

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEKKEHAMAM (DENİZLİ) VE YAKIN ÇEVRESİ JEOTERMAL
SULARININ HİDROJEOLÖJİK, HİDROJEOKİMYASAL VE İZOTOP
JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ**

Elif Ece YILMAZ

**Danışman
Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOLÖJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2015**

© 2015 [Elif Ece YILMAZ]

TEZ ONAYI

Elif Ece YILMAZ tarafından hazırlanan “Tekkehamam (Denizli) ve yakın çevresinin jeotermal sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Fuzuli YAĞMURLU
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Erdal KOŞUN
Akdeniz Üniversitesi

Enstitü Müdür

Doç.Dr. Yasin Tuncer

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Elif Ece YILMAZ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Jeotermal akışkanların kökeni	3
1.1.1. Jeotermal sistemlerin jeolojik konumları.....	3
1.2. Araştırmanın Amacı.....	6
1.3. Çalışma Bölgesinin Jeotektonik Konumu	6
2.KAYNAK BİLGİSİ.....	14
3. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ.....	21
3.1. Tekkehamam (Denizli) ve Yakın Çevresinin Jeolojisi.....	21
4. MATERYAL VE METOD	30
4.1. Metod.....	30
4.1.1. Jeolojik çalışma	30
4.1.3. Hidrojeokimyasal analizler	32
4.1.4. Jeotermometreler.....	34
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	35
5.1. Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri	35
5.2. Hidrojeokimya	37
5.2.1. Hidrojeokimyasal analizler	38
5.2.2. Doygunluk indeksi	46
5.3. Jeokimyasal Jeotermometre Uygulamaları.....	48
5.3.1. Kimyasal jeotermometre uygulamaları.....	48
5.3.1.1. Silis jeotermometreleri.....	49
5.3.1.2. Katyon jeotermometreleri.....	50
5.3.2. Birleşik jeotermometre uygulamaları.....	51
5.3.3. Çalışma alanındaki termometrelerin jeokimyasal değerlendirmesi..	53
5.4. İzotop Jeokimyasal Özellikleri	56
5.5. Tekkehamam Jeotermal Alanının Hidrojeolojik Modellemesi.....	59
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	62
6.1. Tekkehamam Jeotermal Alanında Olası Isı Kaynağı, Jeotermal Sistem ve Tektonik Arasındaki İlişki	62
6.2. Çalışma Alanının Hidrojeolojik, Hidrojeokimyasal ve İzotop Jeokimyasal Özellikleri.....	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ.....	77

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEKKEHAMAM (DENİZLİ) VE YAKIN ÇEVRESİ JEOTERMAL SULARININ HİDROJEOLÖJİK, HİDROJEOKİMYASAL VE İZOTOP JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Elif Ece YILMAZ

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR

Bu çalışma Tekkehamam (Denizli) ve yakın çevresi jeotermal sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri inceleyen tez çalışmasıdır. Çalışma alanı Büyük Menderes ve Gediz çöküntülerinin kesişim bölgesinin hemen batısında, Babadağ horstunun kuzey kanadında ve Büyük Menderes grabeninin güney kenarında, yer almaktadır. Çalışma alanında, stratigrafik olarak Paleozoik yaşlı Menderes Masifi Metamorfikleri (İğdecik Formasyonu), Neojen yaşlı Kızılburun Formasyonu, Sazak Formasyonu, Kolonkaya Formasyonu ve Tosunlar Formasyonu bulunur. Bunların hepsinin üzerinde ise Alüvyon ve Travertenler yüzlek vermektedir. Çalışma alanında Sazak Formasyonu ve Menderes Masifi Metamorfikleri (İğdecik Formasyonu) jeotermal suların hazne kaya özelliğini gösterirken, Alüvyon soğuk suların akiferini oluşturur. Menderes Masifine ait şistler, Kolonkaya, Kızılburun ve Tosunlar Formasyonları geçirimsiz taban kayacı ve örtü kayacı rolü üstlenmektedir.

Çalışma alanında dört farklı sıcak su lokasyonundan su örnekleri alınmıştır. Alınan örneklerde katyon ve anyon analizleri yapılmıştır. İnceleme alanında sıcak sular genel olarak $\text{Na-SO}_4\text{-HCO}_3$ tipi sular olarak adlandırılabilir. Tekkehamam ve yakın çevresi jeotermal suları $\text{Na}+\text{K}>\text{Ca}>\text{Na}$ baskın katyonlar ve $\text{HCO}_3>\text{SO}_4>\text{Cl}$ baskın anyonlar olarak sınıflandırılabilir. İnceleme alanındaki jeotermal sular $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ üçgen diyagramına göre magma kaynağı tarafından ısıtılan sular sınıfına girmektedir. Sülfat içeriğinin yüksek olduğu da gözlenmektedir. Çalışma alanındaki sularda yapılan Na-K-Mg diyagramı sıcak suların belli bir kısmının kısmi dengelenmiş sular sınıfına girdiği bir kısmının ise ham sular sınıfına girdikleri saptanmıştır. Tüm jeotermometre sonuçları ve mevcut kuyuların rezervuar sıcaklıkları birlikte değerlendirildiğinde jeotermal suların hazne kaya sıcaklıkları 160-250°C arasında olarak gözlenmektedir. Termal suların $\delta^2\text{H}$ değerleri -61,9 ile -51,8 arasında değişirken, $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ise -9,23 ile -5,84 arasında değişim göstermektedir. Çalışma alanındaki termal suların trityum içerikleri 0,7 ile 3,3 TU arasındadır. Bu durumda araştırılan sıcak sularda soğuk su karışım oranının oldukça az veya hemen hemen hiç olmadığı söz konusu olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tekkehamam, Kükürtlü Kaynağı, Babacık Pınarı, Kızıldere, Jeotermal Sular, Hidrojeoloji, Hidrojeokimya, İzotop Jeokimyası, Jeotermal Modelleme

2015, 77 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

HYDROGEOLOGICAL, HYDROGEOCHEMICAL AND ISOTOPE GEOCHEMICAL FEATURES OF THERMAL WATERS IN TEKKEHAMAM (DENİZLİ) AND ENVIRONS

Elif Ece YILMAZ

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Geology Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR

In this M.Sc. thesis, hydrogeological, hydrogeochemical, and isotope geochemical features of geothermal waters in Tekkehamam (Denizli) and environs were studied. The investigated area is located in the western part of the intersection area of Büyük Menderes and Gediz rift zones, which is also in the northern part of Babadağ horst and southern part of the Büyük Menderes rift zone. Stratigraphically, Paleozoic metamorphic rocks of the Menderes Massif (İğdecik Formation) and Neogene Kızılburun Formation, Sazak Formation, Kolonkaya Formation and Tosunlar Formation are outcropped in the study area. In the investigation area, Sazak Formation and metamorphic rocks of the Menderes Massif (İğdecik Formation) form the reservoir rocks of the geothermal waters. In comparison, alluvium forms the aquifer of the cold groundwaters in the region. The Paleozoic schists of the Menderes Massif, and Neogene Kızılburun, Kolonkaya, and Tosunlar formations are of impermeable basement and cap rocks.

The samples of thermal waters were collected from four different locations. In these samples, cations and anions were analysed. Generally, the geothermal waters in the investigation area are classified as Na-SO₄-HCO₃ type waters. The geothermal waters of Tekkehamam and environs are identified to be Na+K>Ca>Na dominant cations and HCO₃>SO₄>Cl dominant anions. According to the diagram of Cl-SO₄-HCO₃, the thermal waters might be heated by a magmatic source due to high contents of sulfates in thermal waters. Geochemical thermometer analyses were applied to the collected sample in the region. According to the diagram of Na-K-Mg, a certainly part of the thermal waters can be considered as equilibrated thermal waters during some waters are of raw waters. According to the results of geochemical thermometers, the reservoir temperatures of thermal waters range from 160 to 250°C. the $\delta^2\text{H}$ values of thermal waters are between -61,9 to -51,8, while $\delta^{18}\text{O}$ values range from -9,23 to -5,84. The tritium contents of thermal waters are between 0,7 to 3,3 TU. These results show that there is no mixing with cold groundwaters.

Keywords: Tekkehamam, Sulphurous Source, Babacık Pınarı, Kızıldere, Geothermal Water, Hydrogeology, Hydrogeochemistry, Isotopes Geochemistry, Geothermal Model

2015, 77 pages

TEŞEKKÜR

Sunulan bu yüksek lisans tez çalışması Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 4138-YL1-14 nolu araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Saygıdeğer danışmanım, Sayın Prof. Dr. Nevzat Özgür'e bu tezin tamamlanmasında göstermiş olduğu destek, yapıcı eleştirileri ve özveriden dolayı teşekkür ederim. Tezin sonuçlanmasında ve başarı elde edilmesinde çabası çok büyüktür. Kendisine Süleyman Demirel Üniversitesi'nde bulunduğum süre zarfında şahsım adına başarılı bir öğrencilik hayatı geçirmemi sağladığı için çok şey borçluyum.

Tekkehamam (Denizli) ve yakın çevresinde yapılan arazi çalışmamda su örnek alımlarında bizlere kaynaklarını açan otel yetkililerinden İnaltı Termal Otel Müdürü Sayın Mustafa ŞEN ve Çavuşoğlu Aile Kaplıcaları Müdürü Sayın İsmail ONAÇ' a yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca alınan örneklerimizin laboratuvar çalışmasını yaparak bizlere sonuçları ileten Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederim. Alınan su örneklerinde in-situ ölçümlerinin gerçekleştirilmesine kaynak sağlayan Jeoser Yerbilimleri Servisi Ltd. Şti., teşekkür ederim.

Bu çalışma esnasında gerek arazi çalışmaları olsun gerek tez yazım aşamasındaki yardımlarından dolayı Yük. Jeo. Müh. İbrahim İbrahim ABUBAKAR, Jeo.Müh. Duygu Sengül KUTLU, Jeo.Müh. Sinan GÜLMEZ ve Jeo.Müh. Ömer ÖZGÜLER'e, ve Aquachem yazılım programında gerçekleştirmiş olduğum diyagram çizimlerinde yardımlarından dolayı Dr. Ziya ÖNCÜ'ye teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman destekçim olan aileme teşekkür ederim.

Elif Ece YILMAZ

Isparta, 2015

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Dünyanın değişik bölgelerindeki jeotermal suların beklenen kompozisyonları: Yerel meteorik su ile jüvenil su arasındaki farklı karışım oranları.....	4
Şekil 1.2. Alpin sıkışması ve izleyen gerilme deformasyonları ile ilişkili K-G yönlü şematik enine kesit	8
Şekil 1.3. Batı Anadolu’da bulunan grabenlerin Erken Miyosen’den günümüze kadar gelişim evrelerini gösteren şematik blok diyagram	9
Şekil 1. 4. Menderes masifinin jeolojik haritası ve örnek noktaları.....	11
Şekil 1.5. Büyük Menderes, Küçük Menderes ve Gediz graben rift zonlarında gelişen drenaj sistemleri, ana nehirler ve tektonik hatlar	12
Şekil 1. 6. Batı Anadolu’nun stratigrafik kesiti.....	13
Şekil 3. 1. Kızıldere ve çevresindeki jeotermal alanların jeolojik haritası.....	22
Şekil 3. 2. Çalışma alanına ait sütun kesit	23
Şekil 3.3. Kızıldere-Tekkeköy jeolojik haritası.....	26
Şekil 3. 4. Büyük Menderes Grabeni Jeotermal Alanları.....	28
Şekil 3. 5. Kızıldere-Tekkeköy jeolojik enine kesiti.....	29
Şekil 4. 1. Çalışma alanında gerçekleştirilen in-situ ölçümleri	31
Şekil 4.2. Çalışma alanında Babacık Pınarı’nda örnek alımı ve in-situ ölçümleri ...	32
Şekil5.1. Çalışma alanında bulunan jeotermal suların Piper diyagramında gösterilmesi.....	41
Şekil 5.2. Tekkehamam ve çevresi jeotermal sularının Cl-SO ₄ -HCO ₃ üçgen diyagramı	43
Şekil 5. 3. Çalışma alanında jeotermal suların Ca-Na+K-Mg üçgen diyagramı ..	44
Şekil 5. 4. İnceleme alanındaki suların Na-K-Mg diyagramındaki görünümü ve su-kayaç denge sıcaklıkları	53
Şekil 5. 5. Tekkehamam ve yakın çevresi jeotermal sularında δD ve δ18O izotopu ilişkisi (EY-1, EY-2, EY-3 Tekkehamam; AB-1, AB-2, AB-3, AB-8 Gölemezli; D-19, D-20 Kızıldere).....	58
Şekil 5.6. Tekkehamam jeotermal sisteminin basitleştirilmiş hidrojeolojik oluşum modeli.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. In-Situ cihazları ve özellikleri.....	33
Çizelge 4.2. Hidrojeokimyasal cihazlar ve özellikleri	34
Çizelge 5.1. Çalışma alanındaki kayaç birimlerinin hidrojeolojik özellikleri	37
Çizelge 5.2. Tekkehamam ve yakın çevresi termal suların in-situ parametreleri	39
Çizelge 5.3. Çalışma bölgesi termal sularının hidrojeokimyasal analiz sonuçları....	40
Çizelge 5.4. İnceleme alanındaki örneklerin su tipleri.....	41
Çizelge 5.5. Suların sodyum adsorpsiyon oranı'na (SAR) göre sınıflaması.....	45
Çizelge 5.6. İnceleme alanı su örneklerinin SAR değerlerine göre sınıflaması.....	45
Çizelge 5.7.Çalışma alanındaki örneklerde rastlanabilecek bazı minerallerin doğgunluk indeksleri	47
Çizelge 5. 8. Silis (SiO ₂) jeotermometreleri ve bağıntıları (Tüm derişimler mg/l)..	50
Çizelge 5. 9. Na/K jeotermometreleri ve bağıntıları (Tüm derişimler mg/l)	51
Çizelge 5.10.Çalışma alanındaki termal suların çözünen jeotermometresine göre sonuçları	55
Çizelge 5. 11. İzotop analiz sonuçları	57

1.GİRİŞ

Günümüzde dünya çapında artan enerji ihtiyacı gelecekte bir enerji kriziyle karşılaşmamak için özellikle gelişmiş ülkeler yeni enerji kaynaklarına yönelmektedir. Bu ülkeler enerji konusunda önemli yer tutan kömür, petrol ve doğalgazın yanı sıra gerek yenilenebilir gerekse çevre bilinci olan alternatif enerji kaynakları olan güneş, hidrojen, jeotermal ve biyokütleyle ilgi göstermektedirler.

Jeotermal enerji, sürdürülebilirliği nedeniyle yenilebilir enerji türüdür ve yerküre içinde bulunan termal sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda, termal enerji maddenin sıcaklığını belirleyen enerjidir. Yerkürenin jeotermal enerjisi gezegenimiz olan yerkürenin orijinal formasyonundan (%20) ve minerallerin radyoaktif bozunmasından kaynaklanmaktadır.(%80) (Turcotte ve Schubert, 2002). Günümüzde bu kavram yerküre ısısının belirli kısımları için kullanılmaktadır. Bu ısının kullanımı çeşitli sondaj yöntemleriyle ısıya ulaşarak belirli amaçlar için kullanılır. Jeotermal kaynakları dünyanın birçok noktasında bulunur. Ancak, işletilebilir seviyede bulunanlar jeotermal gradyanı normal veya anormal derecede yüksek gradyanlara sahip yerlerdedir.

Jeotermal enerji, yer kabuğu içinde depolanmış olan ısı enerjidir. Bu ısı enerjisi yeraltındaki kayaç formasyonlarında ve bu formasyonların çatlaklarında ve gözeneklerinde bulunan doğal akışkanlarda bulunur. Jeotermal sistemlerin farklı tiplerinin her biri belirli özelliklere sahiptir ve bunlar aynı zamanda bu özelliklerinin kimyasal bileşimlerinde ve çeşitli kimyasal uygulamalarında belirli bir şekilde ortaya koymaktadır. Ancak, hepsi birkaç kilometre derinlikte, ortak bir ısı kaynağı olan ve konveksiyon içine yer kabuğunun üst bölümlerinde bulunan, mevcut su birikimleridir (Nicholson, 1993).

Yağmur sularının ve yer altı sularının yer kabuğunda yer alan çatlaklardan sızarak magma tabakasına kadar ulaşması ile jeotermal kaynaklar oluşmaktadır. Magma tabakası ulaşan yağmur suları burada kaynayarak buharlaşır. Meydana gelen buhar yüksek basıncın etkisiyle yeryüzüne doğru hareketlenmeye başlar.

Yeryüzüne çıkan sıcak sulara jeotermal enerji kaynaklarını oluşturmaktadır. Eğer kabuğunda doğal su dolaşımı sağlayacak yeterli kırık yoksa ve ısı birikimi tespit edilirse, oluşturulacak yapay kırıklardan dolaştırılacak akışkanlardan enerji elde edilmesi mümkündür.

Yenilebilir enerji olarak tanımlanmasına rağmen jeotermal, birçok tanınmış jeotermal sahanın aşırı işletilmesi sonucu akışkan ve ısı üretimiyle belli bir derece tükenme (sıcaklık ve özellikle basınçta) sürecine girdiği gözlenmiştir. Örneğin; İyi tanınan Wairakei sahası geçmiş elli yıldır az düşümle ortalama 140 MWe üretim yapmaktaydı ve çalışmalar adı geçen sahanın bir elli yıl daha sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

Yeryüzüne çıkan jeotermal sulardan İtalya, Amerika, Japonya, Filipinler ve Meksika borikasit, amonyum bikarbonat, ağır su (döteryum oksit), amonyum sülfat, potasyum klorür gibi kimyasal maddeler elde etmektedir. Jeotermal suların kullanım alanları çeşitlilik göstermektedir; (Rinehart, 1980) Elektrik enerjisi üretimi, balık ve kereste kurutma, tuz elde edilmesi, şeker sanayi, damıtma prosesleri, sera, ahır, kümes ısıtılması, mantar yetiştirme, toprak ısıtma, yüzme havuzları, turizm ve sağlık amaçlı banyolarda kullanımı söz konusudur.

Jeotermal suların kimyasal özelliklerinden dolayı korozyif maddelerin, kalıntı bırakan veya yoğunlaşmayan bileşenlerin doğrudan sisteme gönderilmesi çeşitli problemlere neden olmaktadır. Bu nedenle kullanılan suların kimyasal özelliklerine uygun inhibitörlerin seçimi ve uygun ekipman, sistem dizaynı ile jeotermal suların kabuklaşma ve korozyon sorunu çözülerek verimli olarak kullanmak mümkündür.

Dünya çapında jeotermal enerji yaklaşık olarak 10,715 MW gücünde, 24 ülkede kullanılmaktadır. Bununla birlikte; 28 GW doğrudan jeotermal ısıtma kapasitesi olan bir sistem bölgesel ısıtma, mekân ısıtması, kaplıcalar, endüstriyel prosesler, arıtma ve tarımsal uygulamalar için kurulmaktadır (Fridleifsson vd., 2008).

Jeotermal kuyular yerin derin kısımlarında sıkışıp kalan sera gazlarını serbest bırakırlar, ancak bu emisyonların miktarı fosil yakıtlardan, daha düşüktür. Sonuç olarak ; jeotermal enerji yaygın fosil yakıtların yerine konuşturulmuş ise küresel ısınmanın azaltılmasına yönelik yardımcı potansiyele sahiptir.

1.1. Jeotermal akışkanların kökeni

Jeotermale yönelik eski çalışmalarda, suyun juvenil yada magmatik bir kaynaktan türediği sanılmaktaydı. Ancak yüksek rakımlı ve karasal alanlardan örneklenen yağmur ve kar sularının hafif izotoplarca zengin olduğu ve bu δD ve $\delta^{18}O$ sulardaki değerlerinin meteorik su çizgisi üzerinde yer aldığının ortaya konulmasıyla bu görüş radikal bir değişim geçirmiştir.(Craig, 1963)

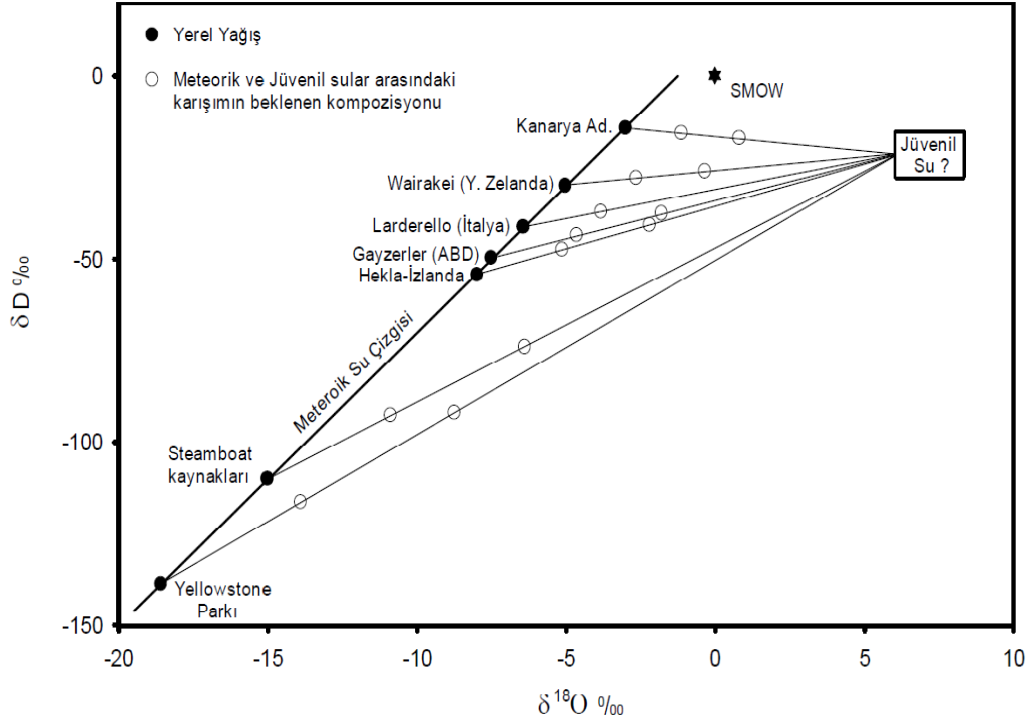
Tropik denizlerden uzaklaştıkça ağır izotoplarda (^{18}O , D) görülen fakirleşme, bu izotopların yağmur ve kar suyu gibi yoğun fazlar içine girmeleri ve kalıntı buhar fazında da hafif izotopların zenginleşmesi (Raleigh süreci) ile açıklanmaktadır. Craig (1963), jeotermal sulardaki $\delta^{18}O$ değerlerinin yerel meteorik sulardakilerden daha yüksek (pozitif) olduğunu ancak δD bolluklarının ise aynı kaldığını ortaya koymuştur. Craig (1963) hidrojen ve oksijen izotopik bileşimlerinin ölçmek suretiyle jeotermal sular ve buharların meteorik kökenli olduklarını ortaya koymuştur.

Farklı jeotermal alanlardaki meteorik sular farklı izotop bileşimleri sergilemektedirler. Yıllık ortalama yağışın izotop kompozisyonu büyük ölçüde yerel hava sıcaklığına bağlıdır. Ancak meteorik döngü içinde yer alan suların kendine özgü izotop kompozisyonu bulunmaktadır (Şekil 1.1.). Bu kompozisyon yağış sularının tamamıyla meteorik bir kökene sahip olduklarını işaret etmektedir.

1.1.1. Jeotermal sistemlerin jeolojik konumları

Jeotermal sistemler, ısı yayılım ve zenginleşmesine elveren kaya türleri ve yapısal ortamların varlığını gerektirir. Bu sistemlerin, illede ısı kaynağının bulunduğu yerde oluşmadığı bilinir. Bu nedenle, ısı kaynağı ile bu sistemin konuşturıldığı dolaysız bir ilişki ve yakınlık olması zorunlu değildir. Önemli olan

bölgesel ısı akısının yüksek olduğu, kütleli ısı taşınımının görüldüğü, yada ısı çevrimine elverişli jeoloji yapılarının, katmanlanma yada zonların olduğu yerlerin bulunmasıdır.



Şekil 1.1. Dünyanın değişik bölgelerindeki jeotermal suların beklenen kompozisyonları: Yerel meteorik su ile jüvenil su arasındaki farklı karışım oranları (Nutı, 1991)

Volkanitler, oluşumları sırasında kabuğun üst düzeylerine kütleli ısı taşıdıkları için jeotermal olanak sağlar. Özellikle strato volkanlar, farklı geçirimsizliğe sahip ürünlerinin ardalanması ve karmaşık iç yapıları ile jeotermal sistemlerin yerleşimine elverişli ortamlar sağlar. Volkanik kayalar, breş ve tüfler, ignimbrit akıntılarının yayıldığı yöreler, hem göremeli olarak sıg magma odalarından türemeleri, hemde bu magmanın bazik olanlara göre çok daha sıcak, daha çok ısı yüklü oluşları ve hemde farklı ilksel geçirimsizliği olan katmanların ardalanması istiflerinden kurulu olduğu için jeotermal sistemlerin oluşmasına elverişli yöreleri sağlar.

Tortul birimler çökelindikleri havzanın niteliğine bağlı olarak farklı geçirimsizliğe sahip ortamların ardalanmasından kurulu ise, jeotermal sistemlerin oluşumu açısından ilginç olabilmektedir. Tortul birimlerin jeotermal sistemlerde

üstlendikleri en tipik işlev bir örtü katmanı oluşturarak ısı kaplanmasına yardımcı olmalarıdır.

Metamorfik kuşakların, başka yerlere göre iki kata kadar daha yüksek ısı akısına sahip olduğu bilinmektedir (Verhogen, 1980) . Özellikle, görel olarak genç, örneğin Tersiyer’de oluşan metamorfizma ortamları, yüksek ısı akısı ile özgündür. Dahası, metamorfizma sonrasında bu masifler hızla yükseldikleri ve aşınma ve sıyrılma faylarıyla tüketildikleri için daha derinlerdeki daha sıcak kesimleri yeterince soğuyamadan yüzeye yaklaşmakta ve ısı gradyanı yükselmektedir. Bu nedenle, bu tür masiflerde görel olarak sığ derinliklerde yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Bu tür kaya ortamları ilksel olarak yeterince geçirimli olmamakla birlikte, masifin yükselmesine eşlik eden sıyrılma fay zonları ve oluşan graben fayları boyunca oldukça yüksek ikincil geçirimsizlik kazanarak jeotermal sistemlerin gelişmesine olanak sağlarlar. Üstelik metamorfik kayaların çoğu, hidrotermal alterasyonlarla geçirimsizleşmekten çok, geçirimsizlik kazanacak şekilde etkilenir. Bu da, metamorfik masiflerde jeotermal sistemlerle daha sık karşılaşılmasının nedenlerinden olmaktadır.

