

**YERALTI SUYU AKIMININ MODFLOW  
KULLANILARAK SAYISAL MODELLENMESİ: BURSA  
İLİ KARACABEY VE MUSTAFAKEMALPAŞA OVASI  
UYGULAMASI**

**Muhammed Zakir KESKİN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERALTI SUYU AKIMININ MODFLOW KULLANILARAK SAYISAL  
MODELLENMESİ: BURSA İLİ KARACABEY VE MUSTAFAKEMALPAŞA  
OVASI UYGULAMASI**

**Muhammed Zakir KESKİN**  
0000-0002-7872-8080

Doç. Dr. Serdar KORKMAZ  
0000-0002-3393-1632  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Muhammed Zakir KESKİN tarafından hazırlanan “YERALTI SUYU AKIMININ MODFLOW KULLANILARAK SAYISAL MODELLENMESİ: BURSA İLİ KARACABEY VE MUSTAFAKEMALPAŞA OVASI UYGULAMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Serdar KORKMAZ

**Başkan** : Prof. Dr. Ali Osman DEMİR  
0000-0003-3409-6680  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Ziraat Fakültesi,  
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Doç. Dr. Serdar KORKMAZ  
0000-0002-3393-1632  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Babak VAHEDDOOST  
0000-0002-4767-6660  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin AKSEL EREN**  
**Enstitü Müdürü**

..!./...

**U.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

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

**beyan ederim.**

**19/09/2019**

**Muhammed Zakir KESKİN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YERALTI SUYU AKIMININ MODFLOW KULLANILARAK SAYISAL MODELLENMESİ: BURSA İLİ KARACABEY VE MUSTAFAKEMALPAŞA OVASI UYGULAMASI

**Muhammed Zakir KESKİN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman: Doç. Dr. Serdar KORKMAZ**

Bu çalışmada, Susurluk Havzasının Bursa ili Karacabey ve Mustafakemalpaşa ilçe sınırları içinde kalan kısmında yeraltı suyu dağılımının sayısal modellemesinin yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, belirtilen sınırlar içinde DSİ'ye ait 5 adet gözlem kuyusunda bulunan saatlik ölçüm yapan dalgıç veri cihazlarının 2013-2015 yılları arasında kaydettiği basınç değerleri temin edilmiştir. Temin edilen ham rasat değerleri, Diver Office programında atmosfer basıncına göre düzeltilerek her kuyu için günlük su seviyeleri tespit edilmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden bölgedeki istasyonlara ait günlük yağış ve buharlaşma değerleri temin edilmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında kuyular noktasal olarak işlenmiş ve eşyüksekti haritası yardımıyla havza sınırları belirlenmiştir. Havza elemanlarının, havza sınırlarının ve noktasal olarak kuyuların işlendiği haritalar MODFLOW arayüzüne aktarılarak 150 m x 150 m çözünürlüğünde bir grid oluşturulmuştur. 2013-2015 yıllarına ait günlük yağış ve buharlaşma değerleri girilmek suretiyle havzaya ait yeraltı suyu seviyesi dağılımı kararlı ve kararsız durumlar için hesaplanmıştır. Gözlem kuyularına ait veriler kullanılarak hidrolik parametreler kalibre edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** yeraltı suyu, sayısal model, MODFLOW  
**2019, ix + 63 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

**NUMERICAL MODELLING OF GROUNDWATER FLOW USING MODFLOW: A  
CASE STUDY IN KARACABEY AND MUSTAFAKEMALPAŞA PLAIN OF  
BURSA PROVINCE, TURKEY**

**Muhammed Zakir KESKİN**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Serdar KORKMAZ**

The aim of this study is to develop a numerical model of groundwater flow in the lower part of Susurluk Basin located within the boundaries of Karacabey and Mustafakemalpaşa districts of Bursa. For this purpose, the pressure data of 5 observation wells recorded by data logger devices between the years 2013-2015 within the study area were provided from DSİ. The obtained raw data was used to find the distance of the water level from the surface for each well. Daily precipitation and evapotranspiration data of the region recorded by weather stations was obtained from the General Directorate of Meteorology. In GIS environment, the wells were marked as points and boundaries of the basin were determined using a topographic map and a Digital Elevation Model. Shapefiles containing aquifer boundaries and well locations were transferred to MODFLOW interface and a 150 m x 150 m resolution grid was formed. Using all available data, steady-state and transient groundwater flow simulations were performed for years 2013-2015 and the groundwater level distribution was obtained. Hydrologic parameters were also estimated.

**Key words:** Groundwater, Numerical Model, MODFLOW  
**2019, ix + 63 pages.**

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması sűrecinde anlayıőla ve samimiyetle alıőmanın her aőamasında bilgi ve desteęinin esirgemeyen deęerli danıőman hocam Sayın Do. Dr. Serdar KORKMAZ'a en içten teőekkűrlerimi arz ederim.

Veri paylaőımı ve arazi çalıőmaları ile çalıőmaya katkıda bulunan Devlet Su İőleri 1. Bűlge Műdűrlűęű'ne teőekkűr ederim.

Kıymetli katkıları ile tezi őekillendiren jűri űyelerine teőekkűrlerimi sunarım.

Bu sűreci benim için kolaylaőtıran ve her zaman yanımda desteklerini hissettięim sevgili aileme őűkranlarımı sunarım.

Muhammed Zakir KESKİN  
19/09/2019

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Kaynak Araştırması.....	3
2.2. Hidrolojik Döngü ve Su Potansiyeli .....	4
2.3. Akifer Parametreleri.....	6
2.4. MODFLOW Paket Programı .....	12
2.5. Parametre Tahmin Modeli .....	17
2.6. Hata Payı Hesaplama Yöntemleri .....	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	22
3.1. Arazi Çalışması .....	22
3.1.1. Susurluk Havzası.....	22
3.1.2. Çalışma Alanı.....	23
3.2. Veri Toplama .....	25
3.2.1. Rasat Kuyusu Otomatik Ölçüm Verileri .....	25
3.2.2. Rasat Kuyusu Manuel Ölçüm Verileri .....	27
3.2.3. Meteorolojik Veriler .....	27
3.2.4. Susurluk Çayı AGİ Verileri .....	28
3.3. Uygulama .....	28
3.3.1. Diver Office .....	29
3.3.2. CBS Çalışması .....	30
3.3.3. Sayısal Modelleme .....	33
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	39
4.1. Kararlı Durum .....	39
4.2. Kararsız Durum.....	45
4.3. AGİ Verileri ile Çözüm.....	55
4.4. Değerlendirme.....	56
4.5. Tartışma .....	57
5. SONUÇ .....	59
KAYNAKLAR .....	60
ÖZGEÇMİŞ .....	63



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$A$	Brüt akım kesiti alanı
$b$	Akifer kalınlığı
$C$	İletkenlik
$c$	Boyutsuz katsayı
$d$	Ortalama boşluk çapı
$h$	Hidrolik yük
$i$	Hidrolik eğim
$K$	Hidrolik iletkenlik
$k$	Özgün permeabilite
$K_{xx}$	x koordinat eksenini boyunca hidrolik iletkenlik
$K_{yy}$	y koordinat eksenini boyunca hidrolik iletkenlik
$K_{zz}$	z koordinat eksenini boyunca hidrolik iletkenlik
$L$	Akış uzunluğu
$l_w$	Akış yönüne dik enkesit alanı
$n$	Porozite
$Q$	Akım debisi
$R$	Birim hacim için akifere giren/çıkan debi terimi
$S_s$	Özgül depolama katsayısı
$S_y$	Özgül Verim
$t$	Malzemenin akış yönündeki kalınlığı
$V_T$	Toplam akifer hacmi
$V_{wd}$	Çekilen suyun hacmi
$w_i$	Her gözlem için atanan bir ağırlık faktörüdür
$\bar{x}$	x değerlerinin ortalaması
$\bar{y}$	y değerlerinin ortalaması
$y^{ort}$	Gözlem verilerinin ortalaması
$y_i^{sim}$	t anındaki simülasyon değeri
$y_i^{göz}$	t anındaki gözlem değeri
$\Delta H$	Hidrolik seviye kaybı
$\Delta h$	Birim yük kaybı
$\Delta V_w$	Birim akiferden salınan su
$\alpha$	Akiferin sıkıştırılabilirliği
$\beta$	Suyun sıkıştırılabilirliği
$\gamma$	Akışkanın özgül ağırlığı
$\mu$	Dinamik viskozite

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AGİ	Akım Gözlem İstasyonu
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
DSİ	Devlet Su İşleri
ET	Evapotranspiration
GMS	Groundwater Modeling System (Yeraltı Suyu Modelleme Sistemi)
MAE	Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)
NSE	Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı)
OMH	Ortalama Mutlak Hata
PEST	Parameter Estimation (Parametre Tahmini)
RMSE	Root Mean Square Error (Ortalama Karekök Hata)
TIN	Triangulated Irregular Network (Üçgenlenmiş Düzensiz Ağ)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Hidrolojik döngü. Küresel su döngüsünün üç ana yolu vardır: yağış, buharlaşma ve su buharı taşınımı. Parantez ( ) içindeki sayılar her rezervuar için stokları ( $10^6 \text{ km}^3$ ) olarak gösterir. Köşeli parantez [ ] içindeki sayılar ( $10^6 \text{ km}^3/\text{yıl}$ ) cinsindedir. (Berner ve Berner 1987).....	4
Şekil 2.2. Dünya yüzeyinde (veya yüzeğe yakın) su dağılımı. Sadece çok az miktarda tatlı su (toplam suyun $< \% 0,3$ 'ü) insanlar ve diğer canlı yaşam için uygundur. (Maurits la Riviere 1989).....	6
Şekil 2.3. (a) Geleneksel yaklaşım ve (b) CHD paketinde kullanılan yaklaşım ile zamana bağlı değerlerin lineer enterpolasyon ile belirlenmesi .....	13
Şekil 2.4. Buharlaşma-yeraltı suyu seviye ilişkisi .....	14
Şekil 2.5. Buharlaşmanın derinlikle ilişkisi-ET oranı grafiği .....	15
Şekil 2.6. STR ve SFR paketleri tarafından kullanılan düzenli akış şeması .....	16
Şekil 2.7. Farklı korelasyon katsayısı değerlerine sahip dağılım diyagramı örnekleri ...	20
Şekil 3.1. Susurluk Havzası Fiziki Haritası (Anonim, 2012).....	23
Şekil 3.2. Çalışma alanının harita görünümü .....	24
Şekil 3.3. Mini-Diver cihazından verilerin aktarılması.....	26
Şekil 3.4. Baro-Diver cihazı.....	26
Şekil 3.5. Seviyemetre cihazı ile yapılan manuel ölçümler .....	27
Şekil 3.6. MODFLOW yeraltı suyu modellemesi için iş akış şeması.....	29
Şekil 3.7. Diver Office çalışma prensibi .....	30
Şekil 3.8. Thiessen poligonu ile havzanın yağış bölgelerine ayrılması .....	32
Şekil 3.9. Susurluk Çayı üzerindeki Yahyaköy AGİ istasyonu konumu ve debi verilerinin karşılaştırıldığı çıkış noktası .....	37
Şekil 4.1. Kararlı durum hidrolik iletkenlik kalibrasyonu grafiği (2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait ortalama değerlerdir).....	39
Şekil 4.2. Havzanın 2013 yılına ait yeraltı suyu seviyesi dağılımı (kararlı durum).....	40
Şekil 4.3. Havzanın 2014 yılına ait yeraltı suyu seviyesi dağılımı (kararlı durum).....	41
Şekil 4.4. Havzanın 2015 yılına ait yeraltı suyu seviyesi dağılımı (kararlı durum).....	41
Şekil 4.5. Kuyu seviyeleri için simülasyon verilerinin gözlem değerlerinden sapması-2013 (kararlı durum) .....	43
Şekil 4.6. Kuyu seviyeleri için simülasyon verilerinin gözlem değerlerinden sapması-2014 (kararlı durum) .....	43
Şekil 4.7. Kuyu seviyeleri için simülasyon verilerinin gözlem değerlerinden sapması-2015 (kararlı durum) .....	44
Şekil 4.8. Hidrolik iletkenlik ve özgül verimin PEST ile kalibrasyonu için havzanın bölgelere ayrılması.....	45
Şekil 4.9. 2013 yılı 5 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	48
Şekil 4.10. 2013 yılı 58578 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	48
Şekil 4.11. 2013 yılı 58579 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	49
Şekil 4.12. 2013 yılı 58580 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	49

