

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**KÜTAHYA OVASI SIĞ AKİFERİNİN YERALTI SUYU AKIM
MODELLEMESİ**

Berihu Abadi BERHE

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2016**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Berihu Abadi BERHE tarafından hazırlanan “KÜTAHYA OVASI SIĞ AKİFERİNİN YERALTI SUYU AKIM MODELLEMESİ” adlı tez çalışması 15/04/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mehmet ÇELİK
Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı



Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Mehmet Zeki ÇAMUR
ÖDTÜ Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Mehmet ÇELİK
Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Kamil KAYABALI
Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Doç. Dr. Mustafa FENER
Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdür V.

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

15/04/2016

Berihu Abadi BERHE

ÖZET

Doktora Tezi

KÜTAHYA OVASI SIĞ AKİFERİNİN YERALTI SUYU AKIM MODELLEMESİ

Berihu Abadi BERHE

Ankara Üniversitesi
Fenbilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ÇELİK

Kütahya Ovası içme, tarımsal ve endüstriyel su temininin yoğun olarak yeraltı sularına bağlı olduğu ovalardan biri olup, 93 km²'lik bir alandır. Çalışma alanındaki doğal drenaj, sürekli akan Felent ve Porsuk çayları tarafından yapılmaktadır. Yüzey ve yeraltı sularında yapılan hidrokimyasal değerlendirmeye göre iyonların göreceli bollukları; katyonlar için $Ca^{+2} > Mg^{+2} > (Na^{+} + K^{+})$, anyonlar için ise $HCO_3^{-} > SO_4^{-2} > Cl^{-}$ şeklindedir. Bölgede yüzey ve yeraltı suyunun ana iyon kimyasına bağlı olarak beş hidrokimyasal fasiyes belirlenmiştir. Bununla birlikte çalışma alanındaki baskın su tipi Aralık 2013 ve Haziran 2014 dönemlerinde Ca-Mg/Mg-Ca-HCO₃'tür. Tez alanındaki sular kalsit, aragonit ve dolomit minerallerine doymuş, anhidrit, jips, florit ve halit minerallerine ise doymuş değildir. Model alanı Kütahya Ovasının 83 km²'lik kısmını kapsamaktadır. Kütahya Ovası'nda mevcut veriler kullanılarak alüvyon akifer sistemine ait kavramsal hidrojeolojik modeli belirlenerek siğ akiferin 2-boyutlu yeraltı suyu sayısal akım modellemesinde kullanılmıştır. Model kalibrasyonu deneme yanılma yöntemi ile yapılmıştır. Hidrolik iletkenlik, beslenme değerleri ve akarsu taban çökellerinin geçirimsizliği ovada hidrolik seviye değerlerinin kalibrasyonu amacıyla kullanılmıştır. Model sonuçlarına göre yeraltı suyu seviye haritası hazırlanmıştır. Model su bütçesi sonuçlarına göre alüvyon akifere giren suyun %64,7'si Emet ve Parmakören Formasyonları Genel Yük Sınırından gelmektedir. Geriye kalan beslenme miktarı ise eşit yaklaşık miktarlarda akarsu ve yağıştan kaynaklanmaktadır. Modelin hassasiyeti, kalibre edilen değerler $\pm 20\%$, $\pm 40\%$ ve $\pm 60\%$ oranlarında değiştirilerek ve model çalıştırılarak RMSE, MAE ve ME hataları ile yorumlanmıştır. Yeraltı suyu yükleri beslenmenin hem artışına hem de azalışına karşı; hidrolik iletkenlik azalmaya karşı daha çok, artmaya karşı daha az; dere sedimanı iletkenliğinin ise azalışa karşı daha hassas olduğu görülmüştür.

Nisan 2016, 204 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kütahya Ovası, yeraltı suyu akım modeli, MODFLOW, kavramsal hidrojeolojik model, yeraltı suyu kimyası

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

GROUNDWATER FLOW MODELING OF SHALLOW AQUIFER IN KÜTAHYA PLAIN

Berihu Abadi BERHE

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ÇELİK

The Kütahya Plain, which covers total area of 93 km², is one of the plains in Kütahya where drinking, agricultural and industrial water supplies are highly dependent on groundwater resources. The natural surface drainage within the study area is generally towards the two dominant and perennial rivers: Felent and Porsuk Rivers. Assessment of hydrochemical results of surface and groundwater shows that the relative abundance of major ions (meq/l) for most of the water samples were $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ for cations and $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ for anions. Five hydrochemical facies have been identified based on the major ion chemistry of the surface and groundwater of this area. However, based on hydrochemical facies, the type of water that predominates in the study area is Ca-Mg/Mg-Ca-HCO₃ type in both December 2013 and June 2014. Waters in the thesis area were saturated with respect to calcite, aragonite and dolomite. However, they were under-saturated with respect to anhydrite, gypsum and fluorite minerals. Modeling area covers 83 km² from the total area of Kütahya Plain. Based on the available data in the Kütahya Plain hydrogeological conceptual model and a two-dimensional numerical groundwater flow model of the shallow alluvial aquifer system was developed. Calibration of the model was performed through trial-and-error method. Hydraulic conductivity, recharge and riverbed conductance were used to calibrate the groundwater heads of the plain. Groundwater head map were produced based on modeling results. Water balance of the model shown that 64.7 % of the input groundwater came from Emet and Parmakören Formations through General Head Boundaries. The remaining amount of water was recharged from rivers and precipitation in equal amounts. The sensitivity of the model was performed by changing the calibrated values of each parameter by ± 20 , ± 40 and $\pm 60\%$ and was evaluated using the results of RMSE, MAE and ME after running model. Results shows that recharge is sensitive to both increasing and decreasing, hydraulic conductivity is more sensitive to a decrease than to increase and riverbed conductance is more sensitive to decrease.

April 2016, 204 pages

Key Words: Kütahya Plain, groundwater flow modelling, MODFLOW, conceptual hydrogeological model, groundwater chemistry

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın her aşamasında değerli görüş ve katkıları ile beni destekleyen ve yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet ÇELİK'e (Ankara Üniv. Jeoloji Müh. ABD) teşekkürlerimi ve en derin saygılarımı sunarım.

Tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mehmet Zeki ÇAMUR'a (ÖDTÜ Üniv. Jeoloji Müh. ABD) ve Prof. Dr. Kamil KAYABALI'ya (Ankara Üniv. Jeoloji Müh. ABD) değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez jüri üyeleri olarak tez çalışmasının şekillenmesine katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Mustafa FENER'e (Ankara Üniv. Jeoloji Müh. ABD) ve Sayın Prof. Dr. Nail ÜNSAL'a (Gazi Üni. İnşaat Müh. Bölümü) teşekkür ederim.

Başta arazi çalışmalarım ve tez yazma sırasında yardımını esirgemeyen yakın ilgi ve desteklerinden dolayı Sayın Araş. Gör. Dr. Uğur Erdem DOKUZ'a (Niğde Üni. Jeoloji Müh. Uygulamalı jeoloji, ABD), tez yazım çalışması sırasında yardımcı olan Araş. Gör. Süleyman Selim Çallı'ya (Ankara Üniv. Jeoloji Müh. ABD) ve tezimde modelleme yapmak için kullandığım GMS programını benimle paylaşan uzman Dr. Şebnem ARSLAN'a (Ankara Üniv. Jeoloji Müh. ABD) içimden çok teşekkür ederim.

Arazi çalışmaları sırasında yardımcı olan Sayın Erdinç Ayküz AKUSBA'ya (Kütahya Belediyesi yeraltı sular idaresi) ve Sayın Turgay ESER'e (Eskişehir DSİ) teşekkür ederim. Çalışma sırasında verilerin elde edilmesinde yardımcı olan Sayın Cengiz SAĞNAK'a (Ankara DSİ, Jeoteknik hizmetleri ve yeraltı suları) teşekkür ederim.

Doktora süresince verdikleri burs desteklerinden dolayı TÜBİTAK ve Türkiye Çevre Kuruma Vakfı'na teşekkür ediyorum. Bu tez çalışması, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri koordinatörlüğüne, 13L4343002'nolu proje kapsamında yaptıkları destekten dolayı içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tüm yaşantım boyunca, bana her zaman sevgileriyle beraber moral, şevk ve gayret veren, bir çok fedakarlığa katlanarak beni bu günlere getiren ve sürekli destekleyen değerli AİLEM'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Berihu Abadi BERHE
Ankara, Nisan 2016

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	2
2. ÇALIŞMA ALANININ KONUMU.....	4
2.1 Yerleşim Yeri ve Ulaşım.....	4
2.2 Topoğrafya.....	6
2.3 Arazi Kullanımı.....	9
2.4 Toprak Tipleri.....	10
2.4.1 Hidrolojik toprak grupları.....	11
2.5 Su Kullanımı.....	14
2.6 Ekonomik Durum.....	14
2.7 İklim Koşulları.....	15
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	16
3.1 Çalışma Alanı İle İlgili Önceki Çalışmalar.....	16
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	20
4.1 Arazi Çalışmaları.....	20
4.2 Laboratuvar Çalışmaları.....	21
4.3 Büro Çalışmaları.....	21
5. JEOLojİ ÇALIŞMALARI.....	24
5.1 Stratigrafi.....	24
5.1.1 Sarıcaşı Formasyonu.....	28
5.1.2 Arıkaya Formasyonu.....	30
5.1.3 Çöğürler Karmaşığı.....	31

5.1.4 Sabuncupınarı Formasyonu.....	35
5.1.5 Emet Formasyonu.....	36
5.1.6 Parmakören Formasyonu.....	39
5.1.7 Alüvyon.....	40
5.2 Yapısal Jeoloji.....	41
6. HİDROMETEOROLOJİ.....	44
6.1 Yağış ve Sıcaklık.....	44
6.2 Buharlaşma ve Terleme.....	48
6.2.1 Turc yöntemi.....	48
6.2.2 Thornthwaite yöntemi.....	51
6.2.3 Penman yöntemi.....	53
7. HİDROLOJİ.....	60
7.1 Akarsular.....	60
7.1.1 Felent ve Porsuk Çayların tabanının hidrolik özellikleri.....	63
7.2 Kaynaklar.....	67
7.3 Barajlar.....	67
8. HİDROJEOLJİ ÇALIŞMALARI.....	69
8.1 Kuyular.....	69
8.1.1 Sondaj kuyuları.....	69
8.1.2 Sığ kuyular.....	70
8.2 Jeolojik Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri.....	75
8.2.1 Geçirimli birimler.....	77
8.2.2 Yarı geçirimli birimler.....	78
8.2.3 Geçirimsiz birimler.....	78
8.3 Akifer Oluşuklar.....	80
8.3.1 Alüvyon akifer.....	90
8.3.2 Parmakören Formasyonu akiferi.....	93
8.3.3 Emet Formasyonu akiferi.....	93
8.3.4 Sabuncupınarı Formasyonu akiferi.....	93
9. HİDROJEOKİMYASAL ÇALIŞMALAR.....	97
9.1 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	103
9.1.1 Piper ve Schoeller diyagramları.....	104

9.1.2 Doygunluk indisi (SI)	110
9.1.3 İyon değişimi.....	115
9.2 Çevresel İzotop Çalışmaları.....	116
9.2.1 Duraylı izotop ($\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$) incelemeleri.....	117
9.2.2 Duraysız izotop (Tritiyum, ^3H) incelemeleri.....	120
10. YERALTI SUYU AKIM MODELİNİN OLUŞTURULMASI.....	123
10.1 Modelin Amacı.....	126
10.2 Kavramsal Modelleme.....	126
10.3 Genel Varsayımlar.....	129
10.4 Model Kodu Seçimi.....	130
10.5 Model Yaklaşımı.....	131
10.6 İşlemci.....	132
11. SAYISAL YERALTI SUYU AKIM MODELİ OLUŞTURULMASI.....	133
11.1 Model Alanı.....	133
11.1. 1 Yatay boyutu.....	133
11.1.2 Dikey boyutu.....	134
11.2 Grid Ağlarının Oluşturulması.....	135
11.3 Model Sınır Koşulları.....	136
11.3.1 Genel yük sınırı.....	137
11.3.2 Bilinen yüklü sınırlar.....	138
11.3.3 Akış olmayan sınırlar.....	139
11.4 Üst ve Alt Tabaka.....	140
11.5 Başlangıç Hidrolik Yüğü.....	143
11.6 Hidrolik Parametreler.....	143
11.7 Beslenme Paketi.....	145
11.8 Nehir Paketi.....	147
11.9 Buharlaşıma-Terleme Paketi.....	148
12. MODELİN ÇALIŞTIRILMASI, KALİBRASYON ve HASSASİYET ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	150
12.1 Modelin Çalıştırılması ve Kalibrasyonu.....	150
12.2 Yeraltı Suyu Akım Modellemesiyle Hazırlanan Su Bütçesi.....	161
12.3 Model Kalibrasyonu Performans Ölçümleri.....	162

12.4 Hassasiyet Analizleri.....	162
12.5 Model Sonucunun Güncel Yeraltı Suyu Durumu ile Karşılaştırılması..	179
13. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	183
KAYNAKLAR.....	187
EKLER.....	191
EK 1 Çalışma Alanının Jeoloji Haritası.....	192
EK 2 DSİ Sondaj Kuyularına Ait Veriler.....	193
EK 3 Kütahya Ovası’nda Açılan Sığ Kuyularına Ait Ekim 1976’da Ölçülen Yeraltı Su Seviyeleri.....	196
EK 4 Kütahya Ovasında Alüvyon Akiferinde Açılan Sığ Kuyuların 1976 Yılına Ait Yeraltı Suyu Seviyeleri Ölçüm Noktaları.....	197
EK 5 Çalışma Alanı Sularının Kimyasal Analiz Sonuçları (Aralık 2013).....	198
EK 6 Çalışma Alanı Sularının Kimyasal Analiz Sonuçları (Haziran 2014)...	199
EK 7 Çalışma Alanında Hidrolojik Toprak Gruplarına Göre Ekim Ayın 1976 Yılına Ait Beslenim Miktarları.....	200
EK 8 Model Tarafından Hesaplanan Yeraltı Suyu Seviyeleri İle Haziran 2014’te Ölçülen Yeraltı Suyu Yükülerinin Karşılaştırması.....	201
EK 9 Tane Boyu Dağılım Analizleri Sonucunda Elde Edilen Eklenik Tane Boy Dağılım Eğrileri.....	202
ÖZGEÇMİŞ	203

SİMGELER DİZİNİ

CBn	Sınırın iletkenliği
d ₁₀	Etkili tane çapı
d ₆₀	%60'a karşılık gelen tane boyu
EC	Elektriksel iletkenlik
EN	Elektriksel Nötralite
Etp	Potansiyel buharlaşma-terleme
Etr	Gerçek buharlaşma-terleme
g	Yerçekimi ivmesi
h	Güneş örme müddeti, ayda saat olarak
H	Günün toplam astronomik müddeti
h _{i, j, k}	Model hücresinin hidrolik yükü
HBn	Sınırdan model alanına boşalacak suyun miktarı sınırdaki su yükü
Ig	Yatay düzleme
i	Sıcaklık indisi
K/HK	Hidrolik iletkenlik
mek/l	Miliekivalen/litre
n	Porozite
P	Yağış
pH	H ⁺ iyonu değişimi
Q	Isı enerjisi
Sc	Özgöl Kapasite
SI	Doygunluk indeksi
T	Transmissivite
T°	Sıcaklık
TU	Trityum Birimi
³ H	Trityum
ν	Kinematik viskozite
δ	İzotop derişiminin Standart Ortalama Okyanus Suyundan sapma miktarı
$\delta^{18}\text{O}$	Oksijen-18
$\delta^2\text{H}$	Döteryum
μ	Dinamik viskozite
μS	MikroSimens
ρ	Akışkan yoğunluğu

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
APHA	Amerikan Halk Sağlığı Örgütü
ASTER	Gelişmiş Uzay Termal Yayılma ve Yanıma
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Birliği
BKB	Batı Kuzey Batı
DEM	Dijital Yükselti Modeli
DGD	Doğu Güney Doğu
DMİ	Devlet Meteoroloji İstasyonu
DSİ	Devlet Su İşleri
DSİ	Devlet Su İşleri
GDEM	Küresel Dijital Yükselti Modeli
GHB	Genel Yük Sınırı
GIS	Coğrafi Bilgi Sistemi
GMS	Yeraltı suyu Modelleme Sistemi
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi
IDW	Ağırlıklandırılmış Uzaklığın Ters
KFZ	Kütahya Fay Zonu
MAE	Mutlak Ortalama Hata
ME	Ortalama Hata
MODFLOW	MODular yeraltı suyu akım modeli
MT3DMS	Üç Boyutlu Çoklu Bileşenleri Taşınım Model
MT3DMS	Üç Boyutlu Tek Bileşen Taşınım Model
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
PEST	Parametre Tahmin Programı
RCH	Beslenme
RMSE	Hataların Kareleri Toplamının Kare Kökü Hata
SAR	Sodyum Adsorbsiyon Oranı
SI	Doygunluk indeksi
SP	Potansiyel Uçlaşma Logu (Potansiyel Spontane)
SPSS	Sosyal Bilimleri için İstatistik Paketi
UKAM	Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi
USDA	Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı
USGS	Birleşik Devletler Jeolojik Araştırmalar Merkezi
UTM	Merkatör Projeksiyonu Kürenin
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Çalışma alanı yer bulduru haritaları.....	5
Şekil 2.2 Kütahya Ovası ve çevresinin yükseklik haritası.....	7
Şekil 2.3 Çalışma alanı yükselti kabartma haritası.....	8
Şekil 2.4 İnceleme alanı arazi kullanım haritası.....	9
Şekil 2.5 İnceleme alanı toprak haritası.....	10
Şekil 5.1 Çalışma alanının genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti.....	26
Şekil 5.2 A-A' enine jeolojik kesiti.....	27
Şekil 5.3 B-B' enine jeolojik kesiti.....	27
Şekil 5.4 C-C' enine jeolojik kesiti.....	27
Şekil 5.5 Sarıcasu birimine ait mikaşitlerden bir görünüm.....	29
Şekil 5.6.a. Arıkaya Formasyonunun görünümü, b. Arıkaya Formasyonunun breşleşmiş kısmının Parmakören Formasyonu ile olan dokanağı.....	31
Şekil 5.7 Çöğürler Karmaşığı.....	32
Şekil 5.8 Kütahya -Yoncalı karayolunda Dumlupınarı Üniversitesi doğusunda Çöğürler Karmaşığı'nda: a. Mavişist blokları görünümü, b. Folyasyon görünümü ve c. Ovacık melanjından bir görünüm.....	33
Şekil 5.9.a. Çöğürler Karmaşık'ına ait ofiyolitlerin Alüvyon ile olan dokanağı, b. Ofiyolitlerin üzerine gelen Emet Formasyonu ile olan dokanağı.....	34
Şekil 5.10 Kınık Ofiyoliti içerisinde peridotit düzeyleri.....	34
Şekil 5.11 Kütahya-Eskişehir karayolu doğusu, Yenibosna Köyü kuzeyinde görünümlü tüfler.....	36
Şekil 5.12 Yenibosna Köyü doğusunda Emet Formasyonu kireçtaşı ile tuf dokanağı.....	38
Şekil 5.13 Yenibosna Köyü doğusunda Emet Formasyonunda gözlenen karstik kireçtaşı.....	39
Şekil 5.14 Parmakören Köyü batısında Parmakören Formasyonu'nun görünümü	40
Şekil 5.15 Kütahya Ovası'nın kuzeyinde Çöğürler Karmaşık'ına ait ofiyolitleri Alüvyon ile olan dokanağı.....	41
Şekil 5.16 Çalışma alanının yapısal jeoloji haritası.....	43

Şekil 6.1 Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1975-2014 yılları arasında ölçülen aylık ortalama sıcaklık değerlerinin aylara göre değişimi.....	45
Şekil 6.2 Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1975-2014 yılları arasında ölçülen aylık ortalama yağış değerlerinin aylara göre değişimi.....	45
Şekil 6.3 Kütahya DMİ istasyonuna ait 1975-2014 yılları arasında yıllık ortalama yağıştan eklenik sapma grafiği.....	47
Şekil 6.4 Yağış ve buharlaşma - terleme grafiği.....	53
Şekil 7.1 Çalışma alanının drenaj alanı.....	60
Şekil 7.2 Felent Çayı Porsuk çayına boşalmadan önce debi ölçümü yapılan yer...	62
Şekil 7.3 Porsuk Çayı'ndan bir görünüm.....	63
Şekil 7.4 Nehir yatağı zemin örnekleme haritası.....	64
Şekil 7.5 Elek analizi çalışmaları.....	65
Şekil 7.6 Çalışma alanında bulunan doğal kaynak noktaları.....	67
Şekil 7.7 Enne Baraj Gölü.....	68
Şekil 8.1 Çalışma alanı DSİ kuyu lokasyon haritası.....	70
Şekil 8.2 Yeraltı su seviye değişim grafiği.....	74
Şekil 8.3 Çalışma alanında yer alan birimlerin hidrojeolojik özelliklerine göre hidrostratigrafik dikme kesit.....	76
Şekil 8.4 Kırık ve çatlaklı yapıdaki kireçtaşlarından bir görünüm.....	77
Şekil 8.5 Boşluklu kireçtaşlarından bir görünüm.....	78
Şekil 8.6 I-I', II-II' ve III-III' hidrojeolojik enine kesitler.....	79
Şekil 8.7.a. DSİ 30738 kuyusu pompajı sırasında, b. yükselim sırasında yapılan deney grafikleri.....	83
Şekil 8.8.a. DSİ 36600B kuyusu pompajı sırasında, b yükselim sırasında yapılan deney grafikleri.....	84
Şekil 8.9 DSİ 6974C ve 1063 kuyuları kademeli pompaj deney grafikleri.....	86
Şekil 8.10 DSİ kuyusu (No: 1054) seviye değişim grafiği.....	91
Şekil 8.11 DSİ kuyusu (No: 6977) seviye değişim grafiği.....	92
Şekil 8.12 DSİ kuyusu (No: 36809) seviye değişim grafiği.....	95
Şekil 8.13 Alüvyon akiferine ait yeraltı suyu seviye haritası.....	96
Şekil 9.1 Su örnek noktaları haritası.....	99
Şekil 9.2 Çalışma alanında yer alan yüzey sularının Piper diyagramları.....	106

Şekil 9.3 Çalışma alanında yer alan yeraltı sularının Piper diyagramları.....	106
Şekil 9.4 Çalışma alanında yer alan kaynak sularının Piper diyagramları.....	107
Şekil 9.5 Su örneklerinin yarı logaritmik (Schoeller) diyagramları.....	108
Şekil 9.6 Su örneklerinin ortalama değerlerinin Schoeller diyagramları.....	108
Şekil 9.7 Çalışma alanındaki yüzey, kaynak ve yeraltı sularının Doygunluk İndisleri grafiği (Aralık 2013).....	113
Şekil 9.8 Çalışma alanındaki yüzey, kaynak ve yeraltı sularının Doygunluk İndisleri grafiği (Haziran 2014).....	114
Şekil 9.9 Tez sahası sularının $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ diyagramı üzerindeki konumu.....	120
Şekil 9.10 Çalışma alanı Aralık 2013 dönemi örneklerine ait EC-3H grafiği.....	122
Şekil 9.11 Çalışma alanı Aralık 2013 dönemi örneklerine ait $\delta^{18}\text{O}$ -3H grafiği....	122
Şekil 10.1 Yeraltı suyu modelleme süreci.....	124
Şekil 10.2 Modelleme alanını gösteren harita.....	125
Şekil 10.3 Alüvyal akiferde yer alan 1054 numaralı kuyuda su seviyesi değişimi.	126
Şekil 10.4 Kütahya Ovası iki boyutlu kavramsal hidrojeolojik modeli.....	129
Şekil 10.5 Bir serbest akiferin iki boyutlu alansal modelinin blok merkezli gridi..	131
Şekil 11.1 Alüviyal akiferin yatay boyutu.....	134
Şekil 11.2 Alüviyal akiferin dikey boyutu.....	135
Şekil 11.3 Model alanın grid ağları.....	136
Şekil 11.4 Sınırdan geçen akışın şematik gösterimi.....	137
Şekil 11.5 Nehir-akifer etkileşiminin kavramsal temsili.....	139
Şekil 11.6 Model alanın sınır koşulları.....	140
Şekil 11.7.a Alüvyal akiferin üst tabaka, b. alt tabaka yüksekliği.....	142
Şekil 11.8 Alüvyal akiferin hidolik iletkenlik dağılımı.....	144
Şekil 11.9 Model alanının hidolik iletkenlik zonlanma haritası.....	144
Şekil 11.10 Ekim ayındaki alansal beslenme miktarı haritası.....	146
Şekil 11.11 Model alanının beslenme zonlanma haritası.....	147
Şekil 11.12 Felent ve Porsuk çaylarının akarsu tabanı iletkenlik değerlerinin segmentlere göre değişimleri.....	148
Şekil 11.13 Buharlaşma-terleme benzeştirilmesinde kullanılan kavramsal yüzeyler.....	149
Şekil 12.1 Kalibrasyon hedefini gösteren şema.....	151

Şekil 12.2 Deneme yanılma kalibrasyon yöntemi şematiği.....	152
Şekil 12.3 Modelleme alanı için kalibre edilmiş hidrolik iletkenlik haritası.....	154
Şekil 12.4 Modelleme alanı için kalibre edilmiş beslenme haritası.....	154
Şekil 12.5 Model tarafından hesaplanan yeraltı suyu seviyeleri ile gözlenen yeraltı suyu seviyeleri karşılaştırması.....	158
Şekil 12.6 Kalibrasyon sonuçlarının model üzerindeki dağılımı.....	159
Şekil 12.7 Model kalibrasyonu sonucu elde edilen kararlı akım koşullarına ait seviye dağılım haritası.....	160
Şekil 12.8 Bölgelere göre beslenme hassasiyeti analizleri.....	166
Şekil 12.9 Tüm bölgelerin beslenme hassasiyet analizi sonuçları.....	168
Şekil 12.10 Beslenme değişiminin süzölmeye etkisi.....	169
Şekil 12.11 Bölgelere göre hidrolik iletkenlik hassasiyet analizleri.....	172
Şekil 12.12 Tüm bölgelerin hidrolik iletkenlik hassasiyet analizleri.....	174
Şekil 12.13 Hidrolik iletkenlik değişiminin süzölmeye etkisi.....	175
Şekil 12.14 Akarsu tabanı iletimliliği için Felent ve Porsuk Çaylarında değerlerin ayrı ayrı değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri grafiği.....	177
Şekil 12.15 Akarsu tabanı iletimliliği için Felent ve Porsuk Çaylarında aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri grafiği.....	177
Şekil 12.16.a. Akarsudan akifere süzölme, b. akiferden akarsuya süzölme miktarlarında akarsu tabanı iletimlilik hassasiyet analizlerinin grafiği.....	178
Şekil 12.17 Modelleme alanının Haziran 2014'e ait seviye dağılım haritası.....	181
Şekil 12.18 Model sonucu ile Haziran 2014 yeraltı suyu yükünün karşılaştırılması.....	182

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Çalışma alanında hidrolojik toprak grupları.....	13
Çizelge 6.1 Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1975-2014 yılları arasında ölçülen ortalama yağış ve sıcaklık değerleri.....	44
Çizelge 6.2 Turc yöntemi ile hazırlanmış uzun dönem buharlaşma-terleme değerleri.....	50
Çizelge 6.3 Turc'a göre toprağın nem bilançosu.....	50
Çizelge 6.4 Thornthwaite'e göre hazırlanmış uzun dönem meteorolojik su bilançosu.....	52
Çizelge 6.5 Penman'a göre hazırlanmış uzun dönem buharlaşma-terleme değerleri.....	57
Çizelge 6.6 Penman'a göre hazırlanmış uzun dönem meteorolojik su bilançosu..	58
Çizelge 7.1 Tane boyu analizlerine dayalı olarak hesaplanan geçirgenlik katsayıları.....	66
Çizelge 8.1 Yeraltı su seviyesi ölçüm noktaları	72
Çizelge 8.2 Alüvyon akiferinde yeraltı su seviyesi ölçüm noktala.....	73
Çizelge 8.3 Akiferlerin hidrojeolojik parametreleri - Sabit debili.....	82
Çizelge 8.4 Akiferlerin hidrojeolojik parametreleri - Kademeli debili.....	85
Çizelge 8.5 Akiferlerin hidrojeolojik parametreleri Driscoll yöntemi.....	88
Çizelge 9.1 Su örnekleme noktaları.....	98
Çizelge 9.2 Çalışma alanı yüzey, kaynak ve yeraltı sularının iki döneme ait kimyasal analiz sonuçları ortalama verileri.....	102
Çizelge 9.3 İnceleme alanındaki suların ana iyon dizilimleri ve hidrokimyasal fasiyesleri.....	109
Çizelge 9.4 Çalışma alanındaki suların Doygunluk İndislerinin istatistiksel tanımlaması (Aralık 2013).....	111
Çizelge 9.5 Çalışma alanındaki suların Doygunluk İndislerinin istatistiksel tanımlaması (Haziran 2014).....	112
Çizelge 9.6 Çalışma alanındaki yüzey, kaynak ve yeraltı sularının Kloro Alkalın İndislerinin istatistiksel tanımlaması.....	116

Çizelge 9.7 İnceleme alanı sularının Döteryum, Oksijen-18 ve Tritiyum değerleri.....	119
Çizelge 12.1 Başlangıç ve kalibre edilmiş parametre değerleri.....	155
Çizelge 12.2 Ekim 1976 yılındaki kararlı durum modeli kalibrasyon istatistikleri.....	157
Çizelge 12.3 Kütahya Ovası sığ akifer sistemine ait kararlı durum su bütçesi.....	161
Çizelge 12.4 Her bir beslenme zonunun etkisi birbirinden bağımsız olarak beslenmenin hassasiyet analiz sonuçları.....	165
Çizelge 12.5 Beslenme için tüm zonlarda aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri ve akarsudaki süzülme etkisi ve akarsuyun baz akımına etkisi.....	168
Çizelge 12.6 Her bir Hidrolik iletkenliğin zonunun etkisi birbirinden bağımsız olarak beslenmenin hassasiyet analiz sonuçları.....	171
Çizelge 12.7 Hidrolik iletkenlik için tüm zonlarda aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri ve akarsudaki süzülme etkisi.....	174
Çizelge 12.8 Dere yatağı iletimliliğinin hassasiyet analizleri.....	176

1. GİRİŞ

Canlıların yaşamları için önemli olan su, tüm canlılar için vazgeçilmezdir. Son yıllardaki hızlı nüfus artışına paralel olarak artan su talebine karşın uygun yeraltı suyu kaynaklarının azlığı ve gün geçtikçe gelişen sanayi ve tarımsal faaliyetlere bağlı olarak aşırı kullanım ve çeşitli kirlilik parametreleri nedeniyle ortaya çıkan sorunlar su kaynaklarının yönetimi için ciddi tedbirler almayı gerektirmektedir. Her geçen gün önemi artan yeraltı suyunun uygun bir şekilde kullanılabilmesi, zaman ve konum açısından davranışının bilinmesi gerekmekte, yeraltı suyu kaynaklarının iyi yönetilmesi açısından önem kazanmaktadır.

Türkiye’de sanayileşme 1950’li yıllarda başlamış, önemli tesisler devlet tarafından yapılmıştır. Kütahya merkezinde en önemli kamu sanayi kuruluşları; Seyitömer Termik Santrali İşletme Müdürlüğü, TEAŞ-Tunçbilek Termik Santrali İşletme Müdürlüğü, TKİ-Garp Linyitleri İşletmesi, TKİ-Seyitömer Linyitleri İşletmesi, Eti-Bor A.Ş. Emet Bor İşletme Müdürlüğüdür. Kütahya ilinde şeker, azot, gübre, porselen, gümüş, karo ve çinicilik alanında özel sektörün büyük kuruluşları mevcuttur.

Kütahya, Türkiye’de hızla büyüyen ve endüstrileşen kentlerden biridir. Hızlı büyüme ve endüstrileşmeye bağlı olarak yörede su kullanımı hızla artmış, su gereksinimini karşılamak amacıyla 1940’lı yıllardan itibaren ovadaki alüvyon akiferde kuyular açılmaya başlanmıştır. Kütahya’da şehrin endüstriyel kuruluşlarının ve diğer kamusal kuruluşların su gereksinimi ovada açılmış olan kuyulardan ve civardaki bazı kaynak sularından karşılanmaktadır (Anonim 2009).

Kütahya bölgesinde alüvyonlarla kaplı bulunan Kütahya, Köprüören, Tavşanlı, Altıntaş, Aslanapa, Gediz, Simav ve Örencik Ovaları hidrolik eşiğin alçak kısımlarını teşkil etmektedir.

Kütahya ili ve bağlı köyler genelinde sulama ve içme amacıyla yüzey ve sığ yeraltı suları kullanılmaktadır. Kütahya Ovası’nı doğu-batı doğrultusunda kateden Felent Çayı,

Porsuk Çayı'na karışarak doğrudan bu su havzasına ulaşmaktadır. Ayrıca, Porsuk Çayı da ovayı güney-kuzey doğrultusunda kesmektedir.

Çalışma alanı Türkiye'nin hızlı büyüyen ve yoğun tarımsal ve endüstriyel aktivitenin bulunduğu bir bölgesidir. Tarımsal sulama, yüzey ve yeraltı suyu arasındaki ilişki hidrolojik bakımdan önemlidir. İnceleme alanında yoğun tarımsal aktiviteler ve şeker, azot, magnezyum ve diğer fabrikalar doğal drenaj olan Felent ve Porsuk Çaylarını kirletmektedir.

Çalışma sahasında günümüzde neredeyse tüm tarım arazilerinde kullanılan azot gübreler üre ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), diamonyum fosfat-DAP ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$), amonyum sülfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), amonyum nitrat (NH_4NO_3), magnezyum sülfat (MgSO_4) potasyum nitrat (KNO_3) ve potasyum sülfat (K_2SO_4)'lerdir (Kütahya İli Çevre Durum Raporu, 2012). Diğer taraftan gübrelerden kaynaklanan yüksek amonyum, nitrat, nitrit, sülfat ve magnezyum toprağı asitleştirmekte ve bitki yetişmesini ve toprak verimini düşürmektedir.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu çalışma, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmış; Kütahya Ovası Sığ Akiferinin Yeraltı Suyu Akım Modelini oluşturabilmek için yapılmıştır. Bu tez kapsamında, yapılan arazi, laboratuvar ve büro çalışmaları ile tezin amaçlarına ulaşabilmek için jeolojik haritalama, yapısal jeoloji, toprak grupları, kuyu logları, meteorolojik ve hidrolojik analizler, yüzey sularının boşalımı, yeraltı suyu seviye ölçümleri, hidrokimyasal değerlendirmeler ile izotop hidrolojisi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda ihtiyaç duyulan veriler, önceki çalışmalarda elde edilenlere ek olarak arazi ve laboratuvar çalışmalarıyla üretilmiştir.

Çalışma alanı içerisinde yer alan alüvyon ve kireçtaşı akiferleri içerisinde içme, işletme, araştırma, kullanma ve sulama amaçlı olarak Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından çok

sayıda kuyu açılmıştır. Vatandaşlar tarafından da alüvyonda çok sayıda, genellikle sığ derinlikte sulama amaçlı kuyular açılmıştır.

Kütahya Ovası'nda hidrojeoloji ile ilgili Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Dairesi Başkanlığı tarafından yapılan Hidrojeolojik Etüt Raporu dışında akiferlerin yeraltı suyu akımının kavramsal ve sayısal modellenmesi ile ilgili yapılmış herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, Kütahya Ovası yeraltı suyunun geleceğe dönük değerlendirmesini yapabilmek için akım modellenmesi çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

Önerilen tezin amacı, Kütahya Ovası'nda mevcut fiziksel ve kimyasal hidrojeolojik koşulların ortaya çıkarılarak bölgedeki sığ akifer sistemine ait kavramsal hidrojeolojik modelin belirlenmesi, bu model kapsamında akiferin yeraltı suyu akım modelini oluşturarak yeraltı suyunun sürdürülebilir kullanımına ışık tutmaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANININ KONUMU

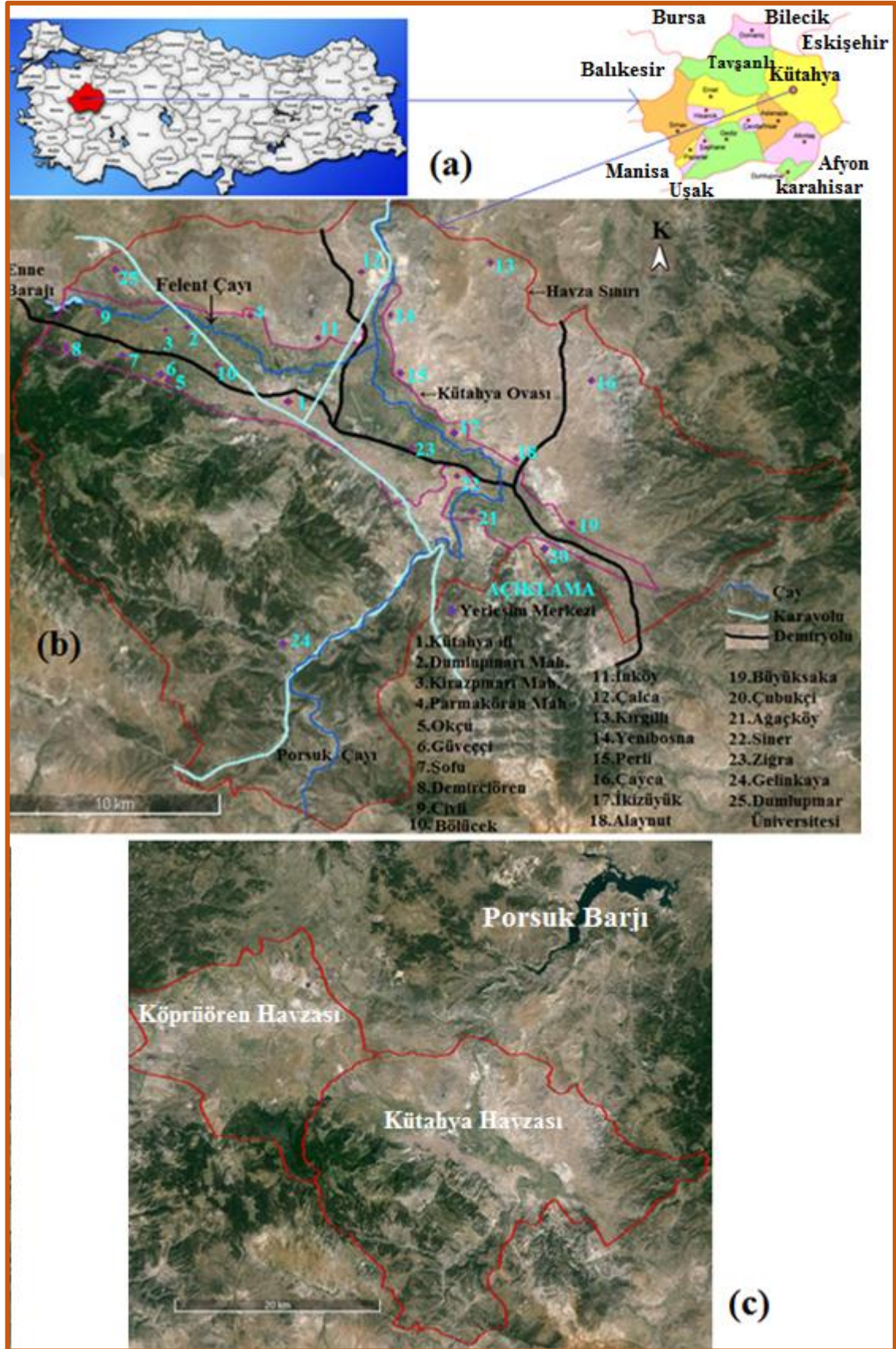
2.1 Yerleşim Yeri ve Ulaşım

Ege Bölgesinin İç Batı Anadolu bölümünde, Yukarı Sakarya ve Güney Marmara bölümlerinin kavşağında yer alan Kütahya, kuzeyden ve kuzeybatıdan Bursa, kuzeydoğudan Bilecik, doğudan Eskişehir, güneydoğudan Afyonkarahisar, güneyden Uşak, güneybatıdan Manisa, batıdan ise Balıkesir illeri ile çevrilidir (Şekil 2.1.a).

Çalışma alanı, 1:25000 ölçekli J23b1, J23b2, J24a1, J24a2, J24b1, J24b4, J23b3, J24a4, J24a3, J24b4, I23C4, I23C3 ve I24d4 paftalarında ve UTM cinsinden yaklaşık olarak 225000 - 268000 D boylamları ve 4345000 - 4380000 K enlemleri ile sınırlanan, 93 km² civarında alana sahip Kütahya Ovası'nı çevreleyen 530 km² alana sahip su toplama havzasını kapsamaktadır (Şekil 2.1.b).

İnceleme alanındaki en önemli yerleşim merkezi Kütahya'dır. Kütahya Ovası'nda Kütahya ili dışında Dumlupınarı Mah., Parmaköran Mah., Kirazpınarı Mah., Demirciören, Cıvli, Güveççi, İnköy, Yeni Bosna, Çalca, Çayca, Perli, Zığra, Siner, İkizüyük, Kırğıllı, Alaynut, Ağaçköy, Büyüksaka, Çubukçi, Okçu, Sofu, Bölücek, ve Gelinkaya köyleri yer almaktadır. Kütahya kara ve demiryolu ağının kavşak noktalarından biridir. Ankara-İzmir karayolu, İstanbul-Afyon karayolu ve Ankara-Afyon demiryolu Kütahya'dan geçmektedir (Şekil 2.1.b).

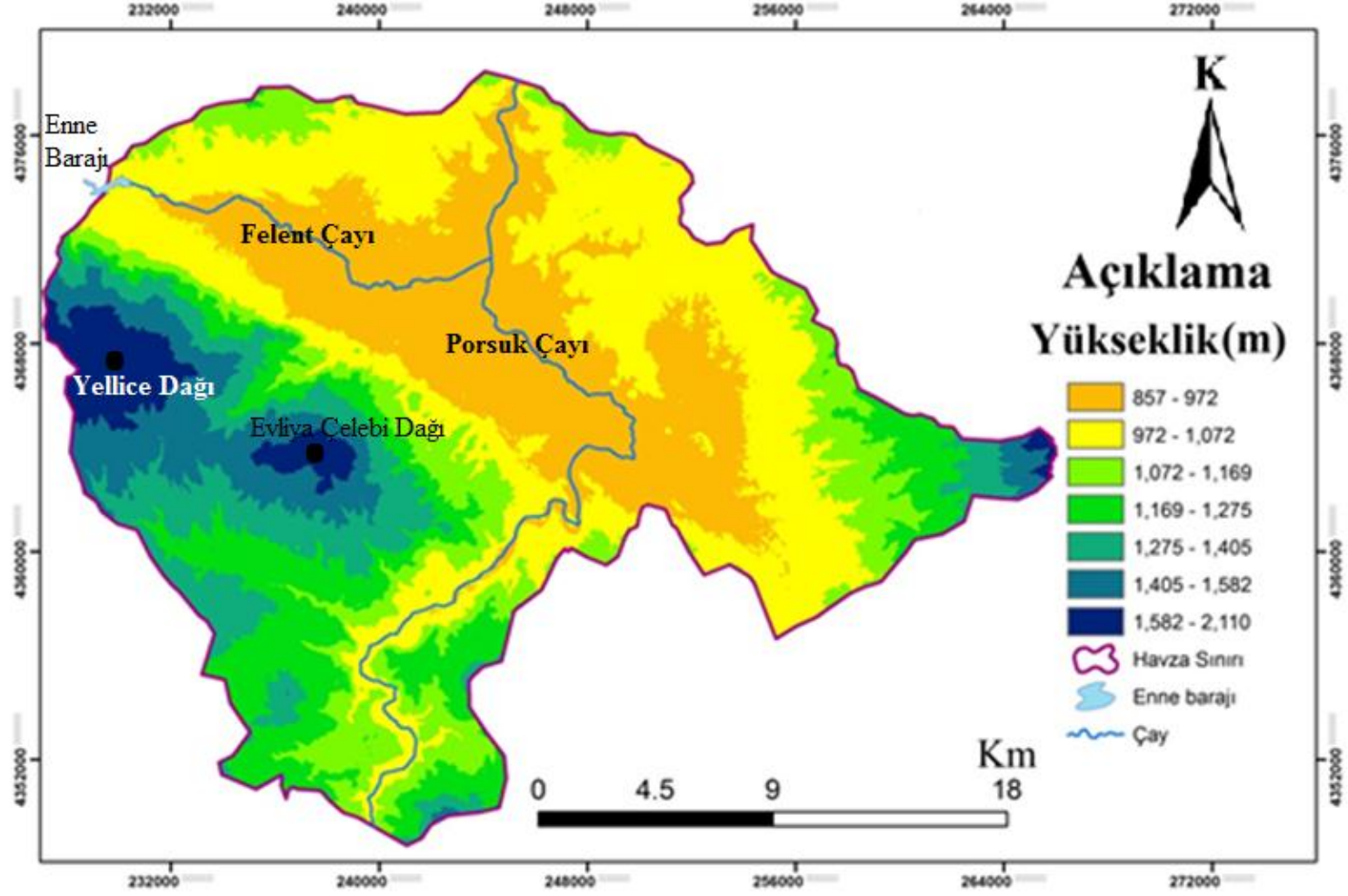
Bu çalışmaya konu olan alan, Kütahya şehrinin de içinde bulunduğu Kütahya Ovası ve çevresidir. Çalışma sahası, Kütahya ve Eskişehir illeri için içme ve kullanma suyu kaynağı olarak kullanılan Porsuk Baraj gölünün membasında ve Köprüören Ovası'nın mansabında yer almaktadır. Ovada bulunan yerleşim yerlerinin içme, kullanma ve endüstri amacıyla kullanılan suların kaynağı tamamen yeraltı suları olup, sulama suları ise genellikle yüzey sulardır (Şekil 2.1.c).



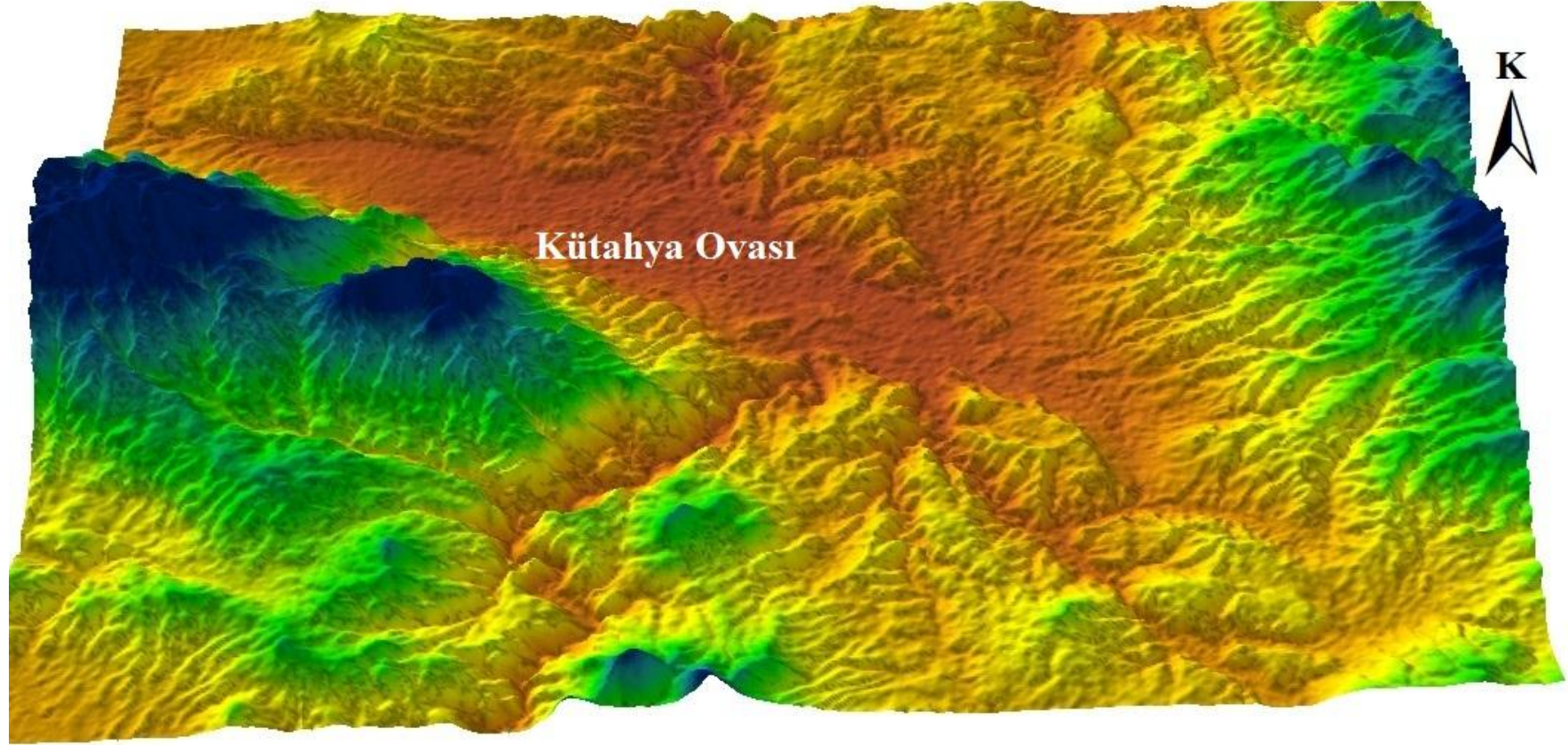
Şekil 2.1 Çalışma alanı yer bulduru haritaları

2.2 Topoğrafya

Türkiye'nin İçbatı Anadolu eşiği üzerinde yer alan Kütahya bölgesinin yüzey şekilleri üzerinde bir takım dağ ve tepe dizilerinin yer aldığı muhtelif yükseltilerdeki yaylalar ile bunlar içinde gelişmiş ovalardan biri Kütahya Ovası'nı teşkil eder (Şekil 2.2). Eşik üzerindeki başlıca dağ ve tepe dizileri, Kütahya Ovası'nın hemen güneyinde yarı kristalize kireçtaşı ve metamorfik şistlerden oluşan Yellice Dağı (1764 m) ve Evliya Çelebi Dağı (1270 m) ve bunların uzantılarındaki tepelerdir (Şekil 2.3). Kütahya Kalesinin bulunduğu Hisar Tepesi ile doğusundaki Yeterlik Tepesi denizden 1000 m yüksekliktedir. Bu iki tepe arasındaki vadiden geçen dere Porsuk Çayı'nın kolu olan Felent Çayı'na karışır. Şehrin asıl merkezi Hisar Tepe önünde yer almaktadır. Ova düzlüğü yüksekliği 920-950 m arasında değişirken ovanın kuzeybatı ve güneybatı uçları arasındaki maksimum uzunluk ve ovanın genişliği sırasıyla 25,0 km ve 5,5 km'dir.



Şekil 2.2 Kütahya Ovası ve çevresinin yükseklik haritası

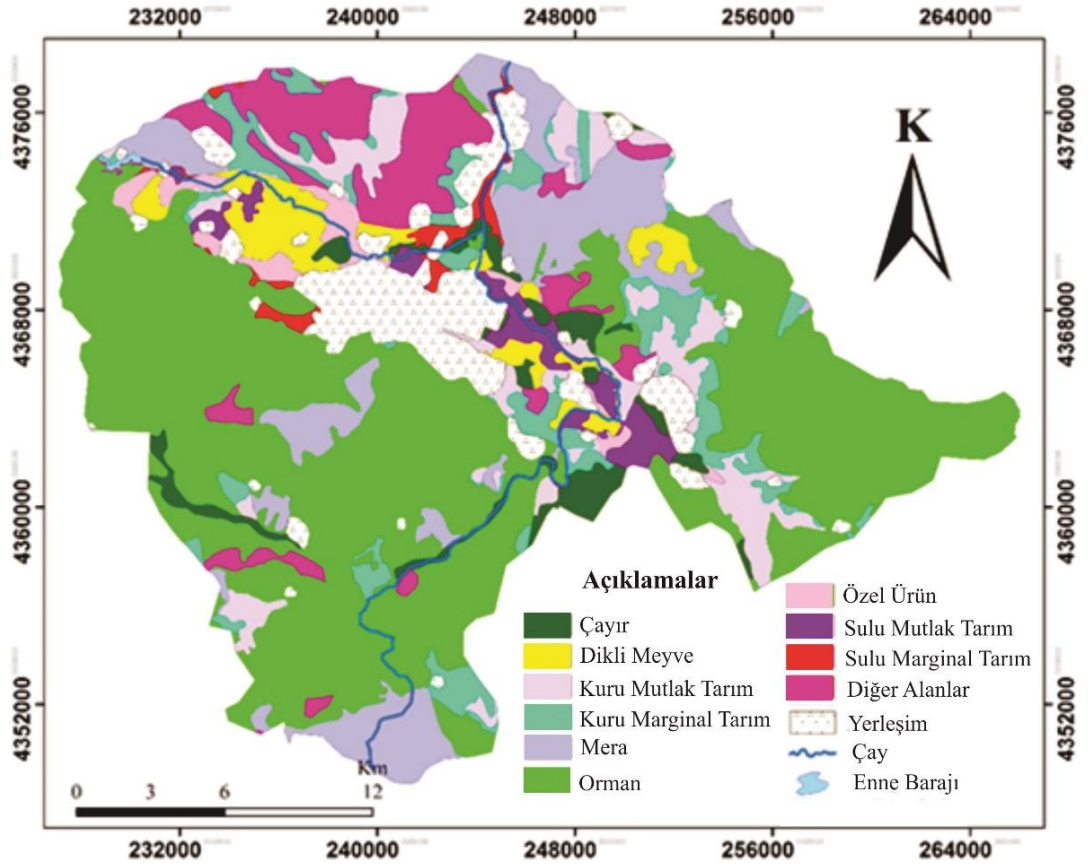


Şekil 2.3 Çalışma alanı yükselti kabartma haritası

2.3 Arazi Kullanımı

Kütahya Ovası'nda ekonomik gelişme açısından önemli olan faaliyetlerden biri de tarımsal işletmelerdir. Çalışma alanında, sıcak ve kurak dönemlerde tarım topraklarının su ihtiyacı oldukça fazladır. Çünkü bitkilerin terlemesi, buharlaşma ve sızma gibi yollarla su kaybı artmaktadır. Bu zamanlarda yeraltı suları ile akarsular gibi su kaynakları aracılığıyla sulanan tarım alanları ekilmektedir. Sulu tarım genel olarak çalışma alanının ova boyunca bulunan düz ve düze yakın alüvyal düzlük alanlarında yoğun olarak yapılmaktadır.

Genellikle Kütahya Ovası'nda çayır, dikili meyve, kuru mutlak tarım, sulu mutlak tarım, sulu marjinal tarım yapılmaktadır. Havzanın yüksek kotları ormanlık arazidir (Şekil 2.4).

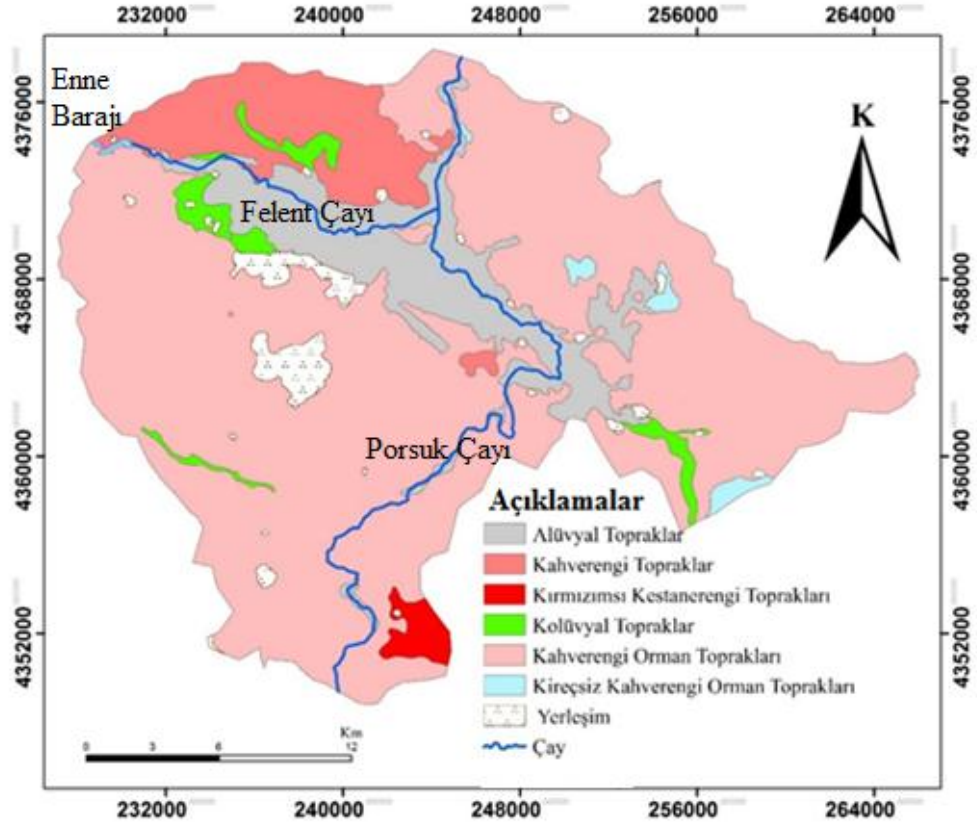


Şekil 2.4 İnceleme alanı arazi kullanım haritası (T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığından sayısallaştırılmış olarak alınmıştır)

2.4 Toprak Tipleri

İnceleme alanında yer alan büyük toprak grupları ve bunların dağılımı Şekil 2.5'te verilmiştir. Tez sahasında toplam 6 tip toprak türü bulunmaktadır (Şekil 2.5). Bunlardan alüvyal topraklar Kütahya Ovası'nda en yaygın toprak tipini oluşturmaktadır. Alüvyal topraklar, akarsuların taşıdığı materyalin depolanması sonucu oluşmaktadır. İnceleme alanında Kütahya Ovası'nı kaplayan alüvyal toprakların büyük kısmı Felent Çayı ve Porsuk Çayı çevresinde yer almaktadır (Şekil 2.5). Tarım bakımından çok önemli olan bu topraklar genellikle genç topraklar olarak tanımlanmaktadır.

Kahverengi orman toprakları, Kütahya Havzası'nda yüksek ve orman alanlarında en yaygın olarak görülen toprak grubudur. Kahverengi topraklar, Kütahya Havzası'nda en yaygın olarak görülen ikinci toprak grubudur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 İnceleme alanı toprak haritası (T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığının sayısallaştırılmış olarak alınmıştır)

2.4.1 Hidrolojik toprak grupları

Bu toprak grupları A, B, C ve D gruplarından oluşmakta olup, eğim ve arazi örtüsünden bağımsız olarak hidrolojik içeriklerine bağlı olarak oluşturulmuştur (Anonymous 2009, Boorman vd. 1995).

A Grubu topraklar düşük akış potansiyeline ve yüksek infiltrasyona sahiptir. Su topraktan rahatlıkla süzulebilmektedir. A Grubu topraklar genellikle %10'dan az kil ve %90'dan fazla kum ve çakıl içermekte olup, çakıllı/kumlu dokuya sahiptir (Anonymous 2009).

B Grubu topraklar, hidrolojik toprak sınıflandırması içerisinde balçıklı toprak olarak gösterilmektedir. Bu topraklarda kum ve ince kum boyutlu parçacıklar az miktarda kil bulundurmaktadır. Orta yüzeysel akış potansiyelli, kumlu tın, tın, killi tın bünyeli, derin, geçirgenliği orta olan topraklar, B Grubu toprakları tipik olarak %10 ve %20 arasında kil ve %50-90 arasında kum ve balçıklı kum veya kumlu balçık dokuya sahiptir (Anonymous 2009).

C Grubu topraklar iyice ıslandığında bile düşük sızdırma yeteneğine sahiptir. C sınıfı topraklarda suyun aşağı yöndeki hareketini engelleyen bir tabaka içermektedir. C Grubu topraklar tipik olarak %20-40 arasında kil ve %50'den az kum ve balçık, kumlu kil balçık, kil balçık ve siltli kil balçık dokuya sahiptir. Yüksek yüzey akış potansiyelli, az derin, önemli düzeyde kil ve kolloid içeren, geçirgenliği düşük olan topraklardır (Anonymous 2009).

D Grubu topraklar yüksek kil içeriğine sahiptir. D Grubu topraklar tipik olarak %40'tan fazla kil, %50'den az kum ve killi dokusudur. Çok yüksek yüzey akış potansiyeli ve şişme özelliği gösteren, kil içeren, geçirgenliği çok az, alt katmanları geçirimsiz olan topraklardır (Anonymous 2009).

Toprak özelliklerinin, modelleme alanının hidrolojik özellikleri ve yüzeysel akış özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla hidrolojik toprak grupları DSI tarafından açılan sondaj kuyu loglarından tanımlanan topraklardan elde edilmiştir.

Anonymous (2009)'göre Kütahya Ovası'nda, hidrolojik toprak özelliklerine göre A, B, C ve D grubu topraklar olarak bulunmaktadır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 Çalışma alanında hidrolojik toprak grupları

Kuyu No	Kuyu lokasyonu		Toprak	Toprak grubu
	X	Y		
1053	244956	4369786	Kil	D
1054	241118	4370369	Killi kum	B
1055	245653	4366454	Kumlu kil	C
1056	244914	4370463	Kil	D
1057	241719	4367660	İnce kum	A
1063	242221	4370042	Kil	D
1065	250850	4364946	Killi kum	B
1066	237261	4368959	Killi kum	B
1067	247744	4366545	Killi kum	B
1068	244198	4371776	Kil	D
1069	243701	4365872	Killi kum	B
1073	242919	4366243	Killi kum	B
1076	242922	4366246	Kil	D
6973	244736	4372853	Kil	D
6974	241793	4369551	Kil	D
6975	244543	4366877	Çakıl	A
6976	237421	4370951	Kil	D
6977	234275	4372555	Kil	D
18818	240258	4367929	İnce kum	A
24807	250484	4362766	İnce kum	A
25190	244654	4364082	Kum, çakıl	A
30738	244207	4372818	Kil	D
30739	243916	4372440	Kil	D
31431	244638	4364253	Kil	D
35221	236279	4371901	Çakılı kil	C
35537	243800	4371264	Çakılı kil	C
35538	244970	4374002	Kum, çakıl	A
36599	244113	4372179	Kil	D
36600	244674	4373503	Kumlu kil	C
36807	254500	4361325	Killi çakıl	B
36808	255450	4360150	Killi çakıl	B
36809	253600	4361775	Killi çakıl	B
41173	241018	4367745	Kil	D
41548	240870	4367548	Kum, çakıl	A
46872	238710	4368432	Kum, çakıl	A
52883	233229	4371709	Kil kum çakıl	A
53185	241237	4367659	Kil kum çakıl	A
53974	237189	4369394	Kil kum çakıl	A
53975	236566	4370040	Kil kum çakıl	A
54088	241903	4369895	Kil kum çakıl	A
54210	236095	4372404	Kil kum çakıl	A
57386	236834	4369874	Kil kum çakıl	A
57620	243516	4366645	Kil kum çakıl	A

2.5 Su Kullanımı

Kütahya ili içme ve evsel kullanma suyu ihtiyacını Kütahya Ovası'nın dışında bulunan karstik kaynaklar olan Gelinkaya ve Porsuk kaptajlarından çıkan sudan karşılamaktadır. Gelinkaya kaptajının en düşük, en yüksek ve ortalama debileri sırasıyla 242 l/s, 765 l/s ve 550 l/s olup, Porsuk kaptajlarının ise 450 l/s, 2189 l/s ve 635 l/s'dir (Anonim 2012). Bu kaynaklardan Kütahya iline pompalanan 400 l/s'lik su günlük ihtiyacı karşılamakta, geri kalan miktar ise yeraltı suyuna geri beslenme olarak gönderilmektedir. Kütahya il merkezine bağlı bazı köyler (Büyüksaka, Alayunt, Perli, Siner, Ağaç, Çalca, Yenibosna ve Kirazpınarı) sularını derin akiferlerden elde etmektedir.

Kütahya ilinde yer alan fabrikaların birkaç tanesinde DSİ tarafından kayıtlı kuyu bulunmasına rağmen, diğer birçok fabrika kaçak kuyularla yeraltı suyu kullanmaktadır. Bu yüzden kuyulardan çekilen su miktarı, çekim yapılan akifer ve kuyuya hangi akiferden ne kadar katkı olduğu bilinmemektedir.

Kütahya Ovası'nda sulama amacıyla kullanılan suyun çoğu Parsuk Çayı'ndan ve ilaveten Kütahya Ovası'nın batısında yer alan Enne Barajı'ndan sağlanmaktadır. Felent Çayı'na yakın tarım arazilerinde vatandaşlar kişisel su motorlarını kullanarak çekim yapmakta ve kendileri sığ kuyular açarak alüvyondan su çekmektedirler.

2.6 Ekonomik Durum

Kütahya'nın ekonomisi, tarım, hayvancılık ve sanayiye dayalıdır. Başlıca tarım ürünleri tahıl, şekerpancarı, haşhaş, baklagiller, mısır, patates ve kirazdır. Kütahya Seramik Fabrikası, Azot Sanyı, Şeker Fabrikası, kiremit ve tuğla fabrikaları, ağaç ürünleri fabrikaları başlıca sanayi kuruluşlarıdır.

Kütahya yeraltı kaynakları yönünden çok zengin bir ildir. Sanayi de buna paralel olarak gelişmiştir. Kütahya'da 1950-1960 yılları arasında önemli sanayi tesisleri kurulmuştur. Bunlar TEAŞ Tunçbilek Termik Santrali (1954), Kütahya Şeker Fabrikası (1954),

Yıldız Entegre Gübre Fabrikasıdır (1954). Sanayi tesislerinin kuruluşuna bağlı olarak kentsel nüfus artış hızı ülke ortalamasından fazla olmuştur. Kütahya'da 1960-75 döneminde toprak ve seramik sanayi dalında yapılan yeni yatırımlarla birlikte kentleşme artmıştır. Bu tarihlerde TÜGSAŞ Azot Fabrikası (1961), TEAŞ Seyitömer Termik Santrali (1969), Kütahya Manyezit İşletmeleri A.Ş. (1972), Gimsan Gediz İplik ve Mensucat A.Ş. (1972), Kütahya Porselen Sanayi A.Ş. (1974), 1975 sonrası ise Gediz Ambalaj Sanayi A.Ş. (1982), Heriş Seramik ve Turizm Sanayi A.Ş. (1989) faaliyete başlamışlardır. Yine havzanın önemli kenti Kütahya'da sanayi ile birlikte nüfusta da artış görülmüştür. Sanayi ve yerleşimin artması sonucu Porsuk Çayı'nın kirliliği zamanla artış göstermiştir (Anonim 1999).

Kütahya ilinde sanayi, ticaret, sosyal hizmet ve buna benzer alanlarda, evlerdeki çeşitli aktiviteler sonucunda katı atıklar meydana gelmektedir. Uygun değerlendirme ve geri kazanma yöntemlerinin tespiti için katı atıkların miktarlarının belirlenmesi, sınıflandırılması ve özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Kütahya ilindeki yerel yönetimlerin atıkların değerlendirilmesi konusunda planlı bir çalışmaları bulunmamaktadır (Anonim 2005).

2.7 İklim Koşulları

Kütahya Ovası; Ege Bölgesi'nde yer almasına rağmen, denizden uzaklık ve yükseltiye bağlı olarak iklimi farklıdır. Kütahya ve çevresinin iklimi Ege, Marmara ve İç Anadolu Bölgeleri arasında bir geçiş tipidir. Bölge, iklim ve sıcaklık şartları bakımından, her üç bölgenin özelliklerini taşımaktadır. Sıcaklık şartları İç Anadolu, yağış şartları Marmara Bölgesi tesiri altındadır. Kışlar sert, uzun ve yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak geçer.

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1 Çalışma Alanı İle İlgili Önceki Çalışmalar

Kütahya Ovası ve dolayında bugüne kadar farklı amaçlar ile çok sayıda jeolojik inceleme yapılmıştır. Bunlardan, çalışma alanını kapsayanlar aşağıda verilmiştir. Ancak ovanın hidrojeolojisi hakkında çok az ve yetersiz çalışma bulunmaktadır. Yeraltı suyu akım modellemesi ile ilgili daha önce ne kavramsal ne de sayısal modelleme yapılmıştır.