Yeşil kayalar, okyanus sırtlarında oluşmuş ve dalma batma zonlarında değişmiş ve karılmış olmaları nedeni ile ısı kaynakları ile bağı kopmuş, çoğu durumda geçirimsiz ve giderek geçirimsizleşen, tektonik süreçlerden jeotermal sistemlerin oluşmasına hiçte yatkın olmayan yapısal ögeler edinmiş olma özellikleri ile bulundukları yerlerde jeotermal sistemlerle pek karşılaşılmayan kaya türleridir.

Yerkabuğunda bir jeotermal sistemin oluşmasını en dolaysız etkileyen ve yönlendiren olgular yapısal jeoloji olgularıdır. Isı akısının yüksekçe olduğu bir bölgede de bulunulsa, ancak yüksek geçirimsizlik varsa, yani kırıklı ve kırıklı sistemli olarak birbirleri ile bağlantılı zonlar varsa, derinlerdeki yüksek sıcaklıklı zonlardan ısı yüklenip hızla sığlara taşıyan ve bir katman ya da cepteki çevrim hücrelerinde yüksek sıcaklıkların birikmesini sağlayan akışkanlar, gereğince dolaşıp bu işlevlerini yerine getirebilir.

1.2. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, (1) Tekkehamam ve yakın çevresi jeotermal alanlarının jeoloji haritasının güncellenmesi, (2) minerolojik, petrografik ve jeokimyasal çalışma yöntemleriyle jeotermal akışkan-kayaç etkileşimini tanımlamak, (3) jeotermal suların hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal yöntemlerle oluşumunu ve gelişimini incelemek ve (4) jeotermal akışkan-kayaç etkileşimini çerçevesinde jeotermal sistemin oluşumunu modellemektir.

1.3. Çalışma Bölgesinin Jeotektonik Konumu

Bölgesel olarak Türkiye'nin depremselliği, Türkiye ve yakın çevresindeki levha hareketlerinin bir sonucudur. Türkiye ve yakın çevresindeki levhalar kuzeyde Avrasya, güneyde ise Arap ve Afrika levhalarıdır. Türkiye anakara kütlesi tıpkı bir mozaik gibi çok bloğa bölünmüştür. Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Kuzeydoğu Anadolu Fayı (KDAF), Doğu Anadolu Sıkışma Zonu (DASZ), Ege graben sistemi, Kıbrıs-Helenik yayı, Orta Anadolu Bölgesi ve Karadeniz Bölgesi olmak üzere Türkiye'de yedi ana tektonik bölge bulunmaktadır (şengr vd., 1985).

Batı Anadolu Bölgesinde yaklaşık olarak K-G yönlü genişleme tektoniğine bağlı D ve BKB-DGD doğrultulu Büyük Menderes, Küçük Menderes ve Gediz gibi kr havzaları gelişmiştir (Philippon 1910-1915, 1918; Ketin, 1968; McKenzie 1978, Dewey ve şengr 1979 ; Jackson ve McKenzie 1984; şengr 1982, 1987; şengr vd., 1984).

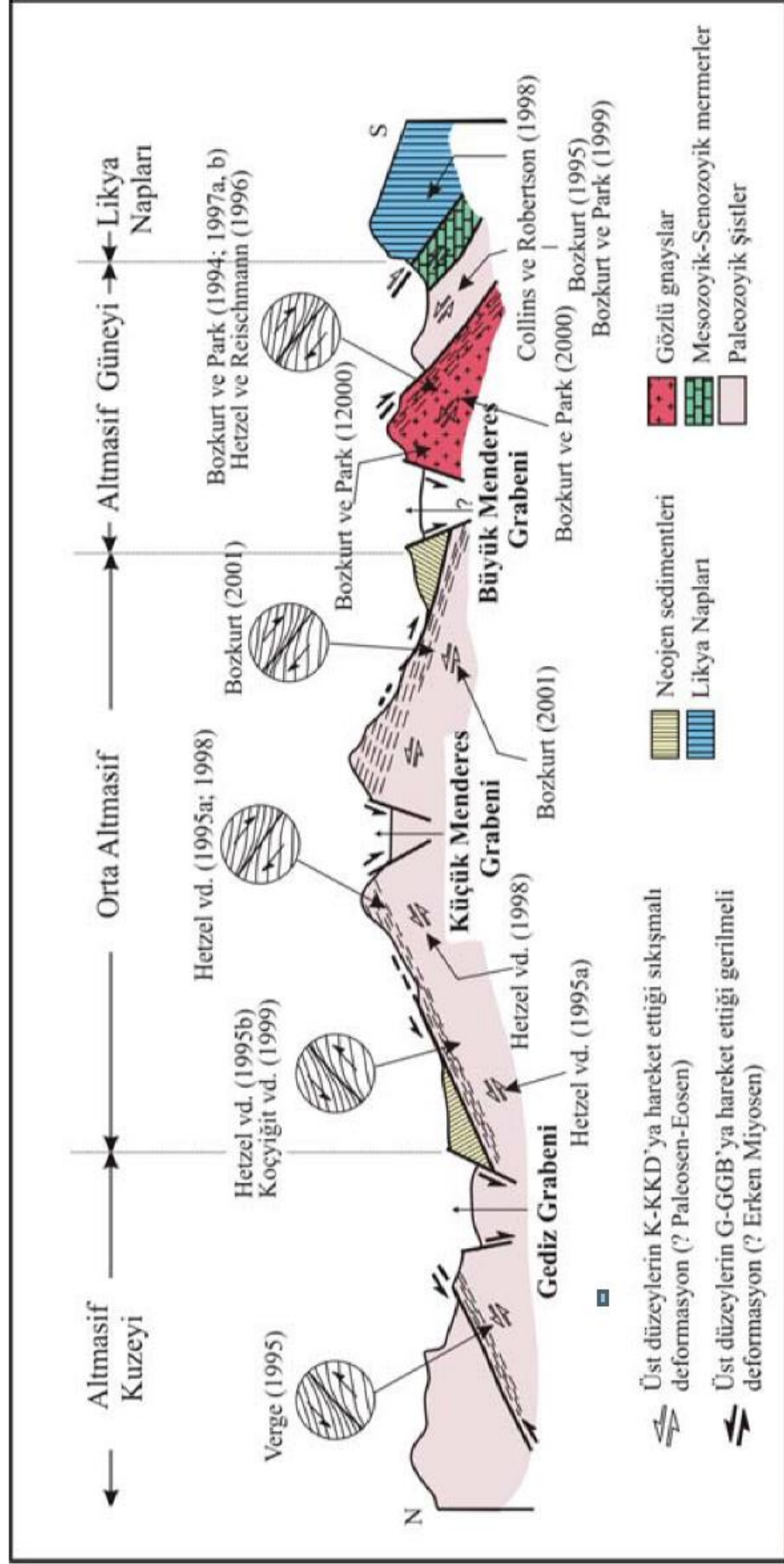
Denizli ve evresi Büyük Menderes ve Gediz kntlerinin kesişim bölgesinin hemen doğusunda yer almaktadır. Babadağ horstunun kuzey kanadında, Büyük Menderes grabeninin güney kenarında yer alan inceleme alanında 5 km'lik bir zon içerisinde, 500 m ile 3 km arasında değişen egemen olarak K50-60B gidişli bir fay demeti bulunmaktadır.

Tekkehamamı (Denizli) jeotermal alanı, Batı Anadolu Bölgesinin Denizli ilinin Büyük Menderes Graben sistemi içinde ülkemizin en önemli alanlarından

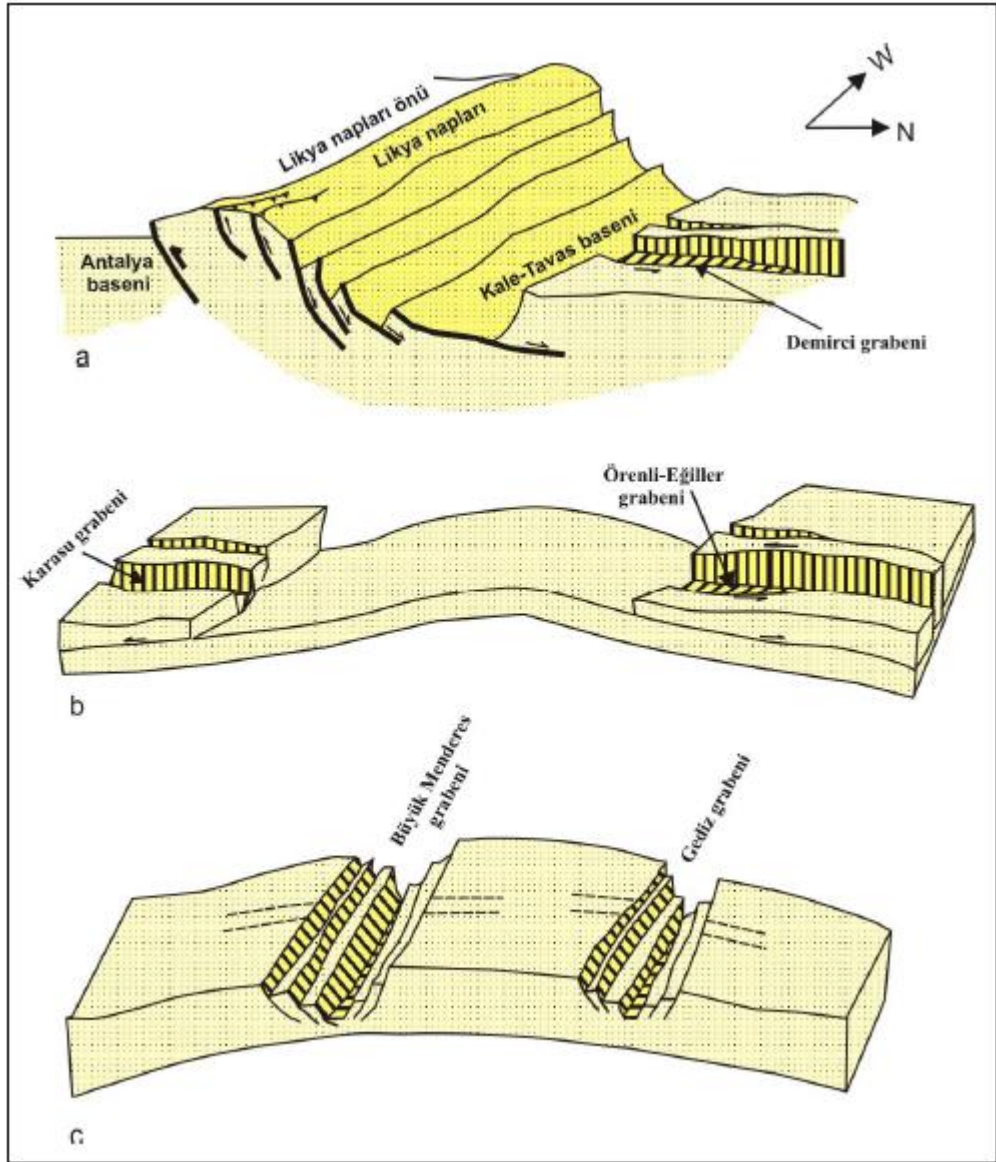
biridir. Araştırma alanı, Büyük Menderes Grabeninin KB kısmında olup Sarayköy ilçesinden 18 km uzaklıkta bulunmaktadır. Tekkehamamı bölgesi 37° 46' 27" K enlemle 29° 05' 15" D boylamları üzerindedir.

Türkiye, Alp-Himalaya dağ kuşağı içinde yer almaktadır. Batı Anadolu'da litosferik gerilimin Alp-Himalaya zonu kıtasal çarpışması ile ilişkin olduğu bölgede lokalize edilmiş gerilme tektoniği hüküm sürmektedir. Batı Anadolu Bölgesi, D-B gidişli sıradağları ve derin sedimanlar ile dolu vadileri ile karakterize edilir. Bölge genç Miyosen başına kadar, kuzey-güney yönünde basınca maruz kalmıştır. Tortoniyen başında, bölgede bir gerilme tektoniği oluşmuş ve kısmi ergimeye uğrayan kabuk gerilmeye bağlı olarak ince ve kırılğan kabuk oluşmuştur (Yılmaz, 1989; Alptekin vd., 1990; Gemici ve Tarcan, 2002). Bu şekilde ülkemizde Batı Anadolu Bölgesinde DB uzanımlı grabenler bulunmaktadır (Şekil 1.2. ve Şekil 1.3.).

Türkiye'nin önemli jeotermal alanlarının çoğu saha bu grabenlerin kenarlarında yer almaktadır. Büyük Menderes grabeni bunlardan biri ve D-B uzanımlı olup Denizli'nin doğusundan başlayarak Ege Denizi içinde devam ederek yaklaşık 200 km'ye ulaşır. Büyük Menderes grabeni, Söke'de 35 km, Nazilli'de 35 km, Denizli'de 40 km, Salavatlı'da 10 km ve Buharkent'te 5 km genişlik sunar (Şimşek, 1988). Kızıldere jeotermal alanı derinliği 500-1000 m arasında değişen sekiz üretim kuyusu ile Türkiye'de ilk elektrik enerjisi üretilen jeotermal santraldir.



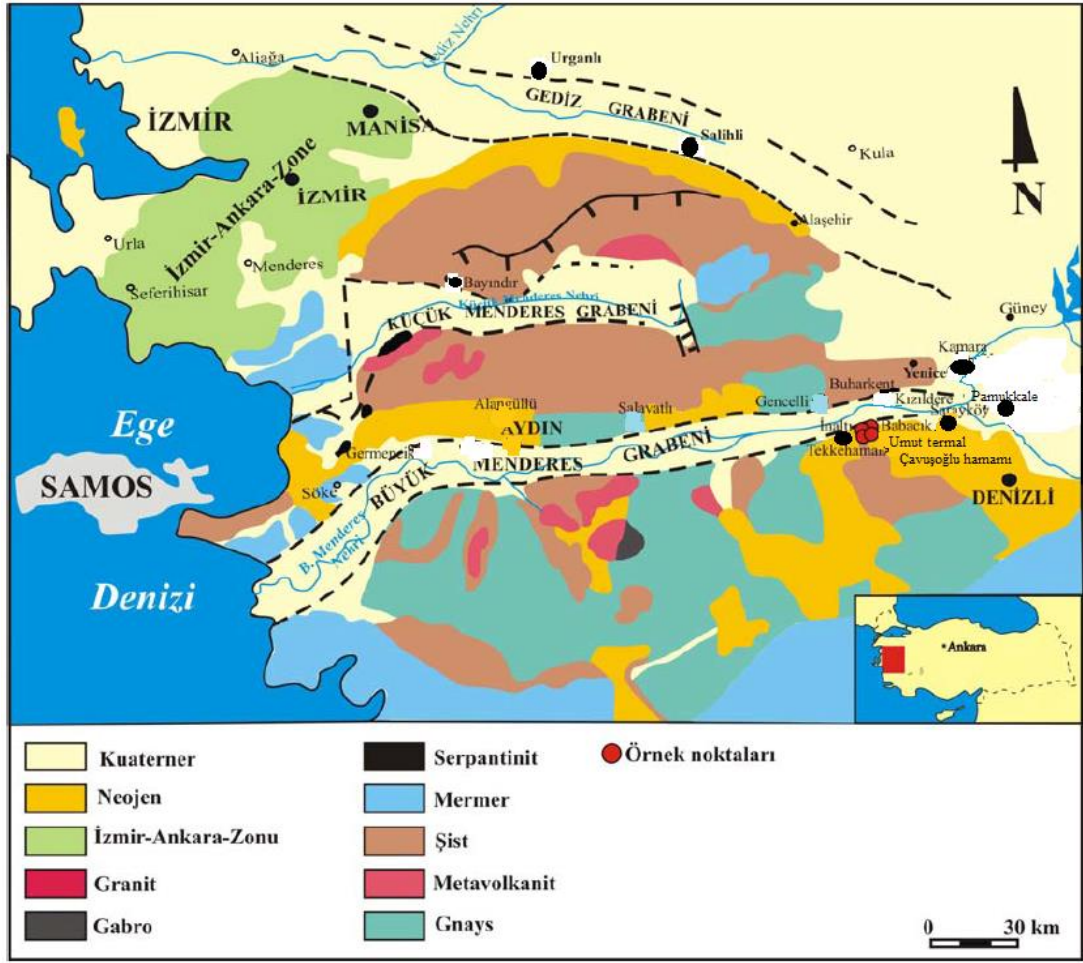
Şekil 1. 2. Alpin sıkışması ve izleyen gerilme deformasyonları ile ilişkili K-G yönlü şematik enine kesit (Bozkurt, 2001)



Şekil 1. 3. Batı Anadolu’da bulunan grabenlerin Erken Miyosen’den günümüze kadar gelişim evrelerini gösteren şematik blok diyagram (Yılmaz vd., 2000)

Menderes bloğu 50 milyon yıl önce Sakarya bloğu ile çarpışmış ve daha sonra yüksek sıcaklık metamorfizması ve granit intrüzyonları meydana gelmiştir (van Hinsbergen vd., 2010). Menderes Masifi’nin ortaya çıkışının ilk aşaması, Geç Oligosen (25 milyon yıl) ile Orta Miyosen (16 milyon yıl) (Seyitoğlu vd., 2004) veya En Genç Oligosen (Purvis ve Robertson, 2005) veya En Son Oligosen-Erken Miyosen (Cavazza vd., 2009) arasında olmaktadır, ya da Geç Oligosen (25 Ma) ve Orta Miyosen (16 Ma) veya Son Oligosen (Seyitoğlu vd., 2004) arasında meydana gelen Erken Miyosen zamanıdır. Agostini vd., (2010). Menderes Masifi

metamorfik kayaçlarının yükselmesini ve böylece ortaya çıkışını graben gerilme tektoniği ve trans-gerilmeli fay sistemlerinin bir sonucu olarak yorumlamaktadır. Bu yüzden Bozkurt vd., (2011) kuzey Menderes Masifinin gerilme tektoniğine bağlı ortaya çıkışı için Geç Oligosen (30 milyon yıl) önermektedir. Cavazza vd., (2011) Ege bölgesini etkileyen gerilme tektoniğinin Menderes Masifinin ortaya çıkmasında bölgesel anlamda önemli rol oynadığını belirtmektedir. Bazı çalışmalarda (i) Erken-Orta Miyosen gerilme tektoniği ve Ege hendeğinin geriye dönüşü ve (ii) Geç Miyosen-Pliyo-Kuvaterner gerilim tektoniği ve Batı Anadolu'da dahan Ege levhasının başlangıcı olmak üzere iki belirli bağlantının olduğunu ileri sürmektedirler. Ege Bölgesi graben sistemi gerilme tektoniğinin zamanlaması (Bozkurt ve Sözbilir, 2004), Ersoy vd., 2010 ve van Hinsbergen vd., (2010) tarafından detaylı olarak tartışılmıştır. D-B doğrultulu olan üç graben Simav, Gediz ve Büyük Menderes masifini bölmektedir (Şekil 1.5.). Batı Anadolu'da graben tipi basenlerin tektonik evrimi epizodik (Bozkurt, 2000; Ersoy vd., 2010) veya darbeli gerilme kuvvetleri (Bozcu, 2010; Purvis ve Robertson, 2004) Geç Senozoyik zamanında kontrol edilir. Bu havzalarda levha içinde oluşan magma sokulumları bulunmaktadır. Yılmaz vd., (2000)'e göre yapılan şematik blok diyagram Batı Anadolu'da bulunan grabenlerin gelişim evrelerini göstermektedir (Şekil 1.3.). (a) Geç Oligosen boyunca Likya Naplarının güneye doğru hareketi ile Kale-Tavas baseni oluşmuştur. (b) Geç Miyosen boyunca K-G yönlü gerilmeler başlamış. Bozdağ horstunun yükselmesi ve ana kırılma fayları bu zamanda oluşmuştur. (c) Geç Miyosen- Erken Pliyosenden (?) sonra, kısa süreli erozyon ile birlikte harekete geçen K-G gerilmeleri altında, D-B uzanımlı graben basenleri oluşmaya başlamıştır. D-B uzanımlı grabenler Üst Miyosen- Alt Pliyosen (?) seviyeleri içeren kayaç birlikleri ve daha eski yapılar ile kesilmiştir (Yılmaz vd., 2000).

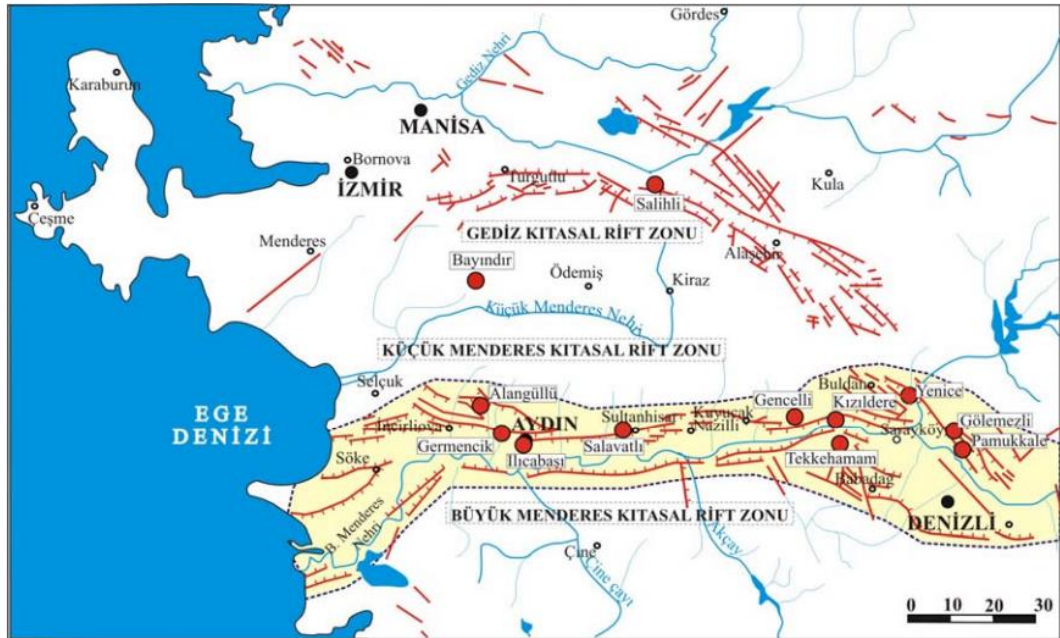


Şekil 1. 4. Menderes masifinin jeolojik haritası ve örnek noktaları (Şengör, 1982 ve Dora vd., 1995; Özgür, 1998)

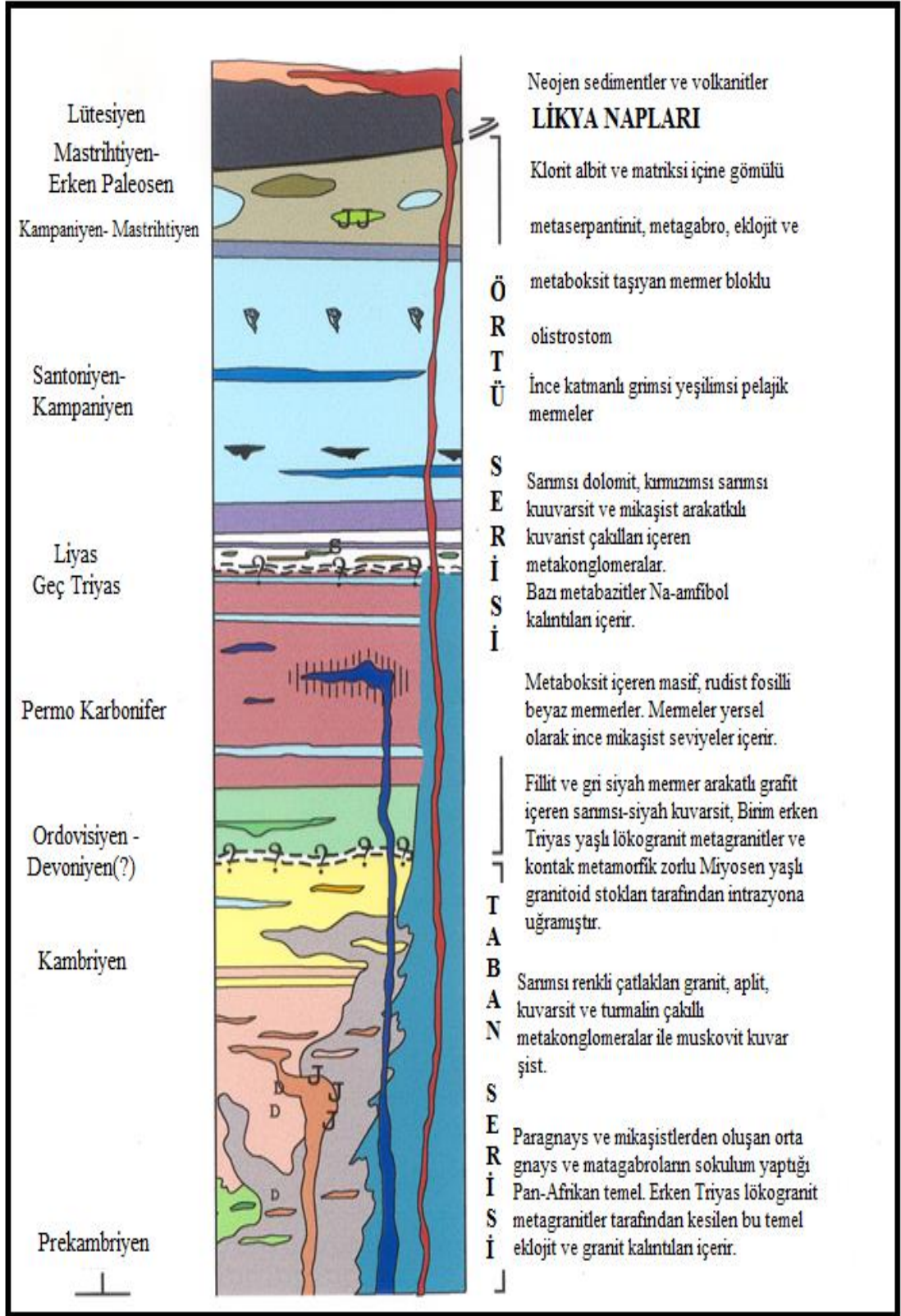
Menderes masifi içindeki litostratigrafik birimler: Candan vd., (2001) tarafından; (i) Pan-Afrikan temeldeki çekirdek serisi ve (ii) Paleozoyik-Erken Tersiyer metasedimentlerini içeren örtü serisi olmak üzere iki tektono-metamorfik birime ayrılırlar. Prekambriyen-Kambriyen yaşlı olan Pan-Afrikan orojenezi ile ilişkili çok fazlı deformasyon ve metamorfizmaya sahip “çekirdek serisi” (Oberhansli vd., 1997; Candan ve Dora 1998; Dora vd., 2001); gözlü gnayslar, metagranitler, yüksek dereceli şistler, paragnayslar ve eklojit kalıntıları içeren metagabrolardan oluşur (Şengör vd., 1984; Satır ve Friedrichsen, 1986; Candan, 1995; 1996; Candan vd., 1998; 2001; Oberhansli vd., 1997; 1998) (Şekil 1.4.). Masifin çekirdeğinde en fazla egemen olan ve en fazla yayılıma sahip litolojiyi oluşturan gözlü gnayslar; iyi gelişmiş milonitik foliasyon ve K-G yönlü mineral

uzaması ile karakterize edilen blastomilonitlerden meydana gelir (Bozkurt ve Oberhansli, 2001).

