Büyük Menderes Graben, Western Turkey, and Its Tectonic Implications. Geological Society, London, Special Publications, 173, 385.
- Bozkurt, E., ve Oberhänsli, R. (2001). Menderes Massif (western Turkey): structural, metamorphic and magmatic evolution—a synthesis. *International Journal of Earth Sciences*, 89(4), 679-708.
- Brown K., 2011. “Thermodynamics and Kinetics of Silica Scaling” , Proceedings from the International Workshop on Mineral Scaling, 25-27 May 2011, Manila, p. 1-7.
- Brown, K. (2011). “Antimony and arsenic sulfide scaling in geothermal binary plants”. In Proceedings International Workshop on Mineral Scaling (pp. 103-106).

- Brown, K.L., 2011b. "Antimony and arsenic sulfide scaling in geothermal binary plants". In: Proceedings International Workshop on Mineral Scaling 2011, Manila, Philippines, pp. 103–106.
- Büyüksağış, A. (2007). "Afyonkarahisar Jeotermal Isıtma Sisteminde Oluşan Kabuklaşma ve Korozyon". *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 31(2), 9-23.
- Chan, S. H. (1989). A review on solubility and polymerization of silica. *Geothermics*, 18(1-2), 49-56.
- Demadis, K. D. 2010. Recent developments in controlling silica and magnesium silicate foulants in industrial water systems. *The Science and Technology of Water Treatment*, 179–203.
- Demir, M. M., Baba, A., Atilla, V., ve İnanlı, M. (2014). "Types of the scaling in hyper saline geothermal system in northwest Turkey". *Geothermics*, 50, 1-9.
- Erdoğan, B., ve Güngör, T. (1992). Menderes Masifi'nin kuzey kanadının stratigrafisi ve tektonik evrimi (Stratigraphy and tectonic evolution of the northern Margin of the Menderes Massif). *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 4, 9-34.
- Filella, M., Belzile, N. ve Chen, Yu-Wei. (2002) "Antimony in the environment: a review of focused on natural waters I. Occurrence". *Earth-Science Reviews* 57, 125-176.
- Filiz, Ş., Tarcan, G., ve Gemici, Ü. (1999). Germencik (Aydın) Jeotermal Alanlarının Hidrojeokimyasal Açısından İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(1), 41-58.
- Fournier, R. O. (1985). The behavior of silica in hydrothermal solutions.
- Gallup, D. L., Sugiaman, F., Capuno, V. ve Manceau, A. 2003. Laboratory investigation of silica removal from geothermal brines to control silica scaling and produce usable silicates. *Applied Geochemistry* 18, 1597–1612.
- Gallup, D.L., 2011. "pH modification scale control technology". In: Proceedings International Workshop on Mineral Scaling, Manila, Philippines, pp. 39–46.

- Gawlik, K., Kelley, S., Sugama, T., Webster, R., ve Reams, W. (2000, May). Development and field testing of polymer-based heat exchanger coatings. In World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan.
- Gill, J. S. (2011, May). New Inhibitors for silica and calcium carbonate control in geothermal. In International Workshop on Mineral Scaling.
- Gunnarsson I. ve S. Arnorsson, 2005. "Impact of silica scaling efficiency of heat extraction from high temperature geothermal fluids", *Geothermics*, v. 34, p. 320 – 329.
- Gürer, Ö. F., Sarica-Filoreau, N., Özbüran, M., Sangu, E., ve Doğan, B. (2009). Progressive development of the Büyük Menderes Graben based on new data, western Turkey. *Geological Magazine*, 146(5), 652-673.
- Haklıdır, F. S. T. Jeotermal Akışkan Kaynaklı Kabuklaşma Oluşumu ve Engellenmesinde Kontrol Parametrelerinin İzlenmesinin Önemi. (2012)
- Haklıdır, F. S. T., ve Sengun, R. (2016). Thermodynamic effects on scale inhibitors performance at multi-flash and advanced geothermal power systems. In Proceedings 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
- Hakyemez, Y.H., Erkal, T. ve Göktaş, F. 1999. Late Quaternary evolution of the Gediz and Büyük Menderes grabens, Western Anatolia, Turkey. *Quaternary Science Reviews*, 18,549-554.
- Inanlı, M., ve Atilla, V. (2011, May). Metal silicate formation at Tuzla geothermal brine lines. In Proceedings International Workshop on Mineral Scaling, Manila, Philippines.
- Isık, T., Baba, A., Chandrasekharam, D., ve Demir, M. M. (2023). "A brief overview on geothermal scaling". *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 171, 185-203. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1228900>
- Jamero, J., Zarrouk, S. J., ve Mroczek, E. (2018). "Mineral scaling in two-phase geothermal pipelines: Two case studies". *Geothermics*, 72, 1-14.
- JEDMSK, (2007). Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu

