



T. C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PAMUKKALE (DENİZLİ) VE YAKIN ÇEVRESİ JEOTERMAL SULARININ
HİDROJEOLOJİK, HİDROJEOKİMYASAL VE İZOTOP JEOKİMYASAL
ÖZELLİKLERİ

Duygu Sengül KUTLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman
Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR

ISPARTA 2015

©2015 [Duygu Sengül KUTLU]

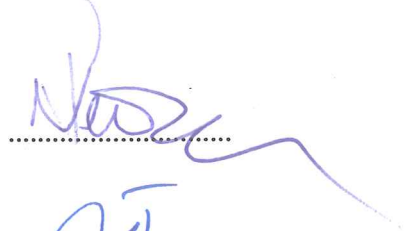
TEZ ONAYI

Duygu Sengül KUTLU tarafından hazırlanan “Pamukkale (Denizli) Ve Yakın Çevresi Jeotermal Sularının Hidrojeolojik, Hidrojeokimyasal Ve İzotop Jeokimyasal Özellikleri“ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR

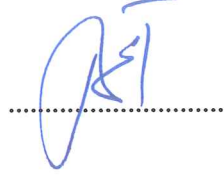
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Fuzuli YAĞMURLU

Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç. Dr. Erdal Koşun

Akdeniz Üniversitesi



Enstitü Müdürü

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.

Duygu Sengül KUTLU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Jeotermal Sistemler	5
1. 2. Araştırmanın Tanımı ve Amacı.....	9
1. 3. Araştırma Alanının Jeotektonik Konumu	9
2. KAYNAK BİLGİSİ.....	15
3. ARAŞTIRMA ALANININ JEOLJİSİ.....	20
3.1. Paleozoyik Yaşlı Litolojiler	23
3.1.1. İğdecik formasyonu	24
3.2. Mesozoyik Yaşlı Kireçtaşları	24
3.3. Eosen Yaşlı Tortul Kayaçlar	24
3.4. Pliyosen Yaşlı Tortul Kayaçlar	25
3.4.1. Kızılburun formasyonu.....	25
3.4.2. Sazak formasyonu	25
3.4.3. Kolonkaya formasyonu	26
3.4.4. Tosunlar formasyonu.....	26
3.5. Kuvaterner Yaşlı Çökeller.....	27
3.5.1. Alüvyon (Qal).....	27
3.5.2. Travertenler (Qtrv)	27
3.5.2.1. Travertenlerin sınıflandırılması	31
1. Teras tipi travertenler.....	31
2. Sırt tipi travertenler.....	32
3. Kanal tipi travertenler	33
1. Kristalin Kabuk Tipi Travertenler	33
2. Çalı Tipi Travertenler	34
3. Kamış Tipi Travertenler.....	35
4. Breşik (Litoklastik) Travertenler	35

5. Sal Tipi Travertenler	36
6. Gaz Boşluklu Travertenler	36
7. Pizolitik Travertenler	37
3.5.2.1.2. Çalışma alanı travertenlerinin kimyasal özellikleri.....	37
4. MATERYAL VE METOD	38
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	39
5.1. Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri.....	39
5.2. Hidrojeokimya.....	42
5.2.1. Hidrojeokimyasal analizler.....	44
5.2.2. Doygunluk indeksi.....	50
5.3. Jeokimyasal Termometre Uygulamaları	51
5.3.1. Kimyasal jeotermometre uygulamaları	51
5.3.1.1. Silis jeotermometreleri	52
5.3.1.2. Katyon jeotermometreleri.....	53
5.3.2. Birleşik jeotermometreleri uygulamaları.....	54
5.3.3. Çalışma alanındaki jeotermometrelerin jeokimyasal değerlendirilmesi	56
5.4. İzotop Jeokimyasal Özellikler	58
5.5. Pamukkale Yöresi Jeotermal Suların Hidrojeolojik Modellemesi.....	60
6. SONUÇLAR.....	63
6.1. Pamukkale jeotermal alanında olası ısı kaynağı, jeotermal sistem ve tektonik arasındaki ilişki	63
6.2. Çalışma alanının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri	64
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	77

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PAMUKKALE (DENİZLİ) VE YAKIN ÇEVRESİ JEOTERMAL SULARININ HİDROJEOLOJİK, HİDROJEOKİMYASAL VE İZOTOP JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Duygu Sengül KUTLU

Süleyman Demirel Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR

Bu çalışma kapsamında Pamukkale (Denizli) ve yakın çevresi jeotermal sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri incelenmiştir. Çalışma alanında, jeolojik olarak Menderes Masifine ait metmorfik kayalar ile Mesozoyik, Pliyosen ve Kuvarterner yaşlı kayalardan oluşmaktadır. Stratigrafik olarak Paleozoik yaşlı Menderes Masifi Metamorfikleri (İğdecik Formasyonu), Neojen yaşlı Kızılburun Formasyonu, Sazak Formasyonu, Kolonkaya Formasyonu ve Tosunlar Formasyonu bulunur. Çalışma alanı ve yakın çevresinde Paleozoik yaşlı mermerler, Mesozoyik yaşlı kireçtaşları ve Pliyosen yaşlı alüvyon ve travertenler geçirimli kayaç görevini üstlenirken hidrojeolojik olarak önemli rol oynamaktadır. Çalışma alanında Sazak Formasyonu ve Menderes Masifi Metamorfikleri (İğdecik Formasyonu) jeotermal suların rezervuar özelliğini gösterirken, Alüvyon soğuk suların haznesini oluşturur. Menderes Masifine ait şistler, Kolonkaya, Kızılburun ve Tosunlar Formasyonları geçirimsiz taban kayacı ve örtü kayacı rolü üstlenmektedir.

Çalışma alanında üç farklı sıcak su lokasyonundan su örnekleri alınmıştır ve alınan bu örneklerde katyon ve anyon analizleri yapılmıştır. İnceleme alanında esas kaynak suları yaklaşık 35°C sıcaklığa sahip olup genel olarak Ca-Mg-HCO₃ tipi sular olarak adlandırılabilir. Pamukkale ve yakın çevresi jeotermal suları Ca>Na+K>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 magmatik ısıtıcı tarafından ısıtılmış sular sınıfına girmektedir. Sülfat içeriğinin yüksek olduğu da gözlenmektedir. Çalışma alanındaki sıcak sulara jeokimyasal termometre analizleri uygulanmış ve ortaya çıkan diyagramlarda 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 rezervuar 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.

Anahtar Kelimeler: Batı Anadolu Bölgesi, Büyük Menderes rift zonu, Pamukkale, jeothermal sular, hidrojeolojik modelleme, travertenler

2015, 77 sayfa

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

HYDROGEOLOGICAL, HYDROGEOCHEMICAL AND ISOTOPE GEOCHEMICAL FEATURES OF THE THERMAL WATERS OF PAMUKKALE (DENİZLİ) AND ENVIRONS

Duygu Sengül KUTLU

Süleyman Demirel University

Graduate School of Applied and Natural Sciences

Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR

In this study, hydrogeological, hydrogeochemical and isotope geochemical features of geothermal waters in Pamukkale (Denizli) and environs were investigated. The study area is composed of Paleozoic metamorphic rocks of Menderes Massif, Mesozoic limestones, Eocene, Pliocene and Quaternary sediments. Stratigraphically, Paleozoic Menderes Massif metamorphics (İğdecik Formation), Pliocene Kızılburnu Formation, Sazak Formation, Kolonkaya Formation and Tosunlar Formation are found in the region. Paleozoic marbles, Mesozoic limestones and Pliocene alluvium and travertine serve as the permeable rocks and play an important role from the view of hydrogeological points in the study area. The Sazak Formation and İğdecik Formation of Menderes Massif in the study area shows the features of reservoir rock of the geothermal waters, whereas the alluvium form the aquifer of cold groundwaters. Schists of the Menderes Massif, Kolonkaya Formation, Kızılburnu Formation and Tosunlar Formation are the important impermeable basement and cap rock in the investigation area. Cation and anion analyses were performed on water samples collected from three different locations in the study area. The main source of water in the study area with temperature approximately 35 °C can be considered as Ca-Mg-HCO₃ type exchange waters in general. Thermal waters in Pamukkale and environs waters are of Ca>Na+K>Mg as dominant cations and HCO₃>SO₄> Cl as dominant anions.

According to Cl -SO₄-HCO₃ triangle diagram, geothermal waters in the study area falls into the area of magmatic vapor and steam-heated waters. High sulphate contents are observed. Geochemical thermometer analyses applied on the thermal waters, and the resulting diagram shows that some thermal waters fall in partial offset class waters while some are classified as raw water class waters. All geochemical thermometer results and reservoir rock temperatures of the geothermal waters are evaluated together, the existing well temperature is observed between 160-250 ° C. $\delta^2\text{H}$ value of the thermal waters ranges from -61.9 to -51.8, while $\delta^{18}\text{O}$ values vary from -9.23 to -5.84. Tritium contents of the thermal waters in the study area are between 0.7 and 3.3 TU. In this case, the mixing ratio of cold water in the hot waters of the investigation area is quite small or almost never.

Keywords: Western Anatolia, the rift zone of the Büyük Menderes, Pamukkale, thermal waters, hydrogeological modeling, travertines

2015, 77 pages

TEŞEKKÜR

Sunulan bu Yüksek Lisans Tez Çalışması Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 4137-YL1-14 No'lu araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan saygıdeğer danışmanım, Sayın Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR'e bu tezin tamamlanmasında göstermiş olduğu destek, yapıcı eleştiri ve özverisinden dolayı teşekkür ederim. Arazi çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Yüksek Jeoloji Mühendisi Elif Ece YILMAZ, Yüksek Jeoloji Mühendisi İbrahim ABUBAKAR'a, Jeoloji Mühendisi Sinan GÜLMEZ ve SDÜ Jeoloji Mühendisliği öğrencisi Ömer ÖZGÜRLER'e ve Aquachem yazılım programında gerçekleştirmiş olduğum diyagram çizimlerinde yardımlarından dolayı Dr. Ziya ÖNCÜ'ye teşekkür ederim.

TÜRSAB-Denizli (Türkiye Seyehat Acentaları Birliği), Pamukkale Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü Üyesi Dr. Levent ÜNVERDİ ve Mehmet Aydın'a Pamukkale ve yakın çevresinde bulunan kaynaklarda ölçüm yapılması ve su örnekleri alınmasında verdikleri müsaade için teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen ve tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Duygu Sengül KUTLU
ISPARTA, 2015

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. 1. Çalışma alanının bulduru haritası.	2
Şekil 1. 2. Basitleştirilmiş bir jeotermal system.	5
Şekil 1. 3. Menderes masifinin jeolojik haritası ve örnek noktaları.	12
Şekil 1. 4. Batı Anadolu'nun stratigrafik kesiti.	14
Şekil 3. 1. Araştırma alanının jeolojik haritası.	21
Şekil 3. 2. Çalışma alanına basitleştirilmiş sütun kesiti.....	23
Şekil 3. 3. Traverten litosfasiyeslerinin oluştuğu depolanma ortamları ve alt ortamları. ..	29
Şekil 3. 4. Pamukkale'deki aktif teras tipi travertenler ve travertenlerin oluştuğu yamaçlardaki teraslar ve havuzlar.	31
Şekil 4. 1. Sıcak su örneklerinin yerlerini gösteren lokasyon haritası.	38
Şekil 5. 1. Çalışma alanındaki kayaç birimlerinin hidrojeolojik özellikleri	41
Şekil 5. 2. Çalışma alanında gerçekleştirilen in - situ ölçümleri (Hierapolis)	43
Şekil 5. 3. Çalışma alanında bulunan jeotermal suların Piper diyagramında gösterilmesi.....	46
Şekil 5. 4. Pamukkale ve çevresi jeotermal sularının Cl-SO ₄ -HCO ₃ üçgen diyagramı....	48
Şekil 5. 5. Çalışma alanında jeotermal suların Ca-Na+K-Mg üçgen diyagramı.	49
Şekil 5. 6. Pamukkale ve yakın çevresi jeotermal sularında δD ve $\delta^{18}O$ izotopu ilişkisi.	60
Şekil 5. 7. Pamukkale jeotermal sisteminin basitleştirilmiş hidrojeolojik oluşum modeli	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 5. 1. İn - Situ cihazları ve özellikleri.	42
Çizelge 5. 2. Hidrojeokimyasal cihazlar ve özellikleri	44
Çizelge 5. 3. Çalışma bölgesi termal sularının hidrojeokimyasal analiz sonuçları	45
Çizelge 5. 4. İnceleme alanındaki örneklerin su tipleri.	46
Çizelge 5. 5. Çalışma alanındaki örneklerde rastlanabilecek bazı minerallerin doygunluk indeksi	50
Çizelge 5. 6. Silis SiO ₂ jeotermometreleri ve bağıntıları	52
Çizelge 5. 7. Na/K jeotermometreleri ve bağıntıları.....	54
Çizelge 5. 8. İnceleme alanındaki suların Na – K - Mg diyagramındaki görünümü ve su - kayaç denge sıcaklıkları	55
Çizelge 5. 9. Çalışma alanındaki termal suların çözünen jeotermometresine göre sonuçlar.	57

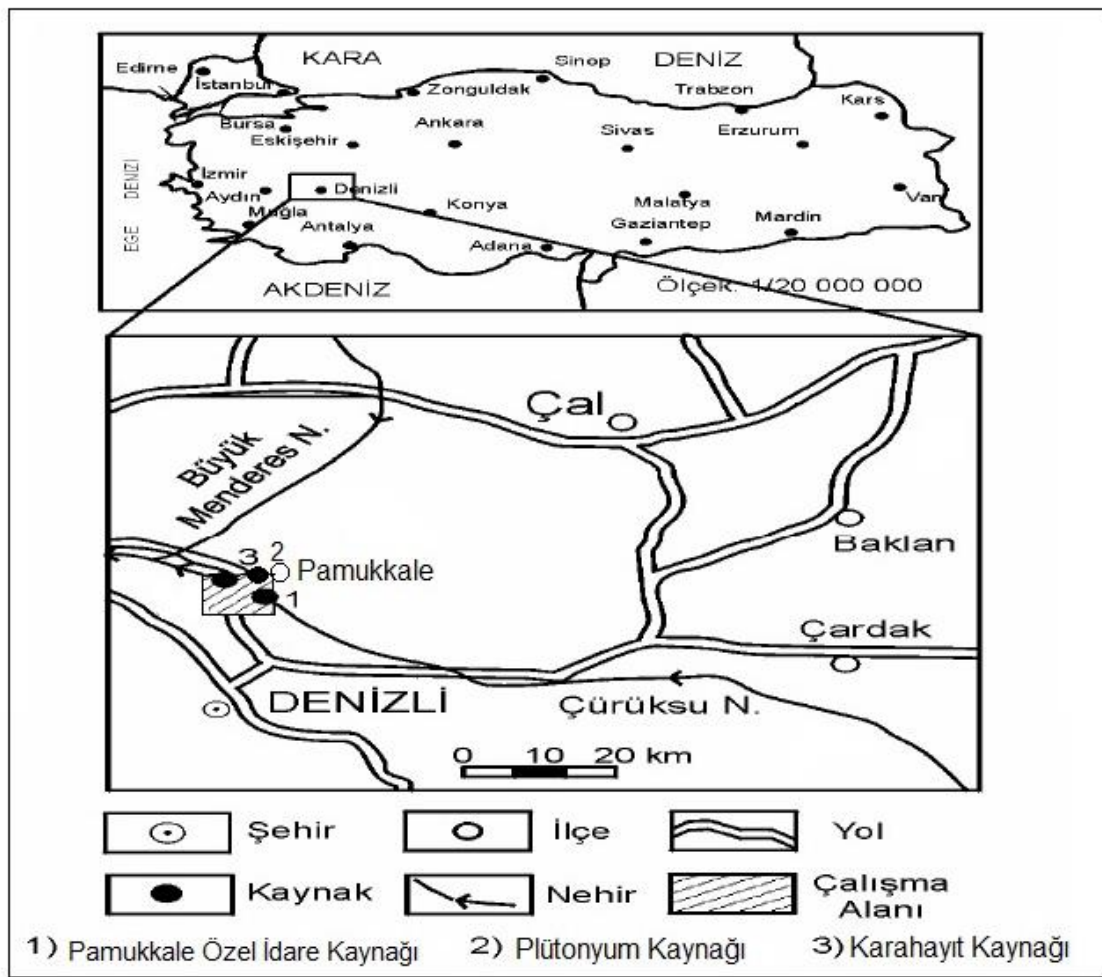
1. GİRİŞ

Enerji kavramı ve enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği geçmişten bugüne dünyanın en önemli konularından ve sorunlarından biri olmuştur. Enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, petrol, kömür, nükleer enerji gibi kendini yenileme durumu olmayan kaynakların bilinçsizce kullanılması, bu kaynakların çevreye ve atmosfere verdiği kirlilik gibi etkenler insanları yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya yönlendirmiştir (Külekçi, 2009). Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden olan jeotermal enerji ise günümüzde elektrik üretimi, tıp, turizm, ziraat, endüstri gibi sayısız alanda kullanılabilen bir kaynaktır. Jeotermal enerji kaynaklarının nice faydası bulunmakla birlikte, bunların başlıcaları daha önce belirtildiği gibi yenilenebilir olması yani doğru kullanımla tükenmesi zor bir enerji çeşidi olması, tespit ve üretiminin kolay olması, maliyetinin düşük olması, yatırımın çok kısa bir zamanda geri dönüş sağlaması, ayrıca diğer kaynaklara göre çevreye verilen zararın çok az olmasıdır. Dünya üzerinde jeotermal enerji değeri anlaşılan bir enerji çeşidi olmakla beraber kullanımı ülkelere göre değişmektedir. Ülkemiz ise çok önemli bir jeotermal kuşak üzerinde olmasına ve 1300'ün üzerinde kaynak barındırmasına karşın jeotermal enerjiden yeterince faydalanamamaktadır. Türkiye'de jeotermal kullanımı; kaplıca turizmi, seracılık gibi temel kullanımlarla sınırlı bir şekilde yürütülmekle beraber son yıllarda konut ısıtılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Fosil yakıtların sürdürülebilirliğinin olmaması nedeniyle, birçok ülkede odaklanmalar ve dikkatler daha çok alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına çevrilmiş bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji sürdürülebilir enerjidir. Çünkü bu enerji kaynakları güncel insan topluluklarının artan enerji gereksinimlerine ve taviz vermeyecek bir şekilde gelecek nesillerin yaşam şartlarını da dikkate alacak şekilde belirli bir tarzda kullanılmalıdır.

Jeotermal enerji sürdürülebilirliği nedeniyle yenilenebilir enerjidir 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. Bunun için; genellikle çeşitli sondaj

yöntemleri ile yerküre ısısına ulaşılır ve elde edilen enerjiden çeşitli amaçlar için yararlanılmaktadır. Jeotermal kaynaklar dünyamızın her tarafında bulunur, ancak işletilebilir jeotermal sistemler genel olarak normal ya da anormal derecede yüksek jeotermal gradyan bölgelerinde bulunur. Yerküre gezegenimizin çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı olan jeotermal gradyan, yüzeye çekirdekten yüzeye doğru ısı şeklinde termal enerjinin sürekli kondüksiyonu şeklinde olmaktadır. Jeotermal sıfat olarak, sıcak anlamına gelen Yunancadan kökleri yerküre anlamında “γη” (ge) ve sıcak anlamına “θερμος” (termos) gelen kavramlardan oluşmaktadır.



Şekil 1. 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.

Jeotermal alanlar dünyada bir çok alanlarda belirli jeolojik formasyonlara bağlı olarak bulunmakta ve bunlar artan bir şekilde enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır. Jeotermal sistemlerin farklı tiplerinin her biri belirli özelliklere sahiptir ve bunlar aynı zamanda bu özelliklerini kimyasal bileşimlerinde ve çeşitli potansiyel uygulamalarında

belirli bir şekilde ortaya koymaktadır. Ancak, hepsi birkaç kilometre derinlikte, ortak bir ısı kaynağı olan ve konveksiyon içine yerkabuğunun üst bölümlerinde bulunan, mevcut su birikimleridir (Nicholson, 1993).

Jeotermal sular, paleolitik çağlardan beri termal banyo ve ayrıca antik Roma döneminden beri de konut ısıtmasında kullanılmaktadır. Buna karşın zamanımızda akıllı bir şekilde elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Dünya çapında, jeotermal enerji yaklaşık 10,715 megavat (MW) gücünde 24 ülkede faaliyettedir. Ek olarak, 28 gigavat doğrudan jeotermal ısıtma kapasitesi olan bir sistem bölgesel ısıtma, mekan ısıtması, kaplıcalar, endüstriyel prosesler, arıtma ve tarımsal uygulamalar için kurulmaktadır (Fridleifsson vd, 2008). Jeotermal kuyular yerin derin kısımlarında sıkışıp kalan sera gazlarının serbest bırakırlar, ancak bu emisyonların miktarı fosil yakıtlardan daha düşüktür. Sonuç olarak, jeotermal enerji yaygın fosil yakıtların yerine konuşturılmış ise küresel ısınmanın azaltılmasına yönelik yardımcı potansiyele sahiptir.

Jeotermal alanlar oldukça geniş aralıkta olan çeşitli jeolojik ortamlar ve kayaç türlerinde ortaya çıkarlar ve benzer türdeki kayaç ortamları farklı tipte jeotermal sistemler meydana getirebilirler Örneğin Kızıldere, ülkemizde benzer kayaçların içinde yüksek ısıda su üretirken, esas olarak kuru buhar üreten Larderello, İtalya da ortaya çıkmıştır (Bello, 2013). Alanlarında ortak noktaları olmasına rağmen her sahanın birinin kendi özellikleri vardır ve böylece tipik bir jeotermal alanı tanımlamak zordur.

Jeotermal sistemlerde sismik aktivite, ısıtıcı kayaç, rezervuar kayaç ve örtü kayasına ihtiyaç vardır. Sismik aktivite denilince yörenin depremselliği akla gelmektedir. Depremsellik sonucu kayaçlarda süreksizlikler adı verilen bir takım kırık ve çatlak sistemleri gelişmekte, bu süreksizliklerden yağmur suları kolayca rezervuar kayaca ulaşabilmektedir. Dolayısıyla süreksizlikler jeotermal enerji açısından önem taşımaktadır. Denizli ve yöresinde gerilme tektoniği sonucu Horst ve Grabenler şeklinde normal faylar dikkati çekmektedir. Batı Anadolu'da tektonik sistem çek ve ayır adı verilen horst ve grabenlerden oluşan fay sistemini ortaya çıkarmıştır. Rezervuar kayaçları, genellikle metamorfik kayaçlardan oluşan karbonatlı kayaçlardan mermerler meydana getirmekte olup, bunların gözenekleri birbirleriyle irtibatlı olduğu için, söz konusu süreksizlik sistemleri boyunca, ısıtıcı kayaca süzülen yağmur sularını ve ısıtıcı kayaç tarafından ısıtılarak konveksiyon akımlarla yukarıya yükselen sıcak akışkanları kolayca bünyeleri

içinde tutabilmektedir. Meteorik sular Denizli volkanik kayaçları tarafından ısıtılmakta ve konveksiyon akımlarla yukarıya yükselerek yukarıda sözü edilen karbonatlı kayaçlarda depolanmaktadır.

