

KUYUCAK JEOTERMAL REZERVUARININ NÜMERİK MODELİ

NUMERICAL MODELING OF KUYUCAK GEOTHERMAL RESERVOIR

TUĞÇE YARGICI

DR. LEVENT TEZCAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Jeoloji (Hidrojeoloji) Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

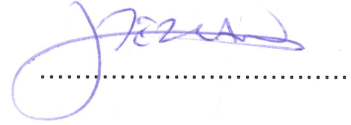
2018

TUĞÇE YARGICI'nın hazırladığı “KUYUCAK JEOTERMAL REZERVUARININ NÜMERİK MODELİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından JEOLojİ (HİDROJEOLojİ) MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

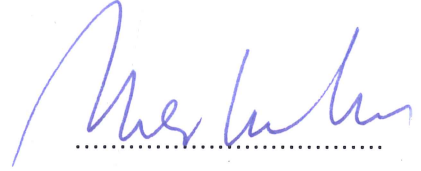
Prof. Dr. Mehmet ÇELİK
Başkan



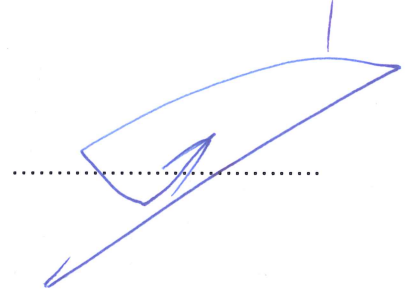
Dr. Levent TEZCAN
Danışman



Prof. Dr. Mehmet EKMEKÇİ
Üye



Doç. Dr. Hüseyin KARAKUŞ
Üye



Dr. Türker KURTTAŞ
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☐ Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☐ Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- ☒ Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

Tezde kullanılan veriler "gizlilik sözleşmesi"ne bağlı olarak kullanıldığı için, tezimin hiçbir şekilde erişime açılmasını, içindeki verilerin kullanılmasını ve fotokopi alınmasını istemiyorum. 08/07/2018


(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

Tugce Yargici

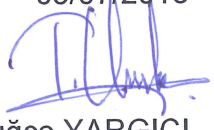
ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

08/07/2018


Tuğçe YARGICI

ÖZET

KUYUCAK JEOTERMAL REZERVUARININ NÜMERİK MODELİ

Tuğçe YARGICI

Yüksek Lisans, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Levent TEZCAN

Haziran 2018, 67 Sayfa

Türkiye’de jeotermal enerji üretimine olan ilgi ve yatırımlar artarken, sürdürülebilir kaynak yönetimi daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Bu bağlamda, sağlıklı bir jeotermal kaynak yönetiminin yapılabilmesi için nümerik jeotermal rezervuar modeli önemli ve etkin bir araçtır.

Tez kapsamında; Aydın ili Kuyucak İlçesi civarında bulunan ve jeotermal elektrik üretimi amaçlı 30 yıllık süre ile işletilmesi planlanan rezervuarın kavramsal modeli, jeolojik ve hidrojeolojik veriler değerlendirilerek ortaya konmuş, oluşturulan kavramsal model, FEFLOW programına aktarılarak nümerik olarak test edilmiştir.

Jeolojik katmanlar ve yapısal elemanlar programa aktarılmış, hidrolik ve ısı parametreleri ve kavramsal modeli temsil eden sınır koşulları tanımlanmıştır. Kararlı akım koşulları altında model çalıştırılarak, doğal durum modeli ortaya konmuştur. Doğal durum modeli sonuçları, kuyulara ait statik sıcaklık verileri ve hidrolik yük değerleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonucunda mevcut durumu temsil eden bir jeotermal rezervuar modeli ortaya konmuştur.

Model sonuçları, kabul edilebilir ve yönetilebilir bir jeotermal rezervuar modeli ortaya konduğunu gösterse de işletme parametrelerinin daha hassas tahmin edilebilmesi

için, uzun süreli işletme verileriyle yapılacak olan kararsız model kalibrasyonun da tamamlanması faydalı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Rezervuar Modeli, Nümerik Model, Jeotermal Enerji, Hidrojeoloji, Jeotermal Kavramsal Model



ABSTRACT

NUMERICAL MODELING OF KUYUCAK GEOTHERMAL RESERVOIR

Tuğçe YARGICI

**Master of Science, Geological (Hydrogeological) Engineering
Department**

Supervisor: Dr. Levent TEZCAN

June 2018, 67 pages

The increasing interest to geothermal investments in Turkey brings more attention to the sustainable resource management. Numerical modeling is a powerful and significant tool in order to achieve efficient geothermal reservoir management.

In project scope, the conceptual model of the geothermal field located in Aydın Kuyucak region was developed with interpretation of geological and hydrogeological data deriving from field and drilled wells. The geothermal resource is planned to be operated 30 years for electricity generation. The conceptual model was tested through numerical modelling using FEFLOW software.

The methodology includes transferring geological layers, tectonic elements, hydraulic and thermal properties to software and defining the boundary conditions. The natural state modeling was conducted in order to present the current situation and the results were calibrated using the observed static temperature values and hydraulic heads gathering from well logs.

A manageable and acceptable geothermal reservoir model of the field was achieved at the end of the study. In order to get more accurate results, a transient model run is recommended before using the model for operation scenarios.

Keywords: Geothermal Reservoir Model, Numerical Model, Geothermal Energy, Hydrogeology, Geothermal Conceptual Model



TEŞEKKÜR

Başta bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde daima yol gösterici ve yardımcı olan değerli danışman hocam Sayın Levent TEZCAN'a, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Mehmet EKMEKÇİ'ye, jeotermal enerji sektöründe yer almamda payı olan ve önerileriyle yoluma ışık tutan değerli hocam Sayın Şakir ŞİMŞEK'e, sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez süresi boyunca her zorluğu benimle birlikte göğüsleyen hayat arkadaşım Ahmet Fuat YARGICI'ya, hayatımın her safhasında beni sabırla destekleyen değerli annem Gülseren VELİBAŞOĞLU'na ve canım aileme teşekkür ediyorum.

Tez döneminde verdiği motivasyon sebebiyle canım arkadaşım Işıl ÖNGÖR'e, bu süreçte yol arkadaşlığı yaptığımız N. Erdem KALAYCIOĞLU ve Mehmetcan ÖZKADIOĞLU'na ve diğer arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Bu çalışmayı, tezimin son safhasındayken hayata gözlerini yuman dedem Kemal ÜNALAN'a adıyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Çalışma Alanı	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Çalışma Alanı ve Çevresi	3
2.2. Jeotermal Modelleme	4
3. JEOLojİK YAPI	6
3.1. Stratigrafi	8
3.2. Yapısal Jeoloji	13
4. HİDROJEOLojİK YAPI	16
4.1. Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri	16
4.2. Sahada Açılan Kuyular	17
4.3 Hidrojeokimya	18
4.3.1. Suların Majör Anyon ve Katyon İçeriği	19
4.3.2. Jeotermometre Analizi	21
4.3.3. Suların Duraylı İzotop Sonuçları	24
4.3.4. Döteryum-Beslenme Yüksekliği İlişkisi	25
4.3.5. Radyoaktif İzotop Sonuçları (Trityum)	26
4.4. Kuyu İçi Ölçümler ve Testler	27
4.4.1. Statik Sıcaklık Ölçümleri	30
4.4.2. Basınç Yükselim Testleri ve Geçirimlilik Değerlerinin Hesaplanması ..	34
5. KAVRAMSAL MODEL	39

5.1.	Jeotermal Rezervuar ve Örtü Tabakası	39
5.2.	Beslenme ve Dolaşım	41
5.3.	Isı Kaynağı	42
6.	JEOTERMAL SİSTEMİN NÜMERİK MODELİ.....	44
6.1.	Model Yazılımı	44
6.2.	Model Alanı ve Grid Tasarımı	44
6.3.	Hidrolik ve Isı Taşınımı Parametreleri	47
6.4.	Sınır Koşulları	49
6.5.	Sayısal Çözümleme	51
6.6.	Doğal Durum Modellemesi ve Parametre Kalibrasyonu.....	51
6.7.	Hassasiyet Analizi	57
6.8.	Örnek İşletme Senaryosu.....	60
7.	SONUÇLAR	63
	KAYNAKLAR.....	65
	ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1.Çalışma Alanı Yer Bulduru Haritası	2
Şekil 3.1. Türkiye'nin Neotektonik Haritası ([10]'den düzenlenerek).....	7
Şekil 3.2. Büyük Menderes Grabenine ait Genelleştirilmiş Stratigrafik Kolon Kesit ([5], [12], [13]'den alınmıştır).....	9
Şekil 3.3.Çalışma Alanına ait Genelleştirilmiş Stratigrafik Kolon Kesit ([3]'den alınmıştır)	10
Şekil 3.4.Gnays, Şistlerin kırık çatlaklarına yerleşmiş kuvarslar	11
Şekil 3.5. Çalışma Alanının Jeolojik Haritası ve Ana Fayları (Koçyiğit 2010'dan yeniden düzenlenerek [3])	14
Şekil 4.1. Çalışma Alanında Bulunan Kuyular	17
Şekil 4.2. Jeokimya Değerlendirmesinde Kullanılan Örnek Noktalarını Gösterir Harita.....	19
Şekil 4.3. Çalışma sahasında bulunan jeotermal kuyular (H-G kodlu), diğer jeotermal kuyulara (AP kodlu) ve diğer su numunelerine (J kodlu) ait Piper Diyagramı.....	20
Şekil 4.4. Çalışma sahasında bulunan jeotermal kuyulara (H kodlu), diğer jeotermal kuyulara (AP kodlu) ve diğer su numunelerine (J kodlu) ait Schoeller Diyagramı.....	21
Şekil 4.5. Analiz Sonuçlarının Giggenbach Diyagramı üzerinde Gösterilmesi ([17]'den düzenlenmiştir).....	22
Şekil 4.6. Akdeniz ve Küresel Meteorik Su Doğruları ve δD - $\delta^{18}O$ ilişkisi	25
Şekil 4.7. Kot (m)- δD ilişkisi.....	25
Şekil 4.8. Grabende Batıdan Doğuya Doğru Sıralanan örneklerin Tritiyum İçerikleri	27
Şekil 4.9.H-2 Kuyusu Kısa Dönem Akış Testinden Bir Görünüm	29
Şekil 4.10.H-1 Kuyusu Kısa Dönem Akış Testinden Bir Görünüm	29
Şekil 4.11. Kuyularda Hesaplanan Sıcaklık Gradyanı Değerleri ($^{\circ}C/100$ m).....	31
Şekil 4.12. Kuyu içi Statik Sıcaklık Loglarında Kondüktif ve Konvektif Isı İletim Bölgeleri	32
Şekil 4.13. Kuyuların Statik Su Seviyeleri, Litolojik Birimler ve Filtre açıklıkları (Filtre açıklıkları litoloji loglarının sol kısmında delikli işaretlerle belirtilmiştir.)	33

Şekil 4.14. Denklemin Uygulanmasına Örnek Bir Horner-Plot Eğrisi.....	35
Şekil 4.15.H-1 Kuyusu Horner-Plot Grafiği	36
Şekil 4.16.H-2 Kuyusu Horner-Plot Grafiği	36
Şekil 4.17.H-3 Kuyusu Horner-Plot Grafiği	37
Şekil 4.18.R-1 Kuyusu Horner-Plot Grafiği	37
Şekil 5.1. Kuyuların Derinlik (d), Kuyu Dibi Sıcaklık (KDS), Hidrolik Yük (h) ve Gradyan (T Grad) Değerleri	42
Şekil 5.2. Manyetotellürik Model Kesidi Üzerinde Sıcaklık Konturlarıyla Birlikte Hidrotermal Kavramsal Model Yaklaşımını Gösteren 2B Kesit (K-G) (Kırmızı zon Manyetotellürik ölçüsünün alınmadığı, yüzeyin üstünü, atmosferi simgelemektedir. Bu zonun rezistivite değeri gerçek ölçüm değildir)	43
Şekil 6.1. Model Alanı.....	45
Şekil 6.2. Üç Boyutlu Model Geometrisi	46
Şekil 6.3. Model Geometrisinde Aktif ve Aktif Olmayan Bölgeler.....	46
Şekil 6.4. Model Alanı Rezervuar Giriş Yüzeyinde Yatay Hidrolik İletkenlik Katsayısı (m/g) Dağılımı.....	47
Şekil 6.5. Model Geometrisinde İki Boyutlu Yatay Hidrolik İletkenlik Katsayısı (m/g) Dağılımı (Kuzey-Güney).....	48
Şekil 6.6. Model Geometrisinde İki Boyutlu Termal İletkenlik Katsayısı (J/m/s/K) Dağılımı.....	48
Şekil 6.7. Model Geometrisinde Sınır Koşullarının Gösterimi.....	50
Şekil 6.8. H-1 Doğal Durum Modellemesi Sonucunda Elde Edilen Sıcaklık Dağılımı	52
Şekil 6.9. H-1 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama	53
Şekil 6.10. H-2 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama	54
Şekil 6.11. H-3 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama	54
Şekil 6.12. H-5 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama	55
Şekil 6.13. R-1 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama	55
Şekil 6.14. Dört Kuyuda Ölçülen ve Hesaplanan Hidrolik Yük Değerlerinin Kıyaslanması.....	56
Şekil 6.15.Model Parametrelerinin Hassasiyet Analizi Sonucu Meydana Gelen Hidrolik Yük Farkı	58
Şekil 6.16.Model Parametrelerinin Hassasiyet Analizi Sonucu Meydana Gelen Sıcaklık Farkı	59

Şekil 6.17. Örnek Senaryo Sonucu Hesaplanan Hidrolik Yük Değerlerinin Zamanla Değişimi (S9 kodlu örneklerin özgül depolama değeri 10^{-9} , diğer örneklerin 10^{-6} 'dır.).....	61
Şekil 6.18. Örnek Senaryo Sonucu Hesaplanan Sıcaklık Değerlerinin Zamanla Değişimi	62



ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 4.1. Kuyu Bilgileri.....	18
Çizelge 4.2. Akışkanların Kuvars Jeotermometresine Göre Hesaplanan Rezervuar Sıcaklıkları, Katyon Jeotermometresine Göre Hesaplanmış Sıcaklıkları ve Kuyu içi Ölçülmüş En Yüksek Sıcaklıklarının Kıyaslanması.....	23
Çizelge 4.3.Kuyulara ait Akış Parametreleri	28
Çizelge 4.4. Kuyu içi Ölçümlerden Hesaplanan Sıcaklık Gradyanı Değerleri	30
Çizelge 4.5. Horner Plot Yönteminde Kullanılan Parametreler	38
Çizelge 6.1. Kalibrasyon Sonucu Nihai olarak kullanılan Model Parametreleri	53



1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Tez çalışmasının amacı, Aydın ili Kuyucak İlçesi civarında bulunan ve jeotermal elektrik üretim amaçlı işletmeye alınarak en az 30 yıl süreyle sağlıklı bir şekilde işletilmesi planlanan sahada, jeotermal sisteminin kavramsal ve nümerik modelini ortaya koymaktır. Nümerik modeller işletme döneminde rezervuarın sürdürülebilir olarak işletilmesinde yol gösterici olmaktadır.

Büyük Menderes grabeninde yer alan jeotermal rezervuara ait jeolojik, jeokimyasal, jeofizik ve hidrojeolojik veriler kullanılarak öncelikle kavramsal model kurgulanmıştır. Literatür verileri, kuyu içi litolojik loglar, sıcaklık, basınç logları ve kuyu test verileri kullanılarak model katmanları ve ısı ve akışkan taşınımına doğrudan etki eden model parametreleri belirlenmiştir. Tüm elde edilen verilerle ve belirlenen sınır koşullarıyla, işletme öncesi sisteme herhangi bir baskının olmadığı koşulları yansıtan, doğal durum modellemesi kurgulanmıştır. Doğal durum modellemesi, işletme öncesi elde bulunan sıcaklık ve hidrolik yük verileriyle kalibre edilmiştir. Yapılan kalibrasyon sayesinde kavramsal modelin kabul edilebilirliği ortaya konmuştur. Kalibre edilen modelin sıcaklık ve hidrolik yük çıktıları kullanılarak sisteme dışarıdan yapılan üretim ve reenjeksiyon müdahalesiyle model çalıştırılmış ve örnek bir işletme etkisi gözlemlenmiştir.

1.2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Aydın ili Kuyucak ilçesi civarında bulunmaktadır. Jeotermal sahanın işletme hakkı özel bir şirket tarafından jeotermal elektrik üretim amacı ile alınmıştır. Sahanın 30 yıl süre ile sürdürülebilir olarak işletilmesi hedeflenmektedir.

Çalışma alanının yer aldığı Kuyucak İlçesi, Aydın ilinden Denizli iline doğru uzanmakta olup, Nazilli ve Buharkent ilçeleriyle komşudur.

Sahanın yer bulduru haritası Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1.Çalışma Alanı Yer Bulduru Haritası

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Alanı ve Çevresi

Şimşek (1984) [1], grabenin jeolojik haritasını çıkarmış, birimleri stratigrafik olarak ayırtlamış, grabende genel jeotermal sistemin kavramsal modelini ortaya koymuştur. Araştırmacı, Menderes metamorfikleri ve Pliyosen çökellerini formasyonlara ayırtlamış ve adlandırmıştır. Büyük Menderes doğu-batı fayını araştıran Şimşek (1984), jeotermal alan oluşmasında fayların etkili olduğunu belirtmiş, jeotermometreler yardımıyla Kızıldere, Tekkehamam, Yenice alanlarındaki rezervuar sıcaklıklarını ortaya koymuş, hazırladığı kavramsal model kesitleriyle jeotermal akışkan taşınımını göstermiştir. Çalışmasında, rezervuarın besleniminin ana faylar boyunca olduğunu belirtmiş, jeotermal rezervuarların besleniminin toplam $145,5 \times 10^6$ ile 420×10^6 m³/yıl arasında olduğunu hesaplamıştır. Jeotermal rezervuarın beslenmesinin yalnızca yer üstü beslenmesine bağlı olmayıp, yoğun kırık çatlak sistemleriyle olabileceğini belirtmiştir.

Göktürkler (2002) [2], sonlu farklar algoritması ve kıtasal kabuk modeli ve kondüktif ısı akımını baz alarak, iki boyutlu olarak grabenin ısı taşınım mekanizmasını çalışmıştır. Araştırmacı, sonlu farklar algoritması ile grabende ısı transferi dinamiğini çalışmış, ısı akısı değerinin 70-80 mW/m² arasında olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında sediman dolu grabenin, çevre bölümlere göre 15-20°C daha sıcak elde edildiğini belirtmiştir.

Koçyiğit (2010) [3], bölgenin jeolojik ve tektonik yapısını ortaya koymuş, çalışma alanının temel kayacını Menderes masifine ait örtü ve çekirdek olarak tabir edilen kompleksin oluşturduğunu, metamorfik temelin üzerine, uyumsuzlukla graben dolgularının geldiğini söylemiştir. Çalışmasında ayrıca, sıcak akışkan taşınımında rol oynayabilecek ana fayları ortaya koymuş, haritalamıştır. Sıcak akışkan taşınımında rol oynayan ve yaklaşık 10 km derinliğe uzanan bu ana faylar, Gedik Künüpe ve İğdecik fayları olup, çalışma sahasına konu Çobanisa fay zonu ve Kayrandere transfer zonu da araştırmacı tarafından çalışılmıştır.

Atmaca (2010) [4], Pamukören sahasında Monte Carlo istatistiksel metodunu kullanarak rezerv kapasitesini hesaplamış ve üretim senaryolarını çalışmıştır. Araştırmacı, Pamukören sahası için %90 olasılıkla 45.2 MWe, %50 olasılıkla 110.45 MWe, %10 olasılıkla ise 233.09 MWe enerji kapasitesi hesaplamıştır.

Karakuş (2010) [5], Büyük Menderes Grabeni'nde sıcak ve soğuk suların hidrojeokimyasal özelliklerini araştırmış ve grabenin farklı bölgelerinde ısı taşınım mekanizmasının modelini ortaya koymuştur. Isı taşınım modellerinde 85-116 mW/m² değerleri arasında değişen ısı akıları hesaplamıştır. Rezervuar kayacın şistler olduğunu belirtmiş, fay zonları dışında kalan bölgelerde mermer dışındaki metamorfiklerin genellikle geçirimsiz olduğunu söylemiştir. Grabenin doğusundaki sahalarda göreceli olarak yüksek R/R_a değerlerinin mantosal kökenli helyumun varlığını yansıtırken, batı yönünde ilerledikçe bu değer azaldığını belirleyen araştırmacı, doğudan batıya bir derin dolaşım sisteminin varlığına işaret etmiştir. Araştırmacı, kavramsal model çalışmaları sonucunda, grabendeki rezervuarlarda genel olarak kuzeyden düşen yağışlarla beslenme ve çöküntü alanlarına doğru bir yeraltısuyu akımını ve Ege denizine doğru doğu-batı bileşenli yeraltısuyu akımını saptamıştır. Ancak grabendeki özellikle yüksek sıcaklıklı akiferlerde güncel beslenime ilişkin bir kanıt olmadığını ve derin dolaşımlı sistemlerin hakim olduğunu belirtmiştir.

Bilim vd. (2015) [6], aeromanyetik verilerin spektral analizini yaparak Büyük Menderes Grabeni'nin ve Ege bölgesinin ısı akısı, radyojenik ısı taşınımı, Curie noktası derinliği haritalarını oluşturmuşlardır. Araştırmacılar, çalışma alanında 42.02 °C/km ve 93.40 °C/km arası jeotermal gradyan değeri hesaplamışlardır. Isı akısı değerleri ise 2.5 ve 2.7 W m⁻¹ K⁻¹ ısı iletkenlik değerleri için 105.07 ve 252.18 mW m⁻² arasında değişmektedir. Isı akısının ve jeotermal gradyanın yüksek olduğu alanların, sıcak su çıkış noktalarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

2.2. Jeotermal Modelleme

Jeotermal modelleme ile ilgili çalışmalar 1980'li yıllarda Stanford Jeotermal Programı kapsamında, "Code Comparison Study" projesi ile ortaya çıkmış, proje kapsamında farklı simülatörler test edilmiştir. Jeotermal rezervuar simülasyonlarında bilgisayar yazılımlarının kullanılmasıyla birlikte, dünya çapında 100'ü aşkın sahada jeotermal simülasyon modelleri kurgulanmıştır. Yazılımlar, Berkeley Ulusal Laboratuvarı, US Geological Survey, Auckland Üniversitesi ve GeothermEX gibi bazı özel şirketler bünyesinde geliştirilmiştir [7].

Bu gelişmelerden itibaren, dünya çapında sıklıkla kullanılan jeotermal simülasyon programları, STAR, TETRAD ve TOUGH2 gibi programları olmuştur. Günümüzde,

FEFLOW gibi yeraltısuyu ve ısı taşınımını entegre modelleyebilen yazılımlar da kullanılmaya başlanmıştır.

Modelleme çalışmalarının gelişmesinde ilk kapsamlı tecrübeler, 1990-1993 yıllarında Olkaria, Kenya ve Nesjavellir, İzlanda sahalarında Bodvarsson ve diğer araştırmacılar tarafından, bir dizi art arda proje ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda jeotermal model, jeotermal üretim, reenjeksiyon stratejileri ve elektrik üretim kapasiteleri tahminlerinde kullanılmıştır [7].

İlk jeotermal model çalışmalarında rezervuardaki akışkan yalnızca su olarak ele alınırken, CO₂ gibi yoğunlaşmayan gazların dahil edilebildiği versiyonlar da ortaya çıkmıştır.

Jeotermal modelleme çalışmalarında, kalibrasyon verisi olarak, sıcaklık, basınç, hidrolik yük, kuyu debileri gibi veriler sıklıkla kullanılıyor olsa da, jeofizik, jeokimya, mikrosismik ve izleyici verilerinin de kalibrasyon verisi olarak kullanıldığı çalışmalar da ortaya çıkmaya başlamıştır [7].

3. JEOLJİK YAPI

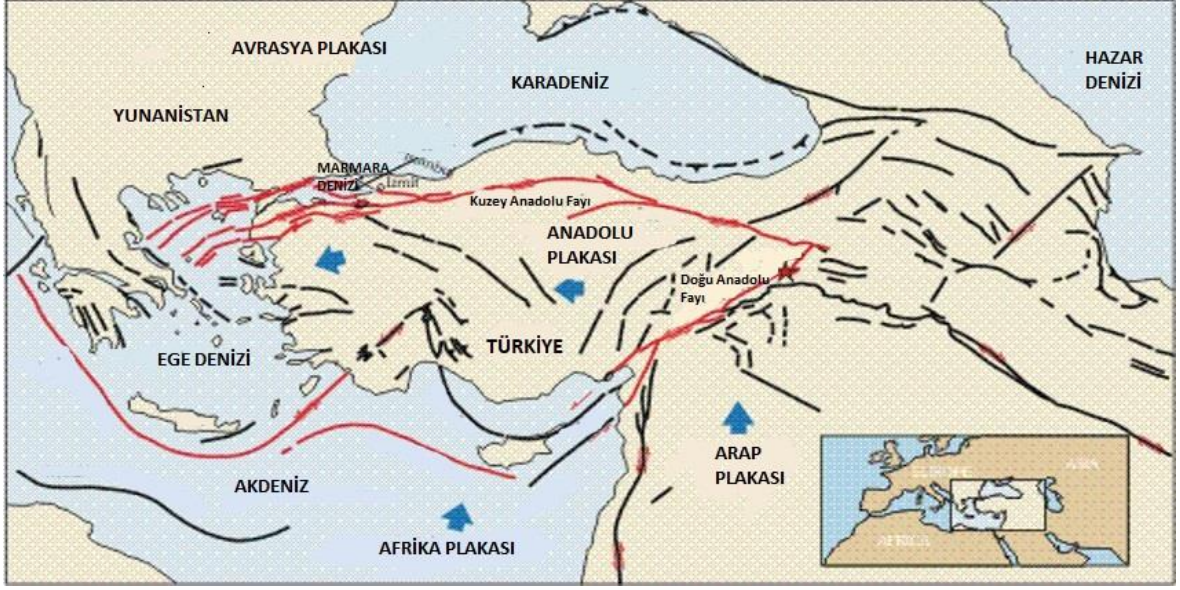
Çalışma alanı, Büyük Menderes Grabeni üzerinde yer almaktadır. Büyük Menderes Grabeni'nin karmaşık jeolojik ve tektonik tarihi bugüne dek birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır.

