

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PASINLER (ERZURUM) JEOTERMAL SİSTEMİNDE AKIŞKAN AKIMININ
MODELENMESİ VE JEOTERMAL SULARIN HİDROJEOKİMYASI**

DOKTORA TEZİ

Jeoloji Yük. Müh. Esra HATİPOĞLU TEMİZEL

KASIM 2014

TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PASINLER (ERZURUM) JEOTERMAL SİSTEMİNDE AKIŞKAN AKIMININ
MODELLENMESİ VE JEOTERMAL SULARIN HİDROJEOKİMYASI

Jeoloji Yük. Müh. Esra HATİPOĞLU TEMİZEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.10.2014
Tezin Savunma Tarihi : 06.11.2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fatma GÜLTEKİN

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Esra HATİPOĞLU TEMİZEL Tarafından Hazırlanan

PASINLER (ERZURUM) JEOTERMAL SİSTEMİNDE AKIŞKAN AKIMININ
MODELLENMESİ VE JEOTERMAL SULARIN HİDROJEOKİMYASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14/ 10 / 2014 gün ve 1573 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Fikri BULUT



Üye : Prof. Dr. Mehmet ÇELİK



Üye : Prof. Dr. Ömer YÜKSEK



Üye : Doç. Dr. Fatma GÜLTEKİN



Üye : Yrd. Doç. Dr. Arzu FIRAT ERSOY



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada Pasinler (Erzurum) jeotermal sahasında sıcak su dolaşım sistemini açıklamak ve ısı taşınım modelini ortaya koymak amaçlanmıştır. Ayrıca çalışmada jeotermal alanda yer alan sıcak ve soğuk su kaynaklarının hidrokimyasal ve izotopik özellikleri belirlenmiştir.

“Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi” tarafından 1063 No'lu proje ile desteklenen bu çalışmayı bana öneren ve beni yönlendiren, çalışmanın başlangıcından sonuna kadar bilgi, deneyim ve tecrübeleri ile yol gösteren, maddi manevi desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Fatma GÜLTEKİN'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmaya maddi destek sağlayan Karadeniz Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim. Doktora Tez İzleme Komitesi'nin değerli üyeleri Prof. Dr. Ömer YÜKSEK ve Yrd. Doç. Dr. Arzu FIRAT ERSOY'a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Bilgi, tecrübe, görüş ve önerilerinden yararlandığım, değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet ARSLAN'a, Prof. Dr. M. Ziya KIRMACI'ya, Doç. Dr. Reyhan KARA GÜLBAY'a, Yrd. Doç. Dr. Kemal AKDAĞ'a ve Yrd. Doç. Dr. Hakan ERSOY'a şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında benimle birlikte tüm zorlukları paylaşan, her konuda destekleri ile bana güç veren sevgili arkadaşlarım Arş Gör. Emine TÜRK'e ve Arş. Gör. M. Oğuz SÜNNETCİ'ye teşekkür ederim.

İnceleme alanına ait eski jeolojik ve hidrojeolojik çalışmaların gözden geçirilmesine imkan veren MTA Genel Müdürlüğü'ne (Ankara) ve DSİ 8. Bölge Müdürlüğü'ne (Erzurum) içtenlikle teşekkür ederim.

Hayatımın en değerli varlıkları olan ve öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve eşim Doç. Dr. İrfan TEMİZEL'e şükranlarımı bir borç bilirim.

Esra HATİPOĞLU TEMİZEL
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sisteminde Akışkan Akımının Modellenmesi ve Jeotermal Suların Hidrojeokimyası’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Fatma GÜLTEKİN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06 / 11 / 2014

Esra HATIPOĞLU TEMİZEL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu ve Morfolojisi	3
1.4. İklim ve Bitki Örtüsü	5
1.5. Önceki Çalışmalar.....	6
1.5.1. Jeoloji-Petrol-Petrografik-Jeomorfoloji Amaçlı Çalışmalar.....	7
1.5.2. Hidrojeoloji ve Jeotermal ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	11
1.5.2.1. Sıcak Sularla İlgili Yapılan Çalışmalar.....	11
1.5.2.2. Soğuk Sularla İlgili Yapılan Çalışmalar	14
1.5.3. Matematiksel Modellemeler ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	15
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	18
2.1. Arazi Çalışmaları	18
2.2. Laboratuvar Çalışmaları.....	19
2.3. Büro Çalışmaları	20
3. BULGULAR.....	21
3.1. Genel Jeoloji	21
3.1.1. Giriş.....	21
3.1.2. Şahvelet Ofiyolitleri.....	23
3.1.3. Derviş Halit Formasyonu.....	24
3.1.4. Yaylasırtı Gabrosu	25

3.1.5.	Alibaba Volkanitleri.....	25
3.1.6.	Haneşdüzü Formasyonu.....	26
3.1.7.	Erzurum-Kars Plato Volkanitleri.....	27
3.1.8.	Horosan Formasyonu.....	29
3.1.9.	Alüvyon.....	30
3.2.	Yapısal Jeoloji.....	30
3.3.	Hidroloji.....	31
3.3.1.	Yağışlar ve Sıcaklık.....	31
3.3.2.	Buharlaşma-Terleme.....	32
3.3.3.	Yüzey Suları ve Akımları.....	34
3.3.4.	Yeraltına Süzülme.....	36
3.4.	Hidrojeoloji.....	37
3.4.1.	Formasyonların Hidrojeolojik Özellikleri.....	37
3.4.2.	Akiferin Hidrolik Karakteristikleri.....	40
3.4.3.	Su Noktaları.....	41
3.4.3.1.	Akarsular.....	41
3.4.3.2.	Soğuk Su Kaynakları ve Kuyuları.....	41
3.4.3.3.	Sıcak Su Kaynakları ve Jeotermal Kuyular.....	42
3.5.	İnceleme Alanındaki Suların Hidrokimyasal Özellikleri.....	45
3.5.1.	Suların Fiziksel Özellikleri.....	51
3.5.1.1.	Sıcaklık (°C).....	51
3.5.1.2.	Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH).....	52
3.5.1.3.	Elektriksel İletkenlik (EC).....	54
3.5.1.4.	Çözünmüş Oksijen (DO).....	55
3.5.1.5.	Toplam Çözünmüş Madde Miktarı (TDS).....	55
3.5.2.	İnceleme Alanındaki Sularda Majör İyonlar.....	56
3.5.2.1.	Sodyum (Na ⁺).....	56
3.5.2.2.	Potasyum (K ⁺).....	57
3.5.2.3.	Kalsiyum (Ca ⁺²) ve Magnezyum (Mg ⁺²).....	57
3.5.2.4.	Alkalinite (HCO ₃ ⁻ ve CO ₃ ⁻²).....	58
3.5.2.5.	Klorür (Cl ⁻) ve Florür (F ⁻).....	59
3.5.2.6.	Sülfat (SO ₄ ⁻²).....	60
3.5.3.	Ağır Metal Analizleri.....	61

3.5.3.1.	Demir (Fe) ve Mangan (Mn).....	64
3.5.3.2.	Bakır (Cu)	64
3.5.3.3.	Kurşun (Pb).....	65
3.5.3.4.	Çinko (Zn).....	65
3.5.3.5.	Nikel (Ni).....	65
3.5.3.6.	Alüminyum (Al).....	66
3.5.3.7.	Arsenik (As).....	66
3.5.3.8.	Bor (B)	67
3.5.3.9.	Brom (Br).....	67
3.5.3.10.	Silisyum (Si)	68
3.5.3.11.	Baryum (Ba).....	68
3.5.3.12.	Lityum (Li).....	68
3.5.3.13.	Stronsiyum (Sr).....	69
3.5.3.14.	Kadmiyum (Cd)	69
3.5.4.	Kirlilik Analizleri.....	69
3.5.4.1.	Amonyum (NH ₄).....	69
3.5.4.2.	Nitrit (NO ₂)	72
3.5.4.3.	Nitrat (NO ₃)	72
3.5.4.4.	Fosfat (PO ₄)	73
3.6.	İnceleme Alanındaki Suların Sınıflandırılması.....	73
3.6.1.	Piper Diyagramı Değerlendirmesi	74
3.6.2.	Schoeller Diyagramı Değerlendirmesi.....	76
3.6.3.	ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı	77
3.7.	Minerallerin Sudaki Çözünürlüklerinin Değerlendirilmesi	79
3.8.	Jeotermometre Uygulamaları.....	81
3.8.1.	Çözünürlüğe Dayalı Jeotermometreler	83
3.8.1.1.	Silis Jeotermometreleri	83
3.8.2.	İyon Değişimine Bağlı Jeotermometreler	84
3.8.2.1.	Na/K Jeotermometreleri.....	85
3.9.	Karışım Modelleri.....	86
3.10.	Çevresel İzotop Hidrolojisi	90
3.10.1.	Oksijen 18 (¹⁸ O)- Döteryum (² H) İlişkisi.....	91
3.10.2.	Oksijen 18 (¹⁸ O)- Sıcaklık (°C) İlişkisi.....	93

3.10.3.	Tritiyum (^3H)- Elektriksel İletkenlik (EC) İlişkisi.....	93
3.10.4.	Tritiyum (^3H)- Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) İlişkisi.....	95
3.10.5.	Karbon İzotopu (^{13}C)	96
3.10.6.	Kükürt İzotopu (^{34}S)	98
3.11.	Su-Kayaç Etkileşimi	100
3.11.1.	Kayaç Jeokimyası	101
3.11.2.	Hidrojeokimya	105
3.11.3.	Su-Kayaç İlişkisi.....	107
3.12.	Jeotermal Sistemler.....	111
3.12.1.	Jeotermal Sistemlerin Oluşum Şekilleri.....	111
3.12.2.	Pasinler Jeotermal Sistemi	112
3.13.	Pasinler Jeotermal Alanında Yeraltı Suyu Akımı ve Isı Taşınım Modeli.....	116
3.13.1.	Yeraltı Suyu Akımının Temel Matematiksel Denklemi	117
3.13.2.	Isı Taşınım Eşitlikleri.....	120
3.13.3.	SHEMAT Modelinde Kullanılan Eşitlikler	123
3.13.3.1.	Basınçlı ve Serbest Akiferlerde Yeraltı Suyu Akımı.....	123
3.13.3.2.	Isı Transferi.....	126
3.13.4.	Sayısal Çözüm Teknikleri.....	128
3.13.4.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	128
3.13.4.2.	Sonlu Farklar Yöntemi.....	129
3.13.5.	Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sahasının Processing SHEMAT ile Modellenmesi.....	131
3.13.5.1.	Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sahasının Akım Modeli	136
3.13.5.2.	Akım Sınır Koşullarının Oluşturulması	137
3.13.5.3.	Akım Parametrelerinin Belirlenmesi ve Akım Modelinin Değerlendirilmesi.....	138
3.13.5.4.	Akım ve Isı taşınım Modelinin Birlikte Çalıştırılması	139
3.13.5.5.	Sıcaklık Sınır Koşullarının Belirlenmesi	139
3.13.5.6.	Termal Parametrelerin Belirlenmesi	141
3.13.5.7.	Akım ve Isı Taşınım Modelinin Birlikte Değerlendirilmesi.....	141
3.13.5.8.	Modelin Kalibrasyonu	143
3.14.	Jeotermal Akışkanların Çevresel Etkileri	144
4.	İRDELEME VE TARTIŞMA.....	147

5.	SONUÇLAR.....	152
6.	ÖNERİLER.....	155
7.	KAYNAKLAR.....	156
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

PASINLER (ERZURUM) JEOTERMAL SİSTEMİNDE AKIŞKAN AKIMININ
MODELENMESİ VE JEOTERMAL SULARIN HİDROJEOKİMYASI

Esra HATİPOĞLU TEMİZEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Fatma GÜLTEKİN
2014, 167 Sayfa

Pasinler (Erzurum) jeotermal alanında baskın kaya tipi farklı zamanlarda oluşmuş volkanitlerdir. Volkanitleri havza merkezinde genç tortullar ve alüvyonlar örtmektedir. Çalışma alanında jeotermal kaynakların sıcaklıkları 22.5-51°C, EC değerleri 970-6233 µS/cm aralığında değişmektedir. Rezervuar sıcaklığı silis jeotermometresi ile 46-177°C olarak hesaplanan jeotermal sular, $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ ilişkisine göre meteorik kökenlidir. $\delta^{13}\text{C}_{\text{vpdb}}$ değerlerine göre jeotermal sulardaki karbon; yeraltı sularındaki çözülmüş inorganik karbon, tatlı su karbonatları ve manto kökenli CO₂ gazına, $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 'e göre kükürt; volkanik sülfüre, petrol-kömüre ve denizel kireçtaşlarına karşılık gelmektedir. Jeotermal sahada akışkan akımının modellenmesini amaçlayan bu çalışmada jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal veriler kullanılarak yeraltı suyu akımı ve ısı taşınımını birlikte çözebilen SHEMAT yazılımı kullanılmıştır. Model kararlı akım koşullarında iki boyutlu kesit model olarak hazırlanmıştır. Model alanında yeraltı suyu akımının havza sınırlarından merkeze, havza tabanında ise akımın yeryüzüne doğru olduğu belirlenmiştir. Akım ve ısı taşınım modeli birlikte değerlendirildiğinde havza ortasında kesitin doğu ve batı tarafına olmak üzere su bölümü gerçekleşmiştir. Model alanında hesaplanan sıcaklık yatay yönde homojen, düşey yönde ise jeotermal gradyana bağlı olarak derinlikle artış göstermiştir. Model jeotermal kuyularının boşalım sıcaklıkları ve bu kuyularda ölçülen sıcaklık-derinlik logları ile kalibre edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pasinler Jeotermal Sahası, Sayısal Modelleme, SHEMAT, Isı Taşınımı, Hidrojeokimya, Çevresel İzotoplar

PhD. Thesis

SUMMARY

THE FLUID FLOW MODELLING OF PASINLER (ERZURUM) GEOTHERMAL
SYSTEM AND HYDROGEOCHEMISTRY OF GEOTHERMAL WATER

Esra HATİPOĞLU TEMİZEL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geological Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Fatma GÜLTEKİN
2014, 167 Pages

The dominant rock types in the Pasinler (Erzurum) geothermal area are volcanics that are formed at different times. These volcanics are overlain by young sediments and alluvium at the center of the area. The springs have a temperature of 22.5-51 °C, and EC values of 970-6233 $\mu\text{S}/\text{cm}$. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ relations reveal that the geothermal water is meteoric in origin, and according to the Si geo-thermometer, the reservoir temperature was estimated between 46 and 177 °C. Based on $\delta^{13}\text{C}_{\text{vpdb}}$ values, the sources of the carbon in the geothermal water are inorganic carbon in the ground water, the fresh water carbonates, and mantle-based CO_2 . $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ values suggest that the sulfur in the hot water is originated from volcanic sulfur, coal and oil, and limestones. In order to model the liquid flow of the geothermal area, the SHEMAT software, which can calculate both ground water flow and heat transport via geological, hydro-geological and hydro-chemical data, was used in this study. The model was created as a 2D section under static flow conditions. In this model, the ground water flow is from the outer boundaries of the basin to the center, and at the bottom it is upwards. When both flow and heat transport conditions are considered, it is seen that the water splits to east and west at the center of the basin. In the model area, the calculated temperatures are homogeneous horizontally and increase with depth vertically related to the geothermal gradient. The model was calibrated with discharge temperatures and the temperature-depth logs of the wells.

Key Words: Pasinler, Geothermal Area, Numerical Modeling, SHEMAT, Heat Transport, Hydro-geochemistry, Environmental Isotopes

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Çalışma alanına ait yer belirleme haritası	4
Şekil 1.2. Pasinler Havzası'nın sayısal yükseklik modeli	5
Şekil 2.1. Pasinler jeotermal alanındaki kaplıca tesislerinden bir görünüş	19
Şekil 3.1. İnceleme alanında yer alan birimlerin bir kısmından genel bir görünüm.....	21
Şekil 3.2. Pasinler (Erzurum) ve yakın çevresinin stratigrafik kolon kesiti	22
Şekil 3.3. Pasinler Meteoroloji İstasyonu'nda 2000-2012 yılları arasında ölçülen ortalama yağış değerlerinin yıllara göre değişimi	32
Şekil 3.4. Pasinler Meteoroloji İstasyonu'nda 2000-2012 yılları arasında ölçülen ortalama sıcaklık değerlerinin yıllara göre değişimi	32
Şekil 3.5. Pasinler İlçesi'nde 2000-2012 yılları arasındaki aylık ortalama yağış ve potansiyel buharlaşma-terleme değerlerinin aylık değişimi.....	34
Şekil 3.6. Eğirmez akım gözlem istasyonunun yağış alanı ve yeri	35
Şekil 3.7. Eğirmez-Pasinler akım gözlem istasyonuna ait 1984-2012 yılları arasında aylık ortalama akışların değişimi.....	35
Şekil 3.8. Pasinler (Erzurum) ve yakın çevresindeki formasyonların hidrojeolojik özellikleri	38
Şekil 3.9. Pasinler (Erzurum) Havzası'nın hidrojeoloji haritası.....	39
Şekil 3.10. İnceleme alanında yer alan (a) Hasankale Çayı ve (b) Hamam Deresi	41
Şekil 3.11. Alüvyonlardan yüzeye ulaşan kaynaklar (a) ve Hamam Deresi Kaynağı (b)	44
Şekil 3.12. İnceleme alanındaki jeotermal kuyular; (a) OZ, (b) PS-2, (c) PS-3 ve (d) PS-4.....	44
Şekil 3.13. İnceleme alanındaki sıcak suların, yüzey sularının ve soğuk su kaynağının mevsimlere göre sıcaklık değişimleri	52
Şekil 3.14. İnceleme alanındaki soğuk su kuyularının mevsimlere göre sıcaklık değişimleri	52
Şekil 3.15. İnceleme alanındaki sıcak suların, yüzey sularının ve soğuk su kaynağının mevsimlere göre pH değişimleri.....	53
Şekil 3.16. İnceleme alanındaki soğuk su kuyularının mevsimlere göre pH değişimleri	53
Şekil 3.17. İnceleme alanındaki sıcak suların, yüzey sularının ve soğuk su kaynağının mevsimlere göre elektriksel iletkenlik (EC) değişimleri	54
Şekil 3.18. İnceleme alanındaki soğuk su kuyularının mevsimlere göre elektriksel iletkenlik (EC) değişimleri	55

Şekil 3.19.	İnceleme alanındaki su örneklerine ait piper diyagramı.....	76
Şekil 3.20.	İnceleme alanında yer alan su örneklerinin Schoeller diyagramındaki konumları.....	77
Şekil 3.21.	İnceleme alanındaki suların ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı.....	79
Şekil 3.22.	İnceleme alanından derlenen su örneklerine ait mineral doygunluk indisi değerleri.....	81
Şekil 3.23.	Çalışma alanındaki sulara ait Giggenbach diyagramı	86
Şekil 3.24.	Pasinler jeotermal alanındaki sıcak ve mineralli suların entalpi-silis diyagramı.....	88
Şekil 3.25.	Pasinler jeotermal alanındaki sıcak ve mineralli suların entalpi-klorür diyagramı.....	88
Şekil 3.26.	İncelenen suların oksijen-18 (¹⁸ O)-döteryum (² H) ilişkisi.....	92
Şekil 3.27.	İncelenen suların oksijen-18 (¹⁸ O)-sıcaklık ilişkisi.....	94
Şekil 3.28.	İncelenen suların tiryum- elektriksel iletkenlik ilişkisi.....	95
Şekil 3.29.	İncelenen suların tiryum- sıcaklık ilişkisi.....	96
Şekil 3.30.	Farklı doğal ortamlardaki $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ değerinin değişim aralığı (Clark ve Fritz, 1997).....	97
Şekil 3.31.	İnceleme alanındaki sulara ait karbon-13- bikarbonat ilişkisi.....	98
Şekil 3.32.	Farklı malzeme ve ortamlarda kükürt ve kükürt bileşiklerinin ³⁴ S _{CDT} değerleri (Krouse, 1980).....	99
Şekil 3.33.	Kayaç örneklerinde ana oksitlerin dağılımı.....	102
Şekil 3.34.	İz elementlerin kayaçlardaki değişimi.....	104
Şekil 3.35.	İnceleme alanındaki (a) kayaçlarda (Haskin, 1968) ve (b) sulara (Evens, 1978) kondrite göre normalize edilmiş NTE dağılımları.....	105
Şekil 3.36.	İnceleme alanındaki sulara ait dairesel diyagramlar.....	106
Şekil 3.37.	Su ve kayaçların iz element dağılımları.....	111
Şekil 3.38.	Pasinler PS-4 kuyusu litoloji ve kuyu donanımı (Özten ve Yurtseven, 1996).....	114
Şekil 3.39.	Pasinler jeotermal alanında yer alan sıcak su kaynaklarının oluşum modeli.....	115
Şekil 3.40.	Modelleme çalışmalarında izlenen akış şeması.....	116
Şekil 3.41.	Gözenekli ortamdaki akış için birim kontrol hacmi (Freeze ve Cherry, 1979).....	118
Şekil 3.42.	Bir akiferin sonlu elemanlar nokta ağı.....	129
Şekil 3.43.	Köşe merkezli sonlu farklar (a) noktalar ağı, blok merkezli sonlu farklar (b) noktalar ağı.....	130
Şekil 3.44.	Değişen aralıklı sonlu farklar noktalar ağı.....	130

Şekil 3.45.	Sonlu farklar noktalar ağı (a), sonlu farklar noktalar ağı için bilgisayar notasyonu (b).....	131
Şekil 3.46.	Model çalışması için seçilmiş kesit hattı	133
Şekil 3.47.	SHEMAT'ta kullanılan enine kesit	134
Şekil 3.48.	Seçilen kesit hattı boyunca Pasinler jeotermal alanının elemanları	136
Şekil 3.49.	Modelleme çalışmalarında kullanılan sonlu farklar ağı	136
Şekil 3.50.	Kesit hattı boyunca SHEMAT programı ile oluşturulan zonlar	137
Şekil 3.51.	Pasinler ovasına ait yeraltı su tablası haritası	138
Şekil 3.52.	Model alanında hesaplanan hidrolik yük dağılımı	139
Şekil 3.53.	Akım modeli sonucunda meydana gelen akım doğrultuları.....	139
Şekil 3.54.	Pasinler jeotermal alanındaki sıcak su kuyularında ölçülen derinlik-sıcaklık profili (a: PS-1A, b: PS-2, c: PS-3, d: EHD-1)	140
Şekil 3.55.	SHEMAT programında oluşturulan sıcaklık sınır koşulları.....	141
Şekil 3.56.	Akım ve ısı taşınımının birlikte değerlendirilmesi ile oluşan hidrolik yükler	142
Şekil 3.57.	Akım ve ısı taşınımının birlikte değerlendirilmesi ile oluşan yeraltı suyu akım yolları.....	142
Şekil 3.58.	Pasinler jeotermal alanında seçilen model kesitte oluşan sıcaklık dağılımı.....	142
Şekil 3.59.	Pasinler jeotermal alanında derinliğe göre sıcaklık değişimi	143
Şekil 3.60.	Pasinler jeotermal alanında seçilen model kesite göre jeotermal elemanların sıcaklık değişimleri	143
Şekil 3.61.	Modelin kalibrasyonu sonucunda derinliğe göre hesaplanan sıcaklık dağılımı.....	144
Ek Şekil 1.	Pasinler (Erzurum) yöresinin jeoloji haritası ve enine kesiti	

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Pasinler ilçesine ait yıllık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri (2000-2012)	6
Tablo 3.1. Pasinler İlçesi'ne ait Thornthwaite yöntemine göre hazırlanmış hidrolojik bilanço (To: Toplam, Rasat Süresi: 2000–2012).....	33
Tablo 3.2. Pasinler Havzası'nda Süzülme oranı	36
Tablo 3.3. Pasinler Ovası'ndaki işletme kuyuların hidrolik özellikleri (Dilek, 1973 ve DSİ, 2011)	43
Tablo 3.4. İnceleme alanındaki kaynaklardan yapılan örnekleme noktalarının koordinatları.....	45
Tablo 3.5. İnceleme alanından derlenen sıcak ve soğuk su kaynaklarına ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	46
Tablo 3.6. İnceleme alanındaki sularda bulunan eser elementler (değerler mg/l).....	62
Tablo 3.7. İnceleme alanından derlenen örneklerin kirlilik analiz değerleri	70
Tablo 3.8. Pasinler jeotermal alanındaki suların IAH (1979) göre su tipi sınıflaması	75
Tablo 3.9. İnceleme alanından derlenen su örneklerine ait SI değerleri (d: doygun).....	80
Tablo 3.10. Akifer sıcaklıklarının tahmin edilmesinde kullanılan kimyasal jeotermometre hesaplamaları.....	84
Tablo 3.11. İnceleme alanında bulunan sıcak sulara ait $\log(\sqrt{Ca/Na})$ değerleri	85
Tablo 3.12. İnceleme alanında yer alan sıcak ve mineralli sulara ait silis jeotermometre uygulamaları (tüm derişimler mg/l)	86
Tablo 3.13. Pasinler jeotermal alanında yer alan sıcak sularda karışım modellerine göre belirlenen sıcak su karışım oranları	89
Tablo 3.14. İnceleme alanındaki sulara ait izotop verileri.....	91
Tablo 3.15. Kayaç örneklerine ait ana oksit değerleri (değerler % olarak verilmiştir) ..	101
Tablo 3.16. Kayaç ve su örneklerine ait iz element sonuçları (su örnekleri ppb kayaç örnekleri ppm olarak verilmiştir).....	103
Tablo 3.17. Kayaç ve su örneklerine ait nadir toprak element (NTE) analiz sonuçları (su örnekleri ppb kayaç örnekleri ppm olarak verilmiştir).....	104
Tablo 3.18. Su- kayaç etkileşimine bağlı olarak belirlenen sonuçlar (Hounslow, 1995'den düzenlenmiştir).....	108
Tablo 3.19. Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} katyonları ile Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- anyon değişimleri ve kalsit doygunluk indeksi değerleri (Hounslow, 1995).....	109

Tablo 3.20.	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ⁺² , Mg ⁺² katyonları ile Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , HCO ₃ ⁻ anyon değişimlerine bağlı olarak kaya- su etkileşimi ve kalsit doygunluk indeksine göre kimyasal olaylar (Hounslow,1995)	109
Tablo 3.21.	Jeotermal sahaların akışkan sıcaklıklarına göre sınıflandırılması (Dickson ve Fanelli, 1990)	112
Tablo 3.22.	Sayısal modelde kullanılan hidrolik ve termal parametreler	135
Tablo 3.23.	Jeotermal gelişmenin olası çevresel etkileri (Hunt, 2001)	145
Tablo 4.1.	Ulusal ve uluslar arası içmesuyu standartlarının birbirlerine göre Karşılaştırılması ve kaplıcalar yönetmeliği	150
Tablo 4.2.	Su kirliliği kontrolü yönetmeliği (2004).....	151

SEMBOLLER DİZİNİ

D	: Döteryum
DIC	: Çözünmüş inorganik karbon
DO	: Çözünmüş Oksijen
EC	: Elektriksel İletkenlik
HDK	: Hamam Deresi kaynağı
HD	: Hamam Deresi
HDE	: Hamam Deresi (Erzurum)
OZ	: Özdemir kuyusu
HÇ	: Hasankale Çayı
SI	: Doygunluk İndeksi
t	: Sıcaklık
TDS	: Toplam Çözünmüş Madde Miktarı
TU	: Tritiyum Birimi
¹³ C _{VPDB}	: Karbon-13 (Vienna Pee Dee Belemnite)
² H	: Döteryum
³ H	: Tritiyum
¹⁸ O	: Oksijen-18
pH	: Hidrojen iyonu aktivitesi
³⁴ S _{CDT}	: Kükürt-34 (Canon Diablo Troilite)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünya ülkelerinde enerji ihtiyacının büyük bir kısmı doğalgaz, kömür, petrol, hidroelektrik ve nükleer santrallerden karşılanmakla birlikte dünyada enerjiye olan talep giderek artmaktadır. Nükleer santrallerin çevreyi tehdit etmesi ve fosil enerji kaynaklarının tükenmekte olması araştırmaları yenilenebilir temiz enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında jeotermal, güneş, su, rüzgar, gel-git, deniz akıntıları ve dalga enerjileri gelmektedir. Bu enerji kaynakları arasında jeotermal enerji son zamanlarda fazla ilgi görmektedir (Lund ve Freeston, 2001).

İnsanlar ilk çağlardan başlayıp 20. yüzyıla kadar sıcak su kaynaklarından yalnızca tedavi edici ve dinlendirici olarak yararlanmışlardır. Bu zengin enerji kaynağının daha farklı ve ekonomik olarak kullanımı ise yenidir. İlk kez 1904-1905 yıllarında İtalya'da başlayan jeotermal enerji araştırmalarında jeotermal su kaynağı elektrik amaçlı kullanılmıştır. Bundan sonra jeotermal enerjinin potansiyelini kavrayan insanoğlu, bu yöndeki çalışmalara hız vererek, bu enerjinin kullanım yöntemlerini geliştirmiş ve uygulamaya koymuştur (URL-1, 2004).

Jeotermal enerjiden başta elektrik enerjisi üretimi olmak üzere sağlık amaçlı olarak, ısıtmacılıkta, soğutmacılıkta, kurutmacılıkta, konservecilikte, kağıt ve tekstil sanayinde, kimyasal madde üretiminde olduğu gibi çok çeşitli alanlarda faydalanılmaktadır.

Sıcaklığı 100-180 °C arasında değişen sular, elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir. Sıcaklığı 90 °C ve üzerinde olan hidrotermal kaynaklar, sanayide kurutma işleminin yapımı sırasında, sıcaklığı 50 °C ve üzerinde olan sular ise çeşitli ısıtma işlemlerinin yapılması için kullanılabilirler.

Ülkemiz fayların, volkanik alanların, aktif deprem kuşaklarının bulunduğu bir hat üzerindedir ve bu nedenlerden dolayı termal sular bakımından oldukça zengindir. Termal kaynakların sayısı 1500'den fazladır, ancak 200 kadarı kaplıca olarak işletilmektedir. Kaplıca kaynaklarının mevcut potansiyeline rağmen kaplıca turizmi büyük ölçüde yöresel düzeyde kalmıştır (Yılmaz, 2013). Sıcaklığı 20 °C ve altında olan yeraltı suları sulama amacıyla kullanılmaktadır. Kimyasal madde üretiminde jeotermal sulardan potasyum, lityum, borik asit ve çeşitli minerallerin üretimi için faydalanılmaktadır (Yılmaz, 2013).

Jeotermal kaynakların Türkiye'deki dağılımına bakıldığında bu kaynakların %79'u Batı Anadolu'da, %8.5'i Orta Anadolu'da, %7.5'i Marmara Bölgesi'nde, %4.5'i Doğu Anadolu'da ve %5'i diğer bölgelerde yer almaktadır (URL-2, 2012). Sıcak su kaynakları bakımından %4.5 oranla Türkiye'de dördüncü sırada yer alan Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki jeotermal alanların büyük bir çoğunluğu Erzurum ilinde yer almaktadır ve bu kaynaklar istenilen seviyede ekonomik olarak değerlendirilmemektedirler. Aktif deprem kuşağında bulunan Erzurum-Pasinler jeotermal sahası da Doğu Anadolu'da bulunan önemli jeotermal sahalardan biridir ve bu jeotermal alandan yeterli derecede yararlanılmamaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Erzurum-Pasinler jeotermal alanı Doğu Anadolu'daki önemli jeotermal alanlardan birisidir. Pasinler jeotermal alanında Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından çeşitli yıllarda açılmış sıcak su kuyuları ve kendiliğinden yeryüzüne ulaşmış sıcak su kaynakları bulunmaktadır. Bu çalışmanın asıl amacı, ülkemizin önemli jeotermal alanlarından biri olan Erzurum-Pasinler jeotermal sahasında sıcak su dolaşım sistemini açıklamak ve ısı taşınım modelini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda hidrojeolojik kavramsal modeli oluşturabilmek için jeotermal alanda yer alan sıcak ve soğuk su kaynaklarının hidrokimyasal ve izotopik özellikleri belirlenmiş ve su-kayaç etkileşimi araştırılmıştır.

Çalışmanın amacı doğrultusunda, inceleme alanının 1/100000 ölçekli jeoloji haritası daha önceki çalışmalardan yararlanılarak araştırma amacına uygun olarak yeniden hazırlanmıştır. Bu haritadan yararlanılarak çalışma alanının kavramsal modeli oluşturulmuştur. Bu model ile alanın mevcut durumu belirlendikten sonra belirli koşullarda jeotermal sistemin durumu değerlendirilmiştir. Daha sonra, uygun fiziksel özellikler, sınır ve başlangıç koşulları kullanılarak bu kavramsal model, doğal şartlar için sahaya kalibre edilmiştir.

Hidrokimyasal çalışmaları gerçekleştirmek üzere jeotermal alanda yer alan sıcak su kaynaklarından, jeotermal kuyulardan, yüzey sularından ve soğuk yeraltı sularını temsilen kaynak suyundan, yağışlı, kurak ve ara periyotlarda su örnekleri alınarak kimyasal analizleri yapılmıştır. Ayrıca Devlet Su İşleri (DSİ) ve MTA tarafından çalışma alanında daha önce belirlenmiş olan hidrokimyasal veriler de çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Elde edilen veriler AquaChem 2012.1, ArcGIS (ArcMap 10), Grapher 9 CorelDRAW 12 ve Processing SHEMAT adlı bilgisayar programları kullanılarak değerlendirilmiştir.

Jeotermal sistemin beslenme-boşalma bölgelerinin ve suların kökeninin belirlenmesinde kullanılmak üzere sıcak su kaynak ve kuyularından, soğuk su akiferini temsil eden kaynaklardan ve yüzey sularından alınan örnekler üzerinde izotop analizleri yaptırılmıştır.

Su-kayaç ilişkisini incelemek amacıyla jeotermal sistemi oluşturan kayalardan örnekler alınarak tüm kayaç analizleri yaptırılmıştır.

1.3. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu ve Morfolojisi

Çalışma Alanı, Erzurum İli'nin 40 km doğusunda Pasinler İlçesinde yer almaktadır (Şekil 1.1). Jeotermal sistemi çevreleyen hidrolojik havza, 1/25000 ölçekli H46c3, H47c1, H47c2, H47c3, H47c4, H47d1, H47d2, H47d3, H47d4, I46b1, I46b2, I46b3, I46b4, I47a1, I47a2, I47a3, I47a4, I47b1, I47b2 ve I47b4 paftaları içerisinde yer almakta olup yaklaşık 1532 km² lik bir alanı kapsamaktadır.

Pasinler İlçesi'nin kuzeyinde Tortum ve Narman, doğusunda Köprüköy, güneyinde Karayazı ve Tekman ilçeleri bulunmaktadır. Pasinler Ovası, kuzeybatıda Kargapazarı Dağları, güneybatıda Palandöken Dağları ve Şahvet Dağları ile sınırlanmakta olup dağların yükseltileri 2000-3000 m arasında değişmektedir. Hem kuzeyde hem güneyde ovanın dar bir kesiminde, yüksek dağların önünde bir şerit halinde yayılmış volkanik domlar ovayı sınırlamaktadır (Şekil 1.2).

Pasinler Ovasının deniz seviyesinden yüksekliği ortalama 1700 m kadardır. Ovadaki tarım arazileri, kuzeyinde ve güneyinde yer alan yüksek platolardan kaynaklarını alan akarsular ile onların oluşturduğu Hasankale Çayı ve yer altı suyu ile sulanmaktadır. Ovayı doğu-batı yönünde kat eden Hamam Deresi, Değirmendere, Seliv Deresi ve Müceldi Çayı birleşerek Pasinler ilçe merkezinin hemen batısında Hasankale Çayı adını almakta ve güneydoğuya yönelerek Aras Nehri'ne katılmaktadır.

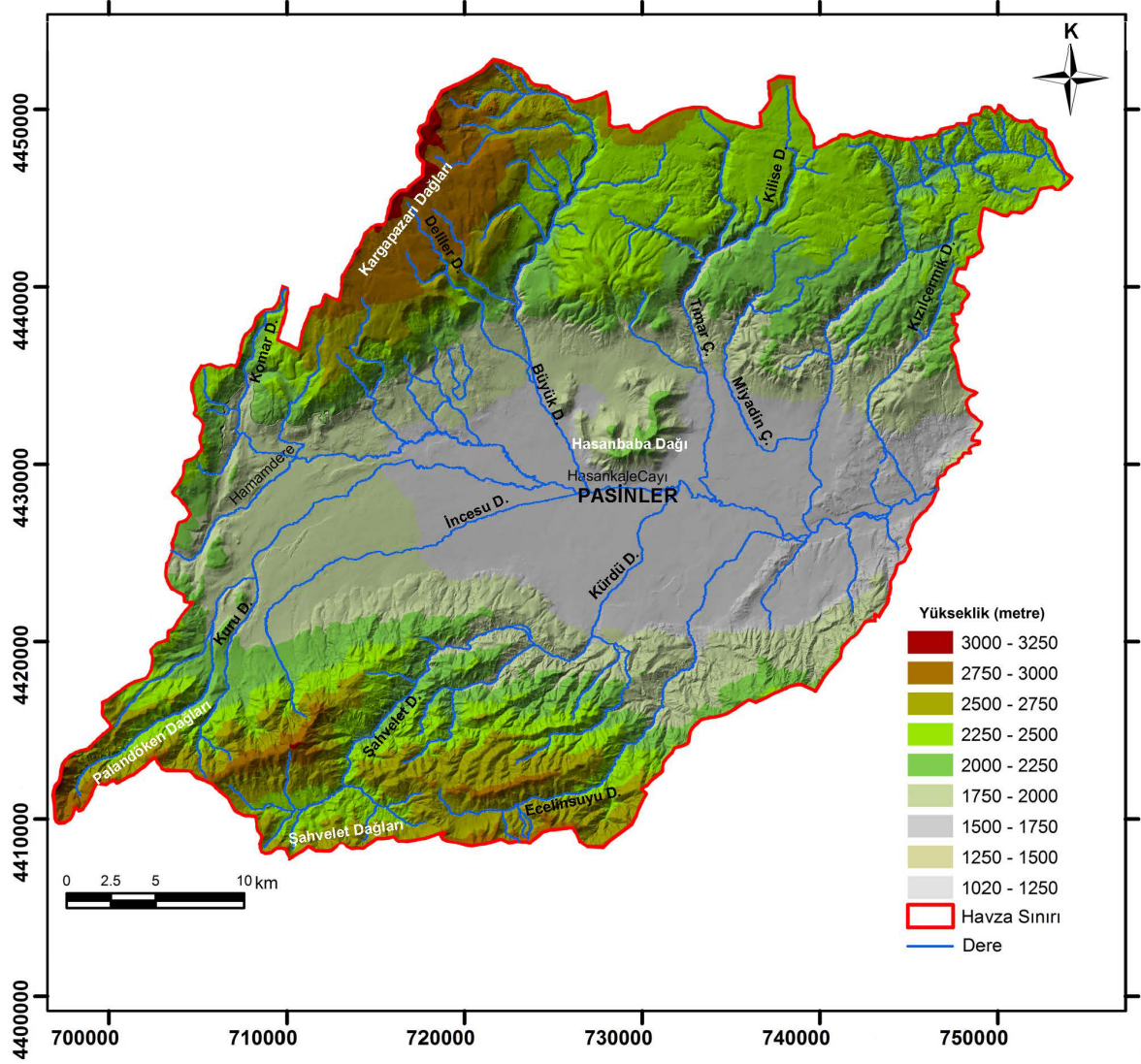
İnceleme alanının kuzeyini sınırlandıran Kargapazarı Dağları, yaklaşık 40-50 km uzunluk ve yaklaşık 15-20 km'lik bir genişlik göstermektedirler. Bu dağların inceleme alanı içinde kalan bölümünde ortalama yükselti, 2000 m'yi aşmaktadır. Yüksek bir plato görünümünde olan bu düzlükler üzerinde, yer yer yükseltileri 3000 m'ye varan tepeler yer almaktadır. Daha çok Kargapazarı Dağları'nın kuzey-güney sınırını oluşturan bu tepeler

güneybatıdan kuzeydoğuya doğru; Baldırkanlıbaşı Tepe (3045 m), Yurtlartereği Tepe (3120 m), Deveyurdu Tepe (3110 m) ve Çamlıyurt (3145 m) Tepe'dir. Pasinler Ovası'nın kuzeyindeki diğer tepelerin yükseltileri, genellikle 2000-2500 m arasında değişmektedir. Açıgın Tepe (2534 m), Eskiyaıyla Tepe (2490 m), Gort Tepe (2367 m), Sivri Tepe (2468 m), ve Ziyaret Tepe (2410 m) kuzeydeki plato düzlükleri üzerinde yer alan tepelerden bazılarıdır (Ek Şekil 1).



Şekil 1.1. Çalışma alanına ait yer belirleme haritası

Çalışma alanının, Kargapazarı Dağları'ndan sonra yer alan ikinci büyük yükseltisi Pasinler İlçe merkezinin hemen kuzeyindeki Hasanbaba Dağı'dır. Araştırma sahasının güneyinde Palandöken Dağları'nın bir kısmı çalışma alanı içerisinde yer almaktadır. Nalbant Dağı, Gavurlu Dağı ve Akbaba Dağı birbirinden ayrılmaksızın Pasinler İlçesi ile Tekman ve Karayazı İlçeleri sınırlarını oluşturarak doğu- batı doğrultusunda uzanırlar.



Şekil 1.2. Pasinler Havzası'nın sayısal yükseklik modeli

1.4. İklim ve Bitki Örtüsü

İnceleme alanındaki, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ait aylık toplam yağış (mm), aylık ortalama sıcaklık (°C) ve aylık toplam buharlaşma (mm) ölçümlerinin yapıldığı

istasyon 2001 yılında kapatılmıştır. Dolayısıyla çalışma alanına en yakın istasyon olan Erzurum'a ait meteorolojik veriler Pasinler İlçesi için kullanılmıştır (Tablo 1.1). Erzurum ile Pasinler arasındaki yükseklik farkı dikkate alınarak sıcaklık verilerinde gerekli yükseklik düzeltmesi yapılmıştır. Bu istasyon kayıtlarından alınan Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan 13 yıllık (2000-2012) rasatların ortalamasına göre yıllık toplam yağış 474.6 mm ve yıllık ortalama sıcaklık 5.55 °C'dir. Ova tabanı ile çevresindeki yüksek dağlar arasında sıcaklık farkları ortaya çıkmaktadır. 3000 m yükseklikteki dağ zirvelerinde yıllık ortalama sıcaklık 0 °C'nin altındadır. En soğuk ay -10.2 °C ile Ocak ayı, en sıcak ay 19.8 °C ile Ağustos ayıdır.

Tablo 1.1. Pasinler İlçesi'ne ait yıllık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri (2000-2012)

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	Yıllık
Aylık Top. Yağış (mm)	56.3	25.2	34.1	73.2	70.6	45.5	28.5	25.2	16.4	52.1	30.7	16.4	474.6
Ortalama Sıcaklık (°C)	-10.2	-8	-1.2	5.8	10.6	15	19.2	19.8	14.6	8.4	0.5	-7.9	5.55

Pasinler Ovası ve çevresinde yağışın dağılışı arazinin rölyef özellikleri ile yakından ilişkilidir. Yağış miktarı ova tabanından çevredeki yükseltilere doğru artmaktadır. Bu artış ovanın kuzey, batı ve güneyinde yüksek dağlar üzerinde artmakta olup, ovanın doğusunda ise yükseltinin fazla olmaması nedeni ile belirgin bir artış göstermemektedir (Geçit, 2009).

Yarı kurak iklim tipi içerisinde yer alan Pasinler İlçesi'nde hakim doğal bitki örtüsü steptir. Pasinler ovasında özellikle ilçe merkezinin güneyinde, vadi tabanlarında veya bazı küçük tepeciklerde küçük birlikler halinde ardıç, sarıçam ve meşe türlerine rastlanmaktadır.

1.5. Önceki Çalışmalar

Pasinler Ovası ve çevresi değişik amaçlara yönelik olarak birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmalar genel jeoloji, petrol jeolojisi, hidrojeoloji, jeomorfoloji, petrografik ve jeokimyasal amaçlı çalışmalar olup, bunlar aşağıda özetlenmiştir.

1.5.1. Jeoloji-Petrol-Petrografik-Jeomorfoloji Amaçlı Çalışmalar

Pasinler Havzası Üst Miyosen'den bu yana bölgede etkin olan sıkışma rejimi altında gelişmiş ve aynı zamanda doğrultu atımlı hareketlerin etkisini taşıyan bir dağ arası havzadır. Sahada örtü lavı özelliğinde bazaltlar yüzeyleir.

Alpin Orojenik Kuşağı içerisinde yer alan Türkiye ana karası, Ketin (1966) tarafından kuzeyden güneye doğru Pontidler, Anatolidler, Toridler ve Kenar Kıvrımları olmak üzere dört tektonik birliğe ayrılmıştır. İnceleme alanı, Pontidleri güneyden sınırlayan ofiyolitli kuşağın üzerinde yer almaktadır.

Bölgenin öncü jeoloji çalışmaları; Mercier (1948) ve Erentöz (1949) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu bölgenin önemli kaya türleri ve stratigrafisi genel çizgileriyle belirlenmiştir. İnceleme alanında daha sonra, amaçları farklı 1/25000 ölçekli ayrıntıda pek çok çalışma yapılmıştır.

Pamir ve Baykal (1943), Tekman yöresinde yaptığı çalışmalarında, altta Paleozoyik yaşlı metamorfik kompleks ve onun üstünde yer alan serpantin kompleksinin varlığından söz etmiştir.

Erentöz (1949), bölgede yaptığı çalışmada, yeşil kayaçlar kompleksi olarak tanımladığı ofiyolitlerin Anadolu'da geniş sahalarda yayılmış olduğunu ve bunları bazik ve ultrabazik intrüzyonlar, yastık lavlar, spilitler, diyabazlar, serpantinize olmuş peridotit, radyolarit, killi şist veya kalker adeselerinden oluşmuş bir kompleks olarak tanımlamıştır.

Akkuş (1965), "Pasinler (Hasankale) Havzasının 1/25000 Ölçekli Detay Petrol Etüdü" adlı çalışmasında bölgenin petrol olanaklarını incelemiş ve stratigrafik istifini ortaya koymuştur.

Demirtaşlı vd. (1965), Tekman yöresinde yaptığı çalışmada, alttaki metamorfik kompleksi Akdağ Metamorfikleri olarak tanımlamış ve bunların üzerinde Mesozoyik yaşlı ofiyolitli serinin bulunduğunu belirtmiştir.

İlker (1966), Hacıömer yöresinde yaptığı çalışmada, temeldeki metamorfikleri Akdağ- Karadağ Masifi olarak tanımlamış ve bu metamorfiklerin üzerinde Üst Kretase yaşlı ofiyolitlerin olduğunu söylemiştir.

Pelin (1970), Pasinler'in güneyinde yapılan Pasinler-2 petrol sondajı için hazırlanan "MTA Pasinler-2 kuyu Raporu" isimli çalışmasında bölgenin stratigrafik istifini ortaya çıkarmış ve istifin petrografik, paleontolojik ve kimyasal değerlendirmesini yapmıştır.

Aziz (1971), Palandöken yöresinde yaptığı incelemede, temeli oluşturan metamorfite Akdağ Metamorfite, üstteki ofiyolitleri ise ofiyolitik seri olarak tanımlamıştır.

Havur (1972), Söylemez ve Hacıömer yöresinde yaptığı çalışmada, ofiyolitlerin Akdağ Metamorfite ile birlikte havzanın temelini oluşturduklarını ve genellikle koyu yeşil renkli, bileşimleri oldukça değişim gösteren bu birimi oluşturan kaya tiplerinin peridotit, gabro, norit, diyabaz ve spilitler olduğunu belirtmiştir. Ayrıca kahverengi-gri kireçtaşı, sarımsı bej renkli dolomitik kireçtaşı, kahve renkli silisifiye kumtaşı, şarabi renkli kalsit damarlı ve radyolaritli kireçtaşı ara tabakalarını kapsadıklarını ve bir karmaşık halinde bulduklarını belirtmiş ve ofiyolitik karmaşık olarak tanımlamıştır.

Erdoğan (1972), Söylemez ve Karayazı yöresinde yaptığı çalışmada, ofiyolitlerin Akdağ Metamorfite ile birlikte havzanın temelini teşkil ettiğini söylemiştir. Ofiyolitlerin genellikle koyu yeşil renkli, çok çatlaklı ve serpantinleşmiş olduğunu belirtmiş ve genellikle peridotit, gabro, norit, diyabaz ve spilit bileşimde olduğunu ifade etmiştir. Bu karmaşığın alt yaşının içinde bulunan fosilli kalker anklavları yardımıyla Neokomien'e kadar indiğini, üst yaşının ise Maestrihtiyen olduğunu belirtmiştir. Ofiyolitik faaliyetlerin Maestrihtiyen ortalarına kadar devam ettiğini ve karmaşığın bundan sonra kısmen dahi olsa yükselerek aşınmaya maruz kaldığını belirtmiştir.

Gedik (1978), "Doğu Anadolu'da Açılan Stratigrafik Açınama Sondajları" adlı çalışmada, Doğu Anadolu Bölgesi'nde açılan stratigrafik sondajların kuyu kütüklerini ve stratigrafisini açıklamıştır.

Pelin (1981), "Pasinler (Erzurum) Havzasında Ana Kaya Özelliklerinin ve Petrol Oluşumunun Açıklanması" adlı çalışmada, Rock-Eval ve vitrinit yansıması değerlerinin birlikte kullanılmasıyla katajenez yorumu yapılmış ve sonuçta kuyuları kesen Üst Miyosen bazalt dayklarının ısı etkisiyle katajenez hızlandırdığı görüşüne varılmıştır. Havzada hazne kaya gelişmesi olmadığı için en erken Üst Miyosen'de oluşan petrolün tektonik gelişmeye bağlı olarak sızıntılar yaptığı sonucuna varılmıştır.

Yılmaz ve Şener (1984), "Erzurum-Pasinler, Erzincan-Çayırılı, Kars-Tuzluca, Malatya-Hacılar stratigrafik açınama kuyularına ait örneklerin X-ışınları tekniği ile incelenmesi" adlı çalışmalarında Erzurum-Pasinler havzasında açılan Pasinler-2 ve Pasinler-3 kuyuları benzer formasyonları kesmişlerdir. Bu kuyularda yapılan analizlere göre bölgede organik olgunlaşmasını tamamlamış ana kaya bulunmadığını söylemişlerdir.

Koçyiğit (1985), bölgede Karayazı Fayı ile ilgili yaptığı çalışmasında, Anadolu ofiyolitli karışığın tüm Anadolu'da yaygın olan, tektono-sedimanter kökenli, allokton bir birim olduğunu söylemiştir. Özellikle Doğu Anadolu Bölgesi'nde ofiyolitlerin genç karasal tortullar ve volkanitlerce örtülmüş olmasına karşın, aşınmış pencereler, tektonik klipler ve fay kuşakları boyunca yüzelediğini belirtmiştir. Değişik derecede tektonizma ve başkalaşıma uğramış serpantinit, peridotit, gabro, kuvars-diyorit, olivinli bazalt, yastık lav, spilit, diyabaz, tuf, pelajik kireçtaşı, radyolarit, değişik yaş ve dokulu kireçtaşı blokları (Jura-Kretase yaşlı olanlar egemen) ve türbiditik kumtaşlarının tektono sedimanter karışımı olduğunu söylemiştir.

Gedik (1985), "Tekman (Erzurum) Havzasının Jeolojisi ve Petrol Olanakları" adlı çalışmasında bölgenin genel jeolojik özelliklerini ortaya koymuş ve alanda bulunan Katranlı Deresi'nde petrol sızıntısı ve Mesozoyik-Tersiyer yaşlı formasyonlarda petrol için ana, hazne ve örtü kaya olabilecek seviyeler bulunduğunu belirtmiştir. Bu seviyelerden Tekman havzasındaki Kretase-Üst Miyosen zaman aralığındaki istif, örtü kaya açısından oldukça elverişli olduğunu, Derviş Halit formasyonu üzerinde yer alan Haytakomu şeylleri örtü kaya olabileceğini, Oligosen yaşlı Ağcakoca şeylleri hem ana kaya, hem de iyi örtü kaya özelliğinde olduğunu, Alt Miyosen yaşlı Hürübaba formasyonunun kalın şeylleri ise ideal örtü kaya olduğunu, Haneşdüzü formasyonundaki resifal kireçtaşları üzerindeki şeyller de iyi örtü kayası özelliğinde olduğunu belirtmiştir.

Yılmaz vd. (1986, 1989), Erzurum güneydoğusunda (Hınıs-Tekman- Karayazı ve Sakaltutan Dağı Yöresi) yaptıkları çalışmalarda, ofiyolitli birimleri farklı ortamların ürünü üç yapısal birime ayırtlamışlardır. Bunlar alttan üste doğru; metamorfitletler, ofiyolitli karışık ve karışığın örtüsü ile ofiyolit napları olmak üzere sıralanmıştır. Metamorfitletleri Karataştepe Metamorfitletleri olarak adlandırmışlar ve bunların Triyas yaşlı pelajik meta volkano-tortul dizi niteliğinde olup yeşilşist fasiyesinde bir metamorfizma geçirdiklerini söyleyerek bu birimi Akdağ Metamorfitletleri'nden ayırmışlardır. Ofiyolitli Karışığı, Bozyokuştepe Karışığı olarak adlandırmış ve çoğunlukla volkano-tortul bir hamur ve yaşlı Triyas ile Senomaniyen arasında değişen farklı kökene sahip bloklardan oluştuğunu söylemişlerdir. Karışığın, metamorfitletlerin üzerinde stratigrafik ilişkili olarak yer aldığını ve üste doğru Kampaniyen yaşlı pelajik kireçtaşlarının egemen olduğu birime de (Üzümpınar Formasyonu) uyumlu olarak geçtiğini belirtmişlerdir. Ofiyolit naplarını Şahvelet Ofiyoliti olarak adlandırmışlar ve başlıca serpantinit, peridotit, gabro ve bunları kesen diyabaz dayklarından oluştuğunu ve yukarıda sunulan birimlerin üzerinde yer

aldığını belirtmişlerdir. Ofiyolitli karışığın, Senomaniyen-Kampaniyen aralığında, okyanus kabuğunun sıkışıp dilimlenmesine bağlı olarak oluştuğu ve buna koşut olarak ofiyolit naplarının yerleştiğini ileri sürmüşlerdir. Ofiyolitli birimler, Maestrihtiyen-Eosen sırasında yeniden sıkışıp yükselirken, bu dönemde oluşan havzaya da yeniden aktarılmış ve Oligosen başında tümüyle su yüzü olduklarını söylemişlerdir.

Şaroğlu ve Yılmaz (1986), “Doğu Anadolu’da Neotektonik Dönemdeki Jeolojik Evrim ve Havza Modelleri” adlı çalışmalarında, sıkışma tektonik rejimi ile karakterize olan Doğu Anadolu’da, Neotektonik dönem boyunca kıvrımlar, bindirmeler, doğrultu atımlı faylar ve açılma çatlaklarının geliştiğini belirtmişlerdir. Bu yapıların denetiminde dağ arası ve çek-ayır olmak üzere iki tür havzanın geliştiğini söylemiş ve Muş, Ahlat-Adilcevaz, Karayazı-Tekman havzaları dağ arası, Kağızman-Tuzluca havzası ise çek-ayır türünde havzalar olduğunu ve Erzurum-Pasinler-Horosan havzasında doğrultu atımlı fayların da etkili olduğu bir tür dağ arası havza olduğunu belirtmişlerdir.

Korkmaz vd. (1991), “Türkiye’deki Bazı Tortul Havzalara Petrol Potansiyeli Açısından Bir Bakış” adlı çalışmalarında Türkiye’nin değişik bölgelerinde yer alan tortul havzaların çeşitli jeolojik özellikleri ile petrol potansiyellerini yeniden yorumlamaya çalışmışlardır. Doğu Anadolu’daki havzalarda yer yer ana kaya fasiyesi ile petrol oluşumuna rastlandığını ancak tektonizma ve volkanizma nedeniyle yapılan sondajlardan bir sonuç elde edilemediğini belirtmişlerdir.

Keskin (1994), “Erzurum-Kars Platosu’nda çarpışma ile ilişkili volkanizmanın kökeni, KD Türkiye” adlı çalışmasında sahanın volkanizmasıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında kayaçlara en karakteristik mostralarının görüldüğü yerlere göre adlandırma yapmıştır. Buna göre Pasinler Ovası’nın kuzeybatısındaki Kargapazarı dağlarında gözlenen kayaçları Kargapazarı Volkaniti olarak adlandırmıştır. Bu volkanik kayaçlar; andezit, bazalt, riyolit, ignimbirit ve pomzadır.

Ünal (1994), “Pasinler İlçesi’nin Coğrafi Etüdü” adlı çalışmasında alanın iklimi, nüfusu, morfolojik özellikleri gibi coğrafi özelliklerini ortaya koymuştur.

Geçit (2002), “Pasinler Ovası ve Çevresinin İklimi” adlı çalışmasında bölgenin iklim özelliklerini ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuş, bölgenin Thorntwaite’a göre iklim tipinin karasal iklim tipinde olduğunu belirtmiştir.

Collins vd. (2005) “Fluvial stratigraphy and palaeoenvironments in the Pasinler Basin, Eastern Turkey” adlı çalışmasında Pasinler havzasındaki Pleistosen ve Holosen vadi taban sedimentlerini incelemişlerdir.

Kılıç (2006), “Pasinler (Erzurum) Kuzeyindeki Volkanik Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi” adlı çalışmasında alandaki volkanitleri piroklastik kayaçlar, bazaltik andezit, andezit, dasit, riyolit ve perlit olmak üzere altı farklı kaya birimine ayırtlayarak incelemiştir.

Gelişli ve Maden (2006), “Analysis of potential field anomalies in Pasinler-Horasan Basin, Eastern Turkey” adlı çalışmalarında Pasinler-Horasan Havzası’nda gravite, magnetik ve tüm yatay türetilmiş gravite haritalarını kullanarak Moho’nun derinliğini 42.9 km, Üst Kretase’nin kalınlığını 12.8 km ve ortalama sedimanter havzanın kalınlığının 4.7 km olduğunu belirtmişlerdir.

Collins vd., (2008), “Geomorphological evidence for a changing tectonic regime, Pasinler Basin, Turkey” adlı çalışmalarında Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Landsat ve hava fotoğraflarını kullanarak Pasinler Havzası’nın tektoniğini yeniden incelemişlerdir.

Yıldırım (2008), “Tekman-Pasinler (Erzurum) Arasında Yüzeyleyen Ofiyolitik Birimlerin Jeolojisi ve Petrografik Özellikleri” adlı çalışmasında, alanda yer alan Şahvelet Ofiyolitleri’ne ait kayaçların; dalma-batma zonunda oluşmuş ada-yayı toleyitik karakterli bir magmadan türediklerini belirtmiştir. Neotetis’in kuzey kolunun Üst Kretase’den itibaren kuzeye doğru dalmaya başlaması ile bu okyanus kabuğu üzerindeki, okyanusal kabukta gelişen yeni okyanus kabuğu (Suprasubduction) ürünleri olduğu sonucuna varmıştır.

1.5.2. Hidrojeoloji ve Jeotermal ile İlgili Yapılan Çalışmalar

1.5.2.1. Sıcak Sularla İlgili Yapılan Çalışmalar

Pasinler İlçesi’nde sıcak su aramaya yönelik çalışmalar 1987 yılında etüd düzeyinde başlamıştır. Bu yıllardan sonra yapılan kapsamlı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Küçük (1991), “Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-1A sıcak su kuyusu sondaj bitirme raporu” adlı çalışmasında, sıcak su sondajı ile ilgili parametreleri değerlendirmiştir. Bu çalışmada 200.5 m derinliğinde açılan bu kuyuda 75 l/s debide ve 42 °C sıcaklıkta akışkan olduğu belirtilmiştir.

Uluşahin (1992), Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-2 sıcak su kuyusu kuyu bitirme ve koruma alanları adlı çalışmasında PS-2 nolu sıcaksu kuyusu açılması, sondajda geçilen

birimler ve belirlenen koruma alanlarını anlatmaktadır. Bu çalışmada derinliği 200 m olan PS-2 sıcak su kuyusundan 42 °C sıcaklıkta ve 95 l/s debide jeotermal akışkan elde edilmiştir. Sondaj sonucunda elde edilen bu sıcak suyun klorür içeren sodyumlu-bikarbonatlı termal sular sınıfına girdiği saptanmıştır ve kaplıca ve çevresindeki termal kaynakların fiziksel ve kimyasal kirlenmelere karşı koruma alanları tespit edilmiştir.

Göçtü vd. (1992), Pasinler Havzasında gravite manyetik ve elektriksel metodları kullanarak jeofizik çalışmaları yapmışlardır. Ayrıca PS-1A kuyusunda yoğunluk ve gamma norton logları almışlardır. Önceki araştırmacılar tarafından, çalışma alanında gravite etüdü 22 profil üzerinde, 250 m aralıkta toplam 508 noktada ölçümler alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bölgede eğim atımlı fayların olamayacağı tespit edilmiştir ve son olarak Pasinler Havzası'nda alüvyon altında geniş ve derinlere doğru yaygın bir riyolit- riyolitik tüf kütlelerinin olduğunu tahmin etmişlerdir.

Taşçı ve Yurtseven (1995), "Pasinler (Erzurum) kaplıcası PS-3 nolu sıcaksu sondajı Kuyu bitirme ve koruma alanları" raporunda PS-3 nolu sıcaksu kuyusu açılması, sondajda geçilen birimler ve belirlenen koruma alanlarını anlatmaktadırlar. Bu çalışma sonucunda derinliği 205 m olan jeotermal sondajdan elde edilen suyun sıcaklığı 40 °C, ve debisinin 110 l/s olduğu belirtilmiştir. Sıcak suların analizi sonucu suların, florür içeren sodyumlu-bikarbonatlı termal sular sınıfına girdiği belirlenmiştir.

Aynalı (2000), "Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-4 sıcaksu kuyusu sondaj faaliyet raporu" adlı çalışmasında Jeotermal alanda 500 m derinliğinde açılan PS-4 adlı kuyudan 50 l/s debide ve 43 °C sıcaklıkta akışkan üretildiğini söylemiştir.

Aynalı (2000), "Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-5 Sıcaksu Kuyusu Sondaj Faaliyet Raporu" adlı çalışmasında PS-5 sıcaksu sondajı ile ilgili parametreleri değerlendirmiştir. Bu çalışmada 160 m derinliğinde açılan bu kuyudan 70 l/s debide ve 40 °C sıcaklıkta akışkan üretildiği belirlenmiştir.

Esen (2001), "Pasinler (Erzurum) Belediyesi Jeotermal Sahası Hidrojeolojik Raporu" Adlı çalışmada, Havzada bulunan sıcak suların K-G doğrultulu açılma çatlakları boyunca yüzeye ulaştıkları, sahanın düşük entalpili bir termal sistem içerdiği, sıcak suların tamamının sodyumlu- klorürlü-bikarbonatlı termal sular sınıfına girdiği belirlenmiştir.