Rezervuar kayaçtaki sıcak akışkanların sıcaklıklarının korunması içinde geçirimsiz örtü kayaçlarına ihtiyaç vardır. Jeotermal alanlarda bu tür örtü kayaçlarını genellikle evaporitler ve killi litolojilerden çamurtaşları oluşturmaktadır. Bunlar geçirimsiz olup, bu özellikleriyle hem petrol hem de jeotermal kayaçlarda örtü kayacı görevini görmektedir. Örtü kayacı aynı zamanda, jeotermal akışkanların sıcaklıklarının korunmasında yardımcı olarak bunların soğumasını da önlemektedir.

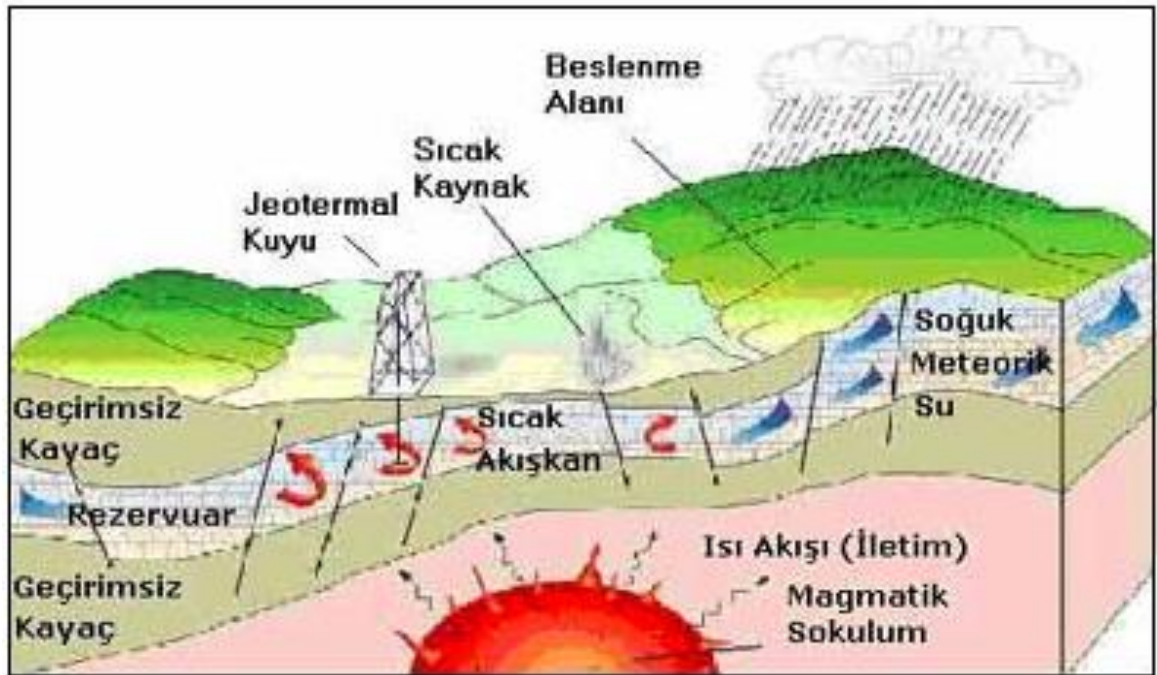
Jeotermal Enerji kaynaklarına ülkemizde Ege, İç Anadolu ve Batı Karadeniz bölgelerinde yaygın olmakla beraber diğer bölgelerimizde de rastlanır. Çok çeşitli kullanım alanı olan jeotermal enerji kaynaklarına sondajla açılan kuyulardan ya da yer kabuğu içindeki doğal çatlaklardan ulaşılır. Yeryüzüne çıkarılan enerjiden buhar formunda türbinlerde elektrik üreterek ya da sıcak su halinde ısıtma sistemlerinde ısı transferi yoluyla faydalanırız.

Pamukkale ve diğer alanlardaki jeotermal kaynaklarda, termal turizme büyük yarar sağlamaktadır. Denizli şehrinin bu nedenle bir termal kent olduğunu göstermektedir. Denizli ve yöresinde yeraltı su kaynakları, maden suları ve jeotermal sular su kayaç etkileşimi şeklinde, yörenin tektonik yapısı, çevredeki kayaçlar ve onları oluşturan farklı mineraller tarafından denetlenmektedir. Dolayısıyla, Denizli ve yöresinin jeolojik konumu, su kaynaklarını tüm yönleriyle ayrıntılı açıklamak açısından önem taşımaktadır. Jeotermal enerji açısından, Denizli ve yöresindeki genç volkanik kayaçlar ısıtıcı kayaç, karbonatlı kayaçlardan mermerler ve farklı fasiyesteki kireçtaşları rezervuar kayaç ve kilce zengin Kuvaterner yaşlı genç çökellerde örtü kayaç görevini görmektedir.

Denizli ve civarındaki Jeotermal kaynaklar; Pamukkale, Kızıldere, Çardak, Beylerbeyi, Karahayıt, Buldan Efe, Gölemezli, Yenice Çizmeli, Bölmekaya, Tekkehamam, Babacık ve Demirtaş olmak üzere sıcak su kaynakları açısından son derece zengindir (Kıymaz, 2012). Sıcak su kaynakları Menderes Grabeni ve Gediz Grabeni oluşturan kırık hatlar boyunca çıkmaktadır Söz konusu sıcak su kaynaklarından tarih öncesi devirlerden beri ve halen kaplıca olarak yararlanılmaktadır.

1.1. Jeotermal Sistemler

Jeotermal sistem üç ana unsurdan oluşmaktadır; Isı kaynağı, rezervuar ve ısıyı taşıyan akışkan, Isı kaynağı yüksek sıcaklıklı ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve yüzeye yakın kısımlara ulaşabilen (5-10 km) magmatik sokulumlar olabileceği gibi, düşük sıcaklıklı sistemlerde de derinlikle birlikte artan normal sıcaklık (jeotermik gradyan -ortalama $2,5\text{-}3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) olabilir (Şekil 1. 2.). Rezervuar ise ısıyı taşıyan sıvının devir-daim edebileceği çatlaklı (permeable) kayalardır. Rezervuarların üzerinde genellikle geçirimsiz tabakalar bulunmaktadır. Jeotermal akışkan ise çoğu durumda meteorik sudur ve rezervuarda sıcaklık ve basınca bağlı olarak buhar veya sıvı haldedir. Bu su genellikle bazı kimyasal maddeler ve gazlar (CO_2 , H_2S gibi) içerir. Jeotermal sistemin mekanizması sıvının ısıyı iletimi üzerinedir. Konveksiyon akım (ısı iletimi) ısınma nedeniyle oluşur ve sonuçta sistemdeki sıvının termal genişlemesine neden olur. Düşük yoğunluklu ısınmış sıvı, sistemde yükselme eğilimindedir ve sistemin kenarlarından gelen yüksek yoğunluklu soğuk su ile yer değiştirir. Doğal olarak konveksiyonel akım sisteminde, alt kısımlarda sıcaklık azalma eğiliminde iken üst kısımlarda sıcaklık artma eğilimindedir. Gerçek jeotermal sistemler için yapılacak iyi bir modelleme oldukça zordur. Yapılacak modellemede yüksek sıcaklığa bağlı olarak çok disiplinli ve geniş bir çalışmaya gereksinim vardır. Jeotermal sistem çok değişken jeolojik, fiziksel ve kimyasal karakteristiğın kombinasyonuna bağlı olarak oluşur. Jeotermal sistem unsurları içerisinde sadece ısıtıcı kaynak doğaldır.



Şekil 1. 2. Basitleştirilmiş bir jeotermal system.

Jeotermal sistemler, oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sistemlerde, hidrojeolojik sistemlerden farklı olarak faz değişimleri ve ısı taşınımı da söz konusudur (Akan, 2002). Dolayısıyla, böyle karmaşık bir sistemde beslenme-boşalım ilişkisine bağlı olarak meydana gelebilecek değişimleri öngörmek oldukça zordur. Bu aşamada, modelleme yaklaşımı sistemin geleceğine ilişkin bir öngörü yapabilmek açısından büyük bir önem kazanmaktadır. Son yıllarda matematiksel modeller yardımıyla jeotermal alanların modellenmesi yoğun olarak çalışılan bir konudur. Bu modeller, jeotermal alanların kavramsal modellerinin geliştirilmesi ve doğruluğunun kanıtlanması için kullanılmaktadır. Jeotermal sistemlerin modellenmesinde esas amaç, rezervuar potansiyelinin belirlenmesi ve reenjeksiyonun sistem üzerindeki etkilerinin ortaya konması gibi önemli problemlerin çözümüdür.

Türkiye’de MTA kayıtlarına göre ülke genelinde 277 alanda jeotermal oluşum olduğu bilinmektedir. İstanbul Teknik Üniversitesi, ülkedeki jeotermal kaynakların büyüklüğünü ve buralardan elde edilebilecek güç üretim potansiyellerini belirlemek amacıyla Türkiye’nin jeotermal kaynaklarının değerlendirilmesi konusunda bir çalışma yürütmektedir. İlk aşama olarak, MTA tarafından yayınlanan 2 adet jeotermal kaynak envanteri, literatürdeki mevcut sahalara hakkındaki verilerle birlikte çalışılan çeşitli projelerin saha verileri kullanılarak tahmini görünür (tanımlanmış) kapasite hesabı yapılmıştır. Görünür kapasite; ölçülmüş debi ve üretilen akışkanın sıcaklık değerine dayalıdır. 20°C referans sıcaklığı için toplam jeotermal görünür kapasite yaklaşık 3700 MWt bulunmuştur. Bu konu hakkındaki ayrıntılı çalışma 2007 yılında yapılmıştır. Bu çalışma sonrasında, bilinen ve yeni sahalarda yapılan araştırma-geliştirme etkinlikleri sonrasında gözlemlenen / ölçülen ek kapasitelerle birlikte jeotermal görünür kapasitenin 3700 MWt’den daha büyük olduğu tahmin edilmektedir. İkinci aşamada ise elektrik üretimine uygun jeotermal sahalardan elde edilebilecek üretilebilir güç değerleri hacimsel rezerv hesabına göre tahmin edilmiştir. Bu amaçla 11 adet yüksek sıcaklıklı jeotermal sahanın mevcut jeolojik, jeokimyasal, jeofizik ve sondaj verileri değerlendirilerek Monte Carlo simülasyonu kullanılarak üretilebilir güçler hesaplanmıştır. Monte Carlo simülasyonu sonuçlarına göre %90 olasılıkla 11 sahadan üretilebilecek elektrik güç potansiyeli 632 MWe ve üretilebilecek ısı güç potansiyeli ise 15833 MWt olarak hesaplanmıştır. Kullanılan yöntem ve ayrıntılar kaynak sunulmaktadır. Üçüncü aşama olarak, doğrudan kullanıma uygun göreceli orta sıcaklıklı jeotermal sahalardan elde edilebilecek üretilebilir ısı güç potansiyelleri tahmin edilmiştir. Bu amaçla 19 adet

jeotermal saha değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar görünür kapasite, simülasyon sonuçları ve üretilebilir ısılar cinsinden bu bildiride tartışılmıştır. Bunlara ek olarak, Türkiye'nin yer altı jeotermal sıcaklık dağılımını belirlemek amacıyla ek bir çalışma sürdürülmüştür.

Nüfus, endüstrileşme ve elektrik kullanımının her geçen gün artmasıyla Türkiye'nin enerji ve elektrik gereksinimi sırasıyla her yıl yaklaşık 4.5% ve 7.5% olarak büyümektedir. Türkiye'nin enerji tüketimi yaklaşık 106 milyon ton petrol eşdeğeri ve elektrik üretim kurulu kapasitesi ise yaklaşık 42.000 MWe'dir. Bu artışın büyük bir çoğunluğu ithal edilen ve enerji bağımlılığını arttıran daha fazla fosil yakıtların (zellikle petrol ve doğal gaz) piyasaya girmesinden kaynaklanmaktadır. Yenilenebilir kaynak olarak jeotermal enerji, ülkenin yerli enerji potansiyelinin artmasına az da olsa bir olanak sağlamaktadır. Jeotermal kaynakların enerji arzını genişleteceği ve bilinen jeotermal kaynakların özelleştirilerek daha fazla katma değer sağlayacağı dşnlmektedir. Türkiye'nin jeotermal kaynakları hidrotermal ve geliştirilmiş jeotermal sistemler (GJS=EGS "Engineered Geothermal Systems") olmak üzere iki sınıfa ayırabiliriz. Günümüzde ülkedeki tüm jeotermal arama ve geliştirme projeleri hidrotermal üzerine yoğunlaşmıştır. Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla İstanbül Teknik niversitesi'nde bir değerlendirme çalışması yürütülmektedir. Bu değerlendirme çalışmasında, mevcut ve ekonomik hidrotermal kaynaklar ile yerkabuğunda belli derinlik aralığında depolanmış ısı enerjisi (ısı içeriği) araştırılmaktadır. Türkiye'deki geleneksel hidrotermal kaynaklar hem elektrik hem de doğrudan kullanım uygulamalarında kullanılmakta olup, her geçen gün bu uygulama sayısı artmaktadır. GJS ise Jeotermal Enerji Semineri hidrotermal kaynakların ötesinde olan geliştirilmiş / planlanmış jeotermal sistemlerdir. Bu sistemlerden hem günümüz hem de gelecekteki teknolojiler kullanılarak ısı üretilmesi amaçlanmaktadır. GJS'in dünya üzerindeki uygulamaları şimdilik birkaç adet olmakla birlikte, uzun dönemde bu sistemlerden oldukça yüksek potansiyeller elde edileceğine inanılmaktadır.

Türkiye'de ortalama 529 adet termomineral kaynak vardır. Bunlardan 241 adedi maden suları, 247 adedi 60°C ye kadar, 41 adedi de 60°C - 100°C arasında bulunan kaynaklardır. Bu kaynakların yüksek ısılı olanları bilhassa Batı Anadolu'da, doğu-batı doğrultusunda bulunan grabenler içerisinde sıralanmışlardır. Derindeki kırıklı ve çatlaklı metamorfik formasyonlardan kolaylıkla yukarı intikal eden ısı, Paleozoik, Mesozoik ve Tersiyer yaslı

(mermer, kalker ve dolomitik kalkerler) rezervuar kayalardaki suları ısıtır. Bazı Tersiyer marnlı killi formasyonları da örtü tabakası vazifesini görür. Bir kısım kavnaklar Orta Anadolu'da ve bilhassa Doğu Anadolu'da halen CO₂, H₂S neşreder. Bunlar solfatar safhalarının son devirlerini tamamlayan Neojen-Kuaterner ve tarihî zamanların volkanlarının civarlarında krater ve parazit konilerinde kaynaklar halinde bulunur. Türkiye'deki sıcak kaynakların büyük kısmını asitli, bikarbonatlı, klorürlü, sülfatlı sular teşkil eder. Total mineralizasyondaki bor, NH₄ ve H₂SiO₃ gibi elemanlar muhtemelen çok derinlerden gelmektedir. 1963 yılında İzmir ve batısındaki Agamemnun kaplıcalarında yapılan sondajlarla, 124° C ısıli tabiî buhar elde edilmiştir. Ayrıca 15 Mayıs 1968'de Denizli-Sarayköy'de Kızıldere civarında takriben 450 m derinlikte, yüksek basınçlı tabiî buhar elde edilmiştir. Türkiye'deki sıcak sular jeotermik enerji yönünden de etüdlere tabi tutulmuş ve Anadolu, tarafımızdan, başlıca altı jeotermik enerji provensine ayrılmıştır: Bunlar sırasıyla 1. Ege provensi → Batı Anadolu Bölgesi, 2. Ankara provensi → Batı Orta Anadolu Bölgesi, 3. Kayseri provensi → Doğu Orta Anadolu Bölgesi, 4. Amanoslar provensi → Güney Orta Anadolu Bölgesi, 5. Erzurum provensi → Kuzey Doğu Anadolu bölgesi ve 6. Diyarbakır provensi → Güney Doğu Anadolu Bölgesi şeklindedir.

Türkiye'de halen işletilen meşhur ve çok şifalı kaplıcalar ve maden suları vardır. Bu tesislerin çoğu fizyoterapi aletleriyle de teçhiz edilmiştir. İçme sularından, Kisarna, Çitli maden suları ve bilhassa Afyonkarahisar maden suları ve sodası çok tanınmıştır. İstanbul'a yakın Bursa, Yalova ve Gönen kaplıcaları da meşhurdur.

Şimdiye kadar yapılan ve bilhassa 1961 yılından beri etüdleri daha sistematik olarak ele alınan Türkiye termomineral sularının envanterine göre, rejyonel yıllık ortalama ısıda ekseriya düşük dereceli olan ve maden suları klasifikasyonuna giren kaynaklar Türkiye'de takriben 241 adettir. Bunların bir kısmı dünyaca tanınmış ve modern tesisleriyle inşa edilmiş bulunmakta, diğerleri ise lokal harcamalar için sarfedilmektedir. Buna mukabil, yıllık ortalama mevsim ısılarının üstünde bulunan ve termal sular grubuna giren kaynaklar ise 288 den fazla bulunmaktadır ki, bunlardan 41 adedi 60° - 100°C arasında ısıya maliktir. Şu hale göre, Türkiye'de ortalama 529 dan fazla termomineral kaynak bulunmaktadır. Türkiye yüzölçümünü 770.000 km² kabul ettiğimize göre, 1.450 – 1.500 km² alana ve takriben 55.000 kişiye de bir termomineral kaynak düşmektedir. Uluslararası şöhrete malik birçok kaynak bunlar arasında bulunmakta olup, bu haliyle Türkiye, termomineral bakımından dünya memleketleri arasında sayılı bir mevkide

bulunmaktadır. Afyon, Kısarna, Uludağ, Bursa, Yalova, Gönen, Sandıklı, Havza, Kızılcahamam, Haymana, Hasankale v.b. kaplıca ve içmeleri gibi. Bu kaynakların birçokları, kırıklı, faylı, şaryajlı ve deprem bölgelerinde konsantre olmuş bulunmaktadır. Jeolojik ve tektonik etüdler ilerledikçe termomineral kaynaklara daha birçokları ilâve edilmektedir. Ayrıca depremlerle bu gibi yerlerde bazı kaynaklar kaybolmakta veya yenileri çıkmaktadır. Bu kaynakların etüdları devam ederken ve bir klasifikasyona tabi tutulurken, diğır taraftan da jeotermik enerji bakımından jeotermal provenslerin ayırımına çalışılmıştır. Biri 1963 yılında İzmir batısında Seferihisar kuzey bölgesinde, sahilde, diğeri 1968 yılında İzmir doğusunda, Denizli-Sarayköy-Kızıldere'de olmak üzere iki önemli tabii buhar kaynağı keşfedilmiştir.

1. 2. Araştırmanın Tanımı ve Amacı

Bu çalışmanın amacı Pamukkale (Denizli) ve yakın çevresinin jeotermal alanlarının jeoloji haritasının güncellenmesi, minerolojik, petrografik ve jeokimyasal çalışma yöntemleriyle jeotermal akışkan - kayaç etkileşimini tanımlamak, jeotermal suların hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal yöntemlerle oluşumunu ve gelişimini incelemek ve jeotermal akışkan - kayaç etkileşimi çerçevesinde jeotermal sistemin oluşumunu bir model içinde ortaya koymaktır.

1. 3. Araştırma Alanının Jeotektonik Konumu

Alp-Himalaya deprem kuşağında yer alan ülkemizde olan depremler, Atlantik Okyanus ortası sırtının iki tarafa doğru yayılmasına bağlı olarak Afrika-Arabistan levhalarının kuzey - kuzeydoğuya doğru hareket etmeleriyle ilişkilidir. Ayrıca, Kızıldenizin uzun eksenı boyunca bugün de devam eden deniz tabanı yayılması nedeni ile Arabistan levhası kuzeye doğru itilmekte ve Avrasya levhasının altına doğru dalmaya zorlanmaktadır. Bu zorlanma ile Arabistan levhası ile Avrasya kıtası arasında kalan Doğu Anadolu bölgesinde yoğun sıkışma etkisi oluşmaktadır. Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı gibi belli başlı büyük kırıkları harekete geçiren bu sıkışma milyonlarca yıldır devam etmekte günümüzde de yaşadığımız depremlerin ana nedenini oluşturmaktadır.

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

(Sengor vd., 1985). Türkiye tektoniği büyük ölçüde Arap plakası, Avrasya ve Afrika plakalarının hareketlerinden etkilenir.

Ege bölgesinde diri ve normal faylar ile sınırlı doğu - batı uzanımlı Büyük Menderes ile kuzeybatı - güneydoğu uzanımlı Gediz grabenlerinin birleştiği bölgede Denizli havzası yer alır. Yaklaşık 50 km. uzunluğunda ve 20 km genişliğindeki bu havza güneyde ve kuzeyde diri - normal faylar ile sınırlanmıştır (Koçyiğit, 1984; Şaroğlu vd., 1987; Westaway, 1990, 1993).