Batı Anadolu'da D-B doğrultulu ana yapılardan biri olan Büyük Menderes Grabeni, doğuda Denizli havzasından batıda Ege Denizi'ne kadar uzanmaktadır. Yaklaşık uzunluğu 150 km olan Büyük Menderes Grabeni yarı graben niteliğindedir. Büyük Menderes grabenindeki jeotermal aktivitenin önemli bir kısmının grabenin kuzeyinde gerçekleştiği daha önce yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur [1], [5].

Menderes masifinin ilk metamorfizmasının Kambriyen/Ordovisyen sınırında olduğu [8], masifin bugünkü halini almasındaki ana metamorfizmanın ise İzmir-Ankara Zonu'na ait okyanus ofiyolit naplarının kuzeyden Menderes Masifi istifi üzerinden geçmesi ile oluştuğu bilinmektedir [5].

Mc Kenzie (1972) modeline göre, Arap Plakası Anadolu Plakası'na bindirmektedir. Bu bindirme sebebiyle Anadolu Plakası batıya doğru hareket eder ve Ege Plakası'nın güneybatıya doğru hareket etmesini sağlar. Ege Plakası'nın güneybatıya doğru hareket etmesi nedeniyle oluşan genişlemede, Batı Anadolu'daki D-B yönlü çok sayıda normal fay oluşmuş, ikinci aşamada sıyrılma fayları sayesinde açılarak yayılmıştır [9].

Türkiye'de ana fay hatlarının ve plaka sınırlarının gösterildiği harita Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Türkiye'nin Neotektonik Haritası ([10]'den düzenlenerek)

Çalışma alanının yer aldığı Menderes Masifi ana hatları ile çekirdek olarak nitelendirilen bir Pan Afrikan temel ile onu üzerleyen Alt Paleozoyik-Paleosen yaşlı örtü serilerinden oluşmaktadır. Temel'in tipik özelliği, özünde alt katmanlarda yer alan gnaysların, bir sürüklenme zonunun üzerinde aktarılacak kesitin üst düzeylerine yerleşmiş olmasıdır. Çalışma yapılan bölgede temelin üzerinde değişik litolojilere sahip Miyosen yaşlı tortullarda oluşan bir kesit bulunmaktadır. Graben dolgusu genel olarak Miyosen çökellerinin KD-GB ve KB-GD uzanımlı normal faylarıyla sınırlanan eski grabenleri dolduracak şekilde birikmiştir [3]. Devam eden bölümde çalışma alanının stratigrafisi anlatılmış olup, sahaya ait jeoloji haritası Şekil 3.5'de verilmiştir.

3.1. Stratigrafi

Çalışma alanının çok büyük bir kısmı grabenin kuzeyindeki horst üzerinde yer almaktadır. Çalışma alanı içinde büyük bir alanda, temele ait allokton gnays birimi yüzeylenmektedir. Grabenin örtü birimlerine ait kayaçlar ancak vadi içlerinde akarsuların taşıdığı ve biriktirdiği güncel birimler olarak ve sahanın güneyinde ana graben faylarının ötesinde gözlenmektedir. Sık bitki örtüsü ve dik vadi yamaçları, nemli-sıcak iklim ve derin vadiden akan derenin de aşındırması sebebiyle meydana gelen yüzey alterasyonları özellikle temele ait mostraları görmeyi ve ayırtlamayı zorlaştırmaktadır.

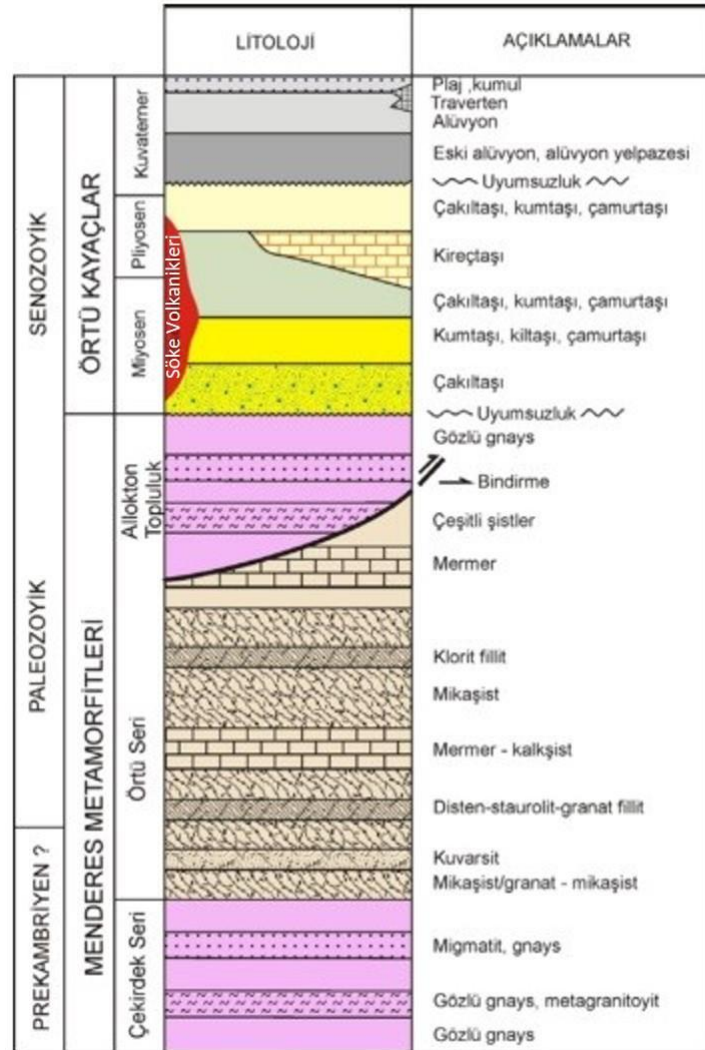
Çalışma alanı ve çevresinde, büyük alanlar kaplayan metamorfik temelin üzerine uzun bir stratigrafik boşluktan sonra, karasal Üst Miyosen çökelleri açısız uyumsuzlukla gelmektedir. Aşınım yüzeylerinde ayrılmış gnays, kuvarsit, mermer çakıllarının akarsu ortamında birikmesiyle Üst Miyosen birimleri oluşmuştur. Bu kaba taneli kırıntılar üzerine yine açısız uyumsuzlukla, Pliyosen yaşlı, gölsel kumtaşı, kiltası, marn çökelleri gelmektedir. Gölsel Pliyosen çökelleri, yanal olarak akarsu ortamı birimlerine geçişlidir. Pliyo-Kuvaterner'de, tektoniğin etkinliği sonucu, iri bloklar içeren, yaygın alüvyon yelpazeleri oluşmuştur. Kuvaterner'de ise güncel alüvyon yelpazeleri, yamaç molozları ve travertenler oluşmuştur [3].

Temel Kayaçlar

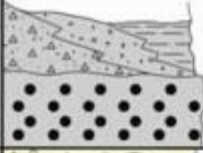
Çalışma alanının temel kayaçları Menderes Masifi ile karakterize edilebilir ve bu masif yapısal olarak dom şekilli, çekirdek karmaşığdır. Menderes masifi, birbirinden aralarındaki uyumsuzluk sayesinde ayrılabilen 2 ana metamorfik kayaç birliğinden oluşmaktadır. Menderes Masifinin içerdiği birliklerin ilki yüksek basınç / yüksek sıcaklık metamorfik kayaçlarının bir kombinasyonudur. Bu kısım aynı zamanda masifin çekirdeği olarak da bilinmektedir. Çekirdek kayaları gözlü gnayslar (ortognayslar), metagranit, şist, paragnays ve metagabrolardan oluşmaktadır [11]. Çekirdek ve örtü kayaları olarak adlandırılan kayaç birlikleri arasındaki süreksizlik veya kontak halen tartışılmakta olan bir konudur. Örtü ise, mikaşist, fillit, meta-kuvarsit, meta-bazit, meta-granit, kloritoyit-kiyanit şist, metakarbonat ve metaolistostromdan oluşmaktadır [1].

Menderes masifine ait çekirdek ve örtü kayaçları, geniş alanlarda gözlenirse de saha jeolojisi çalışmalarında bu birimlerin sınırları ayırt edilememiştir. Bu nedenle birimler Koçyiğit (2010) tarafından “Menderes metamorfikleri” ismiyle, ayırtlanmadan verilmiştir.

Arazide gözlenen en yaygın temel kayaçlar gözlü gnayslar, amfibolitler, kuvarsit ve kuvars mikaşistler, kalkışist ve mermerlerdir. Menderes masifindeki gözlü gnayslar, devamlılığı olmayan tektonik dilinimlerde, üzerlenmiş yığınlarının içinde Likya Naplarının güneye doğru tektonik taşınması sürecinde ortaya çıkmıştır [3]. Büyük Menderes Grabeni için Karakuş (2010) tarafından sadeleştirilen stratigrafik kolon kesit ve çalışma alanı için Koçyiğit (2010) tarafından hazırlanan stratigrafik kolon kesitte görülen litolojik birimler Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Büyük Menderes Grabenine ait Genelleştirilmiş Stratigrafik Kolon Kesit ([5], [12], [13]'den alınmıştır)

YAŞ	BİRİM	KALINLIK	LİTOLOJİ	TANIM	TEC PER
Kuvaterner	Aşağıtekte F.	~400 m		Kenar (alüvyal fan) ve graben tabanı sedimanları Teras Konglomeraları (kenar fasiyesi) Bölgesel diskonformite	NEOTEKTONİK PERİYOT
Geç Pliyosen	Kestel Formasyonu	~1200 m		Debriz akışı ve flüvyal depoları: merceksele çamurtaşı arakatkılı kırmızı, sarımsı gri, poligenetik, iyi boyanmamış, zayıf dereceli yataklanma gösteren, çakıl, iri çakıl ve blok boyutlarında konglomera, kumtaşı ve silttaşı alterasyonu	
Geç Erken-Geç-Orta Miyosen	Kızılburun Formasyonu	~800 m		Açısal Uyumsuzluk Taşkın düzlüğü-sığ su çökelleri: Kömür yatağı arakatkılı gri-mavi-beyaz kumtaşı-silttaşı şeyl ve marn Temel Konglomeralar: kırmızı çamurtaşı arakatkılı poligenetik, iyi boyanmamış, ince tabakalıdan masife kadar değişen çakıl-iri çakıl ve blok konglomeraları	PALOTEKTONİK PERİYOT
Erken Miyosen	Temel Menderes Masifi	X		Non-Konformite Temel: ters faylanmış gözlü gnayslar, amfibolit, kuvarsit, mermer, kuvars-klorit mikaşist, mikaşist, kalkışist X: ters fay	

Şekil 3.3.Çalışma Alanına ait Genelleştirilmiş Stratigrafik Kolon Kesit ([3]'den alınmıştır)

Sahada, vadi içinde kuzeyden güneye doğru indikçe, kırık ve çatlakların içine yerleşmiş olarak bulunan ve hidrotermal aktivite ürünleri olduğu düşünülen emareler görülmüştür. Kuzeyden güneye doğru yol yarmalarında, gnays ve şistlerin içindeki kırık çatlaklara yerleşmiş olarak bulunan geniş uzanımlı kuvars damarları gözlenmiştir. Bu damarların, sıcak akışkanın yüzeye yükselmesi ve kayaç ile teması esnasında kuvars çökeline bağlı olarak meydana geldiği düşünülmüş ve jeotermal aktivitenin göstergesi olarak yorumlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4.Gnays, Şistlerin kırık çatlaklarına yerleşmiş kuvarslar

Bölgede açılan gerek dar çaplı araştırma kuyularında, gerekse geniş çaplı üretim ve reenjeksiyon amaçlı kuyularda, güncel alüvyon ile başlayan seri, allokton gnayslarla devam etmekte, sonrasında kuvarsit, mermer, kuvars-klorit mikaşist, kalkşistlerden oluşan bir seri kesilmekte, sonrasında jeotermal üretimin yapıldığı kalkşist ve mermerlere girilmektedir. Bu seri, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de verilen stratigrafik kolon kesitteki birimlerle oldukça uyumlu izlenmektedir. Kuyuların açıldığı bölge; horstta yer almakta olduğundan, güncel alüvyon birimi dışında aşağıda bahsedilen ve genç örtü birimleri olarak tanımlanan Miyosen-Kuvaterner yaşlı örtü birimleri kesilmemiştir.

Örtü Kayaçlar

Genellikle, Miyosen-Kuvaterner yaşta olan graben dolguları yaklaşık 2-3 km kalınlıktadır [1]. Fasiyes yaşları baz alınarak; çalışma alanındaki graben dolguları 3 stratigrafik birime ayrılmıştır. Bunlar yaşlıdan gence doğru, Kızılburun formasyonu, Kestel formasyonu ve Aşağıtekke formasyonudur [3].

Kızılburun Formasyonu

Kızılburun Formasyonu, graben dolgusunun en alt birimidir. Temel konglomeraları içeren kırıntılar, direkt olarak altındaki temel kayaktan türeyen gnays, kuvars, kuvarsit, kuvars mikaşist, amfibolit, mermer ve kalkışist içerirler [3].

Kestel Formasyonu

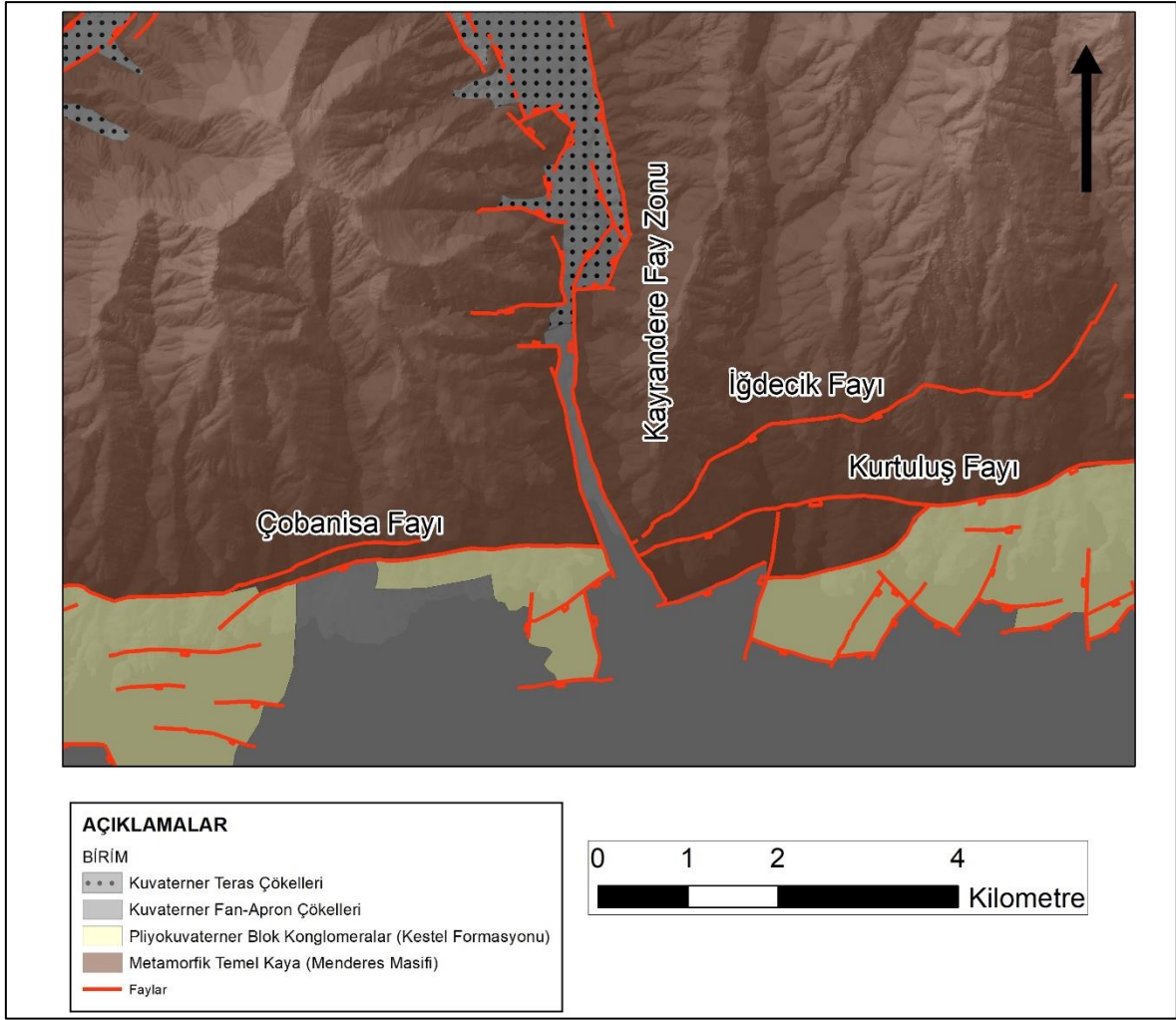
Bu formasyon iyi boylanmamış, polijenetik ve zayıf tıkızlaşmış iri taneli-bloklı konglomeralardan ve kalınlıkları yaklaşık 1.2 km olan tortul breşlerden oluşmaktadır. Büyük Menderes Grabeni'nin kuzey sınırını şekillendiren, 2-6 km arası genişlikte değişen ve belirli bir çizgisellik sunan bir formasyon yükselip, parçalanıp, devrilmiştir. Grabenin kuzey kenarında yer alan daha sonra fan önü depozitleri ile bütünleşen alüvyal fanlar yükselmiş, parçalanmış ve sınır faylarına farklı mesafelerde ve 10° - 40° arasında değişen açılarla geri tiltlenmiş ve kıvrımlanmışlardır [3].

Aşağıtekke Formasyonu

Bu formasyon yaklaşık 400 m kalınlığındaki, zayıf tıkızlaşma gösteren graben dolgularından oluşmaktadır. Kompozisyonu çoğunlukla gözlı gnayslar, kuvars, kuvarsit, mermer, kalkşıst, kuvars-epidot, klorit, mikaşıst, kumtaşı ve gölssel kireçtaşlarından oluşmaktadır. Yarı veya tam yuvarlaklaşmış şekilde ve 20 cm çaplı kaba taneliden kum boyuna kadar değişebilen kırıntılıları kapsarlar [3].

3.2. Yapısal Jeoloji

Çalışma alanı, Büyük Menderes Grabeni'ninin kuzeyini sınırlayan sıyrılma fayının etkisiyle karakterizedir. Sahada bu doğu-batı uzanımlı fayların jeotermal akışkanı taşıyıcı ana elemanlar olduğu düşünölse de, bu faylara paralel ve dik olarak gelişmiş ikincil zonların da jeotermal akışkanın iletilmesinde rol oynadığı düşünölmektedir. Sahada jeotermal etkinliğe etkisi olduğu düşünölen ana faylar, Çobanisa fayı, Kurtuluş fayı, İğdecik fayı ve Kayrandere faylarıdır. Bölgenin jeolojisi ve fayları daha önce Koçyiğit (2010) tarafından haritalanmıştır. Sonrasında bu faylar ve birimler arazide gözlemlenmiş, haritanın bazı noktaları ve fayların gidişatları bu bilgiler doğrultusunda güncellenmiştir. Jeolojik harita Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Çalışma Alanının Jeolojik Haritası ve Ana Fayları (Koçyiğit 2010'dan yeniden düzenlenerek [3])

1- Kayrandere Fay Zonu

Kayrandere Fay Zonu, transfer ve normal fay özelliği ile karakterize olup, K-G uzantılı bu fay zonu yaklaşık 0.2-2.0 km genişliğinde ve 7.5 km uzunluğundadır. Fay, birçok küçük paralel fay segmentlerinden oluşmaktadır. Bu fayın metamorfik kayaları keserek yaklaşık 100 m kadar düşeyde hareket ettirdiği bilinmektedir [3]. Kayrandere fay zonunun yarattığı kırık çatlak yapısının jeotermal rezervuarın oluşumunda rol oynadığı düşünülmektedir (Şekil 3.5).

2- Sarıhan ve Çobanisa Fayları

Çalışma alanının hemen güneyinde, graben ve horst yapısını sınırlayan ve D-B uzanmakta olan Çobanisa fayının 4 km olduğu belirtilmiştir. Çobanisa fayı DKD uzanımlı olup basamak tipinde gelişmiştir (Şekil 3.5). Metamorfik temeli kesen bu fay Kestel formasyonunun konglomeraları ile temel kayaların dokanağını

oluşturmuştur. Çobanisa fayına paralel uzanan ikinci fay da Sarıhan fayı olarak adlandırılmış olup, 5 km uzunluk tanımlanmıştır. Başlangıçta düşük-açılı listrik özellikte gelişen bu yapılar Pliyo-Kuvaterner döneminde yüksek-açılı normal fay karakteri kazanmışlardır [3] .

3- İğdecik Ayrılma Fayı ve Kurtuluş Fayı

İğdecik fayı, çalışma alanının GD ucunda 30 m genişliğinde ve 9 km uzunluğunda DKD yönlü, düşük açılı normal bir faydır. Kurtuluş fayı ise çalışma alanının güneyinde 50 m genişliğinde ve 10 km uzunluğunda DKD yönlü, oblik atımlı normal bir faydır. İğdecik ve Kurtuluş faylarının her ikisi de sıyrılma fayı niteliğinde olup, sonrasında yeniden aktifleşerek daha yüksek açılı normal fay özelliği kazanmışlardır [3]. Kurtuluş fayı, Çobanisa fayının devamı niteliğinde gibi görünse de bu fayların doğrultuları arasında K-G doğrultuda görülen mesafe farkı, bu fayların, Kayrandere fay zonu gibi transfer bir zon aracılığıyla ayrılmaya uğradığını düşündürmektedir (Şekil 3.5).

4. HİDROJEOLojİK YAPI

Çalışma alanında hidrojeolojik yapı ortaya konulurken, kuyuların litoloji logları, kuyu içi sıcaklık logu ölçümleri, kuyularda gerçekleştirilen kısa dönem akış testleri sonrasında yapılan basınç yükselim testleri, saha ve çevresinde yer alan soğuk-sıcak su ve kuyu akışkan analizleri dikkate alınmıştır.

4.1. Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri

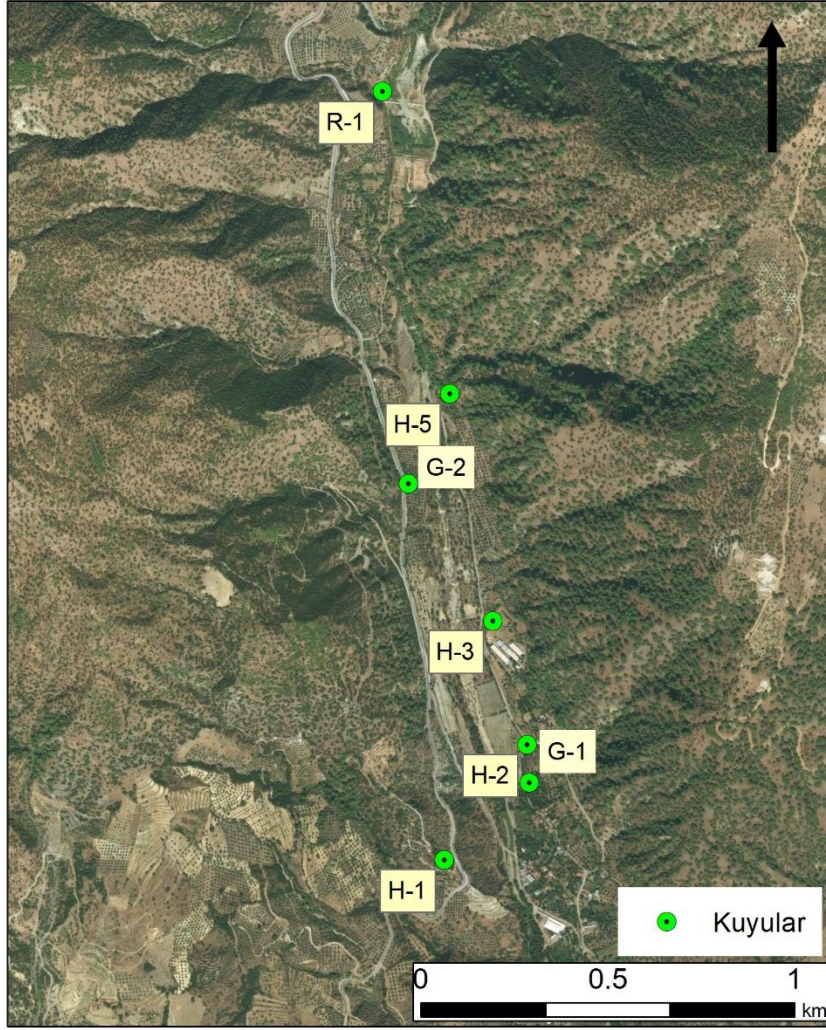
Çalışma alanında açılan kuyularda, Pliyo-Kuvaterner ve Miyosen yaşlı kayaçlar kesilmeksizin, güncel alüvyondan sonra direkt olarak Menderes Metamorfiklerinin çeşitli kayaç gruplarının kesildiği görülmektedir. Kayaçlar temel olarak geçirimli ve geçirimsiz olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir.

Geçirimli Birimler: Çalışma sahasında jeotermal rezervuar niteliği taşıyabilecek yüksek geçirimli birimler, yoğun kırık ve çatlaklı yapıya sahip olan Menderes Masifi'nin mermer ve şist seviyeleridir. Menderes metamorfikleri olarak tanımlanan ve içinde gnays, şist, mermer gibi farklı seviyeleri barındıran kayaçların birincil gözenekliliği yok denecek kadar zayıf olmakla beraber, bu kayaçlardan bazıları genç ve gerilmeli tektonik etkinliğin altında, faylar ve kırık çatlaklar sayesinde ikincil geçirimlilik kazanmıştır. Bu ikincil geçirimlilik, jeotermal rezervuarın oluşmasındaki etkindir. Suyun hareketine sebep olan kırık, çatlak, fay ve kanallar bu kayaçların içinde homojen bir dağılım göstermemektedir.

