DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİMAV (KÜTAHYA) OVASINDA YERALTISUYU JEOTERMAL AKIŞKAN ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL MODELLEME İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yağmur AKPINAR

Temmuz, 2024

İZMİR

SİMAV (KÜTAHYA) OVASINDA YERALTISUYU JEOTERMAL AKIŞKAN ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL MODELLEME İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Jeotermal Enerji Anabilim Dalı

Yağmur AKPINAR

Temmuz, 2024

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

YAĞMUR AKPINAR tarafından **PROF. DR. CELALETTİN ŞİMŞEK** yönetiminde hazırlanan "**SİMAV (KÜTAHYA) OVASINDA YERALTISUYU JEOTERMAL AKIŞKAN ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL MODELLEME İLE DEĞERLENDİRİLMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Prof.Dr. Celalettin ŞİMŞEK

Danışman

.....

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Jüri Üyesi

.....

Prof. Dr. Orhan GÜNDÜZ

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezim boyunca beni yönlendiren, tavsiyeleri ile yön veren tezimin tüm detaylarına gösterdiği ilgi için öncelikle tez danışmanım Prof. Dr. Celalettin ŞİMŞEK'e teşekkür ederim. Maddi ve manevi daima yanımda olan, destekleyen, bana cesaret veren güzel aileme teşekkür ederim. Daima mücadele eden, geliştiren, çalışan, araştıran ve başarılı olan kendime ayrıca teşekkür ederim.

Yağmur AKPINAR

SİMAV (KÜTAHYA) OVASINDA YERALTISUYU JEOTERMAL AKIŞKAN ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL MODELLEME İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZ

Simav Ovası Ege bölgesinin iç kesimlerinde yer almaktadır. Simav ovası doğu-batı doğrultusunda fay sistemleri ile kontrol edilen bir graben sistemine sahiptir. Bölge kapalı bir havza niteliğinde olduğundan ovada oluşan Simav Gölü, DSİ tarafından açılan kanal ile drene edilerek kurutulmuştur. Çalışma alanındaki ana kaya Kalkan Formasyonu olmak üzere, temel kayalarını ise migmatitler ve gnayslar oluşturmaktadır. Kalkan Formasyonun üzerinde gri yapıda, kahve renkli kuvarsit, muskovit, kalk şistlerden oluşan Simav Metamorfitleri bulunmaktadır. Simav Ovası bir çöküntü ovası olduğundan, alanın güney kesimlerindeki yüksek rakımlı alanlardan aşınma ve taşınma ile gelen sedimanlar doldurmuş ve kalınlığı 150 metreye ulaşan bir alüvyon malzeme ile doldurulmuştur. Bölgede alüvyon birimi yeraltı suyu sağlayan en önemli akiferi oluşturur.

Simav Ovasında D-B yönlü oluşan fay sistemleri tüm birimleri kesmiş ve bu fay sistemleri bölgede jeotermal sistemin oluşmasında etkili olmuştur. Eynal, Çitgöl ve Naşa jeotermal sahaları bölgede önemli sistemleri oluşturur. Bölgede jeotermal sistemden yararlanmak amacı ile derinliği 958 metreye ulaşan üretim kuyuları açılmıştır. Kuyu dibi sıcaklığı maksimum 163 dereceye ulaşan bu sahalar yüksek jeotermal potansiyele sahiptir. Bölgede bazı kuyular sığ açılmış olup, üretilen jeotermal sular ısıtma, seracılık ve termal turizm amaçlı kullanılmaktadır. Bölgede yeraltı suyu seviyesinin zaman içerisinde yağışa değişikliğine bağlı beslenim miktarı, aşırı çekim ve alüvyon tabanında bulunan jeotermal sistemin etkileşiminin araştırılması oldukça önemlidir. Bu yoldan hareketle, yapılan çalışmada yukarıda belirtilen üç farklı senaryo altında yeraltısuyu seviye davranışı sayısal modelleme ile anlaşılmaya çalışılmıştır.

Bölgede daha önceki yıllarda araştırma amaçlı açılan sondaj kuyu verileri kullanılarak model kalibre edilmiştir. Yapılan modelde yüksek bir korelasyon katsayısı (r=0,97 üzerinde) elde edilmiş olup, sistem için oluşturulan modelin sistemi

temsil edecek özellikte olduğu düşünülmüştür. Yapılan modelleme çalışmasında yeraltısuyu akımının yüzeysel akaçlama ile paralel olarak batı kesime doğru olduğu, alüvyon altındaki fay sistemleri ile yüzeye çıkan sıcak akışkanın alüvyon akiferde fay boyunca bir karışım gösterdiği ortaya konulmuştur. Havzada yeraltısuyu yüzey suyu etkileşimi açısından ele alındığında yeraltısuyunun Simav Çayına boşalan bir sisteme sahiptir.

Anahtar kelimeler: Jeotermal Enerji, Simav Grabeni, Sayısal Modelleme

EVALUATION OF GROUNDWATER - GEOTHERMAL FLUID INTERACTION IN SİMAV (KÜTAHYA) PLAIN WITH NUMERICAL MODELING

ABSTRACT

Simav Plain is located in the interior of the Aegean region. Simav plain has a graben system controlled by fault systems in the east-west direction. Since the region is a closed basin, Lake Simav, which was formed in the plain, was drained and dried by the canal opened by DSI. The bedrock in the study area is the Kalkan Formation which are migmatites and gneisses. Kalkan Formation is covered by the Simav Metamorphites rocks consisting of gray, brown colored quartzite, muscovite and calcite. Since the Simav Plain is a depression plain, it was filled with sediments coming from the high-altitude areas in the southern parts of the area by erosion and transportation and an alluvial material reaching a thickness of 150 meters. The alluvium unit constitutes the most important aquifer providing groundwater in the region.

Simav Plain cuts all rocks with direction of E-W fault system and these fault systems have been effective in the formation of the geothermal system in the region. Evnal, Citgöl and Nasa geothermal fields constitute important system in the region. In order to benefit from the geothermal system in the region, production wells depth of 958 meters. These fields have high geothermal potential with a maximum downhole temperature of 163 degrees. Some of the wells in the region are shallow and the geothermal water produced is used for heating, greenhouse cultivation and tourism purposes. It is very important to investigate the interaction of the rate of the recharge due to the groundwater level change, overdraft from the groundwater and the geothermal system in the alluvial aquifer base. In this study, the groundwater level behavior was tried to be understood by numerical modelling under three different scenarios mentioned above.

The model was calibrated using data from boreholes drilled for research purposes in the region in previous years. A high correlation coefficient (over r = 0.97) was obtained in the model, and it was thought that the model created for the system was

representative of the system. In the modeling study, it was revealed that the groundwater flow was towards the western part in parallel with the surface drainage, and that the hot fluid coming to the surface with the fault systems under the alluvium aquifer showed a mixture along the fault in the alluvial aquifer. When considered in terms of groundwater-surface water interaction in the basin, it has a system where groundwater discharges into Simav Stream.

Keywords: Geothermal Energy, Simav Graben, Numerical Modeling

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZ SINAVI SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT vi
ŞEKİLLER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xii

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Amaç 1
1.2 Coğrafi Özellikler 1
1.2.1 Ekonomik Durum 2
1.2.2 İklim Özellikleri 3
1.2.2.1 Yağış 6
1.3 Materyal ve Metot 7
1.4 Önceki Çalışmalar 8

BÖLÜM İKİ – ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİK VE HİDROKEOLOJİK ÖZELLİKLERİ 12

2.1 Proje Sahasının Genel Jeolojisi 12
2.2 Proje Sahasının Genel Hidrojeolojik Özellikleri 16
2.2.1 Yeraltısuyu Akiferleri 16
2.2.2 Simav Jeotermal Sistemi 17

BÖLÜM ÜÇ – YERALTISUYU AKIM MODELİ 21

3.1 Giriş 21
3.2 Model Yapılandırılması 24
3.2.1 Kavramsal Modelin Oluşturulması 24

3.2.1.1 Yüzey Topoğrafyası 25
3.2.1.2 Alüvyon Birimi Taban Kot Dağılımı 25
3.2.1.3 Naşa Bazaltı Taban Kot Dağılımı 26
3.2.1.4 Kızılbük Formasyonu Taban Kot Dağılımı 28
3.3 Sonlu Farklar Model Ağı 30
3.3.1 Sınır Koşulları 31
3.4 Model Girdileri 33
3.4.1 Başlangıç Koşulları ve Model Süresi 33
3.4.2 Yağıştan Beslenim 33
3.4.3 Nehir ve Akarsular 34
3.4.4 Kuyular 36
3.4.5 Başlangıç Su Kotları 39
3.5 Model Kalibrasyonu 39
3.5.1 Hidrolik İletkenlik 39
3.6 Yeraltısuyu Kotu 43
3.7 Yeraltısuyu Bütçesi 44

BÖLÜM DÖRT – YERALTISUYU SEVİYE DEĞİŞİMLERİ 47

4.1 20 Yıllık Sürede Yeraltısuyu Bütçe Bileşenleri 47
4.2 Yeraltısuyu Beslenimindeki Değişim 49
4.3 Çekimlerin Artması 50
4.4 Akiferler Arası Yeraltısuyu Etkileşimi 52

BÖLÜM BEŞ – SONUÇ VE ÖNERİLER 55

KAYNAKLAR 59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Çalışma alanının yer bulduru haritası 2
Şekil 1.2 Aylık ortalama sıcaklık 4
Şekil 1.3 Simav bölgesi sıcaklık 1979-2023 sıcaklık değişimi 4
Şekil 1.4 Aylık ortalama yağış 5
Şekil 1.5 Simav bölgesi 1979-2023 yağış değişimi 5
Şekil 1.6 Aylık ortalama buharlaşma miktarı 6
Şekil 1.7 Sahada kuyu tespiti ve örnekleme 8
Şekil 2.1 Simav Ovasına ait stratigrafik sütün kesiti 13
Şekil 2.2 Simav Ovasının jeoloji haritası 14
Şekil 2.3 Simav Ovasının kavramsal jeolojik kesiti 15
Şekil 2.4 Simav Ovası yeraltısuyu kontur haritası 17
Şekil 3.1 Model alanının yüzey haritası 25
Şekil 3.2 Alüvyon tabakasının taban kot dağılımı 26
Şekil 3.3 Naşa Bazaltı taban kot dağılımı 27
Şekil 3.4 Kızılbük Formasyonu taban kot dağılımı 27
Şekil 3.5 Simav Ovasının kavramsal modeli 28
Şekil 3.6 Model hücre ağlarının oluşturulması 30
Şekil 3.7 Model alanının hücre dağılımı 32
Şekil 3.8 Model alanına tanımlanan beslenim değerleri 34
Şekil 3.9 Nehir sınır koşulu (RIV) koşulunun yeraltısuyu seviyesi durumuna göre değerlendirilmesi 35
Şekil 3.10 Simav Çayının genel görünümü 36
Şekil 3.11 Simav Ovasında açılan gözlem kuyuları 41
Şekil 3.12 Alüvyon akifer için tanımlanan hidrolik iletkenlik (Kx) dağılım haritası 42
Şekil 3.13 Model kalibrasyon grafiği 43
Şekil 3.14 Kararlı akım koşullarında yeraltısuyu akım modeli 44
Şekil 3.15 Simav Ovasındaki yeraltısuyu bütçesinin grafiksel gösterimi 46
Şekil 4.1 20 yıllık simülasyon ile oluşan yeraltısuyu seviye değişimi 48
Şekil 4.2 20 yıllık süre ile sistemde dolaşan su hacmi 48

Şekil 4.3 Yeraltısuyu beslenim değerinin %20 oranında azaltılması durumunda ovadaki yeraltısuyu seviyesi 49
Şekil 4.4 Beslenim değerinin %20 azaltılması durumu 50
Şekil 4.5 Çekim debisinin %20 oranında arttırılması durumunda oluşan seviye kotları 51
Şekil 4.6 Pompa çekimlerinin %20 arttırılması durumunda 20 yıllık simülasyon bütçesi 52
Şekil 4.7 Jeotermal sistemden alüvyon akifere gerçekleşen sızıntı katkısı ile oluşan su kotları 53
Şekil 4.8 Jeotermal sistemden akifere sızıntı karışımı ile oluşan bütçe..... 54

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Simav Ovası jeotermal kuyuların bilgileri..... 18
Tablo 3.1 Simav Ovasında yapılan gözlem kuyularının bilgileri 29
Tablo 3.2 Simav Ovasındaki yeraltısuyu tüketimi..... 37
Tablo 3.3 Modele tanımlanan kuyuların verileri 38
Tablo 3.4 Modelde kullanılan hidrolik iletkenlik değerleri 40
Tablo 3.5 Yeraltısuyu yıllık bütçe bileşenleri..... 45

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

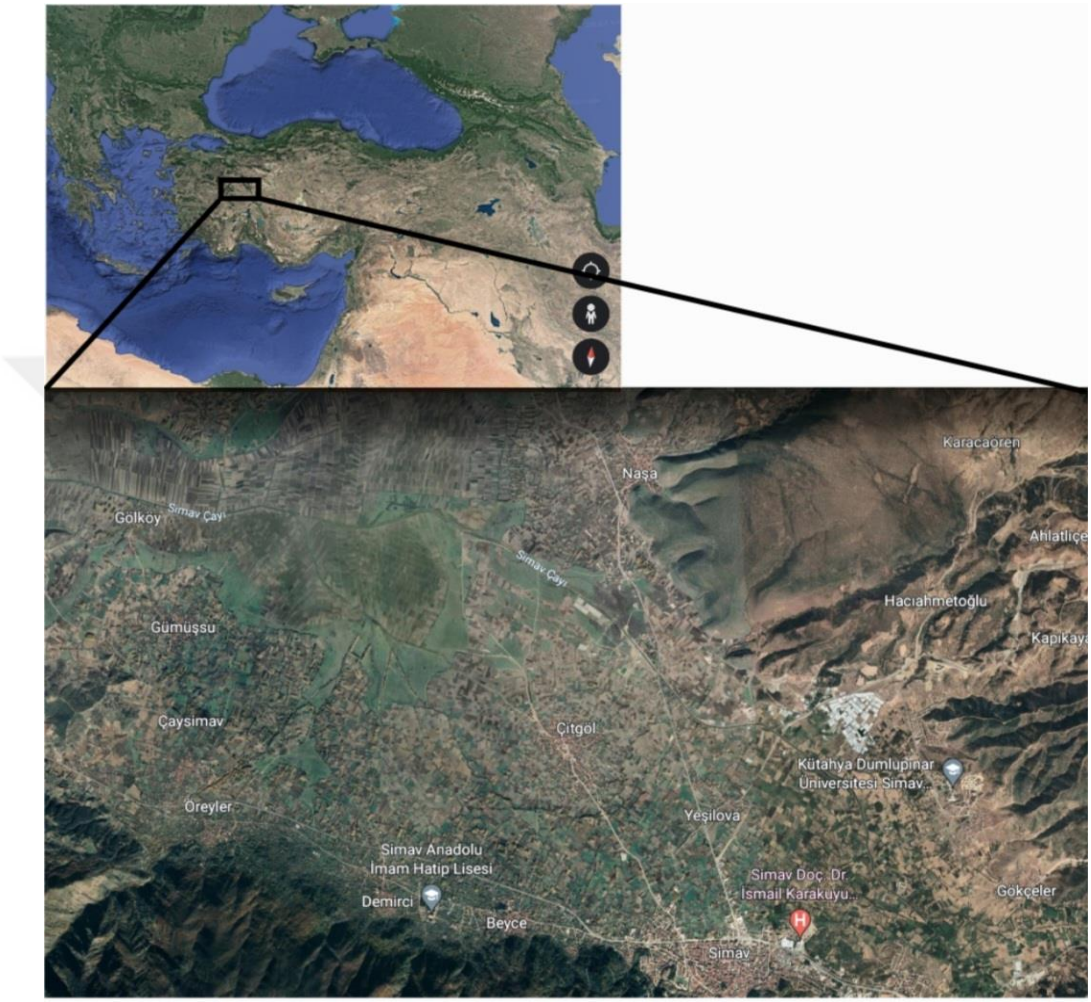
1.1 Amaç

Türkiye jeotermal enerji kullanımı ve üretimi açısından stratejik bir konuma sahiptir. Fay sistemlerinin oluşturduğu doğu-batı grabenleri doğrultusunda Simav bölgesi jeotermal enerji kaynağı olarak büyük bir etkiye sahiptir. Jeotermal sistemler ise genel olarak yeraltısuyu akiferinin de bulunduğu graben alanlarında yer almaktadır. Simav Ovası'ndaki yeraltısuyu akiferi serbest akifer niteliğinde olup, doğrudan yağıştan beslenmektedir. Bölge son dönemlerde sıcaklık artışın etkisi altındadır. Bu durum yağış paternin değişmesine ve yeraltısuyu besleniminin de değişmesinde etkili olacağı düşünülmektedir. Son zamanlarda ise bölgede yeraltısuyu aşırı çekim ve alüvyon akiferin tabanında yer alan jeotermal sistemin baskısı altındadır. Özellikle jeotermal sular bulundukları bölgede yeraltısuyu kalitesinin korunması açısından önlem alınmadıklarında önemli bir risk teşkil etmektedir. Bu yoldan hareketle, çalışma alanı olan Simav Ovasının 3D boyutlu kavramsal hidrojeolojik modeli ortaya konulmuş, elde edilen kavramsal model kullanılarak yeraltısuyu akım modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinde bölgedeki yeraltısuyunun yağıştan beslenimin azalması, aşırı çekim ve jeotermal akışkan ile yeraltısuyu etkileşimi ve geleceğe dönük olası etkilenme durumu değerlendirilmiştir.

1.2 Coğrafi Özellikleri

Kütahya ili merkez ilçesi olan Simav, Ege bölgesinin İç batı Anadolu bölgesinde yer almaktadır. Simav Ovası, faylarla sınırlanmış tektonik kökenli bir ovadır (Şekil 1.1). Ovanın güney kesimlerini temel kayaçları oluşturur ve 820 m kotlu yüksek rakımlı dağlar ile sınırlandırılmıştır. Kuzeyi ise volkanik kayaçlar yayılım sunmakta ve daha düşük topoğrafyaya sahiptir. Simav Ovası bir çöküntü alanı olduğundan çöküntü alanı alüvyonla kaplıdır. Ortasında yer alan sığ Simav Gölü Devlet Su İşleri tarafından 1960 yıllarında kurutulmuştur (Gündüz, 2010). Bölgede son olarak 19 Mayıs 2011 de saat 23:15'te 5,9 büyüklüğünde deprem meydana gelmiş ve Simav İlçesine ve civar köylere önemli hasar vermiştir.

Bölgede Doğu-Batı yönlü uzanan Simav Çayı ovadaki yüzey suyunu drene etmektedir. Ovanın en batısında yapılan bir regülatör ile su kontrollü bir şekilde akıtılmaktadır. Kış aylarında eski Simav Gölü ve çevresinde su toplanmaktadır.



Şekil 1.1 Çalışma alanının yer bulduru haritası

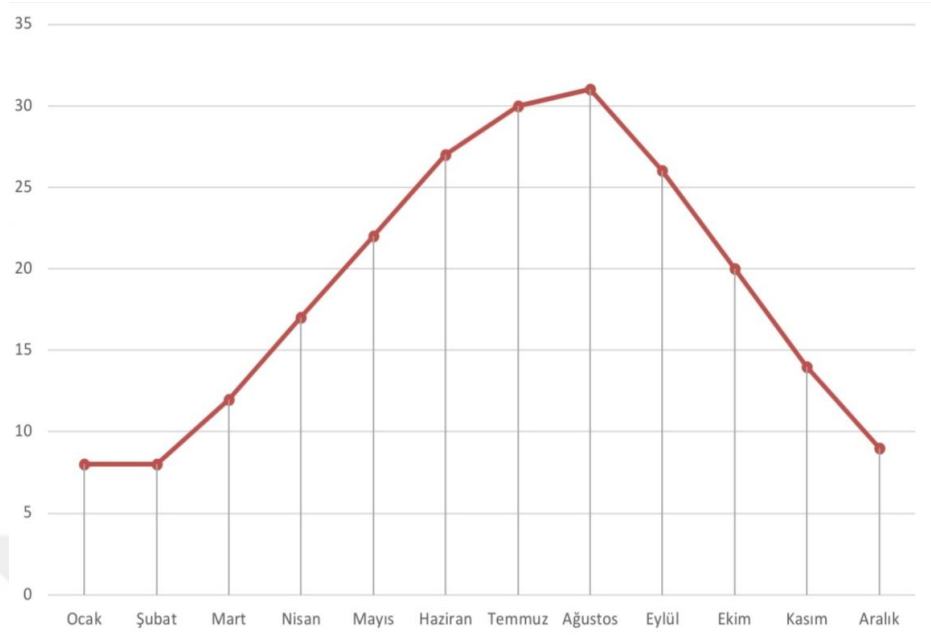
1.2.1 Ekonomik Durum

Bölgenin ekonomisi tarım ve sanayiye dayanmaktadır. Sebzecilik ve meyvecilik oldukça gelişmiştir. Başlıca tarım ürünleri buğday, arpa, mısır, baklagiller, şeker pancarı, kenevir lifi, kenevir tohumu, haşhaş, patates ve soğandır. Simav İlçesi ve köylerinde en önemli geçim kaynağı tarım ve hayvancılıktır. Bölge nüfusunun büyük oranı hayvancılıkla uğraşmaktadır. Simav Ovasının büyük bölümü tarımsal amaçlı kullanılmaktadır. Tarımsal amaçlı su gereksinimi bölgede yeraltısuyundan

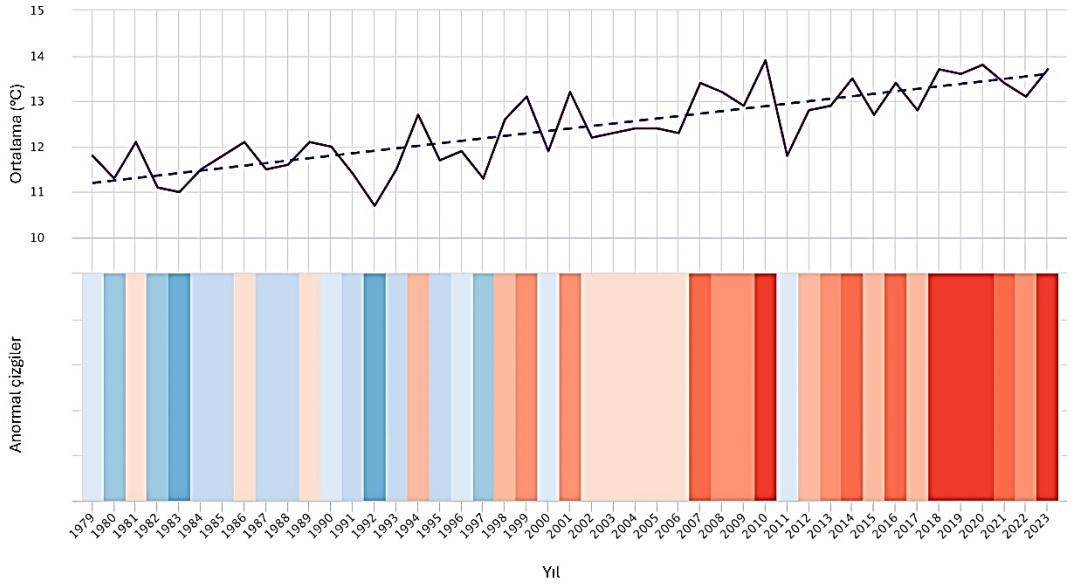
sağlanmaktadır. Bölge halkı hayvancılık yanında bağ ve bahçe ürünleri yetiştirmektedir. Diğer bir geçim kaynağı ise jeotermal termal turizmdir. Bölgede Eynal, Naşa ve Çitgöl kaplıcaları ile önemli turizm faaliyetlerini gerçekleştirmektedir.