Anonim (1965), tarafından Kütahya Ovası'nın jeolojik durumunu belirtmek amacıyla ilk olarak jeofizik rezistivite etüdü yapmıştır. Kütahya Ovası'nda yapılan jeofizik rezistivite etüdü neticesinde çok hareketli tektonik faaliyetler geçiren Kütahya Ovası'nın jeolojik yapısının meydana geldiği ve çok karışık bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir.

Anonim (1979), tarafından Kütahya ve Köprüören Ovaları jeofizik rezistivite etüt raporu hazırlanmıştır. Venner metodunda 129 adet elektrik sondaj ölçümü ve 1965 yılından sonra açılan kuyuların çoğundan SP ve tek nokta rezistivite (R) logları alınarak akifer karakterli olan alüvyon ve kireçtaşlarının kalınlık ve yayılımlarının, sondaj kuyuları arasındaki korelasyonu ve gömülü fay olasılığının araştırılması amacı ile çalışmalar yapılmıştır. Alüvyonun en kalın olduğu yer Kütahya Ovası'nın doğusunda olup, en fazla 100 m civarında olduğu ve Emet Formasyonunun kalınlığının ise 400 m'den fazla olduğu tespit edilmiştir.

Suner (1980), çalışma alanında Mesozoyik yaşta metamorfik temel üzerine diskordans olarak Alt Eosen denizel kireçtaşları ile yaygın Alt-Orta Miyosen yaşta çökellerin geldiğini ve bunların da üzerine diskordans olarak gölsel kökenli çökellerin yer aldığını belirtmiştir.

Anonim (1981), tarafından Kütahya ve Köprüören Ovaları'nda yer alan birimlerin yeraltı suyu taşıyan formasyonların hidrojeolojik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada yüzey, kaynak ve yeraltı sularının su kimyası analiz yaptırarak sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre akarsular oldukça bazik ($\text{pH} > 8,2$), orta tuzlu, kalsiyum bikarbonatlı ve düşük klorürlü olduğu belirlenmiştir. Kimyasal olarak her türlü sulama amaçlarına uygun olan akarsuların sulama sınıfının C_2S_1 olduğu tespit edilmiştir. Kaynak sularının akarsularla aynı kimyasal özellikleri taşıdığı belirlenmiştir. Kimyasal olarak içmeye ve her türlü sulama amacına uygun sular olduğu tespit edilmiştir. Sığ ve sondaj kuyuları sularının kimyasal analiz sonuçları akarsu ve kaynaklara son derece benzerliği ve genel olarak içme ve sulamaya uygun olduğu belirlenmiştir. Ovanın güney kenarı boyunca açılan sondaj kuyularında 90 ile 150 m arasında kalınlığa sahip olan alüvyon ve baz akım analizlerinden yola çıkılarak yeraltı suyu bilançosu hesaplanmış ve emniyetli işletme rezervi belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, boşalımın %85'inin yeraltı suyundan emniyetle alınacağı kabul edilerek, ovanın yıllık emniyetli verimi $62 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak belirlenmiştir.

Konak'a göre (1982), Sarıcasu Formasyonu yer yer klorit-muskovit-kuvars şist, kuvarsit, fillit, kalkşist ve kristalize kireçtaşı mercekleri bulunduran bu litoloji topluluğu tektonik etkiler sonucu yersel olarak milonitleştiği belirtmiştir.

Baş (1983) çalışmasında, Kütahya çevresindeki ilk Tersiyer birimlerinin Alt Eosen yaşta denizel kireçtaşlarından oluştuğunu belirtmiştir. Orta Miyosen'in graben oluşumları ile başladığını, akarsu çökellerinin ilk devrede etkili olduğunu, daha sonra gölsel kömür içeren marnların geliştiğini açıklamaya çalışmıştır.

Şaroğlu vd. (1987, 1992), Kütahya Fay Zonu (KFZ), Batı Anadolu Açılma Bölgesi'nin kuzeydoğu sınırında, $\text{K}60^\circ\text{B}$ doğrultusunda yaklaşık 40 km boyunca uzanan ve belirgin çöküntü morfolojisi sunan Kütahya Ovası'nın güneyini sınırlandığı belirtmişlerdir.

Koçyiğit ve Bozkurt (1997), Bozkurt (2001, 2003) ve Gürer vd. (2005) yaptıkları çalışmalarında KFZ'nin ana karakteristiğinin normal fay olduğu fikrini beyan etmişlerdir.

Barka ve Reilinger (1997)'da GPS hızları ve sismik aktivite verilerini değerlendirerek yaptıkları çalışmalarında, KFZ'ndan Batı Anadolu'daki başlıca faylanmalardan biri olarak söz etmekte ve aktif bir fay olarak nitelendirmektedirler.

Anonim (2003)'in Kütahya Ovası karst Hidrojeolojisi ara raporunda ovanın su kimyası ve jeolojik birimlerinin hidrojeolojik özellikleri ile ilgili çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucu Kütahya Ovası'nın hidrojeoloji birimleri ayrılıp yeraltı suyu taşıyan jeolojik birimlerinin hidrolik özellikleri belirlenmiştir. Kütahya Ovası'nın beslenimi, yapılan hesaplamalarla $5,56 \times 10^6$ m³/yıl olarak bulunmuştur. Bu miktarın %80'i emniyetli işletme rezervi olarak çekildiği takdirde sulama mevsimi boyunca $4,44 \times 10^6$ m³/yıl yeraltı suyunun emniyetli olarak çekilebileceği belirlenmiştir. Jeoloji ve hidrojeoloji çalışmalarının yanı sıra su kimyası analizleri yapmak üzere Kütahya Ovası'nda yer alan kuyulardan yeraltı suyu örnekleri alınmıştır. Yapılan su kimyası analizleri sonuçlarına göre değerlendirmelerde bulunulmuştur. İnceleme alanındaki suların sodyum yüzdesi ve elektriksel iletkenlik değerlerine göre Wilcox diyagramı kullanılarak Kütahya Ovasındaki suların "çok iyi - iyi" ile "iyi - kullanılabilir" arasında olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramında inceleme alanı yeraltı suları SAR ve EC değerlerine göre C₂S₁-C₃S₁ alanlarında olduğundan suların her türlü sulamada kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Kavaf ve Nalbantçılar (2007), çalışmalarında ovanın jeoloji, hidrojeoloji, su kimyası, yüzey ve yeraltı suyu kirliliği değerlendirme yapmıştır. Çalışma sonucunda yeraltı suyu bakımından kirlilik riski taşıyan bölgeler İnköy dolayında bulunan katı atık sahası, Kütahya merkezde bulunan sanayi siteleri, Çalca ile Çöğürler çevresinde bulunan fabrikalar ve Alayunt, Siner, Zira ve İhsaniyede bulunan endüstriyel aktiviteler ve tarımsal faaliyetlerden dolayı kirlilik açısından risk taşıdığı belirlenmiştir. Kütahya Ovası'ndaki çalışmalarında su kalitesi ve kirliliğini araştırmışlar ve bu çalışma sonucunda, tüm formasyonlarda arsenik derişimlerinin normal değerlerin üzerinde

olduğunu, Kütahya Formasyonunda aşırı yüksek olduğunu, ayrıca Kütahya Ovası'nda Ag, Cd, Pb ve Zn derişimlerinin de yüksek olduğunu göstermişlerdir.

Yüce vd. (2006) yaptıkları çalışmalarında Porsuk Çayı'nın beslenme alanındaki atık su ve Kütahya civarında bulunan azot gübre, şeker pancarı, manyezit fabrikaları tarafından kirletildiği belirlenmiştir. Şeker fabrikasının atık suyu Felent Çayı'na boşalmaktadır ve biyolojik oksijen ihtiyacı (BOD) 19,95 mg/l'dir. Kütahya şehrinin mezbahası da yetersiz atık su arıtma tesisinden çıkan atık suyunu Felent Çayı'na boşaltmaktadır.

Özburan (2009), tez çalışmasında Kütahya Ovası ve çevresinde daha ayrıntılı jeoloji çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmasında alanın temel biriminin başlıca mikasıstlerden oluştuğu belirlenmiştir.

Altınok vd. (2012), 'Kütahya Fay Zonu'nun Holosen Aktivitesi' adlı makalesinde Kütahya Fayı Kütahya Ovası'nın kuzey bloğunun düştüğü normal fay geometrisine sahip 5 ayrı uzanımdan oluştuğunu ve K50°-70°B doğrultusunda yaklaşık 22 km uzunluğa sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu doktora tezinin amacına ulaşmak için gerekli çalışmalar arazi, laboratuvar ve büro çalışmaları olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

4.1 Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmaları Mayıs 2013 ile Ağustos 2015 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Yüzey ve yeraltı sularında Multi 350i-çok parametrelili cihaz kullanılarak yerinde fizikokimyasal parametreler hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH), elektriksel iletkenlik (EC) ve sıcaklık (T°) ölçülmüştür. Felent ve Porsuk Çaylarından yüzeysuyu örnekleri ve özel ve resmi (DSİ) sondaj kuyularından ise yeraltı suyu örnekleri toplanmıştır.

Felent ve Porsuk Çayları dere yatağı malzemesinin hidrolik iletkenlik (K) değerlerini belirlemek amacıyla her çayın 6 değişik noktasından toprak örnekleri alınmıştır.

Kütahya alüvyon ovası ve dolayından, Felent ve Porsuk Çaylarının her birinden 3 adet olmak üzere akım yolu boyunca toplam 6 akarsu örneği ve kuyulardan 21 yeraltı suyu örneği Aralık 2013 ve Haziran 2014'de olmak üzere iki dönem alınmıştır.

Su örnekleri 0,45 mikron, tek kullanımlık kapsül filtre kullanılarak filtrelenmiş, ana iyonlar, iz element ve δD ve $\delta^{18}O$ izotop analizleri için 250 ml'lik ve trityum (3H) analizleri için 1 litrelik çift kapaklı polietilen şişeler kullanılmıştır. Şişeler ve kapakları her örnekleme sırasında örneğin alındığı su ile üç defa çalkalanmış ve üzerinde hava kalmayacak şekilde tamamen doldurulmuştur. Örneklerin laboratuvar ortamına ulaşmaya kadar korunması amacıyla 100 ml örnek için $pH < 2$ oluncaya kadar %65'lik HNO_3 eklenmiştir.

İnceleme alanında yeraltı suyu haritası ve akım yönünü belirlemek üzere yeraltı su seviye ölçümleri elektrikli su seviye ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

4.2 Laboratuvar Çalışmaları

Su kimyası ve duraysız izotop (Tritiyum, ^3H) analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarında DIONEXLC25 ve KS-1000 yüksek performanslı iyon kromatografi sistemi otomatik asit titrasyon büreti ve sistemi kullanılmış; ölçümler Amerikan Halk Sağlığı Örgütü (Anonymous 1989) tarafından önerilen standart yöntemlerle gerçekleştirilmiştir.

İnceleme alanında iki döneme ait 2013 yılı Aralık ve 2014 yılı Haziran aylarında inceleme alanı içerisindeki önemli görülen bazı su noktalarında 19 adet duraylı izotop ($\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$) analizleri Hacettepe Üniversitesi Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) laboratuvarında yaptırılmıştır.

Tane boyu analizlerine dayalı olarak Felent ve Porsuk Çayları dere yatağından alınan zemin örneklerinden Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendislik bölümü zemin mekaniği laboratuvarında ıslak elek analiz kullanılarak, amprik formül yardımıyla geçirgenlik katsayısı hesaplanmıştır. Örnekler etüvde 24 saat kalacak şekilde etüv sıcaklığı 105°C 'ye ayarlanarak bekletilmiştir.

4.3 Büro Çalışmaları

Büro çalışmalarına başlamadan önce, çalışma alanı hakkında detaylı bir araştırma yapmak üzere Kütahya Havzası ve çevresi ile ilgili literatür araştırması yapmış olup, ilgili tezler ve raporlar incelenerek gerekli bilgiler derlenmiştir.

Kütahya ilinde yağışların 1975-2014 döneminde değişimini incelemek amacıyla Türkiye Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden yağış verileri alınmıştır. İnceleme alanında açılan kuyuların logları Devlet Su İşleri (DSİ)'den alınmıştır.

Bu çalışmada sunulan önemli şekillerden bazılarını (Piper ve Schoeller diyagramları) oluşturmak ve su tiplerini belirlemek için Aquachem 5.1 yazılımı kullanılmıştır. İyonların analitik hata payları iyon dengesi hesabı ile test edilmiştir.

İnceleme alanındaki kaynak, yüzey ve yeraltı sularının doygunluk indisi hesaplamaları PhreeqC Interaktif programı ile yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Arazi sonrası büro çalışmaları ile jeoloji ve diğer haritalar ArcGIS 10.2.2 çizim programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Kütahya Ovası yağış ve buharlaşma karakteristiğinin belirlenmesi amacıyla havza içerisinde bulunan Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonu verilerinden yararlanılmıştır. Potansiyel (Etp) ve gerçek (Etr) buharlaşma-terleme değerleri Turc, Penman ve Thornthwaite yöntemleri ile hesaplanmıştır.

Toprak özelliklerinin, modelleme alanının hidrolojik özellikleri ve yüzeysel akış özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, hidrolojik toprak grupları DSI tarafından açılan sondaj kuyu loglarındaki tanımlamaya göre gruplandırılmıştır. İnceleme alanında modelleme alanının yeraltı sularının yağıştan beslenme miktarını cm/yıl olarak hesaplamak için Williams ve Kissel (1991) yöntemi kullanılmıştır. Kuyu loglarının en üst kuşağında yer alan toprak tipine göre hidrolojik toprak grupları belirtilerek noktasal olarak net beslenme miktarı hesaplanıp, alansal beslenme dağılım haritasının oluşturulmasında ise ArcGIS 10.2.2 coğrafi veri tabanı yazılımı içinde bulunan Ağırlıklandırılmış Uzaklığın Tersisi (IDW) yöntemi kullanılmıştır.

Kütahya ve çevre köylerine hem evsel hem de endüstriyel kullanım için su sağlayan birimlerin akifer özelliklerini belirlemek için kuyularda sondaj sırasında yapılan pompa testi verileri kullanılmıştır. Pompa testi verileri Theis (1935) ve Cooper-Jacob (1946) yöntemleri ile değerlendirilmiş ve akiferlerin, T (Transmissivite) ve K (Hidrolik iletkenlik) parametreleri Aquifer Test 4.5 bilgisayar yazılım programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Çalışma, başlangıçta inceleme alanına ait topografik haritalar ile önceden hazırlanmış tüm jeolojik ve hidrojeolojik haritaların detaylı olarak incelemesi, meteorolojik verilerin elde edilmesi, eksiklerin tamamlanması ve bunlardan model için gerekli olanların ayırt edilip modele uygun hale getirilmesi şeklinde gelişmiştir. Daha sonra, bu veriler ışığında çalışma alanının genel stratigrafisi ve hidrojeolojik bilgileri hazırlanmıştır. En son aşamada ise, tüm bu veriler Yeraltı suyu Modelleme Sisteminde MODFLOW paket programına aktararak alüvyal sığ akiferin iki boyutlu (2-B) modeli hazırlanmış ve akiferin durumu irdelenmiştir.

Kütahya Ovası alüvyon akiferinde, yeraltı suyu akımı ve potansiyelinin belirlenmesi amacıyla GMS (Processing MODFLOW for Windows) programı kullanılarak yeraltı suyu akım modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak kavramsal model oluşturulmuş, sonra programa geometri, model ağı, hidrolik parametreler, sınır koşulları, stresler ve su seviyeleri aktarılmıştır. Model kalibrasyonu deneme yanılma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model çalıştırılarak gözlenen değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılmış ve model parametrelerinin kalibrasyonu yapılarak model sonuçlarının gözlenen veriler ile uyumu sağlanmıştır. Modelin hassasiyeti, kalibre edilen değerler ± 20 , ± 40 ve ± 60 oranlarında değiştirerek yapılmıştır.

5. JEOLJİ ÇALIŞMALARI

5.1 Stratigrafi

Saner (1980)'den elde edilen bilgilere göre çalışma alanının ve çevresin jeolojisi değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir. İnceleme alanında ilk Mesozoyik çökelimi Alt Jura'da başlamış, Liyas yaşlı kumtaşları topografyanın çukurlarını doldurmuştur. Orta-Üşt Jura ve Alt Kretase'de deniz ilerlemiş, Alt Jura'da kara halinde olan alanları kaplamıştır. Bu evrede havzanın doğu ve kuzeydoğu kesimi, batı kesimine göre daha derin özellikler göstermektedir. Üşt Kretase'de havza derinleşmiş ve her kesimde filiş çökelmiştir. Üşt Kretase'nin sonlarına doğru başlayan orojenik etkinlikle havzanın güneyi yükselerek su yüzüne çıkmış ve doğu-batı uzanımlı bir sahil çizgisi oluşmuştur. Paleosen'de regresyonun devam etmesiyle bu sahil çizgisi daha kuzeye gerilemiş, ancak havzanın kuzey kesiminde deniz devam etmiştir. Alt Eosen'de yeni bir transgresyon olmuşsa da derinleşme olmaksızın Üşt Eosen-Oligosen'de yeniden regresyon olmuş, bölge o zamandan günümüze kadar karasal durumunu korumuştur. Miyosen'de ve Kuvaterner'de özellikle tektonik çöküntü alanlarında bazı göller gelişmiştir.

Kavaf ve Nalbantçılar (2007) çalışmalarında, alüvyonun ovada ve dere yataklarında biriktiği ve Kütahya Formasyonu, Gökçeyayla Formasyonu, Kıyır Formasyonu ve Çöğürler Kompleksi tarafından çevrildiğini belirtmişlerdir.

Doktora tez çalışması kapsamında yer alan birimlerin jeolojik özelliklerinin tanımlanmasında (Anonim 1981, 2003) ve Özburan (2009) tarafından yapılan çalışmalar esas alınmıştır. Anonim (2003), Kütahya İli ve batısını kapsayan 1472 ha arazinin sulamasını sağlayan Kütahya Sulaması sol ana kanalının su ihtiyacının yeraltı suyundan temin edilebilmesi amacı ile çalışmalar yapmışlardır. Kütahya Ovası ve çevresinde, Paleozoyik, Mesozoyik ve Senozoyik dönemlerine ait birimler yüzeylemektedir (EK 1).

Tabanda temel kayaları, şist ve mermerden oluşan metamorfik birimler ve bunların üzerine tektonik dokanakla yerleşmiş ofiyolitik kayalar bulunmaktadır. Bunların da

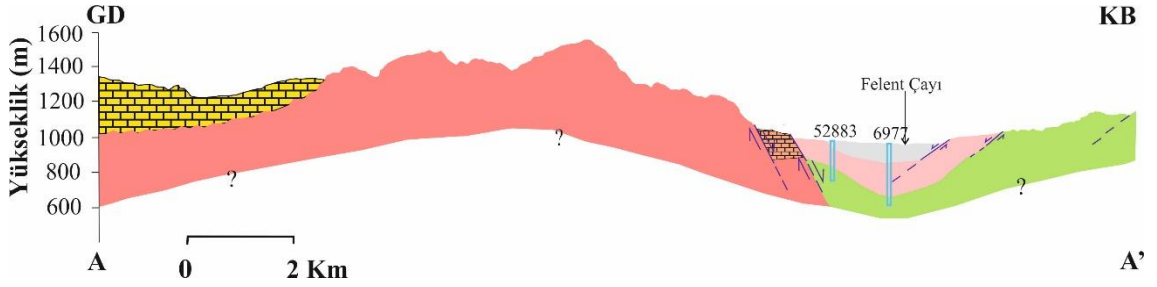
zerinde ise diskordansla duran, kireçtaşları ve tf/tüfitler çalışma alanının kuzey doğu, güney doğu ve doğusunda bulunmaktadır. Kütahya Ovası'nın içinde ise daha genç flüviyal çökeller graben dolgusu olarak bulunmaktadır (EK 1). Çalışma alanının genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti şekil 5.1'de verilmiştir.



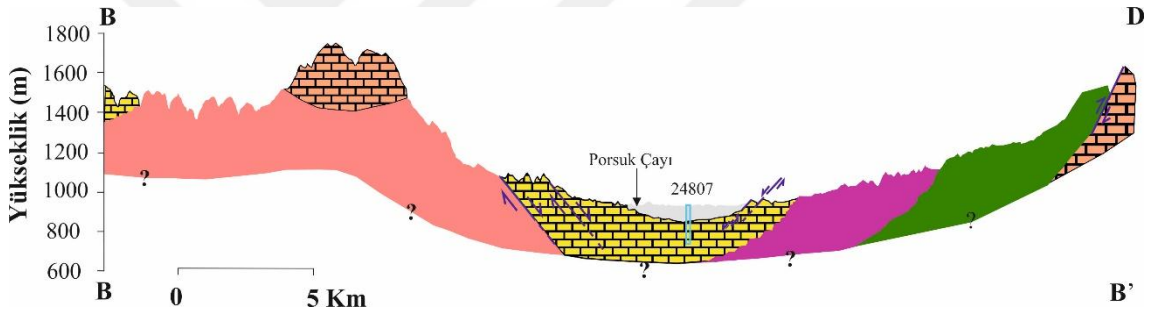
Üst Sistem	Sistem	Seri	Formasyon	Litolojik Simge	Litolojik Tanımlama
SENOZOYİK	Kuvaterner	Holosen	Alüvyon		Çakıl, Kum, Kil, Silt
		Pliöstosen	Parmakören		Çakıltası, Kumtaşı, Kilitaşı, Çamurtaşı
	Neojen	Pliyosen	Emet		Kireçtaşı, Kili kireçtaşı, Marnlı kireçtaşı
		Alt Miyosen	Sabuncupınarı		Tüf, Tüfit
		Üst Kretase	Çöğürler Karmaşığı		Perdotit, Serpentin
MESOZOYİK	Kretase	Alt Kretase	Ovacık Melanjı		Şeyl, Sleyt, Kalkşist, Mavişist
		Üst Kretase	Kınık Ofiyoliti		Perdotit, Serpentin
	PERMİYEN	Üst Permian - Alt Triyas	Arıkaya		Mermer
			Sarıcasu		Şist, kalkşist, Kuvarşist, Kristalize kireçtaşı

Şekil 5.1 Çalışma alanının genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti (Anonim 2003 ve Özburan 2009'dan değiştirilerek alınmıştır), ölçeksiz

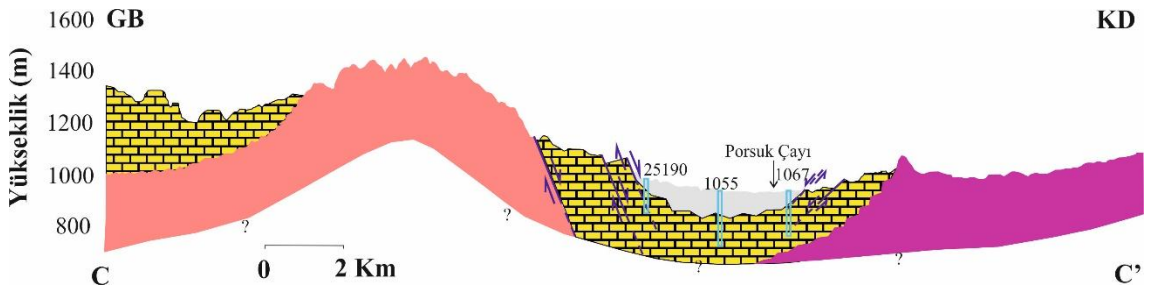
Çalışma alanının jeoloji haritası EK 1’de verilmiş olup, jeoloji haritasından yararlanılarak ovanın üç farklı yerinden çizilen jeolojik enine kesitler şekil 5.2-5.4 verilmiştir.



Şekil 5.2 A-A’ enine jeolojik kesiti (birimlerin açıklaması EK 1’de verilmiştir)



Şekil 5.3 B-B’ enine jeolojik kesiti (birimlerin açıklaması EK 1’de verilmiştir)



Şekil 5.4 C-C’ enine jeolojik kesiti (birimlerin açıklaması EK 1’de verilmiştir)

5.1.1 Sarıcası Formasyonu

Kaya (1972)'nin "İkibaşlı Formasyonu" adıyla tanımladığı bu litoloji topluluğunu Akdeniz ve Konak (1979) Sarıcasu Birimi olarak incelemişler ve Orta-Üst Triyas çökellerine çakıl verdiğini saptamışlardır. Sarıcasu Formasyonu içinde türü tayin edilemeyecek derecede kristalize olmuş krinoid ve alg parçaları dışında herhangi bir fosile rastlanmamıştır. Bölgesel deneştirmeyeyle birimin yaşı Üst Paleozoyik-Alt Triyas olarak tahmin edilmiştir

Çalışma alanında en eski formasyonun Kütahya Ovası'nın güney ve kuzeyinde şist serisi olarak yer aldığını Devlet Su İşleri (1981) çalışmasında belirlemiştir. Paleozoyik yaşta olan bu seri üzerinde güneydoğu kuzeybatı doğrultusunda muhtemelen yine Paleozoyik yaşlı kristalize kireçtaşları yer almaktadır.

Konak'a (1982) göre inceleme alanının güneyinde yaygın olarak izlenen birimin düşük dereceli metamorfizma özellikleri sunan Sarıcasu birimi olduğunu belirtmiş ve bunların değişen mineral bileşenlerine göre muskovit-kuvars şist, muskovit-albit kuvars şist ve kloritmuskovit-albit şist olarak tanımlanmıştır.

Anonim (2003)'in çalışmasında inceleme alanındaki en yaşlı birim olan Sarıcasu biriminin alt dokanağı gözlenememiştir. Arıkaya birimi ile olan üst dokanağı yanal ve düşey yönde geçişlidir. Kirli beyaz, bej ve yeşilin değişik tonlarında renkleri sunan Sarıcasu birimi kayalar ipeğimsi ve sedefimsi parlak dış yüzleriyle, biri belirgin olmak üzere iki yönde gelişmiş çizgisellik göstermeleriyle tanımlanırlar. Diğer ayırtıcı özelliklerinden biri de milimetre ve santimetre boyutunda, göz şekilli albit ve kuvars porfiroblastları bulundurmalarıdır. Anonim (2003)'te yayımladığı Kütahya Ovası karst hidrojeolojisi ara raporunda arazi eğrilerini süperpozisyon metodu, Cagniard yardımcı abakları ile değerlendirilmiş, inceleme alanındaki formasyonların jeolojik ve litolojik özellikleri gözlenerek jeofizik kesitler çıkarılmıştır.

Özburan (2009)'un tez çalışmasında temel birimin, başlıca mikaşistlerden oluştuğu belirlenmiştir. Bunlar çalışma alanındaki en yaşlı birim olup, gözlenebilen en alt kesimleri şistlerle başlamaktadır. Birimin üst seviyelerinde, değişik ölçeklerde gri, grimsi beyaz renklerde rekristalize kireçtaşı, mermer blokları gözlenmektedir. Sarıcasu Formasyonu içerisinde, metamorfize olmuş hem kaba, hem de ince kırıntılılar bulunması, birimin çökmesi sırasında kırıntı egemen bir çökme ortamı olduğunu ve dönemsel olarak da bunu sağlayan enerji miktarının farklılaştığını gösterdiği belirlenmiştir. Karbonatlı, killi düzeylerin de bulunması çökme ortamının ritmik olarak sıklaşıp derinleştiğine ve kimyasal açıdan karbonat çökeline elverişli olduğuna işaret etmiştir.

Çalışma alanının güney ve güneybatı kesimlerinde geniş alanlarda yüzeyleyen birim, başlıca Yellice Dağı ve eteklerinde gözlenmektedir. Koyu renklerin hakim olduğu şistler, çoğunlukla kahverengi tonlarındadır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Sarıcasu birimine ait mikaşistlerden bir görünüm (Yellice dağ civarından çekilmiştir)

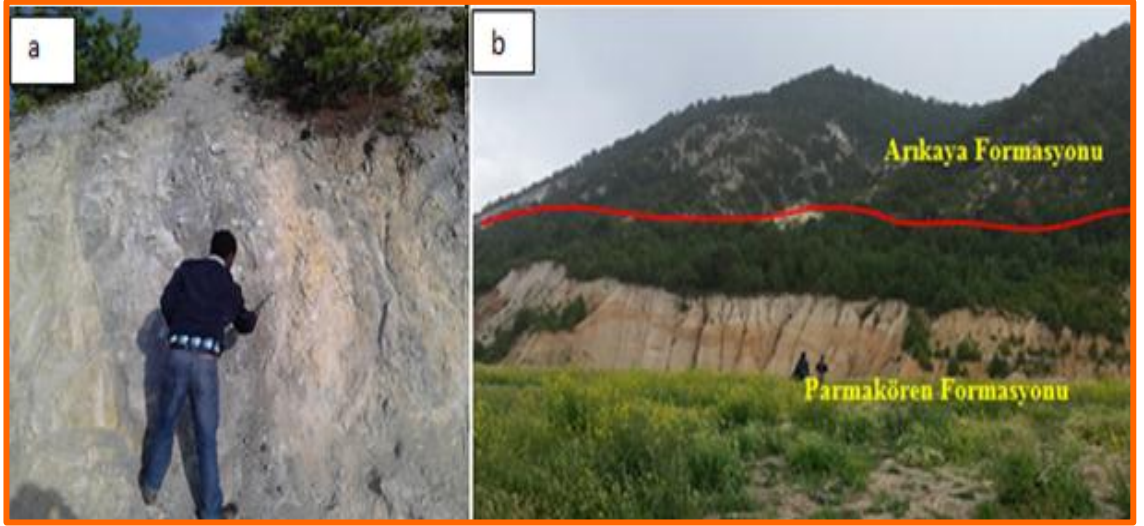
5.1.2 Arıkaya Formasyonu

Kütahya ve çevresinde temel kayaları, tabanda şistler ve onun üzerinde uyumlu olarak bulunan mermerler ile temsil edilmektedir (Şekil 5.6).

Akdeniz ve Konak (1979) çalışmalarında Sarıcasu birimi ile olan alt dokanağının yanal ve düşey geçişli olması nedeni ile Arıkaya biriminin yaşı Üst Paleozoyik-Alt Triyas olarak kabul edilmektedir.

Anonim (2003)'te yaptığı çalışmada bu birimin beyaz, gri renklerde kristalize, bazen dolomitleşmiş yersel breşik dokulu, sert, kırılğan, düzensiz kırılmalı, orta kalın katmanlı, seyrek lamine ve kuvvetli gelişmiş kaya dilimine sahip olduğunu belirlemiştir. Birim tek yönlü gelişmiş eklemleri, şiddetli kıvrımları ve karstik topografyası ile belirgindir. Arıkaya Formasyonun, Sarıcasu Formasyonu ile olan alt dokanağı yanal ve düşey yönde geçişlidir. Çöğürler Karmaşığı ile olan üst dokanağı ise uyumsuzdur.

Özburan (2009)'ın tez çalışmasında kristalize kireçtaşı, mermer olarak tanımlanan birim, gri, bej ya da beyazımsı renklerde, yer yer dolomitleşmiş, fay zonuna yakın kesimlerde yoğun makaslanmış ve breşik dokulu olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.6.a. Arıkaya Formasyonunun görünümü, b. Arıkaya Formasyonunun breşleşmiş kısmının Parmakören Formasyonu ile olan dokanağı

5.1.3 Çöğürler Karmaşığı

Anonim (1981)'e göre Çöğürler Karmaşığı; kıltaşı-çamurtaşı, türbiditik kumtaşı ve çakıltaşı, matriksli kireçtaşı, ultramafik, volkanosedimanter, mavi şist bloklu, ofiyolitli olistostromla temsil edilmektedir. Ofiyolitler İnköy batısında küçük bir alanda yüzlek vermektedir.

Anonim (2003)'nin çalışmasında bu birimin Arıkaya birimi ile olan alt dokanağı, Emet ve Parmakören birimi ile olan üst dokanağının uyumsuz olduğu belirlenmiştir. Birim alt kısımlarında sleyt, kalkışist, kristalize kireçtaşı ardalanmalı olarak gözlenmiştir. Sleytler kahve, yeşilimsi kahve, grimsi kahverenkli ve ince yapraklanmalıdır. Kalkışistler sarı grimsi, sarı renkli, ince-orta yapraklanmalıdır. Kristalize kireçtaşları, koyu gri renkli, lineasyonlu, eklemlili, orta katmanlı, yer yer katmanlanmaya koşut yapraklanma gelişmiştir. İstifin üst kısımlarına doğru metamorfizma etkileri azalmaktadır. Sleyt, kıltaşı, silttaşı türü ince kırıntılılar egemendir. Bunlar genellikle yeşilimsi, gri ve kahve renkli, ince katmanlı olup, ara katkı olarak çakıltaşı içermektedir. Birimin üst kısımlarında olistostromal çakıltaşları ile olistolitli düzeyler gözlenmiştir. Çakıl ve bloklar, kristalize kireçtaşı ve ofiyolit kökenlidir. Çöğürler Karmaşığının yaşı

stratigrafik ilişkilere ve eski çalışmalara dayanılarak Üst Kretase-Alt Paleosen olarak kabul edilmiştir (Şekil 5.7).

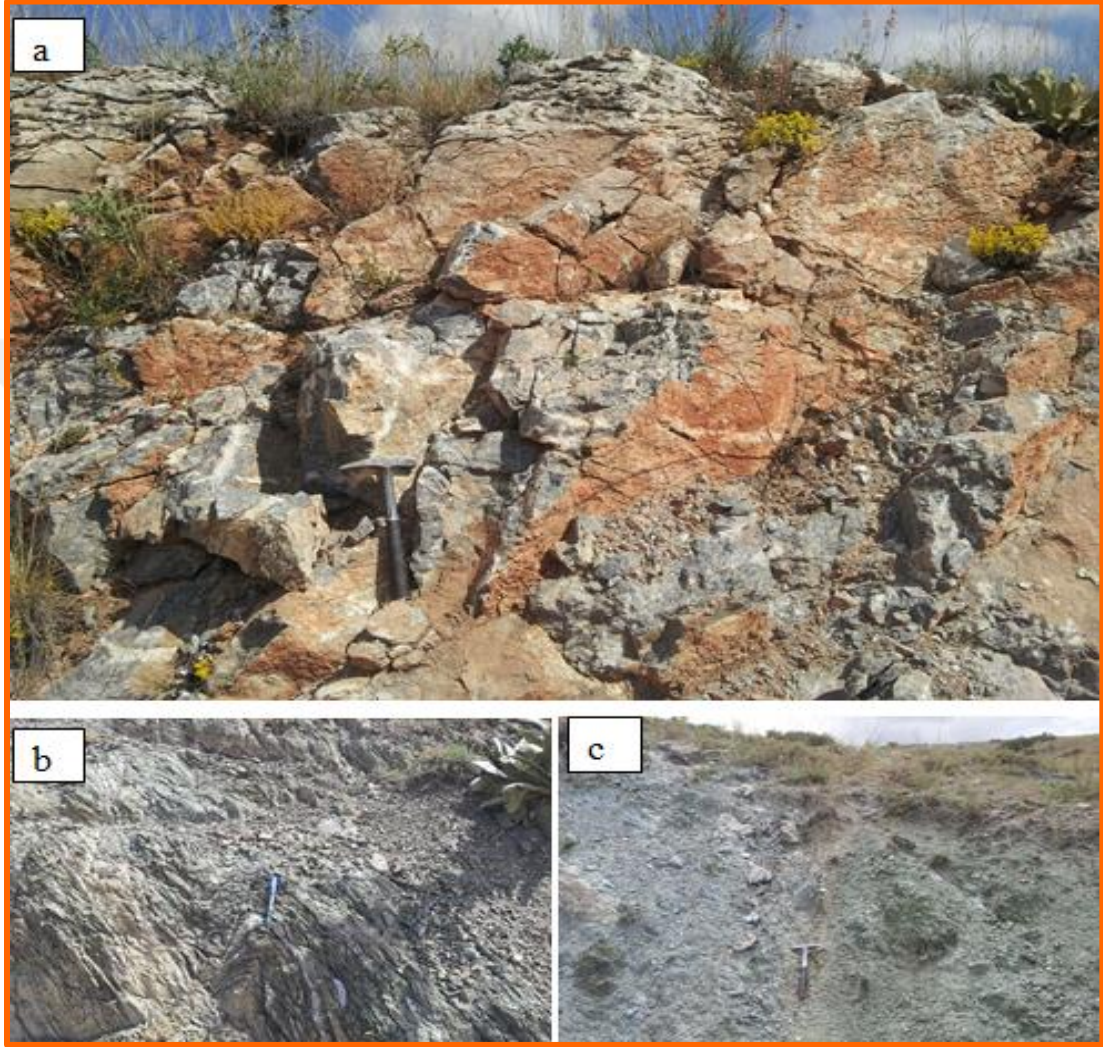
Özburan (2009)'ın tez çalışmasında, Çöğürler Karmaşığı Ovacık Melanji ve Kınık Ofiyoliti olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Ovacık Melanji, türbiditik kumtaşı ve çakıltası, yeşil-sarı renkli, ince katmanlı-laminalı, şeyl, silttaşı-kiltaşı-çamurtaşı-tüfit-litarent gibi makaslanmış bir hamur içinde mavişist blokları ve ofiyolitik kayaç parçaları içeren, çoğunlukla düzensiz dağılmış, istif görüntüsü sunan bir karmaşık olduğu belirlenmiştir. Ova içinde bulunan kuyu loglarına göre birim, yaklaşık 50 m kalınlıktaki genç alüvyon sedimanları ve 100 m kalınlıktaki Pleyistosen yaşlı Parmakören Formasyonu altında yer almaktadır. Kınık ofiyolitinin ise başlıca peridotit, serpantinit, spilitik diyabaz, harzburgit ve serpantinleşmiş harzburgitlerden oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 5.7 Çöğürler Karmaşığı (Enne Baraj Gölü'nün doğusundan çekilmiştir)

Ovacık Melanji: Birim, kumtaşı ve çakıltası, yeşil-sarı renkli, ince katmanlı-laminalı, şeyl silttaşı-kiltaşı-çamurtaşı-tüfit-litarenit gibi makaslanmış bir hamur içinde mavi şist

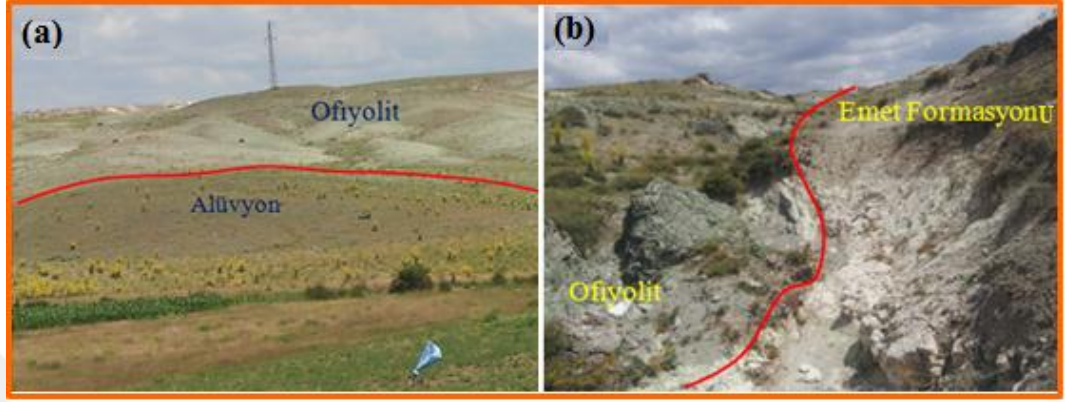
blokları ve ofiyolitik kayaç parçaları içermektedir (Şekil 5.8). Sleytler kahve, yeşilimsi kahve, grimsi kahverenkli ve ince yapraklanmalıdır. Kalkşistler sarı grimsi, sarı renkli, ince-orta yapraklanmalıdır.



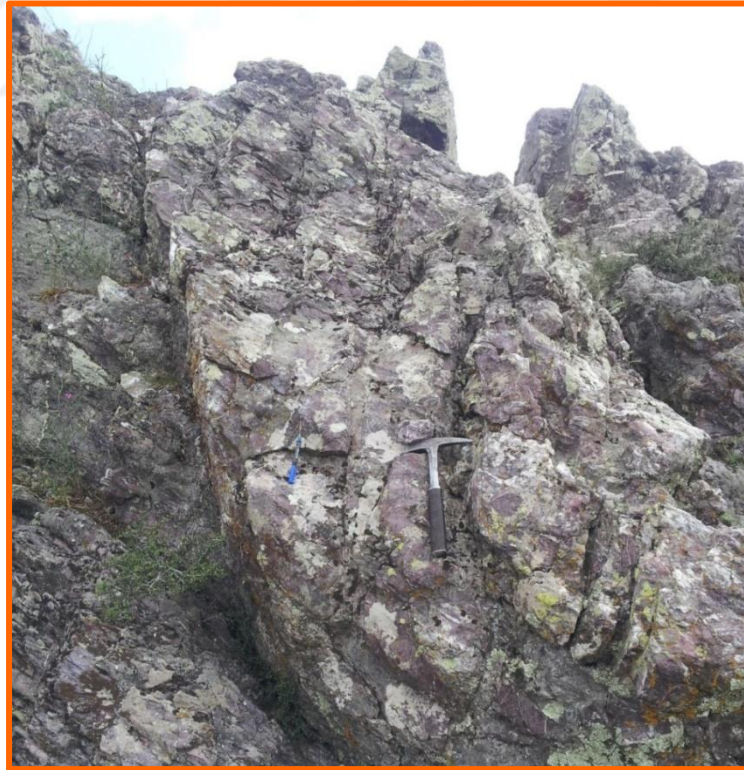
Şekil 5.8 Kütahya -Yoncalı karayolunda Dumlupınarı Üniversitesi doğusunda Çöğürler Karmaşığı'nda: a. Mavişist blokları görünümü, b. Folyasyon görünümü ve c. Ovacık melanjından bir görünüm

Ofiyolitler: Kavaf'ın (2007) çalışmasında Kınık Ofiyoliti olarak anlatılan birimin yaşı ise Paleosen-Eosen olarak ifade edilmiştir. Ofiyolitik birimler İnkoy Köyü'nün kuzeyinde ve çalışma alanının doğusunda yüzeylemiştir. Kınık Ofiyolitinin başlıca peridotit ve serpantinitten oluşmaktadır (Şekil 5.9-5.10). Ofiyolitik melanjin yerleşimi tektonik dokanakla (bindirme) olmuştur (EK 1). Ofiyolitler İnkoy batısında küçük bir

alandanda yüzlek vermekte olup, arzai çalışma sırasında çekilen fotoğraflarında ofiyolitlerin Alüvyon ile olan dokanağı (Şekil 5.9.a) ve Ofiyolitlerin üzerine gelen Emet Formasyonu ile olan dokanağı görölmektedir (Şekil 5.9.b).



Şekil 5.9.a. Çöğürler Karmaşık'ına ait ofiyolitlerin Alüvyon ile olan dokanağı, b. Ofiyolitlerin üzerine gelen Emet Formasyonu ile olan dokanağı



Şekil 5.10 Kınık Ofiyoliti içerisinde peridotit düzeyleri (Parmakören civarından çekilmiştir)

5.1.4 Sabuncupınarı Formasyonu

Özburan (2009)'ın tez çalışmasında, çakıltası, kumtaşı, kıltaşı, tuf, tüfit, marn, killi kireçtaşı ve kireçtaşı ardalanmasından oluşan lav arakatkılı birim Sabuncupınar Formasyonu adlanması ile incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda volkanoklastik malzeme, Sabuncupınar Formasyonu'nun bir üyesi olarak Çayca Üyesi adı altında tanıtılmıştır.

Bu kalın çökel istifin tabanında, önceki çalışmalarda (Baş 1983, 1986) Civanadağ tüfü olarak tanıtılan volkanoklastik malzeme vardır. Bu volkanoklastik malzeme, Sabuncupınar Formasyonunun bir üyesi olarak Çayca Üyesi adı altında tanıtılmıştır.

Çayca Üyesi: Birim, ilk olarak Akdeniz ve Konak, (1979) tarafından Civanadağ Tüfleri olarak adlandırılmıştır. Tüfler, kirli beyaz, sarımsı, grimsi, pembemsi ve bej renklerde gözlenebilir. Arık ve Temur (2003), gümüş işletmeleri dolaylarındaki yüzleklerinde, birimin kıltaşı, kumtaşı ara seviyeleri içerdiğini, içlerinde birkaç metreyi geçmeyen lapilli ve pomza parçalarından oluşan seviyeler bulunduğunu belirtmişlerdir.

Sabuncupınarı Formasyonu inceleme alanının doğu kesimlerinde yayılım göstermektedir. Tüfler çoğunlukla masif yapılı olmakla birlikte, yer yer tabakalı yapı da da gözlenmektedir. Bu birimleri inceleme alanında en yaygın olduğu alanlar Sabuncupınarı, Çayca, Turgutlar ve Yenibosna civarındır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Kütahya-Eskişehir karayolu doğusu, Yenibosna Köyü kuzeyinde görünümlü tüfler

5.1.5 Emet Formasyonu

Anonim (1981) raporunda tüfitlerde kaba ve ince taneli, sık sık münavebeli olarak devam etmekte olup bunlar arasında da kireçtaşı bantları ile silisleşmemiş kireçtaşlarının yer aldığı belirlenmiştir. Bu çalışmaya göre Alayunt - Büyüksaka Köyleri arasında tüfitler içinde 0,5 ile 2,5 m kalınlıkta bir obsidiyen tabakası da tespit edilmiştir.

Anonim (2003)'e göre gölsel kireçtaşları alt seviyelerde, kil-marn ara katkıları içeren kumlu, killi, grimsi, beyaz, kirli beyaz, krem renkli, kalın tabakalı kireçtaşlarıdır. Genellikle yatay veya yataya yakın orta-kalın tabakalanmalı olan bu kireçtaşları, özellikle üst seviyelerine doğru, bolca sileks ve gastropod kalıntıları içermektedir. Çoğu kesimlerde silisleşmiş olan bu kireçtaşları, gastropod kavkılarının erimesi sonucu boşluklu, gözenekli bir görünüm kazanmıştır. Gölsel kireçtaşları Alt-Orta Pliyosen yaşındadır. Emet Formasyonu Kuvaterner yaşlı çökellerce uyumsuz olarak örtülmüştür.

Bu çalışmaya göre kireçtaşı, killi kireçtaşı, yer yer kıltaşı ara düzeylerinden oluşan Emet biriminde kireçtaşları beyaz, gri, krem renkli, yer yer bol gözenekli, alt kesimleri fazlaca killi, üste doğru yer yer silisifiye, orta kalın katmanlı, katmanlar yatay ve yataya çok yakındır. Killi kireçtaşları açık yeşil renkli olup birimin alt kesimlerinde daha

yaygındır. Postvolkanik silis gelimi Emet biriminin daha da belirgin bir şekilde silisifiye olmasını sağlamıştır.

Özburan (2009)'ın tez çalışmasına göre Emet birimi tabanda killi, kumlu seviyelerle başlamaktadır. Üste doğru çamurtaşı, marn, çörtlü ve silisifiye kireçtaşı ve kireçtaşı ile son bulmaktadır. Çamurtaşı düzeyleri nadiren kömür bant ve mercekleri içermektedir. Birim beyaz, kirli beyaz, sarımsı, açık gri ve bej renklerde gözlenmektedir. Killi kireçtaşları birimin taban kesimlerinde yaygın, üste doğru ise kil oranının azaldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla istifin alt kesimleri daha dayanımsız ve yumuşak, üste doğru silisifiye ve çörtlü kireçtaşlarının bulunması ve kil oranının da azalmasıyla daha dayanımlı bir görünüm sunmaktadır. Marn tabakaları ise ardalanmalı olarak istifin farklı düzeylerinde gözlenmektedir.

Çalışma alanımızda Emet Formasyonu adı altında incelenen birim, başlıca kireçtaşı ve marndan oluşan gölsel karbonatlarla temsil edilmektedir. İnceleme alanının doğusunda ve kuzey doğusunda geniş bir kısımda yer almaktadır. Yeşil renkli ve bol kırıklı ve çatlaklı yapısıyla Yenibosna civarında gözlenmektedir (Şekil 5.12). Bu çalışmaya göre kireçtaşı, killi kireçtaşı, yer yer kıltaşı ara düzeylerinden oluşan Emet Formasyonu'da kireçtaşları beyaz, gri, krem renkli, yer yer bol gözenekli, alt kesimleri fazlaca killi, üste doğru yer yer silisifiye, orta kalın katmanlı, katmanlar yatay ve yataya çok yakındır.

Kireçtaşlarının, özellikle sert düzeylerinde gözenekler olağandır. Erime boşlukları olarak nitelenebilecek bu gözenekler çoğunlukla dar olmasına rağmen çalışma alanımızda Yenibosna Köyü'nün doğusunda gözlenmektedir (Şekil 5.13).



Şekil 5.12 Yenibosna Köyü doğusunda Emet Formasyonu kireçtaşı ile tüf dokanağı

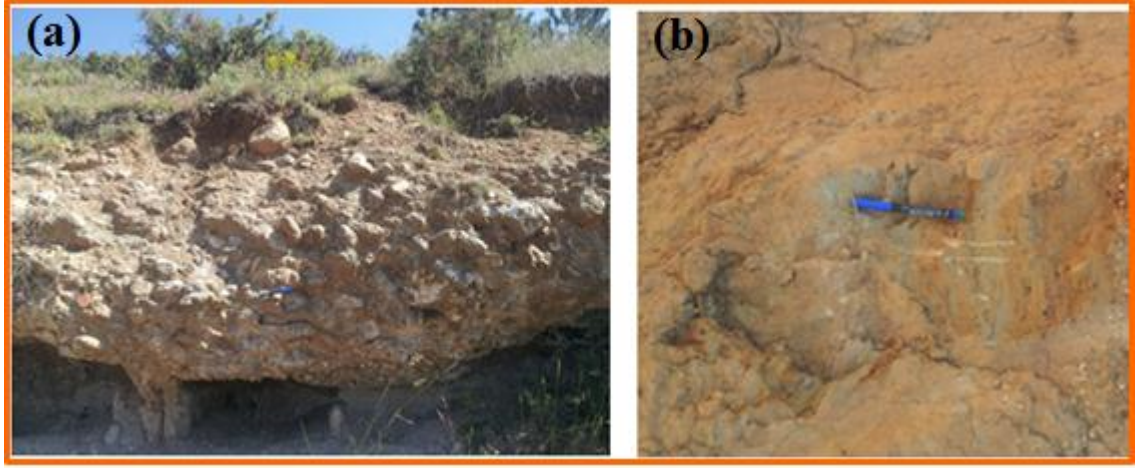


Şekil 5.13 Yenibosna Köyü doğusunda Emet Formasyonunda gözlenen karstik kireçtaşı

5.1.6 Parmakören Formasyonu

Anonim (2003) çalışmasında bu birim açık kahve, kırmızımsı renkli çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı, kiltası ardalımasından oluştuğu birimin üst kısımlarının kil çimentolu, tabana doğru ise yer yer karbonat çimentolu olduğu belirtilmiştir. Çakıltaşlarının egemen bileşimi metamorfik kayalardan türeme kuvarsit, mermer ve şistlerden oluştuğu belirlenmiştir. Parmakören Formasyonu'nun Sarıcasu, Arıkaya, Çögürler Karmaşığı ve Emet Formasyonu ile olan alt dokanağının uyumsuz olduğu belirlenmiştir.

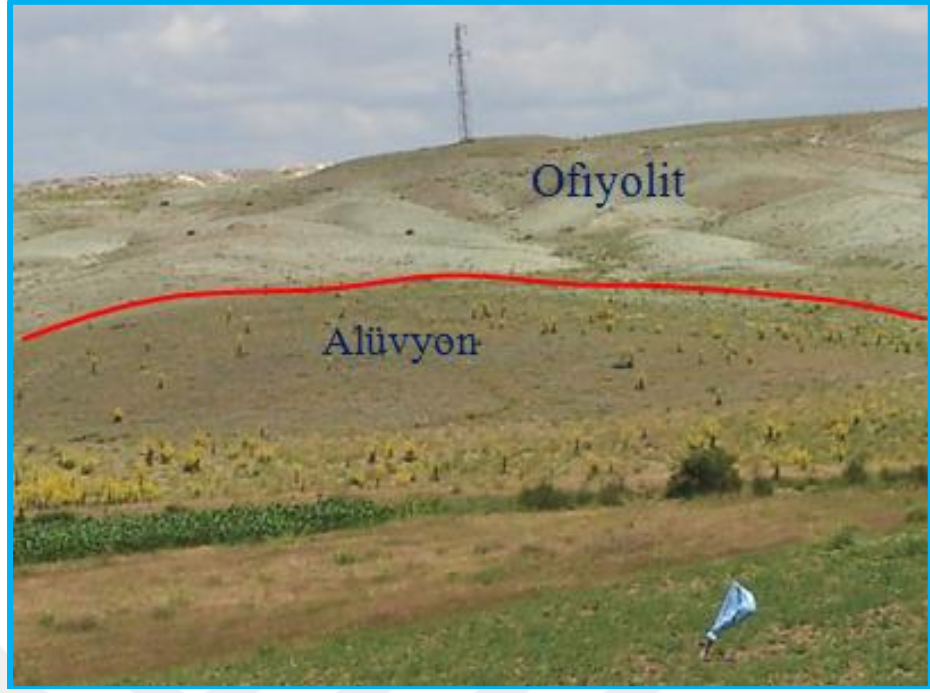
İnceleme alanının kuzey ve batısında yüzlek veren birimin en iyi gözleendiği yer Parmakören Köyü çevresidir. Açık kahve, kırmızımsı renkli çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı, kiltası ardalımasından oluşmaktadır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 Parmakören Köyü batısında Parmakören Formasyonu'nun görünümü
a. Çakıltaşı, b. Çamurtaşı

5.1.7 Alüvyon

İnceleme alanında yaş olarak en genç olan alüvyon Felent ve Porsuk çayların çevresinde oluşan eski ve yeni vadi tabanlarında, graben ovası düzlüklerinde yer alan alüvyon gevşek tutturulmuş veya tutturulmamış blok, çakıl, kum, silt ve kil boyutlu malzemelerden oluşmuştur (Şekil 5.15) (Anonim 2003). DSİ tarafında açılan sondaj kuyu loglarına göre ova boyunca kalınlığı 10 ile 100 m arasında değişmektedir. Ağaçköy ile Alayunt Köyleri arasında kalınlığı 10-20 m ve Ağaçköy-Alayunt'dan sonra Kütahya ili ile ovanın çıkışı arasında kalan alanlarda 20-100 m arasında değişmektedir. Buna ek olarak ovanın batısında Kütahya ili ile Bölcek-Akkilise arasında 6976 ve 6977 no'lu sondaj kuyularına göre kalınlığı 10-40 m'dir. Ova kenarlarında ise 5 ile 10 m arasında değişmektedir.



Şekil 5.15 Kütahya Ovası'nın kuzeyinde Çögürler Karmaşık'ına ait ofiyolitleri Alüvyon ile olan dokanağı (Parmakören civarından çekilmiştir)

5.2 Yapısal Jeoloji

Özburan (2009) çalışmasında Kütahya bölgesinin, kıtasal çarpışmada farklı evrelerin ürünlerini taşıyan kıvrımlanma, ters faylanma, gömülme ve metamorfizma gibi farklı akitvite sonucunda yeşilşist ve mavi şist zonlu metamorfitlerin de yüzeylediği bir ofiyolitik kuşağa dahil olduğu belirtilmiştir. Ofiyolitlerin yerleşme sürecine dair yansımalar olan ters faylar görülmektedir.

İnceleme alanının en önemli fayı, Kütahya şehir merkezinin yakın güneyinde BKB-DGD doğrultusunda geçen Kütahya Fay olup, belirgin bir morfoloji sunan Kütahya Ovası'nın güneyini sınırlamaktadır (Şekil 5.16). Kütahya Fay Zonu, BKB-DGD doğrultusunda uzanmakta ve çalışma alanının jeoloji haritası üzerinde yaklaşık 20 km izlenmektedir (EK 1).

Farklı araştırmacılar: örneğin Şaroğlu vd. (1987, 1992), Koçyiğit ve Bozkurt (1997) ve Bozkurt (2001) tarafından yapılan incelemeler KFZ'ni aktif normal fay olarak

haritalamış ve bu zon içerisindeki fayların Neojen yaşlı kaya topluluklarını ve Kuvaterner yaşlı çökelleri kestiğini ileri sürmüşlerdir. Gürer vd. (2005) ise KFZ'nun sol yanal bileşenli normal bir fay niteliğinde olduğunu belirlenmişlerdir.

İnceleme alanındaki Ovacık Melanjı ve Kınık Ofiyoliti arasındaki dokanağı belirleyen ters faylar ile Kınık Ofiyoliti'nde gelişen ters fay, bölgede Paleotektonik dönemde gelişmiş önemli ters faylardan olduğu ve ortalama $K55^{\circ}B$ doğrultulu olup, fayların eğimleri 50° ile 70° arasında değiştiği belirlenmiştir (Özburan 2009).

Ofiyolitik melanjın yerleşimi tektonik dokanakla (bindirme) olmuştur. Ofiyolitler Büyüksaka doğusunda küçük bir alanda yüzlek vermekte olup, bindirme fay görülmektedir. Jeoloji haritasında çizilen ters fay, ofiyolitik melanjın Arıkaya Formasyonu üzerine bindirdiğini belgelemektedir (EK 1).

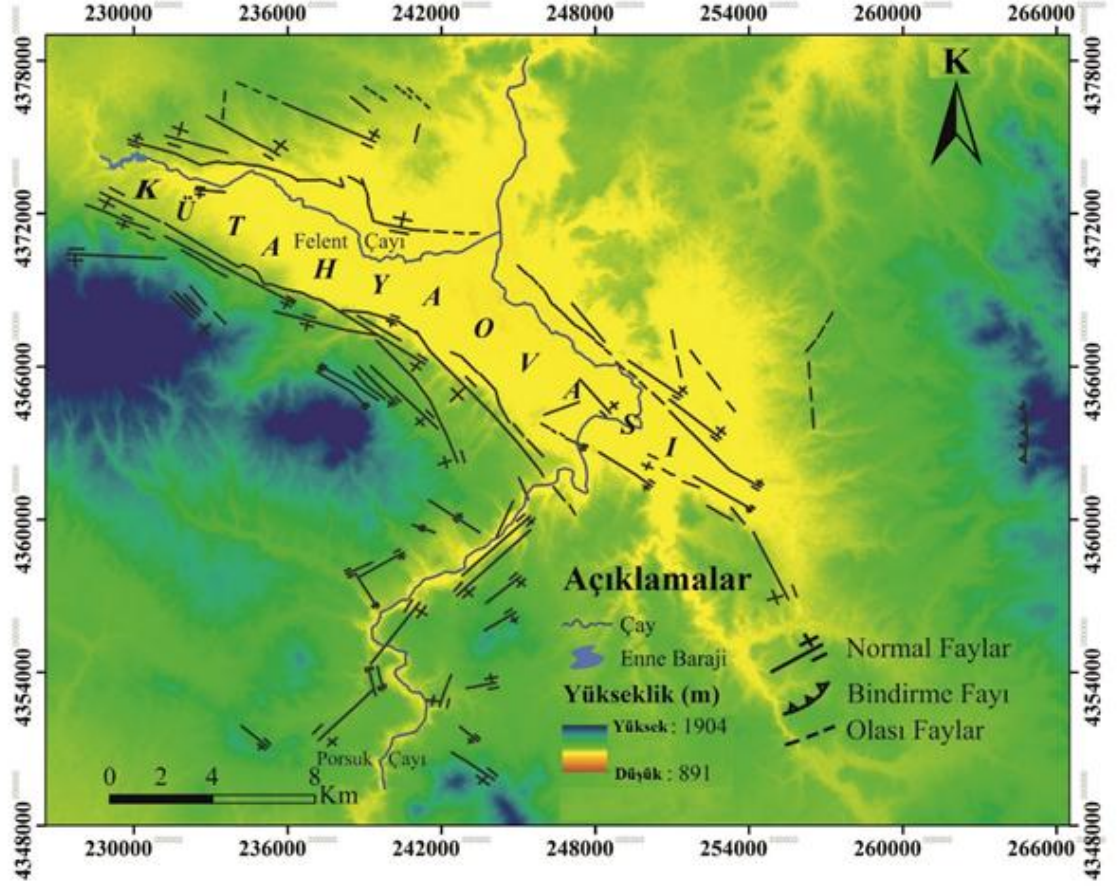
Fay, fay zonu ve kırık çatlak gibi tektonik yapılar yeraltı suyu akımı konusunda önemli rol oynamaktadırlar. Bu yapılar bazen yeraltı suyu akışına karşı bariyer olarak davranırken bazen de bir akiferden diğerine ya da akiferler arasında yeraltı suyu akışını sağlayan kanallar olarak davranabilmektedirler.

Kütahya Ovası çoğunlukla birbirine paralel faylarla çevrilmiş bir graben sistemi içinde yer almaktadır (Şekil 5.16).

Doğal yeraltı suyu boşalımı kaynaklardan noktasal olarak gerçekleşmektedir. Çalışma alanında genellikle fay ve fay zonlarına bağlı yaklaşık 28 adet kaynak noktası bulunmaktadır. Fay ve fay zonlarında görülen kaynaklar jeolojik birimlerin hidrolik iletkenlikleri arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Fay zonlarında kaynakların bulunması, fayların yeraltı suyu dolaşım ve akım yönlerini kontrol ettiğini ortaya koymaktadır. Fakat çalışma alanında yer alan fayların hidrolik davranışları (bariyer veya kanal olarak) hakkında çok az şey bilinmektedir. Bu yüzden, model alanı sınırları içerisinde yer alan doğal kaynaklara bağlı faylar bariyer

(geçirimsiz) olarak kabul edilirken üzerinde hiçbir kaynak çıkışı gözlenmeyen ya da kaynaklarla ilişkili olmayan faylar ise geçirimli olarak kabul edilmektedir.



Şekil 5.16 Çalışma alanının yapısal jeoloji haritası (Anonim 1981 ve Özburan 2009'dan değiştirilerek alınmıştır)

6. HİDROMETEOROLOJİ

6.1 Yağış ve Sıcaklık

Yağış, hidrolojik döngünün ana girdisidir. Yağmur, kar, dolu ve bunların çisenti ve sulu sephen gibi varyasyonları şeklinde oluşmaktadır. Yağışın biçimi ve miktarı; rüzgâr hızı, sıcaklık ve atmosferik basınç gibi birçok iklimsel faktörden etkilenmektedir.

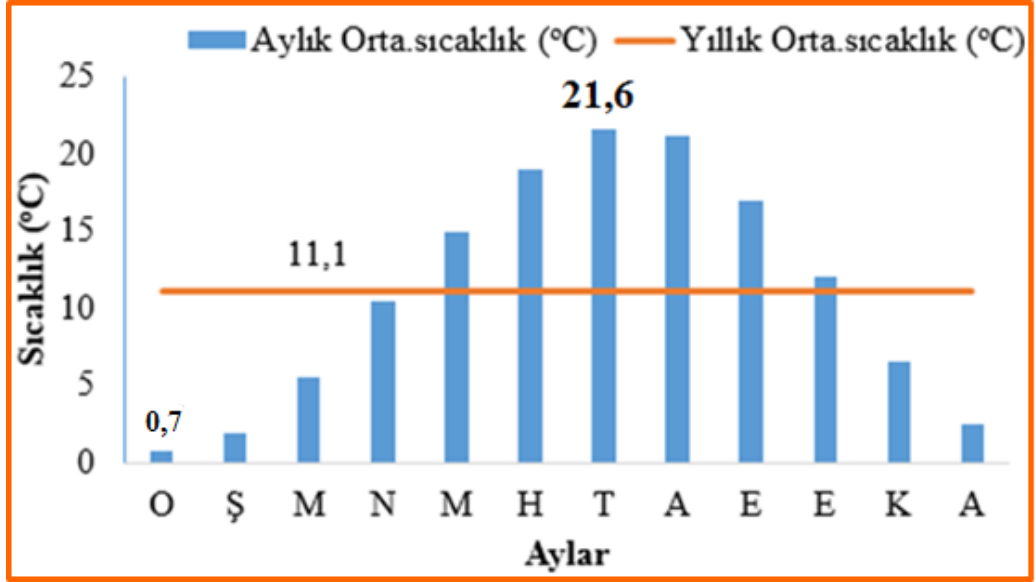
İnceleme alanı içindeki Kütahya Devlet Meteoroloji istasyonuna ait veriler kullanılarak bölgenin sıcaklık, yağış ve buharlaşma karakteristiği belirlenmiştir. 40 yıllık (1975-2014) yağış verilerinden yararlanarak havzaya düşen ortalama yağış miktarı hesaplanmıştır. Aylık ve yıllık gerçek buharlaşma-terleme değerini hesaplamak için ise Turc, Thornthwaite ve Penman yöntemleri kullanılmıştır.

Türkiye'de yağışlar düzenli olarak Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından, yağış istasyonlarında ölçülmektedir. Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1975-2014 yılları arasında ölçülen ortalama yağış ve sıcaklık değerleri kullanılarak çizelge hazırlanmıştır (Çizelge 6.1). Bu çizelgeye göre sıcaklığın en yüksek olduğu ay 21,5 °C ile Temmuz, en düşük olduğu ay ise 0,7 °C ile Ocak ayında olup, yıllık ortalama sıcaklık ise 11,1 °C olarak hesaplanmıştır (Çizelge 6.1, Şekil 6.1).

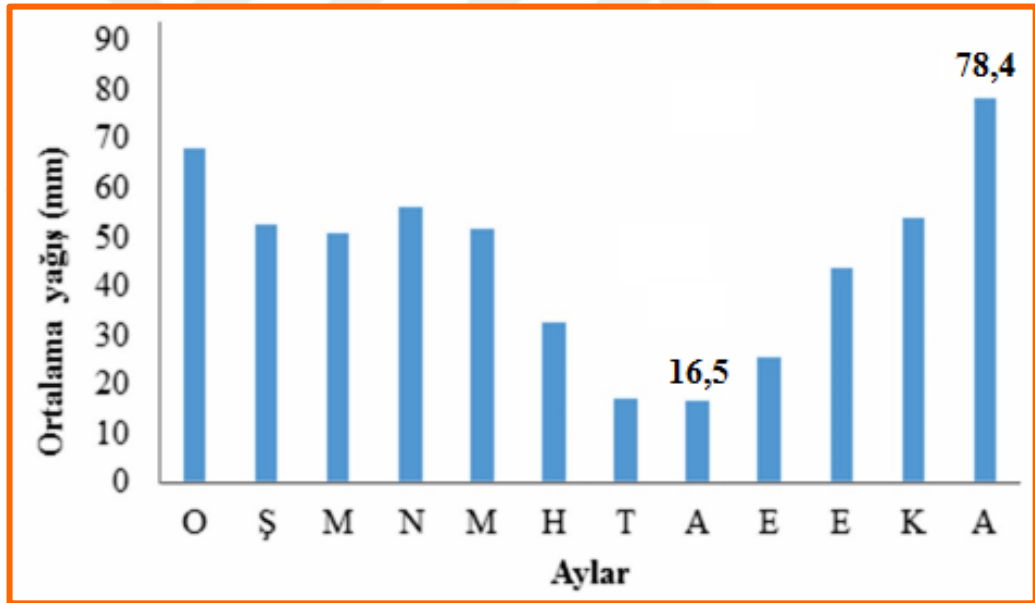
İnceleme alanında en fazla yağış kış (%36,4), sonra sırasıyla ilkbahar (%29), sonbahar (%22,5) ve yaz (%12,1) aylarında düşmektedir. Yağışın en fazla olduğu ay 78,4 mm ile Aralık, en az olduğu ay ise 16,5 mm ile Ağustos'tur (Çizelge 6.1, Şekil 6.2).