Aynalı ve Bulut (2002), "Pasinler (Erzurum) Belediyesi Jeotermal Ön Etüt Raporu" adlı çalışmalarında, Pasinler jeotermal alanında yapılan daha önceki çalışmaları derlemişlerdir. Çalışmalarında alandaki alüvyon kalınlığının 100-200 m arasında olduğunu, Pasinler ilçesinin de içinde bulunduğu bölgede yeraltı suyunun akış yönünün kuzeyden

güneye olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bölgede açılan sondaj kuyularına ait kimyasal analizler incelendiğinde suların bazik karakterde oldukları, yüzeye ulaşan sıcak sulara başka su karışımlarının olmadığını söylemişlerdir.

Akkuş vd. (2005), “MTA Genel Müdürlüğü, Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri” adlı çalışmalarında Türkiye’deki 25 °C ve daha yüksek sıcaklığa sahip sıcak su kaynağı veya sıcak su kuyularının bulunduğu 63 il içerisindeki jeotermal alanlara ait bilgiler verilmiştir. Bu envanterde Pasinler jeotermal alanına ait kaynaklar ve sondajlar incelenmiş, bu kaynaklar ve kuyulardan elde edilen suların kimyasal analizleri sunulmuştur.

Mamontotov vd. (2005), “Formation of the Geothermal Resources of the North-Eastern Part of Turkey” adlı çalışmalarında Türkiye’nin kuzeydoğusunun önemli jeotermal kaynaklara sahip olduğunu, bu kaynakların geliştirilip kullanılması bölgede ekonomik ve sosyal gelişim için önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Bektaş vd. (2007), “Regional Geothermal Characterisation of East Anatolia from Aeromagnetic, Heat Flow and Gravity Data” adlı çalışmalarında, Doğu Anadolu’nun magnetik anomali verilerinden yaptıkları Curie nokta derinlik haritalarından bölgedeki manyetik kalınlığın 13-23 km olduğunu, kabuktaki yüksek sıcaklık anomalisi bölgede 45°C’den büyük sıcaklıktaki suların ve genç yaştaki volkaniklerin varlığına işaret ettiğini belirtmişlerdir. Sahadaki jeoloji, manyetik ve gravite anomali haritalarına dayanarak sıcak suların üst kabuktaki magma odaları ile ilişkili olduklarını belirtmişlerdir.

Gökmenoğlu vd. (2009), MTA tarafından gerçekleştirilen “Doğu Anadolu Jeotermal Aramaları EHD-1” adlı proje kapsamında Pasinler-Küçüktüy köyü arazisi içerisinde 750 m derinliğinde açtıkları sondaj kuyusundan 51.6 °C sıcaklığında ve 50 l/s artezyen sıcak su elde etmişlerdir.

Toy vd. (2010), “Erzurum Termal Turizm Potansiyeli” adlı raporlarında önceki çalışmalardan da yararlanarak sahadaki jeotermal kaynaklar hakkında bilgiler vermişlerdir. Bu araştırmacılar bölgedeki termal tesislerin düşük entalpili sahalar olduğunu, modern termal tesislere ihtiyaç duyulduğunu, bölgede yeterli sayı ve kapasitede işletme ve reenjeksiyon kuyularının açılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Şimşek (2012), “Erzurum-Pasinler Uzunahmet-Hamamderesi” adlı jeotermal kaynaklar için işletme faaliyet raporu çalışmasında Hamamderesi alanında bir adet sıcak su kaynağının bulunduğunu, bu kaynağın sıcaklığının 32.6 °C, pH’ının 7.35 ve elektiriksel iletkenliğinin 3990 µS/cm sahip olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca bu kaynağın sol yönlü

doğrultu atımlı fay ile eğim atımlı normal fayın kesişme noktasından yüzeye çıktığını belirtmiştir.

1.5.2.2. Soğuk Sularla İlgili Yapılan Çalışmalar

Ercan (1956), “Erzurum Pasinler Ovası Hidrojeolojik Etüd Raporu” adlı çalışmasıyla Pasinler Ovası’nın yeraltısuyu etüdü gerçekleştirilmiştir. Etüd Sahasında Kretase yaşlı mermerleşmiş gri renkli kreçtaşı ve radyolaritler, serpantinitle, Eosen yaşlı konglomera, kıltaşı, kumtaşı ve marnlar, Oligosen yaşlı jipsli marnlar ile kumtaşları, Miyosen yaşlı kireçtaşı ve trakit ve andezitler, Pliyosen yaşlı az çimentolu, gri kireçtaşı, bazaltlar, Pleistosen yaşlı bazaltlar ile bunları çarpaz şekilde örten kumtaşları ile Kuvaterner yaşlı çok kalın bir alüvyon konisi yer aldığını belirtmiştir. Ovada yeraltı suyu ihtiva eden yalnız alüvyonlar olup, 200-300 m arasında değişen araştırma kuyuları açılmasını önermiştir.

Emre (1962), “Erzurum Pasinler İzirmik- Sos- Müceldi Köylerinin Hidrojeolojik Etüd Raporu” adlı çalışmayla Erzurum Pasinler İzirmik, Sos ve Müceldi Köylerinin içme ve kullanma su ihtiyaçlarının karşılanması planlanmıştır. Etüd sahasında Neojen’in marn ve killeri ile ara katkılı olarak Miyosen’e ait birimler ve Kuvaterner’in kum ve çakıllarından oluşan alüvyon birikintileri yer almaktadır. Köylerin içme ve kullanma su ihtiyaçlarının karşılanması için 1 adet su sondaj kuyusu açılması önerilmiştir. Ancak bu kuyulardan alınacak suların bünyelerinde kükürt olma ihtimali de belirtilmiştir.

Atalay vd. (1972), “Pasinler Ovası Hidrojeolojik Etüd Raporu” adlı çalışmalarında Pasinler Ovası’nda yeraltısuyu kaynaklarını geliştirme imkanlarını araştırarak hangi derinlikte ne kadar ve ne kalitede su olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmada Pasinler Ovası’nın jeolojisi, hidrojeolojisi ve jeofizik çalışmaları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Bölgede bulunan 13283, 12551 ve 12569 nolu kuyularda pompaj deneyleri yapılmıştır.

Aydın vd. (1998), “Erzurum Pasinler Korucuk Köyü Münferit Hidrojeolojik Etüd Raporu” adlı çalışma Erzurum Pasinler Korucuk Köyü civarında üst akiferden alınacak yeraltısuyunun kalitesini tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Etüd Sahasında Pasinler ovasının jeolojik yapısı hakim olup, en yağın birim kil, kum ve çakıl depozitlerinin oluşturduğu Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yer almaktadır. Etüd sahasında 1 adet 50 m derinlikte araştırma su sondaj kuyusu önerilmiştir. Açılan 52745 nolu kuyudan iyi kalitede su alınmıştır.

Aydın vd. (1998), “Erzurum Pasinler Alvar Beldesi Münferit Hidrojeolojik Etüd Raporu” adlı çalışma, Erzurum Pasinler Alvar Beldesi arazilerinde yeraltısuyu imkanlarını araştırmak amacıyla yapılan bir çalışmadır. Etüd Sahasında Pasinler Ovası'nın jeolojik yapısı hakim olup, en yagın birim kil, kum ve çakıl çökellerinin oluşturduğu Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yer almaktadır. Etüd sahasında 1 adet 150 m derinlikte araştırma su sondaj kuyusu önerilmiştir.

1.5.3. Matematiksel Modellemeler ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Dilek (1973), “Akiferlerin Matematiksel Modelle İncelenmesi Pasinler (Erzurum) ve Çamlıbel (Tokat) Ovalarına Uygulamalar” adlı çalışmada Pasinler Ovası'nın 1969 verilerine göre, permenant ve transitar rejimde matematiksel modelini yapmıştır. Özellikle ovanın batı yöresini teşkil eden ağlar dışındaki ağlarda hesap ve gözlem sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğunu söylemiştir. Batı bölgesindeki değerlerin farklı oluşunu verilerin aynı anda toplanmamış olması ve sağlıklı olmaması ile açıklamıştır.

Akan (2002), “Afyon Ömer Gecek Jeotermal Sisteminin Modellenmesi” adlı çalışmada, sıcak su dolaşım sistemini ortaya koymak ve işletme koşullarının sisteme etkisini göstermek amacıyla sıcak su akiferindeki basınç ve sıcaklık dağılımı HST3D modeli aracılığıyla benzeştirilmiştir. HST3D Programı ile Ömer-Gecek jeotermal sahasında farklı derinliklerdeki kuyulara reenjeksiyon yapılması sonucunda termal akiferdeki basınç ve sıcaklık koşullarında ne tür değişikliklerin meydana geleceği ve kullanımdan dönen jeotermal suyun hangi derinliğe verilmesinin daha uygun olacağını incelemiştir. Bu çalışmaya göre AF-4, AF-22 numaralı kuyular ile Reen adı verilen hayali bir kuyuda 700-800 m derinliğe reenjeksiyon işlemi yapılmıştır. Model sonuçlarına göre 700-800 m derinliğe 20 yıl süreyle yapılacak olan reenjeksiyon işleminin, termal akifer dinamikleri üzerinde bir etkisinin olmadığı, buna karşılık sistem içerisinde soğumayı önlediği belirlenmiştir.

Can (2002), “Jeotermal Rezervuarların Performanslarının Sonlu Elemanlar Metodu İle Belirlenmesi” adlı çalışmasında, Denizli-Kızıldere jeotermal rezervuarında 1984-1998 yılları arasında yapılan jeotermal akışkanın üretimi sonucunda rezervuar basıncında meydana gelen düşümden hareketle rezervuar kalınlığını 1200 m, porozitesini 0.15 ve permeabilitesini $4.17 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ olarak bulmuştur. Bu jeotermal alan için altı değişik üretim

senaryosu uygulanarak her bir üretim senaryosu için ortalama rezervuar ömrü ile her bir üretim kuyusunun ömürleri ayrı ayrı belirlenmiştir.

Budak (2004), “Balçova Jeotermal Alanı'nın Rezervuar Simülasyonu” adlı çalışmasında genel akışkan ve ısı transferleri için yazılmış Fluent programı kullanılarak Balçova jeotermal sahasının rezervuar simülasyonu incelenmiştir. İlk önce alanın kavramsal modeli oluşturulmuş ve bu kavramsal modelden de sahada bulunan Agamemnon-I fayının baskın fay olduğu ve derinlerden gelen sıcak suyun bu fayı kullanarak yüzeye doğru yükseldiği varsayılmıştır. Kavramsal modelin geometrisi Gambit mesh programı kullanılarak çizilmiş ve meshlenmiştir. Meshlenmiş rezervuar Fluent programına aktarılıp burada verilen sınır şartları altında çalıştırılmış, Agamemnon-I fayı boyunca ısı akısının gerçekleştiği bulunmuş ve rezervuarın üç boyutlu sıcaklık dağılımı oluşturulmuştur.

Sarak vd. (2005), “Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Rezervuarlar İçin Boyutsuz Rezervuar Modelleri” adlı çalışmalarında, jeotermal rezervuarın üretim davranışının boyutsuz rezervuar modellemesi yöntemi ile modellenmesi konusunu tartışmışlardır. İncelenen modellerde üretim, enjeksiyon ve doğal beslenmenin, düşük sıcaklıklı ve sıvının etken olduğu bir jeotermal rezervuarın mevsimsel basınç veya su seviyesi üzerindeki etkileri göz önüne alındığı vurgulanmıştır. Modellemede rezervuar ve akifer ayrı ayrı tanklar olarak temsil edilmekte ve beslenme kaynağının etkisi incelenmektedir. Model sonuçları sabit debide üretim/enjeksiyon durumunda analitik ifadeler şeklinde verilmekte, debi değişimleri Duhamel İlkesi yaklaşımıyla modellenmiştir. İzlanda'daki üç jeotermal sahanın yanısıra Yeni Zelanda'daki bir jeotermal sahanın verileri ve ayrıca Türkiye'den Kızıldere jeotermal sahası verileri değerlendirilerek, model sonuçlarıyla saha sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar sunulmuştur.

Fırat Ersoy (2007), “Gümüşhacıköy (Amasya) Akiferi'nin Yeraltısuyu Akım Modeli” adlı çalışmasında Gümüşhacıköy Akiferi'nde hesaplanan değişik yıllara ait hidrolik yük verilerine göre, zaman içinde kuyulardan çekimin artmasına bağlı olarak hidrolik yüklerin ovanın doğusuna doğru alçaldığı belirlenmiştir. Hidrolik yük değerleri kullanılarak MODFLOWP programında modelin kalibrasyonu yapılmıştır. Gözlenen ve hesaplanan hidrolik yük değerleri arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Gümüşhacıköy Akiferi'ne ait yeraltısuyu akım modelinin sonuçlarına göre, gelecekte akiferden çekilecek su miktarının artması durumunda yeraltısuyu seviyelerinin dahada azalacağı tespit edilmiştir.

Özkaya (2007), “Kızıldere Jeotermal Alanı'nın Sayısal Modellenmesi” adlı çalışmasında Kızıldere jeotermal sahasının eşışıl olmayan mekanizması, basınç ve sıcaklık değişkenleri için simüle edilmiştir. Bu amaçla, jeolojik durum ve alanda daha önce açılmış bulunan kuyular dikkate alınarak, sahanın bir sonlu elemanlar modeli (750 nod dört-nodlu eleman) formüle edilmiştir.

Polat (2010), “Balçova Jeotermal Sahası'nın Sayısal Modellenmesi” adlı çalışmada Balçova jeotermal sahası için sayısal bir model oluşturulmuştur. Çalışmada sayısal modelleme için simülasyon programı olan TOUGH2 ve bu programın grafiksel arayüzü olan Petrasim kullanılmıştır. Sahanın doğal durum modellemesi sahanın kavramsal modeli temel alınarak yapılmıştır. Modellemenin son aşamasında sahanın gelecekteki performansı üç farklı senaryo ile belirlenmiştir.

Akar (2012), “Seferihisar ve Balçova Jeotermal Alanlarında ve Çevre Akiferlerinde Akışkan Akımının Modellenmesi” adlı çalışmada, jeolojik, hidrojeolojik, hidrojeokimyasal çalışmalardan elde edilen veriler kütle ve ısı taşınımını birlikte çözebilen FeFlow yazılımı ile değerlendirilmiştir. Sayısal model sonucunda hidrotermal ve hidrokimyasal anomalilerin, deniz suyunun girişim yaptığı ana faylar boyunca oluşan termal konveksiyon ve topografya denetimli akımın sonucu ortaya çıktığı bulunmuştur. Ayrıca hazne kaya boyunca oluşan ve temel kayayla sınırlanan bölgedeki konveksiyon akımları jeotermal suların hareketini belirlemekte ve bazı tektonik ortamlarda deniz suyu girişimine neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Rogiers (2014) “Demonstrating large-scale cooling in a Variscan terrane by coupled groundwater and heat flow modelling” adlı çalışmasında SHEMAT programını kullanarak yeraltısuyu ve ısı taşınımı modeli yapmıştır. Model sonucunda Variscan-Belçika'da Soumagne, Havelange ve Grand-Halleux derin kuyularında üst kabuktan yaklaşık 2 km derinde ısı akısının değişimi 20-60 mW/m² daha, derinlerde ise 60-150 mW/m² olduğu gözlenmiştir. Modelin kalibrasyonu üç kuyudaki sıcaklık verileri ile yapılmış ve iyi bir sonuç elde edilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmaları, Mayıs 2011, Mayıs 2012, Ağustos 2012, ve Kasım 2012 tarihlerinde jeolojik çalışmalar, yerinde ölçüm ve örnekleme çalışmaları şeklinde yürütülmüştür. Jeolojik çalışmalarda 1/25000 ölçekli topografik haritalar ve inceleme alanına ait daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından hazırlanmış 1/100000 ölçekli jeolojik haritalar kullanılmıştır. Formasyon sınırları arazide takip edilerek farklı araştırmacıların farklı isimlerle adlandırdığı aynı kayaç grupları tek bir formasyon olarak değerlendirilmiştir. Jeotermal sistemin rezervuar kayacını oluşturan volkanik kayalardan örnekler alınmıştır.

Arazi çalışmaları esnasında Pasinler jeotermal alanında (Şekil 2.1) sıcak, soğuk ve yüzey su kaynaklarının yerleri tespit edilmiştir. Bu kaynakların çevrelerinde çalışmalar yapılarak o bölgedeki jeolojik ve tektonik unsurlar önceki çalışmalardan da yararlanılarak belirlenmiş, sıcak ve soğuk su kaynaklarının birbirleri ile olan mesafeleri ile morfolojik ve tektonik ilişkileri göz önünde bulundurularak su alınması uygun olan noktalar belirlenmiştir.

Yerinde ölçüm çalışmalarında havzadaki sıcak su kaynakları ve kuyularında, soğuk su kaynağında ve yüzey sularında EC (elektriksel iletkenlik), pH, T (sıcaklık), tuzluluk, TDS (Toplam Çözünmüş Madde Miktarı), DO (Çözünmüş Oksijen) ölçümleri yağışlı, kurak ve ara dönemleri temsil etmek üzere üç kez YSI-556 model çoklu parametre ölçer ile yapılmıştır.

Ölçümler sırasında kullanılan probalar her ölçüm öncesi ve sonrasında saf su ile yıkanarak korunmuş ve her arazi çalışmasından önce buffer solüsyonları ile günlük kalibrasyonları yapıldıktan sonra çalıştırılmıştır.

Jeotermal ve soğuk suların kimyasal içeriklerini ve değişimlerini belirlemek için Mayıs 2011, Mayıs 2012, Ağustos 2012 ve Kasım 2012 dönemlerinde sıcak su kaynakları ve kuyularından, soğuk su kaynağından ve yüzey sularından su örnekleri alınmıştır.

Su örnekleri polietilen şişelere alınmıştır. Ağır metal analizleri için alınan örneklere ultra saf nitrik asit eklenerek örneğin pH'nın 2'nin altına düşmesi, dolayısıyla polietilen örnek kabı içinde sudaki elementlerin çökmesi ya da kabın iç yüzeyinde tutulmalarının

önüne geçilmesi sağlanmıştır. İzotop analizleri (^{18}O , ^2H , ve C-13) için 100 ml, tiryum ve S-34 analizleri için 500'er ml, majör anyon-kasyonlar için 250 ml'lik şişelere örnekler alınmıştır.



Şekil 2.1. Pasinler jeotermal alanındaki kaplıca tesislerinden bir görünüş

Pasinler Ovası'nda çoğu sulama suyu olarak kullanılan çok sayıda soğuk su kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyulara ait statik su seviyesi, dinamik su seviyesi, kuyu derinliği ve suyun kimyasal analizleri gibi veriler DSİ Erzurum 8. Bölge Müdürlüğü'nden alınmıştır.

Arazi çalışmaları esnasında çalışma yapılan noktaların koordinatlarını belirlemek amacıyla GARMIN marka Küresel Yer Belirleme Sistemi (GPS) kullanılmıştır. Ölçüm yapılan noktaların koordinatları topografik haritalara işlenmiştir.

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Çalışma alanından alınan su örneklerinde majör anyon-kasyonlar, iz metaller ve izotopların analizleri yaptırılmıştır.

Su örneklerinin kimyasal analizleri, Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü su kimyası laboratuvarında iyon kromatografi tekniği, metal analizleri ise İndüktif Eşlenik Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) yöntemi ile ACME Analitik Laboratuvarında (Kanada) yaptırılmıştır. $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ izotop analizleri ISO Analitik

Laboratuvarı'nda (İngiltere) İzotop Oranı Kütle Spektrometresi (IRMS) tekniği, C-13 izotop analizleri Acid Continuous Flow (Acid-CF-IRMS) tekniği ile yaptırılmıştır. S-34 analizleri İzotop Oranı Kütle Spektrometresi tekniği ile Isotope Tracer Technologies Inc (Kanada) Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır. Tiryum analizleri sıvı sintilasyon sayma tekniği ile Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü Kütle Analiz Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.

Çalışma alanındaki jeotermal kaynakların çevresinden alınan bazı kayaç örneklerine ait ana oksitler ve belirli elementlerin analizleri ICP-ES ve ICP- MS ile ACME Analitik Laboratuvarı'nda (Kanada) yaptırılmıştır.

2.3. Büro Çalışmaları

Çalışma alanında yer alan sıcak su kaynaklarına ait genel bilgiler literatür araştırması yapılarak belirlenmiştir. İnceleme alanı ve çevresinde daha önce yapılan çalışmalardan yararlanılarak jeotermal sistemi oluşturan havza sınırları belirlenmiştir. Bu havza sınırlarını kapsayan alanın jeoloji haritası, alanda önceden yapılan çalışmalarla denştirilerek çalışmanın amacına yönelik olarak yeniden hazırlanmıştır. İnceleme alanının 1/25000'lik topografik haritaları ArcGIS (ArcMap 10) programı kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırılan haritalar ile inceleme alanının sayısal yükseklik modeli ve jeoloji haritası oluşturulmuştur. Örnekleme yapılan su noktalarının ve alanda mevcut su kuyularının koordinat bilgileri kullanılarak sayısallaştırılan haritalar üzerine işlenmiştir. Kimyasal analizlerden elde edilen sonuçlar AquaChem 2012.1 programı ile yorumlanmıştır.

Modelleme aşamasında Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers (SHEMAT and Processing SHEMAT) adlı Model programı ile ilgili literatür çalışması yapıp model programı için gerekli veri tabanı hazırlanmıştır. Programda kullanılmak üzere daha önce oluşturulan jeolojik haritadan enine kesit alınarak programa aktarılmıştır. Programın akış şemasına uygun olacak şekilde veri tablosu oluşturulup programa girilmiştir. Sonuç olarak program koşturularak model sonuçlarının çıktısı alınmış ve model sonuçları kalibre edilmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Genel Jeoloji

3.1.1. Giriş

Doğu Anadolu Neotektonik dönem çökellerinin yüzeleendiği Pasinler Havzası yaklaşık doğu-batı uzanımlı olup, etrafı Miyosen öncesi birimlerle çevrilidir. Havzada petrol, jeoloji ve hidrojeoloji amaçlı birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan özellikle Akkuş (1965), Gedik (1985), Yılmaz ve diğ. (1989), Keskin (1994), Konak ve Hakyemez (2008)'in çalışmalarından yararlanılarak inceleme alanının genel jeolojisi ortaya konulmuştur.

İnceleme alanında yaşlıdan gence doğru Geç Kretase yaşlı Şahvelet Ofiyolitleri ve Derviş Halit Formasyonu, Eosen yaşlı Yaylasırtı Gabrosu ve Alibaba Volkanitleri, Erken Miyosen yaşlı Haneşdüzü Formasyonu, Geç Miyosen yaşlı Erzurum-Kars plato volkanitleri, Geç Pliyosen- Erken Pleyistosen yaşlı Horosan Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyon yüzeilenmektedir (Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Ek Şekil 1).



Şekil 3.1 İnceleme alanında yer alan birimlerin bir kısmından genel bir görünüm

SİSTEM	SERİ	FORMASYON	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	
					KUVA- TNER
T E R S İ Y E R	Pliyosen-Pleyistosen	Horosan		Alüvyon	
				Çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı, kiltası, marn ardalanması	
	Miyosen	Erzurum-Kars Plato Volkanitleri		Bazalt, andezit, dasit, riyodasit, riyolit ve piroklastitleri	
		Haneşdüzü		Üst kısımlarda resifal kireçtaşları, orta kısımlarda kumtaşı-kiltası ardışımı, alt kısımlarda ise çakıltaşı	
	Eosen	Alibaba Volkanitleri		Andezit, bazalt ve piroklastitleri	
		Yaylasırtı G.		Grimsi, yeşilimsi renkli gabro	
	KRETASE	Üst Kretase	Dervişhalit		İnce-orta tabakalanmalı şeyl, kiltası, marn ve yer yer ince kumtaşı ve kumlu kireçtalı
			Şahvelet Ofiyolitleri		Serpantin, peridotit, diyabaz daykları

Ölçeksizdir

Şekil 3.2. Pasinler (Erzurum) ve yakın çevresinin stratigrafik kolon kesiti

3.1.2. Şahvelet Ofiyolitleri

Pasinler Havzası'nda yüzeyleyen başlıca serpantinit, peridotit, gabro ve bu birimleri kesen diyabaz dayklarından oluşan bölgenin en yaşlı birimi, ilk kez Demirtaşlı ve Pisoni (1965) tarafından Mesozoyik ofiyolitli seri olarak adlandırılmıştır. Daha sonra birime, Tanrıverdi (1971) ve Aziz (1971) Ofiyolitik Seri, Erdoğan (1972) ve Havur (1972) Ofiyolitik Karmaşık isimlerini vermişlerdir. Son olarak Yılmaz ve diğ. (1989) bölgede yaptıkları ayrıntılı çalışmalarla birimi Şahvelet Ofiyolitleri olarak adlandırmışlardır. Bu çalışmada da Geç Kretase yaşlı birimler genel olarak bu ofiyolitler ile benzer litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olması nedeni ile Şahvelet Ofiyolitleri olarak tanımlanmıştır.

Birim inceleme alanının güneyinde Fakiriçmez Tepe, Yıkıkdağ Tepe, Şemun Dağı, Maden Dağı ve Dikenli Dağ bölgelerinde geniş bir yayılım göstermektedir (Ek Şekil 1).

Çalışma alanında genel olarak kahverengi, gri ve yeşilimsi renkler sunan, ofiyolitik kayaçların ayrışması sonucu oluşan serpantinitler inceleme alanının bazı kesimlerinde blok şeklinde gözlenmekte olup, taze yüzeylerinde yeşil ve koyu yeşil renkli olup, arazide parlak bir görünüş sunarlar. Serpantinitler tektonik kuvvetlerin etkisinde kalarak kırıklı bir yapı kazanmıştır ve bu kırıklarda yer yer silis dolgularına rastlanmıştır. Yapılan mikroskobik incelemeler sonucunda serpantinitler içinde yer yer ortopiroksen ve olivine rastlanmıştır (Yılmaz vd., 1989).

Çalışma alanında gözlenen peridotitler ise harzburjit türünde olup, genelde olivin ve ortopiroksen içermektedirler.

İnceleme alanındaki gabrolar makroskobik olarak masif görünümlü gri-koyu gri renkli ve bol çatlaklıdır. Mikroskobik olarak gabrolar; olivinli gabro, klinopiroksen ve plajiyoklas içeren klinopiroksenli gabro olarak adlandırılabilir. Ayrıca, bu gabrolarda yer yer klorit, aktinolit ve tremolit gözlenir (Yılmaz vd., 1989).

Bir diğer kayaç birimi olan diyabaz dayklarının dış yüzeyleri kahverengi, taze yüzeyleri ise siyah renklidir. Diyabaz dayklarında mikroskobik olarak plajiyoklaslar ayrılmış, piroksenler amfibole dönüşmüş ve yer yer epidot ve klorit oluşmuştur (Yılmaz vd., 1989). Ayrıca alanda yer yer izlenen yastık yapılı ve akma dokusunun geliştiği, başlıca olivin, klinopiroksen, ortopiroksen ve plajiyoklasları kapsayan camsı hamur malzemesinden oluşmuş spilitik bazaltlar da ofiyolitlerin volkanitlerine karşılık gelebilir (Yılmaz vd., 1989). Şahvelet ofiyolitleri içerisinde küçük ölçekte listvenit oluşumları bulunmaktadır.

Şahvelet Ofiyolitleri'nin alt dokanağı inceleme alanın dışında olan Akdağ Metamorfitleri (Erdoğan, 1972) ile tektonik ilişkilidir. Ofiyolitler üzerine Geç Kretase yaşlı Derviş Halit Formasyonu ve Tersiyer yaşlı birimler uyumsuz olarak gelmektedir (Şekil 3.2).

Yılmaz vd. (1989), birimin Geç Senoniyen yaşlı olduğunu belirtirken, Gedik (1985) bölgede yaptığı çalışmalarda ofiyolitlerin yerleşim yaşının Liyas sonrası Kampaniyen öncesi olduğunu söylemiştir.

Şahvelet Ofiyolitleri Bektaş (1981)'in Erzincan Tanyeri yöresindeki Üst Kretase Tektonik Karmaşığı ile deneştirilebilir.

3.1.3. Derviş Halit Formasyonu

Çalışma alanında kumtaşı, kiltası, silttaşı ve şeyl araldanmasından oluşan sedimanter kayaç topluluğu ilk kez Aziz (1971) tarafından incelenmiş ve Derviş Halit Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda benzer kayaç türlerinden oluşan Eosen yaşlı birimleri Tanrıverdi (1971) Gökçeharman Formasyonu ve Musakomu Formasyonu olarak adlandırmıştır. Yılmaz vd. (1989) ise yaptıkları arazi çalışmaları sonucunda yaşlı Maestrihtiyen ile Eosen arasında değişen ve yer yer olistostromal düzeyler kapsayan kaya birimlerini bir bütün halinde Aziziye Grubu olarak adlandırmışlardır. Bu çalışmada inceleme alanındaki kayaçlar Derviş Halit Formasyonu ile benzer litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olmasından dolayı aynı isimle tanımlanmıştır.

Birim havzanın güneyinde Ortaburun, Çamlıca, Madenkaya, Kaldırım Tepe ve Kandilli sırtı bölgelerinde yüzeylemektedir (Ek Şekil 1).

Formasyon, ince-orta tabakalı, şeyl, kiltası, marn ve seyrek olarak ara tabakalar halinde ince kumtaşı ve kumlu kireçtaşlarından oluşur. Şeyller koyu gri, yeşilimsi gri renkli olup, ince kumtaşı ara tabakalıdır. Tabaka kalınlıkları yer yer 2 m'ye ulaşan kumtaşları ise koyu yeşilimsi gri renkli, kireç çimentolu, ince-orta taneli ve kötü boylanmalıdır. Formasyonun üst düzeylerinde ise kalın tabakalı, bol fosilli kumlu kireçtaşları yer alır.

Derviş Halit Formasyonu, Şahvelet Ofiyolitleri üzerine uyumsuzlukla gelmektedir. Birimin üzerine ise Tersiyer yaşlı volkanitler uyumsuz olarak gelmektedir (Şekil 3.2).

Daha önce çalışma alanında yapılan incelemelere göre Derviş Halit Formasyonunun kalınlığı 320 m olarak ölçülmüştür (Gedik, 1985).

Çalışma alanında daha önce yapılan çalışmalarda *Globotruncanita cf. calcarata* (Cush.), *Globotruncana arca* (Cush.), *Globotruncana linneiana* (d'Orb.), *Globotruncana ventricosa* White fosilleri elde edilmiştir. Bu fosillere göre birimin yaşı Kretase'dir (Gedik, 1985).

Derviş Halit Formasyonu; Eyüpler Formasyonu (Tanrıverdi, 1971) ve Dünder Formasyonu (Erdoğan, 1972)'nin alt seviyeleri ile denestirilebilir.

3.1.4. Yaylasırtı Gabrosu

Bölgede yer alan intrüzif gabroların bazı yüzeylemeleri Sungurlu (1971) tarafından Yaylasırtı Gabrosu olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada inceleme alanındaki kayalar Yaylasırtı Gabrosu ile benzer litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olması nedeni ile aynı isimle tanımlanmıştır.

Yaylasırtı Gabrosu, inceleme alanının güneyinde Kayınlı sırtı dolaylarında, küçük bir alanda yüzeylemektedir (Ek Şekil 1).

Makroskobik olarak arazide gri-yeşilimsi renklere gözüken gabrolar, masif ve yer yer bol çatlaklıdır ve bu çatlakları kalsit doldurmuştur. Gabronun orta kısımları iri taneli kenar kısımları ise oldukça ince tanelidir. Kenar bölümlerde yer yer diyabaz dokusu gözlenmektedir. Mikroskobik incelemelerde holokristalen doku özelliği sunan gabroların plajiyoklas, klinopiroksen, daha az oranda ortapiroksen ve çok az hornblend içerdiği saptanmıştır. Bazı örneklerdeki klinopiroksenler kısmen uralitleşmiştir (Konak ve Hakyemez, 2008).

Havzada çoğunlukla Maestrihtiyen ile Eosen arasında değişen kırıntılı birimi kesen gabroların yaşının Eosen olabileceği ifade edilmiştir (Yılmaz vd. 1989).

3.1.5. Alibaba Volkanitleri

Çalışma alanında ilk kez Sungurlu (1971) tarafından belirlenen Eosen yaşlı volkanitler daha sonra bölgede yapılan çalışmalar sonucunda Yılmaz ve diğ. (1989) tarafından daha genç olan volkanitlerden ayırtılarak Alibaba Volkanitleri olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada da Eosen yaşlı volkanitler genel olarak Alibaba Volkanitleri

ile benzer litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olması nedeni ile aynı isimle tanımlanmıştır.

Bu volkanik birim Pasinler Ovası'nın güneyinde Katarkaya Tepe, Akkayalar Tepe ve Bulkasım bölgelerinde, ovanın kuzeyinde ise Kışladere etrafında yüzeylemektedir (Ek Şekil 1).

Ağırlıklı olarak andezitlerden, trakiandezitlerden ve bazaltlardan oluşan birim, gri, koyu gri, morumsu, çok eklemli, ince taneli ve yer yer katmanlı bir görünümündedir. Yılmaz vd. (1989), yaptıkları petrografik incelemelerde; andezitlerin genel olarak porfirik dokuda, yer yer akma dokusu belirgin, ayrışmış ve mikrolitli bir hamur içerisinde kuvars, mika, mafik elemanlar ve plajiyoklaslardan oluştuğunu belirtmişlerdir.

Bu volkanitlerin diğer birimlerle olan dokanakları, genelde faylı olmakla beraber Geç Oligosen-Erken Miyosen yaşlı birimler tarafından uyumlu olarak örtülmektedirler (Yılmaz vd., 1989). Yılmaz vd. (1989), yaptıkları çalışmalarda birimin Eosen yaşlı olduğunu belirtmişlerdir.

3.1.6. Haneşdüzü Formasyonu

Doğu Anadolu'da geniş bir yayılım gösteren ve ağırlıklı olarak platform türü karbonatlarla temsil edilen birim, ilk olarak Demirtaşlı ve Pisoni (1965) tarafından Adilcevaz Kalkeri olarak adlandırılmıştır. Daha sonra bölgede yapılan çalışmalar sonucunda birime Rathur (1965) Haneşdüzü Formasyonu, Soytürk (1973) Alibonca Formasyonu, İlker (1966) ise Güzelbaba Formasyonu adlarını önermişlerdir. Bu çalışmada da inceleme alanında yer alan platform türü karbonatlar genel olarak Haneşdüzü Formasyonu ile benzer litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olması nedeni ile aynı isimle tanımlanmıştır.

Haneşdüzü Formasyonu Pasinler Havzası'nın güneyinde Hündül Dağı, Bayramıntaş Tepe ve Yılanlı Tepe dolaylarında küçük alanlarda mercekler şeklinde yüzeylemektedir (Ek Şekil 1).

Birim içerisindeki kayaçlar tabanda ince taneli çakıltası düzeyi ile başlar ve yukarıya doğru açık beyaz-sarı renkli kumtaşı ve kiltası ardalanması ile devam eder. Alt seviyelerde yer alan bu kırıntılı kesim çoğunlukla çapraz, orta ve ince katmanlıdır. Üst seviyelere doğru ise birim resifal kireçtaşlarına geçer. Bu resifal kireçtaşları ise gri, beyazımsı-sarımsı renkli oldukça kalın katmanlıdır ve bol makro ve mikro fosil içerir.

Formasyonun Oligosen yaşlı oluşuklarla ilişkisi, Rathur (1965) ve Soytürk'e (1973) göre uyumsuzdur. Alt dokanaktaki kayatürü özellikleri ve değişimine göre, Oligosen sonuna doğru ortamın oldukça sığlaştığı ve yer yer karasal bir niteliğe büründüğü söylenebilir. Birimin üzerine ise Üst Miyosen yaşlı birimler uyumsuzlukla gelmektedir (Şekil 3.2).

Daha önce Gedik (1985) yaptığı çalışmalarda, birimin kalınlığını Mescitli-Karayazı arasında 450 m, Haneşdüzü'nde ise 600 m olarak belirlemiştir.

Haneşdüzü Formasyonu'nun yaşı, içermiş olduğu *Miogypsina* sp., *Amphistegina* sp ve *Lepidocyclina* sp. gibi fosillere göre Burdigaliyen'dir (Gedik, 1985).

Haneşdüzü Formasyonu İlker (1966) ve Rathur (1965)'nin Muş-Hınıs Havzası'ndaki, Demirtaşlı ve Pisoni (1965)'in Ahlat-Adilcevaz yöresindeki Güzelbaba formasyonu ile deneştirilebilir.

3.1.7. Erzurum-Kars Plato Volkanitleri

Doğu Anadolu Bölgesi'nde çok geniş bir alanda yüzeyleme veren volkanitler birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Erzurum-Kars Plato Volkanitleri ilk olarak Akkuş (1965) tarafından adlandırılmıştır. Daha sonra bu volkanitlerin bir bölümü için Akkuş (1965) ve Tokel (1965) Karatepe Volkanitleri, Yılmaz vd. (1989) Bingöldağı Volkanitleri adlarını kullanmışlardır. Bu çalışmada da incelenen Geç Miyosen yaşlı bu volkanitler genel olarak Erzurum-Kars Plato volkanitleri ile benzer litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olması nedeni ile aynı isimle tanımlanmıştır.

Pasinler Havzası'nın kuzeyinde ve güneyinde yayılım gösteren Üst Miyosen yaşlı volkanitler, havzanın kuzeyinde Hasanbaba Dağı, Çakmaştas Tepe, Kızıilveren Köyü, Yeniköy, Tımaryaylası, Kırmızıgeçit Tepe dolaylarında, güneyinde ise Yastıktepe, Bulkasım, Gerdekkaya, Alibezirgan, Sığırlı ve Yıkılğan dolaylarında yüzeylemektedir (Ek Şekil 1).

Erzurum-Kars Plato Volkanitleri, çoğunlukla tuf, ignimbirit ve obsidiyenlerden oluşan piroklastik kayalar, bazalt, andezit, dasit ve riyolit türü volkanik kayalar ve perlitler oluşturur. Bölgedeki volkanizma piroklastitlerle başlayıp bazalt, andezit, dasit, riyolit ve perlitlerle devam etmiştir (Kılıç, 2006).

Piroklastik kayaların hakim litolojisini lapilli tuf ve aglomeralar oluşturmaktadır. Çalışma alanında yer alan beyaz- krem renkli tüflerin içindeki malzemenin türü dikkate

alındığında riyalitik özellikte oldukları söylenebilir. Alandaki tüflerle aralanmalı olarak içlerinde değişik boyutlarda volkanik kayaç blokları yer alan, koyu renkli, çok sert yapılı masif aglomeralar bulunmaktadır.

Birim içerisinde tüflerle aralanmalı olarak yer alan obsidiyenler alanda yer yer döküntü şeklinde, heterojen bir yayılım sunmaktadırlar. Çalışma sahasında bulunan ignimbiritler pembe, kırmızı ve siyah renkli olup düzenli çatlak sistemleri içermektedir. Genelde masif yapıda olan ignimbiritlerde yönelmiş iri mineral ve kayaç parçaları gözlenmektedir.

Çalışma alanında büyük masif kütleler halinde, sarımsı krem renkli oldukça kırılğan ve hafif yapıda ve bazaltik-andezitik kayaçlarla örtülü olan pomzalar yer almaktadır (Kılıç, 2006).

Erzurum-Kars Plato Volkanitleri içerisinde bulunan ve inceleme alanında Karakale, Turnagölü Tepe ve Hasankale Dağı civarlarında yüzeyleme veren bazaltlar kahverengimsi, siyah renkli taze yüzeyleri koyu gri, siyah renkte, ince taneli afanitik ve porfirik dokuludurlar. Bu kayaç birimi çalışma alanındaki piroklastik kayaçlar üzerine örtü lavı şeklinde yayılmış durumdadır ve Akkuş (1965) tarafından Üst Miyosen yaşta oldukları belirlenmiştir.

Çalışma alanındaki andezitler, Hasan Kalesi çevresinde büyük kütleler halinde yüzeylenmektedir. Bu kayaçlar siyah ve koyu gri renklerde porfirik dokuya sahiptirler ve içlerinde yer yer gaz boşlukları gözlenmektedir.

Dasitler, inceleme alanının kuzeyinde bazalt ve andezitlerin üzerine tipik dom yapısı sunarak yüzeylenmektedirler. Birim çalışma alanında kremi, açık ve koyu pembe renkler sunmaktadır.

İnceleme alanında yüzeyleme veren riyalitler ise makroskobik olarak pembemsi-gri renkte olup porfirik doku sunmaktadırlar.

Perlitler, inceleme alanında yeşilimsi-gri, mavimsi renkte olup taze yüzeyleri parlak görünümüldür. Soğansı dokuları ile tipik ve oldukça kırılğan bir yapıya sahiptirler. Perlitler yer yer pomzamsı bir yapı sunarlar ve bazı bölgelerde ayrıışmış halde, tüf ve aglomeralarla aralanmalı olarak bulunurlar.

Birim Erken Miyosen Yaşlı Haneşdüzü Formasyonu üzerine uyumsuzlukla gelmektedir. Birimin üst sınırında ise Pliyo-Kuvaterner yaşlı Horosan Formasyonu uyumsuz olarak bulunmaktadır (Şekil 3.2). Akkuş (1965) yaptığı çalışmalarda birimin kalınlığını 450 m olarak belirlemiştir.

Yılmaz ve diğ. (1989), yaptıkları çalışmalarda birimin yaşının Üst Miyosen olduğunu belirtmişlerdir.

Kargapazarı Volkaniti, Ercan (1990) tarafından isimlendirilen Sarıkamış Volkanitleri, Bozkuş (1993) tarafından adlandırılan Karakurt Volkanitleri ve Yılmaz ve diğ. (1989) tarafından adlandırılan Bingöldağı Volkanitleri ile deneştirilebilir niteliktedir.

3.1.8. Horosan Formasyonu

Bölgede ilk kez Arpat (1965) tarafından Gelinkaya Formasyonu olarak adlandırılan birim, daha sonra Akkuş (1965) tarafından Horosan Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada da incelenen Pliyo Kuvaterner yaşlı bu birimler genel olarak Horosan Formasyonu ile benzer litolojik ve stratigrafik özelliklere sahip olması nedeni ile aynı isimle tanımlanmıştır.

Formasyon Pasinler Havzası'nda Sürbehan, Kalbular, Porsuk, Baldızı, Pertek, Büyüktüy ve Hamamdere dolaylarında yüzeylenmektedir (Ek Şekil 1).

Birim altta kalın katmanlı, kahvemsı grimsi renkli gevşek tutturulmuş çakıltaşı, ve kumtaşlarıyla başlar. Çakılları iyi derecede boylanmış ve yuvarlaklaşmış olan çakıltaşları alt kesimlerde sıkı çimentolu üst kesimlerde ise gevşek çimentoludur. Birim üste doğru sarı, boz, grimsi, yeşilimsi kumtaşı, silttaşı, marn araldanması ile devam eder. Birim havzanın güneyinde ve kuzeyinde değişik özelliklere sahiptir. Güneyde çok küçük alanlarda tuf, tüfit seviyeleri gözlenirken, kuzeyde birimin üst seviyelerinde tuf-tüfit ve obsidiyen çakılları hakim durumdadır. Güneyde birimin alt seviyelerinde yer yer ekonomik kömür oluşumlarına rastlanır (Akkuş, 1965).

Geç Miyosen yaşlı Kargapazarı Volkaniti üzerine uyumsuz olarak gelen Horosan Formasyonu'nu genç çökeller uyumsuz olarak örtmektedir (Şekil 3.2). Akkuş (1965) yaptığı çalışmalarda birimin kalınlığını 475 m olarak belirlemiştir.

Önceki çalışmalarda (Erentöz 1954; Rathur 1965) saptanan fosillere göre birimin yaşlı Geç Pliyosen- Erken Pleyistosen olarak belirlenmiştir.

3.1.9. Alüvyon

İnceleme alanında Hasankale Çayı ve kolları boyunca alüvyal birikintiler yüzeylemektedir (Ek Şekil 1). Bu birikintiler blok, çakıl, kum, silt ve kil boyutundaki çimentolanmamış elemanlardan oluşur. Havzadaki kayaç litolojisine bağlı olarak değişik türdeki kayaç parçaları genellikle çok yuvarlaklaşmış çakılları oluşturur. Hasankale Çayı yakın çevresindeki alüvyal malzeme içerisinde kum ve çakıl boyutundaki elemanlar fazla iken kuzey ve güneye gidildikçe silt ve kil boyutundaki elemanların oranı artmaktadır.

3.2. Yapısal Jeoloji

Doğu Anadolu Bölgesi, Neotektonik döneme ait sıkışma bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şengör, 1980). Pasinler Havzası'nda da bu rejim egemen olduğundan, bu rejim etkisinde gelişen tektonik yapı ve oluşumlar büyük ölçüde göze çarpar. İnceleme alanında, sıkışma tektonik rejiminin egemen olduğu neotektonik dönemde en yaygın tektonik yapılardan birisi de doğrultu atımlı faylardır. Yılmaz ve diğ. (1989)'un bölgesel olarak yaptıkları mikrotektonik çalışmalarda, bu fayların Üst Miyosen evresinde oluştuğunu, Üst Miyosen yaşlı birimlerde yaptıkları gözlem ve ölçümlerde ise D-B doğrultulu sol yönlü doğrultu atımlı fayın yardımı ile sıkışmanın K-G yönlü olduğunu ortaya koymuşlardır.

Yılmaz vd. (1989) Pasinler'in 1 km kuzeyindeki andezitlerde yaptıkları fay ölçümlerinden yaklaşık KB-GD yönlü bir sıkışmayı; Pasinler Kalesi'nin üst kesimlerinde andezitlerde gelişen doğrultu atımlı fay düzlemlerinde yaptıkları ölçümlerde ise yaklaşık KD-GB ile KB-GD yönlü sıkışmayı ortaya koymuşlardır. Pasinler Kalesi'nde ve civarında gözlenen diğer sol yönlü doğrultu atımlı faylar ve havzanın güney kenarında gözlenen sağ yönlü doğrultu atımlı fay yaklaşık aynı sıkışma doğrultusunu verir.

Pasinler Havzası'nda, sıkışma tektonik rejimi altında gelişen diğer bir yapısal unsur, havza kenarında gözlenen K-G doğrultulu açılma çatlaklarıdır. Bölgedeki volkanitlerin böyle bir çatlak boyunca çıktığı kabul edilir (Şaroğlu, 1985). Ayrıca havzanın güneyinde ve kuzeyinde gözlenen volkanik domlar bu tür çatlaklara bağlı olarak yükselmiş olabilir.

Pasinler Havzası'nın güneyindeki ofiyolit bindirmesi de sıkışma tektonik rejimi altında gelişmiştir. Bindirme zonlarında yaklaşık KB-GD doğrultulu lisvenitler gelişmiştir (Şaroğlu, 1985).

Pasinler Havzası'nda, Neotektonik dönem Üst Miyosen yaşlı gölssel çökellerle başlar. Havzanın kenar kısımlarında derin deniz çökelleriyle başlayan çökel istif gölssel çökellerle devam eder. Dolan göllerin yerlerini akarsular almış ve böylece havza dolgu sıralaması akarsu çökelleri ile son bulmuştur (Şaroğlu, 1985).

Doğrultu atımlı fay zonlarında gelişen havzalarda olduğu gibi, Pasinler Havzası'nın bir kenarı dar deniz şelfi ile sınırlandırılmış ve havzanın güney kenarında karbonatların çökeldiği kısımlar havzaya detritik malzeme vermişlerdir. Havzanın güneyinde resifal karbonatların egemen olduğu birim kendisinden sonra oluşan çökellere malzeme vermiştir (Şaroğlu, 1985).

Şaroğlu, (1985)'e göre Pasinler Havzası, yaklaşık K-G doğrultulu sıkışma tektonik rejimi altında doğrultu atımlı fayların egemenliğinde gelişmiş, doğrultu atımlı grabendir.

3.3. Hidroloji

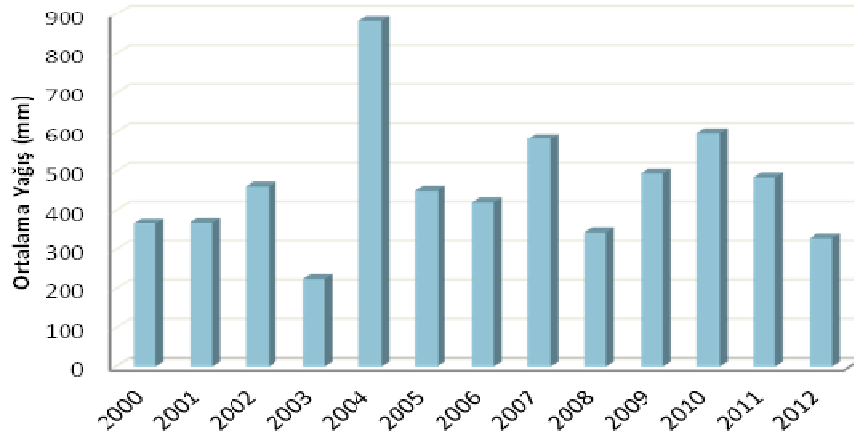
Su yeryüzünde karalar, atmosfer ve okyanus arasında sürekli dolaşım halindedir. Doğada suyun bu dolaşımı esnasında yağışla yeryüzüne düşen suların bir miktarı yeraltına süzülerek değişik ortamlarda yeraltı suyunu, bir kısmı da doğrudan akışa geçerek yüzey sularını oluştururlar. Yağışın buharlaşma, akış ve süzülme şeklindeki durumlarını içeren bu olaylara hidrolojik döngü denir.

Çalışma alanında hidrolojik döngünün elemanları 2000-2012 yılları arasındaki veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

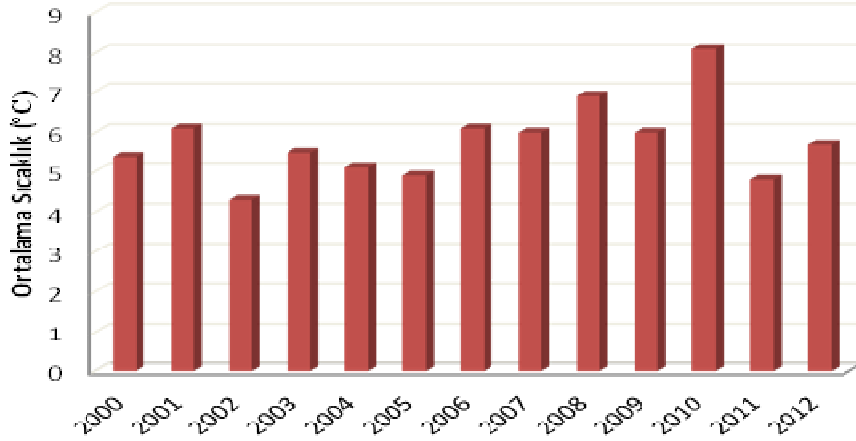
3.3.1. Yağışlar ve Sıcaklık

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan Pasinler'e ait 13 yıllık (2000-2012) veriler kullanılarak Pasinler İlçesi'nin yağış ve buharlaşma-terleme durumu belirlenmiştir. Pasinler Ovası'na ait yıllık toplam yağışların ve yıllık sıcaklık ortalamalarının 2000-2012 yılları arasındaki değişimi Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de görülmektedir. 13 yıllık verilere göre ölçülen maksimum yağış değeri 2004 yılında 881.1 mm, minimum yağış değeri ise 2003 yılında 223.3 mm olarak gerçekleşmiştir (Şekil 3.3).

Sıcaklık verilerine göre, ortalama sıcaklığın en düşük olduğu yıl 4.3 °C ile 2002, ortalama sıcaklığın en yüksek olduğu yıl ise 8.1 °C ile 2010 yılıdır (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Pasinler Meteoroloji İstasyonu'nda 2000-2012 yılları arasında ölçülen ortalama yağış değerlerinin yıllara göre değişimi



Şekil 3.4. Pasinler Meteoroloji İstasyonu'nda 2000-2012 yılları arasında ölçülen ortalama sıcaklık değerlerinin yıllara göre değişimi

3.3.2. Buharlaşma-Terleme

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan 2000-2012 yılları arası sıcaklık ve yağış değerlerinin ortalamasından Thornthwaite (1948) yöntemi kullanılarak bölgenin potansiyel (Etp) ve gerçek (Etr) buharlaşma-terleme değerleri hesaplanmış, su bilançosu hazırlanmış ve grafiği çizilmiştir (Tablo 3.1, Şekil 3.5).

Thornthwaite yöntemine göre aylık potansiyel buharlaşma-terleme (Etp) aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır:

$$Etp = 1,6 \times G \times (10t/I)^a \quad (1)$$

Burada;

Etp: Aylık potansiyel buharlaşma-terleme miktarı (cm)

G: Aylık güneşleme faktörü

I : Yıllık sıcaklık indisi olup aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$I = \sum i$$

i: Aylık sıcaklık indisi olup aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$i = (t/5)^{1.514} \quad (2)$$

t : aylık sıcaklık ortalaması (°C)

a: Yıllık sıcaklık indisine bağlı bir katsayı olup aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

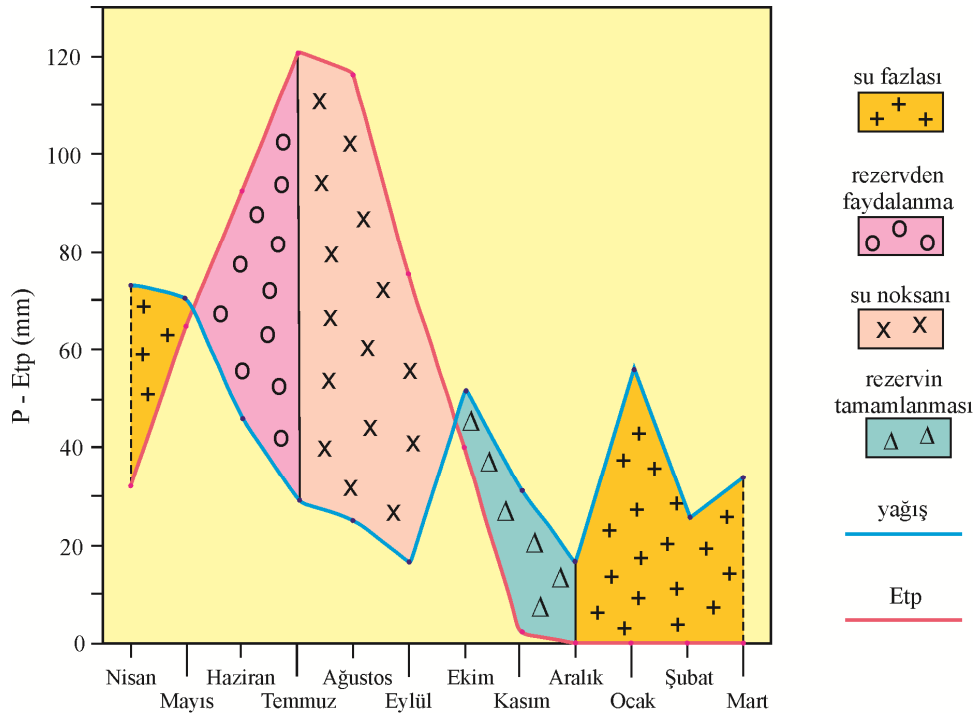
$$a = 6.75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1.79 \times 10^{-2} \times I + 0.492 \quad (3)$$

Tablo 3.1'e göre Pasinler İlçesi'ndeki yıllık toplam potansiyel buharlaşma- terleme (Etp) 543.9 mm, yıllık gerçek buharlaşma- terleme (Etr) ise 353.8 mm olarak bulunmuştur. Havzaya düşen yağışın yaklaşık %75'i buharlaşma-terleme yolu ile tekrar atmosfere dönmektedir.

Tablo 3.1 Pasinler İlçesi'ne ait Thornthwaite yöntemine göre hazırlanmış hidrolojik bilanço (Top: Toplam, Pot: Potansiyel, Ger: Gerçek, Rasat Süresi: 2000–2012)

Bilanço Elemanları	N	M	H	T	A	E	E	K	A	O	Ş	M	Top.
Yağış (mm)	73.2	70.6	45.5	28.5	25.2	16.4	52.1	30.7	16.4	56.3	25.2	34.1	474.2
Pot. Buharlaşma (mm)	31.7	64.6	92.6	120.7	116.6	75.5	39.9	2	0	0	0	0	543.9
Ger. Buharlaşma (mm)	31.7	64.6	92.6	81.4	25.2	16.4	39.9	2	0	0	0	0	353.8
Top. Faydalı Su Rezervi Değişimi	-	-	-47.1	-52.9	-	-	+12.2	+28.7	+16.4	+42.7	-	-	
Topraktaki Faydalı Su Rezervi	100	100	52.9	0	0	0	12.2	40.9	57.3	100	100	100	
Su Açığı (mm)				39.3	91.4	59.1	-	-	-	-	-	-	
Su fazlası (mm)	41.5	6	-	-	-	-	-	-	-	13.6	25.2	34.1	120.4
Yüzeysel Akış (mm)	33.4	19.8	9.9	4.9	2.5	1.3	0.6			7.1	15.9	25	120.4

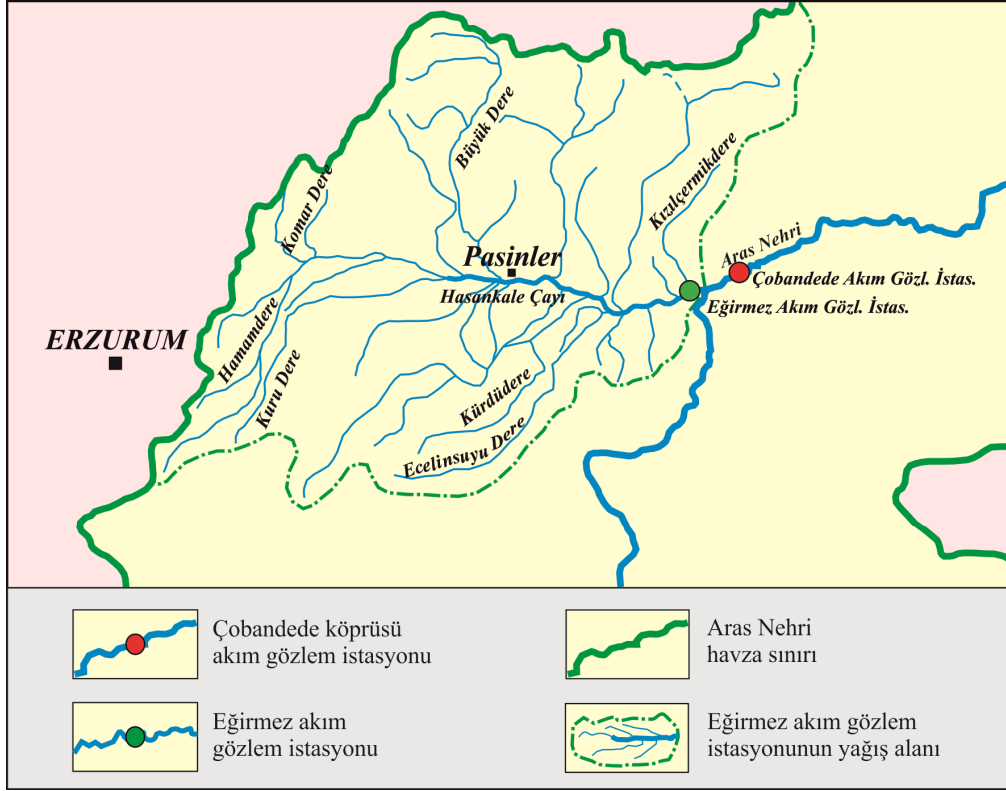
Mayıs ayının sonuna kadar yağış Etp'den fazladır. Dolayısıyla bu aylarda su fazlası görülmüştür. Yağış fazlası toprağın su rezervine eklenmektedir. Haziran ve Temmuz aylarında yağış miktarı değerinden daha azdır. Dolayısıyla gerçek buharlaşma-terlemenin meydana gelmesinde faydalı su rezervi kullanılmıştır. Ağustos ve Eylül ayında rezervde su bulunmama ile birlikte gerçek buharlaşma-terleme yağışa eşittir. Ekim, Kasım ve Aralık aylarında yağış miktarı gerçek buharlaşma-terlemeden fazla olup yağış miktarındaki fazlalık rezerv tamamlamada kullanılmaktadır (Şekil 3.5, Tablo 3.1).



Şekil 3.5. Pasinler İlçesi'nde 2000-2012 yılları arasındaki aylık ortalama yağış ve potansiyel buharlaşma-terleme değerlerinin aylık değişimi

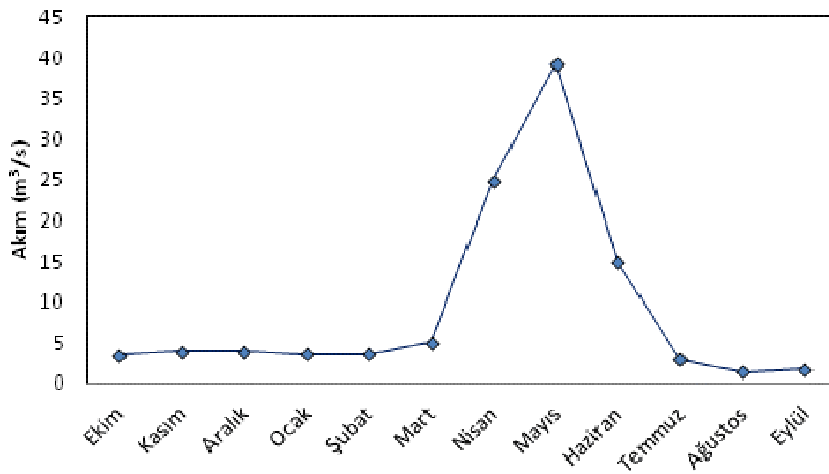
3.3.3. Yüzeysel Suları ve Akımları

Pasinler Havzası'nda kuzey ve güney yönlerinden alana giren yan dereler Hasankale Çayı'nda birleşerek Köprüköy İlçesi'nde Aras Nehrine karışır. Hasankale Çayı'nı oluşturan dereler; Hamam Dere, Çaykara Dere, Büyük Dere, Kürdü Dere, Kızılçermik Dere, Ecelinsuyu Dere, Kuru Dere ve Komar Deredir (Şekil 3.6). Her mevsim su taşıyan Hasankale Çayı'nın debisi iklim şartlarına uygun olarak yaz aylarında düşer kış aylarında artar.



Şekil 3.6. Eğirmez akım gözlem istasyonunun yağış alanı ve yeri

Çalışma alanındaki akarsulara ait akım değerlerinin ölçümü DSİ 8. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Pasinler İlçesi'nde 1580 m yükseklikte ve 1470 km² lik yağış alanına sahip Hasankale Çayı üzerinde bulunan Eğirmez istasyonuna ait 1984-2012 yılları arasında ölçülmüş ortalama akım değerleri Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Eğirmez-Pasinler akım gözlem istasyonuna ait 1984-2012 yılları arasında aylık ortalama akışların değişimi

Grafik incelendiğinde Hasankale Çayı'nın ortalama akım değerlerinin en yüksek olduğu ay 39.15 m³/s ile Mayıs ayı, en düşük olduğu ay 1.32 m³/s ile Ağustos ayıdır.