Şekil 4.13. 2013 yılı 2 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	50
Şekil 4.14. 2014 yılı 5 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	50
Şekil 4.15. 2014 yılı 58578 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	51
Şekil 4.16. 2014 yılı 58579 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	51
Şekil 4.17. 2014 yılı 58580 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	52
Şekil 4.18. 2014 yılı 2 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	52
Şekil 4.19. 2015 yılı 5 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	53
Şekil 4.20. 2015 yılı 58578 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	53
Şekil 4.21. 2015 yılı 58579 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	54
Şekil 4.22. 2015 yılı 58580 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	54
Şekil 4.23. 2015 yılı 2 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği.....	55
Şekil 4.24. AGİ değerleri ile yapılan simülasyon (1 Ekim 2013 – 30 Eylül 2014) .....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Farklı jeolojik malzemeler için hidrolik iletkenlik ve porozite değerleri aralığı (Freeze ve Cherry 1979 ve Back vd. 1988) .....	9
Çizelge 2.2. Özgül Verim ( $S_y$ ) değerleri (Johnson 1967).....	10
Çizelge 3.1. Veri tablosu .....	28
Çizelge 3.2. MODFLOW paket girdi verileri tablosu.....	34
Çizelge 3.3. Modelleme kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlar .....	35
Çizelge 3.4. STR1 paketi girdi verileri tablosu.....	38
Çizelge 4.1. Farklı hidrolik iletkenlik değerleri için kuyu seviyelerinin ortalama mutlak hataları (kararlı durum) .....	39
Çizelge 4.2. 2013 yılı için kuyularda ölçülen su seviyeleri ile modelde tespit edilen su seviyeleri ve hata payları (kararlı durum) .....	42
Çizelge 4.3. 2014 yılı için kuyularda ölçülen su seviyeleri ile modelde tespit edilen su seviyeleri ve hata payları (kararlı durum) .....	42
Çizelge 4.4. 2015 yılı için kuyularda ölçülen su seviyeleri ile modelde tespit edilen su seviyeleri ve hata payları (kararlı durum) .....	42
Çizelge 4.5. Kalibrasyon işlemi (PEST) sonucu havzanın farklı bölgeleri için elde edilen hidrolik iletkenlik ve özgül verim değerleri (2013 yılı).....	46
Çizelge 4.6. 2013 yılı kalibrasyon işlemi sonucu simülasyona ait hata verileri (Kararsız durum) .....	46
Çizelge 4.7. 2014 yılı simülasyonuna ait hata verileri (Kararsız durum) .....	47
Çizelge 4.8. 2015 yılı simülasyonuna ait hata verileri (Kararsız durum) .....	47
Çizelge 4.9. Susurluk Çayı Yahyaköy AĞI için giriş ve çıkış debi değerleri.....	56

## 1. GİRİŞ

Su geçmişten günümüze insanlığın faydalandığı kıymetli bir doğal kaynaktır. Günlük yaşam ve medeniyet ucuz, temiz suyun mevcudiyetine bağlıdır. Su kaynakları aynı zamanda gıda üretimi ve endüstriyel faaliyetlerin desteklenmesinde de önemlidir. Bir su kaynağı olarak yeraltı suyu genellikle daha ucuzdur, daha elverişlidir ve kirlenmeye karşı yüzey suyundan daha korunaklıdır. Yeraltı suyu çoğu zaman yeraltında bulunduğu ve farkına varılmadığı için çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan olumsuz sonuçlara yol açacak şekilde değer kaybına uğrar. Çevresel, ekonomik ve sosyal gereksinimleri karşılamak ve sürdürülebilir yeraltı suyu gelişimi sağlamak için yeraltı suyu kaynaklarını yönetmek insanoğlunun sorumluluğundadır. Artan su kullanımları mevcut su kaynaklarının tespitini, kapasitesinin bilinmesini ve kullanımının belirlenerek buna göre gelecek planlaması yapılmasını önemli kılmaktadır. Dolayısıyla yeraltı suyunun davranışını bilmek büyük önem arz etmektedir.

Yeraltı suyunun davranışının tespitinde en çok kullanılan yöntemlerden biri de sayısal modellemedir. Bu alanda kullanılan birçok yazılım mevcuttur. Bunlardan bazıları MODFLOW (McDonald ve Harbaugh 1988), MIKE-SHE (Refsgaard ve Storm 1995) ve MODHMS (Panday ve Huyakorn 2004) olarak sayılabilir. Sayısal model kullanmak suretiyle yapılan birçok havza modelleme çalışması mevcuttur. Örneğin, Gaur vd. (2011) çalışmalarında Banganga Nehri (Hindistan) alt havzası için havza yönetimi çalışmasında potansiyel bölge analizi için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve yeraltı suyu modellemesi için MODFLOW kullanmak suretiyle havza yönetimi yapmışlardır. Shu vd. (2012) MIKE SHE sayısal modeli ile Kuzey Çin Ovası'nın entegre hidrolojik modellemesini yapmışlardır. Liggett vd. (2013) blok merkezli yüzey-yeraltı hidrolojisi modeli kullanılarak yüzey iletkenlik yaklaşımının uygulanmasında MODHMS kullanmışlardır.

Yapılan çalışmanın amacı Susurluk Havzasının içinde yer alan Bursa ili Karacabey ve Mustafakemalpaşa ovasının yeraltı suyu sayısal modelini oluşturmak suretiyle yeraltı suyunun seviyelerini, akım yönlerini ve yıl içindeki değişimini belirlemek, ayrıca akifer parametreleri hakkında bilgi sahibi olmaktır. Yapılan çalışma ile havzada yapılacak yatırım, planlama veya iyileştirme çalışmaları için bilgi kaynağı oluşturmak, havzanın

yeraltı suyu seviyesinin daha kolay ve daha ucuz yolla takibine imkân sağlamak hedeflenmiştir.

Modelleme çalışması kapsamında, havzaya ait arazide yapılan ölçümler ve çeşitli kurumlardan alınan ham veriler kullanılmıştır. Bu veriler, bilgisayar programları ile kullanılabilir hale getirilmiş, Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında havzanın projeksiyonu ve boyutlandırılması yapılmıştır. MODFLOW (Harbaugh 2005) yazılımı kullanılarak yağış, buharlaşma ve diğer veriler girilmek suretiyle havzanın sayısal modellenmesi yapılmıştır. Modellemenin doğruluğunu tespit etmek amacıyla hata payları hesaplanmış, hidrolik iletkenlik (K), özgül verim ( $S_y$ ) gibi akifer parametrelerinin kalibrasyonu yapılarak model hataları minimize edilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde konu ile ilgili daha önce MODFLOW kullanılarak yapılan akademik çalışmalardan bahsedilmiş, ilgili teorik bilgi, formül ve grafiklere yer verilmiştir. Üçüncü bölümde tezde kullanılan verilerden ve bu verilerle kullanılarak yapılan modelleme çalışmasından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ve bulgular sunulmuştur. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar belirtilerek yorumlanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kaynak Araştırması

Havza sayısal modellemesi alanında birçok çalışma mevcuttur. Bunlar arasında en yaygın kullanıma sahip model MODFLOW olup, yeraltı suyu modellemesi alanındaki çalışmaların önemli bir kısmı MODFLOW kullanılarak yapılmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

Lachaal vd. (2012) MODFLOW ve GIS araçlarını kullanarak yarı kurak bir bölgede - Zéramdine-Béni Hassen miyosen akifer sistemi, Ortadoğu Tunus- 3 boyutlu bir yeraltı suyu akış modeli uygulaması yapmışlardır. Yang vd. (2012) Daxing Bölgesindeki (Pekin) yeraltı suyu akışının sayısal modellemesini yapmışlardır. Chen vd. (2012) çalışmalarında yeraltı suyu girişi, yağış ve buharlaşma gibi çevresel etmenlerin, Nebraska, Sand Hills'de bulunan kum tepelerindeki su döngüsüne etkisini araştırmışlar ve simülasyon için MODFLOW modelini kullanmışlardır. Surinaidu vd. (2014) Andhra Pradesh, Hindistan'da farklı maden geliştirme aşamalarında kömür madenlerine giren yeraltı sularını hesaplamak için hidrojeolojik ve yeraltı suyu modelleme çalışmalarında MODFLOW'u kullanmışlardır. Qiu vd. (2015) Çin'de Jilin kentsel bölgesinde bir nehir vadisi havzasında yeraltı suyu akımının sayısal simülasyonu için MODFLOW-2000 modelini kullanmışlardır. Wang vd. (2015) çalışmalarında yağış yoğunluğunun yeraltı suyu seviyelerine olan tesirini MODFLOW ile modellemişlerdir.

Korkmaz vd. (2016) çalışmalarında Eskişehir havzasının yeraltı ve yüzey akımlarını kararsız durum için MODFLOW ile modellemişlerdir. Maheswaran vd. (2016) MODFLOW kullanarak Ganj Nehri havzası için bölgesel ölçekli yeraltı suyu modelleme çalışması yapmışlardır. Doble vd. (2017) Sığ yeraltı suyu sistemlerinde yağış ve evapotranspirasyon işlemlerinin uygulanması için çalışmalarında MODFLOW kullanmışlardır. Moharir vd. (2017) MODFLOW yazılımını kullanarak pompalama testi yardımıyla bazaltik kayalardaki akifer parametrelerinin tespiti için çalışmalar yapmışlardır. Nkhonjera vd. (2017) iklim değişikliğinin Olifants Nehri havzasının yeraltı sularına olan doğrudan ve dolaylı etkilerinin önemini, havza modellemesi yaparak araştırmışlardır. Sobeih vd. (2017) Mısır'ın batı Nil deltasına dair çalışmalarında yeraltı

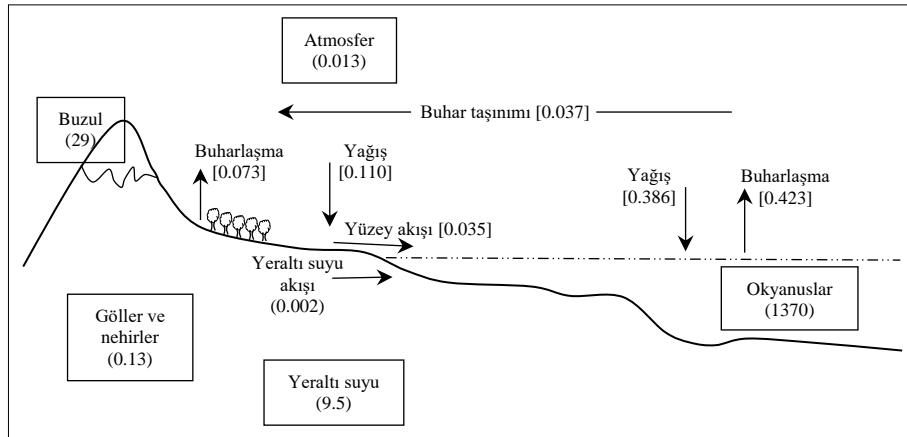


suyu seviyelerinin kontrolü için MODFLOW kullanmak suretiyle sayısal model oluşturmuşlardır.

Boughariou vd. (2018) çalışmalarında Tunus'un Sfax bölgesinde iklim değişikliği ve yüksek tüketim koşulları altında akifer davranışını CBS ve MODFLOW 2000 kullanarak modellemişlerdir. Liu vd. (2018) çalışmalarında kuzeybatı Çin'de mevcut kurak kıta içi nehir havzalarının vaha bölgelerinde yoğun tarımsal faaliyetlerin uzun vadede yeraltı suyu dinamiklerine etkisini araştırmak için MODFLOW ile havza modellemesi yapmışlardır. Tam ve Nga (2018) Hanoi, Vietnam'da yeraltı suyu kaynakları üzerinde kentleşme etkisinin değerlendirilmesi çalışmasında modelleme için MODFLOW'u kullanmışlardır.

## 2.2. Hidrolojik Döngü ve Su Potansiyeli

Yeraltı ve yüzey sularını birbiri ile ilişkilendirmek ve yeraltı sularının sistem içindeki rolünü kavramak için ilk adım, hidrolojik döngüyü temel bir çerçeve olarak benimsemektir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi hidrolojik döngü, dünyanın yüzeyine yakın suyun okyanustan atmosfere ve daha sonra yağış, yüzey akışı ve yeraltı suyu akışı yoluyla tekrar okyanusa akması şeklinde devam eden döngü olarak bilinmektedir.

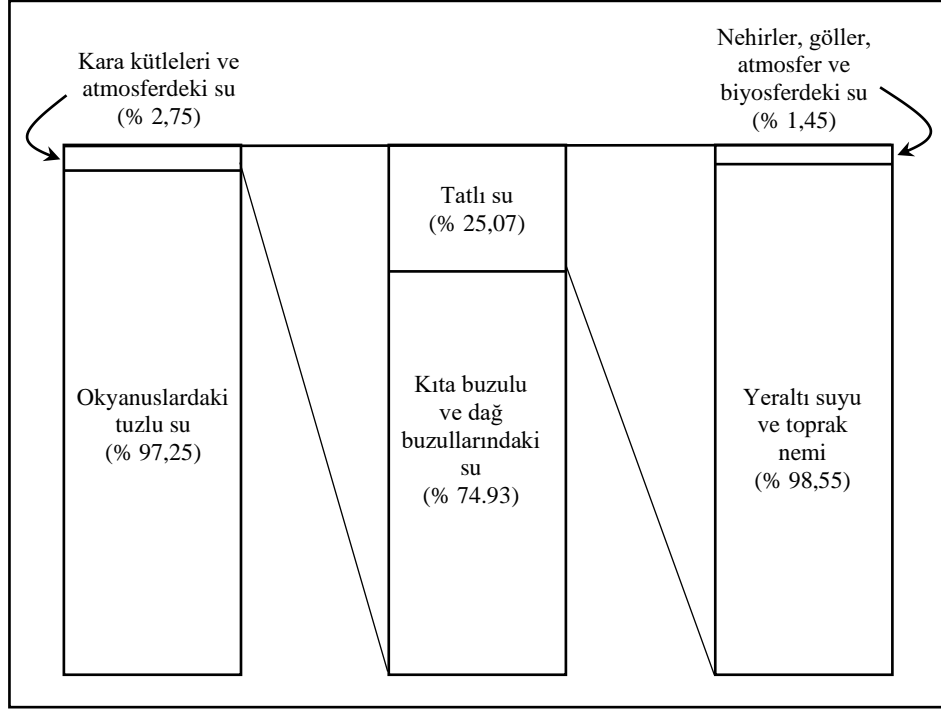


**Şekil 2.1.** Hidrolojik döngü. Küresel su döngüsünün üç ana yolu vardır: yağış, buharlaşma ve su buharı taşınımı. Parantez () içindeki sayılar her rezervuar için stokları ( $10^6 \text{ km}^3$ ) olarak gösterir. Köşeli parantez [] içindeki sayılar ( $10^6 \text{ km}^3/\text{yıl}$ ) cinsindedir. (Berner ve Berner 1987)

Okyanusun güneş ışınımı ile ısınması suyun, atmosfere buharlaşmasına ve rüzgârlar tarafından buharın yoğunlaştığı ve yağış olarak düştüğü kara kütlelerine taşınmasına neden olur. Yağış ya doğrudan okyanusa geri döndürülür, bitki örtülü yüzeyler tarafından tutularak buharlaşma ile atmosfere geri döndürülür, birikerek yüzey akışı oluşturur ya da toprağa ve altında yatan kayalara sızarak yeraltı suyunu oluşturur. Yüzeysel akış ve yeraltı suyu akışı okyanusa akan akarsu ve nehirlerle katkıda bulunurken, göller ve göletler geçici depolama sağlar.