1.2.2 İklim Özellikleri

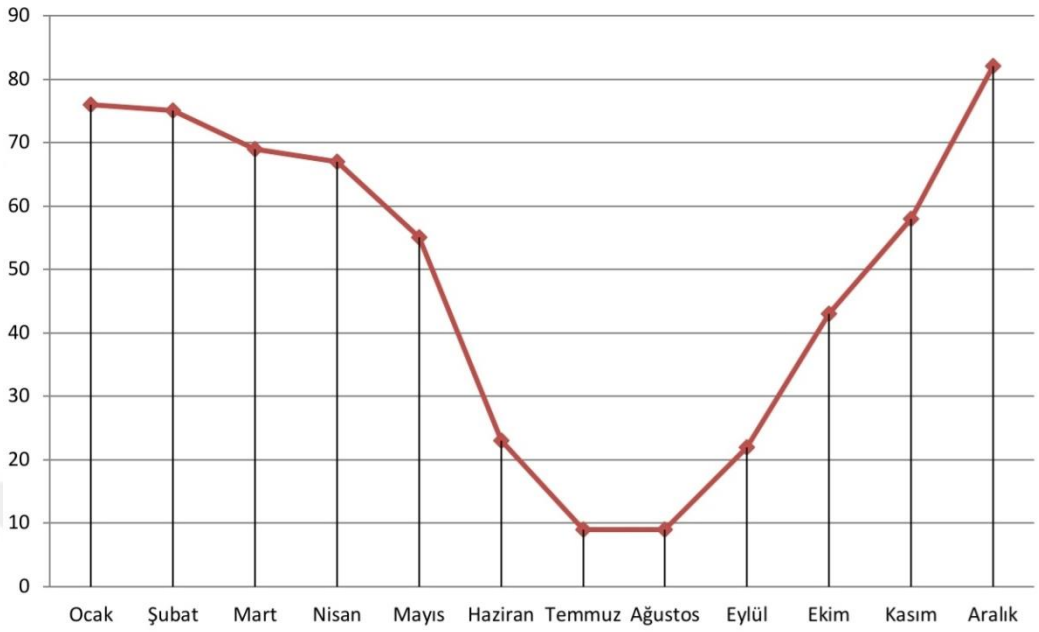
Simav Ovası iç Ege iklim koşullarını gösterir. Yazları sıcak ve kurak kışları ise ılıman ve yağışıdır. Bölge De-Monte iklim sınıflamasına göre yarı kurak ve nemli sınıfındadır. Yıllık ortalama sıcaklık ve yıllık ortalama yağış verileri baz alınarak hesaplanan De-Martonne indisi kullanılmaktadır. Simav'ın yıllık kuraklık indisi 20,2'dir. 20'nin üstünde olan indisler nemli bölgeleri göstermektedir. Bölgede bu değerin 20 ye yakın olması, yarı kurak şartlarda yaşandığını göstermektedir. Böylece Simav yarı kurak iklim sınıfı içerisine girmektedir. Meteoblue 2023 uzun dönem ortalama verilerine göre Simav Ovası yıllık ortalama sıcaklığı 11,9 °C dir. Ay içerisinde ortalama sıcaklık en düşük 2,5°C ile Ocak, en yüksek olduğu ay 21,9°C ile temmuz ayıdır (Şekil 1.2). Simav'da yıllık ortalama sıcaklık 1979 yılından itibaren düzenli olarak artmaktadır (Şekil 1.3). Bu artış bölgede sıcaklık değişiminin göstergesidir. Simav ilçesi iklim kuşağı olarak kuzey yarım kürede orta kuşak bölgesinde yer almaktadır. Simav'da dikkat edilmesi gereken durum sıcaklıkların her geçen gün artması nedeni ile kuraklığın daha çok hissedileceğini göstermektedir. Bu durum bölgedeki tarımsal faaliyetleri ve su potansiyelini etkileyeceği düşünülmektedir.



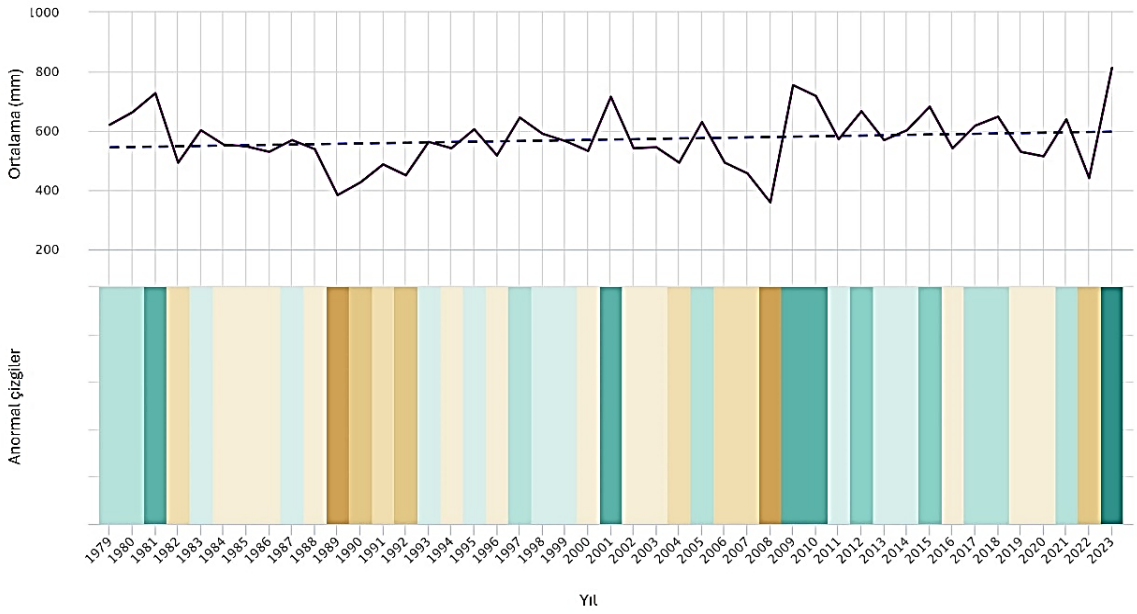
Şekil 1.2 Aylık ortalama sıcaklık (°C)



Şekil 1.3 Simav bölgesi 1979-2023 sıcaklık değişimi



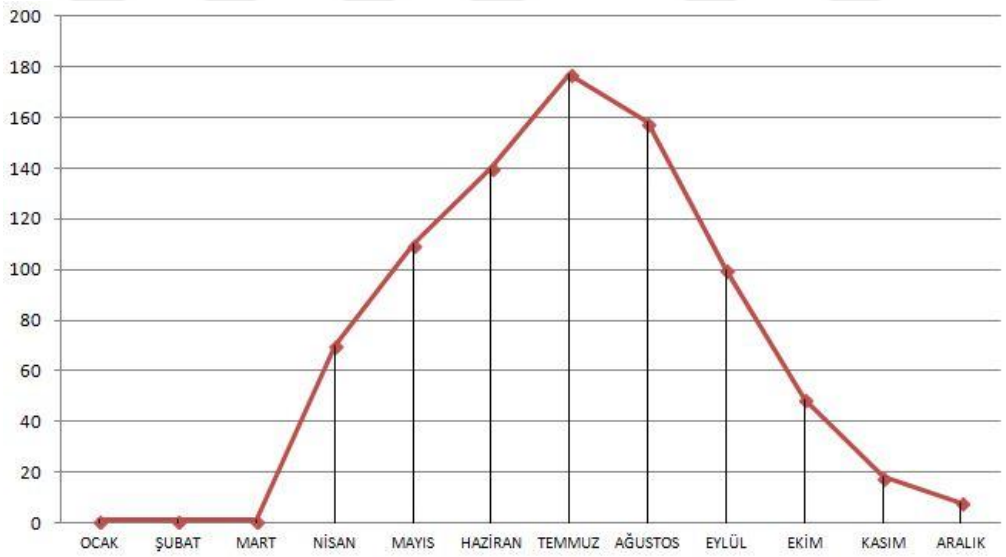
Şekil 1.4 Aylık ortalama yağış (mm)



Şekil 1.5 Simav bölgesi 1979-2023 yağış değişimi

1.2.2.1 Yağış

Simav Ovası'nda su girdisi olarak yağmur, kar, dolu, kırağı ve çiğ olup en fazla payı yağmur oluşturur. Simav'da yağışların büyük bir kısmı ekim ile mayıs ayları arasında düşer. Diğer aylar ise tamamen kurak olmayıp düşük oranlarda yağışlar almaktadır (Şekil 1.4). Uzun dönem yıllık yağış ortalaması 597.3 mm'dir. Şekil 1.5'te sunulan uzun dönem yıllık yağış eğilimine bakıldığında yağışlarda bir artış izlenmektedir. Özellikle 2008 yılından sonraki yağışlarda bir artış göze çarpmaktadır. Bölgede buharlaşma ise sıcak dönemler olan Mart ile ekim arasında gerçekleşmek olup maksimum buharlaşma temmuz ayında 178 mm'ye kadar ulaşmaktadır (Şekil 1.6). Buharlaşmanın artması bölgede yüzeye yakın olan yeraltısuyundan da önemli bir buharlaşma ile kayıp olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 1.6 Aylık ortalama buharlaşma miktarı (mm)

1.3 Materyal ve Metot

Yapılan çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada Simav Ovasında yapılmış olan çalışmalar ulaşılmış ve eldeki veriler değerlendirilmiştir. Öncelikle bölgede açılmış olan MTA kuyu verileri elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak genelde literatürde bulunan verilere ulaşım sağlanabilmiştir. Bazı kuyuların derinlik ve sıcaklık verileri olmaması nedeni ile çalışmada değerlendirilmeye alınmamıştır. Genel olarak jeotermal verilere ulaşım sağlamak oldukça zor olmuştur. Bununla birlikte 2012 yılında ovada gerçekleştirilen "*Simav Ovası (Kütahya) Yeraltı Suyunda Arsenik Kirliliğinin Araştırılması ve İnsan Sağlığına Olan Risklerinin Değerlendirilmesi*" adlı 109Y029 numaralı Tübitak projesinde yapılan sondaj verileri projede özellikle modelleme için önemli bir veri oluşturmuştur. Proje kapsamında 2012 yılı öncesinde açılan gözlem kuyuları sahada incelenmiş ve halen kullanılabilir oldukları görülmüş ve bu kuyulardan seviye ölçümü yapılmıştır (Şekil 1.7). Ayrıca beyler kovası ile kuyulardan su örneği alınarak klorür analizleri yapılmıştır. Analizler Dokuz Eylül Üniversitesi Torbalı Meslek Yüksekokulu laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanına ait tüm veriler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'ne aktarılarak tüm haritalar CBS ortamında üretilmiştir. Projenin kapsamlı kısmını oluşturan modelleme çalışmasında elde edilen veriler ve değerlendirmeler ise ileriki modelleme bölümünde kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan Modflow ara yüzü ise Dokuz Eylül Üniversitesi lisanslı program kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modelde kullanılan yeraltısuyu çekimleri ise bölgedeki köylerin nüfusundan yola çıkarak günlük su tüketimleri hesaplanmıştır.



Şekil 1.7 Sahada kuyu tespiti ve örnekleme

1.4 Önceki Çalışmalar

Dünya nüfusundaki artış, enerji tüketim hızındaki artış ve fosil yakıt rezervlerindeki azalmaya bakıldığında bu durum ülkeleri yenilenebilir enerji kaynağına yönlendirmektedir. Dünya kabuk, manto ve çekirdek olmak üzere eş merkezli üç bölgeden oluşmaktadır. Jeotermal enerji dünyanın iç kısmında bulunan enerjidir. Dünyanın manto ve kabuğuyla birlikte iç yapısındaki ısı transfer mekanizmaları, jeotermal alanların konumunu bulmakta, jeolojik ortamı, sondaj ve kaynak değerlendirmesi ile birlikte jeotermal enerji kaynakları arama yöntemi tanımlamaktadır. Derine indikçe kayaların sıcaklığı artmaktadır. Bu da jeotermal gradyanın varlığını kanıtlamaktadır. (Enrico Barbier, 2002).

Jeotermal su dünyada önemli bir enerji kaynağıdır. Bu çerçevede, dünya enerji değerlendirmesi raporuna göre yenilenebilir enerji kaynakları doğrultusunda şimdiye kadar en büyük katkı %92 olmak üzere hidroelektrikten, %5,6 biyokütleden, %1,6 jeotermalden , %0,6 rüzgârdan sağlanmaktadır. (Fridleifsson, 2001). 2000 yılında 80'den fazla ülkede jeotermal enerji kaynakları tespit edilmiş ve 58 ülkeden jeotermal

enerji kullanımına ilişkin çalışmalar yapılmıştır. Dünya üzerinde jeotermal enerji kullanımı ve üretimi açısından bakıldığında toplam elektrik üretim ihtiyacının Filipinler'de %27'si, Endonezya'da %7'si, El Salvador'da %60'ı, İzlanda'da %92'si jeotermalden karşılanmaktadır. İzlanda Reykjavik bölgesi jeotermal kaynak kullanımında çok önemli bir etkiye sahiptir (Aghahoseini ve Breyer, 2020). CO_2 salınımı çok düşük olduğundan ve bacalardan çıkan duman olmadığından çevresel açıdan çok etkili bir yere sahiptir. Jeotermal enerji açısından yapılan uygulamalar açısından Çin, ABD, İsveç, Türkiye ve Japonya önde gelir (Mertoğlu vd., 2000; IEA, 2018). Dünyada 2020 yılı itibariyle jeotermal enerjinin elektrik dışı kullanımı 108.000 mWt olup bu değer yaklaşık 14 milyon konut ısıtmasına eşdeğerdir (Serpen vd., 2008). Bu bağlamda Türkiye jeotermal enerji üretiminde önemli bir paya sahiptir.

Bu denli önemli bir enerji kaynağına sahip olan jeotermal suların faaliyetleri sırasında yüzey ve yeraltısuyuna da önemli etkileri olduğu önceki çalışmalardan anlaşılmaktadır (Rabet vd, 2017; Goswami ve Rai, 2024). Jeotermal suların yüzeye çıkartılması sırasında açılan sondaj problemleri, üretilen jeotermal suyun çevreye salınması veya derin faylardan çıkan akışkanın yeraltısuyuna karışması temiz su kaynakları açısından önemli bir risk taşımaktadır (Aksoy vd., 2009). Jeotermal akışkanın yeraltısuyundan farklı bir dolaşım sistemi ve kimyasal özelliği olması nedeni ile önemli oranda insan sağlığı açısından toksik element içerir (Baba ve Sözbilir, 2012). Bu toksik elementler arasında en önemlisi ise arseniktir.

Ancak su sıcaklığı aşırı yüksek değilse, genellikle alan ısı kazanımı için kullanılır. Simav (Kütahya) jeotermal sahası, bölgesel ısıtma amaçlı önemli jeotermal kaynaklardan biri olarak bilinmektedir (Gündüz vd., 2010). Simav ilçesi Eynal, Çitgöl ve Nasa kaplıcalarıyla ünlü jeotermal bölgelerdir. Simav bölgesinde yer alan jeotermal sahaların su analiz çalışmaları sonucu jeotermal akışkan deşarjının su kalitesini oldukça büyük etkilediği gözlemlenmektedir. Atık jeotermalin yüksek maliyet ve risk durumları göz önüne alınarak re-enjekte yerine yüzeysel sulara verilmesi bölgede ciddi doğa kirlenmesine yol açmaktadır. Bölgede yapılan çalışmalarda sıcak sularda yüksek oranda bor ve arsenik belirlenmiştir (Gündüz vd., 2010). Sahada jeotermal sistem üç ayrı bölgeden çıkmaktadır. Bu sahalar Eynal, Naşa ve Çitgöl olup yapılan çalışmalarda

yüksek sıcaklık ve basınç altında pek çok element çözünerek yeraltısuyuna karıştığı belirtilmektedir (Gemici ve Tarcan, 2002; Gündüz vd., 2010). Bu da özellikle arsenik, lityum, bor, vb. kimyasalların su ve toprak kirlenmesine yol açabilmektedir. Derinliği 950 m'yi aşan bu sahalarda yapılan ölçüm değerleri gözlemlendiğinde Eynal jeotermal sahasında, kuyu derinliğinin daha fazla olması nedeniyle kimyasalların ve kararlı elementlerin daha fazla olduğu bahsedilmektedir (Gemici ve Tarcan, 2002). Bölgenin yerel jeolojisinde bor oranının yüksek olması ile birlikte, bu kimyasallardan arseniğin deşarj noktalarıyla bağlantılı olmadığı durumlarda, su-kayaç etkileşimlerinden ortaya çıktığı öngörülmektedir. (Gündüz vd., 2010) Ayrıca bu bölgede eskiden işletilmiş olan madenin varlığının da bu kimyasalların ortaya çıkmasında etken olduğundan bahsedilmektedir. Gemici ve Tarcan (2002) yaptıkları çalışmalarda, metamorfitlerin barındırdığı termal sular Simav jeotermal alanında fay çizgileri boyunca ortaya çıktığını ortaya koymuştur. Bölgede, 6000 konutun ısıtılması ve elektrik üretim potansiyelin değerlendirilmesi amacıyla MTA burada bir dizi derin kuyu açmıştır. Açılar kuyuların dip sıcaklıkları 163°C ye ulaştığını kaplıcaların yüzey sıcaklıkları 51°C ile 90°C arasında değiştiği belirlenmiştir (Gemici ve Tarcan, 2002).

Gündüz vd. (2010) çalışmasında jeotermal akışkan deşarjının su kalitesine etkisini araştırmış ve bölgedeki jeotermal akışkanın kontrolsüz olarak yüzeysel sulara verilmesinin ciddi su kirlenmesi problemi yarattığını, bu nedenle en uygun durumun yeraltına re-enjeksiyonu olması gerektiğini vurgulamıştır. Bunun yapılmadığı durumlarda deşarj standartlarına uyulması gerektiği vurgulanmıştır.

Tarcan (2005)'de Gediz grabeninin jeotermal aktivite için önemli bir alan olduğu vurgulanmaktadır. Grabenin yapısı ve tektonik hareketleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Burada kayaların üzerinde normal bir fay ile Neojen karasal çökelleri yer alır. Bu kayaçlar hem soğuk yeraltı suları hem de termomineral sular için akifer görevi görmektedir. Bu çalışmada Gediz grabeninin hidrojeolojik özellikleri ile jeokimyasal özellikleri tartışılmıştır. 20-150 m derinliğindeki kuyulardan 5-30 L/sn debilerle yer altı suyunu kaldırmak mümkündür. Tüm bu çalışmalara bakıldığında jeotermal akışkanın kimyasal ve sıcaklık özelliğinin yeraltısuyundan farklı olması nedeni ile yeraltısuyuna karışması durumunda önemli kalite problemlerine neden olmaktadır.

Son zamanlarda küresel iklim değişikliği, azalan yüzey su kaynakları, yağışın değişikliğine bağlı olarak bölgesel kuraklık problemleri yeraltısuyu kaynağına olan talebi arttırmıştır. Bu talep ise yeraltısuyu kaynağının hızlı tükenmesine, seviyelerde önemli oranda düşümlerin olmasına ve bazı kaynakların kurumasında neden olmuştur (Kapluhan, 2013; Şimşek ve Demirkesen, 2022). DSİ verilerine göre çekilen yeraltısuyunun %67'sı sulamada, %33'ü ise içme-kullanma ve sanayide tüketilmektedir (DSİ, 2024). Bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda, ülkemizde yeraltısuyu kaynağı üzerinde en önemli baskıyı aşırı çekimler oluşturmaktadır (Şimşek vd, 2020).

Nüfusun fazla olduğu Ege ve Marmara Bölgesinin de içinde bulunduğu büyük nehir havzalarında yeraltısuyu aşırı çekim baskısı altındadır (SYGM, 2015). Yeraltısuyu kaynağı yenilenebilir su kaynağı olmasında karşın aşırı çekim nedeni ile yeterince su depolanamamakta ve bölgesel su sorunlarına neden olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, yeraltısuyu bulunduran serbest akifer özelliğindeki sistemlerin doğrudan yağışla beslendiği ve yağış paternine bağlı olduğu belirtilmektedir (Gündüz ve Şimşek, 2011).

Yukarıdaki çalışmaların sonuçlarına bakıldığında, Simav Ovası'nda yeraltısuyu açısından risk teşkil edecek olan sorunların başında jeotermal suların yeraltısuyuna karışımı, yağışların zamanla azalması ve yeraltısuyu beslenim miktarındaki değişimlerin etkisi ve zamanla yeraltısuyundan yapılacak aşırı çekimler olduğu anlaşılmaktadır. Simav Ovasındaki yeraltısuyu beslenim değişikliği, aşırı çekim ve jeotermal su karışım durumları yeraltısuyu akım modeli ile değerlendirilmiştir.