3.3.4. Yeraltına Süzülme

Bir havzadaki yeraltı suyu beslenimi genel olarak yağıştan ve yüzeysel akıştan süzülme ile gerçekleşir. Pasinler Havzası'ndaki yeraltına süzülme miktarını hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır ve sonuçlar Tablo 3.2'de verilmiştir.

$$P=Q_r+E_{tr}+I \quad (4)$$

Bu denklemde;

P: Toplam yağış

Q_r: Dolaysız akış

E_{tr}: Gerçek buharlaşma-terleme

I: Yeraltına sızan su miktarı

Gerçek buharlaşma-terleme miktarı (E_{tr}) Thornthwaite yöntemi ile 353.8 mm bulunmuştur (Tablo 3.1). Hasankale Çayı'nın dolaysız akış (Q_r) değeri, Eğirmez istasyonundan alınan verilerle hazırlanan hidrograftan 116x10⁶ m³/yıl olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.7).

Tablo 3.2 Pasinler Havzası'nda süzülme oranı

Yağış Alanı (A)	1470x10 ⁶ m ²
Yağış (P)	474.2 mm
Gerçek Buharlaşma-Terleme (E _{tr})	353.8 mm
Hasankale Çayı yıllık dolaysız akış miktarı (Q _r)	116x10 ⁶ m ³
Yağıştan havzaya gelen su (AxP)	697.07x10 ⁶ m ³
AxE _{tr}	520.08x10 ⁶ m ³
Yeraltına sızan su (I)	61x10 ⁶ m ³
Süzülme oranı (I/P)	0.08

Pasinler Havzası'nda yağıştan yeraltına süzülen su miktarı $61 \times 10^6 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Havzadaki süzülme oranı ise % 8 olarak belirlenmiştir.

3.4. Hidrojeoloji

Pasinler Havzası'nın güneyinde serpantinit, peridotit gibi ultramafik kayalar ile andezit türü volkanik kayalar, orta kesimlerinde marn aralanmalı çakıltaşı ve kumtaşları ile alüvyonlar, kuzeyinde ise bazalt, andezit, dasit, riyodasit ve riyolit gibi volkanik kayalar yüzeylemektedir.

3.4.1. Formasyonların Hidrojeolojik Özellikleri

Şahvelet Ofiyolitleri'ni oluşturan serpantinit, peridotit ve gabro gibi kayaların birincil geçirgenlikleri yoktur. Ancak tektonik faaliyetlere bağlı olarak birimde meydana gelen çatlaklar birime yersel geçirimsizlik kazandırmıştır (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).

İnce-orta tabakalanmalı şeyl, kıltaşı, marn ve yer yer ince kumtaşı ve kumlu kireçtaşıdan oluşan Dervişhalit Formasyonu'nun çoğunluğunu oluşturan şeyl ve kıltaşları geçirimsiz, kumtaşı katmanları ise geçirimli özelliktedir.

Magmatik ve volkanik kayalardan oluşan Yaylasırtı Gabrosu ve Alibaba volkanitlerinin birincil geçirimsizlikleri yoktur. Birimler çatlaklı oldukları kısımlarda geçirimsizdirler (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).

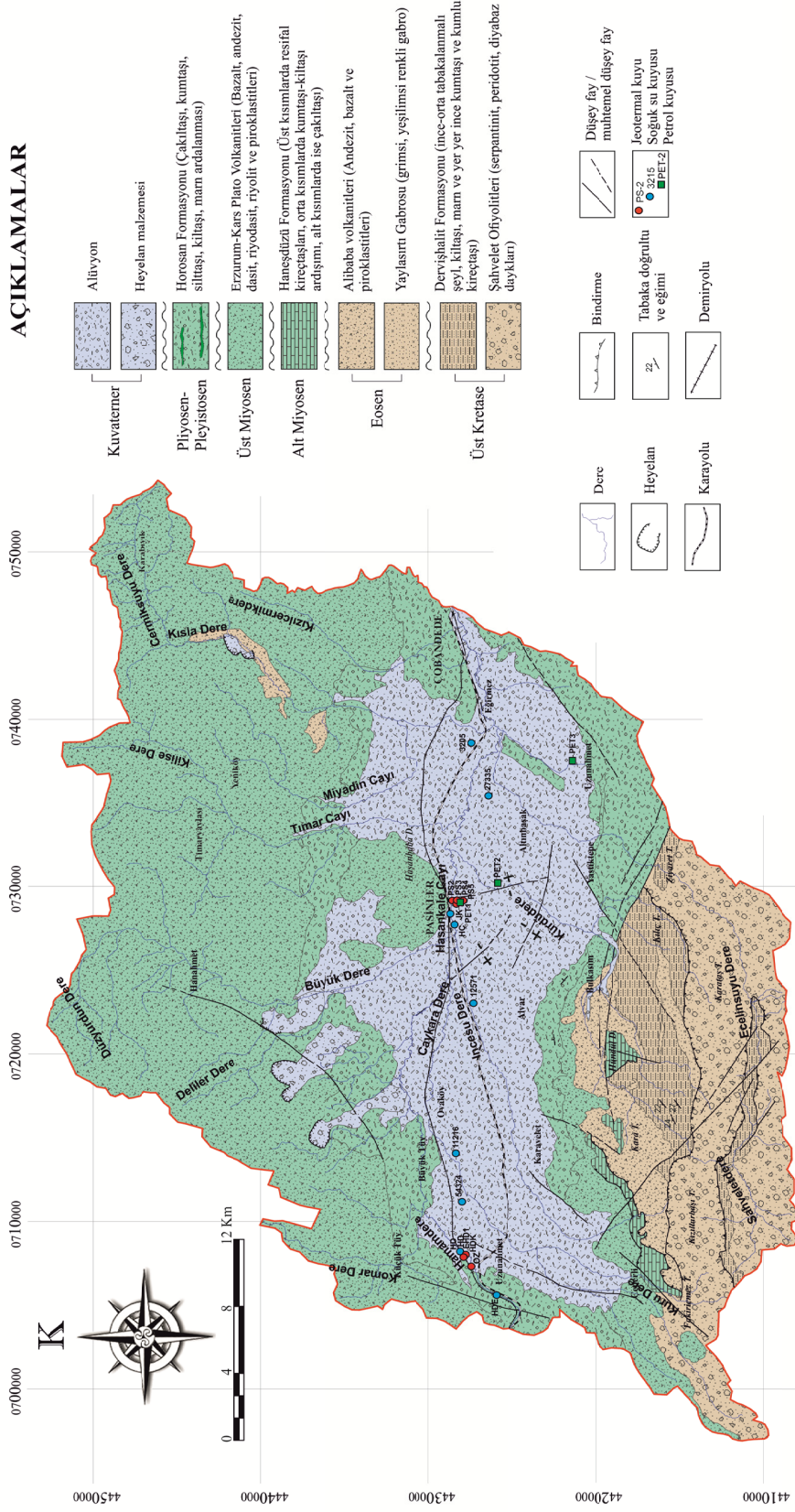
Havzada oldukça küçük bir alanda yüzeyleyen, çakıltaşı, kumtaşı-kıltaşı ardışımı ve resifal kireçtaşlarından oluşan Haneşdüzü Formasyonu yarıgeçirimli özelliktedir (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).

SİSTEM	SERİ	FORMASYON	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	FORMASYONLARIN HİDROJEOLOJİK ÖZELLİKLERİ		
KRETAZE	T E R S İ Y E R	K U V A - T E R N E R		Alüvyon	Geçirimli		
				Horosan	Çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı, kiltası, marn ar dalanması	Yarıgeçirimli	
				Erzurum-Kars Plato Volkanitleri	Bazalt, andezit, dasit, riyodasit, riyolit ve piroklastitleri	Tüf ve ignimbiritlerin yüzeylendiği alanlarda geçirimli, volkanik kayaların yüzeylendiği alanlarda yarı geçirimli	
				Haneşdüzü	Üst kısımlarda resifal kireçtaşları, orta kısımlarda kumtaşı-kiltası ardışımı, alt kısımlarda ise çakıltaşı	Yarıgeçirimli	
				Eosen	Alibaba Volkanitleri	Andezit, bazalt ve piroklastitleri	Geçirimsiz
					Yaylasırtı G.	Grimsi, yeşilimsi renkli gabro	Geçirimsiz
				Üst Kretase	Dervişhalit	İnce-orta tabakalanmalı şeyl, kiltası, marn ve yer yer ince kumtaşı ve kumlu kireçtalı	Şeyl ve kiltaları geçirimsiz, kumtaşı katmanları geçirimli
					Şahvelet Ofiyolitleri	Serpantinit, peridotit, diyabaz daykları	Geçirimsiz

Ölçeksizdir

Şekil 3.8. Pasinler (Erzurum) ve yakın çevresindeki formasyonların hidrojeolojik özellikleri

PASINLER (ERZURUM) HAVZASI'NİN HİDROJEOLOJİ HARİTASI



Şekil 3.9. Pasinler (Erzurum) Havzası'nın hidrojeolojisi haritası

Çoğunlukla tuf, ignimbirit ve obsidyenlerden oluşan piroklastik kayalar, bazalt, andezit, dasit ve riyolit türü volkanik kayalar ve perlitlerden oluşan Erzurum-Kars Plato Volkanitleri; özellikle tuf ve ignimbiritlerin yüzeyletiği alanlarda geçirimli, volkanik kayaların yüzeyletiği alanlarda yarı geçirimli özelliktedir.

Pasinler Havzası'nda yeraltı suyu bakımından önemli olan birimler çakıltası, kumtaşı silttaşı ve marn ardalanmasından oluşan Horosan Formasyonu ve alüvyonlardır. Havzanın yaklaşık üçte birini oluşturan birimler geçirimli özellikte olup, yeraltı suyu içermektedirler (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).

Pasinler Ovası'nda üst üste bulunan Pliyosen ve Kuvaterner yaşlı tutturulmamış genç çökeller soğuk su akiferini oluşturmaktadır. DSİ tarafından yapılan sondaj loglarından akiferin kil, çakıl ve kum malzemelerinin ardalanmalı olarak birikmesi sonucu oluştuğu belirlenmiştir. Bu malzemeler arasında yer yer bloktan meydana gelmiş seviyelere de rastlanır. Bu durumda havzada çok katlı bir akifer sisteminden söz etmek mümkündür. Ancak kil bantları bazen mercek şeklinde bulunduğu için akiferleri birbirinden ayırmak mümkün değildir.

Akiferin değişik kısımlarında kum, kil ve çakıl malzemesinin kalınlıkları da değişiklik gösterir. Genellikle 30-40 m kalınlıktaki kum ve çakıl seviyeleri ince kil bantları tarafından bölünmüştür. Genel olarak kil bantları batıdan doğuya doğru azalmakta, akiferin doğu kesimlerinde hemen hemen ortadan kalkmaktadır (Dilek, 1973). Kum ve çakıllı seviyelerinin killere kesilmesi ovanın büyük bir kısmında artezyen yapısının meydana gelmesini sağlamıştır. Akiferin kalınlığı doğudan batıya doğru gittikçe artmaktadır ve toplam kalınlığı DSİ tarafından yapılan sondaj loglarından 100-260 m arasındadır.

3.4.2. Akiferin Hidrolik Karakteristikleri

Soğuk su akiferinin transmissibilite değeri ovada daha önce yapılan çalışmalarda (Dilek, 1973) Theis yöntemine göre 250-2700 m²/gün olarak hesaplanmıştır.

Akiferin depolama katsayısı değeri basınçlı bölgeler için 10⁻⁴, serbest bölgeler için 10⁻² olarak hesaplanmıştır (Dilek, 1973).

3.4.3. Su Noktaları

3.4.3.1. Akarsular

Pasinler Ovası akarsu yönünden oldukça zengindir. İnceleme alanındaki ana akarsular çalışma alanını doğu- batı yönünde kat edecek şekilde akan Hasankale Çayı ve onun bir kolu olan Hamam Deresidir (Şekil 3.10a ve b). Hasankale Çayı'nı oluşturan diğer önemli dereler; Çaykara Dere, Büyük Dere, Kışla Dere, Kızılçermik Dere, Ecelinsuyu Dere, Kuru Dere ve Komar Dere'dir (Ek Şekil 1) . Pasinler Kaplıca kaynağı Hasankale Çayı yatağından 10-15 m uzaklıkta yüzeye çıkmaktadır. Her mevsim su taşıyan Hasankale Çayı'nın debisi kaplıcaların doğusunda 2700 l/s, kaplıcaların batısında 4122 l/s olarak ölçülmüştür (Esen, 2001).



Şekil 3.10. İnceleme alanında yer alan (a)Hasankale Çayı ve (b) Hamam Deresi

3.4.3.2. Soğuk Su Kaynakları ve Kuyuları

Pasinler Havzası'nda eğimli topografyanın alüvyon sınırında yüksek debili kaynaklar bulunmaktadır. Bu kaynaklardan 175 l/s debili Ovaköy (Ezirmik) kaynağı Müceldi ve Alvar köyleri arasında ve Keyvanlı Köyü güneyinde bataklıklar meydana gelmiştir (Dilek, 1973). Bir diğeri ise Alvar köyünün batısında bulunan 200 l/s debili kaynaktır. Ova içinde akiferin basınçlı olduğu bölgelerde yeraltı suyunun yeryüzüne ulaştığı yerlerde de çok sayıda kaynaklar bulunmaktadır ve bu kaynaklar drene edilerek sulama işlerinde kullanılmaktadır. Pasinler Kaplıcası yakın çevresinde ve üzerinde çeşmesi olan sürekli

akışa sahip Jandarma Kaynağının debisi yaklaşık 3.5 l/s dir. Ayrıca İller Bankası raporunda çalışma alanının kuzeydoğusunda 5 l/s debili Örentaş kaynağının olduğu belirtilmiştir.

Pasinler Ovası'nda yeraltı suyu araştırılması amacıyla ilk defa 1959 yılında sondaj kuyuları açılmaya başlanmıştır. Ovada 20 adet araştırma, 10 adet içme ve 116 adet işletme olmak üzere toplam 146 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Kuyu derinlikleri 24 m ile 340 m arasında değişmektedir. Mevcut kuyulardan bazılarında ait bilgiler Tablo 3.3'te verilmiştir. Kuyuların statik seviyeleri 1968-1969 yıllarında 0.00-28.60 m, 2011 yılında 0.88-30.47 m arasında ölçülmüştür. Özgül debileri yüksek olup yaklaşık 24-60 l/s/m ye kadar değişiklik göstermektedir. Artezyen olan kuyulardaki debiler, 0.5 l/s ile 30 l/s arasında değişmektedir (DSİ, 2013). DSİ 8. Bölge Müdürlüğü tarafından kuyuların 2011 yılında statik su seviyeleri 0.88-30.47 m arasında ölçülmüştür.

Pasinler Ovası'nda işletmeye açılan 10 adet Sulama Kooperatifi mevcuttur. Bu kooperatifler Erzurum-Pasinler Merkez, Pasinler Karavelet, Pasinler Aşıtlar, Pasinler Pusudere, Pasinler Yiğittaşı, Pasinler Korucuk, Pasinler Büyüktü, Pasinler Küçüktü, Pasinler Saksı, Pasinler Alvar, Pasinler Alibezirgan sulama kooperatifleridir (DSİ, 2013).

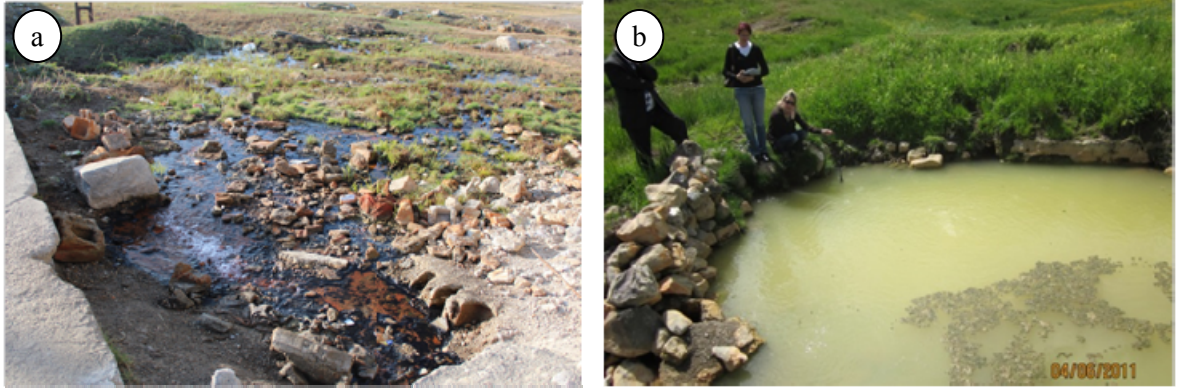
3.4.3.3. Sıcak Su Kaynakları ve Jeotermal Kuyular

Pasinler Havzası'nda sıcak su kaynakları, Uzunahmet köyünde, Hamamderesinin her iki kıyısında ve Hamam Deresi alüvyonları boyunca birkaç noktadan yüzeye ulaşmaktadırlar (Şekil 3.11a ve b). Yerden kaynarak yüzeye ulaşan kaynakların debileri ölçülemezdir. Kaynakların sıcaklıkları ise 33.6-34.4 °C arasında değişmektedir.

Pasinler Havzası'nda MTA tarafından 1991 yılından 2009 yılına kadar, değişen tarihlerde, PS-1, PS-1A, PS-2, PS-3, PS-4, PS-5 ve EHD-1 adlarında yedi adet jeotermal kuyu açılmıştır. Bu kuyulardan 4 tanesi (PS-2, PS-3, PS-4, PS-5) faal olarak çalışmakta olup, iki tanesinin (PS-1, PS-1A) üretimi durdurulmuştur. Pasinler Kaplıca Tesisleri'nde 2 adet kuyu (PS-2, PS-3) sürekli kullanılmakta olup diğer iki kuyu, (PS-4, PS-5) kuyu başı vanaları kapalı halde yedek olarak bekletilmektedir.

Tablo 3.3. Pasinler Ovası'ndaki işletme kuyuların hidrolik özellikleri (a: Dilek, 1973 ve b: DSİ, 2011)

Kuyu No (DSİ)	X	Y	Kot (m)	Derinlk (m)	T ^a (m ² /gün)	S ^a	St. Sv. (m) (1968) ^b	Dn. Sv. (m) ^b	Verim (l/sn) ^b	St.Sv. (m) (2011) ^b
10359	713633	4426150	1805	250	860	10 ⁻³	10.5	21.48	30	26.23
10368	715850	4427275	1766	250	600	10 ⁻⁴	5.81	9.95	41	15.04
10375	716850	4427500	1757	196	600	10 ⁻⁴	2.76	13.58	45	12.04
10523	735175	4430375	1658	80	258	10 ⁻¹	5.45	30.02	25	5.24
10529	734475	4429300	1650	65	1090	5x10 ⁻²	4.61	12.52	48	5.27
10532	737350	4429325	1645	100	600	5x10 ⁻²	3.50	12.10	42	3.99
11150	729925	4425000	1670	180	1495	5x10 ⁻²	8.93	13.35	42.6	11.10
11214	712163	4427400	1800	200	2701	10 ⁻³	5.35	4.87	53	5.61
11215	711000	4427038	1811	200	440	5x10 ⁻²	2	12.18	42	6.53
11218	711375	4428000	1802	200	1800	10 ⁻³	3	9.41	54	2.9
11290	718688	4428825	1737	194	1083	10 ⁻⁴	2.1	10.53	48	3.90
11292	718750	4427625	1725	161	1102	-	5.2	6.63	30	9.01
11346	719700	4427875	1793	172	2150	5x10 ⁻²	1.68	4.50	60	7.07
12540	732650	4426525	1652	160	700	10 ⁻⁴	1.8	12.35	45	3.23
12541	731625	4425663	1659	200	1500	10 ⁻⁴	3	8.80	43	5.43
12543	730950	4424450	1668	200	1000	10 ⁻⁴	5.74	14.11	45	8.30
12544	730813	4425450	1665	200	1260	10 ⁻⁴	3.92	11.70	47	7.76
12546	730275	4426900	1663	200	1000	10 ⁻⁴	5.37	11.41	45.2	7.07
12547	729750	4425825	1669	200	2130	10 ⁻⁴	6.87	12.04	40.8	9.27
12548	730188	4424200	1669	200	2120	10 ⁻⁴	9.25	13.00	51	12.85
12551	729250	4423950	1676	200	1475	10 ⁻⁴	12.5	16.06	45.2	16.85
12555	727850	4425400	1677	226	-	10 ⁻⁴	7.5	14.00	50	11.15
12561	727163	4425375	1685	225	-	10 ⁻⁴	10.8	18.18	48	13.96
12565	726500	4424700	1678	225	-	10 ⁻⁴	14.7	20.70	33	19.32
12566	724750	4427300	1682	200	-	10 ⁻⁴	0	13.65	60	0.88
12571	722850	4427075	1692	200	-	10 ⁻⁴	0	2.3	32	
12574	720700	4426775	1712	200	1264	10 ⁻⁴	3	3.80	60	3.02
12576	719575	4426038	1722	200	770	10 ⁻⁴	4.2	14.82	47	8.46
12578	718750	4425825	1733	200	1185	10 ⁻⁴	8.3	14.63	51	13.58
12580	717825	4425100	1748	200	1580	10 ⁻⁴	14.16	16.39	45	20.58
12910	710125	4427925	1819	200	-	-	4	50.00	39	6.85
13281	711000	4425350	1843	250	-	-	28.6	34.90	23.6	30.47
27333	736265	4424325	1655	100	-	-	8.43	23.88	50	6.44
27336	736950	4424875	1651	100	-	-	9.34	32.09	45.2	8.19
27350	732625	4423965	1665	100	-	-	8.36	21.70	60	8.62



Şekil 3.11. Alüvyonlardan yüzeye ulaşan kaynaklar (a) ve Hamam Deresi Kaynağı (b)

Son olarak 2009 yılında MTA tarafından Uzunahmet (Hamamderesi) mevkiinde 750 m derinliğinde EHD-1 kuyusu açılmıştır. Kuyudan 51°C sıcaklıkta 50 l/s debili sıcak su elde edilmiştir (Gökmenoğlu vd., 2009). Yine Uzunahmet (Hamamderesi) mevkiinde şahsi olarak açılmış ortalama sıcaklıkları 30°C, ortalama debileri 22 l/s olan sıcak su kuyuları bulunmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. İnceleme alanındaki jeotermal kuyular; (a) Oz, (b) PS-2, (c) PS-3 ve (d) PS-4

3.5. İnceleme Alanındaki Suların Hidrokimyasal Özellikleri

Pasinler jeotermal alanındaki sıcak su kaynakları MTA tarafından daha önceki yıllarda çalışılmış ve suların temel kimyasal özellikleri verilmiştir. Bu çalışmada havzadaki sıcak sulardan, yüzey sularından ve soğuk sulardan çeşitli dönemlerde örnekler alınarak havzadaki bu su kaynaklarının kimyasal içerikleri ayrıntılı şekilde ortaya konmuştur. Pasinler jeotermal alanındaki suların hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sıcak su kuyularından Özdemir (ÖZ), PS-2 ve PS-3 kuyularından, sıcak su kaynaklarından Hamamderesi kaynağı (HDK)'ndan, yüzey sularından Hamamderesi'nden iki ayrı noktadan (HD)- (HDE) ve Hasankale Çayı (HÇ)'nden, soğuk su kaynaklarından Jandarma kaynağı (JK)'ndan, soğuk su kuyularından ise 3205, 11216, 12571, 27335, 54324 numaralı kuyulardan örnekler alınmıştır. Çalışılan su örneklerinin numaraları, koordinatları ve kot değerleri Tablo 3.4'de verilmiştir (Ek Şekil 1).

Tablo 3.4. İnceleme alanındaki kaynaklardan yapılan örnekleme noktalarının koordinatları

Kuyu No	Koordinatı (UTM)	Kotu (m)
OZ-1 (Sıcak su kuyusu)	707269 - 4427475	1845
PS-2 (Sıcak su kuyusu)	729092 - 4427955	1656
PS-3 (Sıcak su kuyusu)	729105 - 4428602	1657
PS-4 (Sıcak su kuyusu)	729089 - 4428323	1647
PS-5 (Sıcak su kuyusu)	728920 - 4428347	1656
EHD-1(Sıcak su kuyusu)	708163 - 4428129	1825
HDK (Sıcak su kaynağı)	707961 - 4427803	1824
JK (Soğuk su kaynağı)	728313 - 4428720	1656
HD (Yüzey suyu)	707964 - 4427829	1825
HDE (Yüzey suyu)	705605 - 4425965	1855
HC (Yüzey suyu)	727673 - 4428515	1660
3205 (Soğuk su kuyusu)	738800 - 4427375	1629
11216 (Soğuk su kuyusu)	714050 - 4428375	1772
12571(Soğuk su kuyusu)	722850 - 4427075	1692
27335(Soğuk su kuyusu)	735125 - 4426250	1640
54324 (Soğuk su kuyusu)	711375 - 4428000	1802

Pasinler jeotermal alanındaki suların pH, sıcaklık (T), çözülmüş oksijen (DO), elektiriksel iletkenlik (EC) ve toplam çözülmüş madde miktarı (TDS) değerleri arazide yerinde ölçülmüştür. Çalışılan suların yağışlı, kurak ve ara mevsimi temsil eden fiziksel-kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. İnceleme alanından derlenen sıcak ve soğuk su kaynaklarına ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Ölçülen Parametreler	PS1-A		PS-2		PS-3		PS-4		PS-5		HDK			
	Ağu.91*	Ağu.91* Eki.94*	May.11	May.12	May.12	Ağu.12	Kas.12	2000*	May.11	2000*	May.12	Ağu.12	Kas.12	
Sıcaklık (°C)	42	40	37	38.4	36.9	36	37.6	42	36.17	39	34.44	34.25	34	33.62
pH	7.6	7.57	7.01	5.28	5.5	6.56	6.5	6.7	5.17	6.15	6.35	6.3	6.58	6.56
EC (µS/cm)	4060	5641	5030	5692	6516	6274	6621	6604	5505	5120	5243	4844	5404	4810
TDS	2639	3667	3270	3700	4236	4392	4304	4293	3637	3584	3408	3149	3513	3367
DO (mg/l)	-	-	1.82	0.7	0.92	0.8	2	-	2.44	-	1.92	0.89	1.76	3.55
Ca ⁺² (mg/l)	104	69	150	200	240	245	241	185	201.6	163	293.7	289.15	286	281.44
Mg ⁺² (mg/l)	73	104	76	100.7	89	106.47	105.07	75	83.3	81.9	198.5	159.2	161	165
Na ⁺ (mg/l)	570	920	850	910	910	927.28	895.3	1005	1010	700	361	354.68	405	410
K ⁺ (mg/l)	41	74	60	83.7	73.7	72.27	71.25	70	77.5	81.2	51.5	42.96	42.18	42.13
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	1202	1530	1410	1670	1830	1920	1910	1930	1910	1571	1925	1817	1919.8	1921.5
SO ₄ ⁻² (mg/l)	16	5	5.7	5.7	3.04	3.16	2.88	3.9	4.2	6.6	1.1	0.51	0.34	0.33
Cl ⁻ (mg/l)	628	1059	1040	1174	1078	1060	1074	1020	1970	976	578	475.34	535	540.78
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0	1.4	1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.1	<0.01	<0.1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NO ₃ ⁻ (mg/l)	1	1.1	1	<0.01	<0.01	<0.01	0.72	1.76	1	1.6	1	2	1.19	0
PO ₄ ⁻ (mg/l)	0.1	0.1	0.1	0.09	0.79	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NH ₄ ⁺ (mg/l)	4.5	0.5	5.7	17.60	13	12.13	27.42	4.3	12.1	4.8	6.9	7.39	8.05	7.08
F ⁻ (mg/l)	-	0.2	5.5	0.53	1.45	0.78	0.54	<0.1	0.47	<0.1	0.1	0.3	1.32	0.16
Li (mg/l)	-	-	-	1.2	0.43	1.08	1.09	-	1.09	-	0.3	0.25	0.3	0.26
Br (mg/l)	-	-	-	1.7	0.74	<0.01	0.95	-	1.6	-	1.7	<0.01	<0.01	0.91
SiO ₂ (mg/l)	170	169	-	170	171.2	173.2	172	-	157.2	-	190.5	181.8	174.1	-
Tuzluk (mg/l)	-	-	2.98	3.03	3.33	3.1	3.12	-	2.97	-	2.03	2.25	2	2.15

* MTA tarafından yapılan analizler

Tablo 3.5 devamı

Ölçülen Parametreler	HD		HDE		HÇ		
	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12	Kas.12
Ölçüm tarihi							
Sıcaklık (°C)	18.76	19.8	11.71	20.9	18.46	23.1	9.62
pH	6.35	7.4	6.15	7.93	6.3	7.76	8.27
EC (µS/cm)	1142	1122	810	750	452	721	784
TDS	742.6	785.7	525.8	523	293.8	505.3	510
DO (mg/l)	6.3	2.35	9	2.62	4.55	3.8	10.6
Ca ⁺² (mg/l)	86	85.13	70.4	70.83	40	63.18	60.84
Mg ⁺² (mg/l)	48	47.22	37.3	36.78	18	33.5	26.03
Na ⁺ (mg/l)	35.2	40.67	12.96	11.5	10	20.18	19.52
K ⁺ (mg/l)	7.17	7.2	2.53	4.35	3.22	5.13	5.47
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	545.1	582.1	389.4	383.96	208	346.8	371.2
SO ₄ ⁻² (mg/l)	4.24	3.76	6.25	7.11	7.49	18.03	9.71
Cl ⁻ (mg/l)	15	17.96	6.51	6.25	4	7.59	9.8
NO ₂ ⁻ (mg/l)	1.24	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.15
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0.76	1.8	0.08	1.31	3.06	9.89	6.58
PO ₄ ⁻ (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NH ₄ ⁺ (mg/l)	1,07	0.85	0.9	0.95	0.8	0.97	1.1
F ⁻ (mg/l)	0.21	0.22	0.31	0.32	0.1	0.28	0.21
Li (mg/l)	0.04	0.05	0.03	0.03	0.01	<0.01	0.01
Br (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
SiO ₂ (mg/l)	-	-	-	-	-	-	-
Tuzlk (mg/l)	0.42	0.2	0.28	0	0.16	0	0.24

Tablo 3.5 devamı

Ölçülen Parametreler	ÖZ			JK			3205 (Pasinler Çakırtaş)**											
	May. 11	May. 12	May. 12	Kas. 12	May. 12	Ağu. 12	Kas. 12	Nis. 09	Haz. 09	Eki. 09	Ara. 09	Haz. 10	Ey. 10	Haz. 11	Ey. 11	Haz. 12	Ey. 12	
Sıcaklık (°C)	23.03	23.17	23	22.58	13.32	14.2	13.26	17.20	16.60	13.2	9.7	-	14.8	14	13.1			
pH	6.23	6.2	6.2	6.4	7.8	7.9	7.9	7.90	8.07	7.97	8	8.05	8.25	8.02	8.63	7.95		
EC (µS/cm)	1456	1457	1506	1529	420	470	504	565	626	609	637	543	540	475	318	394		
TDS	946	930	1014	990	304	308	328	367.6	407	426	414	353	355	310	206	275		
DO (mg/l)	1.18	0.8	1.39	4.4	7.45	9	8.2	6.90	0.64	0.98	0.99	-	-	0.96	3.8	6.6		
Ca ⁺² (mg/l)	93.78	99.01	100.55	101.72	33.05	35.87	38.02	28	28	28	26	28	30	12	25	24.4		
Mg ⁺² (mg/l)	58.34	60.13	61.3	61.66	23	22.13	22.55	31.2	15.6	19.2	19.2	20.4	18	8.4	18	17		
Na ⁺ (mg/l)	59.2	59.14	59.37	57.58	11.38	11.08	13.83	25.3	55.2	61.1	60.2	4.24	48.7	60	52.2	52.2		
K ⁺ (mg/l)	10.37	10.08	10.07	9.63	2.66	2.33	3.43	1.95	1.95	1.56	1.95	3.12	2.7	2.34	6.24	7		
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	700	730	760	731	221	222.94	225.7	244	298	275	268	262	219	189	72.5	129		
SO ₄ ⁻² (mg/l)	1.2	1.41	1.24	5.04	7.8	7.31	7.27	2.4	2.1	6.24	4.8	0.96	0.48	0.48	0	0.48		
Cl ⁻ (mg/l)	24	20.42	20	21	2.02	2.18	11.15	34.8	6.39	35.5	34	34.7	36.2	36.2	33	30		
NO ₂ ⁻ (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.18	0.00	0	0	0	0.12	0	0	-	0.06		
NO ₃ ⁻ (mg/l)	<0.01	<0.01	0.41	0.23	3.62	3.89	4.37	0.06	0.01	0.05	0.22	0.07	0.89	0	-	15.41		
PO ₄ ⁻³ (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
NH ₄ ⁺ (mg/l)	2.1	4	1.76	2.39	0.8	1.2	1.69	0.01	0.05	0.03	0.05	0	0.04	0.04	-	0		
F ⁻ (mg/l)	0.35	0.44	0.22	0.34	0.12	0.14	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Li (mg/l)	0.06	0.07	0.06	0.07	0	<0.01	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Br ⁻ (mg/l)	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
SiO ₂ (mg/l)	125.9	160	123.4	-	22.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Tuzluk (mg/l)	0.48	0.53	0.3	0.51	0.16	0	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

** DSİ tarafından yapılan analizler

Tablo 3.5 devamı

Ölçülen Parametreler	11216 (Pasinler)**						12571 (Pasinler)**								
	Nis. 09	Haz. 09	Ek. 09	Ara. 09	Haz. 09	Ara. 09	Nis. 09	Haz. 09	Eki. 09	Ara. 09	Haz. 10	Ey. 10	Haz. 11	Haz. 12	Ey. 12
Ölçüm tarihi															
Sıcaklık (°C)	16.6	16.3	15.9	9.7	7.93	9.7	15.2	18.2	15	11	-	-	15.5	16	14.1
pH	8	8.07	7.87	7.93	7.93	7.93	7.7	7.86	7.71	7.85	8.55	8.32	7.94	8.61	8.01
EC (µs/cm)	360	310	342	320	320	320	494	432	483	461	370	437	273	200	308
TDS	234	202	223	224	224	224	321	280	314	323	241	284	180	123	200
DO (mg/l)	6	5.73	5.8	6.36	6.36	6.36	4.6	5.1	7.8	4.47	-	-	5.9	6.60	6.20
Ca ⁺² (mg/l)	26	18	28	22	22	22	32	24	34	28	32	32	15.2	28	27.4
Mg ⁺² (mg/l)	12	14.4	10.8	15.6	15.6	15.6	18	21.6	19.2	19.2	16.8	16.8	10.3	19.4	18.3
Na ⁺ (mg/l)	17	10.3	11.5	13.3	13.3	13.3	19.7	13.8	19.5	22.3	15.6	18.4	13.1	14.2	14.7
K ⁺ (mg/l)	2.3	3.1	3.51	0.7	0.7	0.7	8.9	2.3	2.3	12.8	2.7	2.3	3.9	1.95	1.95
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	164.7	152.5	152.5	158.6	158.6	158.6	225	214	214	214	164.7	195.2	128	45.7	110.4
SO ₄ ⁻² (mg/l)	5.76	2.4	9.12	7.2	7.2	7.2	9.1	4.8	16.8	14.8	1.44	9.12	2.4	9.12	9.6
Cl ⁻ (mg/l)	6.4	0.71	7.1	6.4	6.4	6.4	8.5	0.3	8.5	12	7.8	8.5	7.1	5.6	6
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.07	-	0.02
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0.2	1.14	0.12	0.07	0.07	0.07	0.27	0.47	0.34	0.33	0.34	2.27	0.38	-	10.69
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0.01

**DSİ tarafından yapılan analizler

Tablo 3.5 devamı

Ölçülen Parametreler	27335 (Pasinler Altınbaşak)**												54324 (Pasinler)**											
	Nis.09	Haz.09	Ek.09	Ar.09	Haz.10	Ek.10	Ar.10	Haz.11	Haz.12	Ek.12	Ar.12	May.12	Nis.09	Haz.09	Ek.09	Ar.09	Haz.10	Ek.10	Ar.10	Haz.11	May.12			
Ölçüm tarihi	13.5	18.7	13.8	10.8			13.3	14.2	14				15.4	19.9	16.3	12				13.9	12.9			
Sıcaklık (°C)	7.81	7.96	7.89	7.94	8.46	8.28	7.89	8.6	8.06				6.6	6.66	6.63	6.6	8.48	8.2	7.36	8.1				
pH	515	443	552	504	432	430	305	389	316				402	497	538	450	450	490	300	317				
EC (µs/cm)	335	310	358	327	281	297	196	279	206				261	323	350	298	293	318	195	206				
TDS	7	6.67	6.7	7.61	-	-	7.05	6.8	6.9				1.6	1.67	1.87	3.3	-	-	6.62	6.9				
DO (mg/l)	28	22	32	28	26	36	14	28	27.6				16	12	20	18	20	38	18.4	38.6				
Ca (mg/l)	24	24	22.8	24	24	19.2	10.3	22.4	21.7				26.4	14.4	12	26.4	10.8	21.6	10	22.6				
Mg (mg/l)	21.8	23.4	30	24.6	21.6	21.1	24.6	21.6	20.7				11.2	43.7	47.6	17	42.7	9.2	14.2	6.4				
Na (mg/l)	1.1	1.17	1.5	1.1	1.1	0.7	1.5	0.7	0.7				3.1	11.7	13.2	12.3	13.2	3.12	7.8	3.1				
K (mg/l)	220	220	238	207	164	164	116	72.5	103				189	238	238	201	195	238	134	117				
HCO ₃ (mg/l)	26.8	18.7	22.5	31.2	32.6	26.4	17.7	26.4	23				7.2	2.4	10.5	14.4	2.8	1	1	4.8				
SO ₄ (mg/l)	13.4	1.42	12	12	12	12	12.7	9.5	9.23				8.5	1.4	8.5	8.5	8.5	7.8	8.5	3.9				
Cl (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	-	0.01				0	0	0	0.01	0.04	0	0	0.02				
NO ₂ (mg/l)	0.99	2.58	0.72	0.53	0.41	0.3	1.34	-	11.8				0.1	0.24	0	0	0.08	0.88	0.99	9.94				
NO ₃ (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	-	0				0	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0				
NH ₄ (mg/l)																								

**DSİ tarafından yapılan analizler

Elde edilen bu kimyasal analiz sonuçlarının hata oranlarının belirlenmesi için elektronötrallite denklemi kullanılarak katyon-anyon dengesi (%e) hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalara göre analiz sonuçlarındaki hata oranının $\pm\%5$ 'i geçmemesi beklenir. İnceleme alanındaki suların kimyasal analiz sonuçlarında hata oranı (%e) -5.8-5.1 arasında değişmektedir ve bu hata oranları kabul edilebilir düzeydedir.

3.5.1. Suların Fiziksel Özellikleri

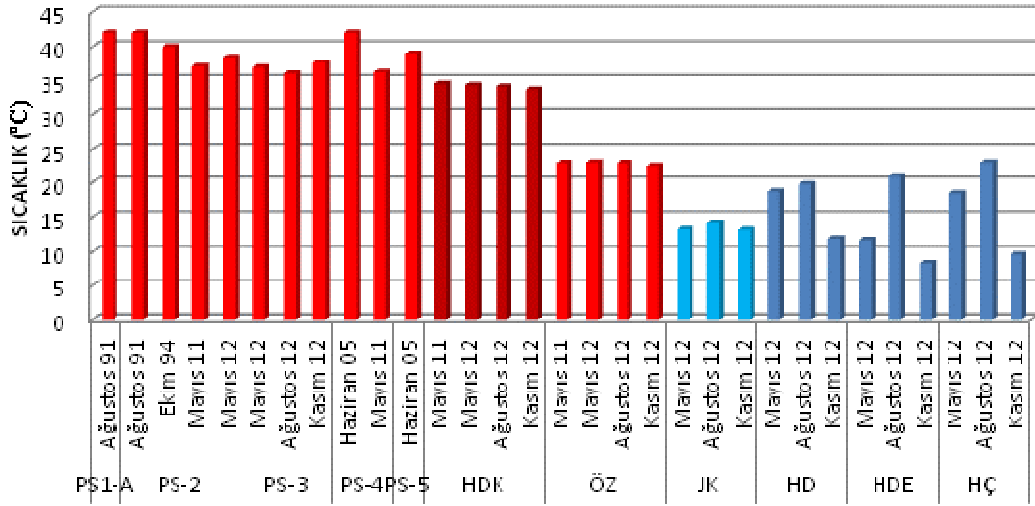
3.5.1.1. Sıcaklık (°C)

Yüzey ve yeraltı sularının kullanılmasına ve çeşitli yerlere göç edip birikmesine etki eden önemli faktörlerden biri sıcaklıktır. Yüzey sularının sıcaklığı mevsim, akarsu debisi, derinlik, yükselti gibi özelliklere bağlı olarak değişir. Yeraltı sularının sıcaklığı genellikle yüzey sularına göre daha düşüktür ve homojen dağılım gösterir. Suyun sıcaklığı yükseldikçe oksijenin suda çözünürlüğüde azalır (Stevens vd., 1975).

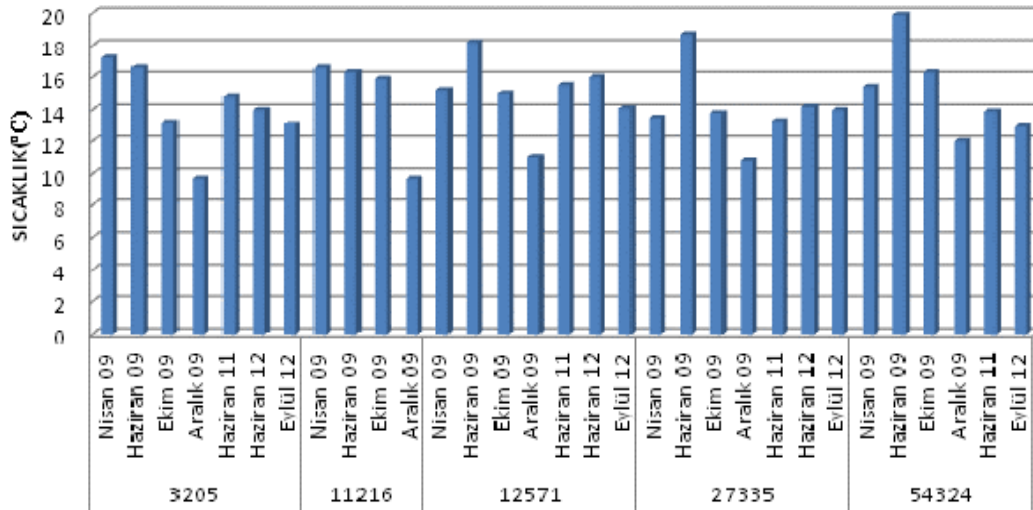
İnceleme alanındaki Hamamderesi sıcak su kaynağında (HDK), sıcak su kuyularından (ÖZ, PS-2 ,PS-3, PS-4 ve PS-5), soğuk su kaynağında (JK), yüzey sularında (HD, HDE ve HÇ) ve soğuk su kuyularında (3205, 11216, 12571, 27335 ve 54324) ölçülen sıcaklık değerleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5'e göre çalışma alanında kimyasal analizleri olan jeotermal kuyuların su sıcaklığı 22.5-42 °C, EHD-1 jeotermal kuyusunun sıcaklığı 51 °C, HDK'nın sıcaklığı ise 33.6-34.44 °C arasındadır (Şekil 3.13). Kaynak ve jeotermal kuyu sularının sıcaklıkları dikkate alındığında jeotermal alan Muffler ve Cataldi (1978)'e göre düşük entalpili sahalar sınıfında yer almaktadır. İnceleme alanında yer alan soğuk su kaynağının sıcaklığı ise 13.26-14.2 °C arasındadır. Çalışma alanında yer alan soğuk su kuyularının sıcaklığı ise mevsimlere göre küçük farklılıklar göstermekte olup, 9.7-19.9 °C arasındadır (Şekil 3.14).

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 incelendiğinde değişik yıllarda ve mevsimlerde bölgedeki suların sıcaklık değişimi jeotermal suların en düşük değerinde olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.13. İnceleme alanındaki sıcak suların, yüzey sularının ve soğuk su kaynağının mevsimlere göre sıcaklık değişimleri



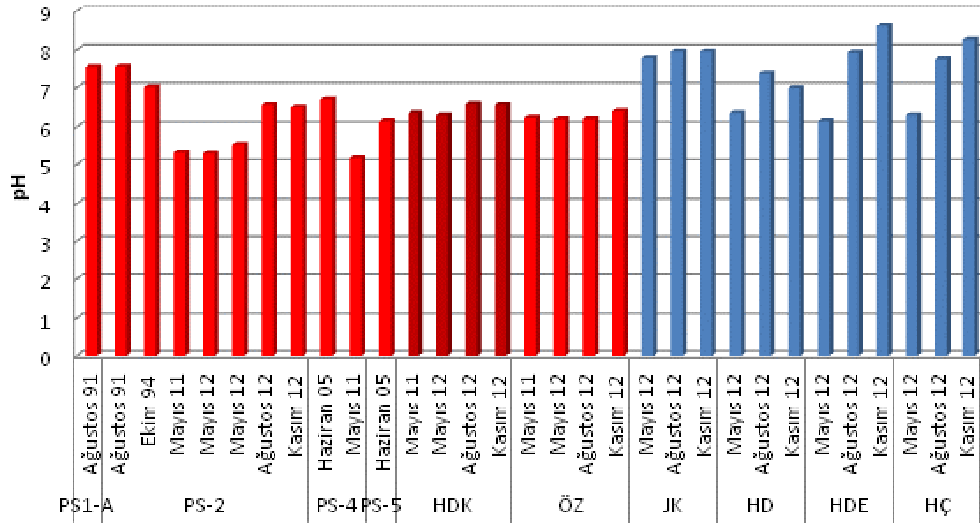
Şekil 3.14. İnceleme alanındaki soğuk su kuyularının mevsimlere göre sıcaklık değişimleri

3.5.1.2. Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH)

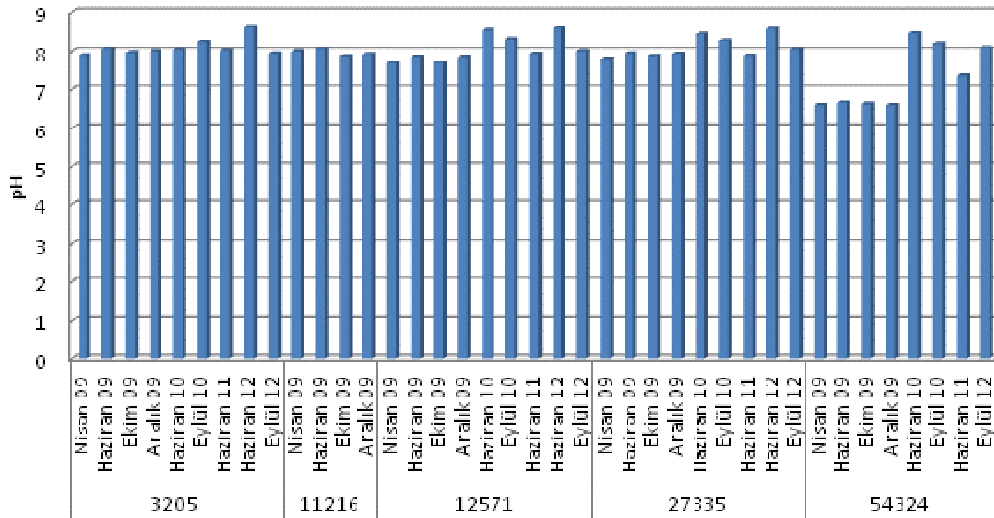
pH, sudaki hidrojen iyonu konsantrasyonunun bir ölçüsü olup sudaki asit ve bazlar arasındaki dengeyi gösterir. Suların pH'ı hidrojen iyonu üreten birbirleri ile ilişkili kimyasal reaksiyonlar tarafından kontrol edilir. Doğal yer altı sularının pH değeri 6.0- 8.5 arasında değişir, fakat termal sularda düşük pH değerleri görülmektedir (Hem, 1971). Sudaki karbonat, hidroksit ve bikarbonat suyun bazik özelliğini artırırken, serbest mineral asitleri ve karbonik asit suyun asit özelliğini artırmaktadır (Hem, 1971). Suların aşındırıcı

(düşük pH) ve kabuk bağlayıcı (yüksek pH) özellikleri suların pH değerlerinden kaynaklanmaktadır. Bunun nedeni ise atmosferdeki CO₂ gazının fiziksel çözünme ile sulara geçmesi ve hidrasyon sonucunda karbonik aside dönüşerek sulara çözücü-aşındırıcı bir özellik kazandırmasıdır (Hem, 1985).

Çalışma alanındaki sıcak suların pH'ı 5.17-7.6 arasında, Jandarma soğuk su kaynağının pH'ı 7.8-7.96 arasında, yüzey sularının pH'ı 6.3-8.2 ve soğuk su kuyularının pH'ı ise 7.7-8.6 arasında değişmektedir (Tablo 3.5, Şekil 3.15 ve 3.16).



Şekil 3.15. İnceleme alanındaki sıcak suların, yüzey sularının ve soğuk su kaynağının mevsimlere göre pH değişimleri



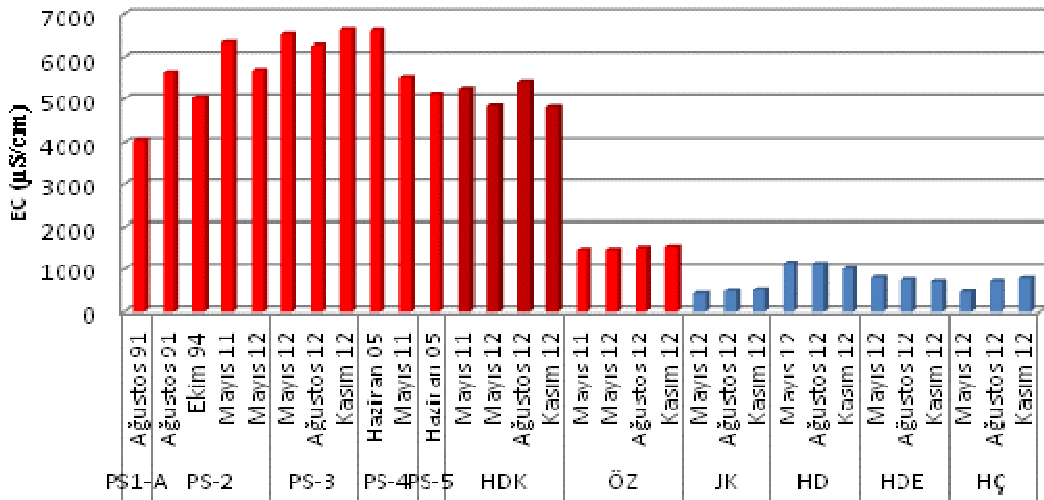
Şekil 3.16. İnceleme alanındaki soğuk su kuyularının mevsimlere göre pH değişimleri

Sıcak suların, soğuk su kuyularının ve soğuk su kaynağının pH değerlerinin her mevsim çoğunlukla birbirlerine yakın olması bu sulara herhangi bir yüzey suyunun karışmadığını gösterir. Yüzey sularının pH değerleri mevsimsel değişimlerden etkilenmiştir.

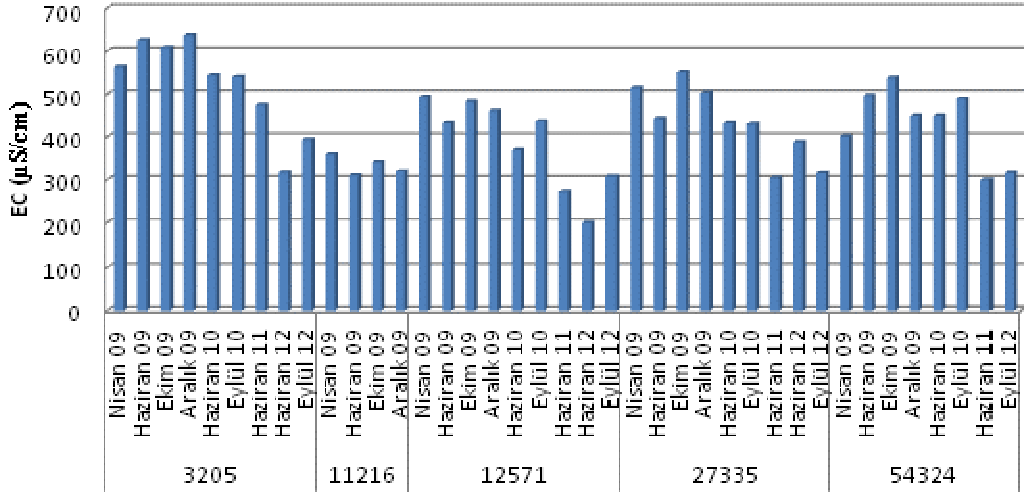
3.5.1.3. Elektriksel İletkenlik (EC)

Elektriksel iletkenlik, suyun elektrik akımını iletebilme özelliğinin sayısal olarak ifadesidir. Suyun analiz sonuçları 25 °C’de mikromoh/cm veya mikrosiemens/cm ($\mu\text{S/cm}$) olarak ifade edilmektedir. Suların EC’leri suda çözülmüş toplam madde (TDS) miktarına, suların yeryüzüne çıkıncaya kadar izledikleri yola, temasta oldukları kayaçların türüne, çözünürlüklerine, iklime, bölgedeki hidrolojik koşullara ve suyun sıcaklığına bağlıdır. Sıcaklık artışı ile suların EC değerlerinde artış görülür. TDS ile artış gösteren EC değeri, sudaki toplam iyon değişiminin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Hem, 1985). Çalışma alanındaki sıcak suların EC değerleri 970-6233 $\mu\text{S/cm}$ arasında, Jandarma soğuk su kaynağının 320-322 $\mu\text{S/cm}$ arasında, yüzey sularının 330-857 $\mu\text{S/cm}$ arasında, soğuk su kuyularının ise 234-510 $\mu\text{S/cm}$ arasında yer almaktadır (Şekil 3.17 ve 3.18).

Tablo 3.5, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 incelendiğinde genel olarak en yüksek EC değerleri sıcak sularda gözlenmektedir ve bölgedeki suların EC değerleri mevsimsel değişimlerden etkilenmemiştir.



Şekil 3.17. İnceleme alanındaki sıcak suların, yüzey sularının ve soğuk su kaynağının mevsimlere göre elektriksel iletkenlik (EC) değişimleri



Şekil 3.18. İnceleme alanındaki soğuk su kuyularının mevsimlere göre elektriksel iletkenlik (EC) değişimleri

3.5.1.4. Çözünmüş Oksijen (DO)

Oksijen, sularda orta derecede çözünebilir bir gazdır. Sulardaki çözünmüş oksijenin büyük bir kısmı atmosferden ve suda yaşayan canlıların fotosentez yapmaları ile sağlanır. Doğal sulardaki çözünmüş oksijen miktarı, sıcak suyun karışımı, tuzluluk ve atmosferik basınç gibi fiziksel şartlardan etkilenir. Sıcaklık ve tuzluluk arttıkça suda çözünen oksijen azalır. Yeraltı sularındaki oksijen suyun yüzeysel sularından beslenmesi ve su tablasının üzerindeki doymamış bölgedeki havanın hareketi ile sağlanır (McNeely vd., 1979).

Çalışma alanındaki sıcak sularda çözünmüş oksijen miktarı 0.7-4.4 mg/l arasında, yüzey sularında 2.35-10.6 mg/l arasında, soğuk su kaynağında 7.45-9 arasında ve soğuk su kuyularında ise 0.6-7.8 mg/l arasında değerler almaktadır (Tablo 3.5). Sıcak sularda çözünmüş oksijenin bulunmasının nedeni soğuk sularla karışımın olmasından kaynaklanabilir.

3.5.1.5. Toplam Çözünmüş Madde Miktarı (TDS)

Toplam çözünmüş madde miktarı; sularda çözünmüş halde bulunan inorganik tuzlar (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{-2}) ve organik maddelerden oluşmaktadır. Sularda toplam çözünmüş madde miktarı çeşitli dış etkilerle artabilir. Farklı jeolojik birimlere sahip

bölgelerde TDS'nin değişik konsantrasyonları, minerallerin çözünürlükleri arasındaki fark nedeniyle olmaktadır.

İnceleme alanındaki sıcak sularda TDS değerleri 2538-4392 mg/l, yüzey sularında 215-830 mg/l ve jandarma soğuk su kaynağında 209-321mg/l olarak ölçülmüştür.

3.5.2. İnceleme Alanındaki Sularda Majör İyonlar

Yapılan bu çalışmada sularda bulunan anyon ve katyon değerlerinin kökenlerine ilişkin yorumlamalar literatür bilgilerinden yararlanılarak yapılmaya çalışılmıştır.

Doğal suların toplam iyon içeriklerinin %90'ından daha fazlasını oluşturan Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- ve SO_4^{-2} iyonları majör iyonlar olarak adlandırılmaktadır. Sıcak ve soğuk yer altı sularının iyonik derişimleri suyun kökeni, akifer sistemleri ve karışım oranları hakkında bilgi verebilmektedir.

3.5.2.1. Sodyum (Na^+)

İnceleme alanındaki sıcak su kaynaklarının Na^+ iyonu miktarı 57.5-1005 mg/l arasında, Jandarma soğuk su kaynağının 11.3-13.8 mg/l, yüzey sularının 10-40.6 mg/l, soğuk su kuyularının ise 0.28-2.66 mg/l arasında değişmektedir.

Sodyum, alkali gurubu elementlerdendir. Sodyum klorürün sudaki çözünürlüğünün oldukça yüksek olması ve tabiatta çok bol olması sularda bol miktarda bulunmasına sebep olmaktadır. Na^+ yaygın olarak NaCl şeklinde deniz suyunda bulunmaktadır ve yer altı sularına plajiyoklasların ayrışması ve kil minerallerinin baz değişimi sonucu karışmaktadır. Bütün Na^+ bileşikleri suda kolayca çözünürler. Yer altı sularındaki sodyumun bulunuşu mineral cinsine ve miktarına, pH'a, bozunma süresine, yer altı sularının akım hızına, ortamdaki kalsiyum iyon derişimine, yapay ve doğal kirlenme gibi etkenlere bağlıdır. Yer kabuğundaki Na^+ kaynakları mağmatik kayaçlar, kil mineralleri, feldspatlar, evaporitler ve feldspatoidler'dir. Ayrıca insan aktiviteleri yüzey sularındaki ve yeraltı sularındaki Na^+ derişimini etkiler (kışın yolların tuzlanması vb.). Evaporitlerden halit (NaCl) ve mirabilit ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) suda çok çözünür ve genellikle sudaki Na^+ 'un ana kaynağını oluştururlar. Sodyum jeotermal rezervuar akışkanın ana katyonudur ve konsantrasyonu yaklaşık 200-2000 mg/l'dir. Sıcak sularda Na^+ ve K^+ içerikleri sıcaklığa bağlı olarak gelişen mineral su

dengesine bağlıdır. Sıcak sularda düşük Na/K oranı suların yüzeye hızlı bir şekilde ulaşımını gösterir (Nicholson, 1993). İnceleme alanındaki sularda bulunan Na^+ 'un kaynağı Pasinler Havzası'nda geniş bir alanda yüzeyleme veren magmatik kayalarındaki feldspatlardan kaynaklanabilir.

3.5.2.2. Potasyum (K^+)

İnceleme alanındaki sıcak sularda K^+ iyonu miktarı 10.08-86.8 mg/l arasında, Jandarma soğuk su kaynağında 2.3-3.4 mg/l, yüzey sularında 2.5-7.2 mg/l, soğuk su kuyularında ise 0.02- 0.34 mg/l arasında değişmektedir.

Yeraltı sularındaki potasyum içeriği çökel kayalardan, feldspatlardan, mikalardan, feldspatoidlerden ve kil minerallerinden kaynaklanmaktadır. Doğal sularda K^+ içeriği 20 ppm'den fazla değildir. Ancak sıcak su kaynaklarında bu değer 100 ppm'e ulaşabilmektedir (Doğan, 1981). Sodyum ve Potasyum konsantrasyonu mineral-akışkan dengesine bağlı olarak, sıcaklıkla kontrol edilir ve jeotermal akışkanlardaki majör kationlardır. Düşük Na/K oranı yüzeye hızlı bir şekilde ulaşan sıcak sularda gözlenir. Yüksek Na/K oranı ise yatay bir hareketin yüzeye yakın kesimlerindeki reaksiyonların ve kondaktif soğumanın etkisindedir (Nicholson, 1993). İncelenen sulardaki potasyumun kaynağını havzada yüzeylenen riyolitler oluşturmaktadır.

3.5.2.3. Kalsiyum (Ca^{+2}) ve Magnezyum (Mg^{+2})

İnceleme alanındaki sıcak sularda Ca^{+2} değerleri 69-289.1 mg/l arasında, Jandarma soğuk su kaynağında 33-38 mg/l, yüzey sularında 40-70.8 mg/l, soğuk su kuyularında ise 0.6-1.90 mg/l arasında değişmektedir. Mg^{+2} miktarı, sıcak sularda 58-198.5 mg/l arasında, Jandarma soğuk su kaynağında 22.1-23 mg/l, yüzey sularında 18-48 mg/l, soğuk su kuyularında ise 0.7-2.2 mg/l arasında değişmektedir.

Kalsiyum canlıların yaşamında ve doğal sularda bulunan en önemli toprak alkali metallere biridir. Atmosfer basıncı ve sıcaklığı sudaki kalsiyum çözünürlüğünü artırır.

Doğal sularda kalsiyumun kaynağı; kalsit (CaCO_3), aragonit (CaCO_3), dolomit ($(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrit (CaSO_4), florit (CaF_2), plajiyoklas (anortit, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), piroksen (diyopsit, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) ve amfiboller ($\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe,Al})$

$\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ olabilir. Genellikle kalsit, jips ve montmorillonitlerde yer alır (Hounslow, 1995).

Bitkilerin gelişmesinde kalsiyumun önemli bir rolü vardır. Sulama sularında kalsiyumun bol miktarda bulunması, sodyum yüzdesinin azalmasını sağlar ve böylelikle oluşacak zararları önler (Hounslow, 1995).

Suların pH değerleri sulardaki kalsiyum iyonları miktarlarını ve çökelişini doğrudan etkiler. pH değeri artarsa CO_3/HCO_3 oranı büyür ve kalsit çökelişini meydana gelir. Soğuk yeraltı sularında kalsiyum değeri 10-100 mg/l arasındadır. Karbondioksitin ortamdaki uzaklaşması kalsit çökelişine neden olur. Bu nedenle yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde kalsiyum içeriği genellikle düşük değerdedir.

Yeraltı sularında kalsiyumdan sonra en fazla bulunan katyon magnezyumdur. Sulardaki magnezyum iyonu dolomit, evaporit, mağmatik kayaç minerallerinden (olivin, biyotit, hornblend, ojit) ve serpantinleşme sonucu açığa çıkan magnezyum karbonatın çözünmesi ile karışır (Nicholson, 1993). Yeraltı sularında magnezyum değeri 1-40 mg/l arasında değişmektedir ve genelde kalsiyum miktarından daha azdır. Çok yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerde magnezyumun ikincil alterasyon minerallerinden illit, montmorillonit ve özellikle klorit tarafından soğurulması nedeniyle magnezyum miktarı çok düşük değerlere inebilmektedir (0.1 mg/l gibi). Sıcak sulardaki daha yüksek magnezyum içerikleri ise sıcak suların soğuk sularla karışımından veya yan kayaç ile reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Mg^{+2} tuzları ise oldukça yüksek bir çözünürlüğe sahiptir. Mg tuzları çöktürüldükten sonra da çözeltide kalmaya devam ederler. Doğal sularda 100 ppm'e kadar değişen derişimlerde bulunan Mg^{+2} , suların sertliğini oluşturan diğer bir iyondur. İnceleme alanındaki sularda bulunan Ca^{+2} ve Mg^{+2} , un kaynağını havzada yüzeylenen volkanik kayaçlardaki minerallerden kaynaklanmaktadır.