Çizelge 6.1 Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1975-2014 yılları arasında ölçülen ortalama yağış (mm) ve sıcaklık (°C) değerleri

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	Yıllık orta.
Orta. Sıcaklık	0,7	1,9	5,5	10,4	15,0	19,0	21,6	21,2	17,0	12,0	6,6	2,5	11,1
Orta. Yağış	68,3	52,5	50,8	56,3	51,6	32,5	17,2	16,5	25,8	43,8	53,7	78,4	547,3



Şekil 6.1 Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1975-2014 yılları arasında ölçülen aylık ortalama sıcaklık değerlerinin aylara göre değişimi

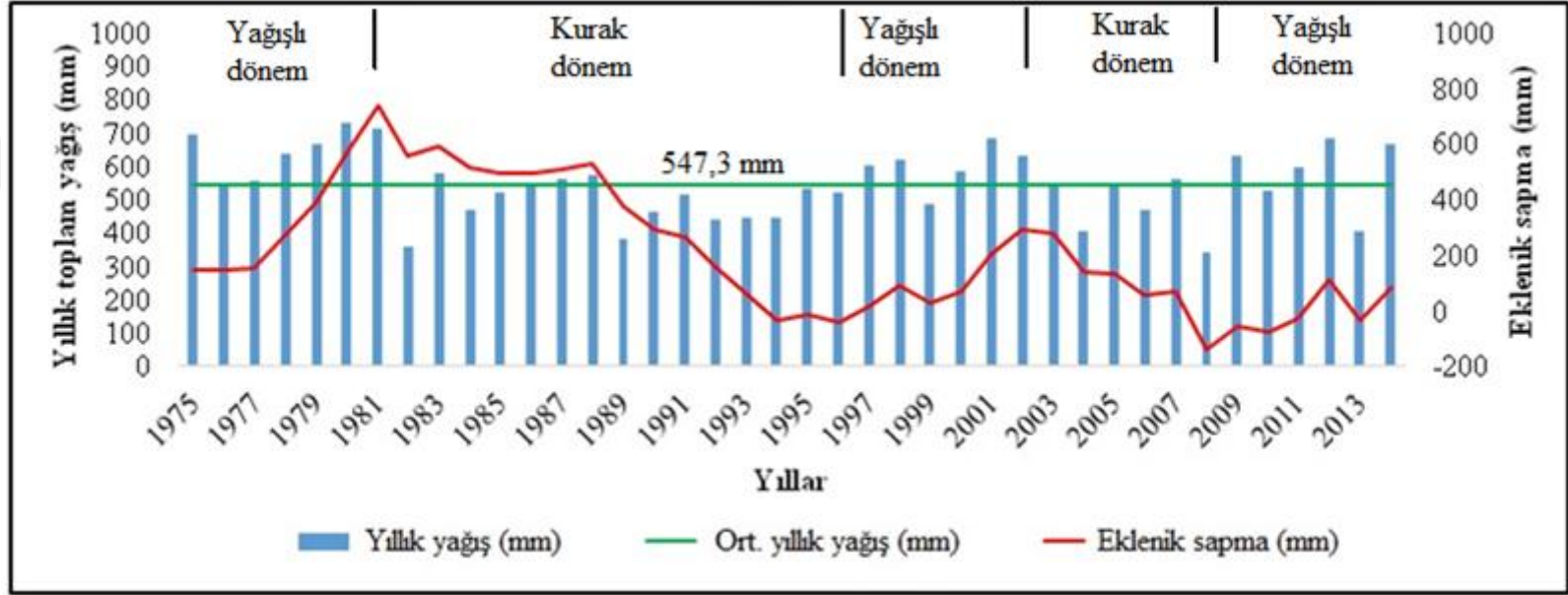


Şekil 6.2 Kütahya Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1975-2014 yılları arasında ölçülen aylık ortalama yağış değerlerinin aylara göre değişimi

Kütahya Meteoroloji İstasyonunun uzun yıllar (1975-2014) yağış verileri incelendiğinde (Şekil 6.3), en yüksek yağış 733,2 mm ile 1980 yılında, en düşük yağış ise 339 mm ile 2008 yılında gözlenirken yıllık ortalama ise 547,3 mm olup, bu oran Türkiye uzun yıllar (1981-2014) ortalamasına (574 mm) yakındır.

Kütahya Havzası'nın Kütahya DMI istasyonuna ait yıllık yağışların zamana göre değişiminin ve uzun yıllar içinde yağışlı ve kurak dönemlerin ayrılması amacıyla ortalama yıllık yağıştan eklenik sapma değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Öncelikle, yıllık yağışların yıllık ortalama yağış miktarından olan sapmaları hesaplanır. Bu hesaplamalar her yıl için ayrı ayrı yapılmaktadır. Hesaplanan sonuca göre, 1975-1981 yılları arası yağışlı, 1982-1996 yılları arası kurak, 1997-2002 yılları arası yağışlı, 2003-2008 yılları arası kurak ve 2009-2014 yılları arası yağışlı dönem olarak geçmiştir (Şekil 6.3). İnceleme alanının yağışlı-kurak dönemleri ayrı ayrı incelendiğinde yıllık yağış ortalamasının yağışlı dönemlerde 625,1 mm, kurak dönemlerde ise 483,7 mm dolayında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.3 Kütahya DMİ istasyonuna ait 1975-2014 yılları arasında yıllık ortalama yağıştan eklenik sapma grafiği

6.2 Buharlaşma ve Terleme

Buharlaşma katı ya da sıvı fazda olan suyun su buharı haline dönüşmesi ve atmosfere karışması sürecidir. Terleme ise bitkilerin kökleri ile aldıkları suyu yaprakları ile atmosfere buhar şeklinde bırakmalarıdır.

Potansiyel buharlaşma-terleme (Etp): Bitkilerin su ihtiyacında eksikliğe neden olabilecek tüm su kayıplarını ifade etmektedir (Thornthwaite 1944, 1948). Etp'nin başka bir tanımı ise, suyun limitsiz olma durumunda (bu sadece bir kabuldür) yüzeyden buharlaşma ve terlemeyle olabilecek kayıpların tümü şeklindedir (Domenico ve Schwartz 1990).

Gerçek buharlaşma-terleme (Etr): Doğal şartlar altında ve eldeki mevcut su miktarı ile yüzey veya yeryüzüne yakın sulardan olabilecek tüm buharlaşma süreçlerini ve miktarını içermektedir (Morton 1983). Gerçek buharlaşma-terleme maksimum potansiyel buharlaşma-terleme (Etp) değeri kadar olabilmektedir.

İnceleme alanının aylık ve yıllık gerçek buharlaşma-terleme değerlerini hesaplamak için Penman (1948), Thornthwaite (1948) ve Turc (1954) yöntemleri kullanılmıştır.

6.2.1 Turc yöntemi

Turc'a (1954) göre inceleme alanının nisbi nem oranı %50'den büyük olduğundan, aylık buharlaşma-terleme aşağıdaki formül ile hesaplanarak yıllık gerçek buharlaşma-terlemenin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

$$Etp = (50 + Ig) * 0,4 * \frac{T^{\circ}}{T^{\circ} + 15} \quad (6.1)$$

Etp: Aylık potansiyel buharlaşma - terleme

T°: Aylık sıcaklık ortalaması

I_g : Yatay düzleme cm^2 ' sine küçük kalori cinsinden, seçilen ay boyunca ulaşan günlük güneş ışığının (şuasının) aylık ortalaması

$$I_g = I_{gA} (0,18 + 0,62 \frac{h}{H}) \quad (6.2)$$

h : Güneş görme müddeti, ayda saat olarak

H : Günün toplam astronomik müddeti, ayda saat olarak

Bu formül ile inceleme alanında yıllık potansiyel buharlaşma-terleme ve gerçek buharlaşma-terleme sırasıyla 833,39 mm ve 429,68 mm olarak hesaplanmıştır. Buna göre yağışın %78,5'i gerçek buharlaşma terleme ile atmosfere dönmektedir (Çizelge 6.2 ve 6.3).

Çizelge 6.2 Turc (1954) yöntemi ile hazırlanmış uzun dönem (1975-2014) buharlaşma-terleme değerleri

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	Toplam (mm)
Aylık orta. Sıcaklık - T° (°C)	0,7	1,9	5,5	10,4	15,0	19,0	21,5	21,2	16,9	12,0	6,6	2,5	
n (saat)	2,12	3,44	4,83	6,04	7,55	9,44	10,40	9,55	7,37	4,82	3,71	2,41	
h (saat)	65,66	96,22	149,65	181,09	233,91	283,09	322,40	295,91	221,18	149,36	111,27	72,27	
Nesbi Nem (%)	69,2	65,0	60,3	57,3	55,8	53,6	52,5	53,5	56,6	61,2	64,2	69,8	
H (saat)	302,0	301,0	371,0	397,0	444,0	447,0	454,0	424,0	373,0	346,0	302,0	293,0	
IgA	376,0	510,0	679,0	834,0	944,0	988,0	955,0	860,0	716,0	546,0	404,0	336,0	
Ig	118,4	192,9	292,0	386,0	478,3	565,8	592,4	526,9	392,1	244,4	165,0	111,9	
Etp (mm)	3,0	10,9	36,9	71,5	105,6	137,5	151,3	135,2	93,8	52,3	26,3	9,1	833,4

Çizelge 6.3 Turc'a (1954) göre toprağın nem bilançosu (1975-2014)

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	Toplam (mm)
Aylık sıcaklık ort. - T° (°C)	0,7	1,9	5,5	10,4	15,0	19,0	21,5	21,2	16,9	12,0	6,6	2,5	
Pot. buh. terleme - Etp (mm)	3,0	10,9	36,9	71,5	105,6	137,5	151,3	135,2	93,8	52,3	26,3	9,1	
P-Etp (mm)	65,3	41,7	14,0	-15,2	-54,0	-105,0	-134,2	-118,7	-68,0	-8,6	27,4	69,3	
Yağış- P (mm)	68,3	52,5	50,8	56,3	51,6	32,5	17,2	16,5	25,8	43,8	53,7	78,4	547,3
Faydalı su yedeği (mm)	100,0	100,0	100,0	84,8	30,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,4	96,7	
Faydalı su yedeği değişimi (mm)	0,0	0,0	0,0	-15,2	-54,0	-30,8	0,0	0,0	0,0	0,0	27,4	69,3	
Gerçek buh. terleme- Etr (mm)	3,0	10,9	36,9	71,5	105,6	63,3	17,2	16,5	25,8	43,8	26,3	9,1	429,7
Su fazlası (mm)	65,3	41,7	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	121,0
Su noksanı (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	74,2	134,2	118,7	68,0	8,6	0,0	0,0	403,7

6.2.2 Thornthwaite yöntemi

Kütahya Meteoroloji İstasyonundan alınan 1975-2014 yılları arası sıcaklık ve yağış değerlerinin aritmetik ortalamasından Thornthwaite (1948) yöntemi kullanılarak bölgenin potansiyel ve gerçek buharlaşma terleme (Etr) değerleri hesaplanmış, yağış ve düzeltilmiş potansiyel buharlaşma terlemenin karşılaştırmalı nem bilançosu hazırlanmış ve grafiği çizilmiştir (Çizelge 6.3, Şekil 6.4).

Thornthwaite yönteminin potansiyel buharlaşma-terlemeyi (Etp) veren formülü;

$$Etp = 16 \times (10 T^{\circ} / I)^a \quad (6.3)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,79 \times 10^{-2} \times I + 0,492$$

$$I = \sum i$$

$$i = (T^{\circ}/5)^{1,514} \text{ şeklindedir.}$$

Etp: Aylık potansiyel buharlaşma - terleme miktarı (mm)

a ve I: Katsayı

i: Sıcaklık indisi

T°: Aylık sıcaklık ortalaması, °C

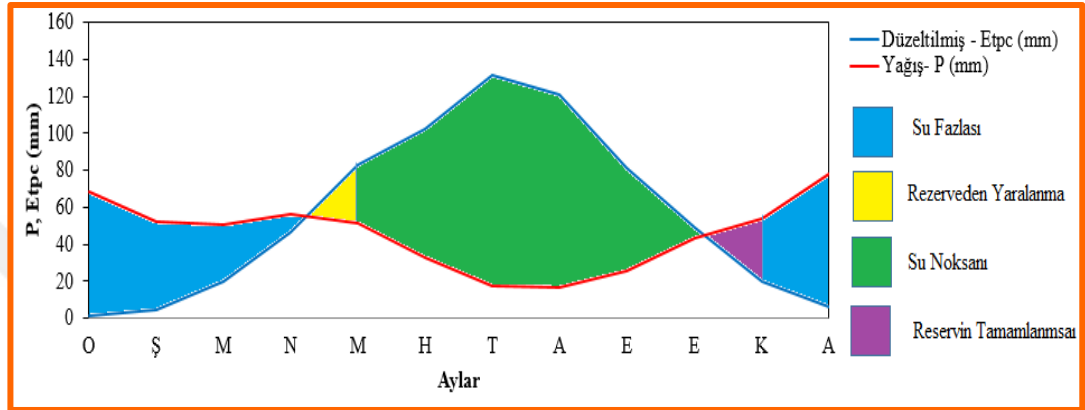
Kütahya Meteoroloji İstasyonu verilerine göre, yıllık yağış ortalaması 547,3 mm, sıcaklık ortalaması ise 11,1°C'dir.

Thornthwaite yöntemine göre hesaplanan buharlaşma-terleme, su fazlası ve su noksanı çizelge halinde verilmiştir (Çizelge 6.4). Yıllık düzeltilmiş potansiyel buharlaşma-terleme 666,0 mm'dir. Gerçek buharlaşma-terleme 386,1 mm olup, yağışın %70,5'i gerçek buharlaşma terleme ile atmosfere tekrar dönmektedir. Yağışın yaklaşık %30'u yüzeysel akış ve yeraltı suyuna süzölmeye karşılık gelmektedir.

Çizelge 6.4 Thornthwaite'e (1948) göre hazırlanmış uzun dönem (1975-2014) meteorolojik su bilançosu

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	Toplam
Aylık sıcaklık ort. - T° (°C)	0,7	1,9	5,5	10,4	15,0	19,0	21,5	21,2	16,9	12,0	6,6	2,5	
Sıcaklık indisi (i)	0,1	0,2	1,2	3,0	5,3	7,5	9,1	8,9	6,3	3,8	1,5	0,3	47,3
Pot. buh. terleme - Etp (mm)	1,5	5,1	19,4	42,7	67,1	89,8	105,0	103,4	78,1	50,9	24,2	7,1	
Enlem düzeltme katsayısı	0,85	0,84	1,03	1,10	1,23	1,14	1,25	1,17	1,04	0,96	0,84	0,83	
Düzeltilmiş - Etpc (mm)	1,3	4,3	20,0	47,0	82,5	102,4	131,2	121,0	81,2	48,9	20,3	5,9	666,0
P-Etpc (mm)	67,1	48,2	30,8	9,3	-30,9	-69,9	-114,0	-104,5	-55,5	-5,1	33,4	72,5	
Yağış- P (mm)	68,3	52,5	50,8	56,3	51,6	32,5	17,2	16,5	25,8	43,8	53,7	78,4	547,3
Faydalı su yedeği (mm)	100,0	100,0	100,0	100,0	69,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,4	100,0	
Faydalı su yedeği değişimi (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	-30,9	-69,1	0,0	0,0	0,0	0,0	33,4	66,6	
Gerçek buh. terleme- Etr (mm)	1,3	4,3	20,0	47,0	82,5	101,6	17,2	16,5	25,8	43,8	20,3	5,9	386,1
Su fazlası (mm)	67,1	48,2	30,8	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	72,5	227,9
Su noksanı (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	114,0	104,5	55,5	5,1	0,0	0,0	279,8

Yağış ve buharlaşma-terlemenin değişim grafiği ise şekil 6.4'te verilmiştir. Toprağın su yedeği 100 mm alınmıştır. Bölgede Nisan ayının sonlarına kadar su fazlalığı görülmektedir. Mayıs ayında su noksanlığı toprağın su yedeğinden karşılanmaktadır. Haziran ayından itibaren toprağın su yedeği tükenmektedir. Bu durum Kasım ayı sonuna kadar devam etmekte olup, Aralık ayından itibaren su fazlalığı görülmektedir.



Şekil 6.4 Yağış ve buharlaşma - terleme grafiği

6.2.3 Penman yöntemi

Penman denklemi kütle transferi (E_a) ve enerji bütçesi (H) yöntemleri birleştirilerek oluşturulmuş bir ampirik denklemdir. 1948 yılında Penman tarafından geliştirilen bu denklem, sinoptik meteoroloji verileri kullanılarak potansiyel buharlaşma hesaplanmakta ve hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışma alanının su bilançosu hazırlanırken, alanın potansiyel ve gerçek buharlaşma-terleme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Penman yöntemi enerji dengesi ve kütle transferi eşitliklerine dayanmaktadır ve potansiyel buharlaşma (E_o , mm/gün) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

Basitleştirilmiş enerji dengesi denklemde:

$$H = E_o + Q \quad (6.4)$$

H: Buharlaşma yüzeyinde kullanılan güneş enerjisi (mm/su/gün)

E_o : buharlaşma enerjisi

Q: Isı enerjisi

$$Q = \frac{\gamma E_o}{\Delta} - \frac{\gamma E_a}{\Delta} \quad (6.5)$$

$$E_o = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} H + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (6.6)$$

Bu eşitlik, buharlaşma için üretilmiş en son Penman formülüdür. Bu denklem için Kütahya Havzası'nda Δ/γ değerler gibi H ve E_a değerleri de potansiyel buharlaşma hesaplamasında gerekmektedir.

E_o : Potansiyel buharlaşma (mm/gün)

$\frac{\Delta}{\gamma}$: Sıcaklığın buhar basıncı ile psikometrik sabitler arasındaki bağıntı

H: yüzeyine gelen güneş enerjisi (mm/su/gün)

E_a : Havanın su buharlaştırma gücü (mm/gün)

Net radyasyon ölçümü varsa, mevcut ısı doğrudan ölçülebilir. Dahası, H değerleri güneş ışığı kayıtlar, sıcaklık ve nem ile tanımlanan gelen radyasyonu (R_I) ve giden radyasyon (R_O) değerleri kullanarak hesaplanabilmektedir.

$$H = R_I(1 - r) - R_O \quad (6.7)$$

r: Yüzeyin radyasyonu yansıtma yüzdesi (Albedo değeri- su için 0,05'e eşittir)

R_I (Aylık ortalama radyasyon) R_a 'nın bir fonksiyonudur. Güneş radyasyonu, maksimum muhtemel güneşlenme süresinin ölçümü olan n/N 'nin bir fonksiyonu olarak, enlem ve mevsime göre düzenlenerek bulunmaktadır.

$r = 0,05$ kullanarak,

$$R_I(1 - r) = 0,95 R_a f_a(n/N)$$

$$f_a(n/N) = 0,18 + 0,55n/N$$

$$R_I(1-r) = 0,95 R_a (0,18 + 0,55n/N)$$

n: Aylık ortalama güneşlenme süresi (saat/gün)

N: Astronomik ortalama güneşleme süresi (saat/gün)

R_a: Aylık ortalama atmosfer üstü güneş radyasyonu (mm/su/gün)

Yukarıdaki R_o terimi:

$$R_O = \delta T_a^4 (0,56 - 0,09\sqrt{e_d}) (0,1 + 0,9 n/N) \quad (6.8)$$

δT_a^4 (mm su): Boltzman sabit (δ : $2,01 \times 10^{-9}$ mm/gün), ve mutlak sıcaklık bileşimi (aylık ortalama sıcaklık ile bulunur, T_a: Sıcaklık Kelvin olarak)

$$E_a = 0,27 \cdot V_2(e_a - e_d) \quad (6.9)$$

e_a: Doymuş buhar basıncı (mm Hg)

$$e_a \text{ (Kpa)} = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27T_a}{T_a + 237,3}\right], \text{ (1 Kpa = 7,50061683 mmHg)} \quad (6.10)$$

e_d: Havanın buhar basıncı (rölatif nem H) x e_a)

(e_a-e_d): Doygunluk açığı

Kütahya Meteoroloji İstasyonunda rüzgar hızı yeryüzünden 10 m yükseklikte ölçüm yapılmaktadır. Rüzgar hızının iki metre yükseklikteki değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$V_2 = V_Z \left(\frac{2}{Z}\right)^{0,2} \quad (6.11)$$

V₂: Yeryüzeyinden 2 m yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı (m/s)

V_Z: Z m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızı (m/s)

Penman yöntemine göre verilerin değerlendirilmesiyle inceleme alanı için hesaplanan değerlerin Penman formülünde yerine konulması ile bölgenin günlük potansiyel buharlaşma-terleme değeri mm.su.gün⁻¹ olarak belirlenmektedir. Her ayın gün sayısı göz önüne alınarak aylık, aylık değerlerin toplamı ile de yıllık potansiyel buharlaşma-

terleme değeri bulunmaktadır (Çizelge 6.5). Çizelge 6.5'ten görüleceği gibi potansiyel buharlaşmanın en düşük olduğu aylar; Kasım, Aralık ve Ocak, en yüksek olduğu aylar ise, Haziran, Temmuz ve Ağustos'tur. İnceleme alanında Penman yöntemi kullanılarak toplam yıllık potansiyel ve gerçek buharlaşma miktarı sırasıyla 831,2 ve 452,7 mm.su/yıl olarak bulunmuştur (Çizelge 6.5-6.6).



Çizelge 6.5 Penman’a (1948) göre hazırlanmış uzun dönem (1975-2014) buharlaşma-terleme değerleri

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	Toplam (mm)
Aylık sıcaklık ort. - T° ($^{\circ}\text{C}$)	0,7	1,9	5,5	10,4	15,0	19,0	21,5	21,2	16,9	12,0	6,6	2,5	
V_{10} (m/s)	1,6	1,8	1,8	1,8	1,6	1,6	1,7	1,5	1,3	1,3	1,4	1,6	
V_2 (m/s)	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,0	0,9	1,0	1,2	
n	2,12	3,44	4,83	6,04	7,55	9,44	10,40	9,55	7,37	4,82	3,71	2,41	
N	9,60	10,70	11,90	13,30	14,40	15,00	14,70	13,80	12,50	11,20	10,00	9,30	
n/N	0,22	0,32	0,41	0,45	0,52	0,63	0,71	0,69	0,59	0,43	0,37	0,26	
Ra (mm/gün)	6,0	8,3	11,0	13,9	15,9	16,7	16,3	14,8	12,2	9,3	6,7	5,5	
RI (1- r), mm/gün	1,7	2,8	4,2	5,7	7,1	8,3	8,8	7,9	5,9	3,7	2,4	1,7	
δT_{a4} (mm/gün)	11,3	11,5	12,1	13,0	13,9	14,6	15,2	15,1	14,2	13,3	12,3	11,6	
H (Nisbi nem),%	69,2	65,0	60,3	57,3	55,8	53,6	52,5	53,5	56,6	61,2	64,2	69,8	
ea (mm Hg)	4,8	5,3	6,8	9,5	12,8	16,4	19,2	18,9	14,5	10,5	7,3	5,5	
ed (mm Hg)	3,3	3,4	4,1	5,4	7,1	8,8	10,1	10,1	8,2	6,4	4,7	3,8	
Ro (mm/gün)	1,3	1,8	2,1	2,3	2,5	2,9	3,1	3,0	2,7	2,2	2,0	1,5	
Ea (mm/gün)	0,5	0,6	0,9	1,4	1,8	2,4	3,0	2,6	1,6	1,0	0,7	0,5	
Δ/γ	0,7	0,8	1,0	1,3	1,7	2,1	2,3	2,2	1,9	1,4	1,0	0,8	
H (mm/gün)	0,4	1,1	2,1	3,4	4,5	5,5	5,7	4,9	3,1	1,5	0,5	0,2	
Eo (mm/gün)	0,4	0,8	1,5	2,5	3,5	4,5	4,9	4,2	2,6	1,3	0,6	0,4	
Gün sayısı	31,0	28,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	31,0	30,0	30,0	
Eo (mm/ay)	13,3	22,9	46,4	75,8	108,6	135,1	151,3	129,1	78,3	41,1	18,0	11,3	831,2

Çizelge 6.6 Penman’a (1948) göre hazırlanmış uzun dönem (1975-2014) meteorolojik su bilançosu

Aylar	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	Toplam (mm)
Aylık sıcaklık ort. - T° (°C)	0,7	1,9	5,5	10,4	15,0	19,0	21,5	21,2	16,9	12,0	6,6	2,5	
Pot. Buh. terleme - Etp (mm)	13,2	23,0	46,4	75,9	108,7	135,1	150,5	128,8	78,4	41,1	17,9	11,3	830,3
P-Etp (mm)	55,1	29,6	4,5	-19,7	-57,0	-102,6	-133,4	-112,3	-52,6	2,7	35,8	67,1	
Yağış - P (mm)	68,3	52,5	50,8	56,3	51,6	32,5	17,2	16,5	25,8	43,8	53,7	78,4	547,3
Faydalı su yedeği (mm)	100,0	100,0	100,0	80,4	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	38,5	100,0	
Faydalı su yedeği değişimi (mm)	0,0	0,0	0,0	-19,7	-57,0	-23,3	0,0	0,0	0,0	2,7	35,8	61,5	
Gerçek buh. terleme- Etr (mm)	13,2	23,0	46,4	75,9	108,7	55,9	17,2	16,5	25,8	41,1	17,9	11,3	452,7
Su fazlası (mm)	55,1	29,6	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,1	156,1
Su noksanı (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	79,3	133,4	112,3	52,6	0,0	0,0	0,0	377,6

Bu doktora tezi kapsamında, Penman yönteminde, diğerlerine göre daha fazla meteorolojik parametreleri kullanıldığından, modelleme sırasında kullanılacak aylık gerçek buharlaşma-terleme değerleri için Penman'a göre yapılan toprağın nem bilançosu verileri kullanılmıştır.



7. HİDROLOJİ

7.1 Akarsular

İnceleme alanının devamlı akışa sahip dereleri ovayı batıdan doğuya kateden Felent Çayı ile güneyden kuzeye akışlı Porsuk Çayı'dır. Çalışma alanı içerisine komşu havzadan gelen ve devamlı akan havzanın ana akarsuyu Porsuk çayıdır. Ayrıca, şekil 7.1'de verilen haritada görüldüğü gibi havza sınırı içinde yer alan ovaya doğru, yüksek kesimlerden gelen birçok mevsimsel akışı olan dere bulunmaktadır.



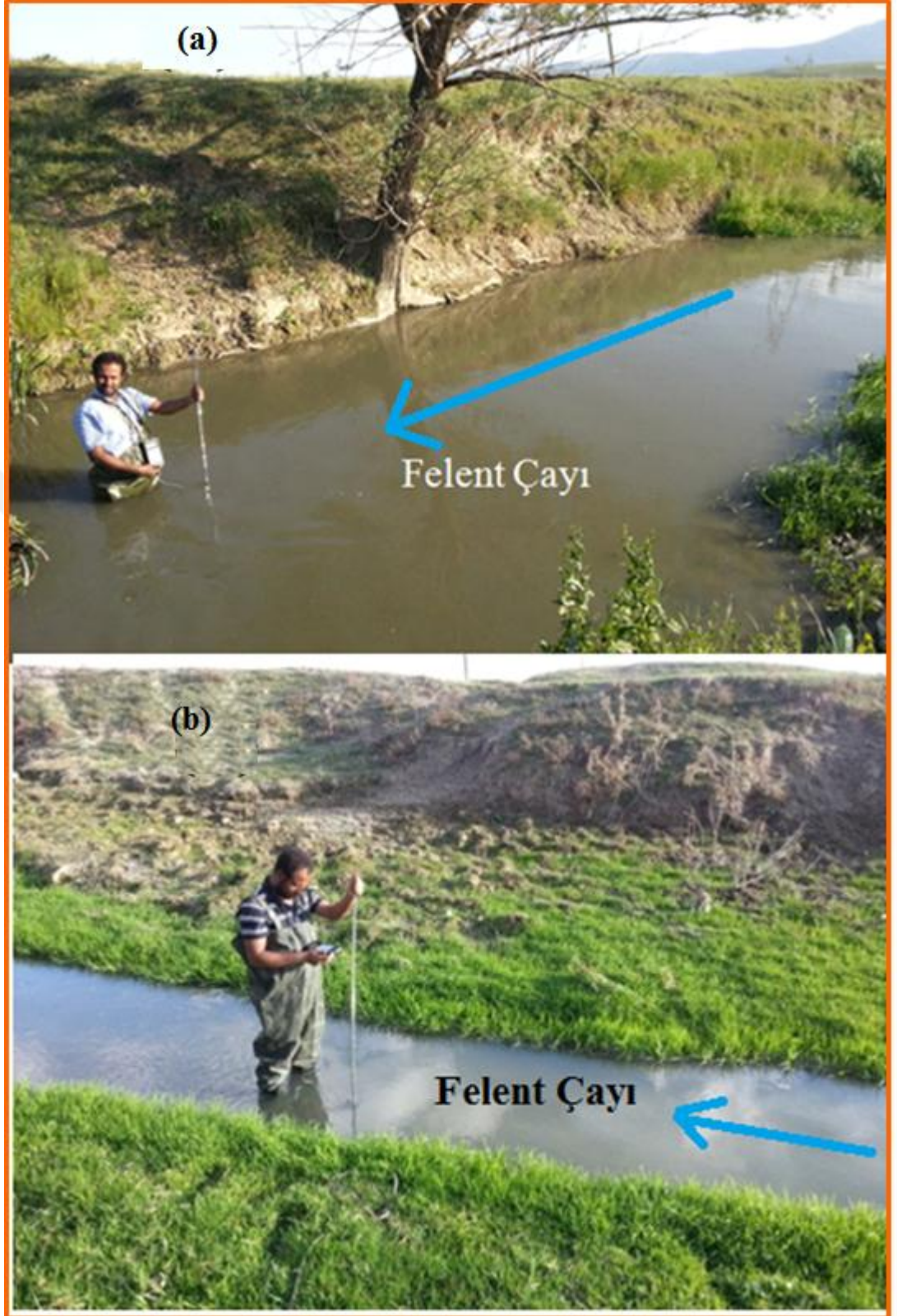
Şekil 7.1 Çalışma alanının drenaj alanı

Felent Çayı, inceleme alanının kuzeybatısında Köprüören tali drenaj alanındaki bir çok yan dere ve küçük kaynakların birleşmesi sonucu gelişerek, Yoncalı Kaplıcaları civarında Enne Baraj gölüne boşalır (Şekil 7.1-7.2). Enne Baraj gölüne boşalmadan önce 12-196 nolu akım gözlem istasyonunun 1989-1996 yıllarına ait 8 yıllık rasatlarına

göre Felent Çayı'nın ortalama yıllık toplam debisi $5,59 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ 'dır. Anonim (1981)'e göre Felent çayı Porsuk çayına ulaşmadan önce Kütahya-Eskişehir karayolunda 6 no'lu akım rasat istasyonunda 1976 ile 1978 yıllarına ait ortalama debisi ise $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ dir.

Porsuk Çayı, inceleme alanının güneyinde Porsuk Çiftliği kaynakları ve Gelinkayası kaynaklarının boşalımı ile drenaj alanından gelen akımların birleşiminden oluşarak güneyden kuzeye akar (Şekil 7.1-7.3).

Kütahya Ovası'na Enne Barajı'ndan boşalan sular, ovaya diğer beslenme alanlarından akarsularla gelen sular ile Kütahya Ovasını terk ederek Porsuk Baraj Gölü'ne giden sulara ait debi değerleri Elektrik İşleri Etüt İdaresinin mevcut istasyonlarından alınmıştır. Ölçüm yapılmayan noktalarda muline ile ölçüm yapılmıştır. 2013 Mayıs ve Aralık aylarında Dumlupınarı civarında (X:755034, Y:4370756) Felent Çayının debisi ölçülmüş olup, tespit edilen debiler sırasıyla $0,127 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $0,031 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Buna ek olarak Felent Çayı Porsuk Çayına (X:244251, Y:4371083) birleşmeden önce de debi ölçümü yapılmıştır. Burada tespit edilen debiler sırasıyla $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir (Şekil 7.2). Porsuk Çayının debisi ovaya giriş (12-33 no'lu Porsuk Çiftliği akım gözlem istasyonunununda) ve çıkışta (12-181 no'lu Yenibosına İstasyonunda) debi ölçümlerinin DSİ tarafından 2013 Nisan ayında yapılan ölçümler sonucunda sırasıyla 7,261 ve $11,215 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.2 Felent Çayı Porsuk çayına boşalmadan önce debi ölçümü yapılan yer
a. Mayıs 2013, b. Aralık 2013

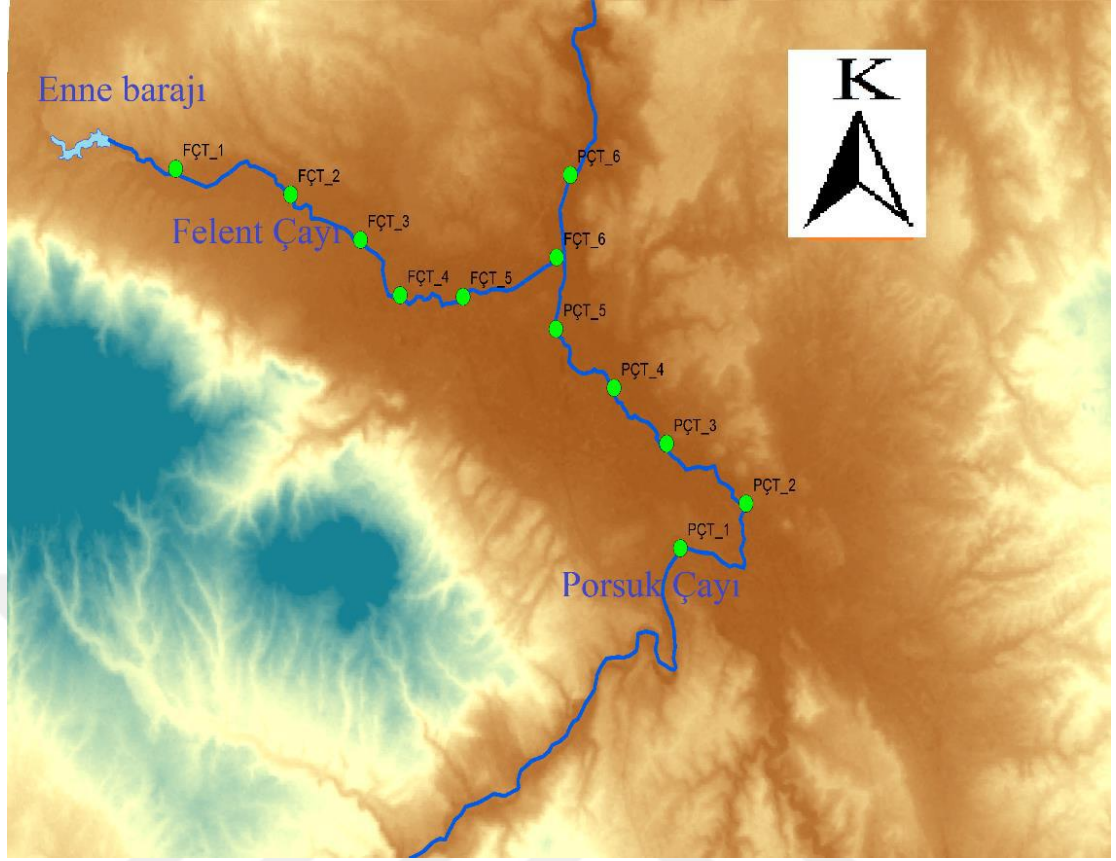


Şekil 7.3 Porsuk Çayı'ndan bir görünüm (Aralık 2013)

7.1.1 Felent ve Porsuk Çayların tabanının hidrolik özellikleri

Nehir yatağının hidrolojik özelliğini belirlemek üzere Felent ve Porsuk çaylarının her birinden 6 adet olmak üzere akım yolu boyunca toplam 12 zemin örneği alınmıştır (Şekil 7.4).

Tane boyu analizlerine dayalı olarak nehir tabanından alınan zemin örneklerinden laboratuvarında ıslak elek analiz yöntemi kullanarak geçirgenlik katsayısı hesaplanmıştır (Şekil 7.5).



Şekil 7.4 Nehir yatağı zemin örnekleme haritası



Şekil 7.5 Elek analizi çalışmaları

Felent ve Porsuk çayları nehir yatağının geçirgenlik katsayısı (K), zemin numuneleri üzerinde tane boyu analizi yöntemiyle, ampirik denklemler kullanılarak belirlenmiştir (Çizelge 7.1).

Odong (2013), sıkılaşmamış zeminlerin geçirgenlik katsayısının elek analizi verilerinden yararlanılarak ampirik formüllerle güvenli olarak elde edilebileceğini belirtmiştir. Vuković ve Soro (1992) daha önceki çalışmalardan birkaç deneysel yöntem özetlemiş ve genel bir formül sunmuştur. Tane boyu dağılım analizleri sonucunda elde edilen eklenik tane boyu dağılım eğrileri EK 9’da verilmiştir.

$$K = (g/ v) * 6 * 10^{-4} (1 + 10 (n - 0,26) d_{10}^2 \quad (7.1)$$

$$n = 0,255 (1 + 0,83^U) \quad (7.2)$$

Uniformluk katsayısı U aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$U = d_{60}/d_{10} \quad (7.3)$$

K: Hidrolik iletkenlik (m/gün)

g: Yerçekimi ivmesi 9,807 m²/s

v: Kinematik viskozite

n: Porozite,

d₁₀: Etkin tane boyu (% 10'a karşılık gelen tane boyu)

d₆₀: % 60'a karşılık gelen tane boyu

Kinematik viskozite için aşağıdaki formül verilmiş olup, dinamik viskozite (μ) ve akışkan (su) yoğunluğu (ρ) ile ilişkilidir.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (7.4)$$

v: 1,14*10⁻⁶ m²/s

μ : Dinamik viskozite (m²/s)

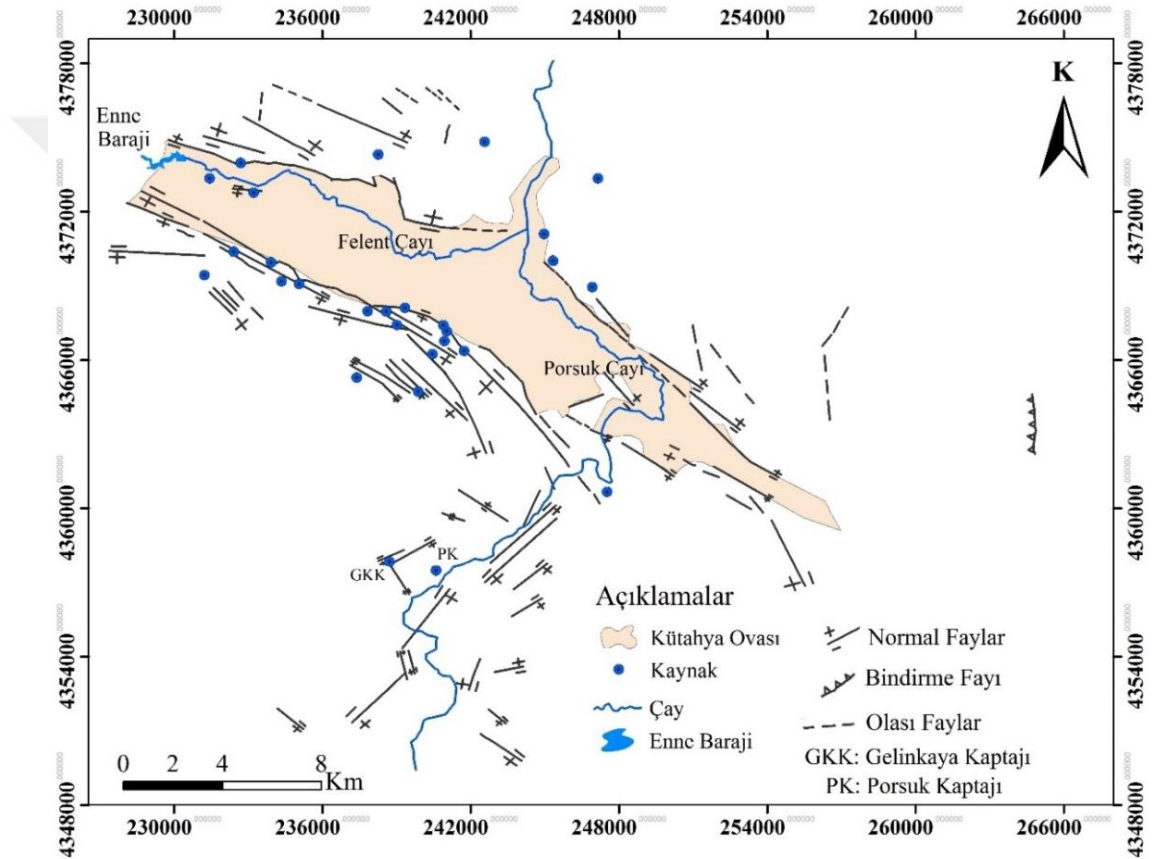
ρ : Akışkan yoğunluğu (g/m³)

Çizelge 7.1 Tane boyu analizlerine dayalı olarak hesaplanan geçirgenlik katsayıları

Örnekleme No	X	Y	K (m/s)	
Porsuk Çayı	PÇ-1	247841,00	4364062,79	4,24E-04
	PÇ-2	249843,5	4365170,72	3,80E-04
	PÇ-3	247422,45	4366656,18	4,09E-04
	PÇ-4	245822,10	4368043,16	3,38E-03
	PÇ-5	244057,62	4369503,99	3,45E-03
	PÇ-6	244492,59	4373328,43	3,45E-03
Felent Çayı	FÇ-1	232469,25	4373479,85	1,85E-07
	FÇ-2	235980,59	4372848,56	3,19E-06
	FÇ-3	238103,45	4371721,47	1,09E-06
	FÇ-4	239307,13	4370342,70	3,01E-07
	FÇ-5	241222,09	4370298,92	1,42E-06
	FÇ-6	244073,63	4371286,77	2,05E-05

7.2 Kaynaklar

Çalışma alanında genellikle Kütahya Ovası'nın sınırlarında oluşan alüvyon kaynakları ile fay, dokanak, kırık çatlak ve karstik kaynaklar bulunmaktadır. Çalışma alanının güneyinde bulunan Gelinkaya ve Porsuk Kaptajları adlı iki karstik kaynak Kütahya Belediyesi'nin en önemli içme suyu kaynağıdır. Gelinkaya ve Porsuk kaptajlarının günlük ortalama debileri sırasıyla 550 ve 636 l/s' dir (Anonim 2012) (Şekil 7.6).

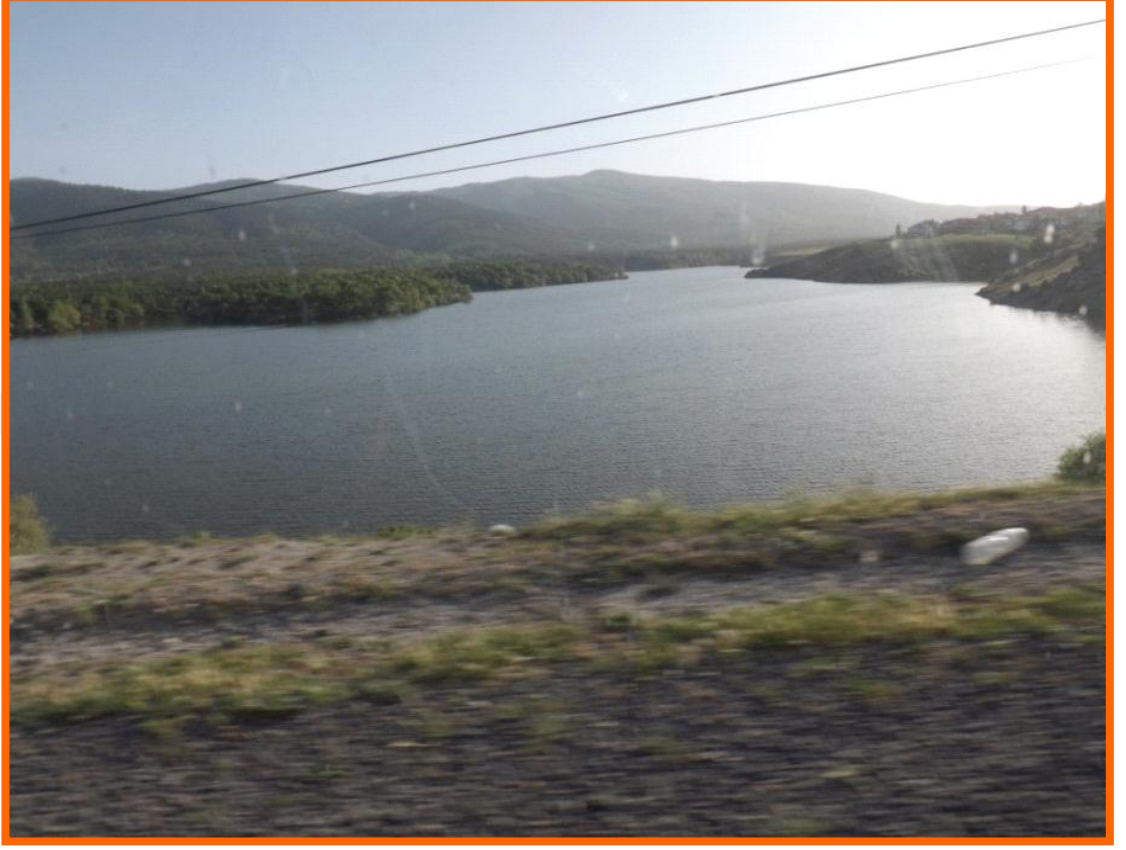


Şekil 7.6 Çalışma alanında bulunan doğal kaynak noktaları

7.3 Barajlar

Enne Baraj Gölü: DSİ III. Bölge Müdürlüğünce 1968 ile 1970 yılları arasında Felent Çayı üzerine inşa edilmiş zemin dolgu barajdır (Şekil 7.7). Ovanın kuzeybatısında yer alan Enne Barajı, Seyitömer Termik Santrali'nin kullanma-soğutma ve Kütahya

Ovası'nın sulama suyu gereksinimini karşılamaktadır. Temelden yüksekliği 24,5 m ve su depolama hacmi 7 milyon m³ dır (Anonim 2002).



Şekil 7.7 Enne Baraj Gölü (Mayıs 2013)

8. HİDROJEOLOJİ ÇALIŞMALARI

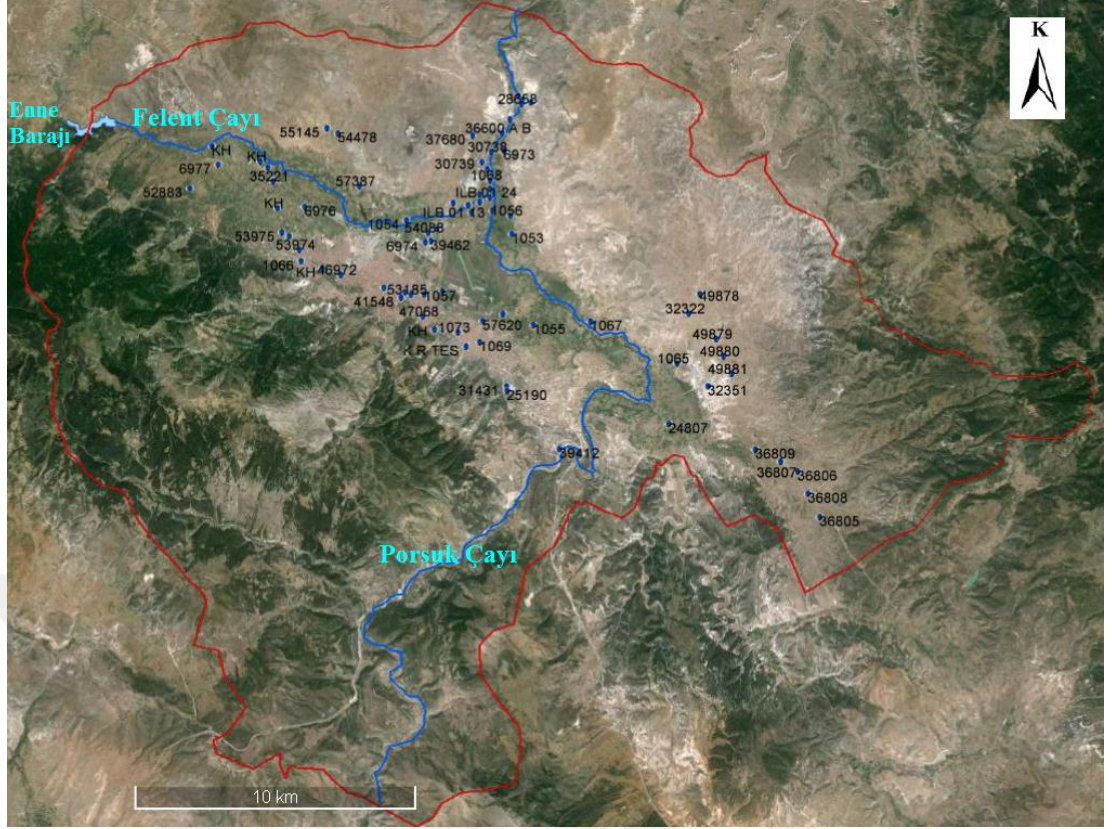
8.1 Kuyular

Bu bölümde çalışma alanında bulunan su noktaları, litolojik birimlerin hidrojeolojik özellikleri, akiferlerin hidrolojik parametreleri ve yeraltı suyu dinamiği hakkında bilgiler verilmiştir.

Kütahya Havzası içerisinde DSİ, İller Bankası ve Köy Hizmetleri tarafından işletme, araştırma, içme ve kullanma amacıyla sondajlar açılmıştır (Şekil 8.1 ve EK 2).

8.1.1 Sondaj kuyuları

İnceleme alanında bulunan DSİ sondaj kuyularının derinlikleri 38,0-402,8 m, kuyularının açıldıkları tarihlerde yapılan ölçümlerine göre statik su seviyelerinin yüzeyden itibaren derinlikleri 0,94-60,45 m, debileri ise 0,9-84,27 l/s arasında değişmektedir (EK 2). Çalışma alanında kuzeydoğu ve güneydoğu kesimlerde ova seviyesinde yer alan kireçtaşı-marn-tüf ardışık serilerinin ovada saptanan kalınlığı 400 m'nin üzerinde olduğu 6974, 6975 ve 25190 no'lu sondajlarda tespit edilmiştir.



Şekil 8.1 Çalışma alanı DSİ kuyu lokasyon haritası

8.1.2 Sığ kuyular

Sondaj kuyularına ek olarak genellikle her bahçede vatandaşlar tarafından sulama amaçlı olarak alüvyonda açılan kayıtlı olamayan sığ kuyular bulunmaktadır.

Anonim (1981) yaptığı hidrojeoloji çalışmasında sığ kuyuların çalışma alanında Felent ve Porsuk Çayları boyunca ve köyler arasında kalan düzlük alanlarda elle açılmış keson kuyular olduğu belirtilmiştir. Ekim 1976'da DSİ tarafından yapılan arazi çalışmasına göre kuyuların çapları ve derinlikleri sırasıyla 0,9 ile 1,25 m ve 6 ile 20 m arasında değişmekte olup, statik seviyeleri ise 0,7-14,9 m arasında değiştiği belirlenmiştir (Anonim 1981) (EK 3).

Bu çalışmada, Haziran 2014'te yeraltı suyu akım yönünü belirlenmek üzere Alüvyon akiferinde 23 noktada elektrikli su seviye ölçüm cihazı ile yeraltı su seviye ölçümü

yapılmıştır. Bu noktalara ait yeraltı suyu seviye haritası şekil 8.13'te verilmiştir. Yeraltı su seviye haritasına göre akarsular bazı yerlerde alıcı ve bazı yerlerde ise verici durumdadır. Buna ek olarak nehir boyunca akış suyun bir taraftan alıcı ve diğer taraftan verici durumlarda vardır. Çizelgede sunulan yeraltı su seviyesine göre Haziran ayında 2014 yılı sığ kuyuların yeraltı suyu statik su seviyesi 1-13 m arasında değişmektedir. Buna ek olarak Parmakören, Emet ve Sabuncupınarı Formasyonlarında açılan kuyulardan sırasıyla iki, üç ve iki noktada aynı zamanda yeraltı su seviye ölçümü yapılmıştır (Çizelge 8.1).



Çizelge 8.1 Yeraltı su seviyesi ölçüm noktaları (Haziran 2014)

No	Ölçüm Noktaları	Kod	X	Y	Z	Kuyu Derinliği (m)	Statik Su Seviyesi (m)	Akifer	
								Litoloji	Formasyon
1	Alayunt Kuyusu	AK	251033	4365133	937	9	3,6	Alüvyon	
2	Alayunt Köyü Çıkış	AKÇ	250349	4364866	931	15	3,7		
3	Azot Fab. Karşısı	AFK	243876	4372144	918	30	3,2		
4	Bölcek Mahalesi Vatandaş Kuyu	BMVK	236600	4370353	947	10	7,4		
5	Büyüksaka Tulumba	BST	254070	4361065	963	28	6,4		
6	Civli küyü Çıkış 1	CKÇ-1	232273	4372184	965	16	6,9		
7	Civli küyü Çıkış 2	CKÇ-2	232299	4372171	966	20	8,3		
8	Çubukiçi Giriş-1	ÇG-1	251656	4361996	946	38	4,4		
9	Çubukiçi Giriş-2	ÇG-2	251766	4361974	943	6,5	1,5		
10	Çubukiçi Giriş-3	ÇG-3	251802	4361840	948	42	3,4		
11	Çubukiçi-4	ÇK-4	252444	4361357	950	43,5	2,4		
12	Dumlupınarı Mah-Dumlupınarı Üni. Yolu	DM-DÜ-Y1	233942	4372819	951	9	1,2		
13	Dumlupınarı Mah-Dumlupınarı Üni. Yolu	DM-DÜ-Y2	233781	4372751	951	9,8	1,6		
14	İkizhoyuk Köyü Giriş Kuyusu	İKGK	247877	4366379	925	7,5	2,8		
15	İkizhoyuk Köyü Kuyusu	İKK	247483	4366674	926	7,3	3,0		
16	İkizhoyuk Tulumba -1	İYKT-1	247483	4366858	926	8	2,1		
17	Kırazpınarı Kuyusu	KK	234252	4371969	960	30	6,5	Kumtaşı, Çakıltaşı	Parmakören
18	Perli Vatandaş kuyusu-1	PVK-1	244580	4369401	919	9	1,2		
19	Perli Vatandaş kuyusu-2	PVK-2	244848	4369390	920	8,5	1,3		
20	Perli Vatandaş kuyusu-3	PVK-3	245856	4369135	924	8,3	1,0		
21	Parmakören Giriş Yolunda	PGY	238483	4371597	934	10	2,6		
22	Siner Köyü Girişi Vatandaş Kuyusu	SKGVK	247841	4364268	939	5,4	3,5		
23	Yenibosna Vatandaş Kuyusu	YVK	244788	4371930	933	13	13,0		
24	Parmakören-1	PÖ-1	238647	4373463	954	106	9,0		
25	Parmakören-2	PÖ-2	238267	4373819	961	128	12,8		
26	Çalca Köyü Kuyusu	ÇKK	243459	4374424	944	82	12,2		
27	Siner Kuyusu	SK	248423	4365429	925	120	1,0	Kireçtaşı	Emet
28	Perli DSİ Kuyusu	PDK	244938	436853	919	38	1,8		
29	Büyüksaka -1	BSK-1	253773	4361964	964	150	5,5	Tüf	Sabuncupınarı
30	Büyüksaka -2	BSK-2	254488	4361399	966	150	9,2		

Kütahya Ovası'nda sığ yeraltı su seviyelerinin mevsimlik olarak değişimini görebilmek için vatandaşlar tarafından açılan dağılımı ovayı temsil eden 15 sığ kuyuda Haziran 2014-Mayıs 2015 arasında yıllık seviye ölçümü yapılmıştır (Çizelge 8.2).

Çizelge 8.2 Alüvyon akiferinde yeraltı su seviyesi ölçüm noktaları (Haziran 2014-Mayıs 2015)

No	Ölçüm noktaları	Kodu	Statik Seviye (m)						
			Haziran	Temmuz	Eylül	Kasım	Ocak	Mart	Mayıs
			2014				2015		
1	Alayunt kuyusu	AK	3,60	3,90	4,30	4,15	3,50	2,35	3,30
2	Bölcek Mahalesi Vatandaş Kuyusu	BMVK	7,40	7,15	6,70	8,35	7,15	6,65	6,75
3	Civli köyü Çıkış 1	CKÇ-1	6,90	7,00	7,10	6,50	5,85	5,30	5,45
4	Civli Köyü Çıkış 2	CKÇ-2	8,30	8,40	8,30	7,60	7,05	6,50	6,75
5	Dumlupınarı Mah-Dumlupınarı Üni, Yolu	DM-DÜ-Y1	1,20	2,00	2,35	1,10	0,00	0,40	0,90
6	Dumlupınarı Mah-Dumlupınarı Üni, Yol	DM-DÜ-Y2	1,60	1,50	2,55	1,50	0,30	0,75	1,10
7	İkizhoyuk Köyü Giriş Kuyusu	İKGK	2,75	3,15	2,95	2,40	2,20	1,83	2,20
8	İkizhoyuk Köyü Kuyusu	İKK	2,95	3,35	3,15	2,75	2,35	2,00	2,45
9	İkizhoyuk kuyu Tulumba -1	İYKT-1	2,10	2,45	2,30	1,50	0,43	1,10	1,80
10	Kırazpınarı Kuyusu	KK	6,50	6,50	6,58	6,67	5,47	5,20	5,00
11	Perli Vatandaş Kuyusu-3	PK-3	1,00	1,00	1,00	0,85	0,10	0,00	0,25
12	Parmakören Girişi Yolu	PGY	2,55	2,85	3,00	2,77	1,65	1,85	2,15
13	Perli Vatandaş Kuyusu-1	PVK-1	1,20	1,55	1,43	1,26	0,53	0,42	0,93
14	Perli Vatandaş Kuyusu-2	PVK-2	1,25	1,20	1,30	1,15	0,32	0,23	0,70
15	Siner Köyü Giriş Vatandaş kuyusu	SKGVK	3,50	3,70	4,00	3,95	2,40	2,80	2,95

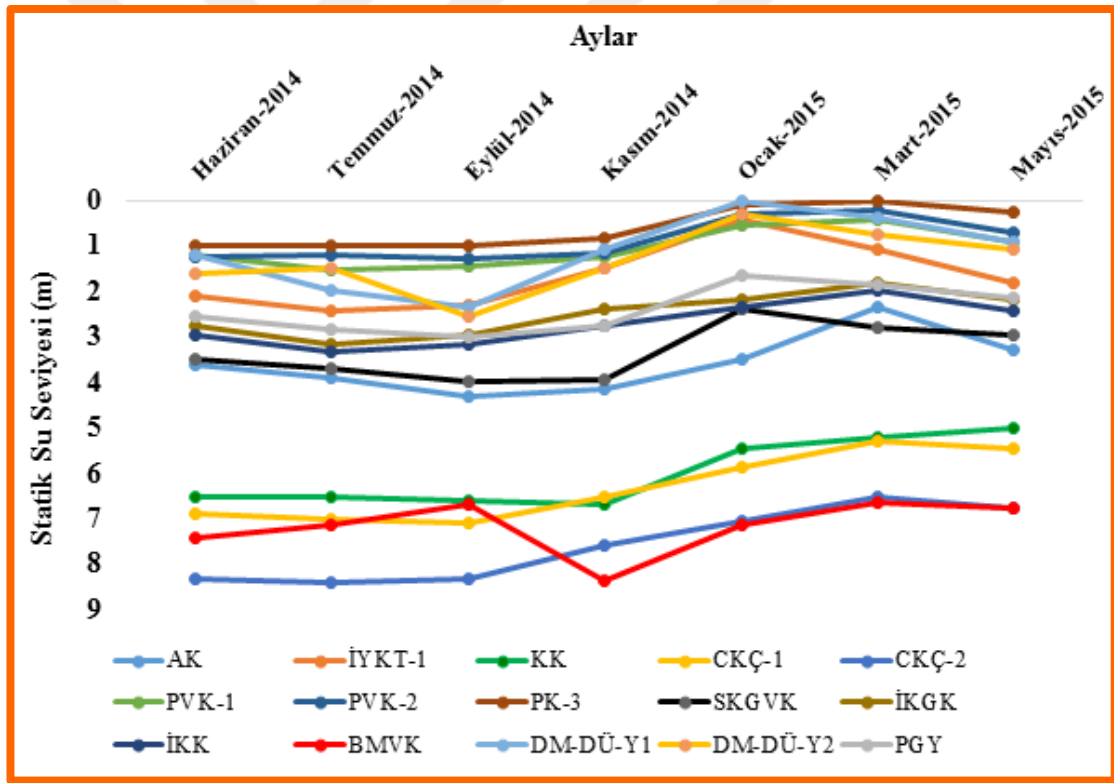
(Ölçüm noktalarının lokasyonları Çizelge 8.1'de verilmiştir)

Şekil 8.2'de su tablası derinliğinin zamana göre değişimi görülmektedir. Temmuz ve Eylül aylarında statik seviye düşüktür.

Beslenmenin ve sığ kuyulardan tarımsal amaçlı pompaj miktarının değişmesinin sonucunda yeraltı su seviyelerinde dalgalanma görülmektedir. Kütahya Ovası'nda Alüvyon akiferinde Ocak 2015'te ölçülen yeraltı su seviyelerinin, Haziran 2014'te

ölçülen değerlerden genel olarak 1,00 m daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8.2).

Akiferlerdeki su seviyelerinin genellikle gecikmeli olarak görülmesine rağmen, Kütahya Ovası'nda alüvyon akiferin yeraltı su seviyesinin göreceli daha hızlı tepki vermesi, ovada sığ akifer bulunmasından kaynaklanmaktadır. Ocak ve Mart aylarda 2015 yılında ölçülen yeraltı su seviyelerinin bazı kuyularda yüzeye kadar çıktığı gözlenmiştir. Bu yüksek yeraltı su seviyesinin sebebi, yağış ve kar erimesinden kaynaklanan beslenmenin, tarımsal sulamada kullanılan miktardan daha fazla olmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Sulama amaçlı pompajın fazla, doğal beslenmenin az olması yeraltı su seviyelerinde düşüşe sebep olmaktadır.



Şekil 8.2 Yeraltı su seviye değişim grafiği

8.2 Jeolojik Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri

Tez sahasında yeraltı suyu ile ilgili olarak çok az araştırma yapılmıştır. Bunlardan, 1981 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı suları Dairesi tarafından Kütahya ve Köprüören ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu hazırlanmıştır (Anonim 1981). Bu çalışmalara ek olarak DSİ tarafından 1965 ve 1979 yıllarında “Kütahya Ovası Jeofizik Rezistivite Etüdü Raporu”, 2003 yılında da “Kütahya Ovası karst Hidrojeolojisi ara raporu” hazırlanmıştır.

Çalışma alanında, Devlet Su İşleri’nin yaptığı hidrojeolojik çalışmada (Anonim 1981), alüvyonlar ile Neojen kireçtaşlarının Kütahya Ovası’nda önemli akifer sistemler olduğu belirtilmiştir.

İnceleme alanında bulunan jeolojik birimlerin hidrojeolojik özelliklerini tespit edebilmek için DSİ tarafından 1981 ve 2003 yıllarında yapılan hidrojeolojik çalışmalar kapsamında, çalışma alanında farklı amaçlar için açılan kuyuların logu, jeofizik loglar, kuyu verimleri, kuyu test verileri ile birimlerin hidrojeolojik özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve su bulundurma özellikleri irdelenmiştir. Bu verilerden yararlanılarak çalışma alanında geçirimli, yarı geçirimli ve geçirimsiz olmak üzere üç farklı formasyon ayrıtlanmıştır. Çalışma alanının genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti üzerinde birimlerin hidrojeolojik özelliklerine göre hidrostratigrafik dikme kesit hazırlanmıştır (Şekil 8.3).

Formasyon	Litolojik Simge	Hidrojeolojik Özellikleri
Alüvyon		Çakıl ve kum - Geçirimli Kil ve silt - Geçirimsiz
Parmakören		Çakıltası ve Kumtaşı - Geçirimli Kiltaşı- Çamurtaşı ile ardalanması çakıltası ve kumtaşı - Az geçirimli Kiltaşı ve silttaşı - Geçirimsiz
Emet		Kireçtaşı ve killi kireçtaşı - Geçirimli Marnlı kireçtaşı - Az geçirimli
Sabuncupınarı		Tüfit - Geçirimli Tüf - Geçirimsiz
Çöğürler Karmaşığı Kırıık Ofiyoliti		Ofiyolitik melanaj - Az geçirimli
Çöğürler Ovacık Melanajı		Kalkşist - Geçirimli Şeyl ve sleyt - Geçirimsiz
Arıkaya		Mermer - Geçirimli
Sarıcasu		Kuvarsitve Kalkşist - Geçirimli Muskovit ve Klorite-şistler - Geçirimsiz

Şekil 8.3 Çalışma alanında yer alan birimlerin hidrojeolojik özelliklerine göre hidrostratigrafik dikme kesit

8.2.1 Geçirimli birimler

Sarıcasu Formasyonu Kuvarsit ve kalkışistler, Arıkaya Formasyonunu oluşturan mermerler; Çöğürler Karmaşığı kristalize kireçtaşı, kalkışist ve ofiyolitli melanji; Sabuncupınar Formasyonu tüfitler; Emet Formasyonu kireçtaşları ve Kili kireçtaşları; Parmakören Formasyonu kumtaşı ve çakıltaşları; kumlu ve çakıllı seviyelerden oluşan Aluvyön Formasyonu geçirimli birimleri oluşturmaktadır.

İnceleme alanında yüzeyleyen kireçtaşları kırıklı-çatlaklı ve çözünmeye bağlı boşluklu yapılarından dolayı en önemli geçirimli birim olarak görülmektedir (Şekil 8.4-8.5).



Şekil 8.4 Kırık ve çatlaklı yapıdaki kireçtaşlarından bir görünüm (Yenibosna'dan çekilmiştir)



Şekil 8.5 Boşluklu kireçtaşlarından bir görünüm (Yenibosna'dan 300 m doğusudan çekilmiştir)

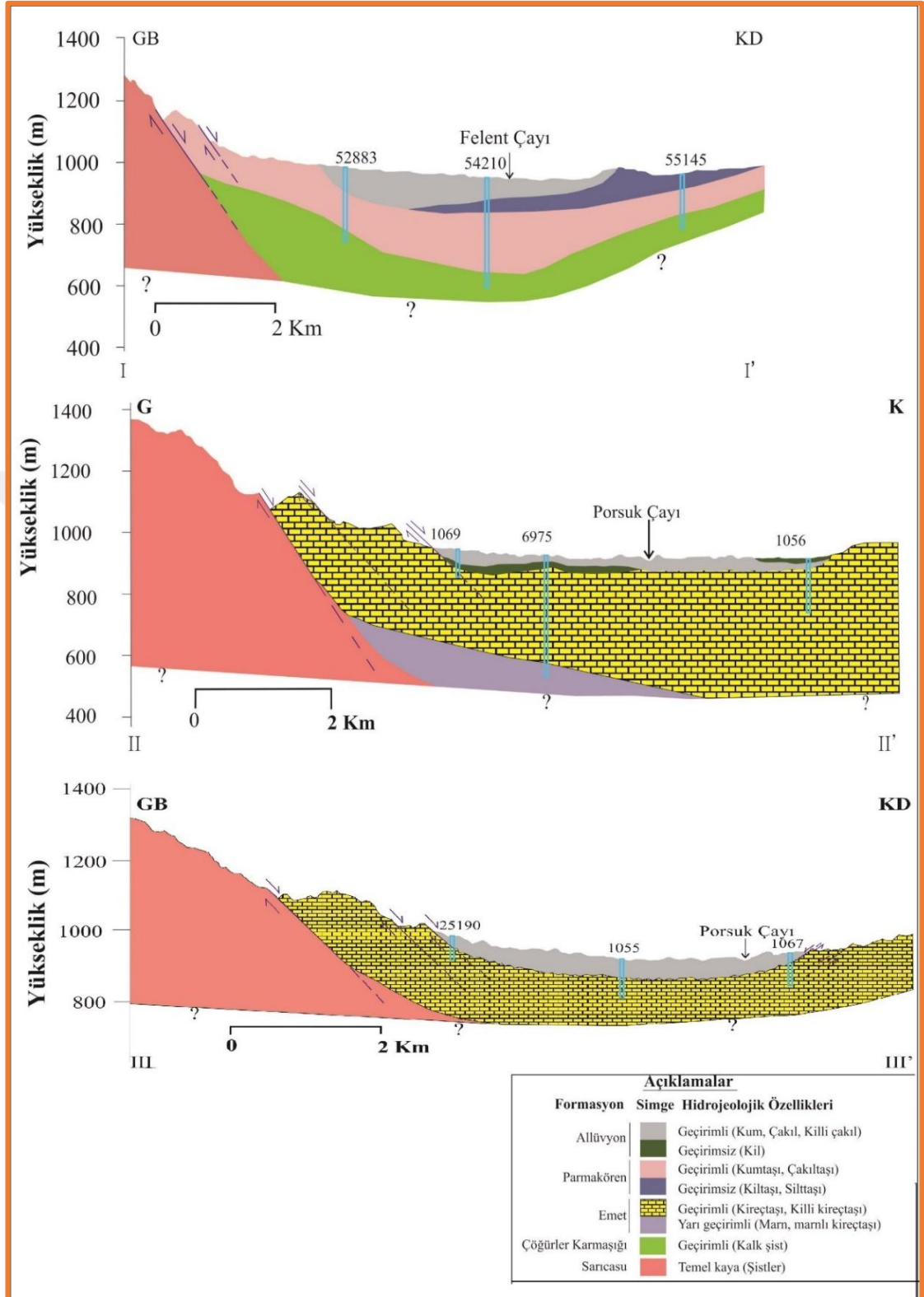
8.2.2 Yarı geçirimli birimler

Çöğürler Karmaşığı kilitaşı, çamurtaşı, şist ve radyolaritlerden; Emet Formasyonu marnlı kireçtaşı; Parmakören Formasyonu kilitaşı, çamurtaşı ile ardalanmalı çakilitaşı ve kumtaşı seviyelerinden oluşmakta olup, yarı geçirimli birimi oluşturmaktadır.