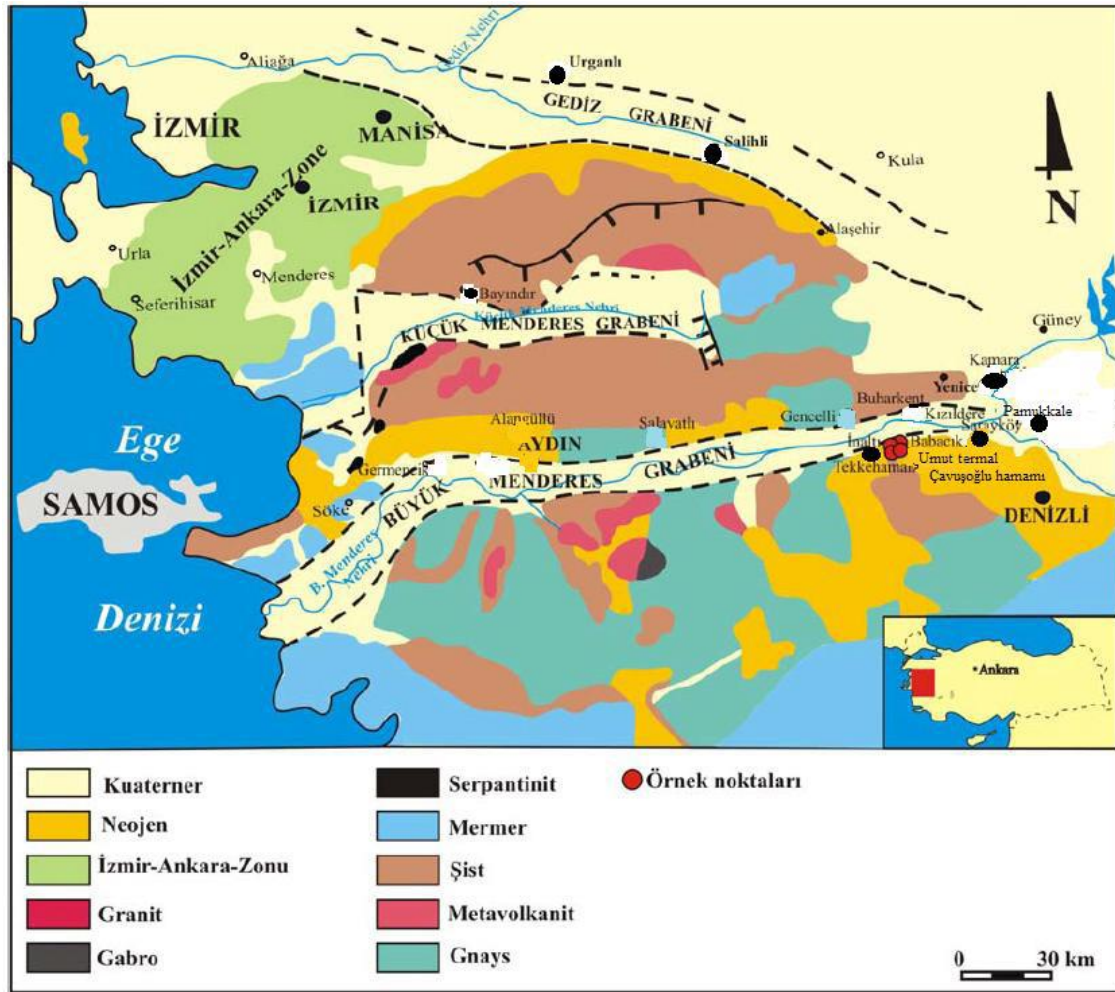
Pamukkale, Denizli ili sınırları içinde, ilin 20 km kuzeybatısında yer almaktadır. Ege'ye dökülen Büyük Menderes nehrine eklenen Çürüksu Çayının geçtiği Çürüksu Ovasından 150 m, denizden ise 360 m yüksekliktedir. Çökelez Dağı'nın güney yamacında, bir traverten düzlüğünde, büyük bir kristal kitlenin önünde, kalker katlarının arasından çıkan su yeryüzünde tek örnek olan Pamukkale'yi oluşturur. Travertenlerden ve antik Hierapolis Kenti harabelerinden oluşan alan, özgün doğal yapısı ve barındırdığı tarihi değerler bakımından önemli bir merkezdir. Toplam alanı 44 km² olan Pamukkale Özel Çevre Koruma Bölgesi sınırları içinde beş yerleşim yeri bulunmaktadır. Bunlar merkeze bağlı Develi, Karahayıt, Pamukkale, Yeniköy ve Akköy'dür.

Pamukkale, Büyük Menderes Nehri'nin bir kolu olan Çürüksu Çayı Ovasının kuzeydoğusundadır. Burada arazi geniş alüvyal depolar meydana getiren Çürüksu vadisinden başlayarak kuzeye ve güneye doğru yükselmeye başlar. Güneyde ilgi çekici morfolojik yükseltiler bulunmaktadır. Bunlar 2308 m ile Baba Dağları, kuzeyde 1840 m ile Büyük Çökelez, 1733 m ile Küçük Çökelez dağlarıdır. Yörenin en büyük akarsuyu çöküntü hendeği karakterindeki vadide akan Çürüksuyu Çayı'dır. Bu vadiden başlayarak arazi kuzeye doğru basamaklar halinde yükselir. Bu basamakların en tipik olanı üzerinde antik Hierapolis kenti bulunan, traverten basamaklarıdır. Pamukkale'yi oluşturan termal kaynaklar Çökelez Dağı'nın eteklerinde ve 6 km uzaklıktadır. Travertenler, Kadı Deresi yakınındaki Domuz Çukuru'ndan başlayarak kuzeydeki Nekropol'ün son mezarının yanından akan Çeltik Deresi'ne kadar uzanır. 50 m yüksekliğinde yaklaşık 3 km uzunluğunda ve 250 - 600 m genişliğindeki bu travertenlerin oluşumunu termal sular sağlamıştır. Çökelez Dağlarının yamaçlarında görülen orman kalıntıları ve kademelenmiş düşey farklılıklar travertenlerle birlikte alana ilginç özellikler kazandırmaktadır.

Pamukkale termal kaynakları, oluşturduğu karbeyazı renkteki traverten alanı ile dünyanın önde gelen doğal güzelliklerinden biridir (Güner ve Elhatip, 1999). Yaklaşık olarak 20 km² yüzey alanına ve 100 m kalınlığa sahip olan bu travertenler, Pamukkale kaynaklarından boşalan suların bünyelerinde çözünmüş olarak bulundurduğu karbondioksitin, CaCO₃ olarak çökmesi sonucunda oluşmuştur. Pamukkale termal kaynakları, Denizli şehrinin 15 km kuzeyinde yeralan Çürüksu Graben'ini oluşturan fay hattı boyunca meydana gelen kırık zonlarından Jandarma Kaynak Grubu (PJ1, PJ2, PJ3 ve PJ4), Gelin Hamamı, Pamukkale Motel (PM1), İnciraltı ve Beltes Kaynağı (PB1) adı altında toplam 8 adet noktadan boşalmaktadır. Pamukkale termal kaynaklarından yaklaşık olarak 200 m daha düşük kotta Soğukgöz, Kocagöz ve Gözpinarı kaynakları (Ova Kaynakları) yer almaktadır.

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 çıkması Neojen döneminde birbiri ardına meydana gelen faylar boyunca oluşmuştur (Şekil 1. 3.). Güncel çalışmalar, Menderes Masifi'nin iki veya daha fazla oluşum süreci yaşadığını göstermektedir (Seyitoğlu vd., 2004). 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 (Örneğin, 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.

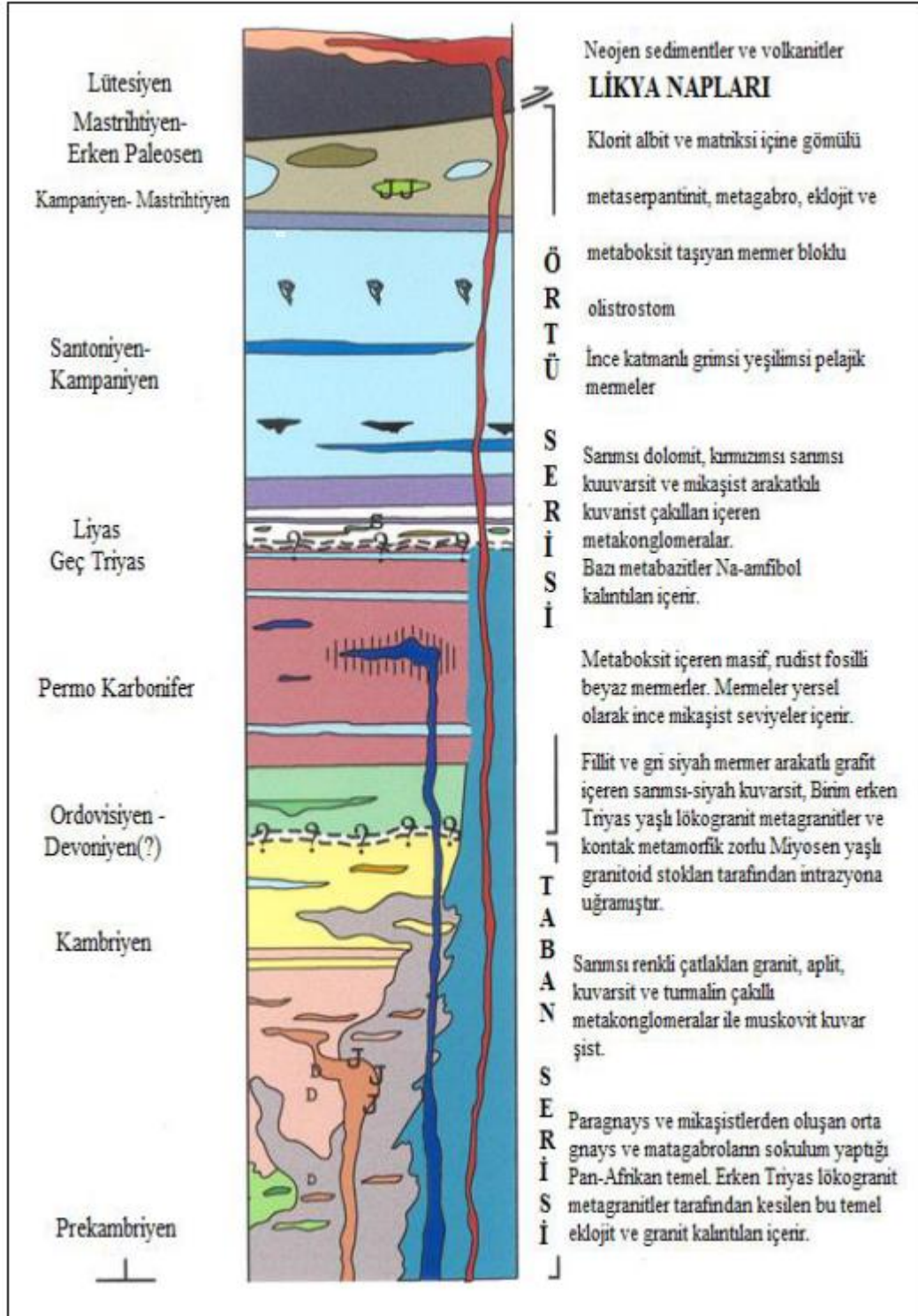


Şekil 1. 3. Menderes masifinin jeolojik haritası ve örnek noktaları.(Şengör, 1982 ve Dora vd., 1995; Özgür, 1998)

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 (Şekil 1.4.). 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 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. 4. Batı Anadolu'nun stratigrafik kesiti (Özgür ve Karamandere, 2015).

2. KAYNAK BİLGİSİ

Çalışma alanı ve yakın çevresinde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan çalışma alanını ve yakın çevresini ilgilendiren çalışmalar şu şekilde sıralanabilmektedir.

Denizli ve çevresindeki ilk ayrıntılı jeolojik çalışmalar 19.yy.'da başlamıştır. 1944 yılında da Egeran ve İlhan (1944) tarafından bölgede çalışmalar yapılmış ve ilk kez “Menderes Masifi” terimi kullanılmıştır.

Erişen (1971), Denizli Paleosen’ini konu alan ön raporunda, Paleosen’in aralarında uyumsuzluk bulunan “Alt Pliyosen” ve “Üst Pliyosen” serilerinden oluştuğunu belirtmiştir. 1971 tarihli, “Denizli – Dereköy Sahasının Jeolojik Etüdü ve Jeotermik Enerji İmkanları” adlı raporunda ise, paleontolojik verilere göre inceleme alanında yalnızca Alt Pliyosen çökellerinin var olduğunu, Üst Pliyosen izlenimi veren serilerin ise Alt Pliyosen yaşlı olduklarının saptandığını ileri sürmüştür.

Taner (1974 a,b), Denizli bölgesi Neojen’inde yaptığı paleontolojik ve stratigrafik incelemede, Paleozoyik yaşlı metamorfitlerin üzerine uyumsuz olarak gelen çökellerin Miosiyen yaşında olduğunu belirlemiştir. Araştırmacı, Pliyosen de küçük kapalı bir havza şeklinde gelişen Denizli havzası göl ortamının az derin ve sakin olduğunu, tatlı su içerdiği, ancak daha sonraları biraz tuzlandığını ileri sürmüştür.

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

Canik (1978), Sıcak sular ve travertenlerin oluşumu konusunda araştırmalar yapmıştır.

Şimşek (1984), Denizli-Kızıldere-Tekkehamam-Tosunlar-Buldan-Yenice alanının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları adlı çalışmada: Alt Pliyosen’de Kızılburun, Sazak, Kolonkaya ve Pliyokuvaterner’de Tosunlar formasyonlarını tanımlamış, Kuvaterner’de ise Taraça, Yamaç Molozu, Alüvyon ve Traverten ayırtlanmıştır.

Şimşek (1985), Kaya statigrafik birimleri olarak, Paleozoyik Menderes metamorfitleeri ve Senozoyik karasal görsel 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 başlamıştır. Günümüzde de devam etmektedir. Kayıt edilmiş ve bilinen depremlerde bunu doğrulamaktadır. Pliyosen, Sazak formasyonu içindeki kireçtaşları birinci, Menderes metamorfitlerinden İğdecik formasyonunun mermer kuvarsitist ardalanması ikinci rezervuarı oluşturmaktadır.

Pliyosen birimlerinden, Kızılburun, Kolonkaya ve yerel olarak Sazak formasyonu örtü kayadır. Geniş beslenme olanağı vardır, özellikle yüksek geçirimli fay zonları, jeotermal rezervuarların beslenmesini sağlamaktadır. Bölgede gnays-kuvarsit birimi üçüncü rezervuar 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.

Altunel ve Hancock (1993), Pamukkale travertenleri kaç yaşında adlı makalelerinde travertenlerin nasıl oluştuklarını belirtmişlerdir. Pamukkale travertenleri doğu-batı uzanımlı Menderes grabeni ile kuzeybatı güneydoğu uzanımlı Gediz grabeninin birleştiği kesimde yer alır. Yaklaşık 10 km² 'lik bir alanı kapsayan ve en az 400.000 yıldan beri oluşmaya devam eden Pamukkale travertenleri Denizli ilinin 18 km kuzeyinde olup beyaz görünümü ile 40 km'den fazla uzaklıktan farl edilebilirler. Denizil havzasının doğu kesiminde yer alan dört ayrı traverten kütlesinden biri olan Pamukkale travertenleri, havzayıkuzeydoğuda sınırlayan Pamukkale fayının düşen bloğu üzerinde aktif olarak depolanmaktadırlar. Altunel (1996), Pamukkale travertenlerinin morfolojik özellikleri, yaşları, Neotektonik önemleri üzerinde durmuş ve travertenleri morfolojik özelliklerine

göre 5 gruba ayrılmıştır. Bunlar sırasıyla; Teras tipi travertenler, sırt tipi travertenler, fay önü travertenleri, kendiliğinden oluşan kanal travertenleri ve aşınmış örtü travertenlerdir. Pamukkale travertenlerine uygulanan uranyum serisi yaş yöntemi, travertenlerin 400.000 yıldan bu yana değişik lokasyonlarda çökmeye devam ettiklerini ortaya koymuştur. Pamukkale bölgesi son 200.000 yıldan bu yana KD - GB yönünde 0.23 ile 0.6 mm/yıl hızıyla açılmaktadır.

Güner ve Elhatip (1999), Ege Bölgesi'nin geniş dağılımı olan aktif tektonizması büyük ölçekte horst ve graben yapıları ile temsil edilmektedir. Aktif tektonizmanın sonucu olarak birçok termal kaynak meydana gelmiştir. Bunlardan, ortalama yıllık sıcaklığı 35 - 36 °C olan Pamukkale Termal kaynakları karbeyazı rengi ile görsel açıdan önemli bir değere sahip olan, dünyanın en büyük traverten alanlarından birini oluşturmaktadır. Ortalama debisi 381. 8 l/s, Ca^{++} iyonu değeri 23 meq/l olan Pamukkale Termal kaynaklarının 400 mg/l gibi yüksek miktarda çözünmüş CO_2 gazı içerdiği saptanmıştır. Aynı yörede diğer önemli kaynak Karahayıt termal kaynağı ise 57 °C sıcaklığa sahip olup, Pamukkale Kaynağına göre nisbeten O^{18} izotopu açısından zenginleşme göstermektedir. İzotop örneklemelerinin analiz sonuçları kullanılarak, $\delta^{18}O$ yükseklik ilişkisi değişimi, her 100 m için ‰ 0.31 olarak bulunmuştur. Hidrojeolojik İncelemeler, çalışma alanındaki yeraltısuyu dolaşımı kavramsal olarak üç değişik sistem oluşturduğu göstermiştir. Bunlar; (1) güncel ve kısa süreli geçiş zamanına sahip nisbeten sık dolaşımli soğuk sular, (2) daha uzun geçiş süresine sahip Pamukkale Termal suları ve (3) en derin dolaşıma sahip en uzun geçiş süreli Karahayıt termal sularıdır.

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. **Özgür vd., (1998)**, Kızıldere, Salavatlı ve Germencik jeotermal alanlarında meteorik suların ısınmasını iki ayrı nedene bağlar, (i) Menderes Masifi kıtasal rift zonlarında kalkan bazik ve ortaç volkanik kayalar içeren intrüzif kayaların Orta Miyosenden başlayarak Kuvaternere kadar aktif volkanizmanın geliştiği birçok çalışma ile ortaya konduğu dolayısıyla mantodan gelen bazik volkanik kayaları 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. **Yaman (2005)**, Büyük Menderes kıtasal rift zonunda Germencik, Ilıcabaşı, Bozköy ve Salavatlı sahaları hidrojeokimyasal olarak aynı süreçlerden etkilenmiştir. Bu jeotermal sahalarda derin dolaşımli 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 dolaşımli 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 iyonunca zenginleşmesi yan kayanın dolomitik etkisine bağlı olarak gelişmiş olmadır. 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 sık 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 zone 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 ya da sondajlarla çıkartılan, değişik tipte sular bulunmaktadır. Suları gruplandırmak ve sistem hakkındaki bilgileri geliştirmek için çeşitli kimyasal analizler

yanında, alandaki sulara $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^3\text{H}$, çözülmüş sülfat iyonunda (SO_4) $\delta^{34}\text{S}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ izotop analizleri yapılmıştır. Sığ dolaşımli soğuk su kaynaklarının döteryum yerleri korele edilerek termal suların beslenme yükseklikleri belirlenmiştir. Bu hesaplamalar, Kızıldere-Tekkehamam termal sularının 1.300 - 1.900 m kotları arasında, Pamukkale-Gölemezli termal sularının ise 1.100 - 1.400 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 °C sıcaklıklı Kızıldere A tipi Na-HCO_3 'lı ($<90 \text{ TDS} < 130 \text{ meq/l}$) 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 'lı ($\text{TDS} - 70 \text{ meq/l}$) suların çeşitli oranlardaki karışımlarından oluşmaktadır.

Özdemir ve Tezelli (2008), Batı Anadolu'da incelenen jeotermal sahalar; Afyon, Aydın, Balıkesir, Denizli, İzmir, Kütayha, Manisa, Muğla ve Uşak jeotermal sahalarıdır. Bu sahalardaki su kompozisyonlarının genel eğilimi ise $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ve Cl-Na içerikleri fazla sulardır. Batı Anadoludaki suların genellikle Na^+K ve HCO_3 karakterli oldukları görülmektedir. Bunun sebebi ise rezervuarı oluşturan Mesosoyik yaşlı kireçtaşları, Veojen volkanosedimanları, kuvars ve başkalaşım oluşmuş mermerlerdir. Bu haznekayalarla etkileşime giren sular karbonatça zenginleşmektedir. $\text{HCO}_3\text{-Na}$ zenginleşmesinin en çok gözlemlendiği bölgelerin Denizli jeotermal sahalarına ait olduğu söylenebilmektedir. Bölgedeki yüksek orandaki bikarbonattan dolayı traverten oluşumları bunun bir kanıtıdır.

3. ARAŞTIRMA ALANININ JEOLJİSİ

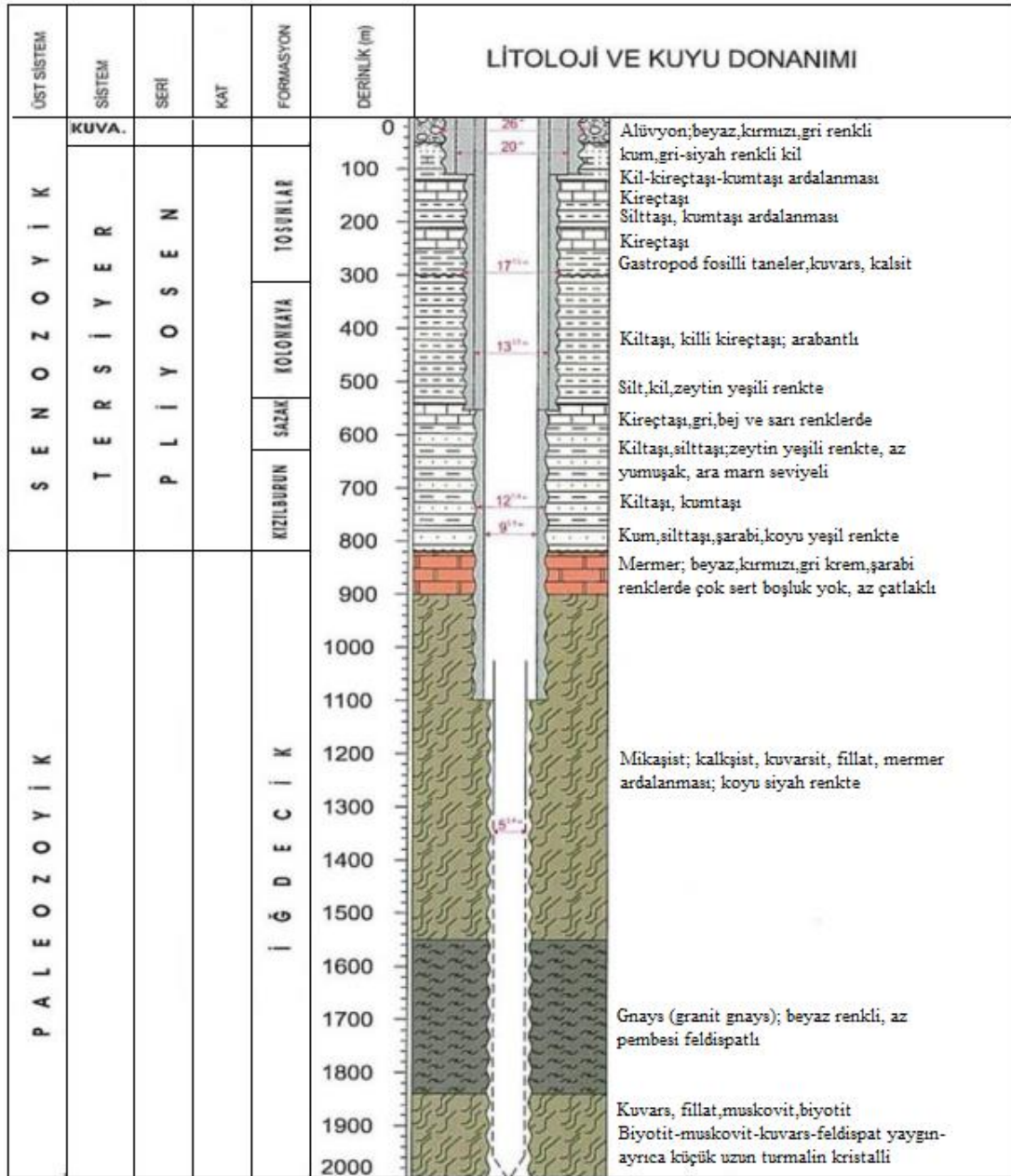
Ege bölgesinde diri ve normal faylar ile sınırlı doğu - batı uzanımlı Büyük Menderes ile kuzeybatı güneydoğu uzanımlı Gediz grabenlerinin birleştiği bölgede Denizli havzası yer alır (Şekil 3. 1.). Yaklaşık 50 km uzunluğunda ve 20 km genişliğinde ki bu havza güneyde ve kuzeyde diri - normal faylar ile sınırlanmıştır (Koçyiğit, 1984; Şaroğlu ve diğerleri, 1987; Westaway, 1990, 1993). Denizli havzasının kuzey kenarında yer alan ve yaklaşık 10 km² lik bir alanı kapsayan Pamukkale travertenleri, havzanın doğu kesiminde yer alan dört ayrı traverten kütlesinden biri olup, havzayı kuzeyden sınırlayan Pamukkale fayının düşen bloğu üzerinde halen oluşmaya devam etmektedirler. Şekil 3. 1.' deki jeolojik haritadan da görüldüğü gibi, Pamukkale bölgesinde dört ayrı jeolojik birim mevcuttur. Bunlar, Neojen öncesine ait mermer ve şist içeren metamorfik kayalar, Neojen yaşlı çakıltası, kumtaşı ve kireçtaşı içeren sedimanter kayalar, Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ve travertenlerdir.