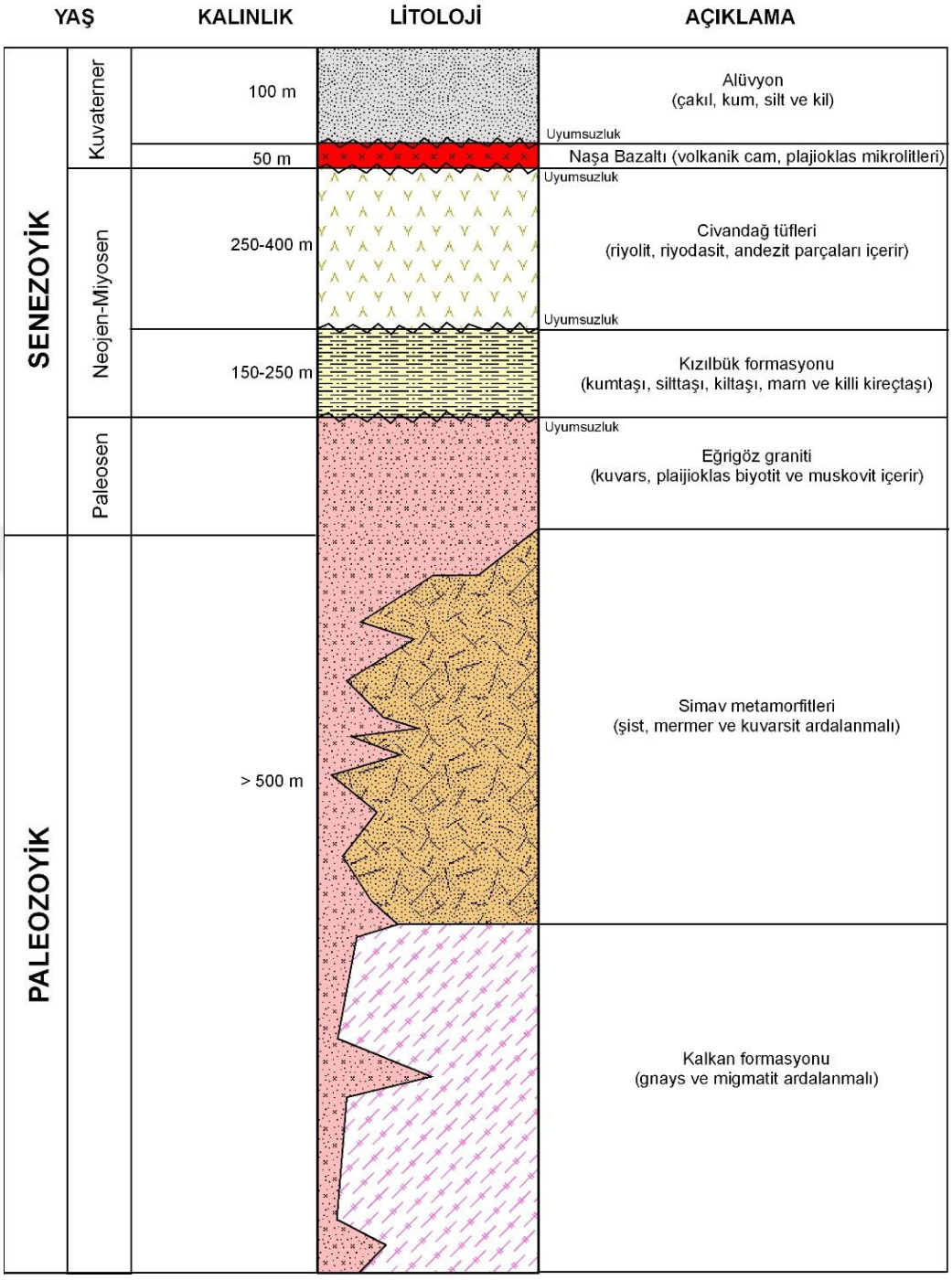
BÖLÜM İKİ
ÇALIŞMA ALANIN JEOLOJİK VE HİDROJEOLOJİK ÖZELLİKLERİ

2.1. Proje Sahasının Genel Jeolojisi

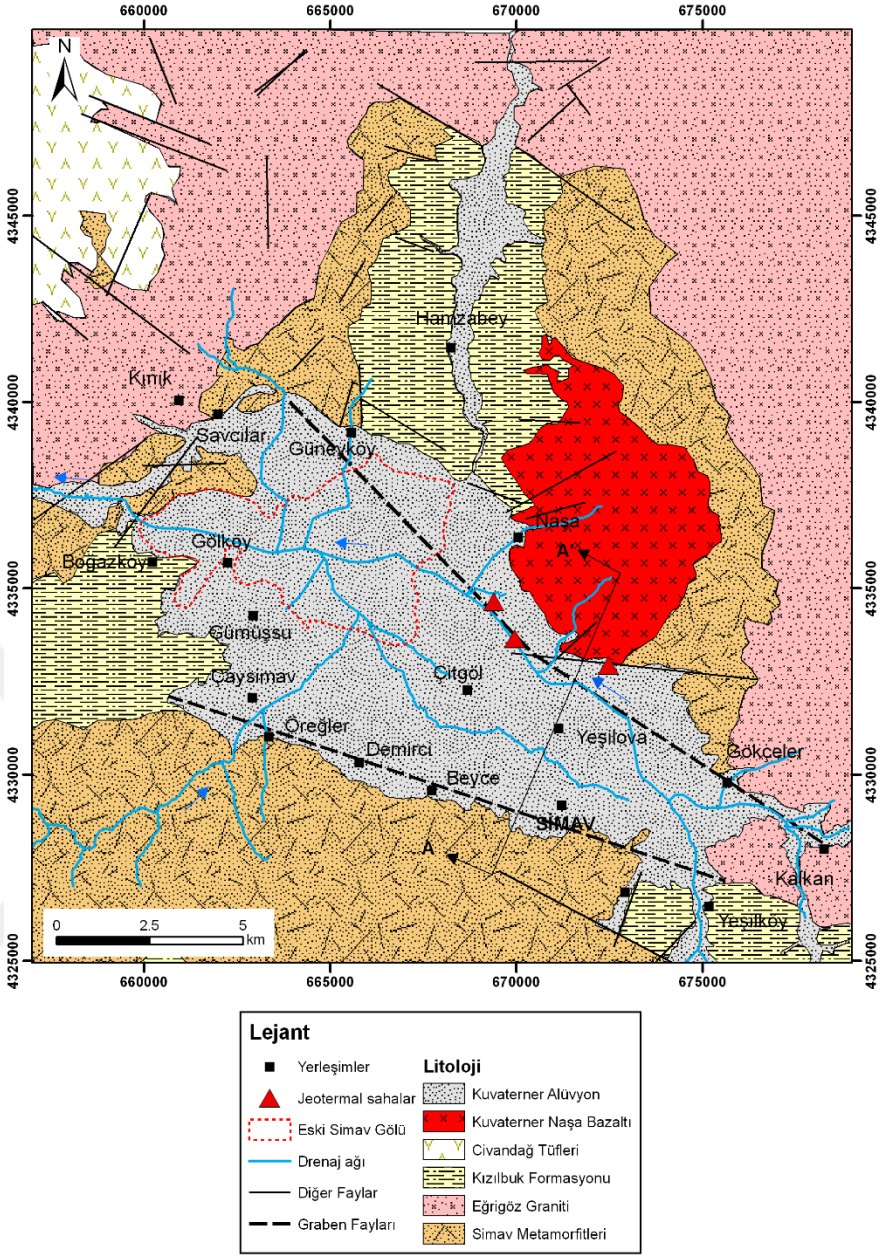
Çalışma alanı Türkiye'nin orta batı kesimlerinde, Kütahya İli, Simav İlçesi ve çevresini kapsamaktadır. Çalışma alanı stratigrafik istif olarak alttan üste doğru; Paleozoyik yaşlı Kalkan Formasyonu ve Simav Metamorfitlerini bu iki seriyi uyumsuzlukla kesen Paleosen yaşlı Eğrigöz Graniti izlemektedir. Bu birimleri uyumsuzlukla Neojen Yaşlı Kızılbük Formasyonu üstlemektedir. Neojen seriler üzerine litolojik uyumsuzlukla Civandağ Tüfleri gelmektedir. Kuvaterner yaşlı Naşa Bazaltı ve Alüvyonlar ise çalışma alanının en genç birimlerini oluşturmakta ve inceleme alanındaki tüm birimleri uyumsuzlukla üstlemektedir (Gündüz vd., 2010).

Çalışma alanındaki ana kaya, temel kayalarını migmatitler ve gnaysların oluşturduğu Kalkan Formasyonu'dur (Şekil 2.1). Çaysimav dolaylarında çok dar bir alanda yüzlek veren Kalkan Formasyonun üyesi olan gnayslar yer almaktadır. Gnayslar belirgin yapraklanmalı, açık ve koyu kahve renge sahip olup oldukça ayrışmıştır. Genel olarak alt kesimlerde bantlı özellik sunan gnayslar, üst seviyelere doğru biyotitli ve mikalı gnayslara ve en üst seviyelerde ise şistlere geçiş yapmaktadır.

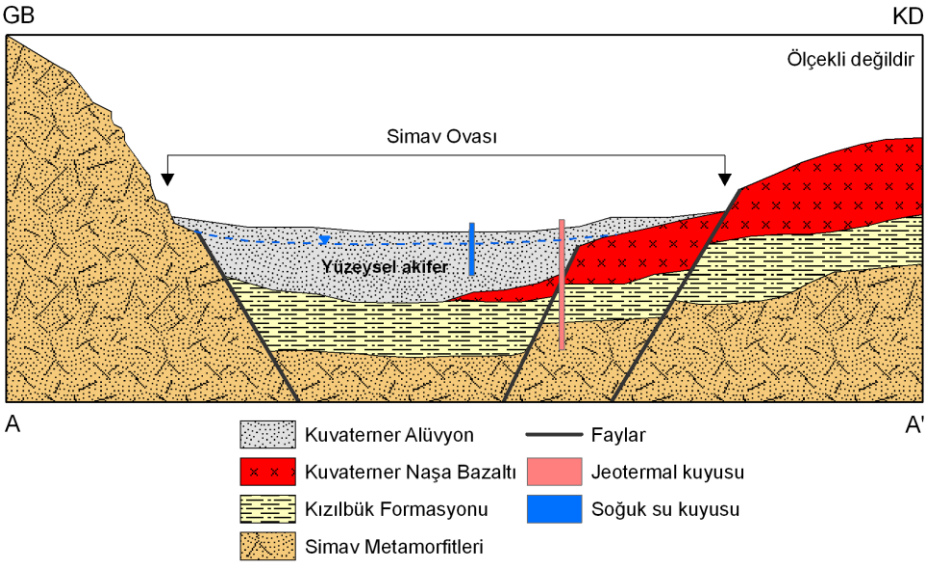
Kalkan Formasyonun üzerine grimsi, kahve renkli kuvarsit, muskovit, klorit şist, kalk şistlerden oluşan Simav Metamorfitleri gelir. Simav Metamorfitleri kuzeyde Eğrigöz Graniti'nin güney kesimini çevreleyen alanlarda ve Simav ovasının güneyinde yer alan Simav Dağı çevresinde yaygın olarak gözlenmektedir (Gündüz vd., 2010).



Şekil 2.1 Simav Ovasına ait stratigrafik sütün kesiti (Eser 1998'den değiştirilmiştir)



Şekil 2.2 Simav Ovasının jeoloji haritası (Gündüz vd., 2010)



Şekil 2.3 Simav Ovasının kavramsal jeolojik kesiti (Gündüz vd., 2010)

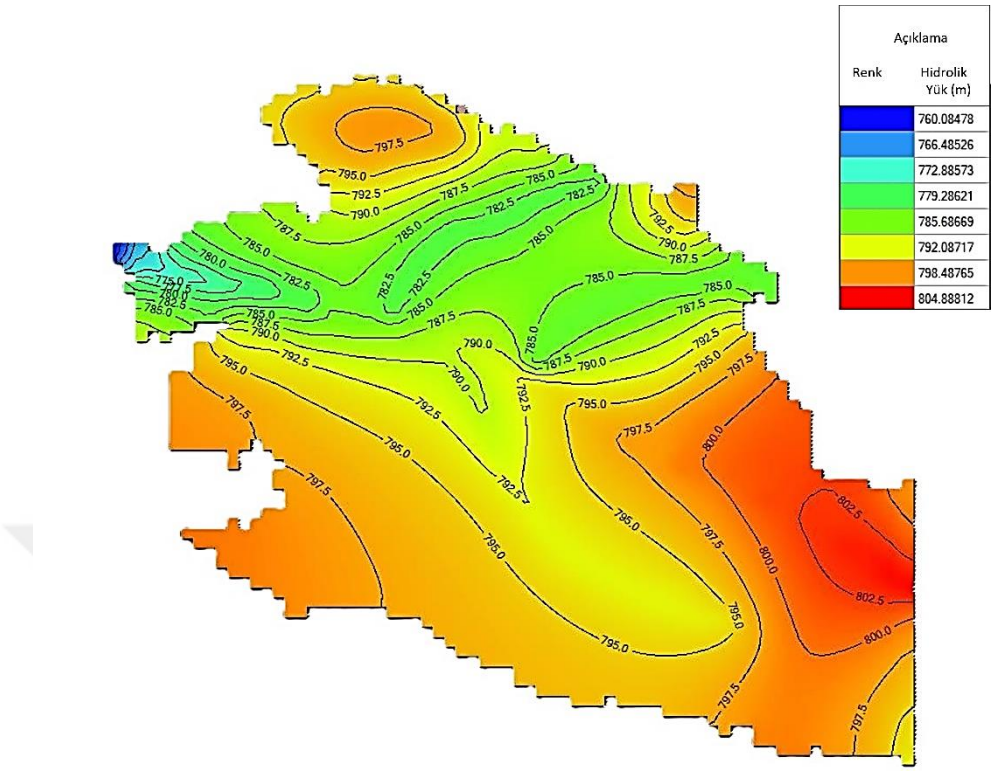
Çalışma alanında güney kesimdeki yükseltiyi şekillendiren D-B yönlü düşey faylar ile kuzeydeki fay sistemleri ovayı şekillendirmiştir. Bu graben yapısı bölgede jeotermal sistemin oluşmasında en önemli rolü oynamıştır. Çalışma alanında Neojen Yaşlı Kızılbük Formasyonu jeotermal sistemin örtü kayasını oluşturur. Kuzeydeki Naşa Bazaltı ve volkanik kayaçlar ise ısıtıcı kaya özelliğindedir. Jeotermal akışkan ise metamorfik kayaçların içerisinde gözenekli ortamda ve bölgedeki fay sistemleri ise rezervuar kayası ve dolaşım sistemini oluşturur. Örtü kayası konumundaki Kızılbük Formasyonu çalışma alanının kuzey, kuzeybatı, güneydoğu ve güneybatı kesimlerinde kumtaşı, kiltaşı, marn ağırlıklı killi kireçtaşı ardalanmalı tüfler şeklinde gözlenir. Naşa bazaltı ise siyah ve koyu gri renkli, bol eklemli bir yapıya sahiptir. Çalışma alanında, Simav Ovası olarak adlandırılan graben alanının tamamında Kuvaterner yaşlı alüvyonlar gözlenmektedir (Şekil 2.3). Çalışma alanında yapılan incelemelerde alüvyonunun kalınlığının 15-150 m arasında değiştiği belirtilmektedir (Gündüz vd., 2010). Kuvaterner yaşlı alüvyonlar çalışılan bölgedeki bütün birimleri kayaçların litolojik ve açısal uyumsuzluğu ile kaplamaktadır.

2.2 Proje Sahasının Genel Hidrojeolojik Özellikleri

Çalışma alanında iki farklı akifer sistemi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yüzeyde yer alan ve yeraltısuyu bulunduran alüvyonel akifer diğer ise kimyasal olarak farklı bir akışkan barındıran derin jeotermal sistemdir. Aşağıda bu iki sistem ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.2.1 Yeraltısuyu Akiferleri

Simav Ovası'ndaki alüvyonel birimler içerisinde yeraltı suyu taşıyan tabakalar ise siltli, kumlu ve çakıllı seviyeleri ile birikinti konileridir. Alüvyon akiferin kalınlığı 40-175 m, birikinti konisinin kalınlığı 25-100 m civarındadır. Alüvyonda iletkenlik katsayısı 10-2000 m^3/m/gün, özgül debi 0,37-8,3 lt/s/m; birikinti konisinde iletkenlik katsayısı 2000-9000 m^3/m/gün, özgül debi 8,3-55,6 lt/sn/m arasında değişmektedir (DSİ, 1976). Kumlu, çakıllı seviyelerin içinde bazı seviyelerde siyah renkli akıcı silt ve mavi kil bulunur. Alüvyon akiferin altında ova genelinde yer yer basınçlı akiferi oluşturan bir kil tabakasına rastlanır. Söz konusu kilin kalınlığı ovanın doğusunda 20 m, Çitgöl yakınlarında ise 40 m civarında olup Boğazköy'e doğru 100 m'ye ulaşmaktadır (DSİ, 1976). Alüvyonun formasyonun kalınlığı ve taban derinliği ovada açılan sondajların loglarından ve yürütülen jeofizik rezistivite etüdünden belirlenmiştir (DSİ 1976). Bölgede yapılan araştırma sondajlarında ise Simav Gölü ve çevresinde kalınlığı 80 m'ye ulaşan kil tabakası, alanın güneyinde ise çakıllı ve bloklu alüvyonel malzemeler belirlenmiştir (Tübitak, 2012). Alüvyonel akiferde açılan sondajların büyük çoğunluğu bölgede yaşayan nüfusa içme suyu sağlamaktadır. Alüvyon akiferdeki yeraltısuyu akımı ise yüzeysel akaçlamaya uygun olarak doğudan batı kesime doğru akmaktadır. Bölgenin en önemli yüzeysel su kaynağı ise Simav Çayı olup, havzadaki suyu batı kesime drene etmektedir (Şekil 2.4). Bölgede metamorfik kayaçlar ve Neojen kırıntılı birimler ise yeraltısuyu bulundurma açısından oldukça zayıftır.



Şekil 2.4 Simav Ovası yeraltısuyu kontur haritası

2.2.2 Simav Jeotermal Sistemi

Çalışma alanında jeotermal sular ise düşey fay sistemleri boyunca hareket eden bir sisteme sahiptir. Kuvaterner Alüvyon altında yayılım sunan Kızılbük Formasyonu içerisindeki kumtaşı ve çakıl taşları ile Simav Metamorfitleri içerisindeki mermer düzeyleri jeotermal sistemin rezervuar kayasını oluşturur. Bölgede Naşa Bazaltı ise jeotermal sistemin ısıtıcı kayası özelliğindedir. Jeotermal amaçlı açılan sondajların derinlikleri 150 m ile 958 m arasında değişmektedir. Sondajların kuyu başı sıcaklığı 42°C ile 97°C arasındadır. Debileri ise 1 ile 72 L/s arasındadır. (Tablo 2.1) Bölgede sıcak sular birçok sığ kuyudan da üretilmektedir. Eynal kesiminde açılan 100 m derinliklerindeki jeotermal sulardan üretim yapılmaktadır. Bu durumda sıcak suların yüzeydeki yeraltısuyuna karışımı ve etki alanının araştırılması önemli bir konu haline gelmiştir.

Tablo 2.1 Simav ovası jeotermal kuyuların bilgileri (Palabıyık ve Serpen, 2008)

Kuyular	Enlem	Boylam	Derinlik (m)	Üretim Seviyesi (m)	Rezervuar Kayası	Rezervuar Kaya Derinlik Aralığı (m)	Kuyu Başı Sıcaklığı (°C)	Tavan Kotu Sıcaklığı (°C)	Üretim Debisi (L/S)	Tarih
E-1	672311	4332911	65.8	-	Naşa Bazaltı	50-65.8	97	143	14	1985
E-2	671527	4333108	149.5	120	Simav Metamorfik	84-149.5	97	158	55	24.07.1985
E-3	670983	4333173	150	120	Simav Metamorfik	92-150	97	149	50	25.09.1985
E-5	672111	4332911	300	-	Simav Metamorfik	74-300	97	-	6	24.10.1994
E-6	670507	4333272	169.6	-	Simav Metamorfik	135-169.6	-	157	50	25.12.1994
E-8	671507	4333272	205	-	Simav Metamorfik	180-205	-	161	60-80	08.03.1997
EJ-1	671606	4332616	725.2	600	Simav Metamorfik	437-650	-	162	72	28.09.1987
EJ-2	671671	4332239	958	462	Simav Metamorfik	457-791	-	157	1	02.10.1988
EJ-3	670306	4332116	424	-	Budagon Kireçtaşı	403-424	-	151	40-60	13.04.1997
C-1	668540	4333895	101	46	Alüvyon	0-83	97	105	32	14.08.1985
N-1	669819	4335092	200	-	Simav Metamorfik	157-200	42	-	2	18.10.1985

Bölgedeki jeotermal sistemde ısı kaynağı jeolojik gradyan ve magmatik kayaların varlığıdır. Jeotermal gradyanda yer sıcaklığı artış hızı ile belirlenir. Normal yer kabuğunda sıcaklık her 33 m de 1°C artar. Magmatik aktivitede yer altında soğumakta olan bir magma milyonlarca yıl içinde gerçekleştiği için soğuma sırasında ısı elde edilir.

Simav bölgesi veri kaynağına bakıldığında kuyularda yapılan ölçümlerde Simav metamorfik kayaçlarında 84-149,5 m, 92-150 m, 74-300 m derinliklerinde kuyu başı sıcaklığının, 158°C, 149°C, 157°C olduğu tespit edilmiştir. Naşa bazaltında derinlik 50-65,8 m iken kuyu başı sıcaklığının 97°C tavan kotu sıcaklığı 143°C olduğu ölçülmüştür (Gemici ve Tarcan, 2002). Kuyu debileri Naşa bazaltında 14 L/s iken Simav metamorfik kayaçlarında 50-80 L/s aralığına ulaşmaktadır. Alüvyonda 0-83 m derinlikte yapılan ölçümde ise kuyu başı sıcaklığı 97°C ve tavan kotu sıcaklığı 105°C olarak ve üretim debisi ise 32 L/s olarak ölçülmüştür (Tablo 2.1). Bölgedeki jeotermal sistemin ısı kaynağı Naşa bazaltları ve volkanik kayaçlar oluşturur.

Simav jeotermal sahası, bulunduğu kuyunun konumuna göre üç ana birime ayrılmaktadır. Bunlar Eynal, Çitgöl ve Naşa jeotermal sahalarıdır. Eynal sahası, doğu-batı doğrultusunda normal fay sistemi boyunca ortaya çıkar. Jeotermal suların sıcaklığı 60-96°C arasındadır. MTA tarafından 65-958 m derinliğinde maksimum 163°C ulaşan kuyu dibi sıcaklığı ve 72 L/s artezyen üretim hızı ile yüksek jeotermal potansiyele sahiptir. Bölgede çok düşük üretim oranlarına sahip olan kuyular terk edilmiştir. Termal su ve sera ısıtılması açısından oldukça aktif olarak desteklenmektedir. Çitgöl sahası, Eynal'ın 3 km batısında yer almaktadır. Otel ısıtması ve balneolojik amaçlarla kullanılmaktadır. Sıcaklıkları 77°C ve 83°C arasında değişip toplam debiler 2 L/s olan kuyular bulunmaktadır. Konut kuyuları bu kaynakların daha sonra kaybolmasına neden olmaktadır. Alt kuyu sıcaklıkları 160°C ye ulaşmaktadır. Kuyudan sadece ısı alındığı için jeotermal sıvı boşaltma sorunları ortadan kalkmaktadır. Naşa sahası, Eynal ve Çitgöl'e göre daha düşük sıcaklıklı bir jeotermal sistemdir. Bu kaynak çevresinde herhangi bir mineral birikimi oluşmamaktadır. 90°C sıcaklıktaki bir kuyu Naşa kaplıcasındaki banyoları beslemektedir. Bölgedeki Simav jeotermal sistemin rezervuar kayasını derinliği 50 m ile 790 m aralığında değişmektedir. Bu kadar geniş

bir aralıkta, Kızılbük Formasyonunun gözenekli tabakaları ile fay sistemi jeotermal akışkanın dolaşım yaptığı zonları oluşturur. Yer altındaki ısının yalıtımını sağlamak üzere rezervuar kayacın üzerindeki geçirimsiz birimlerden oluşur. Bu zon yukarı kesimlerde bulunan yeraltısuyu ile derin sistemde bulunan jeotermal suların karışımını önleyen bir yapıyı sunar. Rezervuarda depolanan ve hareket halinde olan akışkanın ve ısının enerjisini kaybetmeden sürdürülebilirliğini sağlayacak geçirimsiz birimlerdir. Simav sahasında ise ağırlıkla Kızılbük Formasyonundaki kil taşları ağırlıkla örtü birimini oluşturur.