8.2.3 Geçirimsiz birimler

Sarıcasu Formasyonu muskovit-kuars şist, muskovit-albit kuars şist ve klorit-muskovit-albit şistleri; Çöğürler Karmaşığının şeyl ve sleyt; Parmakören Formasyonu ise silttaşı ve kilitaşı birimleri ve alüvyon ise kil oranı yüksek olan düzeleri geçirimsizdir.

İnceleme alanında Kütahya Ovası ve çevredeki birimlerin DSİ tarafından açılan kuyu loglarından yararlanarak hidrojeolojik dikime kesiti elde edilmiştir (Şekil 8.6).



Şekil 8.6 I-I', II-II' ve III-III' enine hidrojeolojik kesitler

8.3 Akifer Oluşuklar

Kütahya Havzası'nda alüvyon (kum, ince kum, çakıl, killi çakıl), kireçtaşları, volkanikler (özellikle tüfler), Parmakören Formasyonu (kumtaşı, çakıltası), Çöğürler karmaşığı (kalk şist) akifer özelliğindeki birimlerdir.

Kütahya Ovası'nda önceki bölümde belirttiği gibi yeraltı suyu taşıyan formasyonlardan önemli olan Alüvyon ve Emet Formasyonu'dur.

Kütahya Ovası alüvyonu altında ve çevresinde yer alan Neojen yaşlı kireçtaşları ve killi kireçtaşları önemli akifer kayalarını oluşturur. Özellikle çalışma alanının doğu ve kuzey doğu kesimlerinde gözlenen kireçtaşları akifer özelliğindeki kayalar, bulundukları kesimlerde önemli oranda yeraltı suyu sağlarlar. Ayrıca, bu akifer sistemler ovadaki alüvyonla bağlantılı olup, alüvyon akiferi yandan beslerler.

Bu bölümde, inceleme alanındaki akiferler tanımlayarak, geometrik konumları ve hidrojeolojik parametreleri (K, T) ve kuyu verimliği konu edilmiştir. Çalışma alanındaki akiferlerin ekonomik kullanımına yönelik hidrojeolojik parametrelerinin hesaplanabilmesi için ortamı temsil eden kuyular seçilmiştir. Bu kuyuların açıldıkları tarihlerde yapılan pompaj deneyleri DSİ tarafından yapılmıştır.

Devlet Su İşleri tarafından gerçekleştirilen testlere ait 50 adet veri üç farklı yöntem kullanılarak (pompaj boyunca zaman-düşüm, yükselim boyunca zaman-düşüm ve özgül kapasite yaklaşımı), Kütahya ve çevre köylerine hem evsel hem de endüstriyel kullanım için su sağlayan birimlerin akifer özelliklerini belirlemek üzere analiz edilmiştir (Berhe vd. 2014).

1960'lardan günümüze kadar Kütahya Ovası'nda açılan bu kuyuların yalnızca 28'inde pompa testi süresince, 27'sinde de yükselim süresince sabit debili pompalama ve 5'inde kademeli pompalama deneyine ait veriler Theis (1935) ve Cooper-Jacob (1946) yöntemlerine uygulanmış ve akiferlerin, T (Transmissivite) ve K (Hidrolik iletkenlik)

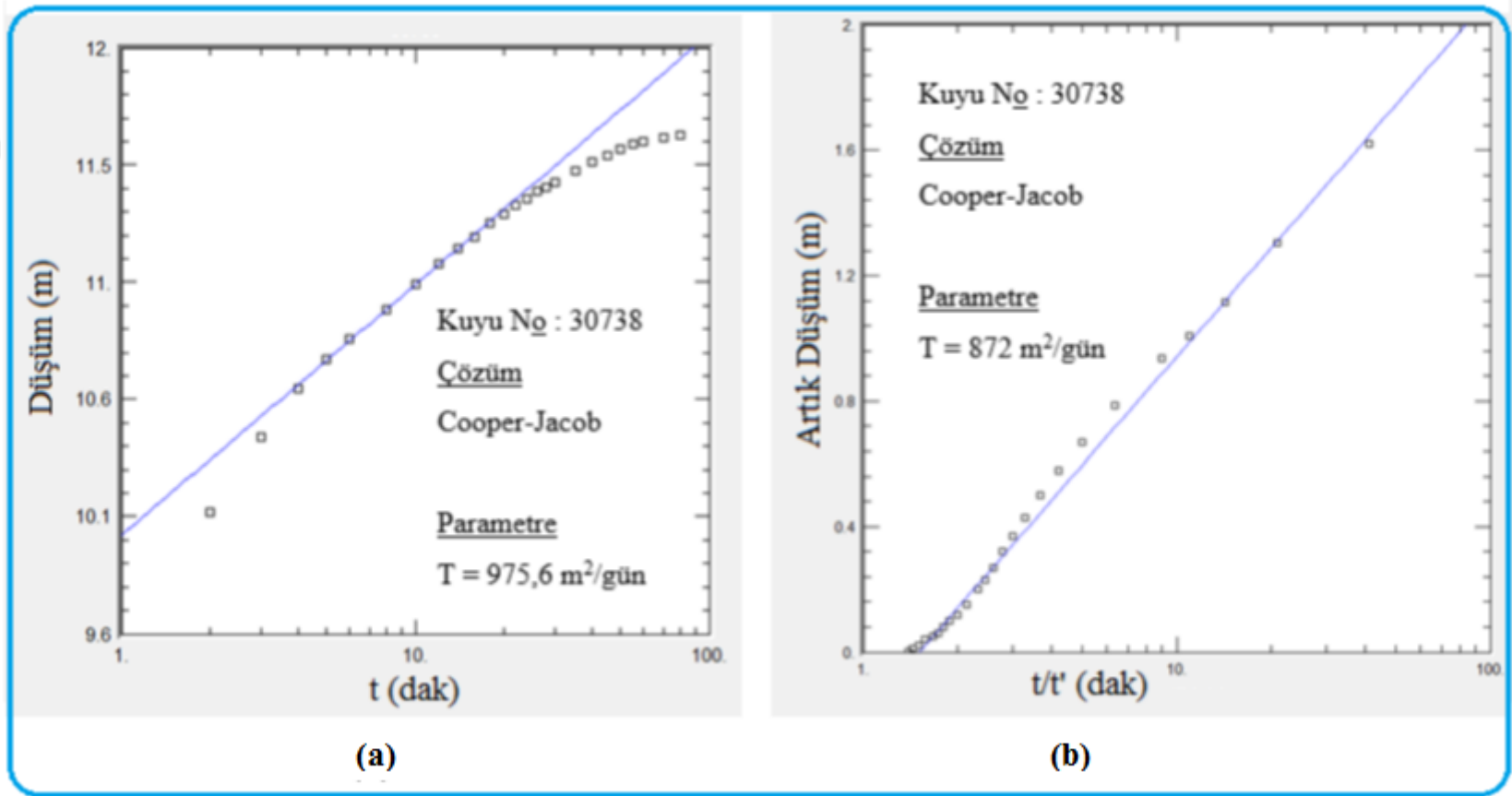
parametreleri hesaplanmıştır (Çizelge 8.3). Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde Aquifer Test 4.5 bilgisayar yazılım programından yararlanılmıştır. Bu program yardımıyla sabit debili pompalama sırasında pompaj deneyinde ve daha sonra yapılan yükselim deneyinde çizilen örnek grafikler de akiferin transmissivitesi otomatik olarak program tarafından hesaplanmıştır (Şekil 8.7-8.8). Aynı program ve yöntem kullanılarak çalışma alanında yapılmış kademeli pompalama sonucu elde edilen akiferlerin hidrojeolojik parametreleri çizelge 8.4'te ve program içinde çizilen grafiklerden alınmış olup, bir örneği şekil 8.9'da verilmiştir.



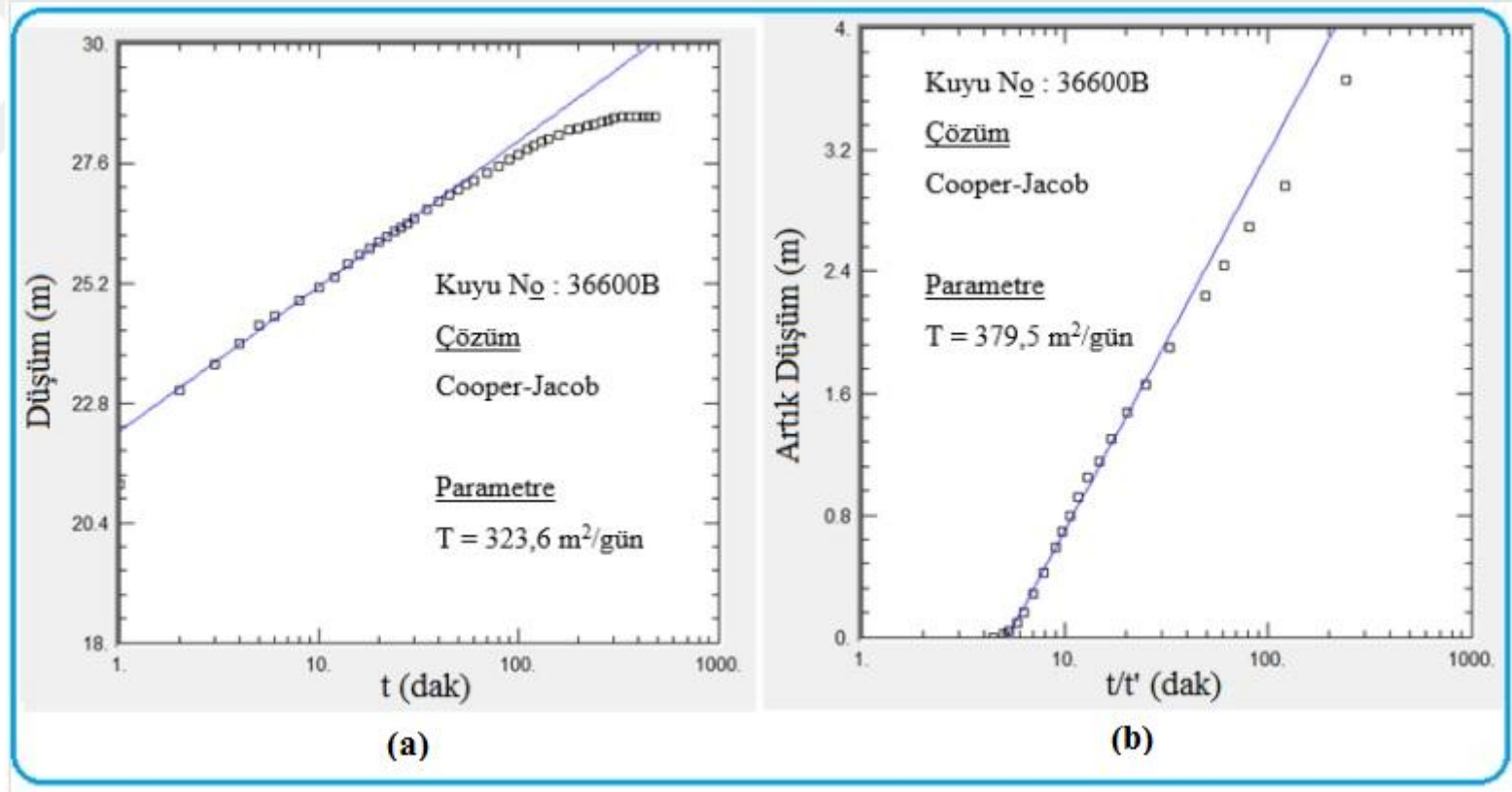
Çizelge 8.3 Akiferlerin hidrojeolojik parametreleri (Cooper-Jacob yöntemi) - Sabit debili

Sıra No	Kuyu No	Lokasyon		Cooper- Jacob (Pompaj boyunca zaman-düşüm, t/s)		Cooper- Jacob (Zaman-Artık düşüm, t/t' - s')		Akifer	
		X	Y	T (m ² /gün)	K (m/gün)	T (m ² /gün)	K (m/gün)	Litoloji	Formsyon
1	6977	234275	4372555	1,6	0,32			Çakıllı kil	Alüvyon
2	35221	236279	4371901	22	0,04	17	0,3	Kil yer yer çakıllı	Alüvyon
3	41548	240870	4367548	2,3	0,004	1,6	0,03	Kil-çakıl	Parmakören
4	41173	241006	4367820	3,6	0,004	1,8	0,02	Kil-çakıl	Parmakören
5	55145	238267	4373819	1,6	0,001	1,5	0,02	Kumtaşı	Parmakören
6	6973	244736	4372853	484	1,24	240	6	Kireçtaşı	Emet
7	6974B	241793	4369551	54	0,34	56	3,5	Kireçtaşı	Emet
8	25190	244654	4364082	34	0,02	44	0,3	Kireçtaşı	Emet
9	28569	245763	4374615	39	0,09	11	0,3	Kireçtaşı	Emet
10	28658	245407	4374504	320	0,46	999	1,4	Kireçtaşı	Emet
11	30738	244207	4372818	976	0,61	872	5,5	Kireçtaşı	Emet
12	30739	243916	4372440	2000	1,51	1450	11	Kireçtaşı	Emet
13	31431	244638	4364253	139	0,12	379	3	Kireçtaşı	Emet
14	35537	243800	4371264	187	0,15	165	1,3	Kireçtaşı	Emet
15	39412	246500	4361950	448	1,28	155	4,4	Kireçtaşı	Emet
16	46872	238710	4368432	4	0,002	1,1	0,01	Killikireçtaşı	Emet
17	57620	243516	4366645	17	0,03	21	0,3	Killikireçtaşı	Emet
18	36600B	244674	4373503	324	0,25	379	3	Kireçtaşı	Emet
19	57387	239423	4371657	8	0,01	7	0,03	Ofiyolit	Çöğürler Karmaşık
20	36805	255850	4359300	185	0,2	247	2	Tüfit	Sabuncupınarı
21	36806	255100	4360950	369	0,3	384	3	Tüfit	Sabuncupınarı
22	36807	254500	4361325	700	0,5	755	5	Tüfit	Sabuncupınarı
23	36808	255450	4360150	206	0,2	161	1,3	Tüfit	Sabuncupınarı
24	36809	253600	4361775	155	0,12			Tüfit	Sabuncupınarı
25	49878	251750	4367450	44	0,03	99	0,7	Tüfit	Sabuncupınarı
26	49879	252300	4365800	48	0,03	25	0,2	Tüfit	Sabuncupınarı
27	49880	252550	4365175	39	0,03	164	1,2	Tüfit	Sabuncupınarı
28	49881	252825	4364525	59	0,04	87	0,6	Tüfit	Sabuncupınarı

(t: zaman, t': yükselim zaman, s: düşüm, s': artık düşüm)



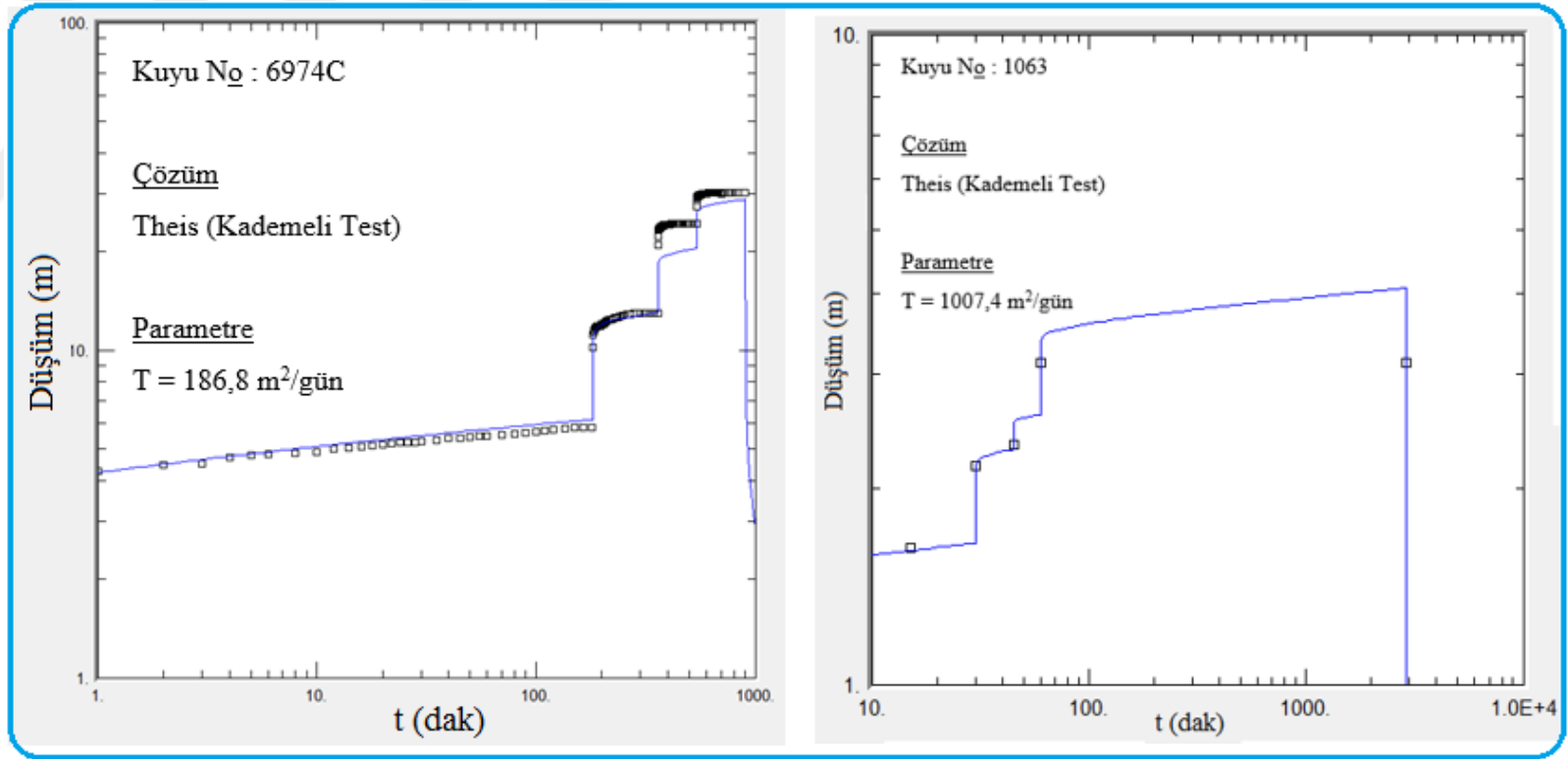
Şekil 8.7.a. DSİ 30738 kuyusu pompajı sırasında, b. yükselim sırasında yapılan deney grafikleri



Şekil 8.8.a. DSİ 36600B kuyusu pompajı sırasında, b yükselim sırasında yapılan deney grafikleri

Çizelge 8.4 Akiferlerin hidrojeolojik parametreleri (Theis (1935) yöntemi) - Kademeli debili

Sıra No	Kuyu No	Theis (1935) kademeli düşüm test yöntemi		Akifer	
		T (m ² /gün)	K (m/gün)	Litoloji	Formasyon
1	1063	1007	336	Killi Çakıl	
2	1076	84	4	Çakıllı Kil	Alüvyon
3	6974C	187	11	Çakıllı Kil	
4	1067	786	11		
5	6975	276	1	Kireçtaşı	Emet



Şekil 8.9 DSİ 6974C ve 1063 kuyuları kademeli pompaj deney grafikleri

Bunun yanı sıra, 41 adet pompaj verisi ile transmissivite, pompa testi süresince düşüm verilerini kullanan Driscoll (1986) yöntemi ile hesaplanmıştır. Driscoll (1986) yönteminden elde edilen verilere göre alüvyon akiferin, Emet Formasyonu'nun, Çalca Tüfitleri'nin ve Parmakören Formasyonu'nun transmissivite ve hidrolik iletkenliği sırasıyla 5,5 ile 729 m²/gün ve 0,5 ile 243 m/gün, 3,3 ile 2662 m²/gün ve 0,01 ile 26 m/gün, 72 ile 293 m²/gün ve 0,5 ile 2,5 m/gün ve 4,5 ile 27 m²/gün ve 0,1 ile 2,4 m/gün arasında değişmektedir (Çizelge 8.5).

$$\text{Basınçlı akifer, } T = 1,385(Q/S_w) \quad (8.1)$$

$$\text{Serbest akifer, } T = 1,042(Q/S_w) \quad (8.2)$$

$$S_c = Q/S_w$$

Sc: Özgül Kapasite (m²/gün)

T: Transmissivite (m²/gün)

Q: Verim (m³/gün) veya Pompaj debisi

S_w: Kuyuda düşüm (m)

Çizelge 8.5 Akiferlerin hidrojeolojik parametreleri Driscoll (1986) yöntemi

Sıra No	Kuyu No	X	Y	Akifer	Akifer tipi	Q (L/s)	S _w (m)	Akifer Kalınlığı (m)	Özgül Kapasite Sc (m ² /gün)	T (m ² /gün)	K (m/gün)
1	1054	241118	4370369	Kum, kum-çakıl	Serbest	12	3,15	42	329	343	8
2	1055	245653	4366454	Kum, çakıl, kum-çakıl, killi çakıl	Serbest	15	6,3	54	206	214	4
3	1057	241719	4367660	Çakıl, çakıllı kum, killi çakıl	Serbest	7	7,4	97	82	85	0,9
4	1063	242221	4370042	Killi Çakıl	Basınçlı	19	3,12	3	526	730	243
5	1076	242922	4366246	Çakıllı Kil	Basınçlı	8,9	8,83	20	87	120	6
6	6974C	241793	4369551	Çakıllı Kil	Basınçlı	40	31,05	17	111	154	7
7	6977	234275	4372555	Çakıllı, Killi Çakıl	Basınçlı	0,9	18,78	5	4	6	1,2
8	35221	236279	4371901	Kil yer yer çakıllı	Serbest	6,24	19,18	63	28	29	0,5
9	41548	240870	4367548	Kil-çakıl	Basınçlı	2	50,5	63	3,4	5	0,1
10	41173	241006	4367820	Kil-çakıl	Serbest	7,44	25,6	59	25	26	0,44
11	55145	238267	4373819	Kumtaşı	Basınçlı	12,3	54,68	87	20	27	0,3
12	1053	244953	4369790	Kireçtaşı	Basınçlı	5	0,65	35	665	920	26
13	1056	244914	4370463	Kireçtaşı	Basınçlı	10	5,3	94	163	226	2,4
14	1067	247744	4366545	Kireçtaşı	Serbest	5	1,45	70	298	310	4,43
15	6973	244736	4372853	Kireçtaşı	Serbest	28	23,02	39	105	110	3
16	6974A	241793	4369551	Kireçtaşı	Basınçlı	2,2	31,33	99	6	8	0,1
17	6974B	241793	4369551	Kireçtaşı	Basınçlı	4,9	10,66	16	40	55	3,4
18	6975	244543	4366877	Kireçtaşı	Basınçlı	0,7	23,26	299	2,6	3,6	0,01
19	25190	244654	4364082	Kireçtaşı	Serbest	30,27	39,3	153	67	69	0,5
20	28569	245763	4374615	Kireçtaşı	Serbest	8,8	32,8	44	23	24	0,6

Çizelge 8.5 Akiferlerin hidrojeolojik parametreleri Driscoll (1986) yöntemi (devam)

Sıra No	Kuyu No	X	Y	Akifer	Akifer tipi	Q (L/s)	S _w (m)	Akifer Kalınlığı (m)	Özgül Kapasite Sc (m ² /gün)	T (m ² /gün)	K (m/gün)
21	28658	245407	4374504	Kireçtaşı	Serbest	50,46	23,8	68,5	183	191	2,3
22	30738	244207	4372818	Kireçtaşı	Serbest	63,2	12,1	160	451	470	2,9
23	30739	243916	4372440	Kireçtaşı	Serbest	84,27	2,85	133	2555	2662	20
24	31431	244638	4364253	Kireçtaşı	Serbest	15,8	4,93	121	277	289	2,4
25	35537	243800	4371264	Kireçtaşı	Serbest	78,83	21,32	125	320	333	2,7
26	39412	246500	4361950	Kireçtaşı	Basıncılı	20	26,41	35	65	91	2,6
27	46872	238710	4368432	Killi kireçtaşı	Serbest	2	55,83	133	3	3,3	0,02
28	57620	243516	4366645	Killi kireçtaşı	Basıncılı	14,45	26,25	65	48	66	1,01
29	36600B	244674	4373503	Kireçtaşı	Basıncılı	59,54	28,5	129	181	250	1,9
30	37680	243594	4373435	Şist	Serbest	18,36	44,58	30	36	37	1,2
31	57387	239423	4371657	Ofiyolit	Serbest	7	42,02	195,3	14	15	0,1
32	32322	251325	4366750	Tüfit	Serbest	38	14,95	199,3	220	229	1,2
33	36805	255850	4359300	Tüfitt	Serbest	68	27,91	125,6	210	219	1,8
34	36806	255100	4360950	Tüfit	Serbest	80,22	24,64	130,4	281	293	2,3
35	36807	254500	4361325	Tüfit	Serbest	56,01	41,11	135,7	118	123	1
36	36808	255450	4360150	Tüfit	Serbest	51	34,12	128,9	129	135	1
37	36809	253600	4361775	Tüfit	Serbest	81	36,19	136,3	193	201	1,5
38	49878	251750	4367450	Tüfit	Serbest	50	42,96	146	100	105	0,7
39	49879	252300	4365800	Tüfit	Serbest	50	48,82	156	88,5	92	0,6
40	49880	252550	4365175	Tüfit	Serbest	38,75	48,28	140,3	69	72	0,5
41	49881	252825	4364525	Tüfit	Serbest	50,46	44,66	145	98	102	0,7

8.3.1 Alüvyon akifer

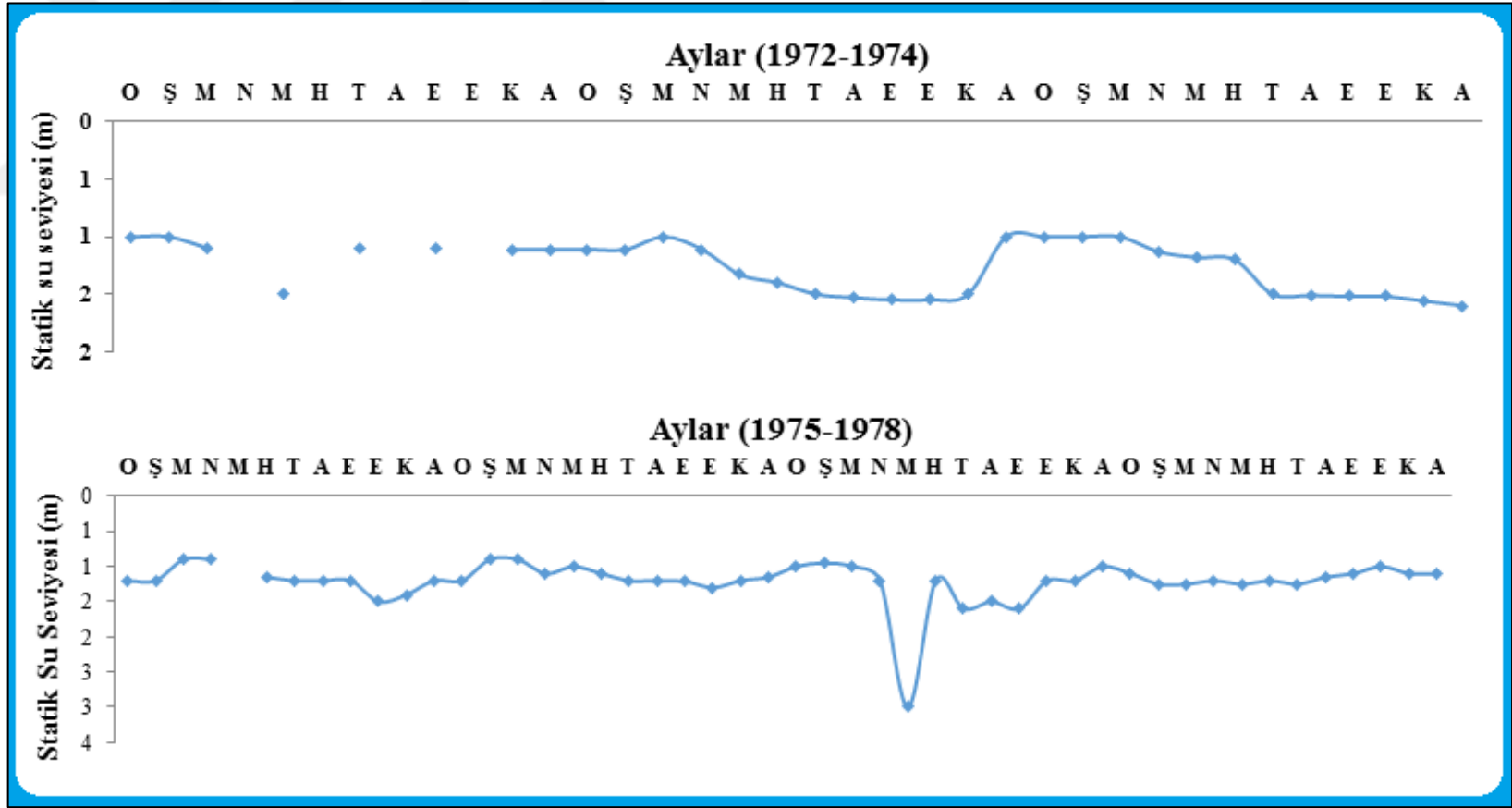
Alüvyon akiferin doğu-batı uzunluğu 28 km'dir, sondaj kuyularının logları incelendiğinde; alüvyon akiferin yersel olarak farklılıklar gösterdiği, kil seviyelerinin bölgesel olarak kalınlaştığı ve/veya sık tekrarlandığı görülmektedir. Kil seviyeleri arasında genel olarak çakıl ve killi çakıl seviyeleri bulunmaktadır. Çizelgede verilen hidrolik parametreler kuyu logları ile birlikte değerlendirildiğinde; tane boyutları arttıkça permeabilite ve transmisibilite katsayılarının arttığı görülmektedir. Kil oranının artışına bağlı olarak hidrolik parametrelerde düşme tespit edilmiştir.

Alüvyon akiferde açılan 1054 numaralı kuyuda 1972 ile 1978 yılları arasında aylık seviye ölçümü yapılmıştır (Şekil 8.10). Kuyu seviye değişim grafiğinde görüldüğü gibi 1976 ve 1978 yıllarında genellikle yıllık yeraltı su seviye değişiminin olmadığı tespit edilmiştir.

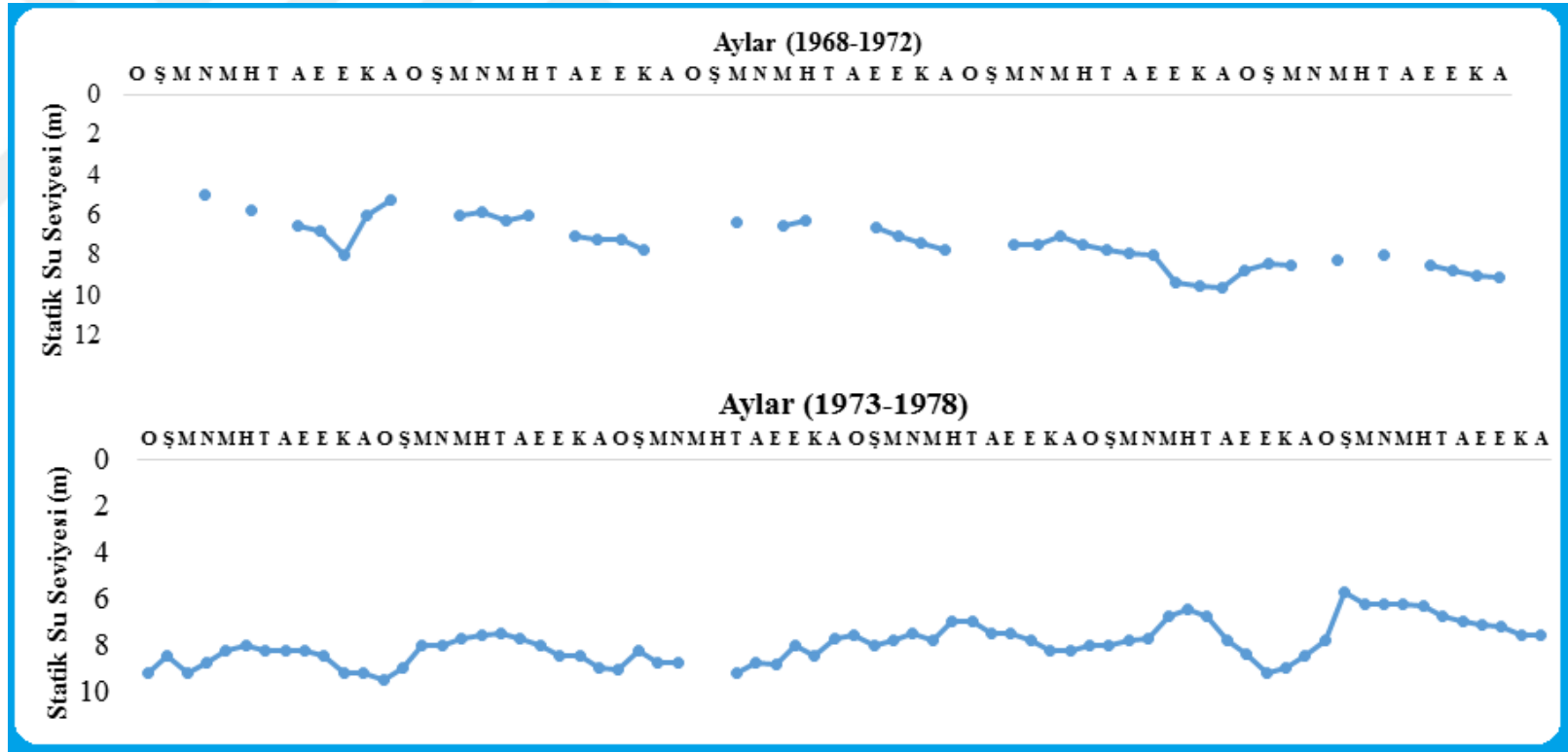
Kütahya Ovası içinde Alüvyon akiferinde açılan derinliği 264 m olan 6977 numaralı kuyunun 1968-1978 yılları arasında statik su seviyeleri şekil 8.11'de verilmiştir.

Çalışma alanının batısındaki Kirazpınarı Köyünde bulunan 6977 nolu kuyu alüvyon içerisinde açılmış olup kil seviyeleri nedeniyle Cooper-Jacob yöntemi ile hesaplanan transmisibilite değeri düşüktür ($T=1,6 \text{ m}^2/\text{gün}$). Bu kuyunun permeabilite katsayısı (K) 0,3 m/gün olarak bulunmuştur. Yine alüvyonda açılan 1054 nolu kuyuda transmisibilite değeri (T) $343 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve permeabilite katsayısı (K) 8 m/gün olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.3). Bu kuyuda hidrolojik parametrelerin yüksek olması çakıl seviyelerinin kalınlığı ile açıklanabilmektedir.

Alüvyal akiferin farklı yöntemlerle hesaplanan T ve K değerleri sırasıyla $1,6-343 \text{ m}^2/\text{gün}$ ve 0,04-11 m/gün arasında değişmektedir (Çizelge 8.3-8.5).



Şekil 8.10 DSI kuyusu (No: 1054) seviye değişim grafiği



Şekil 8.11 DSİ kuyusu (No: 6977) seviye değişim grafiği

8.3.2 Parmakören Formasyonu akiferi

Pliyosen yaşlı çakıltası, kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı, kiltası birimlerinin kalınlığı ovanın orta kesimlerinde 6977 nolu sondaj kuyusunda 252 m ve 54210 nolu sondaj kuyusunda ise 297 m kalınlığa ulaşmaktadır (EK 1, EK 2).

Sonuç olarak pompaj sırasında ölçülen zaman-düşüm grafiğinden hesaplanan akifer özelliklerinden hidrolik iletkenlik Parmakören Formasyonu için 1,5 ile 3,6 m²/gün ve 0,002 ile 0,004 m/gün arasında değişmektedir. Aynı zamanda yükselim süresince hesaplanan transmissivite ve hidrolik iletkenlik ise 1,5 ile 1,8 m²/gün ve 0,02 ile 0,03 m/gün arasında değişmektedir (Çizelge 8.3, 8.5).

8.3.3 Emet Formasyonu akiferi

Pompaj sırasında ölçülen zaman-düşüm grafiğinden hesaplanan hidrolik iletkenlik akifer parametresi Emet Formasyonu için 3,6 ile 2000 m²/gün ve 0,003 ile 11 m/gün arasında değişmektedir. Ancak yükselim süresince ise transmissivite ve hidrolik iletkenlik ise 1,1 ile 1450 m²/gün ve 0,01 ile 11 m/gün arasında değişmektedir (Çizelge 8.3-8.5).

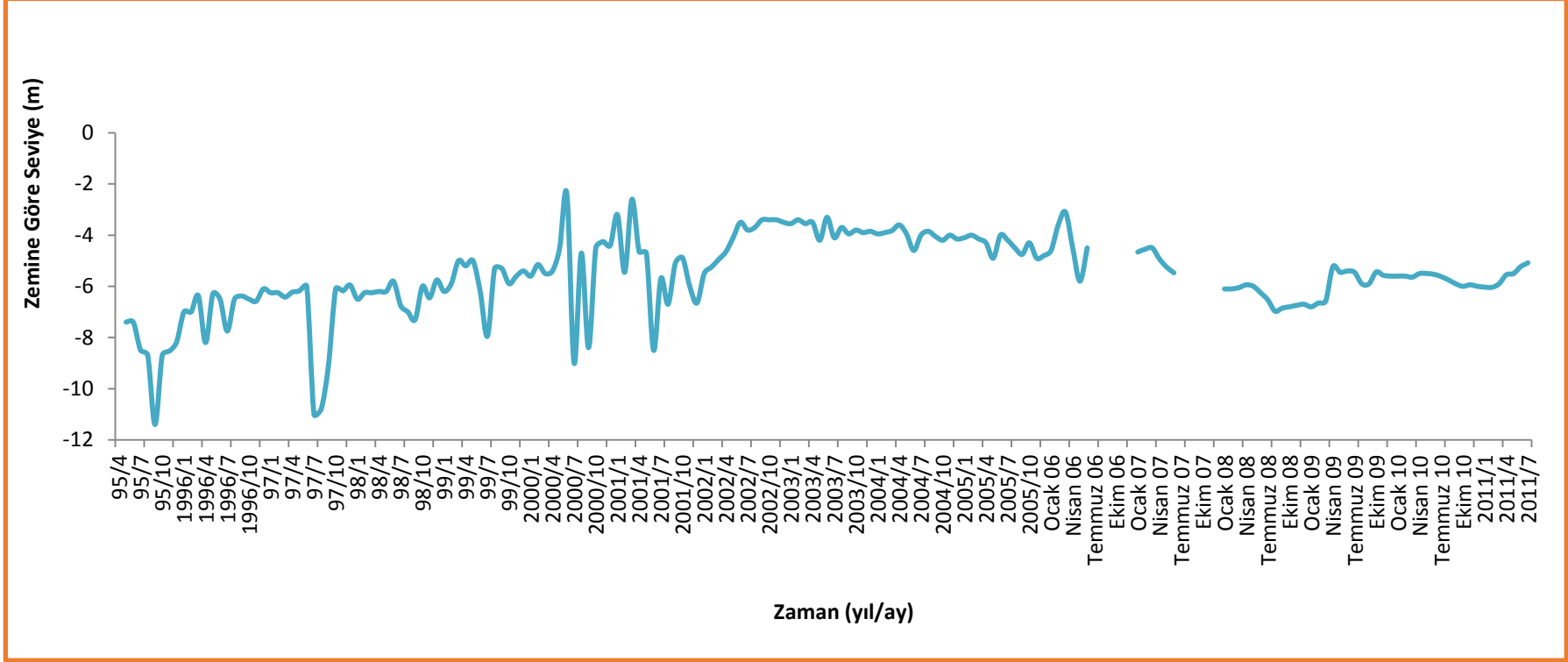
8.3.4 Sabuncupınarı Formasyonu akiferi

Kütahya Ovası'nda Devlet Su İşleri'ne ait 36809 numaralı (Büyüksaka) Sabuncupınarı Formasyonunda açılan gözlem kuyusunda 1961'den beri Devlet Su İşleri tarafından uzun süreli yeraltı su seviye ölçümü yapılmaktadır. Şekil 8.12'ye göre Büyüksaka kuyusunda 2002 yılının dördüncü ayından itibaren genel olarak yeraltı suyu ortalama yıllık seviye değişiminin çok fazla olmadığı görülmektedir.

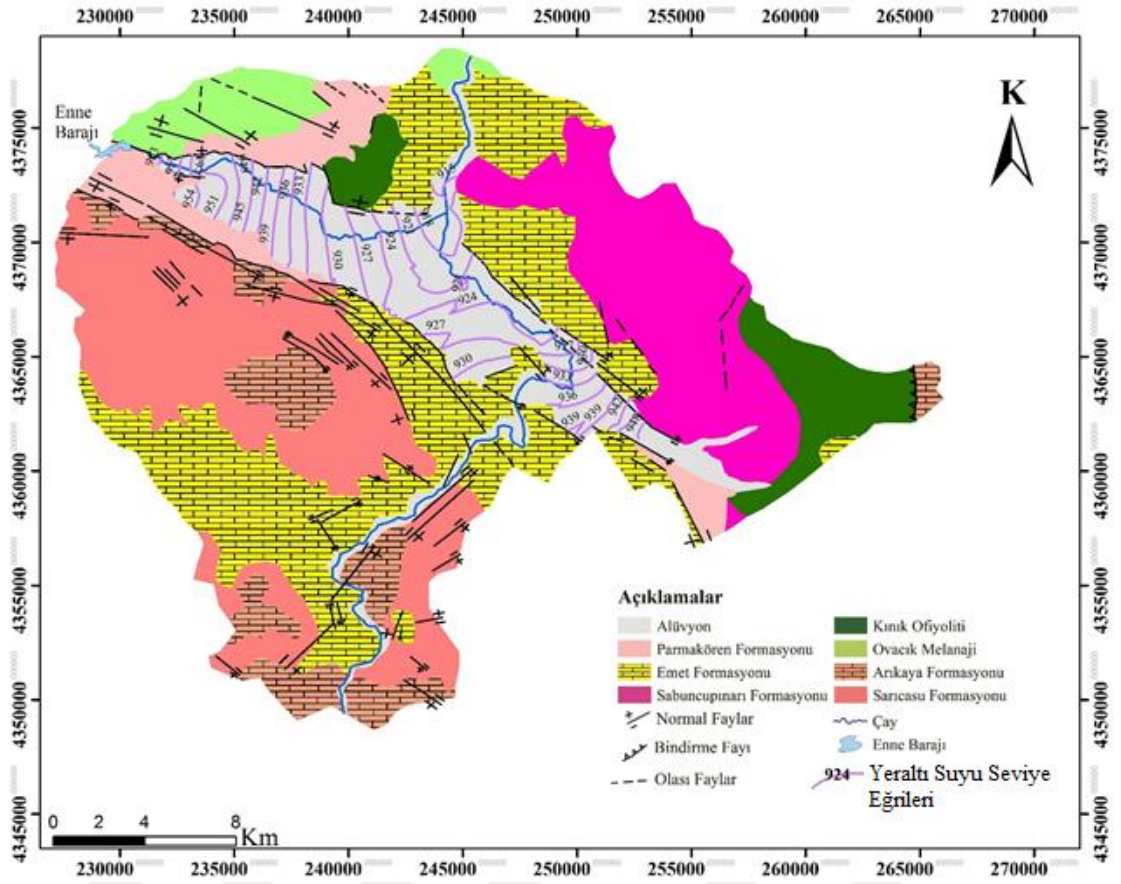
Sonuç olarak pompaj sırasında zaman-düşümden hesaplanan transmissivite ve hidrolik iletkenlik akifer özellikleri, sırasıyla Çalca Tüfitleri için 39 ile 700 m²/gün ve 0,03 ile

0,52 m/gün arasında değişmekte olup, yükselim süresince ise transmissivite ve hidrolik iletkenlik akifer özellikleri 24,5 ile 755 m²/gün ve 0,16 ile 5,6 m/gün arasında değişmektedir (izelge 8.3, 8.5).





Şekil 8.12 DSİ kuyusu (No: 36809) seviye değişim grafiği (1996-2011)



Şekil 8.13 Alüvyon akiferine ait yeraltı suyu seviye haritası (Haziran 2014)

9. HİDROJEOKİMYASAL ÇALIŞMALAR

Tez sahasında bugüne kadar yapılan çalışmalardan, Anonim (1981) tarafından hazırlanan Kütahya ve Köprüören Ovaları'nın hidrojeolojik etüt raporunda akarsular, kaynaklar ve yeraltı sularının genel olarak oldukça bazik, orta tuzlu, kalsiyum bikarbonatlı ve düşük klorürlü sular olduğu belirlenmiştir.

KAVAF (2007)'in çalışmasında Kütahya Ovası'nın su kalitesi ve kirlilik durumu ortaya konarak olası kirletici unsurlar belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma alanındaki kaynak, yeraltı ve yüzey sularının kalitesi ve kirlilik durumu kısmen ortaya konulmuştur. Elektriksel iletkenlik (EC), klorür (Cl^-), sertlik ve sülfat (SO_4^{2-}) konsantrasyonlarının inceleme alanındaki dağılım haritaları hazırlanmış ve inceleme alanının kuzeybatı kesimlerinde konsantrasyonun arttığı belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, çalışma alanında yer alan kaynak, yüzey ve yeraltı sularının hidrojeokimyasal olarak alansal ve zamansal değişimlerini değerlendirmek amacıyla kurak (Aralık 2013) ve yağışlı (Haziran 2014) dönemlerde major iyon ve iz element (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br^- , F^- , NO_2^- , NO_3^- ve PO_4^{-3}) analizleri için toplam 27 adet tanımlayıcı örneklemeler ve yerinde ölçümler yapılmıştır (Çizelge 9.1 ve Şekil 9.1). Her iki dönemde yapılan ölçümlerin ortalama değerleri Çizelge 9.2'de verilmiştir. Her iki dönemde yapılan su kimyası analiz sonuçları ayrı ayrı EK 5 ve EK 6 'da sunulmuştur.

Çizelge 9.1 Su örnekleme noktaları

Örnek Numarası	X	Y	Su noktası	Açıklamalar
PÇ-3	247420	4363425	Porsuk Çayı	Yüzey suları
PÇP	243965	4369577		
PÇÇ	244194	4372525		
FÇ-1	238706	4370964	Felent Çayı	
FÇ-2	241403	4370637		
FÇ-3	244251	4371683		
SKK	232809	4370642	Kaynak	Mermer Akifer
OKK	234155	4370164		
SÇ	252318	4361648	Sığ kuyu	Alüvyon Akifer
AKÇ	249890	4363229		
ÇÇ	252318	4361648		
BST-1	253883	4361871		
BST-2	254107	4361127		
AT-1	250637	4365185		
İYKT-1	247523	4366858		
ZKT-1	245326	4366463		
KOY-1	236289	4371809		
BK-A	236905	4370311		
İG-1	241402	4370627		
İG-2	241489	4370790		
İG-3	241608	4371230		
KOYM	236613	4370830		
K-1	245325	4374761	Derin kuyu	Emet Formasyonu (Akifer: Kireçtaşı)
K-2	245221	4374579		
PÖ-1	238649	4373681		Parmakören Formasyonu (Akifer:
SKÇK	232311	4371705		Çakıltısı, Kumtaşı)
OK Kuyu	234313	4370490		

alanına yakın olduğunu ve su-kayaç ilişkisinin çok etkili olmadığını düşündürmektedir (Çizelge 9.2).

İki dönemde yüzey suları, yeraltı suları ve kaynak sularının ortalama sıcaklıkları sırasıyla 15,3 °C, 14,5 °C ve 12,8 °C 'dir (Çizelge 9.2).

Aralık 2013 ve Haziran 2014'te yapılan yüzey sularının kimyasal analizlerinin sonuçlarının ortalamasına göre Cl^- değeri 1,71 ile 142,47 mg/l; SO_4^{2-} değeri 6,28 ile 539,88 mg/l ve HCO_3^- değeri 2334,61 ile 458,98 mg/l; major katyonlar ise Na^+ değeri 9,15 ile 27,92 mg/l; K^+ değeri 2,46 ile 158,99 mg/l, Mg^{2+} değeri 6,89 ile 237,91 mg/l ve Ca^{+2} değeri 21,93 ile 154,30 mg/l arasında değişmektedir. Yeraltı sularının ise Cl^- değeri 1,63 ile 110,99 mg/l; SO_4^{2-} değeri 5,21 ile 430,32 mg/l ve HCO_3^- değeri 284,27 ile 630,84 mg/l; major katyonlar ise Na^+ değeri 1,24 ile 63,35 mg/l; K^+ değeri 0,52 ile 165,99 mg/l, Mg^{+2} değeri 12,42 ile 173,39 mg/l ve Ca^{+2} değeri 53,68 ile 165,4 mg/l arasında değişmektedir (Çizelge 9.2). İki adet kaynağa (SKK ve OKK) ait iki dönem ortalaması çizelge 9.2'de verilmiştir.

Çalışma alanında ana katyon kalsiyum (Ca^{+2}) ve magnezyum (Mg^{+2}) iyonu, ana anyon ise genel olarak bikarbonat (HCO_3^-) iyonu olup, alüvyon akiferde açılmış yeraltı suyu örnek noktasında (İG-3) ise sülfat (SO_4^{2-}) iyonu baskındır. Genel olarak, Kütahya Ovası'nın beslenme alanlarında karbonatlı kayaçlar bulunduğu için Ca^{+2} , Mg^{+2} ve HCO_3^- tipli sular olağandır. Magnezyum, sondajlarda (K-1 ve PÖ-1) kesilen serpantin ve peridotit gibi ultrabazik kayalar oluşturan olivin ve hornblend minerallerin bozulması ile suya geçmektedir.

Örnek IG-3'te SO_4^{2-} iyonunun baskın olarak bulunması ve bu örneğin alındığı su noktası ve yakın konumlarda jips bulunmaması nedeniyle atıklardan etkilenmiş olabileceği düşünülmektedir. Tüm sularda klorür (Cl^-) içeriği oldukça düşüktür. Bu düşük Cl^- içeriği, alanı besleyen su kaynaklarının meteorik orijinli oluklarını göstermektedir.

Çalışma kapsamında ana katyon ve anyon analizlerinin yansira her iki dönemde iz element analizleride gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar sonuçlarına göre yüzey suların F^- , Li^+ ve Br^- ortalama konsantrasyonları sırasıyla 0,19-0,29 mg/l, 0,01-0,02 mg/l ve 0,01-0,10 mg/l aralıklarında değişirken yeraltı sularının ise 0,06-2,84 mg/l, 0,0-0,08 mg/l ve 0,0-0,38 mg/l aralıklarında olduğu belirlenmiştir (Çizelge 9.2). SKK ve OKK kaynak suyu örnekleme noktalarında yapılan iz element analizler sonuçlarında F^- , Li^+ ve Br^- ortalama konsantrasyonları sırasıyla 0,09 mg/l, 0,0 mg/l ve 0,025 mg/l olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 9.2 Çalışma alanı yüzey, kaynak ve yeraltı sularının iki döneme ait kimyasal analiz sonuçları ortalama verileri

Örnek No	pH	T°	EC	Li ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻	Br ⁻	F ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	% Hatta
PÇ-3*	7,91	15,4	580,5	0,02	0,39	2,46	9,15	23,18	82,83	0,03	0,01	0,20	0,09	3,34	3,67	14,61	334,61	4,52
PÇP*	8,04	15,9	636,5	0,02	0,56	3,42	13,18	25,03	85,49	0,18	0,04	0,26	0,30	4,39	9,26	24,10	358,30	2,01
PÇÇ*	7,47	16,7	803,25	0,02	13,19	6,41	27,92	28,48	81,99	0,51	0,04	0,28	0,35	0,80	21,92	34,97	416,04	1,98
FÇ-1*	8,55	13,6	897,25	0,01	4,46	6,29	20,44	46,37	96,28	0,24	0,05	0,29	0,49	11,03	21,62	65,73	426,41	3,95
FÇ-2*	8,12	12,9	830,75	0,01	0,79	5,01	18,31	45,85	87,55	0,00	0,06	0,19	0,90	5,60	21,44	65,16	381,99	4,19
FÇ-3*	7,53	17,2	891,5	0,01	6,71	18,77	25,65	35,38	99,16	0,00	0,10	0,23	0,50	0,78	22,57	38,49	458,98	4,46
SKK■	8,23	11,7	457	0,00	0,26	0,69	1,76	24,43	59,28	0,00	0,02	0,07	0,07	1,94	1,71	6,28	279,83	2,75
OKK■	7,74	13,8	616,75	0,00	0,34	1,03	3,10	55,47	51,47	0,00	0,03	0,12	0,07	0,47	3,38	16,67	382,29	4,27
SÇ▲	7,35	17,1	611,75	0,02	0,14	2,54	8,30	22,77	90,18	0,13	0,01	0,36	0,23	6,41	5,16	17,49	349,42	3,35
AKÇ▲	7,74	15,2	742,5	0,02	0,23	4,08	15,71	34,64	93,18	0,34	0,03	0,36	0,27	6,47	13,52	33,63	395,32	3,74
ÇÇ▲	7,83	14,4	598	0,03	0,28	4,11	6,69	40,61	62,82	0,22	0,02	0,33	0,23	8,09	5,71	13,01	355,34	3,56
BST-1▲	7,72	14,8	674,25	0,01	0,08	2,95	4,06	40,70	80,11	0,22	0,04	0,21	0,18	10,49	7,05	12,71	384,95	4,38
BST-2▲	7,52	14,5	769,75	0,01	0,03	2,32	5,30	59,67	73,50	0,34	0,01	0,17	0,33	10,62	4,25	14,53	456,02	4,55
AT-1▲	7,57	15,5	2060,75	0,07	0,00	162,49	65,85	103,03	119,56	0,66	0,16	0,26	2,84	220,43	94,86	146,68	626,34	4,51
İYKT-1▲	8,11	16,8	1831	0,08	0,14	117,70	63,66	84,13	149,43	0,70	0,24	0,48	0,69	160,79	90,66	180,12	583,71	4,23
ZKT-1▲	7,52	16,0	845	0,01	0,13	0,73	18,53	9,66	155,78	0,13	0,04	0,14	0,22	16,65	15,44	51,71	430,85	2,87
KOY-1▲	7,49	10,6	810,25	0,00	0,47	2,24	9,96	47,11	95,08	0,00	0,04	0,11	0,06	30,47	15,21	26,04	430,85	3,41
BK-A▲	7,77	13,8	672,5	0,00	0,31	1,07	4,96	41,89	76,28	0,00	0,02	0,09	0,10	25,53	11,42	13,62	359,78	4,08
İG-1▲	7,52	14,3	1289,25	0,01	0,74	3,84	41,85	79,91	121,82	0,00	0,20	0,20	0,17	5,60	72,20	208,11	439,73	3,33
İG-2▲	7,89	12,9	829	0,01	0,43	2,34	19,15	54,84	79,22	0,00	0,05	0,38	0,08	0,21	16,45	57,61	426,41	3,89
İG-3▲	8,06	13,5	2478,5	0,01	1,69	6,53	89,63	205,65	139,43	0,00	0,38	0,41	0,17	0,54	142,47	539,88	691,43	2,52
KOYM▲	7,38	12,1	964	0,00	1,00	11,77	12,13	49,78	112,47	0,00	0,04	0,10	0,42	14,52	27,02	38,50	503,40	2,66
K-1▼	7,53	16,1	768,25	0,02	0,37	6,71	24,80	28,54	94,74	0,00	0,05	0,26	0,07	21,70	51,03	45,83	307,96	3,35
K-2▼	7,75	16,6	686,75	0,02	0,52	6,55	15,39	38,55	68,27	0,00	0,05	0,19	0,09	18,83	17,23	43,72	313,89	4,10
PÖ-1▼	7,89	16,3	546,25	0,00	0,58	1,65	15,57	31,58	51,92	0,00	0,06	0,34	0,07	14,13	6,30	9,23	313,88	1,49
SKÇK▼	7,75	11,8	731	0,00	0,32	0,96	5,60	19,08	127,12	0,00	0,03	0,08	0,07	8,68	7,45	7,47	432,33	3,79
OK Kuyu▼	7,77	12,5	536	0,00	0,35	0,69	3,70	27,51	65,70	0,00	0,00	0,08	0,09	7,16	4,74	6,49	319,81	0,88

Açıklamalar: EC (µS/cm), iyon konsantrasyonları (mg/l), sıcaklık (°C), *yüzey suyu, ■ kaynak suyu, ▲sığ yeraltı suyu, ▼derin yeraltı suyu

9.1 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Hidrojeokimyasal çalışmalar yeraltı sularının kimyasal özelliklerinin ve kalitelerinin belirlenmesi, kökenlerinin araştırılması, yüzey ve yeraltı suları ile olası ilişkilerinin incelenmesi, yüzey ve yeraltı sularının kirlenmesi ve iyileştirilmesi gibi problemlerin çözülmesi ve benzeri araştırmalarda kullanılan hidrojeolojik çalışmaların vazgeçilmez bir parçasını oluşturmaktadır.

Laboratuvarlarda sulara yapılan kimyasal analizlerin doğruluğu, anyon ve katyon değerleri kullanılarak elektriksel nötralite (EN) dengesi ile belirlenmektedir. Aşağıdaki denklemde hesaplanabilir hata yüzdesinin genellikle %5'den düşük olması istenir. Ancak, suların analizi sırasında yapılan hatalar dışında da bu oran bazen (özellikle seyreltik sulara) %5'den yüksek olabilir. Bu durumda sulara analizi yapılmamış olan iyon türlerinden bazılarının suda baskın olduğu yorumu yapılabilir (Mazor 2004). Suların kimyasal analizlerinde yapılabilecek hatalar aşağıdaki anyon ve katyon dengesinden hesaplanabilmektedir. Pozitif değerler katyon fazlalığını, negatif değerler ise anyon fazlalığını göstermektedir.

$$EN = [(\Sigma \text{ Katyon} - \Sigma \text{ Anyon}) / \Sigma \text{ iyon}] \times 100 \text{ (mek/l)} \quad (9.1)$$

EN: Elektriksel Nötralite

Yapılan kimyasal analiz sonuçlarında her iki dönemde de hata yüzdesi %5'den düşük çıkmıştır (EK 5, EK 6).

Laboratuvarların analiz sonuçlarını doğruluğunu test etmek amacıyla, “duplicate analysis”olarak bilinen ikiz numune metodu kullanılmaktadır. Bu kapsamda K-1 kodlu yeraltı suyu numunesi K-3 koduyla yeniden gönderilmiş ve analizi yaptırılmıştır (EK 6). Laboratuvarın gelen analiz sonuçlarının birbirine yakınlığı, laboratuvarın analiz sonuçlarının doğruluğunu yüksek olduğunun göstermektedir.

9.1.1 Piper ve Schoeller diyagramları

Yeraltı sularının hidrokimyasal parametrelerinin anlamı ana anyon ve katyon konsantrasyonlarının Piper (1944) ve Schoeller (1977) diyagramına yerleştirilmesiyle daha iyi anlaşılabilir. Hidrojeokimyasal açıdan değerlendirme yapabilmek için suların grafiklerde toplu halde bir arada görülebilmesi, sınıflandırılması, birbirleriyle ilişkilerinin araştırılması ve karşılaştırılması gibi işlemler gerçekleştirilmektedir. İyonik kompozisyona bağlı olarak su tiplerini sınıflamak ve karşılaştırmak için Piper (1944) diyagramından yararlanılmıştır. Schoeller (1977) diyagramı, farklı hidrokimyasal su tiplerini aynı diyagram üzerinde gösterilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu tür bir grafiksel gösterimin Piper diyagramına göre avantajı gerçek iyon konsantrasyonlarının da grafikte görülebilmesi ve karşılaştırılabilmesidir.

Piper (1944) üçgen diyagramı ve Schoeller (1977) yarı logaritmik diyagramı gerek iyonların topluca tek bir diyagramda görüntüleme kolaylığı açısından, gerekse benzer ve farklı kökenli suların karşılaştırılmasının kolaylığı açısından hidrojeolojide oldukça sık kullanılan diyagramlardır. Suların hidrokimyasal fasiyeslerini kıyaslamalı olarak ortaya koyan üçgen (Piper) diyagramlar, aynı zamanda akış yolu boyunca sularda meydana gelen kimyasal değişimi de yansıtır. İnceleme alanındaki suların analiz sonuçları kullanılarak hazırlanan Piper diyagramı Şekil 9.2-9.4'te verilmiştir. Görüldüğü gibi, gerek anyon ve katyon üçgenlerinde gerekse eşkenar dörtgende, suları temsil eden noktalar belirli bir alan içinde toplanmışlardır. Schoeller yarı logaritmik diyagramda benzer kökenli, aynı hazneye ve beslenme alanına sahip sular benzer pik verirler, iyon doğru parçaları birbirine paraleldir (Şekil 9.5).

Çalışma alanındaki yüzey, kaynak ve yeraltı sularının ana iyon konsantrasyonları hidrokimyasal fasiyes/su tipini belirlemek üzere Piper diyagramına yerleştirilmiştir. Hidrokimyasal fasiyesler su-kayaç etkileşiminin bir sonucu olarak anyon ve katyon kategorilerini ayıran farklı zonlardır.

Piper diyagramına göre yapılan değerlendirmede çalışma alanında yüzey, kaynak ve yeraltı suyunun ana iyon kimyasına bağlı olarak 5 hidrokimyasal fasiyes belirlenmiştir

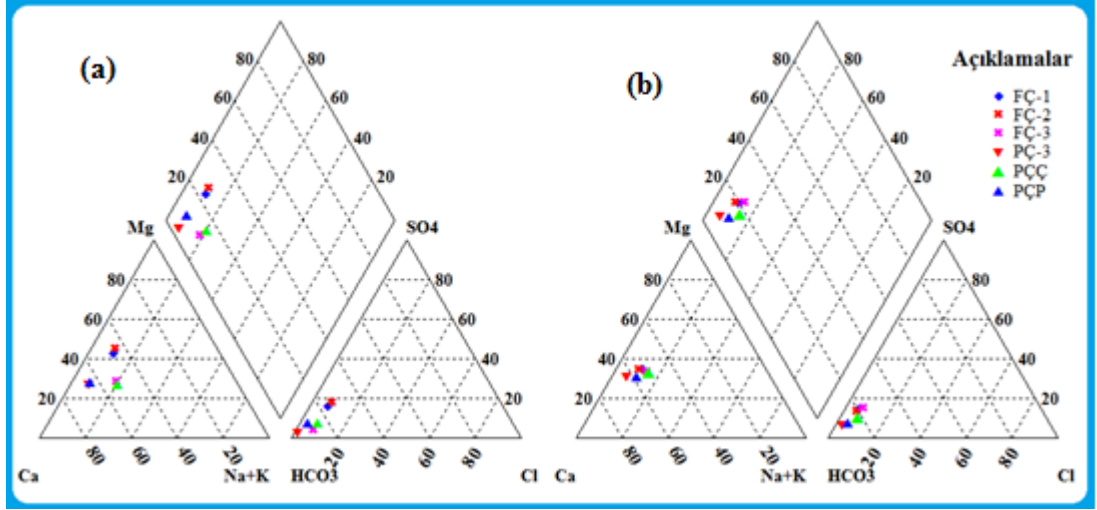
(Çizelge 9.3). Bununla birlikte çalışma alanındaki baskın hidrokimyasal fasiyes tipi hem Aralık 2013 hem de Haziran 2014 dönemlerinde Ca-Mg/Mg-Ca-HCO₃ olarak belirlenmiştir.

Yüzey sularının iki dönem boyunca Ca-Mg-HCO₃ tipinde sular olduğu, yalnızca FÇ-2 noktasında Aralık 2013'te su tipinin Mg-Ca-HCO₃ olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9.2 ve Çizelge 9.3).

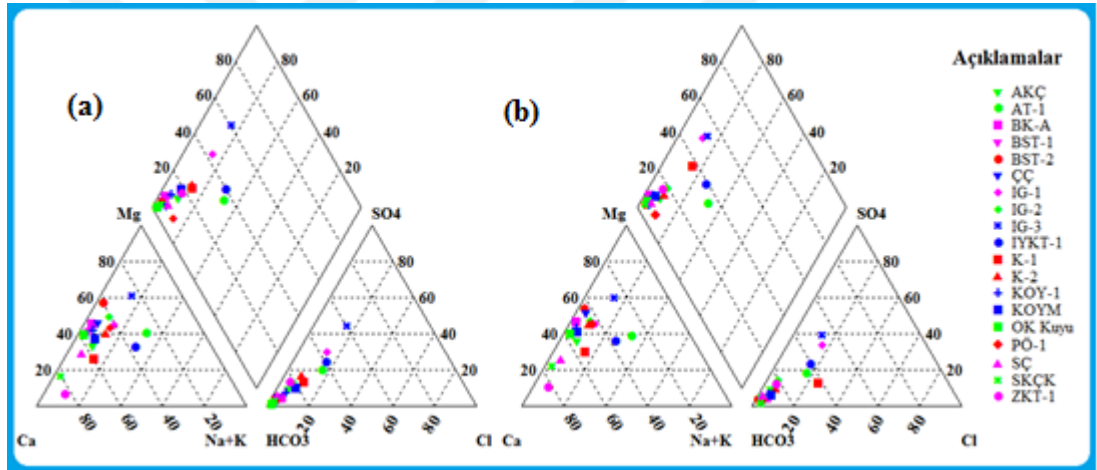
Çalışma alanından derlenen yeraltı suyu örneklerinin çoğunluğunun Ca-Mg/Mg-Ca-HCO₃ tipinde olduğu, ZKT-1'in ise Ca-HCO₃ tipinde olduğu belirlenmiştir. Ancak İG-1 ve İG-3 örnekleme noktalarında baskın katyonlar iki dönemde de Mg-Ca şeklindedir. Anyonlar Haziran 2014'te her ikisi için HCO₃-SO₄ baskın iken Aralık 2013 döneminde İG-1'de HCO₃-SO₄ ve İG-3'te SO₄-HCO₃ olarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak K-1 örnekleme noktasında su tipi Aralık 2013'te Ca-Mg-HCO₃ iken Haziran 2014'te ise Ca-Mg-HCO₃-Cl olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.3 ve Çizelge 9.3).

İki kaynak (Örnek no: OKK ve SKK) noktasından alınan suların kimyasal analiz sonuçlarına göre çalışma alanında EC değerlerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu kaynak sularının EC değerlerinin düşük olmasının nedeni, beslenme ve boşalım noktaları arasındaki mesafenin az olması ve su-kayaç etkileşiminin düşük olmasıyla açıklanabilir. Kaynak sularından SKK ve OKK'nın iki dönemde de sırasıyla Ca-Mg-HCO₃ ve Mg-Ca-HCO₃ su tipinde oldukları tespit edilmiştir (Şekil 9.4 ve Çizelge 9.3).