Şekil 2.2’de okyanuslardaki tuzlu suyun küresel döngüdeki toplam suyun %97,25’ine tekabül ettiği görülmektedir. Bu durumda kara kütleleri ve atmosfer toplam suyun %2,75’ini içerir. Kıta buzulu ve dağ buzulları %2,05, 4 km’ye kadar derinlikteki yeraltı suları %0,68, tatlı su gölleri %0,01, toprak nemi %0,005 ve nehirler %0,0001 oranlarına sahiptir. Karalardaki suyun yaklaşık %75’i buzullarda hapsolmüştür veya tuzludur. Karalardaki suyun kalan çeyreğinin %98’inin yeraltında depolandığı düşünöldüğünde yeraltı suyunun önemi anlaşılabilir. 4 km derinliğe kadarki su döngüsüne dahil edilen erişilebilir yeraltı suya ek olarak, kaya gözeneklerinde bulunan suyun hacmine dair  $53 \times 10^6 \text{ km}^3$  (Ambroggi 1977) ile  $320 \times 10^6 \text{ km}^3$  (Garrels vd. 1975) arasında tahminler mevcuttur.

Ölkemiz için değerlendirildiğinde, teknik ve ekonomik şartlar çerçevesinde çeşitli maksatlar için tüketilebilecek yerüstü suyu potansiyeli, yurt içindeki akarsulardan  $95 \times 10^6 \text{ m}^3$  ve komşu ölkelerden gelen akarsulardaki  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$  su ile birlikte yıllık ortalama olarak  $98 \times 10^6 \text{ m}^3$ ’tür. Teknik ve ekonomik olarak çekilebilir yeraltı suyu potansiyeli de  $14 \times 10^6 \text{ m}^3$  (toplamın yaklaşık %34’ü) olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla ölkemizde mevcut durumda kullanılabilir yerüstü ve yeraltı suyu potansiyeli  $112 \times 10^6 \text{ m}^3$  (toplamın yaklaşık %58’i) alınabilir. Hâlihazırda toplam kullanılabilir su potansiyelinin  $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ ’ü (toplamın yaklaşık %36’sı) kullanılmaktadır (Anonim, 2012).



**Şekil 2.2.** Dünya yüzeyinde (veya yüzeeye yakın) su dağılımı. Sadece çok az miktarda tatlı su (toplam suyun < % 0,3'ü) insanlar ve diğer canlı yaşam için uygundur. (Maurits la Riviere 1989)

### 2.3. Akifer Parametreleri

**İletkenlik (C):** Birçok MODFLOW sınır koşulu türü (nehirler, drenler vs.) bir iletkenlik parametresi içerir. MODFLOW, sınır koşulu gerilimlerinden dolayı modele giren ve çıkan suyun miktarını belirlemek için iletkenliği kullanır. Kavramsal bir model kullanıldığında, iletkenlik teriminin hesaplanması ve girilmesi durumu, nesnenin poligon, çizgi veya nokta olmasına bağlıdır. Bunu tam olarak açıklamadan önce, iletkenlik tanımının kısa bir incelemesi uygun olur. Darcy Kanunu'na göre:

$$Q = KiA \quad (2.6)$$

$Q$ : Akım debisi ( $L^3/T$ )

$K$ : hidrolik iletkenlik ( $L/T$ )

$i$ : hidrolik gradyan (birimsiz)

$A$ : brüt akım kesiti alanı ( $L^2$ )

Darcy Kanunu ayrıca şöyle de ifade edilebilir:

$$Q = K \frac{\Delta H}{L} A \quad (2.7)$$

$\Delta H$ : hidrolik seviye kaybı (L)

$L$ : akış uzunluğu (L)

Burada sağ tarafta tek bilinmeyen  $\Delta H$  olduğu için, diğer terimlerin beraber ele alınıp tamamına iletkenlik denilmesi uygun olur:

$$Q = C \Delta H \quad (2.8)$$

$C$ : iletkenlik ( $L^2/T$ )

Bu da iletkenlik için şu genel ifadeyi verir:

$$C = \frac{K}{L} A \quad (2.9)$$

Bu, aşağıdaki şekilde daha spesifik olarak ifade edilebilir:

$$C = \frac{K}{t} l_w \quad (2.10)$$

$t$ : malzemenin akış yönündeki kalınlığı (L)

$l_w$ : akış yönüne dik enkesit alanı ( $L^2$ )

**Hidrolik İletkenlik ( $K$ ):** Bir sıvının (genellikle suyun) gözenek boşlukları veya kırıkları içinde hareket etme kolaylığını tanımlayan bir malzeme özelliğidir. Malzemenin mutlak geçirgenliğine, doymunluk derecesine ve sıvının yoğunluk ve viskozitesine bağlıdır. Doymuş hidrolik iletkenlik, doymuş ortam içinde su hareketini açıklar. Tanım olarak,

hidrolik iletkenlik, gözenekli ortamın geçirgenliğini gösteren hızın hidrolik eğime oranıdır.

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (2.4)$$

$K$  = Hidrolik iletkenlik (m/sn)

$\gamma$  = Akışkanın özgül ağırlığı (kg/m<sup>2</sup>sn<sup>2</sup>)

$\mu$  = Dinamik viskozite (kg/m sn)

$k$  = özgül permeabilite (m<sup>2</sup>)

Özgül permeabilite şu şekilde ifade edilir:

$$k = cd^2 \quad (2.5)$$

$k$  = özgül permeabilite (m<sup>2</sup>)

$c$  = katsayı (boyutsuzdur)

$d$  = ortalama boşluk çapı (m)

Çizelge 2.1’de farklı zemin yapıları için hidrolik iletkenlik ve porozite değer aralıkları verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Farklı jeolojik malzemeler için hidrolik iletkenlik ve porozite değerleri aralığı (Freeze ve Cherry 1979 ve Back vd. 1988)

Jeolojik malzeme	Hidrolik İletkenlik, $K$ (m/s)	Porozite, $n$
Akarsu çökeltileri (alüvyon)	$10^{-5} - 10^{-2}$	0.05 – 0.35
Buzul çökeltisi		
– Bazal buzul tortusu	$10^{-11} - 10^{-6}$	0.30 – 0.35
– Göl silt ve kili	$10^{-13} - 10^{-9}$	0.35 – 0.70
– Buzul artığı kum ve çakıl	$10^{-7} - 10^{-3}$	0.25 – 0.50
– Lös	$10^{-11} - 10^{-5}$	0.35 – 0.50
Kumtaşı	$10^{-10} - 10^{-5}$	0.05 – 0.35
Şist		
– Sağlam	$10^{-13} - 10^{-9}$	0 – 0.10
– Çatlak	$10^{-9} - 10^{-5}$	0.05 – 0.50
Kiltaşı	$10^{-12} - 10^{-10}$	0.35 – 0.45
Dolomit	$10^{-9} - 10^{-5}$	0.001 – 0.20
Oolitli kireçtaşı	$10^{-7} - 10^{-6}$	0.01 – 0.25
Kalker		
– Birincil	$10^{-8} - 10^{-5}$	0.15 – 0.45
– İkincil	$10^{-5} - 10^{-3}$	0.005 – 0.02
Mercan kireçtaşı	$10^{-3} - 10^{-1}$	0.30 – 0.50
Karstik kireçtaşı	$10^{-6} - 10^0$	0.05 – 0.50
Mermer, çatlak	$10^{-8} - 10^{-5}$	0.001 – 0.02
Volkanik tüf	$10^{-7} - 10^{-5}$	0.15 – 0.40
Bazalt lav	$10^{-13} - 10^{-2}$	0 – 0.25
Volkanik ve metamorfik kayaçlar	$10^{-13} - 10^{-5}$	0 – 0.10
– Çatlak veya sağlam		

**Özgül Verim ( $S_y$ ):** Efektif poroziteye eşit veya daha az bir orandır; bu, belirli bir akiferin tüm suyunun yerçekimi etkisi altında kendiliğinden akmasına izin verildiğinde salıverdiği suyun hacminin toplam akifer hacmine oranını gösterir. Boyutsuzdur.

$$S_y = \frac{V_{wd}}{V_T} \quad (2.11)$$

$V_{wd}$  : çekilen suyun hacmi ( $L^3$ )

$V_T$  : toplam akifer hacmi ( $L^3$ )

Çizelge 2.2’de farklı zemin formasyonları için özgül verim değer aralıkları verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Özgül Verim ( $S_y$ ) değerleri (Johnson 1967)

<i>Malzeme</i>	<i>Özgül Verim (%)</i>		
	<i>Min.</i>	<i>Ort.</i>	<i>Max.</i>
<i>Konsolide olmayan zemin</i>			
Kil	0	2	5
Kumlu kil (çamur)	3	7	12
Silt	3	18	19
İnce kum	10	21	28
Orta boy kum	15	26	32
İri daneli kum	20	27	35
Çakıllı kum	20	25	35
İnce çakıl	21	25	35
Orta boy çakıl	13	23	26
İri daneli çakıl	12	22	26
<i>Konsolide zemin</i>			
İnce daneli kumtaşı		21	
Orta daneli kumtaşı		27	
Kireçtaşı		14	
Şist		26	
Silttaşı		12	
Tüf		21	
<i>Diğer zeminler</i>			
Kumul		38	
Lös		18	
Turba		44	
Buzul tortusu, ağırlıklı silt		6	
Buzul tortusu, ağırlıklı kum		16	
Buzul tortusu, ağırlıklı çakıl		16	

**Depolama Katsayısı (S):** Hidrolik yükün bir birim düşmesi için basınçlı akiferin birim alanından çekilmesi gereken suyun hacmidir. Birimsizdir. Basınçsız akiferde ise özgül verime ( $S_y$ ) eşittir.

Basınçsız akiferde:

$$S = \frac{\Delta V_w}{A \Delta h} = S_y \quad (2.12)$$

$\Delta V_w$  : birim akiferden salınan su ( $L^3$ )

$A$  : akiferin birim alanı ( $L^2$ )

$\Delta h$  : birim yük kaybı (L)

Basınçlı akiferde:

$$S = b\gamma(\beta n + \alpha) \quad (2.13)$$

$b$  : akifer kalınlığı (L)

$\gamma$  : akiferin birim hacim ağırlığı (P/L)

$\beta$  : suyun sıkıştırılabilirliği (1/P)

$n$  : porozite

$\alpha$  : akiferin sıkıştırılabilirliği (1/P)

**Özgül Depolama ( $S_s$ ):** Hidrolik yükün bir birim düşmesi için basınçlı akiferin birim hacminden çekilmesi gereken suyun hacmidir.

$$S_s = \frac{\Delta V_w}{V_T \Delta h} = (\beta n + \alpha)\gamma \quad (2.14)$$

$$S_s = \frac{\Delta V_w}{Ab \Delta h} = \frac{1}{b} S; \quad S = b S_s \quad (2.15)$$

$\Delta V_w$  : birim akiferden salınan su ( $L^3$ )

$V_T$  : birim akiferin toplam hacmi ( $L^3$ )

$A$  : birim akiferin alanı ( $L^2$ )

$\Delta h$  : birim yük kaybı (L)

$b$  : akifer kalınlığı (L)

$\gamma$  : suyun birim hacim ağırlığı ( $ML^{-2}T^{-2}$ )

$\beta$  : suyun sıkıştırılabilirliği (1/P)



$n$  : porozite (birimsiz 0 ile 1 arasında bir değer)

$\alpha$  : akiferin sıkıştırılabilirliği (1/P)

#### 2.4. MODFLOW Paket Programı

MODFLOW, 3 boyutlu, hücre merkezli, sonlu fark metodu kullanan doymuş bir akım modelidir (McDonald ve Harbaugh 1988, Harbaugh 2005). Hem kararlı hem kararsız durum için analiz yapabilir ve çok çeşitli sınır koşulu ve girdi seçeneklerini barındırır. Bu çalışmada, MODFLOW ile modelleme yapabilmek için GMS (Owen vd. 1996) arayüzü kullanılmıştır. GMS (The Groundwater Modeling System) yeraltı suyu simülasyonlarını gerçekleştirmek için kapsamlı bir grafiksel kullanıcı ortamıdır. GMS sisteminin tamamı bir grafik kullanıcı arayüzü ve bir dizi analiz yazılımından (MODFLOW, MT3DMS, vs.) oluşur. Birkaç model türü desteklenir ve farklı modeller ve veri türleri arasında bilgi paylaşımı için olanaklar sağlanır.