BÖLÜM ÜÇ
YERALTISUYU AKIM MODELİ

3.1 Giriş

Yaşanan kuraklık ve suyun azalması nedeni ile yeraltısuyu miktarını korumak ve yeraltı suyunu yönetmek için miktarını bilmek gerekmektedir. Aşırı tüketim, mevcut su kaynaklarının belirlenmesini, potansiyelinin bilinmesini ve kullanımını tespit ederek buna göre gelecek planlaması yapılmasını önemli kılmaktadır. Bu nedenle yeraltı suyunun davranışını bilmemiz gerekmektedir. Yapılan araştırmanın amacı yeraltısu seviyelerinin değişimi ve belli zaman içerisindeki seviye değişimlerini belirlemek ve akifer içerisindeki kirlenmenin dağılımı belirlemek önem taşımaktadır. Diğer taraftan bir akifer içerisindeki yeraltısuyunun farklı bir sistemle ilişkisinin belirlenmesi için yeraltısuyu akım modelleri kullanılmaktadır (Al-Hashmi vd., 2020; Rudakov ve Inkin, 2022). Akiferdeki hacimsel değişim ve depolamaların hesaplanması ile yeraltısuyu kaynaklarının niceliksel değerlendirmesi mümkün olabilmektedir. Modflow bu aşamada yaygın modeldir.

Nehir akifer etkileşimleri ile ilgili çalışmalar akiferde açılan bir kuyu ve bu kuyudan çekilen sabit bir debi neticesinde akifer ile nehir arasında oluşan akımı incelemek üzere yapılmıştır. (Boyraz ve diğ. 2018) Ardından günümüze kadar yapılan çalışmalar ile nehir ile yeraltı suları arasında sürekli bir akım olduğu ve bu akımın nehir yatağı, nehir şekli, eğimi, akım özellikleri gibi birçok parametreden etkilendiği anlaşılmıştır.

Yapılan çalışmada, Simav Ovası alüvyon akiferin yağıştan beslenimi ve aşırı yeraltısuyu çekimine ek olarak bölgedeki jeotermal sistemin etkisi yeraltısuyu açısından önem arz etmektedir. Zaman içerisinde yukarıda bahsedilen etkilerin yeraltısuyu miktarına olası etkilerinin değerlendirilmesi için yeraltısuyu akım modeli yaklaşımı benimsenmiştir. Öncelikle, Simav Ovası ve çevresinin daha önce yapılmış olan jeoloji ve hidrojeolojik çalışmaları temin edilmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemine aktarılan jeoloji ve hidrojeoloji haritaları üzerine sahadaki jeotermal alanlar

işlenmiştir. Bölgedeki jeotermal sistemin anlaşılmasında dönük olarak bölgede gerek MTA gerekse araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar temin edilerek yapılacak modelin altlıkları oluşturulmuştur.

Proje sahasında yeraltısuyu akımının simüle edilmesi için YAS akımları benzetimi sonlu-farklar çözüm yöntemini esas alan Modflow-2005 (Harbaugh, 2005) YAS akım modeli kullanılmıştır. Modflow-2005 hidrojeolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeraltısuyu akım modelinde akımını tanımlayan ve Modflow ara yüzü ile çözümü gerçekleştirilen kısmi diferansiyel denklem aşağıda verilmiştir. (1.1) (Harbaugh, 2005)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1.1)$$

Burada *Kxx*, *Kyy* ve *Kzz* birimlerin *x*, *y* ve *z* yönlerindeki hidrolik iletkenlik katsayılarını, h hidrolik yükü (YAS kotunu), *Ss* birimin özgül depolama katsayısını, *W* hacimdeki birim başına beslenme ya da boşaltımı (x,y,z) koordinatları t zamanı tanımlamaktadır. Sunulan bağıntıda üç boyutlu ve zaman değişkenli YAS akımı için yazılmıştır. h'ın uzay ve zamana göre türevleri (1.1) de yerine yazıldığında başlangıç ve sınır koşulları sağlanmış olur. Bununla birlikte, yapılan modelleme çalışmalarında çalışmanın hedefine ve gereksinimine uygun olarak kararsız veya kararlı akım koşullarında çalıştırılabilmektedir. Bu durumda yukarıda belirtilen denklem daha basit bir hale dönüşmüş olacaktır.

Kararlı durumda eşitliğin sağ tarafı "0" (sıfır) olur. (1.2)

$$\frac{d}{dx}\left(Kxx\frac{dh}{dx}\right)+\frac{d}{dy}\left(Kyy\frac{dh}{dy}\right)+\frac{d}{dz}\left(Kzz\frac{dh}{dz}\right)=0 \qquad (1.2)$$

MODFLOW sonlu farklar çözüm yöntemini esas alarak matematiksel analizleri basitleştirmek, hesaplamaları fiziksel kavramlarla açıklama amacıyla

kullanılmaktadır. Böylece (1.1) No.lu denklemi aşağıdaki (1.3) No.lu denkleme dönüştürmektedir. (McDonald ve Harbaugh, 1988)

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k}\left(h^{m}_{i,j-1,k} - h^{m}_{i,j,k}\right) + CR_{i,j+1/2,k}\left(h^{m}_{i,j+1,k} - h^{m}_{i,j,k}\right) \\ & + CC_{i-1/2,j,k}\left(h^{m}_{i-1,j,k} - h^{m}_{i,j,k}\right) + CC_{i+1/2,j,k}\left(h^{m}_{i+1,j,k} - h^{m}_{i,j,k}\right) \\ & + CV_{i,j,k-1/2}\left(h^{m}_{i,j,k-1} - h^{m}_{i,j,k}\right) + CV_{i,j,k+1/2}\left(h^{m}_{i,j,k+1} - h^{m}_{i,j,k}\right) \\ & + P_{i,j,k}h^{m}_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}\left(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k\right)\frac{h^{m}_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^{m} - t^{m-1}} . \end{aligned} \quad (1.3)$$

$h^{m}_{i,j,k}$ = m zamanda i, j, k hücrelerindeki yük değeri

$SS_{i,j,k}$ = i, j, k hücrelerindeki özgül depolama (L^{-1})

$\Delta_{rj}\Delta_{ci}\Delta_{vk}$ = i, j, k hücrelerindeki hacim (L^3)

CR, CC, CV = i, j, k hücrelerindeki akışı kontrol eden iletkenlik katsayıları (L^2T^{-1})

$P_{i,j,k}$ = hidrolik yük katsayılarının toplamı (L^2T^{-1})

t^m = m zaman adımının sonundaki zaman (T)

$Q_{i,j,k}$ = hacimsel akış oranı

Burada denklem (1.1) ile tanımlanan denklem uzay ve zamandaki sonlu ayrık noktalar kümesi ile değiştirilir ve kısmi türevlerin yerini bu noktalardaki yük değerlerindeki farklardan hesaplanan terimler alır. Böylece yaklaşım oluşturarak analitik çözüm elde edilmiş olur. Model içerisinde aşağıda belirtilen paketler kullanılmaktadır.

CHD (Time-Variant Specified-Head) ; Yük sınırlarını simüle etmek için kullanılır. Veri okuması her stres periyodunda gerçekleşir ve bu durum sabit seviye hücrelerinde su seviyesinin değişkenliğine imkân sağlar.

DRN (Drain) ; Akifer içerisindeki drenaj kanallarını simüle etmek için kullanılır. Su seviyesi drenaj kotunun üstünde olduğu sürece akiferden suyu çeker. Belirli eşiğin altına düştüğünde drenaj etkisi yoktur. Akı sıfıra düşer.

EVT (Evapotranspiration) ; Yük bağlantılı akının uzunluk ve zaman birimleri ile simülasyonudur. Su yüzeyi ile buharlaşma bağlantılı modellemedir.

RCH (Recharge) ; Yağış ve sızma yoluyla akifere giren beslenmeyi, belirli hücrelere belirli akıyı simüle etmek için kullanılır. Beslenme oranının boyutu uzunluk ve zamandır. (Hücrelerde ortalama metrekare bazı)
RIV (River) ; Havzadaki nehirleri modellemek için kullanılır. Bu paketin gerektirdiği başlangıç ve bitiş zamanı, su seviyesi, iletkenlik nehir tabanıdır değerleridir.
STR/SFR (Stream)(Streamflow-Routing) ; Akarsular ile yeraltısuyu arasındaki etkileşimi simüle etmek için kullanılır.

Bu çalışmada Simav Ovasındaki yeraltısuyu akım modelin oluşturulmasında zamana bağlı verilerin olmaması nedeni ile kararlı akım model analizi yapılmıştır. Kararlı akım modeli ile yeraltısuyu beslenimiinde azalma, yeraltısuyu çekimin artması ve jeotermal suyun yeraltısuyunu beslemesi (karışımı) senaryoları ile yeraltısuyu miktarsal değişimi değerlendirilmiştir. Simav Ovasında yapılan modelleme çalışmalarının tüm aşamaları aşağıda detaylı bir şekilde sunulmuştur.

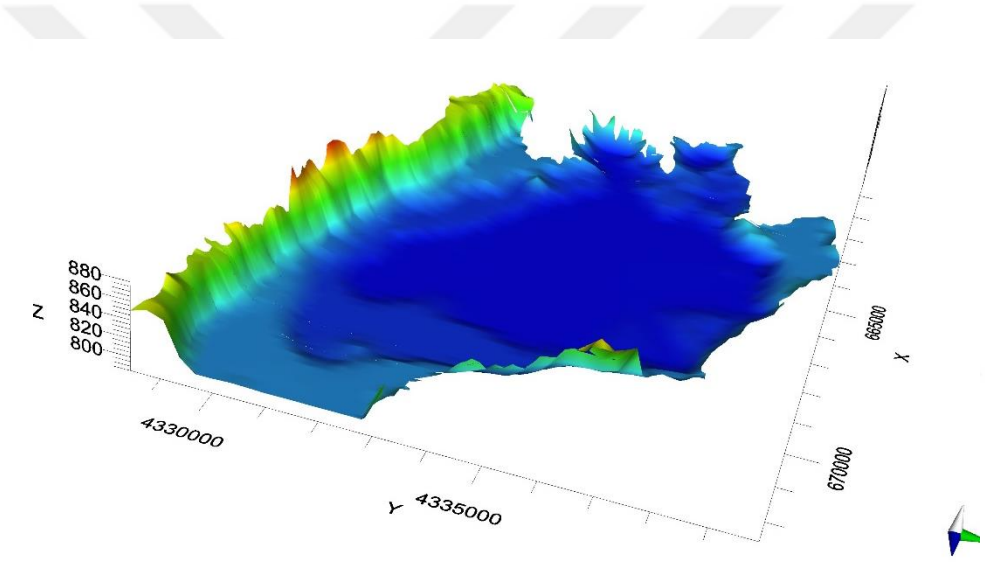
3.2 Modelin Yapılandırılması

3.2.1 Kavramsal Modelin Oluşturulması

Simav Ovasının modellenmesi için öncelikle kavramsal modelin oluşturulması gerekmektedir. Kavramsal modelin oluşturulmasında alanın jeolojik ve hidrojeolojik özelliklerinin yanında bölgede açılmış olan MTA jeotermal kuyu verilerinden yararlanılmıştır. Tablo 3.1'de sunulan kuyu verilerine göre kavramsal model oluşturulmuştur. Kavramsal model oluşturulurken alüvyon birimi, Naşa bazaltı ve Kızılbük formasyonu olmak üzere üç tabakalı model oluşturulmuştur. Modelde veri eksikliği olan kesimlerde ise Şekil 2.3'te sunulan jeolojik kesitten yararlanılarak tamamlanmaya çalışılmıştır. Kavramsal modelde ayrıca Kızılbük formasyonunda açılmış olan E-1 ve E-5 gibi derin sondaj verileri baz alınarak 500 m kotlarda temel kayasına girdiği düşünülmüştür. Bu nedenle yeterli veri olmayan noktalarda alüvyon biriminin altında ortalama 100 m Kızılbük formasyonu kalınlığı tanımlanmıştır. Noktasal kuyu verileri kullanılarak model alanı içerisinde Inverse Distance Weighing (IDW) interpolasyon tekniği ile taban kotu dağılımı haritası üretilmiştir. Kavramsal modelin oluşturma aşamaları aşağıda sunulmuştur.

3.2.1.1 Yüzey Topoğrafyası

Kavramsal model oluşturulmadan önce Simav Ovasının yüzey haritası üretilmiştir. Bunun için bölgede topoğrafik veriler kullanılarak model programında interpole edilerek yükselti haritası üretilmiştir. Şekil 3.1'de görüleceği üzere modellenecek alanın düz bir ova şeklinde olduğu ve güney kesimde ise horst yapısından dolayı topoğrafyanın aniden yükseldiği dikkati çekmektedir. Modellenen alan yüzeyi 800 ile 880 m kotları arasında değişmekte olup, düşük topoğrafya batı kesime doğrudur (Şekil 3.1).

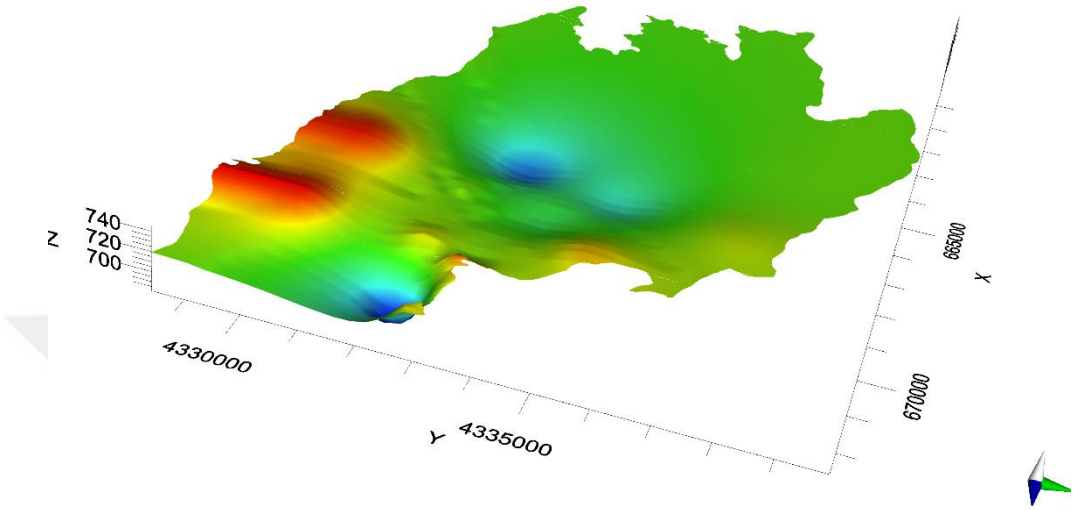


Şekil 3.1 Model alanının yüzey haritası

3.2.1.2 Alüvyon Birimi Taban Kot Dağılımı

Tablo 2.1 ve Tablo 3.1'de oluşturulan veri tabanı baz alınarak alüvyon birimin taban kot dağılımı üretilmiştir. Özellikle MTA sondaj verileri alüvyon biriminin taban kotu hesaplamalarından öncülük etmiştir. Diğer SK numaralı sondajlar ise derin olanları ise alüvyon birimi içerisinde kaldığından bu sondaj derinlikleri alüvyon biriminin taban kotu olarak ele alınmıştır. Bu veri tabanı kullanılarak model alanı

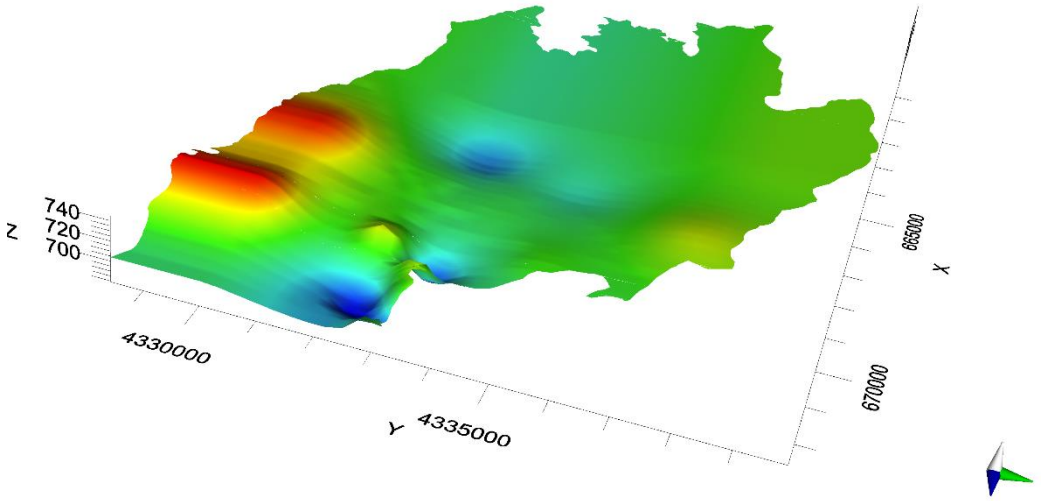
içerisinde Inverse Distance Weighing (IDW) interpolasyon tekniği kullanılarak taban kotu dağılımı haritası üretilmiştir. Alüvyon taban kotu 700 m ile 740 m arasında değişmektedir. En düşük kot Naşa ve Eynal bölgelerinde yer almaktadır (Şekil 3.2).



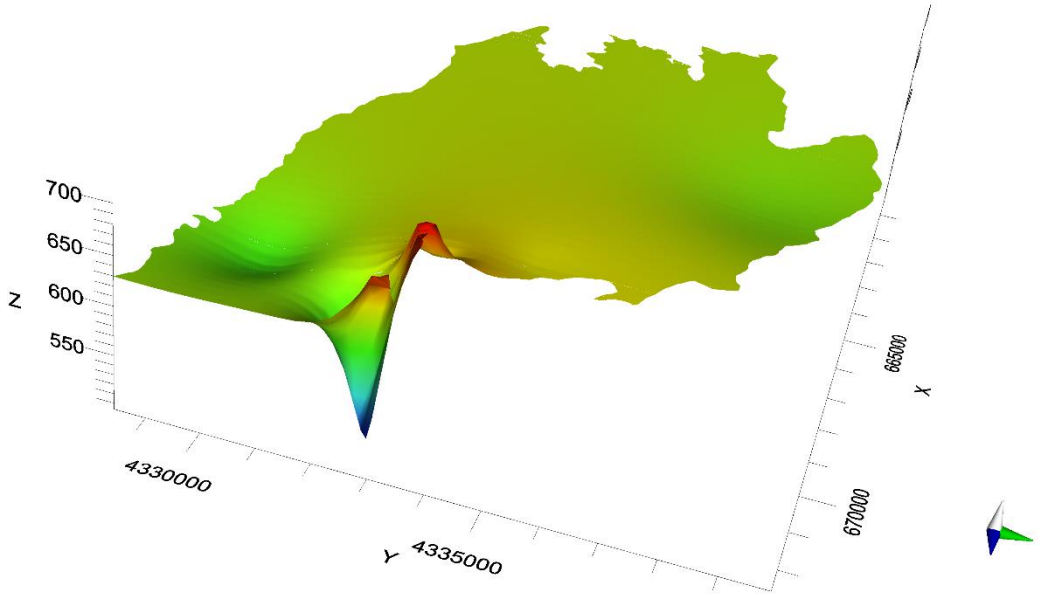
Şekil 3.2 Alüvyon tabakasının taban kot dağılımı

3.2.1.3 Naşa Bazaltı Taban Kot Dağılımı

Bölgede Naşa Bazaltı sınırlı bir alanda yayılım sunmaktadır (Şekil 2.2 ve 2.3). Kalınlığı oldukça ince olduğundan modele Naşa ve Eynal bölgelerinde ortalama 20 m'lik bir kalınlık tanımlanmıştır. İnterpolasyon tekniği ile taban kot haritası üretilmiş ve Şekil 3.3'te sunulmuştur. Naşa Bazaltı'nın kalınlığının çok ince olması nedeni ile Alüvyon taban kotu ile Naşa Bazaltı taban kotu dağım haritası birbirine benzerdir.



Şekil 3.3 Naşa Bazaltı taban kot dağılımı

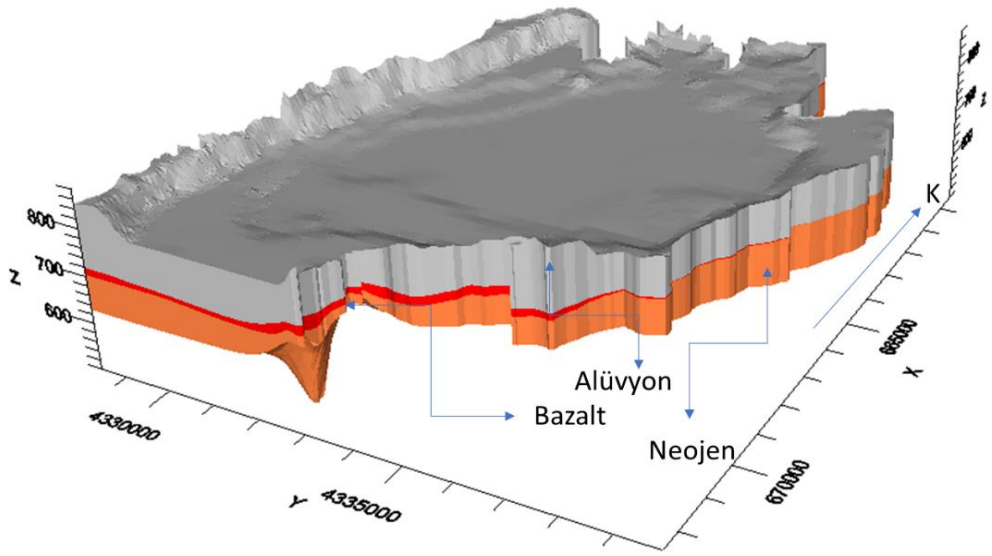


Şekil 3.4 Kızılbük Formasyonu taban kot dağılımı

3.2.1.4 Kızılbük Formasyonu Taban Kot Dağılımı

Modelleme alanında graben alanında temel kayası üzerinde Kızılbük Formasyonu gelmektedir (Şekil 2.2). Proje sahasında MTA tarafından açılan sondajlarda birimin kalınlığı oldukça değişkendir. Bu bağlamda modelde MTA verisi baz alınarak ve diğer noktasal verilerde Kızılbük Formasyonu verisi olmayan alanlarda ise ortalama 100 m'lik bir kalınlık tanımlanmıştır. Bu veriler kullanılarak interpolasyon yapılarak Kızılbük Formasyonun taban kotu üretilmiştir (Şekil 3.4). Yapılan interpolasyonda Naşa ve Eynal bölgelerinde jeotermal sistemin çıkışına olanak sağlayan fay sistemin etkisi açıkça görülmektedir.

Yukarıda taban kot haritaları kullanılarak modelleme alanı için Şekil 3.5'teki kavramsal model oluşturulmuştur. Modelde görüleceği üzere jeotermal sahaların olduğu alanlarda Naşa ve Eynal kaplıcaların bulunduğu alanlarda derin fay sistemleri ve bazalt yayılımı dikkati çekmektedir. Alüvyon akiferin kalınlığı ise jeotermal sistemi deneyleyen fay zonu bölgesine ve kuzey kesimlere doğru artmaktadır.