Paleozoyik-Erken Tersiyer yaşlı örtü kayaçları altta Ordovisiyen (?) - Permo-Karbonifer yaşlı düşük-orta metamorfizma dereceleri fillitler, kuvarsitler ve mermerlerden oluşur (Candan vd., 2001). Erken Triyas yaşlı lökogradit granitlerin bu kayaçlara sokulum yaptığı bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Şengör vd., 1984; Reischmann vd., 1991; Dannat ve Reischmann, 1998; Koralay vd., 1998). Bu birimlerin üzerine gelen Geç Triyas-Erken Tersiyer yaşlı kayaçlar, metaboksit içeren platform tipi mermerler ve metaolistrosromlardan oluşur (Candan vd., 2001) (Şekil 1.5 ve Şekil 1.6.).



Şekil 1. 5. Büyük Menderes, Küçük Menderes ve Gediz graben rift zonlarında gelişen drenaj sistemleri, ana nehirler ve tektonik hatlar (Şaroğlu vd., 1992)



Şekil 1. 6. Batı Anadolu'nun stratigrafik kesiti (Özgür ve Karamandere, 2015)

2.KAYNAK BİLGİSİ

Daha önceden gerçekleştirilen araştırmalar Tekkehamam (Denizli) ve yakın çevresinde jeolojik, hidrojeolojik ve jeokimyasal amaçlı araştırmalar yapılmıştır ve bu çevrede jeotermal suların ve yörenin jeotektonik oluşumuna genel olarak bir açıklama getirmeye çalışmışlardır. Bu konuda yapılan çalışmalar hem yöreye ait ve hem de ülkemize ait olmak üzere özetlenmiştir.

Menderes Masifinin jeolojik gelişimi konusunda yapılan araştırmalar geçen yüz yılın başına kadar dayanmaktadır. Masifle ilgili olarak İlk olarak 1840 yılında Hamilton tarafından başlatılan bu çalışmalar günümüzde de yoğun bir şekilde sürmektedir. Bölgede bugüne kadar yürütülen çalışmalar daha ziyade jeoloji ve tektoniğe dayalı olup, son zamanlarda yapılan araştırmalarda kıtasal rift zonlarında gelişen sıcak su kaynaklarının oluşum koşullarına dair çeşitli yaklaşımlarda bulunulmuştur.

Denizli ve yöresinde, günümüze dek çok sayıda araştırmacı, yörenin jeolojisi petrografisi, bölgedeki sıcak su kaynakları, traverten oluşumları ve bölgenin hidrojeolojisi hakkında pek çok araştırma ve incelemelerde bulunmuştur.

1968 yılında MTA tarafından Denizli-Kızıldere jeotermal sahasının prospeksiyonu yapılmıştır. 1984 yılında Türkiye’de ilk jeotermal enerji üreten santral Kızıldere’de 21 MW kapasiteyle üretime geçmiştir. MTA Genel Müdürlüğü, Kızıldere jeotermal alanı ve çevresinde bulunan sıcak suların kullanımı amacıyla 1964 yılında başlattığı çalışmaları günümüzde halen sürdürmektedir. Söz konusu santral günümüzde özelleştirilerek elektrik üretim kapasitesi yükseltilmiştir.

Bilgin (1978), Bölgede Menderes Masifi'nin en yaşlı kayaçları olan ve bölgesel metamorfizma ürünü olarak ortaya çıkan mikasistlerin jeolojisi, mineraloji petrografi ve jeokimyası üzerinde ayrıntılı çalışmalar yapılmıştır.

Bozkurt vd. (1995), Menderes Masifindeki gözlü gnaysların metasedimenter kayaçlarla örtülmediğini, aksine bu kayaların Miyosen yaşlı granitler olduğunu ve metasedimenter kayaçlarla kesme ilişkisi gösterdiğini, jeokimyasal analizlere bağlı olarak gözlü gnaysların kökenini granitoid olarak açıklarlar. **Bozkurt ve Oberhansli** (2001), ise saha verileri, petrolojik ve radyometrik çalışmalara dayanılarak gözlü gnaysların farklı magmatik evrelerde oluşmuş farklı intruzyonları temsil ettiğini belirtir. Gözlü gnaysların kökeni, kalk-alkalin, per-alüminyumlu, S-tipi, geç-post tektonik, turmalinli ve iki mikalı lökogranitlerdir.

Karahan (2009), Bölgedeki gerilme tektoniğinin etkisiyle kuzey-güney yönlü açılma ve Menderes Masifi bloğunun sürekli yükselmesi sonucunda doğu-batı yönlü grabenleşme oluşmuş ve basamak fay sistemi gelişmiştir. Menderes grabeninde kıtasal kabukta incelmeye bağlı olarak yüzeye yaklaşan ve zayıflık zonları boyunca yükselen magma faaliyetleri sistemin ısı kaynağını oluşturur. Graben faylarından çok derine inenler, litosferin üst kısımlarından ısı transferi yaparak hazne kayayı ısıtırlar. Menderes masifi içindeki gabro stokları granit pegmatit dayklarının bulunması derinde yüzeye yakın yerlerde ısını kaybetmemiş asit magmatik kayaçların bulunduğunu göstermektedir.

Keskin (1972), Kızıldere jeotermal sahasında jeokimyasal analizler yaparak bölgede hazne kaya sıcaklığı 260 °C olan üçüncü bir rezervuar kayacın varlığından bahseder.

Möller vd., (2004), REY (REE ve tytrium) elementleri ile yaptığı çalışmada Kızıldere ve çevresindeki (Tekkehamam, Babacık ve Gölemezli) jeotermal sularının derin yerleşimli akiferlerle ilişkili olduğunu ve Pliyosen sedimenter kayaçları ile etkileşimin çok düşük olduğunu belirtir. Bu alanda temel kayaçlardaki mermerler ve Pliyosen kireçtaşları sıcak sularda önemli akiferi temsil eder. Temel kayaçlarda bulunan mikaşist ve mikaşist arakatmanlı litolojiler REY kontrol eden en olası kaynaktır. REY bolluğuna göre Kızıldere ve çevresinde CO₂ gazınca zengin yüksek debi ve yüksek sıcaklığa sahip jeotermal sular yaklaşık 230° C sıcaklıkta baskın olarak mikaşistler tarafından kontrol edilir. Sular bu kayacın altındaki gnayslara kadar ulaşmaz.

Öngür (2007), Menderes masifi özgün jeolojik yapısı ve evriminin yanında, çok sayıda genç grabenle kesilmiş oluşu ilede ülkemizde en yaygın ve yüksek akılı ısı anomalisini temsil etmektedir. Sahaların tümü orta-yüksek entalpili, 120-240°C sıcaklıklı rezervuarlarda gelişmiştir. Rezervuarlar genellikle metamorfik temel farklı litolojilere sahip kaya birimlerinde yerleşmiştir. Temelin tipik bir özelliği, aslında alt katmanlarda yer alan gnaysların, bir sürüklenme zonunun üzerinde aktararak kesitin üst düzeylerine yerleşmiş olmasıdır. Çok incelenen sahalarda görüldüğü kadarı ile grabenin içinde, bu temel üzerinde değişik litolojilere sahip miyosen yaşlı tortullardan oluşan bir kesit bulunmaktadır ve bu istifin içinde sığ jeotermal rezervuarlar gelişebilmiştir. Bu jeoloji çatısı içinde, Büyük Menderes Grabeni'nde Germencik, Aydın, Salavatlı, Kızıldere ve Denizli jeotermal alanları bulunmaktadır. Büyük Menderes Grabeninde jeotermal sistemlerin yerleştiği zonlar güncel D-B grabenlerinin K yarılarında, Miyosen grabenlerinin gömülü verev fay zonları olmaktadır. Bu bölgedeki sular, çok az ayrıcısı dışında alkali bikarbonat bileşimli, çokça CO₂ içerikli, meteorik kökenli suların yan kaya ile etkileşimi sonunda olgunlaşmış, yükselirken sığ sularla değişik oranlarda karışmış, orta (entalpili) ısı yüklü 120-240°C arasında değişen rezervuar sıcaklığına sahip akışkanlardır.

Özdemir ve Tezelli (2008) , Batı Anadolu'da incelenen jeotermal sahalara; Afyon, Aydın, Balıkesir, Denizli, İzmir, Kütayha, Manisa, Muğla ve Uşak jeotermal sahalardır. Bu sahalardaki su kompozisyonlarının genel eğilimi ise HCO₃-Na ve Cl-Na içerikleri fazla sulardır. Batı Anadoludaki suların genellikle Na+K ve HCO₃ karakterli oldukları görülmektedir. Bunun sebebi ise hazne kayayı oluşturan Mesosoyik yaşlı kireçtaşları, Veojen volkanosedimanları, kuvars ve başkalaşım oluşmuş mermerlerdir. Bu haznekayalarla etkileşime giren sular karbonatça zenginleşmektedir. HCO₃-Na zenginleşmesinin en çok gözlemlendiği bölgelerin Denizli jeotermal sahalara ait olduğu söylenebilmektedir. Bölgedeki yüksek orandaki bikarbonattan dolayı traverten oluşumları bunun bir kanıtıdır.

Özgür ve Pekdeğer (1995), $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ve ^3H izotop verilerine bağlı olarak yürüttükleri çalışmada, Kızıldere sahasında yüzeylenen sıcak suların meteorik kökenli olduğunu, bölgenin yoğun olarak su-kayaç ilişkisinden etkilendiğini

ifade etmişlerdir. **Özgür ve Pekdeğer** (1998), kıtasal rift zonlarındaki tektonizmanın etkinliğine bağlı olarak meteorik suların güncel sub-vulkanik aktiviteyle ısındığını belirtmiştir. Yüksek sıcaklık ve su-kayaç ilişkisine bağlı olarak masifteki kristalli kayaçlarla reaksiyona girdiğini, magmatik CO₂ ve H₂S gaz boşalımı ile reaksiyonun hızlandığını belirtirler. Çalışmada hidrolik basınç etkisiyle, geçirimli sedimanter kayaçlar boyunca yükselerek, su-kayaç ilişkisinin sıcak suların kimyasal ve izotop karakteri üzerinde baskın rol oynadığı ortaya koyulmuştur. **Özgür** (1998), Menderes Masifinde aktif ve pasif jeotermal sistemlerde yaptığı çalışmada jeotermal sistemleri tektonik ve volkanizma yönünden detaylı incelemiştir. Bu çalışmada jeotermal sulardaki yüksek bor kökeninin su-kayaç etkileşimi yolu ile masifte yüzeyleyen kayaçlar olacağını, diğer yandan CO₂, HS⁻ ve NH₃⁻ gaz çıkışlarının magmatik bir kaynağı işaret edebileceğini belirlemiştir. **Özgür vd.**, (1998), Kızıldere, Salavatlı ve Germencik jeotermal alanlarında meteorik suların ısınmasını iki ayrı nedene bağlar, (i) Menderes Masifi kıtasal rift zonlarında kalkalen bazik ve ortaç volkanik kayaçları içeren intrüzif kayaçların Orta Miyosenden başlayarak Kuvaternere kadar aktif volkanizmanın geliştiği birçok çalışma ile ortaya konduğu dolayısıyla mantodan gelen bazik volkanik kayaçları karakterize eden yüksek orandaki manto kaynaklı helyum elementinin Kızıldere ve çevresindeki jeotermal akışkanlar ile etkileşimde olduğunu belirtir. Bu nedenle Büyük Menderes kıtasal rift zonunun derinliklerinde bir magma odasının varlığının kabul edilebilir olduğunu ifade eder. **Özgür** (1998) ve **Yaman** (2005), Tekkehamam jeotermal suları Büyük Menderes graben zonunun güney kanadında ve Kızıldere jeotermal alanının kuzeyinde yer alır. Bu Tekkehamam jeotermal alanında Kükürtlü sıcak su çıkışı, Tekkehamam sıcak su çıkışı ve Babacık pınarı adlı sıcak su çıkışları bulunmaktadır. Burada su çıkışları 62°C ile 90°C arasında değişmektedir.

Şimşek (1985), Kaya statigrafik birimleri olarak, Paleozoyik Menderes metamorfikleri ve Senozoyik karasal gölsel çökelleri bulunur. Bölgede graben ve horstları oluşturan faylar genellikle birbirlerine paralel, normal atımlıdır. Menderes masifindeki grabenlerin oluşumunu açıklayıcı bir model geliştirilmiş, jeotermal olanaklar bu model üzerinde yorumlanmıştır. Pliyo-kuvaternerde, bölgesel tektonik etkilerle grabenleşme başlamış. Günümüzde de devam

etmektedir. Kayıt edilmiş ve bilinen depremlerde bunu doğrulamaktadır. Pliyosen, Sazak formasyonu içindeki kireçtaşları birinci, Menderes metamorfizmlerinden İğdecik formasyonunun mermer kuvarsitist ardalanması ikinci hazne kayayı oluşturmaktadır. Pliyosen birimlerinden, Kızılburun, Kolonkaya ve yerel olarak Sazak formasyonu örtü kayadır. Geniş beslenme olanağı vardır, özellikle yüksek geçirimli fay zonları, jeotermal hazne kayaların beslenmesini sağlamaktadır. Bölgede gnays-kuvarsit birimi üçüncü haznekaya olabilecek niteliktedir. Bölgede Kızıldere, Tekkehamam, Buldan ve Yenice alanlarının önemli jeotermal enerji potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Kızıldere jeotermal sahasında rezervuardaki jeotermal akışların ana graben fayları boyunca yükseldikleri ve rezervuar içinde graben ortasına doğru hareket ettikleri belirlenmiştir. Bu modele dayanarak üretim ve reenjeksiyon alanları önerilmiştir. Jeotermal alanlardan, elde edilecek jeotermal akışkanın, başta elektrik üretiminde olmak üzere sera ve kent ısıtmacılığında, dokuma endüstrisinde, turizm ve sağlık tesislerinde, CO₂ (kurubuz) ve diğer kimyasal maddelerin üretiminde kullanılması olanaklıdır. Jeotermal alanlarda entegre tesislerin kurulması halinde, jeotermal enerji yurdumuz için en ekonomik enerji kaynağı olacaktır. Türkiye'nin aktif tektonik bir kuşakta yer alması , genç graben ve volkanik etkinliğin bulunması, jeotermal enerji potansiyelinin büyük olabileceğini göstermektedir. Bu konuya dahil ilk önemli araştırma Denizli-Kızıldere ve Tekkehamam jeotermal alanlarında başlamıştır. Bu alanlarda, ilk jeolojik, jeofizik ve jeokimyasal çalışmalardan sonra 17 derin sondaj gerçekleştirilmiş ve alanda iki hazne kaya saptanmış, bunların birincisinde 198°C, ikincisinde ise 213°C sıcaklıkta jeotermal akışkan bulunmuştur. Alanda jeotermal akışkandan pilot elektrik üretimi ve diğer kullanım alanlarının araştırılması yapılmıştır. Halen yılda 160.000.000 kW/h'lik üretim yapacak 20 MW kapasiteli elektrik santralinin yapımı tamamlanmış olup, santral 1982 de devreye girmiştir.

Yaman (2005), Büyük Menderes kıtasal rift zonunda Germencik, Ilıcabaşı, Bozköy ve Salavatlı sahaları hidrojeokimyasal olarak aynı süreçlerden etkilenmiştir. Bu jeotermal sahalarda derin dolaşimli meteorik suları etkendir ve su-kayaç etkileşimi sonucunda yan kayacı oluşturan meta-pelitler-orta/para gnays

kökenli kayaçların etkisi ile sıcak su bileşiminin değişebileceği izlenmiştir. Ayrıca Tekkehamam, Yenice ve Kızıldere sahaları derin dolaşimli olup Tekkehamam ve Yenice alanında soğuk su girişi daha etkindir. Bu sahalar içinde Kızıldere jeotermal alanı, Tekkehamam ve Yenice sahalarına göre daha az oranda meteorik su girişimine maruz kalmıştır. Kızıldere'ye göre Tekkehamam ve Yenice sıcak sularının Mg^{2+} iyonuna zenginleşmesi yan kayanın dolomitik etkisine bağlı olarak gelişmiş olmalıdır. Gölemezli alanı, Tekkehamam, Yenice ve Kızıldere sahalarına göre soğuk yer altı suyu karışımının en fazla olduğu sahadır. Nitekim Gölemezli sahasının litolojik özellikleri dikkate alındığı zaman daha geçirimli özellik taşıdığı gözlenir. Pamukkale sahası ise Gölemezli sahasına nazaran yeraltısuyu/meteorik su girişiminin en fazla olduğu alandır. Pamukkale ve Gölemezli sahaları derin odaklı olmayıp, soğuk suların etken olduğu bir alanı temsil eder. Bu sahalarda Ca^{2+} içeriği belirgin olarak yüksektir. Pamukkale jeotermal alanına meteorik su girişi fazladır ve bu sular jeotermal sulara oldukça sığ derinliklerde karışır. Bu veriler ışığında Tekkehamam, Yenice ve Gölemezli benzer yan kaya litolojik özelliklerden etkilenmiş sıcak su çıkış noktaları olmalıdır. Araştırmacı, Tekkehamam jeotermal alanı, Kızıldere jeotermal alanının güneyinde, Büyük Menderes kıtasal rift zonu güney kenarında yer alır ve jeolojik özellikleri Kızıldere jeotermal alanına benzerlik sunar. Tekkehamam ve çevresinde Uyuz hamamı, İnaltı Kaplıcası ve Babacık pınarı sıcak su çıkışları yer alır. Büyük Menderes kıtasal rift zonunda Denizli ilinde bulunan Yenice, Kızıldere ve Tekkehamam sahalarında jeotermal sular $Na^{+}-SO_4^{2-}-HCO_3^{-}$, Pamukkale ve çevresindeki sıcak sular $Ca^{2+}-Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^{-}$ ve Gölemezli $Na^{+}-Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^{-}$ su karakterlidir.

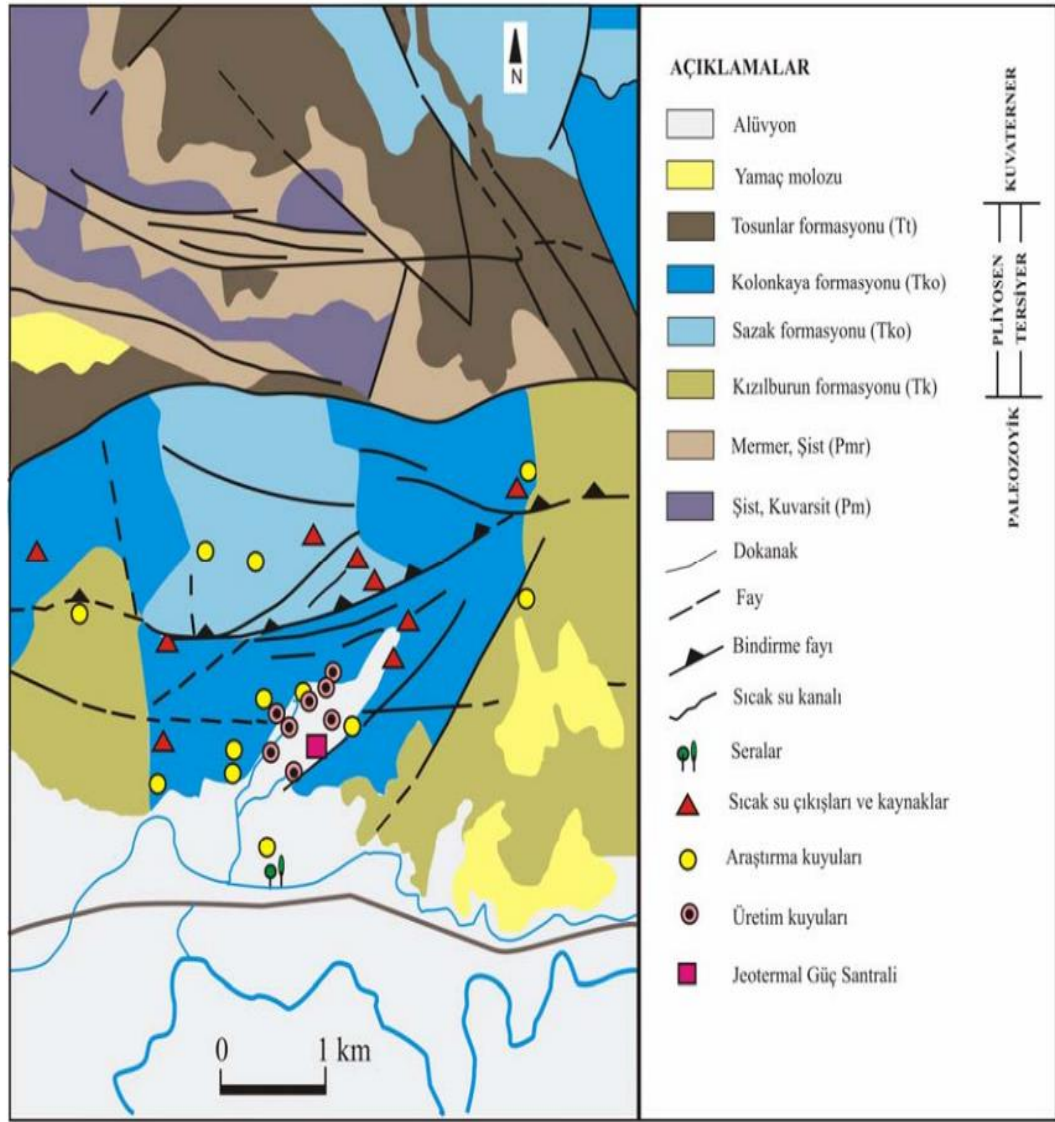
Yıldırım ve Güner (2002), Büyük Menderes Grabeninin Kızıldere, Tekkehamam, Göremezli, Karahayıtlı, Pamukkale kesimlerinde değişik litoloji ve topografyalardan derine süzülerek, bölgede neotektonik baskı rejimi ile gelişen basamak faylarla ısınıp yükselen yada sondajlarla çıkartılan, değişik tipte sular bulunmaktadır. Suları gruptandırmak ve sistem hakkındaki bilgileri geliştirmek için çeşitli kimyasal analizler yanında, alandaki sulara $\delta^{18}O$, δ^2H , δ^3H , çözünmüş sülfat iyonunda (SO_4) $\delta^{34}S$ ve $\delta^{18}O$ izotop analizleri yapılmıştır. Sığ dolaşimli soğuk su kaynaklarının döteryum yerleri korele edilerek termal

suların beslenme yükseklikleri belirlenmiştir. Bu hesaplamalar, Kızıldere-Tekkehamam termal sularının 1300-1900 m. Kotları arasında, Pamukkale-Gölemezli termal sularının ise 1100-1400 m. Kotları arasında beslendiğini göstermektedir. Topografik yapı ve fiziko-kimyasal temellere göre A'dan G'ye kadar 7 değişik tipte hidrojeokimyasal karakterle sınıflandırılan bu sular, çalışma alanında bulunan 242 sıcaklıklı Kızıldere A tipi Na-HCO_3 'lu ($<90 \text{ TDS} < 130 \text{ meq/l}$) termal suları ile B tipi Ca-HCO_3 ($\text{TDS} < 30 \text{ meq/l}$), C tipi Ca-SO_4 ($\text{TDS} - 110 \text{ meq/l}$) ve D tipi Na-SO_4 'lu ($\text{TDS} - 70 \text{ meq/l}$) suların çeşitli oranlardaki karışımlarından oluşmaktadır. Tritiyum izotopu değerleri, alandaki termal sular için 50-75 yıldan fazla sirkülasyon zamanları vermektedir. Çalışma sonuçlarına göre alanda, kalsit-anhidrit çözünmeleri ve silikat hidrolizleri en belirgin su/kayaç reaksiyonları olarak görülmektedir. Sığ yer altı sularıyla karışım, kondaktif yolla ısı kaybı, manto kabuk ve atmosferik gazlarla reaksiyon, derin yeraltı su sirkülasyonunu etkileyen en önemli proseslerdir.