MODFLOW modeli de yeraltı suyu modellerinin çoğu gibi sonlu fark eşitliği ile çözüm yapmaktadır (Eşitlik 2.1). Eşitlik, su dengesi eşitliği ve Darcy yasasının bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Kararsız durum koşulu için gözenekli bir ortamdaki üç boyutlu yeraltı suyu akış eşitliği olarak verilmiştir ve kararlı durum koşullarında eşitliğin sağ tarafı sıfır olur.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1)$$

Burada;

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  ve  $K_{zz}$  : x, y ve z koordinat eksenleri boyunca hidrolik iletkenlik ( $LT^{-1}$ )

$S_s$  : özgül depolama katsayısı ( $L^{-1}$ ),

$h$  : hidrolik yük (L),

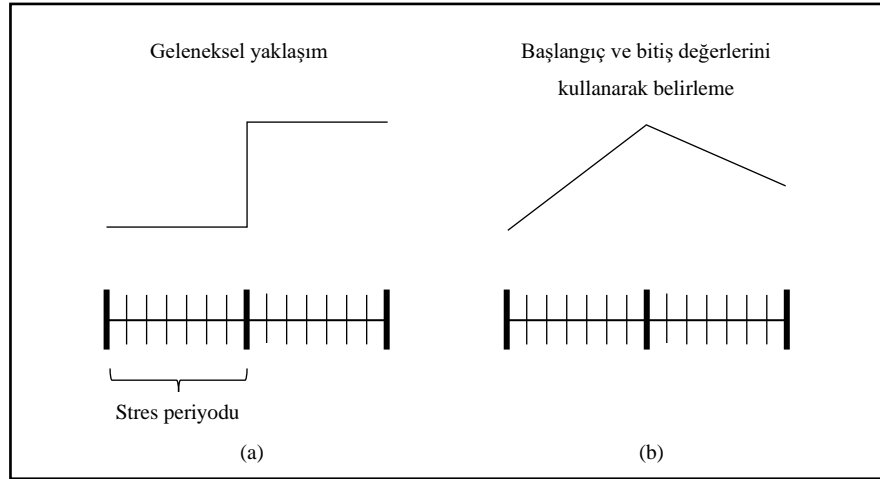
$R$  : birim hacim için akifere giren/çıkan debi terimidir ( $T^{-1}$ ) (akım akifere giriyor ise  $R>0$ ; akım akiferden çıkıyor ise  $R<0$ )

$t$  : seviye değişimi için geçen zaman (T)

GMS, MODFLOW’u işlem öncesi ve sonrası için desteklemektedir. MODFLOW için giriş verileri GMS tarafından üretilir ve bir dizi dosyaya kaydedilir. MODFLOW başlatıldığında bu dosyalar MODFLOW tarafından okunur. MODFLOW çıktısı daha sonra işlem sonrası için GMS’e aktarılır.

MODFLOW da bulunan bazı paketler şu şekildedir:

CHD (Time-Variant Specified-Head) Paketi: CHD paketi her stres periyodunda veri okur ve bu da sabit seviye hücrelerinde su seviyesinin değişken olabilmesini mümkün kılar. Zamana bağlı değişken veriler, CHD paketi ile kendine özgü bir şekilde ele alınmaktadır. Zamana bağlı değişken değerler stres periyodu kullanan paketlere atandığında, her stres periyodu için bir değer atanır. Bu değer stres periyodunun başındaki değeri temsil eder. Bu durumda Şekil 2.3’te görüldüğü gibi basamak şeklinde bir zaman serisi oluşur.



**Şekil 2.3.** (a) Geleneksel yaklaşım ve (b) CHD paketinde kullanılan yaklaşım ile zamana bağlı değerlerin lineer enterpolasyon ile belirlenmesi

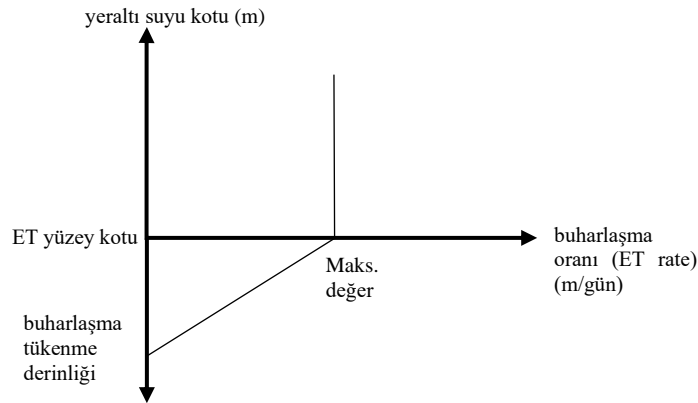
CHD paketi ile her stres periyodu için biri stres periyodunun başında, diğeri sonunda olmak üzere iki değer atanır. Bu da Şekil 2.3’te (b) bölümünde gösterildiği üzere stres periyodu aralığı boyunca lineer bir zaman serisi tanımlamayı mümkün kılar.

DRN (Drain) Paketi: Akiferdeki drenaj kanallarını modellemek için kullanılır. Su seviyesi drenaj kotunun üstünde olduğu sürece akiferden suyu çeker. Su seviyesi drenaj

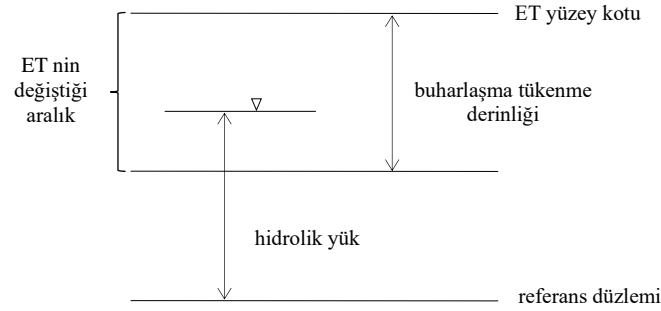
kotunun altına düştüğü takdirde drenajın etkisi yoktur. Suyun çekilme oranı su seviyesi ile drenaj kotu arasındaki kot farkı ile orantılıdır. Orantı sabiti, drenajı çevreleyen dolgu malzemesinin iletkenliğidir. Drenaj ile ilişkili iki parametre vardır. Bunlar kot ve iletkenliktir. Kot sabit değerli ya da değişken olabilir veya mevcut bir TIN formatında eşyüksekti haritasından alınabilir. İletkenlik sabit veya zamana bağlı değişken olabilir.

EVT (Evapotranspiration) Paketi: Modelleme sırasında suyun hücrelerden çekilmesi suretiyle bitki terlemesi ve direkt buharlaşma etkisini simüle etmek için kullanılır. Buharlaşma (ET) tipik olarak grid içindeki her düşey sütuna ait stres periyodu için değerler belirtilerek tanımlanır. Bu değerler, buharlaşmanın gerçekleştiği yüzey kotu (m), buharlaşma tükenme derinliği (ET extinction depth, m) ve maksimum buharlaşma oranıdır (maksimum ET rate, m/gün).

Buharlaşma tükenme derinliği, belirlenen yüzey kotuna göre alınır ve aşağı yönde pozitif değerler alır. Eğer su tablası belirtilen yüksekliğin üzerine çıkarsa buharlaşma maksimum miktarda gerçekleşir. Su tablası buharlaşma tükenme derinliğinin altına düşerse buharlaşma durur (Şekil 2.4). Eğer su tablası kotu bu iki sınır arasında kalırsa buharlaşma derinlikle ters orantılı olarak değişir (Şekil 2.5) (Banta, E. R. 2000).



**Şekil 2.4.** Buharlaşma-yeraltı suyu seviye ilişkisi



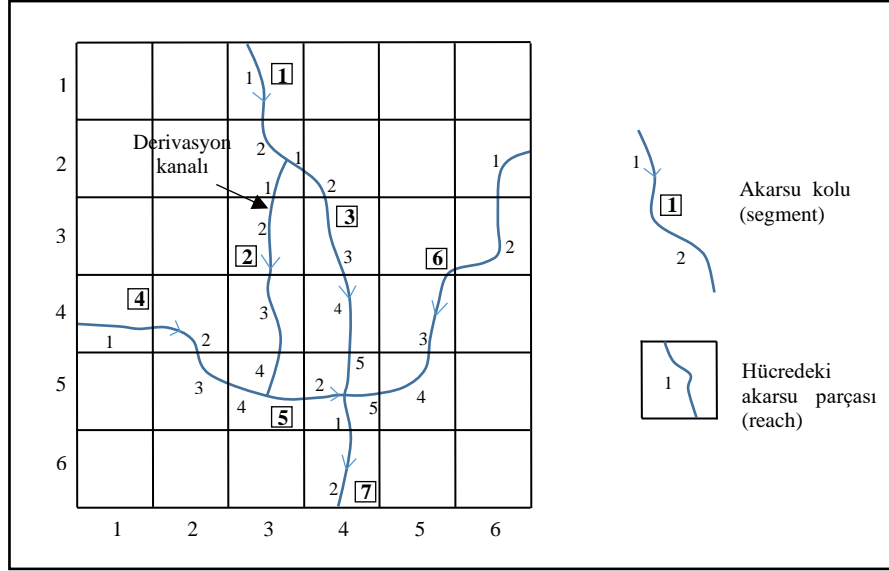
**Şekil 2.5.** Buharlaşmanın derinlikle ilişkisi-ET oranı grafiği

RCH (Recharge) Paketi: Akifere yağış ve sızma yoluyla giren beslenmeyi modellemek için kullanılır. Grid içinde bulunan hücelere bir beslenme değeri atanması ile tanımlanır. Beslenme oranının boyutu uzunluk/zaman'dır. Bu yüzden 0,1 m/gün değerinde bir beslenme oranına sahip olan bir hücrede 0,1 metrelik beslenme her gün için o hücrenin her metrekaresine dağıtılır.

RIV1 (River) Paketi: Havzadaki nehirleri modellemek için kullanılan pakettir. Bu paketin gerektirdiği nehir parametreleri su kotu, nehir taban kotu ve iletkenlik değeridir. Nehir tabanı sabittir. Fakat su kotu ve iletkenlik değeri sabit veya zamana bağlı değişken olabilir. Harita üzerinde bir çizgiye nehir özelliği atandığı zaman iletkenlik bu çizgi üzerinde düzgün olarak uygulanır. Fakat çizginin başı ve sonundaki düğümler için ayrı su kotu ve taban kotu değerleri uygulanır ve bu değerlerin iki düğüm noktası arasında doğrusal olarak değiştiği varsayılır.

STR/SFR (Stream)/(Streamflow-Routing) Paketleri: STR (veya STR1) ve SFR paketleri (Owen vd. 1996) akarsuların yeraltı suyu ile etkileşimini modellemek için kullanılır. RIV1 (River) paketinde olduğu gibi nehir ve su tablası kotlarına bağlı olarak su akiferden akarsuya veya akarsudan akifere akabilir. Fakat RIV1 paketinden farklı olarak su akarsuya girdiğinde sistemden çıkarılmamakta, debi akarsu boyunca ötelenmektedir. Bu akım öteleme metodunda belli bir zaman aralığında debi akış aşağısına (mansaba) doğru kütle korunumu prensibi ile anlık olarak ötelenmektedir. Akiferden nehre giren su, farklı bir hücreden tekrar akifere dönebilmektedir. Su seviyesini ölçmek için basit kanal

hidroliği ve Manning denklemi kullanılır. SFR paketi daha gelişmiş ve karmaşık hidrolik çözümler ve dağıtım seçenekleri sunar. STR paketi kullanabilmek için Şekil 2.6’da gösterildiği gibi eksiksiz ve düzenli bir akarsu ağı tanımlanması gerekmektedir.



**Şekil 2.6.** STR ve SFR paketleri tarafından kullanılan düzenli akış Şeması

Bir akarsu ağı kollardan oluşur. Akarsu kolları membadan mansaba doğru numaralandırılır. Bir akarsu kolu birden fazla hücreye yayılıyorsa her bir akarsu parçası membadan mansaba doğru numaralandırılır. Tek bir hücre birden fazla akarsu kolunu içerebilir.

Akış debisi sadece en membadaki akarsu parçası için ve pozitif bir değer olarak tanımlanabilir (Şekil 2.6’da 1,4,6 nolu akarsu kolları). Daha sonra akım öteleme yapılarak diğer kollar için debi değerleri elde edilir. Buna bir istisna olarak Şekil 2.6’da görülen 2 nolu koldaki derivasyon kanalıdır. Böyle bir durumda bu kanala giren akım debisi belirtilmelidir. Kanala giren akım debisi 1 nolu akarsu kolundan çıkarılacak ve debinin kalan kısmı 3 nolu akarsu koluna yönlendirilecektir.

STR paketinde her akarsu kolu için aşağıdaki değerler atanır:

- İletkenlik (m/gün)
- Giriş debisi (yalnızca en membadaki) (m<sup>3</sup>/gün)

- Akarsu kesitinin genişliği (kesitlerin dikdörtgen olduğu varsayılır)
- Kıvrımlılık (birimsiz)
- Pürüzlülük katsayısı

Ayrıca her düğüm noktası için aşağıdaki değerler atanır:

- Başlangıçtaki su kotu (m)
- Akarsu yatağının üst kotu (m)
- Akarsu yatağının alt kotu (m)

Manning denklemi, akımı akarsu boyunca ötelemek için kullanıldığında, akarsuyun dikdörtgen bir kesite sahip olduğu varsayılır. Veriler MODFLOW'a aktarıldığında GMS şu işlemleri yapar: Akarsuların geçtiği tüm hücrelerde akarsu parçasının uzunluğunu ve eğimini hesaplar, akarsu kollarını oluşturur ve akarsu parçası ile akarsu kollarına hesaplanan değerleri atar. MODFLOW'a aktarma yapıldığında düğüm noktalarında tanımlanan yukarıdaki değerler düğüm noktalarının arasında doğrusal olarak atanır. Her bir hücredeki akarsu parçası için akarsu yatağının üst kotlarının farkı, kıvrımlılık (sinuosity) faktörüyle çarpılmış olan akarsu parçasının uzunluğuna bölünerek hücrelere atanan eğim değeri hesaplanır.