3.5.2.4. Alkalinite (HCO_3^- ve CO_3^{2-})

İnceleme alanındaki sıcak sularda HCO_3^- iyonu miktarı 700-1970 mg/l arasında, Jandarma soğuk su kaynağında 221-225.7 mg/l, yüzey sularında 208-582 mg/l, soğuk su kuyularında ise 0.75- 4.9 mg/l arasında değişmektedir.

Doğal sularda alkaliniteyi oluşturan temel unsurlar, atmosferik karbondioksit ile toprakta ve doygun olmayan bölgede üretilen gazlardır. Suların alkalinitesi, içerdiği çözülmüş maddelerin asitlerle tepkimeye girme ve nötralleştirme kapasitesidir. Hemen

hemen bütün doğal sulara alkalinite, karbonat (CO_3) ve hidroksit (OH) iyonlarından dolayı ortaya çıkmaktadır. Doğal suların alkaliniteleri nadir olarak 500 ppm CaCO_3 'ü aşmaktadır. Rezervuardan doğrudan beslenen kaynaklarda HCO_3^- konsantrasyonu en düşük seviyededir. $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ oranı, suyun akış yönünün göstergesidir. Yüksek akım zonundan suyun akışı su-kayaç ilişkisinin artışına, dolayısıyla HCO_3^- üretiminin artışına neden olur. Yanal akışın artışı ile su-kayaç etkileşimi artar ve ortamdan H_2S kaybolarak $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ oranı artar (Nicholson, 1993). HCO_3^- değerince zengin sulara su kayaç ilişkisi hakimdir. Sıcak sulara bikarbonatın yüksek olması sıcak sularla evaporitik kayaçların etkileşimde olmadığını gösterir (Nicholson, 1993). Ca^{+2} - HCO_3^- tipli sular kireçtaşları ile, Ca^{+2} - Mg^{+2} - HCO_3^- tipli sular dolomitler ile sıcak suların etkileşimini belirtir. Yüksek K^+ içerikli Na^+ - HCO_3^- tipli sular ise feldspat, plajiyoklas ve piroksen içeren magmatik ve volkanik kayaçlarla sıcak suların etkileşimini ifade eder (Mazor, 1997). Çalışma alanındaki sulara bulunan yüksek miktardaki HCO_3^- konsantrasyonu suların çevrede yer alan volkanik kayaçlarla etkileşimde olduğunu göstermektedir.

3.5.2.5. Klorür (Cl^-) ve Florür (F^-)

Cl^- miktarı inceleme alanındaki sıcak sulara 20-1174 mg/l arasında ölçülmüştür. Jandarma soğuk su kaynağında 2.02-11.15 mg/l arasında, yüzey sularında 4- 17.9 mg/l ve soğuk su kuyularında ise 0.04-1.02 mg/l olarak ölçülmüştür.

F^- değeri ise sıcak sulara <0.1-5.5 mg/l, soğuk su kaynağında 0.12-0.37 mg/l yüzey sularında ise 0.1- 0.32 mg/l olarak ölçülmüştür.

Sulardaki klorür ya direk olarak halit çözünmesinden veya dolaylı olarak okyanuslarda buharlaşan suyun yağışlarla yeryüzüne düşmesiyle gerçekleşir.

Cl^- esas olarak sedimanter kayaçlarda özellikle evaporitlerde bulunmakta olup, doğadaki dağılımı oldukça geniştir. Ayrıca sodalit, biyotit, hornblend gibi magmatik kökenli minerallerde klorür iyonu bulunmaktadır. Kirlenmemiş doğal sulara Cl^- içeriği genellikle 10-20 ppm arasındadır. Bu değer yağışın Cl^- içeriği ile yakından ilişkilidir. Jeotermal kaynaklarda yüksek klorür konsantrasyonları, doğrudan derin bir rezervuar kayaçtan beslenmeyi işaret eder (Nicholson, 1993). Bu durumda, soğuma veya soğuk su ile karışım en alt düzeyde olmalıdır. Sıcak sulardaki düşük klorür seviyeleri, yeraltı suyu seyrelmelerini yansıtır. Klorür içeriğinin artması deniz suyu kontaminasyonu ile ilişkiyi de gösterir. 1000 mg/l ve üzerinde klorür içeren sular klorürlü sulardır (Nicholson, 1993).

Florürün kaynağı ise; florit, apatit, mika ve amfibol gibi minerallerdir. Genellikle anyon değişimi sonucunda kaolinitlerin adsorbsiyonu ile oluşur; pH= 6 ise adsorbsiyon en yüksek seviyededir (pH>7.5 ve pH<4 olduğunda desorpsiyon gelişir). Alkalin sular genel olarak yüksek F⁻ içerir. Deniz sularında F⁻ içeriği <1 mg/l'dir (Hem, 1992). Hounslow ve Back (1985)'e göre kaolinitten adsorbsiyon bazı alkali suların F⁻ içeriği >1 mg/l'dir. Jeotermal akışkanlardaki F⁻ içeriği, genellikle 10 mg/l'den düşüktür. F⁻ kayaç-su etkileşimi sonucu farklı mineral fazlarda (iz olarak mikaların yapısında) bulunabilir. CO₂ basıncı yüksek ise kalsiyum ortamda bulunan F⁻ ile bileşik oluşturur. (Nicholson, 1993). Yüksek F⁻ konsantrasyonu, ortamda düşük kalsiyumu işaret eder. Ender olarak yüksek F⁻ değeri meteorik sular içinde volkanik gazların (HF⁻) yoğunlaşması ile üretilebilir. Bu durumda F⁻, çok yüksek Cl⁻ ve SO₄⁻² değerleri ile birlikte oluşur (Nicholson, 1993). İnceleme alanındaki sıcak sularda ölçülen yüksek klorür konsantrasyonları, derin bir rezervuar kayaçtan beslenmeyi işaret eder.

3.5.2.6. Sülfat (SO₄⁻²)

Çalışma alanında yer alan sıcak sulardaki sülfat konsantrasyonu 0.33-16 mg/l, Jandarma soğuk su kaynağında 7.2-7.8 mg/l, yüzey sularında 3.7-18 mg/l ve soğuk su kuyularında 0-0.35 mg/l arasındadır.

Kükürt, magmatik ve sedimanter kayaçlarda indirgenmemiş halde metal sülfürleri olarak yaygın olarak bulunur. Sülfür mineralleri suyla temas ederek bozunurlar ve oksitlenerek sülfat iyonlarını oluşturur ve bu iyonlar suya geçer (Hem, 1985).

Yeraltı sularındaki sülfatın büyük bir kısmı jips ve anhidritlerden ileri gelmektedir. Ayrıca az miktarda piritin oksidasyonu ile oluşan demir sülfattan, magnezyum ve sodyum sülfattan da gelebilir. Yüzey sularındaki yüksek SO₄⁻² konsantrasyonu genellikle yüzeye yakın sular içinden buhar yoğunlaşmasının varlığını gösterir. Derin kökenli jeotermal sularda sülfat içerikleri genelde düşük olup 50 mg/l'den azdır. Sülfat konsantrasyonu nehir suyunda 11 mg/l, kirlenmemiş yeraltı sularında genellikle 1-250 mg/l jeotermal sularda ise maksimum 1000 mg/l'dir. SO₄ miktarında, hidrojen sülfürün oksidasyonu sonucu artış gözlenebilmektedir (Nicholson, 1993). İnceleme alanındaki sıcak sularda ölçülen düşük sülfat konsantrasyonu jeotermal suların derin kökenli olduğuna işaret etmektedir.

3.5.3. Ağır Metal Analizleri

Doğal sularda majör iyonlar dışında eser miktarlarda bulunan bazı maddeler minör bileşenler olarak adlandırılmaktadır. Demir dışında diğer ağır metaller sularda 1 ppm'den daha düşük derişimlerde bulunur (Freze ve Cherry, 1979). Doğal sulara evsel ve endüstriyel atık suları ve madencilik faaliyetleri atıklarının aracılığı ile bazen önemli miktarlarda ağır metaller katılabilir. Suyun dolaşımı sırasında temasta olduğu litolojik birimlerin minerolojik yapısı da, sulardaki ağır metal içeriğinin kaynaklarından birini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada eser element tayinine yönelik kimyasal analizlerde suların Al, As, B, Fe, Mn, Cu, Cr, Pb, Zn, Ni, Cd, Li, Sr, Si, Br içerikleri saptanmıştır. Tablo 3.6'da inceleme alanında yer alan sıcak ve soğuk yeraltı sularına ait eser element değerleri verilmiştir.

Başlıca iyonlarda olduğu gibi yeraltı sularının ikincil iyonları da suların kökeni, hidrokimyasal evrimleri ve kullanılabilirlikleri hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 3.6. İnceleme alanındaki sularıda bulunan eser elementler (değerler mg/l)

Örnek No	OZ-1			PS-2		PS-3			PS-4		HDK			
	May.11	May.12	Ağu.12	Kas.12	May.11	May.11	May.12	Ağu.12	Kas.12	May.11	May.11	May.12	Ağu.12	Kas.12
Al	0.002	0.001	0.001	0.001	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
As	<0.0005	<0.0005	0.5	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	
B	1.07	1.1	1.1		9.9	10.3	9.5	9.2	9.04	9.04	14.7	13.3	13.5	
Ba	0.009	0.007	0.007		0.9	0.9	0.76	0.18	0.83	0.83	0.52	0.32	0.13	
Be	<0.00005	<0.00005	<0.00005		0.0006	0.001	-	-	0.001	0.001	<0.0005	-	-	
Br	0.17	0.04	0.04		1.7	1.7	-	-	1.6	1.6	1.7	-	-	
Cd	<0.05	<0.05	<0.05		<0.5	<0.5	<0.05	<0.05	<0.5	<0.5	<0.05	<0.05	<0.05	
Cu	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.001	0.001	0.0008	0.001	0.0008	0.001	0.0005	0.0005	0.0005	0.0003
Fe	4.8	4.8	4.9	4.8	4.08	4.2	4	4	3.8	3.8	4.3	4	4	3
Ge	0.0009	0.0008	0.0009		0.003	0.004	-	-	0.003	0.003	0.003	-	-	
Li	0.06	0.06	0.06		1.2	1.2	1.2	1.08	1.09	1.09	0.3	1	1	
Mn	0.1	0.09	0.08	0.08	0.4	0.4	0.3	0.08	0.4	0.4	0.1	<0.0005	0.05	0.002
Ni	<0.0002	<0.0002	<0.0002		0.002	0.004	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.005	<0.0002	<0.0002	
P	0.3	0.01	0.09		0.6	0.5	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	4.1	4	
Pb	0.0005	<0.0001	<0.0001	0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.001
Rb	0.01	0.01	0.01		0.14	0.14	-	-	0.13	0.13	0.08	-	-	
S	<1	<1	1		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	
Sc	0.015	0.01	0.01		0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	
Si	58.9	49.6	57.7		80.8	80.1	80	81	73.5	73.5	89.1	85	81.4	
Sr	0.3	0.3	0.3		2.3	2.5	2.4	0.3	2.3	2.3	2.5	2.2	1.6	
Zn	<0.0005	0.001	0.001		0.007	0.01	0.01	0.01	0.005	0.005	0.008	0.009	0.005	
Zr	<0.0002	<0.0002	<0.0002		0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	

Tablo 3.6 devamı

Örnek No	JK		HD		HDE		HC	
	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12
Ölçüm Tarihi	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12
	Kas.12	Kas.12	May.12	Ağu.12	May.12	Ağu.12	May.12	Kas.12
Al	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.02
As	0.006	0.006	0.002	0.002	0.005	0.009	0.005	0.006
B	0.05	0.05	0.6	0.7	0.04	0.04	0.11	0.22
Ba	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.08
Be	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Br	0.01	0.008	0.03	0.05	0.01	0.01	0.01	0.03
Cd	<0.05	<0.05	<0.05	0.20	<0.05	<0.05	<0.05	0.13
Cu	0.0002	0.0002	0.0004	0.003	0.0005	0.009	0.002	0.002
Fe	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Ge	0.05	0.05	0.0003	0.0004	0.05	0.05	0.05	0.05
Li	0.002	0.002	0.04	0.05	0.03	0.02	0.005	0.01
Mn	<0.0005	<0.0005	0.0007	0.003	<0.0005	0.0005	<0.0005	0.001
Ni	<0.0002	0.0002	<0.0002	0.01	<0.0002	0.002	0.003	0.003
P	0.02	0.03	0.04	0.02	0.1	0.2	0.04	0.05
Pb	<0.001	<0.001	0.6	0.7	0.3	0.1	0.4	0.4
Rb	0.002	0.002	0.006	0.009	0.002	0.004	0.003	0.006
S	3	5	2	3	3	5	4	10
Sc	0.002	0.002	0.007	0.002	0.005	0.005	0.002	0.001
Si	10.6	11.6	31.3	41.8	21.8	26.9	12.6	16.9
Sr	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.2	0.6
Zn	<0.0005	0.004	<0.0005	<0.0005	0.001	0.001	0.001	0.015
Zr	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0005	<0.0002	0.0006	0.07	0.04

3.5.3.1. Demir (Fe) ve Mangan (Mn)

İnceleme alanında bulunan sıcak sularda Fe miktarı 3-4.9 mg/l, Mn değeri 0.002-0.4 mg/l arasındadır Soğuk su kaynağında Fe değeri <0.01 mg/l ve Mn değeri ise <0.0005 mg/l dir. Yüzey sularında Fe miktarı <0.01 mg/l ve Mn değeri ise <0.0005-0.001 mg/l arasında yer almaktadır (Tablo 3.6).

Demir, magmatik kayalarda bulunan özellikle piroksen, amfibol, magnetit, pirit, biyotit ve granat gibi demirli minerallerin bozunumundan ortaya çıkar. Yeraltı sularındaki demirin en yaygın bulunuş şekli Fe^{+2} dir. Fe^{+3} ise asit çözeltilerde bulunur. Karbonlu kayalardan gelen sularda fazla miktarlarda demir iyonları izlenebilir. Kireçtaşı ve dolomitten gelen sular pH'ı 7'den fazla olduğundan çok fazla demir iyonu içerir. Bazı sedimanter akiferlerde farklı derinliklerde bulunan farklı redoks potansiyeline sahip karışmış sular ya doğal olarak ya da yeraltı suyunda demir minerallerinin çözünmesi veya çökmesi sebebiyle Fe içermektedir (Hem, 1985).

Mangan yeraltı sularında genellikle iki değerlikli (Mn^{+2}) mangan şeklindedir. Mangan, yeraltı sularında çoğunlukla hidroksit şeklinde bulunur ve etkisi demire çok benzer. Manganın çözünürlüğünü Eh-pH etkiler. Asidik sularda Mn^{+2} , alkali sularda ise Mn^{+4} şeklinde bulunur. pH'ın yükselmesi manganın çökmesine neden olur. Mangan içme sularında istenmeyen renk ve bulanıklığa sebep olur (Hem 1985).

3.5.3.2. Bakır (Cu)

Çalışma alanındaki sıcak sularda Cu konsantrasyonu 0.0003-0.001 mg/l, Jandarma soğuk su kaynağında 0.0002 mg/l, yüzey sularında ise Cu konsantrasyonu 0.0004-0.009 mg/l dir.

Cu, kayalarda doğal Cu veya Cu içeren sülfür ve karbonat mineralleri halinde bulunur. Cu minerallerinin çözünürlükleri çok düşük olduğundan, sulardaki bakırın çok az bir kısmı doğal kökenlidir (Hem, 1985). Bakır bitki ve hayvanların metabolizmasında yer alan önemli bir elementtir. 1mg/l nin üzerindeki bakır suda acı bir tat bırakır. Bakır gıdalarda ve içme suyunda bulunan önemli kirleticilerdir. İçme suyunda bakır konsantrasyonu öncelikli olarak su tesisatlarındaki korozyondan kaynaklanabilir. Asidik sularda ya da karbonatı yüksek sularda bakır konsantrasyonu yüksek olabilir (Anonim, 2006).

3.5.3.3. Kurşun (Pb)

İnceleme alanındaki sıcak sularda kurşun değerleri $< 0.0001-0.02$ mg/l arasında, Jandarma soğuk su kaynağında < 0.001 mg/l ve yüzey sularında $0.01-0.6$ mg/l dir.

Kayaç oluşturan birçok mineralin asıl yapısında yer alan Pb, sularda doğal olarak bulunmakta, kayaçlardan ve insan faaliyetlerinden yeraltı sularına karışmaktadır. Doğal sulardaki Pb nadir olarak yüksek değerlere ulaşır (Hem, 1985). Bunun yanı sıra insanların kurşunu yaygın olarak kullanmaları (su boruları ve benzin) bunların çevresel olarak yaygınlaşmasını sağlamıştır.

3.5.3.4. Çinko (Zn)

İnceleme alanındaki sıcak sularda çinko değerleri $0.001-0.01$ mg/l arasında, Jandarma soğuk su kaynağında 0.004 mg/l ve yüzey sularında 0.001 mg/l dir.

Doğal sularda bulunan Zn genellikle, suyun temasta olduğu kayaçlardan, topraktan, endüstriyel atıklardan, gübreden ve atmosferden kaynaklanabilir. Çinko içme sularında 5 mg/l nin üzerinde bulunması halinde suya buruk acı bir lezzet verir. Suyu genellikle çeşitli endüstriyel atıksularının yanı sıra galvanize borularının korozyonu ile karışır. Çinko tüm ağır metaller içerisinde belkide en az toksik olan metaldir. Sularda fazla bulunması halinde suya hoşta gitmeyen bir tat verir (Akgiray, 2003). Zn, insan için görece olarak zehirli olmayan bir element olup 25 ppm derişimlere kadar olumsuz bir etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir (McNeely vd., 1979).

3.5.3.5. Nikel (Ni)

Nikel, inceleme alanındaki sıcak sularda ve soğuk su kaynağında genellikle <0.0002 mg/l, yüzey sularında ise 0.003 mg/l değerinde ölçülmüştür.

Ni, mağmatik kayaçlarda bulunan birçok mineralin yapısında vardır. Ni'in doğal sularda, 1 ppm'e kadar yükselen derişimleri yanında, genellikle 0.005 ile 0.02 ppm arasındaki derişimlerde bulunduğu belirlenmiştir (WHO, 2008).

3.5.3.6. Alüminyum (Al)

İnceleme alanındaki sıcak sulara ölçülen Al değerleri 0.001- 0.02 mg/l, Soğuk su kaynağında 0.001- 0.003 mg/l ve yüzey sularında 0.001-0.03 mg/l arasında yer almaktadır.

Alüminyum, feldspat, feldispatoid, mika ve amfibol gibi minerallerde önemli miktarda bulunur. Sedimentlerde ise alüminyumca zengin olan mineraller killerdir (Hem, 1992). Alüminyum, yer kabuğunda önemli miktarda bulunmasına karşın (%8.6), az çözünmesi ve yeraltı sularında meydana gelen doğal süzülme nedeniyle yeraltı sularında önemsiz miktarda bulunur. pH'ın 5-9 arasında olduğu sulara, alüminyum 1 ppm'den azdır. Genellikle yer altı sularında 0.005-0.3 ppm arasında alüminyum izlenir, asit sulara bu değer 100 ppm'e erişebilir. Alüminyumun suda bulunuşu, özellikle suyun kökeni ve maden yatakları hakkında bilgi vermesi bakımından önemlidir (Şahinci, 1986). Rezervuar akışkanın Al^{+3} konsantrasyonu, genellikle <2 mg/kg'dır. Buna karşın hareketsiz element olarak adlandırılır ve genellikle silis ile birlikte hareket eder. Asidik sular ise yüksek (yaklaşık 100 mg/l) Al^{+3} içerir (Nicholson, 1993). Alüminyum hemen bütün gıdalarda ve içme sularında tabii olarak mevcuttur.

3.5.3.7. Arsenik (As)

İnceleme alanındaki sıcak sulara ölçülen As değerleri 0.01-0.5 mg/l, soğuk su kaynağında 0.006 mg/l ve yüzey sularında 0.002-0.009 mg/l arasında yer almaktadır.

Arsenik, pirit, arsenopirit, demir, bakırlı şeylerden ve fosfatlı kayaların oksidasyonundan jeotermal sulara kolaylıkla geçer.

Doğal dengeyi bozan kirleticiler arasında yer alan arsenik, gerek doğada serbest halde bulunabilmesi ve gerekse canlı yapıda oluşturduğu değişik toksik etkileri nedeniyle insan ve hayvan sağlığı açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle içilebilir sulara bulunan arsenik düzeylerine belirli sınırlandırmalar getirilmiştir.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme ve kullanma sularında 0.01 ppm'e kadar arsenik bulunabileceğini, 0.05 ppm'den daha yüksek miktarlarda arsenik içeren suların ise kesinlikle kullanılmaması gerektiğini bildirmiştir.

3.5.3.8. Bor (B)

Bor değerleri çalışma alanındaki sıcak sularda 1.01- 14.7 mg/l, soğuk su kaynağında 0.05 mg/l ve yüzey sularında 0.04-0.7 mg/l arasında yer almaktadır.

Yüzey ve yeraltı sularının içerdiği bor magmatik ve sedimanter kayalarından, topraktan, endüstriyel ve evsel atık sulardan kaynaklanır. Volkanik gazlar bor bileşikleri içerirler, bu nedenle volkanik kayalarla temas halinde bulunan sular ve sıcak kaynak suları önemli miktarda bor içerebilir (Dikmen, 2001). Bor'un toksik miktarlarına genellikle fay hatlarına yakın kuyu sularında, sıcak kaynak sularında, tuzlu ve alkali toprakların bulunduğu bölgelerde yeraltı ve taban sularında rastlanır (Eryurt, 1999). Bor bitkiler üzerinde zehirleyici etkisi nedeniyle önemli bir jeotermal kirleticidir. Bitkiler için sınır değer 1 mg/l dir (Doğdu, 2001). Sularda borun bulunuş şekli suyun pH'ına bağlı olarak değişir. Asitli sularda (pH 6'dan az) ortoborik asit egemendir. Ntr ve alkali (pH 11'den yukarı) doğal sularda tetra-penta-hekza ve diğer poliboratlar gözlenir. Alkali metal boratlar fazla, geri kalan boratlar suda çok az znrlenir. Sıcaklığın yükselmesi ile boratların znrlkleri artar. Bu nedenle bor hidrotermal ortamlarda hızlı hareket eder. Borik asit, sıcak sularda çok, soğuk sularda az znr. Jeotermal sistemlerde B^{+3} ve Cl^- genellikle suların kökenini ve sistemler içinde farklı rezervuarlar arasındaki karışımı belirlemek amacıyla kullanılır (Truesdell, 1975, 1991; Arnorsson ve Andresdottir, 1995). Derin yeraltı sularında yüzlerce mg/l bor bulunabilir. Bor tipik halojen elementtir, buharlaşma ile yığışır, özellikle alkali ortamlarda g hızlıdır. Çünkü borun okelmesini etkileyen kalsiyum ve magnezyum alkali ortamlarda çok az bulunur.

3.5.3.9. Brom (Br)

İnceleme alanındaki sıcak sularda llen Br değerleri 0.04-1.7 mg/l, Soğuk su kaynağında 0.008-0.01 mg/l ve yüzey sularında 0.01-0.05 mg/l arasında yer almaktadır.

Brom, klorür iyonu ile birlikte bromür iyunu şeklinde daha çok tuzlu sularda ve bazı endüstri atıklarının karıştığı sularda bulunur. Deniz suları 67 mg/l (Hounslow, 1995), doğal tuzlu sular 100-1000 mg/l Br^- (Collins, 1975) içerir. Jeotermal sularda Br^- genel olarak düşüktür. Ancak jeotermal sulara deniz suyu karışımı olduğunda Br oranı yükselir. Br/Cl ve Br/I oranı sulara denizsuyu karışımı olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan iyi bir indikatördür (Nicholson, 1993).

3.5.3.10. Silisyum (Si)

Çalışma alanında Si değerleri; sıcak sularda 49.6-89.1 mg/l, soğuk su kaynağında 10.6-11.6 mg/l ve yüzey sularında 12.6-41.8 mg/l arasında değişmektedir.

Yerkabuğunda bol miktarda bulunan silisyum elementi suda çok zor çözünmektedir. Silika (SiO_2) miktarı genel olarak doğal sularda 1-30 mg/l arasında değişen konsantrasyonlarda bulunur. Ancak bazı bölgelerde 100 mg/l'ye ulaşan konsantrasyonlar ölçülmüştür (Hem, 1992). SiO_2 'nin ortalama değeri yüzey sularında 14 mg/l, yeraltı sularında 17 mg/l olarak belirtilmiştir (Davis, 1964).

3.5.3.11. Baryum (Ba)

Çalışma alanındaki sıcak sularda Ba^{+2} değerleri 0.007- 0.9 mg/l soğuk su kaynağında 0.04 mg/l ve yüzey sularında 0.02-0.08 mg/l arasında değişmektedir.

Magmatik ve sedimanter kayalarda bulunan baryum yan ve iz elementlerden biridir. Baryum bileşikleri endüstriyel işlemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. İnsan sağlığı açısından bakıldığında baryum yüksek tansiyona sebep olmaktadır. İçme suyundaki miktarı 2 mg/l'den az olmalıdır (Akgiray, 2003).

3.5.3.12. Lityum (Li)

Çalışma alanındaki sıcak sularda lityum (Li^+) konsantrasyonu 0.06-1.2 mg/l soğuk su kaynağında 0.002 mg/l ve yüzey sularında 0.005-0.05 mg/l dir.

Lityumla magnezyumun yer değiştirdiği bazı piroksen ve mikalar lityum (Li^+) taşıyan minerallerdir. Lityum miktarı sıcaklığın artmasıyla artar magnezyum miktarı ise azalır. Bu nedenle Li/Mg oranı jeokimyasal termometre olarak kullanılır (Kharaka ve Mariner, 1987). Yapılan son çalışmalar lityumun illit ve diğer killer tarafından adsorbe edildiğini göstermektedir (Shaw ve Sturchio, 1992). Petrol alanlarında Li^+ içeriği 5-50 mg/l arasında olmasına rağmen, 400 mg/l'ye çıktığı alanlar da vardır (Collins, 1975). Deniz suyunun lityum içeriği 0,17 mg/l'dir (Hounslow, 1995).

3.5.3.13. Stronsiyum (Sr)

İnceleme alanında bulunan sıcak sularda Sr^{+2} elementi 0.3-2.5 mg/l, soğuk su kaynağında 0.4-0.5 mg/l ve yüzey sularında 0.2-0.6 mg/l arasında değişmektedir.

Stronsiyum suya strontianit ($SrCO_3$), sölestin ($SrSO_4$) ve aragonit ($CaCO_3$) minerallerinden geçer. Aragonitteki Ca^{+2} iyonu Sr^{+2} iyonu ile yer değiştirirken bu durum kalsit ($CaCO_3$) için söz konusu değildir. Aragonit, diyajenez sırasında daha duraylı polimorf kalsite dönüşürse bu durumda su içinde Sr^{+2} serbest kalır. Deniz suyunda 8 mg/l kadar Sr^{+2} bulunur (Hounslow, 1995).

3.5.3.14. Kadmiyum (Cd)

İnceleme alanında yer alan sıcak sularda ve soğuk su kaynağında Cd değerleri <0.05 mg/l dir. Yüzey sularında ise Cd değeri <0.05-0.20 arasında değişmektedir.

Kadmiyum elementi yer kabuğunda eser miktarda bulunmakta olup, özellikleri Zn'ya benzer. Doğal suların Cd içerikleri genellikle 0.001 ppm'den daha az olmasına karşın bazı sularda 0.01 ppm'e kadar ulaşan derişimlerde bulunabilmektedir (McNeely vd., 1979).

3.5.4. Kirlilik Analizleri

Çalışma alanındaki sıcak sulardan, soğuk su kaynağından, yüzey sularından ve soğuk su kuyularından kirliliği tespit etmek için mevsimsel örnekleme yapılmıştır (Tablo 3.7)

3.5.4.1. Amonyum (NH_4)

Çalışma alanındaki sıcak sularda amonyum değeri 0.5-27.4 mg/l, Jandarma soğuk su kaynağında 0.8-1.69 mg/l, yüzey sularında 0.73-1.15 mg/l ve soğuk su kuyularında 0-0.05 mg/l arasında değişmektedir.

Amonyak sularda bulunan azotun en fazla indirgenmiş inorganik bileşimidir ve çözülmüş amonyak (NH_3) ve amonyum iyonlarından (NH_4) oluşur. Amonyum sudaki serbest klorürle kolaylıkla reaksiyona girerek kloraminleri oluşturması; içme suyu arıtma tesislerinde sterilizasyon aşamasında klorlama veriminin düşmesine ve oluşan

kloraminlerin düşük konsantrasyon seviyelerinde dahi (0.06-0.1 mg/l) su canlı yaşamını olumsuz etkilemesine sebep olmaktadır (Smethurts, 1979). Yeraltı sularındaki amonyak derişimi, toprak tanelerinin ve kil minerallerinin adsorblanması nedeni ile genellikle düşüktür (APHA vd., 1981). Amonyum hem doğal hem de antropojenik kökenli olarak oluşabilir. Amonyumun doğal kaynakları çoğunlukla metabolik prosesler, kayaç ayrışması hidrotermal aktiviteler, gübreler ve endüstriyel faaliyetlerdir (Aiuppa vd., 2003). Amonyum/Amonyak oranı pH değeri ve sıcaklığa bağlıdır. pH'ın 8.5 ten büyük olduğu durumlarda amonyak yüzdesi hızla artar (Uslu ve Türkman, 1987). Sularda serbest amonyağın bulunması sudaki yakın kirlenmenin bir işaretidir. Serbest amonyak ve nitrit düşük miktarlarda bile yüksek toksik etki yapmaktadır (Erguvanlı ve Yüzer, 1987).

Tablo 3.7. İnceleme alanından derlenen örneklerin kirlilik analiz değerleri

Kuyu No	Örnek türü	Ölçüm Tarihi	NO ₂	NO ₃	NH ₄	PO ₄
PS1-A	Sıcak su kuy.	Ağu.91	0	1.0	4.5	0.1
PS-2	Sıcak su kuy.	Ağu.91	1.4	1.1	0.5	0.1
		Eki.94	1	1	5.7	0.1
PS-3	Sıcak su kuy.	May.12	<0.01	<0.01	13	0.79
		Ağu.12	<0.01	<0.01	12.13	<0.01
		Kas.12	<0.01	0.72	27.42	<0.01
PS-4	Sıcak su kuy.	2000	<0.1	1.76	4.3	0
PS-5	Sıcak su kuy.	2000	<0.1	1.6	4.8	0
HDK	Sıcak su kay.	May.12	<0.01	2	7.39	<0.01
		Ağu.12	<0.01	1.19	8.05	<0.01
		Kas.12	<0.01	0	7.08	<0.01
ÖZ	Sıcak su kuy.	May.12	<0.01	<0.01	4	<0.01
		Ağu.12	<0.01	0.41	1.76	<0.01
		Kas.12	<0.01	0.23	2.39	<0.01
JK	Soğuk su kay.	May.12	<0.01	3.62	0.8	<0.01
		Ağu.12	<0.01	3.89	1.2	<0.01
		Kas.12	0.18	4.37	1.69	<0.01
HD	Yüzey suyu	May.12	1.24	0.76	1.07	<0.01
		Ağu.12	<0.01	1.8	0.85	<0.01
		Kas.12	<0.01	1.88	0.73	<0.01
HDE	Yüzey suyu	May.12	<0.01	0.08	0.9	<0.01
		Ağu.12	<0.01	1.31	0.95	<0.01
		Kas.12	0.39	1.64	1.15	<0.01
HÇ	Yüzey suyu	May.12	<0.01	3.06	0.8	<0.01
		Ağu.12	<0.01	9.89	0.97	<0.01
		Kas.12	0.15	6.58	1.1	<0.01

Tablo 3.7'nin devamı

Kuyu No	Örnek türü	Ölçüm Tarihi	NO ₂	NO ₃	NH ₄	PO ₄
3205	Soğuk su kuy.	Nis. 09	0	0.06	0.01	0
		Haz. 09	0	0.01	0.05	0
		Ek. 09	0	0.05	0.03	0
		Ara. 09	0	0.22	0.05	0
		Haz. 10	0.12	0.07	0	0
		Ey. 10	0	0.89	0.04	0
		Haz. 11	0	0	0.04	0
		Ey. 12	0.06	15.41	0	0
11216	Soğuk su kuy.	Nis. 09	0	0.20	0	0
		Haz. 09	0	1.14	0	0
		Ek. 09	0	0.12	0	0
		Ara. 09	0	0.07	0	0
12571	Soğuk su kuy.	Nis. 09	0	0.27	0	0
		Haz. 09	0.01	0.47	0	0
		Ek. 09	0	0.34	0	0
		Ara. 09	0	0.33	0	0
		Haz. 10	0	0.34	0	0
		Ey. 10	0	2.27	0	0
		Haz. 11	0.07	0.38	0	0
		Ey. 12	0.02	10.69	0.01	0
27335	Soğuk su kuy.	Nis. 09	0	0.99	0	0
		Haz. 09	0	2.58	0	0
		Ek. 09	0	0.72	0	0
		Ara. 09	0	0.53	0	0
		Haz. 10	0	0.41	0	0
		Ey. 10	0	0.30	0	0
		Haz. 11	0	1.34	0	0
		Ey. 12	0.01	11.80	0	0
54324	Soğuk su kuy.	Nis. 09	0	0.10	0	0
		Haz. 09	0	0.24	0.01	0
		Ek. 09	0	0	0.01	0
		Ara. 09	0.01	0	0	0
		Haz. 10	0.04	0.08	0.01	0
		Ey. 10	0	0.88	0	0
		Haz. 11	0	0.99	0	0
		Ey. 12	0.02	9.94	0	0

3.5.4.2. Nitrit (NO₂⁻)

Yapılan bu çalışmada NO₂⁻ iyonu sıcak su kaynaklarında <0.01, jandarma soğuk su kaynağında <0.01-0.18 mg/l, yüzey sularında <0.01-1.24 arasında ve soğuk su kuyularında 0-0.12 mg/l arasında değişmektedir.

NO₂⁻ iyonu, sularda düşük miktarlarda bulunan bir azot bileşiğidir. Oksijenin bulunduğu ortamlarda kararsız durumda olduğundan, NH₃ ve NO₃⁻ arasında (nitrifikasyon) veya nitrat veya azotoksit arasında (denitrifikasyon) geçiş formu olarak bulunur. Suda nitritin bulunması organik kirlenme tarafından etkilenmiş aktif biyolojik süreçlerin varlığını göstermektedir. NO₂ insanlar ve hayvanlar için NO₃⁻'tan daha fazla zehirleyicidir (Doğan, 1981). Nitrit iyonu bitkiler tarafından azot kaynağı olarak kullanılabilir. Suda nitritin bulunması organik kirlenme tarafından etkilenmiş aktif biyolojik süreçlerin varlığını gösterir (McNeely vd., 1979). Nitrit iyonu sularda oldukça yaygın olarak görülür, fakat nitrate oranla oldukça düşük miktarda bulunur. Nitrit organik azotun bakteriler tarafından tamamen oksitlenmesi sonucu oluşur. Evsel atıklar, bozunan bitkisel ve hayvansal atık sular, tarımda kullanılan gübreler, endüstriyel atıksular, katı atıkların yakılması, atmosferdeki azotun yıkanması yüzey ve yeraltı sularına nitrit sağlayan başlıca kaynaklardır (Anonim, 2006). İçme suyunda nitritin yüksek konsantrasyonda bulunması zehirlilik etkisi yapmaktadır. Genel olarak yeraltı sularında azot olarak 0.1 mg/l'den fazla nitrit bulunmaz (Erguvanlı ve Yüzer, 1987).

3.5.4.3. Nitrat (NO₃⁻)

İnceleme alanındaki sıcak sularda nitrat konsantrasyonu 3.62-4.34 mg/l arasında, jandarma soğuk su kaynağında <0.01-0.18 arasında, yüzey sularında 0.08-9.86 mg/l arasında ve soğuk su kuyularında ise 0-11.80 mg/l arasında değişmektedir.

Nitrat, sularda bulunan bağlı azot bileşiklerinin en önemlisidir. Magmatik kayalar ve volkanlardan çıkan malzeme (buhar, gaz v.b.) sulardaki nitrate lokal kaynaklık ederler. Yüzey ve yeraltı sularındaki nitrat çoğunlukla organik veya insan kaynaklıdır. Bozunan bitkisel ve hayvansal atıklar, katı atıkların yıkanması, evsel atıklar, endüstriyel atıksular (azotlu gübre nitrit asit v.b. endüstriler), tarımda kullanılan gübreler, sulamadan dönen sular, atmosferik azotun yağışlarla yıkanması yüzey ve yeraltı sularındaki nitratı sağlayan başlıca kaynaklardır (Dikmen, 2001).

Sulardaki nitrat miktarı genellikle 20 mg/l den azdır, fakat bazı su kaynaklarında 45 mg/l' yi geçebilir. Yüksek nitrat derişiminin çoğu yeraltı sularında görülmektedir. Yüzeysel sulardaki nitrat da sucul bitkiler tarafından kullanılarak azaltılmaktadır (WHO, 1984).

Bazı yüzeysel suları 450 mg/l den fazla nitrat içerebilmesine rağmen, derişim nadir olarak 20 mg/l ye ulaşır ve çoğunlukla 5 mg/l nin altındadır. Yeraltı sularında nitrat miktarı 450 mg/l ye kadar çıkabilir. Azotlu gübrelerin kullanıldığı tarım alanlarında yeraltı sularında nitrat derişimi 1000 mg/l'yi aşabilir. Nitratın insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde tutularak, WHO (1984) içme suyu standartlarında derişiminin 50 mg/l' den az olmasını önermiştir.

3.5.4.4. Fosfat (PO₄)

Çalışma alanındaki sıcak sularda fosfat konsantrasyonu <0.01-0.79 mg/l arasında, jandarma soğuk su kaynağında ve yüzeysel sularında <0.01 mg/l' dir.

Doğal ve atık sularda fosfor çeşitli şekillerde bulunur. Bunlar ortafosfatlar, polifosfatlar, metafosfatlar ve organik fosfatlardır. Fosfor mağmatik kayalarda bulunan en yaygın elementlerden biridir. Bu kayalarda esas olarak apatit minerali olarak bulunur. Sedimanlar içinde de oldukça yaygın olmasına karşın doğal sulardaki fosfat derişimi 1 mg/l' nin çok altındadır (Hem, 1985). Ortamda yeterli miktarda azot bulunduğu 0.1 mg/l üzerindeki fosfor derişimleri çamur oluşumuna ve alg çoğalmasına neden olarak suyun içme, endüstriyel ve banyo amacıyla kullanımını olumsuz etkilemektedir (McNeely vd., 1979).

Yüzeysel ve yeraltı sularında fosfat, kayalardan ve topraktan, bozunan bitkisel ve hayvansal atıklardan, evsel ve endüstriyel atıklardan, arıtma tesisi atık sularından, katı atık depolama alanlarından, tarımda kullanılan gübrelerden kaynaklanmaktadır.

3.6. İnceleme Alanındaki Suların Sınıflandırılması

İnceleme alanındaki suların hidrokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çalışma alandaki sıcak su kaynağından ve MTA'nın açmış olduğu sıcak su kuyularından, soğuk su kaynağından, yüzeysel sularından su örnekleri alınmıştır. Ayrıca Erzurum DSİ

Genel Müdürlüğü tarafından çalışma alanındaki soğuk su kuyularında yapılan analizlerden yararlanılmıştır.

Suda çözünen başlıca iyonlardan anyonlar ve katyonlar, ayrı ayrı olmak üzere litrede eşdeğer gram cinsinden toplam çözünmüşlerin %50'sinden fazla olan iyonlar hidrokimyasal fasiyes tipini belirtmektedir.

İyonların hiçbirisi miktar olarak %50'yi geçmiyorsa karışık su tipini belirtmektedir. Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979) Sıcak ve Mineralli Sular Komisyonu Çalışma Raporu'nda belirtilen sınıflamada ise; suda çözünmüş başlıca iyonlar, anyon ve katyonlar ayrı ayrı olmak üzere yine litrede eşdeğer gram olarak %20'sinden fazla çözünmüş bulunan iyonlara göre (önce katyonlar sonra anyonlar sırasıyla yazılarak) su tipi belirlenmektedir (Başkan ve Canik, 1983).

Çalışma alanındaki suların hidrokimyasal fasiyes kavramına göre sınıflamasında IAH (1979) sınıflaması kullanılmıştır (Tablo 3.8). Yüzey suları, soğuk ve sıcak yeraltı sularını sınıflamak ve hidrojeokimyasal işlevlerini tanımlamak için Piper Diyagramı (1944), suların kimyasal içeriklerini karşılaştırmak amacıyla da Schoeller Diyagramı (1962) kullanılmıştır. Ayrıca, yörede tarımsal amaçlı sulama yapıldığı için sulama suları sınıflaması açısından sular ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramında değerlendirilmiştir.

IAH (1979) sınıflamasına göre Pasinler jeotermal alanındaki termal suların su tipi incelendiğinde; genel olarak jeotermal kuyular Na-Cl- HCO₃, jeotermal kaynak ise Na- Ca-Mg-HCO₃-Cl sınıfındadır. Alandaki soğuk su kaynağı, yüzey suları ve yeraltı suları ise Mg-Ca- HCO₃ su sınıfındadır. PS-3 sıcak su kuyusunun Ağustos ayında Na- HCO₃-Cl tipli su sınıfında yer alması yüzeyden soğuk su karışımı olduğunu göstermektedir.

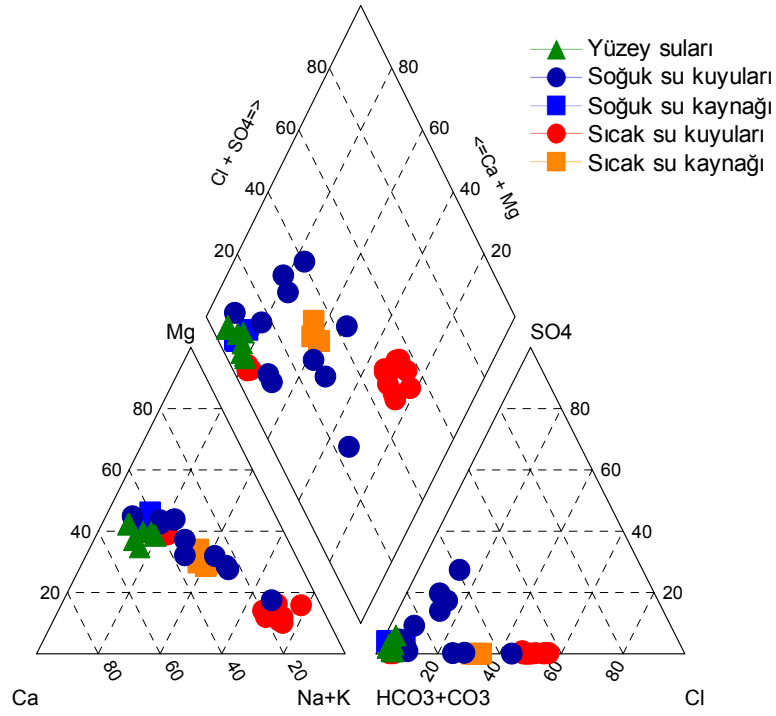
3.6.1. Piper Diyagramı Değerlendirmesi

Piper Diyagramı anyon ve katyonların (% mek/l cinsinden) ayrı ayrı gösterildiği iki ayrı üçgenden ve tüm iyonların ortaklaşa gösterildiği bir eşkenar dörtgenden oluşmaktadır. Üçgen diyagramlar suların hidrokimyasal fasiyes tiplerinin görülmesinde, suların sınıflamasında ve karşılaştırılmasında kolaylık sağlamaktadır. Eşkenar dörtgen ise suların dokuz bölgeye ayrılmış sınıflara göre tanımlanmasında kullanılır.

Tablo 3.8. Pasinler jeotermal alanındaki suların IAH (1979) göre su tipi sınıflaması

Örnek Adı	Türü	Tarih	Su Tipi
HDK	Sıcak su kaynağı	May. 2011	Mg-Na-Ca-HCO ₃ -Cl
HDK	Sıcak su kaynağı	May. 2012	Na- Ca- Mg-HCO ₃ -Cl
HDK	Sıcak su kaynağı	Agu. 2012	Na- Ca- Mg-HCO ₃ -Cl
HDK	Sıcak su kaynağı	Kas. 2012	Na- Ca- Mg-HCO ₃ -Cl
OZ	Sıcak su kuyusu	May. 2011	Mg-Ca-Na- HCO ₃
OZ	Sıcak su kuyusu	May. 2012	Mg-Ca-Na- HCO ₃
OZ	Sıcak su kuyusu	Agu. 2012	Mg-Ca- HCO ₃
OZ	Sıcak su kuyusu	Kas. 2012	Mg-Ca-HCO ₃
PS-2	Sıcak su kuyusu	May-2011	Na-Cl- HCO ₃
PS-2	Sıcak su kuyusu	May-2012	Na-Cl- HCO ₃
PS-3	Sıcak su kuyusu	May-2012	Na-Cl- HCO ₃
PS-3	Sıcak su kuyusu	Agu-2012	Na- HCO ₃ -Cl
PS-3	Sıcak su kuyusu	Kas-2012	Na-Cl- HCO ₃
PS-4	Sıcak su kuyusu	May-2011	Na- HCO ₃ -Cl
JK	Soğuk su kaynağı	May-2012	Mg-Ca- HCO ₃
JK	Soğuk su kaynağı	Agu-2012	Mg-Ca- HCO ₃
JK	Soğuk su kaynağı	Kas-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HC	Yüzey suyu	May-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HC	Yüzey suyu	Agu-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HC	Yüzy suyu	Kas-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HD	Yüzey suyu	May-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HD	Yüzey suyu	Agu-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HD	Yüzy suyu	Kas-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HDE	Yüzey suyu	May-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HDE	Yüzey suyu	Agu-2012	Ca-Mg- HCO ₃
HDE	Yüzy suyu	Kas-2012	Ca-Mg- HCO ₃
3205	Soğuk su kuyusu	Ey-2012	Na-Mg-Ca- HCO ₃
12571	Soğuk su kuyusu	Ey-2012	Mg-Ca-Na- HCO ₃
27335	Soğuk su kuyusu	Ey-2012	Mg-Ca-Na- HCO ₃
54324	Soğuk su kuyusu	Ey-2012	Ca-Mg- HCO ₃

Piper Diyagramı değerlendirilmesine göre inceleme alanındaki sıcak su kuyuları hariç tüm sulara; alkali toprak elementler (Ca + Mg) > Alkali elementler (Na+K)'ve zayıf asit kökleri (CO₃+ HCO₃) > güçlü asit kökleri (Cl+SO₄)'dir. Sıcak su kuyularında ise (Ca+Mg) < (Na+K) ve (SO₄+Cl) > (CO₃+HCO₃)'dir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. İnceleme alanındaki su örneklerine ait piper diyagramı

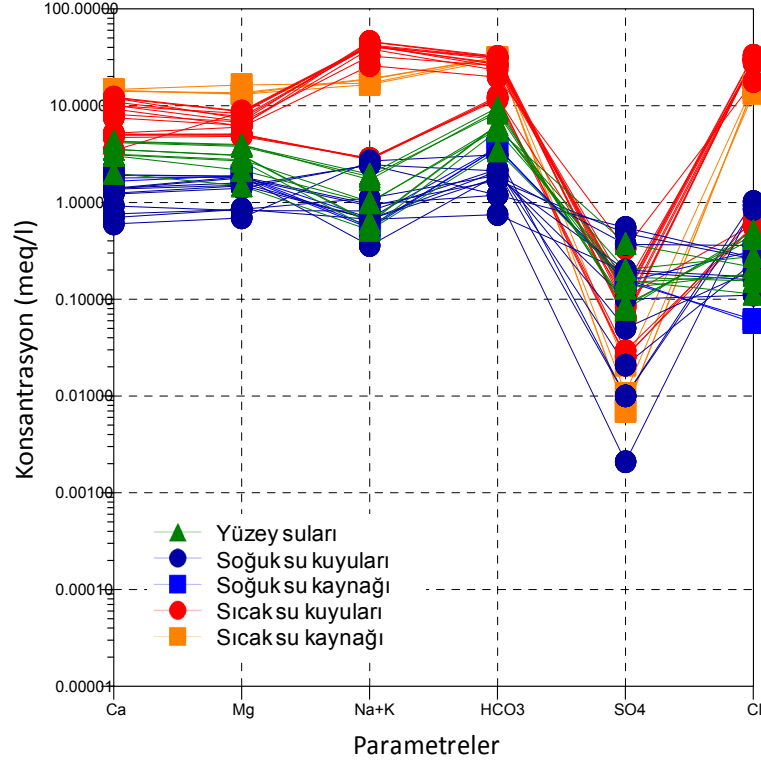
Şekil 3.19 incelendiğinde çalışma alanında yer alan soğuk su kuyuları, yüzey suları soğuk su kaynağı ve sığ derinlikli OZ sıcak su kuyusu karışım suları olarak ayırt edilebilir.

3.6.2. Schoeller Diyagramı Değerlendirmesi

Schoeller Diyagramı logaritmik ölçekli dikey ekseninde element konsantrasyonlarının mek/l, yatay ekseninde Ca^{+2} , Mg^{+2} , $Na^{+}+K^{+}$, Cl^{-} , SO_4^{-2} , HCO_3^{-} iyonlarını içeren yarı logaritmik bir diyagramdır. Bu diyagram gerek iyonların topluca tek bir diyagramda görülmesi, gerekse benzer ve farklı kökenli suların karşılaştırılması açısından oldukça sık kullanılmaktadır. Schoeller diyagramlarında aynı kökenli, aynı akifer ve beslenme alanına sahip suların iyon dağılımlarının paralellik göstermesi beklenmektedir. İnceleme alanına ait suların Schoeller Diyagramı'nda konumları Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

Schoeller Diyagramı incelendiğinde genel olarak tüm suların iyonlarının mek/l değerlerini birleştiren doğrular birbiri ile çakışmakta ya da paralel geçmektedir. Bu durum suların besleniminin aynı kaynaktan olduğunu ve mevsimsel değişimlerden

etkilenmediğini gösterir. Kaynaklardaki ve sığ kuyulardaki soğuk su karışımı buradada gözlenmektedir. Ayrıca sıcak sular soğuk sulara oranla daha yüksek iyon konsantrasyonlarına sahiptirler.



Şekil 3.20. İnceleme alanında yer alan su örneklerinin Schoeller diyagramındaki konumları

3.6.3. ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı

Sodyumca doymuş topraklarda bitkiler çok az gelişir veya gelişmezler. Sodyum toprağın yapısını bozarak geçirgenliğini azaltır ve sulamadan sonra zeminin üst seviyelerinde soğularak toprak yüzeyinde tabaka şeklinde sert bir kabuğun oluşmasına neden olur. Bu durum bitki köklerinin havalanmasını engeller ve bitkiler için zehirleyici bir ortam yaratır (Şahinci, 1991).

Sulama sularının sınıflandırmasında kullanılan Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), iyonların meq/l değerleri kullanılarak,

$$SAR = \frac{Na}{[(Ca+Mg)/2]}^{1/2} \quad (5)$$

formülünden hesaplanır ve aşağıdaki gibi sınıflandırılır (Şahinci, 1991);

<u>Suyun Özelliği</u>	<u>SAR(%)</u>
Çok iyi özellikte sulama suları	<10
İyi özellikte sulama suları	10-18
Orta özellikte sulama suları	18-26
Kötü özellikte sulama suları	>26

SAR ve EC değerleri kullanılarak, inceleme alanındaki suların sulama suyu amaçlı kullanımının uygun olup olmadığını belirlemek için bu suların ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramının çeşitli dönemlere ait değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu diyagramda yatay eksen EC değerleri, düşey eksen SAR değerleri yer alır. Sulama suları bu diyagramda 16 ayrı sınıfa ayrılır (Şahinci, 1991).

Genel Tuzluluk Özellikleri:

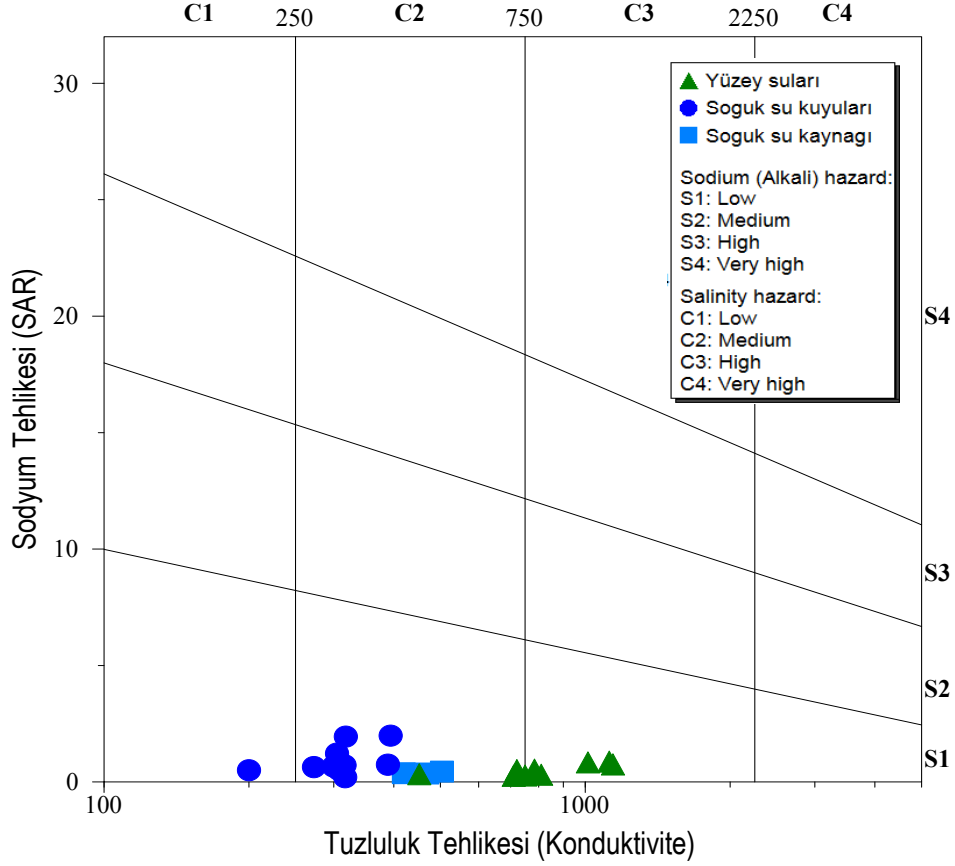
- C1:** (EC 250 μ S/cm'den az), az tuzlu sular, her toprakta, tüm bitkilerin sulamasına uygundur.
- C2:** (EC 250 - 750 μ S/cm arası), orta tuzlu sular, orta akaçlama özelliğindeki topraklarda, tuzluluk tehlikesi olmadan tüm bitkiler sulanabilir.
- C3:** (EC 750 - 2250 μ S/cm arası), tuzlu sular, akaçlaması kötü olan arazilerde sulamada kullanılmaz ve kullanılması gerekirse tuza dayanıklı bitkiler seçilmelidir.
- C4:** (EC 2250 μ S/cm'den büyük), çok tuzlu sular, geçirgenliği ve akaçlaması çok iyi topraklarda, zeminin yıkanmasını sağlamak için bol su verilmeli ve tuza çok dayanıklı bitki türleri seçilmelidir.

Genel Sodyum Tehlikesi Özellikleri:

- S1:** (az sodyumlu sular), tüm topraklarda sodyum tehlikesi yaratmadan kullanılabilir.
- S2:** (orta sodyumlu sular), geçirgen veya bol jipsli arazilerde kullanılabilir.
- S3:** (yüksek sodyumlu sular), birçok toprak cinsinde sodyum tehlikesi oluşturabilir.
- S4:** (az sodyumlu sular), genel olarak sulama için uygun değildir. Ancak suyun toplam tuz miktarı düşük ise, sulamada kullanılabilir.

Sulama suyu açısından inceleme alanındaki soğuk su kuyuları düşük sodyum ve düşük tuzluluk tehlikesine sahip sular (C2-S1), yüzey suları ve jeotermal kuyular düşük

sodyum yüksek tuzluluk tehlikesine sahip sular (C3-S1) , jeotermal kaynak ise çok yüksek tuzluluk, orta sodyum tehlikesine sahip sular (C4-S2) sınıflarında yer alırlar (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. İnceleme alanındaki suların ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı

3.7. Minerallerin Sudaki Çözünürlüklerinin Değerlendirilmesi

Özellikle sıcak ve mineralli suların kabuklaşma ve korozyon özelliklerinin önceden tahmin edilmesi, suların üretilmesi ve işletilmesi aşamasında oluşabilecek çökellerin önlenmesi açısından ekonomik olarak oldukça önemlidir. Yeraltı sularında oluşan kimyasal tepkimeler, hidrokimyasal ortam hakkında yorum yapabilme olanağı sağlamaktadır. Bu nedenle inceleme alanındaki suların çeşitli minerallere göre doygunluk durumları incelenmiştir.

Bir mineralin sudaki çözünürlük durumunun ifadesinin bir şekli olan doygunluk indeksi (Saturation Index, SI); iyonik aktivite çarpanı (IAP) ile tepkime denge sabitine (K) oranının logaritmik ifadesidir. Her mineral için özellikle sıcaklıkla ve kısmen de basınçla

değişen değerler içermektedir. Bilindiği gibi termodinamik yöntemlerle hesaplanan mineral doygunluk indeksi sonuçları aşağıdaki gibi yorumlanmaktadır.

SI (log IAP/K)= 0 ise su ilgili mineral ile dengededir.

SI (log IAP/K)>0 ise su ilgili minerale aşırı doygunudur (mineral çökeltici özelliğindedir).

SI (log IAP/K)<0 ise su ilgili minerale doygun değildir (mineral çözücü özelliğindedir).

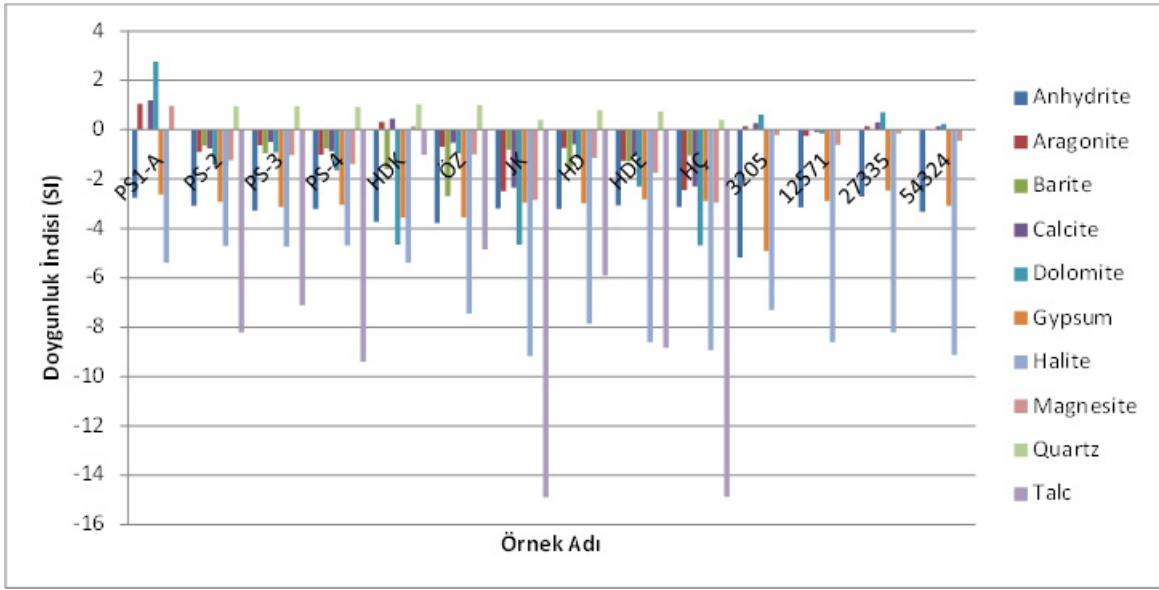
İnceleme alanında yer alan suların mineral doygunluk indislerinin hesaplamasında, arazide ölçülen pH ve sıcaklık değerleri ile kimyasal analiz sonuçlarından yararlanarak AquaChem 2012.1 adlı bilgisayar programı içerisinde yer alan PHREEQC yazılımı kullanılmıştır. Bilgisayar programından elde edilen SI sonuçları Tablo 3.9’ da verilmiştir.

Tablo 3.9 ve Şekil 3.22 incelendiğinde Pasinler jeotermal alanında incelenen sulardan PS1-A kuyusu aragonit, kalsit, dolomit ve magnesit minerallerine, doygun; anhidrit, barit, jips ve halit minerallerine doygun değildir. İnceleme alanında yer alan diğer sıcak su kuyularından PS-2, PS-3, PS-4 ve ÖZ kuyuları kuvars mineraline doygun, anhidrit, aragonit, barit, kalsit, dolomit, jips, halit, magnesit ve talk minerallerine doygun değildir. HDK sıcak su kaynağı ise aragonit, kalsit, dolomit ve kuvars minerallerine doygun, anhidrit, barit, jips halit ve talk minerallerine doygun değildir.