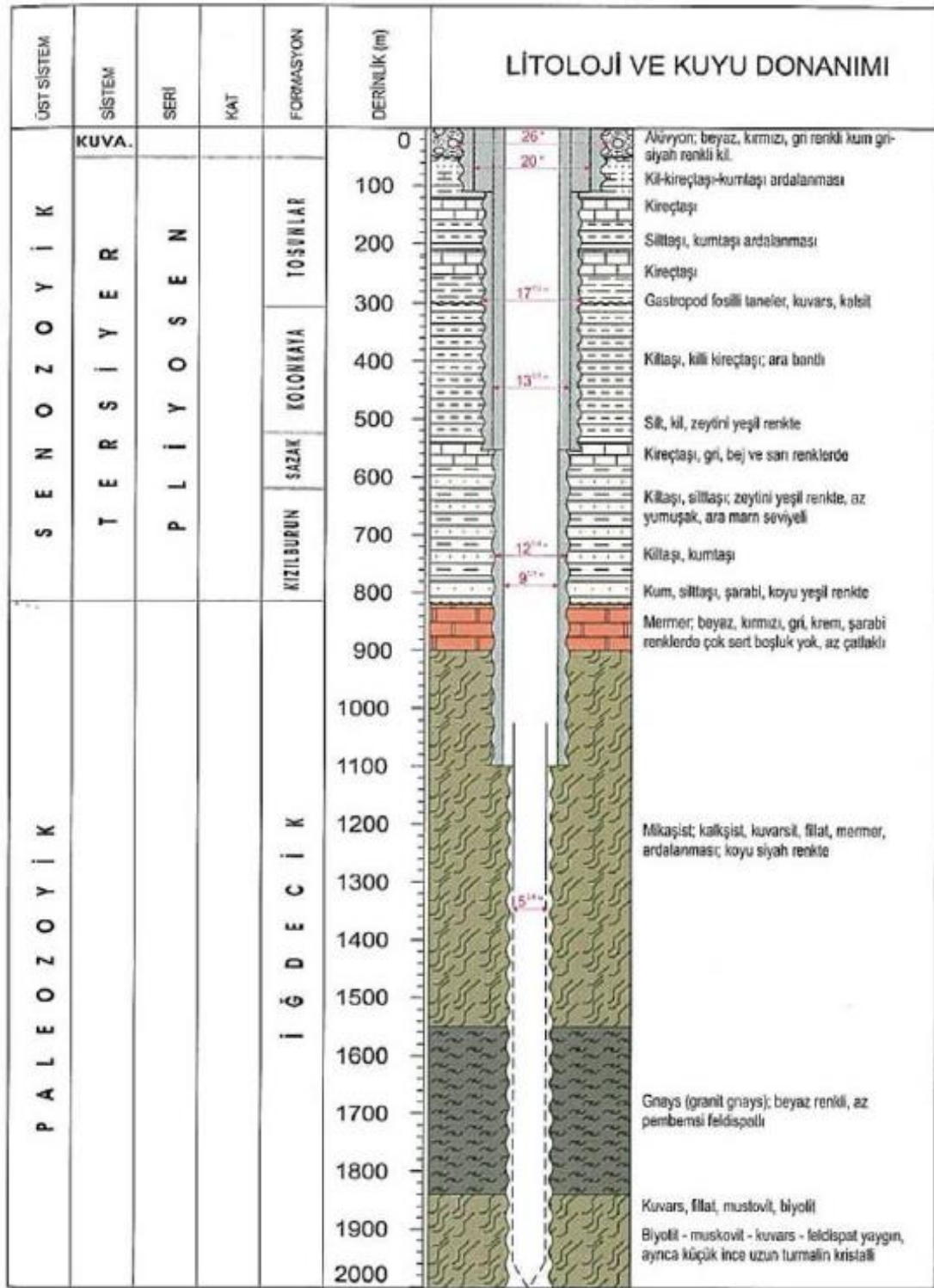
3. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

3.1. Tekkehamam (Denizli) ve Yakın Çevresinin Jeolojisi

Tekkehamam (Denizli) jeotermal alanı, jeolojik olarak Prekambriyen ve Kambriyen yaşlı metamorfik (orta ve para gnayslar) ve Pliyosen yaşlı sedimanter kayalardan oluşur (Şimşek, 1985) (Şekil 3.1.). Temelde yer alan Paleozoyik yaşlı Menderes metamorfikleri gnays, mikaşist ve birbirleriyle geçişli mikaşist, kuvarsit ve mermer içerikli iğdecik formasyonundan oluşur (Şimşek, 1985; Özgür, 2001). Stratigrafik olarak sırasıyla Kızılburun formasyonu (çakıltası, kumtaşı, kiltası), Sazak formasyonu (kireçtaşı, silttaşı, marn), Kolonkaya formasyonu (marn, kumtaşı, kireçtaşı, silttaşı) ve Tosunlar formasyonu (çakıltası, kumtaşı, kireçtaşı) istifinden oluşan Tersiyer çökelleri metamorfiklerin üzerinde uyumsuz olarak çökelmiştir (Şekil 3.2.). Tüm birimler Kuvaterner yaşlı alüvyon ve travertenlerce örtülür. Batı Anadolu tektonik yapısı içerisinde değerlendirilen sahada horst-graben sistemi çok evreli ve yoğun tektonik hareketlerle oluşmuştur.



Şekil 3. 1. Kızıldere ve çevresindeki jeotermal alanların jeolojik haritası (Şimşek, 1985 ve Özgür, 1998)



Şekil 3. 2. Çalışma alanına ait sütun kesit (Alpman, 1963)

(i) İğdecik formasyonunda, bulunan kalın mermer seviyeleri genellikle şistlerin en üst seviyelerinde şistlerle ve kuvarsitlerle ardalanma sunar. Mermerler genellikle koyu gri ve açık renkli, iri kristalli, mika pullu, bol eklemli, ince-orta belirgin katmanlıdır (Şimşek, 1985; Şekil 3.3.). Temeldeki metamorfik kayalar, Pliyosen yaşlı ve dört farklı litolojiye ayrılan sedimanter kayaçlar ile üstlenir (Şimşek, 1985).

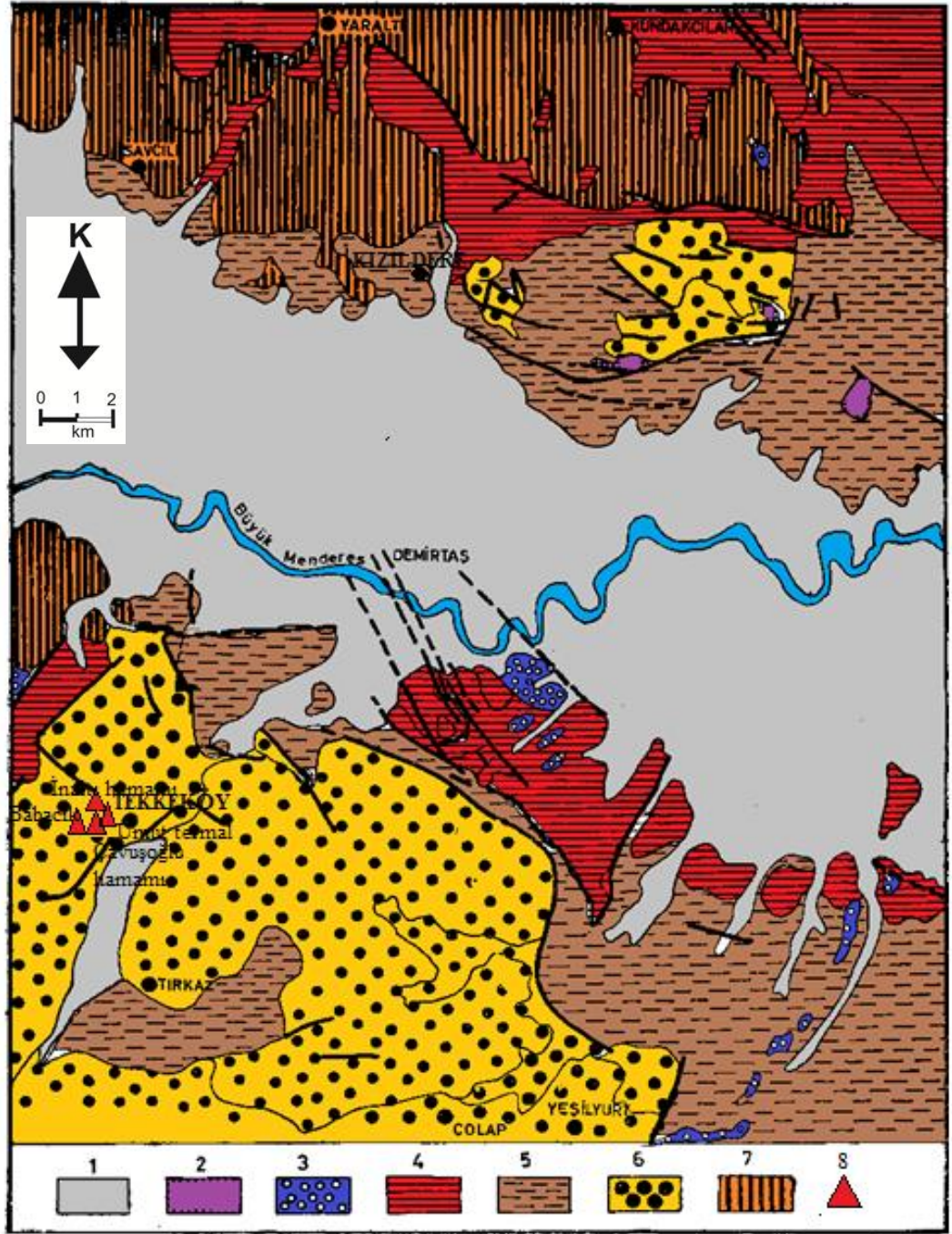
(ii) Kızılburun formasyonu, masif üzerine uyumsuzlukla gelir. Formasyonu kalınlığı 0-300 m olup farklı litolojik özellikler sunar (Şimşek, 1985). Formasyon adını Kızılburun Tepe'den almaktadır. Kızılburun formasyonun üst seviyelerinde tane boyu inceler ve karbonat miktarı artar (Göktaş, 1990). Kızılburun formasyonu tabanda kalın, kızıl-kahve renkli taban çakıltası ile başlar ve kumtaşı, miltaşı, kıltaşı ardalanması ile devam eder. Kızılburun formasyonu yüksek kil içeriğinden dolayı, sıcak sular için iyi bir örtü kaya niteliğindedir. Kızılburun formasyonu ile düşey yönde geçişli Erken Pliyosen yaşlı Sazak formasyonu gelir (Şimşek, 1984).

(iii) Sazak formasyonu, altta kıltaşı, kumtaşı ve konglomera ardalanması, silisifiye marn, beyaz sarımsı marn ve gölsel kireçtaşlarından oluşur. Kıltaşı, kumtaşı ve çakıltası ardalanması dar bir alanda yüzeyler. Marnlar sarımsı ve boz renklerde ve gastropod içeriklidirler. Gölsel kireçtaşları ise beyaz, kırıklı, orta kalın tabakalı olup alg ve gastropod fosilleri içerir (Özler, 1996). Sazak formasyonu karbonat çökellerinin fazla olduğu düşük enerjili bir göl ortamında çökelmiştir (Taner, 1974). Adlanma ilk kez Şimşek (1984) tarafından kullanılmış olup, formasyon adını Sazak Köy'ünden almaktadır. Sazak formasyonu kırıklı, çatlaklı tektonik yapısından dolayı Kızıldere jeotermal alanında -800 m derinlikte ve 198°C sıcaklığa sahip birinci sığ jeotermal sahayı oluşturur (Şimşek, 1984). Akköy-Gölemezli'de, Arpaalanı Tepe, Kartmak Tepe kuzeydoğusu, Kocadüz Tepe ve güneyinde, 321 rakımlı tepede, Yalnızarmut mevkiinde ve Gölemez Tepe ile Ümmet Tepe'de yayılım göstermektedir (Şengün, 2011). Sözbilir (1995) formasyonun yaşının Geç Miyosen-Erken Pliyosen olabileceğini belirtmektedir.

(iv) Kolonkaya formasyonu, marn, silttaşı, çakıllı kum ve zayıf tutturulmuş kumlardan oluşmaktadır. Formasyon tipik olarak fan delta özelliklerinin yansıtmaktadır, özellikle orta taneli, zayıf tutturulmuş kumlar, silttaşları ve marnlar içerisinde çok sayıda yumuşak-çökel deformasyon yapısına rastlanmaktadır. Bu yapılardan yük kalıpları, damla yapıları, alev yapıları, kırıntılı sokulumlar (dayklar), bozulmuş tabakalar, slump yapıları ve sinsedi-manter faylar formasyonda gözlenmektedir (Topal, 2006). Sazak formasyonu-nun adlanmasını ilk kez Şimşek (1984) yapmıştır. Formasyon adını Kolonkaya Tepe'den almaktadır. Kolonkaya formasyonu, Akköy-Gölemezli'de; doğuda Kavakbaşı Köyü'nün doğusunda, Arpaalanı Tepe'nin batı yamacında, Senekçi mahallesinde, Kartmak Tepe batı yamacında, batıda Gölemezin Tepe'nin batı-sındaki tepelerde, Buldan Yenicekent'te ise Kale Tepe çevresinde yayılım gös-terir (Şengün, 2011).

(v) Tosunlar formasyonu, başlıca alacalı kırmızı ve sarımsı çakıltası, kumtaşı ve fosilli kiltaşından oluşan formasyonu inceleme alanının batısında yaygın olarak görülür. Çakıl taşının bileşen taneleri gnays, çeşitli şist, kuvarsit, mermer, Mesozoyik yaşlı kireçtaşları, Kızılburun, Sazak ve Kolonkaya formasyonları' ait çakıl ve bloklardır. Birim az pekleşmiş olup, taneler kötü-iyi arasında yuvar-laklaşmıştır (Şengün, 2011). Katmanlanma belirsiz ya da az belirgindir. Kumtaşı ve silttaşlarının rengi biraz daha koyu ve kırmızımsı sarımsı tondadır. İnce orta katmanlı olan kumtaşları ve silttaşları içinde çakıltası düzeyleride içerir. Birimin belirgin özellikleri düşük kotlarda bulunması, az pekişmiş, dayanımsız olmaları ve belirsiz katmanlanma sunmalarıdır. Katmanlar genelde yatay olup kalınlık-ları yaklaşık 90 cm'dir (Gökgöz, 1998). İri bloklarında bu birim içinde yer alma-ları, gereçlerin çok yakından ve kısa sürede taşındığını gösterir. Bundan dolayı Üst Pliyosen öncesi topografyanın durumuna ve su dışında kalan alanların lito-lojilerine göre Pliyo-Kuvaterner'de farklı alanlarda farklı birimler çökelmiş ve kısa mesafede çökel bileşeni değişebilmiştir (Şimşek, 1984). Tosunlar formas-yonu, graben ve horstları oluşturan büyük atımlı faylarla birlikte gelişmiştir. En büyük atımlı faylar önünde en geniş yayılımı görülmektedir. Bu birimi oluşturan katmanlardaki iri blok ve çakıllar, eski topografyadan havzaya çok yakın yük-seklikten taşınmış olduğu belirlenmiştir. Birim köşeli, iri taneli, bloklu, gevşek

tutturulmuş, az belirgin katmanlı veya katmansız, kötü boylanmalı olduğu alanlarda yığılma ve selinti çökelti halindedir (Şimşek, 1984).



Şekil 3.3. Kızıldere-Tekkeköy jeolojik haritası (Uysallı, 1967'den alınıp düzenlenmiştir)

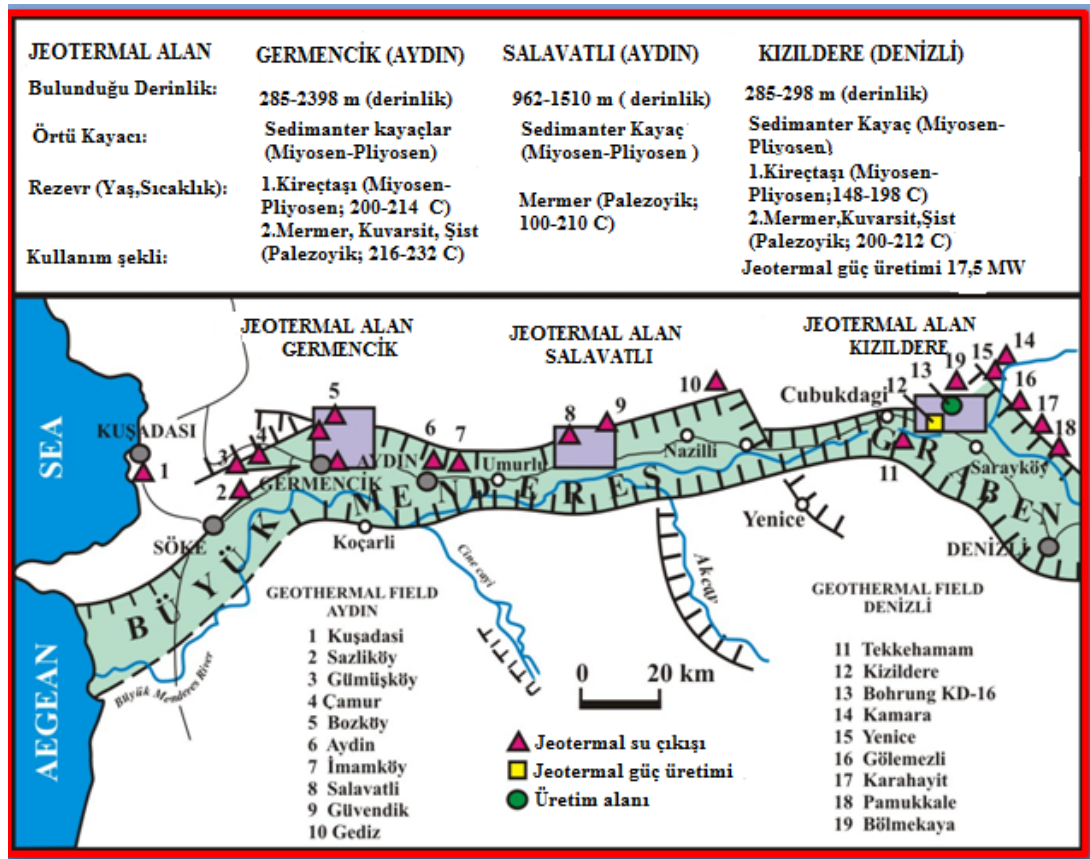
1-Alüvyon; 2-Traverten; 3-Pliyo-Kuvaterner; 4-Pliyosen; 5-Üst Miyosen; 6-Miyosen; 7-Metamorfik Seri; 8-Örnek noktaları

Kızıldere jeotermal sahasında Büyük Menderes nehrinin Kuvaterner yaşlı alüvyon dolgusu yüzeysel hakim litolojiyi oluşturur ve çakıl, kum, mil ve kil

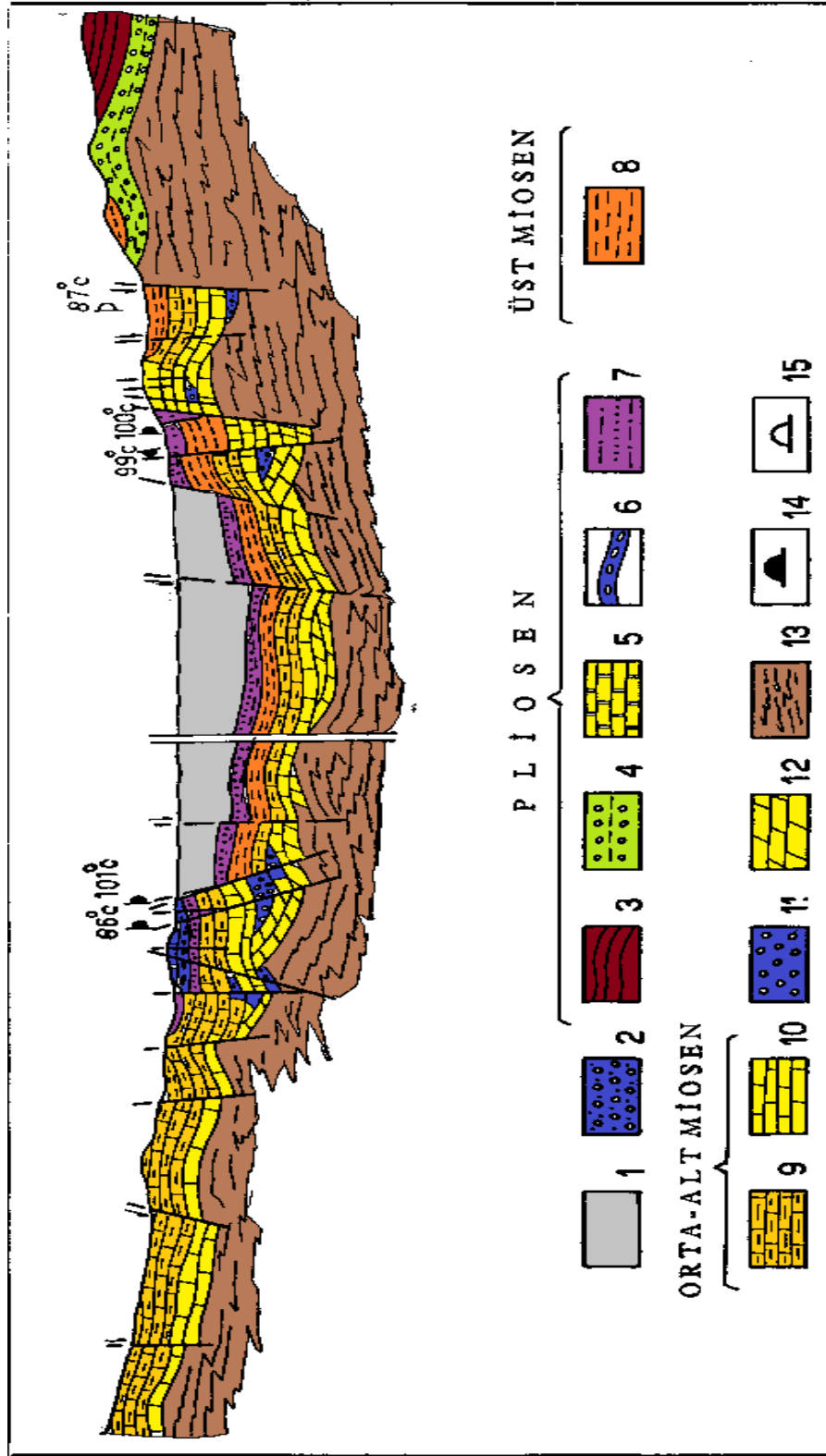
ardalanmasından oluşur. Gediz ve Büyük Menderes kıtasal rift zonlarını birleştiren alanda alüvyon genişliği 15 km'ye kadar ulaşır. Derelerin rift zonlarındaki düzlüğe açıldığı bölgelerde geniş alüvyon yelpazeleri gelişmiştir. Jeotermal alanda yüzeylenen yamaç molozları, fay şevlerinin etkisiyle gelişmiştir. Yamaç molozları, köşeli yer yer çok iri bloklu çakıllı kumlu milli ve killi malzemeden oluşmuştur (Şimşek, 1985; Şekil 3.1.).

Büyük Menderes Grabeni içerisinde var olan jeotermal alanlar Germencik, Salavatlı ve Kızıldere jeotermal sahalarıdır (Şekil 3.4.). Sahalarda varılan derinlikler ele alındığında en fazla derinliğin Germencik sahasında olduğu gözlenmektedir. Örtü ve Rezevr kayaçlarının bütün jeotermal sahalarda benzerlik gösterdiği görülmektedir. Sıcaklıkların ise en fazla Germencik sahasında kaydedildiğine rastlanılmıştır.. Kullanım olarak ise Kızıldere sahasında jeotermal güç üretimi gözlenmektedir (17,5 MWe).

Kızıldere jeotermal alanı, jeolojik olarak tektonizmanın etkin olduğu bir alanda yer almaktadır. Erişen vd., (1996)'ne göre sıyrılma fayları olarak haritalanan kırık hatlarının hemen hepsi derine doğru eğimleri gittikçe azalan normal faylardır. Bölgesel yapıyı kontrol eden kırık hatları , D-B, KD-GB, KB-GD doğrultuludur. Bu alanda sığ nitelikli birinci rezervuarı Sazak formasyonu oluşturur. İkincil rezervuar derin olup İğdecik formasyonu içerisinde gelişmiştir. Şimşek (1985), gnays-kuvarsit bileşimli ve rezervuar sıcaklığı 250-260°C olan üçüncü bir rezervuarın varlığından bahseder. En yüksek sıcaklığa sahip bu rezervuar derin odaklı olup metamorfik kökünde yer alır (Erişen vd., 1996; Şimşek, 2003) (Şekil 3.5.).



Şekil 3.4. Büyük Menderes Grabeni Jeotermal Alanları (Özgür ve Karamandere, 2015)



Şekil 3. 5. Kızıldere-Tekkeköy jeolojik enine kesiti (H. Uysallı'dan (1967) alınıp düzenlenmiştir.)

1-Alüvyon; 2-Pliyo-Kuvaterner; 3-Marn Serisi; 4-Klasik seri; 5-Kalkerler; 6-Jipsli seri; 7-Kum taşı-Mam serisi; 8-Marn serisi; 9-Marnlı Kalker; 10-Kalker; 11- Konglomera; 12-Mermer; Metamorfik seri; 14- Sıcak Sular; 15-Buhar çıkış noktaları

4. MATERYAL VE METOD

Çalışmalarımızı yürüttüğümüz bölgenin hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özelliklerinin anlaşılmasını kolaylaştırmak için Tekkehamam (Denizli) jeotermal alanında ayrıntılı bir araştırma yapılmıştır. Amacımıza ulaşmak için yapılan çalışmalarımızın bir kısmında su örnekleri alınmış ve bu örnekler gerekli standartlar ve uygun analiz yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu bölümde, kullanılan malzemeler, saha çalışmalarında kullanılan yöntemler, laboratuvar analizleri ve veriler yorumlanarak tartışılmıştır. Arazi çalışmaları, arazide ölçülen in-situ parametreleri ve oradan alınan sıcak su örneklerini içermektedir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2.). Su örnekleri, çalışma alanının farklı lokasyonlarından temsili olacak şekilde alınmıştır. Daha sonra alınan temsili örnekler fiziksel parametreleri, anyon ve katyonların belirlenmesi için analiz edilmiştir.

4.1. Metod

Araştırmanın, bu bölümünde tüm aşamaları içeren jeoloji, jeotermal suların hidrojeokimyası, izotop jeokimyası, su örnekleri alımı, laboratuvar analizleri ile elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması yöntemleri tartışılmaktadır. Yapılan saha çalışmalarında anyon ve katyon analizleri için dört numune alım noktasından su örneği alınmıştır. Bu alınan örneklerde in-situ analizlerinin yanı sıra hidrojeokimyasal analizler de gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik (EC), toplam çözünmüş oksijen (O_2), redoks potansiyeli (Eh), karbonat tayini için alkalinite ve toplam sertlik gibi analizler (Şekil 4.1 ve 4.2) arazide gerçekleştirilmiştir. İn-situ cihazları ve ölçülen birimler (Çizelge 4.1 ve 4.2)'de verilmiştir.

4.1.1. Jeolojik çalışma

Çalışma alanının stratigrafi ve yapısal jeoloji özelliklerinin belirlenmesi için farklı jeolojik haritalar hazırlanmış bulunmaktadır. Önceki çalışmalar, çalışma alanıyla ilgili yapılan araştırmalar incelenmiş ve var olan veriler arazide yapılan

gözlemlerle desteklenmiştir. Jeolojik enine kesitler incelenerek genelleştirilmiş stratigrafik kesitler kontrol edilmiş ve buradan giderek jeolojik araştırma çalışmaları tamamlanmıştır.