## 2.5. Parametre Tahmin Modeli

PEST (Parameter ESTimation), Doherty (2013) tarafından geliştirilen genel amaçlı bir parametre tahmin aracıdır. PEST tarafından kullanılan doğrusal parametre tahmini algoritması, karmaşık çevresel modellerle kullanılmak üzere geliştirilmiş olup oldukça sağlam ve güçlüdür. PEST'in amacı veri yorumlamada, model kalibrasyonunda ve tahmine dayalı analizde yardımcı olmaktır.

Model kalibrasyonu, önceden belirlenmiş bir hata aralığında önceden sahada ölçülen değerlerle eşleşen bir dizi parametre ve sınır koşulunun bulunmasını içerir. Yeraltı suyu modelleri çoğu kez gelecekteki yeraltı suyu koşullarını tahmin etmek için kullanılır. Bir model bir dizi geçmiş gözlemle kalibre edilirse, bu modelin gelecekteki koşullar hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabileceği varsayılmaktadır. Bu nedenle kalibrasyon, öngörücü (prediction) simülasyonunu mümkün kılan modelleme sürecinin gerekli bir

parçasıdır. Model kalibrasyonu deneme yanılma yoluyla manuel olarak da yapılabilir, ancak PEST yardımı ile yapılması çok daha kolaydır.

GMS, PEST yardımcı programına, model parametrelerinin kalibrasyonu için basit grafiksel bir kullanıcı arayüzü sunar. GMS'deki PEST arayüzü MODFLOW için otomatik parametre tahminini gerçekleştirmek için kullanılabilir.

Hidrojeolojide, model çıktısını (yükler, akımlar) ölçmek, girdi parametrelerini ölçmekten (hidrolik iletkenlik, özgül verim, porozite vb.) daha kolaydır. Bu nedenle, sistem girdileri veya parametreleri, sistem çıktılarından çıkarılmaya çalışılır. Buna “ters problem” denir. PEST, model çıktılarını bir dizi gözlem verisi ile karşılaştırarak yeni bir parametre setini tahmin etmek için güçlü bir matematik tekniği kullanır ve kavramsal model hakkında değerli bilgiler sağlar. PEST modelden bağımsız, serbest bir yazılımdır. Herhangi bir sayısal simülatör ile kullanılabilir.

Bu noktada kalibrasyon artıklarından (residual) bahsedilebilir. Gözlemlenen bir değer artığı, gözlemlenen değer ile gerçek miktarın hesaplanan değeri arasındaki farktır.

Artık ( $r$ ) şu şekilde ifade edilir:

$$r_i = (h_{hesaplanan} - h_{gözlemlenen}) \quad (2.2)$$

PEST, modeldeki artıkları en aza indirmeye çalışır. PEST'in hedefi, hedef fonksiyonu için minimum değeri bulmaktır. Hedef fonksiyonu ( $\Phi$ ) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Phi = \sum (w_i \cdot r_i)^2 \quad (2.3)$$

$w_i$  : her gözlem için atanan bir ağırlık faktörüdür.

## 2.6. Hata Payı Hesaplama Yöntemleri

Modelin doğruluğunu belirlemek için hata payı hesaplama yöntemleri kullanılır. Bunun için model verileri ile gözlem değerleri karşılaştırılır ve sonuçlar değerlendirilerek model gerekirse kalibre edilir. Yaygın olarak kullanılan istatistiksel ölçüm yöntemlerinden bu çalışmada kullanılanlar şunlardır:

### Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE):

Ortalama mutlak hata (MAE), iki sürekli değişken arasındaki farkın bir ölçüsüdür.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (2.25)$$

Burada  $y$  gözlem değeri,  $x$  hesaplanan değer,  $n$  toplam gözlem değeri adedidir. MAE değeri 0'dan  $\infty$ 'a kadar değişebilir. Daha düşük değerlere sahip tahminleyiciler daha iyi performans gösterir.

### Ortalama Karekök Hata (Root Mean Square Error-RMSE):

Ortalama karekök hata (RMSE) bir model veya hesaplayıcı tarafından hesaplanan değerler ile gözlemlenen değerler arasındaki farkların sıklıkla kullanılan bir ölçüsüdür. RMSE, çeşitli zamanlara ait tahminlerdeki hataların büyüklüğünü bir tahmin gücü ölçüsü olarak toplamaya hizmet eder.

$t$  belirli bir anı ve  $y_t^{sim}$  bu andaki simülasyon değerini ve  $y_t^{göz}$  yine bu andaki gözlem değerini ifade etmek üzere RMSE,  $n$  sayıda farklı ölçüm için sapmaların karelerinin ortalamasının karekökü olarak şu şekilde hesaplanır:

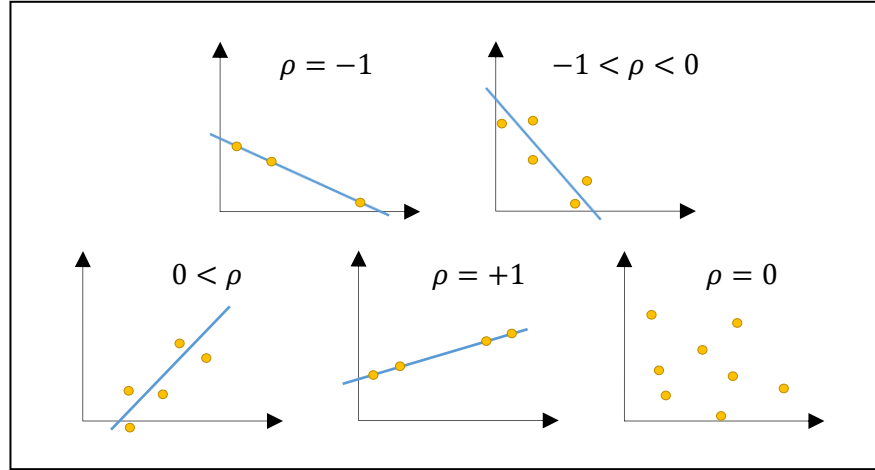
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t^{göz} - y_t^{sim})^2}{n}} \quad (2.26)$$



RMSE değeri 0'dan  $\infty$ 'a kadar değişebilir. Daha düşük değerlere sahip simülasyonlar daha iyi performans gösterir. RMSE değerinin sıfır olması modelin hiç hata yapmadığı anlamına gelir. Her hatanın RMSE üzerindeki etkisi, kare hatanın boyutuyla orantılıdır; bu nedenle daha büyük hataların RMSE üzerinde orantısız şekilde büyük bir etkisi vardır. Sonuç olarak, RMSE aykırı değerlere karşı hassastır. RMSE, birçok matematiksel hesaplamada istenmeyen mutlak değer kullanıldığını engeller.

### Pearson Korelasyon Katsayısı (Pearson Correlation Coefficient):

Pearson momentler çarpımı korelasyon katsayısı, iki değer kümesi (x,y) arasındaki korelasyonun (doğrusal ilişki) istatistiksel bir ölçümüdür. 1 ile -1 arasında bir değere sahiptir. Eğer bu değer 1 ise toplam pozitif lineer korelasyon vardır, 0 ise lineer korelasyon yoktur ve -1 ise negatif lineer korelasyon vardır (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7.** Farklı korelasyon katsayısı değerlerine sahip dağılım diyagramı örnekleri

Pearson momentler çarpımı korelasyon katsayısı  $n$  adet bilinen ikili değer kümesi (x ve y) için aşağıdaki formüle göre verilmiştir:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.27)$$

Burada;

$n$  : numune sayısı

$x_i, y_i$  :  $i$  noktası için ikili değer kümesinin (x,y) aldığı değerler

$\bar{x}$ :  $x$  değerlerinin ortalaması ( $\bar{y}$  aynı şekilde)

### **Nash-Sutcliffe Katsayısı (Nash–Sutcliffe coefficient of efficiency -NSE):**

Nash-Sutcliffe model verimlilik katsayısı (NSE) (Nash ve Sutcliffe, 1970), hidrolojik modellerin tahmin gücünü belirlemek için kullanılır. Şu şekilde tanımlanır:

$$NSE = 1 - \frac{\left[ \sum_{t=1}^n (y_t^{göz} - y_t^{sim})^2 \right]}{\left[ \sum_{t=1}^n (y_t^{göz} - y^{ort})^2 \right]} \quad (2.28)$$

Burada;  $y^{ort}$ , gözlem verilerinin ortalamasıdır.  $y_t^{sim}$ ,  $t$  anındaki simülasyon verisidir.  $y_t^{göz}$ ,  $t$  anındaki gözlem verisidir.  $n$  ise toplam gözlem sayısıdır.

Nash-Sutcliffe katsayısı  $-\infty$  ile 1 arasında değişebilir. (NSE=1) durumu, modellenen verilerin gözlemlenen verilerle mükemmel bir eşleşmesine karşılık gelir. (NSE=0) durumu, model tahminlerinin gözlemlenen verilerin ortalaması kadar doğru olduğunu belirtirken, sıfırdan daha düşük bir katsayı (NSE <0), gözlemlenen verilerin ortalamasının modelden daha iyi bir tahmin edici olduğu durumda ortaya çıkar. Temel olarak, model verimliliği 1'e ne kadar yakınsa, model o kadar doğru olur. Yeterli kalitede bir modeli belirtmek için eşik değer NSE=0,50-0,65 civarında olması önerilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Arazi Çalışması

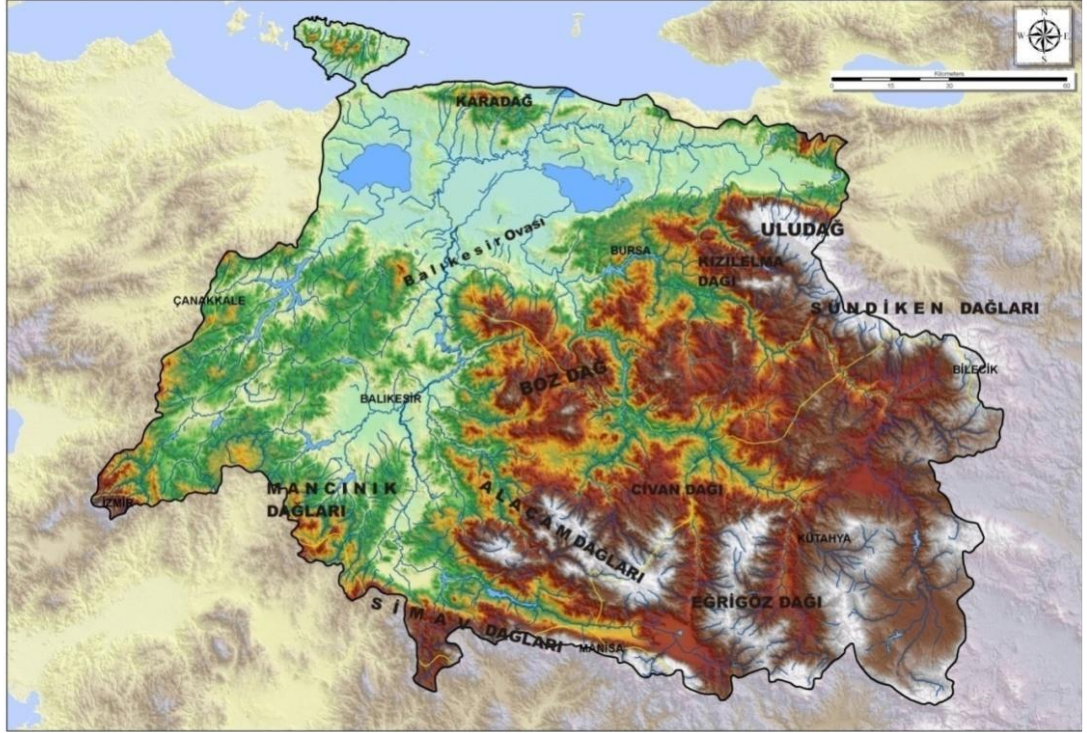
##### 3.1.1. Susurluk Havzası

Çalışma alanının içinde bulunduğu Susurluk Havzası Anadolu yarımadasının kuzeybatısında yer alır ve genel olarak bir dikdörtgene benzemektedir. Doğusunda Murat, Gümeş, Yırca ve Uludağlar; güneyde Şaphane ve Simav Dağları; batıda Madra ve Deliçal Dağları su ayırım çizgisi; kuzeyde ise Karadağ ve Mudanya Tepeleri ile Marmara Denizi tarafından sınırlanmıştır. Kuzeyde 40° 24', güneyde 39° 10' doğuda 29° 38', batıda 27° 20' enlem ve boylamları arasında yer almaktadır.

Havzanın önemli akarsuları Nilüfer Çayı, Mustafakemalpaşa Çayı, Simav Çayı ve Kocaçay'dır. Yıllık su potansiyeli,  $6,08 \times 10^6$  m<sup>3</sup> olarak belirtilmiş havzanın sınırları içerisinde ülkemiz için önemi büyük olan Uluabat ve Manyas Gölleri yer almaktadır. Toplam yağış alanı 22 399 km<sup>2</sup> olan Susurluk Havzası'nın ortalama yıllık akışı 5,43 km<sup>3</sup>'tür.

Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer alan Susurluk Havzası; Bursa, Balıkesir, Kütahya, Bilecik, Çanakkale, Manisa ve İzmir illerinin bir kısmını içine almaktadır. Havzayı 3 büyük il paylaşmaktadır. İzmir, Çanakkale, Bilecik ve Manisa illerinin havzaya katkısı %1'in altındadır (Anonim, 2012).