Şekil 3.5 Simav Ovasının kavramsal modeli

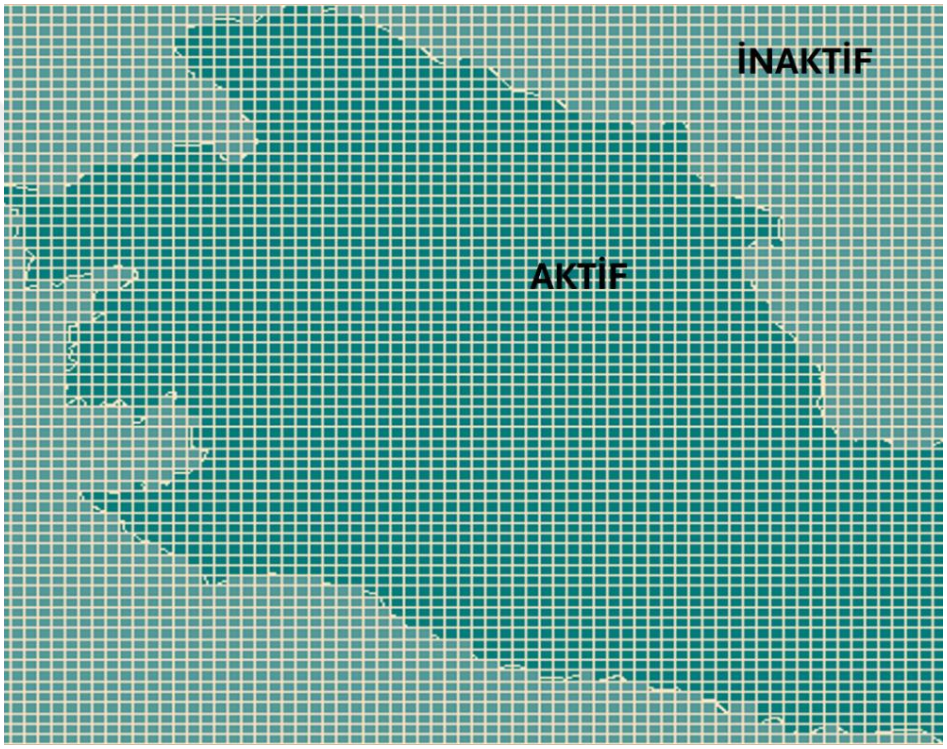
Modelin tabanında ise geçirimsiz özellik sunan metamorfik temel yer almaktadır. Bu birim modelin geçirimsiz temel birimi olarak tanımlanmıştır. Kavramsal model yeraltısuyu akım modeli için kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Simav ovasında yapılan gözlem kuyularının bilgileri (Tubitak-109Y049, 2012)

Sondaj No	X	Y	Z	Mart 2012 Su Kotu	Şubat 2024 Su Kotu	Kuyu Taban Kotu (m)	Kuyu Filtre Başlangıç Kotu (m)	Kuyu Filtre Bitiş Kotu (m)	pH	Sıcaklık (^{0}C)	CI (ppm)
SK-1	675478	4329102	826	823.89		796	804	800			
SK-2	671851	4332060	801	798.69		741	757	745			
SK-3	670368	4330120	791	789.88	790.00	741	763	751		12	23
SK-4	670382	4332387	796	793.69		747	760	752			
SK-5A	668671	4334401	788	787.06	784.50	766	780	776	7.2	17.75	92.8
SK-6B	667227	4334868	781	780.9	780.15	741	749	745	7.74	13.4	33.7
SK-7B	666630	4333066	784	784	783.35	752	760	756	8	13	11.2
SK-8A	669581	4333357	792	789.13		760	772	764			
SK-9	668152	4330307	796	795.14	794.57	744	768	756	8	12	32.2
SK-10	664318	4332032	797	796.52	794.97	756	769	757	8.2	12	11.2
SK-11	662243	4335165	783	782.15	781.60	743	755	745	7.5	13.8	4.6
SK-12	660023	4336302	784	782.66	782.00	768	776	772	7.8	14.05	39.4
SK-13	665097	4338372	789	786.3	784.90	714	733	715	8.45	12.5	6.6
SK-14B	668258	4337451	783	782.33	782.50	723	767	763	8.56	12.4	6.9
Simav Çayı Çıkışı										11	19.9

3.3 Sonlu Farklar Model Ağı

Model alanında 3 katmanlı kavramsal model oluşturulmuştur. Modelin temeli menderes metamorfitleri oluşturduğundan bu birim geçirimsiz temeli oluşturmaktadır. Model alanı 90 km^2 olup alüvyon akifer alanı 70 x 70 m olarak eşit hücre şeklinde bölümlendirilmiştir. Modelleme alanı içerisinde toplam 18367 adet sonlu farklar hücresi olan model ağı oluşturulmuştur. Model alanı dışındaki alanlar ise aktif olmayan hücreler şeklinde oluşturulmuştur. Model alanı ve aktif hücre dağılımı Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6 Model hücre ağlarının oluşturulması

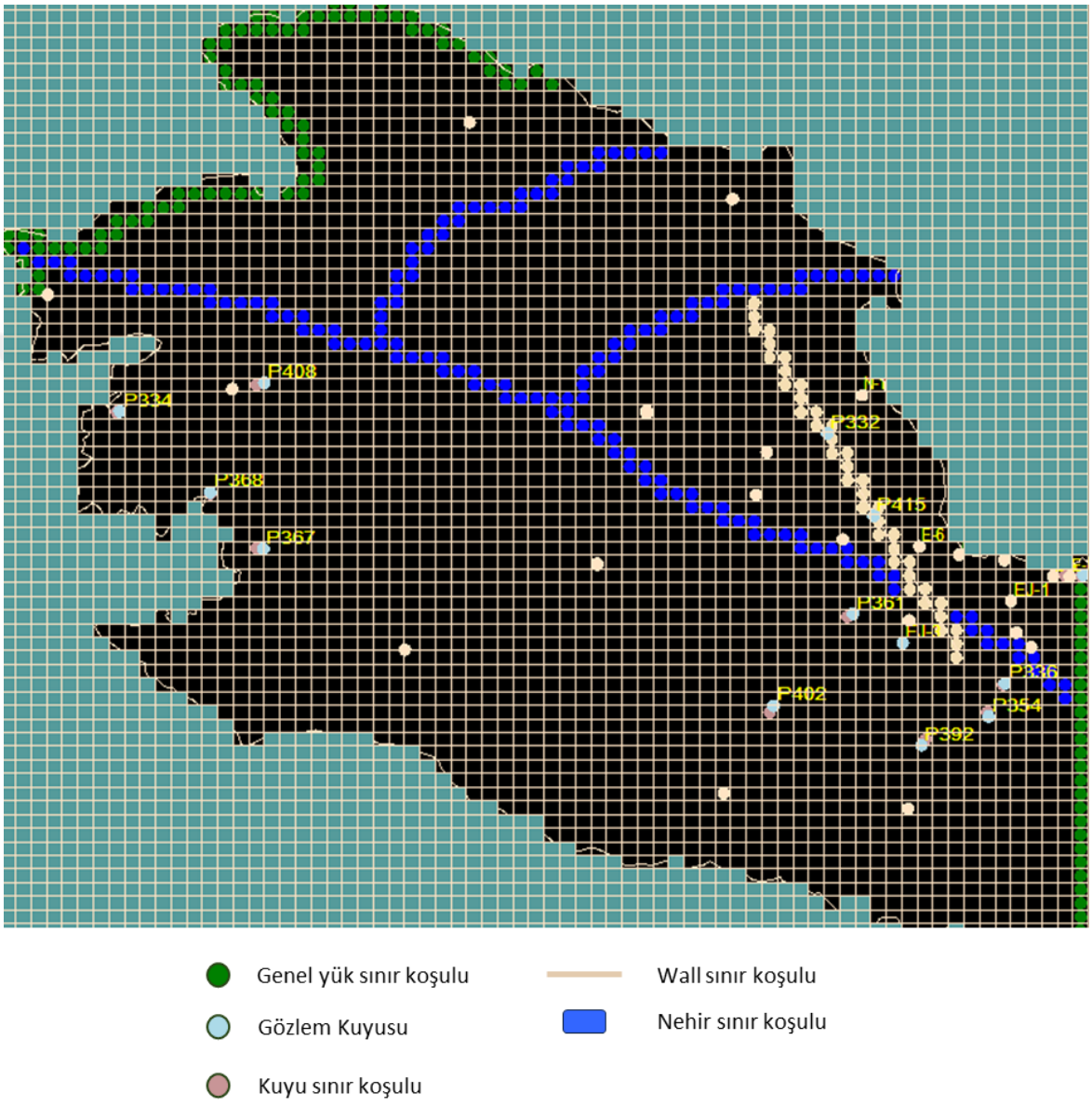
3.3.1 Sınır Koşulları

Model sınırları jeolojik koşullar dikkate alınarak ve bölgenin hidrojeolojik özellikleri ile belirlenir. Kalibrasyon aşamasında akiferin sınır koşulları ile jeolojik yapısı çakıştırılır ve model alanı yeraltısuyu akımı simüle etmek için model oluşturulan gridlerle çakıştırılır. Modellenen bölge 90 km^2'lik bir alana sahiptir. Sınır koşulları çalışılan bölgenin çevre ile ilişkisini temsil ettiğinden giriş parametrelerinin kalitesi oldukça önemlidir. Çalışılan modelde sınır koşulları Şekil 3.7 'de gösterilmiştir. Modellenen alüvyon akifer bölgede yekpare bir litoloji olduğundan model alanının bölümlendirilmesinde kuyu verilerinden yararlanılmıştır.

Modellenen alüvyon akiferin sınırları ayrıca akım modelinin sınırlarını da oluşturmuştur. Sınır koşulları olarak, genel yük ve akımsız yük sınırları uygulanmıştır. Akiferin doğusunda yeraltısuyunun model alanına giriş kesimleri, batıda ise alüvyon akiferden yeraltısuyunun çıkışının sağlandığı kesimler olduğu için bu alanlar genel yük sınırı olarak değerlendirilmiştir. Genel yük sınırın (GHB) belirlenmesinde model alanlarının dışında izleme kuyu verileri kullanılmıştır. Özellikle doğu kesime tanımlanan genel yük sınırı için bölgeye açılmış olan SK-1 No.lu sondajdaki seviye bilgileri baz alınmıştır. SK-1 No.lu kuyunun su seviyesi Tablo 3.1'de sunulmuştur. Alüvyon akiferin kuzey ve güneydeki sınırları ise akımsız sınır koşulu olarak değerlendirilmiştir. Sınır koşulları kavramsal modelde tanımlanan 3 tabaka içinde tanımlanmıştır. Bölgede eski Simav Gölü kuruması nedeni ile herhangi bir göl sınır koşulu tanımlanmamıştır.

Model alanı içerisinde jeotermal sistemin çıkışını sağlayan fay ise alüvyon tabanından itibaren model taban kotuna kadar tanımlanan bariyer (wall) sınır koşulu olarak tanımlanmış ve bariyer ise yarı geçirimli olarak yani jeotermal sistemin geçişine olanak sağlayan ($K=1x10^{-6}$ m/s) derin fay sistemi olarak ele alınmıştır. Wall (HFB) sınır koşulu yeraltısuyu akışını kontrol eden bir bariyer olarak geliştirilmiştir. Wall sınır koşulu geçirimliliğine göre yeraltısuyu akımını geçirimsiz bir duvar veya düşük geçirimli bir yüzey olarak tanımlanabilmektedir. Çalışma alanında fay sistemleri de

bazen geçirimsiz olabileceği gibi düşük geçirimli olup akışkan hareketine olanak sağlayabilmektedir.



Şekil 3.7 Model alanının hücre dağılımı

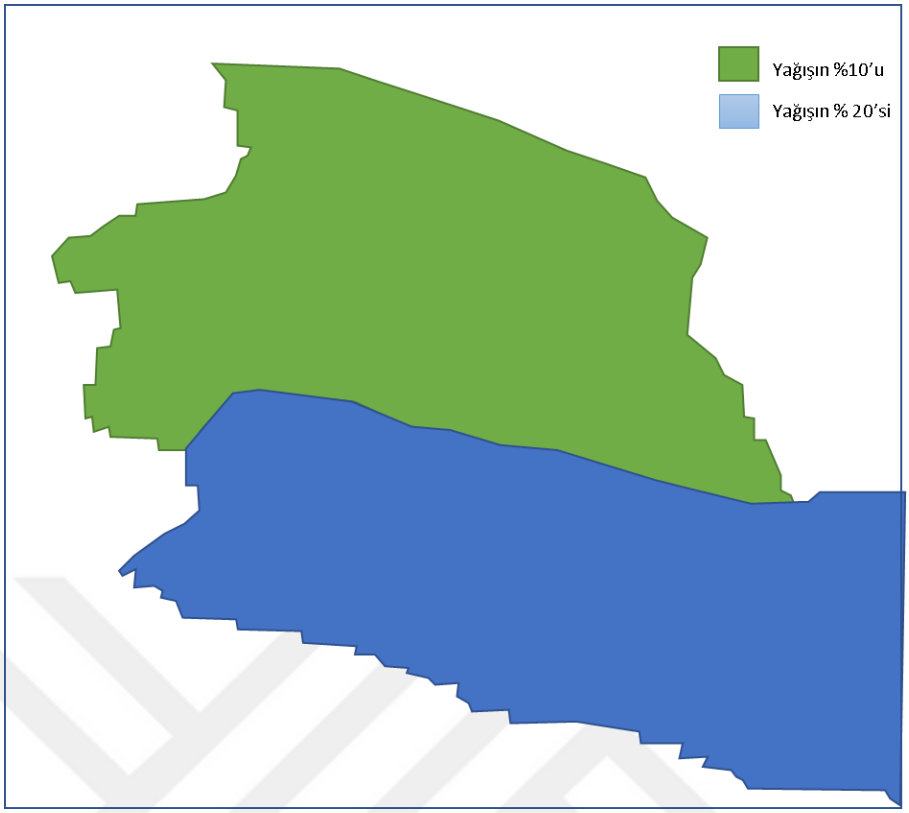
3.4 Model Girdileri

3.4.1 Başlangıç Koşulları ve Model Süresi

Model alanında yeraltısuyu işletme döneminin ne zaman başladığına dönük veri bulunmamaktadır. Ancak bölgede yapılan kapsamlı çalışmalarından seviye verilerinin bulunduğu çalışmalar mevcuttur. Bu nedenle Simav ovasında modelin başlangıç koşulları 2012 yılı başlangıcı baz alınmıştır. Modelleme süresi olarak model başlangıç yılı ile sahada seviye gözleminin yapıldığı 2024 yılına kadar sürdürülmüştür. Modelleme zaman dilimi gün olarak ele alınmıştır.

3.4.2 Yağıştan Beslenim

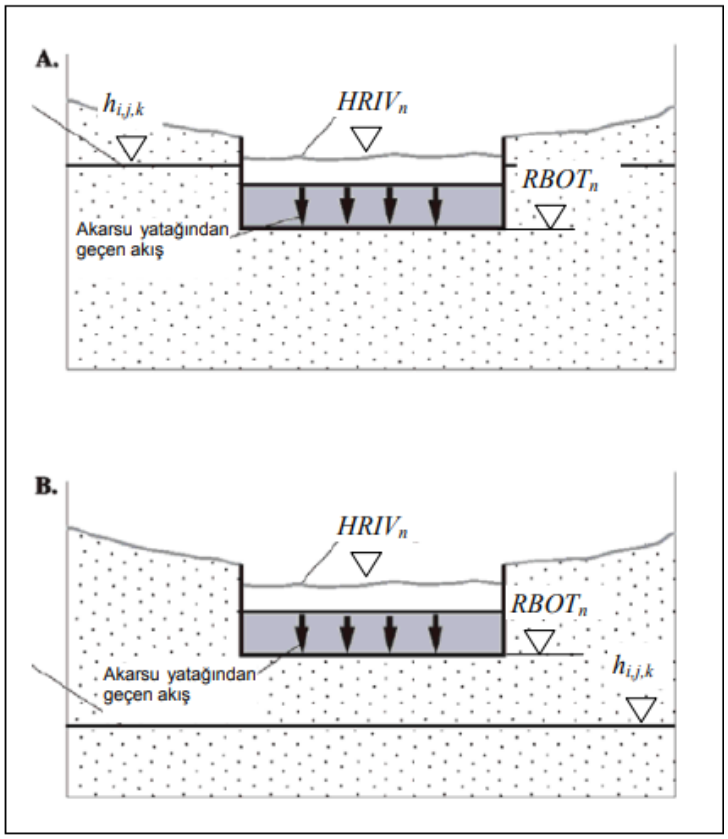
Yeraltsuyu akım modeli girdilerinden diğer bir parametre ise yeraltısuyu beslenimidir. Yeraltısuyu beslenimi model içerisine geçirimli zonlardan süzülen su miktarı olarak belirlenir ve modele aylık veya yıl bazında girilir. Simav Ovası uzun dönem yıllık yağış ortalaması 597,3 mm'dir. Yüzeysel akiferlerde yağıştan beslenim değeri genel olarak %3-25 arasında değerler almaktadır (DSİ, 2014). Simav Ovasında düşen ortalama yıllık yağışın %20'si geçirimli alanlarda yeraltısuyu beslenimi gerçekleştirdiği, geçirimliliği düşük alanlarda ise yağışın %10'u yeraltısuyu beslenimi olarak kabul edilmektedir. Yukarıdaki değerlendirme ışığında güvenli tarafta kalmak için yeraltısuyu beslenimi alüvyon akiferde eski Simav Gölü'nün yer aldığı kuzeybatı kesimleri 50 mm, diğer geçirimli olduğu düşünülen alanların ise 100 mm olarak beslendiği kabul edilmiştir (Şekil 3.8). Simav Gölü ve çevresi ağırlıkla kil ve siltlerden oluşmaktadır. Bu nedenle bu alanlarda beslenim daha düşük gerçekleşmektedir. Ovanın güney kesimleri ise yüksek rakımlı alanlardan gelen sedimanların kum ve çakıllı malzemelerden oluştuğundan bu alanlarda beslenim değeri daha yüksek olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.8 Model alanına tanımlanan beslenim değerleri

3.4.3 Nehir ve Akarsular

Yeraltısuyu akım modellerinde yüzeyde drene olan nehir, akarsu ve çay gibi akarsu niteliğindeki su drenaj hatları modele nehir sınır koşulu (RIV) ile tanımlanır (Şekil 3.9). Bu sınır koşul uygulamasında akar durumdaki nehir yatağının taban kotu, akan suyun yüzey kotu, yatak genişliği ve yataktaki malzemenin kalınlığı ve geçirimliliğinin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.9 Nehir sınır koşulu (RIV) koşulunun yeraltısuyu seviyesi durumuna göre değerlendirilmesi (Elçi vd., 2015)

Simav Çayı için model alanı boyunca tüm derenin taban kotu, su derinliği modele tanımlanmıştır. Çayın su kotu ve derinliği sürekli değiştiğinden ve elimizde akım gözlem verisi olmadığından Şubat 2024 dönemi arazi çalışmasında ölçülen değerler baz alınmıştır. Simav Çayı için minimum taban kotu 759 m maksimum taban kotu ise 804,5 m olarak tanımlanmıştır. Simav Çayının akım yönü doğudan batı kesime doğru olduğundan, en yüksek taban kotu doğuda, en düşük taban kotu ise batı kesimdedir. Nehir sınır koşulu için su kalınlığı doğu kesimde 20 cm tanımlanırken, batı kesimde bu değer 50 cm olarak tanımlanmıştır. Nehir genişliği ve derinliği 5 m olarak ele alınmıştır. Simav Çayının yan kolları ise genişliği 3 m ve derinliği 3 m olarak tanımlanmıştır. Nehir sınır koşulu ile tanımlanmış çay ve derelerin konumları Şekil 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.10 Simav Çayının Genel Görünümü (Kişisel arşiv, 2024)

3.4.4 Kuyular

Alüvyon akiferden yeraltısuyu üretimi yapan içme suyu kuyuları ve jeotermal üretim kuyuları kuyu sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Bölgede kuyular çoğunlukla köylerin içme suyunu sağlamaktadır. Sulama suyu ise keson kuyularla veya Simav Çayından çekilen sularla sağlanmaktadır. İçme suyu kuyularının çekim debileri bilinmediğinden kuyunun bağlı olduğu köy nüfuslarından yola çıkarak günlük çekim değerleri hesaplanmıştır. Bunun için köylerin nüfus verileri ve bu nüfusa karşılık gelen su tüketimleri baz alınmıştır. Köyler için önerilen günlük su tüketimi 200 L olarak ele alınmıştır (TUİK, 2022).

Ovadan çekilen su miktarı Tablo 3.2'te sunulmuştur. Bu oranlar ovada içme suyu kuyularına nüfus oranlarında günlük çekim kuyusu olarak tanımlanmıştır. Kuyuların alüvyon akifer kalınlığı boyunca çekim yaptığı kabul edilmiştir. Bu bağlamda oluşturulan ve modele tanımlanan kuyulardan çekilen su debisi ve diğer veri seti Tablo 3.3'te sunulmuştur. Jeotermal kuyu çekimleri ise Tablo 2.1'de sunulmuştur. Jeotermal

kuyu çekimleri ise MTA tarafından yapılan çalışmalarda üretim zonlarına göre ilgili akifere çekim kuyusu olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.2 Simav Ovasındaki yeraltısuyu tüketimi

Köy Adı	Nüfusu	Kuyu No	Su Tüketimi (m^3/g)
Boğazköy	401	P368	80.2
Gümüş su	560	P367	112
Simav	60000	P392-P354-P336	12000
Naşa	2000	P414	400
Göl köy	292	P408	58.4
Çitgöl	3775	P402	755
Gökçeler	386	P359	77.2
Güney Köy	1600		320
Toplam			13802.8

Kuyuların derinlikleri ve teçhiz planı elde edilememiştir. Kuyuların ortalama 100 m derinliğinde açıldığı ve filtrelerin ise alüvyon akifer içerisinde kaldığı varsayımı ile filtre başlangıç ve bitiş derinlikleri akiferin kalınlığına göre düzenlenmiştir. Bölgedeki kuyular sürekli çekim yaptığından simülasyon süresi boyunca çekim yaptığı kabul edilmiştir.