4.1.2. Örneklem ve in-situ analizleri

Arazide alınan su örneklerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi başka parametrelerde göz önünde bulundurulmalıdır. Bu parametrelerle ilgili olarak tüm laboratuvar standartları göz önünde bulundurularak uygulanmıştır. Örneğin, su örneklerini hidrojeokimyasal analiz etmek için 100 ml olan polipropilen şişelerde katyon ve anyon olarak ayrı ayrı örnekler alınmıştır. Örneklerin şişelere alınması ve muhafaza edilmesi sırasında dikkatli davranılmış ve şişelerin hava almaması için ağızları kapatılırken kapaklarına da su doldurularak kapatılmıştır. Katyon analizi için su örneğinde bazı maddelerin çökelp reaksiyon göstermesini önlemek için derişik HNO_3 konularak pH değeri 2.0 ile 3.0 arasına getirildikten sonra kapağı kapatılmıştır. Su örnekleri daha sonraki analizler için laboratuvar da 4° C'de bekletilmiştir.



Şekil 4. 1. Çalışma alanında gerçekleştirilen in-situ ölçümleri (İnaltı Termal Otel)



Şekil 4. 2. Çalışma alanında Babacık Pınarı'nda örnek alımı ve in-situ ölçümleri

4.1.3. Hidrojeokimyasal analizler

Çalışma kapsamında, su örneklerinin in-situ analizleri ve hidrojeokimyasal analizler Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Hidrojeokimyasal analizler için kullanılan cihazlar ve hidrojeokimyasal parametreler (Çizelge 4.2)'de verilmiştir.

ICP-OES (Bağlı Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektroskopisi) hareketli atomları ve belirli bir elemanın karakteristik dalga boyunda elektromanyetik radyasyon yayan iyonları üretmek için indüktif plazma birleştiğinde kullanılan emisyon spektroskopisi türüdür. Bu emisyon yoğunluğu örnek içinde elementlerin konsantrasyonun göstergesidir.

Çizelge 4. 1.In-Situ cihazları ve özellikleri

In-situ Parametreleri	Ölçüm birimleri	Cihaz adı ve marka
Sıcaklık	$^{\circ}\text{C}$	Thermometer-Testo-95-1
pH		pH meter-WTW 330i
Redoks Potansiyeli (Eh)	mV	pH meter-WTW pH 95
Elektriksel İletkenlik (EC)	$\mu\text{S/cm}$	Electrical conductivity measure-WTW cond 330i and 340i
Çözülmüş Oksijen (O_2)	Mg/l	Oximeter-WTW Oxi 340
Alkalinite	mmol/l	Alkalinity Test kit- Merck Aquamerck 11109

IC (İyon Kromatografi) kendi şarja dayalı iyon ve polar moleküllerin ayrılmasını sağlayan bir süreçtir. Enjekte edilecek çözelti, genellikle bir örnek olarak adlandırılır ve ayrı ayrı bileşenlerin analizleri olarak adlandırılır. Örnek hacmi bir örnek döngü içine, elle veya otomatik örnekleyici ile de tanıtılır. Mobil faz olarak bilinen tamponlu, sulu bir çözelti hareketsiz faz malzeme döngü içine bir kolon üzerine örnek taşır. Hedef analiz sabit faz üzerinde muhafaza edilir, ancak ikinci durağan faz, analiz iyonlarının yerini aynı yüklü türlerin konsantrasyonunun arttırılması ile ayrıştırılır. İlgilenilen analiz daha sonra, tipik iletkenliği veya UV/VIS ışık absorbe ile, bazı yöntemlerle tespit edilmelidir.

Çizelge 4. 2.Hidrojeokimyasal cihazlar ve özellikleri

Analiz parametreleri	Cihaz ismi	Analiz cinsi
Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Pb ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Al ³⁺ , Si ⁴⁺ , As, Cr	Perkin Elmer ICP-OES 2100 DV	Optik Emissiyon spektrometresi
F ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ²⁻	Dionex ICS-3000	İyon Kromatografisi
HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	Merck-Aquamerck test kitleri	Titrasyon Yöntemi

ICP-MS burada kütle spektrometresi ile yüksek sıcaklık ICP kaynağından oluşmaktadır. ICP kaynağı burada örnek içinde element atomlarını iyonlara dönüştürür. Bu iyonlar burada ayrılır ve sonar kütle spektrometresi tarafından belirlenir.

4.1.4. Jeotermometreler

Jeokimyasal termometreler, jeotermal sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi için önemli bir araç olmaktadır. Bu termometreler aynı zamanda jeotermal rezervuarların üretimi esnasında etkilenmesinin izlenmesi bakımından önemlidir. Arama aşaması süresince, jeotermometreler sondaj çalışmalarında beklenen çıkış sıcaklığı gibi yeraltı sıcaklığını tahmin etmek için de kullanılır. Burada sıcak suların ve fumarollerin kimyasal ve izotop jeokimyasal bileşimi kullanılır. Jeotermal geliştirme ve izlemelerin son aşamasında jeokimyasal termometreler kuyularda üretim seviyelerinin yerlerine riayet ederek kuyu deşarzının bileşimini yorumlayabilmek için kullanılır. Jeokimyasal termometreler ayrıca kuyu çevresinde deşarj oluşturan soğuk sular tarafından geliştirilen kaynama ve/veya basınç olayları sonucu oluşan azalma zonlarında oluşan kimyasal reaksiyonları açıklamak için faydalıdır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri

Jeotermal alanlarda jeotermal akışkanın yeraltında birikebileceği gözenekli ve geçirimli kayalar gereklidir. Çalışma alanımızdaki sondajlarda yoğun genç tektonik etkiler sonunda gelişen eklem takımları çatlaklar ve faylar nedeniyle ikincil gözeneklilik ve geçirimlilik kazanan kayalardan kireçtaşı, mermer ve kuvarsite rastlanmıştır. Sahada, üçüncü rezervuar kayayı bulmak olasıdır. Belirlenen iki hazne kaya vardır (Çizelge 5.1.).

I. Rezervuar kayacı: Pliyosen birimleri içinde Sazak formasyonu birinci rezervuar kayacını oluşturmaktadır. Ancak Sazak formasyonunun yanal fasiyes değişiklikleri rezervuar niteliği devamlılığını kısıtlamaktadır. Birimdeki kireçtaşlarının kalınlıkları değişmekte, yanal veya düşey olarak marn ve kumtaşına geçebilmektedir. Kızıldere jeotermal alanında yapılan sondaj verilerine göre KD-1, KD-1A, KD-2, KD-3, KD-4, KD-12, KD-8 nolu kuyular birinci rezervuar kayacı olan pliyosen kireçtaşlarından üretim yapmışlardır. Diğer kuyularda ise kireçtaşı yerine marn ve kumtaşı kesmişlerdir. Bu nedenle üretim yapılamamış diğer Pliyosen çökelleri ile birlikte örtü kayayı oluşturmuşlardır. Birinci rezervuar kayada en fazla KD-1 kuyusunda 198° C elde edilmiştir. Bu hazne için ortalama sıcaklık 170° C dolayındadır. Kalınlığı 100-250 m arasında değişmektedir.

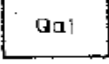
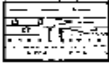
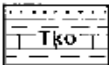
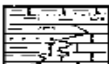
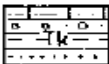
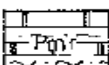
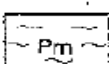
II. Rezervuar kayacı: Menderes metamorfitlelerinden İğdecik formasyonunun mermer-kuvarsit-şist ardalanması ikinci rezervuar kayacı oluşturmaktadır. Birinci rezervuar kayaca oranla daha fazla ikincil geçirimlilik ve gözeneklilik görülmektedir. Ayrıca çok geniş bir alan için devamlılıkları vardır. Daha derin olduğundan daha yüksek sıcaklık verirler. KD-16'da 212° C yaklaşan kuyudibi sıcaklığı alınmıştır. KD-6, KD-7, KD-9, KD-13, KD-14, KD-15, KD-16, KD-111 kuyuları ikinci rezervuar kayaya ulaşmıştır. Kalınlık 100-300 m arasında değişmektedir.

III. Rezervuar kayacı: Kızıldere jeotermal alanında ilk rezervuar kaya bulunduğundan sonra bazı bölümlerin rezervuar kaya özelliğini kaybettiği görülünce ikincil rezervuar kaya araştırılmış ve bulunmuştur. Birincide ortalama 170° C olan sıcaklık, ikincide 212° C ulaşmaktadır. Jeoloji verilerine göre ikinci rezervuar kayayı oluşturan mermer-kuvarsit-şist ardalanmasının altında kalın ve geçirimsiz mikaşistler yer almaktadır. Genel istife göre, mikaşistler altında gnays ve kuvarsit gözlenmektedir. Bu durum geçiş zonunun iyi bir rezervuar kaya oluşturabileceğini göstermektedir (Şimşek 1984). Daha öncede (Keskin 1972), böyle bir olasılıktan bahsedilmiş, ancak rezervuar kayanın ne olabileceği konusuna açıklık getirilememiştir. Ayrıca yeterli jeotermometre verileri sağlanamamıştır. Jeotermometreler ise (Na-K-Ca ve SiO₂) Kızıldere sahasında 250-260° C rezervuar sıcaklığı beklenmektedir. Bahsedilen verilere göre üçüncü rezervuar kaya olasıdır. Bunun denenmesinde büyük yarar vardır. Özellikle kuyu verimlerinin, buhar sıcaklığının ve oranının artmasının sağlanması ve kabuklaşma, atık su sorununa çözüm getirebilmesi açısından çok önemlidir (Şimşek 1984).

I. Örtü kayacı: Birinci rezervuar kayacı olan Sazak formasyonu üzerinde görülen Kolonkaya formasyonu ve Tosunlar formasyonunun kıltaşı, marn, kumtaşı ardalanması birinci rezervuar kaya için çok iyi bir örtü kayadır. Kolonkaya formasyonunda, eklem veya diğer süreksizlik düzlemlerinin, birimin geçirgenliğine etkisi yok denecek kadar azdır. Geçirimsizliği belirleyen çok ince dokuda dentritik drenaj örneği bu birim için çok ayırtıcıdır. Bu örtü içinde yapılan gradyan ölçüleride rezervuar kayanın yerinin saptanmasına da ışık tutmuştur. Birinci örtü kayanın kalınlığı 350-600 m arasında değişmektedir.

II. Örtü kayacı: Birinci rezervuar kayacı altında yer alan Kızılburun formasyonunun sıkı tutturulmuş çakıltaşı, kumtaşı, kıltaşı ardalanması çok iyi örtü kaya oluşturmaktadır. Ölçülen stratigrafi kesitlerinde birimin çeşitli yerlerdeki özellikleri göz önüne alındığında inceleme alanının tümünde bu birimin ideal örtü kaya olduğu belirlenmiştir. Kalınlığı 100-250 m arasında değişmektedir.

Çizelge 5.1.Çalışma alanındaki kayaç birimlerinin hidrojeolojik özellikleri (Şimşek, 1984)

ÇZL. 5.1. HİDROJEOLojİ BİRİMLERİ			
GEÇİRİMLİ		Alüvyon	
AZ GEÇİRİMLİ		Tosunlar Formasyonu	
I.ÖRTÜ KAYA			
GEÇİRİMSİZ		Kolonkaya Formasyonu	
GEÇİRİMSİZ		Sazak Formasyonu (GEÇİRİMLİ KİREÇTAŞI)	
II.REZERVUAR KAYA			
GEÇİRİMSİZ		Kızılburun Formasyonu	
II.ÖRTÜ KAYA			
GEÇİRİMLİ		İğdecik Formasyonu	
II.REZERVUAR KAYA			
GEÇİRİMSİZ		Çeşitli Şistler	
III.ÖRTÜ KAYA (?)			
GEÇİRİMSİZ		Gnays (Geçirimli kuvarsit)	
III.HAZNE KAYA (?)			
			MENDERES METAMORFİ TLERİ

5.2. Hidrojeokimya

Çalışma alanının hidrojeokimyasal özelliklerini anlamak için, alanda bulunan farklı kaynaklardan toplam alanı temsil eden 4 adet su örneği alınmıştır. Su örneklerinin alınmasından önce, bölgede her lokasyonda in-situ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için kullanılan in-situ cihazları (Çizelge 4.1), Jeoser Yer Bilimleri Servisi Ltd. Şti., Isparta tarafından sağlanmıştır.

Ölçülen in-situ parametreleri sıcaklık, pH, redoks potansiyeli (Eh), çözünmüş oksijen (O_2), elektriksel iletkenlik (EC) ve alkalinite olmaktadır (Çizelge 5.2.). Belirtilen katyonlar ve elementler, Na^+ , Ca^+ , Mg^+ , K^+ , Si^{+4} , B^{+3} , ICP-OES ve ICP-MS analiz yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Buna karşın belirtilen anyonlar F^- , SO_4^- , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , CO_3^{-2} iyon kromatografisi (IC) yöntemi ile analiz edilmiştir. HCO_3^- ve CO_3^{-2} değerleri arazide gerçekleştirilen alkalinite ölçümlerinde hesaplanmıştır. Hidrojeokimyasal analizlerin değerlendirilmesinde, Aquachem v.3.7 (Waterloo Hydr., 1999), spreadsheet (Powell ve Cumming, 2010) kullanılmıştır. Hidrojeokimyasal analizler (Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3.)'de sunulmaktadır.

5.2.1. Hidrojeokimyasal analizler

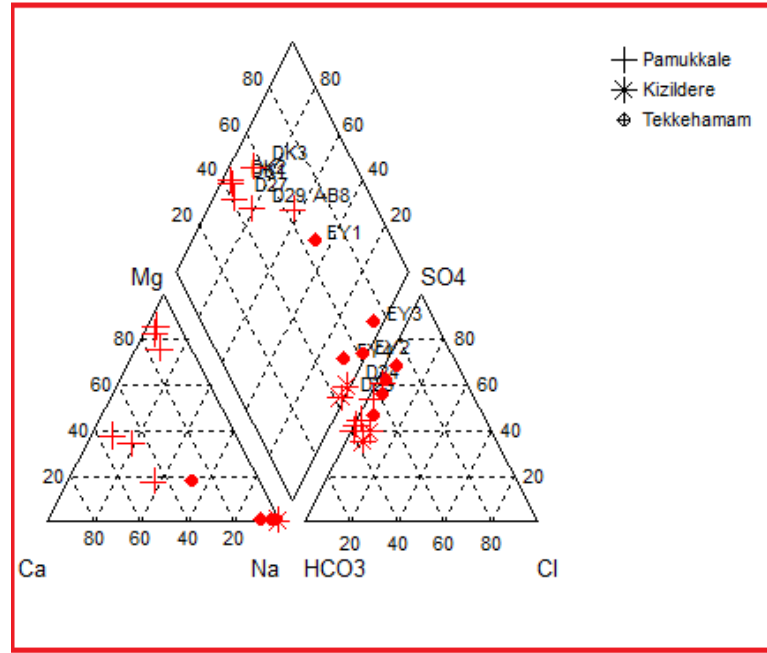
Tekkehamam ve yakın çevresinden alınan su örneklerinin hidrojeokimyasal analiz sonuçları (Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3) AQUACHEM v.3.7 (Waterloo Hydr., 1999) ve Liquid analysis spreadsheet (Powell ve Cumming, 2010) kullanılarak değerlendirilmiştir. Aynı şekilde, Tekkehamam ve yakın çevresi jeotermal sularını tanımlamak ve grafiksel olarak gösterebilmek için Piper ve üçgen diyagramları hazırlanmıştır. Piper diyagramına göre (Şekil 5.1), Tekkehamam ve yakın çevresi jeotermal suları $Na-SO_4-HCO_3$ tipi sular olarak adlandırılabilir (Çizelge 5.4.).

Çizelge 5. 2.Tekkehamam ve yakın çevresi termal suların in-situ parametreleri

Sıra/No	Örnek	Konum	Sıcaklık (°C)	pH	Eh (Mv)	Çözülmüş O ₂ (mg/l)	EC (ms/cm)	
1	EY-1	Babacık Pınarı	56.3	6,55	-334	2,4	3,51	Bu Çalışma Alanı
2	EY-2	Çavuşoğlu Hamamı	78.8	7,89	4,6	2,4	4,29	
3	EY-3	İnalı Hamamı	95	7,92	-290,8	1,6	4,41	
4	EY-4	Umut Termal	65.2	9	-339	2	3,87	
5	D-23	Kızıdere/KD15	95,5	9,67	-362		6450	Yaman, 2005
6	D-24	Kızıdere/KD21	96,2	8,92	-355		6350	
7	D-27	Havuz Pamukkale (Özel İdare)	35	6,22	152		2350	
8	D-29	Karahayıt (Pamukkale)	51,9	6,54	-19		2880	
9	AB-8	Gölemizli Hamam	59	6,28	253		4460	Kıymaz, 2011
10	DK-1	Pamukkale Kaynak	35	6,56	259,9	4,5	2430	Kutlu, 2015
11	DK-2	Plütonyum Kaynak	35,1	6,44	282,1	4,1	2400	
12	DK-3	Karahayıt	46,6	6,52	63	3,4	2680	

Çizelge 5. 3.Çalışma bölgesi termal sularının hidrojeokimyasal analiz sonuçları

Sıra No	Örnek No	Sıcaklık (°C)	pH	Eh (Mv)	Çözünmüş O ₂ (mg/l)	EC (µS/cm)	Alkalinite	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SiO ₂ (mg/l)	B ⁻³	F	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²
1	EY-1	56.3	6.55	-334	2.4	3.51	14.5	524	43	256	93.8	132	11	5	1314	59.5	0.4	884.5	
2	EY-2	78.8	7.89	4.6	2.4	4.29	17.3	999	88	11.8	3.95	162	21	13	1229	84.2	1.05	1055.3	
3	EY-3	95	7.92	-290.8	1.6	4.41	12.1	975	88.1	27.9	6.8	221	21	15	1536	90.3	0.32	738.1	
4	EY-4	65.2	9	-339	2	3.87	K _{94,3} =20 ve K _{98,3} =3.7	826	91.1	61.6	7.1	177	15	12	964	86.9	2.93	1220	222
Sıra No	Örnek NO	Sıcaklık (°C)	Ph	Eh (Mv)	EC (Msc/cm)	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	B ⁻³	Al ⁺³	F	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	Si (mg/l)	
1	D-23	95.5	9.67	-362	6450	1451	184.3	<5	11.5	26.35	0.66*	20.52	140	1800.1	694	882	1	200	
2	D-24	96.2	8.92	-355	6350	1431.4	175.9	<5	12	24.05	0.75*	21.2	112	1464.5	1014	721	1	175	
3	D-27	35	6.22	152	2350	68.6	7.5	150	350.27	0.72		1.48	15	1177.7	0	630	1		
4	D-29	51.9	6.54	-19	2880	176.5	33.5	167	377.1	1.06	0.06*	2.8	29	1348.5	0	889	1	6	
5	AB-8	59	6.28	253	4460	431.6	45.05	109.5	464.15	5.74	<0.01	2.45	70.84	1250.5	0	1664.20	0.01	59.03	
6	DK-1	35	6.56	259.9	2430	44.2	5.45	401	99.4	1		0.8	13	1098	0	649	1.56	15.8	
7	DK-2	35.1	6.44	282.1	2400	40.1	5.08	479	95.4	0.9		1.8	14.1	1079.7	0	642	1.88	15.2	
8	DK-3	46.6	6.52	63	2680	107	21.1	414	124	1.6		2.2	31.8	927.2	0	905	0.65	26.8	



Şekil 5.1. Çalışma alanında bulunan jeotermal suların Piper diyagramında gösterilmesi

Çizelge 5. 4.İnceleme alanındaki örneklerin su tipleri

Örnek No	LOKASYON	SU TİPİ
EY-1	Babacık Pınarı	Na-Ca-SO ₄ -HCO ₃
EY-2	Çavuşoğlu Hamamı	Na-SO ₄ -HCO ₃
EY-3	İnalı Hamamı	Na-SO ₄ -HCO ₃
EY-4	Umut Termal	Na-SO ₄ -HCO ₃
D-23	Kızildere/KD15	Na-HCO ₃ -CO ₃ -SO ₄
D-24	Kızildere/KD21	Na-HCO ₃ -CO ₃ -SO ₄
D-27	Havuz Pamukkale (Özel İdare)	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
D-29	Karahayt (Pamukkale)	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
AB-8	Gölemeli Hamamı	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
DK-1	Pamukkale Kaynak	Mg-HCO ₃ -SO ₄
DK-2	Plitonyum Kaynak	Mg-HCO ₃ -SO ₄
DK-3	Karahayt (Pamukkale)	Mg-SO ₄ -HCO ₃

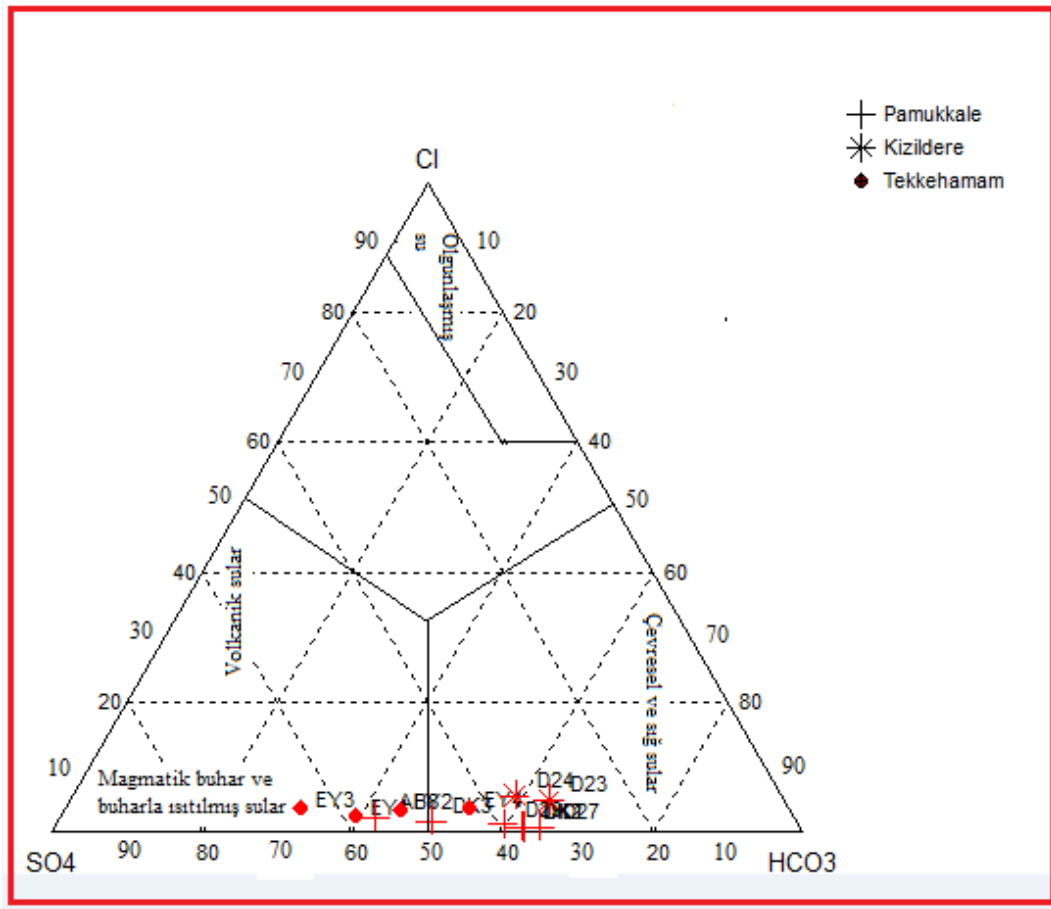
Piper (üçgen) diyagramı gerek iyonların topluca tek bir diyagramda görüntüleme kolaylığı açısından, gerekse benzer ve farklı kökenli suların karşılaştırılması kolaylığı açısından hidrojeolojide oldukça sık kullanılan diyagramlardandır.

Majör anyonlar $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ baz alındığında (Giggenbach, 1988), bu üçgen diyagramı jeotermal suları sınıflandırmak için kullanılır (Şekil 5.2.). Bu olgunlaşmamış kararsız suları ayırt etmeye yardımcı olur ve karıştırma ilişkileri coğrafi gruplaşmalar bir ilk göstergesidir. Bu çalışma alanında bulunan duraysız suları ayırtlamaya yarar ve burada bulunan suların karışım ilişkileri ile ilgili belirteçleri verir.

Piper diyagramı anyon ve katyonların (% mek/l cinsinden) ayrı ayrı gösterildiği iki ayrı üçgenden ve tüm iyonların ortaklaşa gösterildiği bir eşkenar dörtgenden oluşmaktadır. Üçgen diyagramlar suların hidrokimyasal su tiplerinin görülmesinde, dörtgen ise suların sınıflamasında ve karşılaştırılmasında kolaylık sağlamaktadır. Piper üçgen diyagramına göre inceleme alanındaki sıcak suların büyük bir kısmının sodyum, sülfat ve bikarbonatlı su tipini yansıttıkları görülmektedir. Diğer sıcak sular ise sodyum, kalsiyum, sülfat ve bikarbonatlı sulardır. Piper sınıflamasında yöredeki sodyum sülfatlı sular karbonat olmayan alkalinitesi %50'den fazla olan alana düşmektedir (Şekil 5.1.). Diğerleri ise iyonların hiç birisi %50'yi geçmeyen karışık sular sınıfına girerler.