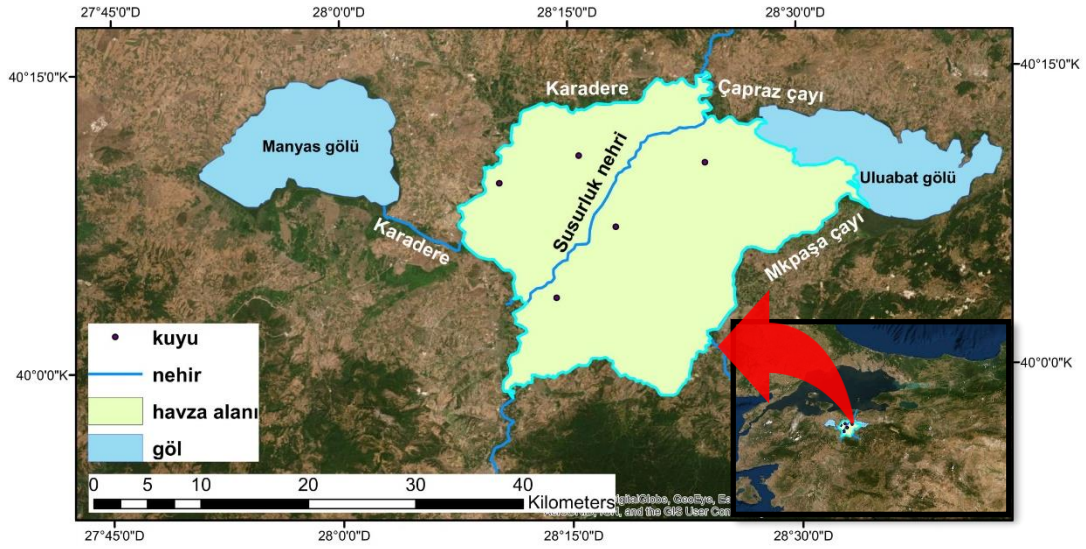
İllerin havza sınırları içerisinde yer alan yükseltilerini içeren fiziki harita Şekil 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Susurluk Havzası Fiziki Haritası (Anonim, 2012).

### 3.1.2. Çalışma Alanı

Çalışmada kullanılan havza, Susurluk havzasının Bursa ili Karacabey ve Mustafakemalpaşa ilçe sınırları içinde kalan 637 km<sup>2</sup>'lik kısmıdır. Havzanın doğusunda Uluabat Gölü, güneydoğusunda Mustafakemalpaşa Çayı, güneyinde Çataldağı, batısında Manyas Gölü, kuzeyinde Marmara Denizi bulunmaktadır. Susurluk Nehri, havzanın içinden geçerek kuzeye doğru devam edip Marmara Denizine dökülmektedir. Fakat modellenen havza, sınır koşulu teşkil edecek şekilde, kuzeyde ve batıda Çapraz Çayı ve Karadere, güneydoğuda ise Mustafakemalpaşa Çayı ile sınırlanmıştır (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2.** Çalışma alanının harita görünümü

Çalışma alanının jeolojisi büyük oranda alüvyal düzlüklerden ve akarsu çökeltilerinden oluşmaktadır. Genel olarak topografya kuzeyde alçak düzlüklerden oluşmakta ve güneye doğru yükseklik artmaktadır (Anonim, 2002).

Havzanın çalışma alanında yer alan başlıca akarsu ve göller şunlardır:

- Simav (Susurluk) Çayı: Susurluk havzasının en önemli akarsuyu olan Simav Çayı Kütahya'dan doğar. İle Sındırgı ilçesinden giren ve Marmara Denizine dökülen Simav Çayı'nın uzunluğu 175 km'dir. Ayrıca havzadaki birçok çay tarafından da beslenmektedir. Çay Sındırgı-Bigadiç dolaylarında keskin bir dirsek yaparak Balıkesir ili sınırlarına girer. Güney-kuzey yönlü akışa sahip olan Simav Çayı, Susurluk Çayı adını almaktadır. Çay Susurluk çevresinin sularını toplayarak, Susurluk ilçesini ikiye bölüp Marmara denizine doğru gider. Daha sonra Manyas Gölünün çıkış ayağı olan Karadere'yi batıdan, Uluabat Gölünün çıkış ayağı olan Çapraz Çayı ve daha sonra Nilüfer Çayını da alarak Karacabey Boğazı'ndan Marmara Denizine dökülür.

- Mustafakemalpaşa Çayı: Bursa il sınırları içerisindeki uzunluğu 134 km olan, Orhaneli ve Emet Çaylarının Çamandar Köyü'nde birleşmeleri ile meydana gelen Mustafakemalpaşa Çayı, buradan 40 km sonra Uluabat Gölü'ne dökülmektedir.
- Karadere: Manyas Gölü çıkış sularını Karadere taşımaktadır. Daha sonra Simav çayı ile birleşerek Marmara Denizine dökülür.
- Uluabat Gölü: Maksimum derinliği 6 m olan göl sığ, bulanık, ötrofik bir tatlısu gölüdür. Marmara Denizi'nin güneyinde yer alır. Kabaca üçgen biçimli olan gölün doğu-batı yönünde uzunluğu 23–24 km, genişliği ise 12 km kadardır. Gölü besleyen en önemli su kaynağı Mustafakemalpaşa Çayı'dır. Ayrıca gölün güneybatısındaki tarım alanlarının drenaj suları da göle verilmektedir. Göle giren su miktarı mevsimlere ve yıllara göre büyük değişiklikler göstermektedir. Gölün fazla suları, gölün batısındaki Uluabat Deresi ile Susurluk Çayı'na ve bu çay vasıtasıyla da Marmara Denizi'ne boşalmaktadır. Ancak göl su seviyesi Uluabat Deresinin altına düştüğünde, dere göle doğru akışa geçerek gölü beslemektedir. Gölden pompalarla su çekilmekte ve göl çevresindeki 6350 ha arazi sulanmaktadır (Anonim, 2012).

## **3.2. Veri Toplama**

### **3.2.1. Rasat Kuyusu Otomatik Ölçüm Verileri**

Çalışmada DSİ 1.Bölge Müdürlüğüne ait 5 adet rasat kuyusunun verileri kullanılmıştır. Bu kuyulardan 3 tanesi Karacabey, 2 tanesi Mustafakemalpaşa ilçelerinde bulunmaktadır. Bu kuyuların içinde bulunan Mini-Diver cihazı ile basınç ölçümü alınmaktadır (Şekil 3.3). Cihaz su içinde bulunmakta olup üzerindeki su kütlesinin ve atmosfer basıncının toplamını saatlik olarak kaydetmektedir. Kaydedilen bu değerler belli zaman aralıklarında toplanarak dijital ortamda muhafaza edilmektedir. Bu kuyulardan 2013-2015 yılları arasında kaydedilen ölçümler DSİ'den temin edilmiştir. Kuyuların üçünde ayrıca Baro-Diver cihazı ile atmosfer basıncı da ölçülmektedir (Şekil 3.4). Bu kuyularda ölçülen barometrik değerler ayrıca temin edilmiştir.



Şekil 3.3. Mini-Diver cihazından verilerin aktarılması



Şekil 3.4. Baro-Diver cihazı

### 3.2.2. Rasat Kuyusu Manuel Ölçüm Verileri

Çalışmada, Diver Office programında kullanılmak üzere manuel ölçüm değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Manuel ölçüm değeri, yüzey baz alınarak belirli bir zamanda ölçülen yeraltı suyu derinliğidir. İhtiyaç duyulan manuel ölçüm değerlerin bir kısmı, DSİ teknisyenlerinin kayıt defterlerinden temin edilmiştir. Bir kısmı ise mahallinde yapılan arazi ölçümleri ile elde edilmiştir (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5.** Seviyemetre cihazı ile yapılan manuel ölçümler

Aylık periyotlarla yapılan ölçümlerde, seviyemetre cihazı kullanılmaktadır. Suya değdiği anda sinyal veren cihazın salındığı derinlik ölçülerek su seviyeleri kayıt edilmektedir.

### 3.2.3. Meteorolojik Veriler

Havzanın yeraltı suyu kotuna etki edecek dış parametreler yağış ve buharlaşmadır. Karacabey ve Mustafakemalpaşa'da bulunan birer adet yağış gözlem istasyonunda 2013-2015 yılları arasında ölçülen günlük yağış değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Aynı kurumdan, Bandırma Havaalanı'nda bulunan gözlem istasyonunda 2013-2015 yılları arasında ölçülen buharlaşma değerleri temin edilmiştir.



### 3.2.4. Susurluk ayı AGİ Verileri

Çalışma alanın ortasından geçen Susurluk (Simav) ayının zerindeki Yahyaköy akım gözlem istasyonuna (AGİ) ait debi değerleri DSİ 1. Bölge Mdrlğnden temin edilmiştir. Ölüm verileri 1 Ekim 2013 – 30 Eylül 2014 arasındaki 1 yıllık süreyi kapsamaktadır. Bu değerler kullanılarak ayrı bir simülasyon yapılmıştır.

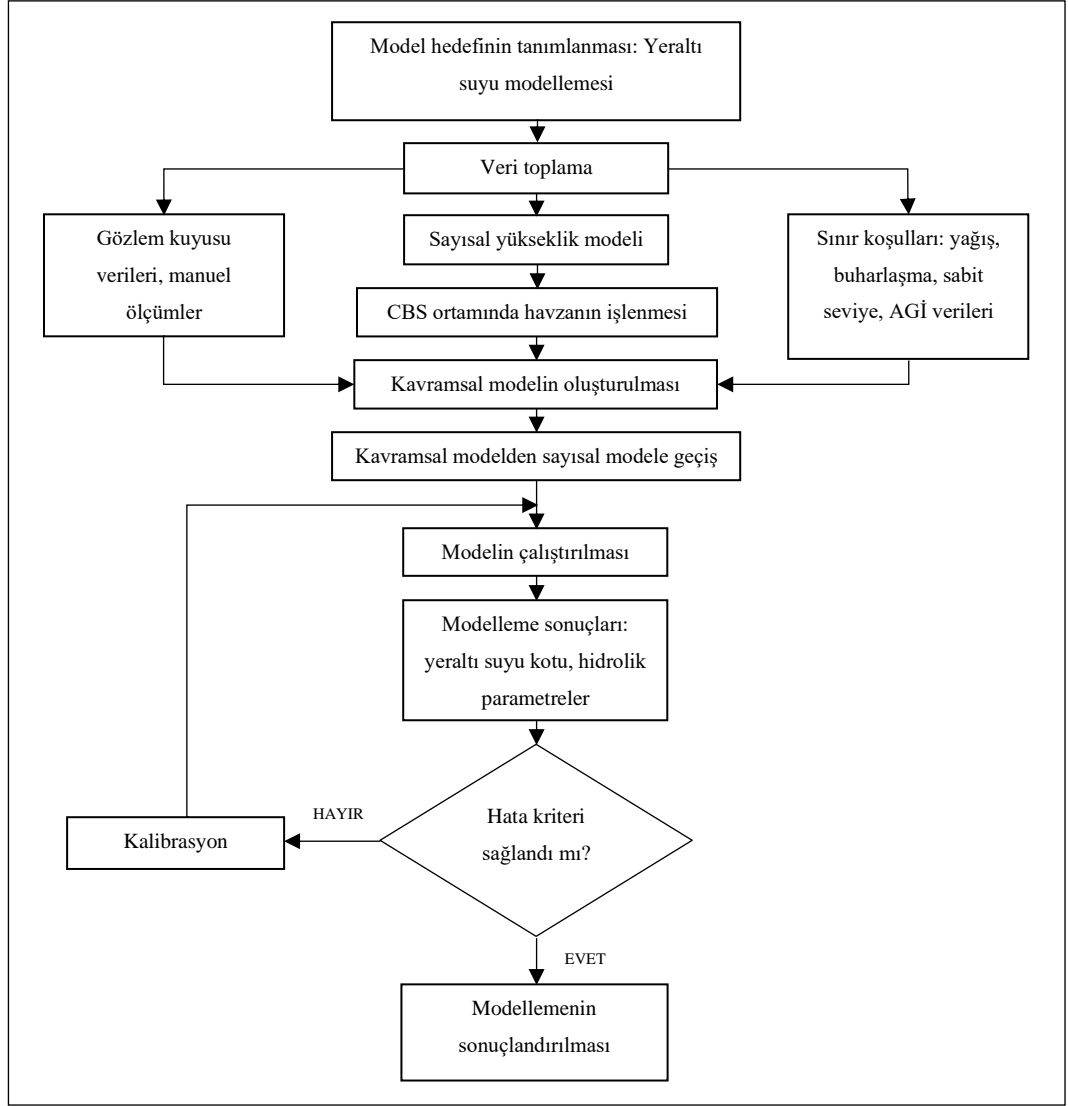
Elde edilen tüm verilere ait tablo izelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Veri tablosu

VERİ SINIFI	İLK TARİH	SON TARİH	VERİ MİKTARI	KONUM
Rasat Kuyusu Verileri	01/01/2013	01/09/2015	Saatlik veri	Karacabey’de 3 kuyu Mustafakemalpaşa’da 2 kuyu
Manuel lm Verileri	05/12/2012	24/03/2017	Bazı günler (toplamda 11 gün)	Karacabey’de 3 kuyu Mustafakemalpaşa’da 2 kuyu
Yağış Verileri	01/01/2013	31/12/2015	Günlük veri	Karacabey’de 1 istasyon Mustafakemalpaşa’da 1 istasyon
Buharlaşma Verileri	01/01/2013	31/12/2015	Günlük veri	Bandırma’da 1 istasyon
AGİ Verileri	01/10/2013	30/09/2014	Günlük veri	Susurluk ayı zerinde Yahyaköy AGİ İstasyonu