Tablo 3.3 Modele tanımlanan kuyuların verileri

Nokta	Tip	Notlar	X	Y	Z	Debi (m^3/g)	Kuyu Taban Kotu (m)	Filtre Başlangıç Kotu (m)	Filtre Bitiş Kotu (m)	Pompa Çalışma Zamanı	Pompa Stop Zamanı
P334	İçme suyu kuyusu	İçme suyu kuyusu	660890	4334896	778	50	678	758	690	1.01.2012	12.12.2023
P336	İçme suyu kuyusu	Eynal köyü içme suyu kuyusu	671533	4331628	794	80	694	774	706	1.01.2012	12.12.2023
P354	İçme suyu kuyusu	Yeşilova köyü içme suyu kuyusu	671337	4331231	799	35	699	779	711	1.01.2012	12.12.2023
P359	İçme suyu kuyusu	Gökçeler köyü içme suyu kuyusu	672230	4329611	826	40	726	806	738	1.01.2012	12.12.2023
P363	İçme suyu kuyusu	Güney kasabası içme suyu kuyusu	665184	4339349	807	320	707	787	719	1.01.2012	12.12.2023
P367	İçme suyu kuyusu	Gümüşsu kasabası içme suyu kuyusu	662617	4333244	67	35	689	769	701	1.01.2012	12.12.2023
P368	İçme suyu kuyusu	Boğazköy-Gölköy yeni içme suyu kuyusu	661976	4333925	795	75	695	775	707	1.01.2012	12.12.2023
P402	Kuyu	Çitgöl kasabası yeni içme suyu kuyusu	668752	4331358	798	402	698	778	710	1.01.2012	12.12.2023
P414	İçme suyu kuyusu	Naşa kasabası içme suyu depo girişi (pınardan)	669964	4336610	883	400	783	863	795	1.01.2012	12.12.2023
P392	Kuyu	İçme suyu kuyusu	670530	4330886	786	12000	686	766	698	1.01.2012	12.12.2023

3.4.5 Başlangıç Su Kotları

Model girdileri arasında başlangıç su kotları gerekmektedir. Bunun için model başlangıç zamanı olan 2012 yılında sahada ölçülmüş olan su kotları kullanılmıştır. Tablo 3.1'de sunulan 2012 yılı mart ayı su kotları başlangıç su kotları olarak kullanılmıştır.

3.5 Modelin Kalibrasyonu

3.5.1 Hidrolik İletkenlik

Yeraltısuyu akım modelinde modellenen tabakaların hidrolik iletkenlik katsayısı (*K*) değerinin belirlenmesi en önemli adımı oluşturur. Hidrolik iletkenlik değerinin tabakalar üzerindeki değerinin bir dağılım haritasına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için sahada kuyulardan elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri model içerisinde tanımlandığında bir dağılım haritası üretmektedir. İlk olarak açılan kuyular için hesaplanan hidrolik iletkenlikler ve alüvyonlar ele alınmıştır. Kalibrasyon sırasında bu değerler değiştirilir. Böylece atanan yeni değerler, faylar hariç, bu birimlerin özelliklerine uygun olur. Modelin iki katmanı arasındaki dikey ve yatay hidrolik iletkenlik değerleri belli bir yüzdelikte eşitlenme varsayımıyla modele atanır. Kalibrasyon çalışmaları sırasında modeldeki yüksek hidrolik iletkenlik bölgeleri ve bunların hidrolik iletkenlik değerleri belirlenir.

Modellemede kullanılan hidrolik iletkenlik şu şekilde hesaplanır;

$$K = k\frac{\gamma}{\mu}$$

K = Hidrolik iletkenlik (m/sn)
γ = Akışkanın özgül ağırlığı (kg/m^2sn^2)
μ = Dinamik viskozite (kg/m sn)
k = Özgün permeabilite (m^2)

Özgün permeabilite hesaplaması;

$$k = cd^2$$

k = Özgün permeabilite (m^2)

c = Ampirik katsayı (boyutu olmayan, akıma bağlı katsayı)

d = Ortalama dane çapı (m)

Bu çalışmada ise Simav Ovasında yapılan gözlem kuyularından elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri kullanılmıştır. Burada özellikle Naşa Bazaltı ve Kızılbük Formasyonu için birimlerin litolojik özellikleri baz belli aralıkta hidrolik iletkenlik değerleri atanmıştır. Naşa bazaltı için $1.0x10^{-6}$ ile $9.00x\text{-}10^{-8}$ m/s, Kızılbük Formasyonu için $1.18x10^{-5}$ ile $1.20x10^{-8}$ m/s arasında değerler tanımlanmıştır. Naşa ve Kızılbük formasyonunda Şekil 3.7'de sunulan sınır koşullar haritasında fay olarak tanımlanan bölgeye Naşa için $1x10^{-6}$ m/s, Kızılbük Formasyonu için $1.18x10^{-6}$ m/s diğer alanlara ise geçirimsiz olarak tanımlanmamış ve geçirimliliği düşük değerler tanımlanmıştır. Her tabaka için kullanılan hidrolik iletkenlik değerleri Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Tablo 3.4 Modelde kullanılan hidrolik iletkenlik değerleri

Katmanlar	Sondaj No	Kx	Ky	Kz
Alüvyon	SK-1	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-06
	SK-2	9.80E-05	9.80E-05	9.80E-06
	SK-3	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-06
	SK-4	2.90E-05	2.90E-05	2.90E-06
	SK-5A	1.50E-06	1.50E-06	1.50E-07
	SK-6B	9.00E-06	9.00E-06	9.00E-07
	SK-7B	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-07
	SK-8A	2.00E-06	2.00E-06	2.00E-07
	SK-9	9.00E-05	9.00E-05	9.00E-06
	SK-10	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-05
	SK-11	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-07
	SK-12	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-07
	SK-13	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-08
	SK-14B	9.00E-07	9.00E-07	9.00E-08

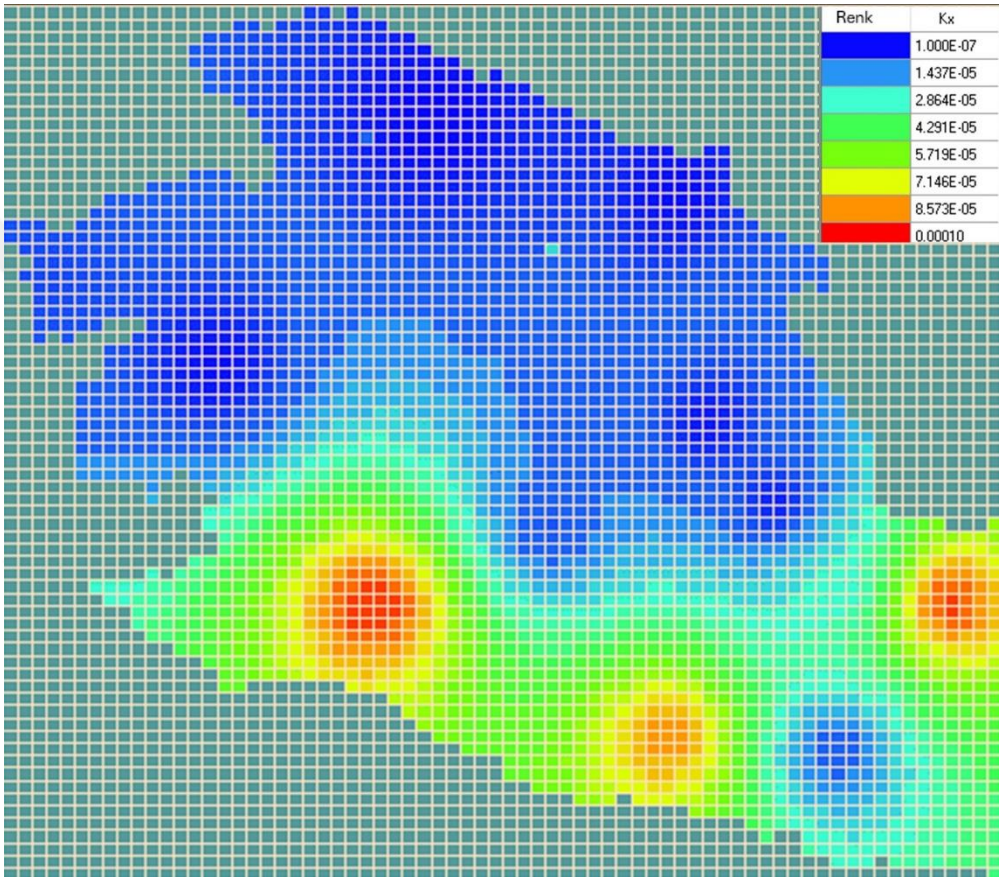
Yeraltısuyu akım modeline tüm girdiler tanımlandıktan sonra model kararlı akım koşullarında çalıştırılmıştır. Model kalibrasyonu için Simav Ovasında 2012 yılı öncesi açılan gözlem kuyularındaki seviye ölçümleri ile kalibrasyon edilmiştir (Şekil 3.11). Alüvyon akifer için atanan hidrolik iletkenlik (Kx) dağılım haritası Şekil 3.12'de sunulmuştur. Kx=Ky=Kz/10 şeklinde alınan hidrolik iletkenlik dağılımının Kx dağılımı verilmesi yeterli görülmüştür. Özellikle eski Simav Gölü ve çevresinin kil ağırlıklı birimler olması nedeni ile bu alanlar geçirimsizliği oldukça düşüktür. Kalibrasyon için kullanılan kuyu özellikleri ve seviyeleri Tablo 3.1'de sunulmuştur. Gözlem kuyularında ölçülen seviyeler, hem sınır koşulları, hidrolik iletkenlik katsayısı ile hem manuel hem de PEST (Doherty, 2004) otomatik kalibrasyon kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu çalışmadaki yeraltısuyu akım modelinin kalibrasyonu aşamasında hidrolik iletkenlik değeri, havzada daha önce açılan kuyularda ölçülen su kotları ile modelin hesapladığı su kotları arasında iyi bir korelasyon elde edilene kadar değiştirilerek modelin kalibrasyonu yapılmıştır.



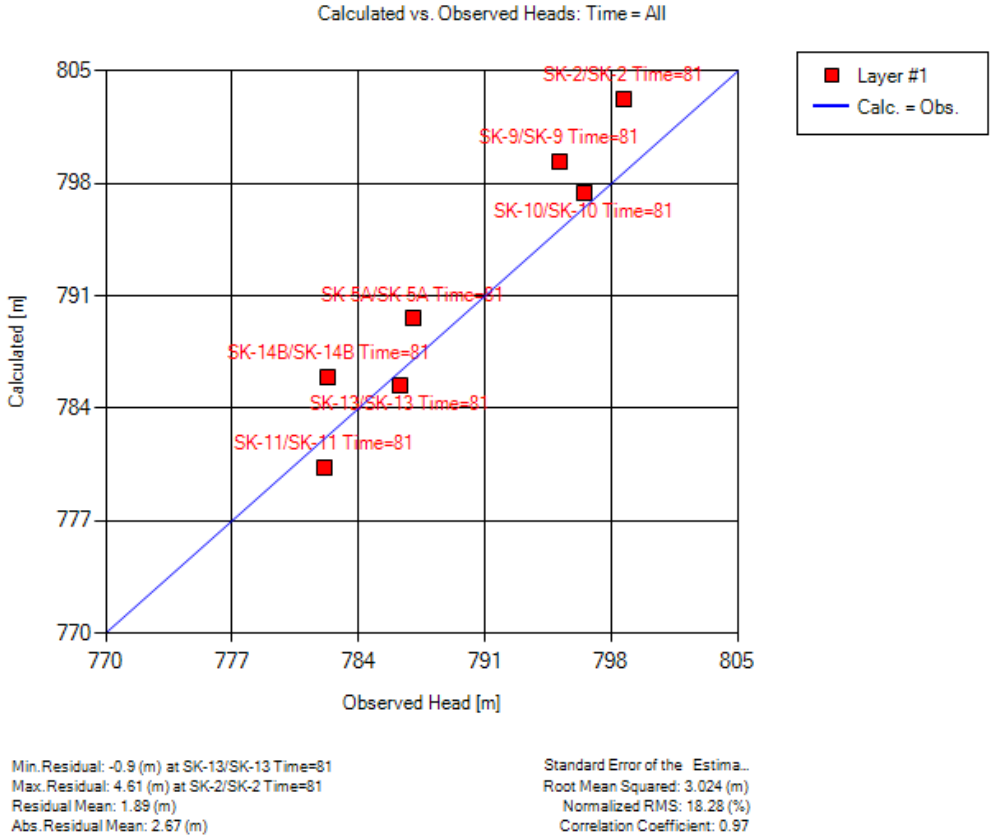
Şekil 3.11 Simav Ovasında açılan gözlem kuyuları (Kişisel arşiv, 2024)

Yeraltısuyu model kalibrasyonundaki amaç, sahada daha önceden ölçülen değerler ile modelin hesapladığı hidrolik yükleri karşılaştırılarak modelin saha verilerine göre

uygunluğunun test edilmesidir. Bu kapsamda Simav Ovasında açılan gözlem kuyularındaki seviyeler kullanılarak modelin kalibrasyonu kararlı akım koşullarında yapılmıştır. Programda PEST Parametre Kestirim Programı ile analizi edilen hidrolik iletkenlik değerleri Tablo 3.4'te sunulmuştur. Yapılan kalibrasyonda r değeri 0,97 olarak elde edilmiş ve modelin çalışma alanını temsil edecek özellikte olduğu kabul edilmiştir (Şekil 3.13).



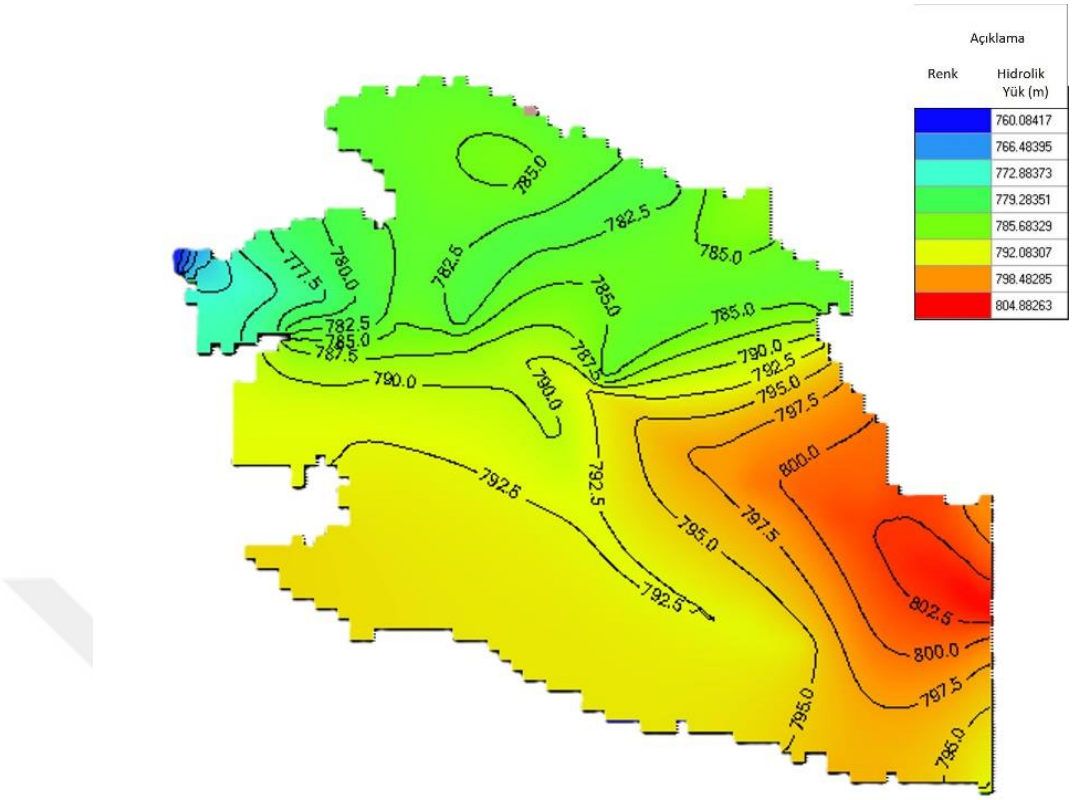
Şekil 3.12 Alüvyon akifer için tanımlanan hidrolik iletkenlik (Kx) dağılım haritası



Şekil 3.13 Model kalibrasyon grafiği (r= 0,97)

3.6 Yeraltısuyu Kotu

Yukarıda ele alınan model girdileri ve kalibrasyonu yapıldıktan sonra kararlı akım koşullarında çalıştırılan modelde Simav Ovasının yeraltısuyu seviye kot haritası üretilmiştir (Şekil 3.14). Yeraltısuyu akım yönünün GD'den KB yönüne doğru olduğu yani Simav Ovasındaki yüzeysel akaçlama paralel olarak akış göstermektedir. Ovada su kotları ise 802 m ile 775 m arasında değişmekte olup, en düşük kot alanın batısındaki havza çıkışında elde edilmiştir. Eski Simav Gölü çevresinde su kotu yüzeye yakın olup bu kesimlerde yeraltısuyu Simav Çayı'na boşalmaktadır. Üst kesimlerde yani doğu kesimlerde ise Simav Çayı yeraltısuyunu besler niteliktedir. Alanın batısında Neojen birimler bariyer özelliği sunduğundan bu alanda Simav Çayının drenajı için açılan kanal ve çevresinde yeraltısuyu akımı da söz konusudur.



Şekil 3.14 Kararlı akım koşullarında yeraltı suyu akım modeli

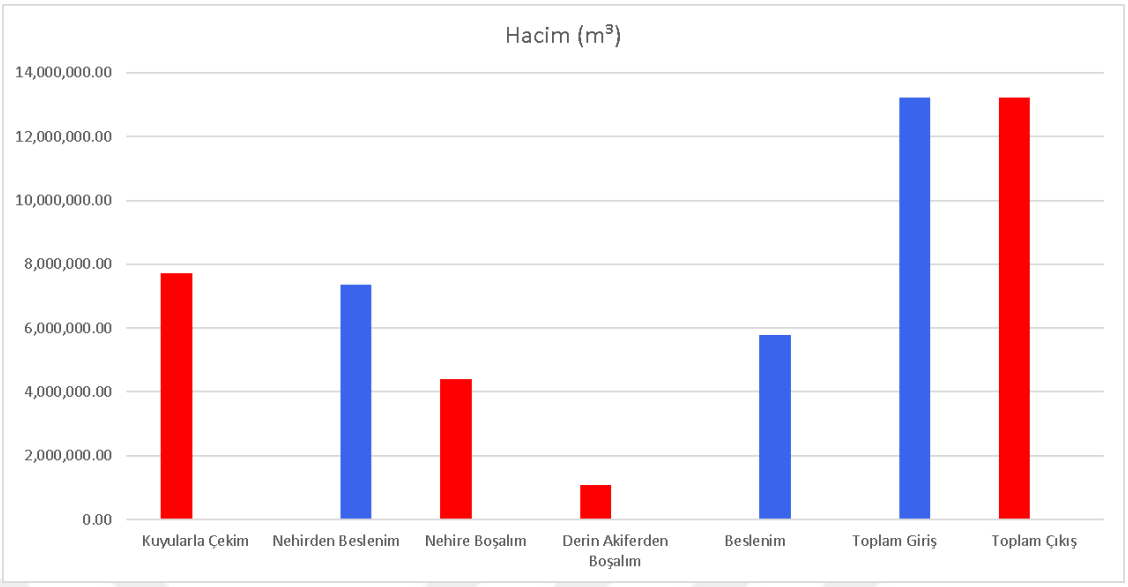
3.7 Yeraltısuyu Bütçesi

Kararlı akım koşullarında çalıştırılan modelde Simav Ovasındaki alüvyon akifer için yıllık yeraltısuyu bütçesi oluşturulmuştur. Yapılan model bileşilenlerinde Simav Ovasında ana çıktıları yeraltısuyu çekimleri oluşturmaktadır. Bu çekimler ovadaki içme suyu kullanımı ve derin akiferden çekilen jeotermal sular oluşturur. Diğer bir bileşen ise yeraltısuyunun doğal boşalımıdır. Doğal boşalım ovanın orta kesimlerinde Simav Çayına olan yeraltısuyu boşalımlarıdır. Özellikle kış aylarında orta kesimlerinde ovada yeraltısuyu yükselimleri izlenerek doğal göl oluşumu gerçekleşmektedir. Yeraltısuyu beslenimi ise alüvyon akiferin yağmur suları ile doğrudan beslenimi ile gerçekleşmektedir. Bahsedilen bu bileşenler çerçevesinde oluşturulan yeraltısuyu bütçe bileşenleri Tablo 3.5'te ve grafiksel olarak ise Şekil 3.15'te sunulmuştur.

Simav Ovasında yıllık toplam bütçesi 13,212,060 m^3'tür. Bu suyun 5,775,255 m^3'ü yıllık ovaya düşen yağmur suyundan beslenim olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca ovada akar durumdaki Simav Çayı ise ovanın üst kesiminde yeraltısuyunu beslemekte, orta kesim ve batıya doğru ise yeraltısuyu Simav Çayını beslemekte ve buradan boşalım yapmaktadır. Simav Çayından yeraltısuyu beslenimi 4,408,089 m^3 olarak gerçekleşmektedir. Ancak akiferden çıkan su miktarına bakıldığında en önemli yeraltısuyu boşalım mekanizması yeraltısuyunun nehre boşalımı ile gerçekleşmektedir. Bu oran ise yıllık 7,357,381 m^3 olarak gerçekleşmektedir. Ovadan yıllık yeraltısuyu çekim miktarı ise 7,727,667 m^3 olup içme suyu olarak kullanılmaktadır. Havzada ise 1,076,304 m^3 su ise derin akiferden boşalım olarak gerçekleşmektedir. Akiferler arası etkileşim ise oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Yeraltısuyu hidrodinamiğini etkileyen en önemli parametrenin kuyular ile çekim olduğu görülmektedir.