Denizli havzası, yüksek topografya oluşturan Menderes masifi metamorfiklerinin çevrelediği ve Pliyosen formasyonları ile kaplı bir bölgede yer almaktadır (Özgüler vd., 1984). Bölgedeki jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru şu şekilde sıralanırlar (Şekil 3.1.); Paleozoyik metamorfikler: Kendi içinde alttan üste doğru gözlü gnays, gnayslı şist, kuvarsit, mikaşist ve mermer birimlerinden oluşan bu kayaçlar tabanı oluşturlar. Pliyosen çökelleri: Tabanı örten karasal ve gölsel bu çökeller konglomera, kumtaşı, kıltaşı, kireçtaşı, marn ve silttaşı aralanmalarından oluşur. Kuvaterner çökelleri: Alüvyon, yamaç molozu ve hidrotermal bozuşum kayaçları bu çökelleri temsil ederler.

Denizli havzasındaki travertenler ilk kez MTA (1964) tarafından 1: 500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritasında gösterilmiştir. Pamukkale bölgesinde yapılan daha sonraki çalışmalarda genellikle bölgedeki suların kimyası (Gökalp, 1971; Koçak, 1976), sıcak sular ve travertenlerdeki sorunlar (Canik, 1978; Altunel 1993; Atiker, 1993) tartışılmıştır.

İnceleme alanında Menderes Masifi'ne ait metamorfik kayalar ile Mesozoyik, Pliyosen ve Kuvaterner'e ait kayalar yüzeylenmektedir. Çalışma alanı ve çevresinde görülen en yaşlı birimler Menderes Masifine ait metamorfik kayalardır (Şekil 3. 2). Gnays, kuvarsit, kalkışit, klorit, biyotit, muskovitşist, ve mermerlerden oluşan metamorfitler almandin - amfibolit ve yeşil şist fasiyeslerinde metamorfizma geçirmişlerdir (Paleozoyik). Mesozoyik yaşlı kayalar inceleme alanında Denizli doğusu ile Pamukkale harabeleri kuzeyinde küçük alanlarda gözlenmektedir. Mesozoyik kayaları kalker ve şistli hornsteyn fasiyesleri ile tanımlanmıştır. Karbonatlı kayalar, açık gri-beyaz masif beyaz renklerde olup şistli hornsteyn fasiyesi killi şist ve hornsteynlardan oluşmaktadır. Bu formasyon içinde yer yer serpantinlerde görülür. Çalışma alanı ve civarında Pliyosen yaşlı çökeller daha önce yapılan araştırmalarda litolojik olarak birçok katlara ayrılmış ancak (Tamgaç vd., 1995) bu çökelleri daha basit ve yalın olarak 4'e ayırmıştır. Pliyosen, eski topoğrafyanın çukurluklarını dolduran iri köşeli, az taşınmış kırmızı renkli Paleozoyik çakıllarından oluşan, Mesozoyik üzerine uyumsuz olarak gelen taban konglomerası ve içinde yer yer jipsli seviyeler içeren (p11), kalın tabakalı kumlu ve marnlı seviyeler içeren bej renkli kireçtaşları (p12), kumtaşı marn kilaşı aralanması (p13), çoğunlukla kumtaşı, konglomera ve kısmen kil arabantlarından oluşan (p14) ile temsil edilmektedir. İnceleme alanında yer alan alüvyon ve traverten büyük alanlar kaplamaktadır (Kuvaterner). Alüvyon inceleme alanında yer alan Çürüksu çayına bağlı olarak oluşmuştur ve kalınlığı 100 m'den fazladır. Traverten ise, Pamukkale termal kaynaklarına bağlı olarak oluşmuştur.

Pamukkale ve yakın çevresinde Paleozoyik yaşlı mermerler, Mesozoyik yaşlı kireç taşları ve Pliyosen yaşlı alüvyon ve travertenler geçirimli kayalardır ve hidrojeolojik olarak önemli rol oynarlar. Bu kayalar yörede sıcak sular için rezervuar kayaları olarak isimlendirilirler. Pamukkale ana kaynak suları yaklaşık 35°C sıcaklığa sahip olup Ca-Mg- HCO₃ tipinde sulardır. Bunlar yüksek HCO₃ ve çözünmüş CO₂ değerleri yüzünden traverten oluşumuna neden olmuştur. Buna karşın Karahayıt kaynağı 55°C olan sıcaklığı ile kendini belli etmektedir (Giese, 1997; Özgür, 1998). Burada yüksek kotlardan yeraltına sızan meteorik suların büyük bir kısmı mevsimsel olarak debileri değişen soğuk suları oluşturular. Buma bağlı olarak yeraltına süzülme hareketine devam eden meteorik sular yaklaşık 20°C daha sıcak olan Karahayıt sıcak sularını oluşturular.



Şekil 3. 2. Çalışma alanına basitleştirilmiş sütun kesiti (Alpman, 1963).

3.1. Paleozoyik Yaşlı Litolojiler

Çalışma alanı kuzeyinde Paleozoik yaşlı Menderes Masifi metamorfikleri gayet güzel şistozite göstermekte ve yanal olarak birbirlerine geçiş yapmaktadır. Renkleri gri ile pembe arasında değişmektedir. Bunları açısız uyumsuzlukla Pliyosen yaşlı genç sedimentler kayalar örtmektedir.

3.1.1. İğdecik formasyonu

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

3.2. Mesozoyik Yaşlı Kireçtaşları

Denizli'nin doğusunda ve Pamukkale harabeleri kuzeyinde Kayraklı T. civarında küçük mostralar halinde, Güzelpınar - Kurtluca düzlüğünde, Küçükdere-Yeniköy kuzeyinde ve Acıdere mah. doğusunda geniş alanlarda gözlenirler. Tümüyle kirlibeyaz, açık kahvems, gözenekli, gastropodlu özelliklere sahiptir. Bunlar ultrabazik kayalarla birlikte Küçük Çökelez Dağı, Kora Tepe ve Malı Dağı yörelerinde görülür. Mesozoyik yaşlı kireçtaşları mikrokristalen kalsit kristallerinden oluşmakta olup, çalışma alanında kuzeyde Çökelez dağı ve yöresinde geniş alanlarda yüzeyleme vermektedir. Yaşı muhtemelen Alt Kratese olup allokton konumludur. Söz konusu kireçtaşları üzerinde zayıf karbonik asitli yağmur sularının çözücü etkisi sonucu dolinler şeklinde karstik yüzey şekilleri ortaya çıkmıştır. Karstlaşma Akdeniz ikliminin sonucu olarak Batı Toroslarda yaygın bir şekilde dikkati çekmektedir.

3.3. Eosen Yaşlı Tortul Kayaçlar

Genel olarak akarsu ve göl ortamı oluşuklarından meydana gelen sedimenter kayalar, konglomera, kumtaşı, silttaşı, kiltası, kireçtaşı ve killi kireçtaşı birimleri ve bu birimlerin yanal ve düşey geçişleri ile temsil olunurlar. Karasal çökelleri yaşlıdan gence doğru dört kısımda incelemek mümkündür. Formasyon adlandırmaları önceki çalışmacılar tarafından yapılmıştır. Bu birimler jeotermal anlamda örtü kaya özelliklerini gösterirken, bazı seviyelerinde de tali rezervuar kaya şeklinde görmek mümkündür. Pliyosen yaşlı olup birçok yerde Paleozoik serileri örterler. Karasal çökellerin kalınlığı graben kenarlarında ve graben üzerinde birkaç yüz metre iken, graben ortasına doğru bu kalınlık bin metrenin üzerine çıkabilmektedir.

3.4. Pliyosen Yaşlı Tortul Kayaçlar

Pliyosen yaşlı formasyonlar alt Pliyosen ve Üst Pliyosen olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Alt Pliyosen yaşlı formasyonları Kızılburun Formasyonu, Szakformasyonu ve Kolonkaya Formasyonu oluşturmaktadır. Üst Pliyosen formasyonu da Tosunlar Formasyonu meydana getirmektedir.

3.4.1. Kızılburun formasyonu

Taban kongloması özelliğinde olan bu birim sedimenter kayaçların en alt seviyesini oluşturur. 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). Konglomera, gevşek tutturulmuş kil, kum ve çakıldan oluşmuştur (Şekil 3.3). Daha önce bu bölgede çalışan araştırmacılar tarafından adlandırılan birim kırmızı bir renge sahip olup, Üst Miyosen-Pliyosen yaşı verilmiştir. Bazı yerlerde kömürlü veya jipsli seviyeler içerir. 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). Menderes Masifi metamorfikleri üzerine diskordansla oturan konglomeraların hemen üzerinde yer alan Sazak Formasyonu ile sınırı uyumludur.

3.4.2. Sazak formasyonu

En iyi gözlemlendiği yer olan Sazak köyünden isim alan birim, kireçtaşları ile temsil olunur. Adlanma ilk kez Şimşek (1984) tarafından kullanılmıştır. Alt seviyelerinde kilitli - killi kireçtaşı özelliğinde iken, üst seviyeleri silisifiye kireçtaşı karakterindedir. İçinde ince kumtaşı ve marnlı seviyeler gözlenir. Bu formasyon içinde yer alan kireçtaşı seviyeleri sarımsı beyaz, sert, köşeli kırıklı, yer yer ince - orta ve kalın katmanlanmalıdır. Marnlar sarımsı ve boz renklerde olup gastropod fosiller içerir (Özler,1996). Sazak formasyonu karbonat çökellerinin fazla olduğu düşük enerjili bir göl ortamında çökelmiştir (Taner, 1974). 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). Özellikle silisifiye olan kısımlar jeotermal anlamda tali rezervuar olarak

görev yapar. Kızılburun Formasyonu üzerine uyumlu olarak oturan Sazak Formasyonu, kendi üzerine gelen Kolonkaya Formasyonu ile de uyumlu dokanaklar sunar.

3.4.3. Kolonkaya formasyonu

Kumtaşı, silttaşı, kilitaşı ve kireçtaşı tabakalarıyla temsil olunan birim, önceki çalışmacılar tarafından Kolonkaya Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Baskın olan litoloji kilitaşı ve silttaşından oluşan bu birim düşük enerjili gölssel, tatlı su ortamını karakterize etmektedir. Birimin yaşı Pliyosen' dir. Birim saha genelinde farklı kalınlıklar göstermektedir. Yüzeylendiği alanlar genellikle graben kanatlarıdır. Kolonkaya Formasyonu hemen altında yer alan Sazak Formasyonu ile uyumlu iken, üzerine gelen Tosunlar Formasyonu ile uyumsuz dokanaklar gösterir.

3.4.4. Tosunlar formasyonu

Başlıca kil, alacalı kırmızı ve sarımsı çakilitaşı, kumtaşı ve fosilli kilitaşı, silttaşı ve siltli kireçtaşlarından oluşmaktadır. Çakıl taşının bileşen taneleri gnays, çeşitli şist, kuvarsit, mermer, Mesozoyik yaşlı kireçtaşları, Kızılburun, Sazak ve Kolonkaya formasyonları'na ait çakıl ve bloklardır. Birim az pekleşmiş olup, taneler kötü - iyi arasında yuvarlaklaşmıştır (Şengün, 2011). Kumtaşı ve silttaşlarının rengi biraz daha koyu ve kırmızımsı sarımsı tondadır. Birimin belirgin özellikleri düşük kotlarda bulunması, az pekleşmiş, dayanımsız olmaları ve belirsiz katmanlanma sunmalarıdır. Katmanlar genelde yatay olup kalınlıkları yaklaşık 90 cm'dir (Gökgöz, 1998). Saha genelinde bu özellikleri koruyan birimin üst seviyelerinde konglomeratik seviyeler gözlenir. Bazı seviyeleri tamamen fosil kavrıklarından oluşmuştur. Önceki araştırmacılar tarafından adlandırılan birime Üst Pliyosen yaşı verilmiştir. Birimin kalınlığı saha genelinde değişkendir. Klastiklerden oluşan Tosunlar Formasyonu, altında yer alan Kolonkaya Formasyonu ve üzerine gelen alüvyonla hafif açısal uyumsuzdur. Kızıldere'nin doğusundaki Tosunlar köyünde tipik yayılım gösterir (Şimşek, 1984). Tosunlar formasyonu, 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 yükseklikten taşınmış olduğu belirlenmiştir. Birim köşeli, iri taneli, bloklu, gevşek tutturulmuş, az belirgin katmanlı veya katmansız, kötü boyplanmalı olduğu alanlarda yığılma ve selinti çökelti halindedir (Şimşek, 1984).

3.5. Kuvaterner Yaşı Çökeller

3.5.1. Alüvyon (Qal)

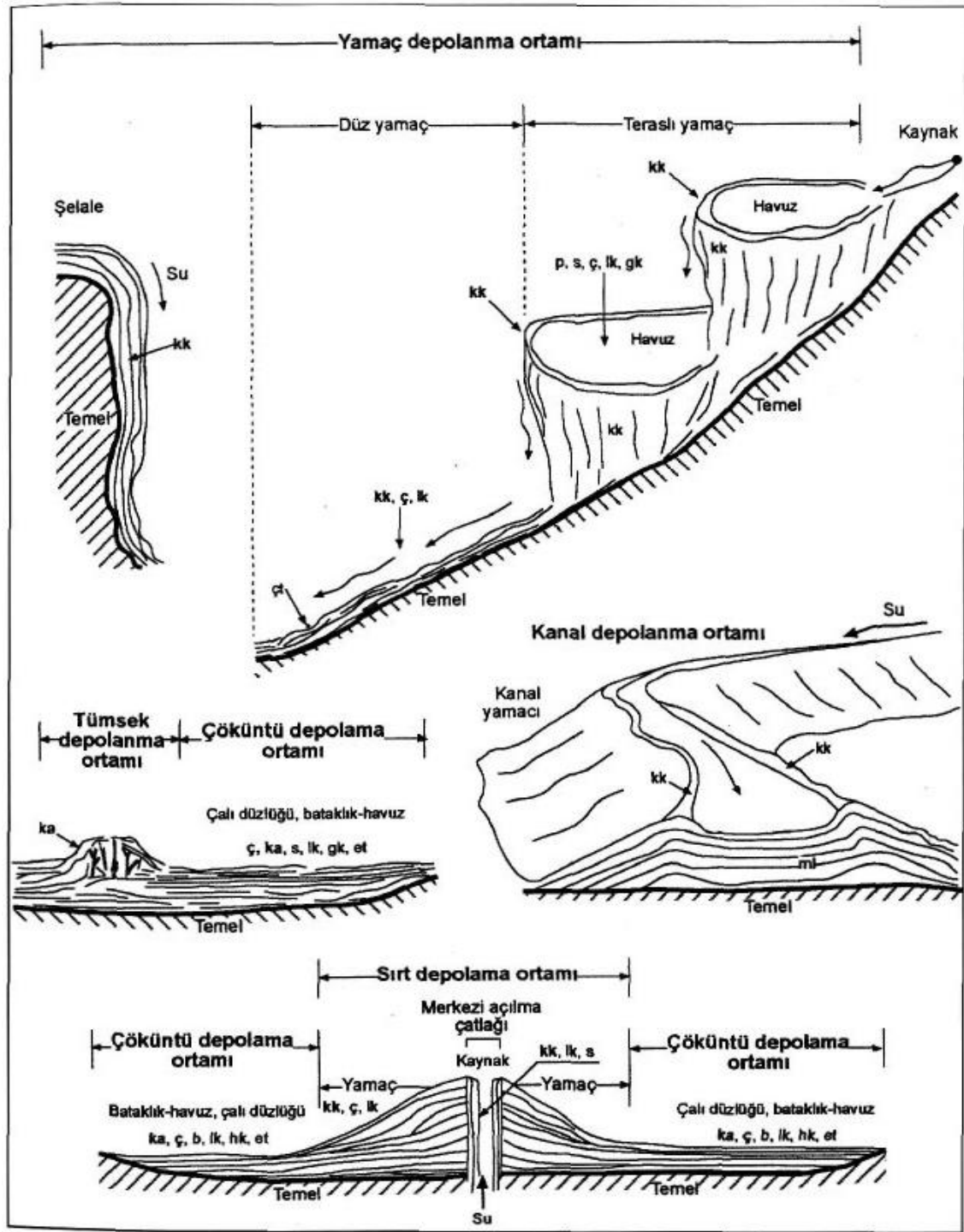
Çalışma alanının, kuzeyinde (Değirmenyıkığı Mevkii, Konyayolu Mevkii), doğusunda (Çayırçiflik Mevkii ve Hanyeri Mevkii) ve güneyinde (Sincan taşı Mevkii) en genç birim olan alüvyonlar gözlenmektedir. Alüvyonlar iyi tutturulmuş çakıl, kötü boylanmış kum ve silten oluşmaktadırlar. Bölgede yapılan D.S.İ. sondaj verilerine göre alüvyon kalınlığı 150 m'dir. Çalışma alanında en çok yayılıma sahip çökellerdir.

3.5.2. Travertenler (Qtrv)

Tanımı; Traverten kelime itibariyle birçok araştırmacı tarafından aynı şekilde tanımlanmıştır. Bu tanımlamalardan bazıları; Traverten, kelime olarak (travertino) İtalyanca ve Tiburtinus kelimesinin zaman içinde değişmiş hali, Roma'ya yakın Tibur'da çok miktarda oluşan bu kayaç eski devirlerde Lapis Tiburtinus olarak adlandırılıyordu (Altunel, 1996). Travertenler karstik ve hidrotermal sular, küçük nehirler ve bataklıklardaki kalsiyum bikarbonatın çökmesiyle veya tamamen biyokimyasal olarak tortullaşmasıyla oluşan kayaçlardır. Travertenler, kireçtaşı ve mermer gibi, suda kolay çözünebilen karbonatlı kayaçların kırıklı çatlaklı zayıf zonlarında çözme-aşındırma (korozyon) yapan yer altı sularının, yeryüzüne çıktığı kaynak ağızları ve çevresinde çökelttiği tortul kayaçtır (Altunel ve Hancock, 1993). Gevrek ve gözenekli yapılı, oolitlik veya pizolitik dokular bulundurabilen, genellikle büyük bitki kalıntıları içeren su kaynaklarının çevresinde oluşmuş kireçtaşlarına traverten denir. Kaynaklardan çıkan kalsiyum (Ca^{+2}) ve bikarbonatça (HCO_3^-) zengin yer altı sularının çökelttiği kireçtaşlarına traverten denir (Guo ve Riding, 1998).

Traverten ve tufalar, eski karbonatlı kayaçların atmosferik ve yer altı sularının etkisiyle çözünerek kalsiyum bikarbonatça zenginleştirdiği kaynak sularından itibaren karasal ortamlarda yeniden CaCO_3 çökeltmesiyle oluşan kayaçlardır. Bunlar daha az oranda da silis bileşenli olabilmektedirler. Traverten ve tufa terimleri genellikle birlikte veya birbirinin yerine kullanılan terimler olmasına karşın, aslında, özellikle oluşum koşulları açısından farklılıklar ifade etmektedir (Pedley, 1990; Ford ve Pedley, 1996). Travertenler, termal ve hidrotermal kökenli kaynak suları ile oluşturulan fiziko-kimyasal ağırlıklı

karbonat çökelimleri olup, içlerinde mikrobiyal etkenlere sıkça rastlanır. Bunlar çoğunlukla sert kristalin, sıklıkla ince laminasyon gösteren ve çalı şekline benzeyen bakteri büyüme yapılan ile karakterize olurlar (Chafetz ve Folk, 1984; Guo ve Riding, 1998; Özkul vd., 2002). Tufalar ise, düşük Mg-karbonatlı soğuk tatlı suların oluşturduğu, tipik olarak makro ve mikro ölçekle bitki, hayvan kalıntısı ve bakteri (özellikle siyano-bakteri) içeren, özellikle de çok gözenekli yapıya sahip olan karbonat çökelimini tanımlamak için kullanılan bir terimdir (Pedley, 1990; Ford ve Pedley, 1996; Janssen vd, 1999; Matsuoka vd., 2001; Wright, 2000; Pedley vd., 2003). Yukarıdaki traverten ve tufa tanımlamaları dikkate alındığında, traverten oluşumlarının Türkiye'deki en tipik örneği Pamukkale'de Denizli) (Altunel, 1996), tufa oluşumlarının en tipik örneği ise Antalya yöresinde yer alır.



Şekil 3. 3. Traverten litofasiyelerinin oluştuğu depolanma ortamları ve alt ortamları.

Kısaltmalar: kk: kristalin kabuki, ç: çalı, p: pizolit, s: sal, hk: zarflı hava kabarcığı, ka: kamuş, lk: litoklast, çt: çakıllı traverten, et: eski toprak, ml: mikritik laminalar [şekilde koyu yazılmış simgelerbaskın litofasiyesleri gösterir] (Özkul ve Alçiçek, 2002).

Soğuk su kaynaklarının oluşturduğu travertenlerle, sıcak su kaynaklarının oluşturduğu travertenler arasında farklılıklar vardır. Soğuk su travertenlerinin oluşumunda su sıcaklığı 20°C'nin altındadır. Sıcak su kaynaklarına oranla soğuk su kaynakları CO₂'i daha yavaş kaybeder. Çökelme kaynaktan kısa bir mesafe sonra başlar. Düşük sıcaklık ve az miktardaki çözünmüş madde oranı, ot, bitki, yosun ve çalılarının gelişmesine neden olur. Karbonat çökelimi ot, yosun, çalı, kamış gibi bitkilerin üzerinde veya etrafını sarar şekilde meydana gelir. Daha sonra bu bitkilerin çürümesi veya bozularak yok olması ile geriye yüksek oranda poroz traverten oluşur. Devam eden çökelme ile suyun akış ağız kapanır ve su sürekli yer değiştirir. Çıkıştan uzaklaştıkça depolanma hızı düşer. Soğuk su travertenleri boşluklu, organik madde içeriği fazla ve koyu renklidir. Çalışma alanının dışında Koyunaliler ve Çömleksaz'da görülmektedir. Sıcak su kaynaklarında ise sıcaklık 20°C'nin üzerindedir. Su sıcaklığı genellikle 36 - 37°C'dir (Atiker, 1993). Sıcak sular kaynaktan çıktıktan sonra soğumaya başlar ve belli bir akıştan sonra traverten çökelimi başlar. Sıcak su kaynaklarında çökelme daha fazladır. Çünkü bitki, organik madde büyümesine engel teşkil eder. Çalışma alanındaki travertenler sıcak su kaynak travertenleridir. Travertenlerin boşluklu olmasında diğer bir etken ise oluşum sırasında hapis kalan gazların zamanla kaçmasıdır. Pamukkale travertenlerine uygulanan uranyum serisi yaş yöntemi, travertenlerin 400.000 yıldan bu yana değişik lokasyonlarda çökelmeye devam ettiğini ortaya koymuştur (Altunel, 1996). Ege bölgesinde diri ve normal faylar ile sınırlı doğu - batı uzanımlı Büyük Menderes ile kuzeybatı-güneybatı uzanımlı Gediz Graben'lerinin birleştiği bölgede Denizli Havzası yer alır. Yaklaşık 50 km uzunluğunda ve 20 km genişliğindeki bu havza güneyde ve kuzeyde diri - normal faylar ile sınırlandırılmıştır (Koçyiğit, 1984).