### 3.3. Uygulama

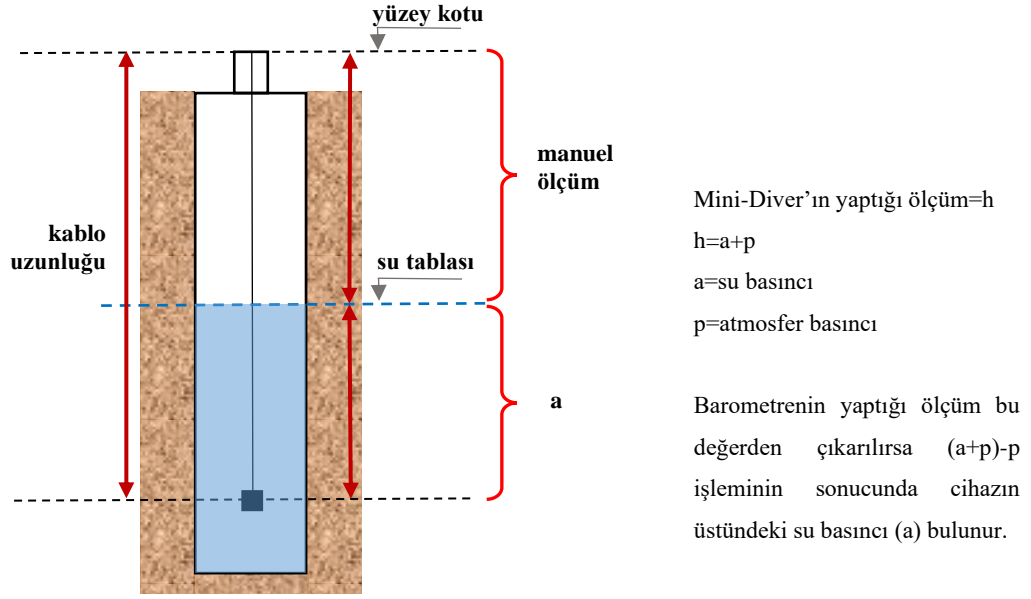
Modelleme sürecinde izlenen yöntem şu şekildedir. Veri toplama yapılarak Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında havzaya ait sayısal yükseklik modeli ile havzanın projeksiyonu ve boyutlandırması yapılmıştır. Eldeki veriler kullanılarak GMS ortamında havzanın modellemesi yapılmıştır. Modelleme sonunda gözlem sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak hataları en aza indirgeyecek şekilde akifer parametrelerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Modelleme süreci şekil 3.6’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.6.** MODFLOW yeraltı suyu modellemesi için iş akış şeması

### 3.3.1. Diver Office

Diver Office (2015), rasat kuyularından alınan ham verileri işleyebilen bir yazılımdır. Bu kuyularda su içinde bulunan dalgıç veri cihazı, üzerindeki basıncı ölçer (Şekil 3.7). Bu basınç, su basıncı (a) ve atmosfer basıncının (p) toplamıdır. Diver Office yazılımı, cihazın ölçtüğü (a+p) değerini kullanarak su yüzeyinin kotunu hesaplar. Her cihaz ölçümü (a+p) için bir Baro-Diver, barometrik ölçüm değeri atanır. Baro-Diver atmosfer basıncını (p) ölçer. Baro-Diver ölçüm aralığı dalgıç veri ölçümlerinin zaman aralığına denk gelmelidir.



**Şekil 3.7.** Diver Office çalışma prensibi

Yüzeyden su derinliğinin hesaplanabilmesi için iki yöntem kullanılabilir:

Birinci yöntemde dalgıç verileri ile aynı aralığa denk gelen bir zaman için manuel ölçüm değerinin programa girilmesi gerekmektedir. Diver-Office manuel değer girilen günü ve saati baz alarak diğer gün ve saatler için yüzey kotunu bulmak suretiyle yüzeyden su derinliğini hesaplamaktadır.

İkinci yöntemde ise kablo uzunluğu programa girilmelidir. Program diğer günler için yüzeyden su derinliğini hesaplamaktadır.

### 3.3.2. CBS Çalışması

Havza şekillendirmesi CBS ortamında yapılmıştır. Havza alanını belirlemek için yaklaşık 30m x 30m çözünürlüklü dijital yükseklik modeli Aster GDEM raster dosyaları temin edilmiştir. İki ayrı raster dosyası birleştirilmiştir. Bunun için ArcToolbox içinde Data Management Tools > Raster > Raster Dataset > Mosaic To New Raster aracı kullanılmıştır. Havza alanının büyük oluşundan dolayı birleştirilen raster dosyasının çözünürlüğü 150m x 150m olarak ayarlanmıştır ve MODFLOW'da kullanılmak üzere

noktasal yüksekliklere dönüştürülmüştür. ArcHydro araç çubuğu kullanılarak havzanın hidrolojik analizi yapılmıştır. Bu kapsamda;

1. Havzadaki çukurlar doldurulmuştur. Eğer havzadaki bir hücre kendisinden daha yüksek kotlu hücreler tarafından çevrili ise suyun bu hücreden akışı mümkün olmamakta ve su bu hücrede hapsolmektedir. Havzadaki çukurları doldurma işlemi bu sorunu ortadan kaldırmaktadır.
2. Akım yönleri bulunmuştur. Akım yönü her hücre için en dik yokuş veya iniş yönüne göre belirlenmektedir. Akım yönü hesabında ArcGIS her hücre için etrafındaki hücrelerle olan düşüş farkını verilen bağıntı ile tespit etmektedir.

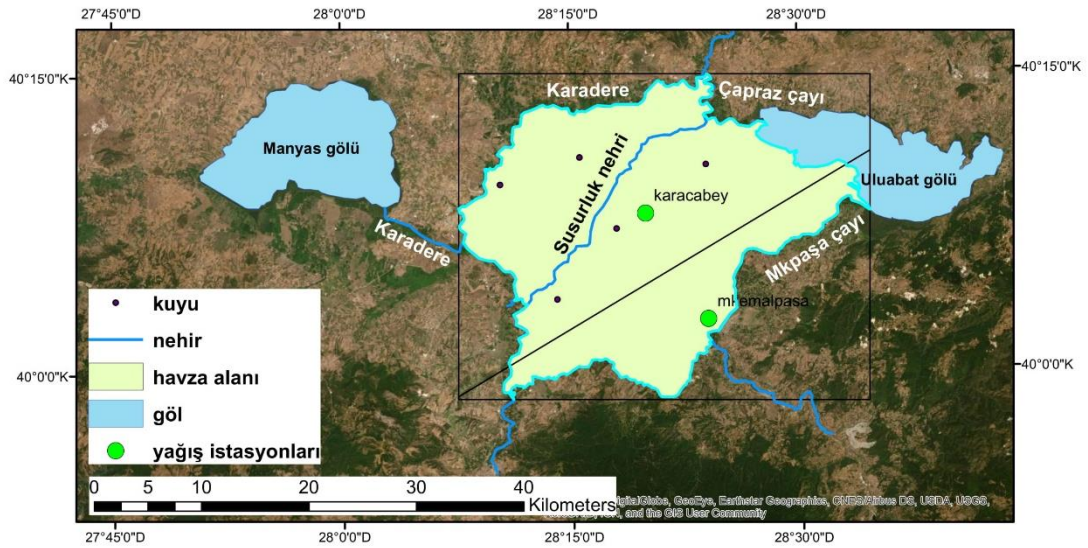
$$\text{maksimum eğim} = \frac{\text{kot farkı}}{\text{mesafe}} * 100 \quad (3.1)$$

Buradaki mesafe hücre merkezleri arasındaki mesafedir. Düşüş miktarı en yüksek olan hücreye doğru akım yönü belirlenmektedir.

3. Her bir hücrenin drenaj alanı hesaplanmıştır. ArcGIS bu hesaplama için her hücrenin akışyukarısında bulunan hücre sayısını vermektedir. Bu şekilde akım yönünde devam ettikçe bu değer büyümektedir. En büyük değerler akarsuların bulunduğu hücreler üzerinde bulunurken, dağ sırtlarında bu değer sıfır olmakta ve bu hücreler geçirimsiz sınır olarak kabul edilebilmektedir.
4. Nehir tanımlaması yapılmıştır. Bu işlemde bir önceki işlem olan drenaj alanları hesabı baz alınarak kullanıcının tanımlayacağı bir eşik değer (hücre sayısı veya alan) üstündeki hücreler için nehir gridi oluşturulmaktadır.
5. Her bir nehir koluna ayrı numara verilmiştir.
6. Alt havzalar belirlenmiştir.

7. Belirlenen alt havzalar grid formatından şekil formatına çevrilmiştir. Bu işlemde her havza için bir poligon atanır.
8. Nehirler grid formatından şekil formatına dönüştürülmüştür. Bu şekilde havzanın işlenmesi tamamlanmıştır.

Editör aracı kullanılarak havzadaki kuyular, nehirler, göller çizilmiş, yağış ve buharlaşma istasyonları haritaya işlenmiştir. Havzada iki adet yağış istasyonu bilgisi mevcut olduğundan dolayı Thiessen poligonu kullanılmak suretiyle havza yağış için iki kısma bölünmüştür (Şekil 3.8). Thiessen poligonu havzayı belirlenen sayıya böler ve her bölge, ortasındaki bir nokta ile temsil edilir. Havza içindeki her yer poligonu temsil eden en yakın noktaya göre işleme alınır.



**Şekil 3.8.** Thiessen poligonu ile havzanın yağış bölgelerine ayrılması

Havza kuzey, batı ve güneydoğusunda akarsular ile, doğusunda göl ile, güneyinde dağlık kesimde su ayırım çizgisi ile sınır koşulu teşkil edecek şekilde sınırlandırılmıştır. Doğuda Uluabat Gölü, kuzeyde ve batıda Çapraz Çayı ve Karadere, güneyde Çataldağı, güneydoğuda ise Mustafakemalpaşa Çayı olmak üzere havza sınırları çizilmiştir. Çizilen tüm şekil dosyaları GMS 'e aktarılmıştır.

### 3.3.3. Sayısal Modelleme

Sayısal modelleme GMS (Owen vd. 1996) ortamında yapılmıştır. GMS, yeraltı suyu sayısal modeli MODFLOW için grafik arayüzü sağlayan bir programdır. GMS, MODFLOW için giriş verilerini üretir ve kaydeder. MODFLOW çıktı verileri de GMS'e aktarılır.

Kavramsal modelde yeni grid çerçevesi oluşturulmuş ve "Grid Frame" 'e sağ tıklayarak "Fit to Active Coverage" komutu ile oluşturulan grid çerçevesi aktif havza sınırları ile eşleştirilmiştir. Grid oluşturulurken hücre boyutu x yönünde 150m, y yönünde 150m olup z yönünde ise hücre sayısı 1 alınmıştır.

CBS ortamından GMS'e aktarılan dosyaların MODFLOW'da işlenebilmesi için bu dosyalar için kavramsal model oluşturulması gerekmektedir. Bunun için nehir, göl gibi her bir şekil dosyası için yeni bir kavramsal model oluşturulmuş ve isimlendirilmesi yapılmıştır. Daha sonra haritadan ilgili çizimi seçilmiş ve oluşturulan kavramsal modele aktarılmıştır. Grid içinde olup havza sınırları dışında kalan kısımlar kırılmak suretiyle, modellemenin havza içiyle sınırlı kalması sağlanmıştır. Bunu sağlamak için havza sınırlarını belirleyen kavramsal model seçili iken "Feature Objects" menüsünden "Active Cells in Coverage" komutu kullanılmıştır.

Yeni MODFLOW dosyası oluşturularak MODFLOW 2005 versiyonu, akış paketi olarak LPF (Layer Property Flow), çözücü olarak PCGN (Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control) seçilmiştir. GMS dosyasından noktasal kotlar MODFLOW'a aktarılarak yüzey kotu olarak kullanılmıştır. Bunun için yeni "2D Scatter Point Set" dosyası oluşturularak daha önce CBS den dışarı aktarılan .csv uzantılı dosyadan kotlar içeri aktarılmıştır. Havzadaki nehirler, RIV1 paketi ile modellenmiştir. Yüzey suyu kütleleri (nehir vb.), yüzey suyu ile yeraltı suyu arasındaki seviye farkına göre, yeraltı suyu giriş veya çıkış akısı olarak sınır koşulu görevi görür. Yüzey suyu ile yeraltı suyu arasındaki etkileşim, nehirdeki su seviyesi (m), nehir yatağı kalınlığı (m) ve nehir yatağının iletkenlik değerleri (C, m/gün) atanması ile simüle edilir. Havzadaki gölün su yüzeyi kotu sabit seviye olarak girilmiş ve bunun için CHD1 paketi

kullanılmıştır. Havzadaki drenaj kanallarının modellenmesi için DRN1 paketi kullanılmıştır. Bu paket suyu havzadan çıkararak tahliye etmektedir. DRN1 paketi için kanalın iletkenlik değeri (C) ve dren taban kotunun belirtilmesi gerekmektedir. Havzadaki yağışları yeraltı suyu modeline dahil etmek için RCH1 paketi, buharlaşma etkisini simüle etmek için EVT1 paketi kullanılmıştır. RCH1 paketi yağış miktarını (m/gün) istemektedir. Yağış bölgeleri Thiessen poligonu ile daha önce ayrılmıştır. Her bölge için yağış istasyonu verileri analiz yapılan yıl için girilmiştir. EVT1 paketi, maksimum buharlaşmanın uygulanacağı kotu (ET surface elevation), maksimum buharlaşma değerini (maximum ET rate) ve buharlaşma tükenme derinliği (extinction depth) istemektedir. Modelde maksimum buharlaşmanın uygulanacağı kot (ET surface elevation) yüzey kotuna eşit alınmıştır. Buharlaşma etkisi zemin altında doğrusal olarak azalmaktadır (Şekil 2.4). Buharlaşma tükenme derinliği -2 metre olarak alınmış ve istasyondan alınan buharlaşma verileri girilmiştir. Tükenme derinliğinin -2 metre olarak belirlenmesinde literatürdeki çalışmalar ve havzanın iklim şartları etkin olmuştur.