Geçirimsiz Birimler: Kuyularda görülen litolojiler dikkate alındığında, çalışma sahasında görece geçirimsiz özellik gösteren kayaçlar, yine Menderes metamorfiklerinin gnays seviyeleri ve şist aralanmalı seviyeleridir. Bu kayaçların, geçirimsiz olarak, diğer birimlerden ayırt edilmesinin sebebi, sıcaklık loglarında görülen kondüktif ısı iletimine izin vermekle beraber, çok düşük geçirimli yapıları nedeniyle, rezervuar olarak tanımlanabilecek seviyede sıcak akışkan iletimine izin vermemeleridir.

4.2. Sahada Açılan Kuyular

Çalışma sahasında, 4 adet üretim kuyusu, 1 adet reenjeksiyon kuyusu ve 2 adet araştırma amaçlı açılmış gradyan kuyusu bulunmaktadır. Üretim ve reenjeksiyon kuyuları test amaçlı, dar çaplı kuyular ise karot alımı ve sıcaklık-basınç logu alımı amacıyla kullanılmıştır. Çalışma alanında yer alan kuyular Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışma Alanında Bulunan Kuyular

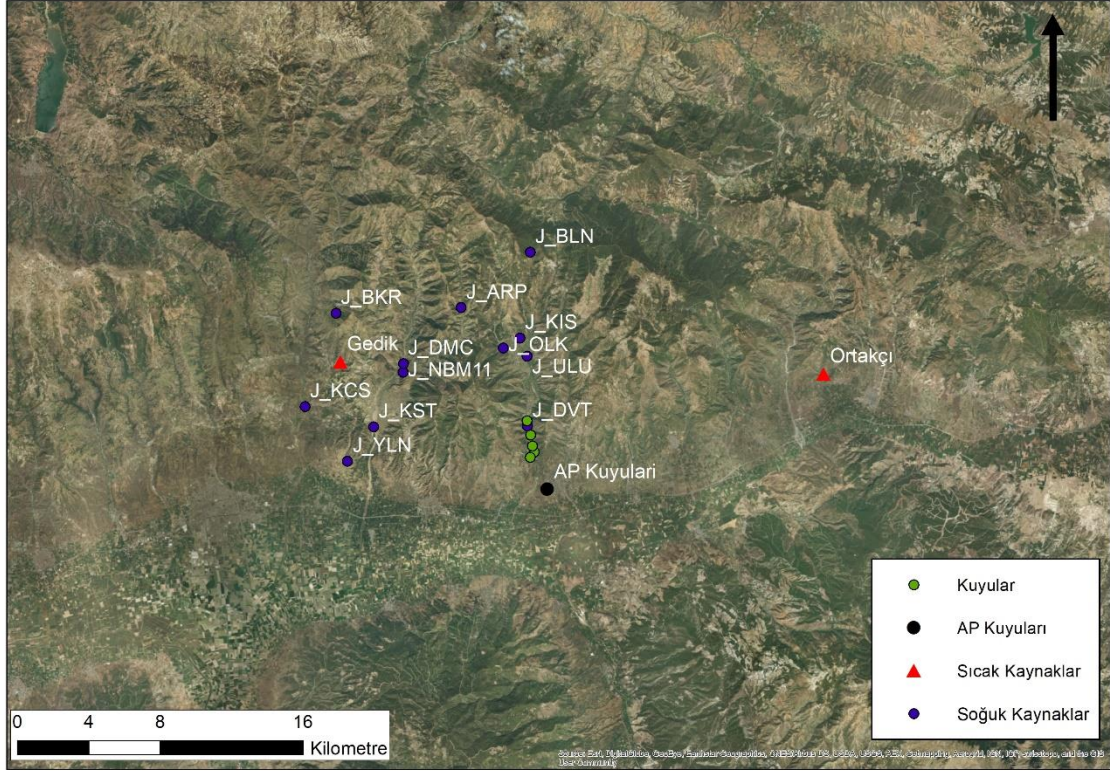
Çalışma alanında açılan kuyuların derinlikleri 1444 m ile 2324 m arasında değişmektedir. Kuyulara ait genel bilgiler Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Kuyu Bilgileri

Kuyu Adı	Türü	Ağız Kotu (m)	Derinlik (m)
G-1	Karotlu Kuyu	246	1444
G-2	Karotlu Kuyu	306	1690
H-2	Üretim Kuyusu	248	1651
H-3	Üretim Kuyusu	262	2098
H-1	Üretim Kuyusu	284	2133
H-5	Üretim Kuyusu	292	1654
R-1	Reenjeksiyon Kuyusu	358.5	2324

4.3 Hidrojeokimya

Kuyucak jeotermal sahasında bulunan üretim ve reenjeksiyon kuyularından kısa dönem akış testi sırasında alınan numunelerinin Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarında analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 3 adet üretim kuyusunun kısa dönem akış testleri esnasında alınan numunelerinin Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Araştırma Laboratuvarı'nda Oksijen-18 ve Döteryum analizleri, kuyulardan alınan 5 adet örneğin ise yine Hacettepe Üniversitesi Su kimyası laboratuvarında Tritiyum analizleri gerçekleştirilmiştir (H, G ve R kodlu örnekler). 2012 yılında, çalışma alanına ait kaynak koruma alanlarının belirlenmesi amacıyla, saha ve çevresinde yer alan kaynak çıkışlarından ve elverişli su kuyularından alınan numunelerin analizi gerçekleştirilmiştir (J kodlu örnekler) [14]. Daha önceki saha çalışmaları kapsamında araştırmacılar tarafından toplanan kaynak ve sığ soğuk su kuyusu örnekleri de hidrojeokimyasal değerlendirme kapsamında kullanılmıştır (AP kodlu örnekler ve diğer örnekler) [15][5]. Örnek lokasyonlarını gösterir harita Şekil 4.2'de sunulmuştur.

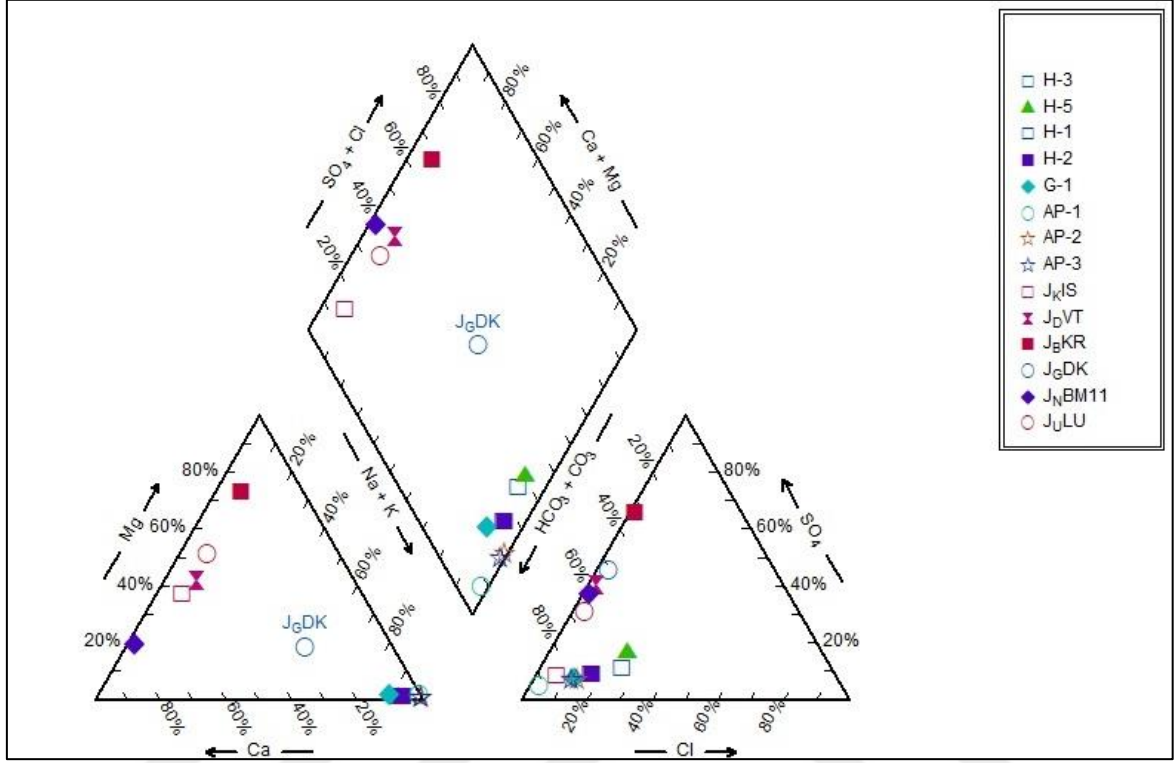


Şekil 4.2. Jeokimya Değerlendirmesinde Kullanılan Örnek Noktalarını Gösterir Harita

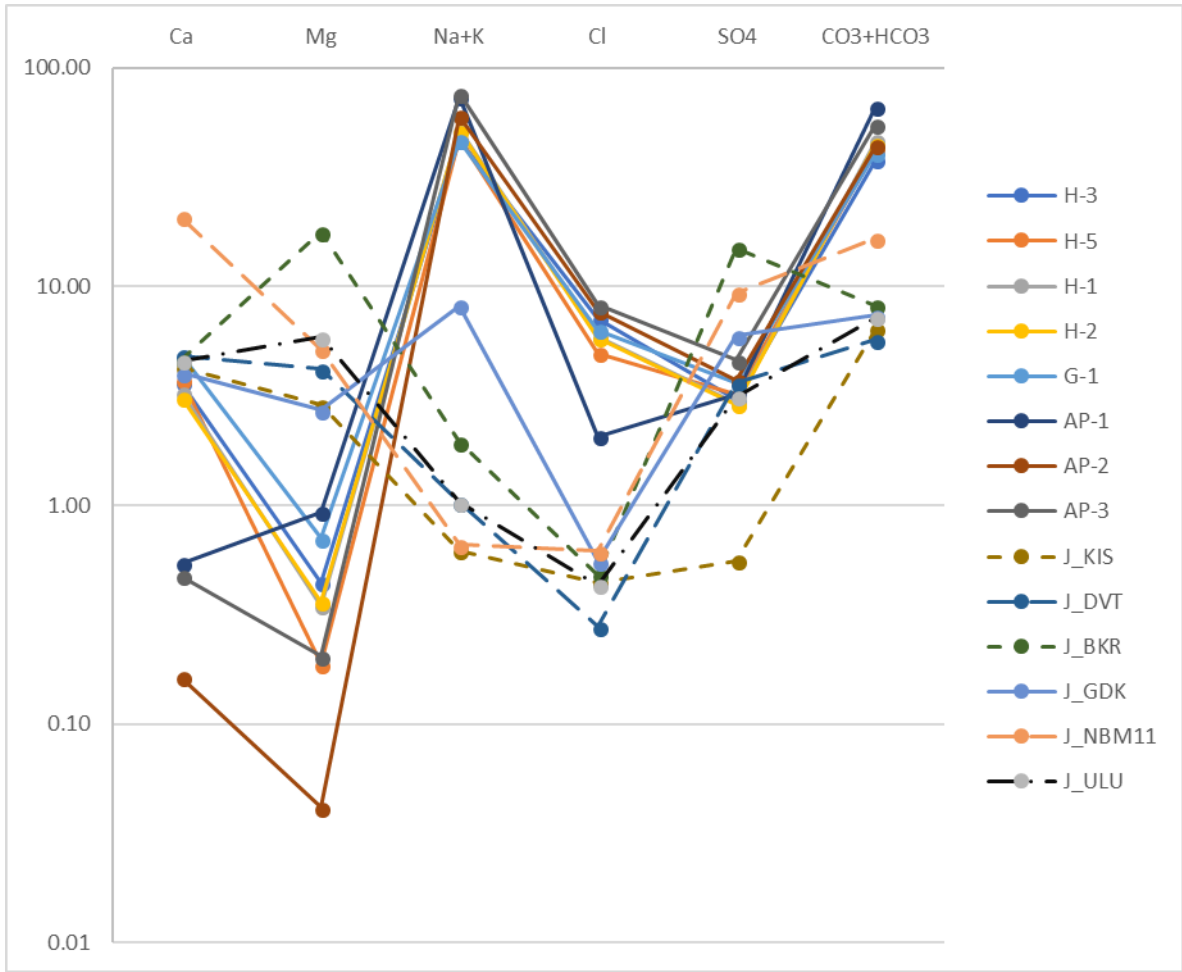
4.3.1. Suların Majör Anyon ve Katyon İçeriği

Yukarıdaki bölümde bahsedilen H, G, AP ve J kodlu numunelere ait majör anyon katyon değerleri Piper ve Schoeller diyagramları üzerinden değerlendirildiğinde, saha ve civarından toplanmış olan soğuk su çıkışlarına ait numunelerin genel olarak Ca^{+2} , Mg^{+2} ve HCO_3^- yönünden zengin olduğu görülürken, üretim ve reenjeksiyon kuyularından alınan tüm numunelerde temel olarak Na^+ ve HCO_3^- iyonlarının baskın olduğu görülmüştür. Yüksek rezervuar sıcaklığında karbonat minerallerinin çökmesi sonucunda termal sulardaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonu derişimleri azalmakta, Na^+ ve K^+ iyon derişimleri ise artmaktadır. Bu süreç etkisiyle derin jeotermal akiferlerdeki sular Na-HCO_3 tipi hidrokimyasal fasiyes grubunda yer almaktadırlar [5]. Termal sular bu özelliğini mika ve felsidpatça zengin Menderes masifi temeli ile temas sonucunda kazanmaktadır. Jeotermal suların su tipi, Na-HCO_3 (Katyon: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$ Anyon: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$) iken, soğuk suların su tipi genellikle Ca-HCO_3 tür. (Katyon: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$ Anyon: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4 > \text{Cl}^-$). Çalışma alanından alınan sıcak su örneklerinin, sahanın güneyinde bulunan sıcak su kuyu örnekleriyle

benzer karakterde olduğu, Şekil 4.3'de bulunan Piper Diyagramı ve Şekil 4.4'de bulunan Schoeller Diyagramında görülmektedir.



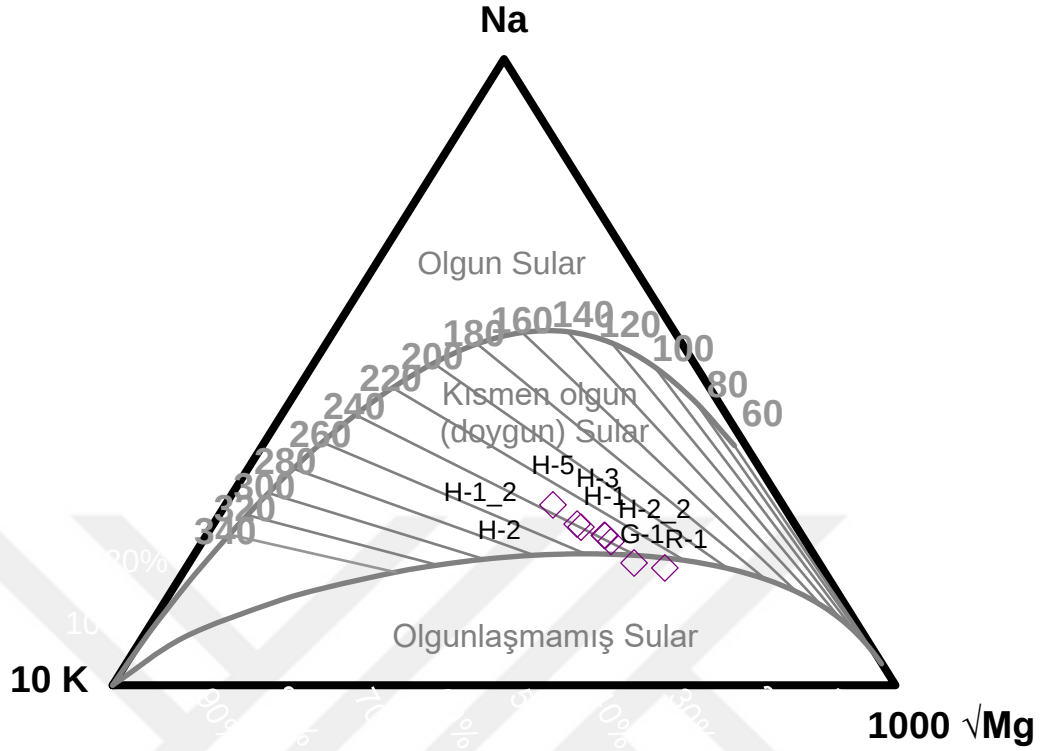
Şekil 4.3. Çalışma sahasında bulunan jeotermal kuyular (H-G kodlu), diğer jeotermal kuyulara (AP kodlu) ve diğer su numunelerine (J kodlu) ait Piper Diyagramı



Şekil 4.4. Çalışma sahasında bulunan jeotermal kuyulara (H kodlu), diğer jeotermal kuyulara (AP kodlu) ve diğer su numunelerine (J kodlu) ait Schoeller Diyagramı

4.3.2. Jeotermometre Analizi

Üretim ve reenjeksiyon kuyularından alınan H, G ve R kodlu örneklerin farklı jeotermometre eşitlikleri ile kaynak ve rezervuar sıcaklıkları saptanmaya çalışılmıştır. Analiz sonuçlarına; kuvars jeotermometrelerinin, rezervuar sıcaklığı 150-225°C olan alanlarda iyi sonuçlar vermesinden dolayı [16] silis jeotermometresi uygulanmıştır. Analiz sonuçlarının farklı bir jeotermometre sonucu ile daha kıyaslanabilmesi için de katyon jeotermometresi uygulanmıştır. Fakat katyon jeotermometresinin kullanılabilmesi için, Giggenbach diyagramına göre suların olgun sular sınıfında olması gerekmektedir [17]. Örnekler, Giggenbach diyagramı üzerinde Şekil 4.5'te değerlendirilmiştir.



Şekil 4.5. Analiz Sonuçlarının Giggenbach Diyagramı üzerinde Gösterilmesi ([17]'den düzenlenmiştir)

Giggenbach diyagramında görüldüğü üzere R-1 ve G-1 kuyuları doymun olmayan sular sınıfında kalmaktadır. Bu nedenle jeotermometre eşitliğinin kullanılması uygun olmayacaktır. Diğer örneklerin ise kısmen olgun sular sınıfında kaldığı için daha güvenilir sonuçlar verebileceği düşünüldüğünden aşağıda belirtilen Fournier ve Truesdell (1973) Na-K-Ca jeotermometresi uygulanmıştır [18].

$t < 100^{\circ}\text{C}$ ve $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2.06 < 0 \Rightarrow \beta = 1/3$, $t > 100^{\circ}\text{C}$ ve

$\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2.06 > 0 \Rightarrow \beta = 4/3$

$$(0-300^{\circ}\text{C}) \quad t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log(\text{Na} / \text{K}) + \left[\beta \log(\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}) + 2.06 \right] + 2.47} - 273.15$$

Kasyon jeotermometresi sonuçlarına göre, rezervuar sıcaklığı $200-210^{\circ}\text{C}$ arasında kalmaktadır. Akışkanların kasyon jeotermometresi sonucunda hesaplanmış değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Akışkan örneklerine ayrıca kuvars jeotermometresi uygulanmıştır. Buharlaştırma koşullarının gerçekleşmediği düşünüldüğünden buhar kaybının hesaba katılmadığı, Fournier (1973) eşitliği uygulanmıştır [19].

$$(0-250^{\circ}\text{C}) \quad t^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$$

Fournier (1973) eşitliğine göre hesaplanan rezervuar sıcaklıkları, katyon jeotermometresi ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları ve kuyu içi ölçülmüş sıcaklık değerlerinin kıyaslaması Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Akışkanların Kuvars Jeotermometresine Göre Hesaplanan Rezervuar Sıcaklıkları, Katyon Jeotermometresine Göre Hesaplanmış Sıcaklıkları ve Kuyu içi Ölçülmüş En Yüksek Sıcaklıklarının Kıyaslanması

Örnek	Kuvars jeotermometresine göre rezervuar sıcaklığı (°C)	Katyon jeotermometresine göre rezervuar sıcaklığı (°C)	Kuyu içi ölçülmüş en yüksek sıcaklık (°C)
H-2	181	207	172
G-1	154		174
H-1_2	145	210	171
H-2_2	147	211	172
H-1	128	204	171
H-3	178	207	170
H-5	165	203	169
R-1	179		166

Kuvars jeotermometresi sonuçlarına bakıldığında, H-3, H-2 ve R-1 kuyularının sıcaklık değerlerini yansıttığı görülmektedir. Diğer kuyuların taban sıcaklıkları ise kuvars jeotermometre sonuçları ile uyuşmamaktadır. Bu kuyulardan alınan numuneler analize gönderilmeden beklemek durumunda kalmıştır. Soğuma kaynaklı silisyumun hızlıca çökeldiği düşünülmüştür. Bu durumun, laboratuvar sonuçlarındaki silisyum içeriklerinin, olması gerekenden daha düşük ölçülmesine sebep olduğu düşünülmektedir. R-1, H-3 ve H-2 kuyularının kuyu içi sıcaklık

değerleri ve katyon jeotermometresi sonuçları yakın olduğundan kullanılabilir ancak diğer sonuçların kullanıma uygun olmadığı görülmüştür.

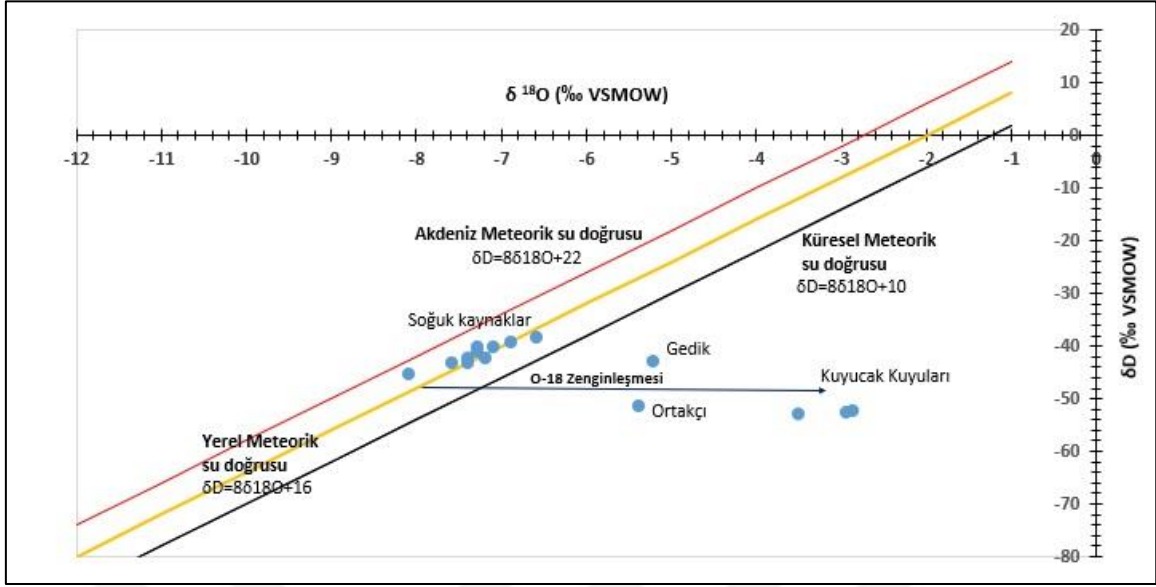
Katyon jeotermometresinde ise G-1 ve R-1 akışkanlarının doygun olmayan sular sınıfında kalmaları sebebiyle, kullanıma uygun olmadığı görülmüştür. Ek olarak katyon jeotermometrelerinin Çizelge 4.2’de yer alan kuyu içi maksimum sıcaklık değerleriyle kıyaslandığında yüksek sonuç verdiği görülmektedir. Bu nedenle dikkatle kullanılmasında fayda görülmektedir. Kuvars jeotermometresi ve katyon jeotermometresi sonuçlarına bakılarak rezervuarın 180-210 °C arasında sıcaklığa sahip olabileceği tahmin edilmiştir.

4.3.3. Suların Duraylı İzotop Sonuçları

Suların kökenlerinin belirlenmesi, güncel beslenim bileşeninin varlığının araştırılması için Oksijen-18 (^{18}O), Döteryum (^2H) ve Trityum(^3H) analizleri yapılmıştır. $^{18}\text{O}/\text{Kot}$ ve $^2\text{H}/\text{Kot}$ grafiklerinde, suların beslenim yüksekliğinin bulunması için daha önce kaynak koruma çalışmaları kapsamında sahadan toplanmış olan soğuk su kaynak örneklerinden [14] kota bağımlı regresyon eğrisi oluşturulmuştur.

Suların kararlı izotop oranları, Küresel Meteorik Su Çizgisi (GMWL) ($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$), Akdeniz Meteorik Su Çizgisi (MMWL) ($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+22$) ve soğuk su örneklerinden oluşturulmuş olan Yerel Meteorik Su Çizgisi ($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+16$) ile birlikte gösterilmiştir (Şekil 4.6). Oksijen-18-Döteryum grafiğine (Şekil 4.6) bakıldığında, Kuyucak rezervuar akışkanının, soğuk sulara göre daha yüksek $\delta^{18}\text{O}$ içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Bu duruma, sıcaklıkla birlikte akım yolu boyunca oluşan su kaynaç etkileşimi sebebiyle, kaynaçtan suya doğru gerçekleşen $\delta^{18}\text{O}$ zenginleşmesinin sebep olduğu düşünülmektedir.