Tablo 3.9. İnceleme alanından derlenen su örneklerine ait SI değerleri (d: doygun)

Mineraller	Formül	PS1-A	PS-2	PS-3	PS-4	HDK	ÖZ	JK
Anhidrit	CaSO4	-2.75	-3.07	-3.28	-3.21	-3.72	-3.77	-3.19
Aragonit	CaCO3	1.06 ^d	-0.89	-0.62	-1.01	0.31 ^d	-0.68	-2.49
Barit	BaSO4	-	-0.64	-0.95	-0.75	-1.59	-2.68	-0.80
Kalsit	CaCO3	1.20 ^d	-0.75	-0.49	-0.87	0.45 ^d	-0.53	-2.34
Dolomit	CaMg(CO3)2	2.75 ^d	-1.40	-0.92	-1.65	1.19 ^d	-0.94	-4.65
Jips	CaSO4:2H2O	-2.62	-2.92	-3.12	-3.05	-3.55	-3.55	-2.94
Halit	NaCl	-5.14	-4.71	-4.73	-4.69	-5.38	-7.45	-9.17
Magnesit	MgCO3	0.96 ^d	-1.24	-1.03	-1.38	0.15 ^d	-0.99	-2.85
Kuvars	SiO2	-	0.95 ^d	0.95 ^d	0.93 ^d	1.03 ^d	1.00 ^d	0.41 ^d
Talk	Mg3Si4O10(OH)2	-	-8.21	-7.11	-9.41	-1.02	-4.85	-14.90
		HD	HDE	HÇ	3205	12571	27335	54324
Anhidrit	CaSO4	-3.22	-3.06	-3.12	-5.17	-3.14	-2.71	-3.32
Aragonit	CaCO3	-0.74	-1.25	-2.45	0.13 ^d	-0.24	0.15 ^d	0
Barit	BaSO4	-1.65	-1.27	-1.05	-	-	-	-
Kalsit	CaCO3	-0.59	-1.09	-2.30	0.28 ^d	-0.08	0.30 ^d	0.15 ^d
Dolomit	CaMg(CO3)2	-1.17	-2.31	-4.69	0.62 ^d	-0.15	0.70 ^d	0.24 ^d
Jips	CaSO4:2H2O	-2.98	-2.81	-2.88	-4.92	-2.89	-2.46	-3.07
Halit	NaCl	-7.86	-8.62	-8.94	-7.30	-8.60	-8.22	-9.13
Magnesit	MgCO3	-1.14	-1.75	-2.95	-0.21	-0.61	-0.15	-0.45
Kuvars	SiO2	0.79 ^d	0.75 ^d	0.40 ^d	-	-	-	-
Talk	Mg3Si4O10(OH)2	-5.92	-8.84	-14.89	-	-	-	-

Çalışma alanında yer alan soğuksu kaynaklarından JK ve tüm yüzey suları (HD, HDE, HÇ)'nda yapılan doygunluk indeksi hesaplamalarında ise bu sular kuvars mineraline doygun diğer tüm minerallere doygun değildir. Soğuk su kuyuları incelendiğinde ise 3205 ve 27335 numaralı kuyular aragonit, kalsit ve dolomit minerallerine doygun, diğer minerallere doygun değildir, 12571 numaralı kuyu hiçbir minerale doygun değildir. 54324 numaralı kuyu ise kalsit ve dolomit minerallerine doygundur.



Şekil 3.22. İnceleme alanından derlenen su örneklerine ait mineral doygunluk indeksi değerleri

3.8. Jeotermometre Uygulamaları

Yeraltı sularının ısı kaybetmelerinin başlıca nedenleri; sıcak suların yüzeye erişene kadar dokanakta bulunduğu kayalarla ısı alışverişinde bulunması, jeotermal alanlarda geçirimsiz örtü kayanın çok ince oluşu veya bulunmayışı, sıcak suların soğuk yeraltı suları ile karışımı gibi etkenlerdir.

Jeotermal sistemlerde akifer sıcaklığının tahmin edilmesi, sıcak ve mineralli suların uygun şekilde kullanılabilirliği açısından önemlidir. Jeotermal alanlarda hazne kaya sıcaklıklarının doğrudan ölçülmesi masraf ve zaman gerektirdiğinden her zaman mümkün olmamaktadır. Buna bağlı olarak gerek ekonomikliği, gerekse de kullanımdaki kolaylığı nedeni ile akifer sıcaklığının saptanması için geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır.

Akifer içerisindeki akışkan sıcaklığının tahmin edilmesi amacıyla kaynak veya kuyu başında yapılan kimyasal ve izotopik analizlerden yararlanılarak jeotermometre yöntemleri geliştirilmiştir.

Kimyasal jeotermometreler sıcak su örneklerinin kimyasal bileşimine, izotopik jeotermometreler ise su-gaz-mineral fazları arasındaki izotopik değişime dayalıdır.

Bu çalışmada rezervuar sıcaklıkları tahmini için sadece silis ve kation kimyasal jeotermometre hesaplamaları kullanılmıştır.

Kimyasal jeotermometreler, rezervuar koşulları altındaki mineral ve su arasındaki sıcaklığa bağlı kimyasal denge üzerine geliştirilmiştir. Bu jeotermometrelerin kullanımında suyun yüzeye çıkışı süresince kimyasal bileşiminin korunduğu varsayılmıştır.

Kimyasal jeotermometreler kalitatif ve kantitatif olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kalitatif jeotermometrelerin çoğunluğu uçucu elementlerin sıcak akışkanlarda ve zeminde göreceli miktarlarına, dağılımlarına veya zemin gazlarındaki oranlarına dayanır (Fournier, 1977).

Silis, hazne kaya sıcaklığı hakkında en iyi bilgiyi verir. Yaklaşık 180 °C sıcaklığa erişen sulara başlayan silis çökeli sıcaklığın düşmesi ile birden artmaya başlar. Doğal gayzerlerde yüzeyde silis çökellerinin varlığı hazne kaya sıcaklığının 180 °C veya daha fazla olabileceğine işaret eder. 150 °C üzerinde bulunan hazne kaya sıcaklığına sahip sulara genellikle klorür miktarı 150 ppm'den fazla, seyrek olarak 200 °C'nin üzerindeki sistemlerde ise 40 ppm'den azdır. Klorür değeri 50 ppm'in üzerinde ise sıcak su sistemlerinin varlığını belirler. B, NH₄, H₂S, Hg, Cl, Na, K, Li, Rb, Cs, As gibi element ve bileşiklerin bir veya daha fazla miktarının suda çok miktarda bulunması hazne kaya sıcaklığının yüksek olabileceğine işaret eder (Şahinci, 1991).

Kantitatif (sayısal) kimyasal jeotermometrelerin kullanılmasında bazı temel varsayımlar gözönünde bulundurulur. Bunlardan bazıları şunlardır;

1. Sıcak sulardaki kimyasal maddelerin oluşması için gerekli kimyasal tepkimeler, akifer-su arasında gerçekleşmektedir.
2. Sıcaklık saptanmasında gerekli maddelerin ortaya çıkması için oluşan kimyasal tepkimeler devamlıdır ve tepkimelerin hammaddesi hazne kayada boldur.
3. Akifer sıcaklığında kaya-su arasında kimyasal denge gerçekleşmiştir.
4. Akiferden yüzeye erişen sıcak suyun, soğuma sonucunda kimyasal yapısı değişmez veya yeni bir kimyasal denge gerçekleşmez.

5. Akiferden gelen sıcak suların, soğuk yeraltı ve yüzey suları ile bir karışımı söz konusu değildir.

Bu varsayımların ilk üçü SiO_2 ve Na-K-Ca jeotermometreleri için kullanılır. Son iki varsayım tam olarak gerçeği yansıtmaz. Çünkü akiferden yüzeye doğru gelen sıcak suyun soğuması veya soğuk suların karışımı ile kimyasal yapısı değişebilir.

Kantitatif kimyasal jeotermometreler çözünürlüğe ve iyon değişimine dayalı olarak geliştirilmişlerdir. Bu çalışmada çözünürlüğe dayalı jeotermometrelerden silis; iyon değişimine dayalı jeotermometrelerden de Na/K jeotermometreleri kullanılmıştır.

3.8.1. Çözünürlüğe Dayalı Jeotermometreler

3.8.1.1. Silis Jeotermometreleri

Hazne kaya sıcaklığının saptanmasında geniş ölçüde kullanılan jeotermometreler kuvars çözünürlüğüne bağlı jeotermometrelerdir. Bu jeotermometreler 150-225 °C sıcaklıklar arasında iyi sonuç vermektedirler. Daha yüksek sıcaklıklarda hazne kayadan yüzeye doğru hareket eden sıcak akışkanda hızlı silis çökelişi gözlenir. Bu nedenle sıcaklığı 225 °C'nin üzerindeki hazne kayalardan gelen sularda gerçek sıcaklığı yansıtmaz. Kuvars jeotermometresi aşağıda verilen varsayımlar göze alınarak kullanılır.

1. Rezervuardaki akışkanlar kuvars ile denge halindedir.
2. Yukarıya yükselme sırasında, soğuk ve sıcak sular arasında herhangi bir karışım yoktur.
3. Yükselen su ya kondüktif olarak soğumakta veya 100 °C'de buhar ayrılması ile adiyabatik soğuma (kaynama) gerçekleşmektedir.

Silis jeotermometrelerinin üst sınırı 250 °C'dir. Bu sıcaklığın üzerinde silis hızla çöker ve yüzeye ulaşan akışkanın silis değeri akiferdekinden farklılık gösterir. Jeotermometre iyon içeriklerinden, iyon içeriklerinin oranlarından çok miktarıyla ilgilidir ve kaynama gibi fiziksel olaylara bağlıdır. Silis konsantrasyonu, artan sıcaklık ve basınçla artar. Sıcak akışkanın yüzeye yakın asidik sularla karışması sonucu yüzeye çıkan sıcak ve mineralli sudaki silis konsantrasyonu akifer koşullarını yansıtmaz ve jeotermometre yanıltıcı sonuçlar verir (Nicholson, 1993).

Silis jeotermometre bağıntıları, kimyasal tepkimeyi etkileyen hazne kaya sıcaklığına veya suyun yükselirken soğumasına bağlı olarak hazırlanmıştır. Silis çözünürlüğüne pH

ancak 9.5 üzerinde etkindir. İyonlaşma gücünün silis çözünürlüğüne etkisi yoktur (Şahinci, 1991).

Çalışma alanında yer alan Pasinler sıcak ve mineralli su kaynağının kimyasal analiz sonuçlarından yararlanılarak Tablo 3.10'daki silis jeotermometre bağıntıları uygulanmış ve sonuçları Tablo 3.12'de sunulmuştur. Silis jeotermometre sonuçları incelendiğinde Pasinler jeotermal alanının hazne kaya sıcaklığının 46-176.7 °C arasında değiştiği söylenebilir. ÖZ sıcak su kuyularda hesaplanan değerler daha düşüktür. Ancak bu kuyular sığ derinliklerde (40-50 m) olduğu için soğuk su karışım oranları yüksektir.

Tablo 3.10. Akifer sıcaklıklarının tahmin edilmesinde kullanılan kimyasal jeotermometre hesaplamaları

Uygulanan Jeotermometreler	Bağıntılar	Değinen Belgeler
1. SiO ₂ (Amorf silis)	$t=731/(4.52-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, (1977)
2. SiO ₂ (α Kristobalit)	$t=1000/(4.78-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, (1977)
3. SiO ₂ (β Kristobalit)	$t=781/(4.51-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, (1977)
4. SiO ₂ (Kalsedon)	$t=1032/(4.69-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, (1977)
5. SiO ₂ (Kuars)	$t=1309/(5.19-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, (1977)
6. SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t=1522/(5.75-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Fournier, (1977)
7. SiO ₂ (Kalsedon, kondaktif soğuma)	$t=1112/(4.91-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., (1983)
8. SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t=1264/(5.31-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., (1983)
9. SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t=1021/(4.69-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., (1983)
10. SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t=1164/(4.9-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., (1983)
11. SiO ₂ (Kuars buhar kaybı)	$t=1498/(5.7-\log\text{SiO}_2)-273.15$	Arnorsson vd., (1983)

3.8.2. İyon Değişimine Bağlı Jeotermometreler

Suda iyon değişimine uğrayan birçok mineral bulunur ve bunlardan yararlanılarak birçok ampirik jeotermometre geliştirilmiştir. İyon değişimi ve bozuşma reaksiyonlarında denge sabitleri sıcaklığa bağlıdır. Bu türdeki reaksiyonlarda çözülmüş katı madde oranları değişen sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterir (Fournier, 1977). Sıcaklığa bağlı olarak gelişen su-mineral dengeleri kullanılarak akifer sıcaklığının tahminine yönelik çeşitli jeotermometreler geliştirilmiştir (Gemici, 1999).

3.8.2.1. Na/K Jeotermometreleri

Na/K jeotermometrelerinin uygulanacağı sıcak suların pH değeri nötre yakın veya hafif alkali, karbonat çökellerinin oluşmaması, $\log(\sqrt{Ca/Na})$ değerinin 0.5 mg/l'den az olması koşulları aranmalıdır. Bu jeotermometreler suda fazla miktarda Ca^{+2} iyonu bulunuyorsa, hazne kaya sıcaklığı hesaplamalarında yüksek değerler verir. Na/K jeotermometreleri, nötr ve alkali, alkali klorürlü, 180-350 °C sıcaklıktaki hazne kayadan gelen sularda iyi sonuçlar vermektedir (Fournier, 1977).

Genellikle 180-350 °C arasında olumlu sonuçlar veren Na/K jeotermometreleri özellikle 120 °C altında yanlış sonuçlar verebilmektedir. Bu düşük sıcaklıklarda Na ve K iyonları killi minerallerden etkilenerek iyon değişimi reaksiyonlarını kontrol edemezler. Buna bağlı olarak jeotermometre hesaplamaları sonucunda gerçek akifer sıcaklığının üzerinde değerler elde edilir (Gemici, 1999).

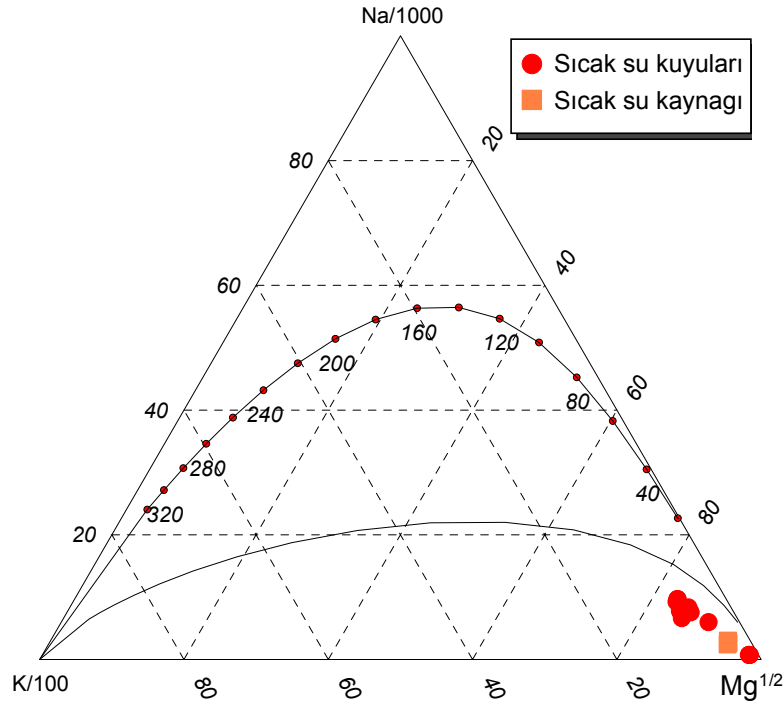
Sıcak suların akifer sıcaklıklarının saptanmasında ve suların temasta bulunduğu kayalarla olan denge durumlarının belirlenmesi için uygulanan bir başka yöntem ise Giggenbach (1988) tarafından geliştirilmiş olan Na-K-Mg birleşik jeotermometresidir. Bu jeotermometre ile katyon jeotermometrelerinin geçerliğinin sınanmasının yanında termal suların hazne kaya sıcaklıkları hızlı bir şekilde yorumlanabilmektedir (Şekil 3.23).

Çalışma alanındaki jeotermal suların pH değerleri nötre yakındır. $\log(\sqrt{Ca/Na})$ değeri ise -0.04 ila 0.1 arasında değişmektedir (Tablo 3.11). Arazide yapılan gözlemler sonucu sıcak su çevresinde karbonat çökellerine rastlanmamıştır.

Tablo 3.11. İnceleme alanında bulunan sıcak sulara ait $\log(\sqrt{Ca/Na})$ değerleri

Örnek No	OZD1	PS1-A-1	PAS2-1	PAS3-2	PS4-1	PAS4-2	PS-5	HDK-1
$\log(\sqrt{Ca/Na})$	0.10	-0.37	-0.56	-0.29	-0.37	-0.35	-0.32	-0.04

Şekil 3.23'de görülebileceği gibi Giggenbach (1991) diyagramında, inceleme alanındaki suların olgun olmayan sular sınıfında yer aldığı görülmektedir. Bu nedenle Na/K jeotermometrelerinin jeotermal rezervuar sıcaklığı tahmininde uygun olmayacağı sonucunu vermektedir ve bu çalışmada Na/K jeotermometreleri uygulanmamıştır.



Şekil 3.23. Çalışma alanındaki sulara ait Giggenbach diyagramı

Tablo 3.12. İnceleme alanında yer alan sıcak ve mineralli sulara ait silis jeotermometre uygulamaları (tüm derişimler mg/l)

Örnek No	PS1A	PS-2	PS-3	PS-4	HDK	OZ
Sıcaklık (°C)	42	37	36.9	36.1	34.4	23.03
SiO ₂ -1	46.1	47.1	46.6	41.5	53.2	28.9
SiO ₂ -2	119.1	120.2	119.6	113.9	126.8	100
SiO ₂ -3	69.5	70.5	70	64.4	77.1	50.9
SiO ₂ -4	146.4	147.7	147	140.7	155	125.3
SiO ₂ -5	169.1	170.2	169.6	164.1	176.7	150.5
SiO ₂ -6	159.3	160.2	159.7	155.2	165.5	143.8
SiO ₂ -7	141.8	142.9	142.4	136.6	149.6	122.6
SiO ₂ -8	137.3	138.2	137.7	132.8	144	120.6
SiO ₂ -9	142	143.2	142.5	136.3	150.5	121.1
SiO ₂ -10	162.9	164	163.4	157.4	171.1	142.6
SiO ₂ -11	158.6	159.5	159	154.4	164.8	143

3.9. Karışım Modelleri

Sıcak akışkanlar yüzeye ulaşırken soğuk yer altı suları ile karışabilir. Bu karışımın varlığı bazı incelemelerle belirlenebilir. Eğer arazide birçok kaynak bulunuyorsa ve bu kaynakların sıcaklıkları veya kimyasal bileşimlerindeki klorür, bor gibi elementler ile Cl/B, Cl/Cs, Cl/As, Cl/(HCO₃+CO₃), Cl/F, Na/K gibi oranlarda büyük değişiklikler izlenirse, karışımından söz edilebilir (Şahinci, 1991).

Fournier ve Truesdell (1974), sıcak-soğuk su karışımlarından yararlanarak hazne kaya sıcaklıklarının saptamışlardır. Bu hesaplamalar iki varsayım üzerine kurulmuştur. Birinci varsayıma göre, sıcak akışkan (buhar+sıcak su) soğuk sularla derinlerde karışarak yüzeye erişir. Karışımdan önce ve sonra buhar kaybı yoktur. Yüzeye erişen karışım suyu ılık veya kaynama sıcaklığında bulunabilir. İkinci varsayımda ise, karışımdan önce derinlerdeki sıcak akışkandan buhar ayrılarak ortamdan uzaklaşır. Geri kalan sıcak su soğuk yeraltı suları ile karışarak yüzeye ulaşır. Genellikle birinci varsayıma göre hesaplanan sıcaklıklar en yüksek, ikinci varsayımla saptanma ise en düşük hazne kaya sıcaklıklarını verir. Jeotermal sistemlerin hazne kaya sıcaklıklarını ve karışım oranlarını belirlemek için çeşitli karışım modelleri geliştirilmiştir. (Şahinci, 1991).

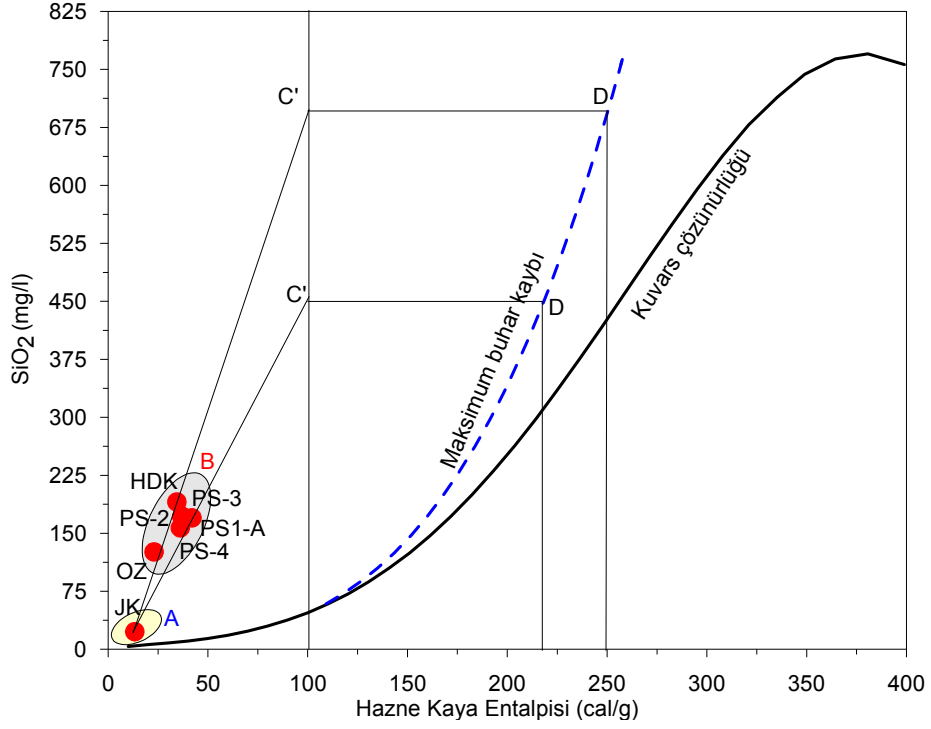
Bu çalışmada, çalışma alanındaki PS1-A, PS-2, PS-3, PS-4 HDK ve OZ sıcak su kaynaklarının hazne kaya sıcaklıklarının ve soğuk yer altı suları ile karışım oranlarının bulunması amacıyla silis-entalpi ve entalpi-klor diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.24, Şekil 3.25, Tablo 3.13). Silis-entalpi karışım modeli diyagramı ile karışım öncesi buhar ve ısı kaybının olmaması ve karışım öncesi buhar kaybının olması (adiyabatik soğuma) durumunda akifer sıcaklığı tahmin edilebilmektedir.

Model oluşturulurken üç temel varsayım göz önünde bulundurulur. Bunlar;

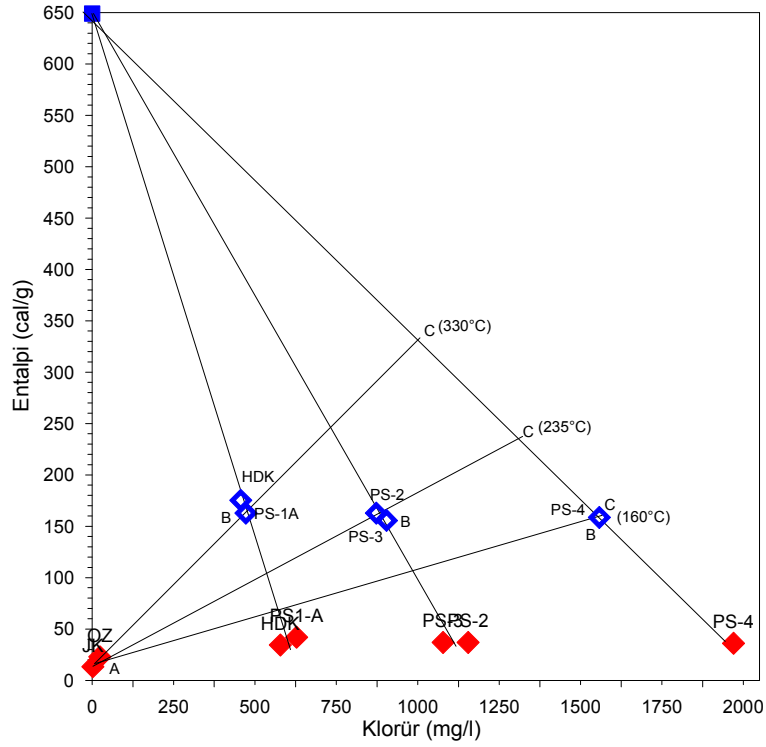
- Karışım sonrası sıcaklık kaybı yoktur,
- Kuvarsın çözünürlüğü akiferdeki akışkanın silis içeriğini kontrol eder,
- Akışkan akiferden ayrıldıktan ve soğuk su ile karışım gerçekleştikten sonra silis çökelimi veya çözünmesi yoktur.

İkinci varsayım derinlerdeki jeotermal akışkanın kuvarsa doymuş olmasından dolayı her zaman için geçerlidir. Çok yüksek sıcaklıklı sistemlerde kuvarsın hızla çökmesinden dolayı üçüncü varsayımın yerine gelmemesinden dolayı hatalar olabilmektedir (Nicholson, 1993).

Pasinler jeotermal alanındaki sıcak ve mineralli suların silis- entalpi karışım modeli oluşturulurken, bölgedeki soğuk suları yansıtan silis (SiO_2) ve entalpi değerleri grafiğe yerleştirilir (A noktası) (Şekil 3.24). Daha sonra grafiğe çalışma alanındaki sıcak suların silis değerleri ve ölçülen sıcaklıkları işaretlenir (B noktası). Bu noktalar A noktası ile birleştirilip kuvars çözünürlük eğrisini kestiği yere kadar uzatılır (C noktası). C noktasından yatay eksene dikme inilir ve yatay eksenin kesildiği noktalar hazne kaya sıcaklığını verir. C noktası karışım suyundaki sıcak ve mineralli suyun karışımdan önceki entalpi ve silis değerini vermektedir.



Şekil 3.24. Pasinler jeotermal alanındaki sıcak ve mineralli suların entalpi-silis diyagramı



Şekil 3.25. Pasinler jeotermal alanındaki sıcak ve mineralli suların entalpi-klorür diyagramı

Buhar kaybı dikkate alındığında suyun yüzeyden buharlaştığı entalpi değerinden (100 cal/g) bir dikme çıkılır ve AB doğrusu bu dikme ile kesiştirilir (C'). C' noktasından maksimum buhar kaybı eğrisini kestiği noktaya kadar (D) yatay eksene paralel çizilir. D noktasının düşeydeki izdüşümü karışımdan önceki akifer sıcaklığını, yataydaki izdüşümü ise akışkanın başlangıçtaki silis değerini verir (Tarcan, 2002).

Entalpi-Klorür karışım modeli Fournier (1979) tarafından önerilmiştir. Bu diyagram oluşturulurken, diyagrama düşey eksende entalpi (cal/g veya kJ/kg), yatay eksende ise klorür (mg/l) değerleri yer alacak şekilde grafik çizilir (Şekil 3.25). Daha sonra buharın sıcak sudan ayrılma entalpisi olan 639 cal/g (2775 kJ/kg) değeri de düşey eksende buhar noktası olarak işaretlenir. Grafiğe işaretlenen boşalım entalpi-klorür değerleri ile elde edilen noktalar buhar noktası ile birleştirilir. Bu doğru üzerine her bir sıcak su örneğinin kuvars- buhar kaybı jeotermometresi (Tablo 3.10, Tablo 3.12) hesaplanan hazne sıcaklıkları işaretlenir (B noktası). B noktası bölgedeki soğuk suların ortalama değerini gösteren A noktası ile birleştirilerek karışım çizgisi elde edilir. Karışım çizgisi uzatılarak en yüksek klorür değerine sahip örneğin doğrusu ile kesiştirilir (C noktası). Bu doğru üzerinde elde edilen en yüksek ve en düşük değerler jeotermal sistemin olası maksimum ve minimum hazne sıcaklığını verir. Ayrıca karışım çizgisi üzerindeki AB ve AC doğru parçaları kullanılarak, sıcak suların soğuk sularla yaptığı karışım oranları bulunur (Tarcan 2002).

Tablo 3.13. Pasinler jeotermal alanında yer alan sıcak sularda karışım modellerine göre belirlenen sıcak su karışım oranları

Örnek no	PS1-A	PS-2	PS-3	PS-4	OZ	HDK
Entalpi-silis karışım modeline göre saptanan sıcak su karışım oranı (%)	29.4	29.4	29.4	29.4	15	-
Entalpi-klorür karışım modeline göre saptanan sıcak su karışım oranı (%)	47.6	68.1	68.1	-	-	47.6

Şekil 3.24 ve Tablo 3.13 incelendiğinde Pasinler jeotermal alanında yer alan sıcak suların silis-entalpi karışım modeline göre hesaplanan karışım oranları düşüktür (% 15-29.4). Bu karışım modeline göre hesaplanan hazne kaya sıcaklıkları ise 220 °C-250 °C arasında yer almaktadır.

Entalpi- klorür diyagramına göre hesaplanan maksimum hazne kaya sıcaklığı ise 330 °C gibi çok yüksek bir değer vermektedir ve gerçek hazne kaya sıcaklığını

yansıtılmamaktadır. Bu değer, PS1-A kuyusu ve dere içerisinden boşalan HDK analiz sonuçlarından hesaplanmıştır. PS1-A kuyusuna ait klorür verisi tarafımızdan ölçülmemiş, MTA'nın kayıtlarından alınmıştır. Kuyu problemleri sebebiyle terk edilen kuyunun analiz sonuçları büyük olasılıkla gerçeği yansıtmamaktadır. HDK kaynağı ise dere içerisinden boşaldığı için soğuk su karışımı fazladır. Bu sebeplerden dolayı sistemin hazne kaya sıcaklığı olarak, Şekil 3.25'e göre hesaplanan ikinci yüksek değer olan sıcaklık kullanılmıştır. Bu değere göre Pasinler jeotermal sisteminde hazne kaya sıcaklığı 160 °C-235 °C arasında olduğu düşünülmektedir.

3.10. Çevresel İzotop Hidrolojisi

Hidrolojik ve hidrojeolojik araştırmalarda sulardaki doğal izotoplar kullanılarak jeotermal sistemlerin hidrojeolojik özelliklerinin ortaya çıkarılması mümkün olabilmektedir. İzotop oranlarının sıcaklığa, fiziko-kimyasal süreçlere, su-kayaç etkileşimine duyarlı olmaları nedeni ile izotop teknikleri jeotermal araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle radyoaktif izotop olarak trityum (^3H) karbon-14 (^{14}C), kararlı izotop olarak da oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve döteryum ($\delta^2\text{H}$) izotoplarından yararlanılmaktadır. Trityum ve karbon-14 yeraltı suyunun yaşının belirlenmesinde kullanılırken, oksijen-18 ve döteryum ise yeraltı suyunun beslenme alanını jeotermal akışkanın kökenini ve akifer içerisindeki akışkanın sıcaklığını belirlemede ve yüzey su kütlelerinde buharlaşma göstergesi olarak kullanılmaktadır.

Oksijen ve hidrojen su molekülünü oluşturan iki element olduklarından dolayı oksijen-18, döteryum ve trityum izotopları hidrolojik çevrimin çeşitli kesimlerindeki su hareketlerinin incelenmesi için izleyici olarak kullanılırlar. Bu doğal izotoplar, hidrolojik sistemlerle ilgili statik ve dinamik parametrelerin belirlenmesini sağlar. Ayrıca, yüzey ve yeraltı suyu sistemlerinde kirleticilerin kökenlerinin ve hareketlerinin saptanması gibi çalışmalarda etkin olarak kükürt, klorür, azot, asal gazlar, uranyum ve toryum gibi elementlerin izotopları da kullanılmaktadır.

Bu çalışmada duraylı izotoplardan oksijen-18 ve döteryumdan suların olası beslenme yükseltilerinin hesaplanmasında, trityumdan ise bağıl yaş ve geçiş sürelerinin belirlenmesi amacıyla yararlanılmıştır. karbon-13 ve kükürt-34 izotopları ise su kalitesini ve kirleticilerin kaynağını belirlemek, sulardaki karbonun ve kükürtün orijinini araştırmak için kullanılmıştır.

İnceleme alanındaki suların izotop analizleri termal sular, soğuk su kaynağı ve yüzey suları olmak üzere mevsimsel olarak Mayıs 2011, Mayıs 2012, Ağustos 2012 ve Kasım 2012 dönemlerinde üç gurup halinde incelenmiştir (Tablo 3.14). Elde edilen analiz sonuçları ile çalışma alanında bulunan suların izotop içerikleri çeşitli diyagramlarla yorumlanmıştır.

Tablo 3.14. İnceleme alanındaki sulara ait izotop verileri

Örnek No	Tarih	Türü	δD	$\delta^{18}O$	T(TU)	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O (SO_4)$	$\delta^{34}S(SO_4)$
			v-SMOW (‰)	v-SMOW (‰)		v-PDB (‰)	v-SMOW (‰)	v-CDT (‰)
OZ	May.11	Sıcak su	-94.68	-13.54	0.18			
OZ	May.12	Sıcak su	-92.15	-13.32	0.0	9.18		
OZ	Ağu.12	Sıcak su	-92.16	-13.35	0.61	9.34	-2.7	36.18
OZ	Kas.12	Sıcak su	-90.12	-13.24	0.0			
PS-2	May.11	Sıcak su	-94.2	-13.37	0.33			
PS-3	May.11	Sıcak su	-92.16	-13.4	0.0			
PS-3	May.12	Sıcak su	-94.71	-13.3	0.57	8.8		
PS-3	Ağu.12	Sıcak su	-93.44	-13.34	0.27	9.54	1.9	18.64
PS-3	Kas.12	Sıcak su	-96.05	-13.1	0.39			
HDK	May.12	Sıcak su	-92.94	-13.01	0.28	8.13		
HDK	Ağu.12	Sıcak su	-99.68	-12.95	0.75	9	6.1	31.35
HDK	Kas.12	Sıcak su	-91.2	-12.57	0.17			
JK	May.12	Soğk su	-84.87	-12.55	0.03	-9.99		
JK	Ağu.12	Soğk su	-86.71	-12.03	0.0	-7.14	5.4	1.94
JK	Kas.12	Soğk su	-83.84	-12.19	0.0			
HD	May.12	Yüzey s.	-87.71	-12.65	2.49	3.22		
HD	Ağu.12	Yüzey s.	-94.1	-12.89	1.59	6.19	8	14.4
HD	Kas.12	Yüzey s.	-88.95	-12.67	1.43			
HDE	May.12	Yüzey s.	-86.66	-12.34	3.76	-9.61		
HDE	Ağu.12	Yüzey s.	-90.73	-12.52	4.64	-7.93	3.8	13.44
HDE	Kas.12	Yüzey s.	-87.15	-12.6	2.84			
HÇ	Ağu.12	Yüzey s.	-73.6	-11.55	5.46	-7.52		
HÇ	Kas.12	Yüzey s.	-81.9	-11.64	6.83			

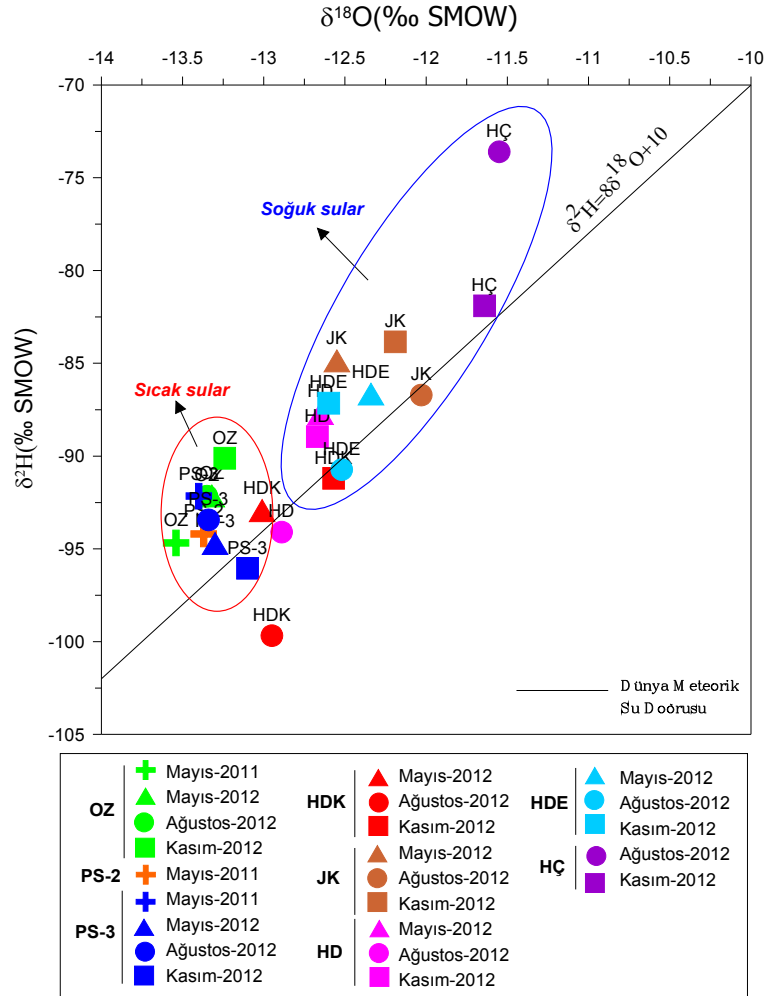
3.10.1. Oksijen 18 (^{18}O)-Döteryum (2H) İlişkisi

Bir bölgeye düşen yağış sularının izotop analizleri sonucunda o bölgenin meteorik su doğrusu elde edilir. Oksijen ve hidrojen izotopları arasındaki ilişkiye etki eden coğrafi koşullar, yağış ve buharlaşma miktarı gibi özellikler bölgeden bölgeye farklılık gösterdiği için her bölgenin kendine özgü meteorik doğrusu vardır. Çalışma alanı ve yakın çevresinde meteorik su doğrusu ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmadığından dolayı inceleme alanındaki sular dünya meteorik su doğrusuna göre yorumlanmıştır.

Yağışlardan alınan su örneklerinde duraylı izotoplardan oksijen-18 ve döteryum içerikleri arasındaki dünya yağışlarını temsil eden ilişki aşağıdaki gibidir (Craig, 1961;Yurtsever, 1978):

$$\delta^2\text{H} = 8x \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (6)$$

Dünya Meteorik Su Doğrusu olarak adlandırılan bu doğruya göre incelenen sulardan çeşitli tarihlerde alınan su örneklerinin oksijen-18 ve döteryum ilişkisi Şekil 3.26'da verilmiştir. Şekil 3.26 incelendiğinde genel olarak bütün su noktaları meteorik su doğrusuna yakın konumdadır ve bu durum suların meteorik kökenli olduğuna işaret eder.



Şekil 3.26. İncelenen suların oksijen-18 (^{18}O)-döteryum (^2H) ilişkisi

Mevsimsel etkiye bakıldığında, sıcak su kaynağı ve kuyulardan mevsimlere göre alınan su örnekleri hemen hemen aynı noktada iken; yüzey suyundan alınan örnekler buharlaşmanın etkisiyle mevsimlere göre bir miktar farklılık göstermiştir.

3.10.2. Oksijen-18 (^{18}O)-Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) İlişkisi

Sıcaklık, izotopik oranların değişiminde önemli bir faktördür. Buharlaşma miktarı sıcaklıkla birlikte artar. Buharlaşma miktarındaki artış ile izotop oranları hafif izotoplarca fakirleşirken ağır izotoplarca zenginleşir. Deniz seviyesinden karalara doğru gidildikçe yüksekliğin artmasına bağlı olarak sıcaklık ve buharlaşma azalır ve sonuç olarak ağır izotop miktarı artmış olur (Clark ve Fritz, 1997).

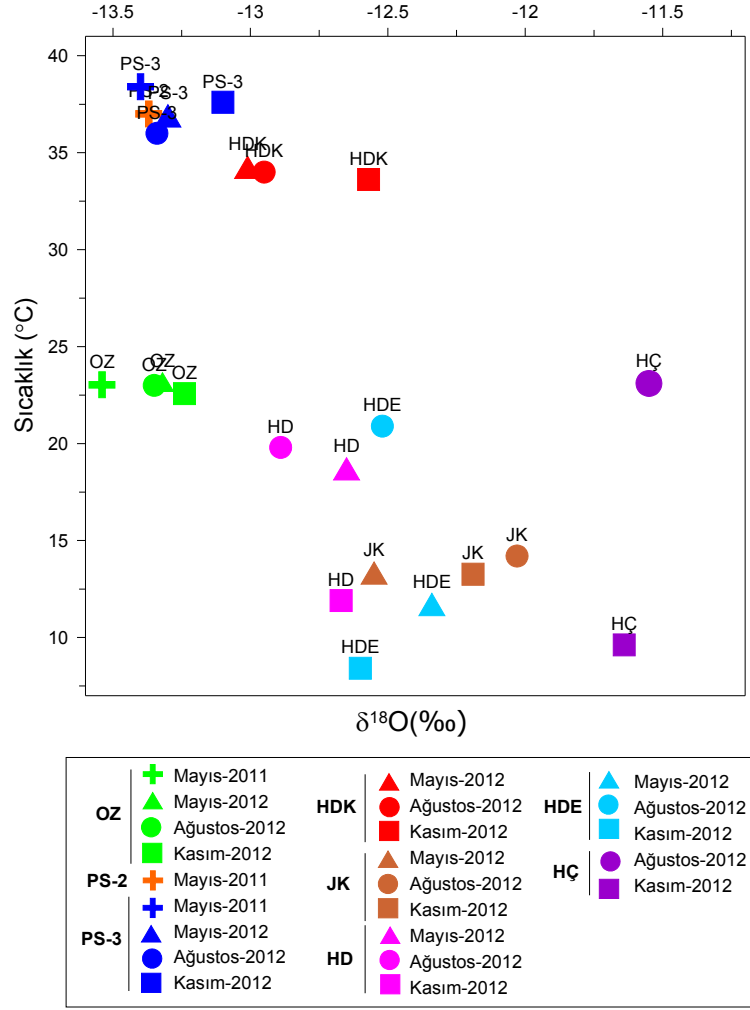
Belli bir bölge için yükseklik artışına bağlı olarak sıcaklık değerinde düşme ve buna karşılık olarak $\delta^{18}\text{O}$ değerinde azalma olduğu kuralı düşünülürse düşük $\delta^{18}\text{O}$ değerine sahip sular görece olarak daha yüksek kotlardan beslenen suları temsil edecektir.

İnceleme alanındaki su örneklerinin Oksijen-18-sıcaklık ilişkisi Şekil 3.27'de görülmektedir.

Şekil 3.27 incelendiğinde inceleme alanından alınan sıcak kuyu ve kaynak sularının $\delta^{18}\text{O}$ miktarları birbirine yakın değerlerdedir ve bunların beslenme yükselteleri yaklaşık aynıdır. Soğuk su kaynağı ve yüzey suları, sıcak sulara göre daha düşük kotlardan beslenmektedir.

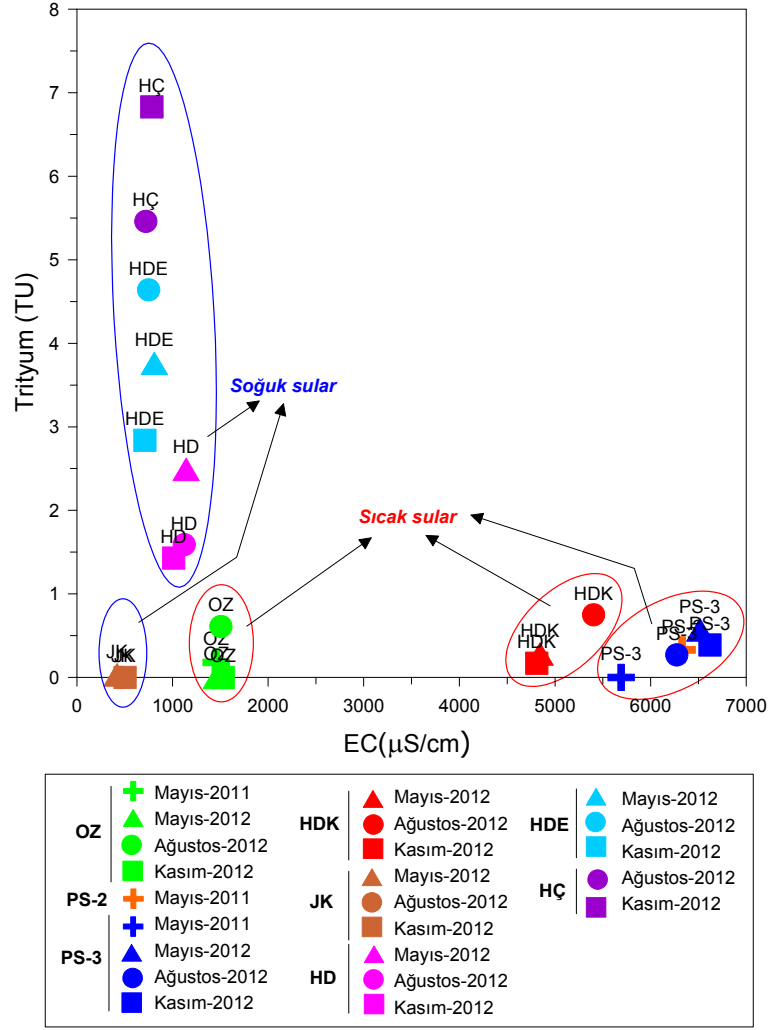
3.10.3. Trityum (^3H)-Elektriksel İletkenlik (EC) İlişkisi

Suların izotopik değerlendirilmesinde kullanılan trityum (^3H) izotopu, radyoaktif bir izotop olmasından dolayı yeraltı suyunun rezervuarda kalış süresi ile orantılı olarak radyoaktif bozunmaya uğramaktadır. Dolayısı ile yeraltı sularının geçiş süresinin ortaya konmasında ^3H izotopu en önemli parametredir. Aynı şekilde, genellikle örneklerle ait EC değeri de yeraltı suyunun rezervuarda kalış süresi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Pasinler jeotermal alanına ait örneklerin trityum (^3H)-elektriksel iletkenlik (EC) ilişkisi Şekil 3.28'de gösterilmektedir.



Şekil 3.27. İncelenen suların oksijen-18 (^{18}O)-sıcaklık ilişkisi

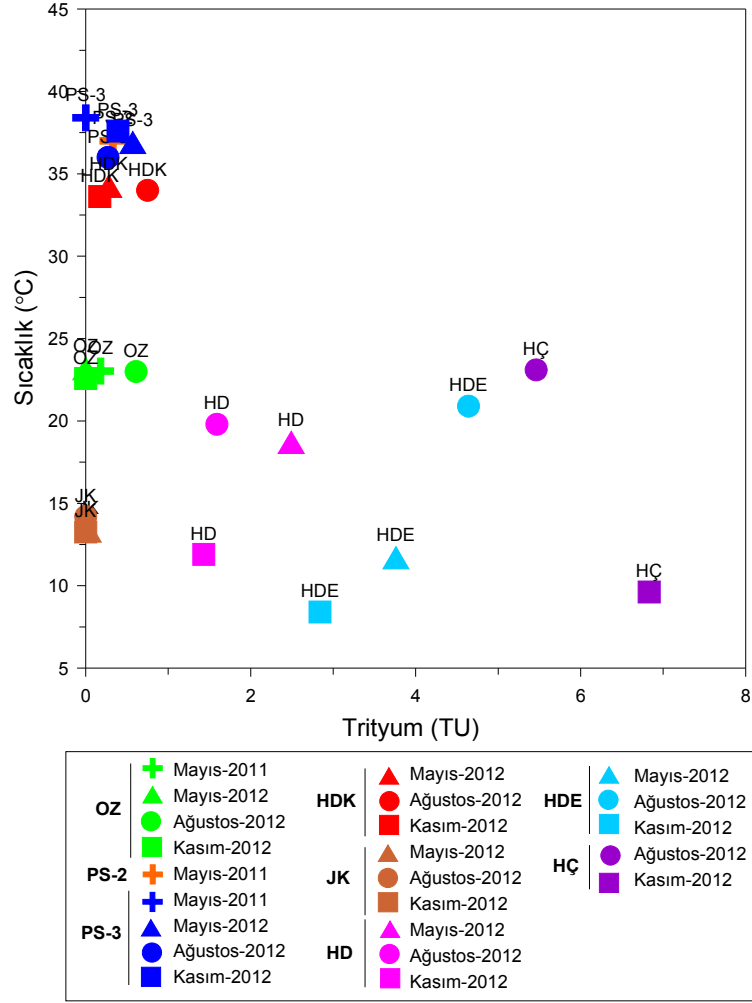
Şekil 3.28 incelendiğinde çalışma alanındaki sıcak suların düşük trityum yüksek EC değerlerine sahip olması, bu suların derin dolaşımli olduğunu gösterir. Jeotermal suların trityum değerlerinin 0.8 TU'dan düşük olması, rezervuarın 1950'lerden önce beslendiğini ifade eder (Clark ve Fritz, 1997). Soğuk sulardan JK (0.03 TU)'nında derin dolaşımli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.28. İncelenen suların trityum-elektriksel iletkenlik ilişkisi

3.10.4. Trityum (^3H)-Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) İlişkisi

Yeraltı sularının geçiş süresinin ortaya konmasında ^3H izotopu en önemli parametredir. Düşük trityum değerleri derin dolaşımli suları, yüksek trityum değerleri sığ suları temsil etmektedir. İnceleme alanındaki suların sıcaklık-trityum ilişkisi Şekil 3.29'da görülmektedir. Şekil 3.29 incelendiğinde PS-2, PS-3, ve HDK'nın yüksek sıcaklık düşük trityum değerlerine sahip olması bu suların yüksek kotlardan beslenen derin dolaşımli sular olduğuna işaret eder. Özdemir (OZ) sıcak su kuyusunda ise trityum değerleri diğer sıcak su kuyuları ile yaklaşık aynı değerde olmalarına karşın daha düşük sıcaklık değerlerine sahiptir. Bu durum, suların soğuk sularla karışımı olduğunu göstermektedir. Hem trityum hem de sıcaklık değeri düşük olan JK'nın yeraltında kalış süresi uzundur, ancak jeotermal gradyanın etkilemediği sığ derinliklerden gelmektedir.

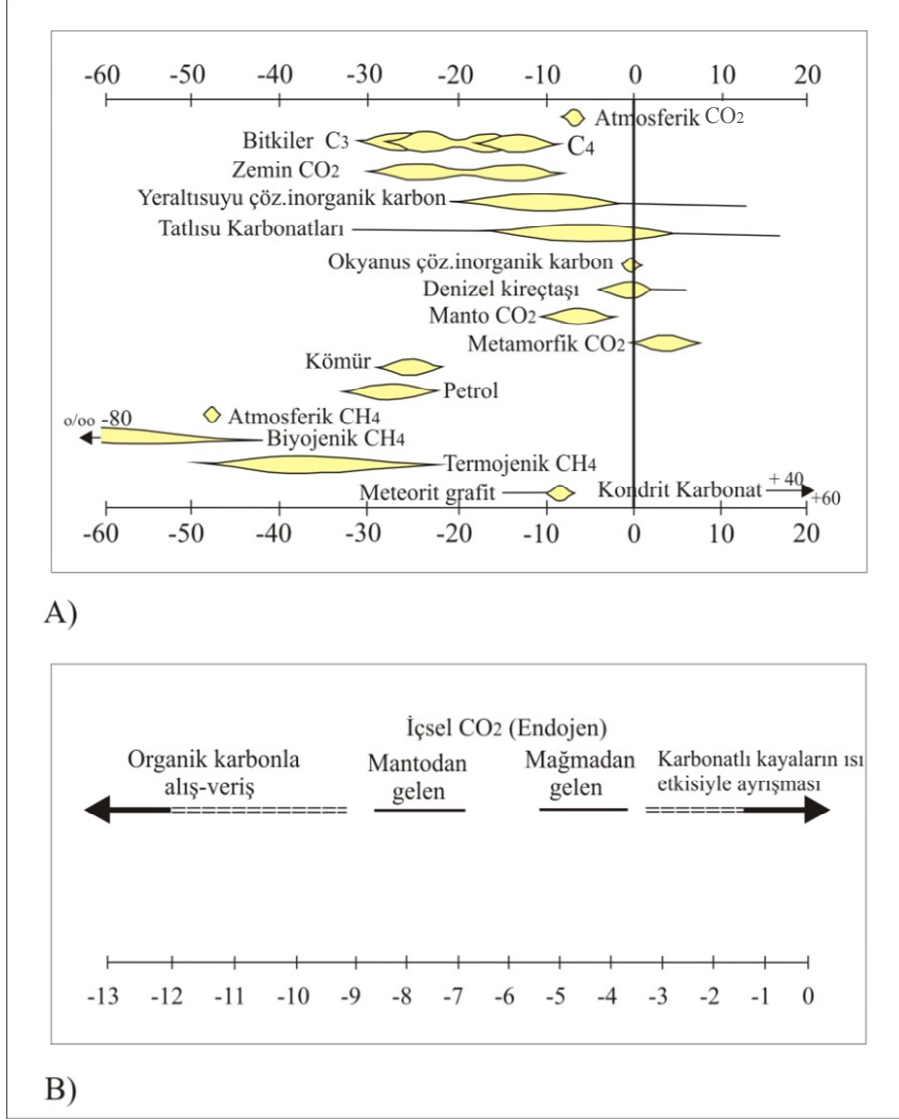


Şekil 3.29. İncelenen suların trityum- sıcaklık ilişkisi

3.10.5. Karbon İzotopu (^{13}C)

Yeraltına süzülen su topraktaki CO_2 'yi çözerken HCO_3^- ve CO_3^{2-} türlerine ayırır. Çözünmüş İnorganik Karbon (DIC) türlerinin dağılımı pH'a bağlı olarak değişir. pH değerine bağlı olarak DIC ve $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 'nin değişimi de farklıdır (Clark ve Fritz, 1997). Yeraltı suyundaki DIC ve $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ akiferlerde ayrışma reaksiyonları sırasında yüksek değerlere ulaşır. Kapalı ya da açık sistem şartlarına ve akifer malzemesinin silikat veya karbonat oluşuna bağlı olarak reaksiyonlar gelişir. Tamamen silikatlı akiferlerde DIC gelişmez, ancak karbonatlı akiferlerde kalsit veya dolomit çözünerek DIC gelişir. Bu tür karbonatlar genellikle ^{13}C bakımından zengindir ve $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in gelişiminde etkilidir (Clark ve Fritz, 1997). Yeraltı sularında çözünmüş inorganik karbon C_{DIC} ve $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ akiferdeki

veya topraktaki ayrışma reaksiyonları sonucu gelişir. Farklı ortamlardaki $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ değerinin değişimi Şekil 3.30'da verilmiştir.

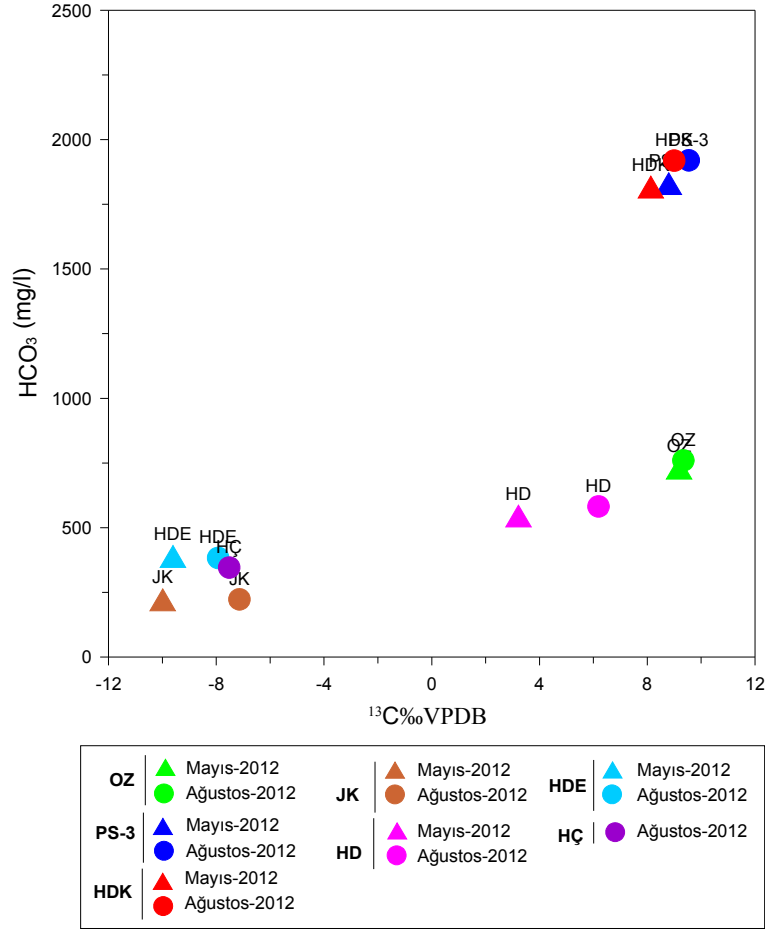


Şekil 3.30. Farklı doğal ortamlardaki $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ değerinin değişim aralığı (Clark ve Fritz, 1997).

Bu çalışma ile inceleme alanında ölçülen sularındaki $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ değerleri sıcak sularında (PS-3, OZ ve HDK) ‰ 8.13-9.54, soğuk su kaynağında (JK) ‰ -7.14, -9.99 ve yüzey sularında (HD, HDK, HÇ) ‰ -9.61, 6.19 arasında değişmektedir. Bu değerler ile Pasinler jeotermal alanında incelenen suların karbon içeriği şekil 3.30'a göre yeraltı sularında bulunan çözülmüş inorganik karbon ya da tatlı su karbonatlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca inceleme alanında sıcak su kaynağına yakın konumda yüzeylenen genç volkanik

kayaçların varlığı karbon içeriğinin bir kısmının manto kökenli CO₂ gazından kaynaklanmış olabileceğini de düşündürmektedir. (Şekil 3.30).

İnceleme alanındaki sulara HCO₃⁻-δ¹³C_{VPDB} ilişkisi incelenmiştir. Şekil 3.31’de görüldüğü gibi sıcak suların δ¹³C_{VPDB} değerleri HCO₃⁻ konsantrasyonunun artışına bağlı olarak yüksektir. Benzer şekilde soğuk sulara δ¹³C_{VPDB} değerleri düşüktür.



Şekil 3.31 İnceleme alanındaki sulara ait karbon-13-bikarbonat (HCO₃) ilişkisi

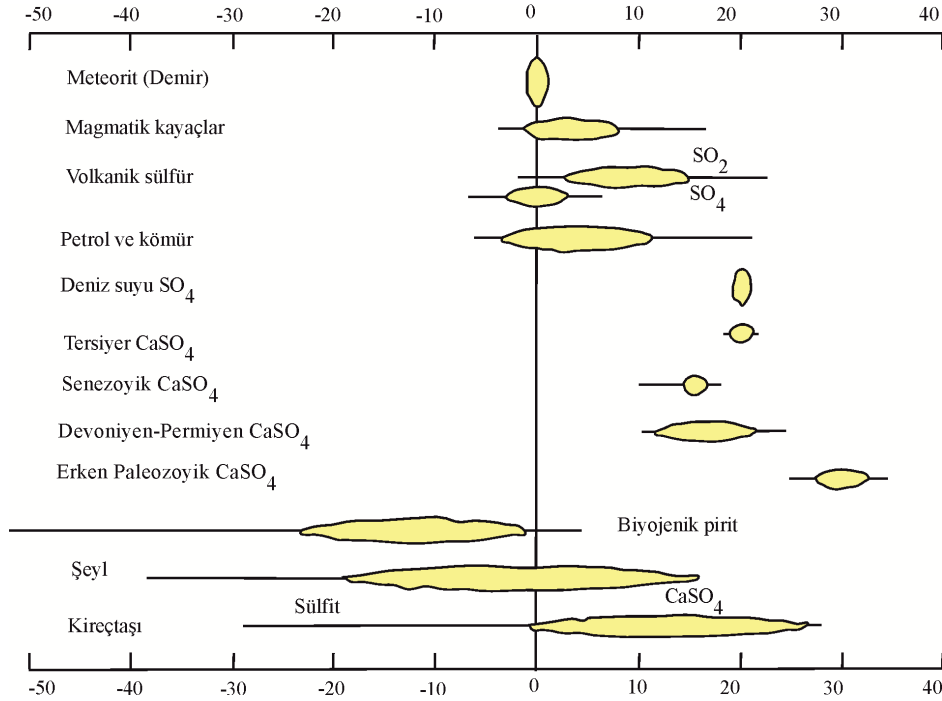
3.10.6. Kükürt İzotopu (³⁴S)

Kükürt yerkabuğunda çözülmüş SO₄⁻², çözülmüş SO₂, H₂S, SO₄ ve SO₂ mineralleri şeklinde bulunmaktadır. Organik kükürt, humik maddeler, kerojen ve hidrokarbon olarak bulunur. Kükürdün topraktaki oksidasyonu yarı kurak bölgelerde karasal sülfatı oluşturur. Atmosferdeki kükürt ise doğal ve endüstriyel SO₂ ve denizel aerosolü içerir.

Kükürt-34, kükürt bileşimleri arasında biyolojik döngüden dolayı oldukça fazla kısımlara ayrılır. Benzer olarak sülfatın oksijen-18 içeriği kükürt döngüsünde iz sürmek için önemli bir araçtır. +20 ‰ yi aşan değerler kireçtaşları ve evaporitlerle ilgilidir. Juvenil sülfürün oksidasyonundaki kükürt-34 oranı genellikle -5‰ ila +5‰ arasındadır. (Clark ve Fritz, 1997). Negatif kükürt-34 değerleri ise tipik olarak indirgenmiş sülfür bileşiklerinin bulunduğu diyajenetik bir çevreden gelir (Krouse, 1980). En yaygın reaksiyon ürünü pirittir ve pirit şeyllerden ve denizel sedimanlarda denizsuyu sülfatının bakterilerce indirgenmesiyle şekillenen organikçe zengin sedimanter kayaçlardan gelir (Clark ve Fritz, 1997).

Pasinler jeotermal alanında çalışılan sulardaki çözülmüş SO_4^{2-} iyonundaki ^{34}S izotopu analiz sonuçları Tablo 3.14’de verilmiştir. Kükürt-34 izotopu için ve tüm kükürt içeren bileşikler için standart olarak CDT (Standard Canon Diablo Troilite) (Krouse, 1980) kullanılmıştır. Pasinler jeotermal alanında incelenen suların $^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ izotop içerikleri ÖZ ve PS-3 sıcak su kuyularında sırasıyla ‰ 36.18, ‰ 18.64, HDK’nda ‰31.35, JK’nda ‰1.94, ve HD ve HÇ’nda sırasıyla ‰14.4, ‰13.44’dür.

Bu analiz sonuçlarını değerlendirmek için Krouse (1980) tarafından oluşturulmuş diyagram kullanılmıştır (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Farklı malzeme ve ortamlarda kükürt ve kükürt bileşiklerinin $^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ değerleri (Krouse, 1980)

Şekil 3.32 incelendiğinde ise PS-3 sıcak su kuyusundan elde edilen değere göre sıcak suların kükürt izotopu volkanik kökenli sülfüre, petrol ve kömüre ve kireçtaşlarına karşılık gelmektedir. İnceleme alanında Horosan Formasyonu'nun alt kısımlarında bulunan ekonomik kömür oluşumları, Pasinler kaplıcası civarındaki petrol sızıntılarının varlığı ve geniş bir alanda yüzeyleme veren Erzurum-Kars Plato Volkanitleri; kükürtün kaynağını oluşturduğu düşünülmektedir. JK, HD ve HÇ'nda da kükürtün kaynağının kireçtaşı, volkanik kayalar ve petrol-kömür kökenli olduğu görülmektedir (Şekil 3.32).