- Kahraman, S. (2022). Türkiye’de jeotermal enerji ve elektrik üretimi. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 33, 29-34.
- Karahan, Ç. (2009), Aydın Çiftlik Aç-1 sıcak su sondajı kuyu bitirme raporu MTA derleme No: 11183
- Kazancı, N., Gürbüz, A., ve Boyraz, S. (2011). Büyük Menderes nehrinin jeolojisi ve evrimi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 54(12), 25-56.
- Kılıçcıoğlu, F., “Jeotermal Kuyularda Kalsit ve Silika Çökelmelerine Karşı Kullanılacak İnhibitör Çeşitleri ve Çalışma Mekanizmalarının İncelenmesi” Teskon Bildiri Kitapçığı, (2009)
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. “Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni”. Erişim: 20 Ekim 2024. <https://www.mta.gov.tr>.
- Mertoglu, O., Canlan, A., Bakir, N., Dokuz, I., ve Kaya, T. (2000). Geothermal direct use applications in Turkey: Technology and economics. In *Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan* (pp. 1-3).
- Meteoblue. “Germencik, Geçmiş & İklim”. Erişim 15 Ekim 2024. <https://meteoblue.com>.
- Ngothai, Y., Lane, D., Kuncoro, G., Yanagisawa, N., Rose, P., ve Pring, A. (2012). “Effect of geothermal brine properties on silica scaling in enhanced geothermal systems”. GRC Transactions, 36.
- Ngothai, Y., Yanagisawa, N., Pring, A., Rose, P., O’Neill, B. ve Brugger, J. (2010, November). “Mineral scaling in geothermal fields: A review”. In *Proceedings of the 2010 Australian Geothermal Energy Conference, Adelaide, Australia* (pp. 17-19).
- Parkin, H. P. (2012). Germencik-İncirliova (Aydın) jeotermal alanlarının hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal incelenmesi (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Phillips, S.L., Mathur, A.K. ve Garrison, W., 1979. Treatment methods for geothermal brines. In: Caspar, L.A., Pinchback, T.R. (Eds.), *Geothermal Scaling and Corrosion*

- (Vol. ASTM Special Technical Publication 717). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 207–224.
- Rinehart, J. S. (1980). *Geysers and geothermal energy* (Vol. 223). New York: Springer-Verlag.
- Sözbilir, H. 2001. Nazilli ve dolayının (Büyük Menderes Grabeni) genç-tektonigi. Büyük Menderes Depremleri Jeofizik Toplantısı, 54-61.
- Sözbilir, H., ve Emre, T., (1991), Neogene stratigraphy and structure of the norther rim of the Büyük Menderes graben. International Earth Science Congress on Aegean Regions, Proceeding, Voll. II, 314-322
- Şener, M. F., Uzelli, T., Akkuş, İ., Mertoğlu, O., ve Baba, A. (2023). The Potential, utilization, and development of Geothermal Energy in Türkiye. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, (early view), 1-1.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. “Enerji İşleri Genel Müdürlüğü”. Erişim: 20 Ekim 2024. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal>
- Tassew, M. (2001). Effect Of Solid Deposition On Geothermal Utilization And Methods Of Control. The United Nations University. *Geothermal Training Programme*.
- Tassew, M. (2001). Effect of solid deposition on geothermal utilization and methods of control.
- Tokcaer, M. (2023). Batı Anadolu’daki bazı jeotermal alanların termal akışkanlarında bor izotop oranları ve borun kökeni. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38(3), 1361-1374.
- Tonkul, S., Baba, A., Demir, M. M., ve Regenspurg, S. (2021). Characterization of Sb scaling and fluids in saline geothermal power plants: A case study for Germencik Region (Büyük Menderes Graben, Turkey). *Geothermics*, 96, 102227.
- Villaseñor, L. B., ve Calibugan, A. A. (2011). Silica scaling in Tiwi–current solutions. In International Workshop on Mineral Scaling, Manila, Philippines.

- Wilson, N., Webster-Brown, J., ve Brown, K. (2007). Controls on stibnite precipitation at two New Zealand geothermal power stations. *Geothermics*, 36(4), 330-347.
- Yalcin, M., Sari, F., ve Yildiz, A. (2023). Exploration of potential geothermal fields using MAXENT and AHP: A case study of the Büyük Menderes Graben. *Geothermics*, 114, 102792.
- Yılmaz, Y. 2000. Ege bölgesinin aktif tektonigi. Batı Anadolu'nun Depremselligi Sempozyumu, 3-13.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş. C., Gürer, F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacik, Z., ... ve Elmas, A. (2000). When did the western Anatolian grabens begin to develop?. *Geological Society, London, Special Publications*, 173(1), 353-384.
- Yurttaş, Ö. (2008). Ilicabaşı jeotermal alanının (Aydın) hidrojeolojisi (Master's thesis, Dokuz Eylul Universitesi (Turkey)).
- Zarrouk, Sadiq J., Blair C. Woodhurst, ve Chris Morris. "Silica scaling in geothermal heat exchangers and its impact on pressure drop and performance: Wairakei binary plant, New Zealand." *Geothermics* 51 (2014): 445-459.