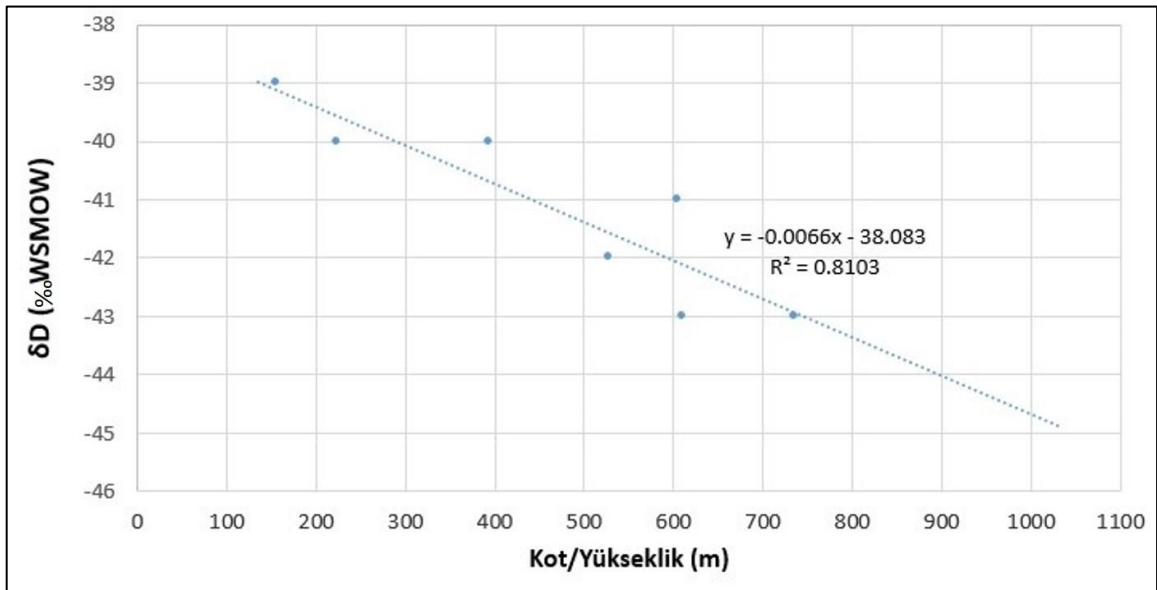
Şekil 4.6’da, sahanın doğusunda, Buharkent yakınında bulunan ve Karakuş (2010) [5] tarafından örneklenen Ortaklar (50 °C) ve kuzeybatısından örneklenen Gedik (32 °C) sıcak kaynak numuneleri gösterilmiştir. Gedik kaynağı Nazilli-Kuyucak bölgesinde doğal boşalımlı tek sıcak kaynaktır. Gedik ve Ortakçı kaynaklarının (Şekil 4.2), $\delta^{18}\text{O}$ ve Döteryum değerlerinin çalışma alanından alınan kuyu numunelerinden alınan değerlere yakın olduğu görülmekte, bu kaynakların çalışma alanındaki jeotermal rezervuarla ilişkili olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.6. Akdeniz ve Küresel Meteorik Su Doğruları ve δD - $\delta^{18}O$ ilişkisi

4.3.4. Döteryum-Beslenme Yüksekliği İlişkisi

Suların beslenme yüksekliklerinin belirlenmesi için kota bağlı döteryum değerlerinden regresyon eğrisi oluşturulmuştur. Grafik oluşturulurken J kodlu farklı kotlardan alınmış soğuk kaynak çıkış örneklerinin analiz sonuçları kullanılmıştır (Şekil 4.2) [14]. Kot ve döteryum ilişkisinin gösterildiği grafik Şekil 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Kot (m)- δD ilişkisi

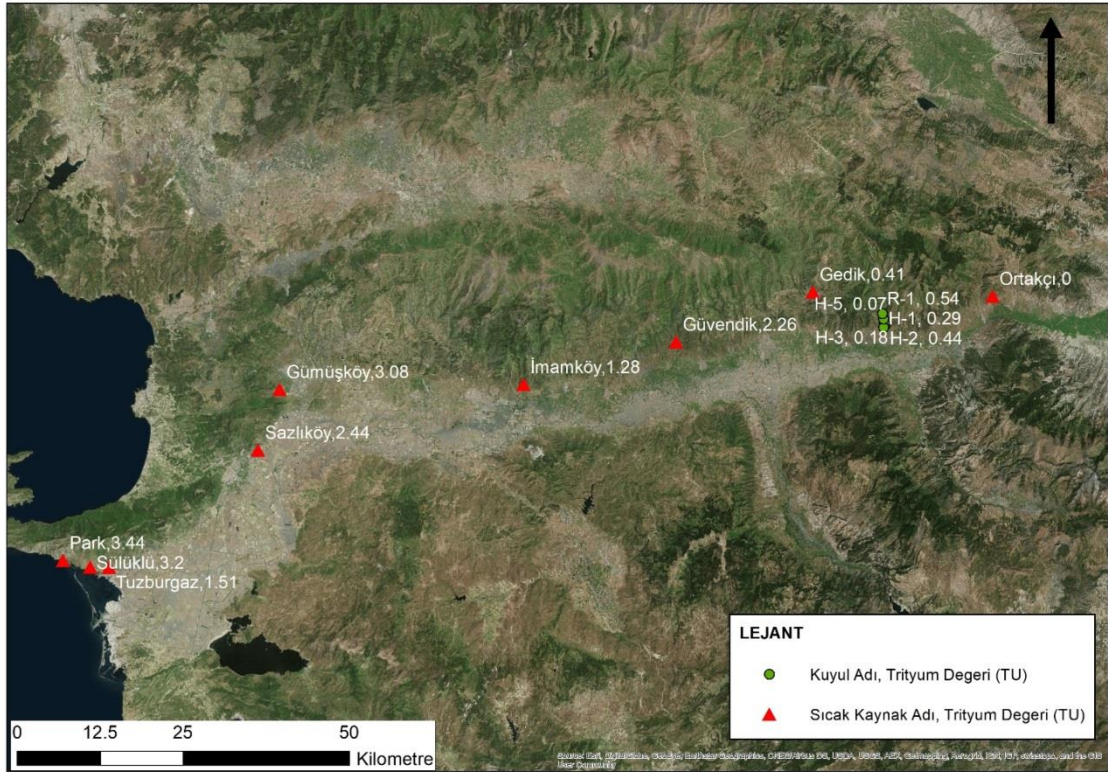
Analiz sonuçlarına ait regresyon eşitliği $y = -0.0066x - 38.083$ olarak hesaplanmıştır. Regresyon eşitliğinde çalışma alanında bulunan H-3, H-5 ve R-1 sularının döteryum değerlerine karşılık gelen beslenim yükseklikleri yaklaşık olarak 2100-2200m arasındadır. Çalışma sahasının yakın çevresinde rastlanan en yüksek kot değerleri, kuzeyde bulunan horstlarda rastlanan 1700-1800 m civarındır. 2100-2250 m arası yükseklikler ise, grabenin güneydoğusunda gözlenmektedir. Bu durum, beslenimin yakın çevredeki yükseltilerden güncel ve kısa süreli gerçekleşmekten ziyade, jeotermal rezervuara ulaşan suyun, uzun dolaşım yollarından güney-kuzey boyunca derinden beslenimle gelmiş olabileceği görüşünü desteklemektedir.

4.3.5. Radyoaktif İzotop Sonuçları (Tritiyum)

Çalışma alanındaki 5 adet kuyunun kısa dönem akış testleri sırasında alınan numunelerin tritiyum sonuçları, literatürde daha önce Büyük Menderes Grabeni'nden toplanmış olan suların tritiyum analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tritiyum (^3H) duraysız izotopunun yarılanma ömrü 12.32 yıldır. Çalışma alanında üretim ve reenjeksiyon kuyularına ait tritiyum miktarları, 0.07 ve 0.54 T.U. arasındadır. Bu durumda Kuyucak rezervuar sularının 50 yıldan daha yaşlı sular olduğu söylenebilmektedir.

Üretim ve reenjeksiyon kuyularından alınan örnekler ve daha önce Karakuş (2010) [5] tarafından Büyük Menderes Grabeni'nden alınmış olan tritiyum örnekleri batıdan doğuya doğru sıralandığında, Kuyucak kuyularından alınan örneklerin düşük ve sıfıra yakın tritiyum içeriklerinin Ortakçı ve Gedik kaynaklarının tritiyum içerikleri ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.8'de kıyaslanan tritiyum içeriklerine bakıldığında, oldukça düşük tritiyum içerikleri nedeniyle bu suların, grabenin batısında yer alan jeotermal sulardan daha yaşlı ve daha derin dolaşım sular olabileceği, bu bağlamda, diğer jeotermal sistemlerden farklılaştığı söylenebilir. Bu suların geçiş süresinin uzun, güncel beslenimin öneminin ise daha az olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.8. Grabende Batıdan Doğuya Doğru Sıralanan örneklerin Tritiyum İçerikleri

4.4. Kuyu İçi Ölçümler ve Testler

Çalışma sahasında, üretim ve reenjeksiyon kuyuları tamamlandıktan sonra, her kuyuda 4 gün ile 1 hafta arasında değişen kısa dönem akış testleri yapılmıştır. Bu testler sırasında kuyu içi pompa kullanılmamış olup, kuyular kompresör basıncı altında ya da inhibitör borusu içinden azot gazı basılarak canlandırılmış ve kendiliğinden akışa verilmiştir.

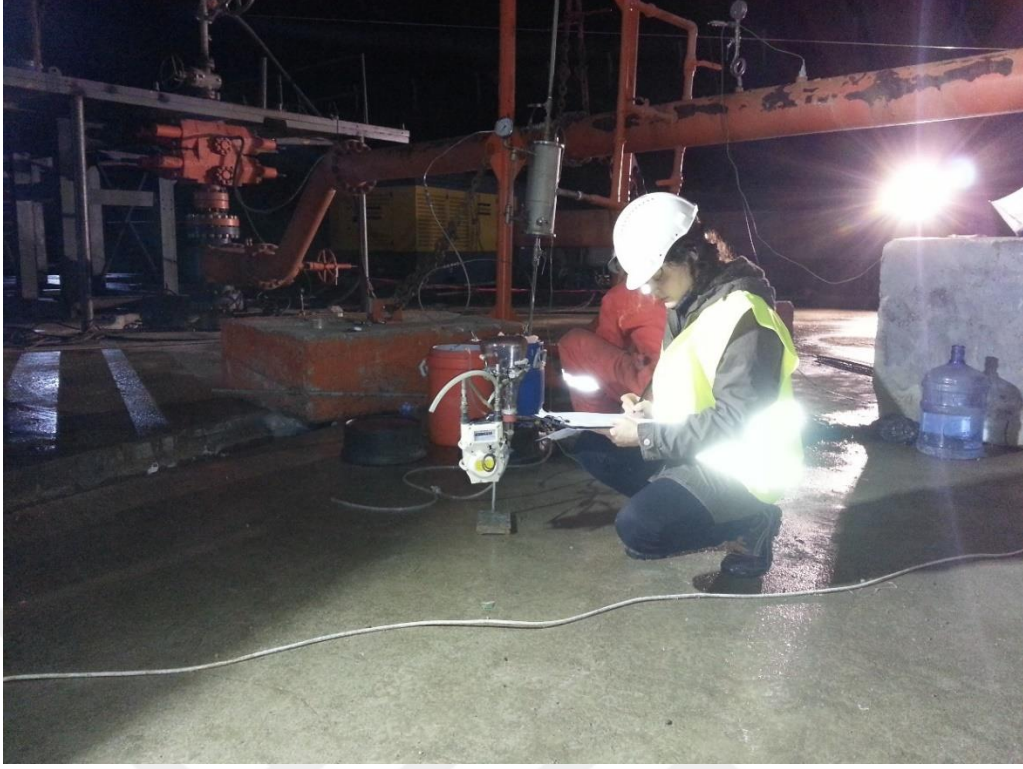
Kuyularda karbonat ve silika çökelim problemi görülmektedir. Bu nedenle kuyularda, faz ayrışmasının başladığı derinliğin altına inhibitör borusu indirilerek akış testleri başlatılmıştır. Kendiliğinden akış sırasında, 3 ya da 4 kademe vana açıklığıyla, kademeli akış testleri yapılmıştır. Kuyuların debisi, akış sıcaklığı ölçülmüş, sıvı ve gaz örneklemeleri yapılmıştır. Testler sırasında ölçülen sıcaklık ve debi değerleri sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3.Kuyulara ait Akış Parametreleri

Kuyu Adı	Türü	Kuyu içi En Yüksek Sıcaklık (°C)	Ortalama Debi (l/s)	Ortalama Akış Sıcaklığı (°C)
G-1	Karotlu Kuyu	174	Ölçülmedi	Ölçülmedi
G-2	Karotlu Kuyu	159	Ölçülmedi	Ölçülmedi
H-2	Üretim Kuyusu	172	73	158
H-3	Üretim Kuyusu	170	48	149
H-1	Üretim Kuyusu	171	50	155
H-5	Üretim Kuyusu	169	58	155
R-1	Üretim Kuyusu	166	18	138

Kuyularda görülen taban sıcaklıkları 170 °C civarındadır. Üretim kuyularında görülen debi değişken olup, kuyu başında buharlaşan miktarla birlikte, su ve buhar toplamda maksimum 73 l/s debi ve maksimum 158 °C akış sıcaklığı gözlenmiştir. Yapılan testlerle, jeotermal rezervuarın 'su baskın' tipte olduğu ortaya konulmuştur. Rezervuarda, toplam akışkan kütlesinin ortalama %3'ü kadar NCG (yoğuşmayan gaz) bulunmakta olup, kuyuların ortalama entalpisi 720 kJ/kg'dır.

H-2 ve H-1 kuyularının kısa dönem akış testleri sırasında sahadan görünümeler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.9.H-2 Kuyusu Kısa Dönem Akış Testinden Bir Görünüm



Şekil 4.10.H-1 Kuyusu Kısa Dönem Akış Testinden Bir Görünüm

4.4.1. Statik Sıcaklık Ölçümleri

Her kuyunun kısa dönem akış testi öncesi, kuyulardan referans statik sıcaklık ve basınç logları alınmıştır. Bu loglar, kuyu içi ve rezervuar sıcaklığının tespitinde ve sıcaklık gradyanının belirlenmesinde rol oynamıştır. Kullanılan statik sıcaklık logları Şekil 4.12’de verilmiştir.

Kuyu içi statik loglarda görüldüğü üzere, ısıнын kondüktif olarak iletilmesi, sıcaklığın derine doğru lineer artışı ile belli olmaktadır. Sıcaklık eğrisinin dikleşmesi ve sıcaklık gradyanının sıfıra yaklaşması, konvektif taşınımı işaret ettiğinden jeotermal rezervuara giriş yapıldığı anlaşılmaktadır [20].

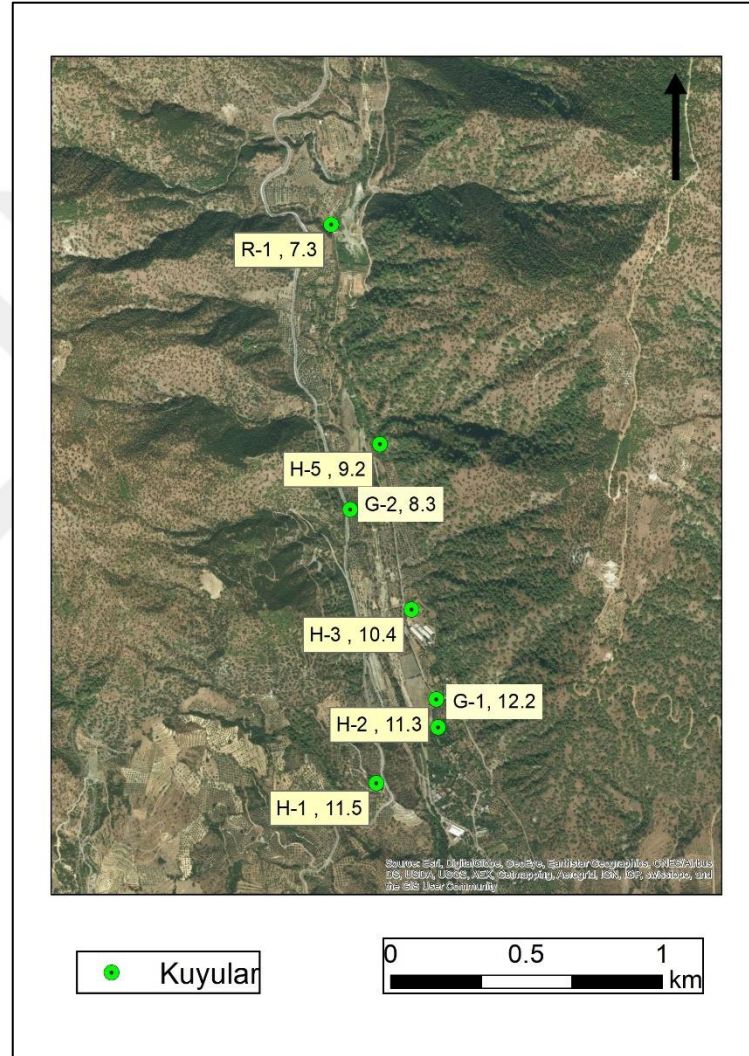
Loglarda, gradyanın sıfıra yaklaştırmaya başladığı zona kadarki bölümlerin sıcaklık gradyanları, statik sıcaklık logları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler,.

Çizelge 4.4’de verilmiştir.

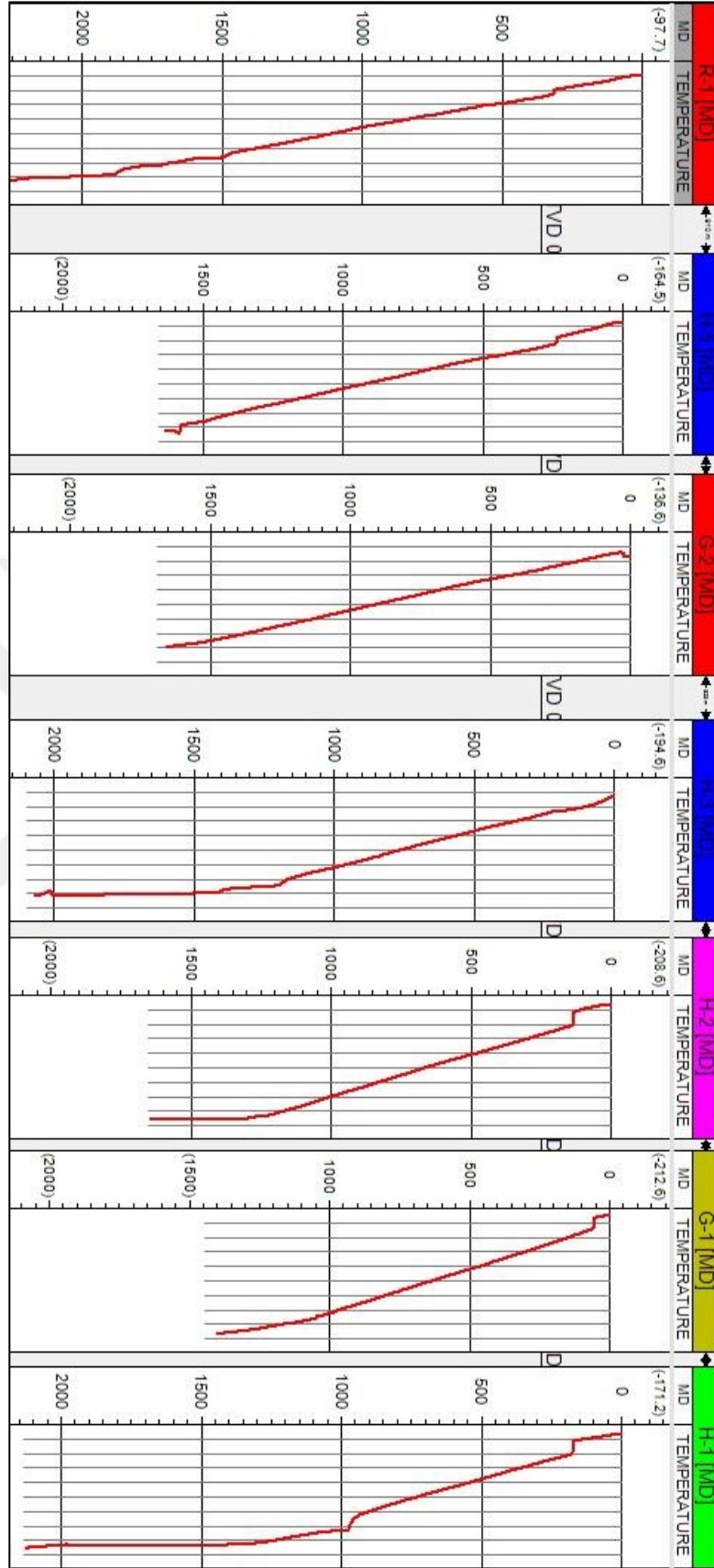
Çizelge 4.4. Kuyu içi Ölçümlerden Hesaplanan Sıcaklık Gradyanı Değerleri

Kuyu Adı	Hesaplanan Gradyan Değeri (°C/100 m)
R-1	7.3
H-5	9.2
G-2	8.3
H-3	10.4
H-2	11.3
G-1	12.2

Çalışma alanına ait bu yedi kuyudan hesaplanan ortalama gradyan $10\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 'dir. Sıcaklık gradyanının çalışma sahasının güneye yakın kısımlarında, kuzeye yakın kısımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Güneydeki kuyularda gradyan değeri $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıkmaktadır. D-B ve K-G fay zonlarının kesişimine yaklaştıkça gradyan değerinin arttığı görülmektedir. Kuyuların gradyan değerlerinin harita üzerinde gösterimi Şekil 4.11'de verilmiştir.

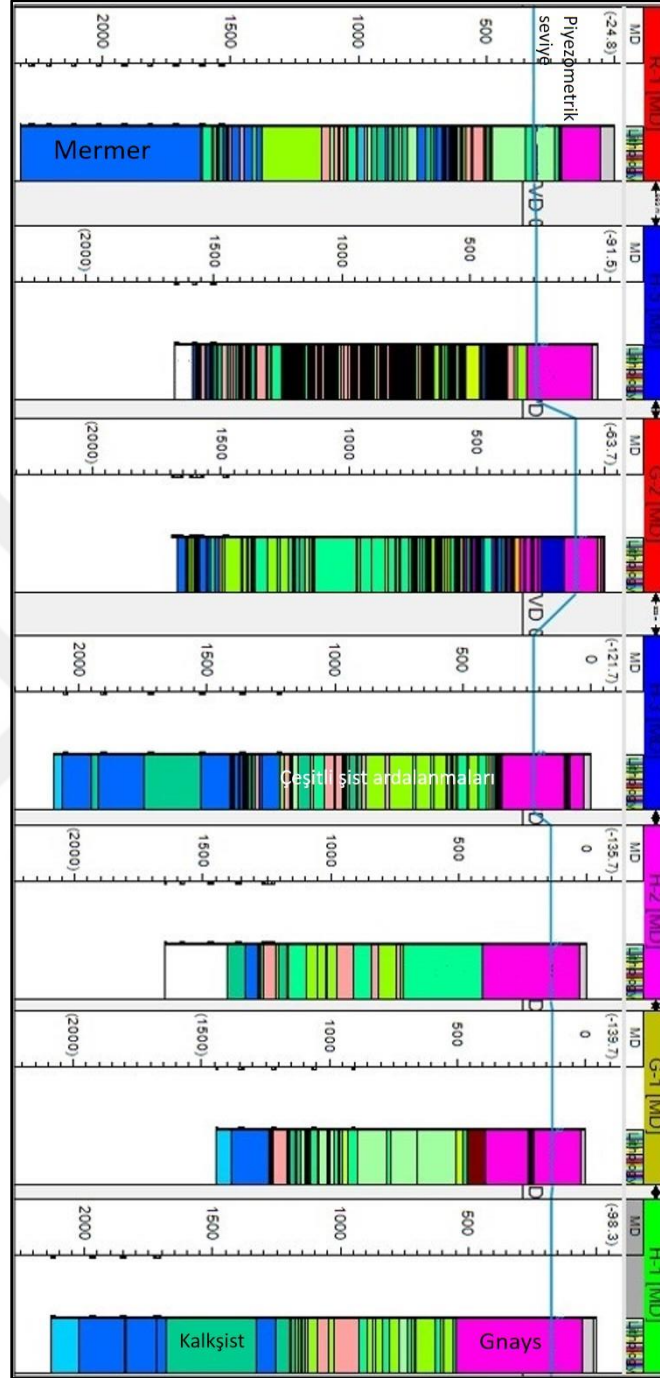


Şekil 4.11. Kuyularda Hesaplanan Sıcaklık Gradyanı Değerleri ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)



Şekil 4.12. Kuyu içi Statik Sıcaklık Loglarında Kondüktif ve Konvektif Isı İletim Bölgeleri

Kuyuların su seviyeleri, kestikleri litolojik birimlerin genelleştirilmiş görünümü ve kuyuların filtreli olduğu zonlar Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Kuyuların Statik Su Seviyeleri, Litolojik Birimler ve Filtre açıklıkları (Filtre açıklıkları litoloji loglarının sol kısmında delikli işaretlerle belirtilmiştir.)

Kuyularda, filtre yerleştirilen ya da açık kuyu olarak bırakılan zonlar Şekil 4.13'de sol sütunda, litolojik birimler ise sağ sütunda yer almaktadır. Kuyuların hepsi alüvyon

ve gnays birimleri ile başlayıp, kalın bir şist aralanma zonu kestikten sonra, mermer ve kalkışist birimlerinden oluşan jeotermal rezervuara girmektedir. Mermer ve kalkışist birimleri, her kuyuda farklı kalınlıklarda filtrelenmiştir. H-1 kuyusu dışında her kuyuda mermer ve kalkışist birimleri filtrelenmiş olup, yalnızca H-1 kuyusunda mermer ve dolomitik mermer birimi (açık mavi renk ile) filtrelenmiştir. Kuyuların hepsi, formasyon eğiminden dolayı, doğal olarak güneye doğru yönlendiğinden, kuyular arası mesafenin korunması amacıyla kuyularda yönlü sondaj ekipmanları kullanılmıştır.

Karotlu kuyu olan G-2 kuyusunda su seviyesinin diğer kuyulara nazaran yüksek olduğu görülmektedir. Bu duruma, daha sonra, kuyu teçhizindeki sorun sebebiyle kuyuya dolan sığ yüzey sularının sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle bu kuyunun su seviyesinin gözlem ve kalibrasyon amaçlı kullanılması doğru bulunmamıştır.

4.4.2. Basınç Yükselim Testleri ve Geçirimsilik Değerlerinin Hesaplanması

Üretim ve reenjeksiyon kuyularının kısa dönem akış testleri kapsamında kuyunun üretim seviyesinin ortalama geçirgenlik değerinin elde edilmesi amaçlanarak build-up (basınç yükselim) testleri yapılmıştır. Testler kapsamında, 4 ila 7 gün arasında süren kısa dönem akış testlerinin son aşamasında, kuyu halen akışta iken basınç sıcaklık aparatı, kuyunun temsili üretim seviyesine indirilerek, bu seviyede sabitlendikten sonra kuyu ani olarak üretime kapatılmıştır. Sıcaklık ve basınç aparatının kuyu içinde uzun süre bekletilememesi sebebiyle, testler sırasında aparat, azami üretim seviyesinde en az 12 en çok 14 saat tutulabilmiştir. Aparat üretim seviyesinde bekletildikten ve değerleri kaydedildikten sonra çekilmiştir.