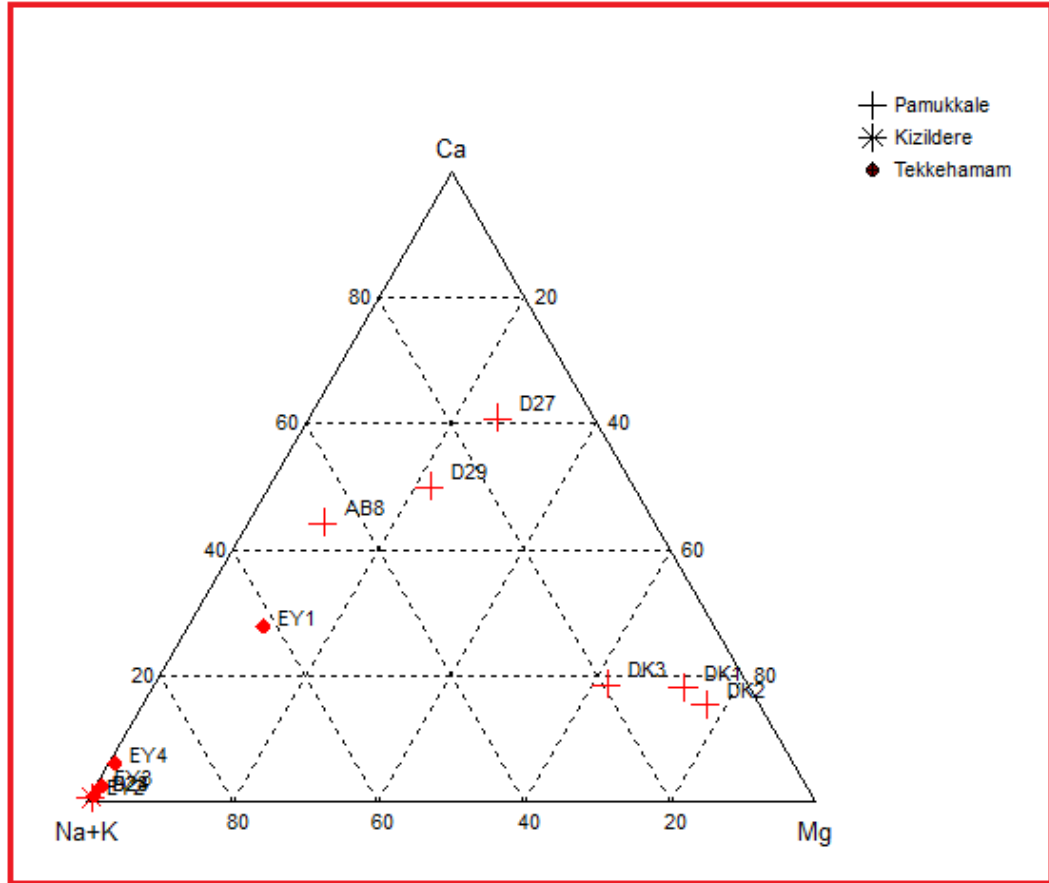
Suları isimlendirmek, birbiri ile karşılaştırmak, iyonlar arası etkileşimleri araştırmak ve kökeni ile ilgili yorum yapabilmek amacıyla suların hidrojeokimyasal su tipinin belirlenmesine yönelik çeşitli yöntemler önerilmiştir. Hidrojeokimyasal fasiyes kavramı, suların içerdikleri başlıca iyonların oranlarına bağlı olarak sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. Suda çözünen başlıca iyonlardan anyonlar ve katyonlar ayrı ayrı olmak üzere mek/L cinsinden %50'den fazla olan iyonlar hidrokimyasal su tipini belirtmektedir. Eğer iyonların hiçbirisi miktar olarak %50'yi geçmiyorsa karışık su tipini belirtmektedir.

Sıcak ve mineralli suların diğer bir sınıflaması da başlıca anyonlara göre (Cl , HCO_3 , SO_4) yapılabilmektedir (Giggenbach, 1991). Bu sınıflamaya göre yöredeki sıcak ve mineralli sular kuyulardan elde edilmekte ve sülfat içeriği yüksek olarak bulunmaktadır. Bu sulardaki sülfat içeriğinin fazlalığı Sazak formasyonunun evaporitik ortam ürünü olan jipsli seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Daha sık sondajlardan Neojen kayaların oluşturduğu akiferlerden alınan sıcak sular ise soğuk yer altı suları ile belli oranlarda karışmaları nedeniyle seyreltik bikarbonatlı sular olarak gözlenmektedirler.



Şekil 5. 2. Tekkehamam ve çevresi jeotermal sularının Cl - SO_4 - HCO_3 üçgen diyagramı

Çalışma alanı jeotermal suları için hazırlanan Ca-Na+K-Mg üçgen diyagramı (Şekil 5.3.) şekilde Tekkehamam örneklerinin Na+K katyonlarına yönelmesi Na+K katyonlarının baskın katyon olduğunu göstermektedir. Bu durum olasıdır, çünkü artan sıcaklıklarda Na^+ değeri artmakta ve buna karşın ise Ca^{+2} ve Mg^{+2} içeriği azalmaktadır. Tekkehamam örneklerinden EY-1 (Babacık Pınarı) Ca^{+2} yönelimi söz konusudur, bunun sebebi ise bölgedeki kalsit içeren karbonat kayaçlarıyla etkileşime girmiş olmasıdır. Kızıldere örneklerinde Tekkehamam örnekleri gibi Na+K katyonlarına yönelimi gözlenmektedir. Ancak Pamukkale örneklerinin Mg^{+2} ve Ca^{+2} oranlarının yüksek olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi buradaki sıcak su kaynaklarının içerisinde Ca^{+2} ve Mg^{+2} miktarı yüksek olan kayaçlarla sirkülasyon gösterdiklerinden dolayıdır.



Şekil 5. 3. Çalışma alanında jeotermal suların Ca-Na+K-Mg üçgen diyagramı

Alınan örneklerdeki suların kullanılabilmesi ve içilebilmesi açısından özellikleri SAR oranları yardımıyla hesaplanmış ve kullanılabilirliği belirlenmiştir (Çizelge 5.5.).

Çizelge 5. 5. Suların sodyum adsorpsiyon oranı'na (SAR) göre sınıflaması

SINIF	SAR
ÇOK İYİ ÖZELLİKTE SULAMA SULARI	<10
İYİ ÖZELLİKTE SULAMA SULARI	10-18
KULLANILABİLİR ÖZELLİKTE SULAMA SULARI	18-26
KULLANILMAZ ÖZELLİKTE SULAMA SULARI	>26

İnceleme alanında yapılan su örneklerinde; Babacık Pınarı (EY-1) örneğinin “Çok iyi özellikte sulama suları” sınıfında, Çavuşoğlu Hamamı (EY-2) İnaltı Termal (EY-3) Umut Termal (EY-4) su örnekleri “Kötü özellikte sulama suları” sınıflarında oldukları belirlenmiştir (Çizelge 5.6.).

Çizelge 5. 6. İnceleme alanı su örneklerinin SAR değerlerine göre sınıflaması

Örnek No	Lokasyon	SAR	SAR Sulama Suyu Değerlendirmesi
EY-1	Babacık Pınarı	7,12	ÇOK İYİ ÖZELLİKTE
EY-2	Çavuşoğlu Hamamı	64,29	KÖTÜ ÖZELLİKTE
EY-3	İnaltı Termal	42,93	KÖTÜ ÖZELLİKTE
EY-4	Umut Termal	26,57	KÖTÜ ÖZELLİKTE

5.2.2. Doygunluk indeksi

Farklı kullanım alanlarıyla insanlığa hizmet eden termal suların bir yerden bir yere taşınması sırasında kabuklaşma yada korozyon gibi çok önemli sorunlar yaşanabilmektedir. Bu sorunların yaşanmasında suyun mineral doygunluğu, çökme ve çözülme özellikleri büyük ölçüde etkindir.

Genellikle çökel ürünü olarak gözlenen kalsit, dolomit ve jips minerallerinin farklı sıcaklık değerlerinde mineral doygunluk indekslerinin hesaplanması ve diyagramının çizilmesi, bu sorunların önlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Bunun için kullanılan mineral sıcaklık diyagramlarında Pozitif doygunluk indeksi çöktürücü özelliği, negatif doygunluk indeksi ise çözündürücü özelliği ifade etmektedir. Doygunluk indeksleri, jeotermal sistemde kayaç ile su arasında meydana gelen kimyasal dengelenmeyi değerlendirmede yararlıdır. Bu, hidrotermal alterasyona uğrayan kayaçları oluşturan minerallerin çözünürlüğü ve bu minerallerin aktiviteleri ile ilgili bilgilerin toplanması ile sonuçlandırılır. Çözeltilerde iyonların, iyon çiftlerinin ve komplekslerin çok sayıda olması nedeniyle, her tip mineral ve bunların aktiviteleri için doygunluk indeksleri geliştirmek yazılım programı kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmada Aquachem programı doygunluk indeksini hesaplamak için kullanılmıştır. Mineral doygunluk indekslerinin hesaplamasında basınç 1 atm olarak alınmış ve pH sabit tutulmuştur. Bulunan bu değerler Excel programı aktararak mineral sıcaklık denge diyagramı oluşturulmuştur (Çizelge 5.7.).

Çizelge 5. 7. Çalışma alanındaki örneklerde rastlanabilecek bazı minerallerin doygunluk indeksleri

Mineraller	EY-1	EY-2	EY-3	EY-4	D-23	D-24	D-27	D-29	AB-8	DK-1	DK-2	DK-3
Anhidrit	-0.5	-1.58	-0.9	-1.34	-1.93	-1.83	-0.79	-0.57	-0.2	-1.4	-1.47	-1.14
Aragonit	0.31	0.52	0.89	1.87	1.3	1.24	0.06	0.63	0.43	-0.18	-0.34	-0.07
Florit	0.12	-0.53	-0.14	0	-0.65	-0.56	-0.55	-0.21	-0.33	-1.81	-1.18	-1
Kalsit	0.43	0.63	0.99	1.99	1.4	1.35	0.2	0.76	0.55	-0.05	0.2	0.06
Kalsedon	0.58	0.44	0.44	0.43	0.01	0.43		-0.39	0.53	0.2	0.18	0.31
Dolomit	0.85	1.07	1.4	3.62	2.72	2.66	0.46	1.64	0.88	0.95	0.74	1.12
Jips	-0.48	-1.8	-1.31	-1.41	-2.34	-2.25	-0.62	-0.51	-0.21	-1.23	-1.3	-1.04
SiO ₂ (a)	-0.17	-0.24	-0.21	-0.29	-0.64	-0.21		-1.15	-0.2	-0.61	-0.62	-0.46
Sepiyolit	-2.86	0.08	1.09	4.42	6.29	4.91		-5.33	-3.9	-3.42	-3.79	-2.69

Çalışma bölgesindeki sular doygunluk indekslerine göre incelendiğinde; Babacık Pınarı örneğinde minerallerin bir çoğununun doygunluğa ulaşmadığı gözlenmektedir. Doygunluk gösteren mineraller aragonit, florit, kalsit, kalsedon ve dolomittir. Bunun yanı sıra anhidrit, jips, kuvars ve sepiyolit mineralleri doygunluk göstermemektedir. Çavuşoğlu örneğinde ise aragonit, kalsit, kalsedon, dolomit ve sepiyolit mineralleri doygunluk göstermekte ancak anhidrit, florit, jips ve kuvars doygunluk göstermemektedir. İnaltı örneğinde aragonit, kalsit, kalsedon, dolomit, sepiyolit doygunluk göstermekte anhidrit, florit, jips, kuvars doygunluk göstermemektedir. Çavuşoğlu ve İnaltı örneklerindeki doygun mineraller benzerlik göstermektedir. Umut termal örneğinde aragonit, kalsit, kalsedon, dolomit ve sepiyolit doygunluk göstermekte ancak anhidrit, jips ve kuvars doygunluk göstermemektedir. Umut termal örneğinde florit minerali denge durumundadır. Çalışma alanının geneline bakıldığında anhidrit, jips ve kuvars doygun değildir. Ancak aragonit, kalsit, dolomit, kalsedon mineralleri doygunluk göstermektedir. Kızıldere ve Pamukkale örneklerine bakılacak olursa Kızıldere örneklerinde anhidrit, florit, jips, kuvars mineralleri doygun değildir ancak aragonit, kalsit, kalsedon, dolomit ve sepiyolit mineralleri doygunluk göstermektedir. Pamukkale örneklerinde ise anhidrit, florit, jips, kuvars ve sepiyolit doygun değildir bunun yanı sıra örneklerin hepsinde yalnızca dolomit minerali doygunluk göstermektedir.

5.3. Jeokimyasal Jeotermometre Uygulamaları

Termal sular yer altında farklı sıcaklık ve basınç koşullarının altında bulunur ve bulunduğu kayaç ile etkileşime girer. Bu etkileşim rezervuar kayacın mineralojisine bağlı olarak su kimyasını da değiştirir. Jeotermometreler su kimyasındaki bu değişimden yola çıkarak rezervuar sıcaklığını hesaplamaya yönelik oluşturulmuş denklemlerdir.

Jeotermometre eşitlikleri kullanılış şekillerine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; Birleşik (kombine) Jeotermometre uygulamaları ve Kimyasal jeotermometre uygulamalarıdır. Kimyasal jeotermometre uygulamaları da kendi içerisinde Silis jeotermometreleri ve katyon jeotermometreleri olarak ikiye ayrılır.

Her jeotermometre kendi içerisinde bulunduğu hidrojeokimyasal durumu yansıtır, bu nedenle bazı jeotermometreler yapılan hesaplamalarda afaki değerler vermiştir. Bu duruma yüzeyde ölçülen sıcaklık değerinden daha düşük akifer sıcaklığı veren K-Mg jeotermometresi bir örnektir. Amorf Silis (Fournier 1977), Amorf Silis (Arnorsson, 1995), Alfa ve Beta Kristobali (Fournier 1977) ve Magonit (Gislason vd., 1996) gibi Silis jeotermometreleri de benzer olumsuz sonuçları verdiği görülmektedir. Grafik ve tablo sonuçları dikkatli bir şekilde irdelenmiş ve yorumlamanın daha gerçekçi sonuçlara ulaşması hedeflenmiştir. Çalışma alanına ait rezervuar kayacın sıcaklığının belirlenmesinde Na-K, Na-K-Ca, Na-K-Ca-Mg, jeotermometrelerinden yararlanılmıştır.

5.3.1. Kimyasal jeotermometre uygulamaları

Çalışma alanında seçilmiş olan sıcak su örneklerinin, akifer sıcaklıklarını hesaplamada kullanılan bir diğer yöntem ise kimyasal jeotermometre uygulamalarıdır. Kimyasal jeotermometre eşitlikleri kullandıkları kimyasal reaksiyon açısından başlıca iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan biri; mineralin sıcaklığa bağlı çözünürlüğünü temel alan jeotermometre yani Silis jeotermometreleri, diğeri ise çözünmüş iyonların sıcaklığa bağlı iyon takas (ion exchange) reaksiyonlarına

dayanan jeotermometre yani katyon jeotermometreleridir (Na-K, Na-Ca, Na-K-Ca, K-Mg, Li-Na vb.) (Doğdu, 2004).

5.3.1.1. Silis jeotermometreleri

Silis jeotermometreleri, silisin su içerisindeki çözünürlüğüne bağlı jeotermometrelerdir (Çizelge 5.8.). Silisin çözünürlüğü sıcaklık ve basınç ile değişim gösterir. Silis minerali su içerisinde; kuvars, kalsedon, kristobalit, opal ve amorf gibi çeşitli formlarda bulunur. Bu formlar su içerisinde birbirinden farklı kinetik özellik gösterir. Bu farklılıktan yararlanarak haznekaya sıcaklığını tahmin etmede kullanılan silis jeotermometreleri her silis formu için farklı hesaplamalar içerir.

Yüksek sıcaklıklarda akifer kayaçtan yüzeye doğru hareket eden sıcak akışkanlarda hızlı silis çökelişi gözlenmektedir. Sıcaklığı 180°C'den düşük olan jeotermal sistemlere kalsedon jeotermometresi, 180°C'den daha yüksek jeotermal sistemlerde ise kuvars jeotermometresinin uygulanması daha uygun görülmektedir (D'Amore ve Arnorsson, 2000).

Kuvars çözünürlüğüne bağlı jeotermometreler, akifer (hazne) sıcaklığının saptanmasında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu jeotermometreler 150-225°C sıcaklıklar arasında iyi sonuç vermektedirler. Daha yüksek sıcaklıklarda akiferden, yüzeye doğru hareket eden sıcak akışkanda hızlı silis çökelişi gözlenir. Bu nedenle sıcaklığı 225°C'nin üzerindeki hazne kayalardan gelen sularda gerçek sıcaklığı yansıtmaz. Silis jeotermometreleri, kimyasal tepkimeyi etkileyen akifer sıcaklığına veya sıcak suyun yükselirken soğumasına dayanılarak hazırlanmıştır. Silisyumun sıcaklıkla çözünürlüğü artmaktadır. Silisin bu özelliğinden yola çıkılarak çeşitli sıcaklıklar için jeotermometre bağıntıları hazırlanmıştır (Tarcan, 2002).

Çizelge 5. 8. Silis (SiO₂) jeotermometreleri ve bağıntıları (Tüm derişimler mg/l)

No	Silis SiO ₂ Jeotermometreleri	Jeotermometre Bağıntıları	Değınilen Belgeler
1	SiO ₂ (Amorf silis)	$t = 731 / (4.52 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977
2	SiO ₂ (α Kristobalit)	$t = 1000 / (4.78 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977
3	SiO ₂ (β Kristobalit)	$t = 781 / (4.51 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977
4	SiO ₂ (Kalsedon)	$t = 1032 / (4.69 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977
5	SiO ₂ (Kuars)	$t = 1309 / (5.19 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977
6	SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t = 1522 / (5.75 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Fournier, 1977
7	SiO ₂ (Kalsedon kond.soğ.)	$t = 1112 / (4.91 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Amorsson vd., 1983
8	SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t = 1264 / (5.31 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Amorsson vd., 1983
9	SiO ₂ (Kuars buhar kavbı)	$t = 1021 / (4.69 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Amorsson vd., 1983
10	SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t = 1164 / (4.9 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Amorsson vd., 1983
11	SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t = 1498 / (5.7 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$	Amorsson vd., 1983

5.3.1.2. Katyon jeotermometreleri

Bir çözeltideki iyonların başka iyonlarla yer değıştirmesinden yola çıkarak oluşturulmuş jeotermometrelerdir (Çizelge 5.9.). Na/K jeotermometresi, Na-K-Ca jeotermometresi ve Magnezyum düzeltmeli Na-K-Ca jeotermometresi katyon jeotermometrelerine birer örnektir. Her jeotermometre bağıntısı kendi içerisinde bulunduğu hidrojeokimyasal durumu yansıttığından, aynı element kullanılmasına karşın formüller doğmuştur. Mutlu (1999)'a göre; katyon jeotermometreleri, belirli çözünmüş elementlerin oranlarını sabitleyen sıcaklık bağımlı değışik reaksiyonlarını esas almaktadır. Oluşum birlikteliğı gösteren alkali feldispatlar arasındaki Na ve K değışimi katyon jeotermometrelerinin esas alındığı temel için verilebilecek en güzel örnektir.

Na/K jeotermometreleri suda fazla miktarda Ca iyonu bulunuyorsa, hazne kaya sıcaklığı hesaplamalarında yüksek değerler verir. Na/K jeotermometrelerinin uygulanacağı sıcak suların pH değeri nötre yakın veya hafif alkali, karbonat çökelmelerinin oluşmaması, $\log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}})$ değerin 0.5'den az olması koşulları aranmalıdır. Na/K jeotermometreleri, nötr ve alkali, alkali klorürlü, 180-350°C sıcaklıktaki hazne kayadan gelen sularda iyi sonuçlar vermektedir (Özen, 2002). Na-K-Ca jeotermometrelerinde Ca/Na (mol/l) oranının birden büyük olduğu durumlarda Na/K jeotermometre bağıntıları, hazne kaya sıcaklığı hesaplamala-

rında çok yüksek değerler vermektedir (Özen, 2002). Jeotermometrenin bu olumsuz yönünü gidermek için Fournier ve Truesdell (1973) tarafından aşağıdaki bağıntı geliştirilmiştir.

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log (\text{Na} / \text{K}) + \beta \log (\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}) + 2,24} - 273,15$$

Bağıntıda Na, K, Ca, mol/l olarak alınır. B bir katsayıdır. Eğer $\log (\sqrt{\text{Ca}}/\text{Na})$ değeri (-) ise $\beta=1/3$, (+) ise $\beta=4/3$ olarak bağıntıya konur. Ayrıca $\beta=4/3$ olarak hesaplanan hazne kaya sıcaklığı 100°C 'den fazla ise $\beta=1/3$ alınarak hazne kaya sıcaklığı tekrar hesaplanabilir.

Çizelge 5. 9. Na/K jeotermometreleri ve bağıntıları (Tüm derişimler mg/l)

No	Na/K Jeotermometreleri	Jeotermometre Bağıntıları	Değinen Belgeler
1	Na/K	$t = 933 / (0.933 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Amorsson vd., 1983
2	Na/K	$t = 1319 / (1.699 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Amorsson vd., 1983
3	Na/K	$t = 777 / (0.70 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Amorsson vd., 1983
4	Na/K	$t = 856 / (0.857 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Truesdell, 1976
5	Na/K	$t = 1217 / (1.483 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Fournier, 1979b
6	Na/K	$t = 1178 / (1.470 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Nieva ve Nieva, 1987
7	Na/K	$t = 1390 / (1.750 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Giggenbach vd., 1983
8	Na/K (mmol)	$t = 908 / (0.692 + \log \text{Na/K}) - 273.15$	Fournier, 1979a
9	K/Mg	$t = 4410 / (13.95 - \log \text{K}^2/\text{Mg}) - 273.15$	Giggenbach vd., 1983
10	Li/Mg	$t = 2200 / (5.470 - \log (\text{Li}/\text{Mg}^{0.5})) - 273.15$	Kharaka ve Mariner, 1989
11	Na/Li	$t = 1590 / (0.779 + \log (\text{Na}/\text{Li})) - 273.15$	Kharaka vd., 1982
12	Na/Li (mmol) Cl<0.3	$t = 1000 / (0.389 + \log (\text{Na}/\text{Li})) - 273.15$	Fouillac ve Michard, 1981
13	Na/Li (mmol) Cl>0.3	$t = 1195 / (0.130 + \log (\text{Na}/\text{Li}^{0.5})) - 273.15$	Fouillac ve Michard, 1981
14	Na/Ca	$t = 1096.7 / 3.08 - \log (\text{Na}/\text{Ca}^{0.5}) - 273.15$	Tonani, 1980
15	K/Ca	$t = 1930 / 3.861 - \log (\text{K}/\text{Ca}^{0.5}) - 273.15$	Tonani, 1980

5.3.2. Birleşik jeotermometre uygulamaları

Giggenbach (1988) hazırladığı diyagramla suları içerdikleri Na, K ve Mg iyonlarının mg/l değerlerine dayalı olarak sınıflamıştır. Bu sınıflamaya göre; I.Bölgeye düşen sular; su kayaç ilişkisi açısından kısmen dengede, II.Bölgeye düşen sular

ise su-kayaç ilişkisi bakımından kimyasal dengelenmenin sağlanmamış olduğu sulardır.

Giggenbach (1988)'ın hazırladığı bu diyagramı Fournier 1990 yılında revize etmiş ve diyagram şimdiki halini almıştır. Buna göre diyagram üç bölgeden oluşmaktadır. I.bölgede; Su kayaç ilişkisi bakımından dengede sular, II.bölgede; Kısmen dengelenmiş sular, III.bölgede; Ham sular bulunmaktadır. Fornier II. ve III. Bölgelerin ayrımını, oluşturduğu “Olgunluk Derecesi” (Maturity Index) kavramına dayandırmıştır. Olgunluk indeksi (MI) 2.0'ın altında bulunan sular ham sular sınıfına girerken (III.bölge), olgunluk indeksi değeri 2.0'ın üzerinde bulunan sular ise kısmen veya tamamen olgunlaşmış, su-kaya ilişkisi dengede olan sular sınıfına girmektedir (I ve II. Bölge). Burada bahsedilen olgunlaşma su-kayaç arasındaki kimyasal dengeye karşılık gelmektedir. Na-K-Mg jeotermometrelerinin sağlıklı sonuçlar verebilmesi için örneklerin mg/l değerlerinin diyagramda dengelenmiş sular sınıfına (I.bölge) düşmesi gerekmektedir.

$$\text{Olgunluk İndeksi (MI)} = [0.315 \log (K^2/Mg)] - [\log (K/Na)] \text{ (Giggenbach, 1988)}$$

Na-K-Mg^{1/2} üçgen diyagramı solute termometre uygulamaları ile rezervuar sıcaklığı uygun jeotermal sular arasında açık ayırım yapmak için bir yöntem olarak Giggenbach (1988) tarafından önerilmiştir. Tekkehamam jeotermal alanından gelen su örneklerinden EY-1 (Babacık Pınarı) “Ham Sular” sınıfına düşmektedir. EY-2 (Çavuşoğlu Hamamı) “Kısmi Dengelenmiş Sular” , EY-3 (İnaltı Termal) “Kısmi Dengelenmiş Sular”, EY-4 (Umut Termal) “Kısmi Dengelenmiş Sular” alanlarına düşmektedir. Diğer incelenen örneklerde ise Kızıldere örneklerinden D-23 “Kısmi Dengelenmiş Sular” sınıfına düşmekte Kızıldere D-24 örneği ise “Ham Sular” sınıfına düşmektedir. Pamukkale örneklerinin hepsinin daha çok yer altı karışımının olduğu alana düştüğü gözlenmektedir (Şekil 5.4.).

sıcaklıkları birbirine yakın değerler göstermektedir. Karahayıt ve Pamukkale sahalarında daha yüksek sıcaklıklar ölçülmüş ve buradaki değerlerinde birbirlerine yakın oldukları gözlenmektedir.

Çizelge 5. 10. Çalışma alanındaki termal suların çözünen jeotermometresine göre sonuçları

Örnek No	Örnekleme Sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$	Amorphous Silica	Cristobalite Alpha	Cristobalite Beta	Chalcodony	Quartz	Quartz Steam Loss	K/Mg Giggenbach 1983	Na/K Fournier 1973	Na/K Truesdell 1976	Na/K Fournier & Potter	Na/K Fournier 1979	Na-K-Ca Fournier 1979	Na-K-Ca-Mg corrected Fournier 1979	
EY-1	56,3	28	104	54	129	134	147	50	162	167	219	201	168	40	Çalışma Alanı
EY-2	78,8	39	117	67	144	167	157	14	170	175	226	206	213	150	
EY-3	95,0	58	138	88	167	187	174	19	172	177	228	208	205	128	
EY-4	65,2	44	123	73	150	173	162	19	196	199	247	226	206	150	
D-23	95,5	109	193	144	229	239	216	10	214	215	262	238	246	192	Yaman, (2005)
D-24	96,2	98	181	131	216	228	207	10	214	215	262	238	246	192	
D-27	35,0							74	195	198	246	225	146	30	
D-29	51,9	-62	0	-43	15	48	55	58	273	269	308	279	190	30	
AB-8	59,0	25	101	52	126	151	145	51	189	192	242	221	172	63	Kymaz, (2011)
DK-1	35,0	-32	35	-11	54	85	88	90	210	212	259	236	155		Kurtu, (2015)
DK-2	35,1	-33	33	-12	52	83	86	94	213	215	261	238	155		
DK-3	46,6	-12	58	11	80	109	109	74	280	275	312	283	193		

5.4. İzotop Jeokimyasal Özellikleri

İzotop, bir atomun aynı sayıda protona, buna karşın farklı sayıda nötrona sahip olan türevleridir. Atomun ağırlığı proton ve nötronların toplam sayısına bağlı olduğundan, aynı atomun izotopları farklı atomik ağırlıklara (atomic mass unit; amu: atomik kütle birimi) sahiptirler. Söz konusu atomik ağırlık farklılığı aynı atomun farklı izotoplarının fiziksel ve kimyasal süreçlerde farklı davranmasına neden olur. Bu durumun bir sonucu olarak; örneğin su molekülünü oluşturan hidrojen ve oksijen atomlarının farklı izotoplarının birbirine olan oranları değişmektedir. Anılan izotop oranlarındaki değişimin incelenmesi sonucunda her hangi bir suyun etkilendiği fiziksel ve kimyasal süreçler belirlenebileceği gibi farklı sular arasındaki olası karışımlar hakkında da yorumlamalar yapılabilir. İzotoplar; sıcaklık ve su kayaç etkileşimine hassasiyetlerinden dolayı jeotermal araştırmalarda etkin bir akifer izleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Oksijen ($\delta^{18}\text{O}$), Döteryum ($\delta^2\text{H}$) ve Tritiyum izotopları termal suların kökeni, yaşı, beslenme alanı, yüksekliği ve yer altında kalış sürelerini tahmin etmede kullanılır.