Pamukkale travertenleri havzanın doğu kesiminde yer alan ve havzayı kuzeyden sınırlayan Pamukkale fayının düşen bloğu üzerinde halen oluşmaya devam etmektedir (Altunel, 1996). Ana faya bağlı olarak traverten oluşumu vardır. Ana fayın kırık yaptığı alanlarda traverten oluşumları daha fazladır. Ana faya bağlı olarak paralel çatlaklar oluşmuştur. Çalışma alanında açılma çatlaklarına rastlanılmış ve açılma çatlaklarına bağlı olarak oluşmuş sırt tipi travertenler gözlenmiştir. Denizli bölgesindeki traverten oluşumları Pamukkale travertenleri dışında doğuya doğru Yeniköy, Küçükdereköy ve Irlaganlı yerleşim merkezlerinde, Kocabaş ve yakın çevresinde, Kocabaş'ın kuzeyinde (Ballık travertenleri) ve Koyunaliler, Karateke'de rastlanmaktadır. Traverten oluşumunu etkileyen faktörler, (1) sıcak ve mineralli suların bileşimi ve doygunluk indeksleri ve

kısmi CO₂ gazı basınçları, (2) sıcak ve mineralli suların sıcaklığı ve debisi, (3) sıcak ve mineralli suyun akış esnasındaki sıcaklığı ve (4) sıcak ve mineralli suların bileşimi ve doygunluk indeksleri ve kısmi CO₂ gazı basınçları (Koçan, 1999).



Şekil 3. 4. Pamukkale'deki aktif teras tipi travertenler ve travertenlerin oluştuğu yamaçlardaki teraslar ve havuzlar.

3.5.2.1. Travertenlerin sınıflandırılması

Travertenler üzerinde yapılan çalışmalarda, travertenlerin morfolojik olarak (Altunel, 1996) ve Litotip olarak (Guo ve Riding, 1998), sınıflandırılması kullanılmıştır. Altunel (1996), tarafından yapılan morfolojik sınıflandırma kullanılmıştır. Çalışma alanında morfolojik tiplerden sadece üç tanesi görülmektedir. Bunlar, teras tipi, sırt tipi ve kanal tipi travertenlerdir.

1. Teras tipi travertenler

Aktif kırık ve fay hatları üzerinde yer alan kaynaklardan çıkan suyun yamaç aşağı akması ile oluşurlar. Eğimli bir yamaç boyunca yer alan teras tipi travertenler, boyutları birkaç santimetreden birkaç metreye uzanan teras havuzları ve teraslar içerirler. Su, ana teras

üzerindeki havuzlar, teras ve eğimli yüzeyler üzerinde küçük çağlayanlar halinde akarak kar beyazı rengindeki travertenleri çökeltir ve zamanla bu küçük ölçekli yapıların büyümesini sağlar. Suyun engeller üzerinden akması sonucu yamaç üzerinde yarım küre şeklinde tepelikler, havuzlar, teraslar ve sarkıtlar gibi küçük ölçekte şekiller oluşur (Altunel, 1996). Dik yamaç üzerindeki su dağıtım kanalları çevresinde değişik boyutlarda, yan yana ve alt alta basamaklı bir dizilim gösteren traverten havuzlarında suyun tabanı çamur kıvamında beyaz kireç çözeltisiyle kaplıdır. Üstü saydam su ile kaplı olan havuzlardan dışa taşan su, havuzun dış duvarında gözle görülmeyecek incelikte kristalli kabuklar şeklindeki traverten katmanlarını sürekli olarak çökeltmektedir.

Traverten çökeliiminin en fazla olduğu bölüm, havuz dış duvarının üst kesimidir. Bu nedenle havuz dış duvarı, sürekli üst kesiminde genişlemeye uğradığından, duvarın alt kesimi zamanla ters eğim kazanır. Traverten teraslarından dışa taşan sular, zamanla gelişen bu ters eğimin arttığı kesimde, duvar yüzeyinden ayrılıp saçaklanarak alttaki havuza düşer. Bu akış biçimine bağlı olarak, balkon şekilli havuzların dış duvarı üzerinde sarkıt-dikit ve çubuk sütun şekilli duvar süsü travertenleri oluşur (Altunel ve Hancock, 1993). Sıcak suyun teraslar üzerinden akışı ne kadar ince bir tabaka şeklinde olur, ne kadar çok dalgalanma ve sıçrama gösterirse içindeki CO_2 ' i daha çabuk kaybedecek ve $CaCO_2$ 'nin çökme hızı artacaktır. Sıcak suyun traverten teraslarını aklaştırması için 3-4 gün üzerlerinden akmasını sağlamak gerekmektedir (Canik, 1978).

2. Sırt tipi travertenler

Çatlak boyunca yüzeye çıkan sıcak suların yüzeyde çökelttiği travertenler zamanla çatlak boyunca sırt oluşturlar. Traverten hem çatlak içinde (bantlı traverten, kristalin kabuk tipi traverten) hemde yüzeyde çökler (tabakalı traverten). Çatlak boyunca yüzeye doğru yükselen sıcak su çatlağın her iki yüzeyinde onikse benzeyen beyazdan kırmızımsı beyaza değişen renklerde, sert ve sıkı dokulu, çatlak duvarlarına paralel bantlı traverten çökeltir. Çatlaktan çıkan suyun yüzeyde çatlağın her iki tarafında akmasıyla tabakalı travertenler oluşur. Traverten tabakalarının eğimleri sırt ekseninden uzağa doğrudur. Yani sırt tipi travertenler bir nevi çatı şeklindedir (Altunel, 1996). Merkezi çatlak boyunca oluşmuş travertenlerin en önemli özellikleri derinliğe bağlı olarak traverten kalınlığının doğru orantılı veya kademeli olarak artmasıdır. Sıcak suyun yukarıya yükselmesi sırasında merkezi çatlak içinde çökelen bantlı traverten genellikle simetriktir.

Yaklaşık düşey olan bantlı travertenler içinde cep şeklinde boşluklar mevcuttur. Bu ceplerin bazıları yataya yakın laminalar içerir (Altunel,1996).

3. Kanal tipi travertenler

Kalsiyum karbonatça zengin suyun kanal içinde akması sonucu, kanal tabanında ve kenarlarında travertenlerin çökmesiyle oluşan duvar şeklindeki travertenler kendiliğinden oluşan kanal tipi travertenler diye adlandırılmıştır (Altunel, 1996). Traverten oluşumunu sağlayan kanallar, doğal ve insanların sulama amaçlı yaptıkları kanallar olabilir. Kanal içindeki suyun akışı kanal kenarlarında, kanal merkezine göre daha çalkantılı olduğu için traverten çökelişi kenarlarda daha fazladır. Dolayısıyla kanal tipi travertenlerin dikey kesiti genellikle “ M ” şeklindedir (Altunel,1996). Topografyanın şekline bağlı olarak kaynak sularının laminar ve türbülanslı akımı sonucu, topografyada çeşitli traverten tipleri oluşur. Travertenler, eski topografyanın şekline, çökme ortamındaki sıcaklık, derinlik, karbonat yoğunluğu ve flora değişikliklerine göre yedi farklı litotip gösterir (Guo ve Riding,1998). Bu litotipler: 1. Kristalin kabuk tipi travertenler, 2. Çalı tipi travertenler, 3. Kamış tipi travertenler, 4. Breşik travertenler, 5. Sal tipi travertenler, 6. Gaz boşluklu travertenler ve 7. Pizolitik travertenlerdir.

1. Kristalin Kabuk Tipi Travertenler

Kristalin Kabuk Tipi Travertenler yamaç ve diklikler üzerinde yayılımı fazla çökeller halinde oluşur ve akan kaynak sularından hızlı bir çökmeyi yansıtır. Bu terim ilk olarak Guo ve Riding (1992) tarafından kullanılmıştır. Bu tür oluşumlar Pamukkale'nin güncel örneklerinde teras havuzlarının yan duvarlarında görülmektedir. Kristalin Kabuk Tipi Travertenler diğer litotiplere göre sıcak su kaynağına en yakın oluşan travertenlerdir. Genellikle yoğun beyaz, krem renginde ve iri lifsi kristallidir. Bu iri kalsit kristalleri depolanma yüzeylerine dik konumludur. Bu yüzden kaynağın ilk çıkış anında su sıcaklığının fazla olmasından ve içersine fazla yabancı madde karışmadığından dolayı; açık renkli ve organik madde içeriği az veya hiç olmayan travertenlerdir. Diğer traverten litotiplerine göre gözenekliliği daha az, özgül ağırlıkları daha fazla ve basınç dayanımları yüksektir. Kristalin Kabuk Tipi Travertenler yatay, düşey ve çapraz konumlarda olabilirler. Bu da suyun çıkış yönü hakkında belirleyici bir sebeptir. Yanal ve düşey yönde diğer litotiplere geçiş göstermekte olup, geçiş gösterdiği litotipler; Çalı Tipi, Kamış

Tipi, Breşik ve Sal Tipi Travertenlerdir. Çalışma alanı içersinde bulunan ocak işletmelerinin açmış olduğu ocak aynalarında görmek mümkündür. Bu ocaklar ise Kocabaş kasabası içersinde ve Kocabaş (Küçükkuşgölü) mevkiinde'dir. Ocak aynalarında Kristalin Kabuk Tipi Travertenler çatlak duvarına paraleldir. Kısa mesafede kırılmış, parçalanmış olduklarından blok vermezler. Ama küçük atölyeler süs eşyası yapımında kullanabilirler. Ayrıca sırt tipi traverten oluşumunun gözleendiği Keklikli tepe, Kocadüz, Güneyyatak tepelerde çatlak doğrultusuna paralel Kristalin Kabuk Tipi Travertenler yüzeyde görölmektedir.

2. Çalı Tipi Travertenler

Az eğimli yüzeyler boyunca gözlenen ve çalı veya bodur bitki görünümünde olan, az gözenekli ve boşluklu travertenlere çalı tipi travertenler denir. Suda çözünmüş karbondioksit gazının dereceli olarak kaybı da çalı tipi travertenin oluşmasını sağlar. Mikrit/sparit romboederlerinden oluşan bu görünüm diğerlerinden kolaylıkla ayırt edilir. Kalınlıkları birkaç milimetreden birkaç metreye kadar olabilir. Bu travertenler kamış tipi travertenlere geçişli olarak bulunur. Çalı tipi travertenler dokusal özelliklerine göre mikritik dokulu, boşluklu bir yapıdadır. Boşluklar çok düzenli olsada, yer yer düzensiz boşluklarda gösterirler. Bu boşlukların fenestral (kuruma boşlukları) boşluklar olduğu tespit edilmiştir. Bu boşlukların oluşumu; günlük, saatlik olarak su akışının kesilmesi ile ilişkilidir. Çalı tipi travertenler teras havuzlarında oluşmakla beraber çukur alanlarda ve düzlüklerde yaygın olarak bulunur. Bu litotiplerin oluşumunda bakteri alg gibi mikrobiyolojik etkiler yanında abiyotik etkilerde önemli rol oynar (Guo ve Riding, 1998). Çalışma alanı içersine giren ocak işletmelerindeki ocak aynalarında çalı tipi travertenler beyaz, krem, yeşilimsi ve açık kahve renklerindedir. Düşey yönde yer yer breşik ve kamış tipi travertenlerle kesilmektedir. Yanal yönde ise kristalin kabuk tipi travertenlerle geçişlidir. Ocak aynalarında çalı tipi travertenlerin bulunduğu seviyelerde, büyükçe boşluklar oluşmuştur. Bu boşlukların iç kesimleri kristalin kabuk tipi travertenler tarafından sarılmıştır. Boşlukların üst kesimlerinde ise sarkıtlar ve dikitler görölmektedir. Çalı tipi travertenler eğer boşluksuz veya az boşluklu, çatlaksız ve beyaz renkli olurlarsa ekonomik olur ve blok üretimi için aranan traverten türünü oluşturmaktadır.

3. Kamış Tipi Travertenler

Kaynak suları kaynaktan uzaklaştıkça ve yağmur sularının da etkisiyle sıcak su kaynaklarındaki suları seyrelterek suların soğumasını sağlarlar. Bundan dolayı kamış, saz ve iri otlar soğuyan suyun yakın çevresinde gelişmeye başlarlar. Kamış saplarının fazla yoğunlaşması ile su akışı engellenebilir. Kök sistemleri, çökelleri sıkıştırır ve sağlamlaştırır. Bu bitki malzemesi kristalin kabuk malzemesi ile kuşatılır. Böylece boşluklu bir yapı kazanır. Bitki kök ve sapları silindirik bir yapıda olabilir. Kamış kalıplarının ve boşluklarının korunmuş olması, sonuçta bu tip travertenlerin yüksek porozitede olmalarına neden olur. Kocabaş beldesinde bulunan traverten ocağından alınan kamış tipi traverten numuneleri üzerinde yapılan dokusal özelliklere göre koyu renkli, boşluklu, boşlukların bazıları düzensiz, bazıları ise yönlendirilmiştir. İçlerinde bakteriler ve mavi yeşil alglerde bulunmaktadır. Yer yer taneli yapıdadır. Taneler mikritik, etrafları spari kalsitle çevrilmiş durumdadır. İçerisinde mikro kamışlar gözlenmiştir. Bu tip travertenler kapalı bataklığa benzer, küçük dar çukurluklarda oluşur. Kamış tipi travertenler içinde yer yer sal tipi traverten oluşumları da gözlenebilir (Guo ve Riding, 1998). Kamış tipi travertenler çalışma alanındaki ocak işletmelerindeki ocak aynalarında çalı tipi travertenlerle ardalanmalı olarak bulunur. Renkleri açık ve koyu kahverengidir. Bazı kesimlerde ise sal tipi ve kristalin kabuk tipi travertenlerle yanal ve düşey ilişkilidir. Ocak aynasındaki kalınlıkları farklılık gösterir. Boşluk oranının fazla olmasından dolayı ekonomik değildir. İyi blok vermezler. Ayrıca Kocabaş kasabesindeki cezaevinin çevresinde kamış tipi travertenlere rastlanmıştır. Kamış boşluklarının çapı 1 - 4 cm arasındadır. Buradaki kamış tipi travertenler ocak aynasında görülenlerden farklıdır. Bu travertenler bahçe süsü olarak kullanılmaktadırlar. Kocabaş kuzeybatısındaki taş ocağı mevkiinde de kamış tipi traverten oluşumları görülmektedir. Masif olmalarına rağmen boşlukları çok fazladır.

4. Breşik (Litoklastik) Travertenler

Bu tip travertenlere Guo ve Riding (1998) tarafından “Litoklastik traverten” adı verilmiştir. Breşik travertenler, traverten oluşumu ile eş zamanlı, eğimli yüzeyler üzerinde çökelmiş travertenleri aşındırıp, parçalayıp traverten oluşturan sularla daha aşağı noktalara taşınıp yeniden biriktirmeleri ile oluşur. Bu nedenle breşik travertenler yamaçların alt kesimlerinde, çukurlarda ve yarılmanın olduğu kesimlerde depolanarak

oluşmuşlardır. Renkleri genellikle beyazımsı, koyu gri, yeşilimsi ve açık kahverengidir. Çevre travertenlerden koparılmış parçalar ise daha açık renkli olmaktadır. Breşik travertenler toprak oluşum koşullarının etkili olduğu sığ çukurlarda birikir. İçinde killi, siltli matrix içermektedir. Breşik travertenler havuz ve küçük su birikintilerinde oluşmuş açık travertenlerle aralanmalı olarak da bulunmaktadır. Çalışma alanında Kocadüz ve Kocabaş beldesindeki ocak aynalarında havuz ve küçük su birikintilerinde oluşmuş görünümündedir. Yanal yönde çalı tipi travertenler ve kamış tipi travertenler tarafından kesilmiştir. Kocabaş beldesindeki ocak aynasında traverten seviyesinin üst kısımlarında gözlenmiştir. Çalı tipi travertenler üzerine gelmektedir. Ayrıca çalışma alanı kuzey doğusunda Pınarkent kasabasında bölgedeki en iyi gözlendikleri yerdir.

5. Sal Tipi Travertenler

Bu tip travertenler sığ çöküntü alanlarını ve teras havuzlarını dolduran su yüzeylerinde biriken CaCO_3 filminin zaman zaman çökmesi ile oluşur. Bu tip travertenler gevşek (kırılgan) ince kristalin katmanlar şeklindedir. Genellikle kamış ve çalı tipi travertenlerle birlikte yatay konumlu, ince laminalar şeklinde görülür. Bu tip travertenler oluşumları küçük durgun su havzalarının ve teras havuzlarının tabanında CaCO_3 birikimlerini temsil eder. Sal tipi travertenlere litaretürde sıcak su buzu ve Kalsit Buzu gibi isimler verilmiştir. Çalışma alanında ocak aynasında kamış ve çalı tipi travertenlerle aralanmalı olarak bulunmaktadır. Belli kesimlerde breşik travertenler üzerine yatay konumlu olarak gelmektedir. Su çıkışlarının olduğu bazı çatlaklarda kristalin kabuk tipi travertenler tarafından kesintiye uğramışlardır.

6. Gaz Boşluklu Travertenler

Gaz boşluklu travertenler, oluşumları sırasında çökeller arasında bazı gazlar sal laminaları altında hapis kalır. Bu hapis kalan gazların zamanla, basınçla veya diğer etkenlerle kaçması sonucunda oldukça boşluklu bir yapıya sahip travertenler oluşur. Bu tip travertenlere gaz boşluklu travertenler denir. Kamış tipi travertenler ve teras havuzlarında yaygındır. Çalışma alanında Kocadüz mevkiindeki ocak işletmesinde gözlenmektedir.

7. Pizolitik Travertenler

Pizolitik traverten, teras havuzları içersinde oluşurlar. Oluşumları bir çekirdek etrafında bir ya da daha fazla konsantrik halkadan oluşan küresel ya da küresele benzer zarflı karbonat tanelerdir. Oluşumlarında alg faaliyetlerinin rol oynadığı tanelerin içyapısı düzensizdir. Çapları 2 mm'den büyüktür.

3.5.2.1.2. Çalışma alanı travertenlerinin kimyasal özellikleri

Koçan (1999); yapmış olduğu “Kaklık - Kocabaş (Denizli) Kömürcüoğlu traverten sahasının jeolojik ve fiziko - mekanik özelliklerinin incelenmesi” adlı lisans tezlerinde ocaklardan alınan örneklerin kimyasal analiz sonuçları belirlenmiştir. Buna göre, SiO_2 ve Al_2O_3 içermektedir. CO miktarı %55,24, MgO miktarı % 0,23, SO_3 miktarı % 0,0-0,12 arasında, K_2O miktarı % 0,0- 0,05 arasında, kızdırma kaybı değeri de % 42,74 değiştiğini belirlemişlerdir.

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 rezervuar vardır (Çizelge 5.1.).

İnceleme alanında hidrojeolojik açıdan geçirimli birim olarak Paleozoyik mermer, Mesozoyik kireçtaşı, Pliyosen kireçtaşları, alüvyon ve traverten yüzeylenmektedir. Paleozoyik mermer Pamukkale-Karahayit arasında ve Pamukkale termal kaynaklarının kuzeydoğusunda, Mesozoyik kireçtaşı Pamukkale Termal kaynaklarının hemen kuzeyinde yer alan tepelerde, Pliyosen çökeller Pamukkale kaynakları civarında ve Yenice Horstu'nun üst kotlarında Pamukkale - Karahayit arasında gözlenmektedir. Debi ölçümlerine göre, yağışların kaynak akımına etkisi uzun süreli olmaktadır. Her üç araştırmaya göre yıllık olarak kaynakların değişim yüzdesi % 5'den fazla değildir (Günay vd., 1994,1995,1996). Çürüksu Grabenini oluşturan fay hattı boyunca yer alan Jandarma Kaynak Grubu (PJ1, PJ2, PJ3 ve PJ4), Gelin Hamamı, Pamukkale Motel, İnciraltı ve Beltes Kaynağı adı altında toplam 8 adet noktadan boşalan Pamukkale Termal kaynakları ile bu kaynaklarından yaklaşık olarak 200 m daha düşük kotta yer alan ova içinde yer alan Kocagöz, Soğukgöz ve Gözpınarı kaynakları (Ova kaynakları) Pamukkale kaynakları benzer izotopik ve hidrokimyasal özelliklere sahiptir. Arazide yapılan izleme deneylerinden elde edilen sonuca göre, akım yönü güneykuzey doğrultusunda Beltes Kaynağı-Pamukkale Motel Kaynağı-Jandarma Kaynakları (PJ1, PJ2 ve PJ3) hattını izlemekte ancak daha sonra takip edilememektedir. Boya deneyi sırasında PJ3 noktasından enjekte edilen boya PJ1 ve PJ2 çıkışlarından gözlenmiş ancak PJ4 noktasından gözlenememiştir (Günay vd.,1995,Yeşener vd., 1997). Ayrıca PJ4 noktasında 1995 yılında gerçekleştirilen pompa deneyi sırasında 85 lt/s sabit debi ile 24 saat çekim yapılmıştır ve 5 cm düşüm meydana gelmiştir ancak PJ1, PJ2 ve PJ3 boşalım noktaları ile bu boşalım noktalarına en yakın olan Pamukkale Motel Kaynağında bir düşüm gözlenmemiştir (Günay vd., 1994). PJ1, PJ2 ve PJ3 hattı ile PJ4 kaynağında yüzeylenen yeraltısularının, Pamukkale ve Develi köyleri arasında bulunan doğu - batı doğrultulu bir

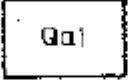
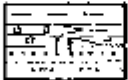
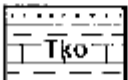
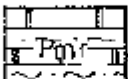
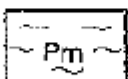
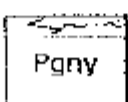
fay ile doğu yönünde ovaya doğru akışa geçip Gözpınarı, Soğukgöz ve Kocagöz kaynaklarından boşalırma geçtiği düşünölmektedir.