Horner-Plot [21] yöntemi, kuyunun üretime kapatılmasıyla meydana gelen süperpozisyon durumunda basınç yükselim değerlerinin çözümüyle, geçirgenlik hesabında kullanılabilmektedir. Bu nedenle geçirgenlik değerleri, bu yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntemin kabulleri aşağıdaki gibidir:

- 1- Rezervuar sınırları sonsuzdur
- 2- Formasyon ve akışkan özellikleri üniformdur.

Kuyu aniden üretime kapatıldığında, basit olarak bir süperpozisyon durumu meydana gelir. Bu durumda; kapatma durumunda BHP (kuyu dibi/üretim seviyesi

basıncı), Horner zamanına ($\log ((t_p+\Delta t)/\Delta t)$) bağlı bir fonksiyon ile ifade edilir. t_p , kuyunun akışa verildiği zamandan kapatıldığı zamana kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Oluşan bu eğrinin eğimi (m); aşağıdaki eşitliğe dönüşmektedir.

$$m = -162.6 \times \frac{qBm}{kh}$$

m =doğrunun eğimi

q = üretim süresi boyunca kuyunun üretim debisi (STB/pd)

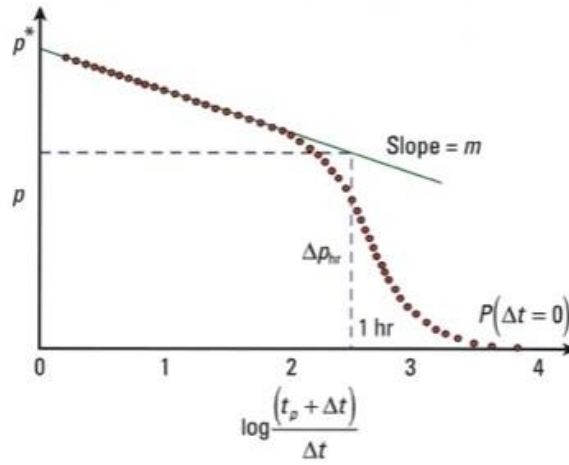
B = formasyon hacim faktörü (rb/stb)

m =akışkanın viskozitesi (cp)

h =üretim seviyesi kalınlığı (ft)

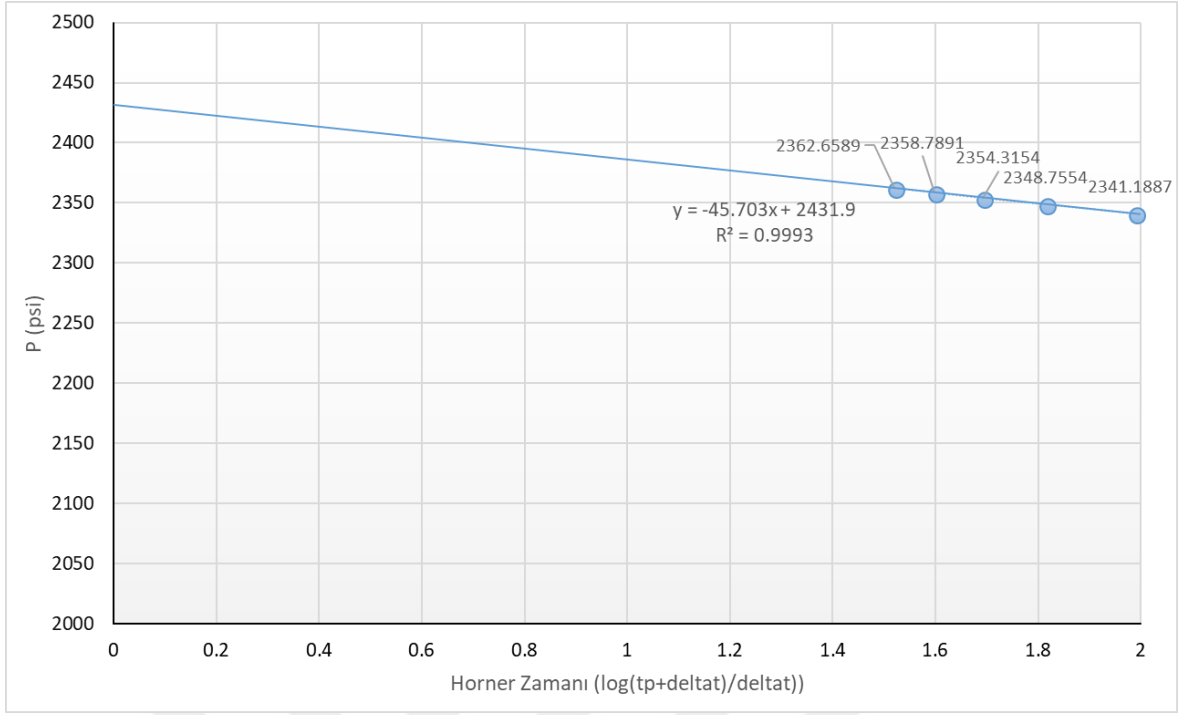
k =Geçirimsizlik (milidarcy)

Bu eğride, $((t_p+\Delta t)/\Delta t)$ 1'e yaklaştırılmaya çalışılır. Bu değer 1'e eşit olduğunda, bu andaki basınç rezervuarın ilksel basıncına eşit olur. Bu durumda oluşan eğrinin eğimi ile üretim seviyesinde ortalama K değeri hesaplanabilir.

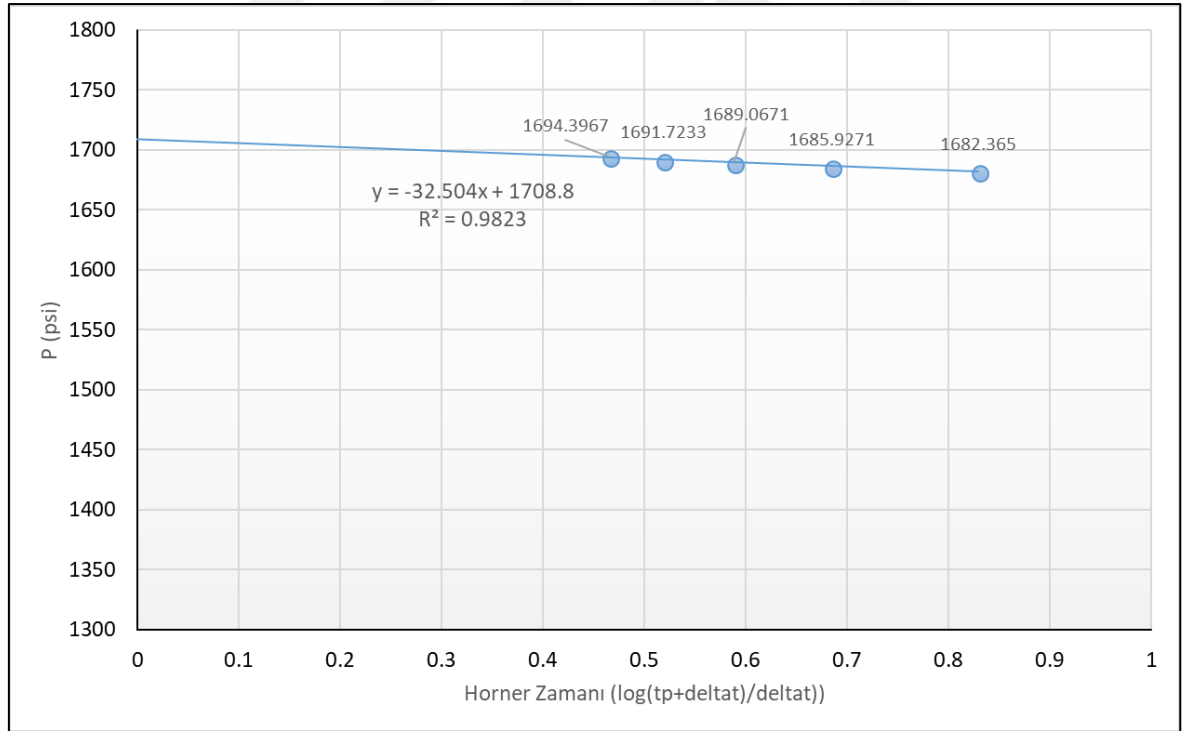


Şekil 4.14. Denklemin Uygulanmasına Örnek Bir Horner-Plot Eğrisi

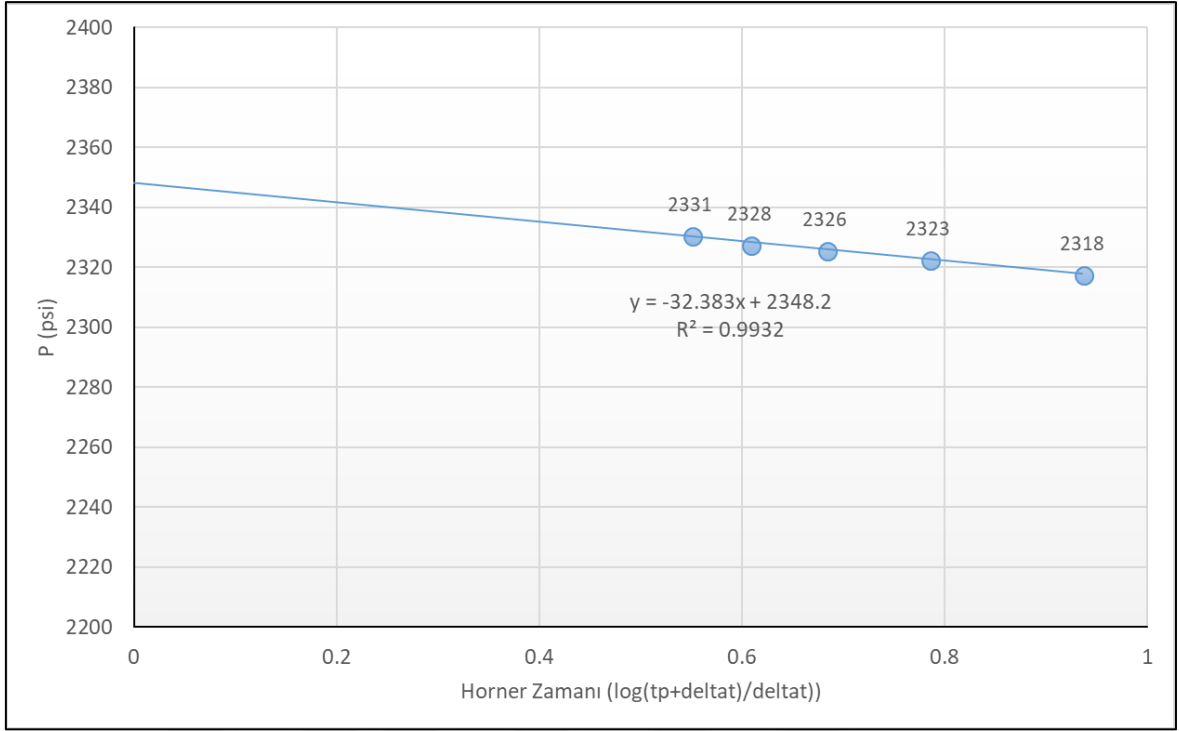
Yukarıda anlatılan metodolojiye bağlı kalarak 4 adet kuyuda uygulanan basınç yükselim testlerine ait Horner Plot Eğrisi elde edilmiştir. Grafiklerde 2 saatte bir ölçülen basınç değerleri kullanılmış, toplamda 12 saatlik veri yansıtılmıştır. Grafiklerden eğim (m) değerleri hesaplanmıştır.



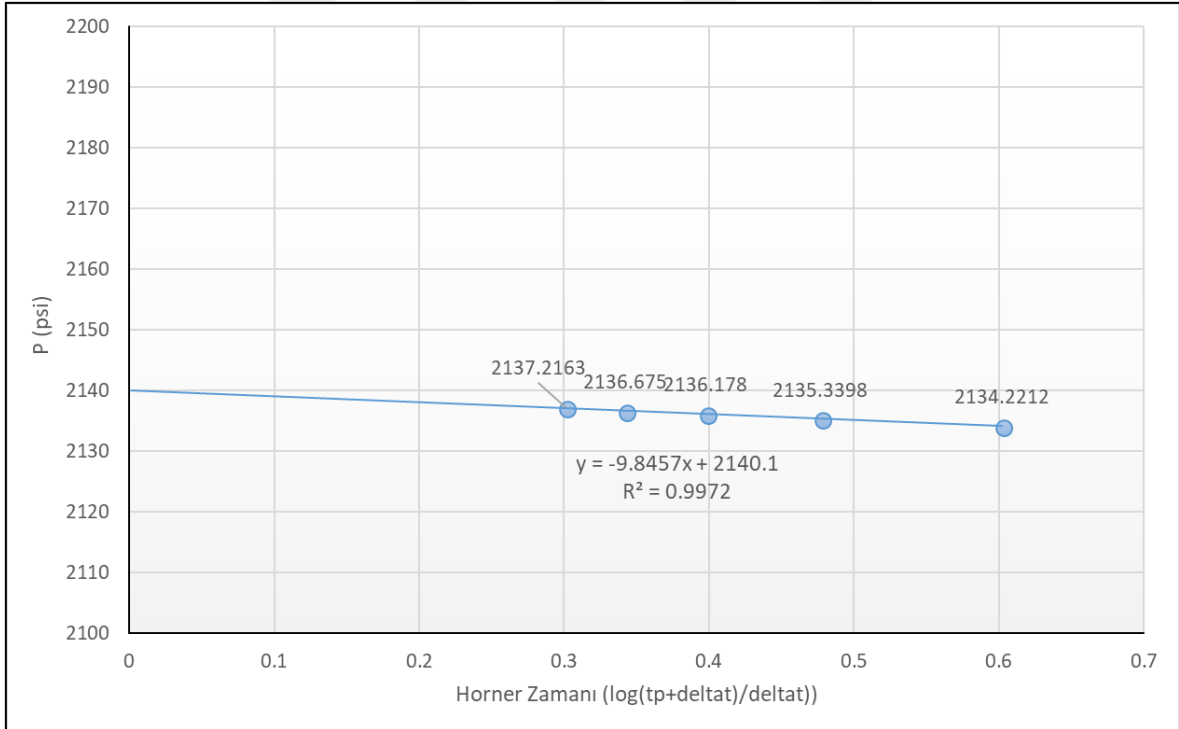
Şekil 4.15.H-1 Kuyusu Horner-Plot Grafiği



Şekil 4.16.H-2 Kuyusu Horner-Plot Grafiği



Şekil 4.17.H-3 Kuyusu Horner-Plot Grafiği



Şekil 4.18.R-1 Kuyusu Horner-Plot Grafiği

Çizelge 4.5'te yöntemde kullanılan girdiler, hesaplanan eğim ve sonuç olarak elde edilen k (geçirgenlik) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Horner Plot Yönteminde Kullanılan Parametreler

	H-1	H-2	H-3	R-1
m	45.70	32.504	32.383	9.84
q (STB/pd)	25867.72	39127.65	25541.66	8532.00
B(rb/stb)	1.00	1	1	1.00
μ (cp)	0.160	0.157	0.165	0.165
h (ft)	246.06	328.08	147.64	164.04
k (milidarcy)	59.68	94.01	143.33	141.57
K (m/g)	0.05	0.08	0.12	0.12

Horner-Plot yönteminin, ideale yakın sonuç vermesi için $\log((t_p + \Delta t)/\Delta t)$ değerinin 0'a yaklaşması gerekmektedir. Bu da ancak aparatın basınç yükselim öncesi akış süresine (t_p) bağlı olarak, daha uzun süre gözlem için tutulmasıyla mümkün olabilir.

Hesaplanan geçirgenlik katsayıları, belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında 0.831 m/g çevrim katsayısı baz alınarak [22] hidrolik iletkenlik katsayısı değerlerine çevrilmiş, elde edilen değerler Çizelge 4.5'de paylaşılmıştır.

Oluşturulan nümerik modelde model hücrelerine atanan K (Hidrolik iletkenlik Katsayısı) değerleri, hesaplanan değerler göz önünde bulundurularak kullanılmıştır.

5. KAVRAMSAL MODEL

Batı Anadolu'da hidrotermal kavramsal model yaklaşımı genel olarak dört bileşen ile tanımlanmaktadır. Bunlar; jeotermal akışkanın depolandığı ve elde edildiği jeotermal akifer/rezervuar özelliği gösteren birimler, jeotermal ısının kaynağı, beslenme ve jeotermal rezervuar üzerinde yer alan görece düşük geçirimli örtü kayadır. Bu bileşenler her sistemde jeolojik ve hidrojeolojik koşullara bağlı olarak farklılık göstermektedir.

5.1. Jeotermal Rezervuar ve Örtü Tabakası

Çalışma alanında jeotermal rezervuarı, birincil geçirimliliğe sahip olmayan, tektonizma sayesinde ikincil geçirimlilik kazanmış metamorfik mermer ve şist seviyeleri oluşturmaktadır. Bu kayalar sonradan kazanılan kırık-çatlaklarla geçirimlilik kazandığından, homojen bir dağılımdan bahsedilemez. Nitekim, kuyularda kesilen mermer ve şist seviyelerinin kalınlıkları ve aralanmaları da farklılık göstermektedir. Kimi üretim kuyularında, jeotermal akışkan esas olarak şist biriminden alınmaktayken, kimisinde mermer biriminden alınmaktadır. Kuyularda mermer ve kalkşist birimlerine, genel olarak örtü olarak tabir edilen kalın şist aralanmasından sonra girilmektedir.

Kuyularda görülen litolojiler dikkate alındığında Büyük Menderes grabeninde örtü olarak nitelendirilebilecek kayalar, horstların güneyi için Pliyo-Kuvaterner ya da Miyosen gibi kayalar olurken, sıyrılma faylarının gerisinde metamorfik kayalardır. Gnays, ince bir mermer tabakası ve sonrasında oldukça kalın kesilen çeşitli şist ve kuvarsit birimleri aralanması, sistemde örtü kaya görevini görmektedir. Bu durumun sebebi, bu kayaların çok düşük geçirimli oluşlarıdır. Bu kayalar ısı iletiminde rol oynamakta ancak jeotermal rezervuar niteliği taşımamaktadırlar.

Kuyularda rezervuar ve örtü seviyesi aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurularak ayırtlanmıştır:

1. Sondajlarda görülen çamur kaçakları: Jeotermal sondaj açılırken yeraltına verilen çamur, geçirimli birimlerin kırık ve çatlaklarından içeriye hareket etmektedir. Bazı zonlarda bu kaçaklar, yüksek miktarlarda oluşmakta ve jeotermal rezervuara girişin emaresi olarak yorumlanmaktadır. Verilen çamurun tamamen formasyon içine kaçarak sirküle olmadığı durumlarda, oldukça yüksek geçirimli bir zona girildiği anlaşılmaktadır. Bu zonlara 'tam kaçaklı zon' adı verilmektedir. H-1 kuyusunda ve H-5 kuyusunda tam kaçaklı zona girilmiştir. Diğer kuyularda tam kaçaklı zona girilmese de, mermer ve kalkışit formasyonları kesilmeye başladıktan sonra, çeşitli metrajlarda çamur kaçaklarının miktarı artmıştır. Kuyularda, mermer ve kalkışit formasyonlarına girilmeden önce, örtü olarak tabir edilen zonda, kaçak miktarları neredeyse yok denecek seviyede gerçekleşmiştir.

2. Statik Sıcaklık logları: Statik sıcaklık logları hakkında detaylı bilgi Bölüm 4.4.1. Statik Sıcaklık Ölçümleri'nde verilmiştir. Şekil 4.12. Kuyu içi Statik Sıcaklık Loglar'nda görüleceği üzere, tüm kuyularda tipik olarak kondüktif bir sıcaklık artışının ardından, sıcaklık artışının azaldığı, gradyanın gittikçe 0'a yaklaştığı, kondüktif gradyanın kaybolduğu zonlara girilmektedir. Bu durum, sıcak su giriş zonları olarak yorumlanmaktadır. Gradyanın azalmaya başladığı bu zonlar, kot(z) olarak; -1516 m (R-1), -1238 m (H-5), -1138 m (H-3), -1052 m (H-2) ve -1043 (H-1) olarak görülmektedir. Bu kotların üzerinde, kondüktif ısı artışının olduğu kısımlar ise örtü olarak yorumlanmıştır.

3. Rezistivite (Manyetotellürik) Ölçümleri: Sahada, Fugro Electro Magnetics şirketi [23] tarafından MT (Manyetotellürik) ölçümü yapılmış, ölçülen rezistivite değerleri 3B olarak modellenmiştir. Şekil 5.2'de görüleceği üzere, rezistivite değerlerinde iki kontrast zonun varlığı göze çarpmaktadır. Mavi-açık yeşil ile gösterilen ve rezistivite değeri genellikle 1 ile 50 ohm.m arasında olan zonun, kesitin kuzey kısmında, metamorfiklerin altere olmuş ya da geçirimsizlik göstermeyen örtü niteliğindeki birimler olduğu, kesitin ve sıyrılma fayının hemen güneyinde ise aynı rezistivitenin, genç örtü birimleri temsil ettiği yorumlanmıştır. 50 ohm m.'den yüksek değerler, metamorfiklerin

geçirimsiz altere zonlarından sonra girilen, potansiyel jeotermal rezervuar olan mermer ve kalkışist seviyeleri olarak yorumlanmıştır. Bu rezistivite değerleri, statik sıcak ve çamur logları ve diğer jeotermal rezervuar emareleri ile tutarlılık göstermektedir. Mermer ve şist formasyonuna giriş derinliğinin, kuzeye doğru gittikçe derine doğru uzandığı söylenebilir (Şekil 5.2).

5.2. Beslenim ve Dolaşım

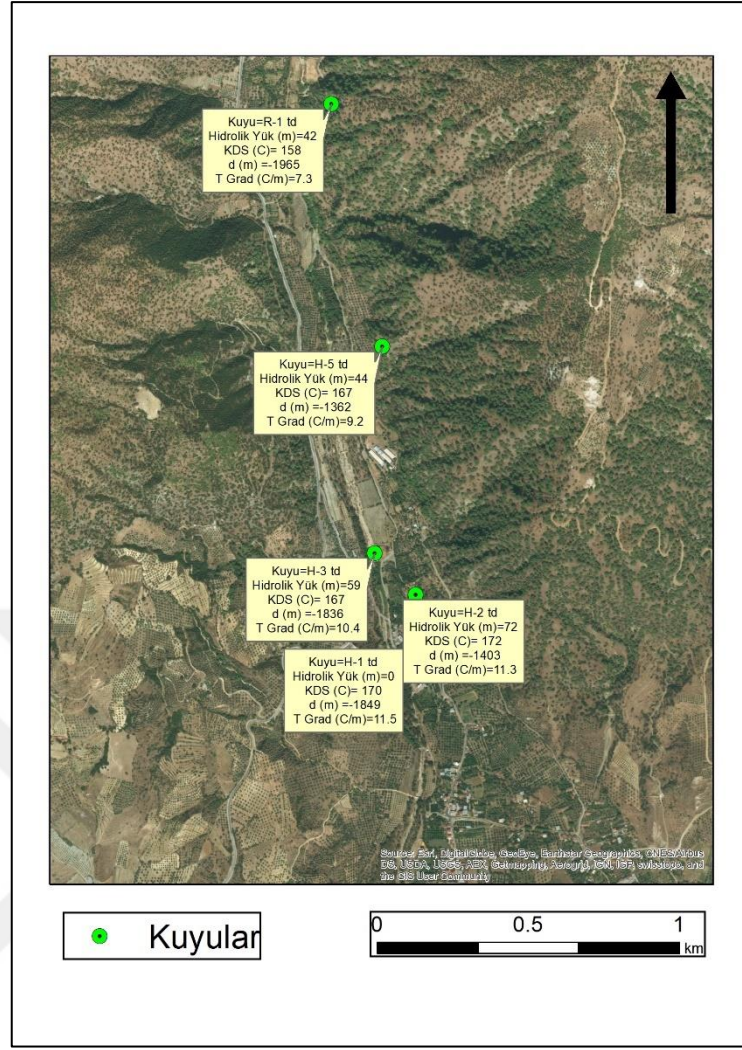
Akışkanların izotop içerikleri değerlendirildiğinde, jeotermal rezervuarın, sıg ve güncel beslenim bileşenlerinden ziyade, derin dolaşım sürecinden etkilendiği söylenebilmektedir. Sahada açılan kuyularda ölçülen trityum değerleri ve $\delta^{18}\text{O}$ zenginleşmesi, bu bölgede kısa mesafeli akım yoluyla, güncel beslenimden ziyade, uzun geçiş süresine sahip sulardan beslenim olduğunu desteklemektedir.

Kota bağılı döteryum regresyonu ile hesaplanan kuyulara ait beslenim yükseklikleri, sahanın yakın çevresindeki horstlarda yer almamaktadır. Bu yükseltilere, grabenin güneydoğusunda rastlanmaktadır.

Örtü olarak tabir edilen çok düşük geçirimli zonun, derin jeotermal rezervuarın kısa sürede yüzeyden beslenimini engellediği düşünülmekte olsa da, soğuma, sıcaklık loglarından görüldüğü üzere, yüzeye doğru kondüktif olarak gerçekleşmektedir.

Akışkan taşınımı temel olarak Büyük Menderes Grabenini D-B doğrultusunda kat eden sıyrılma fayı ve sonradan yeniden aktifleşerek normal fay özelliği kazanan faylar sayesinde gerçekleşmekte ve Kuzey-Güney doğrultulu fay zone ile kırıklı çatlaklı heterojen yapıya sahip olan rezervuara doğru gerçekleşmektedir.