3.11. Su-Kayaç Etkileşimi

Jeolojik olarak kompleks bölgelerdeki su döngüsü meteorik, metamorfik ve magmatik gibi çok farklı kaynakları kapsar. Bu kaynaklardaki akışkanlar çeşitli derinliklerdeki sedimanter, magmatik ve metamorfik kayalarla reaksiyona girebilirler. Suların kimyasal içerikleri onların derinlerdeki kayalarla ve toprakla etkileşimi sonucu veya beşeri faaliyetler sonucunda ortaya çıkar (Stober ve Bucher, 1999). Yeraltı sularını korumak ve güvenilir bir şekilde kullanmak için suların kaynaklarını ve çevre tarafından nasıl etkilendiklerini bilmek önemlidir. Üst kabukta kristalen kayalardaki suların majör element içerikleri derinliğe göre değişiklik gösterir. Alt kabuktan gelen sular Cl^- ca zenginleşirken yüzeye yakın sular Ca^{+2} , Na^+ ve HCO_3^- ca zenginleşir (Frape vd., 2003). Kıtasal kabuktaki suların kimyasal içeriği su-kayaç etkileşimi sonucu gelişir. Bu sürecin detaylarını araştırmak için jeokimyada magmatik, hidrotermal ve düşük sıcaklıklı çevreler dahil olmak üzere geniş bir alanda kullanılan nadir toprak elementleri (NTE= lantanitler + Y) (Lipin ve McKay, 1989) ana elementlere ek olarak kullanılabilir. Geniş ölçekte yapılan çalışmalar, yeraltı sularındaki NTE içeriklerinin ana kaya ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Banks vd., 1999; Leybourne vd., 2000).

Rubidyum (Rb) ve sezyum (Cs) büyük iyon çaplı litofil elementlerdir. Bu elementler benzer kimyasal davranış sergilerler ve minerallerdeki potasyum (K)'un yerini alırlar. Kil minerallerinde Cs'un adsorpsiyonlaşması ile ya da Rb ile birleşmesi sonucunda fraksiyonlaşma oluşabilir (Brouwer vd., 1983; Berger vd., 1988; Viellard, 2000). Elementlerin bu davranışları kayaların su-kayaç etkileşimini yorumlamak için önemli bir göstergedir.

3.11.1. Kayaç Jeokimyası

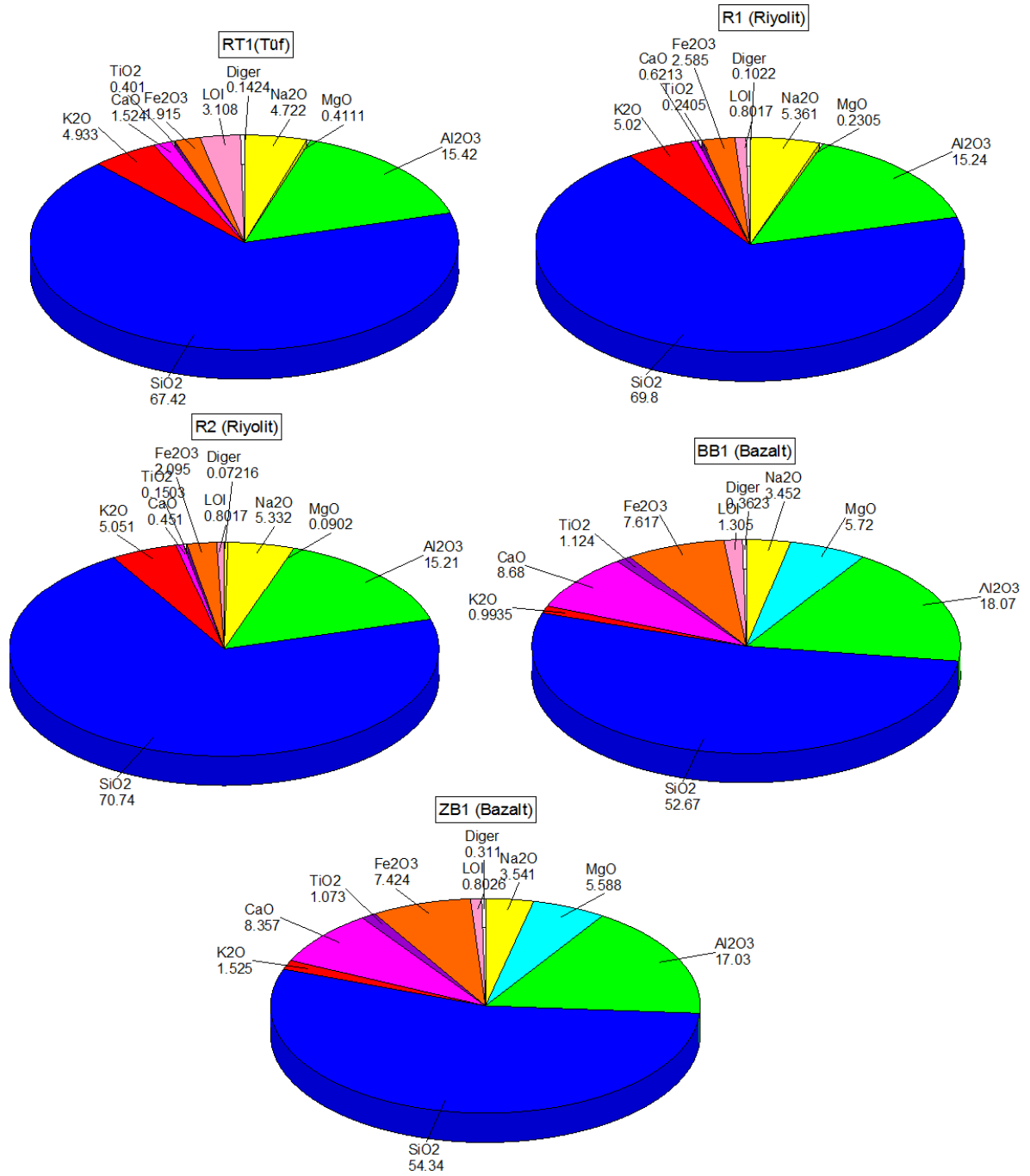
Pasinler (Erzurum) jeotermal alanında ve yakın çevresinde yüzeylenen birimlerin kimyasal analizleri ile bu birimlerden yüzeye ulaşan sularının kimyasal benzerliklerini karşılaştırmak amacı ile çeşitli kayalardan kimyasal analizler yapılmıştır. Miyosen yaşlı Erzurum-Kars Plato Volkanitleri'nden alınan riyolit, riyolitik tüf ve bazalt türü kayaların ana oksit değerleri Tablo 3.15'de, kayaların ana oksit değerlerine ait dairesel grafikler ise Şekil 3.33'de verilmiştir. Çevre kayaların kimyasına göre tüm kayalarda (riyolit, bazalt, riyolitik tüf) en bol bulunan oksit SiO_2 'dir. İkinci sırada ise Al_2O_3 yer almaktadır.

Tablo 3.15. Kayaç örneklerine ait ana oksit değerleri (değerler % olarak verilmiştir.)

Örnek No	R1	R2	ZB1	BB1	RT1
Kayaç adı	Riyolit	Riyolit	Bazalt	Bazalt	Riyolitik tüf
Alındığı Formasyon	Erz.-Kars Plt. Volk.	Erz.-Kars Plt. Volk.	Erz.-Kars Plt. Volk	Erz.-Kars Plt. Volk	Erz.-Kars Plt. Volk
Na₂O	5.35	5.32	3.53	3.44	4.71
MgO	0.23	0.09	5.57	5.70	0.41
Al₂O₃	15.21	15.18	16.98	18.01	15.38
SiO₂	69.65	70.59	54.17	52.49	67.25
P₂O₅	0.06	0.03	0.16	0.19	0.07
K₂O	5.01	5.04	1.52	0.99	4.92
CaO	0.62	0.45	8.33	8.65	1.52
TiO₂	0.24	0.15	1.07	1.12	0.40
Cr₂O₃	<0.002	<0.002	0.020	0.021	<0.002
MnO	0.04	0.04	0.13	0.15	0.07
Fe₂O₃	2.58	2.09	7.40	7.59	1.91
LOI	0.8	0.8	0.8	1.3	3.1

Kayaç ve su örneklerinin iz element değerleri Tablo 3.16'da verilmekte olup, kayalardaki iz element değişimleri Şekil 3.34'de gösterilmiştir.

Kayaçların iz element içerikleri incelendiğinde Ba, Sr, Rb, Zr, Ce, Zn ve Ga gibi iz elementlerin yüksek değerlerde, Sb, Se, As, Cd, Sn, Hg ve Tl gibi elementlerin ise düşük değerlerde olduğu görülür (Tablo 3.16).

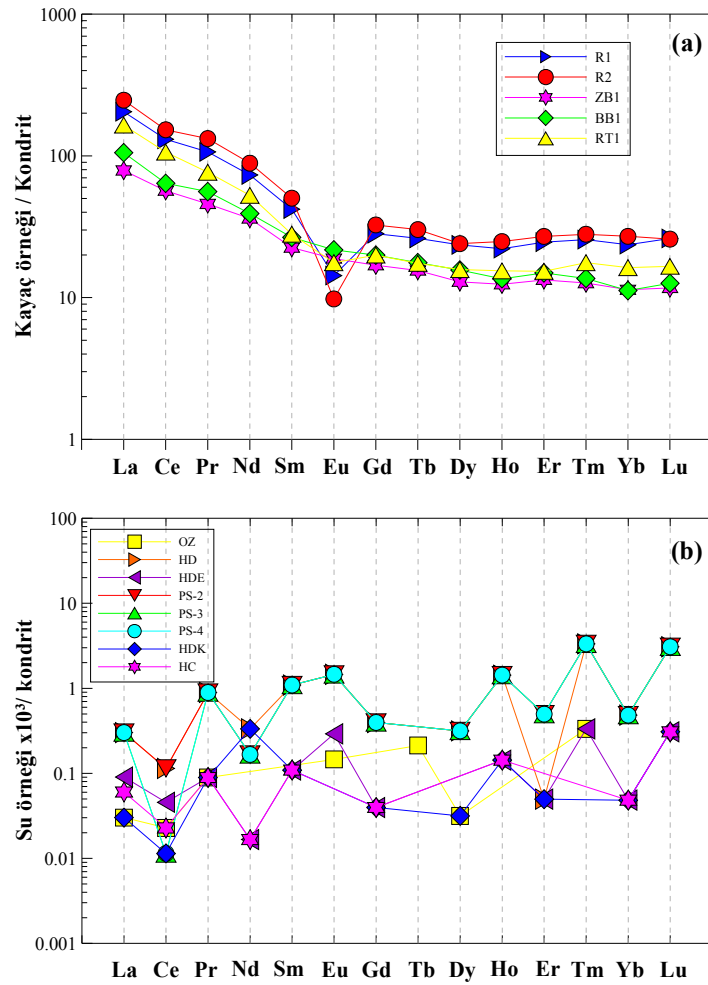


Şekil 3.33. Kayaç örneklerinde ana oksitlerin dağılımı

Tablo 3.16. Kayaç ve su örneklerine ait iz element sonuçları (su örnekleri ppb kayaç örnekleri ppm olarak verilmiştir).

Element	Kayaç örnekleri					Su örnekleri						
	R1	R2	ZB1	BB1	RT1	OZ	HD	JK	PS2	PS3	PS4	HÇ
Co	1.0	0.5	31.9	31.2	1.3	0.02	0.29	0.02	0.02	0.02	0.02	0.11
Ni	1.8	0.6	50.4	69.2	3.6	0.2	5	0.7	0.2	4	0.2	3.7
Cu	3.5	3.3	29.2	22.0	2.8	0.3	3.2	0.2	1	1	1	2.6
Zn	64	83	36	41	64	1.9	10	4	7	10	5	15.5
Ga	20.7	20.4	18.3	19	17.5	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
As	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	23	6.7	20	22	17	6.3
Se	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.7	5	0.5	6	5	5	1.2
Rb	112.1	120.3	37.9	19.4	119.4	11.5	82.8	2.71	140	147	131	6.60
Sr	41.6	18.7	433.2	458.0	149.6	367	2520	492	2366	2578	2370	695
Y	44.2	43.4	22.3	25.5	28.7	0.02	0.3	0.01	0.6	0.6	0.6	0.03
Zr	427.2	367.0	188.5	187.7	468.0	0.03	0.05	0.02	1.7	2.2	2.9	0.04
Nb	28.1	31.5	11.7	11.1	24.3	0.01	0.01	0.01	0.2	0.2	0.2	0.02
Mo	3.2	3.2	1.3	1.0	0.9	0.3	1.1	0.9	0.1	0.1	0.1	5.6
Cd	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.20	0.05	0.05	0.05	0.05	0.13
Sn	7	5	2	2	3	0.13	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07
Sb	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.21	0.08	0.05	0.05	0.05	0.22
Cs	3.7	2.5	1.0	0.6	3.5	0.35	3.7	0.01	12.3	12.8	10.6	0.03
Ba	870	498	362	549	884	9.14	527	44.5	899	890	832	81.4
La	68.0	82.1	26.2	35.0	54.8	0.01	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Ce	114.7	133.8	49.8	56.1	93.2	0.02	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Hf	9.6	9.6	3.7	4.3	10.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Ta	1.5	2	0.6	0.7	1.6	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
W	7.9	1.3	0.7	0.7	2.4	0.08	0.25	0.10	0.2	0.2	0.2	0.22
Hg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.2	0.2	0.1	1	1	1	0.1
Tl	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.08	0.01	0.1	0.1	0.1	0.04
Pb	4.0	5.5	0.9	4.0	1.2	0.5	0.7	0.1	1	1	1	0.4
Th	16.5	19.6	7.4	7.3	23.4	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
U	5.0	5.6	1.7	1.6	6.1	0.02	0.57	0.6	0.02	0.02	0.02	2.16

Pasinler Havzası'ndan derlenen tüm su örneklerindeki NTE içerikleri düşük orandadır ve su örneklerinin normalleştirilmiş (Evens vd., 1978) NTE diyagramlarında hafif nadir toprak elementleri bakımından bir azalma gözlenirken ağır nadir toprak elementlerinde bir zenginleşme gözlenmektedir (Şekil 3.35). Sularda gözlemlenen pozitif Eu anomalisinin yanı sıra negatif Ce anomali oksijence zengin ortamlara işaret etmektedir (Constantopoulos, 1988).

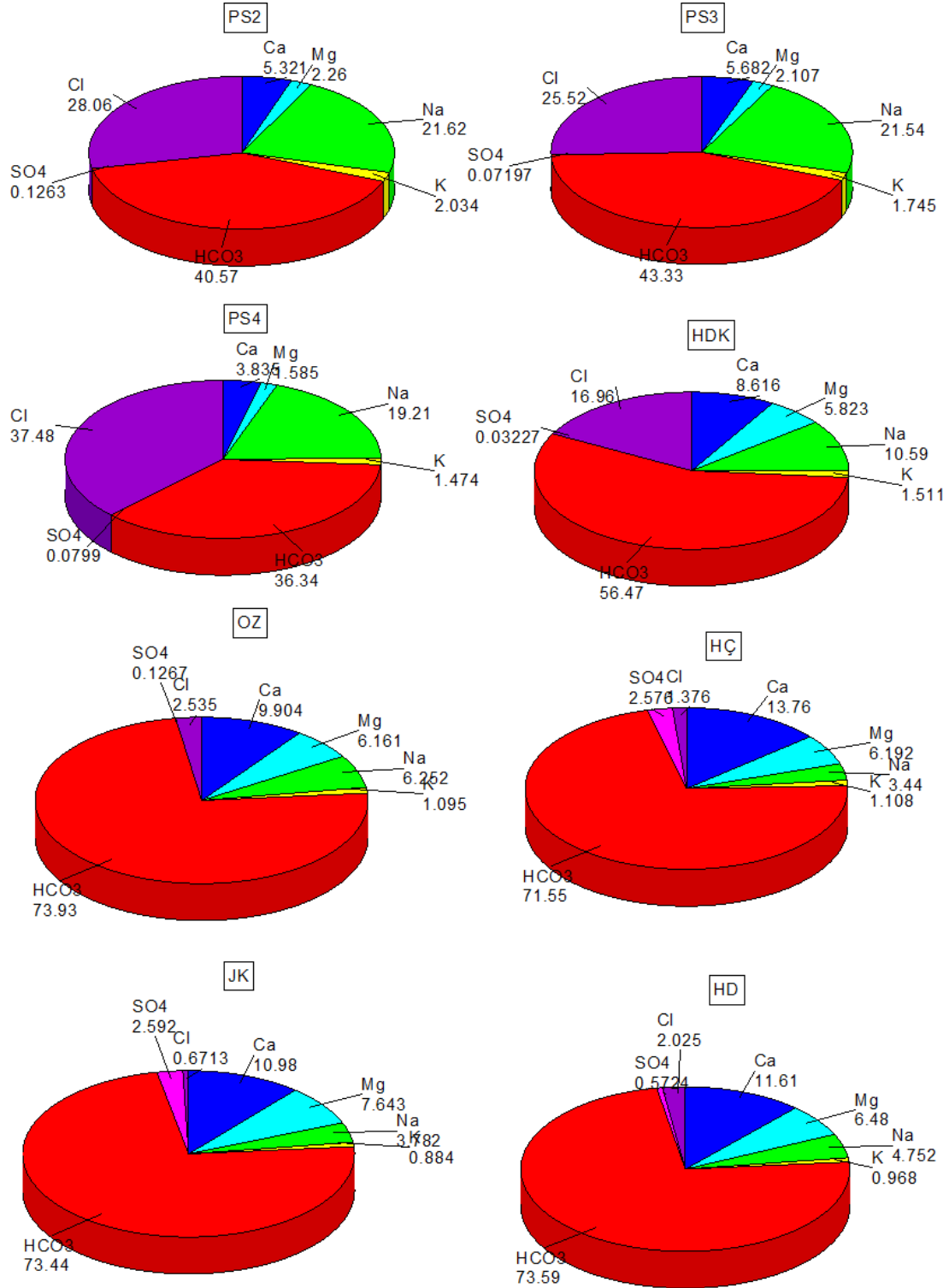


Şekil 3.35. İnceleme alanındaki (a) kayalarda (Haskin vd, 1968) ve (b) sularda (Evens vd., 1978) kondrite göre normalize edilmiş NTE dağılımları

3.11.2. Hidrojeokimya

Çalışma alanında yer alan sıcak sular, soğuk su kaynağı ve yüzey suları Na^+ , K^+ , Ca^{+2} ve Mg^{+2} katyonları ve Cl^- , SO_4^{-2} ve HCO_3^- anyonları açısından farklılıklar gösterirler.

Bu farklılıklar suların içinde dolaştıkları rezervuar kayaların litolojisinden kaynaklanmaktadır. İncelenen kaynaklara ait Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} ve HCO_3^- anyon ve katyon değerlerine göre dairesel diyagramları oluşturulmuştur (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. İnceleme alanındaki sulara ait dairesel diyagramlar

Bu grafikler incelendiğinde sıcak sularda genel olarak Na^+ ve HCO_3^- iyonları, soğuk sularda ise Ca^{+2} ve HCO_3^- diğer iyonlara göre daha baskındır. Na^+ içeriği sıcak sularda %6.2-%21.62 arasında, HCO_3^- içeriği %36.34-%73.93 arasında değişmektedir.

Suların iz element içerikleri incelendiğinde Ba, Sr, Rb, As, Zn ve Ni elementleri diğer elementlere göre daha yüksek konsantrasyonlardadır.

İnceleme alanındaki sıcak sularda SiO_2 miktarı normal yeraltı sularına oranla fazla olup, 123.4-190.5 mg/l arasında değişmektedir. Kayaçlarda da SiO_2 en yüksek konsantrasyona sahip oksiti oluşturmaktadır. Bu durum çalışma alanında yüzeylenen genellikle volkanik kayaçların kimyasal özellikleri suların kimyası üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

3.11.3. Su-Kayaç İlişkisi

Yer altı ve yüzey sularının kimyasını, kayaç kimyası ve sıcaklık, pH, Eh gibi ortam koşulları oldukça fazla etkilemektedir. Su- kayaç etkileşimine ve ortam koşullarına, kayaç kimyasının yanı sıra çevresel faktörlerden iklim koşulları da önemli ölçüde etki etmektedir. Bunun nedeni iklimin tipinin kayaçların ayrışma derecesini, kayaçların ayrışma derecesi ise suyun kimyasal bileşimini etkilemesidir. İnceleme alanındaki jeotermal suların majör iyon (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} ve HCO_3^-) içerikleri ile soğuk suların majör iyon içerikleri birbirinden farklıdır. Aynı şekilde sıcak suların iz element değerleri soğuk suların iz element değerlerinden yüksektir.

Major iyonların hangi kimyasal olaylar sonucu su-kayaç etkileşimi ile suya geçmiş olabilecekleri Hounslow (1995)'e göre değerlendirilmiştir (Tablo 3.18) ve bu değerlendirmeden elde edilen sonuçlar Tablo 3.19'da verilmiştir. Sonuç olarak incelenen kaynakları etkileyen kimyasal olaylar belirlenmiştir (Tablo 3.20).

Tablo 3.18. Su- kayaç etkileşimine bağlı olarak belirlenen sonuçlar (Hounslow, 1995'den düzenlenmiştir)

Parametreler	Değer aralıkları	Olası Sonuçlar
$(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl} + \text{Ca}^{+2})$	> 0.2 ve < 0.8 < 0.2 ya da > 0.8	Olası plajyoklas ayrışması Plajyoklas ayrışması
$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl})$	> 0.5 = 0.5 < 0.5 TDS > 500 < 0.5 TDS < 500 > 50 < 0.5 TDS < 50	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi Halit çözeltisi Tatlılaşmaya dönüş, deniz suyu Analiz hatası Yağmur suyu
$\text{Mg}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})$	$\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_2 > 10$ = 0.5 < 0.5 > 0.5 $\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_2 < 5$ > 0.5 < 0.5	Karbonat ayrışması Dolomit ayrışması Kireçtaşı- dolomit ayrışması Dolomit çözeltisi, kalsit çökeli mi veya deniz suyu Silikat ayrışması Ferromagnezyen mineraller Granit ayrışması
$\text{Ca}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2})$	= 0.5 < 0.5 pH < 5.5 < 0.5 nötr > 0.5	Jips çözeltisi Pirit oksidasyonu Kalsiyum ayrılması- iyon değişimi veya kalsit çökeli mi Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar
$\text{SiO}_2 / (\text{Na} + \text{K} + \text{Cl})$	< 1 > 1 ve < 2 > 2	Katyon değişimi Albit ayrışması Ferromagnezyen mineraller
TDS	> 500 < 500	Karbonat ayrışması, tuzlu sular veya deniz suyu Silikat ayrışması
$\text{Cl} / \Sigma \text{anyon}$	> 0.8 TDS > 500 > 0.8 TDS < 100 < 0.8	Deniz suyu, tuzlu sular veya evaporitler Yağmur suyu Kayaç ayrışması
$\text{HCO}_3^- / \Sigma \text{anyon}$	> 0.8 < 0.8 Yüksek sülfat < 0.8 Düşük sülfat	Silikat veya karbonat ayrışması Jips çözeltisi Deniz suyu veya tuzlu sular
Doymunluk indeksi	Pozitif 0 Negatif	Kalsitce aşırı doymun çözelti Kalsitce doymun çözelti Kalsitce doymamış çözelti

Tablo 3.19. Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} katyonları ile Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- anyon değişimleri ve kalsit doygunluk indeksi değerleri (Hounslow, 1995)

Parametreler	HDK	PS2	PS3	PS4	OZ	JK	HC	HD	HDE
$\frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)}{(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{+2})}$	0.014	0.39	0.46	0.60	0.29	0.21	0.14	0.21	0.10
$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$	0.50	0.54	0.56	0.59	0.79	0.89	0.79	0.78	0.75
$\text{Mg}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})$	0.52	0.41	0.37	0.40	0.50	0.53	0.42	0.47	0.46
$\text{Ca}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2})$	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.91	0.92	0.98	0.96
$\text{SiO}_2 / (\text{Na} + \text{K} + \text{Cl})$	-7.4	0.18	0.13	0.08	0.49	0.39	0.63	0.45	0.92
$\text{Cl}^- / \Sigma \text{anyon}$	0.3	0.53	0.49	0.47	0.05	0.01	0.03	0.04	0.02
$\text{HCO}_3^- / \Sigma \text{anyon}$	0.64	0.44	0.48	0.51	0.93	0.94	0.93	0.93	0.95
Kalsit SI	0.45	-0.7	-0.48	-0.8	-0.53	-2.33	-2.3	-0.59	-1.09

Tablo 3.20. Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} katyonları ile Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- anyon değişimlerine bağlı olarak kaya- su etkileşimi ve kalsit doygunluk indeksine göre kimyasal olaylar (Hounslow, 1995)

Parametreler	HDK	PS2	PS3	PS4
$\frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)}{(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{+2})}$	Plj Ayırışması	Olası plajyoklas ayırışması	Olası plajyoklas ayırışması	Olası plajyoklas ayırışması
$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$	Halit Çözeltisi	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi
$\text{Mg}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})$	Dolomit ayırışması	Kireçtaşı- dolomit ayırışması	Kireçtaşı- dolomit ayırışması	Kireçtaşı- dolomit ayırışması
$\text{Ca}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2})$	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar
$\text{SiO}_2 / (\text{Na} + \text{K} + \text{Cl})$	Katyon değişimi	Katyon değişimi	Katyon değişimi	Katyon değişimi
$\text{Cl}^- / \Sigma \text{anyon}$	Kayaç Ayırışması	Kayaç Ayırışması	Kayaç Ayırışması	Kayaç Ayırışması
$\text{HCO}_3^- / \Sigma \text{anyon}$	Deniz suyu veya tuzlu sular	Deniz suyu veya tuzlu sular	Deniz suyu veya tuzlu sular	Deniz suyu veya tuzlu sular
Kalsit SI	Kalsitçe Doygun	Kalsite doymamış	Kalsite doymamış	Kalsite doymamış

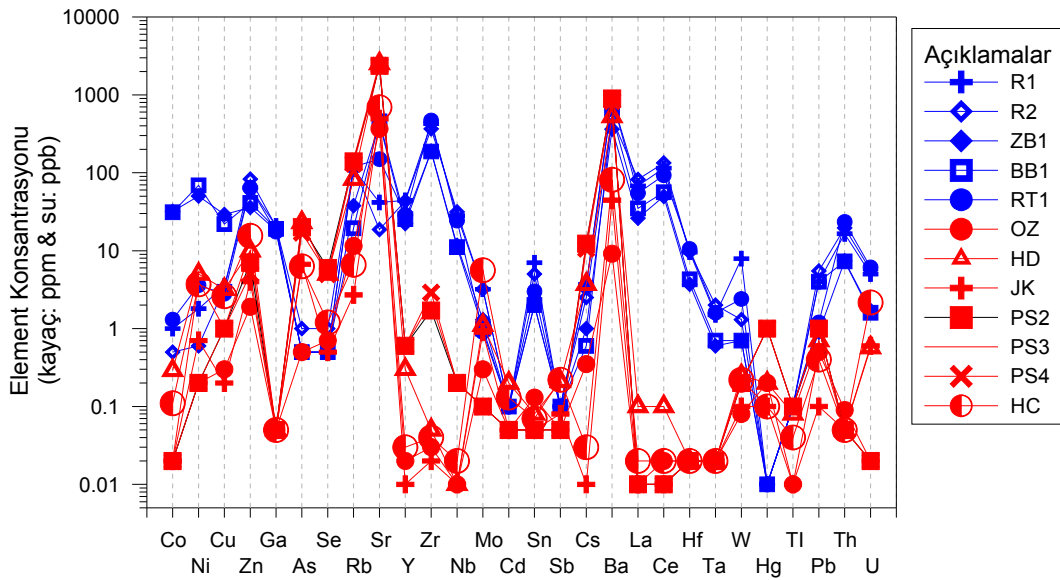
Tablo 3.20. devamı

Parametreler	OZ	JK	HC	HD	HDE
$(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{+2})$	Olası plajiyoklas ayrışması	Olası plajiyoklas ayrışması	Olası plajiyoklas ayrışması	Olası plajiyoklas ayrışması	Olası plajiyoklas ayrışması
$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi	Halit- albit dışındaki farklı sodyum kaynağı, iyon değişimi
$\text{Mg}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})$	Dolomit çözeltisi, kalsit çökeli mi veya deniz suyu	Dolomit çözeltisi, kalsit çökeli mi veya deniz suyu	Kireçtaşı- dolomit ayrışması	Kireçtaşı- dolomit ayrışması	Kireçtaşı- dolomit ayrışması
$\text{Ca}^{+2} / (\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2})$	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar	Jipsten farklı kalsiyum kaynağı- karbonat veya silikatlar
$\text{SiO}_2 / (\text{Na} + \text{K} + \text{Cl})$	Katyon değişimi	Katyon değişimi	Katyon değişimi	Katyon değişimi	Katyon değişimi
$\text{Cl}^- / \Sigma \text{anyon}$	Kayaç Ayrışması	Kayaç Ayrışması	Kayaç Ayrışması	Kayaç Ayrışması	Kayaç Ayrışması
$\text{HCO}_3^- / \Sigma \text{anyon}$	Silikat veya karbonat ayrışması	Silikat veya karbonat ayrışması	Silikat veya karbonat ayrışması	Silikat veya karbonat ayrışması	Silikat veya karbonat ayrışması
Kalsit SI	Kalsite doymamış çözelti	Kalsite doymamış çözelti	Kalsite doymamış çözelti	Kalsite doymamış çözelti	Kalsite doymamış çözelti

Tablo 3.19 ve Tablo 3.20 incelendiğinde inceleme alanındaki sıcak sularda (HDK, PS2, PS3, PS4 ve ÖZ), soğuk su kaynağında (JK) ve yüzey sularında (HÇ, HD, HDE) bulunan Na^+ 'un kaynağını olası plajiyoklas ayrışması ve iyon değişimi, Mg^{+2} 'un kaynağını kireçtaşı- dolomit ayrışması, Ca^{+2} 'un kaynağını karbonat veya silikatlar, Cl^- 'un kaynağını kayaç ayrışması oluşturmaktadır. HCO_3^- sıcak sulara (OZ kuyusu hariç) tuzlu sulardan; OZ kuyusuna, soğuk su kaynağına ve yüzey sularına ise silikat veya karbonat ayrışması sonucu geçmiştir. Çalışma alanında incelenen tüm sulardaki SiO_2 ise katyon değişimi sonucu oluşmuştur.

İnceleme alanından derlenen suların iz element içerikleri ile kayaçlardaki iz element içerikleri karşılaştırıldığında, kayaç kimyasının su kimyasını etkilediği görülmektedir (Şekil 3.37). Şekil 3.38'de riolit ve riolitik tüf türü kayaçlarda Zn, Rb, Zr, Ba, La, Ce gibi iz element içeriğinin yüksek; Hg, Sb, Cd, Se, As gibi iz elementlerin düşük olduğu

gözlenmektedir. Bazaltlardaki iz element miktarları incelendiğinde Ni, Sr, Zr, Ba, La, Ce gibi iz elementlerin yüksek, Hg, Sb, Cd, Se, As gibi iz elementlerin düşük oranda olduğu gözlemlenmektedir. Suların iz element içerikleri ile kayaların iz element içerikleri karşılaştırıldığında; sularda yüksek olan Sr, Ba, Rb, Zn elementleri kayalarda olduğu gibi yüksek değerlerdedir. Bu durum Zn, Rb Sr ve Ba elementlerinin sulara riyolit, riyolitik tüf ve bazaltlardan geçtiğini göstermektedir.



Şekil 3.37. Su ve kayaların iz element dağılımları

3.12. Jeotermal Sistemler

3.12.1. Jeotermal Sistemlerin Oluşum Şekilleri

Bir jeotermal sistem ısı kaynağı, ısıyı taşıyan akışkan (çalışan akışkan, meteorik su), rezervuar zon (poroziteli, permeabilitesi) ve örtü kayadan meydana gelir. Jeotermal sistemlerde en önemli ısı kaynağı yerküre içindeki akkor ve mantodan kaynaklanan ısı ve radyoaktif mineral bozunmasıdır. Yerkabuğu hareketleri nedeniyle oluşan tektonik hatlar boyunca litosferde kıvrımlanma-kırılmalar ve manto üst kesimindeki magma ayrışması sonucu, magmatik intrüzyonlar ve volkanik faaliyetler gelişmektedir. Bu faaliyetler sonucu yerin derinliklerinde bulunan ısı, kabuk içerisinde sığ derinliklere ulaşabilmektedir. Bu ısı etrafındaki kayaları da ısıtarak, bölgede bir ısı anomalisi yaratmaktadır. Bu ısı, konduktif

(ısının ışınım yoluyla yayılması) veya konvektif (bir maddenin hareketi ile taşınma- burada söz konusu olan su ile taşınmadır) olarak taşınabilir (Koçak, 2003).

Yağan meteorik sular yerin kırık ve çatlaklarından derinlere süzülerek, ısı anomali alanlarında ısıtıldıktan sonra tekrar yüzeye doğru ekonomik anlamda sığ derinliklere kadar yükselmektedir. Bu yöntemle ısı taşıma işlemine konvektif (konveksiyon yoluyla) taşıma denmektedir.

Yukarılara doğru taşınan ısınmış akışkan, kabuk içerisinde ekonomik anlamda sığ derinlikte, poroziteli ve permeabiliteli litolojik birimler ve/veya zonlar içinde belirli bir süre depolanabilirler. Rezervuarın sürekli olarak beslenebilmesi için derinden gelen bu akışkanın, beslenme alanı ile uzun mesafelerde bağlantılı olması gerekir. Rezervuar zonda depolanan bu akışkanın ve ısının, enerjisini kaybetmeden korunmalı olarak kalabilmesi için bu zon ve/veya birimler üzerinde ısı ve akışkan kaybını önleyecek geçirimsiz birimler olmalıdır, bu birimlere ise örtü kaya denmektedir.

Jeotermal sahalar, Tablo 3.21’de görüldüğü gibi rezervuar sıcaklıklarına göre düşük, orta ve yüksek entalpili sahalar olmak üzere üç şekilde gruplandırılırlar (Dickson ve Fanelli, 1990). Bu sınıflamanın dışında, rezervuardaki etkin akışkan (buhar veya su) durumuna, kimyasal bileşimine veya araştırmanın niteliğine göre daha değişik amaçlı sınıflamalar yapılabilmektedir.

Tablo 3.21. Jeotermal sahaların akışkan sıcaklıklarına göre sınıflandırılması (Dickson ve Fanelli, 1990)

	a	b	c	d
Düşük Entalpili Sahalar	< 90 °C	< 125 °C	< 100 °C	< 150 °C
Orta Entalpili Sahalar	90–150	125–225	100–200	-
Yüksek Entalpili Sahalar	>150	>225	>200	>150

(a) Muffler ve Cataldi, 1978; (b) Hochstein, 1990; (c) Benderitter ve Cormy, 1990; (d) Haenel vd., 1988

3.12.2. Pasinler Jeotermal Sistemi

Pasinler jeotermal alanında var olan sıcak su kaynaklarından (HDK) ve MTA tarafından yapılan sondajlardan (OZ, PS-1, PS-2, PS-3, PS-4, PS-5 ve HHD-1) rezervuarın varlığını işaret eden 22.5-51 °C sıcaklıklarda yüzeye çıkan sıcak akışkan bulunmaktadır (Şekil 3.38).

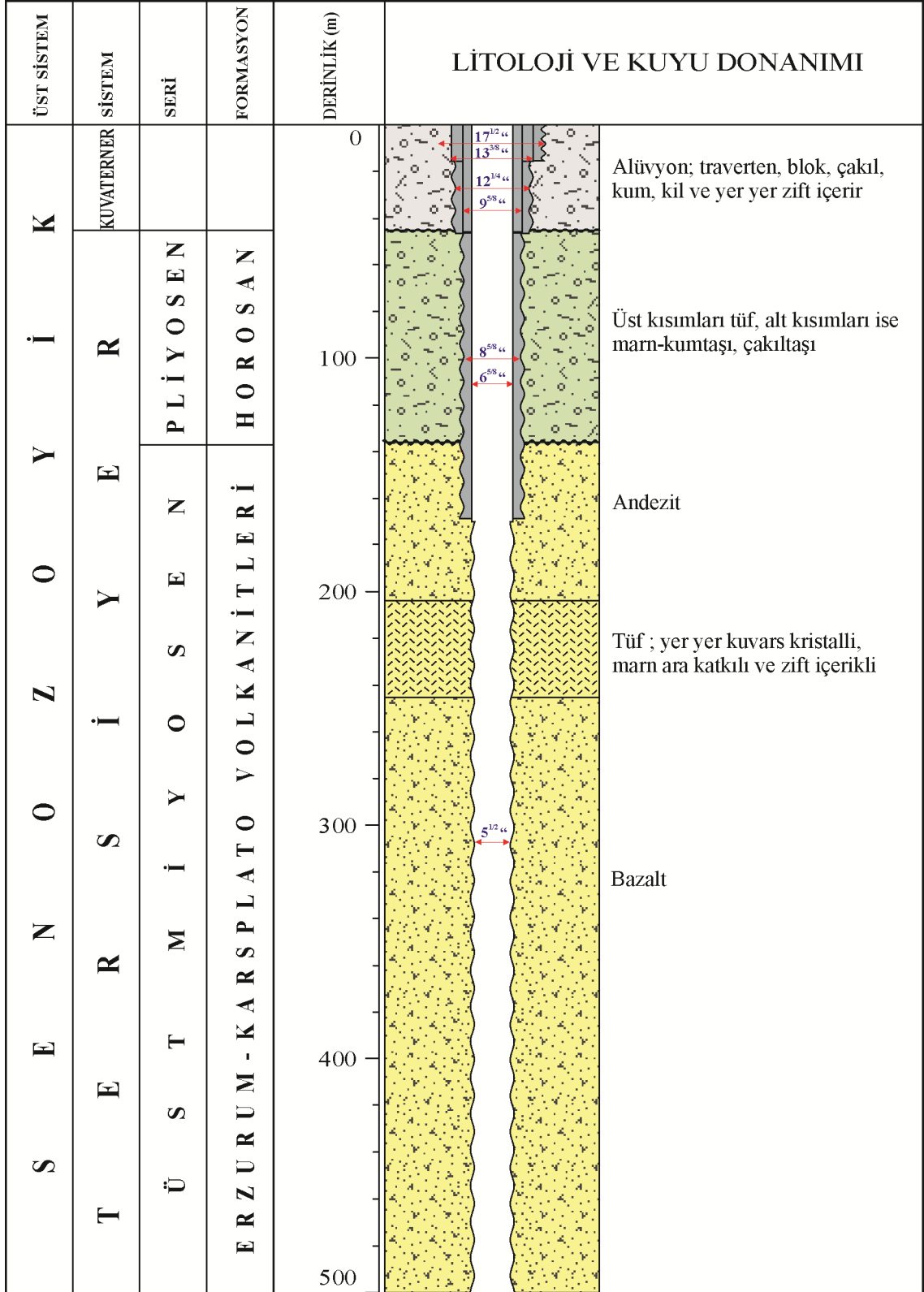
Çalışma alanında daha önce yapılan jeolojik, jeotermal ve jeofizik çalışmalara göre Pasinler jeotermal alanında akışkanın ısınmasını sağlayan kaynağın varlığı için iki türlü yorumlamaya gidilmiştir. Aynalı ve Bulut (2002)'ye göre; Pasinler Havzası K-G yönlü sıkışma ile doğrultu atımlı fayların etkisinde gelişmiştir. Bu sıkışma ve doğrultu atımlı faylar havzanın özellikle kuzey kesiminde volkanik olaylara sebep olmuştur. Havzada volkanik ürünler daha çok trakit ve piroklastiklerdir. Havzanın kuzeyinde sıcak su çıkışlarının yoğun olduğu bölgelerde farklı kayaç türlerine sahip domsal çıkışlar ve fissür tipi volkanizma gelişmiştir. Bu nedenle, Pasinler Havzası'nda sıcak su kaynaklarının yoğun olduğu alanın kuzeyinde yer alan Hasanbaba Domu'nu oluşturan magma ısıtıcı kütle olarak düşünülebilir Pasinler jeotermal alanındaki ısıtıcı kütle için bir diğer görüş ise Pasinler'deki sıcak su kaynaklarının yoğun olduğu alan ve yakınlarında yapılan jeofizik çalışmaların, bir magma kütesinin varlığını gösterebilecek anomaliler ortaya koymasındır. Bu tür sokulumlar da sahadaki ısı kaynağını oluşturabilir.

Yapılan bu çalışmada da Aynalı ve Bulut (2002)'nin yorumu benimsenerek sistemin ısı kaynağı olarak alandaki Üst Miyosen yaşlı genç volkanitler (Erzurum-Kars Plato Volkanitleri) kabul edilmiştir.

Jeotermal sistemde ısıyı taşıyan akışkanın izotop içeriklerine göre meteorik kökenli olduğu anlaşılmaktadır. Yani, yağış suları yerin kırık ve çatlaklarından derinlere süzülerek, ısı anomali alanlarında ısıtılır. Sistemdeki ısı taşınımı ise Darcy yasasına uyan yeraltı suyu dolaşımı ile yoğunluk farkından kaynaklanan akımın karışımı olan konvektif taşınım yoluyla olmaktadır. Gerek hidrokimyasal özellikler gerekse de izotop içerikleri jeotermal rezervuardan faylarla yükselen sıcak suların yüzeye çıkmadan önce, sığ derinliklerde üstte bulunan soğuk su akiferinden gelen yer altı suları ile belirli oranlarda karıştıklarını ortaya koymaktadır (Şekil 3.39).

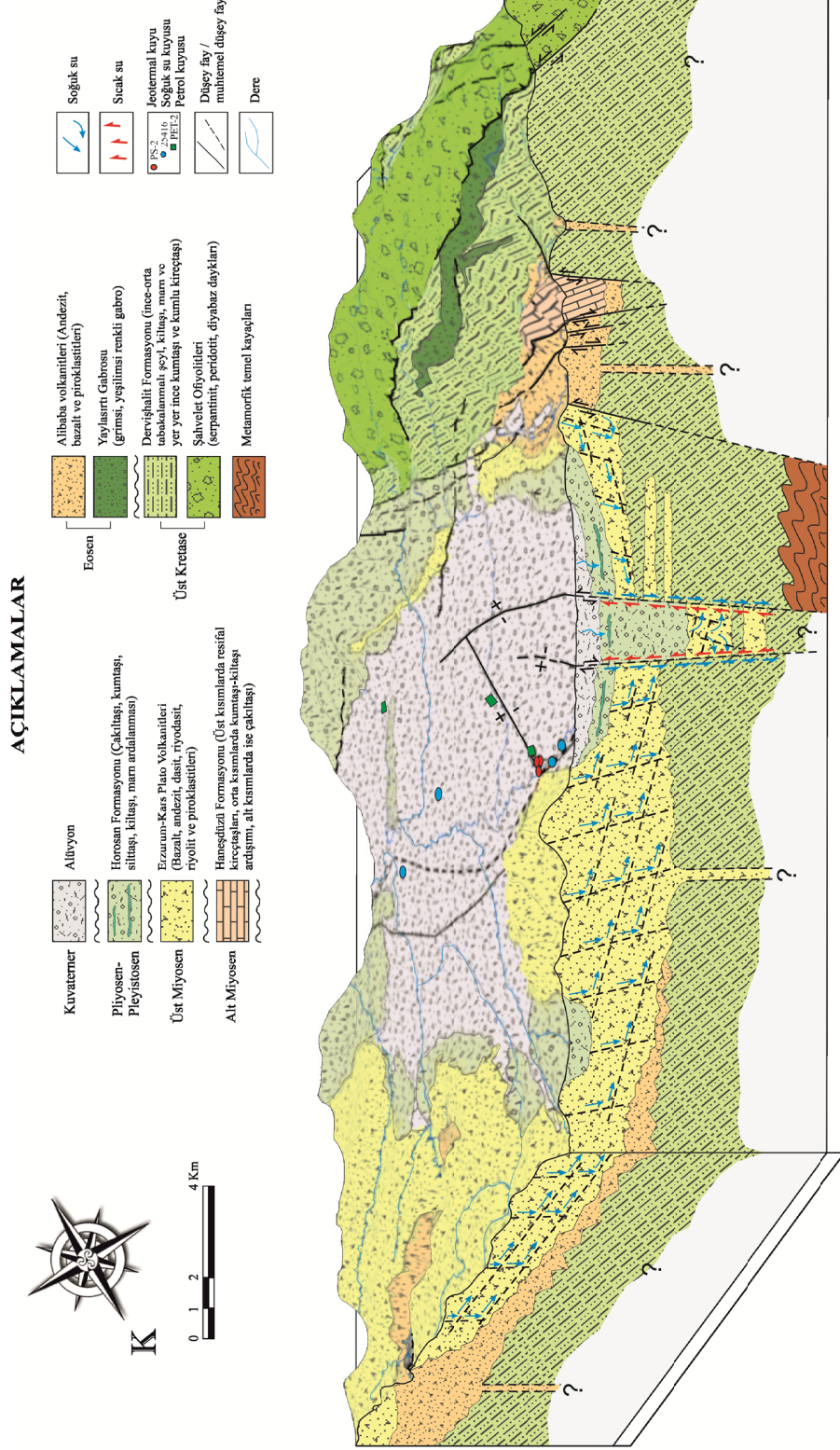
Pasinler Havzası'nda yapılan önceki çalışmalara ve MTA tarafından yapılan sondaj çalışmalarına göre, alanda hazne kayayı Erzurum-Kars Plato Volkanitleri'nin oluşturduğu varsayılmıştır. Yapılan sondajlardan hazne kayanın derinlerde bazalt-bazaltik tuf üst seviyelerde ise riyolit-riyolitik tuf şeklinde olduğu kabul edilmiştir.

Sistemin tamamen geçirimsiz sayılabilecek bir örtü kayası bulunmamaktadır. Bununla birlikte, alüvyon malzemenin altında bulunan çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı, marn aralanmasından oluşan Horasan Formasyonu'nun siltli ve marnlı seviyeleri örtü kaya görevi görmektedir. Ayrıca alüvyonda açılan soğuk su kuyularından değişik kalınlıklarda killi seviyeler de olduğu görülmüştür. Bu seviyelerde örtü kaya özelliği taşımaktadır.



Şekil 3.38. Pasinler PS-4 kuyusu litoloji ve kuyu donanımı (Özmutaf ve Gündüz, 2001)

PASINLER (ERZURUM) HAVZASININ JEOLÖJİK ÜÇ BOYUTLU KAVRAMSAL MODELİ



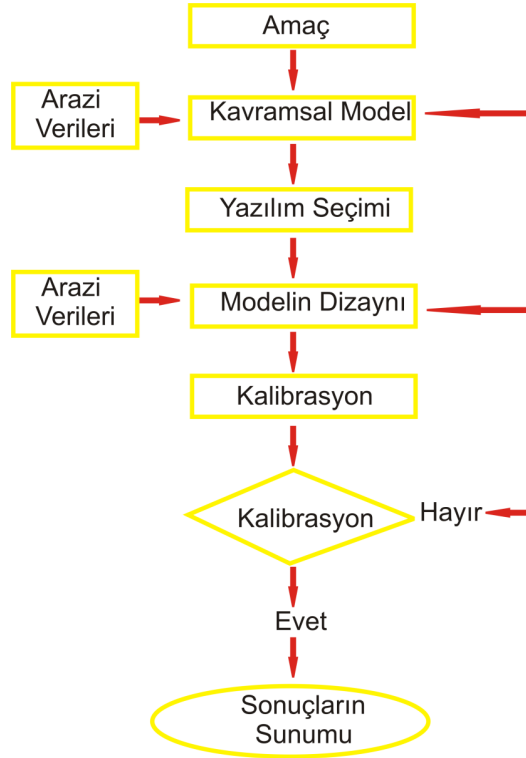
Şekil 3.39. Pasinler jeotermal alanında yer alan sıcak su kaynaklarının oluşum modeli

3.13. Pasinler Jeotermal Alanında Yeraltı Suyu Akımı ve Isı Taşınım Modeli

Son zamanlarda yeraltı suyu akımı ve ısı taşınım modelleri çeşitli hidrojeolojik problemlerin çözümünde önemli bir araç olarak, doğal sistemlerin nasıl davrandığının ve gelecekte nasıl davranacağına anlaşılması amaçlarıyla kullanılmaktadır. Bu tür modeller jeotermal sistemi etkileyen tüm parametreleri, bu parametrelerin sistem üzerinde oluşturduğu tüm etkileri ve sistemin vereceği tepkileri tahmin etmeye yardımcı olmaktadır.

Jeotermal sistemi temsil edebilecek bir yeraltı suyu akım ve ısı taşınım modelinin oluşturulmasında modelde kullanılacak parametrelerin seçimi ve tahmin edilmesi çok önemlidir. Modelde kullanılan veriler ne kadar doğru ve ayrıntılı ise sonuçlar da o kadar gerçekçi olmaktadır. Modelleme çalışmalarında en önemli aşamalar; sistemi temsil eden kavramsal modelin oluşturulması, model sınırlarının ve işleyişinin belirlenmesi, yeraltı suyu akım mekanizmasının ve ortam parametrelerinin tanımlanmasıdır.

Modelleme çalışmaları, genel olarak Şekil 3.40'da gösterilen akış şemasındaki parametreler sırasıyla kontrol edilerek sürdürülür.



Şekil 3.40. Modelleme çalışmalarında izlenen akış şeması

Doğal ortamların geometrisinin ve jeolojik yapının son derece karmaşık olmasından dolayı kavramsal modeller belirli varsayımlara dayanmaktadır. Bu varsayımlar; akiferi oluşturan malzemelerin homojen-heterojen ve izotrop-anizotrop yapı özelliği, tabakaların tanımlanması ve alt ve üst sınırlarının belirlenmesi, başlangıç hidrolik seviyeler ve sınır şartlarının tanımlanması olarak sayılabilir (Soyaslan, 2004).

Jeotermal sistemlerin sürdürülebilir olabilmesi ve potansiyelinin tahmin edilebilmesi için bilgisayar ortamında birçok modelleme programları geliştirilmiştir. Bu programlarla jeolojik ve jeofizik çalışmalardan, kuyu loglarından, jeotermal kuyuların üretim debilerinden, basınç ve sıcaklık testleri gibi parametrelerden faydalanılarak rezervuarda bulunan jeotermal akışkanla ısı akışı gerçeğe uygun bir şekilde modellenenmektedir.

3.13.1. Yeraltı Suyu Akımının Temel Matematiksel Denklemi

Bu bölümde yeraltı suyu akış denklemleri ile ilgili genel bilgiler açıklanırken Freeze ve Cherry (1979)' dan yararlanılmıştır.

Matematiksel modeller, sistem içerisinde meydana gelen fiziksel süreçleri göstermek için tanımlanan eşitliklerden dolayı olarak faydalanıp yeraltı suyu akımını benzeştirirler. Bu modeller analitik ya da nümerik olarak çözülebilir. Analitik çözümler kompleks olmayan hidrojeolojik sistemlerde uygulanmaktadır.

Yeraltı suyu akımının matematiksel denklemlerle tanımlanması yeraltı suyu akımının fiziksel özelliklerini belirlemekle mümkün olmaktadır. İki nokta arasındaki potansiyel fark sonucu ortaya çıkan yeraltı suyu akım miktarını ifade eden ve akışın temel yasası olan Darcy Yasası basit bir matematiksel modeldir. Darcy Yasası'nın denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$q = K * i \quad (7)$$

Bu denklemde;

q: Darcy akımı

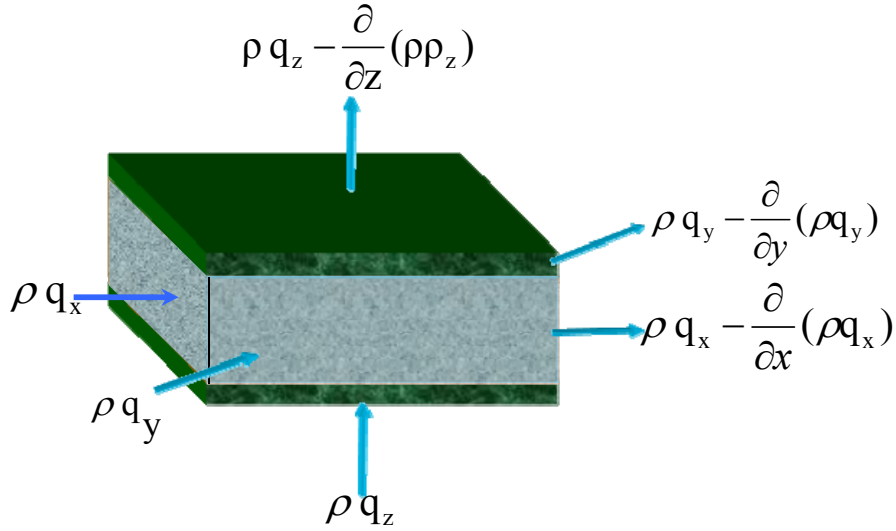
K: hidrolik iletkenlik katsayısı

i: iki nokta arasındaki hidrolik eğimdir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$i = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (8)$$

Akışın kısmi diferansiyel denklemine ulaşmak için Darcy Yasası, gözenekli ortamdaki akış sırasında akışkan kütlelerinin korunumunu tanımlayan süreklilik eşitliği ile beraber kullanılır.

Gözenekli ortamın bir birim hacmi düşünüldüğünde, doymun gözenekli ortamda dengeli akışın kütle korunumu yasasına göre, elementer kontrol hacmi içine giren su kütlesi akış oranı, birim kontrol hacminden çıkan suyun kütlesi akış miktarına eşittir (Şekil 3.41) (Freeze ve Cherry, 1979).



Şekil 3.41. Gözenekli ortamdaki akış için birim kontrol hacmi (Freeze ve Cherry, 1979)

Bu yasayı matematiksel denkleme dönüştüren süreklilik denklemi aşağıdaki gibidir;

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Bu denklemde ρ : özkütle, v_x, v_y ve v_z x, y ve z yönlerindeki darcy akımıdır. ρv , terimleri için bir boyut analizi yapmak gerekirse bunların boyutunun birim kontrol hacimdeki birim kesit alanı boyunca akış kütle oranının boyutu olduğu görülür. Eğer akışkan sıkışmaz kabul edilirse $\rho(x,y,z) = \text{sabit}$ olur ve denklem 9 daki ρ terimleri iptal

edilir. Akışkan sıkışabilir ve $\rho(x,y,z) \neq \text{sabit}$ bile olsa, $\rho \partial v_x / \partial x$ formundaki terimlerin $v_x \partial \rho / \partial x$ formundaki terimlerden çok büyük olduğunu gösterebilir. Bu iki durumda denklem 9 eşitliğinin açılmasında zincir kuralı kullanıldığında ortaya çıkar. Her durumda denklem 9 eşitliği,

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

sade şekline dönüşür. Denklem 10 eşitliğindeki v_x, v_y, v_z yerine Darcy Yasası uygulanırsa, anizotrop ve doymuş gözenekli ortamdaki dengeli rejimin akış denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (11)$$

İzotrop ortamda $K_x = K_y = K_z$ 'dir. Ortam homojen ise $K(x,y,z) = \text{sabit}$ dir. Bu durumda 11 eşitliği homojen, izotrop ortamdaki dengeli rejimin akış denklemi olur:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

12 eşitliği Laplace denklemi olup en temel kısmi diferansiyel denklemdir. Denklemin çözümü üç boyutlu bir akış alanında herhangi bir noktadaki hidrolik yükün değerini tanımlayan $h(x,y,z)$ 'nin bir fonksiyonudur. 12 denkleminin çözümüyle h değerleri bulunur ve bu değerler kullanılarak eşpotansiyel yüzeyleri elde edilir. Bunlara akış çizgileri eklemek suretiyle de akım ağı oluşur (Freeze ve Cherry, 1979).

Doymuş gözenekli ortamda dengesiz rejimdeki akışta kütle korunumu yasasına göre, birim kontrol hacmine giren akışkan kütlesi akışının net miktarı, elemandaki akışkan kütlesi depolamasındaki değişimin zamansal miktarıdır. Süreklilik denklemi Şekil 3.42 baz alınarak;

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} \quad (13)$$

şeklini alır ve eşitliğin sağ tarafı açılacak olursa:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} \quad (14)$$

14. eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim, suyun genleşmesi ile üretilen suyun kütle oranı, ikinci terim gözenekli ortamın sıkışması ile üretilen suyun kütle oranıdır. İlk terim akışkanın sıkışabilirliği, diğer terim de akiferin sıkışabilirliği tarafından kontrol edilir. ρ 'daki değişim ve n 'deki değişimin her ikisi de hidrolik yük h 'daki değişim ile meydana gelmektedir. Yükteki birim azalım için bu iki mekanizma ile üretilen suyun hacminin birim akifer hacmine oranına özgül depolama katsayısı denir ve S_s ile ifade edilir. Buna göre üretilen suyun kütle oranı $\rho S_s \partial h / \partial t$ ' dir ve 14 eşitliği aşağıdaki şekli alır (Freeze ve Cherry, 1979) :

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (15)$$

Sağ taraftaki terimler zincir kuralı ile açılarak ve $\rho \partial v_x / \partial x$ formundaki terimlerinin $v_x \partial \rho / \partial x$ formundaki terimlerden çok büyük olduğu bilindiğinden 15. eşitliğin iki tarafındaki ρ terimleri devre dışı kalır. Darcy yasasını yerine koyarak doymun anizotrop gözenekli ortamdaki dengesiz akış denklemi elde edilir (Freeze ve Cherry, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (16)$$

3.13.2. Isı Taşınım Eşitlikleri

Doymun gözenekli ortamlarda ısı transferi kondüktif, konvektif ve mekanik dispersiyon olmak üzere üç ana mekanizma ile gerçekleşir (De Marsily, 1986).

Kondüktif taşınım, sıcaklık farklarından ya da sıcaklık gradyanından dolayı ortaya çıkan termal enerjinin transferidir. Isı iletimi (λ) yaygın olarak [$W m^{-1}K^{-1}$] birimi ile ifade edilir.

Gözenekli ortamlarda heterojenik akış yollarından dolayı akış hızı mikroskobik ölçekte değişir. Geniş ölçekte heterojenlik ile birlikte permeabilite mekanik dispersiyona

neden olur. Belirli malzemelerin volimetrik ısı kapasiteleri ve termal iletkenlik oranları termal difüzyon olarak adlandırılır [m^2s^{-1}]. Pratikte termal difüzyonun baskın olduğu ısı transferinde mekanik dispersiyon sıklıkla ihmal edilir.

Isı transferinin konduktif ve mekanik dispersiyon mekanizmalarından farklı olarak ısının konveksiyon ile yayılımı madde transferi tarafından meydana gelir ve transfer ortamı kendi kendine hareket eder. Akiferlerde bu maddeler yeraltı suyudur. Bu konvektif taşınım aşamaları bilinen diğer jeolojik konvektif taşınımlardan (manto konveksiyonu) farklıdır. Böylece yeraltı suyu tarafından meydana gelen ısı transferini açıklamak için kullanılan adveksiyon terimi hidrolik gradyandan dolayı daha uygun görülmektedir.

Isı transferi, sıcaklığın yüksek olduğu bölgeden düşük olduğu bölgeye doğru katı ve sıvı fazlarda gerçekleşir (Kangas, 1996).

Karasız yeraltı suyu akış sistemlerinde ısı transferi için kısmi diferansiyel eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir (De Marsily, 1986):

$$\left[\frac{\rho_m C_m}{n \rho_w C_w} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\lambda_m}{n \rho_w C_w} + \alpha v_m \right] \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] - v_a \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{F_0}{n \rho_w C_w} \quad (17)$$

Burada:

T: sıcaklık	[K]
n: toplam porozite	[-]
λ_m : efektif termal iletkenlik	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
$\rho_m C_m$: volümetrik ısı kapasitesi	[J m ⁻³ K ⁻³]
$\rho_w C_w$: suyun volümetrik ısı kapasitesi	[J m ⁻³ K ⁻³]
α : termal dispersivite	[m]
v_m : sızma hızı	[m s ⁻¹]
F_0 : ısı üretim oranı	[W m ⁻³]

Denklem 17'nin 1. tarafı zamansal sıcaklık değişimini sunar ve parantez içerisindeki terimler gecikme faktörüdür. Bu ısı yayılımının su ve katı faz arasındaki ısı değişiminden dolayı yavaşlamasını açıklar. Sağ taraftaki ilk terim ısı iletim/dağılım aşamalarını çözer. Bu terim termal iletimi (λ) ve termal dağılımı (α) hesaplar. İkinci terim ısı adveksiyon yayılımını çözer.

Yüzey ile ısı değişimi eşitlik 17'yi içerir ve Cathomen (2002) tarafından aşağıdaki gibi açıklanır:

$$\left[\frac{\lambda_1}{\rho_m c_m b F + \frac{1}{2}b} \Delta T' \right] \quad (18)$$

Burada

λ_1 : doymamış bölgenin termal iletkenliği	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
b: akiferin kalınlığı	[m]
F: su tablasının derinliği	[m]
$\Delta T'$: T-T _{yüzey}	[K]

Eşitlik 17 ve eşitlik 18 yeniden düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_m}{\rho_m c_m} [+\alpha v_t] \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] - v_t \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\lambda_1}{\rho_m c_m b (F + \frac{1}{2}b)} \Delta T' \quad (19)$$

Burada v_t etkin ısı taşınımı hızını gösterir.

Yeraltı sistemlerindeki akış ve taşınım problemlerini çözmek için birçok matematiksel yöntem vardır (Kolditz, 2002). Bu metodlar analitik ve sayısal çözümler olarak sınıflandırılabilir. Analitik çözümler genellikle lineer ya da yarı lineer denklemleri içine alan problemlerin çözümünde uygulanır. Daha karmaşık problemleri çözmek için kullanılan sayısal modellemelerde ısı transferinin kısmi diferansiyel denkleminin yaklaşık sonuçları elde edilir.

Pasinler (Erzurum) jeotermal sisteminin modellenmesi için Processing SHEMAT adlı sayısal simülasyon programı kullanılmıştır.

SHEMAT (Simulator for **HE**at and **MA**ss **T**ransport), çok çeşitli hidrojeolojik ve termal problemlerin iki ve üç boyutlu çözümü için kullanımı kolay bir reaktif taşınım simülasyon kodudur (Clauser, 2003).

SHEMAT simülasyon programı özellikle aşağıda verilen problemlerin çözümünde kullanılmaktadır:

- 1- Tek bir işlem ile
 - a) Yeraltısuyu akışı

- b) Kondüktiv ısı taşınımı
 - c) Döfifisive madde taşınımı
 - d) Kimyasal reaksiyonlar
- 2- Birleşik iki işlemler ile
- a) Isı taşınımı ile yer altı suyu akışı birlikte
 - b) Yeraltısuyu akışı ile madde taşınımı birlikte;
- 3- Birleşik üç ya da dört işlemler ile
- a) Yer altı suyu akışı ile birlikte kimyasal reaksiyon ve madde taşınımı
 - b) Öngörülen akım, madde ve ısı transferi ile birlikte kimyasal reaksiyon;
 - c) Yer altı suyu akımı, ısı ve madde taşınımı birlikteliği ile kimyasal reaksiyonları

SHEMAT kısmi diferansiyel eşitliklerini çözmek için sonlu farklar metodunu kullanır. Taşınım eşitliklerinin adveksiyon dönemlerinin mekansal ayrımlaşması için üç tasarı mevcuttur:

- a) A pure upwind tasarısı;
- b) The II'in flux blending tasarısı;
- c) The Smolarkiewicz diffusion corrected upwind tasarısı.

Sonuçta elde edilen denklemler sistemi açık, dolaylı ve yarı örtük olarak çözülebilir. Dolaylı ve yarı örtük zaman ağırlıklı lineer denklem setleri kesin örtük işlemler (strongly implicit procedure, SIP) tarafından tekrarlanmalı olarak çözümlür (Weinstein vd., 1969).