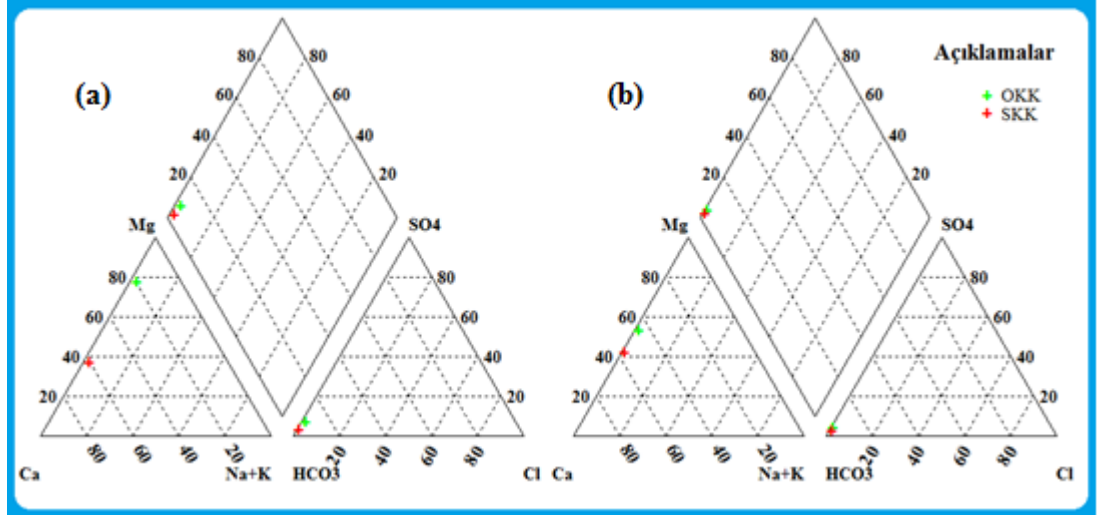
Sular, yağışlı ve kurak dönemlerde su tipi açısından benzer özellikler göstermekte olup, iki örneğin (İG-1, İG-3 ve K-1) karışık bileşimli sular olduğu belirlenmiştir (Şekil 9.3 ve Çizelge 9.3).



Şekil 9.2 Çalışma alanında yer alan yüzey sularının Piper diyagramları
a. Aralık 2013, b. Haziran 2014



Şekil 9.3 Çalışma alanında yer alan yeraltı sularının Piper diyagramları
a. Aralık 2013, b. Haziran 2014

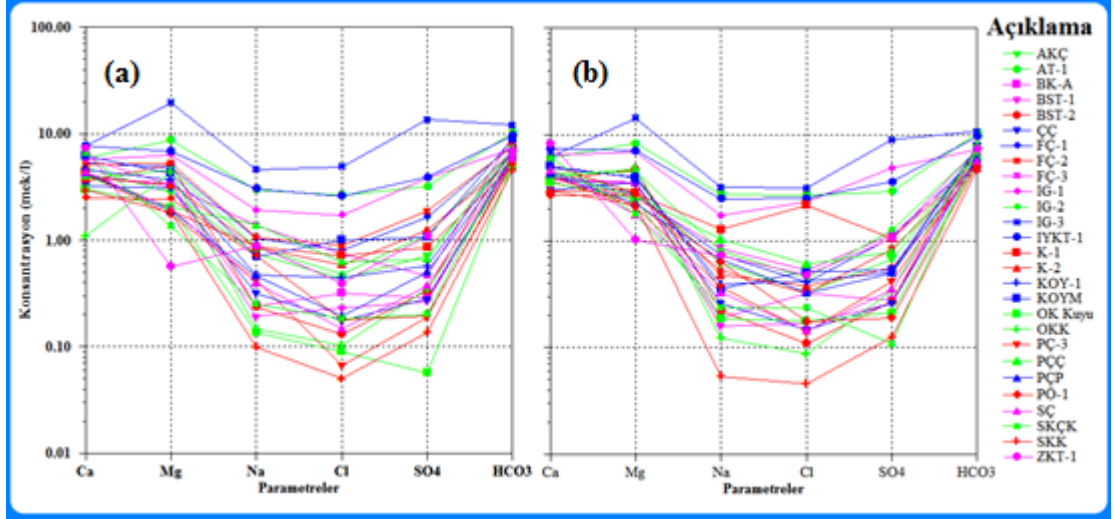


Şekil 9.4 Çalışma alanında yer alan kaynak sularının Piper diyagramları
a. Aralık 2013, b. Haziran 2014

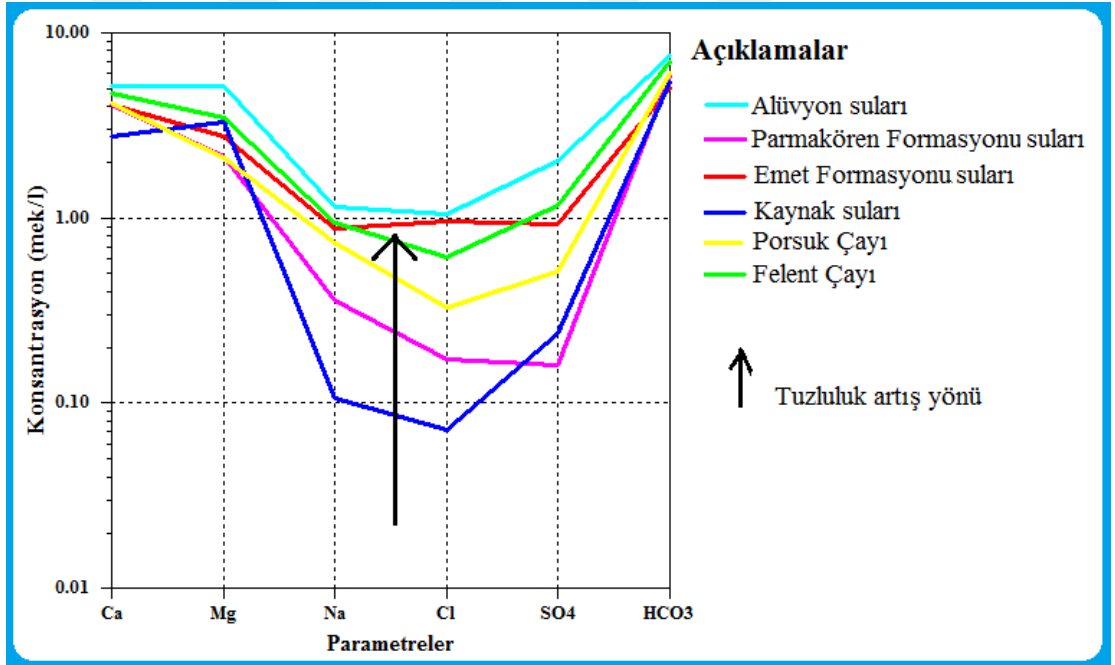
İnceleme alanından alınan her iki döneme ait hidrokimyasal analiz sonuçları yarı logaritmik Schoeller diyagramında incelendiğinde alanındaki sular; katyonlar Ca^{+2} - Mg^{+2} - Na^{+} + K^{+} , anyonları ise HCO_3^{-} - SO_4^{-2} - Cl^{-} şeklindedir. Örneklerin diyagram üzerinde genel olarak Ca^{+2} - Mg^{+2} - HCO_3^{-} su tipi alanında yer almaktadırlar ve her iki dönemde de grafik benzer bir şekilde ortaya çıkmıştır (Şekil 9.3).

Yarı-logaritmik diyagramlar ile yapılan değerlendirmelere göre, inceleme alanında örneklenen su noktaları arasında kökensel olarak önemli farklar bulunmamaktadır. Diyagramda görüldüğü gibi genellikle baskın olan anyon HCO_3^{-} 'tir, İnköy'den alınan su örneğinde (IG-3) ise SO_4 iyonunun baskın olduğu göze çarpmaktadır. Tüm sular birlikte Şekil 9.5'te değerlendirilmiştir.

Çalışma alanının toplam yüzey, kaynak ve yeraltı suların ortalama değerleri kullanılarak yarı-logaritmik Schoeller diyagramı çizilmiştir (Şekil 9.6). Diyagrama göre, katyon ve anyonların konsantrasyonu alüvyon sularında en üst düzeye ulaşmaktadır. Alüvyon akiferdeki suların diğer bileşenlerden (akarsu, kaynak, Parmakören ve Emet Formasyonları) beslenmesi yanında, sulama için kullanılan sığ ve derin akifer sularının alüvyonu tekrar beslemesinin de rolü bulunmaktadır.



Şekil 9.5 Su örneklerinin yarı logaritmik (Schoeller) diyagramları
a. Aralık 2013, b. Haziran 2014



Şekil 9.6 Su örneklerinin ortalama değerlerinin yarı logaritmik (Schoeller) diyagramları

Çizelge 9.3 İnceleme alanındaki suların ana iyon dizilimleri ve hidrokimyasal fasiyesleri

Örnekleme tarihi: Aralık 2013			
Örnek Numarası	Katyonlar	Anyonlar	Hidrokimyasal fasiyes
Yüzey suları			
PÇ-3, PÇP, PÇÇ, FÇ-1	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-Mg-HCO ₃
FÇ-2	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃
FÇ-3	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{-2}$	Ca-Mg-HCO ₃
Kaynak suları			
SKK	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-Mg-HCO ₃
OKK	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃
Sığ yeraltı suları			
SÇ, AKÇ, ÇÇ, BST-1, İYKT-1, KOY-1, KOYM	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-Mg-HCO ₃
BST-2, AT-1, İG-2	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃
İG-1	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃ -SO ₄
ZKT-1	$\text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}) > \text{Mg}^{+2}$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-HCO ₃
BK-A	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{-2}$	Ca-Mg-HCO ₃
İG-3	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-SO ₄ -HCO ₃
Derin yeraltı suları			
K-1, K-2, PÖ-1	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-Mg-HCO ₃
SKÇK	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-HCO ₃
OK Kuyu	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{-2}$	Ca-Mg-HCO ₃
Örnekleme tarihi: Haziran 2014			
Yüzey suları			
PÇ-3, PÇP, PÇÇ, FÇ-1, FÇ-2, FÇ-3	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-Mg-HCO ₃
Kaynak suları			
SKK	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-Mg-HCO ₃
OKK	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃
Sığ yeraltı suları			
SÇ, AKÇ, BST-1, İYKT-1, KOY-1, KOYM	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-Mg-HCO ₃
BST-2, AT-1, İG-2, ÇÇ,	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃
İG-1, İG-3	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃ -SO ₄
ZKT-1	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Ca-HCO ₃
BK-A	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{-2}$	Ca-Mg-HCO ₃
Derin yeraltı suları			
K-1	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{-2}$	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl
K-2, PÖ-1	$\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^{-}$	Mg-Ca-HCO ₃
OK Kuyu, SKÇK	$\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$	$\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{-2}$	Ca-Mg-HCO ₃

9.1.2 Doygunluk indisi (SI)

Doygunluk indeksleri suyun çözünmüş mineral bakımından dengeden sapma miktarını kantitatif olarak tanımlamaktadır. Belirli bir mineral için doymunluk indisi (SI) genellikle yeraltı suyunun söz konusu mineral bakımından dengede (SI=0), doymunluğa ulaşmamış (SI < 0) ya da aşırı doymun (SI > 0) olup olmadığını göstermektedir.

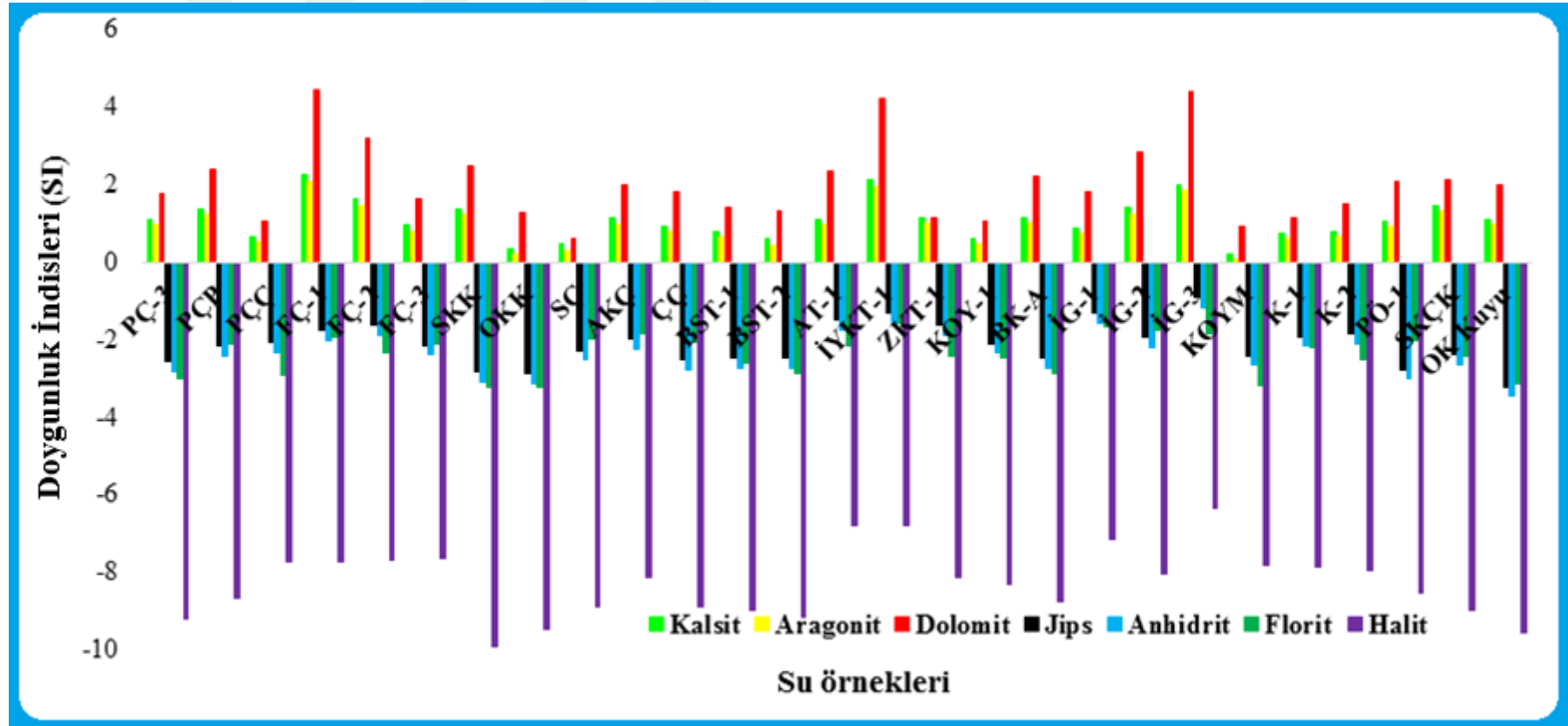
Çalışma alanında genel olarak gerek yüzey, gerekse kaynak ve yeraltı suyu örnekleri kalsit, aragonit ve dolomite göre doymun olup, çökeltme eğiliminde iken, anhidrit, jips, florit ve halit bakımından doymun değildir (Çizelge 9.4-9.5 ve Şekil 9.7-9.8). Bu nedenle çalışma alanındaki su kimyası büyük ölçüde karbonat çözünmesinden etkilenmiş görünmektedir.

Çizelge 9.4 Çalışma alanındaki suların Doygunluk İndislerinin istatistiksel tanımlaması
(Aralık 2013)

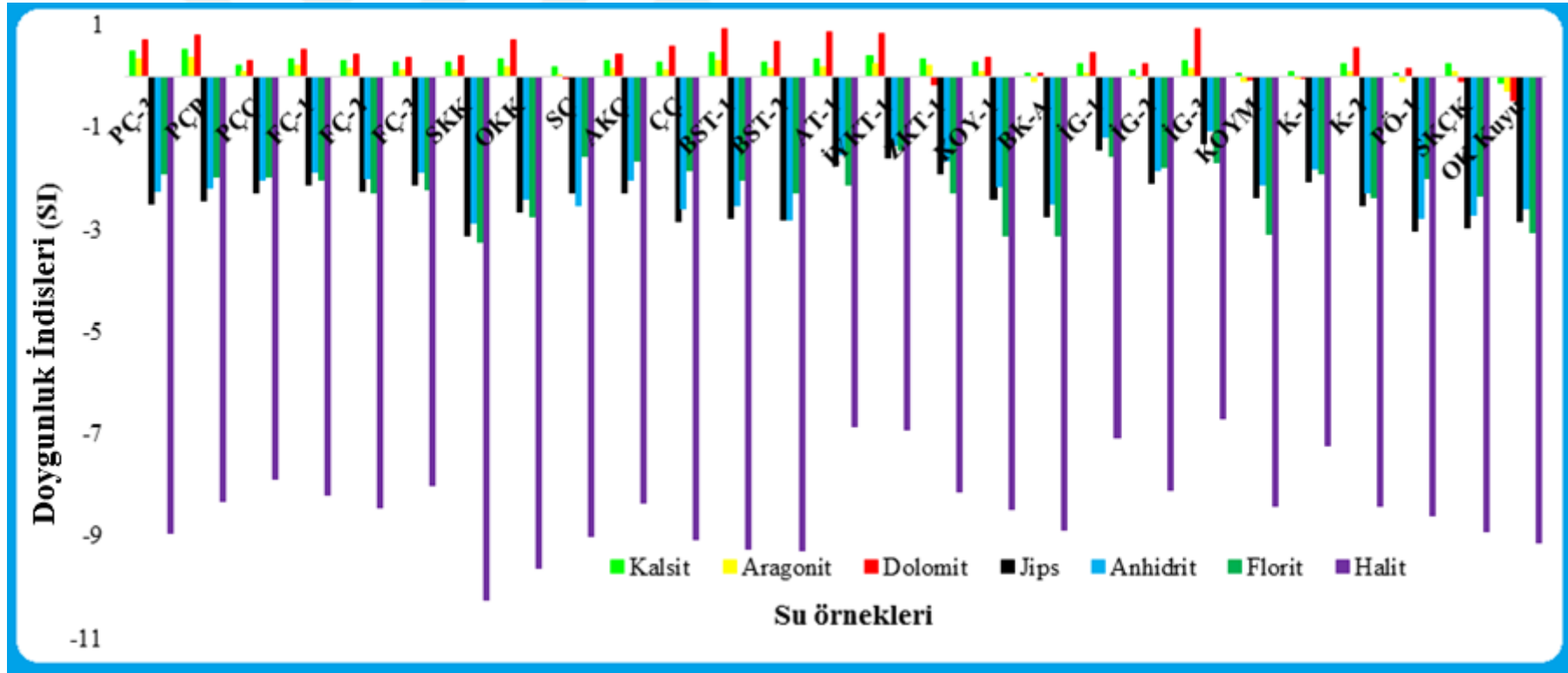
Örnek Numarası		Kalsit	Aragonit	Dolomit	Jips	Anhidrit	Florit	Halit
Yüzey suları	PÇ-3	1,09	0,94	1,78	-2,58	-2,83	-3,01	-9,19
	PÇP	1,38	1,23	2,37	-2,17	-2,42	-2,1	-8,68
	PÇÇ	0,67	0,51	1,03	-2,09	-2,34	-2,9	-7,72
	FÇ-1	2,24	2,08	4,44	-1,77	-2,03	-1,95	-7,73
	FÇ-2	1,62	1,46	3,17	-1,63	-1,89	-2,36	-7,68
	FÇ-3	0,94	0,79	1,61	-2,15	-2,4	-2,13	-7,66
	En düşük	0,67	0,51	1,03	-2,58	-2,83	-3,01	-9,19
	En yüksek	2,24	2,08	4,44	-1,63	-1,89	-1,95	-7,66
	Ortalama	1,32	1,17	2,40	-2,07	-2,32	-2,41	-8,11
St, Sapma	0,56	0,56	1,24	0,33	0,33	0,44	0,66	
Kaynak suları	SKK	1,38	1,22	2,47	-2,83	-3,09	-3,22	-9,93
	OKK	0,35	0,19	1,27	-2,87	-3,12	-3,25	-9,46
	Ortalama	0,87	0,71	1,87	-2,85	-3,11	-3,24	-9,70
Yeraltı Suları	SÇ	0,45	0,3	0,59	-2,28	-2,53	-1,96	-8,89
	AKÇ	1,12	0,96	1,99	-2	-2,25	-1,84	-8,14
	ÇÇ	0,93	0,78	1,81	-2,53	-2,78	-2,05	-8,9
	BST-1	0,79	0,64	1,43	-2,46	-2,72	-2,62	-9
	BST-2	0,6	0,44	1,31	-2,47	-2,72	-2,87	-9,16
	AT-1	1,1	0,95	2,35	-1,49	-1,74	-2,14	-6,81
	İYKT-1	2,12	1,96	4,2	-1,33	-1,58	-1,59	-6,8
	ZKT-1	1,15	1	1,16	-1,64	-1,9	-2,44	-8,12
	KOY-1	0,62	0,47	1,03	-2,11	-2,36	-2,49	-8,33
	BK-A	1,15	0,99	2,2	-2,47	-2,73	-2,89	-8,76
	İG-1	0,89	0,74	1,81	-1,32	-1,57	-1,65	-7,16
	İG-2	1,39	1,24	2,85	-1,94	-2,19	-1,77	-8,04
	İG-3	1,99	1,84	4,39	-0,92	-1,17	-1,84	-6,37
	KOYM	0,2	0,05	0,91	-2,42	-2,67	-3,19	-7,81
	K-1	0,75	0,6	1,12	-1,93	-2,18	-2,19	-7,86
	K-2	0,8	0,65	1,51	-1,85	-2,1	-2,51	-7,95
	PÖ-1	1,06	0,91	2,09	-2,77	-3,02	-2,04	-8,54
	SKÇK	1,46	1,31	2,14	-2,4	-2,65	-2,43	-8,98
	OK Kuyu	1,11	0,96	2,01	-3,21	-3,46	-3,12	-9,55
	En düşük	0,2	0,05	0,59	-3,21	-3,46	-3,19	-9,55
	En yüksek	2,12	1,96	4,39	-0,92	-1,17	-1,59	-6,37
	Ortalama	1,04	0,88	1,94	-2,08	-2,33	-2,30	-8,17
St, Sapma	0,48	0,47	1,00	0,57	0,57	0,49	0,88	

Çizelge 9.5 Çalışma alanındaki suların Doygunluk İndislerinin istatistiksel tanımlaması
(Haziran 2014)

Örnek Numarası		Kalsit	Aragonit	Dolomit	Jips	Anhidrit	Florit	Halit
Yüzey suları	PÇ-3	0,49	0,34	0,7	-2,49	-2,25	-1,89	-8,93
	PÇP	0,52	0,37	0,8	-2,42	-2,18	-1,97	-8,31
	PÇÇ	0,22	0,08	0,3	-2,26	-2,02	-1,95	-7,86
	FÇ-1	0,35	0,2	0,51	-2,11	-1,86	-2,04	-8,17
	FÇ-2	0,31	0,16	0,42	-2,25	-2	-2,27	-8,42
	FÇ-3	0,26	0,11	0,38	-2,11	-1,87	-2,2	-8,01
	En düşük	0,22	0,08	0,3	-2,49	-2,25	-2,27	-8,93
	En yüksek	0,52	0,37	0,8	-2,11	-1,86	-1,89	-7,86
	Ortalama	0,36	0,21	0,52	-2,27	-2,03	-2,05	-8,28
	St, Sapma	0,12	0,12	0,19	0,16	0,16	0,15	0,38
Kaynak suları	SKK	0,29	0,13	0,4	-3,11	-2,86	-3,24	-10,24
	OKK	0,33	0,18	0,71	-2,66	-2,4	-2,75	-9,63
	Ortalama	0,31	0,16	0,56	-2,89	-2,63	-3,00	-9,94
Yeraltı Suları	SÇ	0,18	0,03	-0,03	-2,28	-2,52	-1,55	-8,98
	AKÇ	0,31	0,16	0,43	-2,29	-2,04	-1,65	-8,35
	ÇÇ	0,26	0,11	0,6	-2,84	-2,6	-1,85	-9,07
	BST-1	0,47	0,32	0,92	-2,76	-2,52	-2,04	-9,23
	BST-2	0,29	0,14	0,69	-2,79	-2,79	-2,28	-9,27
	AT-1	0,34	0,19	0,86	-1,76	-1,52	-2,13	-6,84
	İYKT-1	0,39	0,24	0,82	-1,58	-1,34	-1,44	-6,91
	ZKT-1	0,35	0,2	-0,15	-1,89	-1,65	-2,29	-8,13
	KOY-1	0,26	0,1	0,38	-2,41	-2,16	-3,12	-8,45
	BK-A	0,06	-0,09	0,07	-2,74	-2,49	-3,1	-8,86
	İĞ-1	0,23	0,07	0,46	-1,44	-1,19	-1,55	-7,07
	İĞ-2	0,13	-0,03	0,23	-2,08	-1,83	-1,77	-8,09
	İĞ-3	0,31	0,15	0,93	-1,31	-1,06	-1,69	-6,7
	KOYM	0,05	-0,11	-0,08	-2,38	-2,12	-3,09	-8,39
	K-1	0,09	-0,05	-0,04	-2,07	-1,82	-1,89	-7,22
	K-2	0,24	0,09	0,54	-2,51	-2,27	-2,37	-8,4
	PÖ-1	0,05	-0,1	0,16	-3,01	-2,77	-1,99	-8,6
	SKÇK	0,23	0,08	-0,09	-2,96	-2,71	-2,33	-8,91
	OK Kuyu	-0,13	-0,28	-0,46	-2,84	-2,59	-3,06	-9,12
	En düşük	-0,13	-0,28	-0,46	-3,01	-2,79	-3,12	-9,27
	En yüksek	0,47	0,32	0,93	-1,31	-1,06	-1,44	-6,7
	Ortalama	0,22	0,06	0,33	-2,31	-2,10	-2,17	-8,24
	St, Sapma	0,15	0,15	0,41	0,53	0,55	0,56	0,87



Şekil 9.7 Çalışma alanındaki yüzey, kaynak ve yeraltı sularının Doygunluk İndisleri grafiği (Aralık 2013)



Şekil 9.8 Çalışma alanındaki yüzey, kaynak ve yeraltı sularının Doygunluk İndisleri grafiği (Haziran 2014)

9.1.3 İyon değişimi

Kloro Alkalın İndisleri (CAI): Schoeller (1967) bir formül yayımlamıştır, CAI akiferde kalışı ya da dolaşımı süresince yeraltı suyu ile çevresi arasında iyon değişimini anlamak için kullanılmaktadır. Pozitif CAI sudaki Na^+ ve K^+ 'un, kayaçtaki Mg^{+2} ve Ca^{+2} ile değişimine ve negatif CAI ise sudaki Mg^{+2} ve Ca^{+2} 'un, kayaçtaki Na^+ ve K^+ ile değişimine işaret etmektedir (Nagaraju vd. 2006, Çelik vd. 2008).

$$\text{CAI}_1 = \frac{(\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+))}{\text{Cl}^-} \quad (9.2)$$

$$\text{CAI}_2 = \frac{(\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+))}{\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-} \quad (9.3)$$

Çizelge 9.6'ya göre, çalışma alanındaki bir çok örnek dolaylı baz değişim reaksiyonlarını işaret eden negatif değerler göstermektedir. Bu süreç sırasında, rezervuar kayaç, sudaki çözünmüş katıların ana kaynağı olarak dikkate alınmaz ve sudaki $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ ile kayaçtaki Na^+/K^+ 'un doğrudan iyon değişimini yansıtır.

Çizelge 9.6 Çalışma alanındaki yüzey, kaynak ve yeraltı sularının Kloro Alkalın İndislerinin istatistiksel tanımlaması

Örnek Numarası		Aralık 2013		Haziran 2014	
		CAI ₁	CAI ₂	CAI ₁	CAI ₂
Yüzey suları	PÇ-3	-6,37	-0,07	-2,07	-0,05
	PÇP	-1,78	-0,05	-1,38	-0,07
	PÇÇ	-1,48	-0,12	-0,97	-0,08
	FÇ-1	-0,50	-0,04	-1,16	-0,07
	FÇ-2	-0,37	-0,03	-0,96	-0,05
	FÇ-3	-1,89	-0,14	-0,97	-0,08
Kaynak suları	SKK	-1,41	-0,02	-0,46	-0,004
	OKK	-0,72	-0,01	-0,65	-0,01
Sığ yeraltı Suları	SÇ	-2,20	-0,05	-1,66	-0,04
	AKÇ	-0,99	-0,06	-1,16	-0,05
	ÇÇ	-1,50	-0,04	-1,41	-0,03
	BST-1	-0,25	-0,01	-0,30	-0,01
	BST-2	-1,30	-0,02	-1,56	-0,02
	AT-1	-1,65	-0,26	-1,60	-0,26
	İYKT-1	-1,45	-0,23	-1,06	-0,17
	ZKT-1	-1,31	-0,06	-0,55	-0,03
	KOY-1	-0,23	-0,01	-0,05	-0,003
	BK-A	0,15	0,01	0,34	0,02
	İG-1	-0,17	-0,03	0,23	0,04
	İG-2	-0,93	-0,06	-0,92	-0,05
	İG-3	0,02	0,001	-0,07	-0,01
	KOYM	-0,06	-0,01	-0,14	-0,01
Derin yeraltı Suları	K-1	-0,44	-0,05	0,32	0,10
	K-2	-0,79	-0,07	-0,63	-0,04
	PÖ-1	-3,26	-0,10	-2,84	-0,09
	SKÇK	-0,53	-0,01	-0,08	-0,002
	OK Kuyu	-0,67	-0,01	-0,16	-0,005

9.2 Çevresel İzotop Çalışmaları

Doğal olarak bulunan ve hidrojeolojik sirkülasyonunda farklı ortamlarda hidrojeolojik sisteme giren çevresel izotoplar bu günlerde hidrolojik ve hidrojeolojik birçok araştırmanın en önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

Suyu oluşturan oksijen ve hidrojen elementlerinin Oksijen-18, döteryum ve trityum izotopları hidrojeoloji amaçlı çalışmalarda suların kökeni, beslenme alanı, farklı su noktaları arasındaki hidrolojik ilişkiler, karışım, buharlaşma, yeraltı suyu yaş

dağılımının belirlenmesi ve akiferin yeraltı suyu akım yönünün belirlenmesi büyük yararlar sağlamaktadır.

2013 yılı Aralık ve 2014 yılı Haziran aylarında inceleme alanı içerisindeki önemli görülen bazı su noktalarında 19 adet duraylı izotop ($\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$) analiz sonuçları Çizelge 9.7’de verilmiştir. Duraysız izotop (Trityum, ^3H) analizi ise 14 adet yeraltı suyu örneği için Aralık 2013’te yapılmıştır (Çizelge 9.7). Suda yapılan trityum analizleri ile yeraltı suyu dolaşım zamanı, dolaşım derinliği ve uzunluğu ile yeraltı suyu sistemlerini ayırmak mümkün olabilmektedir.

9.2.1 Duraylı izotop ($\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$) incelemeleri

Yeraltı sularının duraylı izotop değişimleri, yağışın izotopik bileşimi, diğer kütleleri ile karışımı ve toprak ve/veya doymamış zon boyunca sızma sırasında gerçekleşen buharlaşma miktarı gibi doğal değişimler nedeniyle oluşmaktadır (Kendall ve McDonnell 1998).

İnceleme alanı içerisindeki oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve döteryum ($\delta^2\text{H}$) analiz sonuçlarına göre 2013 yılı Aralık ayında yüzey suları için $\delta^2\text{H}$ değerleri -67,54 ile -61,50 ‰ ve $\delta^{18}\text{O}$ değerleri -9,80 ile -8,2 ‰ arasında değişirken yeraltı suların ise $\delta^2\text{H}$ değerleri -72,23 ile -61,27 ve $\delta^{18}\text{O}$ değerleri -10,45 ile -8,43 arasında değişen değerler yer almaktadır (Çizelge 9.7).

Benzer bir şekilde inceleme alanı içerisindeki 2004 yılı Haziran ayında da oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve döteryum ($\delta^2\text{H}$) analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yüzey sularının $\delta^2\text{H}$ değerleri -69,60 ile -61,31‰ ve $\delta^{18}\text{O}$ değerleri -10,42 ile -9,22‰ arasında değişirken yeraltı sularının ise $\delta^2\text{H}$ değerleri -73,57 ile -64,18‰ ve $\delta^{18}\text{O}$ değerleri -10,64 ile -8,86‰ arasında değişmektedir (Çizelge 9.7). Çalışma alanındaki örneklerin $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ analiz sonuçları Craig (1961) tarafından tanımlanan Dünya Meteorik Su Doğrusu ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$), Sayın (2005) tarafından tanımlanan Isparta Meteorik Su Doğrusu ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 12,16$) ile birlikte incelenmiştir (Şekil 9.9).

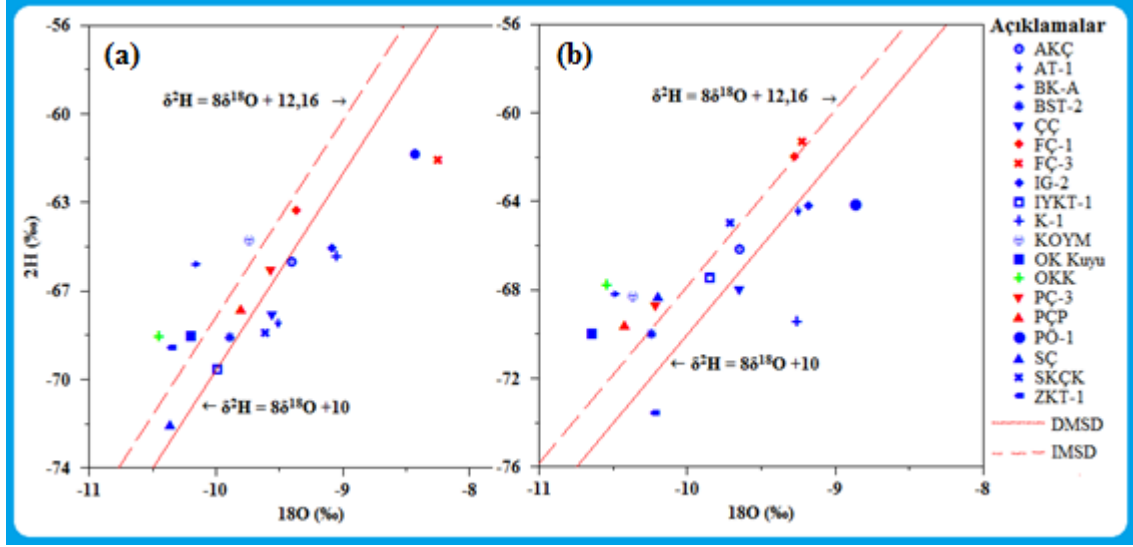
Yeraltı suları, yüzey sularına kıyasla daha düşük ortalama izotop değerlerine sahiptir, zira yüzey sularının yeraltı sularından daha pozitif izotop değerlerine sahip olması yüzey sularındaki evaporasyon etkisini yansıtmaktadır.

$\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ yüzey ve yeraltı sularının Isparta Meteorik Su Doğrusu (IMSD) ve Dünya Meteorik Su Doğrusu (DMSD) hatlarına ya da bu hatların yakınına düştüğünü göstermektedir. Bu durum suların meteorik kökenine işaret etmektedir ve güncel yağışın yeraltı suları için baskın bileşen olduklarını göstermektedir. Meteorik su çizgilerinin uzağına düşen suların ise yeraltına süzülmesi ya da öncesinde evaporasyona maruz kalmış oldukları anlaşılmaktadır (Şekil 9.9).

PÖ-1 ve K-1 su örnekleme noktaları derin olmasına rağmen, bu örnekleme noktalara ait kuyularındaki filitrelemenin farklı derinliklerde yapılmış olması, kuyu suyunda karışım olabileceğini göstermektedir. Bu kuyulara ait noktalar oksijen-18 ve döteryum grafiğinde buharlaşan sular bölgesinde yer almaktadır (Şekil 9.9).

Çizelge 9.7 İnceleme alanı sularının Döteryum ($\delta^2\text{H}$), Oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve Tritiyum (^3H) değerleri

Örnek Numarası	Aralık 2013			Haziran 2014	
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	^3H (TU)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Yüzey suları	PÇ-3	-65,98	-9,57	-68,72	-10,21
	PÇP	-67,54	-9,80	-69,60	-10,42
	FÇ-1	-63,53	-9,37	-61,97	-9,28
	FÇ-3	-61,50	-8,25	-61,31	-9,22
	En düşük	-67,54	-9,80	-69,60	-10,42
	En yüksek	-61,50	-8,25	-61,31	-9,22
	Ortalama	-64,64	-9,25	-65,4	-9,78
	St. Sapma	2,66	0,69	4,36	0,62
Kaynak suları	SKK		7,39		
	OKK	-68,68	-10,45	6,26	-67,78
Yeraltı suları	SÇ	-72,23	-10,36	-68,32	-10,20
	AKÇ	-65,65	-9,40	4,22	-66,16
	ÇÇ	-67,78	-9,56	2,52	-67,98
	BST-2	-68,72	-9,89	8,38	-70,00
	AT-1	-68,14	-9,51	3,38	-64,47
	İYKT-1	-70,00	-9,99	3,11	-67,48
	ZKT-1	-69,13	-10,35	3,76	-73,57
	BK-A	-65,71	-10,16	6,47	-68,23
	İG-2	-65,06	-9,09	3,08	-64,21
	KOYM	-64,75	-9,74		-68,33
	K-1	-65,42	-9,05	1,66	-69,44
	PÖ-1	-61,27	-8,43	1,00	-64,18
	SKÇK	-68,54	-9,61	4,44	-65,00
	OK Kuyu	-68,67	-10,19	5,52	-70,04
	En düşük	-72,23	-10,36	1,00	-73,57
	En yüksek	-61,27	-8,43	8,38	-64,18
	Ortalama	-67,22	-9,67	3,96	-67,67
	St. Sapma	2,74	0,55	2,06	0,55



Şekil 9.9 Tez sahası sularının $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ diyagramı üzerindeki konumu

a. Aralık 2013, b. Haziran 2014, (IMSD: Isparta Meteorik Su Doğrusu, DMSD: Dünya Meteorik Su Doğrusu, Mavi: Yeraltı suları, Kırmızı: Yüzey suları ve Yeşil: Kaynak suyu)

9.2.2 Duraysız izotop (Trityum, ^3H) incelemeleri

Trityum, hidrojenin yarılanma ömrü kısa (12,23 yıl) olan radyoaktif bir izotopudur (Clark ve Fritz 1997). Hem doğal olarak stratosferde kozmik radyasyonla, hem de yapay olarak üretilen ^3H , hidrolojik sisteme yağış ile girmektedir. Suyun molekül yapısında yer alan hidrojenin radyoaktif bir izotopu olduğu için yeraltı suyu geçiş süresinin belirlenmesinde doğrudan kullanılmaktadır. Dolayısı ile yeraltı sularının bağlı yaşlarının ortaya konmasında ^3H izotopu en önemli parametrelerden biridir.

Suda yapılan trityum analizleri ile yeraltı suyu dolaşım zamanı, dolaşım derinliği ve uzunluğu ile yeraltı suyu sistemlerini ayırmak mümkün olabilmektedir. 2013 Aralık ayında toplam 14 su örneği trityum analizleri için alınmıştır (Çizelge 9.7).

Hidrojenin radyoaktif izotopu olan ve bozunmaya uğrayarak parçalanan; bu özelliğiyle sulardaki derişimi zamanla azalan trityum izotopu, güncel yağışlardan beslenen kaynaklarda 1-8,38 TU arasında değişirken, beslenme bölgelerine en uzak olan DSİ kuyularında (K-1 ve PÖ-1) sırasıyla 1 ve 1,66 TU değerleri vermektedir (Çizelge 9.7).

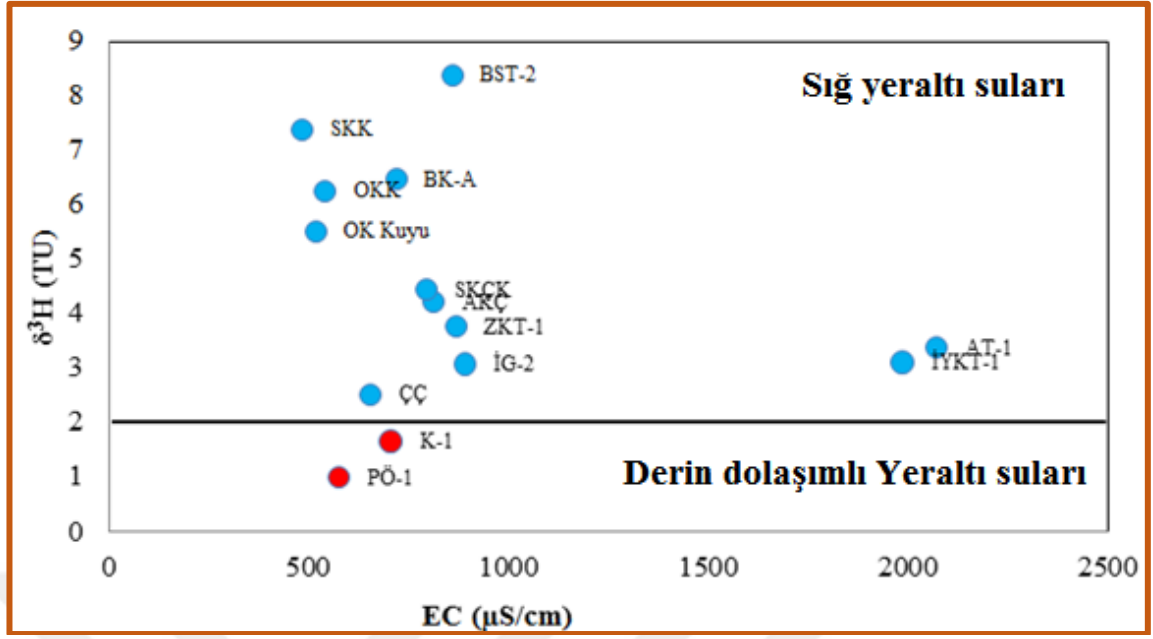
Aynı şekilde örneklere ait EC değeri de, yeraltı suyunun rezervuarda kalış süresine bağlı olarak artış göstermektedir. BST-2, SKK, BK-A, OKK ve OK Kuyu örneklerinin yüksek trityum ve düşük EC değerlerine sahip olmaları, bu örneklere ait suların geçiş sürelerinin kısa olduğunu, İYKT-1 ve AT-1 örneklerin yüksek EC değerlerine sahip olmaları, bu suların ana katyon ve anyon içeriği ile ilgili olmadığı, zirai kirlilikten (K^+ , NO_3^- , SO_4^{2-}) kaynaklandığı tespit edilmiştir (Şekil 9.10).

Oksijen-18 ve trityum ilişkisi genelde suların beslenme yükseltileri ile akifer içinde kalış süreleri arasındaki ilişkiyi yansıtmaktadır. Çalışma alanından alınan su örneklerinin $\delta^{18}O$ 'e karşılık trityum grafiğinde dolaşım süresi ve beslenme alanı yüksekliğine dair yaklaşımda bulunulmuştur. $\delta^{18}O$ değerlerindeki azalma, akiferin beslenme alanı yükseltisinin arttığını, trityum değerlerindeki sıfıra doğru azalma da suyun akifer içinde kalış süresinin arttığını belirtmektedir (Şekil 9.11).

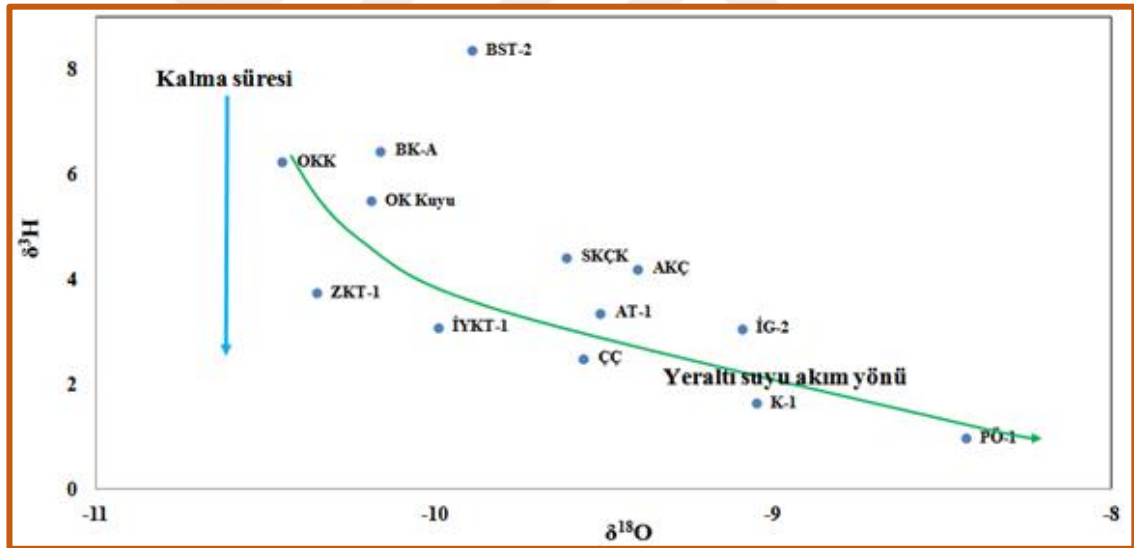
Nisbeten güncel yağışla beslenen suyu daha yaşlı sulardan ayırmak amacıyla suların trityum içerikleri analiz edilmiştir. Çalışma alanındaki kuyulara ait yeraltı suyundaki trityum konsantrasyonu Aralık 2013 için 1,00 ile 8,38 TU arasında değişmekte ve ortalama 4,37 TU'dır (Çizelge 9.10).

Sığ yeraltı sularının trityum içerikleri 2,52 ile 8,38 TU arasında değişmektedir. Buna karşın PÖ-1, K-1 numaralı derin yeraltı suyu örnekleri için sırasıyla 1 ve 1,66 TU'dır. Bu durum nispeten yaşlı yeraltı sularının varlığını göstermektedir (Şekil 9.10). Bu sularda buharlaşma etkisi görülmesine rağmen trityum değerlerinin düşük olması, buharlaşmanın oksijen-18 ve döteryumu etkilemesine rağmen trityum içeriğinin fazla etkilenmediği anlaşılmaktadır.

Suların trityum içeriği ile $\delta^{18}O$ değişim diyagramı suların dolaşım zamanını göstermektedir. Şekil 9.11'de görülen soldan sağa doğru azalan trityum (TU) içeriği, çalışma alanındaki genel yeraltı suyu akım yönünü göstermektedir.



Şekil 9.10 Çalışma alanı Aralık 2013 dönemi örneklerine ait EC-³H grafiği



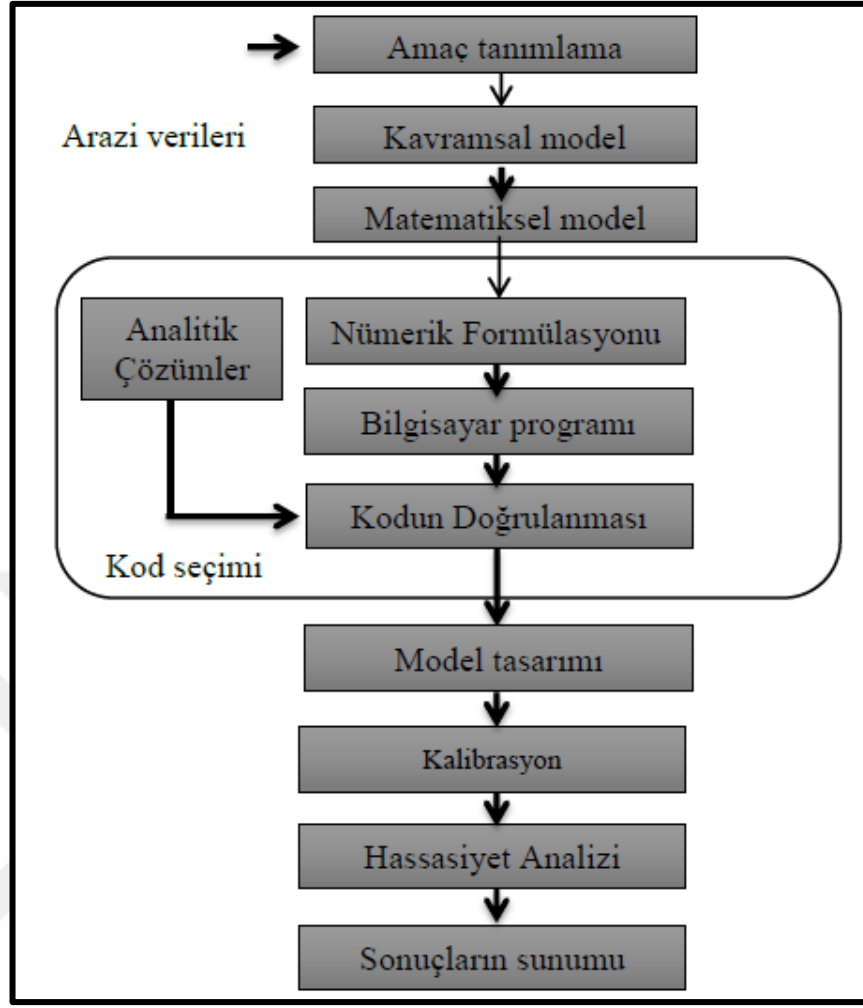
Şekil 9.11 Çalışma alanı Aralık 2013 dönemi örneklerine ait $\delta^{18}\text{O}$ -³H grafiği

10. YERALTI SUYU AKIM MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Yeraltı suyu akım modeli gerçeğin bir temsilidir. Uygun şekilde hazırlanması durumunda, modeller, yeraltı suyu yönetim planlarının hazırlanması için kıymetli bir araç olur (Wang ve Anderson 1982). Bir matematiksel model, sistem içerisinde meydana gelen fiziksel süreçleri ve model sınırları boyunca seviye ve akım değerlerini tanımlayan denklemler vasıtasıyla yeraltı suyu akımını modeller. Zamana bağlı problemler için sistemin başlangıç koşullarındaki seviye dağılımlarını tanımlayan eşitliklere de ihtiyaç duyulmaktadır (Anderson ve Woessner 1992).

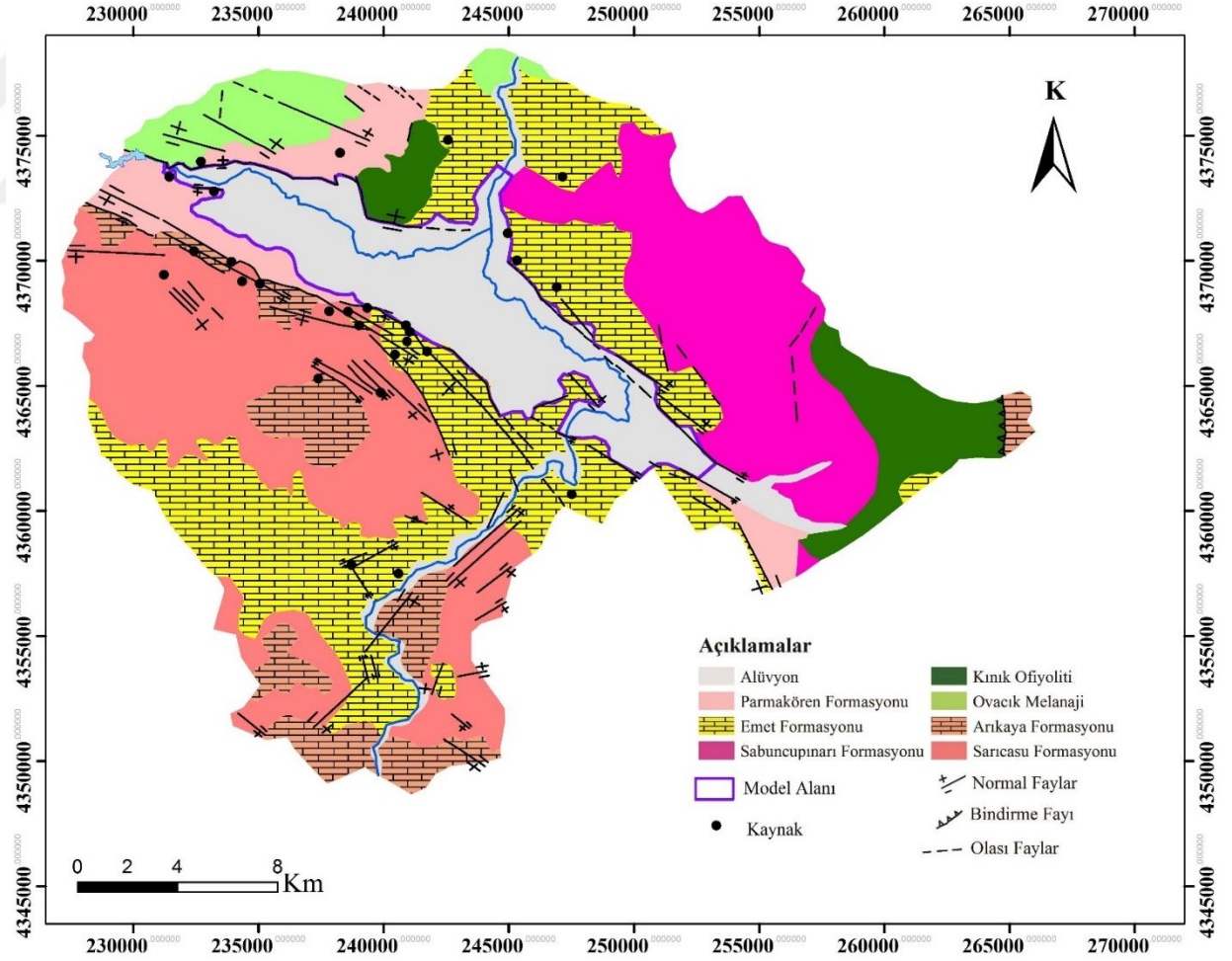
Kararlı durum koşulları için, temsili elementel hacmin kaynak ya da kuyu içermediği durumlarda, sisteme giren ve çıkan su miktarının eşit olduğu varsayılan süreklilik koşulları gereklidir. Kararlı durum koşullarının varlığı, akım ve seviye değerlerinin zamana bağlı olmadığını, zaman içerisinde değişmediğini ifade etmektedir (Wang ve Anderson, 1982). Burada içe akışlar artı, dışa akışlar eksi işareti ile belirtilir. Kararlı durum koşullarındaki bir yeraltı suyunun zaman içinde bir değişimin olmadığı kabul edilmektedir. Bu durum, kuyuda gözlenen hidrolik seviye değişiminin ihmal edilebilir olması halinde ortaya çıkmaktadır.

Yeraltı suyu akım modelinin geliştirilmesinde teknolojilerin ve yöntemlerin bir tercümesi olan Anderson ve Woessner (1992) tarafından önerilen model kullanılmıştır (Şekil 10.1).

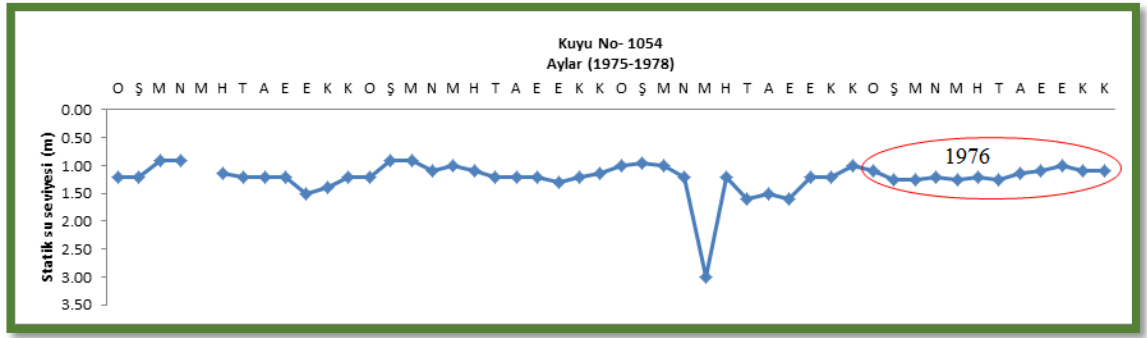


Şekil 10.1 Yeraltı suyu modelleme süreci (Anderson ve Woessner 1992)

Kütahya Ovası'nda yer alan alüvyon akiferi temsil eden modelleme alanı 83 km^2 'dir (Şekil 10.2). İnceleme alanının sığ yeraltı suyu akım modeli kararlı akım durumunda yapılmıştır. Kararlı bir akımın olması için akifer sisteme giren toplam akımın akiferden çıkan toplam akıma eşit olması gerekmektedir. Şekil 10.3'te görüldüğü gibi 1054 numaralı Devlet Su İşleri rasat kuyusunun 1976 yılı statik su seviyeleri genel olarak sabittir. Bu yılda kuyudan çıkan ve kuyuya giren akımlar birbirine eşittir. Buna göre 1976 yılı Ekim ayı yeraltı suyu akımının kararlı akım halini gösterdiği varsayılmıştır.



Şekil 10.2 Modelleme alanını gösteren harita



Şekil 10.3 Alüvyal akiferde yer alan 1054 numaralı kuyuda su seviyesi değişimi

10.1 Modelin Amacı

Bu doktora çalışmasında Kütahya ovasındaki alüvyon sığ akiferi için bir matematiksel akım modelinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. MODFLOW-2005 (Harbaugh 2005) platformu üzerinde geliştirilen model tek katmanlı ve 2-boyutlu olup, 1976 yılı Ekim ayının kararlı akım koşullarını temsil edecek şekilde kurulmuştur.

Yeraltı suyu akım yönünün, alüvyon akifer ile akarsular arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi ve çalışma alanının kavramsal hidrojeolojik durumunun doğrulanması amacıyla çalışma alanının yeraltı suyu akım modeli geliştirilmiştir.

MODFLOW kullanarak Kütahya Ovasının geçmişteki ve günümüzdeki yeraltı suyu durumunu araştırırken ve gelecekteki durumuna yaklaşımda bulunmak için çalışma alanı hücrelere bölünmüş ve her bir hücre için tanımlanan akifer özellikleri hücrenin her yerinde sabit kabul edilerek su seviyeleri hesaplanmıştır.

10.2 Kavramsal Modelleme

Genel olarak bir kavramsal model, modellenecek bölgenin, başlangıç ve fiziksel sınır koşullarını, çalışma alanındaki hidrolik özelliklerin dağılımını, model alanı, kaynak ve kuyuları içeren, basitleştirilmiş bir benzetişimdir. Kavramsal modelin oluşturulmasındaki başlıca amaç, arazi problemini sadeleştirmek ve ilgili verileri düzenlemektir. Böylece sistem dikkatlice incelenebilecektir (Anderson ve Woessner

1992). Kavramsal model, ilgili alan üzerinde hidrojeolojik ortamı temsil eden bir görüntü elde edilebilmesi için hidrojeolojik verilerin değerlendirilmesi yoluyla oluşturulmaktadır (Domomenico ve Schwartz, 1998). Yeraltı suyu akımının kavramsal modeli, mevcut yeraltı hidroloji verilerine dayalı bir nitel çalışmadır. Kavramsal modelin oluşturulması sayısal yeraltı suyu akım modelinin daha nicel bir benzetişiminin geliştirilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Farklı hidrojeolojik birimlerin yanal ve düşey yayılımları ve bu birimlerin birbirleri ile ilişkilerinin net bir biçimde anlaşılması doğru bir kavramsal hidrojeolojik modelin kurulması için önem arz etmektedir. Hidrostratigrafik birimler benzer hidrojeolojik özelliklere sahip jeolojik birimlerden oluşmaktadır. Hidrostratigrafinin geliştirilmesinde aynı jeolojik birimler, farklı akiferlere, geçirimsiz birimlere ayrılabilir ya da birkaç jeolojik birim, bir hidrostratigrafik birim içerisinde birleştirilebilir (Anderson ve Woessner 1992).

Model alanında yüzey suyu olarak dört mevsim akış gösteren, Porsuk ve Felent çayları bulunmaktadır. Porsuk çayı, ovada sulama suyunun ana kaynağıdır. Bu akarsuların, alüvyon akiferler ile hidrolik olarak bağlantılı olduğu, böylece tabanlarının geçirimli olduğu belirlenmiştir.

Çalışma alanındaki yeraltı suyu besleniminin kaynağı genellikle yağıştır. Alanın aylık yağış miktarı meteorolojik verilere dayalı bulunmuştur. Alansal beslenme hidrolojik toprak gruplarının türüne bağlı olarak değişmektedir. Modelleme alanındaki hidrolojik toprak gruplarına göre Ekim 1976'da akiferin net beslenmesi 0,04 mm ile 6,98 mm arasında değişmektedir (EK 7).

Yeraltı suyunun davranışının bilinebilmesi için, yeraltı suyunun beslenme ve kayıplarının bilinmesi; bunlarla arasındaki ilişkinin ortaya konması gerekmektedir. Uzun yıllarına ait Ekim ayı için 41,1 mm aylık gerçek buharlaşma-terleme Penman yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

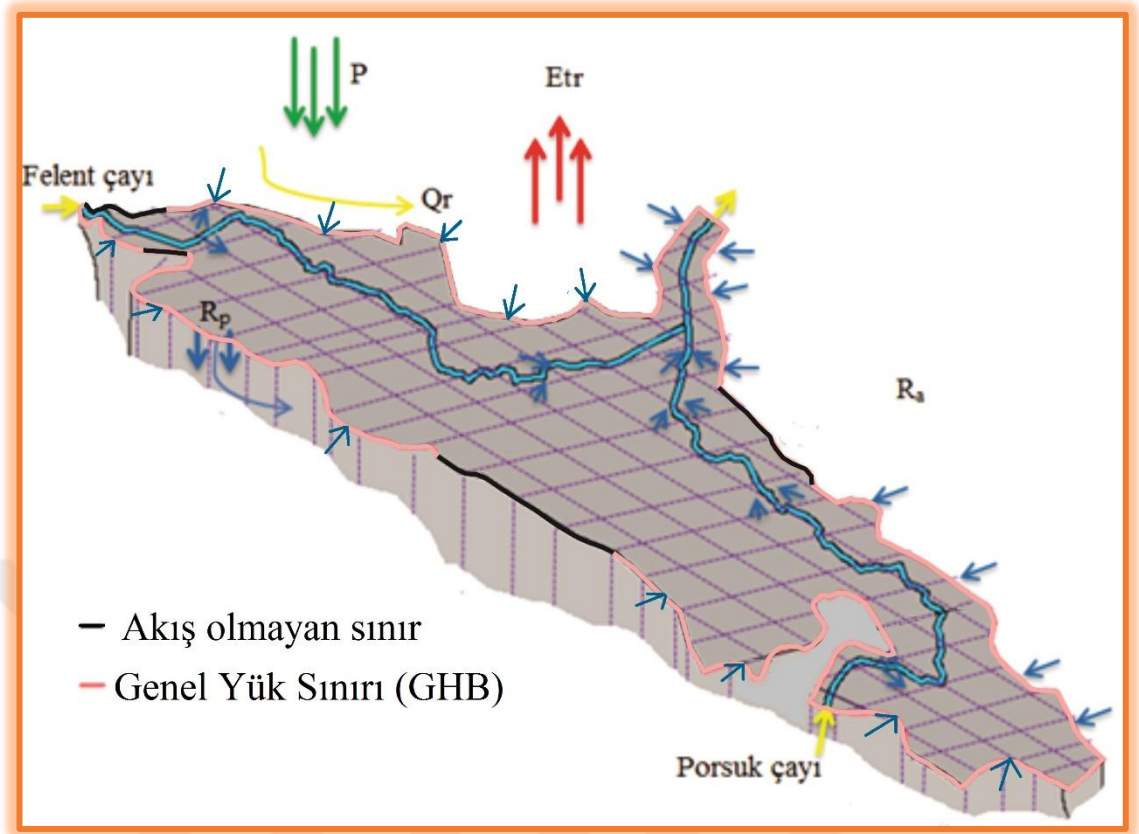
Gerçekçi verilerin eksikliği nedeniyle bu çalışma için sulamadan dönen su ihmal edilmiştir. Böylece sulamadan dönen su miktarı modelde doğrudan hesaplanmayacaktır.

Kütahya ilinin içme suyu ihtiyacı model alanı dışında kalan kaynaklardan sağlandığından ve bazı köyler için derin akifer sistem kullanıldığı için alüvyon akiferden çekilen yeraltı suyu ihmal edilmiştir. Bunun yanı sıra sulama suyunun önemli bir kısmı Enne Barajı'ndan ve yüzey sularından sağlanmaktadır.

Çalışma alanındaki erişilebilen kaydedilmiş veriler ışığında, ova tek tabaka model olarak kavramsallaştırılmıştır. Bu tabaka, arazide yaygın olan yarı geçirimli koşullara uyması için “convertible” (değiştirilebilir) tabaka olarak modellenmiştir. Tüm yönlerde fiziksel sınırların bulunmaması nedeniyle tümü Genel Seviye Koşulu olarak kavramsallaştırılmıştır. Bu ovanın sınırları boyunca net yeraltı suyu akımının modellenmesine imkân sağlamıştır (Şekil 10.4).

Grid sınırları mümkün olduğu kadar sistemin doğal hidrolojik sınırları, kaynak çıkış noktaları, faylar ve jeolojik sınırlar ile hizalanmıştır (Şekil 10.4). Ova kenarındaki model sınırındaki fayların bulunduğu bazı yerlerde kaynak çıkışları görülmektedir. Bu alandaki fay zonları kaynaklar için bariyer görevi yapmakta ve ova ile model sınırı dışındaki hidrolik ilişkiyi engellemektedir. Bu nedenle kaynak su çıkışlarının bulunduğu alanların tamamı Akım Olmayan (No Flow) sınır koşulları olarak tanımlanmıştır. Ancak, kaynak su çıkışlarının olmadığı alanlardaki faylar geçirimli olarak kabul edilmiş ve Genel Seviye Sınırı olarak tanımlanmıştır (Şekil 10.4).

Alüvyon sığ akiferdeki yeraltı sularının su tipi Ca-Mg/Mg-Ca HCO₃ olup, bu suların model sınırı dışındaki Emet ve Parmakören formasyonlarından beslendiği tespit edilmiştir. Ayrıca, alüvyon akifer sularının diğer akifer türlerinden ve akarsudan alınan su örneklerine göre daha tuzlu/iyon yükünün daha fazla olması akışın alüvyon akifere doğru olduğunu göstermektedir. Bu durum yeraltı suyu akım modeli için belirleyici olup, akımın model sınırı dışından model alanına doğru olduğunu göstermektedir. Alüvyon akiferdeki sığ dolaşım, suların izotopik içeriğindeki (Oksijen-18 ve döteryum) buharlaşma etkileri ile de anlaşılmaktadır.



Şekil 10.4 Kütahya Ovası iki boyutlu kavramsal hidrojeolojik modeli

P: Yağış, Etr: Gerçek buharlaşma-terleme, R_p : Yağıştan beslenme, R_a : Diğer akiferlerden beslenme ve Q_r : Yüzeysel akış

10.3 Genel Varsayımlar

Yeraltı suyu akımının benzeştirilmesi ve modelin geliştirilip, kalibre edilmesi amacıyla birçok sadeleştirme varsayımları kullanılmaktadır.

İnceleme alanında oluşturulmuş model, gerçek hidrojeolojik sistemin yüzde yüz aynısı olmayıp, yapılan bazı kabuller ile sistemin temsili olduğu kabul edilmektedir.

- ✓ Su gözenekli ortamda hareket etmektedir.
- ✓ Yağıştan net beslenme alansal olarak uniform dağılmamaktadır. Çünkü model alanında farklı hidrolojik toprak tipleri mevcuttur.
- ✓ Gerçekçi verilerin eksikliği nedeniyle sulamadan dönen akım ihmal edilmektedir.

- ✓ Tek akifer sistemi ya da tek tabaka söz konusu iken düşey akım ve düşey süzülme ihmal edilmektedir.

10.4 Model Kodu Seçimi

Sayısal model için seçilen program kodu MODFLOW'dur. MODFLOW üç boyutlu (3B), sonlu farklar ve hücre merkezli modellemeye olanak sağlanmakta olup, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar (USGS) (McDonald ve Harbaugh, 1988) tarafından ilk defa geliştirilmiştir. Yeraltı suyu modeli, MODFLOW kapsamlı bir grafik ara yüzü içermektedir.

Sonlu Farklar Yöntemi ile oluşturulan yeraltı suyu akımı deterministik bir sistem olduğundan matematiksel denklemlerle ifade edilmektedir. Bunun için yeraltı suyu süreklilik denkleminde yararlanılır. Gözenekli ortamlarda sabit yoğunluktaki yeraltı suyunun üç boyutlu hareketi aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır.