İnceleme alanı ve çevresinde yer alan kaynaklara ait sıcak su örnekleri Duraylı Oksijen ($\delta^{18}\text{O}$), Döteryum ($\delta^2\text{H}$) ve Tritiyum içerikleri bakımından incelenmiş, analiz sonuçları (Çizelge 5.11)'de verilmiştir. Bu verilere göre yeraltı suyunun dolaşım sistemi ve hidrojeolojik özellikleri aydınlatılmaya çalışılmıştır.

Çizelge 5. 11. İzotop analiz sonuçları

Örnek No	Konum	Yaman, (2005)			Özgür, (1998)	
		$\delta^{18}\text{O}$ (% SMOW)	$\delta^2\text{H}$ (% SMOW)	^3H (TU)	$\delta^{18}\text{O}$ (%SMOW)	$\delta^2\text{H}$ (%SMOW)
EY-1	Babacık Pınarı	-6,87	-51,8	<1,0		
EY-2	Çavuşoğlu Hamamı	-5,84	-55	<1,0		
EY-3	İnalı Termal	-6,03	-56	<1,1		
AB-1	Pamukkale Özel İdare Kaynak	-9,14	-61	3,3	-9,14	-60,1
AB-2	Pamukkale Jandarma Kaynak	-9,23	-61,9	2,9		
AB-3	Karahayit Kaynak	-8,74	-58,5	<0,7	-8,56	-57,3
AB-8	Gölemeli Hamam	-8,32	-60,4	<1,3		
D-19	Kızılder/KD13	-5,31	-54,1	<1,0		
D-20	Kızılder/KD22	-5,4	-55,1	<0,7		

Duraylı izotop analiz sonuçları ve örnekleme sırasında ölçülen fiziksel ve kimyasal parametrelere ilişkin bilgiler (Çizelge 5.11)'de verilmiştir. Çizelge de görüldüğü üzere termal suların $\delta^2\text{H}$ değerleri -61,9 ile -51,8 arasında değişirken, $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ise -9,23 ile -5,84 arasında değişim göstermektedir. Çalışma alanındaki termal suların trityum içerikleri 0,7 ile 3,3 TU arasındadır.

Hidrojen atomunun 1 proton ve 2 nötronlu izotopu olan trityum radyoaktif bir izotop olup; yarılanma ömrü 12.43 yıldır. Trityum izotopu çekirdekte elektron (P ışını) salınması ile yarılanır. Elektronların enerjisi düşük olup; doğal düzeydeki trityum derişimi insanlar için sağlık riski oluşturmaz. Duraylı izotoplardakinden farklı olarak trityum izotop miktarı bir derişim birimi olan TU (tritium unit: trityum birimi) ile ifade edilir, 1 TU, 1018 hidrojen atomundan birisinin H olduğunu ifade etmektedir. Atmosferik nemdeki trityumun doğal ve antropojenik olmak üzere başlıca iki kaynağı vardır. Doğal trityum izotopu atmosferin üst tabakasında (stratosfer) kozmik 90 kökenli nötronların 5 N izotopuna çarparak onu 5 C ve 8 H 'a ayırıştırması ile oluşmaktadır. Doğal yoldan atmosfere yayılan trityumun yağış suyundaki eşdeğeri 10 TU 'dir. Atmosferdeki trityumun bir bölümü antropojenik kaynaklı olup; özellikle 1950'li yıllarda başlayan ve 1963 yılında uluslararası antlaşmalar ile yasaklanan atmosfere açık yerüstü termonükleer bomba denemeleri sonucunda oluşmuştur. Bu yolla trityum üretimi 1963 yılında 1000 TU düzeyine ulaşmış olup; 1963 yılından

günümüze değin doğal yarılanma yoluyla azalmıştır. Günümüz atmosferik neminde trityum derişimi doğal fon (natural background) değerine (10 TU) yaklaşmıştır. Radyoaktif olan trityum sürekli bozunmaya uğraması nedeniyle belirli bir bölgede yer altı suyunu besleyen yağışın trityum içeriğinin bilinmesi durumunda, yeraltı suyunun ağırlıklı ortalama yaşının belirlenmesi ve/veya farklı yer altı sularının karışımına ilişkin öngörülerde bulunulması mümkün olmaktadır (Tezcan, 1992).

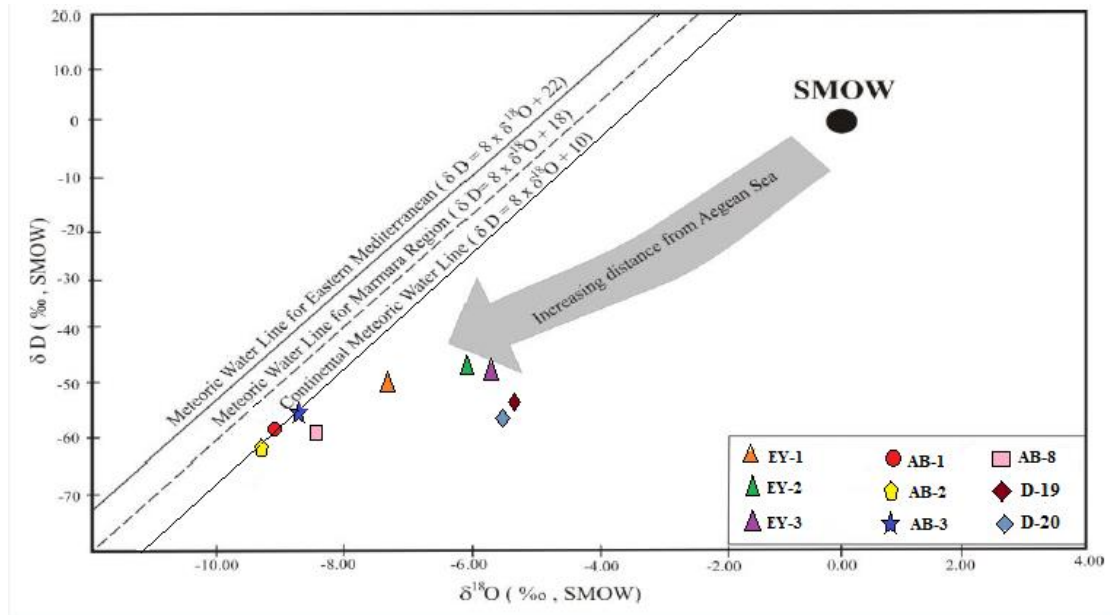
Bu çalışmada Global meteorik su doğrusu, Marmara meteorik su doğrusu, Akdeniz meteorik su doğrusu kullanılmıştır. Su doğrularının denklemleri ve referansları aşağıdaki gibidir.

Global Meteorik Su Doğrusu; (GMWL); $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \text{ ‰ (SMOW)}$

Akdeniz Meteorik Su Doğrusu; $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 22 \text{ ‰ (SMOW)}$ (Gat & Carmi, 1970)

Marmara Meteorik Su Doğrusu; $\delta d = 8 \cdot \delta^{18}O + 18 \text{ (SMOW)}$

İnceleme alanı içerisinde yeralan izotop analizi yapılmış sular grafiğe aktarılmıştır (Şekil 5.5.). Buna göre inceleme alanının yakınında bulunan Gölemezli ve Karahayıt-Pamukkale jeotermal alanlarıdaki sular meteorik kökenlidir. Kızıldere-Tekkehamam jeotermal alanındaki termal sular global meteorik sulardan oluşmaktadır.



Şekil 5. 5. Tekkehamam ve yakın çevresi jeotermal sularında δD ve $\delta^{18}O$ izotopu ilişkisi (EY-1, EY-2, EY-3 Tekkehamam; AB-1, AB-2, AB-3, AB-8 Gölemezli; D-19, D-20 Kızıldere)

Alanda su kayaç etkileşiminin Gölemezli ve Karahayıt-Pamukkale jeotermal alanlarındaki termal sulardan uzun sürmesine ve farklı özellikte olmasına bağlı olarak $\delta^{18}\text{O}$ bakımından zenginleştiği ve bir doğru üzerinde yer aldığı belirlenmiştir. Clark ve Fritz (1997), kıtasal bölgelerde trityum izotopu içeriği 0.8-4 TU olan suların güncel ve eski suların karışımı olduğunu belirtmiştir.

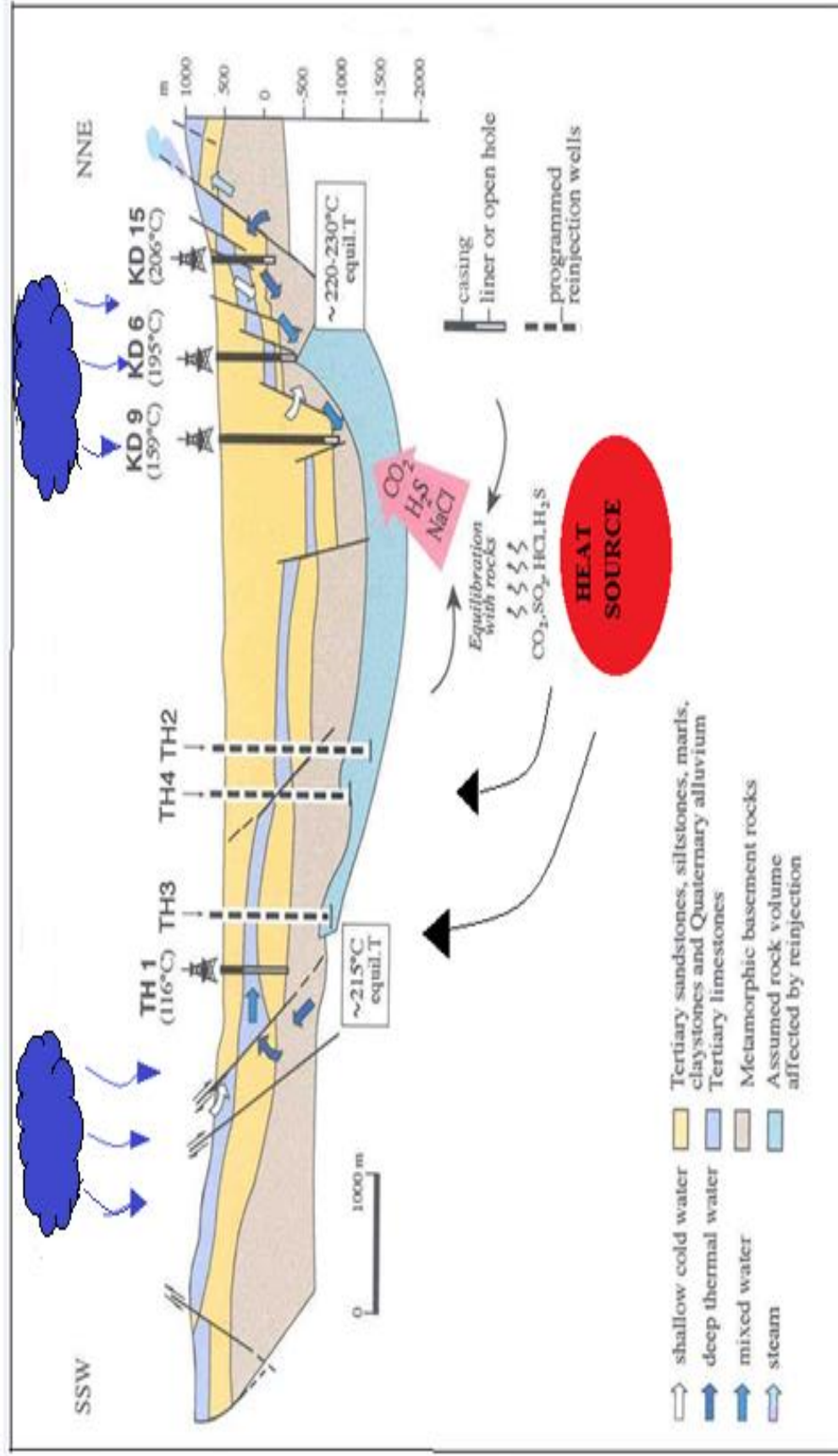
5.5. Tekkehamam Jeotermal Alanının Hidrojeolojik Modellemesi

Tekkehamam ve yakın çevresi yaklaşık olarak 18 km² olan bir alandan oluşmaktadır ve jeolojik olarak alanda Paleozoyik yaşlı metamorfik kayaçlar Pliyosen yaşlı sedimanter kayaçlar bulunmaktadır. Kayaçlar içinde jeotermal rezervuarlarının oluşumu için az geçirimli örtü kayaçlarının yanı sıra birincil ve ikincil permeabilite oldukça önemli rol oynamaktadır. Çalışma alanında birincil permeabilite ile Sazak Formasyonu kireçtaşları ve ikincil permeabilite ile mermer, kuvarsit ve kuvarşistlerden oluşan ardalanmalı İğdecik Formasyonu kendisini göstermektedir. Böylece jeotermal su rezervuarlarının oluşumunu aşağıdaki gibi açıklayabiliriz (Şekil 5.6.).

- 1) Sazak Formasyonunda bulunan kireçtaşlarının oluşturduğu jeotermal rezervuar:** Bu rezervuarda Pliyosen yaşlı Tosunlar Formasyonu ve Kolonkaya Formasyonu geçirimsiz örtü kayaçları oluşturmaktadır. Sazak Formasyonu içinde Alt Pliyosen yaşlı geçirimli kireçtaşları ilk rezervuarı oluşturmaktadır. Ve Alt Pliyosen yaşlı Kızılburun Formasyonunda geçirimsiz taban kayaçlarını oluşturur. Burada Sazak Formasyonuna ait kireçtaşlarında bulunan jeotermal su rezervuarı yaklaşık 800 m derinde bulunmaktadır ve 400 m kalınlık 150-198°C değişen sıcaklık göstermektedir.
- 2) İğdecik Formasyonunda ardalanmalı olarak mermer-kuvarsit-kuvars bulunan jeotermal su rezervuarında** Alt Pliyosen yaşlı Kızılburun Formasyonunda geçirimsiz örtü kayaçlarını oluşturmaktadır. Buna karşın Paleozoyik yaşlı ve geçirimsiz olan taban kayalarıda temeli oluşturmaktadır. İğdecik Formasyonunda oldukça iyi gelişmiş çatlak sistemi bulunmaktadır. Burada sıcak su re-

zervuarı 1700-2000 m derinlikte bulunmaktadır. 250°C kadar olan sıcaklığa sahiptir.

- 3) Gnayslardaki jeotermal su rezervuarı: Gnayslar burada az geçirimli olan mikaşistler tarafından örtülürler. Mikaşistler rezervuarı oluşturan örtü kayalar olarak değerlendirilebilirler.
- 4) Tekkehamam çalışma alanında meteorik sular yeryüzünden aşağıya doğru süzülürler. Bunlar 3000-5000 m arasında değişen derinlikte fay zonlarına doğru ilerlerler. Ve hareketleri Sazak ve İğdecik Formasyonları üzerinde olmaktadır. Burada bulunan sular magma kaynağı tarafından ısıtılırlar. Daha sonra 2-4 km derinde bulunan magma kaynağı bir reaksiyon zonu oluşturmaktadır. Büyük Menderes rift zonunda kalk-alkali, bazik ve ortaçağ volkanik kayalar Denizli ve Söke arasında bulunurlar ve bunlar Üst Pliyosen yaşlıdır. Buna karşın Kula yöresinde 7,5 milyon yıl ile 18.000 yıl arasında değişen yaşlara sahip Kula volkanizması bulunmaktadır. Bu volkanizma yörede bulunan jeotermal suların ısıtılmasında önemli rol oynamış bulunmaktadır.
- 5) Derinde bulunan suların magma tarafından ısıtılmış kayalarla yoğun etkileşimi söz konusudur. Bu etkileşim esnasında CO₂, SO₂, HCl, H₂S, HBr, HF ve H₂ gibi uçucu bileşenler magmadan ayrılarak gaz fazında jeotermal sulara ulaşmaktadır. Burada alterasyona uğrayan kayalar gazlar ve sirkülasyon yapan sular arasında dengelenme olayları meydana gelmektedir. Daha sonra yukarıya doğru hareket eden sular CO₂, H₂S ve NaCl gibi bileşimler içermektedir. Hidrotermal konveksiyon ısıtılan sulara baskı uygulamaktadır ve böylece bu sular az olan yoğunlukları dolayısıyla yeryüzüne ulaşmaktadır. Bunlar böylece tektonik zayıf zonlarda pH nötr sıvılar olarak gaz ve buhar şeklinde yeryüzüne çıkmaktadır. Bu yüzden bizde bu suları yeryüzünde özellikle jeotermal kaynaklar olarak vermekteyiz.



Şekil 5. 6. Tekkehamam jeotermal sisteminin basitleştirilmiş hidrojeolojik oluşum modeli (Özgür, 1998'den uyarlanmıştır).

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

6.1. Tekkehamam Jeotermal Alanında Olası Isı Kaynağı, Jeotermal Sistem ve Tektonik Arasındaki İlişki

Ülkemizde birçok düşük ve orta sıcaklıkta jeotermal kaynak bulunmakta ve bunların çoğu oldukça önemli kırık sistemleri bağlı oluşmaktadır (Serpen ve Mihçakan, 1999; Palabıyık ve Serpen, 2008). Aynı şekilde, Batı Anadolu Bölgesinde bulunan jeotermal sistemlerde benzerdir. Ülkemiz, Alp-Himalaya Dağ Kuşağı içinde yer almaktadır. Batı Anadolu Bölgesinde sınırları belirlenmiş gerilme tektoniği hüküm sürmekte ve burada litosferik gerilim daha çok Alp-Himalaya zonu levhalarının kıtasal çarpışması ile ilişkili olmaktadır. Batı Anadolu Bölgesi, D-B doğrultulu dağlarla ve kalın tortullarla dolu vadiler ile karakterize edilir. Bölge Geç Miyosen başlangıcına kadar, K-G yönünde kısalma yaşamıştır. Tortoniyen başında, bölgede gerilme tektoniği hasil olmuş, burada kısmi ergimiş kabuk gerilmekte sonrasında ise ince ve kırılğan kabuk şekil almıştır (Yılmaz, 1989; Alptekin vd., 1990; Gemici ve Tarcan, 2002). Türkiye'nin batısında birkaç D-B yönlü uzanım gösteren grabenler vardır.

Türkiye'nin önemli jeotermal alanlarının çoğu saha bu grabenlerin kenarlarında yer almaktadır. Büyük Menderes grabeni bunlardan biri ve D-B uzanımlı olup Denizli'nin doğusundan başlayarak Ege Denizi içinde devam ederek yaklaşık 200 km'ye ulaşır. Büyük Menderes grabeni, Söke'de 35 km, Nazilli'de 35 km, Denizli'de 40 km, Salavatlı'da 10 km ve Buharkent'te 5 km genişlik sunar (Şimşek, 1988). Kızıldere jeotermal alanı derinliği 500-1000 m arasında değişen sekiz üretim kuyusu ile Türkiye'de ilk elektrik enerjisi üretilen jeotermal santaldir. Menderes bloğu 50 milyon yıl önce Sakarya bloğu ile çarpışmış ve daha sonra yüksek sıcaklık metamorfizması ve granit intrüzyonları meydana gelmiştir (van Hinsbergen vd., 2010). Menderes Masifi'nin ortaya çıkışının ilk aşaması, Geç Oligosen (25 milyon yıl) ile Orta Miyosen (16 milyon yıl) (Seyitoğlu vd., 2004) veya En Genç Oligosen (Purvis ve Robertson, 2005) veya En Son Oligosen-Erken Miyosen (Cavazza vd., 2009) arasında olmaktadır, ya da Geç Oligosen (25 Ma) ve Orta Miyosen (16 Ma) veya Son Oligosen (Seyitoğlu vd., 2004) arasında

meydana gelen Erken Miyosen zamanıdır. Agostini vd. (2010). Menderes Masifi metamorfik kayaçlarının yükselmesini ve böylece ortaya çıkışını graben gerilme tektoniği ve trans-gerilmeli fay sistemlerinin bir sonucu olarak yorumlamaktadır. Bu yüzden Bozkurt vd. (2011) kuzey Menderes Masifinin gerilme tektoniğine bağlı ortaya çıkışı için Geç Oligosen (30 milyon yıl) önermektedir. Cavazza vd. (2011) Ege bölgesini etkileyen gerilme tektoniğinin Menderes Masifinin ortaya çıkmasında bölgesel anlamda önemli rol oynadığını belirtmektedir.

Bazı çalışmalarda (i) Erken-Orta Miyosen gerilme tektoniği ve Ege hendeğinin geriye dönüşü ve (ii) Geç Miyosen-Pliyo-Kuvaterner gerilim tektoniği ve Batı Anadolu'da dalan Ege levhasının başlangıcı olmak üzere iki belirli bağlantının olduğunu ileri sürmektedirler. Ege Bölgesi graben sistemi gerilme tektoniğinin zamanlaması Bozkurt ve Sözbilir (2004), Ersoy vd., 2010 ve van Hinsbergen vd. (2010) tarafından detaylı olarak tartışılmıştır. D-B doğrultulu olan üç graben Simav, Gediz ve Büyük Menderes masifini bölmektedir. Batı Anadolu'da graben tipi basenlerin tektonik evrimi epizodik (Bozkurt, 2000; Ersoy vd., 2010) veya darbeleri gerilme kuvvetleri (Bozcu, 2010, Purvis ve Robertson, 2004) Geç Senozoyik zamanında kontrol edilir. Bu havzalarda levha içinde oluşan magma sokulumları bulunmaktadır.

Menderes masifi içindeki litostratigrafik birimler: Candan vd., (2001) tarafından; (i) Pan-Afrikan temeldeki çekirdek serisi ve (ii) Paleozoyik-Erken Tersiyer metasedimentlerini içeren örtü serisi olmak üzere iki tektono-metamorfik birime ayrılırlar. Prekambriyen-Kambriyen yaşlı olan Pan-Afrikan orojenezi ile ilişkili çok fazlı deformasyon ve metamorfizmaya sahip "çekirdek serisi" (Oberhansli vd., 1997; Candan ve Dora 1998; Dora vd., 2001); gözlü gnayslar, metagranitler, yüksek dereceli şistler, paragnayslar ve eklojit kalıntıları içeren metagabrolardan oluşur (Şengör vd., 1984; Satır ve Friedrichsen, 1986; Candan, 1995; 1996; Candan vd., 1998; 2001; Oberhansli vd., 1997; 1998). Masifin çekirdeğinde en fazla egemen olan ve en fazla yayılıma sahip litolojiyi oluşturan gözlü gnayslar; iyi gelişmiş milonitik foliasyon ve K-G yönlü mineral uzaması ile karakterize edilen blastomilonitlerden meydana gelir (Bozkurt ve Oberhansli, 2001).

Paleozoyik-Erken Tersiyer yaşı örtü kayaçları altta Ordovisiyen (?) - Permo-Karbonifer yaşı düşük-orta metamorfizma dereceleri fillitler, kuvarsitler ve mermerlerden oluşur (Candan vd., 2001). Erken Triyas yaşı lökogradit granitlerin bu kayaçlara sokulum yaptığı bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Şengör vd., 1984; Reischmann vd., 1991; Dannat ve Reischmann, 1998; Koralay vd., 1998). Bu birimlerin üzerine gelen Geç Triyas-Erken Tersiyer yaşı kayaçlar, metaboksit içeren platform tipi mermerler ve metaolistrosromlardan oluşur (Candan vd., 2001).

Tekkhamamı (Denizli) jeotermal alanı, Batı Anadolu Bölgesinin Denizli ilinin Büyük Menderes Graben sistemi içinde ülkemizin en önemli alanlarından biridir. Araştırma alanı, Büyük Menderes Grabeninin KB kısmında olup Sarayköy ilçesinden 18 km uzaklıkta bulunmaktadır. Tekkehamamı bölgesi 37° 46' 27" K enlemle 29° 05' 15" D boylamları üzerindedir.

6.2. Çalışma Alanının Hidrojeolojik, Hidrojeokimyasal ve İzotop Jeokimyasal Özellikleri

Çalışma alanında yoğun genç tektonik etkiler sonunda gelişen eklem takımları, çatlaklar ve faylar nedeniyle ikincil gözeneklilik ve geçirimsizlik kazanan kayalardan kireçtaşı, mermer ve kuvarsit bulunmaktadır. Sahada, üçüncü rezervuar kayayı bulmak olasıdır. Belirlenen iki hazne kaya vardır. Bu rezervuarlar Sazak ve İğdecik Formasyonlarında bulunmaktadır. Kızılburun, Kolonkaya ve Tosunlar formasyonları da çalışma alanında geçirimsiz temel ve örtü kayaçları oluşturmaktadır.