3.13.3. SHEMAT Modelinde Kullanılan Eşitlikler

SHEMAT programı; akış ve taşınım eşitliklerini x, y, z koordinatları ile iki ve üç boyutlu grid kartezyenleri üzerinde ve alternatif olarak da iki boyutlu dikey simetrik silindirik gridleri yarıçap ve derinlik ile birlikte çözer. SHEMAT, düğüm noktaları grid hücrelerinin merkezinde yer alan blok merkezli gridleri kullanır (Clauser, 2003).

3.13.3.1. Basınçlı ve Serbest Akiferlerde Yeraltısuyu Akımı

Kesitte birim alan başına düşen özgül debi ya da Darcy hızı (v) Darcy eşitliği tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$v = -\frac{k}{\mu} [\nabla P + \rho_f g \nabla z] \quad (20)$$

Kütle korunumu ise:

$$\frac{\partial(\Phi \rho_f)}{\partial t} + \nabla(\rho_f v) = 0 \quad (21)$$

şeklindedir. 20 ve 21 denklemleri birleştirilip çözümlerse:

$$\rho_f (\alpha + \Phi \beta) \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \left[\frac{\rho_f k}{\mu} (\nabla P + \rho_f g \nabla z) \right] + W_s \rho^* \quad (22)$$

elde edilir ve denklemden $W_s = W/dV$ belli bir kaynak gücüdür ve akışkan yoğunluğu aşağıdaki gibi yazılır:

$$\rho_f = \rho_0 \left(1 + \frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_0} \right) = \rho_0 (1 + \rho_r) \quad (23)$$

Yukarıdaki eşitlikte ρ_0 referans durumlarda (sıcaklık ve tuzluluk gibi) yoğunluktur ve bağıl yoğunluk ρ_r aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\rho_r = \left(\frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (24)$$

Sabit hidrolik yük denklemi ise:

$$h_0 = z + P/(\rho_0 g) \text{ dir} \quad (25)$$

ve böylece ∇P 'yi elde etmek için:

$$\nabla P = \rho_0 g (\nabla h_0 - \nabla z) \quad (26)$$

ve;

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho_0 g \frac{\partial h_0}{\partial t} \quad (27)$$

eşitlik 22, 23, 25 ve 27 birleştirildiğinde, sonuç olarak SHEMAT'ta kullanılan (x,y,z) koordinatlarının kartezyen denklemini verir:

$$\rho_f g (\alpha + \Phi \beta) \frac{\partial h_0}{\partial t} = \nabla \left[\frac{\rho_f g k}{\mu} (\nabla h_0 + \rho_r \nabla z) \right] + W_s \frac{\rho^*}{\rho_0} \quad (28)$$

Denklem 28'de $\rho_f g (\alpha + \Phi \beta) = S_s$, $\frac{\rho_f g k}{\mu} = K$ ve $W_s \frac{\rho^*}{\rho_0} = W$ dir. S_s ; özgül depolama katsayısı, K ise hidrolik iletkenlik tensörüdür. Denlem 28'deki ıraksak ifade bileşenleri K için oluşturulursa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$S_s \frac{\partial h_0}{\partial t} - W = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h_0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h_0}{\partial z} + \rho_r \right) \quad (29)$$

SHEMAT, silindirik simetrik problemlerin çözümü için akış denklemlerini düşey silindirik koordinatlarda (r,z) çözer. Silindirik koordinat (r,z) akış denklemi aşağıdaki gibidir:

$$S_s \frac{\partial h_0}{\partial t} - W' = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(K_r \frac{\partial h_0}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h_0}{\partial z} + \rho_r \right) \quad (30)$$

Burada K hidrolik iletkenlik elementi düşey silindirik koordinat eksenlerinde tanımlanmıştır.

Serbest akiferlerde yeraltı suyu akımı, Processing SHEMAT'ta oluşturulan serbest tabakalarda iki ve üç boyutlu problemlere uygulanabilir. Eğer serbest akiferde bir ya da birden fazla tabaka oluşmuşsa denklem 28, 29 ve 30'da hidrolik iletkenlik yerine transmisibilite kullanılır (Clauser, 2003).

3.13.3.2. Isı Transferi

Isı taşınım eşitliklerini türetmek için yüzey alanı ile birlikte bir kontrol hacim (dV)'deki, ısı miktarının değişimi bir zaman aralığı (dt) süresince düşünülmelidir (Clauser, 2003). Enerjinin korunum yasasına göre:

$$\oint_V \frac{\partial Q}{\partial t} dV = \oint_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) dV = \oint_F (\lambda \nabla T - \rho_f c_f T v) n dF + \oint_V H dV \quad (31)$$

Denklem 31'e Gauss teoremi uygulanırsa ürün olarak aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\oint_F (\lambda \nabla T - \rho_f c_f T v) n dF = \oint_V \nabla (\lambda \nabla T - \rho_f c_f T v) dV \quad (32)$$

n: yüzeydeki F ile ilişkili birim vektördür. Ve böylece tek bir kontrol hacim (dV) elde edilir:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) = \nabla (\lambda \nabla T - \rho_f c_f T v) + H \quad (33)$$

Porozite (Φ) ile doğrusal olarak hacimsel termal kapasite için kayaç ve sıvı katkısı ağırlıklandırıldığında, 33. eşitliğin sol tarafı aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) &= \frac{\partial}{\partial t} ([\rho_f c_f \Phi + \rho_m c_m (1 - \Phi)] T) \\ &= T \frac{\partial}{\partial t} [\rho_f c_f \Phi + \rho_m c_m (1 - \Phi)] + [\rho_f c_f \Phi + \rho_m c_m (1 - \Phi)] \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (34)$$

dt zaman aralığı süresince diğer madde özelliklerinin yanı sıra, porozite sabit olarak kabul edilir. Böylelikle eşitlik 34'ün sağ tarafındaki ilk terim kaybolur. Sonuçta aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) = \frac{\partial T}{\partial t} (\Phi \rho_f c_f + (1 - \Phi) \rho_m c_m) \quad (35)$$

Denklem 33'deki bu sadeleştirmeler ile SHEMAT'ta uygulanan (x,y,z) kartezyen koordinatlarındaki ısı transfer eşitliği aşağıdaki gibi olur:

$$\nabla(\lambda \nabla T - \rho_f c_f T v) = \frac{\partial T}{\partial t} (\Phi \rho_f c_f + (1 - \Phi) \rho_m c_m) - H \quad (36)$$

Silindirik koordinatlarda (r,z) SHEMAT'ta uygulanan eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(r (\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} - \rho_f c_f T v_r) \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial r} - \rho_f c_f T v_z) \\ = \frac{\partial T}{\partial t} (\Phi \rho_f c_f + (1 - \Phi) \rho_m c_m) - H \end{aligned} \quad (37)$$

Yukarıdaki formüllerde geçen terimlerin açıklamaları aşağıdaki gibidir:

c: Konsantrasyon; özgül ısı kapasitesi (mmolL^{-1} ; $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

c_f : akışkan özgül ısı kapasitesi ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

c_r : kayaç özgül ısı kapasitesi ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

ρc : hacimsel ısı kapasitesi ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)

g: yerçekimi ivmesi (m s^{-2})

H: ısı üretim oranı (W m^{-3})

h: hidrolik potansiyel, yük (m)

h_0 : referans hidrolik yük (m)

k: permeabilite (m^2)

K: hidrolik iletkenlik (m s^{-1})

P: basınç (MPa)

q: ısı akısı (W m^2)

Q: çözünmüş madde kaynağı ($\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$)

S_s : özgül depolama katsayısı (m^{-1})

t: zaman (s)

T: sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

v: Darcy hızı (m s^{-1})

W: sıvı kaynağı ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

x,y,z: koordinatlar (m)

α : kayaç basıncı (Pa^{-1})

β : sıvı basıncı (Pa^{-1})

Φ : porozite

μ : dinamik viskozite (Pa s)

ρ : yoğunluk (kg m^{-3})

ρ_0 : referans koşullarında yoğunluk (kg m^{-3})

ρ^* : kaynak sıvı yoğunluğu (kg m^{-3})

ρ_f : sıvı yoğunluğu (kg m^{-3})

ρ_r : kayaç yoğunluğu (kg m^{-3})

3.13.4. Sayısal Çözüm Teknikleri

Matematiksel modeller; yeraltı suyu akışı, ısı akışı ve kütle taşınımına ilişkin temel eşitliklerin çözümüne dayanmaktadır. Bu çözüm teknikleri analitik ve sayısal çözüm teknikleri olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Darcy Yasası yeraltı suyu akışının en basit matematiksel modelidir ve analitik modellere örnek olarak gösterilebilir. Bir analitik modeli çözmek için, akış probleminin başlangıç ve sınır şartlarının bilinmesi gerekir. Analitik modeller programlanabilir hesap makinesi veya bir bilgisayar ortamında hesap tablosu ile hızlı doğru ve güvenilir bir şekilde çözülebilir (Fetter, 2001).

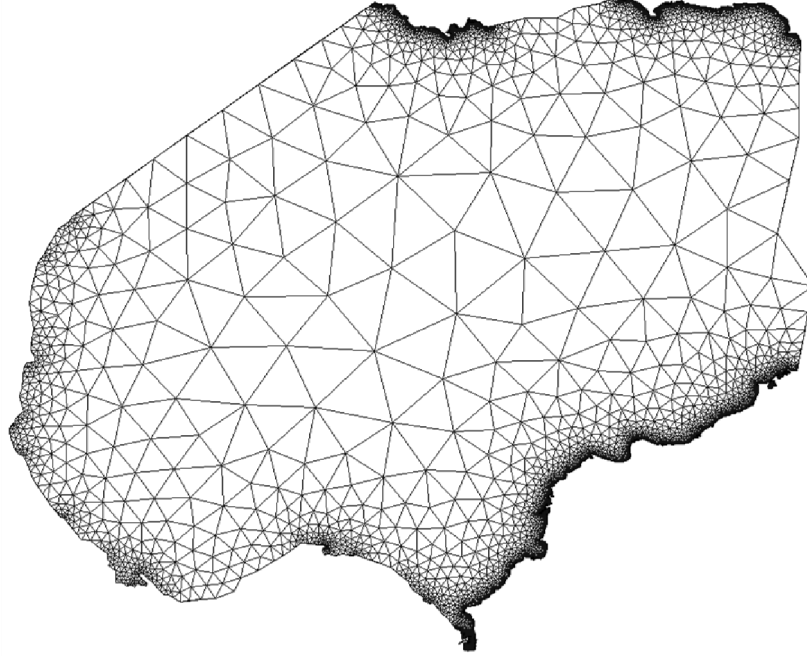
Sayısal modeller ise karışık sınır şartları olduğunda veya model alanında parametrelerin değerinin değiştiği yerde kullanılmalıdır (Zheng ve Bennett, 1995).

Analitik çözüm tekniklerinde, zorunlu bir şekilde kullanılan, akım ortamının homojen ve izotrop olduğu varsayımı, analitik modellerin kullanım alanını sınırlamaktadır. Bu nedenle sorunlara daha gerçekçi bir yaklaşım için sayısal çözüm tekniklerinin kullanımı kaçınılmazdır (Wang ve Anderson, 1982). Çözüm yöntemlerine göre sayısal çözüm tekniklerinde sonlu elemanlar ve sonlu farklar olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

3.13.4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminde akifer hesaplanacak değer noktalarını temsil eden düğümlerde kesişen üçgenlerle poligon hücelerine bölünür (Şekil 3.42). İçteki her hücrenin yük değeri, düğümlü noktaları arasında interpolasyon yapılarak belirlenir. Sonlu eleman

yönteminin matematiksel temeli, sonlu farklar yöntemindekinden çok daha karışıktır (Fetter, 2001).



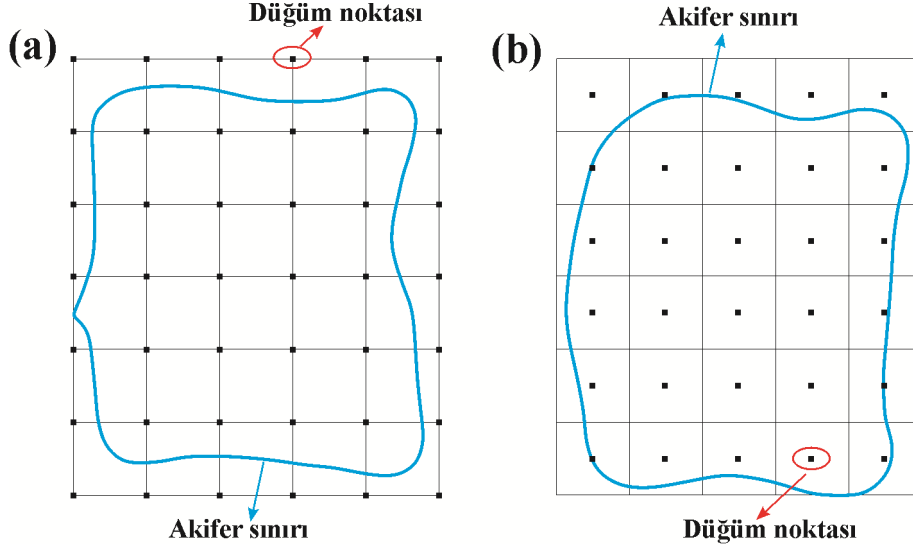
Şekil 3.42. Bir akiferin sonlu elemanlar nokta ağı

3.13.4.2. Sonlu Farklar Yöntemi

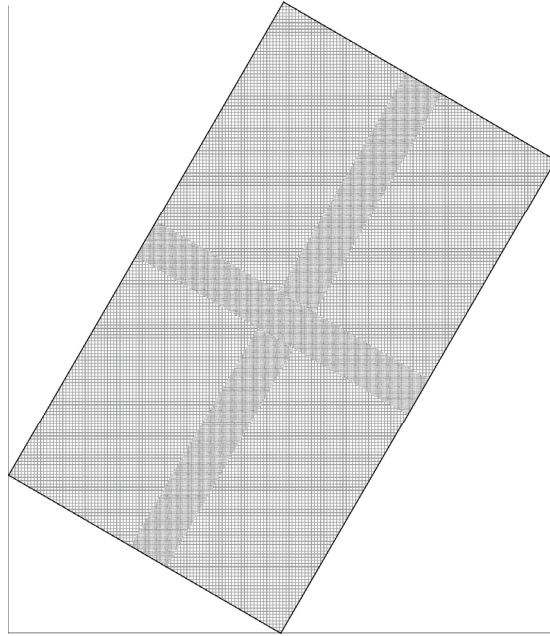
Sonlu farklar yöntemi, düzenli ve düzensiz yeraltı suyu akış problemlerinin çözümünde uygulanması ve anlaşılması en kolay çözüm yöntemidir. Sonlu farklara dayalı sayısal model teknikleri uzaydaki farklı noktalarda miktarları önceden tahmin etmek için değerleri hesaplar (Clauser, 2003). Sonlu farklar nokta ağı blok merkezli nokta ağı ve köşe merkezli nokta ağı olmak üzere iki farklı değişkenle ifade edilir (Şekil 3.43 a ve b). Blok merkezli nokta ağı, nokta ağının ortasına düşen düğüm noktalarının bulunduğu yerlerdir; köşe merkezli nokta ağı nokta ağlarının kesişimindeki düğüm noktalarıdır (Fetter, 2001).

Temel nokta ağı, eni Δx boyu Δy olan birbirine dik satır ve sütunlardan oluşmuş düzgün bir ağıdır. Akiferin belirli bölümlerinde, örneğin daha büyük yük değişiminin beklendiği bir kuyu sahasının çevresinde diğer bölümlerinden daha çok sayıda düğüm noktası olacak şekilde çoğu zaman satır ve sütunların değiştirilmesi gerekebilir (Şekil 3.44). Sonlu fark nokta ağlarındaki düğümlerin konumlarını tanımlamada özel notasyon kullanılmaktadır. Şekil 3.45 a' da merkezi (x,y) olan sonlu fark nokta ağı görülmektedir.

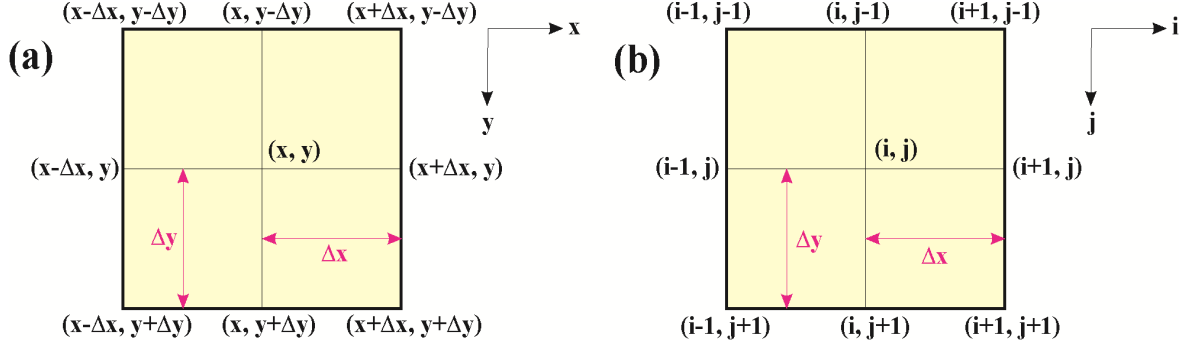
Bilgisayar programlarında Şekil 3.45 b’de görüldüğü gibi düğümlerin yerleri i ’nin sütunu ve j ’nin satırı temsil ettiği i,j düğümü ile ilgili olarak düzenlenmiştir (Fetter, 2001).



Şekil 3.43 Köşe merkezli sonlu farklar (a) noktalar ağı, blok merkezli sonlu farklar (b) noktalar ağı



Şekil 3.44. Değişen aralıklı sonlu farklar noktalar ağı



Şekil 3.45. Sonlu farklar noktalar ağı (a), sonlu farklar noktalar ağı için bilgisayar notasyonu (b)

Sonlu farklar yöntemi hem akış için hem de taşınım hesaplamaları için uygun bir yöntemdir. SHEMAT, kare bir alanın her bir düğüm noktasını kuşatan kare bloklara bölüldüğü, blok merkezli sonlu farklar ağı yöntemini kullanır. Düğüm noktaları i, j, k grid indisleri ile tanımlanır ve grid çizgileri ile ayrılır (Zheng ve Bennett, 2002). Her bir blok için sabit materyal özellikleri belirlenir. Her çeşit akış (sıvı, ısı, kütle) blokları ayıran arayüzlerle hesaplanır (aşamalı grid yaklaşımı).

Bu temel denklemler, sonlu farklar yöntemi ile gridin ayrık düğüm noktalarında belirli kısmi diferansiyel denklemlerdeki diferansiyel yaklaşımlarla çözülür. Bu ayrıklaştırmanın sonucu sayısal olarak çözümlenen sonlu farklı denklem ve doğrusal bir sistemdir.

SHEMAT'da iki farklı benzeştirme türü kullanılır. Bunlardan biri iki boyutlu (2-D) yatay ve dikey enine kesitlerdir. Diğeri ise yatay tabakalardan veya dikey enine kesitlerden oluşturulmuş üç boyutlu (3-D) hacimsel bloklardır.

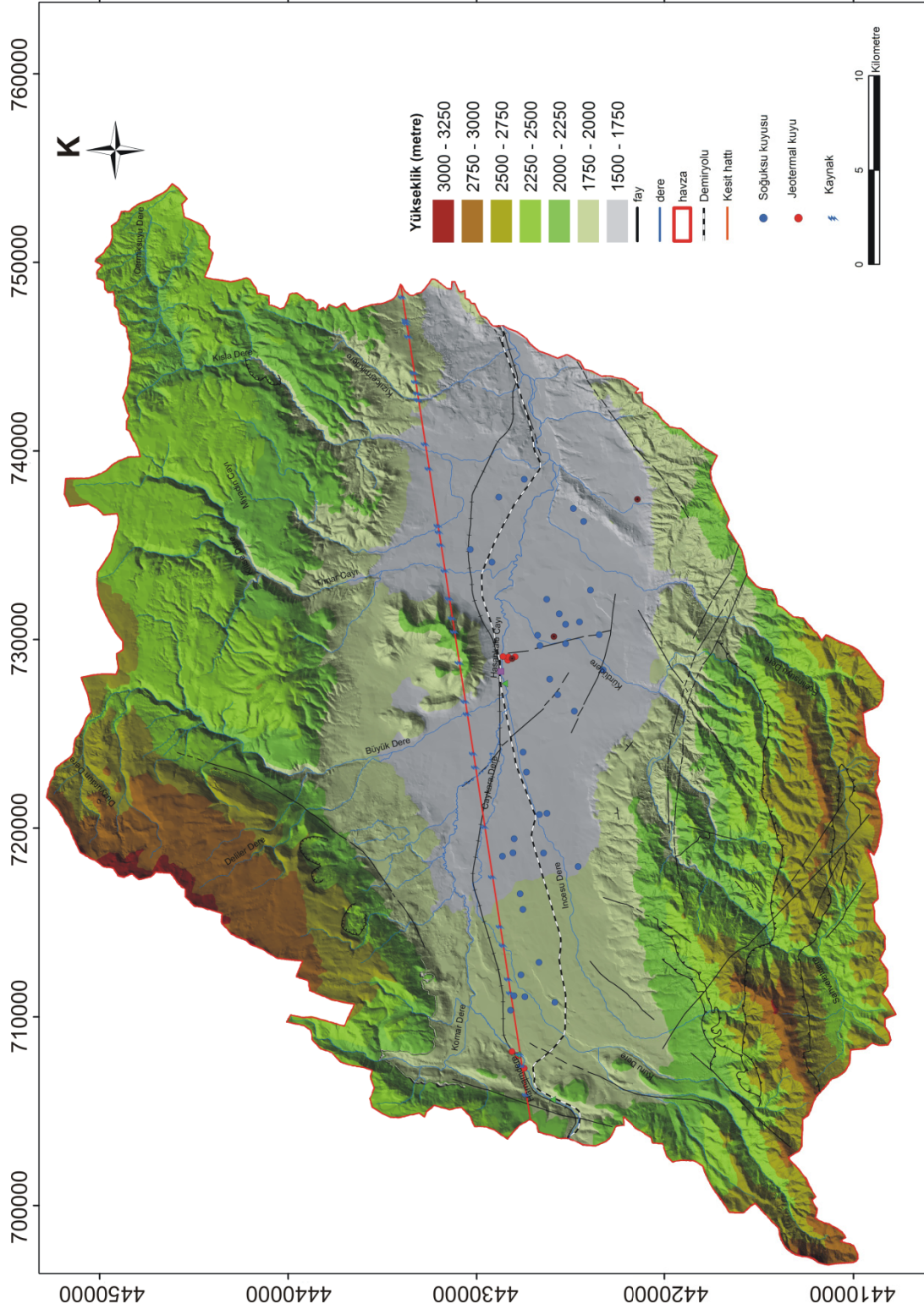
3.13.5. Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sahasının Processing SHEMAT ile Modellenmesi

Erzurum (Pasinler) jeotermal sahası, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan düşük entalpili ve önemli jeotermal sahalardan biridir. Bölgede daha önce MTA ve özel şahıslar tarafından açılmış jeotermal kuyuların yanı sıra kendiliğinden yüzeye ulaşmış birçok jeotermal kaynak bulunmasına rağmen jeotermal sulardan sadece balneolojik olarak yararlanılmaktadır. Jeotermal sistemin rezervuar sıcaklık dağılımı, yeraltı suyu akımı gibi mevcut durumunun belirlenmesi ve sistemi etkileyen tüm parametreleri, bu parametrelerin

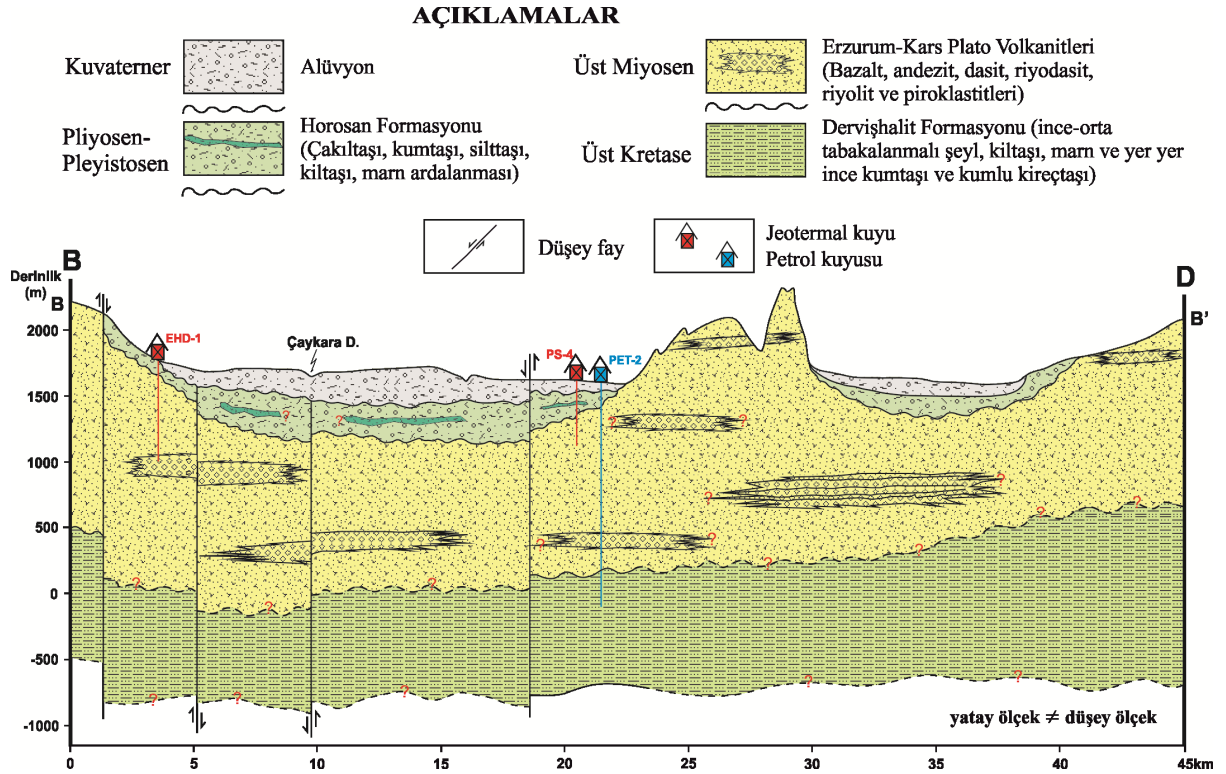
sistem üzerinde oluşturduğu tüm etkileri ve sistemin vereceği tepkileri belirlemek amacıyla Pasinler jeotermal alanı SHEMAT programı ile modellenmiştir.

Modelleme işleminde kullanılmak üzere alana ait kavramsal model, jeotermal akifere ait hidrolik ve termal parametreler belirlenmiştir. Hazırlanan kavramsal modele göre temel kayayı Üst Kretase yaşlı kumtaşı, kıltaşı, silttaşı ve şeyl ardalanmasından oluşan Derviş Halit Formasyonu oluşturur. Hazne kayanın yapılan sondajlardan altta bazalt-andezit şeklinde, üste ise çoğunlukla tüfler daha az miktarda da riyolitlerden oluştuğu belirlenmiştir. Örtü kayayı ise çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı ve marnlardan oluşan Horosan Formasyonu oluşturmaktadır.

Daha önce oluşturulan genel jeoloji haritası kullanılarak jeotermal sistemi temsil edecek şekilde yaklaşık D-B doğrultusunda bir kesit hattı belirlenmiş (Şekil 3.46) ve iki boyutlu kesit bir model hazırlanmıştır (Şekil 3.47).



Şekil 3.46. Model çalışması için seçilmiş kesit hattı



Şekil 3.47. SEMAT'ta kullanılan enine kesit

Kesit hattı seçilirken, hidrolojik havza sınırları ve fay sistemleri dikkate alınmış, sıcak ve soğuk su kaynakları, mevcut jeotermal ve soğuksu kuyularını içermesine özen gösterilmiştir. Kesit hattının derinliği ve yeraltı litolojisi belirlenirken bölgede daha önce MTA tarafından açılmış PS-3 (200 m), PS-4 (500 m) ve EHD-1 (700 m)'lik jeotermal kuyulardan ve Pasinler-1 (1280 m), Pasinler-2 (2100 m) ve Pasinler-3 (3400 m) adlı petrol kuyularından yararlanılmıştır.

Jeotermal sisteme ait hidrolik ve termal parametrelerin bir kısmı önceki çalışmalardan yararlanılarak hesaplanmış bir kısmı ise literatürden alınmıştır (Tablo 3.22).

Model oluşturulurken aşağıdaki koşullardan uygun olanlar seçilmiştir:

Akım verisi;

- Akım başlangıç koşulları
Başlangıç hidrolik yük, referans yoğunluk
- Akım sınır koşulları
1. Tip geçirimsiz sınır koşulu (NFLO), 2. Tip değişken sınır koşulu ve (FLO), 3. Tip sabit sınır koşulu (HEAD)
- Akım bileşenleri

Porozite, permeabilite, anizotropi faktörü, yoğunluk oranı

Isı taşınım verisi;

- Isı taşınım başlangıç koşulları

Sıcaklık ve referans sıcaklık

- Isı taşınım sınır koşulları

1.Tip yalıtımlı sınır koşulu (NFLO), 2.Tip değişken ısı akışı sınır koşulu (WSD),

3.Tip sabit sıcaklık sınır koşulu (TEMP)

- Isı taşınım bileşenleri

Porozite, ısı iletkenliği, ısı kapasitesi, ısı üretim oranı.

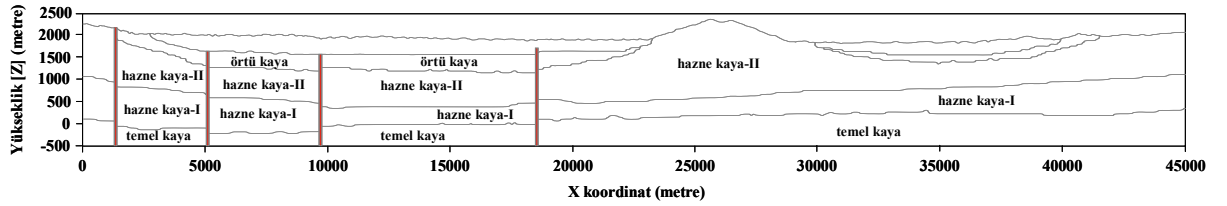
Tablo 3.22. Sayısal modelde kullanılan hidrolik ve termal parametreler

		Litoloji	Permeabilite (m/sn)	Porozite	Isı iletkenliği ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Isı kapasitesi ($\mu J/m^3K$)	Isı üretim oranı (μWm^{-3})
Alüvyon		Çakıl	1.15E-5 1.78E-5 arasında 10*	0.25-0.50 2*	2.44±0.8 3*	2.30 7*	1.30 9*
		Kum		0.20-0.35 2*			
		Kil		0.33-0.60 2*			
		Silt		0.35-0.50 2*			
Horosan Formasyonu	Örtü Kaya	Çakıltaşı	2.5E-6 10*		2.4±0.8 5*		
		Kumtaşı		0.05-0.35 1*	3.7± 1.2 6*	2.05 7*	0.84 8*
		Silttaşı			2.7 6*	2.44 7*	1.8 8*
		Marn			2.1±0.7 5*	2.58 7*	
Erzurum-Kars Plato Volkanitleri	Hazne Kaya	Tüf	$10^{-7}-10^{-5}$ 1*	0.15-0.40 1*	1.7 3*	3.0 7*	1.75 9*
		Bazalt	$10^{-13}-10^{-5}$ 1*	0-0.10 1*	1.7 3*	2.58 7*	1.1 9*
		Andezit			1.35-4.86 4*	2.17 7*	1.13 8*
		Riyolit			1.58-4.33 4*		2.6 9*
Derviş Halit Formasyonu	Temel Kaya	Şeyl	$10^{-13}-10^{-9}$ 1*	0-0.10 1*	1.5±0.5 5*	2.16 7*	1.8 8*
		Kiltaşı			2.7±0.9 5*		1.8 8*
		Marn			2.1±0.7 5*	2.58 7*	
		Kumtaşı	$10^{-10}-10^{-5}$ 1*	0.05-0.35 1*	2.8 5*	2.05 7*	0.84 8*
		Kireçtaşı	$10^{-7}-10^{-6}$ 1*	0.01-0.25 1*	2.9±0.9 5*	2.43 7*	0.62 8*

1* Freeze ve Cherry (1979), Back vd. (1988); 2* Davis (1969); 3* Raznjevic (1976); 4*Clark (1966), Nathenson vd. (1982); 5* Majorowicz ve Jessop (1981); 6* Reiter ve Jessop (1985); 7* Waples ve Waples, J. (2004); 8* Cermak ve Ryback (1982); 9* bu çalışmada hesaplanan değerler; 10* Dilek (1973).

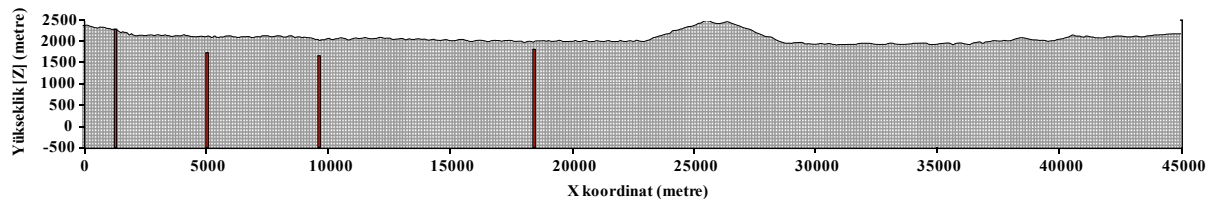
3.13.5.1. Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sahasının Akım Modeli

Pasinler (Erzurum) jeotermal sahasının sayısal akım modeli yaklaşık doğu-batı yönlü kararlı akım koşullarında iki boyutlu kesit bir model olarak hazırlanmıştır (Şekil 3.48). Kesit hattının yüzeyden itibaren derinliği 2.7 km, uzunluğu 45 km olarak seçilmiştir. Kesit hattı boyunca jeotermal alanının elemanları olan temel kaya, hazne kaya, örtü kaya ve fay hatları belirlenmiştir (Şekil 3.48).



Şekil 3.48. Seçilen kesit hattı boyunca Pasinler jeotermal alanının elemanları

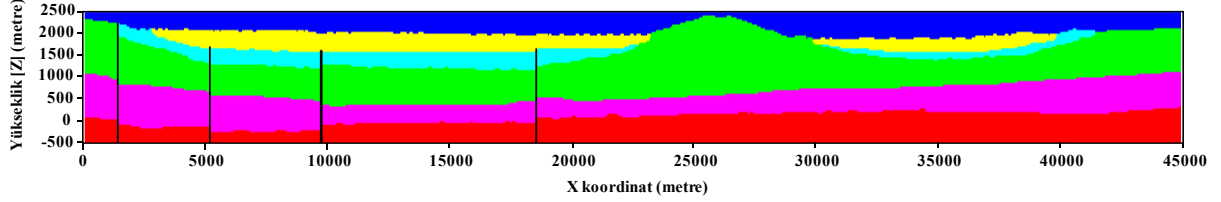
Model alanının ölçüleri sonlu farklar yöntemine göre 700 x 2250 olmak üzere toplamda 303750 düğüm noktasından (hücreden) oluşmaktadır. Hücrelerin boyutları tüm modelleme alanında jeolojik ve hidrojeolojik parametrelerin dar alanda değişim gösterdiği kabul edilerek 400 (20x20) m² olarak ayarlanmıştır. SHEMAT'ın kullandığı kare bloklu, blok merkezli sonlu farklar ağı Şekil 3.49'da görülmektedir.



Şekil 3.49. Modelleme çalışmalarında kullanılan sonlu farklar ağı

SHEMAT, yeraltı suyu sistemlerini iki ve üç boyutta zonlar şeklinde modellemektedir. Bu yüzden modelleme alanı jeolojik birimler, jeotermal sistemin elemanları faylar ve hava da dikkate alınarak toplam yedi zona ayrılmıştır (Şekil 3.50).

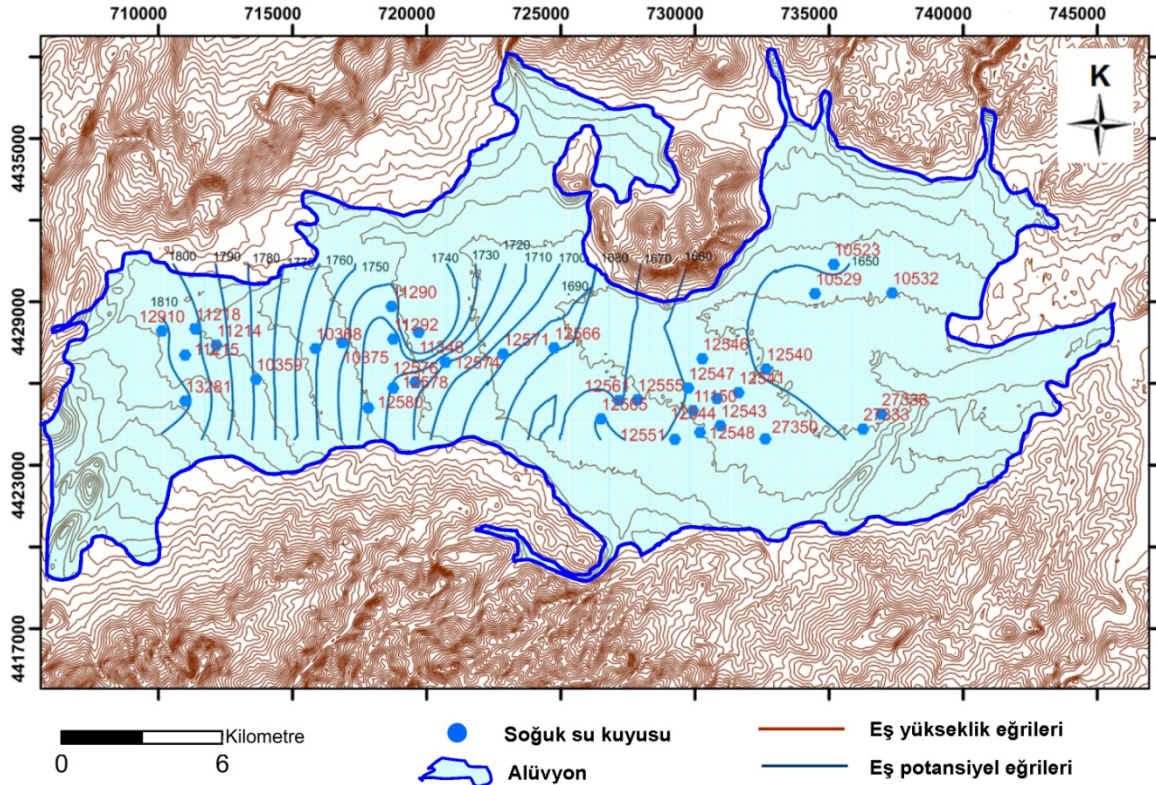
Tüm stratigrafik birimler kendi içlerinde hidrolik iletkenlik, porozite, ısı iletkenliği, ısı kapasitesi ve ısı üretim oranı gibi fiziksel özelliklerinden dolayı homojen olarak düşünülmüş ve fay zonları izotrop olarak atanmıştır.



Şekil 3.50. Kesit hattı boyunca SHEMAT programı ile oluşturulan zonlar

3.13.5.2. Akım Sınır Koşullarının Oluşturulması

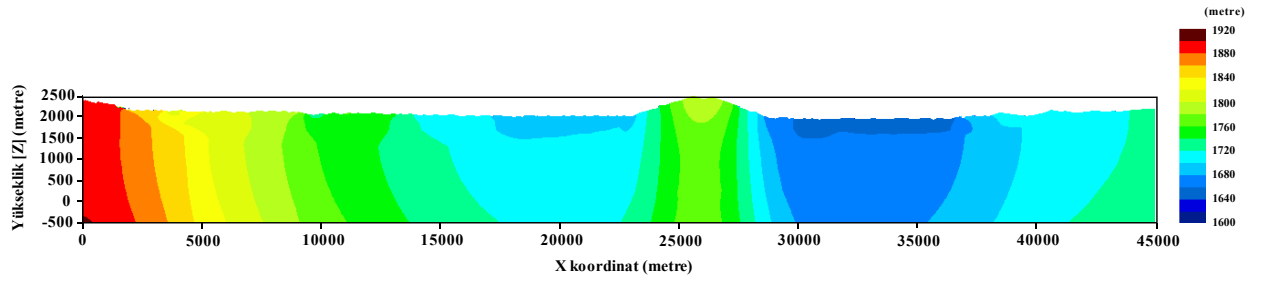
SHEMAT programında, her bir hücrenin sabit yük, aktif veya aktif olmayan hücre olduğunu belirten kodların içinde bulunduğu bir matris vardır. Tüm hücreler başlangıçta 1 değerine sahiptir ve bu değer hücrelerin aktif olmadığını gösterir. Sınır şartları tanımlanırken geçirimsiz sınırların hücrelerine 1, sabit sınırların hücrelerine -1 değerleri atanmıştır. Pasinler jeotermal alanının yanal sınırları 1. tip sınır geçirimsiz sınır koşulu olarak kabul edilmiştir. Kesit modelin yüzey kısmında hidrolik yükler 3. tip sabit sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Modelleme alanındaki hidrolik yükler belirlenirken model kesit hattı boyunca derelerden, kaynaklardan ve alüvyon akiferde açılmış olan kuyularda ölçülen su seviyelerinden yararlanılmıştır. Şekil 3.51’de Pasinler jeotermal alanına ait yer altı su tablası görülmektedir.



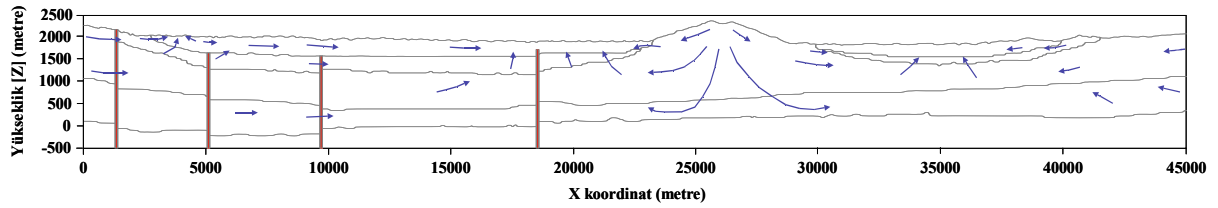
Şekil 3.51. Pasinler ovasına ait yeraltı su tablası haritası

3.13.5.3. Akım Parametrelerinin Belirlenmesi ve Akım Modelinin Değerlendirilmesi

Model alanın akım parametreleri belirlenirken DSİ 8. Bölge Müdürlüğü ve Dilek (1973) tarafından Pasinler Ovası'nda yapılmış hidrojeolojik çalışmalardan yararlanılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 3.22'de verilmiştir. Hidrolik iletkenlik değerleri rezervuar için 1×10^{-6} m/s, örtü kaya için 2.5×10^{-6} m/s, temel kaya için 1×10^{-8} m/s ve fay zonları ve alüvyon için 1.4×10^{-5} m/s olarak programa girilmiştir. Fay zonlarında, volkanik kayalarda ve temel kayada anizotropi oranı 1.0 olarak alınmıştır. Güncel çökellerden oluşan alüvyonlarda ve tabakalı tortul kayalardan oluşan örtü kayada anizotropi oranı 0.1 olarak alınmıştır. Yatay yöndeki iletkenliğin daha büyük olduğu kabul edilmiştir. Hidrolik koşulları denetlemek amacıyla ısı taşınımından yoksun çalıştırılan model sonucu Şekil 3.52'de görülmektedir. Şekil 3.53'de ise kararlı akım koşullarında oluşturulmuş olan akım doğrultuları görülmektedir.



Şekil 3.52. Model alanında hesaplanan hidrolik yük dağılımı



Şekil 3.53. Akım modeli sonucunda meydana gelen akım doğrultuları

Model alanında yeraltı suyu akımının havza sınırlarından topografik eğime benzer şekilde merkeze doğru olduğu, havza tabanında ise akımın yeryüzüne doğru olduğu görülmektedir. Havza ortasında topografik yükseltinin altında kesitin doğu ve batı tarafına olmak üzere su bölümü gerçekleşmiştir. Hazne kayanın üst kısımlarında akım yatay iken alt kısımlarında kısmen örtü kayaya doğru yönelmektedir. Riyolit-riyolitik tuf gibi gözenekli ve geçirimli olan hazne kayadaki düşey fayların yeraltı suyu akımı üzerinde bir etkisi olmamıştır. Bu sonuç modele girilen hazne kaya ve fay zonlarına ait porozite ve hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

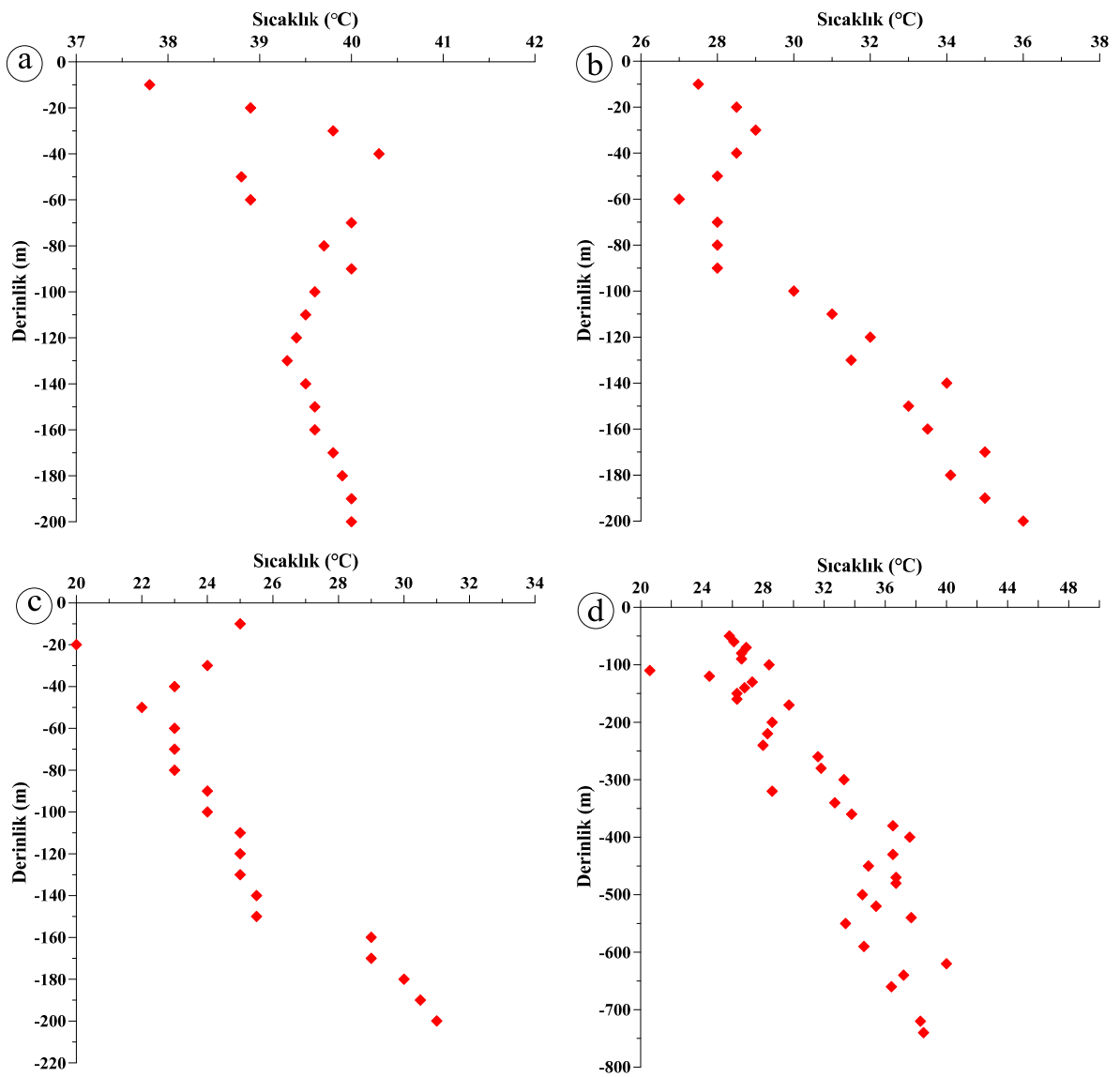
3.13.5.4. Akım ve Isı taşınım Modelinin Birlikte Çalıştırılması

Daha önce hazırlanmış olan akım modeli üzerine, sınır koşulları ve termal parametreler tanımlanarak akım ve ısı taşınım modeli birlikte çalıştırılmıştır.

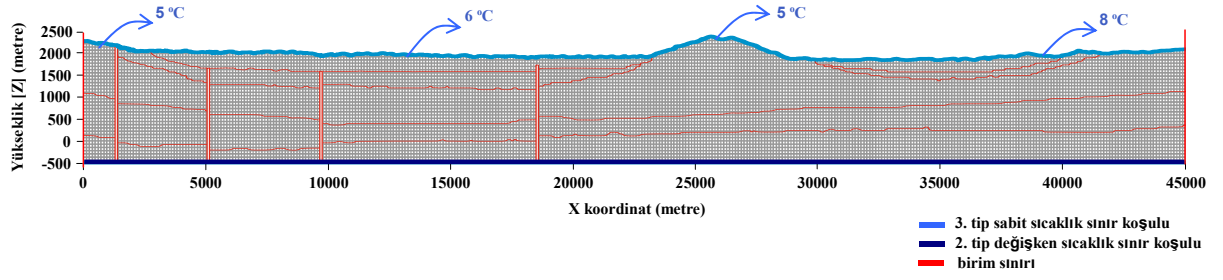
3.13.5.5. Sıcaklık Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Isı taşınım modeli oluşturulurken kesit modelin yanıl sınırları ısı taşınımı için geçirimsiz sınır kabul edilmiştir. Modelin tabanına 2. tip değişken sınır koşulu, yüzeyine 3.

tip sabit sınır koşulu tanımlanmıştır. Modelin yüzey kısmına Meteorolojik verilerden yararlanılarak Pasinler İlçesi'nin yıllık ortalama hava sıcaklığı olan 5 °C atanmıştır. Hava sıcaklığı değerleri Ovanın yüksek kesimlerinde 5 °C, doğu tarafında 8 °C olarak tanımlanmıştır. Model için bölgedeki jeotermal gradyandan yararlanılarak ısı akısı değeri $q = 0.103 \text{ W/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Alandaki PS-1, PS-2 ve EHD-1 kuyularında ölçülmüş olan sıcaklık-derinlik grafiklerinden yararlanılarak model tabanı için 140 °C sıcaklık hesaplanmıştır (Şekil 3.54). Elde edilen bu veriler SHEMAT programına girilerek ısı taşınımı için sınır koşulları oluşturulmuştur (Şekil 3.55).



Şekil 3.54. Pasinler jeotermal alanındaki sıcak su kuyularında ölçülen derinlik-sıcaklık profili (a: PS-1A, b: PS-2, c: PS-3, d: EHD-1)



Şekil 3.55. SHEMAT programında oluşturulan sıcaklık sınır koşulları

3.13.5.6. Termal Parametrelerin Belirlenmesi

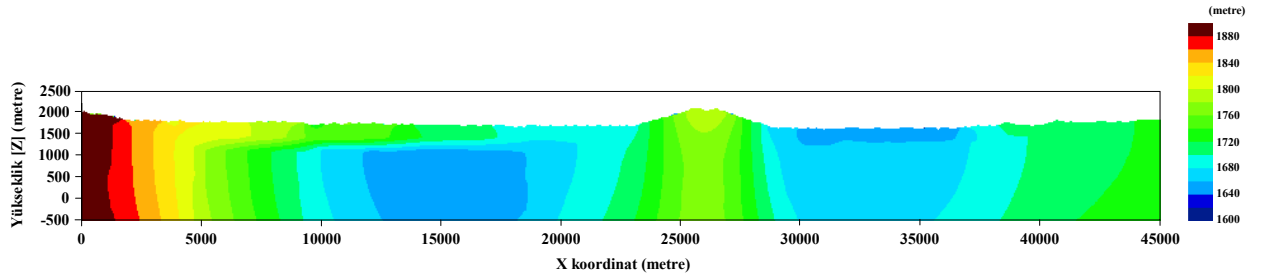
Pasinler jeotermal alanında model kesit hattı boyunca yer alan kayaların ısı iletkenlik ve ısı kapasitesi değerleri belirlenirken daha önce yapılmış olan çalışmalardan yararlanılmıştır (Tablo 3.22). Kayaların ısı üretim oranları; riyolet, bazalt ve tüfler için kayaların kimyasal analiz sonuçları kullanılarak Rybach ampirik formülü (Rybach ve Buntebarth,1982) ile hesaplanmıştır. Rybach ampirik formülü kayaların yoğunluk değerleri ile uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarını kullandığı bir eşitlik ve aşağıda verilmiştir.

$$(\mu\text{W}/\text{m}^3) = 0.1325 \rho(0.718C_U+0.193C_{Th}+0.262 C_K) \quad (38)$$

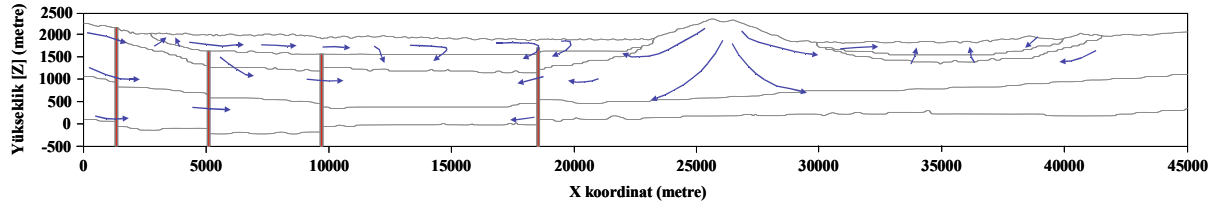
Yukarıdaki formülde C_U , C_{Th} ve C_K sırasıyla uranyum (ppm) toryum (ppm) ve potasyum (% ağırlık) konsantrasyonlarını ρ ise yoğunluk (g/cm^3) değerini ifade etmektedir. Model kesit alanında yer alan diğer kayaların ısı üretim oranları ise literatürden alınmıştır (Tablo 3.22).

3.13.5.7. Akım ve Isı Taşınım Modelinin Birlikte Değerlendirilmesi

Akım ve ısı taşınım modeli birlikte çalıştırıldığında, Pasinler jeotermal alanından seçilen model kesit boyunca meydana gelen hidrolik yükler Şekil 3.56'da, akım yolları Şekil 3.57'de, oluşan sıcaklık dağılımı ise Şekil 3.58'de görülmektedir.

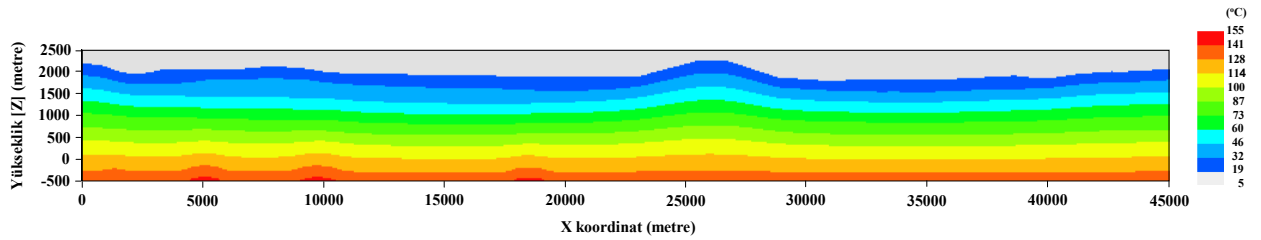


Şekil 3.56. Akım ve ısı taşınımının birlikte değerlendirilmesi ile oluşan hidrolik yükler



Şekil 3.57. Akım ve ısı taşınımının birlikte değerlendirilmesi ile oluşan yeraltı suyu akım yolları

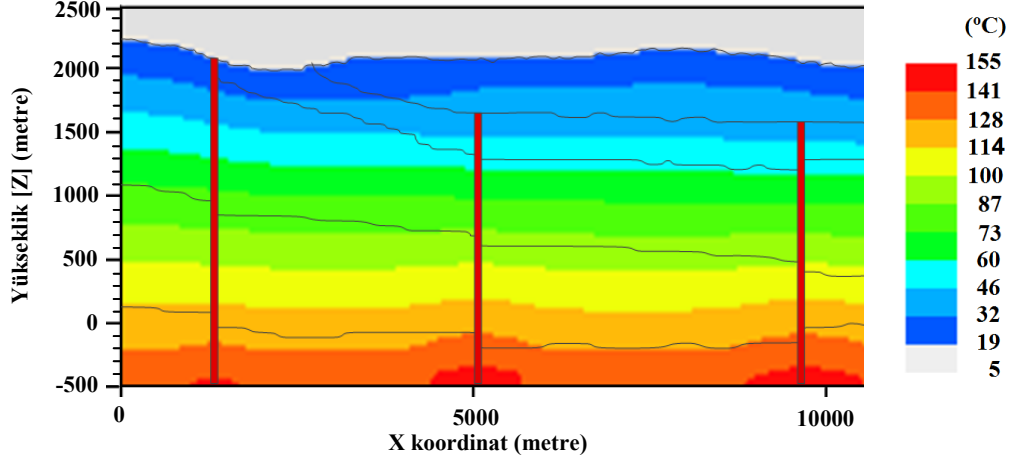
Isı taşınımından yoksun çalıştırılan modelde olduğu gibi, havza ortasında topografik yükseltinin altında kesitin doğu ve batı tarafına olmak üzere su bölümü gerçekleşmiştir. Havzanın doğu kısmında ısı taşınımından yoksun akım modeline benzer akım yolları oluşmuştur. Havzanın batı kısmında ise ısı taşınımından yoksun çalıştırılan akım modeline kıyasla, akım yolları değişerek örtü kayadan hazne kayaya doğru gerçekleşmiştir.



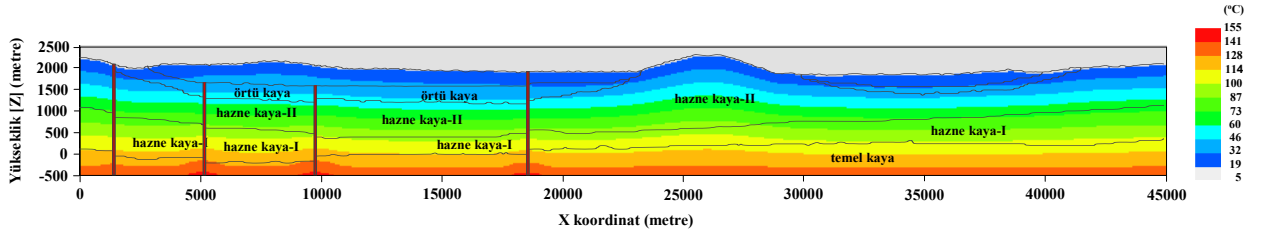
Şekil 3.58. Pasinler jeotermal alanında seçilen model kesitte oluşan sıcaklık dağılımı

Model alanında hesaplanan sıcaklık yatay yönde homojen dağılmıştır. Düşey yönde ise jeotermal gradyana bağlı olarak derinlikle artış göstermektedir (Şekil 3.59). Sıcaklık, temel kayada ve örtü kayada fay zonları boyunca yükselmiştir. Rezervuar kayada fay zonlarının ısı taşınımında etkisiz olması bu zonlarda modele girilen hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine son derece yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeğe yakın derinliklerde (~500 m) 40-50 °C, 700-1200 m'de ~ 55-79 °C, 1200-1600 m'de ~80-90 °C

lik sıcaklıklar hesaplanmıştır. Modelin doğu kısmında hazne kayadaki sıcaklıklar (~80-116 °C) batı tarafındaki hazne sıcaklıklarına (~ 90-130 °C) göre daha düşüktür (Şekil 3.60).



Şekil 3.59. Pasinler jeotermal alanında derinliğe göre sıcaklık değişimi

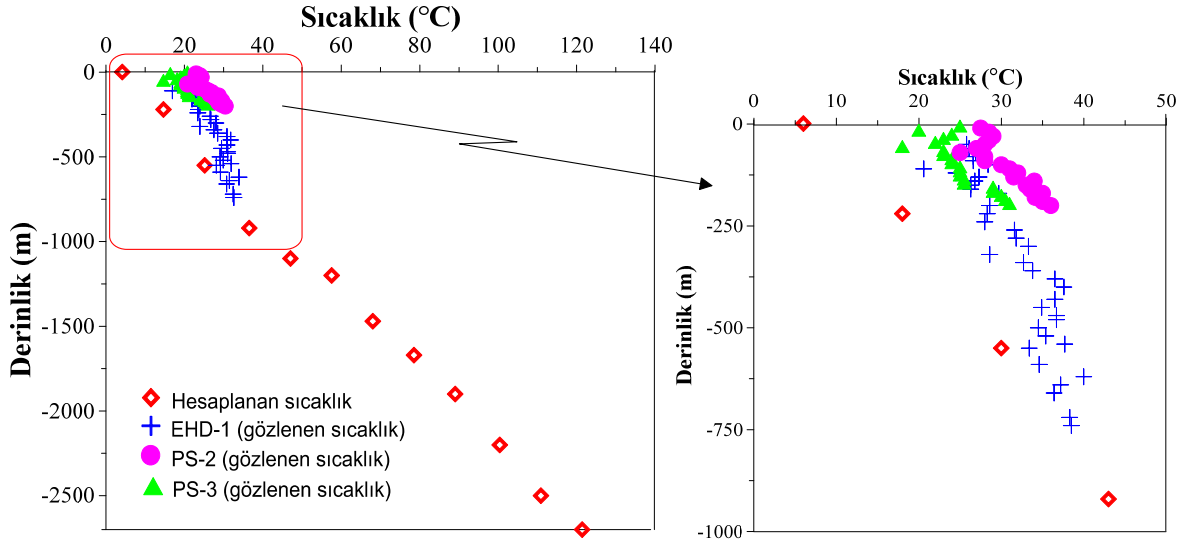


Şekil 3.60. Pasinler jeotermal alanında seçilen model kesite göre jeotermal elemanların sıcaklık değişimleri

3.13.5.8. Modelin Kalibrasyonu

Pasinler jeotermal alanının ısı taşınım modelinin kalibrasyonu için; PS1-A, PS-2, PS-3 ve EHD-1 jeotermal kuyularının boşalım sıcaklıkları ve bu kuyularda MTA tarafından ölçülen sıcaklık-derinlik logları kullanılmıştır. Ancak bu sıcaklıklar sondaj esnasında çamur sıcaklığının ölçülmesiyle elde edilmiştir. İnceleme alanında gece-gündüz arasındaki sıcaklık farkının fazla olması ölçümlerin hassasiyetini önemli ölçüde etkilemiştir. Kuyularda ölçülen çamur sıcaklıkları 20-40°C, jeotermal kuyuların boşalım sıcaklıkları ise 40-51°C arasında değişmektedir. Kuyuların derinlikleri ise 200-750 m arasında değişmektedir.