Yeraltı suyu modelleme çalışması fiziksel problemin kavramsal olarak tanımlanmasıyla başlamaktadır. Modellemede kavramsal modeli oluşturduktan sonraki adım ise fiziksel sistemi matematiksel terimlere dönüştürmektedir.

MODFLOW yeraltı suyu akım denklemi (Darcy Yasası) süreklilik denklemi (kütle dengesi) olup, hesaplama aşağıdaki kısmi diferansiyel denkleme dayanmaktadır.

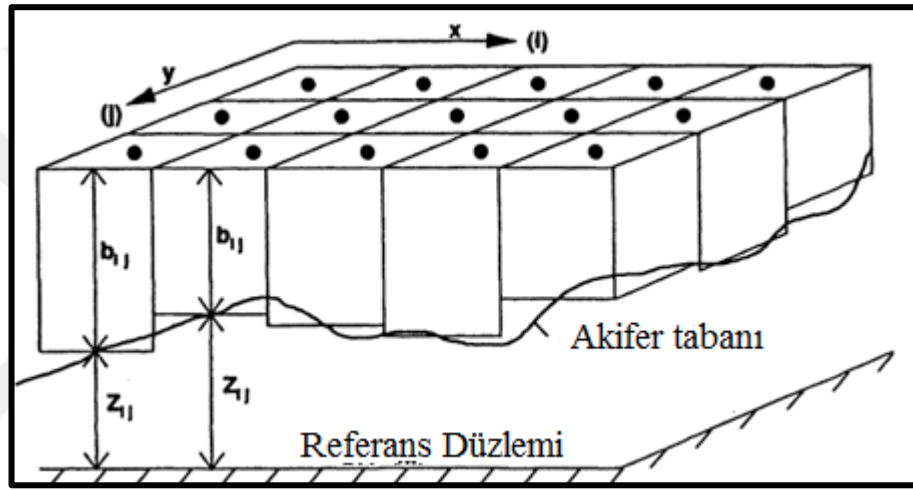
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10.1)$$

Denklemden K_{xx} , K_{yy} ve K_{zz} , x, y, z, Kartezyen koordinat eksenleri boyunca hidrolik geçirgenliği ($L T^{-1}$), h piyezometrik yükü (L), W birim hacimdeki hacimsel değişimi ve sisteme giren ve/veya çıkan akımları ($L^3 T^{-1}$), S_s gözenekli ortamın özgül depolamasını (L^{-1}) ve t zamanı (T) ifade eder. Genelde S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} koordinat

sisteminin bir fonksiyonu ($S_s=S_s(x,y,z)$), h ve W ise koordinat sisteminin ve zamanın fonksiyonu olabilirler ($h=h(x,y,z,t)$).

İki boyutlu kararlı akım ve izotropik koşullarında iki boyutlu yeraltı suyu akım hareketi aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır (Şekil 10.5).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{W}{K} = 0 \quad (10.2)$$



Şekil 10.5 Bir serbest akiferin iki boyutlu alansal modelinin blok merkezli gridi (Andersen 2002)

b_{ij} - akifer kalınlığı, z_{ij} - akifer tabanı

10.5 Model Yaklaşımı

Yeraltı suyu modelleme sistemi GMS (Groundwater Modeling System) programının en önemli özelliklerinden biri kavramsal modelleme yapabilme özelliğinin olmasıdır. Yeraltı suyu sisteminin hidrolik ve jeolojik durumlarının bir tasvirini kapsayan temsili bir gösterime kavramsal model denir.

Yeraltı suyu modelleme sistemi (GMS) üç boyutlu karmaşık ve kapsamlı yeraltı suyu modellemesi yapılabilme imkanı sağlayan alt programları bünyesinde bulunduran bir

bilgisayar programıdır. GMS’de yapılan modelleme bölgenin niteliklerini dikkate alarak, modelin geliştirilmesine, kalibrasyonuna ve görselleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Tek bir katman boyunca iki-boyutlu (2B) alansal akımı temsil etmek üzere üç boyutlu (3B) bir model girdi kullanılmıştır.

Sonlu farklar yaklaşımını uygulamak üzere çalışma alanının dijital yükseklik modeli üzerine bir grid yerleştirilmiştir. Hücre ya da grid merkezi üzerinde kısmi diferansiyel akım denklemini çözmek üzere akiferin hidrolik parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm model hücrelerinde ortalama seviye değerlerinin hesaplanması için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

Kütahya Ovası serbest sığ akifer sistemi iki boyutlu olarak ve kararlı akım koşullarına göre modellenmiştir. Modelin sınırlarını belirlerken alüvyon akiferin tamamını kapsayacak şekilde çalışılmıştır.

10.6 İşlemci

GMS’de tüm sistem, bir grafiksel kullanıcı ara birimi (GMS programı) ile analiz kodlarından (MODFLOW, MODPATH, MT3DMS, MT3D, PEST ve UCODE) oluşmaktadır.

11. SAYISAL YERALTI SUYU AKIM MODELİ OLUŞTURULMASI

Yeraltı suyu modellemesi hidrojeolojik bilimlerde kaynak potansiyeli değerlendirilmesi ve farklı koşullar ya da stresler altında geçmişteki, şu andaki ve gelecekteki etkilerin tahmini için kullanılan yöntemlerden biridir (Spitz ve Moreno, 1996).

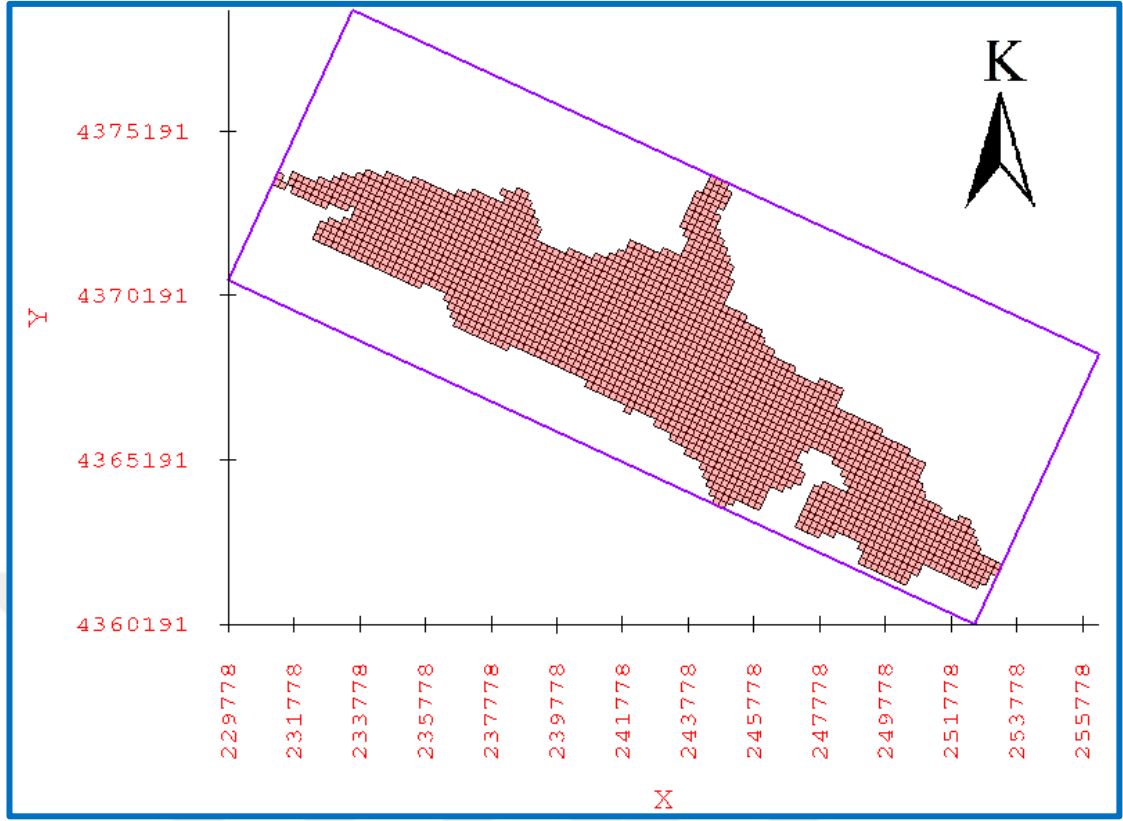
Bu bölümün temel amacı bir önceki bölümde açıklanan kavramsal model ve seçilen bilgisayar koduna dayalı sayısal akım modelinin oluşturulmasıdır. Kalitatif olarak kavramsallaştırılmış model kantitatif olarak ifade edilecektir. Numerik modelleme süreci etki alanının gridlere ayrılmasıyla başlamakta, veri hazırlama ve verileri model alanına işlemekle devam etmekte ve programı çalıştırarak sonlanmaktadır.

11.1 Model Alanı

Kütahya Ovası sığ alüvyal serbest yüzeyli akifer iki boyutlu olarak ve kararlı akım koşullarına göre modellenmiştir. Sığ akifer modelde tek katman olarak temsil edilmiştir.

11.1. 1 Yatay boyutu

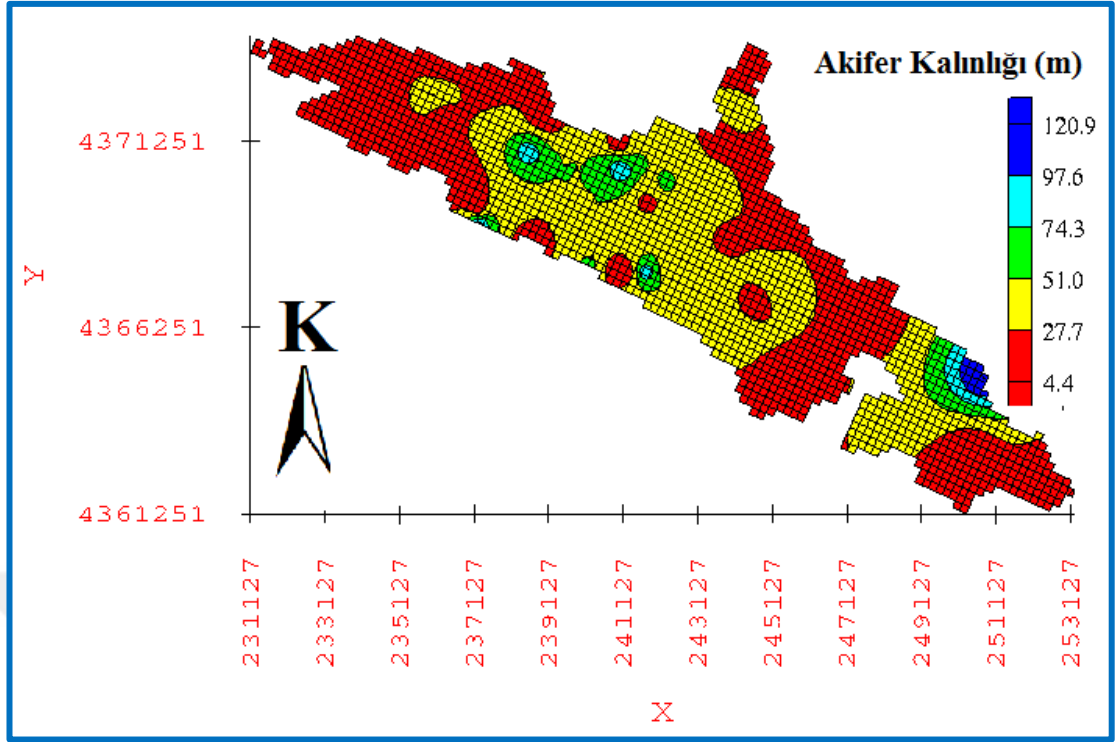
Çalışma alanı 35 ve 36. UTM bölgesine karşılık gelen 231127 E, 4361251 N ve 253283 E, 4373820 N koordinatları arasında kalan X-yönünde 25014 m, Y-yönünde 9047 m olmak üzere 83 km²'lik alanı kapsamaktadır. Modelin güneybatı köşesi orijin olarak $X=Y=0$ noktası yerine $X=229778$ E ve $Y=4370654$ N UTM başlangıç koordinatları kabul edilerek, tüm veriler UTM koordinatları kullanılarak girilmiştir (Şekil 11.1).



Şekil 11.1 Alüviyal akiferin yatay boyutu

11.1.2 Dikey boyutu

Model alanının dikey boyutu akifer kalınlığı ile eşdeğerdir. Bu modelin üst tabakadan akiferdeki alt tabakanın çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Akiferin maksimum kalınlığı 120 m'ye ulaşmaktadır (Şekil 11.2).



Şekil 11.2 Alüviyal akiferin dikey boyutu

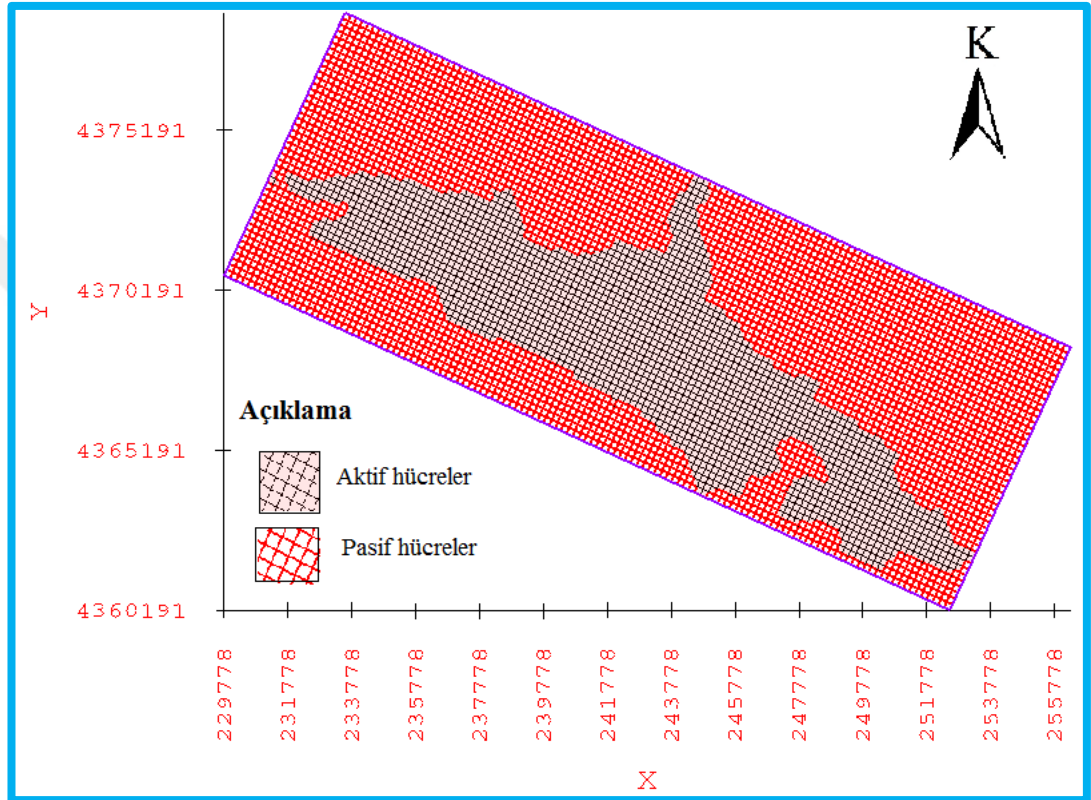
11.2 Grid Ağlarının Oluşturulması

Modelin boyutluluğu kavramsal modelin oluşturulması sırasında tanımlanmaktadır. Örneğin, iki boyutlu bir alansal model uygulandığı zaman, önemli bir dikey bileşen olan akım ve herhangi bir dikey sızıntı olmamalı veya akım sınır koşulları ile açıklanabilmelidir.

MODFLOW akım modelinde IBOUND düzeni olarak çalıştırabilmek için sınır koşullarının girilmesi gerekmektedir. IBOUND düzeninde her bir model ve modeldeki her bir hücrenin modelde sabit yük, aktif veya aktif olmayan hücre olduğunu belirten bir matris kodu bulunmaktadır. IBOUND düzeninde aktif hücreler pozitif (+) bir değer, sabit seviye hücreler negatif (-) bir değer, akışın olmadığı pasif hücreler ise sıfır (0) değeri ile tanımlanmaktadır.

Kütahya Ova akiferini sonlu farklar yöntemi ile modelleyebilmek için, model alanı 200x200 m boyutunda hücrelere bölünüp, 45 satır, 125 kolon ve 1 tabakadan oluşan

5625 hücreye sahip dikdörtgen boyutlu model ağı oluşturulmuştur (Şekil 11.3). Bu hücrelerin 2077 adedi akifer sınırlarının içinde kalan aktif hücrelerden, geriye kalan 3548 hücre ise akifer sınırları dışında kalan pasif hücrelerden oluşmaktadır. Sayısal olarak etkili bir model üretmek için ve aktif olmayan grid hücre sayısını minimize edebilmek için alan 335 dereceye döndürülmüştür (Şekil 11.3).



Şekil 11.3 Model alanının grid ağları

11.3 Model Sınır Koşulları

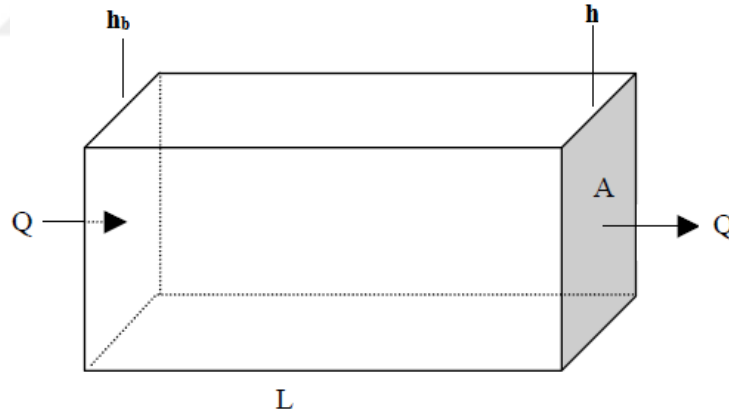
Belirli bir fiziksel işleme karşılık gelen bir kısmi diferansiyel denklemin tekil bir çözümünü elde edebilmek için fiziksel sürecinin durumu hakkında ek bilgiler gerekmektedir. Bu bilgiler, sınır ve başlangıç koşulları tarafından sağlanmaktadır.

Sınır koşulları olarak Genel Yük Sınırı (General Head Boundary-GHB), Yüke - akışa bağlı sınırlar (Boundaries with head- dependent Flux) ve Akış olmayan Sınırlar (No-Flow boundary) uygulanmıştır.

Çalışma alanında yeraltı suyu akım modelinde akifer sisteminin sınır koşulları, model alanının Emet Formasyon ile sınırı ve Parmakören Formasyonu ile sınırı, Genel Yük Sınır (General-Head Boundary) olarak sınır koşulları tanımlanmaktadır. Fayların olduğu yerlerde kaynak su çıkış noktalarının bulunduğu yerlerde sınırların tamamı Akım Olmayan (No Flow) sınır koşulları olarak tanımlanmıştır.

11.3.1 Genel yük sınırı

Genel yük sınır (GHB) koşulu, sabit yük sınır koşulunun bir türüdür; model sınırındaki yeraltı suyu akımı akiferdeki yük değeri ile modelcinin tanımlandığı bir değer arasındaki yük farkı ile orantılı olacak şekilde hesaplanmaktadır. GHB paketi tarafından simüle edilen bir sınır üzerinden yüke bağlı akış (Q) ve sınırdaki hücreler yeraltı suyu akım miktarını kontrol eden hidrolik iletkenlik (C) aşağıdaki formül üzerinden hesaplanmaktadır (McDonald ve Harbaugh 1988) (Şekil 11.4).



Şekil 11.4 Sınırdan geçen akışın şematik gösterimi (McDonald ve Harbaugh, 1988)

$$Q = C(h_b - h) \quad (11.1)$$

$$C = (K \times A) / L \quad (11.2)$$

Q : Sınırdan geçen akış ($m^3/gün$)

C : Sınırın geçirgenliği ($m^2/gün$)

h_b : Sınırdaki yük (m)

h : Akiferin yükü (m)

K: Hidrolik iletkenlik katsayısı

A: Akım yönüne dik kesit alanı

L: Akım yolu uzunluğu

Bilinen yük sınırları geçiş simülasyonu için kullanışlıdır, çünkü değişik zaman periyotlarında C ve h içinde değişikliklere izin vermektedir. Modele değişken yük sınır esnekliği sağlayabilmek için model alanın faylarla sınırlandırıldığı zonlar geçirimli, faylar ve su çıkışlarının bulunduğu zonlar ise geçirimsiz olarak tanımlanmıştır. Modelde geçirimli zonlar (faylı veya normal dokanak) Genel Seviye Sınırı olarak kullanılmıştır.

Özellikle alüvyon ile diğer formasyonların sınırındaki ve bu sınıra çok yakın bazı kuyular, model alanının sınır koşulunda kullanılan Genel Seviye Sınırını tanımlamak için kullanılmıştır (EK 4).

11.3.2 Bilinen yüklü sınırlar

Her iki yönde nehir veya göl gibi bir yüzey suyu ile bir akifer arasındaki akışı simüle etmektedir. Bu kapsamda, bir nehir kanalının ince tıkanıklığını simüle etmek üzere nehir yatağı tortul iletkenliği de yer almaktadır.

Akış hızı, aşağıda verilen denklem kullanılarak sınır hücresinde ve bitişikteki akifer hücresinde, hidrolik yükler arasındaki fark üzerinden hesaplanır (McDonald ve Harbaugh 1988).

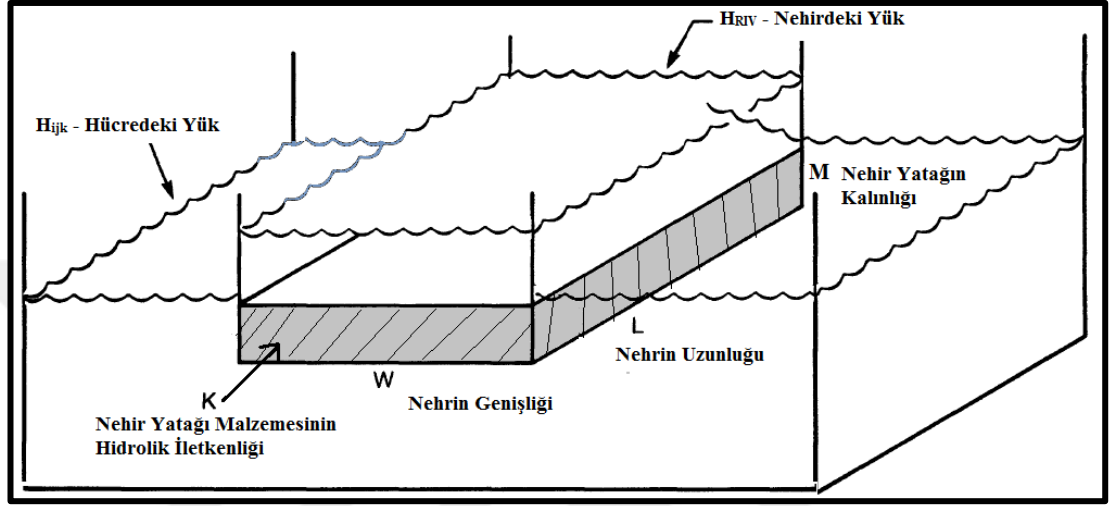
$$Q_{RIV} = \frac{KLW}{M}(H_{RIV} - H_{i,j,k}) \quad (11.3)$$

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(H_{RIV} - H_{i,j,k}) \quad (11.4)$$

Burada Q_{RIV} , nehir ile akifer arasındaki akış hızıdır ve eğer akış akifere doğru ise pozitif değerdedir. H_{RIV} nehirdeki yük, $H_{i,j,k}$ hücredeki yük ve C_{RIV} nehir yatağının hidrolik iletkenliğidir.

$$C_{RIV} = \frac{KLW}{M} \quad (11.5)$$

Burada K, nehir yatağı malzemesinin hidrolik iletkenliği, L nehir kanalının uzunluğu, W nehir kanalının genişliği ve M nehir yatağı malzemesinin kalınlığıdır (Şekil 11.5.).



Şekil 11.5 Nehir - akifer etkileşiminin kavramsal temsili (McDonald ve Harbaugh 1988)

Akifer içindeki hidrolik yük nehir kanalından aşağı düşerse, akış sabit kalır ve aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$Q_{RIV} = C_{RIV} (H_{RIV} - R_{BOT}) \quad (11.6)$$

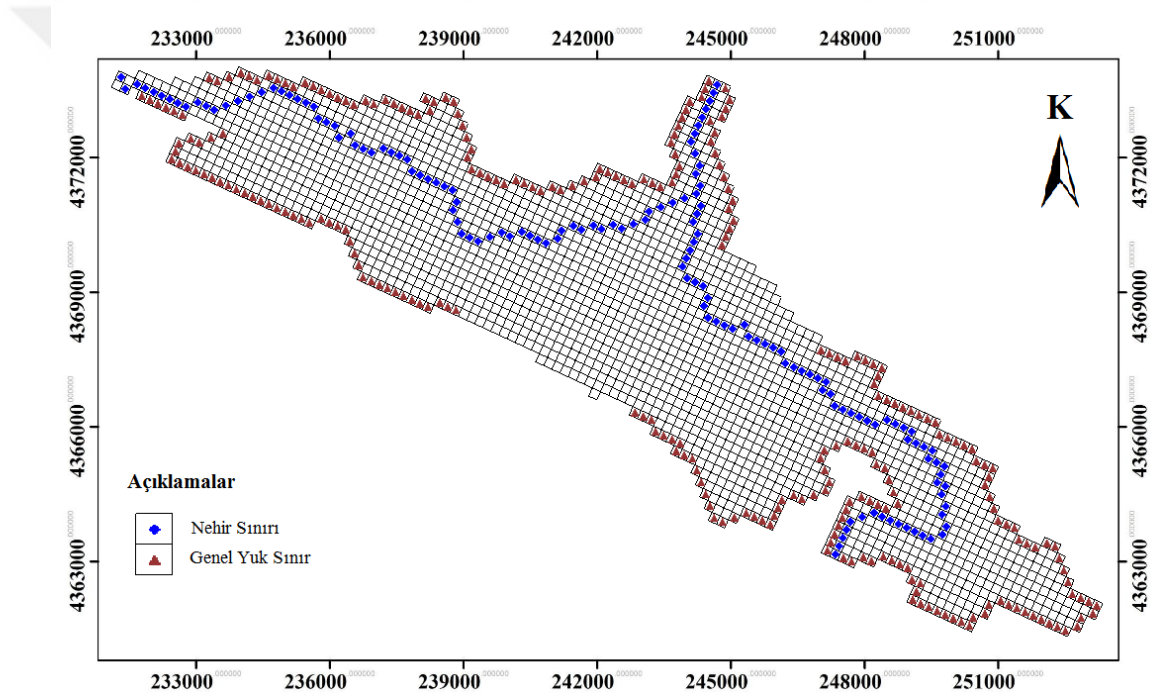
Burada R_{BOT} nehir kanalının alt kısmının yüksekliğidir.

11.3.3 Akış olmayan sınırlar

Akışı sıfır olan sınırlara akış olmayan sınırlar denir. Modflow, aktif olmayan (akış olmayan) hücreleri olan geçirimsiz sınırların çevresinde bir akış olmayan sınır olduğunu varsayar. İnce, düşük geçirgenlik özelliğine sahip, su bölüm hattı, faylar gibi yerleri simüle eden pakete akış olmayan sınırlar denir (Anonymous 2002).

İlgili sınırdaki akım sıfıra eşit ise ($dh/dx = 0$) akım olmayan (no-flow) koşullar geçerlidir. Bu sınır yeraltı suyu bölüm hattı, akış çizgisi, geçirimsiz anakaya ya da geçirimsiz bir fay zonu gibi bölgeleri tanımlar. Faylar, akifer boyunca yanal akımı engelleyici olarak akış olmayan (No-Flow) sınır olarak sınırlanmıştır.

Modelde kullanılan sınır koşulları Şekil 11.6'da gösterilmiştir. Modelin sınır şartları şekildedir; 267 hücre Genel Yük Sınırı (General Head Boundary-GHB) ve 51 hücre akış olmayan (No-Flow) sınır şartına sahiptir. Model 2 nehir kolu halinde gruplandırılmış 150 nehir hücresi kullanılmıştır.



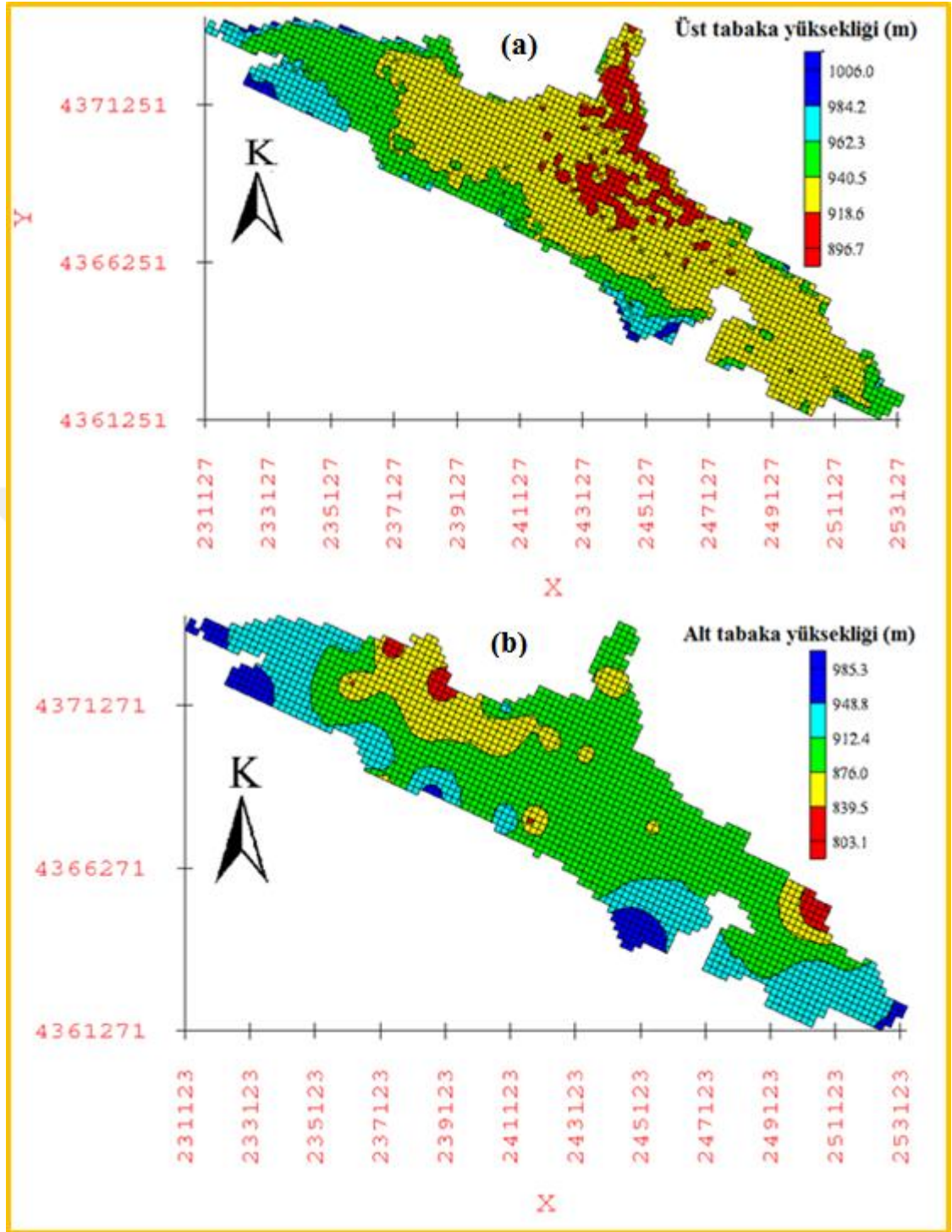
Şekil 11.6 Model alanının sınır koşulları

11.4 Üst ve Alt Tabaka

Model alanının üst ve alt sınır tabakalarının sınırlarının belirlenmesi çalışma alanında yer yüzeyinin sayısal yükseklik modelinin (DEM) ve kuyu verilerinin mevcudiyetine bağlıdır (Şekil 11.7).

Üst tabakanın yükselti değerleri dijital yükselti modelinden (DEM) alınmıştır. Çalışma alanının yer yüzeyi yükselti haritası ASTER uzaktan algılama verileri kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışma alanının yükselti haritasının elde edilmesinde kullanılan ASTER Küresel Dijital Yükselti Modeli (GDEM) NASA tarafından sağlanmaktadır. Buna karşın akiferin alt tabakası alüvyon ile alüvyonun altında kalan jeolojik birimin sınırı olarak alınmıştır. Bu sınırın yükseltisi (alt tabaka) farklı amaçla Devlet Su İşleri tarafından açılan 32 kuyu logu kullanılarak belirlenmiş ve bu noktalar daha sonra GMS programı içinde bulunan Ağırlıklandırılmış Uzaklığın Tersisi (IDW) yöntemi kullanılarak altı tabaka olarak model gridine aktarılmıştır.





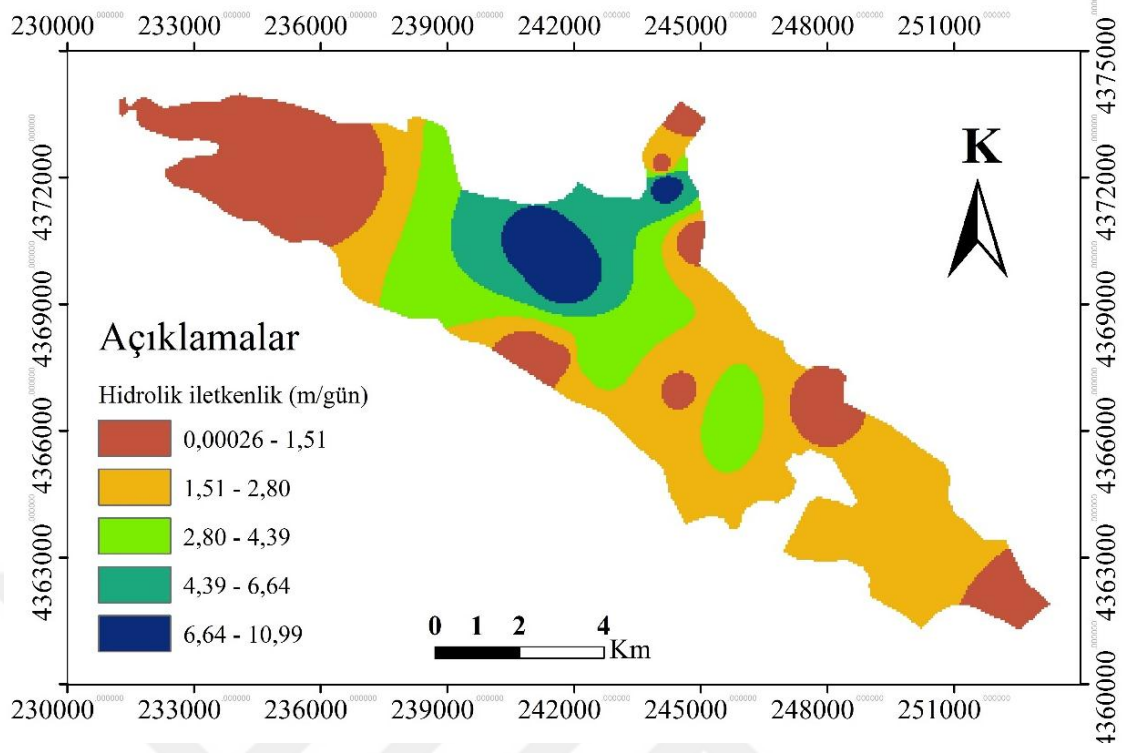
Şekil 11.7.a Alüvyal akiferin üst tabaka, b. alt tabaka yüksekliği

11.5 Başlangıç Hidrolik Yükü

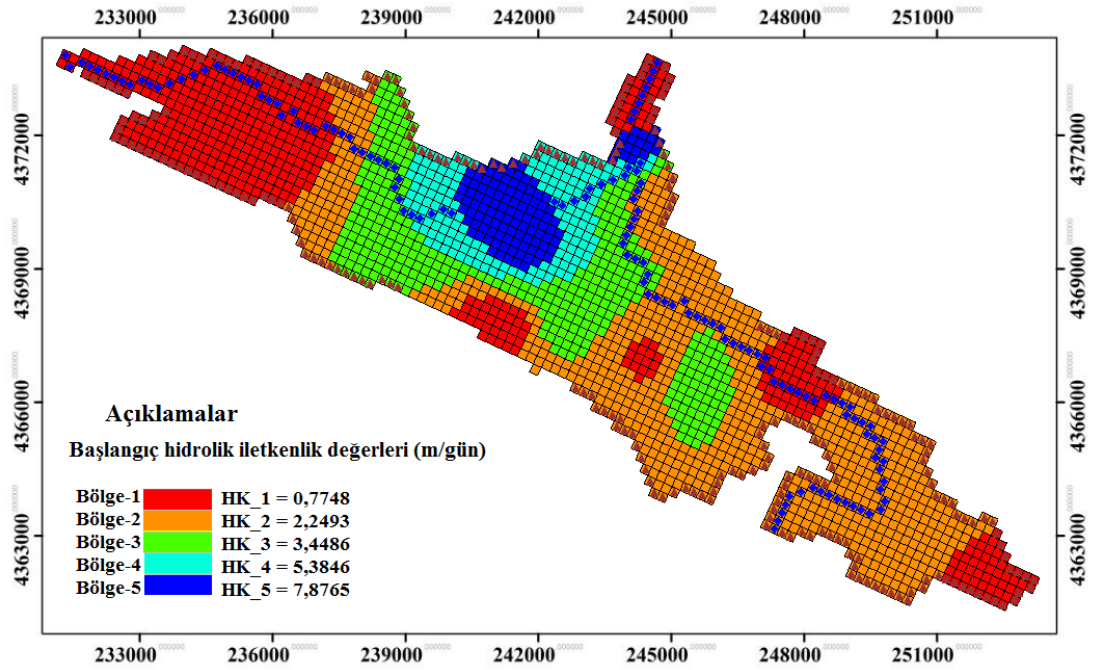
Modelin çalıştırılmasıyla, Ekim 1976 için, kararlı hal koşullarında hidrolik yük seviyeleri başlangıç değerleri olarak tahmin edilmektedir. Kararlı hal modelinden elde edilen seviye dağılımı zamana bağlı koşullar için başlangıç koşulu olarak kullanılmıştır. Başlangıç akarsu seviyeleri ise Ekim 1976'da ölçülen akarsu seviyelerinden elde edilmiştir.

11.6 Hidrolik Parametreler

Modelin kararlı hal durumu için belirlenecek ve kullanılacak başlıca parametreler hidrolik iletkenlik ve transmissivitedir. Modelin grid hücreleri içerisinde parametreler sabit kalacaktır. Akiferin hidrolik iletkenliği pompa testleri (hem pompaj hem de yükselim testleri) analizleri sonucunda belirlenmiştir. Pompa testlerinde kullanılan kuyu verileri yalnızca boşalım miktarları ve düşüm kayıtlarıdır. Transmissivite değerleri Bölüm 8'de anlatıldığı gibi, transmissivite ile özgül kapasite (Q/s) arasındaki ilişkiye bağlı olarak belirlenmiştir. Bu durumda hidrolik iletkenlik (K) değerleri, transmissivite ($T=Kb$) ilişkisine bağlı olarak belirlenmiştir, burada b , akiferin kalınlığıdır. Hesaplanan alansal hidrolik iletkenlik dağılım haritasının oluşturulmasında ise ArcGIS 10.2.2 coğrafi veri tabanı yazılımı içinde bulunan Ağırlıklandırılmış Uzaklığın Tersisi (IDW) yöntemi kullanılmıştır (Şekil 11.8). Akarsu tabanındaki malzemenin hidrolik iletkenliği, Bölüm 7'de açıklandığı gibi elek analizi yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen alansal hidrolik iletkenlik verilerinin ortalamaları alınarak model alanına ait hidrolik iletkenlik zonlanma haritası elde edilmiştir (Şekil 11.9).



Şekil 11.8 Alüvyal akiferin hidolik iletkenlik dağılımı



Şekil 11.9 Model alanının hidrolik iletkenlik zonlanma haritası

11.7 Beslenme Paketi

Tipik olarak yağış veya sulama kaynaklı beslenme gerçek bir filtrelemeyi simüle etmede kullanılabilir. Sızma, yağıştan gelen suyun toprak ve kök bölgesinden geçerek yeraltı suyuna yaptığı beslenme olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, yüksek miktardaki yağış, yüksek miktarda sızmaya ve sonunda akiferde o kadar büyük miktarda beslenmeye neden olmaktadır. Beslenme genellikle yıllık ortalama miktar olarak, mm/yıl cinsinden ifade edilmektedir.

Net beslenme toprak yüzeyinden akifere ulaşan toplam su miktarı olarak tanımlanmaktadır. İnceleme alanında modelleme alanının yeraltı sularının yağıştan beslenme haritasını cm/yıl olarak geliştirmek için Williams ve Kissel (1991) yöntemi kullanılmıştır.

$$R = \frac{(P - 26,11)^2}{(P + 39,19)} \quad (11.7)$$

Çakıl ve kum hidrolojik toprakları (A- grubu topraklar)

$$R = \frac{(P - 38,23)^2}{(P + 57,33)} \quad (11.8)$$

Büzülen kil ve kumlu balçık hidrolojik toprakları (B- grubu topraklar)

$$R = \frac{(P - 49,91)^2}{(P + 74,40)} \quad (11.9)$$

Balçık ve siltli balçık hidrolojik toprakları (C- grubu topraklar)

$$R = \frac{(P - 57,58)^2}{(P + 86,36)} \quad (11.10)$$

Büzülmeyen kil ve çamur hidrolojik toprakları (D- grubu topraklar)

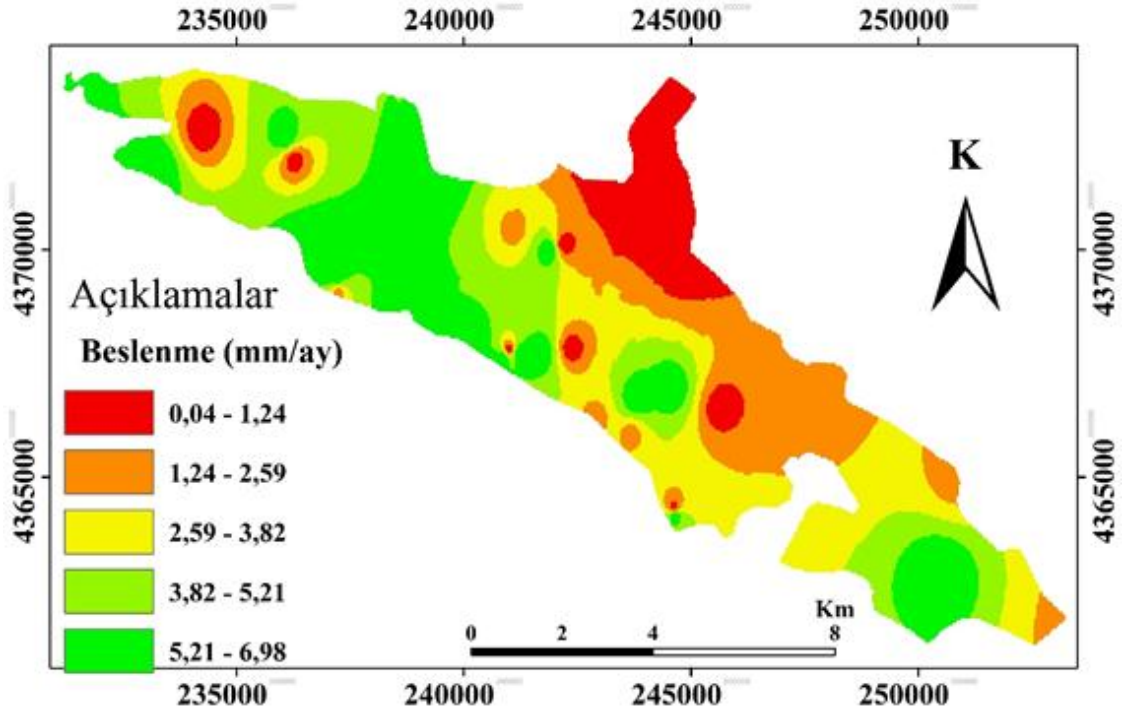
R: Hesaplanan yıllık sızma (cm/yıl)

P: Yıllık yağış (cm)

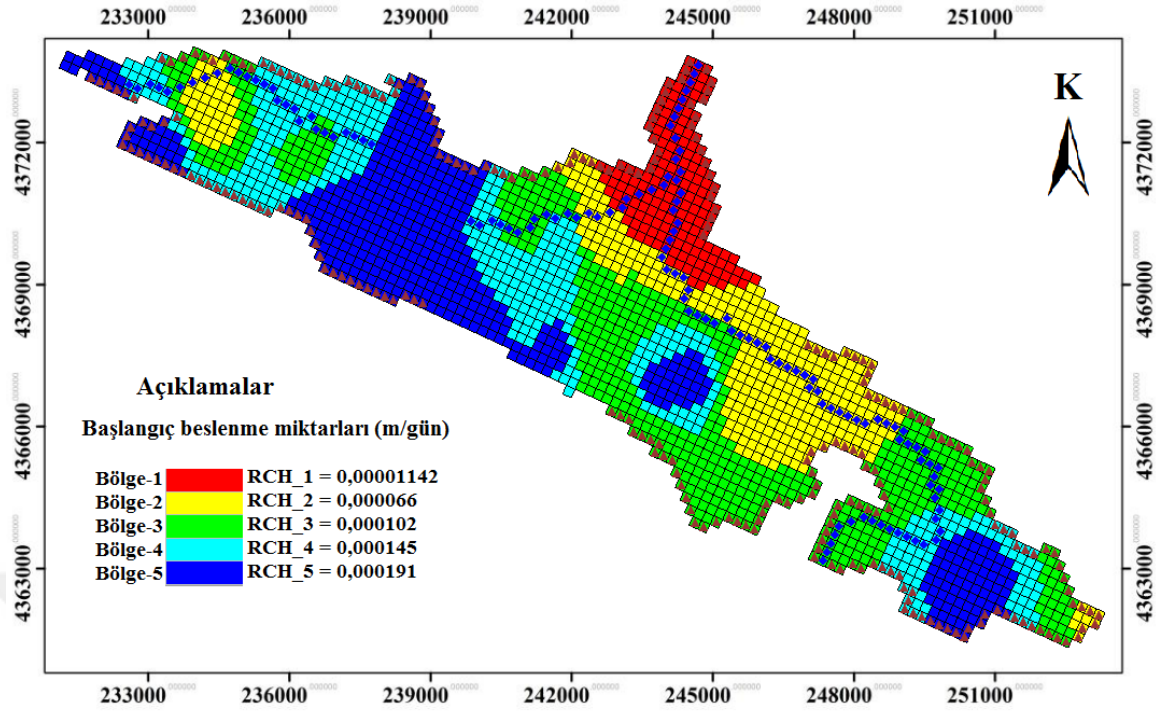
Çalışma alanının en önemli beslenme kaynağını yağış oluşturmaktadır. İnceleme alanında Kütahya DMİ tarafından ölçülen uzun ortalama yıllık yağış 547,3 mm ve Ekim ayının yağış miktarı ise 43,8 mm'dir. Bu yıllık yağış verisi kullanılarak inceleme

alanında bulunan A, B, C ve D hidrolojik toprak grupları için yağıştan yıllık beslenme sırasıyla 87,21 mm, 24,29 mm, 1,79 mm ve 0,57 mm olarak hesaplanmıştır. Buna göre A, B, C ve D hidrolojik toprak gruplarında yıllık yağışın sırasıyla %15,93, %4,44, %0,32 ve %0,10'si beslenme olarak hesaplanmıştır. Bu oranlara göre A, B, C ve D hidrolojik toprak gruplarında Ekim ayının aylık akifere net beslenmesi sırasıyla 6,98 mm, 1,94 mm, 0,14 mm ve 0,04 mm olarak hesaplanmıştır (EK 7).

Kuyu loglarının yüzeyinde (üst zonunda) olan toprak tipine göre hidrolojik toprak grupları belirtilerek noktasal olarak net beslenme miktarı hesaplanıp alansal beslenme dağılım haritasının oluşturulmasında ise ArcGIS 10.2.2 coğrafi veri tabanı yazılımı içinde bulunan Ağırlıklandırılmış Uzaklığın Tersisi (IDW) yöntemi kullanılmıştır (Şekil 11.10). Elde edilen alansal beslenme verilerinin ortalamaları alınarak modelleme alanına ait beslenme zonlanma haritası elde edilmiştir (Şekil 11.11).



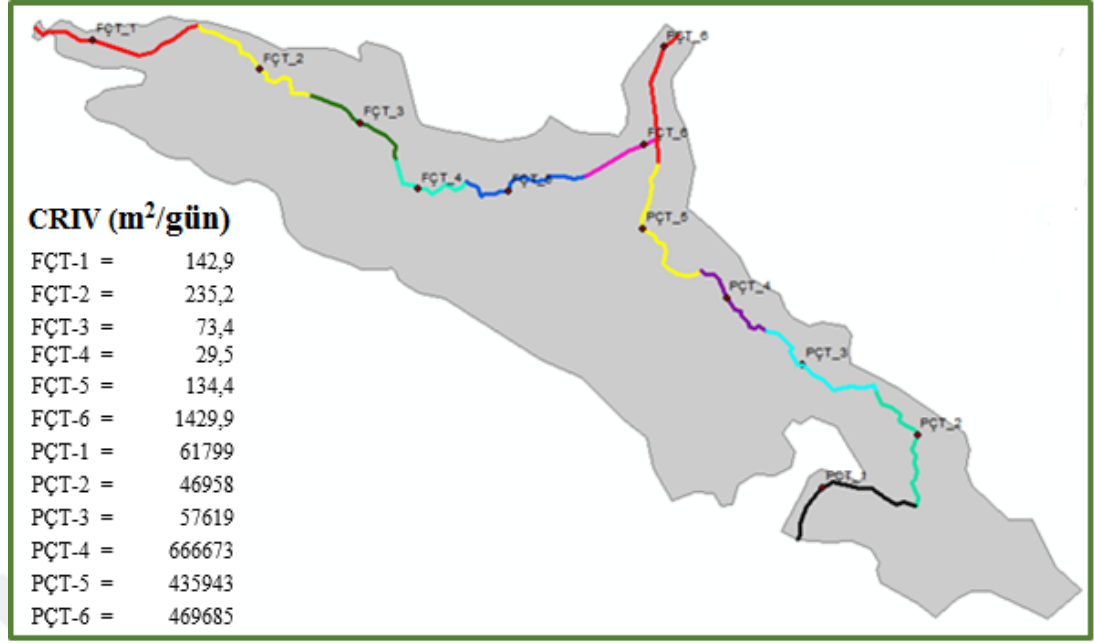
Şekil 11.10 Ekim ayındaki alansal beslenme miktarı haritası (mm/ay)



Şekil 11.11 Model alanının beslenme zonlanma haritası

11.8 Nehir Paketi

MODFLOW'un akarsu paketi Porsuk ve Felent Çayları'nı modellemek amacıyla kullanılmıştır. Porsuk ve Felent Çayları için taban yükselteleri sayısal yükselti modelinden elde edilmiştir. Dere taban malzemesinin hidrolik iletkenlik (K) değerleri ise ıslak elek analizi yöntemi kullanılarak laboratuvarında belirlenmiştir. Porsuk ve Felent Çaylarının taban birimlerinin hidrolik iletkenlik (K) değerleri sırasıyla $3,8 \times 10^{-4}$ ile $3,45 \times 10^{-3}$ m/s ve $1,85 \times 10^{-7}$ ile $2,05 \times 10^{-5}$ m/s arasında değişmektedir. Felent ve Porsuk Çaylarının modelleme sırasında akarsu taban iletkenlik değerlerinin değişimleri şekil 11.12'de görülmektedir. Devlet Su İşleri'nden alınmış olan Felent ve Porsuk Çaylarına ait nehir su seviyeleri 1976 yılı Ekim ayı ortalamaları sırasıyla 10 cm ve 19,45 cm olarak belirlenmiş ve modelde girdi olarak kullanılmıştır.



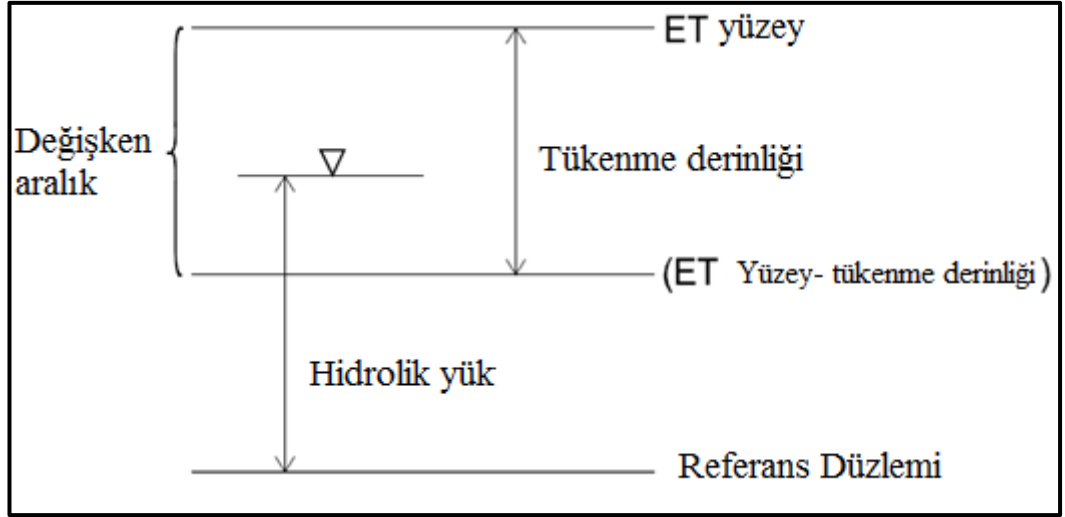
Şekil 11.12 Felent ve Porsuk çaylarının akarsu tabanı iletimlilik değerlerinin segmentlere göre değişimleri

11.9 Buharlaşma-Terleme Paketi (EVT Paketi)

Tipik olarak, sulama suyu alımının simülasyonu için sulamada kullanılmaktadır. Buharlaşma-terleme de yeraltı suyu akım modelleme çalışmalarında önemli bir rol oynamaktadır.

MODFLOW içinde bulunan EVT Paketi belli bir hücre için buharlaşma-terleme oranı her bir hücre için simüle edilen hidrolik yükü, yüzey buharlaşma-terleme (ET yüzey), tükenme derinliği ve maksimum buharlaşma-terleme akış hızı ile belirlenmektedir (Şekil 11.13) (Edward 2000).

Penman yöntemine göre hesaplanan yıllık toplam buharlaşma-terleme 452,7 mm, modelleme sırasında kullanılan Ekim ayına ait aylık buharlaşma-terleme ise 41,1 mm'dir.



Şekil 11.13 Buharlaşıma-terleme benzeştirilmesinde kullanılan kavramsal yüzeyler (Edward 2000)

12. MODELİN ÇALIŞTIRILMASI, KALİBRASYON ve HASSASİYET ANALİZ ÇALIŞMALARI

12.1 Modelin Çalıştırılması ve Kalibrasyonu

Model kalibrasyonu, model simülasyonu ile yeraltı suyu akım sistemi gözlemleri arasında arzu edilen derecede bir uyum yakalamak amacıyla hidrojeolojik iskeleti, hidrolik özellikleri ve sınır koşullarını temsil eden modelin geliştirilmesidir (Anonymous 2008).

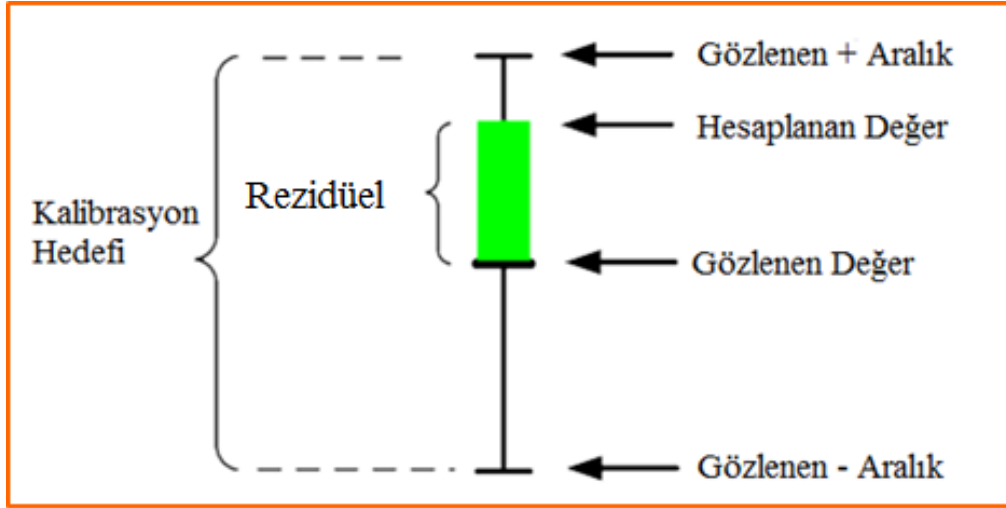
Kalibrasyona ihtiyacı olan modeller için kalibrasyonun yeterli olup olmadığının değerlendirilmesi kolay bir iş değildir. Araştırmacılar bir yeraltı suyu akım modelinin kalibrasyonunun hassasiyetini belirtmek üzere farklı nicel ölçümler kullanmaktadır (Anderson ve Woessner 1992).

Kalibrasyon, bir dizi parametre ve koşullar kullanılarak, arazide ölçülen değerlere benzer şekilde veri üretmekte kullanılmaktadır. Üretilen modeli kalibre etmek için kalibrasyon hedefi ve ölçülen değerler tanıtılmalıdır. Burada yeraltı suyu akım modelinde kullanılan kalibrasyon hedefinin en önemli ve birincil tipi, ovada bulunan sığ kuyuların hidrolik yükleridir.

Gözlenen değer bir nesneye atanmışsa, her nesnenin kalibrasyon hatası "kalibrasyon hedefi" seçeneğini kullanarak çizilebilmektedir. Kalibrasyon hedefleri, kalibrasyon hatasının büyüklüğü, yönü (düşük, yüksek) ve alansal dağılımı hakkında faydalı geri dönüşler sağlar. Bir kalibrasyon hedefinin bileşenleri şekil 12.1'de görülmektedir. Hedefin merkezi gözlenen değerle ilişkilendirilmektedir. Hedefin üstü gözlenen değer artı aralığına, altı ise gözlenen değer eksi aralığına karşılık gelmektedir.

Model içerisinde kullanılmadan kalibrasyon çalışmalarında modelin tutarlılığını kontrol eden tek parametre arazide ölçülmüş yeraltı suyu statik seviyeleri olup, alüvyon akiferde Ekim 1976 yılında arazide ölçülen yeraltı suyu statik seviyelerinden yararlanılmıştır. Bunun için de modelin kalibrasyonunda kullanılan kuyuların Kütahya Ovası'nda

alüvyon akiferdeki yeraltı suyu seviyelerini yansıtması, kalibrasyon ve modelin başarısında çok önemli bir rol oynamaktadır. Kütahya ve Köprüören ovaları (1981) hidrojeoloji etüt raporunda Ekim 1976 döneminde ölçülen toplam 26 sığ kuyuya ait veriler kararlı durum modelinin kalibrasyonu için seçilmiştir. Seçilen gözlem kuyularının lokasyonları şekil 12.2’de verilmiştir.

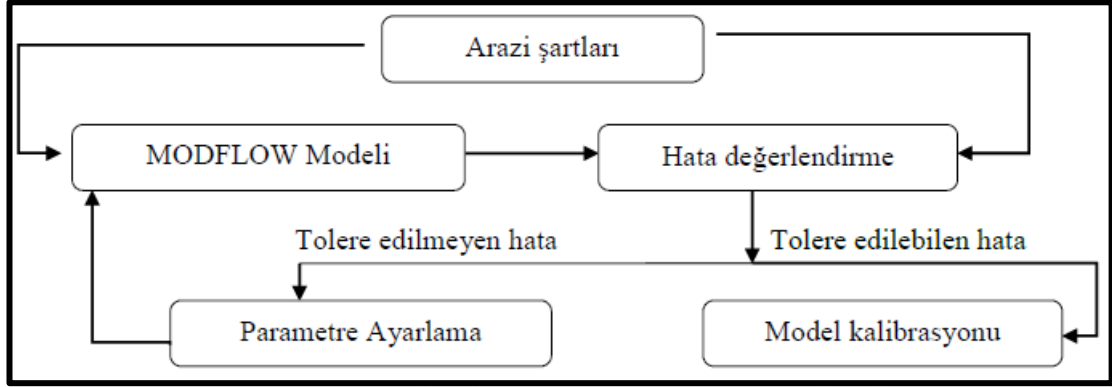


Şekil 12.1 Kalibrasyon hedefini gösteren şema

Kalibrasyon, deneme yanılma veya otomatik kalibrasyon yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu çalışmada kalibrasyon manuel olarak yapılmıştır ve model sonuçları Hataların Kareleri Toplamının Kare Kökü (RMSE), Mutlak Ortalama Hata (MAE) ve Ortalama Hata (ME) ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Manuel kalibrasyon deneme yanılma yöntemi uygulanarak modellenmenin hatasını belirli kriterlere göre en aza düşürmektedir.

Modeller deneme yanılma ya da modellenen ve gözlenen değerler arasındaki farkı en iyi şekilde minimize etmek üzere linear olmayan regresyon gibi otomatik tahmin teknikleri ile kalibre edilebilir. Kalibrasyon bölgelere göre hidrolik iletkenlik (HK), Akarsu taban çökellerinin geçirimsizliği (CRIV) ve bölgelere göre beslenme dağılımı değerleri değiştirerek (artırılarak ya da azaltılarak) deneme yanılma yöntemiyle yapılmıştır.

Deneme yanılma kalibrasyon yöntemi, girdi parametreleri, model sonuçları ölçülen değerlerle uyumlu olana kadar manuel olarak ayarlanmaktadır (Şekil 12.2).



Şekil 12.2 Deneme yanılma kalibrasyon yöntemi şematığı

Kalibrasyon süreçlerinde çıkan ortalama hata Mutlak Ortalama Hata (MAE), Ortalama Hata (ME) ve Hataların Kareleri Toplamının Kare Kökü (RMSE) ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir.

Ortalama Hata (ME), gözlenen yükler (O_h) ile hesaplanan yükler (C_h) arasındaki farkların toplamının ortalama değeridir;

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_h - C_h)_i \quad (12.1)$$

Mutlak Ortalama Hata (MAE), gözlenen yükler (O_h) ile hesaplanan yükler (C_h) arasındaki ortalama mutlak farkın elde edilen değerlerdir;

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(O_h - C_h)_i| \quad (12.2)$$

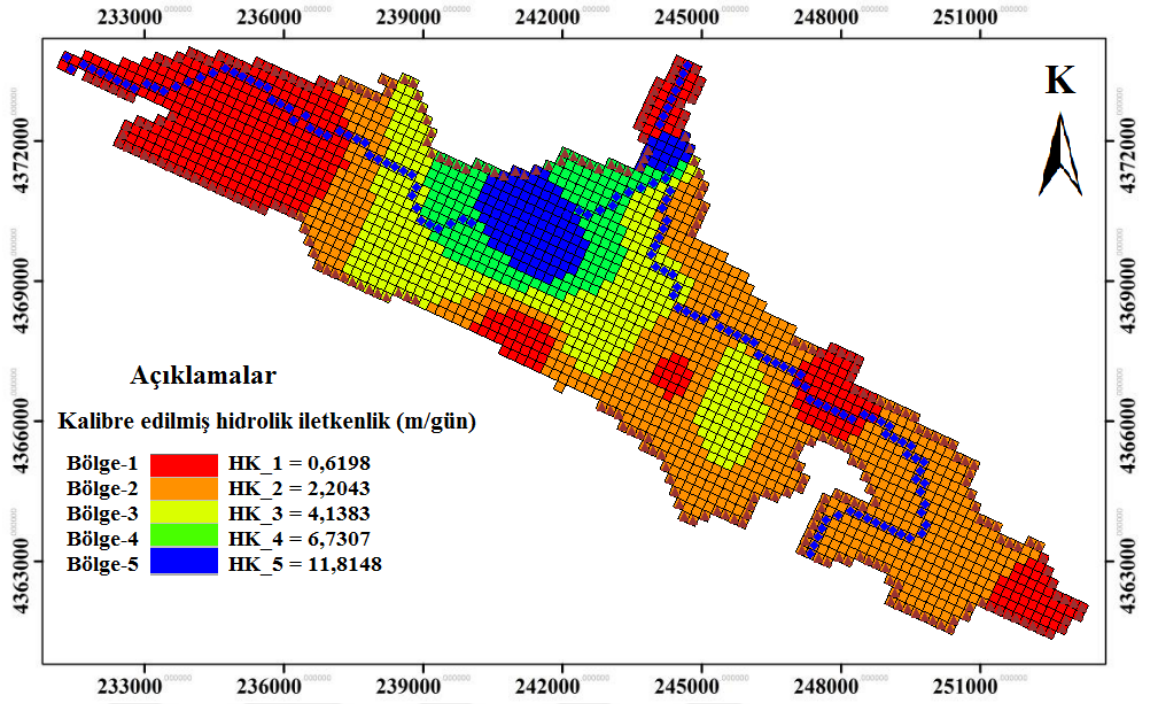
Hataların Kareleri Toplamının Kare Kökü (RMSE), gözlenen yükler (O_h) ile hesaplanan yükler (C_h) arasındaki farkın kareleri toplamının gözlem veri sayısına bölümünün karekökü ile elde edilen değerdir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_h - C_h)_i^2} \quad (12.3)$$

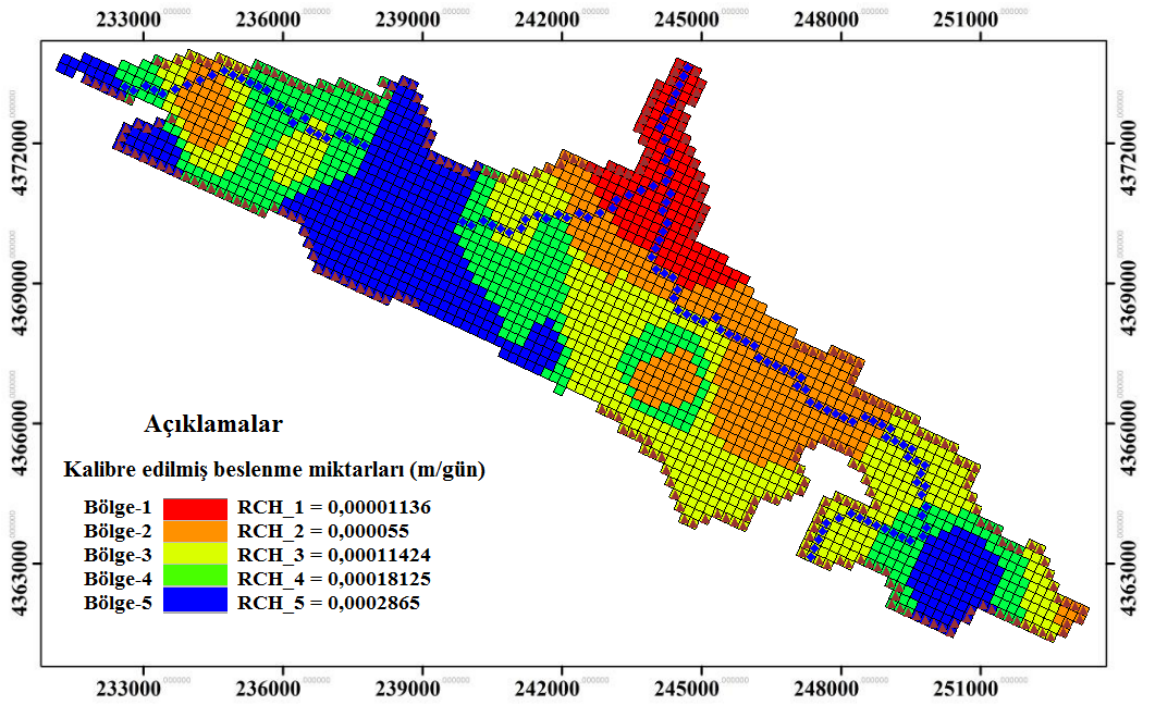
n = kalibrasyon ölçümlerinin veri sayısı

Akifer hidrolik iletkenliği, alansal beslenme miktarı ve Felent ve Porsuk çaylarının akarsu tabanı geçirimsizliği değerlerinde değişiklikler yapılmıştır. Model kalibrasyonu, 26 kuyuda ölçülen ve hesaplanan yeraltı su yükü arasındaki farkı minimize etmek için deneme yanılma kalibrasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 10. bölümde verilen bazı hidrolik parametreler ve beslenme değerleri kararlı akım modeli oluşturabilmek için birkaç kere değiştirilmiş ve her model çalıştırılması sonrasında RMSE, MAE ve ME hataları yukarıdaki eşitliğe dayanarak kontrol edilmiştir.