Kuyularda güneye yaklaştıkça artan sıcaklık gradyanı değerleri, derinlikten bağımsız olarak hidrolik yükün ve kuyu dibi sıcaklığının artışı da güneyden sıcak akışkan beslenimi konusunda destekleyici emarelerdir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Kuyuların Derinlik (d), Kuyu Dibi Sıcaklık (KDS), Hidrolik Yük (h) ve Gradyan (T Grad) Değerleri

5.3. Isı Kaynağı

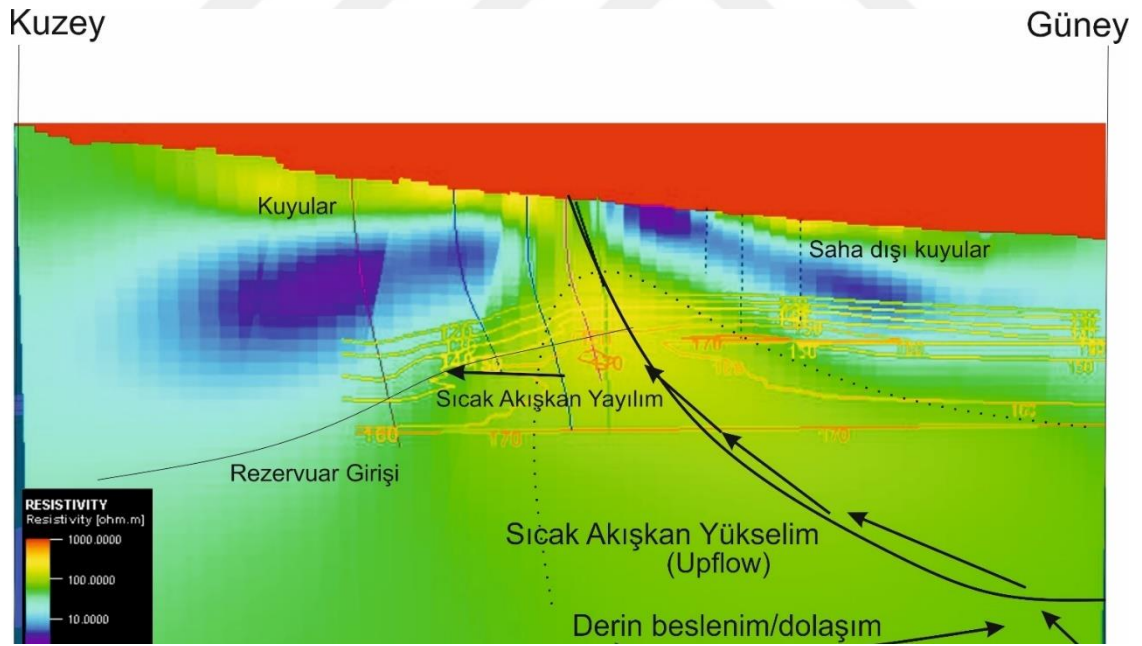
Türkiye'deki jeotermal alanlarda ısı kaynağı, özellikle Orta Anadolu ve Doğu Anadolu bölgesinde soğumasını henüz tamamlayamamış magmatik sokulumlar olarak kabul edilmektedir. Batı Anadolu'da ise temel kuram, genişleme tektoniği etkisi altında kıtasal kabuğun incelmesine bağlı olarak yüksek sıcaklıklı alanların ortaya çıkışıdır [5].

İlkışık [24], silika sıcaklıkları yardımıyla Batı Anadolu'da ısı akısını ortalama 107 mW/m² ile 247 mW/m² arasında hesaplamıştır. Bilim vd. [6] ise ısı akısını 105.07 ve 252.18 mW/m² arasında hesaplamıştır.

Sahada kuyularda yapılmış statik sıcaklık ölçümlerinden kondüktif jeotermal gradyan belirlenmiş, metamorfiklerin temsil edici ortalama gradyanı 10°C/100 m olarak hesaplanmıştır. Sahada kayalara ait herhangi bir ısıl iletkenlik katsayısı ölçümü bulunmamaktadır. Daha önce yapılan araştırmalarda şistler için 2.55 (W/mK), gnayslar için 2.41 (W/mK) ısıl iletkenlik değeri ortaya konmuştur [25].

Bugüne kadar statik durumda görülen kuyu içi maksimum sıcaklık değeri 172 °C olsa da, rezervuar sıcaklığının 180-210 °C arasında olabileceği, jeotermometre çalışmaları ile hesaplanmıştır. Gerçek ısı kaynağının rezervuarın tabanına olan uzaklığı bilinmediğinden, nümerik modelde bu aralıktaki değerler, model tabanı için seçilen sınır koşulu yoluyla denenmiş ve kuyu içi sıcaklık logları ile kalibre edilerek 180 °C taban değeri kullanılmıştır.

Sahanın kavramsal hidrotermal model yaklaşımını gösteren kesit Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Kavramsal modelin FEFLOW programında üç boyutlu olarak gösterimi ise Bölüm 6.4’te paylaşılmıştır.



Şekil 5.2. Manyetotellürik Model Kesidi Üzerinde Sıcaklık Konturlarıyla Birlikte Hidrotermal Kavramsal Model Yaklaşımını Gösteren 2B Kesit (K-G) (Kırmızı zon Manyetotellürik ölçüsünün alınmadığı, yüzeyin üstünü, atmosferi simgelemektedir. Bu zonun rezistivite değeri gerçek ölçüm değildir)

6. JEOTERMAL SİSTEMİN NÜMERİK MODELİ

6.1. Model Yazılımı

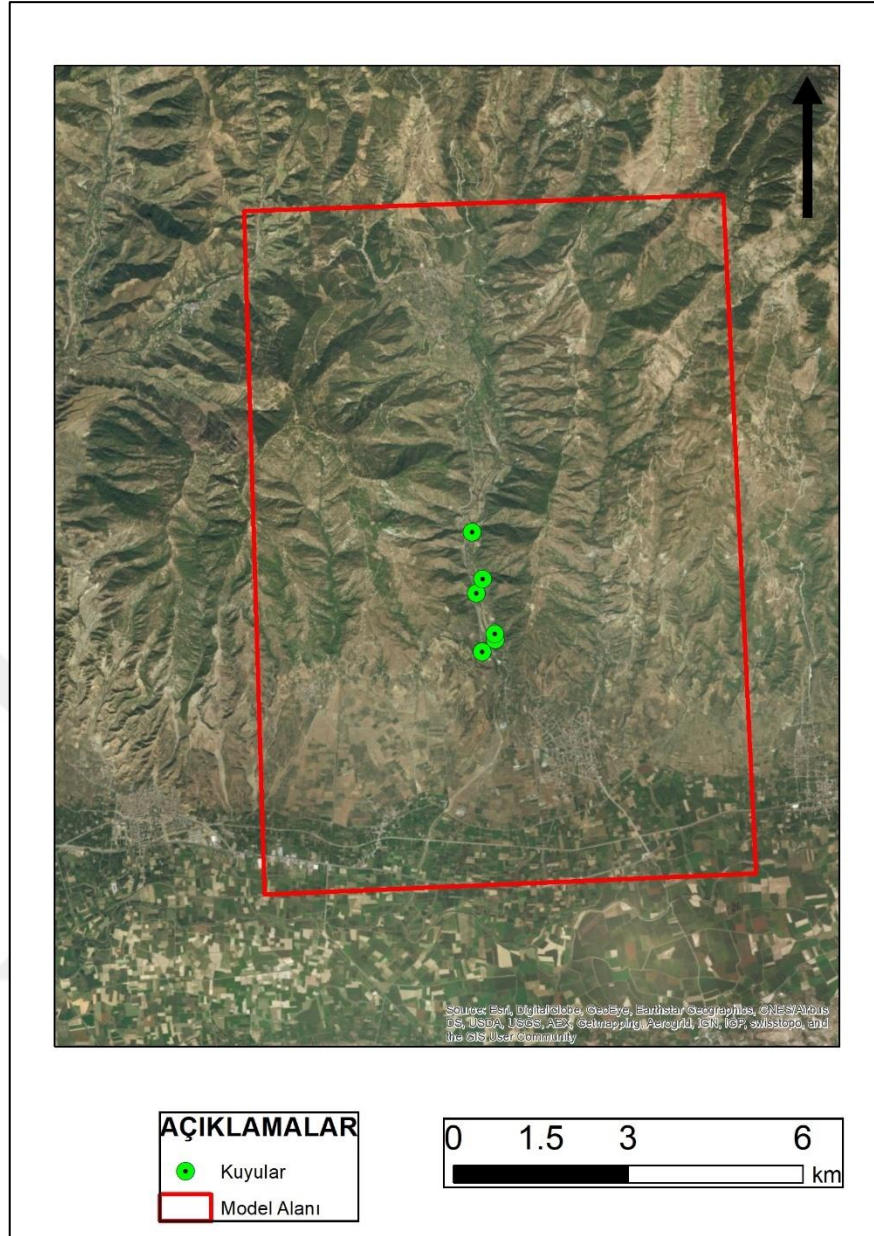
Jeotermal kavramsal modelin nümerik olarak modellenmesi için FEFLOW programı kullanılmıştır. FEFLOW platformu, gözenekli ya da kırıklı çatlaklı ortamlarda akım ve kütle ile sıcaklık taşınımının da simüle edilebildiği bir platformdur.

FEFLOW programı, sayısal çözümlemede sonlu elemanlar yöntemini baz almaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde esnek bir grid yapısı oluşturmak mümkündür. Sınır koşulları, elementlere değil, elementler arası düğüm noktalarına uygulanabilmekte, en zorlu geometriler için grid yapısı oluşturulabilmektedir. Bu sayede nümerik çözüm hataları minimuma indirgenebilmektedir [26].

6.2. Model Alanı ve Grid Tasarımı

Model alanı belirlenirken, işletme sahası, jeolojik ve topografik koşullar göz önünde bulundurulmuştur. Model sınırlarına uygulanacak sınır koşullarının etkisinden uzak tutmak için, model sınırlarının kuyuların işletme alanına yakın olmamasına dikkat edilmiştir.

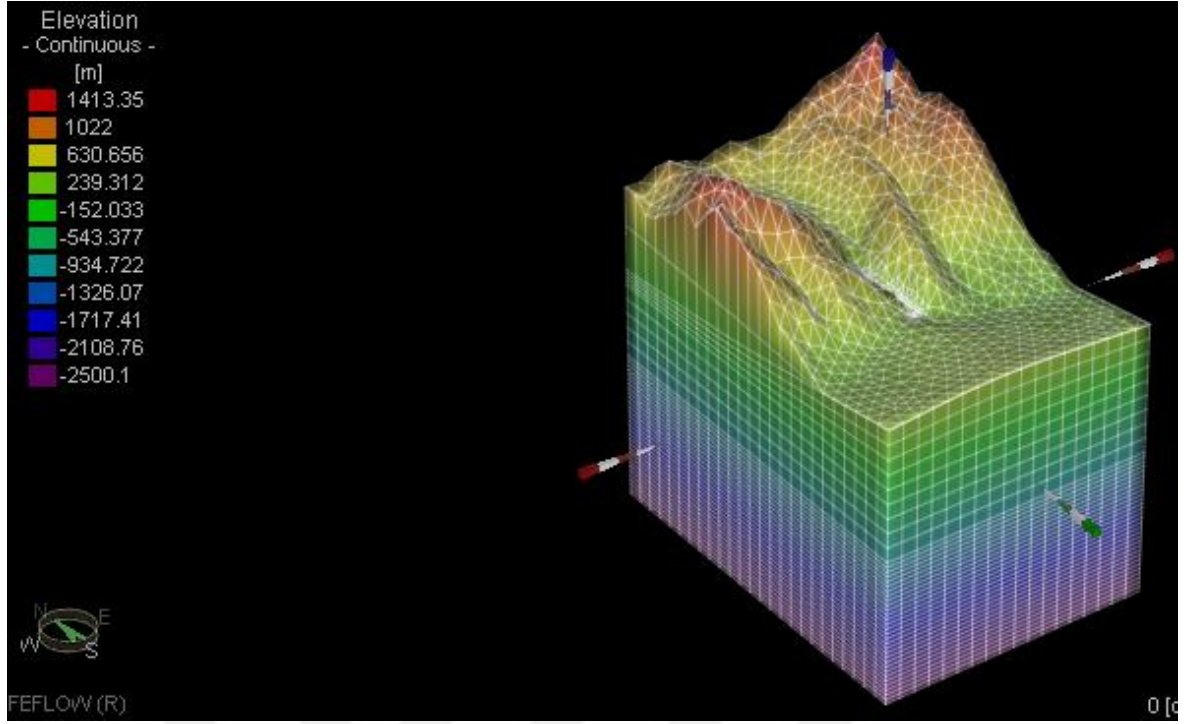
Model alanı genişliği 8792 m, uzunluğu ise 12022 m'dir. Toplam alan 97.7 km²'dir. Model alanının tabanı, en derin kuyudan (2344 m) olması ve sınır koşuluna uzak tutmak amacıyla -2500 m'ye yerleştirilmiştir. Model geometrisi 41 adet katmandan oluşmaktadır. Model alanı Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Model Alanı

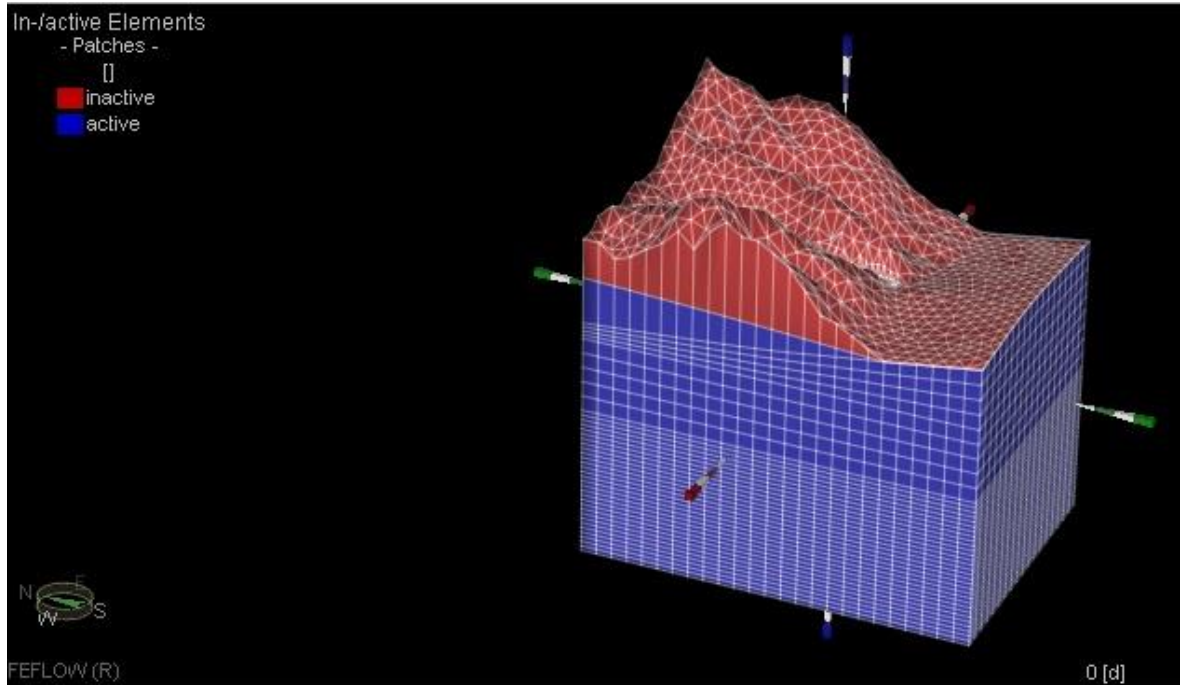
Her katmanda 1993 adet element, 1040 adet düğüm noktası bulunmaktadır.

Model gridleri belirlenirken, kuyuların bulunduğu işletme sahasında, elementlerin boyutu 50 m civarında, veri bulunmayan alanlarda ise 300 m civarındadır. Üç boyutlu model geometrisi Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Üç Boyutlu Model Geometrisi

En üst katman simülasyona dahil edilmemiştir (Şekil 6.3). Aktif olan bölgede, yeraltısuyu ve ısı taşınımı için nümerik çözümleme gerçekleştirilmekte, aktif olmayan kısım ise hesaplama dışı bırakılmaktadır.



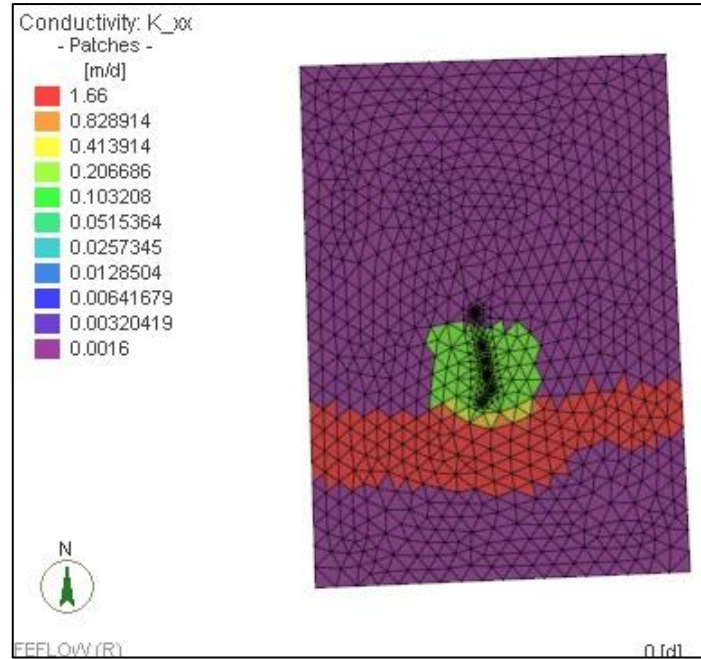
Şekil 6.3. Model Geometrisinde Aktif ve Aktif Olmayan Bölgeler

Düşeyde katmanların sıklığı rezervuar bölümünde artırılmış, düşük geçirimli örtü zonunda ise daha geniş tutulmuştur. Düşey yöndeki akım bileşeni ve ısı taşınımını daha hassas hesaplayabilmek amacıyla rezervuarda her bir katmanın kalınlığı 50 m tutulmuş, diğer katmanlarda ise 150 m olarak atanmıştır.

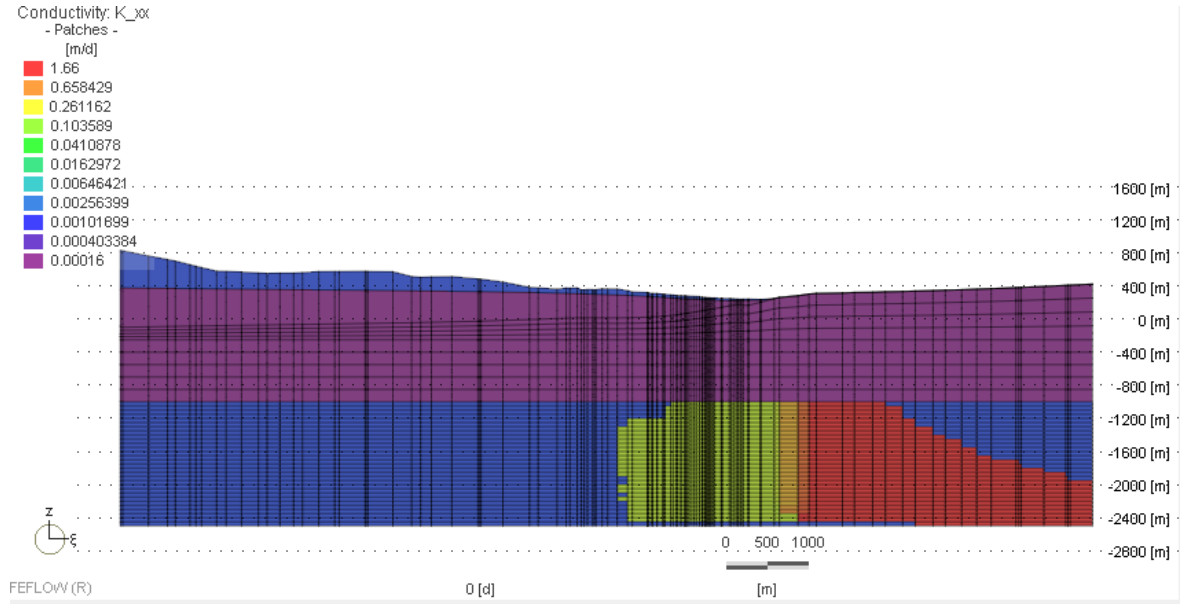
6.3. Hidrolik ve Isı Taşınımı Parametreleri

Model için gerekli hidrolik ve ısı parametrelerden, kuyu testleri sonucunda hesaplanmış olan k (geçirgenlik) değeri dışında herhangi bir ölçümle elde edilmiş parametre bulunmamaktadır.

Yatay yöndeki hidrolik iletkenlik katsayısı değeri, basınç yükselim değerlerinden hesaplanan geçirgenlik (mD) değerlerinden dönüştürülerek, ortalama değer olarak seçilmiş ve rezervuar geometrisine tanımlanmıştır. Akışkanın, fay çevresinde daha hızlı ve tercihli olarak hareket edeceği düşünüldüğünden, fay çevresine 10 kat daha yüksek hidrolik iletkenlik değeri tanımlanmıştır. Örtü birimlerde, konveksiyonu sınırlandıran kondüktif iletimin sağlanabilmesi içinse 100 kat daha düşük olacak şekilde hidrolik iletkenlik değerleri atanmıştır. Hidrolik iletkenlik katsayısının düşey bileşeni, modelin her hücresinde yatay bileşene eşitlenmiştir. Bu şekilde düşeyde de akışkan iletimi sağlanmıştır. Tanımlanan hidrolik iletkenlik değerleri Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de görülebilir.

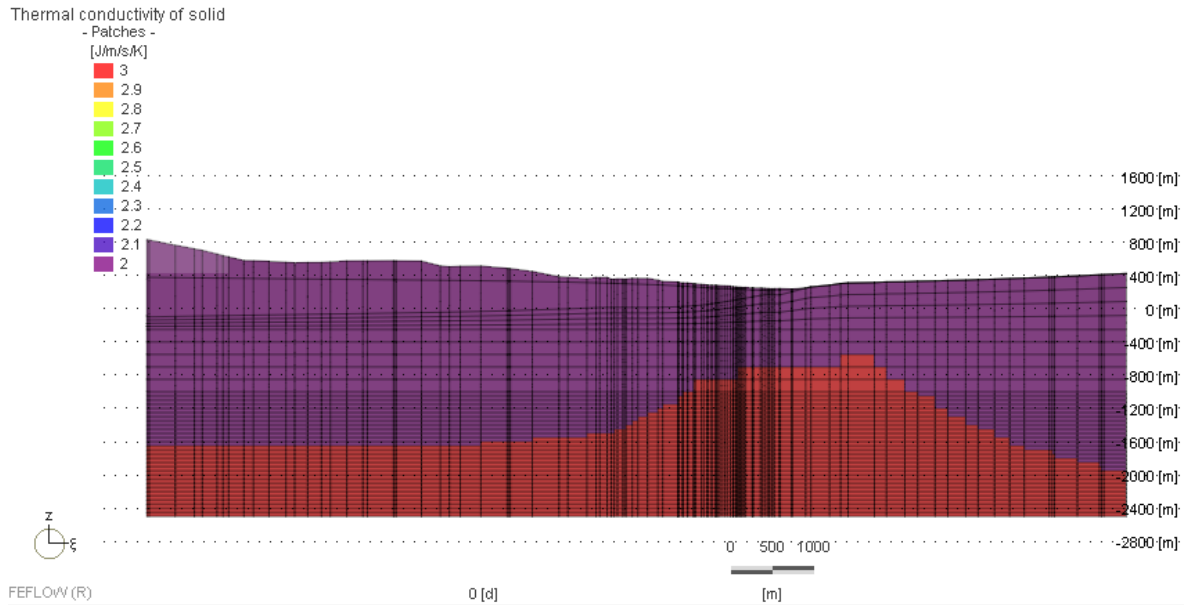


Şekil 6.4. Model Alanı Rezervuar Giriş Yüzeyinde Yatay Hidrolik İletkenlik Katsayısı (m/g) Dağılımı



Şekil 6.5. Model Geometrisinde İki Boyutlu Yatay Hidrolik İletkenlik Katsayısı (m/g) Dağılımı
(Kuzey-Güney)

Termal iletkenlik değerleri, kayaç türlerine göre ortalama bir değer seçilerek katmanlara dağıtılmıştır. Daha önce yapılan araştırmalarda şistler için 2.55 (J/m/s/K), gnayslar için 2.41 (J/m/s/K) ısı iletkenlik değeri ortaya konmuştur [25]. Isıl iletkenlik değeri, ortalama 2 J/m/s/K değerine, rezervuar bölümünde ise 3 J/m/s/K'ye eşitlenmiştir.



Şekil 6.6. Model Geometrisinde İki Boyutlu Termal İletkenlik Katsayısı (J/m/s/K) Dağılımı

Gözeneklilik değeri, literatür verisinden hareketle [27], yalnızca fay ve rezervuar çevresinde 0.1, diğer birimlerde 0.01 olarak kullanılmıştır. Rezervuar bölümünde, konvektif akımın meydana gelebilmesi için, yoğunluk değişimine bağlı akışkan hareketi yaratılması gerekmiştir. Genleşme katsayısı modelde, yoğunluk farkının, referans sıcaklıktaki yoğunluk değerine bölünmesi olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle suyun genleşme katsayısı, sıcaklık değerlerine karşılık gelen $4 \times 10^{-4}/K$ olarak kullanılmıştır.

6.4. Sınır Koşulları

FEFLOW yazılımında hem ısı hem de akışkan için üç tip sınır koşulu kullanmak mümkündür. Bunlar Dirichlet (Sabit Yük) (1. Tip), Neumann (Sabit Gradyan) (2. Tip) ve Cauchy (3. Tip) sınır koşullarıdır.

3. Tip sınır koşulunda, sınır yük değeri ve referans değer arasındaki yük farkının, transfer katsayısına bağlı iletilmesi söz konusu olduğundan, kavramsal modeli nümerik modele dönüştürürken hem ısı hem de akışkan için Cauchy (3. Tip) sınır koşulu tercih edilmiştir.

Jeotermal sahalarda, beslenme ve boşalım alanlarının jeotermal rezervuara uzaklığı, aynı şekilde ısı kaynağının derinliği gibi parametrelerin bilinmezliği, transfer katsayısının kullanımını geçerli hale getirmektedir.