Model sonucunda derinliğe göre hesaplanan sıcaklıklar Şekil 3.61’ de verilmiştir. Şekil 3.61 incelendiğinde 500-700 m’lerdeki hesaplanan sıcaklığın, mevcut kuyuların sıcaklığına uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 3.61. Modelin kalibrasyonu sonucunda derinliğe göre hesaplanan sıcaklık dağılımı

3.14. Jeotermal Akışkanların Çevresel Etkileri

Temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan jeotermal enerjinin arama ve geliştirme çalışmalarına başlamadan önce çevre üzerine olabilecek pozitif ve negatif etkileri araştırılmalıdır. Tablo 3.23’de jeotermal gelişimin çevrede oluşturacağı etkiler düşük sıcaklıklı sistemlerde ve yüksek sıcaklıklı sistemlerde birbirlerinden farklılıklar gösterir (Hunt, 2001).

Jeotermal gelişimin sürdürülebilirliğinde ve çevreye olan etkilerini en aza indirmede en önemli yöntemler; re-enjeksiyon, çok amaçlı kullanım, ısı pompaları ve mineral kazanımıdır.

Uluslararası Enerji Ajansının Jeotermal Uygulama Anlaşması ile jeotermal enerjinin kullanımını artırmak, çevreye olacak etkilerini araştırmak, değerlendirmek ve bu etkileri en aza indirmek için gerekli metotları tespit etmek amaçlanmıştır. Bunun için ana aktiviteler üç grupta ele alınmıştır: (1) jeotermal gelişimin yüzeydeki doğal kaynaklara etkisini araştırmak, (2) jeotermal sıvının üretimi ve re-enjeksiyonuna bağlantılı problemleri belirlemek ve (3) çevresel etkileri en aza indirmek için gerekli metotları geliştirmek.

Tablo 3.23. Jeotermal gelişmenin olası çevresel etkileri (Hunt, 2001)

	Düşük Sıcaklıklı Sistemler	Yüksek Sıcaklıklı Sistemler	
		Buhar egemen	Sıvı egemen
	Sondaj Çalışmaları		
Erozyon ve ormanlık alanların Hasarı	Az etkili		Orta etkili
Gürültü	Orta etkili	Orta etkili	Orta etkili
Işıklandırma	Az etkili	Az etkili	Az etkili
Sondaj çamurunun yer altı suyuna etkisi	Az etkili	Orta etkili	Orta etkili
	Akiferden Su Çekimi		
Termal özelliklerin bozulması	Az etkili	Orta etkili	Yüksek etkili
Zeminde oturmalarda	Az etkili	Orta etkili	Yüksek etkili
Yer altı su seviye düşmeleri	Etkisiz	Az etkili	orta etkili
Hidrotermal çıkışlar	Etkisiz	Az etkili	orta etkili
Yüzeydeki sıcaklık değişimleri	Etkisiz	Az etkili	orta etkili
	Atık Su Boşalımı		
Yüzeysel depolanmanın organizmalara etkisi	Az etkili	Az etkili	Yüksek etkili
Re-enjeksiyon	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz
Yüzeysel depolanmanın su yollarına etkisi	Az etkili	Az etkili	orta etkili
Yer altı suyu kirliliği sismik etkiler	Az etkili Etkisiz	Az etkili Orta Etkili	Az etkili Orta Etkili
	Atık Gaz Boşalımı		
Organizmalar üzerine etkili	Etkisiz	Az etkili	Orta etkili
Sera etkisi	Etkisiz	Az etkili	Az etkili

Jeotermal araştırma ve işletme (elektrik üretimi ve ısının doğrudan kullanımı) aşamasında yapılan çalışmalar ve akışkanın bulunduğu fiziksel koşullar ve kimyasal içeriği çevreyi etkilemektedir. Bu nedenle, çevresel yasal düzenlemelere uyum sağlamak için jeotermal akışkanın çevreye olan fiziksel ve kimyasal etkilerinin belirlenmesi ve bu etkilerin en aza indirilebilmesi için jeotermal sahanın gelişimine başlamadan önce gerekli ön çalışmalara ihtiyaç vardır. Jeotermal araştırma ve işletme aktiviteleri sırasında yapılan sondajlar yüzeyde en çok tahribatı oluşturmakta, elektrik üretimi sonrası açığa çıkan atık, akışkan sıcaklığı çevre problemleri (Armannsson ve Kristmannsdottir, 1992) oluşturmaktadır. Jeotermal akışkanın üretimi sırasında atmosfere salınan buhar ve su akışkanın bor (B), civa (Hg), arsenik (As), kurşun (Pb), amonyak (NH₃), lityum (Li), karbondioksit (CO₂), hidrojen sülfür (H₂S) ve tuz gibi içerdiği kimyasallar çevreyi olumsuz şekilde kirletmektedir. Sıvı atık içerisinde bulunan kimyasallardan özellikle As ve Hg'nin

toprakta ve organizmalarda birikmesi canlı sağlığı için önem taşımaktadır. Ayrıca yüksek bor konsantresi bitkiler için önem taşımaktadır (Brown ve Webster-Brown, 2005).

Jeotermal akışkanın yüzeyde oluşturduğu doğal güzellikler ve tarihi yerlerin korunması jeotermal gelişim için büyük önem taşımaktadır. Bu yerler bölge halkı için ekonomik bir değer taşımaktadır. Jeotermal akışkan üretimi bu yerlerde değişimlere neden olmakta ve yüzeydeki travertenlerin, gayzerlerin, çamur havuzları ve su kaynaklarının kaybolmasına neden olabilmektedir. Bu yerlerin mutlak suretle koruma altına alınması gerekmektedir.

Pasinler jeotermal sahası düşük sıcaklıklı jeotermal sistem sınıfına girmektedir. Saha, Tablo 3.23’de verilen parametrelere göre değerlendirildiğinde, günümüzdeki kullanım şekliyle çevreye olumsuz bir etkisinin olmayacağı anlaşılmaktadır. Pasinler jeotermal alanında 7 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan sonra alandaki tahribatlar giderilmiş ve alan eski haline getirilmiştir. Sondajlardan üretilen akışkan kamuya ait ve özel kaplıca tesislerinde kullanılmaktadır. Kullanım sonrası sıcak sular Hasankale ayı’na doğrudan boşaltılmaktadır. Sahadaki jeotermal suların ortalama 1.07-14.7 mg/l B, 0.01-0.5 mg/l As, 0.001 mg/l Pb, 0.06-1.2 mg/l Li gibi düşük konsantrasyonlarda iz element içermesi evre kirliliği açısından bir tehdit oluşturmamaktadır. Kaynak ve kuyu başlarında yoğun H₂S gazı hissedilmektedir. Bunun evreye etkisi araştırılmalıdır. Pasinler jeotermal sahasında jeotermal akışkandan kaynaklanan traverten okelimi ve gayzerler gibi doğal güzellik oluşturacak unsurlar bulunmamaktadır.

4. İRDELEME VE TARTIŞMA

Jeotermal enerji, yeryüzeyinin altında ısı şeklinde depolanan, potansiyeli sınırsız bir enerji çeşididir. Binlerce yıldır ısıtmacılıkta, elektrik üretiminde, endüstriyel uygulamalarda, termal turizm ve balneolojik amaçlı kullanılmakta olan bu enerjinin dağılımı yer kabuğunda homojen değildir. Jeotermal enerji; aktif tektonik yapı, kayaçların ısı iletkenliği ve bölgesel ısı akısı dağılımı ile ilişkilidir. Enerjinin varlığı çoğu zaman sıcak kaynak ve buhar çıkışı gibi bazı belirtilerle anlaşılır. Ancak yeraltındaki dağılımı jeolojik, jeokimyasal ve jeofiziksel araştırmalarla belirlenmektedir. Son yıllarda bu araştırmalar kapsamında matematiksel modellerden yararlanılmaktadır. Matematiksel modellerde alanın kavramsal modeli baz alınır. Matematiksel modelin dayandırıldığı kavramsal model jeotermal akiferin geometrisi, hidrolik özellikleri, beslenme-boşalma parametreleri ve dinamik özelliklerine bağlı bazı varsayımlar içerir. Bu varsayımlar, alandaki jeotermal sistemi temsil eden veriler ve hidrojeolojik verilerin yorumlanması sonucu geliştirilmiştir. Matematiksel model ise bu kavramsal modelin bağımlı değişkenlerini zamanın ve konumun bir fonksiyonu olarak belirlemektedir. Matematiksel modelin sistemi ne ölçüde temsil ettiği, bağımlı değişkenlerin zaman ve konum içindeki gözlemleri ile model tarafından hesaplanan parametrelerin uyumuna bağlıdır.

Bu çalışmada Pasinler jeotermal sisteminde akım ve ısı taşınımı matematiksel bir model yardımıyla benzeştirilmiştir. Bu matematiksel modelin hassasiyeti sistemi temsil eden kavramsal modelin hassasiyetine bağlıdır. Kavramsal model; arazi çalışmaları, kayaç ve sulardan alınan örneklerin analiz sonuçları, alanda daha önce yapılmış olan sondaj çalışmaları, jeolojik ve hidrojeolojik çalışmalar değerlendirilerek oluşturulmuştur. Havzada DSİ tarafından açılan sığ kuyulardan (~250 m) üstte bir soğuk su akiferi, MTA tarafından açılan derin kuyulardan (~500 m) altta bir sıcak su akiferinin olduğu anlaşılmaktadır. Bu iki akifer arasındaki sınır net bir şekilde açıklanamamıştır. Ancak soğuk su kuyularının logları incelenerek soğuk su akiferinin tabanında siltli, marnlı düzeylerin olduğu belirlenmiştir. Bu düzeylerin devamlılığı konusunda kesin bilgiler edinilememiştir. Fakat sayısal modelde, bu geçirimsiz düzey model boyunca devamlı kabul edilmiştir. MTA tarafından açılan sıcak su kuyularında sıcak akiferin tabanına inilememiştir. Aynı alanda petrol araştırmaları amacıyla açılmış olan derin kuyulardan (1000-3500 m) jeotermal

sistemin rezervuarı kabul edilen volkanik ve piroklastik kayaçların altında şeylli-killi seviyelerin ve daha aşağılarda daha yaşlı volkanik kayaçların bulunduğu belirlenmiştir.

Matematiksel modelde yukarıda sözü edilen kavramsal modeli oluşturan parametrelerden bir kısmı arazi çalışmalarından ve analiz sonuçlarından elde edilmiş, bir kısmı ise literatürden alınmıştır. Sondaj noktalarının jeotermal sistemin bütününe dağılmayıp, birbirlerine çok yakın konumda ve az sayıda olması matematiksel modele veri girişini zorlaştırmıştır.

Pasinler jeotermal alanında akım ve ısı taşınımı modeli SHEMAT programında iki boyutlu kesit üzerinde oluşturulmuştur. Model sonucunda jeotermal akifere ait günümüz koşullarındaki hidrolik yükler ve yeraltı suyu akım yolları belirlenmiştir. Sistemin ortasında yer alan ve topografik yükselti oluşturan volkanik kütle; yeraltı suyu akımının havzanın doğusuna ve batısına doğru gerçekleşmesini sağlamıştır. Bunun sonucunda havzanın doğusunda ve batısında artezyen alanlar meydana gelmiştir. Jeotermal sistemin günümüz koşullarındaki yeraltı suyu akım özelliklerinin belirlendiği bu çalışma ile Pasinler jeotermal alanında gelecekte planlanan jeotermal akışkan işletme projelerinin sistem üzerinde oluşturacağı etkilerin belirlenmesi mümkün olacaktır. Geleceğe yönelik işletme projelerinde açılacak olan kuyu sayısı, derinliği, üretim debileri, üretim süreleri ve yeni akım parametreleri ile model programının tekrar çalıştırılması sonucunda o günün şartlarına göre akım modeli tekrar oluşturulabilecektir.

SHEMAT programında Pasinler jeotermal alanı için gerçekleştirilen ısı taşınımı modeline göre günümüz şartlarındaki ısı dağılımı belirlenmiştir. Isı dağılımının belirlenmesinde kayaçların termal parametreleri, jeotermal gradyan ve yüzeydeki hava sıcaklığı kullanılmıştır. Model sonucunda 1000 m'ye kadar 60°C sıcaklık daha derinlerde ise daha yüksek sıcaklıkların olabileceği görülmüştür. Bu sıcaklıklar şu anda üretilen akışkan sıcaklıkları ile uyumludur. Hazne kaya boyunca sıcaklığın değişken olması soğuk su akiferinden su karışımının fazla olduğunu gösterir.

Akım ve ısı taşınımının birlikte çalıştırılması sonucu elde edilen akım modeli ısı taşınımından yoksun çalıştırılan akım modeli ile büyük ölçüde benzerlik gösterir. Bu modelde havzanın batı tarafında yeraltı suyu akımı örtü kayadan hazne kayaya doğru gerçekleşmiştir.

Pasinler jeotermal alanı günümüzde faydalı bir şekilde kullanılmamaktadır. Alanda açılan jeotermal kuyulardan bir tanesi kaplıca tesisinde havuzlarda kullanılırken, iki kuyudan jeotermal akışkan artezyen şeklinde yüzeye çıkmakta ve Hasankale Çayı'na

karişmaktadır. Model sonucunda jeotermal kuyuların bu boşalımlarının jeotermal sistem üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Pasinler jeotermal alanı akım ve ısı taşınım modeli, sahanın ileriki yıllarda üretim projelerinin hazırlanmasında önemli bir altyapı oluşturacaktır.

Jeotermal akışkanın sıcaklığı ve kimyasal özellikleri kullanım alanları üzerinde etkilidir. Pasinler jeotermal alanı düşük sıcaklıklı saha olduğu için günümüz şartlarında elektrik üretimi için çok uygun görülmemektedir. Ancak ısıtmacılıkta (konut ve sera), soğutmacılıkta, kurutmacılıkta, kağıt ve tekstil sanayinde, kimyasal madde üretimi gibi çok çeşitli alanlarda kullanıma uygun olan Pasinler jeotermal akışkanı sadece kaplıca amaçlı kullanılmaktadır. Bu jeotermal suların kimyasal içerikleri Kaplıcalar Yönetmeliği (2004)'ne göre değerlendirilmiştir (Tablo 4.1). Bu yönetmeliğe göre; kaplıca sularında pH, majör iyonlar (Ca^{+2} , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , SO_4^- , Cl^- ve HCO_3^-), Fe, Mn, Cu, Zn, B, Br, As ve Ba gibi iz elementler için analizlerin yapılması önerilmekte ancak herhangi bir sınır değeri verilmemektedir. Yönetmeliğe göre Pb için 0.01 mg/l, Ni için 0.05 mg/l, Al için 0.2 mg/l ve Cd için 0.003 mg/l sınır değerleri verilmiştir. Alandaki jeotermal kuyu sularında bu iz elementlerin konsantrasyonları yönetmelikteki değerlere uygundur. Ayrıca kuyu sularındaki NH_4 , NO_2 ve NO_3 konsantrasyonları verilen sınır değerlerin altındadır.

Jeotermal akiferin üzerinde bulunan soğuk su akiferine ait DSİ tarafından yapılan analiz sonuçları ve soğuk su kaynağına ait (JK) analiz sonuçları (Tablo 3.5 ve 3.6) Tablo 4.1'deki standartlara göre değerlendirilmiştir.

Standartlara göre inceleme alanındaki soğuk su kuyuları (3205, 11216, 12571, 27335 ve 54324) ve soğuk su kaynağı (JK) pH, Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- , Cl^- , F^- , SO_4^{-2} iyonları, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Al, As, B, Br, Cd gibi iz metalleri ve NO_2 , NO_3 gibi kirlilik parametreleri açısından Tablo 4.1'deki standartlara uygun sınırlar içerisindedir. JK ise NH_4 konsantrasyonu bakımından sınır değerlerin üzerindedir.

İnceleme alanında yer alan yüzey suları (HÇ, HD, HDE) ise Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (2004)'ne göre değerlendirilmiştir (Tablo 4.2). Bu değerlendirmelere göre yüzey suları pH ve kirlilik parametresi olan NH_4 bakımından I-II. yüksek kaliteli az kirlenmiş sular sınıfına girmektedir. Na^+ , Cl^- , F^- ve SO_4^{-2} iyonları, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Al, As, B, Ba ve Cd gibi iz metalleri ve NO_2 , NO_3 gibi kirlilik parametreleri bakımından I-II. kalite sular sınıfına girmektedir. Pb konsantrasyonuna göre de yüzey sularındaki IV. kalite sular sınıfına girmektedir.

Tablo 4.1. Ulusal ve uluslar arası içmesuyu standartlarının birbirlerine göre karşılaştırılması ve kaplıcalar yönetmeliği

Parametreler	İnsani Tüketim Amaçlı Sular (2005)	Dünya Sağlık Örgütü (WHO) 2008	Avrupa Birliği (EU 1998)	Kaplıcalar Yönetmeliği (2004)
pH	6.5-9.5	6.5-8.5	6.5-9.5	-
Bulanıklık	1	5	1	-
Renk	20	15	-	-
TDS (mg/l)	-	1000	-	-
Kalsiyum (mg/l)	-	-	-	-
Magnezyum (mg/l)	-	-	-	-
Potasyum (mg/l)	-	-	-	-
Sodyum (mg/l)	200	200	200	-
Nitrat (mg/l)	50	50	50	45
Nitrit (mg/l)	0.50	0.20	0.50	0.05
Amonyum (mg/l)	0.50	1.50	0.50	-
Sülfat (mg/l)	250	250	250	-
Klorür (mg/l)	250	250	250	-
Flörür (mg/l)	1.5	1.5	1.5	-
Alüminyum (mg/l)	0.20	0.20	0.20	0.2
Kurşun (mg/l)	0.01	0.01	0.01	0.01
Bakır (mg/l)	2	2	2	-
Demir (mg/l)	0.2	-	0.2	-
Mangan (mg/l)	0.05	0.4	0.05	-
Çinko (mg/l)	-	-	-	-
Baryum (mg/l)	-	0.7	-	-
Kadmiyum (mg/l)	0.005	0.003	0.005	0.003
Krom (topl) (mg/l)	0.05	0.05	0.05	0.05
Selenyum (mg/l)	0.01	0.01	0.01	-
Gümüş (mg/l)	-	-	-	-
Antimon (mg/l)	0.005	0.005	0.005	0.005
Berilyum (mg/l)	-	-	-	-
Civa (mg/l)	0.001	0.006	0.001	0.001
Bor (mg/l)	1	0.5	1	-
Nikel (mg/l)	0.02	0.07	0.02	0.05
Bromat (mg/l)	0.01	0.01	0.01	-
Serbest klor (mg/l)	-	5	-	-

Tablo 4.2. Su kirliliği kontrolü yönetmeliği (2004)

SU KALİTE PARAMETRELERİ	SU KALİTE SINIFLARI			
	I	II	III	IV
1) Sıcaklık (°C)	25	25	30	> 30
2) pH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.0-9.0	6.0-9.0 dışında
3) Çözünmüş oksijen (mg O ₂ /L) ^a	8	6	3	< 3
4) Oksijen doygunluğu (%) ^a	90	70	40	< 40
5) Klorür iyonu (mg Cl ⁻ /L)	25	200	400 ^b	> 400
6) Sülfat iyonu (mg SO ₄ ⁼ /L)	200	200	400	> 400
7) Amonyum azotu (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	0.2 ^c	1 ^c	2 ^c	> 2
8) Nitrit azotu (mg NO ₂ ⁻ -N/L)	0.002	0.01	0.05	> 0.05
9) Nitrat azotu (mg NO ₃ ⁻ -N/L)	5	10	20	> 20
10) Toplam fosfor (mg P/L)	0.02	0.16	0.65	> 0.65
11) Toplam çözünmüş madde (mg/L)	500	1500	5000	> 5000
12) Renk (Pt-Co birimi)	5	50	300	> 300
13) Sodyum (mg Na ⁺ /L)	125	125	250	> 250
14) Civa (µg Hg/L)	0.1	0.5	2	> 2
15) Kadmiyum (µg Cd/L)	3	5	10	> 10
16) Kurşun (µg Pb/L)	10	20	50	> 50
17) Arsenik (µg As/L)	20	50	100	> 100
18) Bakır (µg Cu/L)	20	50	200	> 200
19) Krom (toplam) (µg Cr/L)	20	50	200	> 200
20) Krom (µg Cr ⁺⁶ /L)		20	50	> 50
21) Kobalt (µg Co/L)	10	20	200	> 200
22) Nikel (µg Ni/L)	20	50	200	> 200
23) Çinko (µg Zn/L)	200	500	2000	> 2000
24) Siyanür (toplam) (µg CN/L)	10	50	100	> 100
25) Florür (µg F ⁻ /L)	1000	1500	2000	> 2000
26) Serbest klor (µg Cl ₂ /L)	10	10	50	> 50
27) Sülfür (µg S ⁼ /L)	2	2	10	> 10
28) Demir (µg Fe/L)	300	1000	5000	> 5000
29) Mangan (µg Mn/L)	100	500	3000	> 3000
30) Bor (µg B/L)	1000 ^d	1000 ^d	1000 ^d	> 1000
31) Selenyum (µg Se/L)	10	10	20	> 20
32) Baryum (µg Ba/L)	1000	2000	2000	> 2000
33) Alüminyum (mg Al/L)	0.3	0.3	1	> 1
34) Radyoaktivite (pCi/L)				
alfa-aktivitesi	1	10	10	> 10
beta-aktivitesi	10	100	100	> 100

(a) Konsantrasyon veya doygunluk yüzdesi parametrelerinden sadece birisinin sağlanması yeterlidir.

(b) Klorüre karşı hassas bitkilerin sulanmasında bu konsantrasyon limitini düşürmek gerekebilir.

(c) PH değerine bağlı olarak serbest amonyak azotu konsantrasyonu 0.02 mg NH₃-N/L değerini geçmemelidir.

(d) Bora karşı hassas bitkilerin sulanmasında kriteri 300 µg/L'ye kadar düşürmek gerekebilir.

5. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, ülkemizin önemli jeotermal alanlarından biri olan Pasinler (Erzurum) jeotermal sahasında sıcak su dolaşım sistemini açıklamak ve ısı taşınım modelini ortaya koymak amaçlanmıştır. Ayrıca çalışmada jeotermal alanda yer alan sıcak ve soğuk su kaynaklarının hidrokimyasal ve izotopik özellikleri belirlenmiş, su-kayaç etkileşimi araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1. İnceleme alanının en yaşlı birimleri Geç Kretase yaşlı serpantin, peridotit, diyabaz dayklarından oluşan Şahvelet Ofiyolitleri ve şeyl, kıltaşı, marn ve yer yer ince kumtaşı, kumlu kireçtaşlarından oluşan Derviş Halit Formasyonu'dur. Üzerlerine Eosen yaşlı gabrodan oluşan Yaylasırtı Gabrosu ve andezit, bazalt ve piroklastiklerinden oluşan Alibaba Volkanitleri gelmektedir. Bu volkanitler Erken Miyosen yaşlı resifal kireçtaşları, kumtaşı, kıltaşlarından oluşan Haneşdüzü Formasyonu tarafından üzerlenir. Geç Miyosen yaşlı bazalt, andezit, dasit, riyodasit, riyolit ve piroklastiklerinden oluşan Erzurum-Kars Plato Volkanitleri alandaki genç volkanik kayaçların temsilcileridir. Alandaki en genç birimler ise Geç Pliyosen-Erken Pleyistosen yaşlı çakıltaşı, kumtaşı, siltaşı, marn ardalanmasından oluşan Horosan Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır.

2. Havzada yeraltı suyu bakımından önemli olan birimler çakıltaşı, kumtaşı siltaşı ve marn ardalanmasından oluşan Horosan Formasyonu ve alüvyonlardır. Akiferin kalınlığı doğudan batıya doğru gittikçe artmaktadır ve toplam kalınlığı 100-260 m arasındadır. Akiferin transmissibilite değeri 250-2700 m²/gün, depolama katsayısı değeri basınçlı bölgeler için 10⁻⁴, serbest bölgeler için 10⁻², permeabilite katsayısı alüvyon için 1.15*10⁻⁵-1.78*10⁻⁵ m/s, Horosan Formasyonu için 2.5*10⁻⁶ olarak hesaplanmıştır. Akiferde yeraltı suyu akım yönü (YAS) batıdan doğuya doğrudur.

3. Yapılan sondajlı çalışmalardan soğuk su akiferinin altında sıcak su akiferinin olduğu belirlenmiştir. Alanda yapılan derin sondajlardan sıcak su akiferini oluşturan bazalt, andezit, riyolit ve piroklastik kayaçların (tuf ve ignimbirit) kalınlığının yaklaşık 1100 m olduğu belirlenmiştir. Jeotermal kuyuların (PS1-A, PS-2, PS-3, PS-4, PS-5-EHD-1 ve ÖZ) boşalım sıcaklıkları 22.5-51 °C'arasındadır.

4. Düşük entalpili sahalar sınıfında yer alan jeotermal sahadaki sıcak suların pH'ı 5.17-7.6, EC değerleri 970-6233 µS/cm, TDS değerleri 2538-4392 mg/l arasındadır. Jeotermal kuyular Na-Cl-HCO₃; sıcak su kaynağı ise soğuk sularla karışımdan dolayı Na-

Ca-Mg-HCO₃-Cl su tipindedir. Soğuk kaynak ve yüzey sularının pH değerleri 7.9-8.6, EC değeri 322-857 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'dir. Soğuk su kaynağı, yüzey suları ve yer altı suları ise Mg-Ca-HCO₃ su sınıfındadır. Doymunluk hesaplamaları sonucunda genel olarak jeotermal suların kuvars mineraline, soğuk suların ise aragonit, kalsit ve dolomit mineralline doymun olduğu belirlenmiştir.

5. Silis jeotermometrelerine göre hazne kaya sıcaklığı yaklaşık 46-177°C hesaplanmıştır. Sıcak sulara soğuk su karışımı oranı entalpi-klorür diyagramına göre % 68 bulunmuştur.

6. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ ilişkisine göre inceleme alanındaki tüm sular meteorik kökenlidir. Sıcak sular mevsimsel değişiklik göstermezken soğuk sular mevsimsel değişimlerden etkilenmiştir. $\delta^{18}\text{O}$ -sıcaklık (°C) ilişkisine göre sıcak sular yaklaşık aynı yükseklikten, soğuk su kaynağı ve yüzey suları sıcak sulara göre daha düşük kotlardan beslenmektedir. Sıcak suların düşük trityum, yüksek EC değerine sahip olması bu durumu desteklemektedir. Ayrıca bölgede yer alan sıcak suların trityum değerlerinin 0.8 TU'dan düşük olması rezervuarın 1950'lerden önce beslendiğini ifade eder.

7. Pasinler jeotermal alanında incelenen suların karbon içerikleri yeraltı sularında bulunan çözünmüş inorganik karbon ya da tatlı su karbonatlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca inceleme alanında sıcak su kaynağına yakın konumda yüzeylenen genç volkanik kayaların varlığı karbon içeriğinin bir kısmının manto kökenli CO₂ gazından kaynaklanmış olabileceğini de düşündürmektedir. $^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ değerlerine göre sıcak sulardaki kükürtün kökeni volkanik, petrol, kömür ve kireçtaşlarından kaynaklanmaktadır. İnceleme alanında Horosan Formasyonu'nun alt kısımlarında bulunan ekonomik kömür oluşumları, Pasinler kaplıcası civarındaki petrol sızıntılarının varlığı ve geniş bir alanda yüzeyleme veren Erzurum-Kars Plato Volkanitleri kükürtün kaynağını oluşturduğu düşünülmektedir. JK, HD ve HÇ'nda da kükürtün kaynağı kireçtaşı, volkanik kayalar ve petrol-kömür kökenlidir.

8. Zn, Rb, Sr ve Ba elementlerinin jeotermal sularda yüksek değerde olması volkanik kayac kimyasının su kimyası üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Jeotermal suların nadir toprak element (NTE) içerikleri düşük orandadır. Sulardaki pozitif Eu anomalisinin yanı sıra negatif Ce anomalisi oksijence zengin ortamlara işaret etmektedir.

9. Pasinler jeotermal sistemin ısı kaynağı alandaki Üst Miyosen yaşlı genç volkanitlerdir (Erzurum-Kars Plato Volkanitleri). Jeotermal sistemde ısıyı taşıyan akışkan izotop içeriklerine göre meteorik kökenlidir. Hazne kayanın derinlerde bazalt-bazaltik tuf

üst seviyelerde ise riyolit-riyolitik tuf şeklinde olduğu belirlenmiştir. Sistemin tamamen geçirimsiz sayılabilecek bir örtü kayası bulunmamakla beraber, alüvyon malzemenin altında bulunan çakıltası, kumtaşı, silttaşı, marn ardalanmasından oluşan Horosan Formasyonu'nun siltli ve marnlı seviyeleri ve alüvyonda yer alan killi seviyeler kısmen örtü kaya görevi görmektedir.

10. Pasinler (Erzurum) jeotermal sahasının sayısal akım modeli yaklaşık doğu-batı yönlü kararlı akım koşullarında iki boyutlu kesit bir model olarak hazırlanmıştır. Model alanında yeraltı suyu akımının genel olarak topografya denetimli olduğu belirlenmiştir. Hazne kayanın üst kısımlarında alüvyon akiferdeki soğuk su karışımından dolayı akım yatay, alt kısımlarda ise kısmen örtü kayaya doğrudur. Riyolit-riyolitik tuf gibi gözenekli ve geçirimli olan hazne kayadaki düşey fayların yeraltı suyu akımı üzerinde bir etkisi olmamıştır. Bu sonuç modele girilen hazne kaya ve fay zonlarına ait porozite ve hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

11. Akım ve ısı taşınım modeli birlikte çalıştırıldığında Pasinler jeotermal alanından Havzanın doğu kısmında ısı taşınımından yoksun akım modeline benzer akım yolları oluşmuştur. Havzanın batı kısmında ise ısı taşınımından yoksun çalıştırılan akım modeline kıyasla akım yolları değişerek örtü kayadan hazne kayaya doğru gerçekleşmiştir.

12. Isı taşınım modeline göre sıcaklık hazne kaya içerisinde doğu-batı yönünde genel olarak homojen dağılırken, temel kayada ve örtü kayada fay zonları boyunca yükselmiştir. Rezervuar kayada fay zonlarının ısı taşınımında etkisiz olması bu zonlarda modele girilen hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine son derece yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Isı taşınımı düşey yönde ise jeotermal gradyana bağlı olarak derinlikle artış göstermiştir. Yüzeğe yakın derinliklerde (~500 m) 40-50 °C, 700-1200 m'de ~ 55-79 °C, 1200-1600 m'de ~80-90 °C'lik sıcaklıklar hesaplanmıştır.

13. Pasinler jeotermal alanının ısı taşınım modelinin kalibrasyonu için PS1-A, PS-2, PS-3 ve EHD-1 jeotermal kuyularının boşalım sıcaklıkları ve bu kuyularda MTA tarafından ölçülen sıcaklık-derinlik logları kullanılmıştır ve sonuç olarak derinliğe göre gözlenen ve hesaplanan sıcaklıklar incelendiğinde 500-700 m'lerdeki hesaplanan sıcaklığın mevcut kuyuların sıcaklığına uygun olduğu görülmüştür.

14. Jeotermal sahalarda uygulanan bu tür matematiksel modeller bu alanlarda geleceğe yönelik planlamalarda bir alt yapı oluşturacaktır.

6. ÖNERİLER

1. Sayısal modellerin oluşturulmasında kavramsal modellerin son derece etkili olduğu görülmektedir. Pasinler jeotermal sahasına ait kavramsal modelin oluşturulmasında verilerin az oluşu ve elde edilmesindeki güçlükler sayısal modelin çıktılarında olumsuz etkilemiştir. Modelde kullanılan parametrelerin bir kısmı farklı kurumlardan geçmiş yıllara ait raporlardan elde edilmiş, birtakım veriler ise literatürden alınmıştır. Gelecek yıllarda güncel ve alanda ölçülmüş veriler kullanılarak modelin çalıştırılması daha sağlıklı sonuçların elde edilmesine imkan verecektir.

2. Aynı alanda bir başka sayısal model programı ve farklı kesit hatları kullanılarak sonuçlar birbirleriyle deneştirilebilir.

3. Pasinler ilçesi ve çevresinin ortalama hava sıcaklığının yaklaşık 6 °C olması ilçenin yılın yaklaşık 9 ayında ısıtma ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Ayrıca Pasinler Ovası'ndaki tarımsal faaliyetlerin daha uzun süreli devam ettirilmesi ilçe ekonomisi için önemlidir. Yüzey suyu kaynaklarının bol olduğu çalışma alanında balık çiftlikleri kurulabilir. Bu tür küçük tesisler iş alanının oldukça kısıtlı olduğu yörede yöre halkına az da olsa iş olanağı sağlar. Ayrıca yaz turizmini canlandırmak amacıyla bu tür tesislerin yapılması yöreye ekonomik açıdan katkı sağlayacaktır.

4. Jeotermal sahada rezervuar parametrelerinin korunması ve çevreye jeotermal akışkanın atılmaması için re-enjeksiyon yapılmalıdır. Rezervuar parametrelerinin korunması esnasında bu çalışmada oluşturulan akım ve ısı taşınım modeli baz alınabilir.

5. Jeotermal akışkanın kullanımına yönelik araştırmalar ve projeler tek elden yürütülmeli, sıcaqsu üretimi ve dağıtımı resmi bir kurumun denetiminde kontrol altında tutulmalıdır.

6. Alanda jeotermal faaliyetlerin geliştirilmesi ve kullanımının çeşitlendirilmesi için yerel yönetimlerin uluslar arası kuruluşlar ile ortaklık kurabilmesi özendirilmeli ve destek sağlanmalıdır.

7. Çalışma alanında yer alan kaplıca tesislerinde kullanım sonrası sıcak sular Hasankale Çayı'na doğrudan boşaltılmaktadır ve kaynak ve kuyu başlarında yoğun H₂S gazı hissedilmektedir. Bu atık suların yüzey sularına olan etkileri ve jeotermal akışkanla birlikte atmosfere yayılan H₂S ve benzeri gazların çevreye etkisi araştırılmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- Aiuppa, A., Belomo, S., Brusca, L., D'Alessandro, W. ve Federico, C., 2003. Natural and Anthropogenic Factors Affecting Grounwater Quality of an Active Volcano Mt, Applied Geochemistry, Etna, Italy,18, 863-882.
- Akan, B., 2002. Afyon Ömer Gerçek Jeotermal Sisteminin Modellenmesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 26,2, 31-52.
- Akar, T., 2012. Seferihisar ve Balçova Jeotermal Alanlarında ve Çevre Akiferlerinde Akışkan Akımının Modellenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Akkuş, M.F., 1965. Pasinler (Hasankale) Havzasının 1/25.000 Ölçekli Detay Petrol Etüdü Raporu, M.T.A Raporları No. 4037, Ankara, (yayınlanmamış).
- Akkuş, İ., Akıllı, H., Ceyhan, S., Dilemre, A. ve Tekin, Z. 2005. Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri, Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü Envanter Serisi-201, Ankara.
- Akgiray, Ö., 2003. İçme Suyu ve Su Arıtımı Suyumuzun Geleceği ve Türkiye Su Politikaları, 22 Mart Dünya Su Günü Paneli, Mart, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 62-75.
- Anonim, 2006. World Health Organisation (WHO), Guidelines for Drinking Water Quality, First Addendum to Third Edition, Recommendations, WHO Publ., Geneva, 1, 494.
- Armannsson, H. ve Kristmannsdottir, H., 1992. Geothermal Environmental Impact, Geothermics, 21, 869-880.
- Arnorsson, S. ve Andresdottir, A., 1995. Processes Controlling the Distribution of Boron and Chlorine in Natural Waters in Iceland, Geochim Cosmochim Acta, 20, 59, 4125-4146.
- APHA-AWWA-WPCF, 1981. Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater Fifteenth ed., American Public Health Association, Washington, USA, 1134.
- Arpat, E., 1965. Ilıca- Aşkale (Erzurum) Arasındaki Sahanın ve Kuzeyinin Genel Jeolojisi ve Petrol İmkanları, M.T.A. Derleme Raporları, No. 4040.
- Atalay, E., Baysak, M., Ertürk, A. ve Dirik, M., 1972. Pasinler Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu, D.S.İ., Rapor No: 5029, Ankara.
- Aydın, A. ve Özmen, M., 1998. Erzurum Pasinler Alvar Beldesi Münferit Hidrojeolojik Etüd Raporu, D.S.İ., Erzurum.

- Aydın, A. ve Özmen, M., 1998. Erzurum Pasinler Korucuk Köyü Münferit Hidrojeolojik Etüd Raporu, D.S.İ., Erzurum.
- Aynalı, Z., 2000. Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-4 Sıcaksu Kuyusu Sondaj Faaliyet Raporu, M.T.A., Ankara.
- Aynalı, Z., 2000. Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-5 Sıcaksu Kuyusu Sondaj Faaliyet Raporu, M.T.A., Ankara.
- Aynalı, Z. ve Bulut, H., 2002. Pasinler (Erzurum) Belediyesi Jeotermal Ön Etüt Raporu, Ankara (yayımlanmamış).
- Aziz, A., 1971. Erzurum İ46-b, ve İ46-c, Paftalarının Detay Jeolojisi ve Petrol Olanakları, M.T.A. Raporları, No. 5222, Ankara (yayımlanmamış).
- Back, W., Rosenshein, J.,S. ve Seaber, P., R., 1988. Hydrogeology, The geology of North America, O-2, The Geological Society of North America Boulder, Colorado.
- Banks, D., Hall, G., Reimann, C. ve Siewers, U., 1999. Distribution of Rare Earth Elements in Crystalline Bedrock Groundwaters Oslo and Bergen Regions, Norway, Appl. Geochem. 14, 27–39.
- Başkan, M., E. ve Canik, B., 1983. I.A.H. Map of Mineral and Thermal Waters of Turkey Aegean Region, M.T.A. Raporları, No:189, Ankara, 80 s.
- Bektaş, O., 1981. Kuzey Anadolu Fay Zonunun Erzincan-Tanyeri Bucağı Yöresindeki Jeolojik Özellikleri ve Yerel Ofiyolit Sorunları, KTÜ, Yerbilimleri Dergisi, 32.
- Bektas, O., Ravat, D., Büyüksarac, A., Bilim, F. ve Ates, A., 2007 Regional geothermal characterization of East Anatolia from aeromagnetic, heat flow and gravity data, Pure and Applied Geophysics, 164, 975-998.
- Benderitter, Y. ve Cormy, G., 1990. Possible Approach to Geothermal Research and Relative Cost Estimate. In: Dickson, M.H., Fanelli, M. (Eds.), Small Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, 61-71.
- Berger, G., Schott, J. ve Guy, C., 1988. Behavior of Li, Rb and Cs During Basalt Glass and Olivine Dissolution and Chlorite, Smectite and Zeolite Precipitation from Seawater, Experimental Investigations and Modelization Between 50 °C and 300 °C, Chem. Geol., 71, 297-312.
- Bozkuş, C., 1993. Pasinler-Horasan Havzasının Doğusunun Stratigrafisi, M.T.A. Dergisi, Ankara, 115, 43-53.
- Brouwer, E., Baeyens, B., Maes, A. ve Cremers, A., 1983. Cesium and Rubidium Ion Equilibria in Illite Clay, J. Phys. Chem., 87, 1213–1219.
- Brown, K. ve Webster Brown, J., 2005. Environmental Impacts of High Enthalpy System Development, Pre and Post Congress Short Courses, Proceedings World Geothermal Congress, April, Antalya, Turkey.

- Budak, B., 2004. Reservoir Simulation of Balçova Geothermal Field, Yüksek Lisans Tezi, İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- Can, İ., 2002. Jeotermal Rezervuarların Performanslarının Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Cathomen, N., 2002. Warmetransport im Grandwasser-Auswirkung vo Wärmepumpenanlagen auf die Grandwasswertemperatur am Beispiel der Gemeinde Altach im Vorarlberger Rheintal, Diplomarbeit. ETH. Zürich.
- Cermak, V. ve Ryback, L., 1982. Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rock, in Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, eds Angenheister G, New Series, Group V, vol. 16, Springer-Verlag, Berlin.
- Clark, S., P., Jr., 1966. Thermal Conductivity. In: S. P. Clark, Jr. (Ed.), Handbook of Physical Constants, Geol. Soc. Am. Mem. 97, 459–482.
- Clark, I. ve Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis publishers, New York, 328.
- Clauser, C., 2003. Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers. SHEMAT and Processing SHEMAT, Springer, Berlin, 1–333.
- Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Water, Science, 133, 1702-1703.
- Collins, A., G., 1975. Geochemistry of Oil Field Waters, Elsevier, 125p. New York.
- Collins, P., E., F., Rust, D., J., Bayraktutan, M., S. ve Turner, S., D., 2005. Fluvial stratigraphy and palaeoenvironments in the Pasinler Basin, eastern Turkey. Quaternary International 140-141, 121-134.
- Collins, P., E., F., Rust, D., J. ve Bayraktutan, M., S., 2008. Geomorphological evidence for a changing tectonic regime, Pasinler Basin, Turkey, Journal of the Geological Society, 165, 849-857.
- Constantopoulos, J., 1988. Fluid Inclusion and Rere Earth Element Geochemistry of Fluorite From South-Central Idaho, Economic Geology, 83, 626-636.
- Davis, S., N., 1964. Silica in Streams and Groundwater, American Journal of Science, 262, 870-891.
- Davis, S., N., 1969. Porosity and Permeability in Natural Meterials In Flow Through Porus Media, ed. R.J. M. DeWiest Academic Press, 53,89. New York.
- De Marsily, G., 1986. Quantitative Hydrogeology Groundwater Hydrology for Engineers, Academic Press, San Diego, USA.
- Demirtaşlı, E. ve Pisoni, C., 1965. Ahlat-Adilcevaz Bölgesinin Jeolojisi (Van Gölü Kuzeyi), M.T.A. Dergisi, Ankara, 64, 22-23.

- Demirtaşlı, E., Tütüncü, K. ve Gedik, A., 1965. Tekman Havzası'nın 1:25 000 ölçekli Jeoloji Haritası, M.T.A. Enerji Hammadde Etüt ve Araştırma Dairesi Arşivi, Ankara.
- Dickson, M., H. ve Fanelli, M., 1990. Geothermal Energy and its Utilization, In: Dickson, M.H., Fanelli, M. (Eds.), Small Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, 1-29.
- Dilek R., 1973. Akiferlerin Matematiksel Modellenmesi, Pasinler (Erzurum) ve Çamlıbel (Tokat) Ovalarına Uygulamalar, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dikmen, B., 2001. Ulubat Gölü ve Gölü Besleyen Su Kaynaklarında Organoklorlu Pestisit Kirliliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Doğan, L., 1981. Hidrojeolojide Su Kimyası, DSİ yayınları, Ankara, 178 s.
- Doğdu, M., Ş., 2001. Akarçay (Afyon) Havzasında Jeotermal Kökenli Yüzeysuyu ve Yer altı Suyu Kirliliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Emre, A., 1962, Erzurum Pasinler İzirmik – Sos – Müceldi Köylerinin Hidrojeolojik Etüd Raporu, D.S.İ., Erzurum.
- Ercan, S., 1956. Erzurum Pasinler Ovası Hidrojeolojik Etüd Raporu, D.S.İ., Erzurum.
- Ercan, T., 1990. Interpretation of Newgeochemical, Radiometric and Isotopic Data on Neogene-Quaternary Volcanics of Eastern and Southeastern Anatolia, Bull and Exploration Inst., 110,143-164.
- Erentöz, C., 1949. Hınıs 65/2 paftasının raporu, M.T.A. Der. Rap No: 2159 Ankara (yayımlanmamış).
- Erentöz, C., 1954. Oltu 31/4, Kars 32/3 ve Hasankale 42/2, 1/100 000 Ölçekli Jeolojik Paftaları, M.T.A. Rap., No: 2159 (yayımlanmamış).
- Erdoğan, T., 1972. Erzurum-Karayazı Bölgesinin Jeolojisi ve Petrol İmkanları (Erzurum I-47 c1, c2 ve Karaköse I-48 d1, d4), M.T.A. Derleme Rapor No: 4845 Ankara, (yayımlanmamış).
- Erguvanlı, K. ve Yüzer, E., 1987. Yeraltı suları Jeolojisi, İTÜ, İstanbul, No: 23,339 s.
- Eryurt, A., 1999. Manisa Bölgesi Yeraltı Sularının Bileşiminde Mevsimsel Değişiklikler Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Esen, O., C., 2001. Pasinler (Erzurum) Hidrolojik ve Hidrojeolojik Etüd Raporu, D.S.İ., Ankara.

- Evens, N., M., Hamilton, P., J. ve O’Nions, R., K., 1978. Rare Earth Abundances in Chondritic Meteorite, Geochim. Cosmochim. Acta, 42,1199-1212.
- Fetter, C.,W., 2001. Applied Hydrogeology Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 4th ed., 684.
- Fırat Ersoy, A., 2007. Gümüşhacıköy (Amasya) Akiferi’nin Yeraltısuyu Akım Modeli, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Fournier, R.,O. ve Truesdell, A., H., 1974. Geochemical Indicators of Subsurface Temperature, Estimation of Temperature and Fraction of Hot Water Mixed with Cold Water, J. Res. U.S. Geol. Survey, 2, 263-270.
- Fournier, R., O., 1977. Areview of Chemical and Isotopic Geothermometers for Geothermal Systems, Proceedings of the Symp. On Geoth. Energy, Cento Scientific Programme, Ankara, 133-143.
- Fournier, R., O., 1979. Geochemical and Hydrological Considerations and the Use of Enthalpy-Chloride Diagrams in the Prediction of Underground Conditions in Hotspring Systems, J. Volcanol. Geotherm. Res., 5, 1-16.
- Frape, S., K., Blyth, A., Blomqvist, R., McNutt, R., H. ve Gascoyne, M., 2003. Deep Fluids in the Continents: II. Crystalline rocks. In: Drever, J.I. (Ed.), Surface and Ground Water, Weathering, and Soils. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), Treatise on Geochemistry, vol. 5. Elsevier, Amsterdam, 541–580.
- Freze, R., A. ve Cherry, J., A., 1979. Groundwater, Prentice- Hail, USA, 604.
- Geçit, Y., 2002. Pasinler Ovası ve Çevresinin İklimi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Geçit, Y., 2009. Pasinler Ovası ve Çevresinin İklimi, Adıyaman Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Adıyaman.
- Gelişli, K. ve Maden, N., 2006. Analysis of Potential Field Analysis in Pasinler-Horasan Basin, Eastern Turkey, Journal of the Balkan Geophysical Society, 9,1, 1-7.
- Gemici, Ü., 1999. Çeşme Yarımadası’nın Hidrojeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları, Doktora Tezi, D.E.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Gedik, A., 1978. Doğu Anadolu’da açılan stratigrafik istikşaf (açınsama) sondajları, Yeryuvarı ve İnsan, 3, 31-35.
- Gedik, A., 1985. Tekman (Erzurum) Havzasının Jeolojisi ve Petrol Olanakları, M.T.A. Dergisi, 104, 1-24. Ankara.
- Giggenbach, W., F., 1988. Geotermal Solute Eguilibria, Derivatin of Na-K-Mg-Ca Geoindicators, Geochim. Et Cosmochim. Acta, 52, 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 Publications, Rome, 119-143.
- Göçtü, S., Kaynak, M. ve Şahin, H., 1992. Pasinler (Erzurum) Havzası'nda yapılan Jeofizik (Gravite, Manyetik ve Elektriksel) Etüd Raporu M.T.A. Derleme Raporları, Rapor No: 9681, Ankara.
- Gökmenoğlu, O., Öziçli, F., M. ve Çatal, Z., 2009. Erzurum-Pasinler EHD-1 Jeotermal Sondajı Kuyu Bitirme Raporu, No: EHD-1-33-13-07.
- Haenel, R., Rybach, L. ve Stegena, L., 1988. Fundamentals of Geothermics. In: Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L.A. (Eds.), Handbook of Terrestrial Heat- Flow Density Determination, Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, 9-57.
- Haskin, L., A., Wildeman, T., R. ve Haskin, M., A., 1968. An Accurate Procedure for the Determination of the Rare Earths by Neutron Activation, Journal of Radioanalytical Chemistry 1, 337-348.
- Havur, E., 1972. Erzurum İ 47-c1, c4, d2, d3 Paftalarının Jeolojisi ve Petrol Olanakları, M.T.A. Rap., 4851, Ankara (yayımlanmamış).
- Hem, D., J., 1971. Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water, U.S. Geological Survey Water Supply Paper, Second Edition, 93.
- Hem, J., D., 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, USGS Water Supply Paper 2254, US Gov. Print. Office, 263.
- Hem, J.,D., 1992. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, U.S. Geol Surv., Water- Supply, 2254.
- Hochstein, M., P., 1990. Classification and Assessment of Geothermal Resources In: Dickson, M.H., Fanelli, M. (Eds.), Small Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, 31-59.
- Hounslow, A., W. ve Back, D., B., 1985. Evaluation of Chemical Data from Water Supplies in Southwestern Oklahoma, Final Report to the Oklahoma Water Resources Board, 125-130.
- Hounslow, A., W., 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation, Lewis Publishers, 54.
- IAH (International Association of Hydrogeologists) 1979. Map of Mineral and Thermal Water of Europe, Scale: 1:500.000, IAH, United Kingdom.
- Hunt, T., M., 2001. Five Lectures On Environmental Effects of Geothermal Utilization, United Nation University, Geotermal Training Programme, Reykjavik, Iceland.
- İlker, S., 1966. Erzurum-Muş Bölgesinde Karaköse J 48 a4 ve J48 d1 Paftalarının 1 :25 000 Ölçekli Detay Petrol Etüdü Hakkında Rapor, M.T.A. Rap., 4177, Ankara (yayımlanmamış).

- Kangas, M., 1996. Modelling of Transport Processes in Porous Media for Energy Applications, Department of Technical Physics and Mathematics, Helsinki University of Fechnology, Finland.
- Ketin, İ., 1966. Anadolu'nun tektonik birlikleri, MTA Dergisi, 66,20-34
- Keskin, M., 1994. Genesis of Collision-Related Volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, Northeastern Turkey, Ph. D. Thesis, University of Durham, U.K.
- Kharaka, Y., K. ve Mariner, R., H., 1987. Chemical Geothermometers and Their Application to Formation Waters from Sedimentary Basins, In: Thermal History of Sedimentary Basins (Naeser, D., McCulloh, T.H., -eds), New York,75-102.
- Kılıc, O., 2006. Pasinler (Erzurum) Kuzeyindeki Volkanik Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Koçyiğit, A., 1985. Muratbağı-Balabantaş (Horasan) arasında Çobandede fay kuşağının jeotektonik özellikleri ve Horasan-Narman depremi yüzey kırıkları, C.Ü. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, Sivas, 2,17-33.
- Koçak, A., 2003. Jeotermal Enerji Ders Notları, M.T.A. Yayınlar, İzmir. 53 s.
- Kolditz, O., 2002. Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics, Springer, Berlin- Heidelberg-New York.
- Konak, N. ve Hakyemez, H.,Y., 2008. 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Tortum H-47 Paftası, M.T.A., Ankara.
- Korkmaz, S., Gedik, A. ve Pelin, S., 1991. Türkiye'deki bazı tortul havzalara petrol potansiyeli açısından bir bakış, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Ankara, 39, 5-14.
- Krouse, H.,R., 1980. Sulphur Isotopes in Our Environment. In: P. Fritz and J.-Ch. Fontes (Eds.), Handbook of Environmental Isotope Geochemistry I, The Terrestrial Environment, A. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 435-472.
- Küçük, O., 1991. Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS1-A Sıcaksu Kuyusu Sondaj Bitirme Raporu, M.T.A., Proje No: 91-103, Ankara.
- Leybourne, M., I., Goodfellow, W., D., Boyle, D.,R. ve Hall, G.,M., 2000. Rapid Development of Negative Ce Anomalies in Surface Waters and Contrasting REE Patterns in Groundwaters Associated with Zn-Pb Massive Sulphide Deposits. Appl. Geochem., 15, 695-723.
- Lipin, B., R. ve McKay, G.,A., 1989. Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy, vol. 21. Mineralogical Society of America, Washington D.C.
- Lund, J.,W. and Freeston, D.,H., 2001. World-Wide Direct Uses Of Geothermal Energy 2000. Geothermics, 30, 29-68.

- Majorowicz, J., A. and Jessop, A., M., 1981. Regional Heat Flow Patterns in the Western Canadian Sedimentary Basin. Tectonophysics, 74, 109–238.
- Mamontov, V., K., Yakovlev, A., G. ve Bayraktutan, S., M., 2005. Formation of the Geothermal Resources of the North-Eastern Part of Turkey, Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey
- Mazor, E., 1997. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, Applied Approach, 158-166.
- McNeely, R.,N., Neimanis, V.,P. ve Dwyer, L., 1979. Water Quality Sourcebook- A Guide to Water Quality Parameters: Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa, Canada, 88 p.
- McLennan, S., M., 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes, In: Lipin, B.R. & McKay, G.A. (eds) Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements, Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, 21, 169–200.
- Mercier, J., 1948. Hınıs 65/2 paftasının raporu, M.T.A. Der. Rap No: 2258 Ankara (yayımlanmamış).
- Muffler, P. ve Cataldi, R., 1978. Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources, Geothermics, 7, 53-89.
- Nathenson, M., Guffanti, M., Sass, J., H. and Munroe, R., J., 1982. Regional Heat Flow and Temperature Gradients. In: M. J. Reed (Ed.), Assessment of Low-Temperature Geothermal Resources of the United States, U.S. Geol. Surv. Circ., 892, 9-16.
- Nicholson, K., 1993. Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques, Springer-Verlag, Berlin, 263 p.
- Özmutaf, M. ve Gündüz, M., 2001. Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-4 ve PS-5 Sıcak Su Sondajları Kuyu Bitirme Raporu, M.T.A. Der. Rap No: 10475, Ankara (yayımlanmamış).
- Özkaya, M., 2007. Numerical Modeling Of Kızıldere Geothermal Field, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pamir, H.N. ve Baykal, F., 1943, Bingöl bölgesi ile buranın şimal ve cenubundaki jeolojik yapısı: M.T.A. Rap No: 1447 (yayımlanmamış), Ankara.
- Pelin, S., 1970. Pasinler-2 kuyu bitirme raporu. MTA Rap No: 4532, Ankara (yayımlanmamış).
- Pelin, S., 1981. Pasinler (Erzurum) havzasında anakaya özelliklerinin ve petrol oluşumunun açıklanması, KTÜ Yer Bilimleri Dergisi, 1,2,127-143.
- Piper, A., M., 1944. A Graphic Procedure in Geochemical Interpretation of Water Analyses, American Geophysical Union Transactions, 25,914–923.

- Polat, C., 2010. Numerical Modeling Of Balcova Geothermal Field, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Rathur, A.,Q., 1965. Pasinler-Horosan (Erzurum) Sahasına Ait Genel Jeolojik Rapor, M.T.A. Derleme Rapor No: 4168 (yayımlanmamış).
- Raznjevic, K., 1976. Handbook of Thermodynamic Tables and Charts, Washington DC, Hemisphere Publishing Corporation.
- Reiter, M., A. ve Jessop, A., M., 1985. Estimates of Terrestrial Heat Flow in Offshore Eastern Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 22, 1503-17
- Rogiers, B., Huysmans, M.,Vandenberghe, N. ve Verkeyn, M., 2014. Demonstrating large-scale cooling in a Variscan terrane by coupled groundwater and heat flow modelling, Geothermics 51: 71-90
- Rybach, L. ve Buntebarth, G., 1982. Relationships Between the Petrophysical Properties Density, Seismic Velocity, Heat Generation, and Mineralogical Constitution, Earth and Planetary Science Letters, 57, 367-376.
- Sarak, H., Satman, A. ve Onur, M., 2005. Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Rezervuarlar İçin Boyutsuz Rezervuar Modelleri İTÜ Dergisi, 4,3, 107-118.
- Schoeller, H., 1962. Les Eaux Souterraines, Mason et cie, Paris, 642 p.
- Shaw, D., M., Sturchio, N.,C., 1992. Boron-Lithium Relationships in Rhyolites and Associated Thermal Waters of Young Silicic Calderas, with Comments on Incompatible Element Behavior, Geochim. Cosmochim. Acta, 56, 3723-3731.
- Smethurts, G., 1979. Basic Water Treatment, Thomas Telford Ltd., London.
- Soytürk, N., 1973. Murat Baseni Jeolojisi ve Hidrokarbon İmkanları Raporu: TPAO, Arama Grubu Başkanlığı, Jeoloji Müdürlüğü, Rapor No: 791, 22 s.
- Soyaslan, İ., 2004. Eğridir Gölü Doğusunun Hidrojeoloji İncelemesi ve Yeraltısuyu Modellemesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Billimleri Enstitüsü, Isparta.
- Stevens, H., H., Ficke, J., F. ve Smoot, G., F., 1975. Water Temperature- Influential Factors, Field Measurement and Data Presentation, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geol. Survey, Chapter D1, Book 1, 65 p.
- Stober, I. ve Bucher, K., 1999. Deep Groundwater in the Crystalline Basement of the Black Forest Region, Appl. Geochem., 14, 237-254.
- Sungurlu, O., 1971. 1/50 000 ölçekli I47 a Paftasının Jeolojisi, TPAO Arama Grubu Başkanlığı, Jeoloji Arşivi, Ankara (yayımlanmamış).
- Şahinci, A., 1986. Yeraltı Suları Jeokimyası, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, MM/JEO-86, 99, İzmir.

- Şahinci, A.,1991. Jeotermal Sistemler ve Jeokimyasal Özellikleri, Reform Matbaası, İzmir, 247 s.
- Şaroğlu, F., 1985. Doğu Anadolu'nun Neotektonik Döneminde Jeolojik ve Yapısal Evrimi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şaroğlu, F. ve Yılmaz, Y., 1986. Doğu Anadolu'da neotektoniğin gelişime başlıca etkileri, TJK 1986, bildiri özetleri, s.5.
- Şengör, A., M., C., 1980. Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları (Fundamentals of the neotectonics of Turkey), Publication of Geological Society of Turkey, 40 p.
- Şimşek, M., 2012, Erzurum-Pasinler Uzunahmet-Hamamderesi 2012/17 Numaralı Ruhsata İlişkin İşletme Faaliyet Raporu, Rapor No:4839, Trabzon.
- Tanrıverdi, K., 1971. Erzurum (Söylemez) Yöresinin Jeolojisi ve Petrol Olanakları, M.T.A. Raporları, No: 6239 Ankara (yayımlanmamış).
- Tarcan, G., 2002. Jeotermal Su Kimyası, Jeotermal Enerji ve Araştırma ve Uygulama Merkezi (Jenarum) Yaz Okulu Ders Notları, İzmir, 198-230.
- Taşcı, A. ve Yurtseven, D., 1995. Pasinler (Erzurum) PS-3 Sondajı Kuyu Bitirme ve Koruma Alanları Raporu M.T.A. Derleme Raporları, No: 9863, Ankara.
- T.C. Resmi Gazete, 2004. Kaplıcalar Yönetmeliği, 4. Bölüm, 24472, 25.7.2001.
- T.C. Resmi Gazete, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 3. Bölüm, 25687, 31.12.2004.
- Thorntwaite, C., W., 1948. An Approach Toward a Rational Classification of Climate, Geograph., Rev. 38, 55-94.
- Tokel, S., 1965. Erzurum I16 b2 ve Tortum H46 c3 Paftalarına Ait Jeolojik Rapor, M.T.A. Rapor No: 4118 (yayımlanmamış).
- Toy, S., Çatakçı, S., Eymirli, E., B. ve Karapınar, M., 2010 Erzurum Termal Turizm Potansiyeli, Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı, Turizm Raporları, No:3, Erzurum.
- Truesdell, A., H., 1975. Summary of Section III Geochemical Techniques in Exploration, In: Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, 25-50.
- Trusdell, A., H., 1991. Effects of Physical Processes on Geothermal Fluids, In Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development (coordinator F.D'Amore), 71-92.
- TS 266, 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- URL-1 <http://www.jeotermaldernegi.org.tr>. TJD (Türkiye Jeotermal Derneği), Jeotermal Enerji. 08.11.2004.

- URL-2 http://www.mta.gov.tr/v2.0/dairebaskanliklari/enerji/index.phpidjeotermal_potansiyel Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyeli. 11 Kasım 2012.
- Uluşahin, A., 1992. Pasinler (Erzurum) Kaplıcası PS-2 Nolu Sıcaksu Sondajı Kuyu Bitirme ve Koruma Alanları Raporu, M.T.A. Derleme Raporu, No: 9442, Ankara.
- Uslu, O. ve Türkman, A., 1987. Su Kirliliği ve Kontrolü, Çevre Genel Md. Yay. Eğitim Dizisi, 1, 364 s.
- Ünal, Ç., 1994. Pasinler İlçesi'nin Coğrafi Etüdü, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.
- Wang, H., F. ve Anderson, M., P., 1982. Introduction to Groundwater Modeling Finite Difference and Finite Element Methods, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Waples, D., W. ve Waples, J., S., 2004. A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids, Part 1: Minerals and Nonporous Rocks: Natural Resources Research, 13, 2, 97-122.
- Weinstein, H., G., Stone, H., L. ve Kwan, T., V., 1969. Iterative Procedure for Solution of Systems of Parabolic and Elliptic Equations in Three Dimensions, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 8, 2, 281-287.
- W.H.O., 1984. Guidelines for Drinking Water Quality, Health Criteria and Other Supporting Information, WHO Publ., Geneva, Switzerland, 2, 335.
- W.H.O., 2008. Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd Edition.
- Viellard, P., 2000. A New Method for the Prediction of Gibbs Free Energies of Formation of Hydrated Clay Minerals Based on the Electronegativity Scale, Clays Clay Miner. 48, 459-473.
- Yıldırım, N., 2008. Tekman-Pasinler (Erzurum) Arasında Yüzeyleyen Ofiyolitik Birimlerin Jeolojisi Ve Petrografik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yılmaz, O. ve Şener, M., 1984. Erzurum-Pasinler, Erzincan-Çayırılı, Kars-Tuzluca, Malatya-Hacılar stratigrafik açınsama kuyulanna ait örneklerin x ışınları tekniği ile incelenmesi, TJK Bülteni, 27,1, 31-40.
- Yılmaz, A., Terlemez, İ. ve Uysal, Ş., 1986. Erzurum GD'sunda yer alan Hınıs-Tekman ve Karayazı arasının jeolojisi, M.T.A yayınları Rap No: 8089, Ankara.
- Yılmaz, A., Terlemez, İ. ve Uysal, Ş., 1989. 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Erzurum F-33 Paftası, M.T.A., Ankara.
- Yılmaz, N., S., 2013. Aydın ve Çevresindeki Jeotermal Sulardaki Bazı Elementlerin ve İyonların İcp-Oes ve İc ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın.

- Yurtsever, Y., 1978. Tabii İzotopların Hidrojeolojide Kullanılması Esasları ve Antalya Civarı Karstik Bölgede Yerüstü-Yer Altı Suyu İlişkisinin Tabii İzotoplarla Araştırılması Sonuçları, E.İ.E. Bülteni, 75-76, 1061-1080.
- Zheng, C. ve Bennett, G., D., 1995. Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice, Van Nostrand Reinhold (now John Wiley & Sons), New York, 440.
- Zheng, C., ve Bennett, G., D., 2002. Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

ÖZGEÇMİŞ

15.10.1980 tarihinde Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamlayarak 1997 yılında Trabzon Lisesi'nden mezun oldu. 1998 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2002 yılında başarıyla mezun oldu. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı ve aynı yılda Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. Yazar evli olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.