Tablo 3.5 Yeraltısuyu yıllık bütçe bileşenleri

Parametreler	Sisteme Giren (m^3)	Sistemden Çıkan (m^3)
Kuyular		7,727,667
Nehre Boşalım		7,357,381
Nehirden Beslenim	4,408,089	
Derin Akiferden Boşalım		1,076,304
Yağmurdan Beslenim	5,775,255	
Toplam Bütçe	13,212,060	13,212,060



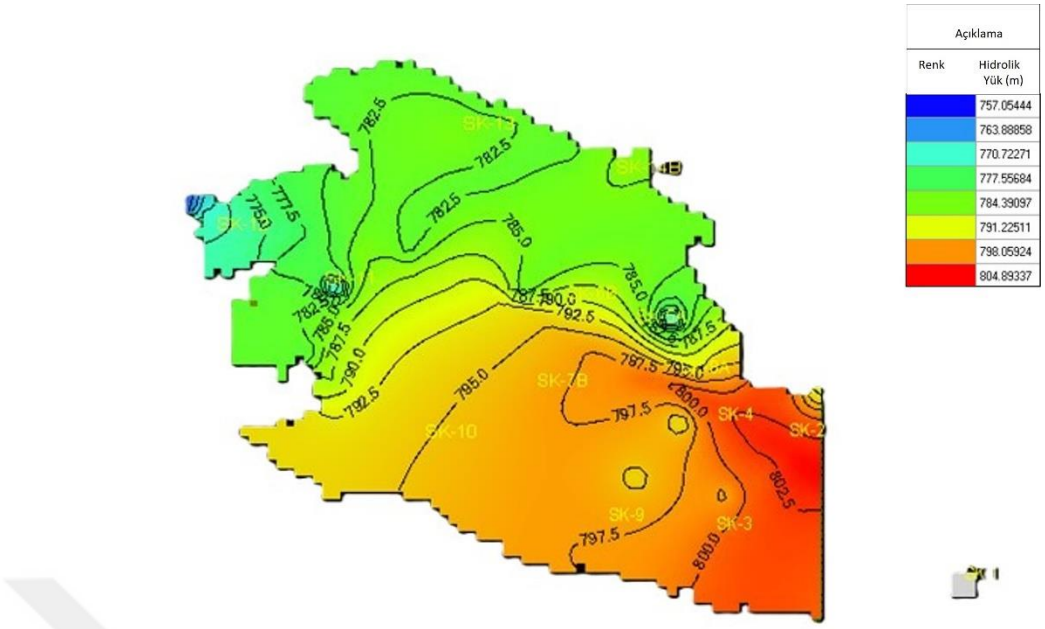
Şekil 3.15 Simav Ovasındaki yeraltısuyu bütçesinin grafiksel gösterimi

BÖLÜM DÖRT
YERALTI SUYU SEVİYE DEĞİŞİMLERİ

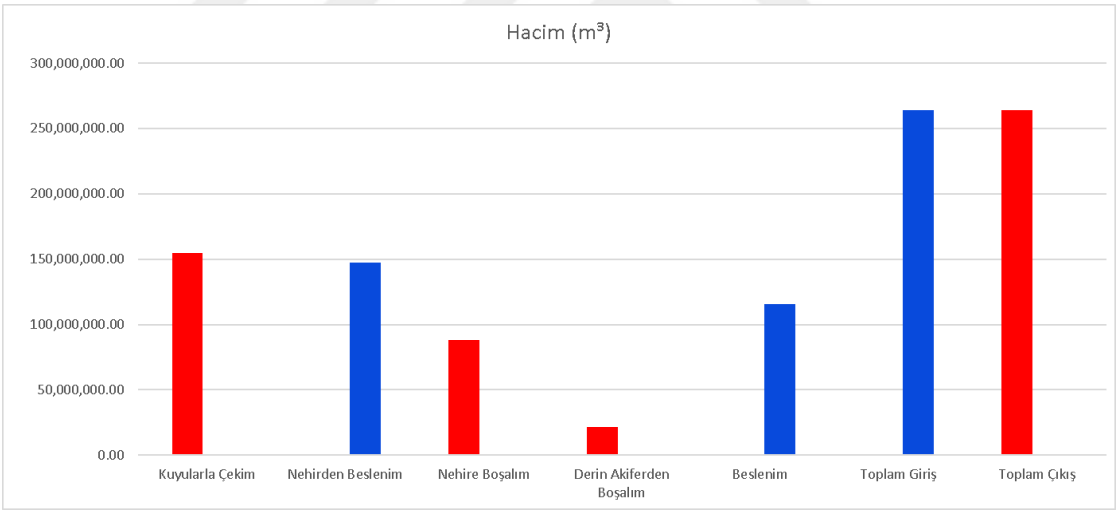
Yeraltısuyu akım modelleri zamansal olarak veya farklı baskı ve stres baskıları altında yeraltısuyu seviye değişimleri, akım yönleri değişimleri hakkında fikirler verir. Hidrojeolojik araştırmalarda yeraltısuyu beslenim, boşalım alanları, yüzey suyu yeraltısuyu etkileşimi, farklı akifer sistemindeki etkileşimler ve iklim senaryoları karşısında yeraltısuyu seviyelerinin tepkileri kolayca simüle edilmektedir (Enrico Barbier, 2002; Akar, 2021). Bu bölümde Simav Ovasında oluşturulan kararlı akım koşullarındaki yeraltısuyu modeli simülasyonun yapılmıştır. Simülasyon başlangıç zamanı olarak 2012 yılı baz alınmış ve model 20 yıllık süredeki yeraltısuyu seviye değişimi, beslenim miktarındaki %20 oranında azalma, pompaj çekimlerinde %20 artış ve jeotermal sistemden fay aracılığı ile alüvyon akifere yaptığı beslenim senaryolarına karşı yeraltısuyu seviyesinin tepkisi değerlendirilmiştir. Bu durum farklı akifer sistemleri arasındaki hidrolik yük değişimlerinde yeraltısuyu akım yönleri değişebilmekte, seviye düşümleri olması halinde ise nehirden yeraltısuyu boşalımları gerçekleşebilmektedir.

4.1 20 Yıllık Sürede Yeraltısuyu Bütçe Bileşenleri

Kararlı akım koşullarında oluşturulan model girdilerinde bir değişiklik yapılmadan 20 yıl süre ile simüle edilmiştir. 20 yıl içerisinde yeraltısuyu bütçe bileşenleri değerlendirilmiştir. Başlangıç zamanı olan 2012 yılından sonra 2032 yılına kadar simüle edilen yeraltısuyu seviye değişimlerine bakıldığında 775 ile 802 m arasında değiştiği, geçirimliliği düşün olan bölgede seviyelerde düşümlerin olduğu dikkati çekmektedir (Şekil 4.1). 20 yıllık simülasyonda 115,505,000 m^3'lük yeraltısuyu beslenimine karşın, 159,388,600 m^3'lük nehirden beslenim gerçekleşmiştir. Yeraltısuyu boşalımlarına bakıldığında ise en önemli parametreyi 154,584,600 m^3 ile kuyu çekimleri oluşturmuştur. Yeraltısuyundan nehre boşalım ise 79,401,870 m^3 ve derin akiferden boşalım ise 19,451,030 m^3 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.2). Yapılan modelde en önemli etkileşimin yeraltısuyu ile nehir etkileşimi olduğu, ovanın batı kesimlerinde yeraltısuyunu nehre boşalımı ile drene olduğu anlaşılmaktadır.



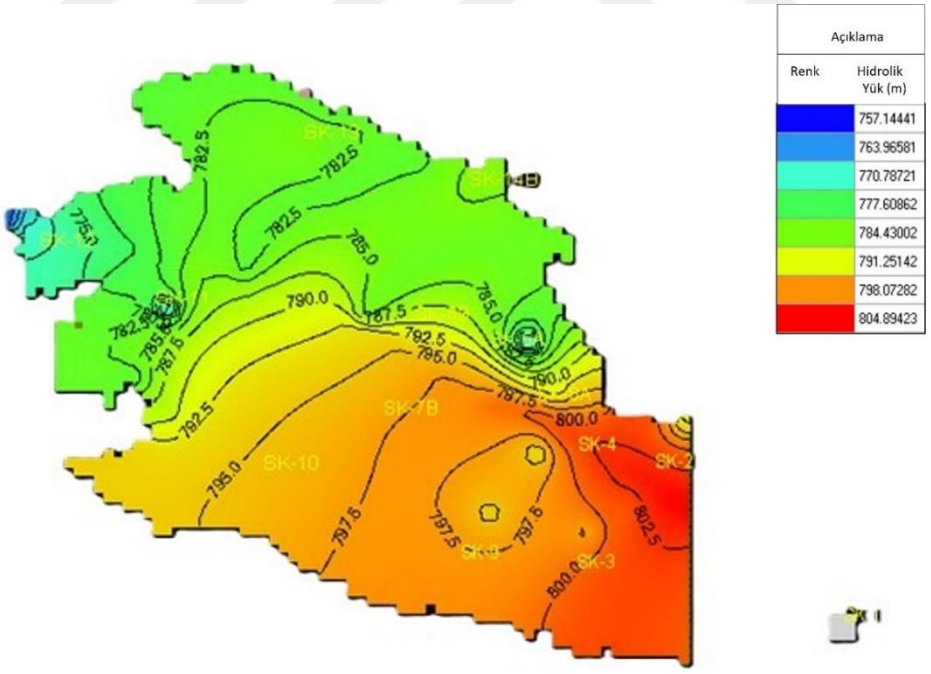
Şekil 4.1 20 yıllık simülasyon ile oluşan yeraltısuyu seviye değişimi



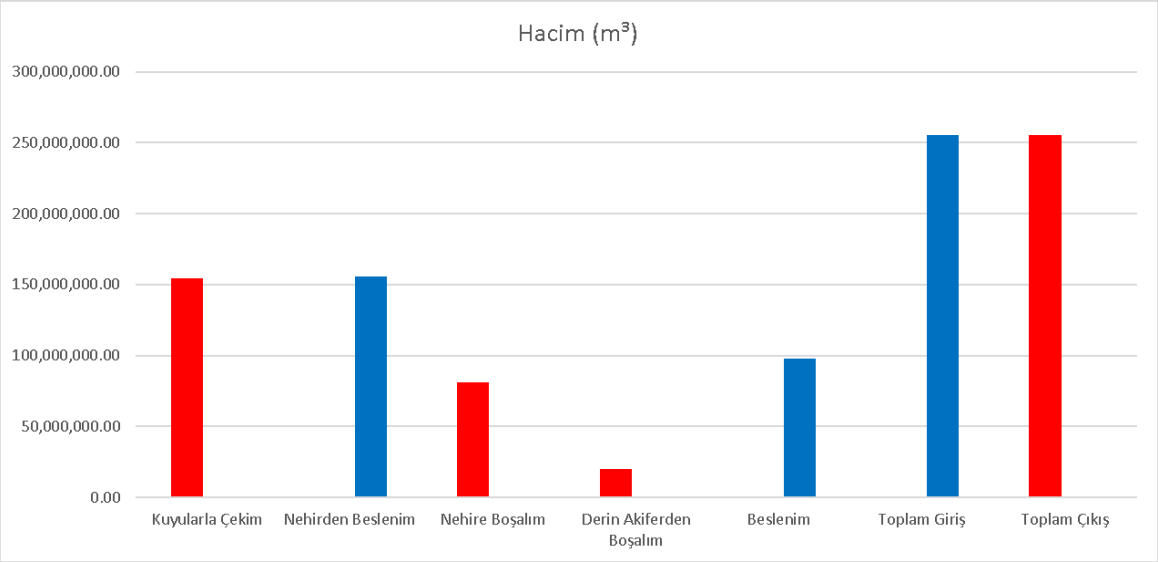
Şekil 4.2 20 yıl süre ile sistemde dolaşan su hacmi

4.2 Yeraltısuyu Beslenimindeki Değişim

Kuyulardan yapılan aşırı pompaj, akiferin beslenim alanlarının azaltılması, yağışlardaki azalma miktarları yeraltısuyu beslenimini azaltmakta, yeraltı su seviyelerinde ve yeraltısuyu depolanmasında önemli düşümlere neden olmaktadır. Simav Ovasında simülasyon süresi olan 20 yıl süre içerisinde bölgedeki yağışların azalmasına karşı yeraltısuyu seviye değişimleri simüle edilmiştir. Bunun için yağıştan beslenim değerleri %20 azaltılarak, Şekil 3.8'de beslenim alanları tanımlanan modelde, modele atanan 100 mm beslenim değeri %20 azaltılarak 80 mm, 50 mm olarak atanan beslenim değeri ise 40 mm olarak tanımlanmıştır. Diğer parametreler sabit tutularak çalıştırılan modelde elde edilen yeraltısuyu seviye dağılım haritası Şekil 4.3'te sunulmuştur. Seviye konturları 775 m ile 802 m arasında değişmektedir. Alanın kuzey kesimlerindeki geçirimliliği düşük alanlarda seviyelerde kısmen düşümler izlenmekte, pompa çekim alanlarında düşüm konileri oluşmaktadır. Yeraltısuyu beslenimin zamanla azalması yeraltısuyu seviyelerinde düşümlerin gerçekleşmesinde önemli bir etken olarak görülmektedir.



Şekil 4.3 Yeraltısuyu beslenim değerinin %20 oranında azaltılması durumunda ovadaki yeraltısuyu seviyesi



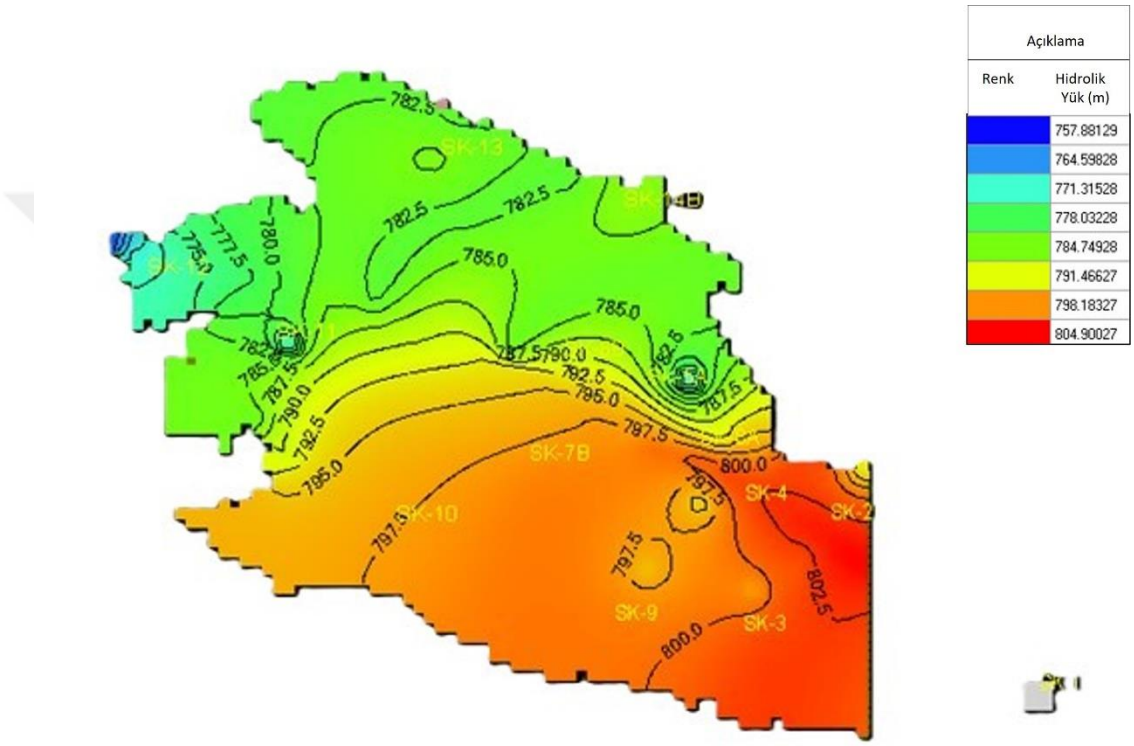
Şekil 4.4 Beslenim değerinin %20 azaltılması durumu

20 yıl süre ile simule edilen modelde akiferde dolaşan su miktarı 255,279,800 m^3'tür. Bu suyun 154,553,300 m^3'ü kuyular ile çekilmiştir. Nehirden yeraltısuyuna ise toplam 155,851,900 m^3 beslenim gerçekleşirken, nehrin batı kesiminden nehirden yeraltısuyuna 80,998,570 m^3'lük boşalım gerçekleşmektedir. Bununla birlikte 19,727,870 m^3 yeraltısuyu ise derin sistemlerle akiferden boşalmıştır. Toplam beslenim ise 97,819,440 m^3 olarak gerçekleşmiştir. Yağıştan beslenime ek olarak nehirden beslenimde önemli oranda katkı sağlamaktadır. Kararlı akım modeli olması nedeni ile nehirdeki su seviyesi sabit kabul etmiştir. Zamanla nehirdeki su seviyesinin azalması yeraltısuyu bütçe bileşenlerini etkileyecek bir parametre olarak görülmektedir.

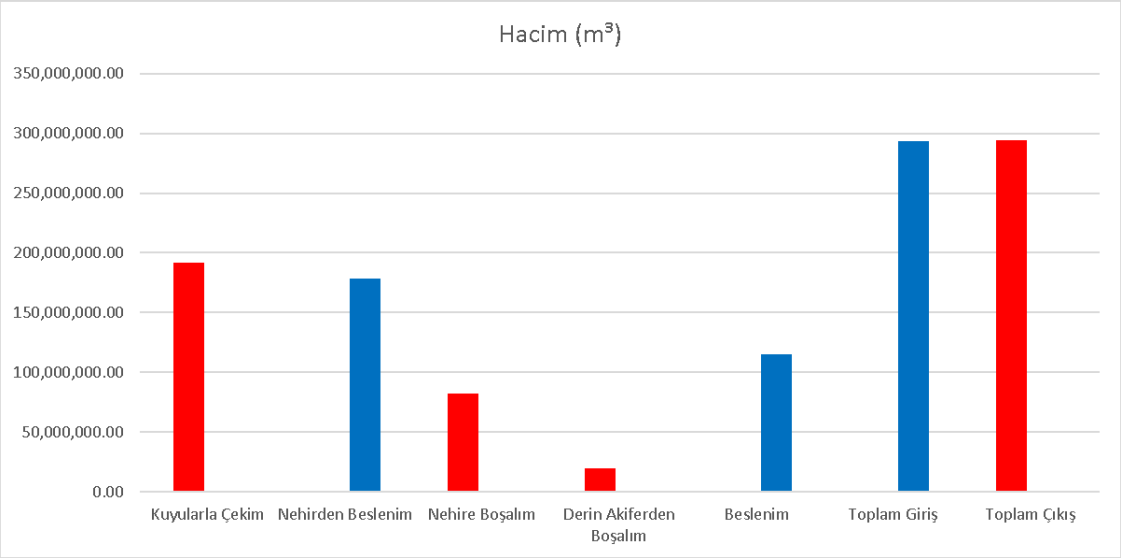
4.3 Çekimlerin Artması

Simav Ovasında nüfusun artması durumunda yeraltısuyu çekimleri artacaktır. Kuyu çekimlerinin belirlenmesi için yıllara göre artan nüfus oranına göre su çekimleri düzenlenmiştir. Bu düzenleme yukarıdaki bölümde ele alınmıştır. Havzada 20 yıllık zaman içerisinde kuyu çekimlerine göre yeraltısuyundaki değişimler simüle edilmiştir. Bunun için pompa çekim debisi %20 arttırılarak model çalıştırılmıştır. Yapılan simülasyona göre 2012 yılı ile 2032 yılları arasındaki yeraltısuyu kot dağılımları Şekil

4.5’te sunulmuştur. Yapılan zamansal değişim haritalarına göre su seviye kotlarında özellikle alanın doğu kesimlerinde kısmı değişiklikler izlenmiştir. Bu durum alanda benzer beslenme koşullarına göre yeraltısuyundan çekimlerin zamana bağlı olarak düşümüne neden olduğu anlaşılmaktadır. İleriki dönemlerde yağışlardaki değişimlerinde etkisi ile yeraltısuyu seviye değişimlerinde etkili olduğunu da vurgulamak gerekir.



Şekil 4.5 Çekim debisinin %20 oranında arttırılması durumunda oluşan seviye kotları



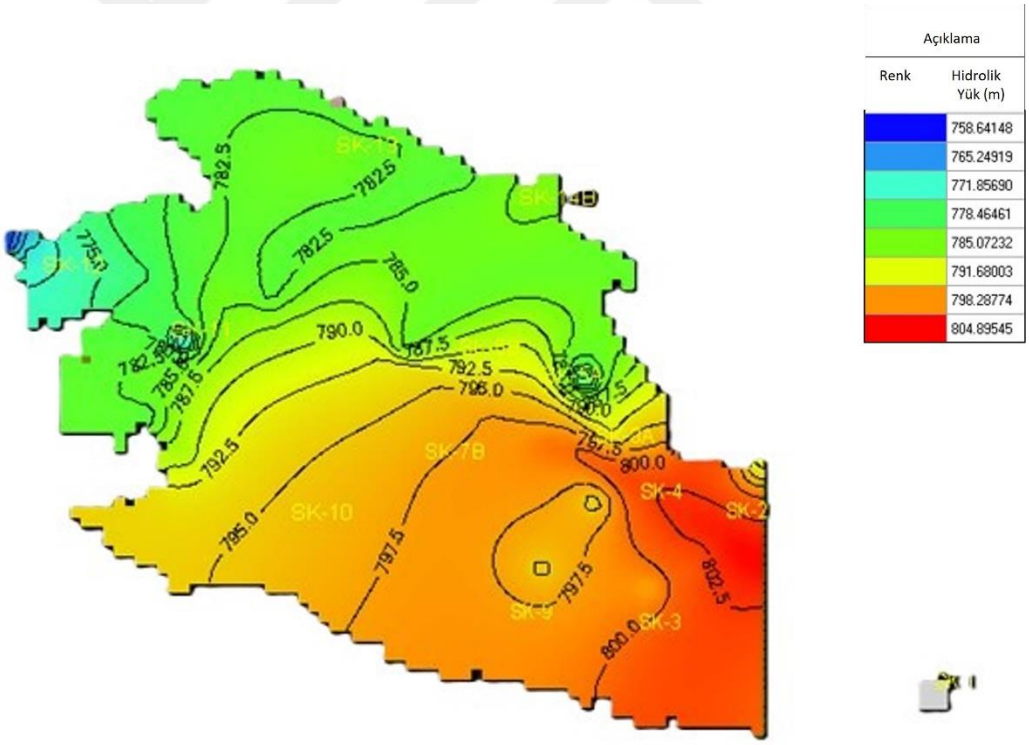
Şekil 4.6 Pompa çekimlerinin %20 arttırılması durumunda 20 yıllık simülasyon bütçesi

Simav Ovasında 20 yıl süre ile çekilen pompaj debisi %20 oranında arttırıldığında toplam çekim miktarı 191,810,000 m^3'tür. Beslenim miktarı 115,505,100 m^3 sabit tutulduğunda sistemde değişen su bileşenlerine bakıldığında, yeraltısuyunun nehre boşalımı 82,600,000 m^3, nehirden yeraltısuyu beslenimi ise 178,307,000 m^3 olarak gerçekleşmiştir. Derin akifer sisteminden boşalım ise 19,431,000 m^3 olarak hesaplanmıştır. Beslenim değerini sabit alıp çekim debisi arttırıldığında yeraltısuyunun nehirden beslenimi artmaktadır. Akifer sisteminde dolaşan su miktarında da artış gerçekleşmektedir. Bu durumda eğer ki akifere giren su miktarında bir değişiklik olmadığında takdirde, aşırı çekimler nedeni ile bölgede su seviyelerinde aşırı bir düşüş olması tahmin edilmektedir.