Transfer katsayısına bağlı olarak sınırdan model alanına gelen akım miktarı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$Q_{ısı} = A \times \Phi \times (T_{ref} - T)$$

$$Q_{akışkan} = A \times \Phi \times (h_{ref} - h)$$

Q: Model alanına giriş ya da çıkış miktarı (J/s- m²/s)

A: Alan (m²)

Φ : Transfer Katsayısı (J/m²/s/°K- 1/s)

h_{ref} : Sınır Hidrolik Yük Değeri (m)

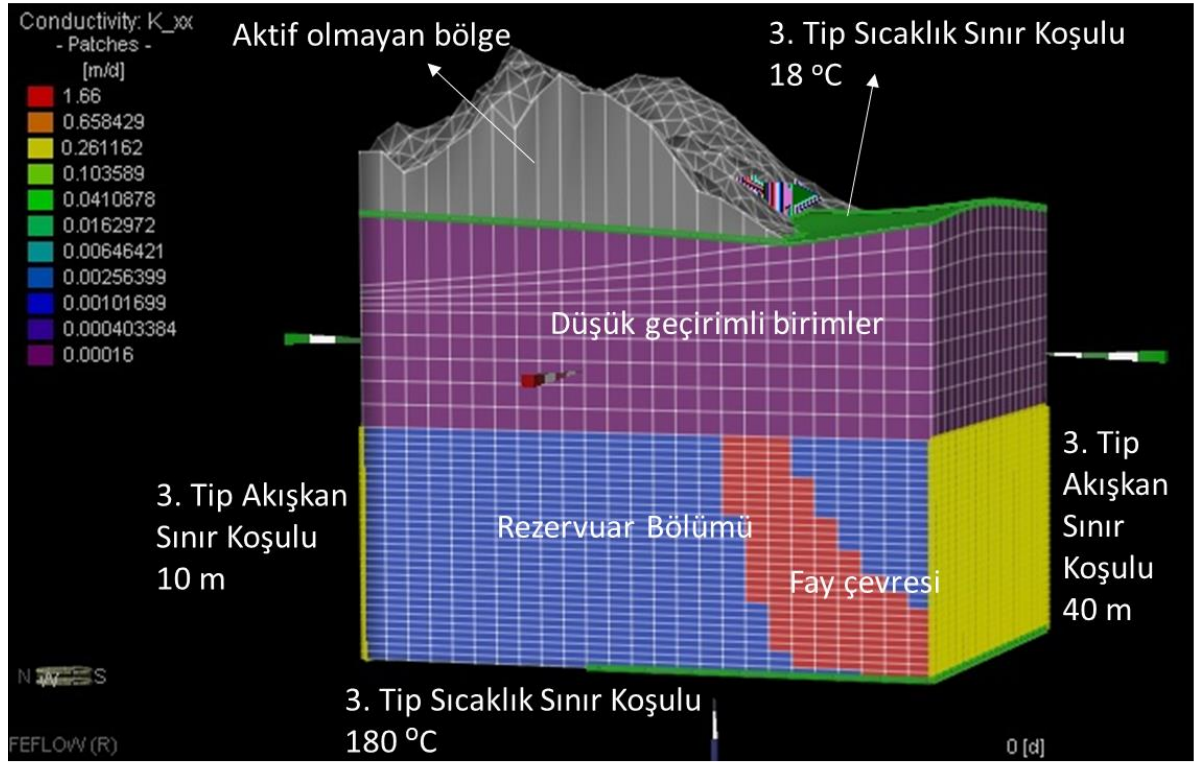
T_{ref} ,: Sınır Sıcaklık Değeri (°K)

h: Rezervuardaki hidrolik yük (m)

T: Rezervuardaki Sıcaklık (°K)

Burada referans sıcaklık ve referans hidrolik yük değerleri sınır koşulundaki değerleri ifade etmektedir.

Jeotermal sistemin kavramsal modeli ve sınır koşulu için seçilen değerler FEFLOW'a Şekil 6.7'deki gibi aktarılmıştır.



Şekil 6.7. Model Geometrisinde Sınır Koşullarının Gösterimi

Model alanının üst sınırına bölgenin ortalama hava sıcaklığını temsil eden 18 °C, sınır değer olarak girilmiş olup, transfer katsayısı 1 J/m²/s/K olarak kullanılmıştır. Model alanının tabanında ise rezervuar sıcaklığını temsil eden 180 °C sınır değer olarak girilmiş olup, transfer katsayısı 3 J/m²/s/°K olarak kullanılmıştır.

Kavramsal modele göre, rezervuarın güney sınırına yüksek hidrolik yük değeri 40 m, kuzey sınırına ise düşük hidrolik yük değeri 10 m olarak tanımlanmıştır. Transfer katsayısı 100 1/g olarak kullanılmıştır. Böylece model alanında güneyden kuzeye doğru bir akım yaratılmıştır.

Sınır değerleri, doğal durum modellemesi adımımda kuyu içi sıcaklık ve hidrolik yük parametreleri ile kalibre edilmiş olup, sonuçları Bölüm 6.6'de paylaşılmıştır.

6.5. Sayısal Çözümleme

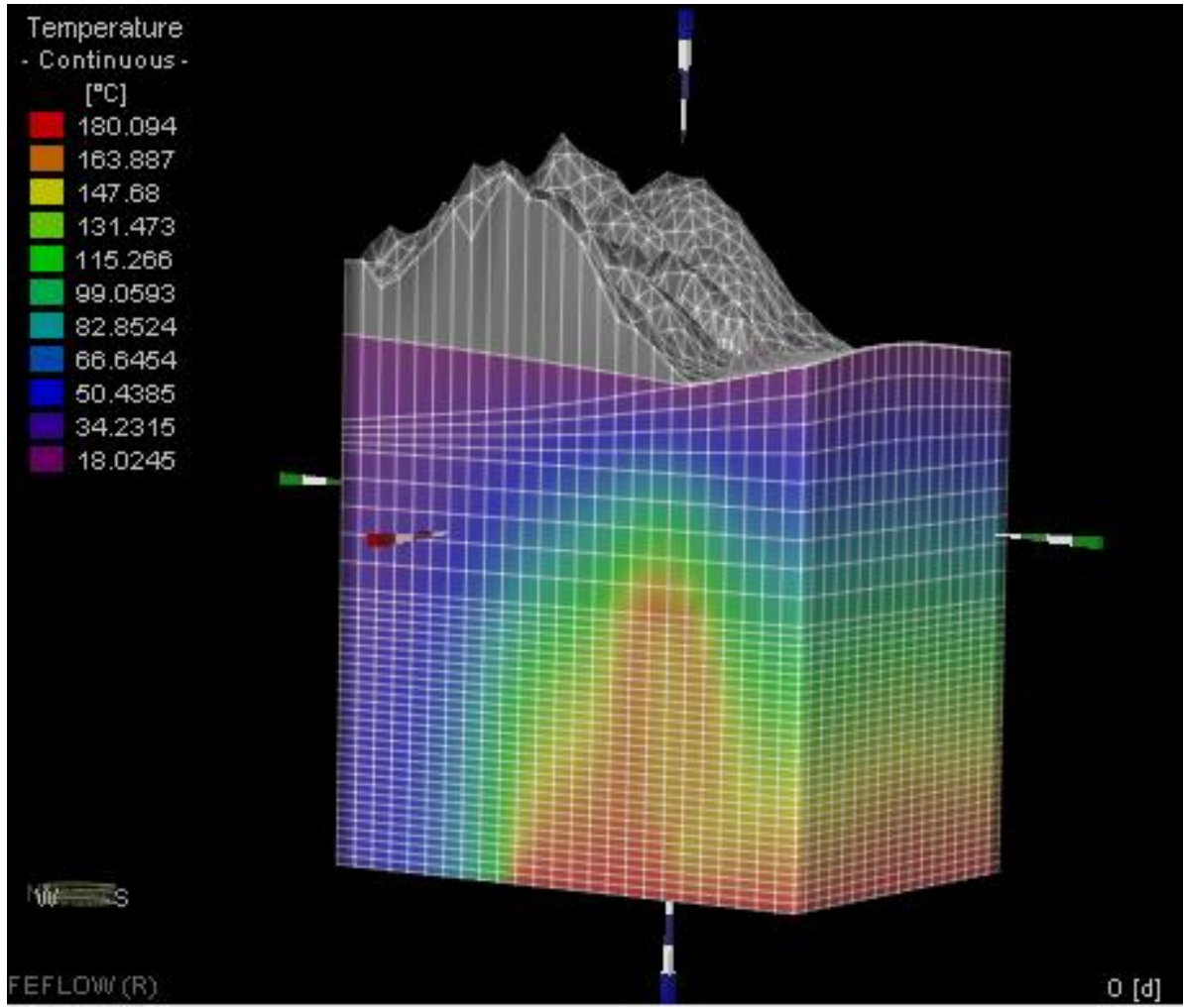
FEFLOW programında, 3 adet çözüm yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar, PARDISO, Standart İterasyon ve Algebraic Multigrid çözüm methodlarıdır. Modelin çözümü için Standart İterasyon yöntemlerine dahil olan PCG (Preconditioned conjugate-gradient method) ve BİCGSTABP (Preconditioned and postconditioned BİCGSTAB) çözüm yöntemleri kullanılmıştır [26]. PCG, akışkan taşınımı, BİCGSTABP ise ısı taşınımı için geçerlidir. Nümerik çözüm gerçekleşirken, yaklaşma sınırını ifade eden hata kriteri 10^{-10} dur.

6.6. Doğal Durum Modellemesi ve Parametre Kalibrasyonu

Doğal durum modellemesi, sahada herhangi bir üretimin başlamadığı ve kuyuların henüz açılmadığı dönemdeki sıcaklık ve hidrolik yük dağılımını temsil etmektedir.

Bu nedenle, model, kararlı koşullarda çalıştırılarak sıcaklık ve hidrolik yük dağılımı kararlı hale getirilmiştir. Model sonuçları, kuyu içi sıcaklık logları ile kalibre edilerek, ölçülen sonuçlara en yakın sonuçlar yakalanmaya çalışılmıştır. Kalibrasyon, kuyularda gözlenen sıcaklık ve hidrolik yükleri esas alınarak yapılmıştır.

Kalibrasyon sırasında, sınır koşullarını temsil eden sıcaklık değerleri, hidrolik iletkenlik katsayıları, transfer katsayıları ve gözeneklilik değerleri değiştirilerek gözlenen değerlere yaklaşılmaya çalışılmıştır.



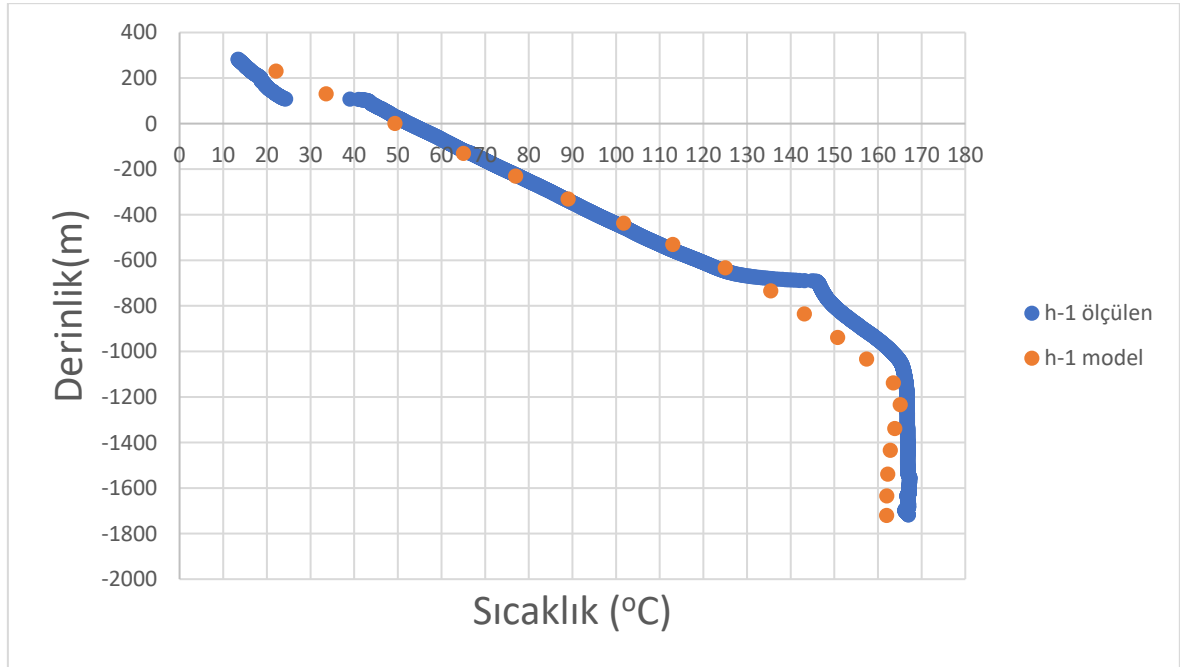
Şekil 6.8. H-1 Doğal Durum Modellemesi Sonucunda Elde Edilen Sıcaklık Dağılımı

Kalibrasyon neticesinde nihai olarak kullanılan model parametreleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

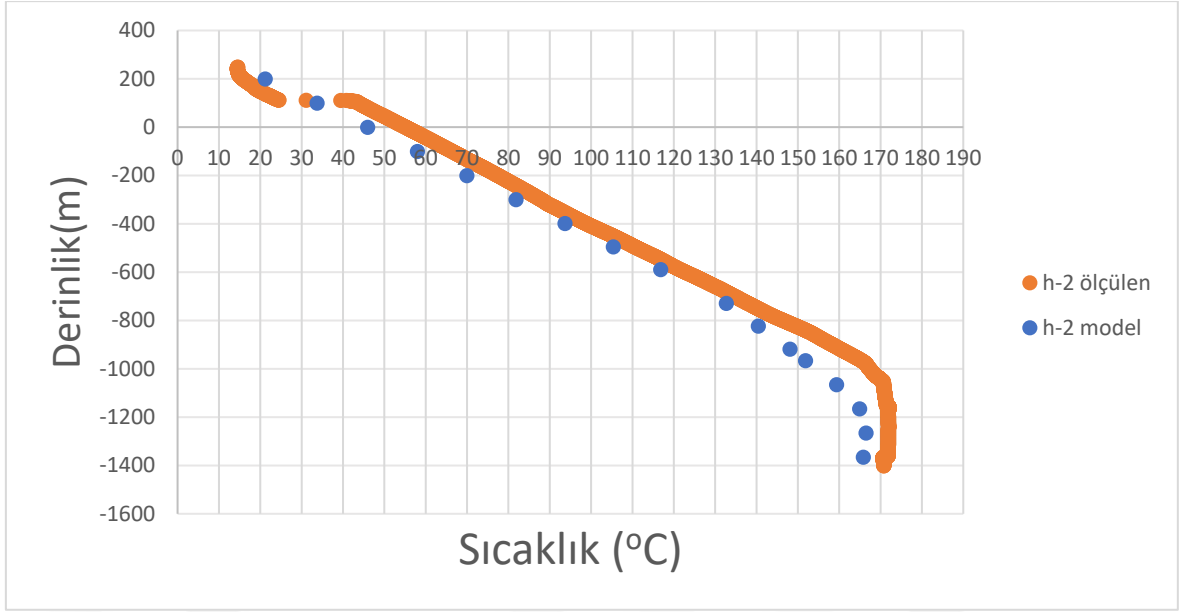
Çizelge 6.1. Kalibrasyon Sonucu Nihai olarak kullanılan Model Parametreleri

Parametre	Fay Çevresi	Rezervuar	Örtü	Taban	Tavan	Güney	Kuzey
Yatay Hidrolik İletkenlik Katsayısı (m/g)	1.66	0.166	0.0016				
Düşey Hidrolik İletkenlik Katsayısı (m/g)	1.66	0.166	0.0016				
Termal İletkenlik Katsayısı (J/m/s/K)	3	3	2				
Genleşme Katsayısı (10^{-4} K)	0	4	0				
Gözeneklilik	0.1	0.01	0.01				
Sıcaklık Sınır Koşulu (3. Tip) (°C)				180	18		
Akışkan Sınır Koşulu (3. Tip) (m)						40	10
Transfer Katsayısı Giriş (1/g) (Akışkan Sınır Koşulu için)	100	100	100				
Transfer Katsayısı Çıkış (1/g) (Akışkan Sınır Koşulu için)	100	100	100				
Transfer Katsayısı Giriş (J/m ² /s/K) (Sıcaklık Sınır Koşulu için)	3	3	3				
Transfer Katsayısı Çıkış (J/m ² /s/K) (Sıcaklık Sınır Koşulu için)	1	1	1				

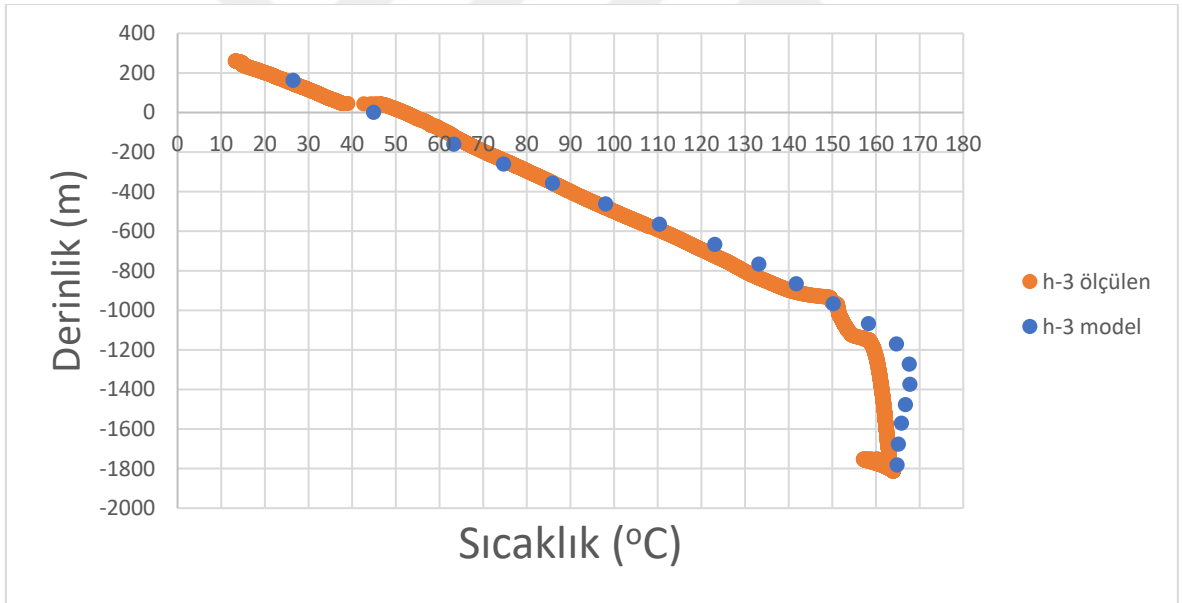
Model sonuçlarının, beş kuyuda ölçülen kuyu içi sıcaklık logları ile kıyaslanması Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’de verilmiştir.



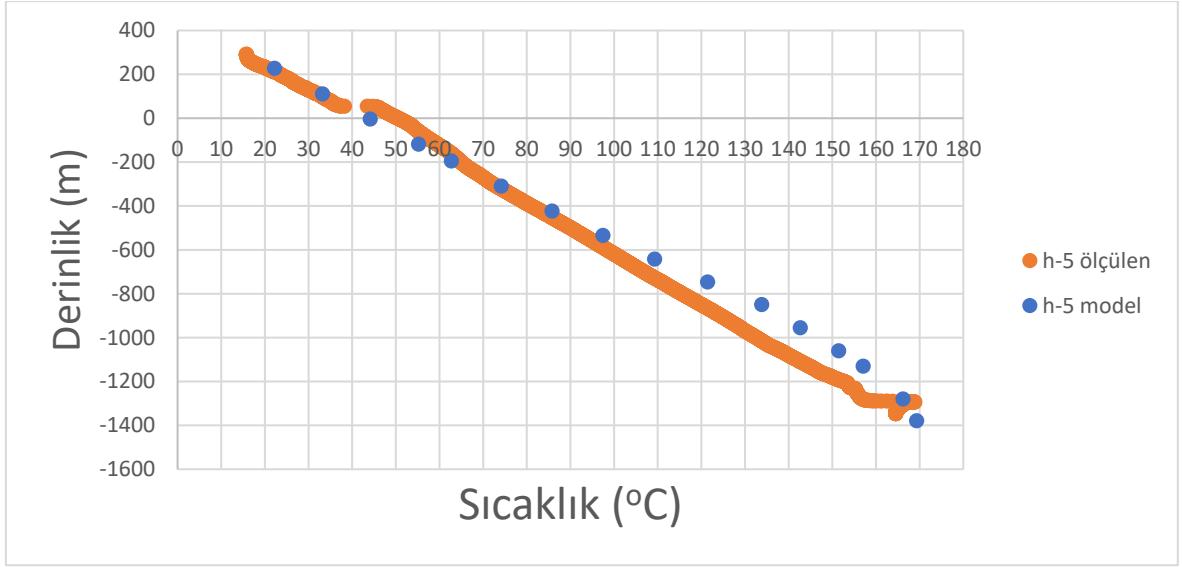
Şekil 6.9. H-1 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama



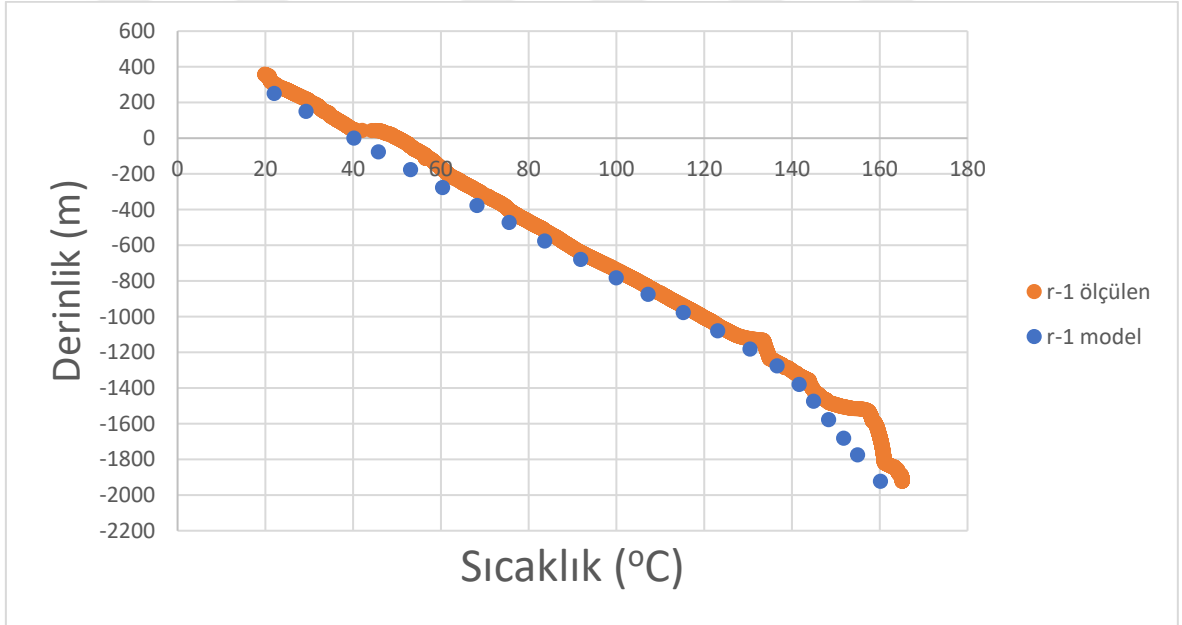
Şekil 6.10. H-2 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama



Şekil 6.11. H-3 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama



Şekil 6.12. H-5 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama



Şekil 6.13. R-1 Kuyusu Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Değerleri Kıyaslama

Modelin kararlı koşullar altında çalıştırılması sonucunda ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri arasındaki mutlak fark, tüm kuyulardaki gözlem noktalarında, sahadaki en yüksek sıcaklık değeri baz alınır, en fazla %2.5 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç, ölçülen ve hesaplanan sıcaklık sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

Kuyucak jeotermal sahasında henüz uzun dönemli işletme verileri bulunmadığından kararsız model kalibrasyonu yapılamamıştır.

Model sonuçlarının, dört kuyuda ölçülen hidrolik yük değerleri ile kıyaslanması Şekil 6.14’de verilmiştir.



Modelin kararlı olarak çalıştırılması sonucunda, gözlenen değerler ve modelde hesaplanan değerler arasındaki farkların karesinin ortalamasının karekökü olarak ifade edilen RMS değeri, hidrolik yük değerleri için 10.5 m olarak gerçekleşmiştir. RMS değerinin, maksimum ve minimum sapma değerleri arasındaki fark değerine bölünmesiyle elde edilen Normalleştirilmiş RMS (N-RMSE) ise 0.79 olarak hesaplanmıştır. Her iki değer de gözlenen değerler ve hesaplanan değerler arasında kabul edilebilir bir yakınlığa ulaşıldığını ve modelin temsil kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Kararlı koşullarda, model alanına 7355 l/s beslenim gerçekleşmiş olup, 7254.8 l/s dışa akış hesaplanmıştır. Nümerik yaklaşma hatalarından kaynaklanan dengesizlik miktarı 0.02 l/s'dir.

Aynı şekilde, modele giriş yapan ısı enerjisi miktarı 18 MW, çıkış miktarı ise 17 MW'dır. Dengesizlik miktarı 1 MW olarak gerçekleşmiştir.