Kararlı akım modeli sonucunda elde edilen kalibrasyon değerleri başlangıç değerleri ile birlikte çizelge 12.1’de verilmiştir. Birinci ve ikinci bölgedeki başlangıç hidrolik iletkenlik ve beslenme değerleri azalırken 3, 4 ve 5. Bölgelerdeki başlangıç hidrolik iletkenlik ve beslenme değerleri artış göstermiştir (Çizelge 12.1, Şekil 12.3-12.4). Kalibrasyon esnasında akarsu yatağı iletimsizlik değerleri Felent çayında artarken Porsuk çayında azalmaktadır (Çizelge 12.1). Aksi takdirde kalibre edilmiş yeraltı suyu yük değerleri ölçülen verilerden ya daha az ya da daha yüksek olacaktır.



Şekil 12.3 Modelleme alanı için kalibre edilmiş hidrolik iletkenlik haritası



Şekil 12.4 Modelleme alanı için kalibre edilmiş beslenme haritası

Çizelge 12.1 Başlangıç ve kalibre edilmiş parametre değerleri

Parametre	Başlangıç değeri	Kalibre değeri
Hidrolik iletkenlik Bölge-1 (m/gün)	0,7748	0,6198
Hidrolik iletkenlik Bölge-2 (m/gün)	2,2493	2,2043
Hidrolik iletkenlik Bölge-3 (m/gün)	3,4486	4,1383
Hidrolik iletkenlik Bölge-4 (m/gün)	5,3846	6,7307
Hidrolik iletkenlik Bölge-5 (m/gün)	7,8765	11,8148
Beslenme Bölge-1 (m/gün)	0,0000142	0,00001136
Beslenme Bölge-2 (m/gün)	0,000066	0,000055
Beslenme Bölge-3 (m/gün)	0,000102	0,00011424
Beslenme Bölge-4 (m/gün)	0,000145	0,00018125
Beslenme Bölge-5 (m/gün)	0,000191	0,0002865
FÇT-1 için CRIV değerleri	142,9	107,175
FÇT-2 için CRIV değerleri	235,2	294
FÇT-3 için CRIV değerleri	73,4	280
FÇT-4 için CRIV değerleri	29,5	250
FÇT-5 için CRIV değerleri	134,4	268,6
FÇT-6 için CRIV değerleri	1429,9	1215,415
PÇT-1 için CRIV değerleri	61799	46349,25
PÇT-2 için CRIV değerleri	46958	37566,4
PÇT-3 için CRIV değerleri	57619	43214,25
PÇT-4 için CRIV değerleri	666673	500004,75
PÇT-5 için CRIV değerleri	435943	152580,05
PÇT-6 için CRIV değerleri	469685	234842,5

İnceleme alanının Ekim 1976 yılındaki kararlı durum modelinin kalibrasyon istatistikleri Çizelge 12.2’de verilmiştir. Sonuçlara göre, Kütahya Ovasında alüvyal akiferin hesaplanan ve gözlenen yeraltı suyu seviye değerleri arasındaki rezidüel değerleri - 1,638 ile 1,719 arasında değişmektedir (Çizelge 12.2). Kalibrasyon sonucu rasat kuyularına ait gözlenen ve model tarafından hesaplanan yeraltı suyu seviyelerinin karşılaştırılmış halini Şekil 12.5’te görebilmekteyiz. GMS programı gözlem kuyularına ait gözlenen ve model tarafından hesaplanan yeraltı suyu yüklerini karşılaştırarak grafiksel olarak aralarındaki istatistiksel ilişkiyi göstermektedir. Kalibrasyonun sonucunda hesaplanan ve gözlenen yeraltı suyu yükleri arasındaki ilişkiyi temsil eden grafik üzerindeki noktaların konumlarının, gözlenen ve hesaplanan değerlerin eşit olduğu doğruya yakın olduğu görülmektedir.

Model kalibrasyonu sonucu elde edilen Kararlı Akım koşullarına ait (Ekim 1976) kalibrasyon sonuçlarının model üzerindeki dağılımı şekil 12.6'da verilmiştir.

Model kalibrasyon sonuçlarının model üzerindeki dağılımı ve kalibrasyonu sonucu elde edilen Kararlı Akım koşullarına ait (Ekim 1976) seviye dağılım haritası sırasıyla şekil 12.6'da ve şekil 12.7'de verilmiştir. Hesaplanan yeraltı suyu seviyelerinin yükü 909,8 m ile 995,6 m arasında değişmektedir (Şekil 12.7). Model kalibrasyon sonuçlarında RMSE (0,94), MAE (0,84) ve ME hata değerleri sırasıyla 0,94, 0,84 ve -0,11'dir (Çizelge 12.2).

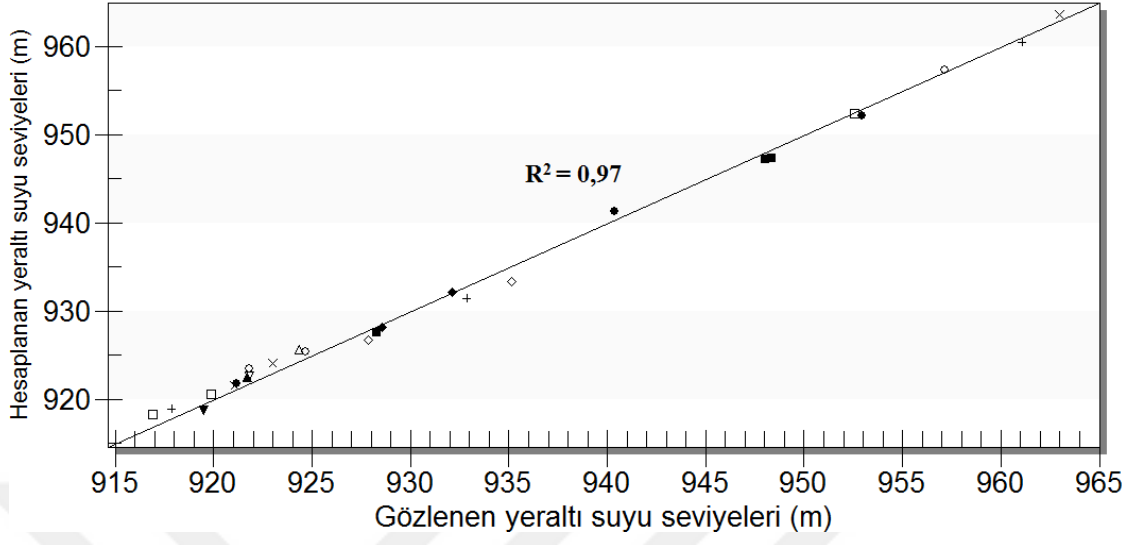
Yeraltı suyu - yüzey suyu etkileşimi üç temel şekilde oluşturulmaktadır. Akarsular, yatağı boyunca yeraltı suyundan su alır (Alıcı nehir) veya nehir yatağı boyunca yeraltı suyuna su çıkışıyla su verir (Verici nehir). Su tablası seviye konturları alıcı nehirleri yukarı akış yönünde gösterirken verici nehirleri nehrin hemen civarındaki aşağı akış yönünde gösterirler veya ikisini de bazı kollarda su alarak bazılarında su vererek gerçekleştirmektedir. Model sonuçlarına göre akarsular bazı yerlerde akifere su verilken bazı yerler de ise akiferden su almaktadır. Buna ek olarak nehir boyunca akış, suyun bir taraftan girdiği ve öbür taraftan çıktığı yerlerde bulunmaktadır (Şekil 12.7).

Çizelge 12.2 Ekim 1976 yılındaki kararlı durum modeli kalibrasyon istatistikleri

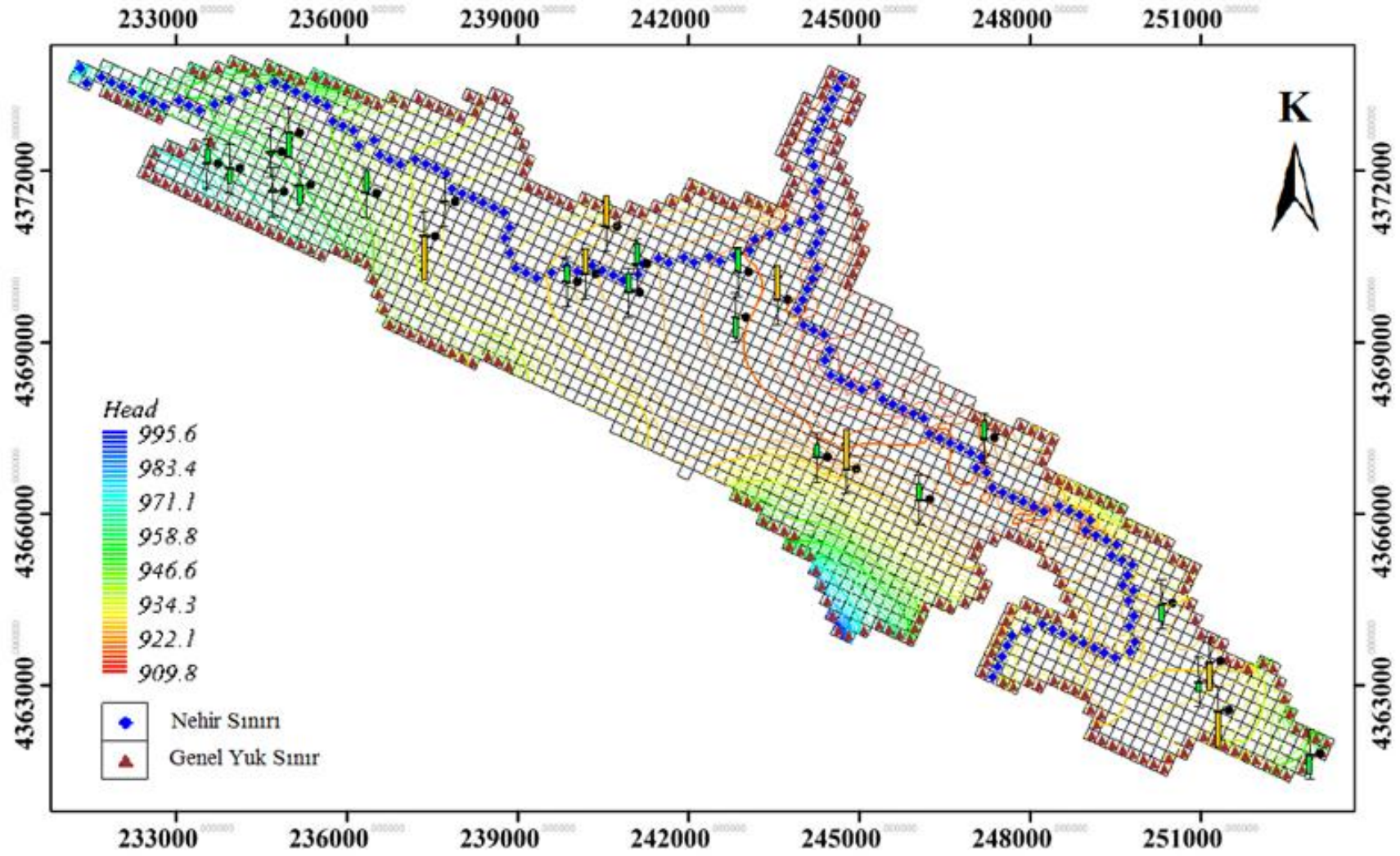
Kuyu No.	Gözlem kuyuların lokasyonu		Gözlenen Değer	Hesaplanan Değer	Rezidüel Değer
	X	Y			
6	246240,8	4366237	921,18	921,83	-0,651
8	244952,0	4366774	921,83	923,47	-1,638
10	244447,1	4366981	921,05	921,58	-0,531
12	247373,8	4367319	919,85	920,57	-0,723
15	243059,8	4370230	917,88	918,87	-0,988
16	240750,7	4371028	924,34	925,57	-1,257
19	243747,7	4369743	916,91	918,31	-1,397
20	241280,9	4370376	921,68	922,53	-0,849
21	243013,2	4369433	919,49	918,72	0,774
22	240376,9	4370198	922,98	924,02	-1,040
29	236535,2	4371613	940,37	941,29	-0,918
30	241149,5	4369869	921,80	922,61	-0,812
32	240055,7	4370056	924,69	925,36	-0,671
33	237561,2	4370857	935,12	933,40	1,719
35	234909,0	4371642	957,17	957,32	-0,147
39	235370,6	4371757	952,94	952,16	0,785
41	234865,5	4372338	952,54	952,44	0,095
44	237911,5	4371462	932,14	932,17	-0,034
46	235179,9	4372675	948,33	947,39	0,937
47	233748,0	4372133	962,95	963,58	-0,634
49	234135,5	4372051	961,09	960,47	0,621
53	251148,6	4363040	928,55	928,15	0,405
56	251341,9	4363398	927,85	926,68	1,171
57	251486,9	4362538	932,88	931,42	1,464
68	253091,4	4361773	948,04	947,25	0,794
72	250498,8	4364415	928,30	927,56	0,7401
Hata			Ortalama hata (ME) = -0,11		
			Mutlak Ortalama Hata (MAE) = 0,84		
			Hataların Kareleri Toplamının Kare Kökü (RMSE) = 0,94		

Hesaplanan - Gözlenen Değer

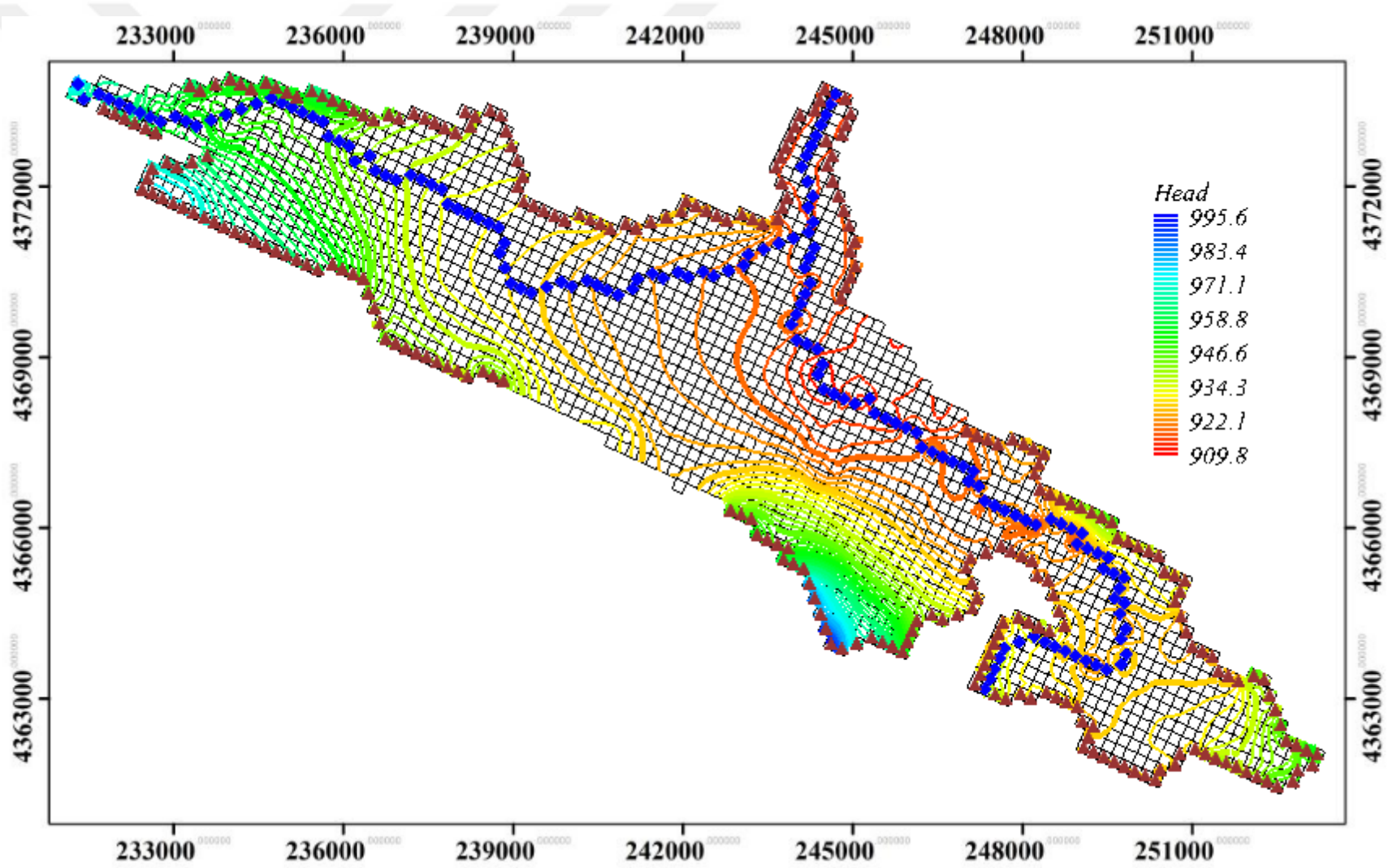
Seviye (m)



Şekil 12.5 Model tarafından hesaplanan yeraltı suyu seviyeleri ile gözlenen yeraltı suyu seviyeleri karşılaştırması



Şekil 12.6 Kalibrasyon sonuçlarının model üzerindeki dağılımı



Şekil 12.7 Model kalibrasyonu sonucu elde edilen kararlı akım koşullarına ait (Ekim 1976) seviye dağılım haritası

12.2 Yeraltı Suyu Akım Modellemesiyle Hazırlanan Su Bütçesi

Ekim 1976 yılına ait su bütçesi Kütahya Ovası'ndaki sığ akifer sistemin yeraltı suyu akım modellemesinden yararlanılarak hazırlanmıştır.

Alüvyal akiferin Ekim 1976 yılı için kararlı akım koşullarında gerçekleştirilen modelleme çalışması sonucunda elde edilen yeraltı suyu akım bütçesi çizelge 11.2'de verilmiştir. Sonuçlara göre, Ekim 1976 için Kütahya Ovası'nın akifer sistemi yağıştan, Parmakören Formasyonu çakıltaşları ve kumtaşları ve Emet Formasyonu kireçtaşlarını temsil eden genel seviye sınırından (GHB), kısmen de Felent ve Porsuk çaylarından beslenmektedir. Ancak Kütahya Ovası'nda yeraltı suyunun temel beslenim kaynağı yanal akiferlerdir.

Yapılan yeraltı suyu akım modellemesine göre 83 km² olan model alanından GHB olarak modellenen Parmakören ve Emet Formasyonu sınırlarından model alanına giren 44,89 x 10³ m³/gün iken, model alanından çıkan ise 14,98 x 10³ m³/gün olarak tespit edilmiştir (Çizelge 12.3). Bölgede yeraltı suyu boşalımı ise akarsulara doğru gerçekleşmektedir. Kütahya Ovası'nda alüvyon akiferi için yapılan su bütçesi hesaplarına göre beslenme ve boşalım elemanları arasındaki fark 810 m³/gün olarak belirlenmiştir (Çizelge 12.3). Bu beslenme ve boşalım değerleri arasındaki farkın vatandaşların kişisel kuyularından yeraltı suyu çekimi yapmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 12.3 Kütahya Ovası sığ akifer sistemine ait kararlı durum (Ekim 1976) su bütçesi

	Beslenme 10 ³ (m ³ /gün)	Boşalım 10 ³ (m ³ /gün)
Genel Seviye Sınırı	44,89	14,98
Akarsu	12,24	27,58
Yağıştan beslenme	12,27	0
Buharlaşma-terleme	0	26,03
Toplam	69,40	68,59

Uyumsuzluk yüzdesi % 1,18

12.3 Model Kalibrasyonu Performans Ölçümleri

Performans göstergesi, model kalibrasyonlarının kantitatif değerlendirilmesinde kullanılmak için önerilir. Performans ölçümü rezidüel hatalar (RMSE, MAE and ME), korelasyon katsayısı ve uyumsuzluğun yüzdesi olarak değerlendirilebilir.

Hesaplanmış hata terimi, modellerin başarılı tekrarları arasındaki yüklerdeki maksimum değişimler olup, hatalar çok düşük olmalıdır (Çizelge 12.2).

Model performansını belirlemek için kullanılan ikinci yöntem, Amerikan Test ve Malzeme Birliği (2008) tarafından yayımlanmış ilkelere dayanan korelasyon katsayısı yöntemidir. Bu yöntem modellenmiş ve ölçülmüş akifer seviyelerinin matematiksel ve grafiksel olarak karşılaştırılmasıdır. Şekil 12.5 model sonuçlarının çoğu ölçüm noktasında su tablası kotuyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Doğrusal korelasyon katsayısı 0,97'dir ve ölçülen ile modellenen seviye değerleri arasında pozitif korelasyon olduğunu göstermektedir. Elbette ki daha iyi kalibre edilmiş modeller 1'e daha yakın doğrusal regresyon katsayısına sahip olmalıdır.

Model performanslarının kontrolünde kullanılan üçüncü metod, uyumsuzluğun yüzde su bütçesidir. Uyumsuzluk yüzdesi, su bütçesi toplam giren su ve toplam çıkan su farkının toplam giren suya ya da toplam çıkan suya bölünmesi ile hesaplanmakta olup, yüzde olarak ifade edilir. Bu model sonuçlarında uyumsuzluk yüzdesi % 1,18 elde edilmiştir (Çizelge 12.3).

12.4 Hassasiyet Analizleri

Hassasiyet analizleri kalibre edilmiş modelde akifer parametreleri, etkiler ve sınır koşulları tahmininden kaynaklanan belirsizlikleri hesaplamaktadır. Analizler sırasında akifer parametreleri ve sınır koşulları için kalibre edilmiş değerler kabul edilebilir bir aralıkta sistematik olarak değiştirilir (Anderson ve Woessner 1992). Hassasiyet

analizleri model girdilerindeki belirsizliklerin model kalibrasyonunda ve sonuçtaki etki derecesinin hesaplanması olarak tanımlanır (Anonymous 1994).

Hassasiyet analizleri mevcut gözlemlere nazaran hangi parametrelerin hassas olduğunu ve hangilerinin hassas olmadığını araştırmak üzere başlangıç model parametre tayininde de kullanılabilir ve buna göre değerler düzeltilebilir. Deneme yanılma ile model girdilerini ayarlayarak, modeli çalıştırarak, ilgili çıktıları okuyarak, bu değerleri kaydederek ve hesaplama döngüsü önererek kritik bir hassasiyet analiz modülü sağlanmaktadır. Arazide ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki ağırlıklandırılmış en düşük kareler bakımından en az seviyeye indirilene kadar değerler belirlenerek, makul aralıklarda en uygun veri seti seçilir.

Hidrolik iletkenlik, beslenme değerleri ve Felent ve Porsuk çaylarının akarsu taban çökellerinin geçirimsizliği, ovada hidrolik seviye değerlerinin kalibrasyonu amacıyla kullanılmıştır. Modelin hassasiyeti her bir parametrenin % ± 20 , % ± 40 ve ± 60 başlangıç değerlerini değiştirerek RMSE, MAE ve ME modelin çalıştırılması ile değerlendirilmiştir. Bu parametrelerin arttırılması/azaltılmasının model üzerindeki etkileri sayısal olarak ve grafiksel olarak görülmektedir (Çizelge 12.4-12.8 ve Şekil 12.8-12.16). Bu analizde bir parametre değiştirilirken diğer parametrelerin aynı kalması esastır.

Alüviyal akifer model alanında hidrolik iletkenlik, beslenme değerleri ve akarsu taban çökellerinin geçirimsizliği değerlerinin değişiminin sonucu olarak, hesaplanan ve ölçülen yeraltı suyu yük değerleri arasındaki farkların RMSE, MAE ve ME hataları çizelge 12.4-12.8’de verilmiştir.

Her bir beslenme zonunun etkisi birbirinden bağımsız olarak incelenmiş (Çizelge 12.4) ve daha sonra beslenmenin toplam etkisi de (Çizelge 12.5) analiz edilmiştir.

Çizelge 12.4’te ve şekil 12.8’de verilen beş bölge için ayrı ayrı beslenme hassasiyeti test edilmiştir. Her bir bölgedeki beslenme miktarı ayrı ayrı $\pm 20\%$, $\pm 40\%$ ve $\pm 60\%$ oranında

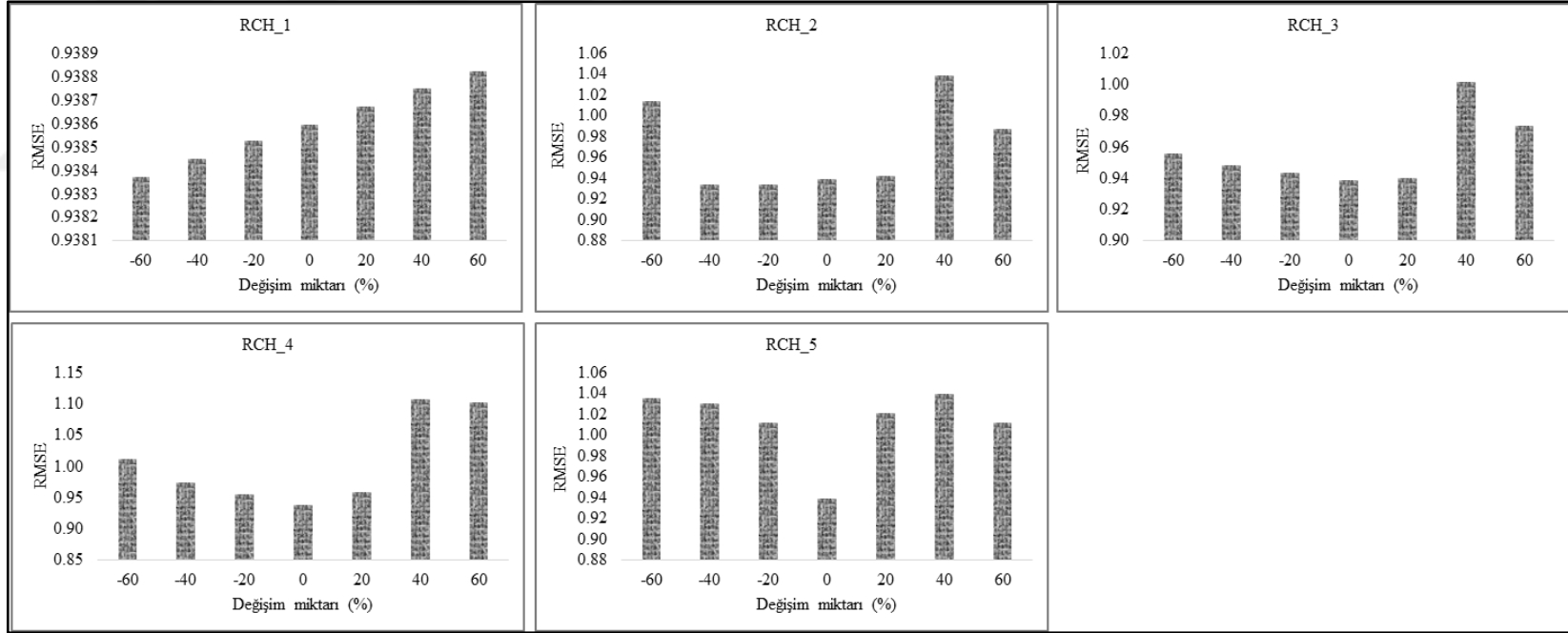
değiştirilmiştir. Bahsedilen yüzde oran ile beslenme miktarında değişiklikler yapılarak model, toplam 30 defa çalıştırılmış ve bunların sonuçları RMSE, MAE ve ME değerleri çizelge 12.4'te sunulmuştur.

Hassasiyet analiz sonuçları çizelge 12.9'da ve şekil 12.8'de görüldüğü üzere, 1. Bölgedeki kalibre edilmiş yeraltı suyu yükü artmaya ve azalmaya hassasiyet göstermektedir. 2. Bölge -%40 ve %20 arasındaki değişikliklere belirli bir tepki vermemektedir. Halbuki kalibre edilmiş yeraltı suyu yükü değerleri beslenmede gerçekleştirilen %40 artış ve %60 azalış değerlerine tepki vermektedir.

3. ve 4. Bölgelerdeki yeraltı suyu yük değerleri beslenmede yapılan değişikliklerden hem artışa hem de azalışa karşı hassas iken, azalıştan daha çok artışa hassasiyet göstermektedir. 5. Bölgedeki yeraltı suyu yükleri beslenmede yapılan artış ve azalışlara eşit hassasiyet göstermektedir. Genel olarak, bu çalışmada oluşturulan Kütahya Ovası yeraltı suyu sayısal akım modeli en çok beslenmede yapılan değişikliklere hassasiyet göstermektedir.

Çizelge 12.4 Her bir beslenme zonunun etkisi birbirinden bağımsız olarak beslenmenin hassasiyet analiz sonuçları

Bölge	Parametre	Değişim miktarı (%)	Değer	Hata		
				RMSE	MAE	ME
Bölge -1	RCH_1	-60	0,000004544	0,93837	0,83821	-0,10670
		-40	0,000006816	0,93845	0,83826	-0,10679
		-20	0,000009088	0,93852	0,83832	-0,10688
		0	0,00001136	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	0,000013632	0,93867	0,83843	-0,10707
		40	0,000015904	0,93875	0,83848	-0,10716
		60	0,000018176	0,93882	0,83853	-0,10726
Bölge -2	RCH_2	-60	0,000022	1,01345	0,90333	0,05865
		-40	0,000033	0,93416	0,83462	-0,05386
		-20	0,000044	0,93355	0,83417	-0,08080
		0	0,000055	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	0,000066	0,94176	0,84105	-0,11695
		40	0,000077	1,03804	0,93489	0,01729
		60	0,000088	0,98768	0,89144	-0,12860
Bölge -3	RCH_3	-60	0,000045696	0,95580	0,86745	-0,00441
		-40	0,000068544	0,94817	0,85570	-0,03733
		-20	0,000091392	0,94336	0,84412	-0,06842
		0	0,00011424	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	0,000137088	0,94030	0,83895	-0,13117
		40	0,000159936	1,00124	0,90665	-0,12164
		60	0,000182784	0,97365	0,87330	-0,23340
Bölge -4	RCH_4	-60	0,0000725	1,01167	0,90149	0,10633
		-40	0,0001088	0,97412	0,87620	0,02905
		-20	0,0001450	0,95584	0,85538	-0,03618
		0	0,0001813	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	0,0002175	0,95835	0,86180	-0,17842
		40	0,0002538	1,10697	0,94203	-0,14774
		60	0,0002900	1,10181	0,94034	-0,22981
Bölge-5	RCH_5	-60	0,0001146	1,03570	0,90042	0,09541
		-40	0,0001719	1,03023	0,90259	-0,01242
		-20	0,0002292	1,01172	0,89542	-0,09453
		0	0,0002865	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	0,0003438	1,02079	0,90913	-0,21968
		40	0,0004011	1,03910	0,91740	-0,28451
		60	0,0004584	1,01181	0,90203	-0,31188



Şekil 12.8 Bölgelere göre beslenme hassasiyeti analizleri

Her bir bölgedeki beslenme miktarları eş zamanlı olarak belirtilen yüzde oranla değiştirilerek model çalıştırılmıştır. Burada model toplam 6 defa çalıştırılmış ve sonuçlar çizelge 12.5'te ve şekil 12.9'da verilmiştir. Sonuç olarak modelleme alanında yeraltı suyu yükleri hem artışa hem de azalışa karşı hassasiyet göstermektedir (Şekil 12.9).

Yeraltı suyu yükü dışında farklı parametreler için de hassasiyet analizleri test edilmiştir. Çizelge 12.5'te ve şekil 12.9'da beslenmenin akarsudaki süzülme miktarına etkisi ortaya konmuştur. Bu baz akımın beslenmedeki artış ve azalışa göre nasıl değiştiğini görebilmek açısından çok önemlidir. Model alınındaki beslenme miktarını değiştirmek akiferdeki yeraltı suyu yük miktarını artırıp azaltacağından, yüzey suyu - yeraltı suyu ilişkisine de etki edecektir.

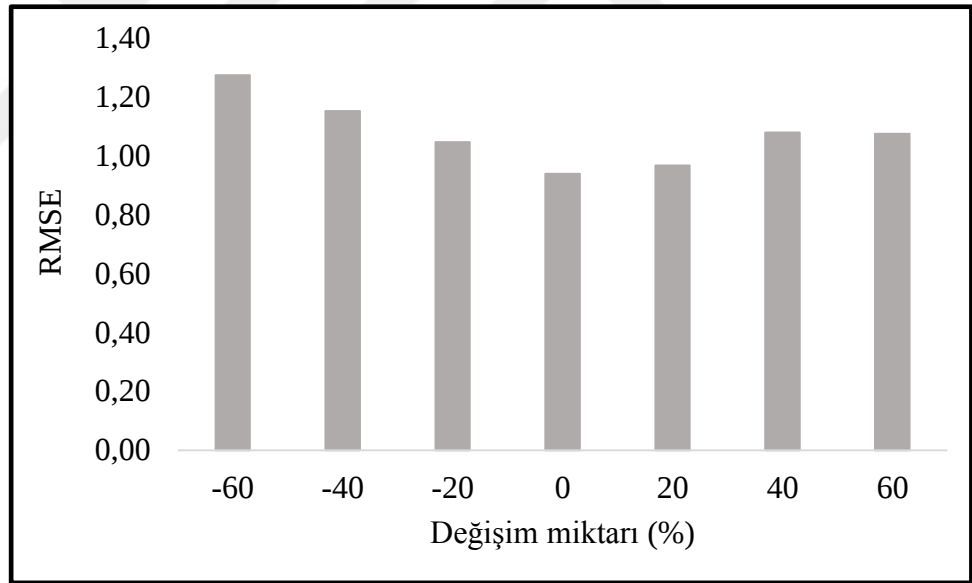
Genel simülasyon sonuçlarına göre; beslenmenin artışı akarsu baz akımını yükseltmekte ve RMSE hatasını artırmakta, beslenmenin azalışı da akarsu baz akımını azaltarak RMSE hatasını azaltmaktadır (Çizelge 12.5 ve Şekil 12.9).

Tüm bölgeler için kalibre edilmiş beslenme değerlerindeki %20, %40 ve %60 azalma aynı zamanda akarsu baz akımında da sırasıyla %2,22, %3,87 ve %6,19 azalmaya neden olmaktadır. Halbuki, akarsudan akifere süzülen su miktarı sırasıyla %1,8, %2,3 ve %3,6 artmıştır (Çizelge 12.5).

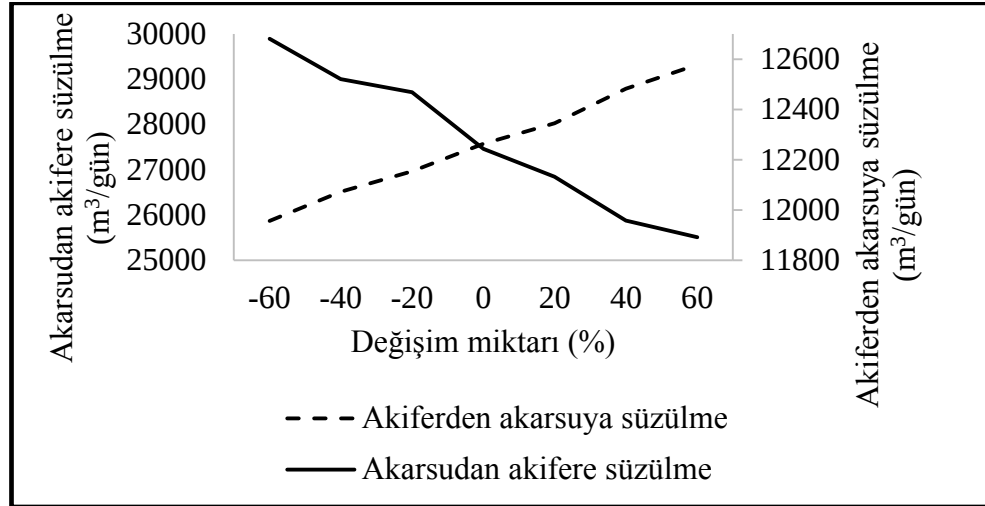
Benzer olarak, model beslenme değerlerinde artış yapılarak da test edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Çizelge 12.5'te ve şekil 12.9'da verilen sonuçlara göre, kalibre edilmiş beslenme değerlerinde %20, %40 ve %60 artış yapıldığında, akarsudaki baz akımda sırasıyla %1,62, %4,40 ve %6,32 artış gözlenirken, akarsudan akifere süzülme miktarlarında sırasıyla %0,9, %2,3 ve %2,9 azalma görülmüştür (Çizelge 12.5). Genel olarak baz akımı beslenme miktarı ile doğru orantılı, akarsudan akifere süzülme miktarı ile ters orantılıdır (Şekil 12.10).

Çizelge 12.5 Beslenme için tüm zonlarda aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri ve akarsudaki süzülme etkisi ve akarsuyun baz akımına etkisi

Bölge	Parametre	Değişim miktarı (%)	Hata			Akarsudan akifere süzülme		Akiferden akarsuya süzülme	
			RMSE	MAE	ME	Değer (m ³ /gün)	Değişim miktar (%)	Değer (m ³ /gün)	Değişim miktar (%)
1,2,3,4,5	RCH	-60	1,27	1,10	0,47	12681,03	3,6	25869,92	-6,19
		-40	1,15	1,04	0,25	12520,71	2,3	26509,60	-3,87
		-20	1,05	0,95	0,08	12468,67	1,8	26965,82	-2,22
		0	0,94	0,84	-0,11	12242,34	0	27577,53	0
		20	0,97	0,87	-0,28	12132,46	-0,9	28024,93	1,62
		40	1,08	0,97	-0,43	11957,29	-2,3	28789,87	4,40
		60	1,07	0,99	-0,56	11891,20	-2,9	29321,10	6,32



Şekil 12.9 Beslenme için tüm zonlarda aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet



Şekil 12.10 Beslenme değişiminin süzölmeye etkisi

Akiferin tüm bölgelerinde test edilen ikinci parametre hidrolik iletkenliktir. Çizelge 12.6’da ve şekil 12.11’de verilen beş bölge için hidrolik iletkenlik hassasiyeti test edilmiştir. Her bir bölgedeki hidrolik iletkenlik değerleri ayrı ayrı $\pm 20\%$, $\pm 40\%$ ve $\pm 60\%$ oranında değiştirilmiştir.

Her bir hidrolik iletkenlik zonunun etkisi birbirinden bağımsız olarak incelenmiş (Çizelge 12.6 ve Şekil 12.11) ve daha sonra hidrolik iletkenliğin toplam etkisi de analiz edilmiştir (Çizelge 12.7 ve Şekil 12.12). Sonuçlar beslenmedekine benzer şekilde analiz edilmiştir.

Bahsedilen yüzde oran ile hidrolik iletkenlik değerlerinde değişiklikler yapılarak model toplam 30 defa çalıştırılmış ve bunların sonuçları RMSE, MAE ve ME değerleri çizelge 12.6’da ve şekil 12.11’de sunulmuştur.

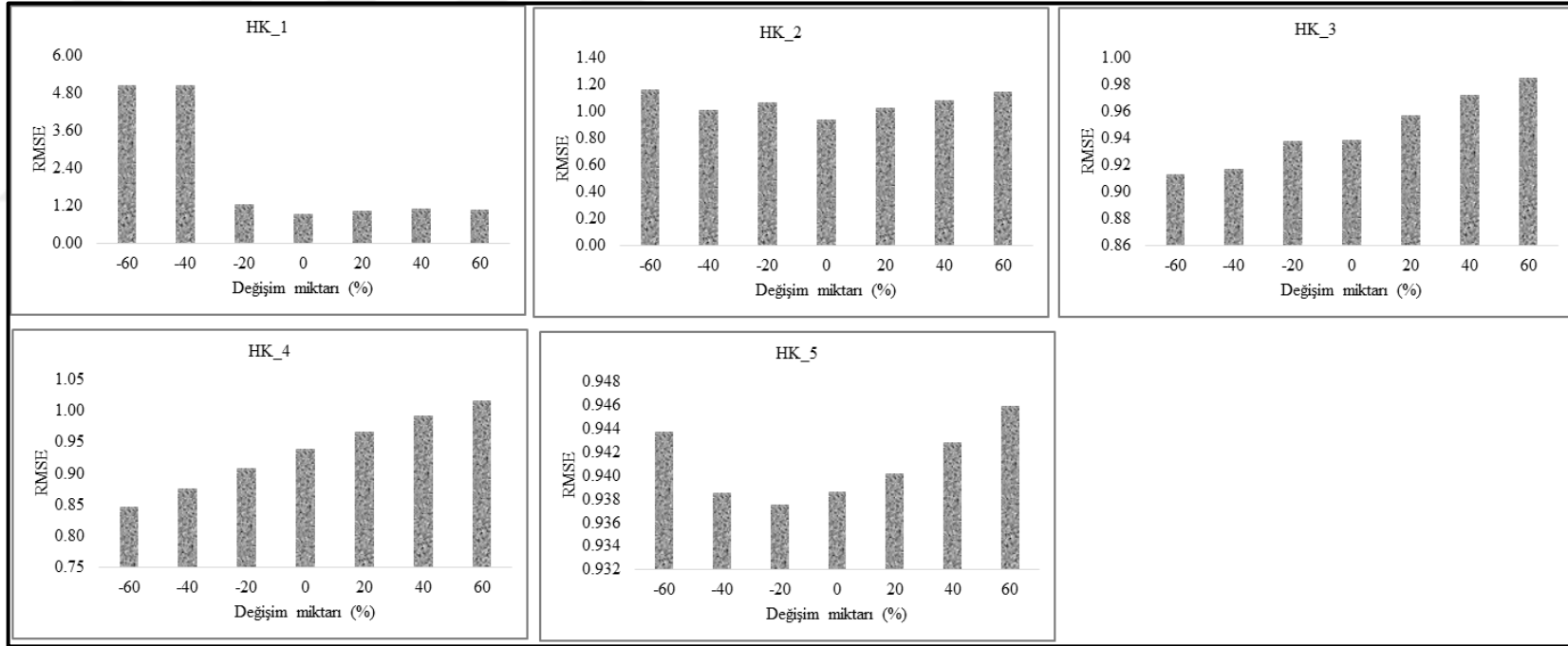
Hidrolik iletkenlik değerleri hangi bölgenin sonuçlarının daha fazla etkileneceğini görmek için değiştirilmiştir. Deneyde 1. Bölgedeki hidrolik iletkenliğin tekil etkisi modelin kalibre edilmiş hidrolik iletkenlik değerlerinin azalmasına daha az hassas artmasına ise daha hassas olduğunu ortaya koymuştur. İkinci Bölgede model yeraltı suyu yük değerleri hidrolik iletkenlik değerlerine göre daha az hassas olduğu görülmüştür (Şekil 12.11).

İkinci ve dördüncü bölgelerdeki yeraltı suyu yük değerleri hidrolik iletkenlik değerlerinin artmasına daha hassas olduğunu göstermektedir. Son olarak 5. Bölgede yeraltı suyu yük değerleri hidrolik iletkenlik değerlerinin artmasına daha hassasken azalmasına ise daha az hassas olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 12.11).



Çizelge 12.6 Hidrolik iletkenliğin hassasiyet analiz sonuçları

Bölge	Parametre	Değişim miktarı (%)	Değer	Hata		
				RMSE	MAE	ME
Bölge -1	HK_1	-60	0,247935	5,03557	2,90839	2,04167
		-40	0,371902	5,03557	2,90839	2,04167
		-20	0,495869	1,25502	1,05032	0,11823
		0	0,619837	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	0,743804	1,03417	0,93059	-0,03113
		40	0,867772	1,12372	1,00688	0,02131
		60	0,991739	1,07011	0,98278	-0,01245
Bölge -2	HK_2	-60	0,881734	1,15984	1,00469	0,29316
		-40	1,322601	1,01034	0,82762	0,08653
		-20	1,763468	1,06733	0,88405	-0,00208
		0	2,204335	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	2,645201	1,02179	0,90600	-0,16251
		40	3,086068	1,08016	0,94289	-0,18836
		60	3,526935	1,14499	0,98261	-0,20209
Bölge -3	HK_3	-60	1,655324	0,91349	0,83229	-0,03691
		-40	2,482986	0,91690	0,82371	-0,07716
		-20	3,310647	0,93776	0,83511	-0,10882
		0	4,138309	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	4,965971	0,95682	0,85611	-0,12037
		40	5,793633	0,97242	0,87095	-0,13041
		60	6,621295	0,98514	0,88337	-0,12623
Bölge -4	HK_4	-60	2,692296	0,84733	0,72763	0,04039
		-40	4,038444	0,87538	0,77693	-0,02523
		-20	5,384592	0,90764	0,81156	-0,07121
		0	6,730741	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	8,076889	0,96671	0,85979	-0,13534
		40	9,423037	0,99196	0,87961	-0,15896
		60	10,76918	1,01495	0,89653	-0,17922
Bölge-5	HK_5	-60	4,725926	0,94371	0,83040	-0,07256
		-40	7,088888	0,93851	0,83476	-0,08646
		-20	9,451851	0,93752	0,83706	-0,09762
		0	11,81481	0,93860	0,83837	-0,10697
		20	14,17778	0,94015	0,83813	-0,11391
		40	16,54074	0,94282	0,83788	-0,12037
		60	18,90370	0,94592	0,83732	-0,12596



Şekil 12.11 Bölgelere göre hidrolik iletkenlik hassasiyet analizleri

Görüldüğü üzere hidrolik iletkenlik değerlerini değiştirmek akiferdeki yeraltı suyu yükü üzerinde değişikliğe sebep olmaktadır. Her bir bölgedeki hidrolik iletkenlik değeri eş zamanlı olarak belirtilen yüzde oranla değiştirilerek model çalıştırılmıştır. Burada model, toplam 6 defa çalıştırılmış ve sonuçlar çizelge 12.7’de ve şekil 12.12’de verilmiştir.

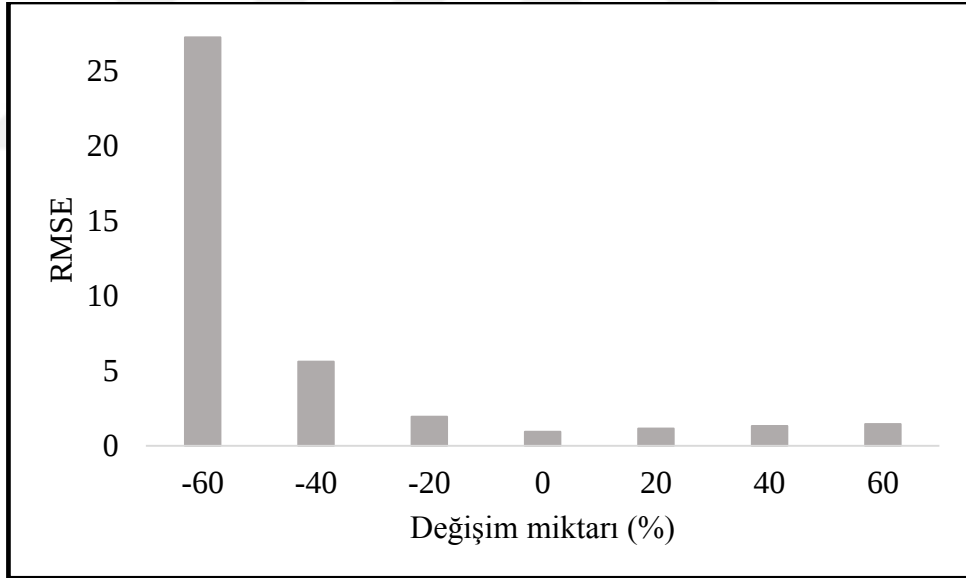
Yüzey ve yeraltı suyu ilişkileri çoğunlukla akifer özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Model sonuçları yüzey suyu - yeraltı suyu ilişkisinin beslenmeden daha çok hidrolik iletkenliğe karşı hassas olduğunu göstermektedir (Çizelge 17.7). RMSE hata grafiğinde hidrolik iletkenlik verilerinin azalmasına karşın daha hassas olduğunu göstermektedir (Şekil 12.12).

Hidrolik iletkenlik arttığında tahmin edildiği gibi akiferden nehre ve nehirden akifere akış artmaktadır. Ancak, akarsudan akifere süzülmedeki artış, baz akımdaki artıştan daha az olduğu görülmektedir (Şekil 12.13).

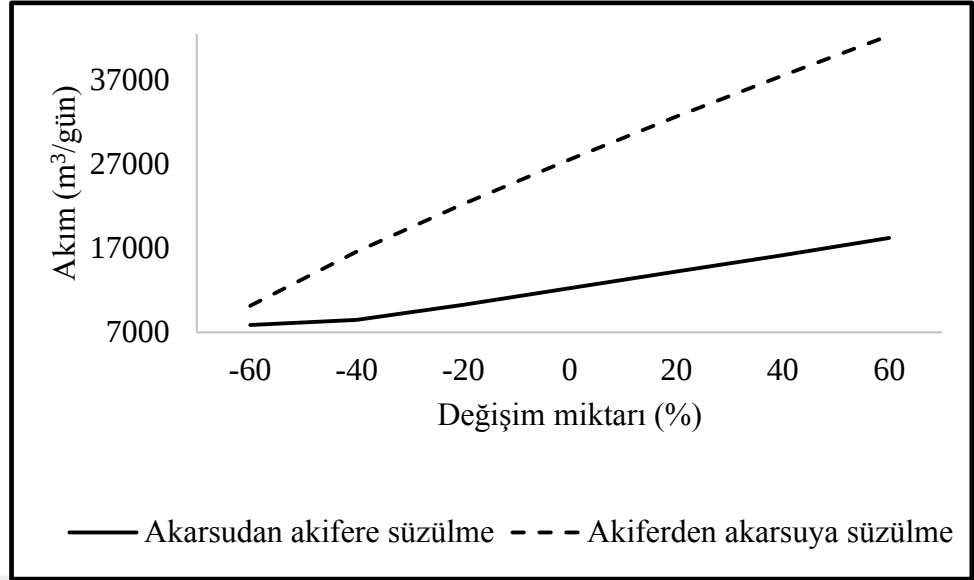
Bölgelerdeki hidrolik iletkenlikteki azalış RMSE, MAE ve ME değerlerinde artmaya neden olurken, baz akımın beklentilerin altında kalmasına neden olmaktadır. Aksine hidrolik iletkenlikteki artış RMSE, MAE ve ME değerlerinde azalmaya neden olurken, baz akımın beklentilerin üzerine çıkmasına neden olmaktadır (Çizelge 12.7 ve Şekil 12.13).

Çizelge 12.7 Hidrolik iletkenlik için tüm zonlarda aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri ve akarsudaki süzülme etkisi

Bölge	Değişim miktarı (%)	Hata			Akarsudan akifere süzülme		Akiferden akarsuya süzülme	
		RMSE	MAE	ME	Değer (m ³ /gün)	Değişim miktar (%)	Değer (m ³ /gün)	Değişim miktar (%)
1,2,3,4,5	-60	27,23	17,11	16,97	7870,10	-35,7	10145,08	-63,21
	-40	5,60	3,14	2,75	8464,63	-30,9	16611,52	-39,76
	-20	1,93	1,16	0,35	10267,29	-16,13	22284,38	-19,19
	0	0,94	0,84	-0,11	12242,34	0	27577,53	0
	20	1,14	1,02	-0,11	14228,23	16,22	32659,84	18,43
	40	1,31	1,14	-0,16	16192,62	32,3	37557,41	36,19
	60	1,44	1,24	-0,21	18215,37	48,8	42314,84	53,44



Şekil 12.12 Hidrolik iletkenlik için tüm zonlarda aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri



Şekil 12.13 Hidrolik iletkenlik değişiminin süzülme etkisi

Belirlenmesi zor bir parametre olan akarsu tabanı iletimliliği model parametrelerinden bir diğeridir. Bu parametre model tahminlerinde belirsizliklerin oluşmasına neden olmaktadır. Beslenme ve hidrolik iletkenlik parametrelerinde olduğu gibi, akarsu tabanı iletimliliği kalibrasyon değerleri %20, %40 ve %60 azaltılarak ve artırılarak hassasiyet analizi yapılmıştır (Çizelge 12.8).

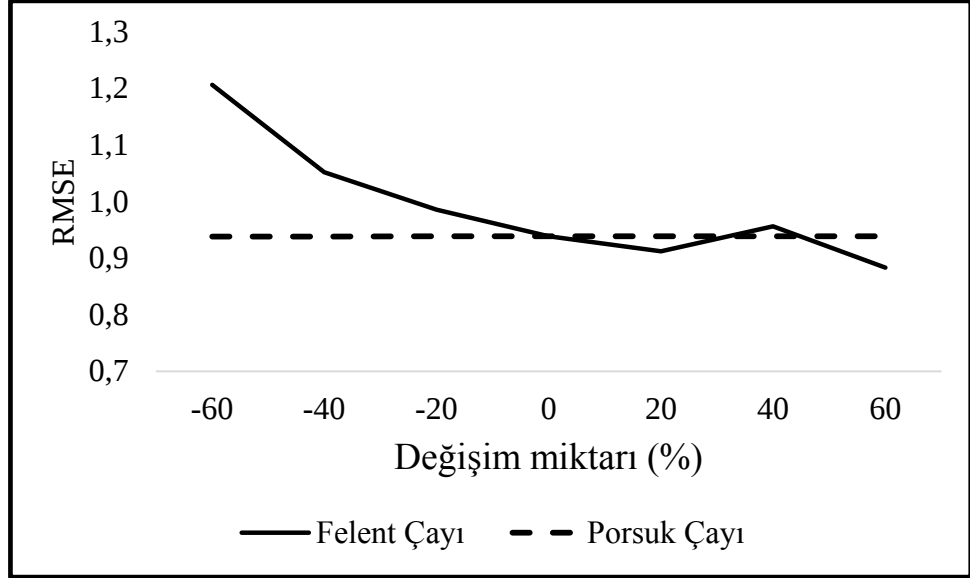
Hassasiyet analizleri Felent ve Porsuk çaylarından ilk önce birisinin iletimlilik değerleri değiştirilerek yapılmıştır (Çizelge 12.8 ve Şekil 12.14). Daha sonra iki akarsu tabanı iletimlilik değerlerinin aynı anda aynı oranda değiştirilmesi sonucunda hassasiyet etkisi incelenmiştir (Çizelge 12.8 ve Şekil 12.15).

Çizelge 12.8 ve Şekil 12.16'da verilen hassasiyet sonuçlarına göre akarsu tabanı iletimlilik değerlerindeki değişiklikler akarsudaki sızıntı miktarını etkilemektedir. Her iki parametredeki değişim akarsudan süzülmede artışa sebep olmaktadır. Şekil 12.14'te yeraltı suyu seviyelerinin Felent Çayı taban sedimanlarının iletkenliğindeki azalışa artıştan daha fazla hassastır. Buna karşın seviyeler Porsuk Çayı taban sedimanı iletkenliğine daha az hassastır (Şekil 12.14). Her iki derenin sediman iletkenlik değerlerini değiştirerek modelin çalıştırılması yeraltı suyu seviyelerinin dere sedimanı iletkenliğinin azalışına daha hassas olduğunu göstermektedir (Şekil 12.16).

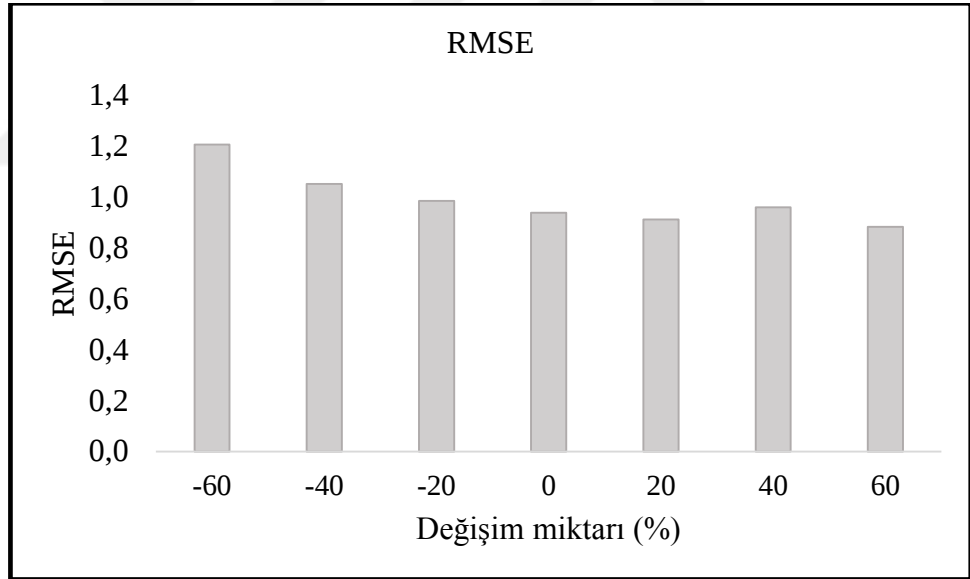
Akarsu tabanı iletimliliği arttığında RMSE, MAE ve ME değerlerinde artmaya neden olurken, baz akımın beklentilerin üzerine çıkmasına neden olmaktadır. Ancak, Akarsu tabanı iletimliliği azaldığında ise RMSE, MAE ve ME değerlerinde azalmaya neden olurken, baz akımın beklentilerin altında kalmasına neden olmaktadır (Çizelge 12.8 ve Şekil 12.16).

Çizelge 12.8 Dere yatağı iletimliliğinin hassasiyet analizleri

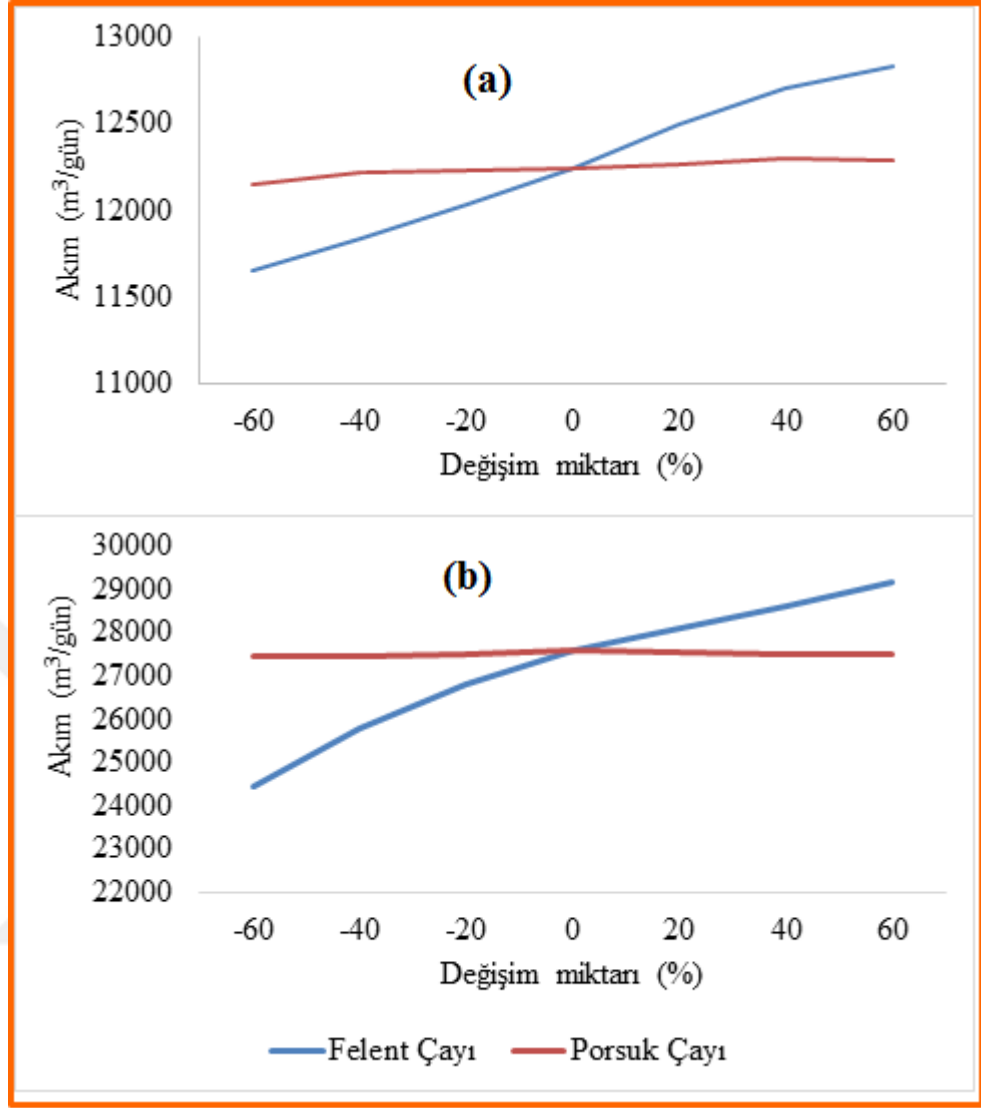
Parametre	Değişim miktarı (%)	Hata			Akarsudan akifere süzülme (m ³ /gün)	Akiferden akarsuya süzülme (m ³ /gün)
		RMSE	MAE	ME		
Felent F_R _{CRIV}	-60	1,21	1,07	-0,24	11653,93	24462,24
	-40	1,05	0,94	-0,23	11835,38	25785,04
	-20	0,99	0,89	-0,15	12034,50	26809,26
	0	0,94	0,84	-0,11	12242,34	27577,53
	20	0,91	0,81	-0,05	12493,22	28108,41
	40	0,96	0,84	0,08	12699,82	28594,41
	60	0,88	0,76	0,02	12834,98	29185,60
Porsuk P_R _{CRIV}	-60	0,93837	0,83820	-0,10685	12145,10	27442,07
	-40	0,93849	0,83829	-0,10691	12223,65	27446,09
	-20	0,93855	0,83833	-0,10695	12234,20	27518,48
	0	0,93860	0,83837	-0,10697	12242,34	27577,53
	20	0,93862	0,83838	-0,10698	12259,04	27536,33
	40	0,93864	0,83840	-0,10699	12299,85	27481,69
	60	0,93865	0,83841	-0,10700	12286,23	27516,35
Felent ve Porsuk R _{CRIV}	-60	1,21	1,07	-0,24	11548,75	24316,92
	-40	1,05	0,94	-0,23	11817,28	25642,11
	-20	0,99	0,89	-0,15	12026,79	26742,54
	0	0,94	0,84	-0,11	12242,34	27577,53
	20	0,91	0,81	-0,05	12510,20	28067,43
	40	0,96	0,85	0,07	12748,77	28385,44
	60	0,88	0,76	0,02	12897,07	29094,91



Şekil 12.14 Akarsu tabanı iletimliliği için Felent ve Porsuk çaylarında değerlerin ayrı ayrı değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri grafiği



Şekil 12.15 Akarsu tabanı iletimliliği için Felent ve Porsuk çaylarında aynı zaman için değerlerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen hassasiyet analizleri grafiği



Şekil 12.16.a. Akarsudan akifere süzülme, b. akiferden akarsuya süzülme miktarlarında akarsu tabanı iletimlilik hassasiyet analizlerinin grafiği

12.5 Model Sonucunun Güncel Yeraltı Suyu Durumu ile Karşılaştırılması

Günümüzde Kütahya Ovası ve çevresindeki fabrikalara ve vatandaşa ait kayıtlı ve kayıtlı olmayan kuyular bulunmaktadır. Genelde fabrikalara ait kuyularda kuyu derinliği, hangi akiferden kuyuya su geldiği, çekim miktarı, yeraltı suyu seviyesi bilinmemekte, yeraltı suyu örneği almak istendiğinde de fabrikalar buna izin vermemektedir.

Kütahya ovasında yer alan derin kuyularda zamana bağlı çekim ve yeraltı suyu seviye ölçümü yapılmamaktadır. Bu sebeple derin akiferlere ait yeraltı suyu seviyesi bilinmemektedir. Üç boyutlu akım modeli yapılamamasındaki en büyük nedenlerden birisi budur. Bu yüzden modelin kararlı akım koşullarında çalıştırıldıktan sonra uzun yıllar için tranziyet olarak çalıştırılmasının birçok belirsizliğe neden olacağı düşünülmektedir. Ancak kararlı akım koşullarında yapılan model simülasyon sonucu Haziran 2014'te ölçülen yeraltı suyu hidrolik yükü ile karşılaştırılabilmektedir. Bu durumda uzun zaman alüvyon akiferde yeraltı suyu seviyesinde büyük yük değişimleri görülmemektedir.

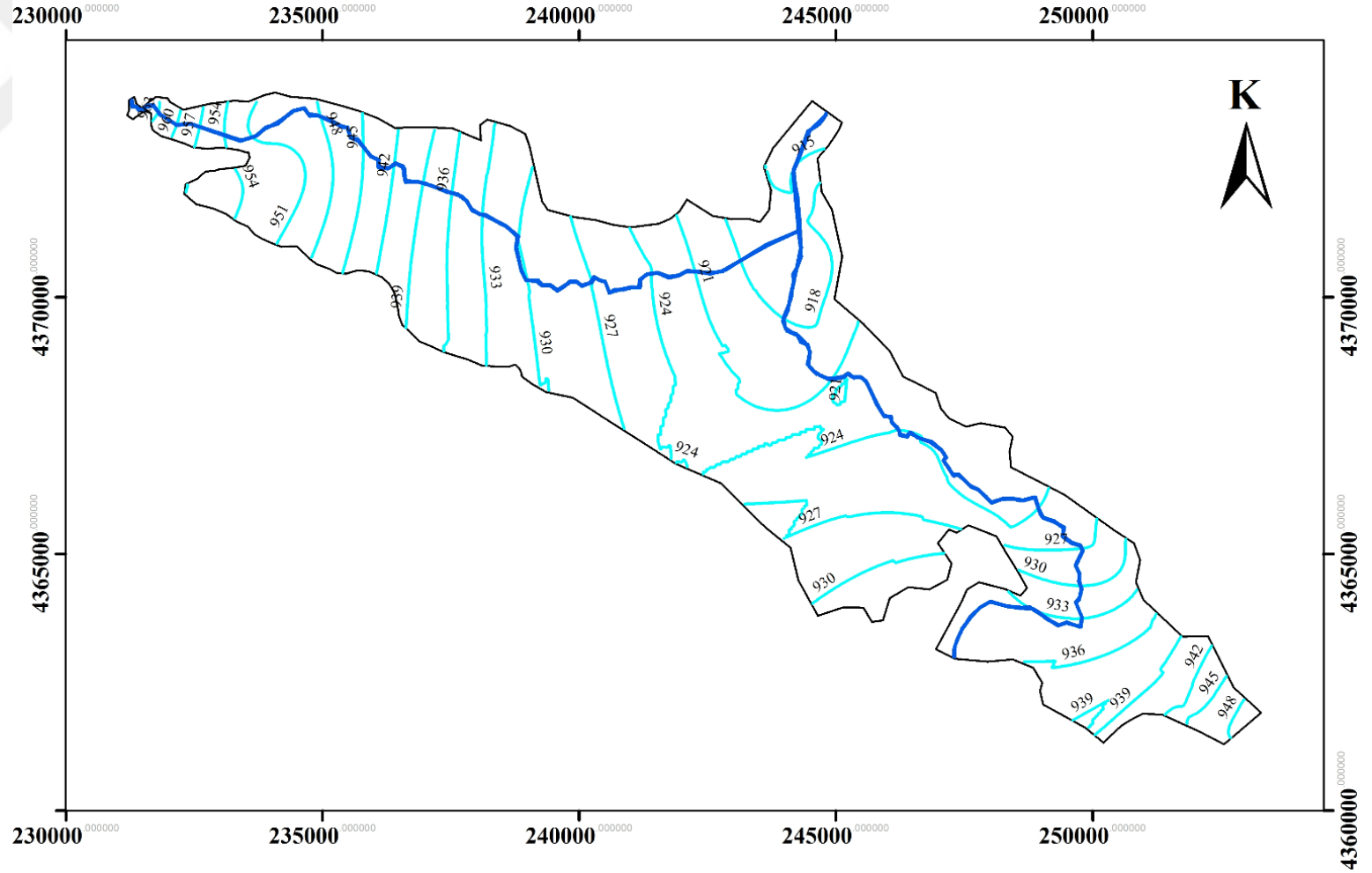
Kütahya Ovası sığ akiferi için gerçekleştirilen yeraltı suyu akım modelinin kalibrasyonu model tarafından hesaplanan 1976 yılına ait yeraltı suyu yükü ile arazide (2014) Haziran ayında ölçülen yeraltı suyu yükü değerlerinin kıyaslanması sonucunda yapılmıştır. Kararlı akım koşullarında oluşturulan model yeraltı suyu yükü sonuçları ile araziden Haziran 2014'te ölçülen yeraltı suyu yükü farkının ortalaması 0,98 m'dir (Şekil 12.17, EK 8).