I. Rezervuar kayacı: Pliyosen birimleri içinde Sazak formasyonu birinci rezervuar kayacını oluşturmaktadır. Ancak Sazak formasyonunun yanal fasiyes değışiklikleri rezervuar niteliği devamlılığını kısıtlamaktadır. Birimdeki kireçtaşlarının kalınlıkları değışmekte, 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 değışmektedir.

II. Rezervuar kayacı: Menderes metamorfizmlerinden İğdecik formasyonunun mermer – kuvarsit - şist aralanması ikinci rezervuar kayacı oluşturmaktadır. Birinci rezervuar kayaca oranla daha fazla ikincil geçirimsizlik ve gözeneklilik görölmektedir. 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 değışmektedir.

III. Rezervuar kayacı: Kızıldere jeotermal alanında ilk rezervuar kaya bulunduğundan sonra bazı bölümlerin rezervuar kaya özelliğini kaybettiği görölünce 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 aralanmasının altında kalın ve geçirimsiz mikaşistler yer almaktadır. Genel istifeye 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).

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

Şekil 5. 1. Çalışma alanındaki kayaç birimlerinin hidrojeolojik özellikleri (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 ayırtmandır. 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.

5.2. Hidrojeokimya

Çalışma alanının hidrojeokimyasal özelliklerini anlamak için, alanda bulunan farklı kaynaklardan toplam alanı temsil eden 3 adet su örneği alınmıştır. Su örneklerinin alınmasından önce, bölgede her lokasyonda in - situ ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5. 1. İn - Situ cihazları ve özellikleri.

In - situ Parametreleri	Ölçüm Birimleri	Cihaz Adı ve Marka
Sıcaklık	°C	Thermometer- Testo-95-1
Ph		pH meter-WTW 330İ
Redoks Potansiyeli (Eh)	Mv	pH meter-WTW 95
Elektriksel İletkenlik (EC)	µs/cm	Elektrical conductivity measure-WTW cond 330i and 340i
Çözülmüş Oksijen (O ₂)	Mg/l	Oximeter-WTW Oxi 340
Alkalinite	mmol/l	Alkalinity Test kit-Merek Aquamerck 11109

Ölçümler için kullanılan in - situ cihazları (Çizelge 5.2), Jeoser Yer Bilimleri Servisi Ltd. Şti. Isparta tarafından sağlanmıştır. Ölçülen in - situ parametreleri sıcaklık, pH, redoks potansiyeli (Eh), çözülmüş oksijen (O_2), elektriksel iletkenlik (EC) ve alkalinite olmaktadır. 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 5.1.'de sunulmaktadır.



Şekil 5. 2. Çalışma alanında gerçekleştirilen in - situ ölçümleri (Hierapolis).

5.2.1. Hidrojeokimyasal analizler

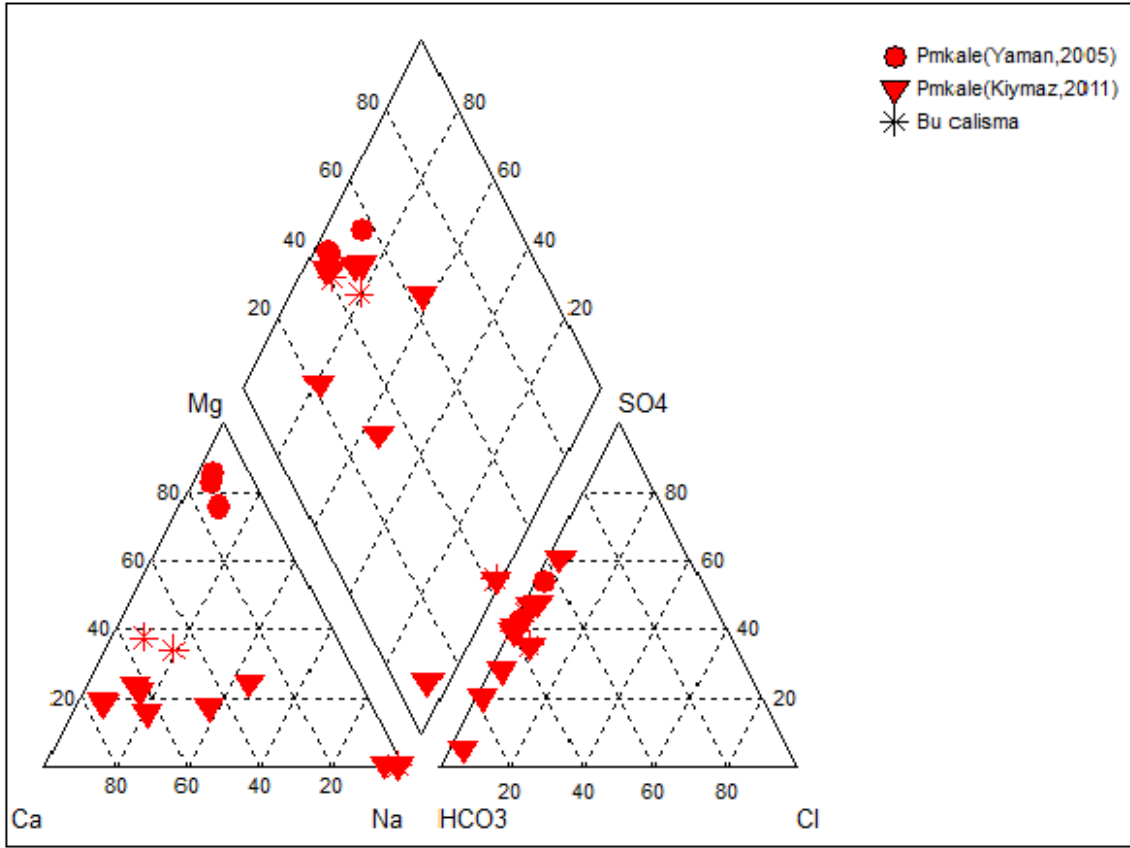
Pamukkale ve yakın çevresinden alınan su örneklerinin hidrojeokimyasal analiz sonuçları AQUACHEM v.3.7 (Waterloo Hidro., 1999) ve Liquid analysis spreadsheet (Powell ve Cumming, 2010) kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 5.1.). Aynı şekilde, Pamukkale ve yakın çevresi jeotermal sularını tanımlamak ve grafiksel olarak gösterebilmek için Piper ve üçgen diyagramları hazırlanmıştır. Piper diyagramına göre (Şekil 5.1.), Pamukkale ve yakın çevresi jeotermal suları Na-SO₄-HCO₃ tipi sular olarak adlandırılabilir (Çizelge 5.5.). Hidrojeokimyasal analizler için kullanılan cihazlar ve hidrojeokimyasal parametreler Çizelge 5.3.'de verilmiştir.

Çizelge 5. 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

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

Sıra no	Örnek no	Konum	Sıcaklık (°C)	Ph	Eh (Mv)	Ec (µs/cm)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ⁺² (mg/l)	Mg ⁺² (mg/l)	B ⁺³ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻² (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Si (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ⁻² (mg/l)	δ ¹⁸ O (% SMOW)	δ ² H (% SMOW)	³ H (% SMOW)	Bu Çalışma
1	DK-1	Pamukkale Kaynak	35	6.56	259.9	2430	44.2	5.45	99.4	401	1	0.8	649	13	15.8	1.56	1098					
2	DK-2	Plütonyum Kaynak	35.1	6.44	282.1	2400	40.1	5.08	95.4	479	0.9	1.8	642	14.1	15.2	1.88	1079.7					
3	DK-3	Karahayıt	46.6	6.52	63	2680	107	21.1	124	414	1.6	2.2	905	31.8	26.8	0.65	927.2					Kıymaz, (2011)
4	AB-1	Pamukkale Özel İdare Kaynak	35	6.22	210	2410	48.85	15.55	455.05	69.9	0.71	1.35	624.89	12.29	19.19	0.51	1128.5		-9.14	-61	3.3	
5	AB-2	Pamukkale Jandarma Kaynak	33	6.24	229	2420	42.95	3.1	449.9	71.25	0.46	1.39	611.95	12.64	19.12	0.58	1159		-9.23			
6	AB-3	Karahayıt Kaynak	52	6.39	113	2790	131.65	21.8	528.5	123.15	0.96	1.88	872.37	27.23	28.94	0.01	1189.5		-8.56	-57.3		
7	AB-4	Karahayıt Richmond Otel	48	6.18	161	2810	124.3	17.25	440.75	95.3	1.6	2.21	879.72	51.61	21.32	0.05	1128.5					
8	AB-5	Karahayıt Soğuk Su (Kutluca köyü)	23.9	8.01	287	448	86.4	0.65	3.77	0.48	0.22	0.34	11.12	5.57	5.1	13.53	231.8					
9	AB-6	Gölemmezli Sondaj 1	67	6.89	194	2420	247.7	52.2	148.75	72	3.4	0.99	377.78	31.41	29.92	<0.01	1159					
10	AB-7	Gölemmezli Sondaj 2	69	6.69	144	3470	207.85	42.95	555.5	84.25	2.99	1.2	431.94	27.44	24.31	<0.01	2074					Yaman, (2005)
11	AB-8	Gölemmezli Hamam	59	6.28	253	4460	431.6	45.05	464.15	109.5	5.74	2.45	1664.2	70.84	59.03	<0.01	1250.5		-8.32			
12	D-23	Kızıldere /KD15	95.5	9.67	-362	6450	1451	184.3	11.5	<5	26.35	20.52	882	140	200	1	1800.1	694				
13	D-24	Kızıldere /KD21	96.2	8.92	-355	6350	1431.4	175.9	12	<5	24.05	21.2	721	112	175	1	1464.5	1014				
14	D-27	Havuz Pamukkale (Özel İdare)	35	6.22	152	2350	68.6	7.5	350.27	150	0.72	1.48	630	15		1	1177.7	0				
15	D-29	KarahayıtPamukkale	51.9	6.54	-19	2880	176.5	33.5	377.1	167	1.06	2.8	889	29	6	1	1348.5	0				Yaman, (2005)



Şekil 5. 3. Çalışma alanında bulunan jeotermal suların Piper diyagramında gösterilmesi.

Çizelge 5. 4. İnceleme alanındaki örneklerin su tipleri.

Örnek no	LOKASYON	SU TİPİ
DK-1	Pamukkale Kaynak	Mg-HCO ₃ -SO ₄
DK-2	Plütonyum Kaynak	Mg-HCO ₃ -SO ₄
DK-3	Karahayıt	Mg-SO ₄ -HCO ₃
AB-1	Pamukkale Özel İdare Kaynak	Ca-HCO ₃ -SO ₄
AB-2	Pamukkale Jandarma Kaynak	Ca-HCO ₃ -SO ₄
AB-3	Karahayıt kKaynak	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
AB-4	Karahayıt Richmond Otel	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
AB-5	Karahayıt Soğuk Su(Kutluca köyü)	Na-HCO ₃
AB-6	Gölemezli Sondaj 1	Na-Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
AB-7	Gölemezli Sondaj 2	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
AB-8	Gölemezli Hamam	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
D-23	Kızıldere /KD15	Na-HCO ₃ -CO ₃ -SO ₄
D-24	Kızıldere /KD21	Na-CO ₃ -HCO ₃ -SO ₄
D-27	Havuz Pamukkale(Özel İdare)	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
D-29	Karahayıt (Pamukkale)	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄

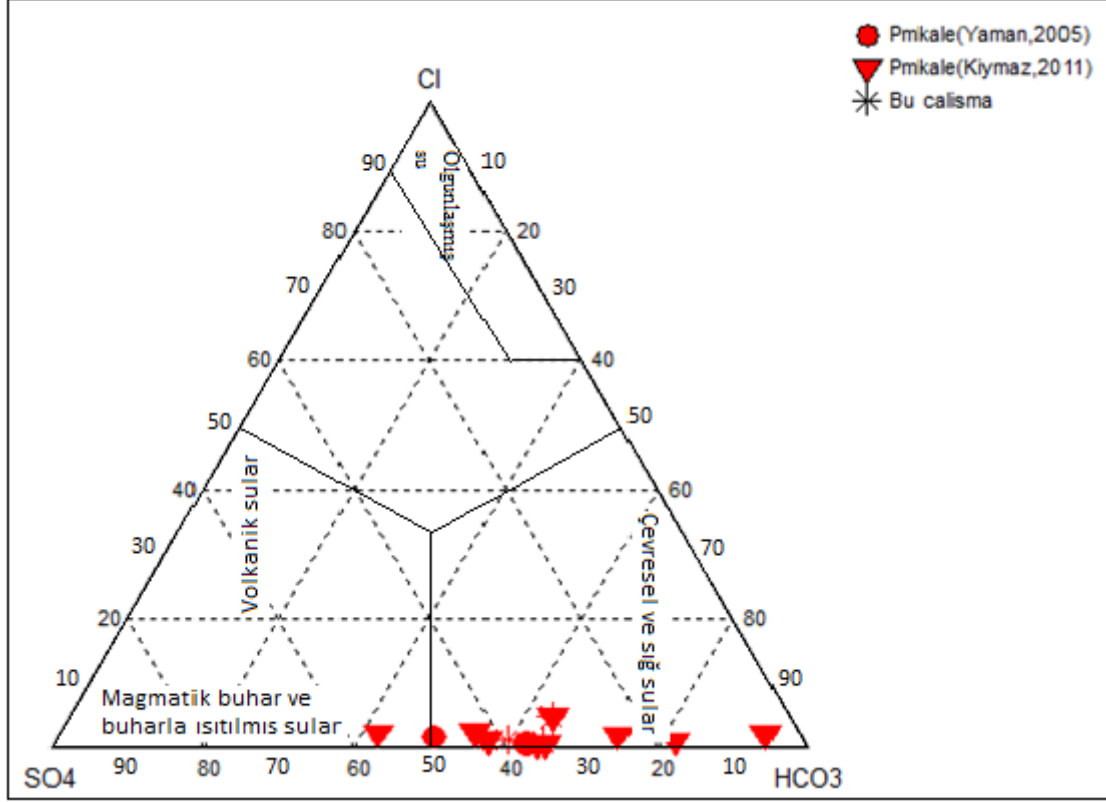
Çalışma alanına ait örneklerin Aquachem programı yardımı ile yapılan Piper diyagramı Şekil 5.1.'de gösterilmektedir. Yapılan bu çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına göre Denizli Pamukkale Jeotermal sıcak su tipleri Çizelge 5.5.'de yer almaktadır. Piper diyagramı iyonların topluca bir diyagramda görüntüleme kolaylığı açısından hidrojeolojide oldukça sık kullanılan diyagramlardan biridir. Piper diyagramı anyon ve katyonların (% mek/1 cinsinden) ayrı ayrı gösterildiği iki ayrı üçgenden ve tüm iyonların ortaklaşa gösterildiği bir dikdörtgenden oluşmaktadır. Üçgen diyagramlar suların fasiyes tiplerinin görülmesinde, dikdörtgen ise suların sınıflamasında ve karşılaştırılmasında kolaylık sağlamaktadır (Güneş, 2006).

Majör anyonlar $Cl-SO_4-HCO_3$ baz alındığında bu üçgen diyagramı jeotermal suları sınıflandırmak için kullanılmaktadır. Bu olgunlaşmamış kararsız suların ayırt edilmesine yardımcı olur. Bu çalışma alanında bulunan duraysız suları ayırtlamaya yarar ve burada bulunan suların karışım ilişkileri ile ilgili belirteçleri verir.

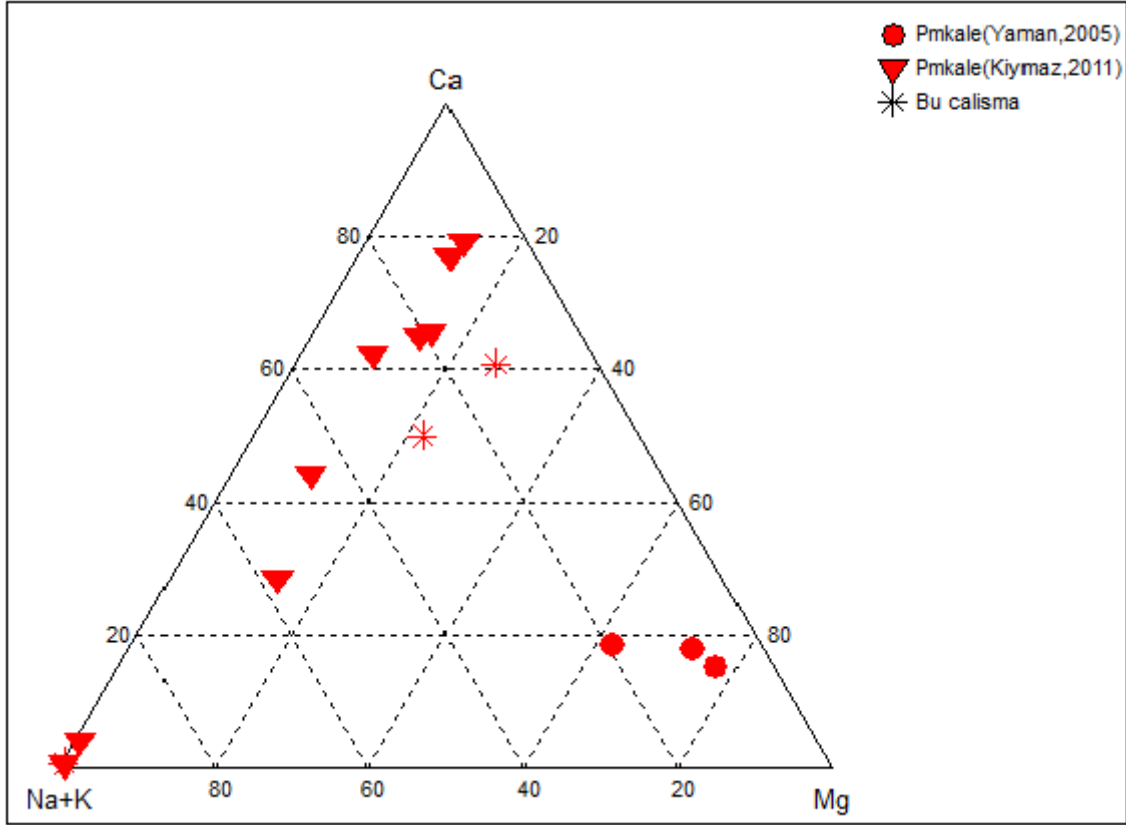
Piper üçgen diyagramına göre inceleme alanındaki sıcak suların büyük bir kısmının sodyum, sülfat ve bikarbonatlı su tipini yansıttıkları görülmektedir. Diğer sıcak sular ise sodyum, kalsiyum, sülfat ve bikarbonatlı sulardır. Piper sınıflamasında yöredeki sodyum sülfatlı sular karbonat olmayan alkalinitesi %50'den fazla olan alana düşmektedir. 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 kayaçların oluşturduğu akiferlerden alınan sıcak sular ise soğuk yer altı suları ile belli oranlarda karışmaları nedeniyle seyreltik

bikarbonatlı sular olarak gözlenmektedirler. Analiz sonuçlarına göre suların rezervuar kayacının karbonat tür bir kayaç olduğunu yansıtmaktadır. Nitekim Denizli Pamukkale yöresinde metamorfik kayalardan mermerler jeotermal kaynak sularına rezervuar ödevini görmektedir.



Şekil 5. 4. Pamukkale ve çevresi jeotermal sularının Cl-SO4-HCO3 üçgen diyagramı.



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

Çalışma alanı jeotermal suları için hazırlanan Ca-Na+K-Mg üçgen diyagramı (Şekil 5.4.) şekilde Pamukkale örneklerinden DK-2 (Plütonyum Kaynak) Na+K yönelmesi Na+K kanyonlarının baskın kanyon olduğunu göstermektedir. Bu durum olasıdır, çünkü artan sıcaklıklarda Na^+ değeri artmakta ve buna karşın ise Ca^{+2} ve Mg^{+2} içeriği azalmaktadır. Pamukkale örneklerinden DK-1 ve DK-3 (Pamukkale Kaynak) Ca^{+2} yönelimi söz konusudur, bunun sebebi ise bölgedeki kalsit içeren karbonat kayaçlarıyla etkileşime girmiş olmasıdır. 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. Alınan örneklerdeki suların kullanılabilirliği ve içilebilirliği açısından özellikleri SAR oranları yardımıyla hesaplanmış ve kullanılabilirliği belirlenmiştir.

5.2.2. Doygunluk indeksi

Farklı kullanım alanlarıyla insanlığa hizmet eden termal suların bir yerden bir yere taşınması sırasında kabuklaşma ya da korozyon gibi çok önemli sorunlar yaşanabilmektedir. Bu sorunların yaşanmasında suyun mineral doygunluğu, çökme ve çözülme özellikleri büyük ölçüde etkindir. Genellikle çökel ürün 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 çökeltici 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 aktarılarak mineral sıcaklık denge diyagramı oluşturulmuştur.

Çizelge 5. 5. Çalışma alanındaki örneklerde rastlanabilecek bazı minerallerin doygunluk indeksi

Mineraller	DK-1	DK-2	DK-3	AB-8	D-23	D-24	D-27	D-29
Anhidrit	-1.4	-1.47	-1.14	-0.2	-1.93	-1.83	-0.79	-0.57
Aragonit	-0.18	-0.34	-0.07	0.43	1.3	0	0.06	0.63
Florit	-1.81	-1.18	-1	-0.33	-0.65	-0.56	-0.55	-0.21
Kalsit	-0.05	0.2	0.06	0.55	1.4	1.35	0.2	0.76
Kalsedon	0.2	0.18	0.31	0.53	0.01	0.43		-0.39
Dolomit	0.95	0.74	1.12	0.88	2.72	2.66	0.46	1.64
Jips	-1.23	-1.3	-1.04	-0.21	-2.34	-2.25	-0.62	-0.51
SiO ₂ (a)	-0.61	-0.62	-0.46	-0.2	-0.64	-0.21		-1.15
Sepiyolit	-3.42	-3.79	-2.69	-3.9	6.29	4.91		-5.33

Bu çalışma alanındaki sular doygunluk indekslerine göre incelendiğinde; DK -1 (Pamukkale Kaynak) örneğinde kalsedon ve dolomit haricindeki minerallerin doygunluğa ulaşamadığı gözleniyor. DK -2 (Plütonyum Kaynak) örneğinde ise kalsit, kalsedon ve dolomit dışındaki minerallerin doygunluğa ulaşamadığı görülmektedir. Ve DK -3 (Karahayıt-Pamukkale) örneğinde de yine aynı şekilde kalsit, kasedon ve dolomit doygunluğa ulaşabilmişken anhidrit, aragonit, florit, jips, kuvars ve sepiyolit minerallerinin doygunluğa ulaşamadığı gözlenmektedir. Çalışma alanının geneline bakıldığında kalsit, kalsedon ve dolomit mineralleri doymun olup, Kızıldere ve Karahayıt örneklerine bakıldığında ise genel olarak aragonit, kalsit, kalsedon ve dolomit minerallerinin doygunluk seviyesine ulaşabildiği görülmüştür.

5.3. Jeokimyasal Termometre Uygulamaları

Termal sular yer altında farklı sıcaklık ve basınç koşulların 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. 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.)

5.3.1.1. Silis jeotermometreleri

Silis jeotermometreleri, silisin su içerisindeki çözünürlüğüne bağlı jeotermometrelerdir (Çizelge 5.7.). 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 kayaktan yüzeye doğru hareket eden sıcak akışkanda 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).