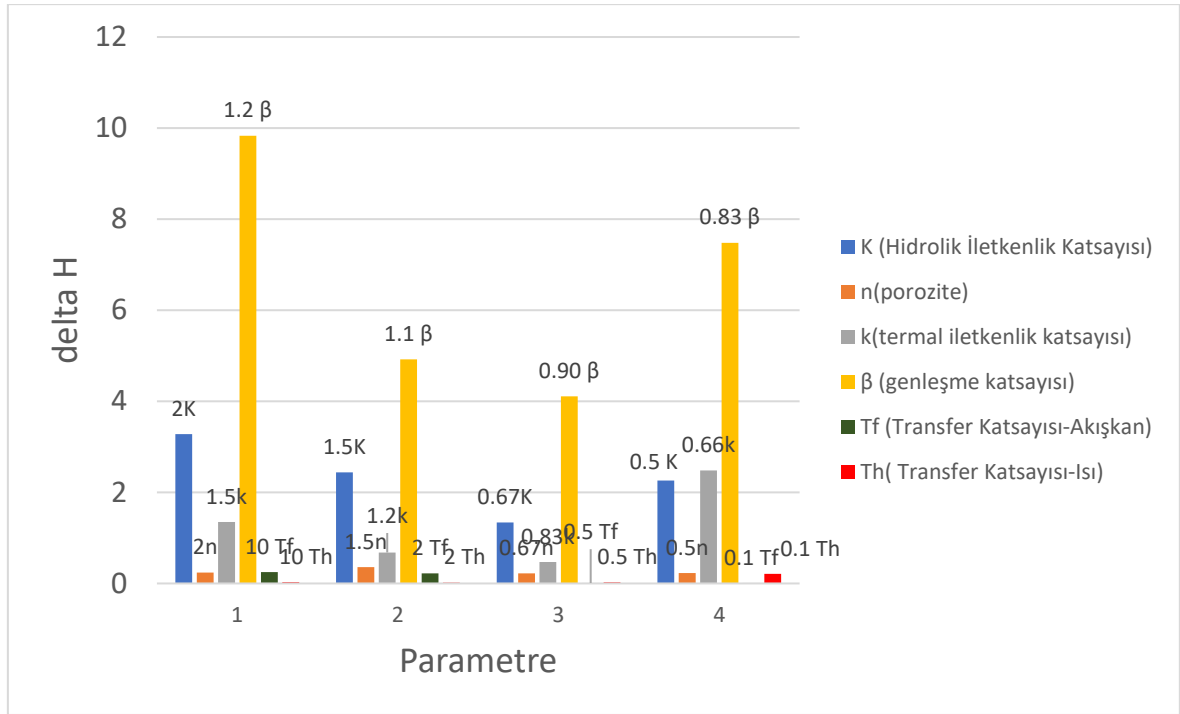
Nümerik modelleme sonucunda elde edilen kararlı sıcaklık ve hidrolik yük dağılımı, kurulan kavramsal modelin, sahanın akım ve sıcaklık dolaşımını temsil ettiğini göstermektedir.

6.7. Hassasiyet Analizi

Model parametreleri, sahayı temsil eden gerçek parametreler değil, gözlemlenen verilere uyum sağlayan seçilmiş parametrelerdir. Bu nedenle, seçilen parametrelerin modelin hassasiyetine nasıl etki ettiğini görmek amacıyla, altı adet parametre ile hassasiyet analizi yapılmıştır. Her seçilen parametre artırılıp, azaltılırken, diğer parametreler sabit tutularak model yeniden çalıştırılmış, yeni elde edilen model sonuçları, mevcut model sonuçları ile kıyaslanmıştır.

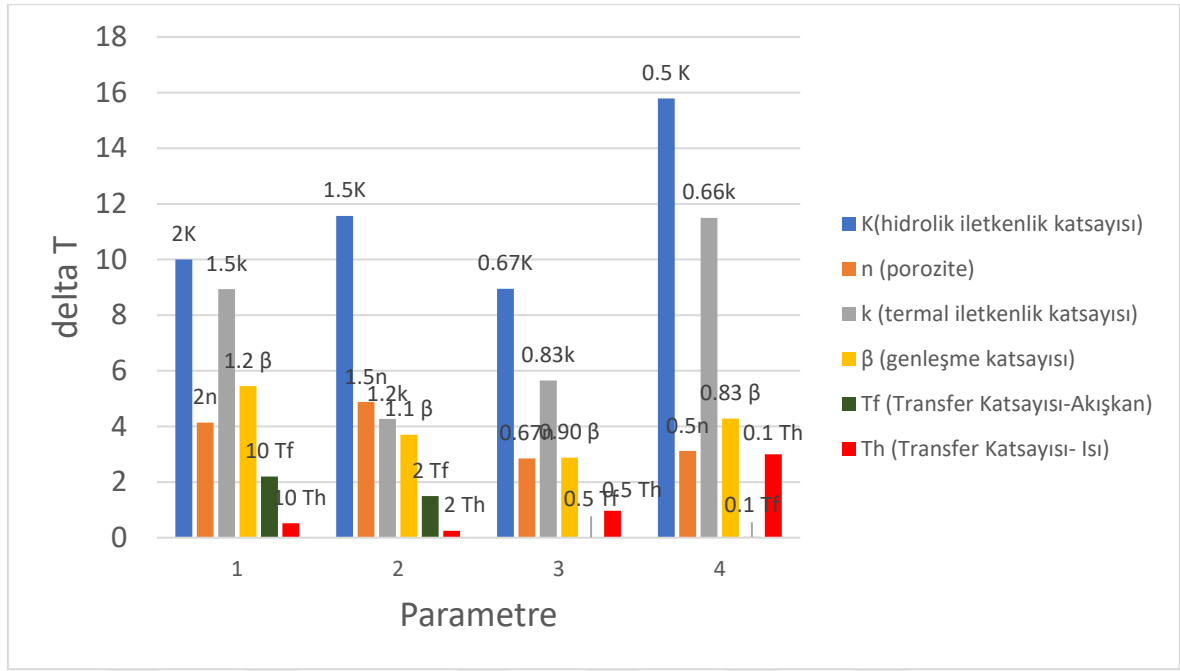
Değiştirilen parametrelerin model sonuçları üzerinde etkisini görebilmek için, modelin her hücresindeki hesaplanmış mevcut hidrolik yük ve sıcaklık değerinden, yeni elde edilen modelin hidrolik yük ve sıcaklık değeri çıkarılmış, aradaki en yüksek fark değerine bakılmıştır.

Her bir parametrenin, belirli katsayılar verilerek değiştirilmiş haline karşılık, modelde meydana gelen en yüksek hidrolik yük ve sıcaklık farkı değerleri, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Model Parametrelerinin Hassasiyet Analizi Sonucu Meydana Gelen Hidrolik Yük Farkı

Şekil 6.15’de görüleceği üzere, hidrolik yük dağılımı açısından, kıyaslanan parametreler arasında modelin en fazla “genleşme katsayısı” ve “hidrolik iletkenlik katsayısı” parametrelerine duyarlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, özellikle bu iki parametrenin, işletme döneminde sahadan toplanacak olan dinamik veriler kullanılarak, kararsız kalibrasyona tabi tutulması önem taşımaktadır.



Şekil 6.16.Model Parametrelerinin Hassasiyet Analizi Sonucu Meydana Gelen Sıcaklık Farkı

Şekil 6.16’da görülen sıcaklık sonuçları açısından kıyaslanan parametreler arasında ise, modelin en az “hidrolik iletkenlik katsayısı” ve “termal iletkenlik katsayısı” parametrelerine duyarlı olduğu görülmektedir. Termal iletkenlik katsayı değerinin, kuyudan alınmış olan karot örneklerinde laboratuvar ortamında ölçülmesi, model belirsizliğinin azalmasında yardımcı olabilir.

6.8. Örnek İşletme Senaryosu

Model sonucu kullanılarak, örnek bir üretim ve enjeksiyon denemesini içeren işletme senaryosu, model üzerinde denenmiştir.

Senaryoda, 10 yıl boyunca H-1, H-2, H-3, H-5 kuyularından çekim yapılmış ve çekilen toplam sıcak su miktarı, R-1 kuyusundan rezervuar seviyesine geri basılmıştır. Çekilen örnek debiler sırasıyla 60, 70, 50, 60 l/s olup, reenjeksiyon debisi ise 240 l/s'dir. G-2 gözlem kuyusu ve tüm üretim kuyularında sıcaklık ve hidrolik yük değişimi gözlenmiştir.

Reenjeksiyon sıcaklığı 70 °C olarak seçilmiş ve 70 °C suyun taşıdığı 293 kJ/kg enerji, modele 2. Tip "Noktasal Isı Kaynağı (Sabit Gradyan)" sınır koşulu olarak, tanımlanmıştır.

Kuyulardan yapılan çekimler ve enjeksiyon ise kuyuların delikli boru metrajlarına "Çoklu Katman Kuyu (Sabit Gradyan)" sınır koşulu ile tanımlanmıştır.

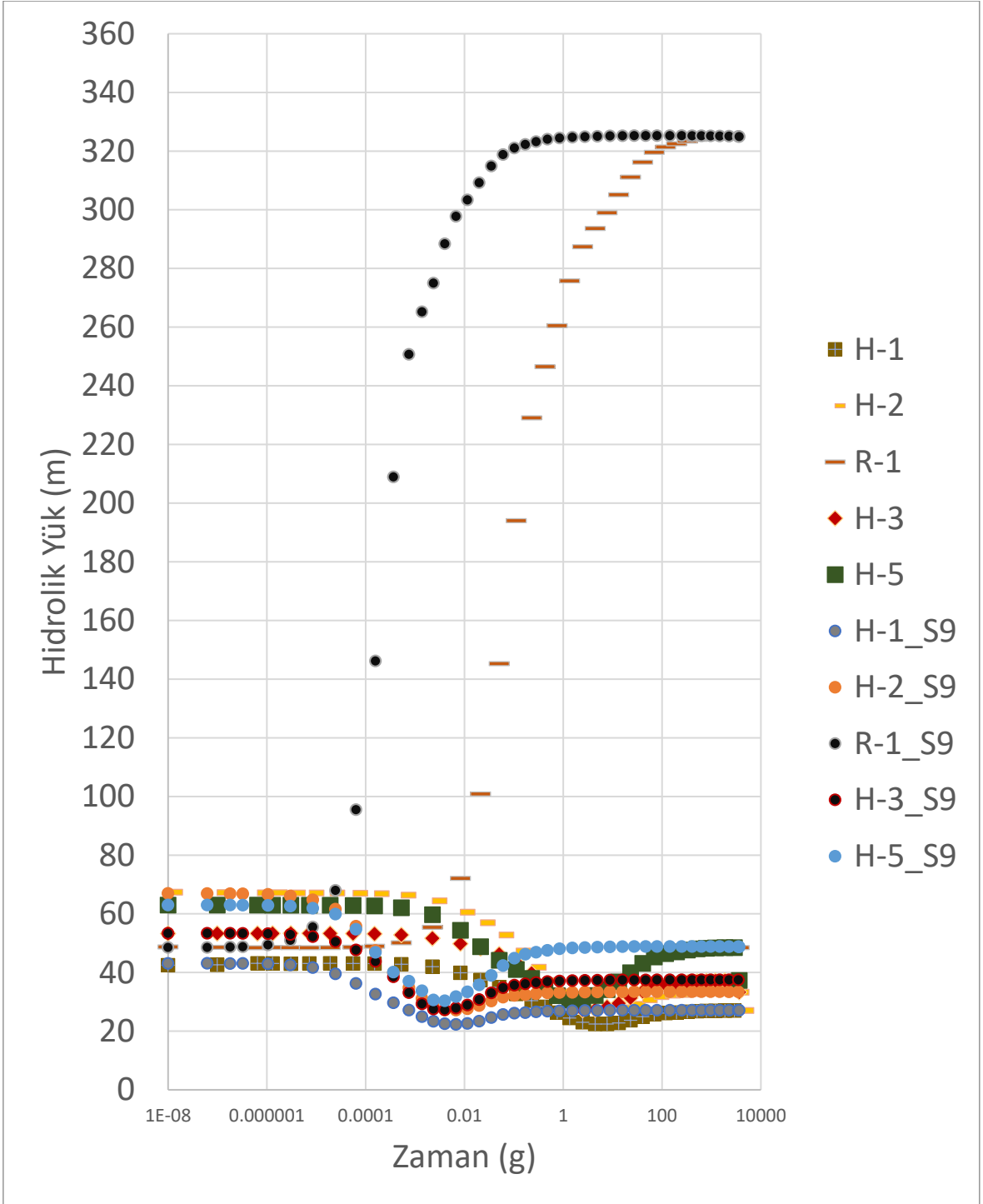
Özgül depolama ile ilgili bir ölçüm bulunmadığından, ilk çıkış noktası olarak literatür verisinden faydalanılmıştır [28]. Modelde katsayı, önce 10^{-6} 1/m olarak atanarak çalıştırılmış, sonrasında 10^{-9} 1/m değeriyle de çalıştırma yapılmıştır. Her iki seçim için gözlem noktalarında sıcaklık ve hidrolik yük değerleri dağılımları Şekil 6.17'de ve Şekil 6.18'de verilmiştir.

Üretim senaryosunda, reenjeksiyon kuyusunda hidrolik yükün yaklaşık olarak 270 m yükseldiği ve sonrasında sabitlendiği görülmektedir. 10 yıllık üretim dönemi boyunca kuyunun yüksek basınç değeriyle sabit kalacağı gözlemlenmiştir.

Üretim kuyularında ise düşüm ilk saatlerde meydana gelmekte, sonrasında enjeksiyonun etkisiyle beraber sabit bir hidrolik yük değeri tüm kuyularda korunmaktadır.

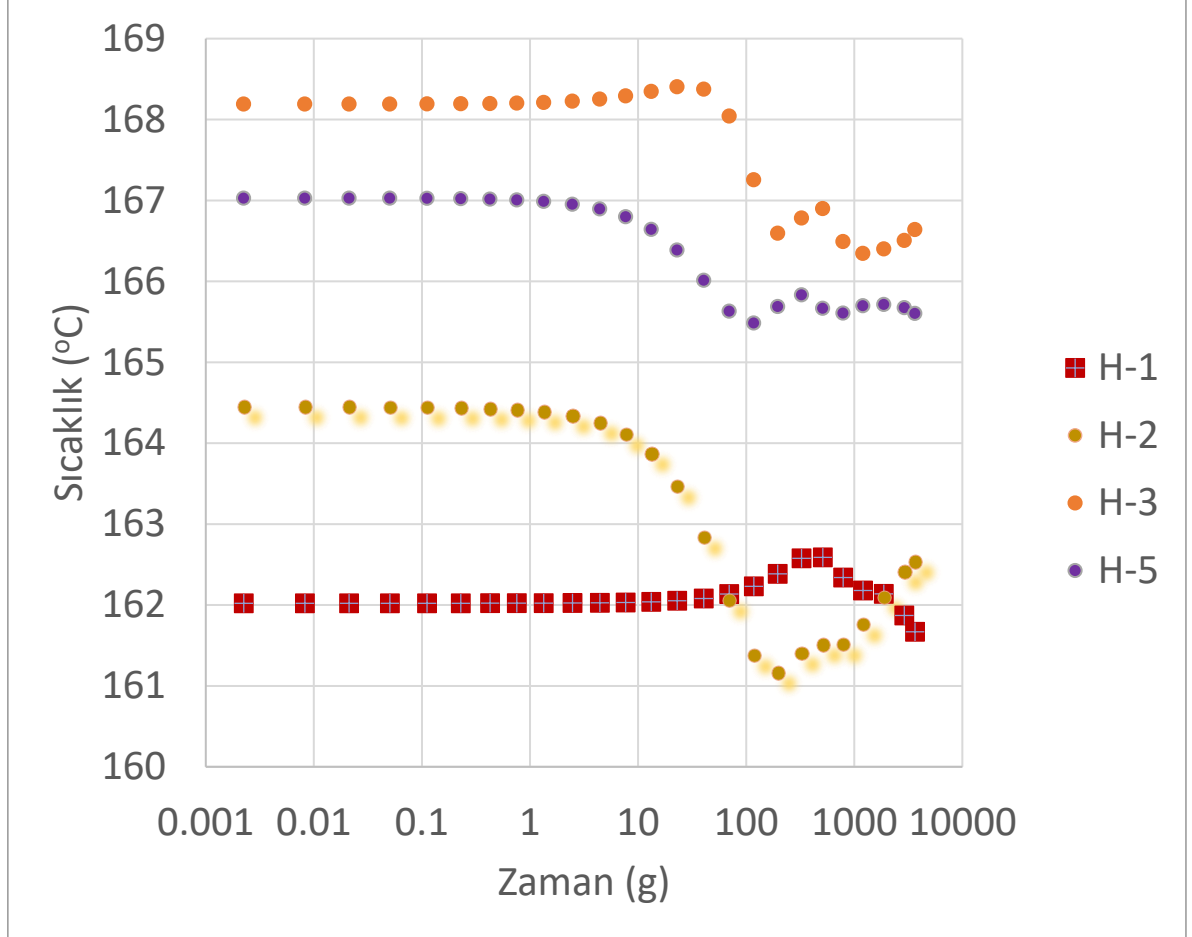
Özgül depolama değişiminin, hidrolik seviyenin yükselme zamanında değişim yarattığı fakat sonuçta ulaşılan hidrolik yüklerde bir değişime sebep olmadığı görülmektedir.

Özgül depolama gibi parametrelerin daha sağlıklı tahmin edilebilmesi için uzun dönemli üretim ve reenjeksiyon verileriyle yapılacak olan kararsız kalibrasyon aşaması önem taşımaktadır.



Şekil 6.17. Örnek Senaryo Sonucu Hesaplanan Hidrolik Yük Değerlerinin Zamanla Değişimi (S9 kodlu örneklerin özgül depolama değeri 10^{-9} , diğer örneklerin 10^{-6} 'dır.)

10 yıllık üretim dönemi boyunca kuyulardaki sıcaklık değişimleri ise Şekil 6.18’de görülebilecek olup, sıcaklık düşümünün temel olarak 10. ve 100. günler arasında yaklaşık olarak 2-3 °C olarak gerçekleştiği, 10 yıl sonunda sıcaklıkların halen kararlı duruma ulaşmadığı görülmektedir.



Şekil 6.18. Örnek Senaryo Sonucu Hesaplanan Sıcaklık Değerlerinin Zamanla Değişimi

7. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, Aydın ili Kuyucak İlçesi'nde bulunan jeotermal sahada jeolojik ve hidrojeolojik veriler ışığında kurulan kavramsal model, FEFLOW nümerik model programına aktarılmıştır.

Oluşturulan kavramsal modelde, Menderes metamorfiklerine ait mermer ve şist seviyeleri, kırık ve çatlaklı heterojen yapılarıyla jeotermal akışkan için rezervuar görevi görmektedir. Yine Menderes metamorfiklerine ait fakat oldukça düşük geçirimli olan örtü tabakası, rezervuarın üzerinde kondüktif bir ısı iletimine sebep olmaktadır. Sahanın güney sınırında bulunan grabeni sınırlayan D-B doğrultulu ana faylar sayesinde taşınan akışkan, K-G doğrultulu fay zonunun da etkisiyle kırıklı-çatlaklı yapıya sahip olan rezervuara doğru iletilmektedir. Jeokimyasal analiz sonuçları, güncel beslenimin varlığından ziyade, derin ve uzun akım yollarından gelen akışkanın varlığını desteklemektedir. Kavramsal model, model geometrisine güney sınırdan tanımlanan beslenim, kuzey sınırdan boşalım, model tabanından ısınma ve model tavanından soğuma oluşturacak şekilde seçilen sınır koşulları ile girilmiştir.

Literatür verileri ve basınç yükselim test sonuçları ışığında seçilen hidrolik ve ısı parametreler, nümerik modelleme sırasında kalibre edilmiştir. Doğal durum modeli çalıştırılarak elde edilen sonuçlar, kuyulardan ölçülen statik sıcaklık verileri ile kıyaslanarak kalibre edilmiştir. Aynı kuyuların hidrolik yük değerleri de kalibrasyon için kullanılmıştır. Kalibrasyon sonucu elde edilen parametre ve sınır değerleri ile kavramsal modelin, mevcut jeotermal rezervuar modelini temsil ettiği görülmüştür.

Ortaya konan bu jeotermal rezervuar modeli, sahada planlanan işletme senaryolarının tahmininde ve testlerin kurgulanmasında kullanılabilir.

Örnek bir işletme senaryosu kurgulanarak, 4 kuyudan üretim, 1 kuyudan reenjeksiyon yapılmış, model 10 yıl süre ile çalıştırılmış ve ortaya çıkacak sıcaklık ve hidrolik yük değerleri tahmin edilmiştir.

Çalışma kapsamında, uzun süreli kuyu testi verisi ve işletme dönemine ait veri bulunmaması, kararsız kalibrasyonun gerçekleştirilememesine sebep olmuştur. Yapılan hassasiyet analizi sonucunda ise model sonuçlarının, genleşme katsayısı, hidrolik iletkenlik katsayısı ve termal iletkenlik katsayısı parametrelerine hassas

olduğu, kararsız koşullar içinse özgül depolama gibi parametrelerin belirlenmesinin önem taşıdığı görölmüşür. Bu nedenle, parametrelerin modele etkisini daha sağlıklı yansıtabilmek için, toplanacak olan uzun dönemli işletme verileri (sıcaklık, basınç, debi) ve laboratuvar ölçümleri ile kararsız model kalibrasyonunun yapılması önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Şimşek, Ş. "Denizli Kızıldere-Tekkehamam-Tosunlar-Buldan-Yenice Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları, **1984**.
- [2] Göktürkler, G. Yerbilimlerinde Isı Transferi Modellemesi: Kararlı-Hal Kondüktif Isı İletimi, *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, vol. 4, no: 3, pp. 67–80, **2002**.
- [3] Koçyiğit, A., Active Tectonics and Geothermal Potential of Pamukören (Nazilli) Area, **2010**.
- [4] Atmaca, İ., Resource Assessment in Aydın-Pamukören Geothermal Field, *Middle East Technical University*, **2010**.
- [5] Karakuş, H., Büyük Menderes Grabenindeki Jeotermal Sistemlerin Jeokimyasal ve İzotop Teknikleri ile İncelenmesi, *Hacettepe Üniversitesi*, **2010**.
- [6] Bilim, F., Akay, T., Aydemir, A., Kosaroglu, S., Geothermics Curie point depth, heat-flow and radiogenic heat production deduced from the spectral analysis of the aeromagnetic data for geothermal investigation on the Menderes Massif and the Aegean Region , western Turkey," *Geothermics*, vol. 60, pp. 44–57, **2016**.
- [7] Sullivan, M. J. O., Pruess, K., Lippmann, M. J., State of the art of geothermal reservoir simulation," vol. 30, pp. 395–429, **2001**.
- [8] Dora, O. Ö., Kun, N., Candan, O., Menderes Masifi'nin metamorfik tarihçesi ve jeotektonik konumu, *TJK Bülteni*, no. 35, pp. 1–14, **1992**.
- [9] McKenzie, D., Pressure Buildup in Wells, *Geophys. J. Int.*, vol. 30, no. 2, pp. 109–185, **1972**.
- [10] Tectonic Map of Turkey, USGS, *earthquake.usgs.gov*, **2003**. .
- [11] Satır, H., Friedrichsen, M., The origin and evolution of the Menderes Massif, West Turkey: A rubidium/strontium and oxygen isotope study, *Geol. Rundschau*, vol. 75, **1986**.
- [12] Şimşek, Ş, Aydın-Germencik-Ömerbeyli Jeotermal Alanının Ön Fizibilite Raporu, Ankara, **1988**.
- [13] Candan, O., Dora, O.Ö., Kun, N., Akal, C., Koralay, E., Aydın Dağları (Menderes Masifi) güney kesimindeki allohton metamorfik birimler, *Türkiye Pet. Jeologları Derneği Bülteni*, vol. 4, pp. 93–110, **1992**.
- [14] Mutlu H., Yüce, G., Aydın İli Kuyucak İlçesi'nde Bulunan Jeotermal Kaynak İşletme Ruhsatına İlişkin Kaynak Koruma Etüt Raporu, **2013**.
- [15] MTA, Pamukören (AP) Kuyuları Analiz Sonuçları, **2009**.
- [16] Şimşek, Ş., Doğdu, M.Ş., Akan, B., HİD 645-Hidrojeotermometreler Ders Notları, *Hacettepe Üniversitesi*, Ankara, **1997**.
- [17] Giggenbach, W.F., Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators, *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 55, pp. 2749–2765, **1988**.
- [18] Fournier, R.O., Truesdell, A. H., An empirical Na-K-Ca geothermometers for natural waters, *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 37, pp. 1255–1275, **1973**.

- [19] Fournier, R.O., Silica in Thermal Waters: Laboratory and Field Investigations, *Proc. Int. Symp. Hydrogeochemistry Biochem. Tokyo, Clark Co., Washington. D.C.*, vol. Vol.1, pp. 122–139, **1973**.
- [20] Grant, M.A., Bixley, P.F., *Geothermal Reservoir Engineering Book*, **1988**.
- [21] Horner, D.R., Pressure Buildup in Wells, *Third World Pet. Cong.*, pp. 503–523, **1967**.
- [22] Duggal K.N., Soni, J.P., Elements of Water Resources Engineering, *New Age International*, p. 270, **1996**.
- [23] Fugro Electro Magnetics Italy Srl with Fugro Sial Geosciences and Consulting and Engineering LTD. ŞTİ, "Geothermal License Areas, Western Turkey, Aydın-Kuyucak, Magnetotelluric (MT) Survey, 3D Modelling, **2012**.
- [24] İlkışık, O. M., Regional heat flow in Western Anatolia using silica temperature estimates from thermal springs, *Tectonophysics*, vol. 244, pp. 175–184, **1995**.
- [25] Eppelbaum, L., Kutasov, I., Pilchin, A., *Applied Geothermics*. **2014**.
- [26] Diersch, H.-J. G., *FEFLOW* Springer Berlin Heidelberg, **2014**.
- [27] Domenico, P.A., Schwartz, F.W., Physical and Chemical Hydrogeology, Second Edition, **1990**.
- [28] Domenico, M., Water from low-permeability sediments and land subsidence, *Water Resour. Res.*, vol. 1, no. 4, pp. 563–576, **1965**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı-Soyadı: Tuğçe Yargıcı

Doğum Yeri: Ankara

Medeni Hali: Evli

E-posta: tugceyargici89@gmail.com

Eğitim

Lisans, 2007-2012: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü

Lise, 2003-2007: Ankara Anadolu Lisesi

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce: İyi

Almanca: Başlangıç

İş Deneyimi

09.2016-01.2018: Jeotermal Rezervuar& Arama Mühendisi

11.2012-07.2016: Jeotermal Proje Geliştirme Uzmanı

09.2012-11.2012: Proje Mühendisi

Deneyim Alanları

Hidrojeoloji, Jeotermal Hidrojeoloji, Jeotermal Modelleme, Yeraltısuyu Modellemesi, Jeotermal Rezervuar Mühendisliği, Hidrojeokimya, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Kuyu Testleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
JEOLojİ (HİDROJEOLojİ) MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 08/07/2018

Tez Başlığı / Konusu: Kuyucak Jeotermal Rezervuarının Nümerik Modeli

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 82 sayfalık kısmına ilişkin 08/07/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Tuğçe Yargıcı
Öğrenci No: N13229335
Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği
Programı: Hidrojeoloji Mühendisliği
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

08.07.2018

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Dr. Levent TEZCAN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)