1976 ile 2014 yılı yeraltı suyu yükü değerleri karşılaştırıldığında Kütahya Ovası sığ akiferi içinde bulunan ÇG-2 ölçüm noktasında 1976 yılında 936,18 m olan yeraltı suyu yükü, 2014 yılında ise 928,55 'e indiği görülmüştür. Aynı zamanda AFKK ölçüm noktasında 914,8822 m'den 911,19 m'ye, ÇG-1 ölçüm noktasında 936,28 m'den 935,65 m'ye ve DM-DÜ-Y1 ölçüm noktasında ise 951,91 m'den 951,69 m'ye düşmüştür. Diğer ölçüm noktalarında yeraltı suyu yükü değişiklikleri EK 8'de ve şekil 12.18'de verilmiştir.

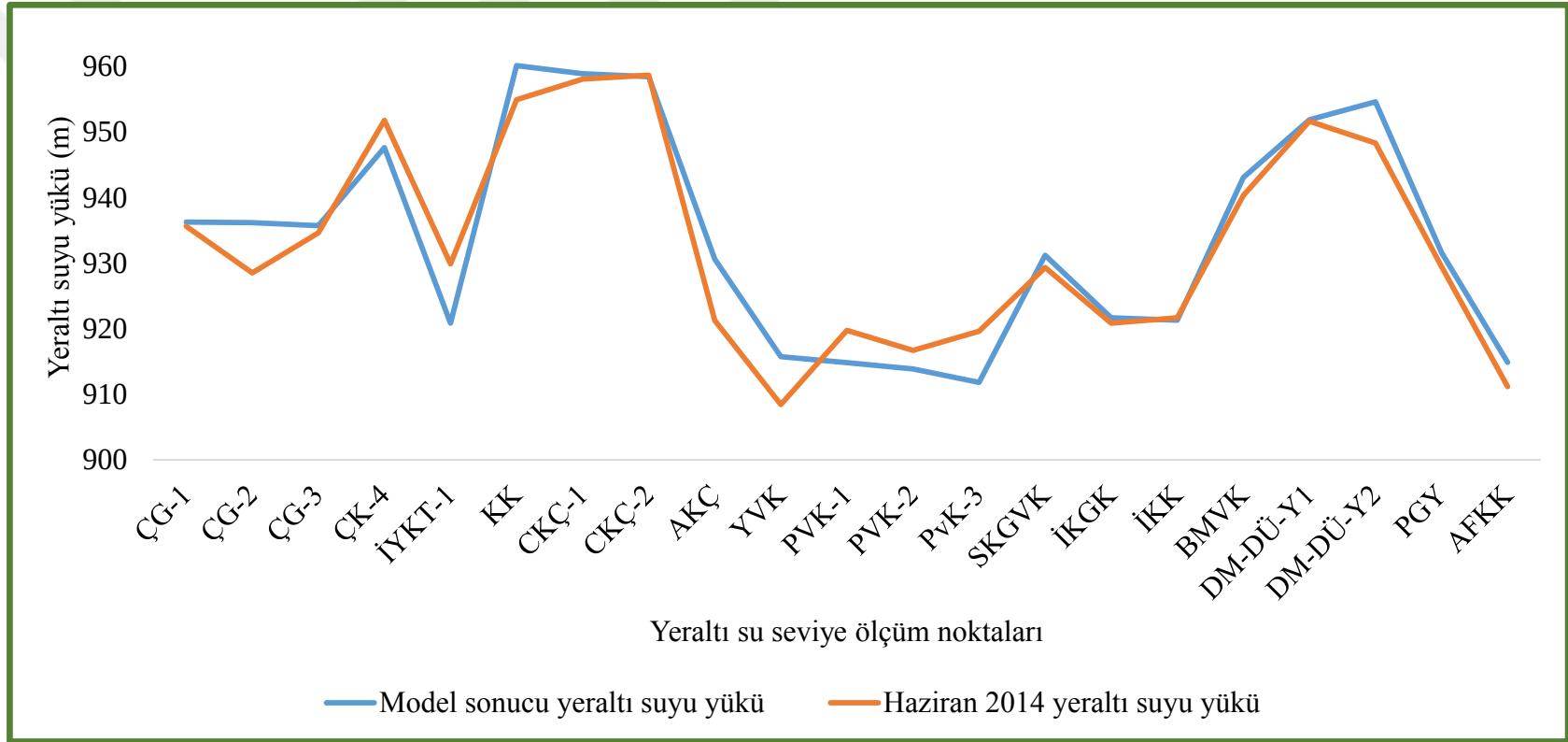
Çalışma alanında yağış miktarı 1970'lerden itibaren giderek azalmakta ve alüvyon akiferin yağıştan beslenme miktarının azaldığı düşünülmektedir. Alüvyon akiferin de hem kayıtlı, hem de kayıtsız kuyulardan yapılan çekimlere rağmen ortalama yeraltı suyu yükünün fazla değişmemesinin nedeni Parmakören ve Emet Formasyonlarından alüvyona gerçekleşen yanal beslenmedir. Model sonuçlarına göre alüvyon akiferin toplam beslenme miktarının %17,7'si yağıştan, %64,7'si de yanal beslenimden karşılanmaktadır.

Alüvyon akiferden yapılan çekim sonucu oluşan yük düşümünün çoğu, kireçtaşı akiferi olan Emet Formasyonu sınırından gerçekleşen yanal beslenme ile karşılanmaktadır.





Şekil 12.17 Modelleme alanının Haziran 2014'e ait seviye dağılım haritası



Şekil 12.18 Model sonucu ile Haziran 2014 yeraltı suyu yükünün karşılaştırılması

13. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

“Kütahya Ovası Sığ Akiferinin Yeraltı Suyu Akım Modellemesi” başlıklı tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Kütahya Meteoroloji İstasyonu'nun uzun yıllar (1975-2014) yağış verileri incelendiğinde yıllık ortalama yağış ve atmosfer sıcaklığı sırasıyla 547,3 mm ve 11,1 °C olarak hesaplanmıştır. İnceleme alanının aylık ve yıllık gerçek buharlaşma-terleme değerlerini hesaplamak için Turc (1954), Thornthwaite (1948) ve Penman (1948) yöntemleri kullanılmıştır. Penman yönteminde, diğerlerine göre daha fazla meteorolojik parametreler kullanıldığından, modelleme sırasında kullanılacak aylık gerçek buharlaşma-terleme değerleri için Penman'a göre yapılan toprağın nem bilançosu verileri dikkate alınmıştır.

Hidrojeolojik çalışmalar kapsamında, çalışma alanında farklı amaçlar için açılan kuyuların logu, jeofizik loglar, kuyu verimleri, kuyu test verileri ile birimlerin hidrojeolojik özellikleri değerlendirilmiş, bu kapsamda formasyonların su bulundurma durumları, kaynak oluşumu, süreksizlik, tane boyu ve dağılımı dikkate alınarak tez alanında geçirimli, yarı geçirimli ve geçirimsiz olmak üzere üç farklı birim ayırtlanmıştır. Kütahya Ovası ve çevresindeki birimlerin DSİ tarafından açılan kuyu loglarından yararlanarak jeolojik ve hidrojeolojik enine ve dikme kesitleri elde edilmiştir. Kütahya Ovası'nda yeraltı suyu taşıyan formasyonlardan Alüvyon ve Emet Formasyonunun önemli bir potansiyele sahip oldukları belirlenmiştir. Alüvyal akiferin farklı yöntemlerle hesaplanan transmissivite ve hidrolik iletkenlik değerleri sırasıyla 1,6 ile 343 m²/gün ve 0,04 ile 11 m/gün arasında değişmektedir. Porsuk ve Felent Çaylarının taban birimlerinin hidrolik iletkenlik (K) değerleri ise sırasıyla $3,8 \times 10^{-4}$ ile $3,45 \times 10^{-3}$ m/s ve $1,85 \times 10^{-7}$ ile $2,05 \times 10^{-5}$ m/s arasındadır.

Tez alanında yer alan kaynak, yüzey ve yeraltı sularının hidrojeokimyasal olarak alansal ve zamansal değişimlerini değerlendirmek amacıyla kurak (Aralık 2013) ve yağışlı (Haziran 2014) dönemlerde major iyon ve iz element (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , NH_4^+ ,

Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br^- , F^- , NO_2^- , NO_3^- ve PO_4^{3-}) analizleri için toplam 27 adet tanımlayıcı örnekleme ve yerinde ölçümler yapılmıştır. Piper ve yarı logaritmik Schoeller diyagramlarına göre yapılan değerlendirmede çalışma alanında ana iyon kimyasına bağlı olarak 5 farklı hidrokimyasal fasiyes belirlenmiştir. Bununla birlikte çalışma alanındaki baskın hidrokimyasal su tipi hem Aralık (2013) hem de Haziran (2014) dönemlerinde Ca-Mg/Mg-Ca- HCO_3 'tür. Tez alanındaki su örnekleri kalsit, aragonit ve dolomit minerallerine göre doygun olup, anhidrit, jips, florit ve halit minerallerine göre ise doygun olmadığı belirlenmiştir. İnceleme alanındaki yeraltı sularında bulunan kalsiyum, magnezyum ve bikarbonat iyonlarının, baskın olarak Emet Formasyonu karbonatlı kayaçlarından sulara geçmiş olabileceği düşünülmektedir.

2013 yılı Aralık ve 2014 yılı Haziran aylarında inceleme alanı içerisindeki önemli görülen bazı su noktalarında 19 adet duraylı izotop ($\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$) analizi yaptırılmıştır. Duraysız izotop (Tritiyum, ^3H) analizi ise 14 adet yeraltı suyu örneği için Aralık 2013'te yapılmıştır. Çalışma alanındaki kuyulara ait yeraltı suyundaki tritiyum konsantrasyonu Aralık 2013 için 1,00 ile 8,38 TU arasında değişmektedir. Suların tritiyum içeriğine göre PÖ-1 ve K-1 örneklerinin diğer sulara göre daha uzun dolaşıma sahip oldukları belirlenmiştir. İYKT-1 ve AT-1 nolu örneklerin yüksek EC değerlerine sahip olmaları, derin dolaşımla ilgili olmayıp, kirlilik kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

Kütahya Ovası sığ akiferi iki boyutlu ve tek katman olarak ve kararlı akım koşullarına göre modellenmiştir. Kalibrasyon, denem yanılma kalibrasyon yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada kalibrasyon manuel olarak yapılmış olup, model sonuçları Hataların Kareleri Toplamının Kare Kökü (RMSE), Mutlak Ortalama Hata (MAE) ve Ortalama Hata (ME) ölçütlerine göre değerlendirilmiştir.

Tez sahasında, birinci ve ikinci bölgedeki başlangıç hidrolik iletkenlik ve beslenme değerleri azalırken 3, 4 ve 5. Bölgelerdeki başlangıç hidrolik iletkenlik ve beslenme değerleri artış göstermiştir. Model performans ölçümü rezidüel hatalar (RMSE, MAE and ME), korelasyon katsayısı ve uyumsuzluğun yüzdesi ile değerlendirilmiştir.

Yapılan 2-boyutlu sayısal akım modellemesinde Kütahya Ovası sığ akifer sitemine ait kararlı durum (Ekim 1976) su bütçesine göre, akifere aylık yeraltı suyu girdi miktarı $69,40 \times 10^3 \text{ m}^3$ düzeyinde gerçekleşmektedir. Bu miktarın %17,7'si ovaya doğrudan düşen yağıştan ve %17,6'sı akarsudan süzülme ile sağlanmaktadır. Geri kalan kısmın önemli bir bölümü ova akiferinin sınırını oluşturan Emet ve Parmakören Formasyonlarından %64,7'si akifere ulaşmakta ve boşalım olarak ise büyük miktarını gerçek buharlaşma-terleme ve akarsu debisi oluşturmaktadır.

Akiferin hidrolik iletkenlik ve beslenme değerleri ile Felent ve Porsuk çaylarının akarsu taban çökellerinin geçirimsizliği, ovada yeraltı suyu seviyesi değerlerinin kalibrasyonu amacıyla kullanılmıştır. Modelin hassasiyeti her bir parametrenin % ± 20 , % ± 40 ve ± 60 başlangıç değerleri değiştirilerek RMSE, MAE ve ME modelin çalıştırılması ile elde edilmiştir. Her bir hidrolik iletkenlik, beslenme zonunun, Felent ve Porsuk çaylarının akarsu taban çökellerinin geçirimsizliğinin etkisi birbirinden bağımsız olarak incelenmiş ve beslenmenin toplam etkisi de analiz edilmiştir.

Model alanında yeraltı suyu yükleri beslenmenin hem artışına hem de azalışına karşı hassasiyet göstermiştir. Genel simülasyon sonuçlarına göre; beslenmenin artışı akarsu baz akımını yükseltmekte ve RMSE hatasını artırmakta; beslenmenin azalışı da akarsu baz akımı azalmakta ve RMSE hatasını da azaltmaktadır. Genel olarak, baz akım ile beslenme miktarı doğru orantılı, akarsudan akifere süzülme miktarı ile ters orantılıdır.

Hidrolik iletkenlik değişimine karşı RMSE hata grafikleri; modelde yeraltı suyu yükleri hidrolik iletkenliğin azalmasına karşı daha hassas, artmasına karşı ise daha az hassas olduğunu göstermektedir. Bölgelerdeki hidrolik iletkenlikteki azalış RMSE, MAE ve ME değerlerinde artmaya, baz akımın ise beklentilerin altında kalmasına neden olmaktadır. Aksine, hidrolik iletkenlikteki artış RMSE, MAE ve ME değerlerinde azalmaya, baz akımın ise beklentilerin üzerine çıkmasına neden olmaktadır.

Her iki akarsu tabanı sediman iletkenlik değerlerini değiştirerek modelin çalıştırılması, yeraltı suyu seviyelerinin dere sedimanı iletkenliğinin azalışına daha hassas olduğunu göstermektedir. Akarsu tabanı iletimsizliği arttığında RMSE, MAE ve ME değerlerinde

de artmaya neden olurken, baz akımın beklentilerin üzerinde bir artışa neden olmaktadır. Ancak, Akarsu tabanı iletimliliği azaldığında ise RMSE, MAE ve ME değerlerinde azalmaya neden olurken, baz akımın beklentilerin altında bir azalmaya neden olmaktadır.

Kararlı akım koşullarında oluşturulan modelin yeraltı suyu yükü sonuçları ile arazide (Haziran 2014) ölçülen yeraltı suyu yükü farkının ortalaması 0,98 m'dir. Alüvyon akiferin de hem kayıtlı, hem de kayıtsız kuyulardan yapılan çekimlere rağmen ortalama yeraltı suyu yükünün fazla değişmemesinin nedeni Parmakören ve Emet Formasyonlarından alüvyona gerçekleşen yanal beslenme olduğu belirlenmiştir.

Kararlı akım model koşulları uzun süreli yeraltı suyu seviye değişimleri ve farklı arazi kullanımlarına veya fabrika ve evlerden kaynaklı kirlilik yüklerini hesaplamak için üretilecek kararsız akım ya da taşınım modelleme çalışmalarında girdi olarak kullanılabilecektir.

Çalışma alanında daha çok tarımsal faaliyetlerin neden olduğu kirleticiler yer almaktadır. Tarımsal faaliyetlerin kirlilik üzerindeki etkisi gübre ve pestisit kullanımını en aza indirmekle gerçekleştirilebilecektir. Bu nedenle bitki ihtiyaçlarına göre gübre-pestisit uygulaması ve uygun sulama yapılmalıdır. Fabrikalardan çıkan atık sular sıklıkla kontrol edilmelidir.

Sistemi daha gerçekçi temsil edebilmek için uzun süreli farklı akifer ya da katmanlarda yeraltı suyu seviye ve çekim miktarı ölçümü yapılmalıdır. Bu, bölgenin üç boyutlu akım modelinin üretilmesinde etkin bir rol oynayacaktır. Kütahya Ovası'nda yoğun tarımsal aktivite ve fabrikalarının bulunmasından dolayı yeraltı suyu kirlilik taşınım modeli çalışmalarının yapılması da uygun olacaktır.

Gerekirse, DSİ tarafından açılan, vatandaş veya fabrikalar tarafından açılan kayıtsız kuyuların kontrolünü sağlamak amacıyla sayaç takılma yoluna da gidilmelidir. Yasal olmayan kuyular kapatılmalı veya bilimsel çalışmalara vakfedilmelidir.

KAYNAKLAR

- Akdeniz, N. ve Konak, N. 1979. Simav-Emet-Tavşanlı-Dursunbey-Demirci yörelerinin jeolojisi. M.T.A. Raporu No: 6547.
- Altınok, S., Karabacak, V., Yalçiner, C.Ç., Bilgen, A.N., Altunel, E. ve Kıyak, N.G. 2012. Kütahya Fay Zonu'nun Holosen Aktivitesi. Türkiye Jeoloji Bülteni. 55 (1); 1-17.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press Limited, 381, London.
- Anonim. 1965. Kütahya Ovası Jeofizik Rezistivite Etüt Raporu, 14, say, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Anonim. 1979. Kütahya ve Köprüören Ovaları Jeofizik Rezistivite Etüt Raporu, 65, say, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Eskişehir.
- Anonim. 1981. Kütahya ve Köprüören Ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 65 s, Ankara, 22-31.
- Anonim. 1999. Yerel Ekonomi Geliştirme Programı. Kütahya Ticaret ve Sanayi Odası, Kütahya.
- Anonim. 2001. Porsuk Havzası Su Yönetim Planı Projesi Hidroloji Raporu, Devlet Su İşleri, Eskişehir.
- Anonim. 2003. Kütahya ovası Karst hidrojeolojisi Ara raporu, Devlet Su İşleri, Türkiye.
- Anonim. 2005. Kütahya il çevre durum raporu. Kütahya Çevre ve Şehircilik il Müdürlüğü, Kütahya.
- Anonim. 2009. Kütahya İl Çevre Durum Raporu. Kütahya Çevre ve Şehircilik il Müdürlüğü, Kütahya.
- Anonim. 2012. Kütahya il çevre durum raporu. Kütahya Çevre ve Şehircilik il Müdürlüğü, Kütahya, 101-103.
- Anonymous. 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th edition, American Public Health Association, Washington D.C.
- Anonymous. 1994. Standard Guide for Conducting a Sensitivity Analysis for a GroundWater Flow Model Application. American Society for Testing and Materials. Standard D 5611-94.
- Anonymous. 2002. Defining Boundary Conditions in Ground-Water Flow Modeling. American Society for Testing and Materials. Standard D 5609-94.
- Anonymous. 2008. Standard Guide for Calibrating a Ground-Water Flow Model Application. American Society for Testing and Materials. Standard D5981-96.
- Anonymous. 2009. National Engineering Handbook Part 630, chapter 7. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. U.S. Govern Anonymou ment Printing Office, Washington, DC.

- Arık, F. ve Temur, S. 2003. Köprüören-Gümüşköy-Yoncalı civarının stratigrafisi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(1): 21-36.
- Barka, A. and Reilinger, R. 1997. Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali di Geofisica*, 40; 587-610.
- Baş, H. 1983. Domaniç-Tavşanlı-Kütahya-Gediz Yörelerinin Tersiyer Jeolojisi ve Volkanitlerinin Petrolojisi: MTA Rap No: 7293 (yayımlanmamış), Ankara.
- Baş, H. 1986. Domaniç-Tavşanlı-Gediz-Kütahya yörelerinin Tersiyer jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 27; 11-18.
- Berhe, B.A., Çelik, M. and Dokuz, U.E. 2014. Determination of aquifer properties of the Kütahya plain from a pumping and recovery test data, 67th Geological Congress of Turkey, 11-16 April, Book of Abstracts, 324-325, Ankara
- Boorman, D. B., Hollis, J. M. and Lilly, A., 1995, Hydrology of Soil Types: A Hydrologically-Based Classification of The Soils of The United Kingdom (No. 126): UK Institute of Hydrology.
- Bozkurt, E. 2001. Neotectonics of Turkey - a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14; 3-30.
- Bozkurt, E. 2003. Origin of NE-trending basins in western Turkey. *Geodinamica Acta*, 16; 61-81.
- Clark, I. and Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, 352, Florida.
- Cooper, H.H. and Jacob, C.E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 27; 526-534.
- Craig, H. 1961. Isotopic Variation in Meteoric Water. *Science*, Vol. 133, No. 3465; 1702-1703.
- Craig, M. and Johnson, T.M. 2008. Groundwater age and groundwater age dating. *Annu Rev Earth Planet Sci.*, 36(1); 121.
- Çelik, M., Ünsal, N., Tüfenkçi, O.O. and Bolat, S. 2008. Assessment of water quality of the lake seyfe basin, Kırşehir, Turkey. *Environmental Geology*, 55; 559-569.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons, 824, New York.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, 824 p.
- Driscoll, F.G. 1986. *Groundwater and Wells*. Johnson Filtration Systems, Inc., St. Paul, 1089, Minnesota.
- Edward R. B. 2000. MODFLOW-2000-Dokumentation of Packages for Simulating Evapotranspiration with a Segmented Function (ETS1) and Drains with Return Flow (DRT1). U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Denver, Colorado.
- Gürer, Ö. F., Özbüran, M., Sangu, E. ve Doğan, B. 2005. Kütahya Dolayının Neotetonik İncelenmesi. BAPB Proje No:2005/14.

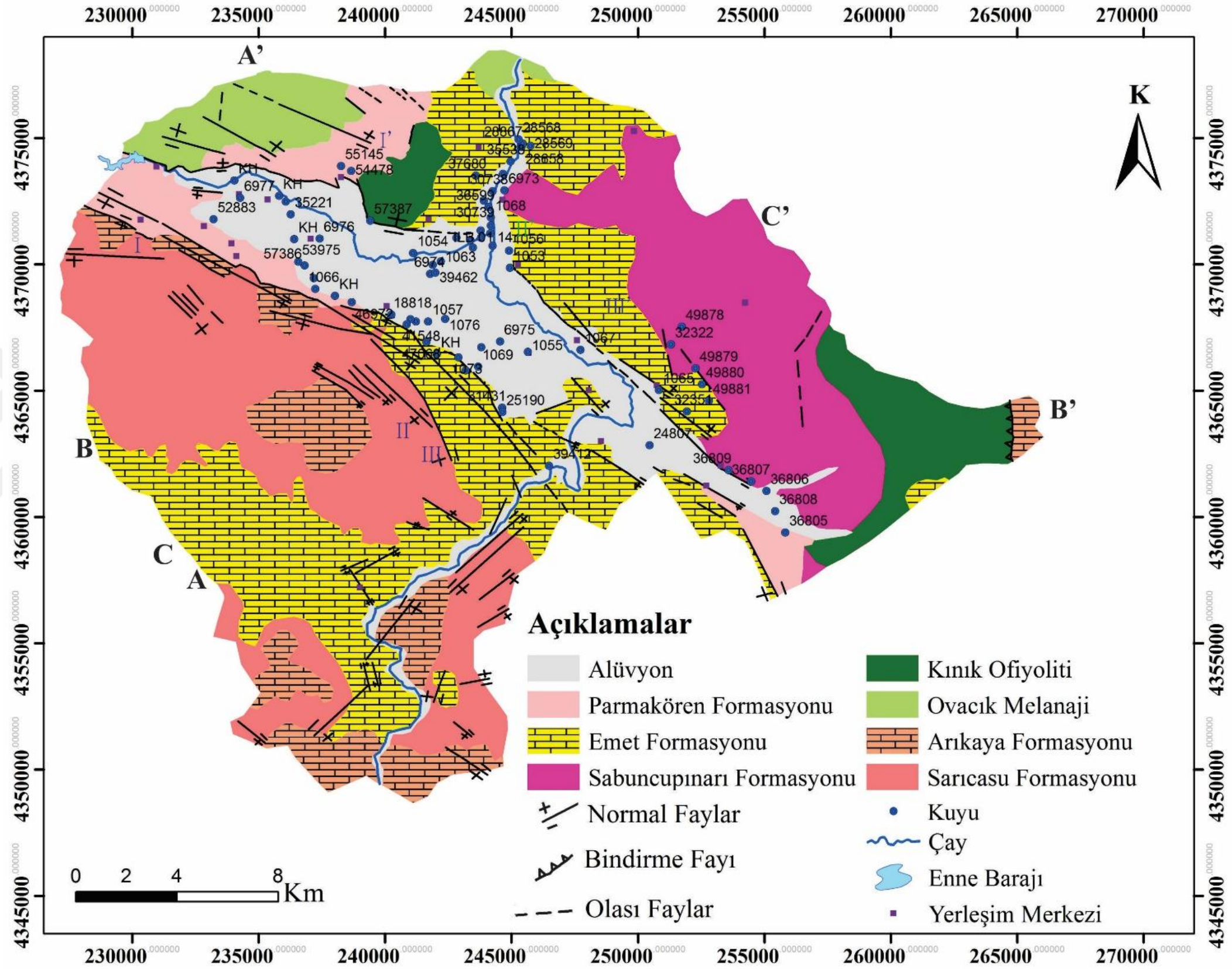
- Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model-the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6- A16, variously p.
- Kavaf, N. and Nalbatçılar, M.T. 2007. Assessment of contamination characteristics in waters of the Kütahya plain, Turkey. *Clean*, 35(6); 585-593.
- Kaya, O. 1972. Tavşanlı yöresi ofiyolit sorununun ana çizgiler. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 15; 26-108.
- Kendall, C. and McDonnell, J.J. 1998. *Isotope Tracers in Watershed Hydrology*, Elsevier, 839, Amsterdam.
- Koçyiğit, A. ve Bozkurt, E. 1997. Kütahya-Tavşanlı Çöküntü Alanının Neotektonik Özellikleri. TUBİTAK Araştırma Projesi No: YDABÇAG-126.
- Konak, N. 1982. Simav Dolayının Jeolojisi ve Metomorf Kayaçların Evrimi. *İstanbul Yerbilim Dergisi*, 3; 313-337.
- Mazor, E. 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Marcel Dekker, Inc., 470, New York.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- Morton, F. I. 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, 66; 1-76.
- Nagaraju, A., Suresh, S., Killham, K.ve Hudson, E.K. 2006. Hydrogeochemistry of Waters of Mangampeta Barite Mining Area, Cuddapah Basin, Andhra Pradesh, India. *Turkish J. Eng. Env.Sci.* 30: 203-219.
- Odong, J. 2013. Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. *International Journal of Agr. & Env.* 01: 1-8
- Özburan, M. 2009. Kütahya ve Çevresinin Neotektonik İncelemesi. Doktora Tezi, Kocaeli University, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 227, Kocaeli.
- Palma, H.C. and Bentley, R.L. 2007. A regional-scale ground water flow model for the Leon- Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal*, 15; 1457-1472.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193; 120-145.
- Piper, A.M. 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Transactions, American Geophysical Union*, 25; 914-928.
- Saner, S., 1980. Mudurnu-Göynük Havzasının Jura ve Sonrası Çökelim Nitelikleri ile Paleocoğrafik Yorumlaması. *Türkiye Jeol. Kur. Bült.*, 23; 39-52.

- Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö. 2005. Türkiye'deki Yağışların Kararlı İzotop İçeriklerini Kullanarak Yerel Meteorik Doğruların Belirlenmesi, 2.Ulusal Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu, 26-30 Eylül, Bildiri Özetleri Kitabı, 323-344, İzmir.
- Schoeller, H. 1967. Qualitative Evaluation of Groundwater Resources (In Methods and Techniques of Groundwater Investigation and Development. Water Resource Series, 33, 44-52.
- Schoeller, H. 1977. Geochemistry of groundwater. An international guide for research and practice, UNESCO, 15, 1-18.
- Spitz, K. and Moreno, J. 1996. A practical guide to groundwater and solute transport modeling (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.Inc. (ASTER GDEM web adresi, 2010)
- Suner, S. 1980. Sarıkaya (Kırka-Eskişehir) Borat Yataklarının Jeolojisi. Türkiye Jeol. M. Kongresi Bült., 2; 19-34.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. 1987. Türkiye'nin Diri Fayları ve Depremsellikleri. MTA yayınları 394 s.(yayınlanmamış).
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Kuşçu, İ. 1992. Türkiye diri fay haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi.
- T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı (?). Kütahya Havzasında sayısallaştırılmış arazi kullanım ve toprak haritası (yayınlanmamış).
- Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Am. Geophys. Union Trans., 16; 519-524.
- Thornthwaite, C.W. 1944. Report of committee on transpiration and evaporation. Am. Geophys. Union Trans., 5; 686-693.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An Approach A Rational Classification Of Climate: The geographical review, 38; 55-94, New York.
- Turc, L. 1954. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la pré'cipitation, l'é'vaporation et l'é'coulement. Ann. Agron. 5; 491-569.
- Vukovic, M. and Soro, A. 1992. Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Wang, H.F. and Anderson, M.P. 1982. Introduction to groundwater modeling- finit difference and finit element methods. W.H.Freeman and company, San Francisco 237 pp.
- Williams, J.R. and Kissel, D.E. 1991. Water percolation: an indicator of nitrogen-leaching potential. In: R.F. Follet, D.R. Keeney, and R.M. Cruse (Eds.). Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI. p. 59-83.
- Yüce, G., Pınarbaşı, A., Özcelik, S., Uğur, D. 2006. Soil and water pollution derived from anthropogenic activities in the Porsuk River Basin, Turkey. Hydrogeology J 49: 359-375.

EKLER

EK 1 Çalışma Alanının Jeoloji Haritası.....	192
EK 2 DSİ Sondaj Kuyularına Ait Veriler.....	193
EK 3 Kütahya Ovası'nda Açılan Sığ Kuyularına Ait Ekim 1976'da Ölçülen Yeraltı Su Seviyeleri.....	196
EK 4 Kütahya Ovasında Alüvyon Akiferinde Açılan Sığ Kuyuların 1976 Yılına Ait Yeraltı Suyu Seviyeleri Ölçüm Noktaları.....	197
EK 5 Çalışma Alanı Sularının Kimyasal Analiz Sonuçları (Aralık 2013).....	198
EK 6 Çalışma Alanı Sularının Kimyasal Analiz Sonuçları (Haziran 2014).....	199
EK 7 Çalışma Alanında Hidrolojik Toprak Gruplarına Göre Ekim Ayın 1976 Yılına Ait Beslenim Miktarları.....	200
EK 8 Model Tarafından Hesaplanan Yeraltı Suyu Seviyeleri İle Haziran 2014'te Ölçülen Yeraltı Suyu Yükülerinin Karşılaştırması.....	201
EK 9 Tane Boyu Dağılım Analizleri Sonucunda Elde Edilen Eklenik Tane Boyu Dağılım Eğrileri.....	202

EK 1 Çalışma Alanının Jeoloji Haritası (Anonim 1981, 2003 ve Özburan 2009'dan değiştirilerek alınmıştır)



EK 2 DSİ Sondaj Kuyularına Ait Veriler

Sıra No	Kuyu No	X	Y	Z	Derinlik (m)	Statik Seviye (m)	Dinamik Seviye (m)	Verim (L/S)	Filtrelenmiş Formasyon (Akifer)
1	1053	244953	4369790	920	38	0,3	0,95	5	Emet (Kireçtaşı)
2	1054	241118	4370369	924	100	1,85	5	12	Alüvyon
3	1055	245653	4366454	924	100	3,7	10	15	Alüvyon
4	1056	244914	4370463	919	108	0,3	5	10	Emet (Kireçtaşı)
5	1057	241719	4367660	933	101	2,6	10	7	Alüvyon
6	1063	242221	4370042	924	111	0,98	4,1	19	Alüvyon
7	1065	250850	4364946	937	133	1,05	2,48	7,6	Alüvyon ve Emet (Kireçtaşı)
8	1066	237261	4368959	958	99,9	16,3	X	X	Alüvyon
9	1067	247744	4366545	932	84	0,65	1,92	5	Emet (Kireçtaşı)
10	1068	244198	4371776	921	198	0,8	41,25	16	Alüvyon ve Emet (Kireçtaşı)
11	1076	242922	4366246	929	69	1,85	10,68	8,9	Alüvyon
12	6973	244736	4372853	930	274	10,5	33,52	28	Emet (Kireçtaşı)
13	6974A	241793	4369551	922	393,75	0,94	30,39	2,2	Emet (Kireçtaşı)
14	6974B	241793	4369551	922	86	0,45	10,21	4,9	Emet (Kireçtaşı)
15	6974C	241793	4369551	922	46	0,57	30,04	42	Alüvyon(Çakıllı Kil)
16	6975	244543	4366877	922	402,8	0,49	22,77	32	Emet (Kireçtaşı)
17	6977	234275	4372555	958	264,22	4,35	23,13	0,9	Alüvyon (Çakıllı Kil)
18	24807	250473	4362840	934	200	14,1	20	40	Alüvyon ve Emet (Kireçtaşı)
19	25190	244654	4364082	990	165	17	56,3	30,27	Emet (Kireçtaşı)

EK 2 DSİ Sondaj Kuyularına Ait Veriler (devam)

Sıra No	Kuyu No	X	Y	Z	Derinlik (m)	Statik Seviye (m)	Dinamik Seviye (m)	Verim (L/S)	Filtrelenmiş Formasyon (Akifer)
20	28568	245300	4374864	927	100	1,8	63,4	20,19	Emet (Kireçtaşı) ve Sabuncupınarı (Tüfit)
21	28569	245763	4374615	936	60		42,9	8,8	Emet (Kireçtaşı)
22	28658	245407	4374504	926	88	2,5	26,3	50,46	Emet (Kireçtaşı)
23	28867	245454	4374710	933	92	2,43	17,92	60,01	Emet (Marnlı kireçtaşı)
24	30738	244207	4372818	919	175	9,4	21,5	63,2	Emet (Kireçtaşı)
25	30739	243916	4372440	920	143	18,35	21,2	84,27	Emet (Kireçtaşı)
26	31431	244638	4364253	948	175	60,45	65,38	15,8	Emet (Kireçtaşı)
27	32322	251325	4366750	950	239	10,7	25,65	38	Sabuncupınarı (Tüfit)
28	32531	251950	4364100	954	100	6	23,85	35	Sabuncupınarı (Tüfit)
29	35221	236279	4371901	950	68	5,27	24,45	6,24	Alüvyon (Kil yer yer Çakıllı ve kumlu)
30	35537	243800	4371264	919	175	20,6	41,92	78,83	Emet (Marnlı kireçtaşı)
31	35538	244970	4374002	915	175	11,82	44,69	28,5	Emet (Marnlı kireçtaşı) ve Sabuncupınarı (Tüfit)
32	36599	244113	4372179	912	175	17,75	38,2	57,69	Emet (Marnlı kireçtaşı) ve Sabuncupınarı (Tüfit)
33	36805	255850	4359300	998	151	14,35	42,27	68	Sabuncupınarı (Tüfit)
34	36806	255100	4360950	978	151	9,6	32,24	80,22	Sabuncupınarı (Tüfit)
35	36807	254500	4361325	968	150	6,32	47,43	56,01	Sabuncupınarı (Tüfit)
36	36808	255450	4360150	980	154	11,12	45,24	51	Sabuncupınarı (Tüfit)
37	36809	253600	4361775	960	150	3,75	39,94	81	Sabuncupınarı (Tüfit)
38	39412	246500	4361950	950	62	8,4	32,81	20	Emet (Kireçtaşı)

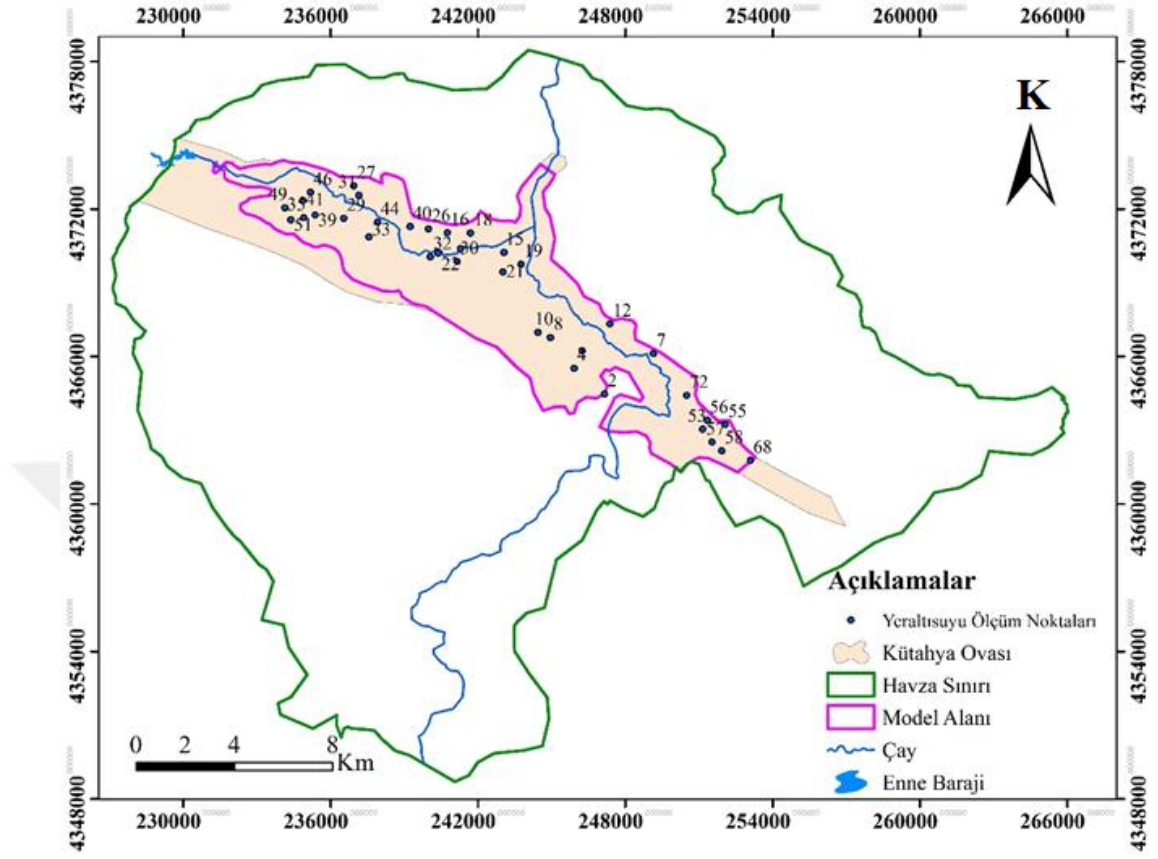
EK 2 Sondaj Kuyularına Ait Veriler (devam)

Sıra No	Kuyu No	X	Y	Z	Derinlik (m)	Statik Seviye (m)	Dinamik Seviye (m)	Verim (L/S)	Filtrelenmiş Formasyon (Akifer)
39	41548	240870	4367548	955	100	10	60,5	2	Parmakören (Çakıllı kil)
40	41173	241006	4367820	955	90	9,7	35,3	7,44	Parmakören (Çakıllı kil)
41	46872	238710	4368432	965	150	7	62,83	2	Emet (Killi kireçtaşı)
42	47068	241642	4366920	950	100	12,2	62,66	3	Emet (Marnlı kireçtaşı)
44	49879	252300	4365800	943	174	11	59,82	50	Sabuncupınarı (Tüfit)
45	49880	252550	4365175	943	150	9,7	51,98	38,75	Sabuncupınarı (Tüfit)
46	49881	252825	4364525	949	153	15	59,66	50,46	Sabuncupınarı (Tüfit)
47	52883	233229	4371709	986	160	13	119,4	3	Alüvyon (kum, çakıl), Parmakören (kumlu ve çakıllı kil) ve Çöğürler karmaşığı (Ofiyolite)
48	53185	241237	4367659	940	100	6	42,6	3	Alüvyon (kum, çakıl), Parmakören (kumlu ve çakıllı kil)
49	53974	237189	4369394	950	209	8,65	65,35	17,69	Parmakören (Kumtaşı) ve Çöğürler Karmaşığı (Kalk şist)
50	53975	236566	4370040	950	187	0,9	41,61	72,98	Parmakören (Kumtaşı- Çakıl taşı) ve Çöğürler Karmaşığı (Ofiyolit)
51	54210	236095	4372404	942	338	1,9	69,52	9,59	Alüvyon (kum, çakıl), Parmakören (kumlu ve çakıllı kil) ve Çöğürler karmaşığı (Ofiyolite)
52	54478	238669	4373616	954	106	9,5	36,26	55	Parmakören (kumlu ve çakıllı kil) ve Çöğürler karmaşığı (Ofiyolite)
53	55145	238267	4373819	958	128	14	68,8	12,3	Parmakören (Kumtaşı)
54	57386	236834	4369874	948	210	3	50,58	51,78	Parmakören (kumtaşı ve çakıltası) ve Çöğürler karmaşığı (Kalk şist)
55	57387	239423	4371657	930	200	4,2	46,22	7	Çöğürler Karmaşığı (Ofiyolit)
56	57620	243516	4366645	929	150	8,7	34,95	14,45	Emet (Killi kireçtaşı)
57	36600B	244674	4373503	910	175	14,8	43,33	59,54	Emet (Marnlı kireçtaşı)

EK 3 Kütahya Ovasında Alüvyon Akiferinde Açılan Sığ Kuyularına Ait Ekim 1976'da Ölçülen Yeraltı Su Seviyeleri (Anonim 1981)

Kuyu No	X	Y	Z	Statik seviye (m)	Su kotu (m)
2	247090	4364460	933,904	5,55	928,354
4	245908	4365518	926,613	5	924,613
6	246241	4366237	926,176	5	921,176
7	249146	4366116	927,528	3,8	923,728
8	244952	4366774	925,532	3,7	921,832
10	244447	4366981	922,553	1,5	921,053
12	247374	4367319	923,298	3,45	919,848
15	243060	4370230	920,254	2,37	917,884
16	240751	4371028	926,537	2,2	924,337
18	241699	4371013	923,388	1,5	921,886
20	241281	4370376	922,891	1,21	921,681
21	243013	4369433	921,486	2	919,486
22	240377	4370198	924,229	1,21	922,983
26	239989	4371184	929,358	3,2	926,158
27	236938	4372936	936,801	2,81	934,001
30	241149	4369869	923,468	1,67	921,798
31	237154	4372555	935,845	2,5	933,345
32	240056	4370056	924,483	3,31	921,173
33	237561	4370857	937,028	1,91	935,118
34	241635	4370104	922,405	1,38	921,025
35	234909	4371642	965,473	6,3	957,173
39	235371	4371757	959,963	7	952,936
40	239238	4371278	929,929	3,29	926,639
41	234866	4372338	957,416	4,88	952,536
44	237912	4371462	933,304	1,16	932,144
46	235180	4372675	952,931	4,6	948,331
47	233748	4372133	966,046	3,1	962,946
49	234136	4372051	964,571	3,48	961,091
51	234381	4371556	970,705	9,22	961,485
53	251149	4363040	934,964	2,45	932,514
55	252064	4363227	937,355	3,13	934,225
56	251342	4363398	933,565	1,15	932,415
57	251523	4362516	937,958	1,12	936,838
58	251922	4362164	941,377	0,98	940,397
72	250499	4364415	930,157	1,86	928,297

EK 4 Kütahya Ovasında Alüvyon Akiferinde Açılan Sığ Kuyuların 1976 Yılına Ait Yeraltı Suyu Seviyeleri Ölçüm Noktaları (Anonim 1981)



EK 5 Çalışma Alanı Sularının Kimyasal Analiz Sonuçları (Aralık 2013)

Örnek Numarası	pH	T°	EC	Li ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻	Br ⁻	F ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	% Hatta
PÇ-3*	8,23	13,8	613,00	0,02	0,32	2,61	9,74	21,32	83,25	0,06	0,02	0,08	0,17	2,32	2,36	9,05	337,57	4,75
PÇP*	8,53	13,3	665,00	0,02	0,00	3,01	10,71	22,72	85,36	0,35	0,04	0,23	0,46	4,80	6,93	24,00	355,34	0,32
PÇÇ*	7,70	14,9	844,50	0,02	13,14	6,29	31,97	24,92	81,02	0,69	0,05	0,25	0,18	0,24	22,16	31,79	438,25	-0,82
FÇ-1*	9,67	11,7	1104,50	0,00	0,00	6,88	23,81	59,38	106,53	0,26	0,08	0,31	0,59	19,90	28,63	79,17	479,71	3,31
FÇ-2*	8,72	10,3	1105,50	0,01	0,00	5,85	24,49	63,95	102,71	0,00	0,08	0,17	1,31	8,60	31,40	90,03	461,94	4,94
FÇ-3*	7,72	15,2	1111,00	0,01	3,15	30,51	31,55	39,79	119,66	0,00	0,17	0,21	0,30	0,19	26,42	22,34	574,47	4,15
SKK [■]	8,83	10,6	483,00	0,00	0,39	0,86	2,27	22,15	59,32	0,00	0,02	0,07	0,13	2,16	1,78	6,50	275,39	1,89
OKK [■]	8,12	13,7	539,50	0,00	0,44	1,21	3,37	52,94	21,93	0,00	0,05	0,12	0,13	0,60	3,66	16,77	284,86	4,71
SÇ [▲]	7,49	17,1	664,50	0,02	0,00	2,89	9,06	24,12	86,99	0,25	0,02	0,28	0,45	6,74	5,20	18,03	355,34	2,31
AKÇ [▲]	8,15	14,4	813,00	0,02	0,38	4,71	17,16	33,96	95,26	0,68	0,06	0,31	0,53	6,89	15,43	34,63	396,80	3,78
ÇÇ [▲]	8,18	13,4	654,00	0,03	0,26	4,59	7,37	37,75	65,00	0,43	0,04	0,28	0,45	9,02	6,20	13,43	343,49	4,10
BST-1 [▲]	7,89	13,2	719,50	0,01	0,08	3,63	4,43	38,22	82,52	0,43	0,05	0,13	0,34	0,07	8,14	12,79	384,95	4,98
BST-2 [▲]	7,71	12,8	858,50	0,01	0,00	2,49	5,45	62,23	71,37	0,67	0,02	0,11	0,66	12,92	4,63	16,12	456,02	4,59
AT-1 [▲]	7,99	13,8	2071,50	0,07	0,00	158,99	68,35	105,53	118,56	0,66	0,16	0,25	2,94	225,43	94,36	153,18	621,84	4,51
İYKT-1 [▲]	9,11	14,0	1985,00	0,09	0,00	129,99	69,88	82,66	152,28	1,39	0,28	0,43	1,27	168,35	92,05	187,18	586,31	4,68
ZKT-1 [▲]	8,00	13,3	868,00	0,01	0,00	0,86	20,33	6,89	146,16	0,26	0,03	0,12	0,44	14,75	13,88	52,54	417,52	1,01
KOY-1 [▲]	7,73	8,5	864,50	0,00	0,80	2,61	10,91	45,26	92,35	0,00	0,05	0,14	0,11	31,29	15,62	27,53	417,52	3,14
BK-A [▲]	8,34	13,0	720,00	0,00	0,43	1,25	5,53	41,38	76,77	0,00	0,03	0,10	0,20	26,49	11,35	13,84	355,34	4,58
İG-1 [▲]	7,87	14,2	1352,50	0,01	1,31	4,38	43,86	76,79	114,77	0,00	0,24	0,40	0,32	5,59	60,99	184,30	441,21	4,53
İG-2 [▲]	8,57	13,5	891,00	0,01	0,79	2,57	19,71	55,30	75,61	0,00	0,05	0,39	0,16	0,37	16,94	54,38	420,49	4,24
İG-3 [▲]	8,93	14,5	3135,00	0,01	3,10	8,02	105,54	237,91	154,30	0,00	0,47	0,39	0,33	0,71	173,94	649,43	731,41	2,83
KOYM [▲]	7,74	12,2	1139,00	0,00	1,54	14,09	16,08	51,91	123,41	0,00	0,08	0,13	0,83	17,44	35,50	51,42	538,93	1,58
K-1 [▼]	7,92	14,5	704,50	0,02	0,48	6,53	19,94	22,95	86,74	0,00	0,06	0,21	0,14	22,68	25,48	41,09	296,12	3,34
K-2 [▼]	8,00	14,1	793,50	0,02	0,97	7,45	19,78	40,49	76,82	0,00	0,05	0,16	0,17	19,04	20,86	60,19	331,65	4,25
PÖ-1 [▼]	8,46	13,8	576,50	0,00	0,83	1,85	16,40	29,78	50,16	0,00	0,07	0,32	0,13	13,97	6,33	9,39	313,88	-0,05
SKÇK [▼]	8,39	10,1	795,00	0,00	0,47	1,19	5,78	16,36	133,31	0,00	0,03	0,00	0,11	6,92	6,51	9,72	432,33	4,52
OK Kuyu [▼]	8,45	12,7	517,00	0,00	0,51	0,60	3,12	24,67	60,26	0,00	0,00	0,08	0,18	3,87	3,19	2,73	302,04	0,44

Açıklamalar: EC (µS/cm), iyon konsantrasyonları (mg/l), sıcaklık (°C), *yüzey suyu, [■] kaynak suyu, [▲] sığ yeraltı suyu, [▼] derin yeraltı suyu

EK 6 Çalışma Alanı Sularının Kimyasal Analiz Sonuçları (Haziran 2014)

Örnek Numarası	pH	T°	EC	Li ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻	Br ⁻	F ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	%Hata
PÇ-3*	7,58	16,9	548	0,01	0,46	2,30	8,55	25,03	82,40	0,00	0,00	0,31	0,00	4,36	4,98	20,16	331,65	4,29
PÇP*	7,54	18,5	608	0,01	1,11	3,82	15,64	27,33	85,61	0,00	0,03	0,29	0,14	3,98	11,58	24,20	361,26	3,70
PÇÇ*	7,24	18,4	762	0,01	13,23	6,53	23,87	32,04	82,95	0,33	0,03	0,31	0,51	1,36	21,68	38,14	393,83	4,78
FÇ-1*	7,42	15,5	690	0,01	8,91	5,70	17,06	33,35	86,03	0,21	0,01	0,26	0,39	2,15	14,60	52,29	373,11	4,59
FÇ-2*	7,52	15,4	556	0,01	1,57	4,16	12,12	27,75	72,38	0,00	0,03	0,21	0,49	2,60	11,48	40,29	302,04	3,43
FÇ-3*	7,34	19,2	672	0,01	10,26	7,03	19,74	30,96	78,65	0,00	0,03	0,24	0,70	1,36	18,71	54,64	343,49	4,76
SKK■	7,62	12,8	431	0,00	0,13	0,52	1,24	26,71	59,24	0,00	0,01	0,07	0,00	1,72	1,63	6,06	284,27	3,60
OKK■	7,35	13,9	694	0,00	0,23	0,85	2,82	57,99	81,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,34	3,10	16,56	479,71	3,82
SÇ▲	7,20	17,1	559	0,01	0,27	2,19	7,54	21,41	93,36	0,00	0,00	0,43	0,00	6,07	5,11	16,95	343,49	4,38
AKÇ▲	7,32	15,9	672	0,01	0,08	3,44	14,25	35,31	91,09	0,00	0,00	0,40	0,00	6,04	11,61	32,62	393,83	3,69
ÇÇ▲	7,47	15,4	542	0,02	0,29	3,63	6,01	43,46	60,63	0,00	0,00	0,38	0,00	7,15	5,21	12,59	367,18	3,02
BST-1▲	7,55	16,4	629	0,01	0,07	2,26	3,68	43,18	77,69	0,00	0,02	0,28	0,02	20,90	5,96	12,62	384,95	3,78
BST-2▲	7,32	16,2	681	0,00	0,06	2,15	5,15	57,10	75,63	0,00	0,00	0,22	0,00	8,31	3,87	12,93	456,02	4,50
AT-1▲	7,15	17,1	2050	0,07	0,00	165,99	63,35	100,53	120,56	0,66	0,15	0,26	2,74	215,43	95,36	140,18	630,84	4,51
İYKT-1▲	7,10	19,5	1677	0,07	0,28	105,40	57,44	85,59	146,58	0,00	0,20	0,53	0,10	153,22	89,27	173,05	581,10	3,78
ZKT-1▲	7,04	18,6	822	0,00	0,25	0,60	16,73	12,42	165,40	0,00	0,04	0,15	0,00	18,54	17,00	50,88	444,17	4,72
KOY-1▲	7,25	12,6	756	0,00	0,14	1,87	9,00	48,95	97,81	0,00	0,02	0,07	0,00	29,64	14,79	24,54	444,17	3,67
BK-A▲	7,20	14,6	625	0,00	0,18	0,89	4,39	42,40	75,78	0,00	0,00	0,08	0,00	24,56	11,48	13,40	364,22	3,58
İG-1▲	7,16	14,3	1226	0,01	0,16	3,29	39,84	83,02	128,86	0,00	0,15	0,00	0,02	5,61	83,41	231,92	438,25	2,12
İG-2▲	7,21	12,3	767	0,01	0,06	2,10	18,59	54,37	82,82	0,00	0,04	0,36	0,00	0,05	15,96	60,84	432,33	3,54
İG-3▲	7,19	12,5	1822	0,01	0,27	5,04	73,71	173,39	124,55	0,00	0,28	0,43	0,00	0,37	110,99	430,32	651,45	2,20
KOYM▲	7,01	12,0	789	0,00	0,46	9,44	8,18	47,64	101,53	0,00	0,00	0,07	0,00	11,60	18,54	25,58	467,86	3,73
K-1▼	7,13	17,6	832	0,02	0,25	6,88	29,65	34,13	102,73	0,00	0,04	0,30	0,00	20,72	76,57	50,57	319,80	3,35
K-2▼	7,49	19,0	580	0,02	0,07	5,64	11,00	36,61	59,71	0,00	0,04	0,22	0,00	18,61	13,59	27,25	296,12	3,95
PÖ-1▼	7,31	18,7	516	0,00	0,32	1,44	14,74	33,37	53,68	0,00	0,04	0,35	0,00	14,28	6,26	9,06	313,88	3,03
SKÇK▼	7,11	13,5	667	0,00	0,16	0,73	5,42	21,79	120,93	0,00	0,02	0,15	0,02	10,43	8,38	5,21	432,33	3,06
OK Kuyu▼	7,08	12,2	555	0,00	0,18	0,78	4,28	30,34	71,13	0,00	0,00	0,08	0,00	10,45	6,29	10,24	337,57	1,32
K-3▼	7,13	17,6	832	0,02	0,17	7,09	30,04	33,55	104,02	0,00	0,03	0,30	0,00	20,69	76,64	50,38	319,80	3,35

Açıklamalar: EC (µS/cm), iyon konsantrasyonları (mg/l), sıcaklık (°C), *yüzey suyu, ■kaynak suyu, ▲sığ yeraltı suyu, ▼derin yeraltı suyu

EK 7 Çalışma Alanında Hidrolojik Toprak Grupların Aylık Yağış Miktarına Göre Ekim
Ayın 1976 Yılına Ait Beslenme Miktarları

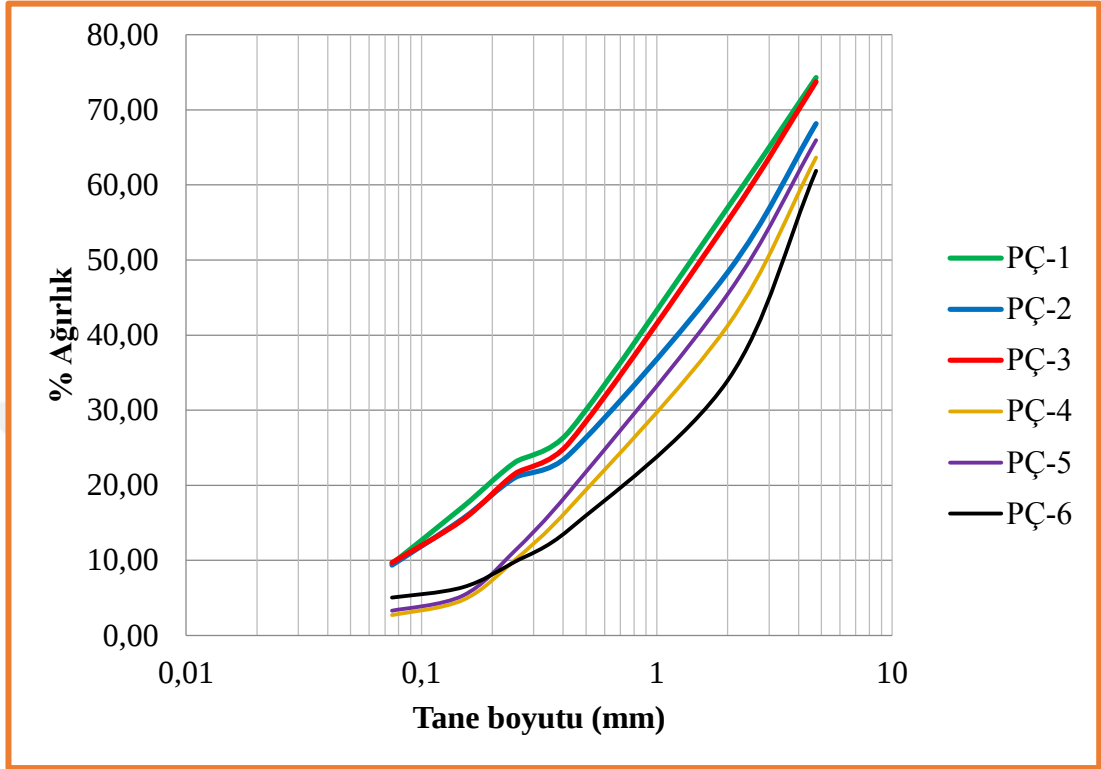
Kuyu No	Kuyu lokasyonu		Toprak tipi	Toprak grubu	Beslenme miktarı (mm/ay)
	X	Y			
1053	244956	4369786	Kil	D	0,04
1054	241118	4370369	Killi kum	B	1,94
1055	245653	4366454	Kumlu kil	C	0,14
1056	244914	4370463	Kil	D	0,04
1057	241719	4367660	İnce kum	A	6,98
1063	242221	4370042	Kil	D	0,04
1065	250850	4364946	Killi kum	B	1,94
1066	237261	4368959	Killi kum	B	1,94
1067	247744	4366545	Killi kum	B	1,94
1068	244198	4371776	Kil	D	0,04
1069	243701	4365872	Killi kum	B	1,94
1073	242919	4366243	Killi kum	B	1,94
1076	242922	4366246	Kil	D	0,04
6973	244736	4372853	Kil	D	0,04
6974	241793	4369551	Kil	D	0,04
6975	244543	4366877	Çakıl	A	6,98
6976	237421	4370951	Kil	D	0,04
6977	234275	4372555	Kil	D	0,04
18818	240258	4367929	İnce kum	A	6,98
24807	250484	4362766	İnce kum	A	6,98
25190	244654	4364082	Kum, çakıl	A	6,98
30738	244207	4372818	Kil	D	0,04
30739	243916	4372440	Kil	D	0,04
31431	244638	4364253	Kil	D	0,04
35221	236279	4371901	Çakılı kil	C	0,14
35537	243800	4371264	Çakılı kil	C	0,14
35538	244970	4374002	Kum, çakıl	A	6,98
36599	244113	4372179	Kil	D	0,04
36600	244674	4373503	Kumlu kil	C	0,14
36807	254500	4361325	Killi çakıl	B	1,94
36808	255450	4360150	Killi çakıl	B	1,94
36809	253600	4361775	Killi çakıl	B	1,94
41173	241018	4367745	Kil	D	0,04
41548	240870	4367548	Kum, çakıl	A	6,98
46872	238710	4368432	Kum, çakıl	A	6,98
52883	233229	4371709	Kil kum çakıl	A	6,98
53185	241237	4367659	Kil kum çakıl	A	6,98
53974	237189	4369394	Kil kum çakıl	A	6,98
53975	236566	4370040	Kil kum çakıl	A	6,98
54088	241903	4369895	Kil kum çakıl	A	6,98
54210	236095	4372404	Kil kum çakıl	A	6,98
57386	236834	4369874	Kil kum çakıl	A	6,98
57620	243516	4366645	Kil kum çakıl	A	6,98

EK 8 Model Tarafından Hesaplanan Yeraltı Suyu Seviyeleri İle Haziran 2014'te Ölçülen Yeraltı Suyu Yükülerinin Karşılaştırması

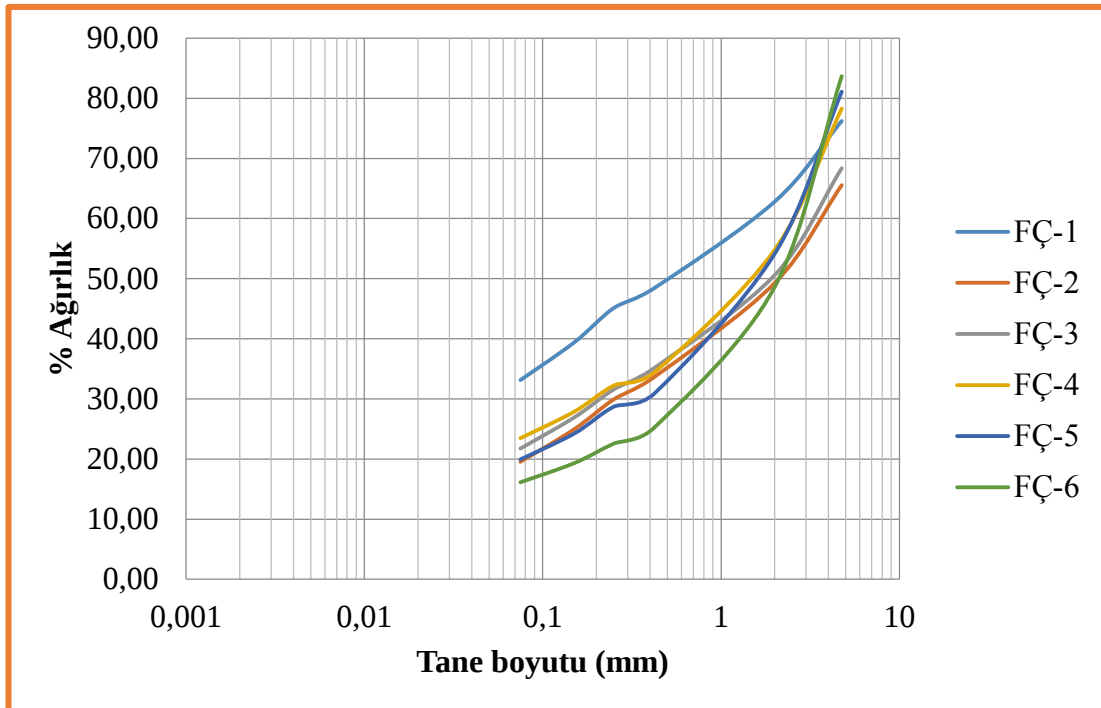
Ölçüm noktaları	X	Y	Z	Su seviye (m)	Model sonucu yeraltı suyu yükü (m)	Haziran 2014 yeraltı suyu yükü (m)
ÇG-1	251656	4361996	940	4,35	936,2831	935,65
ÇG-2	251766	4361974	930	1,45	936,1851	928,55
ÇG-3	251802	4361840	938	3,35	935,7618	934,65
ÇK-4	252444	4361357	954,23	2,40	947,6437	951,83
İYKT-1	247483	4366858	932	2,10	920,8895	929,9
KK	234252	4371969	961,47	6,50	960,1865	954,97
CKÇ-1	232273	4372184	965	6,90	958,9297	958,1
CKÇ-2	232299	4372171	967	8,30	958,4575	958,7
AKÇ	250349	4364866	925	3,70	930,6281	921,3
YVK	244788	4371930	921,44	13,00	915,7745	908,44
PVK-1	244580	4369401	921	1,20	914,8514	919,8
PVK-2	244848	4369390	917,95	1,25	913,9055	916,7
PvK-3	245856	4369135	920,65	1,00	911,8334	919,65
SKGVK	247841	4364268	932,88	3,50	931,2175	929,38
İKGK	247877	4366379	923,61	2,75	921,6946	920,86
İKK	247483	4366674	924,63	2,95	921,3334	921,68
BMVK	236600	4370353	947,74	7,40	943,0754	940,34
DM-DÜ-Y1	233942	4372819	952,89	1,20	951,9115	951,69
DM-DÜ-Y2	233781	4372751	949,96	1,60	954,6359	948,36
PGY	238483	4371597	932,04	2,55	931,6453	929,49
AFKK	243876	4372144	914,39	3,20	914,8822	911,19

EK 9 Tane Boyu Dağılım Analizleri Sonucunda Elde Edilen Eklenik Tane Boyu Dağılım Eğrileri

Porsuk Çayı



Felent Çayı



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Berihu Abadi BERHE

Doğum Yeri : Agulae

Doğum Tarihi :19.06.1980

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce, Türkçe

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Wukro Lisesi (2001)

Lisans : Mekelle Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Fakültesi Uygulama Jeoloji Bölümü (2005).

Yüksek Lisans : Addis Ababa Üniversitesi Fenbilimleri Fakültesi Yerbilimleri Bölümü (Eylül 2005-Temmuz 2008).

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Wollo Üniversitesi/ Bilimsel ve Teknoloji Fakültesi/Jeoloji Bölümü (Eylül 2007-2009).

Hakemli Dergiler (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)

1. **Berhe, B. A.**, Çelik M., Dokuz U, E. (2015). Kütahya Ovası'ndaki Yüzey ve Yeraltı Sularının Sulama Suyu Kalitesi Açısından İncelenmesi, Türkiye, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 150, 147-163 (Kontrol No: 1523201).

Uluslararası Katılımlı Bilimsel Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler

1. **Berhe, B. A.**, Çelik, M., Dokuz, U. E. 2015. Kütahya Ovasındaki Suların İçme Ve Zirai Kullanımlarının Değerlendirilmesi, Kütahya, Türkiye. 68. Türkiye Jeoloji Kurultayı, (Yayın No:1523202).
2. **Berhe, B. A.**, Çelik, M., Dokuz, U. E. 2014. Pompaj ve Yükselim Test Verilerinden Kütahya Ovası Akiferi Özelliklerinin Belirlenmesi. 67. Türkiye Jeoloji Kurultayı, (Yayın No:1040902).
3. Arslan, Ş., Çelik, M., Dokuz, U. E., **Berhe, B. A.** 2014. Köprüören Havzası (Kütahya) Yüzey Suları Ve Yeraltı sularında Arsenik Kirliliği. 67. Türkiye Jeoloji Kurultayı, (Yayın No:1040915).

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

1. Arslan, Ş., Çelik M., Dokuz, U., E., **Berhe B., A.** 2014. Surface And Ground Water Quality İn Köprüören Basin (Kütahya), Turkey. European Geosciences Uniongeneral Assembly 2014 (Yayın No:1040892).

Uluslararası Bilimsel Sempozyumlarda Sunulan ve Tam Metin Olarak Basılan Bildiriler

1. Arslan, Ş., Dokuz, U. E., Çelik, M., **Berhe, B. A.**, Cheng, Z. 2013. Köprüören Havzasında (Kütahya) İnsan Kaynaklı Su Kirliliği, 2.Tıbbi Jeoloji Çalıştay, (Yayın No:834018).

Projelerde Yaptığı Görevler

1. Kütahya Ovası Akifer Sisteminin Kavramsal Hidrojeolojik Modelinin Oluşturulması, BAP, Araştırmacı, 2013 (Devam Ediyor).
2. Köprüören Havzası (Kütahya) yüzey ve yeraltı sularında arsenik kirliliğinin hidrojeokimya ve çevresel izotoplarla incelenmesi, TÜBİTAK PROJESİ, Bursiyer, 2011-2014.