Çizelge 5. 6. 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 (Kuvars)	$t=1309 / (5.19-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, 1977
6	SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1522 / (5.75-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, 1977
7	SiO ₂ (Kuvars kond.soğ.)	$t=1112 / (4.91-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., 1983
8	SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1264 / (5.31-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., 1983
9	SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1021 / (4.69-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., 1983
10	SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1164 / (4.9-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., 1983
11	SiO ₂ (Kuvars buhar kaybı)	$t=1498 / (5.7-\log \text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., 1983

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 çökelimi gözlenir. Bu nedenle sıcaklığı 225°C'nin üzerindeki rezervuarlardan 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.

5.3.1.2. Katyon jeotermometreleri

Bir çözeltideki iyonların başka iyonlarla yer değiştirmesinden yola çıkarak oluşturulmuş jeotermometrelerdir. 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. Katyon jeotermometreleri, belirli çözünmüş elementlerin oranlarını sabitleyen sıcaklık bağımlı değişik reaksiyonlarını esas almaktadır. Oluşum birlikteliği gösteren alkali feldispatlar arasındaki Na ve K değişimi katyon jeotermometrelerinin esas alındığı temel için verilebilecek en güzel örnektir.

Na/K jeotermometreleri suda fazla miktarda Ca iyonu bulunuyorsa, rezervuar sıcaklığı hesaplamalarında yüksek değerler verir. Na/K jeotermometrelerinin uygulanacağı sıcak suların pH değeri nötre yakın veya hafif alkali, karbonat çökelmelerinin oluşmaması, $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}})$ değerinin 0.5'den az olması koşulları aranmalıdır. Na/K jeotermometreleri, nötr ve alkali, alkali klorürlü, 180 - 350°C sıcaklıktaki rezervuardan gelen sularda iyi sonuçlar vermektedir (Özen, 2002).

Na-K-Ca jeotermometrelerinde Ca/Na (mol/l) oranının birden büyük olduğu durumlarda Na/K jeotermometre bağıntıları, rezervuar sıcaklığı hesaplamalarında 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 $\log (\sqrt{\text{Ca/Na}})$ değeri (-) ise $\beta=1/3$, (+) ise $\beta=4/3$ olarak bağıntıya konur. Ayrıca $\beta=4/3$ olarak hesaplanan rezervuar sıcaklığı 100°C'den fazla ise $\beta=1/3$ alınarak rezervuar sıcaklığı tekrar hesaplanabilir.

Çizelge 5. 7. Na/K jeotermometreleri ve bağıntıları (Tüm derişimler mg/l).

No	Na/K Jeotermometreleri	Jeotermometre Bağıntıları	Değinen Belgeler
1	Na/K	$t=933 / (0.933+\log \text{Na/K})-273.15$	Arnosson vd., 1983
2	Na/K	$t=1319 / (1.699+\log \text{Na/K})-273.15$	Arnosson vd., 1983
3	Na/K	$t=777 / (0.70+\log \text{Na/K})-273.15$	Arnosson 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	$t=4410 / (13.95-K^2/\text{Mg})-273.15$	Giggenbach vd., 1983
10	Li/Mg	$t=2200 / (5.470-\log(\text{Li/Mg}0.5))-273.15$	Kharaka ve Michard, 1981
11	Na/Li	$t=1590 / (0.779+\log(\text{Na/Li}))-273.15$	Kharaka vd., 1982
12	Na/Li (mmol)Cl<0.03	$t=1000 / (0.389+(\text{Na/Li}))-273.15$	Fouillac ve Michard, 1981
13	Na/Li (mmol) Cl>0.03	$t=1195 / (0.130+\log(\text{Na/Li}0.5))-273.15$	Fouillac ve Michard, 1982
14	Na/Ca	$t=1096.7 / (3.08-\log(\text{Na/Ca}0.5))-273.15$	Tonani, 1980
15	K/Ca	$t=1930 / (3.861-\log(\text{K/Ca}0.5))-273.15$	Tonani, 1980

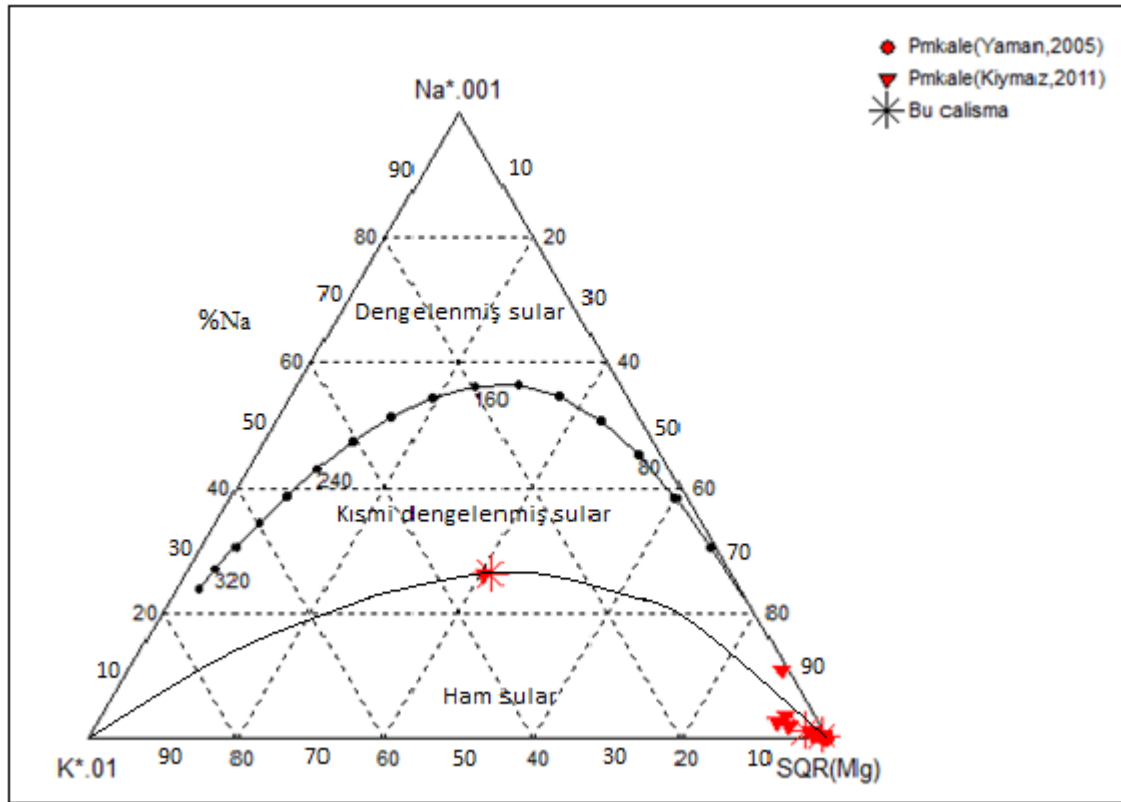
5.3.2. Birleşik jeotermometreleri uygulamaları

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.

Gigenbach (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' in 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 - kaya 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.

$$\text{Olgunluk İndeksi (MI)} = [0.315 \log (K2/Mg)] - [\log (K/Na)] \text{ (Giggenbach, 1998)}$$



Çizelge 5. 8. İnceleme alanındaki suların Na – K - Mg diyagramındaki görünümü ve su - kayaç denge sıcaklıkları (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. Pamukkale jeotermal alanından gelen su örneklerinden DK - 1 (Pamukkale) ve DK - 2 (Plütonyum Kaynak) “Ham Sular” sınıfına düşmektedir. DK - 3 (Karahayıt-Pamukkale) “Kısmi Dengelenmiş Sular”, alanlarına düşmektedir (Şekil 5.5.).

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.

5.3.3. Çalışma alanındaki jeotermometrelerin jeokimyasal değerlendirilmesi

Çalışma alanındaki rezervuar sıcaklığını anlamak için çalışma alanı jeotermal sularının hidrojeokimyasal analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Silis jeotermometreleri ile yapılan analiz sonuçlarına göre Pamukkale Kaynağı (DK - 1) - 32 - 88°C, Plütonyum Kaynak (DK - 2) - 33 - 86°C, Karahayıt (DK - 3) - 12 - 109°C, arasında sıcaklıklar hesaplanmıştır. Değerlendirmeye alınan diğer örnek noktalarında ise Kızıldere Sahası için 98 ile 207°C, Pamukkale örneklerinde - 62 ile 88°C arasında sıcaklıklar gözlenmiştir.

Na/K jeotermometrelerinden elde edilen akifer sıcaklıkları suların karışım oranlarına, su - mineral denge durumuna göre Pamukkale bölgesinde 90 - 261°C arasında sıcaklıklar ölçülmüştür. Değerlendirmeye alınan diğer noktalarda ise Kızıldere sahasında 10 - 262°C, Karahayıt örneklerinde 51 - 242°C arasında değerler ölçülmüştür. Karahayıt ve Pamukkale sahalarında daha yüksek sıcaklıklar ölçülmüş ve buradaki değerlerinde birbirlerine yakın oldukları gözlenmektedir.

Çizelge 5. 9. Çalışma alanındaki termal suların çözünen jeotermometresine göre sonuçlar.

Örnek no	Örnekleme Sıcaklığı °C	Amorphous Silica	Cristobalite Alpha	Cristobalite Beta	Chalcedony	Quartz	Quartz Steam Loss	K/Mg Giggensbach 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 Fournier 1979	
DK-1	35	-32	35	-11	54	85	88	90	210	212	259	236	155		Bu Çalışma Alanı
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		
AB-8	59	25	101	52	126	151	145	51	189	192	242	221	172	63	Kıymaz,(2011)
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							74	195	198	246	225	146	30	
D-29	51.9	-62	0	-43	15	48	55	58	273	269	308	279	190	30	

5.4. İzotop Jeokimyasal Özellikler

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 5.4.'de verilmiştir. Bu verilere göre yeraltı suyunun dolaşım sistemi ve hidrojeolojik özellikleri aydınlatılmaya çalışılmıştır.

Duraylı izotop analiz sonuçları ve örnekleme sırasında ölçülen fiziksel ve kimyasal parametrelere ilişkin bilgiler Çizelge 4.4.' te verilmiştir. Tabloda 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 tritiyum içerikleri 0,7 ile 3,3 TU arasındadır.

Hidrojen atomunun 1 proton ve 2 nötronlu izotopu olan tritiyum radyoaktif bir izotop olup; yarılanma ömrü 12,43 yıldır. Tritiyum izotopu çekirdekten elektron (P ışını) salınması ile yarılanır. Elektronların enerjisi düşük olup; doğal düzeydeki tritiyum derişimi insanlar için sağlık riski oluşturmaz. Duraylı izotoplardakinden farklı olarak tritiyum izotop miktarı bir derişim birimi olan TU (tritium unit: tritium birimi) ile ifade edilir, 1 TU, 1018 hidrojen atomundan birisinin H olduğunu ifade etmektedir. Atmosferik nemdeki tritiyumun doğal ve antropojenik olmak üzere başlıca iki kaynağı vardır. Doğal tritiyum 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 1 O TU 'dır. 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 1.000 TU düzeyine ulaşmış olup; 1963 yılından günümüze değin doğal yarılanma yoluyla azalmıştır. Günümüz atmosferik neminde trityum derişimi doğal fon (natural background) değerine (1 O 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).

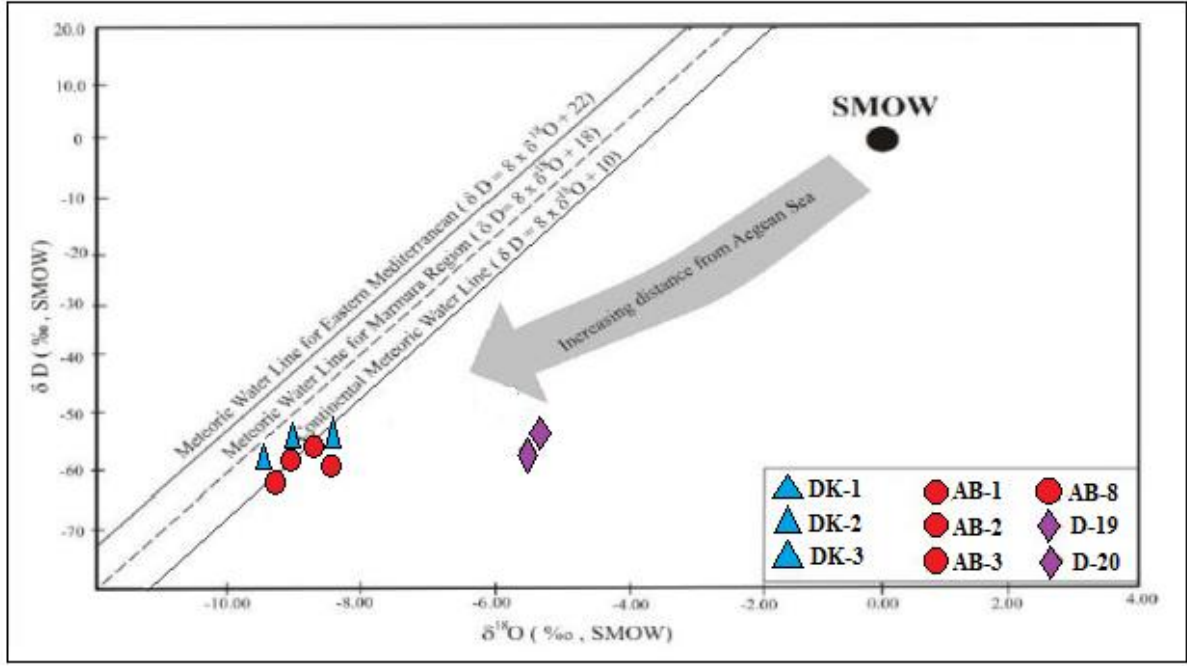
Bu çalışmada global meteorik su doğrusu, Marmara meteorik su doğrusu, Akdeniz meteorik su doğrusu kullanılmıştır. Su doğrularının denklemleri ve referansları aşağıdaki gibidir.

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; $\delta d = 8 \cdot \delta^{18}O + 18$ (SMOW)

İnceleme alanı içerisinde yeralan izotop analizi yapılmış sular grafiğe aktarılmıştır. Buna göre inceleme alanının yakınında bulunan Gölemezli ve Karahayıt - Pamukkale jeotermal alanlarıdaki sular meteorik kökenlidir. Alanda su kayaç etkileşiminin Gölemezli ve Karahayıt - Pamukkale jeotermal alanlarındaki termal sulardan uzun sürmesine ve farklı özellikte olmasına bağlı olarak $\delta^{18}O$ 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.



Şekil 5. 6. Pamukkale ve yakın çevresi jeotermal sularında δD ve $\delta^{18}O$ izotopu ilişkisi (DK - 1, DK-2, DK-3 Karahayıt; AB-1, AB-2, AB-3, AB-8 Gölemezli; D-19, D-20 Kızıldere)

5.5. Pamukkale Yöresi Jeotermal Suların Hidrojeolojik Modellemesi

Pamukkale ve yakın çevresi yaklaşık olarak 18 km² olan bir alandan oluşmaktadır ve jeolojik olarak alanda Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalar Pliyosen yaşlı sedimanter kayalar bulunmaktadır. Kayalar içinde jeotermal rezervuarlarının oluşumu için az geçirimli örtü kayalarının 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.

1) Sazak Formasyonunda bulunan kireçtaşlarının oluşturduğu jeotermal rezervuar: Bu rezervuarda Pliyosen yaşlı Tosunlar Formasyonu ve Kolonkaya Formasyonu geçirimsiz örtü kayaları oluşturmaktadır. Sazak Formasyonu içinde Alt Pliyosen yaşlı geçirimli kireçtaşları ilk rezervuarı oluşturmaktadır. Ve Alt Pliyosen yaşlı Kızılburun Formasyonunda geçirimsiz taban kayalarını oluşturur. Burada Sazak Formasyonuna ait kireçtaşlarında bulunan

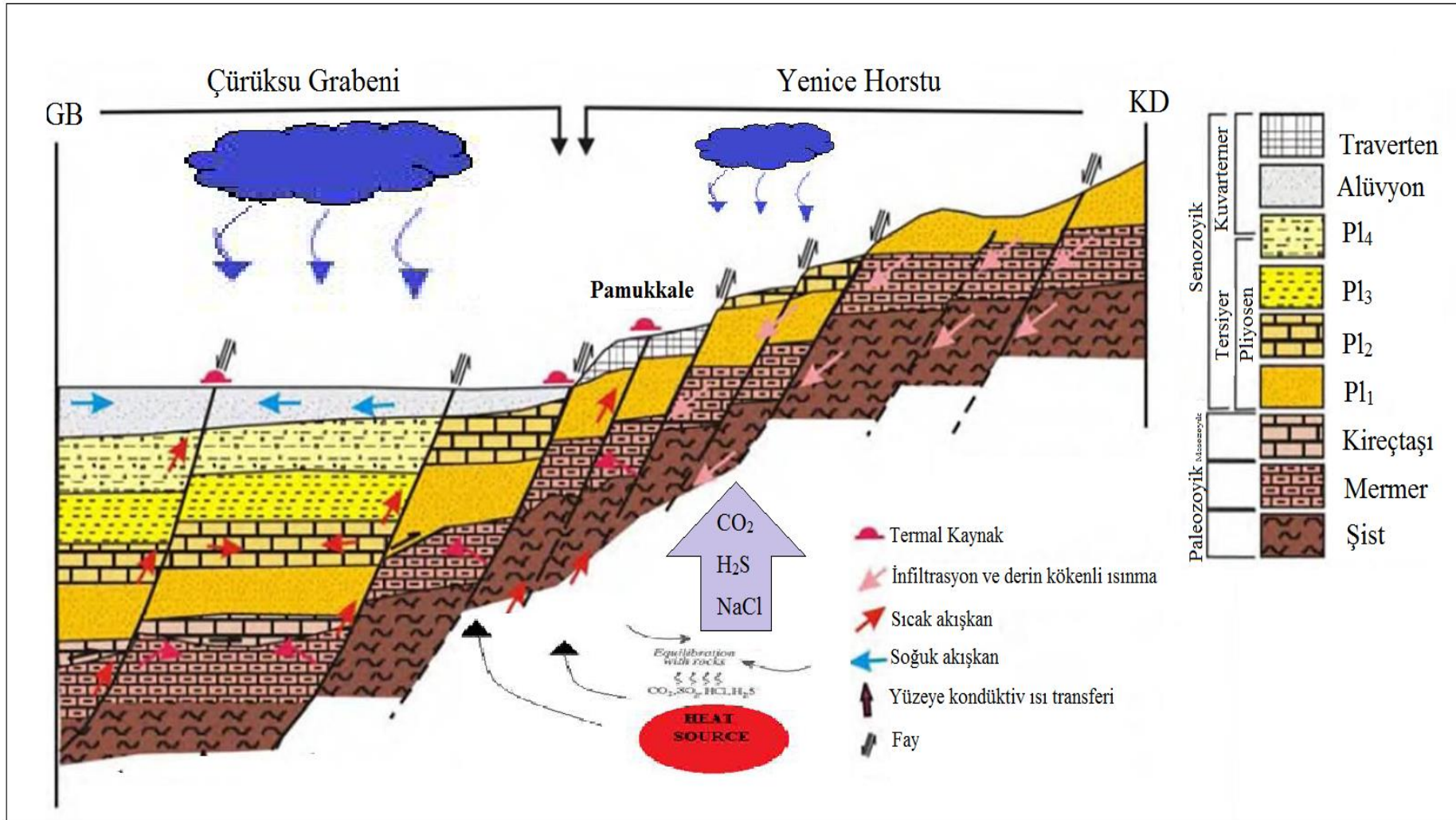
jeotermal su rezervuarı yaklaşık 800 m derinde bulunmaktadır ve 400 m kalınlık 150 - 198°C değişen sıcaklık göstermektedir.

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 oldukęa iyi gelişmiş çatlak sistemi bulunmaktadır. Burada sıcak su rezervuarı 1.700 - 2.000 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 kayaç olarak değerlendirilebilirler.

4) Pamukkale çalışma alanında meteorik sular yeryüzünden aşağıya doğru süzülürler. Bunlar 3.000 - 5.000 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 ortaç volkanik kayaçlar 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 kayaçlarla yoğun etkileşimi söz konusudur. Bu etkileşim esnasında CO₂, SO₂, HCl, H₂S, HB, HF ve HE gibi uçucu bileşenler magmadan ayrılarak gaz fazında jeotermal sulara ulaşmaktadır. Burada alterasyona uğrayan kayaçlar gazlar ve sirkülasyon yapan sular arasında dengelenme olayları meydana gelmektedir. Daha sonra yukarıya doğru hareket eden sular CO₂, H₂S ve NaCl gibi bileşimler iştiva etmektedir. 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. 7. Pamukkale jeotermal sisteminin basitleştirilmiş hidrojeolojik oluşum modeli (Özgür, 1998'den uyarlanmıştır).

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

6.1. Pamukkale jeotermal alanında olası ısı kaynağı, jeotermal sistem ve tektonik arasındaki ilişki

- ▶ 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 kadar ulaşır.
- ▶ Menderes Masifi'nin ortaya çıkması Neojen döneminde birbiri ardına meydana gelen faylar boyunca oluşmuştur.
- ▶ Güncel çalışmalar, Menderes Masifi'nin iki veya daha fazla oluşum süreci yaşadığını göstermektedir
- ▶ Menderes Masifi metamorfik kayaçlarının yükselmesini ve böylece ortaya çıkışını graben gerilme tektoniği ve trans-gerilmeli fay sistemlerinin bir sonucu olarak yorumlamaktadır.
- ▶ Menderes masifi içindeki litostratigrafik birimler; Pan-Afrikan temeldeki çekirdek serisi ve 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” gözlü gnayslar, metagranitler, yüksek dereceli şistler, paragnayslar ve eklojit kalıntıları içeren metagabrolardan oluşur.
- ▶ Masifin çekirdeğinde en fazla egemen olan ve en fazla yayılıma sahip litolojiyi oluşturan gözlü gnayslardır.
- ▶ Pamukkale (Denizli) jeotermal alanı, Batı Anadolu Bölgesinin Denizli ilinin Büyük Menderes Graben sistemi içinde ülkemizin en önemli alanlarından biridir. Araştırma alanı, Büyük Menderes Grabeninin GD kısmında bulunmaktadır.
- ▶ Denizli Pamukkale sıcak su kaynakları bölgede yer alan horst-graben dokanaklarında oluşan fay ve kırık sistemleriyle yakından alakalıdır.