Jeotermal sular 56.3 ile 95°C arasında değişen yüzey sıcaklıklarına sahiptir. Tekkehamam ve yakın çevresi jeotermal suları Na+K>Ca>Na baskın katyonlar ve HCO₃>SO₄>Cl baskın anyonlar olarak sınıflandırılabilir. Majör anyonlar Cl-SO₄-HCO₃ baz alındığında (Giggenbach, 1988), bu üçgen diyagramı jeotermal suları sınıflandırmak için kullanılır. Bu olgunlaşmamış kararsız suları ayırt etmeye yardımcı olur ve karıştırma ilişkileri coğrafi gruplaşmalar bir ilk

göstergesidir. Bu çalışma alanında bulunan suları ayırtlamaya yarar ve burada bulunan suların karışım ilişkileri ile ilgili belirteçleri verir. İnceleme alanındaki sıcak suların büyük bir kısmının sodyum, sülfat ve bikarbonatlı su tipini yansıttıkları görülmektedir. Diğer sıcak sular ise Na, Ca, SO₄ ve HCO₃ sularıdır. Sıcak ve mineralli suların diğer bir sınıflaması da başlıca anyonlara göre (Cl, HCO₃, SO₄) yapılabilir (Giggenbach, 1991). Bu sınıflamaya göre yöredeki sıcak ve mineralli sular kuyulardan elde edilmekte ve sülfat içeriği yüksek olarak bulunmaktadır. Bu sulardaki sülfat içeriğinin fazlalığı Sazak formasyonunun evaporitik ortam ürünü olan jipsli seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Daha sık sondajlardan Neojen kayaların oluşturduğu akiferlerden alınan sıcak sular ise soğuk yer altı suları ile belli oranlarda karışmaları nedeniyle seyreltik bikarbonatlı sular olarak gözlenmektedirler.

Çalışma bölgesindeki sular doygunluk indekslerine göre incelendiğinde Babacık Pınarı ve Çavuşoğlu Hamamı mineral doygunluk indeksleri dikkate alındığında birbirlerine yakınlık göstermektedirler. Buna göre Babacık Pınarındaki örneğin tüm sıcaklıklarda çökelttiği bir mineral yoktur. Jips ve Sepiyolit mineralleri ise tüm sıcaklıklarda doymamış özelliktedir. Çavuşoğlu Hamamı örneği ise; aynı şekilde tüm sıcaklıklarda çökelttiği mineral yoktur ve Jips ve Sepiyolit mineralleri ise tüm sıcaklıklarda doymamış özelliktedir. İnaltı Hamamı su örneğinin mineral doygunluk indeksi incelendiğinde; Kuvars minerali hariç, suda yine tüm sıcaklık değerlerinde doygunluk gösteren mineral bulunmaktadır. Bu örnekte Jips ve Dolomit mineralleri tüm sıcaklıklarda doymamış özellik sergilemektedir. Umut termal su örneğinde; yine Jips tüm sıcaklıklarda doymamış olarak yer almaktadır. Saha genelinde Kalsit ve Aragonit mineralleri baskın karbonat mineralleridir.

İnceleme alanı içerisinde yer alan izotop analizi yapılmış sular grafiğe aktarılmıştır. Buna göre inceleme alanının yakınında bulunan Gölemezli ve Karahayıt-Pamukkale jeotermal alanlarındaki sular meteorik kökenlidir. Kızıldere-Tekkehamam jeotermal alanındaki termal sular global meteorik sulardan oluşmaktadır. Alanda su kayaç etkileşiminin Gölemezli ve Karahayıt-Pamukkale jeotermal alanlarındaki termal sulardan uzun sürmesine ve farklı özellikte

olmasına bağlı olarak $\delta^{18}\text{O}$ bakımından zenginleştiği ve bir doğru üzerinde yer aldığı belirlenmiştir. Clark ve Fritz (1997), kıtasal bėlgelerde trityum izotopu içeriği 0.8-4 TU olan suların güncel ve eski suların karışımı olduğunu belirtmiştir.

KAYNAKLAR

- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E. ve Svavarsson, H., 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. Pergamon Press. The United States of America, 567-577.
- Arnórsson, S., 1995. Scaling problems and treatment of separated water before injection. In: WGC-95, book of course on injection technology, International Geothermal Association, Florence, 65-77.
- Agostini, S., Tokcaer, M., Yılmaz Savaşçın, M., 2010. Volcanic rocks from Foça-Karaburun and Ayvalık lesves grabens (Western Anatolia) and their petogenic-geodynamic significance. *Turkish journal of Earth Sciences* 19, 57-184 s.
- Alptekin, Ö., Ezen, U., Uçer, S.B., 1990. Heat flow, seismicity and the crustal structure of Western Anatolia. *International Earth Sciences Congression Aegean Regions, Proceedings Vol-II*, İzmir.
- Alpman, N., 1963. Batı Anadolu Tabii Sıcak suları İçmeceleri ve Maden Sularının Teknik Envanteri, MTA Rap. NO:3629, Ankara.
- Bilgin, A., 1978, Denizli-Babadağ dolayının jeoloji-Petrografi ve jeokimyası, Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Doktora Tezi, 140 p. Erzurum.
- Bozcu, M., 2010, " Geology of Neogene basins of Buldan-Sarıcaova region and their importance in Western Anatolia neotectonics ". *International J. Of Earth sci (Geol Rundsch)* 99, 851-860.
- Bozkurt, E., Park, R.G., 1994. Menderes Masifi güneyindeki Tersiyer yaşlı gerilmeli makaslama zonu. 47th Geological Congress of Turkey, 21-25 February, Ankara, p.125.
- Bozkurt, E., Winchester, J.A., Park, R.G. 1995. Geochemistry and tectonic significance of augen gneisses from the southern Menderes Massif (west Turkey). *Geol. Magazine, Cambridge Univ. Press*, 132, 287-301 s.
- Bozkurt, E., Park, R.G., 1997. Microstructures of deformed grains in the augen gneisses of Southern Menderes Massif and their tectonic significance. *Geol. Rundsch*, 89, 103-119.
- Bozkurt, E., Park, R.G., 1999. The structure of the Palaeozoic schists in the southern Menderes Massif, Western Turkey; a new approach to the origin of the main Menderes metamorphism and its relation to the Lycian Nappes *Geodinamica Acta* 12; 25-42.

- Bozkurt, E., Satır, M., 2000. The southern Menderes Massif (western Turkey): geochronology and exhumation history. *Geol. J.*, 35, 285-296 s.
- Bozkurt, E., 2001. Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, Western Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 728-744 s.
- Bozkurt, E., Oberhänsli, R., 2001. Menderes Massif (Western Turkey); structural, metamorphic and magmatic evolution a synthesis. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 679-708.
- Bozkurt, E., Sözbilir, H., 2004. Tectonic evolution of the Gediz Graben; field evidence for an episodic, two-stage extension in western Turkey. *Geol. Magazine. Cambridge Univ. Press*, 141, 63-79.
- Bozkurt, E., Satır, N., Buğdaycıoğlu, Ç., 2011. Surprisingly young Rb/Sr ages from the Simav extensional detachment fault zone, northern Menderes Massif, Turkey, *Journal of geodynamics*, 52, 406-431.
- Calmbach, L., 1999, *aquaChem Computer Code-Version 3.7: Aqueous geochemical analyses, plotting and modelling*, Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Ontario, Canada, 184 S.
- Candan, O., 1995. Menderes Masifinde kalıntı granulit fasiyesi metamorfizması. *International Journal of Earth Sciences*, 4, 35-55 s.
- Candan, O., 1996. Çine Asmasifindeki (Menderes Masifi) gabroların metamorfizması ve diğer asmasiflerle karşılaştırılması. *Turkish J. Earth Scr.*, 4, 123-139.
- Candan, O., Dora, O.Ö., 1998. Granulite, eclogite and blueschists relics in the Menderes Massif: an approach to Pan-African and Tertiary metamorphic evolution. *Geol. Bull. Turkey*. 41, 1-35 s.
- Candan, O., Dora, O.Ö., Oberhänsli, R., Çetinkaplan M., Partzsch J.H., Dürr, S., 1998. Pan-African high-pressure metamorphism in the Prekambrian basement of the Menderes Massif, Western Anatolia, Turkey. *Abstract 3th Int Turkish Geol Symp*, 275 s.
- Candan, O., Dora, O.Ö., Oberhänsli, R., Çetinkaplan, M., Partzsch, J.H., Warkus, F.C., Dürr, S., 2001. Pan-African high-pressure metamorphism in the Prekambrian basement of the Menderes Massif, western Anatolia, Turkey. *Int. J. Earth Sci.*, 89, 793-811 s.
- Cavazza, O., Okay, A.I., Zattin, M., 2009. Rapid early-middle Miocene exhumation of the Kazdağ metamorphic core complex (Western Anatolia). *International Journal of Earth Sciences* 98, 1935-47.

- Cavazza, W., Federica, I., Okay, A.I., Zatin, M., 2011. Apatite fission-track thermochronology of the Western Pontides (NW Turkey). Rapid communication: Geological Magazine, PP.1-8.
- Clark, I.D. and Fritz, P., 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis Publishers, 327 pp.
- Collins, A.S., Robertson, A.H.F., 1998. Processes of Late Cretaceous to Late Miocene episode thrust-sheet translation in the Lycian Taurides, SW Turkey. J. Geol. Soc. Lond., 155, 759-772.
- Craig, H., 1963, "The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas " In: Tongiorgi, E. (ed), Nuclear Geology in Geothermal Areas, spoleto, 1963. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa, 17-53.
- D'Amore, F. ve Arnórsson, S., 2000. Geothermometry. S. Arnórsson, (Ed.). Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use (152-199). International Atomic Energy Agency, Vienna, 351.
- Dannat, C., Reischmann T., 1998. Single zircon ages of migmatites from the Menderes Massif, SW Turkey. Programm des Workshop "Das Menderes Massiv (Türkei) und seine Nachbargebiete, Mainz, 6 s.
- Dewey, J.F., Şengör, A.M.C., 1979. Aegean and surrounding regions; complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. Geological Society of America Bulletin, 190, 84-92.
- Doğdu, N., 2004. Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü Denizli Bölgesi Jeotermal Enerji Raporu, Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri 2005.
- Dora, O.Ö., Candan, O., Dürr, H., Oberhänsli, R., 1995. New evidence on the geotectonic evolution of the Menderes Massif. In: Proceedings of the International Earth Sci. Col. On the Aegean Region (Pişkin Ö., Ergün, M., Savaşçın M.Y, Tarcan, G. -eds), 53-72 s, İzmir.
- Dora, O.Ö., Candan, O., O, Kaya., Koralay, E., Dürr, S., 2001, Revision of "Leptitegneiss" in the Menderes Massif: a supracrustal metasedimentary origin. In: Menderes Massif (Western Turkey): structural, metamorphic and magmatic evolution (Bozkurt, E., Oberhänsli, R. -eds), Int. J. Earth Sci., 89, 832-847 s.
- Erişen, B., Akkuş, İ., Uygur, N., Koçak, A., 1996. Türkiye Jeotermal Envanteri. MTA, Ankara, 480 s.
- Ersoy, Y., Helvacı, C., Sözbilir, H., 2010. Tectono-stratigraphic evolution of the NE-SW trending superimposed Selendi basin: implication for late

Cenozoic Crustal extension in Western Anatolia. *Tectonophysics* 488, 210-232 s.

- Fouillac, C., Michard, G., 1981. Sodium/Lithium ratio in water applied to the geothermometry of geothermal waters. *Geothermics*, 55-70.
- Fournier, R.O., Trudell, A., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- Fournier, R.O., 1977. "Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems", *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier, R.O., 1979. "A revised equation for the Na/K geothermometer" *Geothermal Resources Council Transactions*, 3, 221-224.
- Fournier, R.O., Potter, R.W., 1979. Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1543-1550.
- Fournier, R.O., 1990. The interpretation of Na-K-Mg relation in geothermal waters *Geoth. Res. Council Trans.*, 14, 1421-1425.
- Fridleifsson, Ingvar B; Bertani, Ruggero; Huenges, Ernst; Lund, John W; Ragnarsson Arni; Rybach Ladislaus., 2008. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. Huebeck, Germany, pp 59-80, retrieved 2009-04-06.
- Gemici, U., Tarcan, G., 2002. Distribution of boron in thermal waters of western Anatolia, Turkey, and examples of their environmental impacts, *Environmental Geology*, 12, 125-132 s.
- Giggenbach, W.F., 1988. "Geothermal solute equilibria - Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development (Co-ordinator D'Amore, F). United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) / United Nations Development Programme (UNDP) Centre on Small Energy Resources, Rome, 119-144.
- Gislason, A. ve Assthorsson, O.S. , 1996. Food of capelin in the subarctic waters of north of Iceland. *International Council for the Exploration of the Sea, C.M. /L32*, 15.
- Gökgöz, A., 1998. Geochemistry of the Kızıldere-Tekkehamam-Buldan-Pamukkale Geothermal Fields, *Geothermal Training Programme Reports*, 115-156, Reykjavik, Iceland.

- Göktaş, F., 1990. Denizli M22-b1, M22-b2 ve M22-b3 paftalarının jeolojisi, İzmir. Maden Tetkik ve Arama Raporu, No:9114.
- Hetzel, R., Passchier, C.W., Ring, U., Dora, O.Ö., 1995a. Bivergent extension in orogenic belts; The Menderes Massif (southwestern Turkey). *Geology*, 23, 455-458.
- Hetzel, R., Ring, U., Akal, C., Troesch, M., 1995b. Miocene NNE directed extensional unroofing in the Menderes Massif, southwestern Turkey. *J. Geol. Soc. London*, 152, 639-654.
- Hetzel, R., Reischmann, T., 1996. Intrusion age of Pan-African augen gneisses in the southern Menderes Massif and the age of cooling after Alpine ductile extensional deformation. *Geol. Mag.*, 183, 565-572.
- Hetzel, R., Römer, R.L., Candan, O., Passchier, C.W., 1998. Geology of the Bozdağ area, central Menderes Massif, Sw Turkey; Pan-African basement and Alpine deformation. *Gell Rundsch*, 87, 394-406.
- Jackson, J.A., McKenzie, D., 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan; *Geophys. R. Astr. Soc.*, 77, 185-264.
- Karahan, Ç., 2009, Aydın Çiftlik Aç-1 sıcak su sondajı kuyu bitirme raporu, MTA, derleme No: 11183.
- Keskin, B., 1972. Kızıldere Jeotermal sahası jeokimyasal analizleri ve 3. Rezervuar varlığı hakkında rapor, MTA Rapor No: 785, 180 s. Ankara.
- Ketin, İ., 1968. Türkiye'nin genel tektonik durumu ile başlıca deprem bölgeleri arasındaki ilişkiler. *Maden Tetkik ve Arama Derg.* No. 71, Ankara.
- Kharaka, Y.K., Mariner, R.H., 1989. Chemical Geothermometers and their Application to formation waters from sedimentary basins. In. N. D. Nasers, T.H., Mc Culloh (Eds.). *Thermal History of sedimentary Basins; Methods and Case Histories*, Springer Verlag, 99-117.
- Kıymaz, İ., 2011. "Karahayit (Denizli) yöresinin jeotermal potansiyeli" Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Isparta. 42 s.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H., Bozkurt, E., 1999. Evidence from the Gediz Graben for episodic two-stage extension in western Turkey *J. Geol. Soc. London*. 156, 605-616.
- Koralay, E., Satır, M., Dora, O.Ö., 1998. Geochronologic evidence of Triassic and Precambrian magmatism in the Menderes Massif, west Turkey. *Third Int. Turkish Geol. Symp*, 285-286.

- Kutlu, D., 2015. Pamukkale (Denizli) ve yakın çevresi jeotermal sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- McKenzie, D.P., 1978., Active tectonics at the Alpine-Himalayan belt; The Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 55, 217-254.
- Möller, P., Dulski, P., Savaşçın M.Y., Conrad M., 2004. Rare earth elements, yttrium and Pb isotope ratios in thermal spring and well waters of West Anatolia, Turkey: a hydrochemical study of their origin. *Chemical Geology*, 206, 97-118 s.
- Mutlu, H., 1999. Kimyasal Modellemedeki Temel Prensipler. JENARUM. Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi Yaz Okulu Ders Notları, İzmir. 38-54 s.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag, Berlin, 263 p.
- Nieva, D., Nieva, R., 1987. Development in geothermal energy in Mexico, Part 12_A cationic composition geothermometer for prospection of geothermal resources, Heat recovery systems and CHP, 7, 243-258.
- Nutı, S., " Isotope techniques in geothermal waters ", In; F.D'Amore (Coordinator), Application of geochemistry in Geothermal Reservoir Development. UNITAR , United Nations Development Program, Series of Technical Guides on the use of Geothermal Energy, Rome , 408 P, 1991.
- Oberhänsli, R., Candan, O., Dora O.Ö., Dürre, H., 1997. Eclogites within the Menderes Massif, western Turkey. *Lithos*, 41, 135-150 p.
- Oberhänsli, R., Monie, P., Candan, O., Warkus, F.C., Partzsch, J.H., Dora O.Ö., 1998. The age of blueschist metamorphism in the Mesozoic cover series of the Menderes massif. *Schweiz Mineral Petrograph.*, 78, 309-316 p.
- Öngür, T., Jeotermal Sahalrda Jeolojik Ve Jeofizik Arama İlke Ve Stratejiler. Jeotermal Enerji Semineri 2007.
- Özdemir, A., Tezelli, O., " Türkiye Jeotermal Sularının Jeokimyasal Özelliklerinin Değerlendirilmesi ". Sondaj Dünyası (Sondaj Ve Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi), 2008.
- Özen, T., 2002. Dikili sıcak ve soğuk su kaynaklarının hidrojeolojik incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, 57-59.

- Özler, H.M., 1996, Büyük Menderes Havzası Yukarı Çürüksu kesimini hidrojeolojisi incelemesi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 175s. (Yayınlanmamış).
- Özgür, N., Pekdeğer, A., 1995. Active geothermal systems in the rift zones of the Menderes Massif. Western Anatolia. Turkey: in; Kharaka, Y.K and Chudoev, O.V. (eds.); Proc. Internat. 8th Symp. On Water-Rock Interaction. Vlodivostok/Russia, 10, 529-532.
- Özgür, N., 1998, "Aktive und fossile Geothermalsysteme in den kontinentalen Riftzonen des Menderes Massives, Westanatolien, Türkei: Habilitationsschrift, Freie Universität Berlin, 171 S.
- Özgür, N., Vogel, M. Pekdeğer, A., 1998, A new type of hydrothermal alteration of the Kızıldere geothermal field in the rift zone of the Büyük Menderes, western Anatolia, Turkey: in: Arehart, G.B. and Hulston, J.R. (-eds): Proc. Internat. 9th Symp. On Water-Rock Interaction, Taupo, New Zealand, 30 March-3 April 1998, p. 679-682.
- Özgür, N., 2001. Origin of the high boron contents in the thermal waters of the rift zones of the Menderes Massif, Western Anatolia, Turkey. Int. Geol. Rev., 43, 910-920.
- Özgür, N., Karamandereci, İ.H., 2015, An update of the geothermal potential in the continental rift zone of the Büyük Menderes , Western Anatolia, Turkey. Stanford University Symposium, 29 p.
- Palabıyık, Y., Serpen, U., 2008. Geochemical assessment of Simav geothermal field Turkey. Revista mexicana de Ciencias Geológicas, V.25, num,3, P. 408-425.
- Philippson, A., 1910-1915. Reisen und Forschungen in Westlichen Kleinasien. Ergänzungshefte 167, 172, 177, 180, 183 der Petermanns Mitteilungen, Gotha, Justus Perthes.
- Philippson, A., 1918. Kleinasien, Handbuch der Regionalen Geologie. Steinmann, G., Wilckens, O. (eds.), 5, 183 pp, Heidelberg.
- Piper, A.M., 1953. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. United States Geological Survey, Ground Water, No:12.
- Purvis, M., Robertson A.H.F., 2004. A pulsed extension model for the Neogene-Recent E-W trending Alaşehir graben and the NE-SW trending Selendi and Gördes Basins, Western Turkey, Tectonophysics 391:371-201.
- Purvis, M., Robertson, A.H.F., 2005a. Sedimentation of the Neogene-Recent Alaşehir (Gediz) continental graben systems used to test alternative

tectonics models for western (Aegean) Turkey, *Sedimentary Geology*, 173, 373-408.

Purvis, M., Robertson, A.H.F., 2005b. Miocene sedimentary evolution of the NE-SW-trrending Selendi and G rdes Basins, W Turkey; implications for extensional processes *Sedimentary Geology*, 174, 31-62.

Reischmann, T., Kr ner, A., Todt, W., D rr, S.,  eng r A.M.C., 1991. Episodes of crustal growth in the Menderes Massif, W Turkey, inferred from zircon dating. *Terra Abstract*, 3, 35 s.

Rinehart, J.S., 1980. *Geysers and Geothermal Energy*, Springer-Verlag. P: 223, New York, USA.

Satır, N., Friedrichsen, H., 1986. The origin and evolution of the Menderes Massif, W Turkey; a rubidium/strontium and oxygen isotope study. *Gel. Rundsch.*, 75, 703-714.

Serpen, U., Mıh akan, M., 1999. Heat flow and related geothermal potentials of Turkey. *Geothermal Resources Council (GRC) Annual Meeting*. GRC transactions, 23, 485-490.

Seyito lu, G., I ık, V.,  emen, I., 2004. Complete Tertiary exhumation history of the Menderes Massif, western Turkey; an alternative working hypothesis. *Terra Nova* 1616: 358-364.

Sözbilir, H., 1995. Stratigraphy and provenance of the Paleocene-Eocene Alakaya Basin in the Denizli Province, southwestern Turkey, *International Earth Science Colloquium on the Aegean Region*, 1, 309-329.

 aro lu, F., Emre,  ., Ku  u,  ., 1992. *Türkiye diri fay haritası*, MTA Genel M d rl   , Ankara.

 eng r, A.M.C., 1982. Egenin neotektoni ini y neten etkenler: In: *Bati Anadolunun Gen  Tektoni i ve Volkanizması* (Erol, O.,  yg r, V. - eds.), *Türkiye Jeol. B lt.*, 59-71 s.

 eng r, A.M.C., Satır, M., Akk k, R., 1984. Timing of the tectonic events in the Menderes Massif, western Turkey: implications for tectonic evolution and evidence for Pan-African basement in Turkey. *Tectonics*, 3, 693-707 p.

 eng r, A.M.C., 1984. The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia. *Geol. Soc. American*, 195, 82-120 p.

 eng r, A.M.C., 1985. Die Alpen und die Kimmeriden: die verdoppelte Geschichte der Tethys. *Geol. Rdschau*, 74, 181-213 p.

- Şengör, A.M.C., 1987. Cross-faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey. Coward, M.P., Dewey, J.F ve Hancock, P. (Ed) Continental extensional tectonics. Geological Society'de, London, Special Publication, 28, 575-589.
- Şengün, R., 2011. Yenicekent ve Gölemezli çevresinin hidrojeolojisi bitirme tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Yayınlanmamış), 13-54s.
- Şimşek, Ş., 1984 , Denizli- Sarayköy- Buldan alanlarının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları doktora tezi , İstanbul Üni. , Yer bilimleri Fakültesi.
- Şimşek, Ş., 1985, Geothermal Model of Denizli, Sarayköy- Buldan Area Geothermics. 14(2/3), 393-417.
- Şimşek, Ş., 1988. Büyük Menderes Grabeni Jeotermal Alanları ve Yararlanma Olanakları. Mühendislik Jeolojisi Bülteni, Erguvanlı Özel sayısı-İstanbul, sayı 10, 39-45.
- Şimşek, Ş., 2003. Hydrogeological and isotopic survey of geothermal fields in the Büyük Menderes Graben, Turkey. Geothermics, 32, 669-678 p.
- Taner, G., 1974. Denizli bölgesi Neojenin paleontolojik ve stratigrafik etüdü, MTA dergisi, 82, 89-27 s.
- Tarcan, G., 2002. Jeotermal su kimyası, jeotermalde yerbilimsel uygulamalar, yaz okulu ders kitabı, JENERUM. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İzmir Yayın No: 306, 198-245.
- Tezcan, L., 1992, Karst Akifer sistemlerinin trityum izotopu yardımıyla Matematiksel Modellemesi, Doktor Tezi, Hacettepe Üniversitesi. Fenbilimleri Enstitüsü, Beytepe, Ankara, 121 s.
- Tonanni, F., 1980. Some remarks of the application of geochemical techniques in geothermal exploration. Proceedings, Advances in European geothermal research second symposium, Strasbourg, 428-443.
- Topal, S., 2006. Kolonkaya formasyonunda ki yumuşak-çökel deformasyon yapıları ve tetikleme mekanizmaları Denizli Havzası, ATAG 10, Poster Sunumu.
- Turcotte, D.L., Schubert, G., 2002. "4", Geodynamics (2nd edition), Cambridge, England, UK; Cambridge University Press, pp 136-137.
- Uysallı, H., 1967 "Tekkehaman-Kizildere (Denizli-Sarayköy) sıcak su sahalarının jeolojik etüdü ve Jeotermik Enerji İmkânları." MTA Rap.

- Van Hinsbergen, D.J.J., Dekkers, M.j., Bozkurt, E., Kopman M., 2010b. Exhumation with a twist: paleomagnetic constraints on the evolution of the Menderes metamorphic core complex, Western Turkey. *Tectonics* 29. DOI: 10.1025/2009T/002596.
- Verge, N.J., 1995. The exhumation of the Menderes Massif metamorphic complex of Western Anatolia. *Terra abstracts*, EUG8, Strosbourg, France, 9-13.4.1995, p.249.
- Verhhogen, J., Enerjetics of the Eart, National, Academy of Sciences, Washington 1980.
- Yaman, D., 2005, Menderes masifi kıtasal rift zonlarında yeralan jeotermal sulardaki yüksek bor değerlerinin kökeni: Süleyman Demirel Üniversitesi; Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 166 S.
- Yıldırım, N., Güner, İ., 2002, “ Büyük Menderes Grabenin doğusunda yeralan jeotermal sahalarda bulunan izotopik ve hidrojeokimyasal özellikleri.” MTA Enerji Dairesi.
- Yılmaz, Y., 1989. An approach to the origin of young volcanic rocks of western Turkey. In: *Tectonic Evolution of the Tethyan Region* (Şengör, A.M.C.,eds.), 159-189, Kluwer.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Gürer., F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, Ş., Elmas, A., 2000. When did the western Anatolian grabens begin to develop. In: *Tectonics and Magmatism in Turkey and Surrounding Area*, Bozkurt E., Winchester J.A., Piper J.D.A., (Eds.), Geological Society, London, Special Publications, 173, 353-384.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Yeri ve Yılı : Eskişehir, 1991

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

EĞİTİM VE AKADEMİK DURUMU

Lise : 2005-2009 Hoca Ahmed Yesevi Lisesi, Eskişehir

Lisans : 2009-2013 Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
Jeoloji Mühendisliği