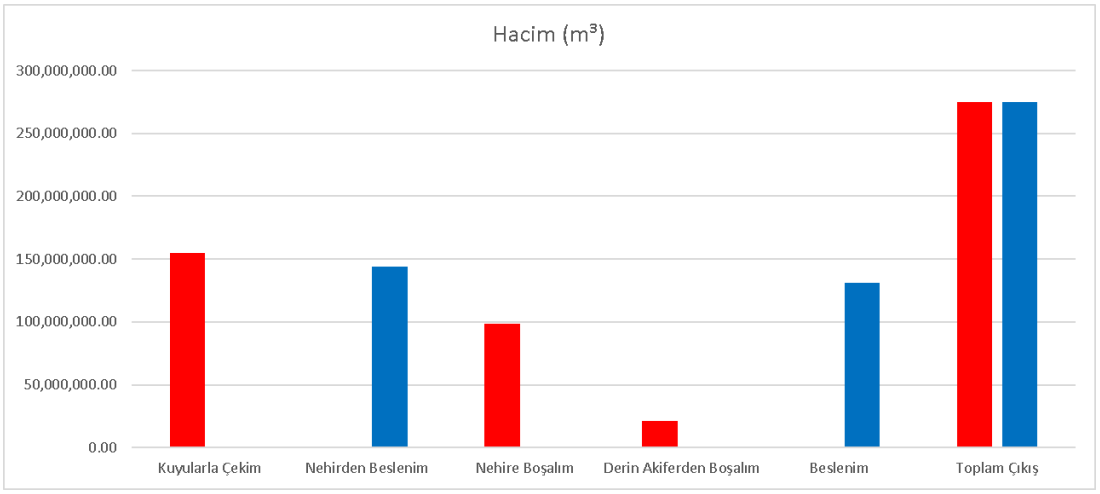
4.4 Akiferler Arası Yeraltı Suyu Etkileşimi

Simav Ovasında iki farklı akifer sistemi bulunmaktadır. Bunlardan birisi serbest akifer özelliğindeki alüvyon akifer diğeri ise jeotermal sistemin dolaşım yaptığı Kızılbük formasyonudur. Arada sınırlı bir alan kaplayan bazalt ise yayılımı ve kalınlığının sınırlı olması nedeni ile önemli bir etkileşim yaratmamaktadır. Yapılan yeraltısuyu akım modelinde her iki akifer sistemi arasındaki etkileşim değerlendirilmiştir. Bu etkileşim ancak bölgede sıcak su çıkışında etkili olan fay

sistemi içerisinde çıkan suyun serbest akifere karışma mekanizması şeklinde olduğu düşünülmektedir. Bunun için fay sisteminin çevresine bir beslenme zonu tanımlanmıştır. Beslenim alanı 5000 m uzunluğunda 5 m genişliğinde bir alanda jeotermal suyun alüvyon akifer tabanına doğu çıktığı ve buradan akifere karıştığı düşünülmektedir. Fay zonunun geçirimliliği $1.0x10^{-6}$ m/s ele alındığında fay zonundan yıllık 750000 m^3'lük bir jeotermal suyun akiferin tabanından sızdığı dikkate alınmıştır. Yeraltısuyu seviye konturlarında çok önemli değişiklik gözlenmemektedir (Şekil 4.7). Ancak sistemdeki değişen su miktarına bakıldığında 130,865,300 m^3'lük bir beslenim gerçekleşmektedir (Şekil 4.8). Yukarıda ele alınan beslenim miktarına göre 15,000,000 m^3'lük bir fazla beslenim gerçekleşmiştir. Bu miktarın jeotermal sistemden alüvyon akifere karıştığı farz edilmektedir. Beslenme miktarındaki artış yeraltısuyundan nehre boşalım değerini de arttırmıştır. Yeraltısuyunun nehre boşalımı 82,600,000 m^3'ten 98,311,600 m^3 yükselerek 12,000,000 m^3'lük bir artış gözlenmiştir.



Şekil 4.7 Jeotermal sistemden alüvyon akifere gerçekleşen sızıntı katkısı ile oluşan su kotları



Şekil 4.8 Jeotermal sistemden akifere sızıntı karışımı ile oluşan bütçe

BÖLÜM BEŞ
SONUÇ VE ÖNERİLER

Simav Ovasında D-B yönlü oluşan fay sistemleri tüm birimleri kesmiş ve bu fay sistemleri bölgede jeotermal sistemin oluşmasında etkili olmuştur. Eynal, Çitgöl ve Naşa jeotermal sahaları bölgede önemli sistemleri oluşturur. Çalışma alanı bir graben sistemi olup, graben alanın üzerinde sığ bir alüvyon akifer bulunmaktadır. Akifer sisteminin altında ise fay sistemleri ile kontrol edilen Simav jeotermal sistemi yer alır. Bölgede yeraltı suyu akiferi olan alüvyon ile akiferin tabanında bulunan temel kayalarından üretilen jeotermal sistemin etkileşiminin araştırılması oldukça önemlidir. Her iki sistemin karışması durumunda yeraltı suyunda sıcaklık artışı, jeotermal sistemde ise soğuma gibi etkiler gözlemek mümkündür.

Bölgede yayılım sunan Simav Ovası en önemli yeraltısuyu akiferini oluşturur. Bölgede tarımsal ve içme-kullanma suyu alüvyon akiferden sağlanmaktadır. Bu nedenle yeraltısuyu bölge ekonomisi için oldukça önemlidir. Bölgede yeraltısuyu kaynağı açısından en önemli baskı unsurlarını jeotermal su, yeraltısuyundan yapılan çekimler ve bölgede son zamanlarda yaşanan iklimsel değişikliklere bağlı olarak yeraltısuyu beslenimindeki azalmalar olarak görülmektedir. Bölgede yapılan çalışmalarda alüvyon akifer kalınlığı ortalama olarak 100 m'dir. Alüvyon akiferin tabanında ise Eynal ve Naşa bölgelerinde Naşa Bazaltı, diğer alanlarda ise Kızılbük Formasyonu yer alır. Jeotermal sistem ise Kızılbük formasyonu içerisindeki geçirimli zonlardan ve fay zonları boyunca dolaşım sağlar.

Simav Ovasında çoğunlukla jeotermal sistemin araştırılması ve yeraltısuyu kalitesinin belirlenmesine dönük çalışmalar yapılmıştır. Simav alüvyon akiferin beslenim ve boşalım bileşenlerinin belirlenmesi, bileşen parametrelerindeki değişimlerden bütçe değişikliği ve bu değişikliğin yeraltısuyu seviyesine etkisin değerlendirilmesi için kararlı akım koşullarında akım modeli kurgulanmıştır.

Bölgede daha önceki yıllarda araştırma amaçlı açılan sondaj kuyu verileri kullanılarak model kalibre edilmiştir. Yapılan modelde yüksek bir korelasyon katsayısı (r=0,97 üzerinde) elde edilmiş olup, sistem için oluşturulan modelin sistemi

temsil edecek özellikte olduğuna karar verilmiştir. Yapılan modelleme çalışmasında yeraltısuyu akımının yüzeysel akaçlama ile paralel olarak batı kesime doğru ve yüzeysel akaçlamaya paralel bir akış gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, bölgede yeraltısuyu yüzey suyu etkileşimi açısından ele alındığında yeraltısuyunun Simav Çayına boşalarak drene olduğu belirlenmiştir.

Kararlı akım koşullarında kurulan akım modeli, öncelikle yıllık simüle edilerek yeraltısuyu bütçesi belirlenmiştir. Simav Ovasında yıllık toplam bütçesi 13,212,060 m^3'tür. Bu suyun 5,775,255 m^3'ü yıllık ovaya düşen yağmur suyundan beslenim olarak gerçekleşmektedir. Simav Çayından yeraltısuyu beslenimi 4,408,089 m^3 olarak gerçekleşmektedir. Ancak akiferden çıkan su miktarına bakıldığında en önemli yeraltısuyu boşalım mekanizması yeraltısuyunun nehre boşalımı ile gerçekleşmektedir. Bu oran ise yıllık 7,357,381 m^3 olarak gerçekleşmektedir. Ovadan yıllık yeraltısuyu çekim miktarı ise 7,727,667 m^3 olup içme suyu olarak kullanılmaktadır. Havzada ise 1,076,304 m^3 su ise derin akiferden boşalım olarak gerçekleşmektedir. Simav Çayı ise ovanın üst kesiminde yeraltısuyunu beslemekte, orta kesim ve batıya doğru ise yeraltısuyu Simav Çayını beslemekte ve buradan boşalım yapmaktadır.

Model bölgede baskı unsurlarını oluşturan yağıştan beslenim azalması durumuna karşılık beslenim miktarının %20 azaltılarak 20 yıl süre ile simüle edilmiştir. Akiferde 20 yıl boyunca dolaşan su miktarı 255,279,800 m^3 olup bu suyun %61'i kuyular vasıtası ile çekilmekte, %31'i ise yüzey suyuna boşalmak, %8'i ise derin akifer sistemi ile boşalmaktadır. Yeraltısuyu besleniminin %62 Simav Çayından süzülen sulardan %38'i ise yağış sularından beslenmektedir. Yağışların azalmasına bağlı olarak beslenimdeki azalma durumun simülasyonunda başlangıç durumuna göre karşılaştırıldığında nehirden beslenim miktarının artığı görülmektedir. Diğer bir baskı unsuru ise yeraltısuyundan yapılan çekimlerde meydana gelen artışların etkisidir. Bu durumda tim değişkenler sabit tutularak pompa debisi %20 arttırılmıştır. 20 yıl süre ile simüle edilen modelde yeraltısuyu bütçesinde yeraltısuyu çekimleri önemli oranda artmıştır. Sistemden çekilen su miktarının artması ile nehirden beslenim miktarı da artmıştır. Bu durumda eğer ki akifere giren su miktarında bir değişiklik olmadığı

takdirde, aşırı çekimler nedeni ile bölgede su seviyelerinde aşırı bir düşüş olması tahmin edilmektedir.

Son olarak bölgedeki jeotermal suyun fay zonu boyunca çıkarak alüvyon akifere sızması durumunda akiferdeki su miktarında artış olacaktır. Bu durumu simüle etmek için fay zonu boyunca gelebilecek su miktarı belirlenmiştir. Yıllık 750,000 m3'lük jeotermal su katkısı 20 yıl boyunca simüle edildiğinde beslenim değerinde 15,000,000 m3'lük beslenimde artış sağlamıştır. Diğer değişkenler sabit tutulduğunda, yeraltısuyu seviyesinde artış sağlandığından, yeraltısuyundan nehre boşalım değerini arttırmıştır. Yeraltısuyunun nehre boşalımı 82,600,000 m^3'ten 98,311,600 m^3 yükselerek 12,000,000 m^3'lük bir artış gerçekleşmiştir.

Simav Ovasında yapılan yeraltısuyu akım modelinde Simav Ovasındaki baskı unsurları 20 yıl süre ile simüle edildiğinde, bütçe kalemlerinde gerçekleşen değişiklikler ve yeraltısuyu seviye değişimleri değerlendirilmiştir. Kararlı akım koşullarında çalıştırılan modelde, bölgede aşırı çekim olması durumunda yeraltısuyunun nehirden beslenimi artmaktadır. Bu durum doğrudan nehirdeki suyun akışına bağlıdır. Zamanla nehirdeki akışın azalması ve kesilmesi durumunda yeterli beslenim karşılanmayacağından yeraltısuyu seviyelerinde düşüşler gerçekleşecektir. Aynı şekilde zamanla yeraltısuyu beslenimin azalması da aynı durum söz konusudur. Ancak, jeotermal suyun akifere karışması miktar açısından olumlu görülse de, kalite açısından önemli riskler barındırmaktadır. Özellikle jeotermal sulardaki toksik elementlerin içme ve sulama suyu olarak kullanılan su kaynağına karışması zamanla kirlenmelerine neden olacaktır.

Diğer bir husus ise Simav Ovasında yeraltısuyu ile yüzey suyu önemli bir etkileşimde oldukları model çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Ancak bölgede yapılan çalışmalarda, jeotermal üretimi yapılan sıcak suların enjeksiyon yapılmadan Simav çayına boşaltıldığı belirtilmektedir. Bu durumda yeraltısuyunu beslenen bir sistem içerisinde olan yüzey suyu ile dorudan yeraltısuyu kirlenmesine neden olabilecek bir uygulamadır. Bunun için jeotermal suların rezervuara enjekte edilmesi önem taşımaktadır.

Yapılan farklı senaryo simülasyonlarında yeraltısuyu seviyelerinde değişimler izlenmiştir. Bu seviye değişimleri özellikle geçirimliliği düşük kuzeybatı kesimlerdeki bölgelerde ve kuyu çekimlerinin yapıldığı alanlarda gözlenmektedir. Ele alınan senaryolar günümüzde yeraltısuyu seviyelerinde önemli baskı oluşturan senaryolardır. Bu simülasyonların bu tür akiferlerde zamana bağlı olarak ve kararsız akım koşullarında yapılmalarında yarar bulunmaktadır. Bunun için tüm su havzalarında çekimlerin belirlenmesine dönük ölçüm sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Özellikle akiferden çekimlerin belirlenmesi için gerekli verilerin olması hidrojeolojik çalışmalarda önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Aynı şekilde yeraltısuyu beslenim miktarı da bütçe çalışmalarında en önemli bileşenlerden birini oluşturmaktadır.

Bu çalışma sonuçlarından biri olarak, Simav Ovasında yapılan model çalışmasından özellikler akiferi temsil eden verilerin sınırlı olması, gözlem ağının zamana bağlı olmaması gibi nedenler çalışma ve model çıktılarını önemli oranda etkilemektedir. Bunun için gelinen noktada, tüm havzalarda yeraltısuyu bütçe ve miktar açısından değerlendirmelerde bulunmak için model çalışmalarında ihtiyaç bulunmaktadır. Model çalışmalarına dönük verilerin oluşturulması için şimdiden su ile ilgili otoritelerin çalışma yapmalarında yarar bulunmaktadır.

KAYNAKÇA

Aghahosseini, A., Breyer, C. (2020). From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential, Applied Energy, 279,115769, ISSN 0306-2619.

Akan B., (2002). "Jeotermal Sistemlerde ısı taşınımının modellenmesi" , Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 26, (2).

Akan, B., (2022). Jeotermal Sistemlerde Modelleme Yaklaşımı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi, Ankara

Akar, A. T., vd. (2021). "Numerical Modeling Of Fluid Flow And Heat Transfer İn Kurşunlu Geothermal Field-KGF (Salihli, Manisa/Turkey), Turkish Journol of Earth Sciences, Cilt: 30, Sayı: 2, syf. 9.

Aksoy,N., Şimşek, C., Gündüz, O. (2009). Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: A case study of Balcova, Turkey, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 103, Issues 1–2: 13-28

Al-Hashmi, S., Gunawardhana, L., Sana, A. *et al.* Application of groundwater flow model in assessing aquifer layers interaction in arid catchment area. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17, 4577–4588 (2020). https://doi.org/10.1007/s13762-020-02805-x

Ateş, Ö., Tutkun, S. Z. (2014) "Simav(Kütahya) depremlerinin jeotermal sistemlerdeki hidrokimyasal değişimleri" Türkiye Jeoloji Bülteni, Cilt: 57, Sayı 3.

Atilla A., (2002). "Afyon ovası yeraltı suyu akım modeli", Jeoloji mühendisliği dergisi, Ankara, 26, (2).

Baba, A., Sozbilir, H. (2012). Source of arsenic based on geological and hydrogeochemical properties of geothermal systems in Western Turkey. Chemical Geology. 334. 364–377. 10.1016/j.chemgeo.2012.06.006

Bakraç, S., (2022). “Jeotermal kuyu testleri ve MTA uygulamaları”, Cilt: 33, 61-68.

Barbier, E., (2002). “Geothermal energy technology and current status: an overview”, Cilt: 6, Sayı: 1-2, Sayfa 3-65.

Bedekar V., Morway E. D., Langevin C. D. & Tonkin M. 2016 MT3D-USGS version 1: A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A53, 69 p. http://dx.doi.org/10.3133/tm6A53.

Blank, L., Rioseco, E. M., Caiazzo. A., Wilbrandt., U. (2020). Modeling, simulation, and optimization of geothermal energy production from hot sedimentary aquifers, Computational Geosciences (2021) 25:67–104, https://doi.org/10.1007/s10596-020-09989-8

Boyraz, vd.., (2018). “Nehir-Akifer etkileşimleri Visual Modflow ile modellenmesi”, Su kaynakları, 3, (2), 8-13.

Burçak, M., Sevim, F., Hacısalihoğlu, Ö. (2007). Jeolojik, Jeofiziksel ve Jeokimyasal Yöntemlerle Yeni Bir Jeotermal Sahanın Keşfedilmesi, Üçbaş-Şaphane-Kütahya, MTA Dergisi, 135, 45-64.

Chen, Chao-Shi, Chia-Huei Tu, Shih-Jen Chen, and Cheng-Chung Chen. 2016. "Simulation of Groundwater Contaminant Transport at a Decommissioned Landfill Site—A Case Study, Tainan City, Taiwan" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13, no. 5: 467. https://doi.org/10.3390/ijerph13050467

Clayton, M. H., Borden R. C. (2009). Numerical Modeling of Emulsified Oil Distribution in Heterogeneous Aquifers, https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00531.x

Doğdu, N. (2022). Jeotermal Kaynak Aramalarında Hidrojeoloji Çalışmaları, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi, Ankara

Doherty, J. (2004) PEST model-independent parameter estimation users manual. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia

DSİ (2014). Gediz Havzası Hidrojeolojik Etüt Raporu. Tarım ve Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara

DSİ (2024). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. http://www.dsi.gov.tr/

Erdogmus, B., Toksoy, M., Özerdem, B., Aksoy, N. (2006). Economic assessment of geothermal district heating systems: a case study of Balçova-Narlidere, Turkey. Energy Build., 38, (1053-1059).

Fridleifsson, I. B., (2001). "Geothermal energy for the benefit of the people", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Sayı: 5, 299-312.

Gemici, Ü. ve Tarcan, G. (2002). "Hydrogeochemistry Of The Simav Geothermal Field Western Anatolia (Turkey), Journal of Working And Geothermal Research, Cilt: 116, 215-233.

Gemici, Ü., Tarcan, G. ve Aksoy, N. (2005). Hydrogeological And Geochemical Assesment of The Gediz Graben Geothermal Areas, Western Anatolia (Turkey), Environ Geol, Cilt: 47, 523-534. DOI 10.1007/s00254-004-1174-1

Goswami, S., Rai, A.K. (2024). Groundwater and hot-spring interactions around Bakreswar geothermal spring. Sustain. Water Resour. Manag. 10, 44. https://doi.org/10.1007/s40899-023-01012-z

Gündüz, O., Mutlu, M., Elçi, A., Şimşek, C., Baba, A. (2012) "Jeotermal Akışkan Deşarjının Yüzeysel Su Kalitesine Etkisi: Örnek Saha Simav Ovası (Kütahya)" Çevre& Bilim Teknoloji Dergisi, Cilt:3, Sayı:4, 231-246.

Gündüz, O., Şimşek, C. ve Hasözbek, A., (2010) "Arsenic Pollution in the Groundwater of Simav Plain, Turkey: Its Impact on Water Quality and Human Health", Springer Science +Business Media, Cilt: 205, 43-62. DOI 10.1007/s11270-009-0055-3

Gündüz, O vd. (2010). Proje 2. Gelişme Raporu. 109Y029 no'lu TÜBİTAK Projesi, İzmir.

Gündüz, O., Şimşek, C. (2011). Influence of Climate Change on Shallow Groundwater Resources: The Link Between Precipitation and Groundwater Levels in Alluvial Systems" Climate Change and its Effects on Water Resources, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security 3.

Harbaugh W. (2005). "Modflow-2005, The U.S. geological survey modular ground-water model-the ground water flow process", U.S. Geological Survey Tecniques and Methods".

Hariharan, V., Uma Shankar M. (2017). A review of visual MODFLOW applications in groundwater modelling, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 263, 032025 doi:10.1088/1757-899X/263/3/032025

IEA, 2018. International Energy Agency. Market Report Series: Renewables 2018. Paris: IEA Yayınlanma; 2018. https://webstore.iea.org/market-report-series-renewables-2018.

Karadaş, D., Elçi, A., Şimşek, C., Gündüz, O., Kazanasmaz., E. (2007). İzmir Tahtalı Çayı Havzasında Mevsimsel Yeraltı suyu Düşümünün Matematiksel Modelleme ile Belirlenmesi, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası.

Kessasra, F., Benabes,D., Seraoui, S., Houda Chetibi, N.E., Mesbah, M., Khaled-Khodja, S., Foughalia, A. (2021). Groundwater flow and chloride transport modeling of the alluvial aquifer of lower Soummam Valley, Béjaia, North-East of Algeria, Journal of African Earth Sciences, Cilt 173: 104023.

Kirubakaran, M., Johnny, J. C., Samson, S. (2018). MODFLOW Based Groundwater Budgeting Using GIS: A Case Study from Tirunelveli Taluk, Tirunelveli District, Tamil Nadu, India, Journal of the Indian Society of Remote Sensing (Mayıs 2018) 46(5):783–792.

Loredo, C., Roqueñí, N., Ordóñez, A. (2016). Modelling flowand heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review, International Journal of Coal Geology 164 (2016) 115–122.

Lund J. W., Freeston Derek H. (2001). "World-wide direct uses of geothermal energy 2000", Cilt: 30, Sayı: 1, 29-68.

McDonald, M.G. ve Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, kitap 6, bölüm A1, 586 p.

Mertoglu , O. , Canlan , A. , Bakir , N. , Dokuz , I. ve Kaya , T. (2000). Geothermal direct use applications in Turkey: Technology and economics . Proceedings of the World Geothermal Congress . 28 Mayıs – 10 Haziran , Kyushu, Tohoku, Japan. (3505 – 3510) .

Mertoğlu, O. (2001). Türkiye'de Jeotermal Enerji Uygulamaları ve Gelişimi, Yerel Yönetimlerde Jeotermal Enerji ve Jeoteknik Uygulamalar Sempozyumu Sayfa: 1-9, Ankara.

Oygur, V., Erler, A. (2000). “Simav grabeninin metalojenisi (İç-Batı Anadolu, Turkiye)” Türkiye Jeoloji Bülteni, Cilt: 43, No:1.

Pujol, M., Bolton, G., Golfier, F., “Flow and heat modelling of a Hot Sedimentary Aquifer (HSA) for direct-use geothermal heat production in the Perth urban area, Western Australia (WA)”.

Rabet, R. S., Şimşek, C., Baba, A., and Murathan, A. (2017). Blowout mechanism of Alasehir (Turkey) geothermal field and its effects on groundwater chemistry. Environmental Earth Sciences, 76(1). doi:10.1007/s12665-016-6334-6

Rudakov, D., İnkin O. 2022. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Kasım 2022, Cilt 2022.

Satman, A., Onur, M., Sarak, H. (2005). Jeotermal Rezervuarların Modellenmesi, Jeotermal Enerji Semineri.

Serpen, U., Palabıyık, Y., (2008). “Geochemical assessment of Simav geothermal field, Turkey”, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Cilt: 25, Sayı: 3, 408-425.

Serpen, U., Aksoy, N., Öngür, T., Korkmaz, E. D. (2009). Geothermal energy in Turkey: 2008 update, Geothermics, 38, 227-237.

Simav Nüfus Artışı, (7 Mayıs 2024), in Wikipedia, https://tr.wikipedia.org/.

Singh, S.K, Garg, S. (2016). Modeling of arsenic transport in groundwater using MODFLOW: a case study. International Journal of Geomatics and Geosciences. 6:4

Şimşek C, Demirkesen A.C., Baba A., Kumanlıoğlu A., Durukan S., Aksoy N, Demirkıran Z, Hasözbek A, Murathan A., Tayfur G., 2020. Estimation groundwater total recharge and discharge using GIS-integrated water level fluctuation method: a case study from the

Alaşehir alluvial aquifer Western Anatolia, Turkey, Arabian Journal of Geosciences, 2020: 13/143

Sowizdzal, A. (2010). "Assessment of Geothermal Water and Energy Resources of Lower Jurassic Formations in the NW Part of Polish Lowland (Szczecin Trough)", Proceedings World Geothermal Congress.

SYGM (2015). Yeraltısuyu Kütlelerinin Belirlenmesi, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü Rehber Dökümanı, Ankara

TUİK (2022). Türk İstatistik Kurumu, Ankara

Unsal, B., Hasan, Y. (2014). Investigation of sustainable development potential for Ulubey Aquifer System, Turkey, Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions Proceedings of ICWRS2014, Bologna, Italy, (IAHS Yayın 364, 2014).

Unyi, Z. (2016). "Geothermal Reservoir Model of Dombóvár Area, Sw-Hungary", Sayı: 40.

http://www.thinkgeoenergy.com/global-geothermal-power-generation-capacity-reaches-14600-mw-at-year-end-2018/ (Erişim tarihi 24 Haziran, 2019).