6.2. Çalışma alanının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop 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 rezervuar vardır. Bu rezervuarlar Sazak ve İğdecik Formasyonlarında bulunmaktadır.
- Kızılburun, Kolonkaya ve Tosunlar formasyonları da çalışma alanında geçirimsiz temel ve örtü kayaçları oluşturmaktadır.
- Pamukkale ve yakın çevresi jeotermal suları $Ca > Na + K > Na$ baskın katyonlar ve $HCO_3 > SO_4 > Cl$ baskın anyonlar olarak sınıflandırılabilir.
- Majör anyonlar $Cl-SO_4-HCO_3$ baz alındığında (Giggenbach, 1998), bu üçgen diyagramı jeotermal suları sınıflandırmak için kullanılır.
- Diğer sıcak sular ise Na, Ca, SO_4 ve HCO_3 sularıdır. Sıcak ve mineralli suların diğer bir sınıflaması da başlıca anyonlara göre (Cl , HCO_3 , SO_4) yapılabilmektedir.
- Çalışma bölgesindeki sular doygunluk indekslerine göre incelendiğinde Pamukkale Kaynak, Plütonyum Kaynak ve Karahayıt (Pamukkale) Kaynak mineral doygunluk indeksleri dikkate alındığında birbirlerine yakınlık göstermektedirler.
- Yapılan bu çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına göre Denizli Karahayıt Jeotermal sıcak su kaynakları; $Mg-HCO_3-SO_4$, $Mg-HCO_3-SO_4$, $Mg-SO_4-HCO_3$ su tipleri içerisinde yer almaktadır.
- Pamukkale ve yöresi jeotermal sularının kökenlerinin izotop çalışmaları dikkate alındığında meteorik kökenli sular oldukları ortaya çıkmaktadır.
- Tabanda yer alan magmatik kayaçlardan Denizli volkanitleri ise ısıtıcı kayaç ödevini görmektedir.
- Isınan sular konveksiyon akımlarla yukarıya yükselerek karbonatlı kayaçlardan mermerler içerisinde depolanmaktadır
- Jeotermal sular 56,3 ile 95°C arasında değişen yüzey sıcaklıklarına sahiptir.
- Sülfat içeriğinin fazlalığı Sazak formasyonunun evaporitik ortam ürünü olan jipsli seviyelerinden kaynaklanmaktadır.
- Denizli İli Pamukkale yöresinde bulunan jeotermal kaynakların sıcaklıkları itibarıyla en uygun kullanım alanı sağlık turizmidir.

KAYNAKLAR

- Agostini, S., Tokcaer, M., Yılmaz Savaşçın, M., 2010. Volcanic rocks from Foça-Karaburun and Ayvalık İsvçes grabens (Western Anatolia) and their petogenic-geodynamic significance. Turkish journal of Earth Sciences 19, S. 57-184.
- Akan, B., 2002, Afyon Ömer-Gecek Sıcak Su Akiferi Hidrojeolojik Modeli, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 90 S.
- Akkuş, İ., Akıllı, H., Ceyhan, S., Dilemre, A., Tekin, Z. 2005. Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri, Envanter Serisi No:201, 849 S, Ankara.
- Alpman, N. (1963) : Batı Anadolu tabii sıcak suları, içmeleri ve maden sularının teknik envanteri. M.T.A. Rap. no. 3629 (yayınlanmamış). Ankara.
- Alptekin, Ö., Ezen, U. and Uçer, S.B.: Heat flow, seismicity and the crustal structure of Western Anatolia. Proceedings, International Earth Sciences Congression Aegean Regions, Vol-II, (1990), İzmir, Turkey, 1-10.
- Altunel, E., Hancock, P.L.,1993, 'Pamukkale Travertenleri Kaç Yaşında. Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi 308, S. 496-498, Ankara.
- Altunel, E., 1996, 'Pamukkale Travertenlerinin Morfolojik Özellikleri, Yaşları ve Neotektonik Önemleri', MTA Dergisi 118, S. 47-64, Ankara.
- Arnórsson S, Gunnlaugsson E, and Svavarsson H., 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochim. Cosmochim. Acta 47, S. 567–577.
- Arnórsson, S., 1995: Scaling problems and treatment of separated water before injection. In: Rivera, J. (editor), Injection technology. World Geothermal Congress 1995, IGA pre-congress course, Pisa, Italy, May, 65-111.
- Atiker, M., 1993, Pamukkale: TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 26, 308, S. 495-498.

- Bello, A.O., 2013, “Simav ve yakın çevresi jeotermal sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri.” Yüksek lisans çalışması. 24-45 s.
- Bilgin, A., 1978. Denizli-Babadağ Dolayının Jeolojisi Petrorafisi ve Petrolojisi .Doktora tezi., A.Ü. Fen Fak, Erzurum , 124 S.
- Bozcu, M., 2010, “Geology of Neogene basins of Buldan-Sarıcaova region and their importance in Western Anatolia neotectonics”. International Journal of Earth Sciences, vol. 99, no.4, S. 851-861.
- Bozkurt, E., and Satır, M., 2000, The southern Menderes Massif (western Turkey): geochronology and exhumation history. Geol. J., 35, S. 285-296.
- Bozkurt, E., 2001. Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, Western Turkey. International Journal of Earth Sciences 89, S. 728-744.
- Bozkurt, E. Ve Oberhansli, R., 2001, Menderes Massif (western Turkey): Structural, Metamorphic and Magmatic Evolution- aSynthesis. ‘International Journal of Earth Sciences.’, 89, S. 679-708.
- Bozkurt E., Sözbilir, H., 2004. Tectonic evolution of the Gediz Graben: field evidence for an episodic, two stage extension in Western Turkey. Geological Magazine 141, S. 63-79.
- Bozkurt E., Satır, M., Buğdaycıoğlu, Ç., 2011. Surprisingly young Rb/Sr ages from the Simav extensional detachment fault zone, northern Menderes Massif, Turkey. Journal of geodynamics 52, S. 406-431.
- Candan, O., 1995. Menderes Masifinde kalıntı granolit fasiyesi metamorfizması. International Journal of Earth Sciences 4, S. 35-55.
- Candan, O., 1996, “Çine Asması’ndeki (Menderes Masifi) Gabroların Metamorfizması ve Diğer Asmasıflerle Karşılaştırılması”, Doğa-Türk Yerbilimleri Dergisi, 5, S. 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, S. 1-35.
- 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, S. 793-811.
- Canik, B., 1978, Denizli - Pamukkale sıcak su kaynaklarının sorunları. *Jeoloji Mühendisliği Derg.* 5, S. 29-33.
- Cavazza, W., Okay, A.I. & Zattin, M., 2009, Rapid early-middle Miocene exhumation of the Kazdağ metamorphic core complex (Western Anatolia). *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 98, 1935–1947.
- Cavazza, W., Federica, I., Okay, A.I., Zatin, M., 2011. Apatite fission-track thermochronology of the Western Pontides (NW Turkey). *Rapid communication: Geological Magazine*, S. 1-8.
- Chafetz, H. ve Folk, R.L. 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology* 54(1), S. 289-316.
- Clark, I.D. ve Fritz, P., 1997, *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Lewis, 327 S.
- Craig 1961, “The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas “ In; E Tongiorgi (ed.), *Nuclear Geology in Geothermal Areas*, CNR, Pisa, S. 17-53.
- D’Amore, F., and Arnórsson, S., 2000: Geothermometry. In: Arnórsson, S. (ed.), *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. Sampling methods, data handling, interpretation*. International Atomic Energy Agency, Vienna, S. 152-199.
- 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.

- Dora, O.Ö., Kun, N., Candan, O., 1992. Menderes Masifi'nin metamorfik tarihçesi ve jeotektonik konumu. Türkiye Jeol. Bült. 35, S. 1-14.
- Dora, O.Ö., Candan, O., Dürr, H., Oberhansli, 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., Savasçın M.Y, Tarcan, G. -eds), S. 53-72, 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, S. 832 - 847.
- Erişen, B., Akkuş, L, Uygur, N. ve Koçak, A., 1996, Türkiye Jeotermal Envanteri, MTA Genel Mü- dürlüğü, 480 S., Ankara.
- 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, S. 210-232.
- Ford, T.D. ve Pedley, H.M. 1996. A review of tufa and travertines deposits of the world. Earth Sciences Reviews 41, S. 117-175.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H. (1973) ‘An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters’, Geochim. Cosmochim. Acta, vol. 37, S. 515-525.
- Fournier, R.O., 1977. “Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems”, Geothermics 5, S. 41-50.
- Fournier, R.O., 1979. “A revised equation for the Na/K geothermometer. Geothermal Resources Consil Transactions 3, S. 221-224.

- Fournier, RO., 1979a: A revised equation for the Na-K geothermometer. Geothermal Res. Council Trans., 3, S. 221-224.
- Fournier, RO., 1979b: Geochemical and hydrologic considerations and the use of enthalpy-chloride diagrams in the prediction of underground conditions in hot spring systems. J. Volc. & Geoth. Res., 5, S. 1-6.
- Fridleifsson, Ingvar B.; Bertani, Ruggero; Huenges, Ernst; Lund, John W.; Ragnarsson, Arni; Rybach, Ladislaus (2008-02-11), O. Hohmeyer and T. Trittin, ed., The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change (PDF), IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Luebeck, Germany, S. 59–80.
- Gemici, U., Tarcan, G., 2002. Distribution of boron in thermal waters of western Anatolia, Turkey, and examples of their environmental impacts. Environmental Geology 12, S. 125-132.
- Giese, L. 1997, Geochemical and environmental aspects of the production and reinjection of thermal fluids for the use of geothermal energy at the example of the Geothermal field of Kızıldere and its surroundings, W-Anatolia/Turkey: Dissertation, Freie Universität Berlin, 201 S.
- Giggenbach, W.F., 1988. "Geothermal solute equilibria - Derivation of Na-K-Mg-Ca Geothermometers. Geochimica et Cosmochimica Acta 52, S. 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., 1991: Chemical techniques in geothermal exploration. In: D'Amore, F. (coordinator), Application of geochemistry in geothermal reservoir development. UNITAR/UNDP publication, Rome, S. 119-144.
- Gökalp, E., 1971, Pamukkale (Denizli) bölgesinin jeoloji ve hidrojeoloji etüdü: MTA Rap., 4561, 18 S. (yayımlanmamış).
- Gökgöz, A., 1998: Geochemistry of the Kızıldere-Tekkehamam-Buldan-Pamukkale geothermal fields, Turkey. Report 5, S. 115-156.

- Göktaş, F. 1990. Denizli M22-b1, b2, b3, paftalarının jeolojisi; MTA Rap. no. 9114, (yayımlanmamış) Ankara.
- Guo, L. ve Riding, R., 1998, Hot-spring travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolino Terme, Italy: Sedimentology, 45, S. 163-180.
- Günay, G., Şimşek, Ş., Keloğlu, N., Elhatip, H., Yeşertener, C., Dilsiz, C., Güner, İ. N., Bektaş, D., Öncel, E., 1994. Pamukkale Koruma Amaçlı İmar Planında Öngörülen Travertenlerin Korunması ve Geliştirilmesi İle İlgili Bilimsel-Teknik Araştırmalar ve Müşavirlik Hizmetleri (I), 132 s, Beytepe-Ankara,
- Günay, G., Şimşek, Ş., Keloğlu, N., Elhatip, H., Yeşertener, C., Dilsiz, C., Güner, İ. N., Bektaş, D., Öncel, E., 1995. Pamukkale Koruma Amaçlı İmar Planında Öngörülen Travertenlerin Korunması ve Geliştirilmesi İle İlgili Bilimsel-Teknik Araştırmalar ve Müşavirlik Hizmetleri (II), 83 s, Beytepe-Ankara,
- Günay, G., Şimşek, Ş., Keloğlu, N., Elhatip, H., Yeşertener, C., Dilsiz, C., Güner, İ. N., Bektaş, D., Öncel, E., (1996) Pamukkale Koruma Amaçlı İmar Planında Öngörülen Travertenlerin Korunması ve Geliştirilmesi İle İlgili Bilimsel-Teknik Araştırmalar ve Müşavirlik Hizmetleri (III), 104 sayfa, Beytepe-Ankara.
- Güner, İ.N., Elhatip, H., 1999, Pamukkale Yöresi (Denizli) Termal Kaynakların Hidrokimyasal ve İzotopik İncelenmesi. Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 3, S. 35-47.
- Güneş, C., 2006. Gediz Kaplıcaları'nın (Kütahya) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 170 s.
- Janssen, A., Swennen, R., Podoor, N. ve Keppens, E. 1999, Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa deposits from Belgium. Sedimentary Geology 126, S. 75-95.
- Keskin, B., 1972. Kızıldere Jeotermal sahası jeokimyasal analizleri ve 3. Rezervuar varlığı hakkında rapor, MTA Rapor No: 785, 180 S. Ankara.

- Kharaka, Y. K.; Mariner, R. H., 1989. Chemical Geothermometers and their Application to formation waters from sedimentary basins. In: N. D. Näser & T. H. McCulloh (Eds.), Thermal History of Sedimentary Basins; Methods and Case Histories (S. 99-117). Springer Verlag.
- Kıymaz, İ., 2012, Karahayıt (Denizli) yöresinin jeotermal potansiyeli. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 46 S.
- Koçak, A., 1976, Denizli–Pamukkale ve Karahayıt Kaplıcalarının Hidrojeoloji Etüdü: MTA Rap. No:5670, 21 S., Ankara.
- Koçan, B., 1999, Kaklık – Kocabaş (Denizli) Kömürcüoğlu Traverten Sahasının Jeolojik ve Fiziko – Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 55 S.(yayımlanmamıştır).
- Koçyiğit, A., 1984, Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişimi (Intraplate neotectonic development of Southwestern Turkey and adjacent areas). TJK Bülteni 27, S. 1-16.
- Koralay, O. E., Satır, M. and Dora, O. Ö.,1998, Geochronologic Evidence of Triassic and Precambrian Magmatism in the Menderes Masif, West Turkey, 3rd Int. Turkish Geol. Symp., Abstracts, S. 285, Ankara.
- Külekçi, Ö.C., 2009, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi 1, S. 83-91.
- Nicholson, K., 1993, Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques. Springer-Verlag, Berlin, 263 S.
- Nieva, D. and Nieva, R. (1987) ‘Developments in geothermal energy in Mexico. XII. A cationic composition geothermometer for prospection of geothermal resources’, Heat Recovery Systems & CPH, Vol. 7, S. 243-258.

- Matsuoka, J., Kano, A., Oba, T., Watanabe, T., Sakai, S. ve Seto, K. 2001, Seasonal variation of stable isotopic compositions recorded in a laminated tufa, SW Japan. *Earth and Planetary Science Letters* 192, S. 31-44.
- Oberhansli, R., Candan, O., Dora O.Ö., Dürr, H., 1997, Eclogites within the Menderes Massif, western Turkey. *Lithos* 41, S. 135-150.
- Oberhansli, R., Monie, P., Candan, O., Warkus, F.C., Partzsch, J.H., Dora O.Ö., 1998, The age of blueshist metamorphism in the Mesozoic cover series of the Menderes masif. *Schweiz Mineral Petrograp.* 78, S. 309-316.
- Özdemir, A., Tezelli, O., 2008, Türkiye Jeotermal Sularının Jeokimyasal Özelliklerinin Değerlendirilmesi. *Sondaj Ve Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi.* 7, S. 52-67.
- Özgüler, M.E. Turgay, M.I. ve Şahin, H. (1984). Denizli Jeotermal Alanlarında Jeofizik Çalışmalar, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 99, S. 129-142.
- Özgür, N., 1998, “Aktive und fossile Geothermalsysteme in den kontinentalen Riftzonen des Menderes Massives, Westanatolien, Türkei: Habilitationsschrift, Freie Universität Berlin, 171 S.
- Özgür, N. ve Karamandere, İ. H., 2015, An Update of the Geothermal Potential in the Continental Rift Zone of the Büyük Menderes, Western Anatolia, Turkey, *PROCEEDINGS, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 26-28, 2015, SGP-TR-204.*
- Özgür, N., Pekdeger, A., Wolf, M., Stichler, W., Seiler, K.-P. und Satir, M., 1998b, Hydrogeochemical and isotope geochemical features of the thermal waters of Kizildere, Salavatli, and Germencik in the rift zone of the Büyük Menderes, western Anatolia, Turkey: preliminary: in: Aherhart, G.B. and Hulston, J.R. (eds.): *Proc. Internat. 9th Symp. on Water-Rock Interaction, Taupo, New Zealand, 30 March – 3 April 1998*, p. 645-648.
- Özler, H.M., 1996, Büyük Menderes Havzası Yukarı Çürüksu kesimini hidrojeolojisi incelemesi. *İstanbul Univ., Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi*, 175 S. (Yayınlanmamış).

- Özkul, M. ve Alçiçek, M. A., 2002, Facies variation in Recent to Quaternary fissure ridge hot spring travertines, Denizli Basin, Interior Western Turkey: International Earth Science Colloquium on the Aegean Region, Dokuz Eylül Univ. Engineering Faculty, Dept of Geology, izmir, Turkey, Poster display, Proceedings Abstracts, S. 91.
- Pedley, H.M., (1990)."Classification and environmental models of cool freshwater tufas". Sedimentary Geology 68: S. 143–154.
- Pedley, H.M., Gonzalez Martin. J. A., Ordonez Delgado, D. ve Garcia Del Cura, M. A., 2003, Sedimentology of Quaternary perched springline and palidal tufas: criteria for recognition, whith examples from Guadalajara Province, Spain. Sedimentology 56, PP. 511-527.
- Piper, A.M., 1953, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. United States Geological Survey, Ground Water, No:12, S. 14.
- Purvis M, Robertson AHF., 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, S. 371-201.
- Reischmann, T., Kröner, A., Todt, W., Dürr, S., Şengör A.M.C., 1991, Episodes of crustal growth in the Menderes Massif, W Turkey, inferred from zircon dating. Terra Abstract, 3, 35 S.
- 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, S. 703-714.
- Semiz, B., 2000, “Kocabaş (Denizli) ve yakın çevresi travertenlerinin jeolojisi”: Pamukkale Üniversitesi; Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği, Bitirme Tezi, Denizli, S. 44.
- Seyitoğlu, G., 1997, The Simav Graben: An example of young E-W trending structures in the late Cenozoic extensional system of Western Turkey. Tr J. of Earth Sciences 6, S. 135-141.

- Seyitoğlu, G., Işık, V., Çemen, I., 2004, Complete Tertiary exhumation history of the Menderes Massif, western Turkey; an alternative working hypothesis. *Terra Nova* 1616, S. 358-364.
- Sözbilir, H., 1997, Stratigraphy and Sedimentology of the Tertiary Sequences in the Northeastern Denizli Province (Southwest Turkey). PhD Thesis, Dokuz Eylül University İzmir-Turkey, 195 S.
- Şaroğlu, F., Boray, A., Emre, O., 1987, Active faults of Turkey, Mineral Res. Explor. Inst. Turkey, unpubl. Report 8643, 394 S.
- Şengör, A.M.C., 1982, Egenin neotektoniğini yöneten etkenler: In: Batı Anadolunun Genç Tektoniği ve Volkanizması (Erol, O., Öygür, V. –eds.), Türkiye Jeol. Bült., S. 59-71.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Varoğlu, F., 1985, Strike-Slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape; Turkey as a case study, strike-slip deformation, Basin formation and sedimentation, Society of Economic paleontologists and mineralogists special publication 37, S. 227-264.
- Şengör AMC, Yılmaz Y. 1985, Tethyan evolution of Turkey; a plate tectonic approach. *Tectonophysics* 75, S. 181-241.
- Şengün, R., 2011, Yenicekent ve Gölemezli çevresinin hidrojeolojisi bitirme tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Yayınlanmamış), S. 13-54.
- Şimşek, Ş., 1984, Denizli-Kızıldere-Tekkehamam-Tosunlar-Buldan-Yenice Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları. Mineral Res. Expl. Direct. Turkey (MTA), Scientific Report No: 7846, S. 85. Ankara.
- Şimşek, Ş, (1985), Geothermal model of denizli, saraykoy-buldan area, *Geothermics* 14, S. 393–417.
- Taner, G., 1974,a, Denizli Bölgesi Neojen'inin Paleontolojik ve Stratigrafik Etüdü, M.T.A. Dergisi, 82, S. 89-125, Ankara.

- Taner, G., 1974,b, Denizli Bölgesi Neojen'inin Paleontolojik ve Stratigrafik Etüdü, M.T.A. Dergisi, 83, S. 145-177, Ankara.
- Tamgaç, Ö. F., Yıldırım N., Çetiner L., 1995, Denizli – Karahayıt – Pamukkale ve çevresi sıcak su kaynaklarının korunması ve geliştirilmesine Ait Hidrojeoloji Etüt Raporu, MTA Derleme No:9942, 94/ 53, Ankara (yayımlanmamıştır.).
- Tezcan, L., 1992, Karst Akifer sistemlerinin trityum izotopu yardımıyla Matematiksel Modellemesi. Hacettepe Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, , Beytepe, Ankara, 121 S.
- Turcotte, D.L; Schubert, G., 2002, Geodynamics (2nd edition), Cambridge, England, UK; Cambridge University Press, S. 136-137.
- Truesdell, A. H., 1976, Summary of Section III Geochemical Techniques in Exploration. In Proceedings, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, CA, U. S. Government Printing Office, 1, S. 13-39, Washington, D. C.
- Waterloo Hydrogeologic, AquaChem 3.7: Aqueous geochemical analyses, plotting and modelling, (1999) 184 S.
- Westaway, R., 1990, Block rotation in VWestern Turkey. 1. Observational evtdence: Journal of Geophysical Research, 95, 19857-19884., 1993, Neogene evolution of the Denizli region of VWestern Turkey: Journal of Structural Geology 15, S. 37-53.
- Wright, J.S. 2000, Tufa accumulations in ephemeral streams: Observations from the Kimberley, NW Australia. Australian Geographer 31, S. 333- 347.
- 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.

- 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.
- Yeşener, C., and Elhatip, H., 1997, Evaluation of Groundwater Flow by Means of Dye Tracing Techniques, Pamukkale Thermal Springs, Western Turkey, "Hydrogeology Journal", IAH Publish., Verlag, Heinz Heise Hannover, Germany, Vol. 5, S. 51- 59.
- Yıldırım, N., Güner, İ.N., 2002. Büyük Menderes Grabeninin Doğusunda Yeralan Jeotermal Sahalarda Bulunan Suların İzotopik ve Hidrojeokimyasal Özellikleri, Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu, S.79-98, Adana.
- Yılmaz, Y. 1989. An approach to the origin of young volcanic rocks of western Turkey. In: Şengör, A.M.C. (Ed.) Tectonic Evolution of Tethyan Region. Kluwer Academic Publishers pp. 159–189.
- Yılmaz, Y., 2000, Ege bölgesinin aktif tektoniği. BADSEM 2000, Batı Anadolu’nun depremselliği sempozyumu, 24-27 Mayıs 2000, İzmir, Bildiriler Kitabı s.3-14.
- Yılmaz, E.E., 2015, “Tekkehamam (Denizli) ve yakın çevresi jeotermal sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal özellikleri ”, Yüksek Lisans Tezi, Isparta (yayımlanmamıştır.).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Duygu Sengül KUTLU

Doğum Yeri ve Yılı : Ankara, 1989

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : dygsnglkutlu@gmail.com

**Taranmış
Fotoğraf
(3.5cm x 3cm)**

Eğitim Durumu

Lise : Beypazarı Süper Lisesi, 2007

Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği

Mesleki Deneyim

Aydın, Germencik, Ömerbeyli jeotermal sahaları, kuyu jeologluğu, (2014)