Havzanın doğusundaki göl, batı, kuzey ve güneydoğusundaki akarsular için sabit seviye sınır koşulu kullanılmıştır. Güneyindeki dağlık kesim geçirimsiz sınır kabul edilmiştir (Şekil 3.2). MODFLOW da kullanılan paketler ve girdi verileri ile ilgili tablo Çizelge 3.2’de verilmiştir. (\*) ile belirtilen veriler literatürden alınmıştır.

**Çizelge 3.2.** MODFLOW paket girdi verileri tablosu

PAKET	VERİ	DEĞER	BİRİM
EVT1	Maksimum buharlaşma oranı	MGM verileri	m/gün
	Maksimum buharlaşma yüzeyi kotu	Yüzey kotuna eşit	m
	Buharlaşma tükenme derinliği	2*	m
RCH1	Yağış oranı	MGM verileri	m/gün
CHD1	Göl seviyesi	8	m
RIV1	İletkenlik	500*	m/gün
	Su kotu (başlangıç)	Yüzey kotu – 1	m
	Taban kotu	Yüzey kotu – 4	m
DRN1	İletkenlik	500*	m/gün
	Taban kotu	Yüzey kotu – 3	m

DSİ verilerine göre havzadaki maksimum kuyu derinliği 160 m olduğu için akiferin taban derinliği 160 m alınmıştır. Yüzey kotları sayısal yükseklik modelinden alınmıştır.

Oluşturulan kavramsal modele verilerin girilmesinin ardından modeli MODFLOW'a aktarma işlemi yapılmıştır.

Toplamda 7 adet simülasyon yapılmıştır (Çizelge 3.3). Kararlı durumda 3 adet simülasyon yapıp farklı hidrolik iletkenlik değerleriyle kalibrasyon yapılmış, ortalama hatanın en küçük olduğu koşullarda modelleme sonuçlandırılmıştır. Kararsız durum için yine 3 adet simülasyon yapıp 2013 yılı kalibrasyon, 2014 ve 2015 yılları validasyon için kullanılmıştır. AGİ verileri ile simülasyon ise sadece girişteki AGİ ile çıkıştaki hücrenin akarsu debilerinin karşılaştırılması için yapılmıştır.

**Çizelge 3.3.** Modelleme kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlar

SİMÜLASYON	MODEL TİPİ	ZAMAN	SÜRE
Simülasyon No:1	Kararlı Durum (Steady State)	2013	1 yıl
Simülasyon No:2	Kararlı Durum (Steady State)	2014	1 yıl
Simülasyon No:3	Kararlı Durum (Steady State)	2015	8 ay
Simülasyon No:4	Kararsız Durum (Transient)	2013	1 yıl
Simülasyon No:5	Kararsız Durum (Transient)	2014	1 yıl
Simülasyon No:6	Kararsız Durum (Transient)	2015	8 ay
Simülasyon No:7	Kararsız Durum (AGİ)-(Transient)	01/10/2013 – 30/09/2014	1 yıl

### **Kararlı Durum**

Kararlı durum için simülasyon yapılmıştır. Bunun için model tipi olarak kararlı durum seçilmiş, yağış ve buharlaşma gibi değişken değerler yıllık ortalamalar şeklinde girilmiştir. Hesaplanan su seviyeleri ile gözlem kuyularının verileri karşılaştırılmıştır. Bunu sağlamak için kuyulardan elde edilen yeraltı suyu seviyelerinin yıllık ortalaması modele gözlem verisi olarak girilmiş ve bu noktalarda MODFLOW'un hesapladığı değerler ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 2.2'de alüvyal zemin için belirtilen hidrolik iletkenlik ortalama değeri yaklaşık olarak 50 m/gün'dür. Bu nedenle literatürde kullanılan



değerler de göz önünde bulundurularak 1-100 m/gün arasındaki farklı hidrolik iletkenlik değerleriyle simülasyon yapılmış ve simülasyon hataları Ortalama Mutlak Hata (MAE) ile tespit edilmiştir (Eşitlik 2.25). Bu şekilde hidrolik iletkenlik kalibrasyonu yapılmıştır. 2013-2015 yıllarına ait hataların ortalamasını gösteren kalibrasyon grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir. En küçük hata değeri, hidrolik iletkenlik değeri 100 m/gün alındığında elde edilmiştir. Bu nedenle çalışma alanının geneli için hidrolik iletkenlik değeri yaklaşık 100 m/gün olarak belirlenmiştir. Kalibrasyon bitince program çalıştırılarak havzanın yeraltı suyu seviyesi tüm yıllar için tespit edilmiştir.

### **Kararsız Durum**

Model tipi olarak kararsız durum seçilmiştir. Stres periyodu 365 gün olarak girilmiştir. MODFLOW simülasyonu için hesaplama zaman aralıklarına stres periyodu denir. Buharlaşma, yağış gibi parametreler stres periyodunda belirtilen zaman adımına göre işleme alınır.

Çalışmanın en önemli kısmını akifer parametrelerinin tespiti oluşturmaktadır. MODFLOW hesapladığı sonuçları gözlem verileriyle karşılaştırarak parametre tahmini yapma olanağını sunmaktadır. Parametre tahmini manuel veya PEST kullanılmak suretiyle otomatik olarak yapılabilir. Bu işlem için gözlem verilerinin MODFLOW’a girilmesi gerekmektedir. Bunun için kuyulara ait su seviyeleri hesaplanmıştır. Diver Office yüzeyden su derinliğini hesaplamıştır. MODFLOW ise kuyulara ait su seviyelerini istemektedir. DSİ’den alınan ve arazide ölçülen kuyu zemin kotlarından su derinlikleri çıkarılarak su seviyeleri bulunmuş ve gözlem verisi olarak MODFLOW’a girilmiştir.

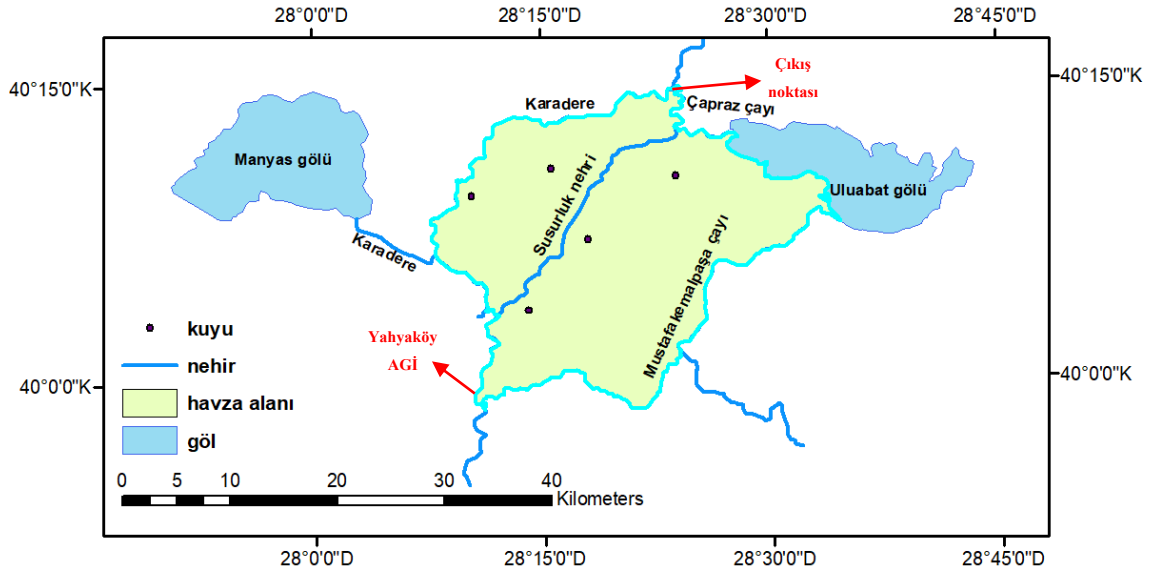
Akifer parametrelerinin tespitinde 2013 yılı kalibrasyon, 2014 ve 2015 yılları doğrulama (validasyon) için kullanılmıştır. Bu kapsamda 2013 yılı verileri kullanılarak hidrolik iletkenlik ( $K$ ) ve özgül verim ( $S_y$ ), kalibrasyon ile bulunmuştur. Kuyuların civarı poligonlar ile ayrılarak havza bölgelere ayrılmış (Şekil 4.8) ve kalan havza alanı ile beraber toplamda 6 bölge için hidrolik parametreler PEST ile bulunmuştur. Bu şekilde 2013 yılına ait parametreler bulunmuş, bu değerler kullanılarak 2014 ve 2015 yılları

çözümlemiştir. Simülasyon hataları RMSE, Nash-Sutcliffe katsayısı (NSE) ve Pearson korelasyonu ( $\rho$ ) kullanılarak tespit edilmiş, yapılan doğrulama (validasyon) ile çözümün tutarlılığı tespit edilmiştir.

### AGİ Verileri ile Simülasyon

Stream paketi STR1 kullanılarak ilave bir simülasyon yapılmıştır. Eldeki akarsu debi verilerinin 1 Ekim 2013 – 30 Eylül 2014 zaman aralığında olmasından dolayı simülasyon bu zaman dilimi için yapılmıştır. RIV1 paketi için açılan mevcut kavramsal modelde Susurluk Çayı pasife alınmış, yeni oluşturulan kavramsal modelde Susurluk Çayı stream paketi STR1 ile işleme alınmıştır.

STR1 paketi kullanılarak Yahyaköy Akım Gözlem İstasyonuna (AGİ) ait debi değerleri Susurluk (Simav) Çayının üzerine girilmiştir (Şekil 3.9). Akım verisi en membadaki nehir arkına (arc) girilmektedir.



**Şekil 3.9.** Susurluk Çayı üzerindeki Yahyaköy AGİ istasyonu konumu ve debi verilerinin karşılaştırıldığı çıkış noktası

Paket verisi olarak iletkenlik (C, m/gün), en membadaki giriş debisi (m<sup>3</sup>/gün), kesit genişliği (m), kıvrımlılık, Manning pürüzlülük katsayısı (n) girilmiştir. Her düğüm noktası için başlangıçtaki su kotu (m), akarsu yatağının üst ve alt kotları (m) girilmiştir.

STR1 paketi girdi verileri ile ilgili tablo Çizelge 3.4’te verilmiştir. (\*) ile belirtilen veriler literatürden alınmıştır, (\*\*) ile belirtilen veri CBS ölçümlerinden alınmıştır.

**Çizelge 3.4.** STR1 paketi girdi verileri tablosu

PAKET	VERİ	DEĞER	BİRİM
STR1	Su kotu (başlangıç)	0	m
	Nehir tabanının üst kotu	Yüzey kotu-3	m
	Nehir tabanının alt kotu	Yüzey kotu-4	m
	İletkenlik	500*	m/gün
	Nehir kesit genişliği	30**	m
	Kıvrımlılık	1	-
	Pürüzlülük (Manning katsayısı)	0,03*	-
	Giriş debisi	AGİ ölçümleri (sadece membadaki nehir arkına)	m

Akım verilerini görüntülemek için MODFLOW menüsünden Optional Packages > STR-Stream> “save info to ccf2 file” işaretlenmelidir. Sonuç verileri MODFLOW altında (.ccf2) uzantılı dosyaya sağ tıklayıp “Streamflow Out Table” seçilerek görüntülenir.

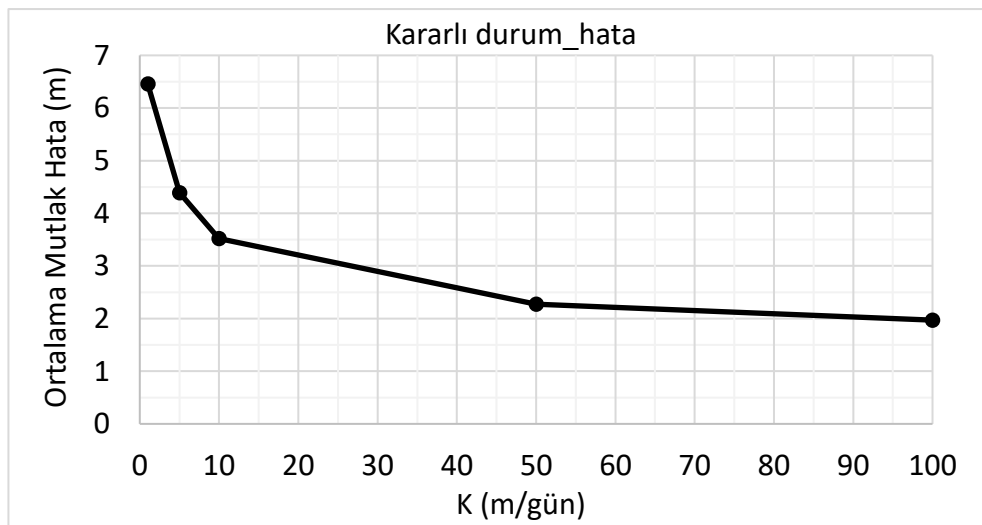
## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1. Kararlı Durum

Kararlı durumda en uygun sonucu elde etmek için hidrolik iletkenlik kalibrasyonu yapılmıştır (Çizelge 4.1). Kalibrasyon 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait hataların ortalaması baz alınarak 1-100 m/gün aralığında farklı hidrolik iletkenlik değerleriyle yapılmıştır. Hidrolik iletkenlik değer aralığı belirlenirken literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurulmuştur. Farklı hidrolik iletkenlik değerleri için kuyu seviyelerinin ortalama mutlak hataları (MAE) 3 yıl için ayrı ayrı tespit edilmiş, daha sonra üç yılın ortalaması alınmıştır.

**Çizelge 4.1.** Farklı hidrolik iletkenlik değerleri için kuyu seviyelerinin ortalama mutlak hataları (kararlı durum)

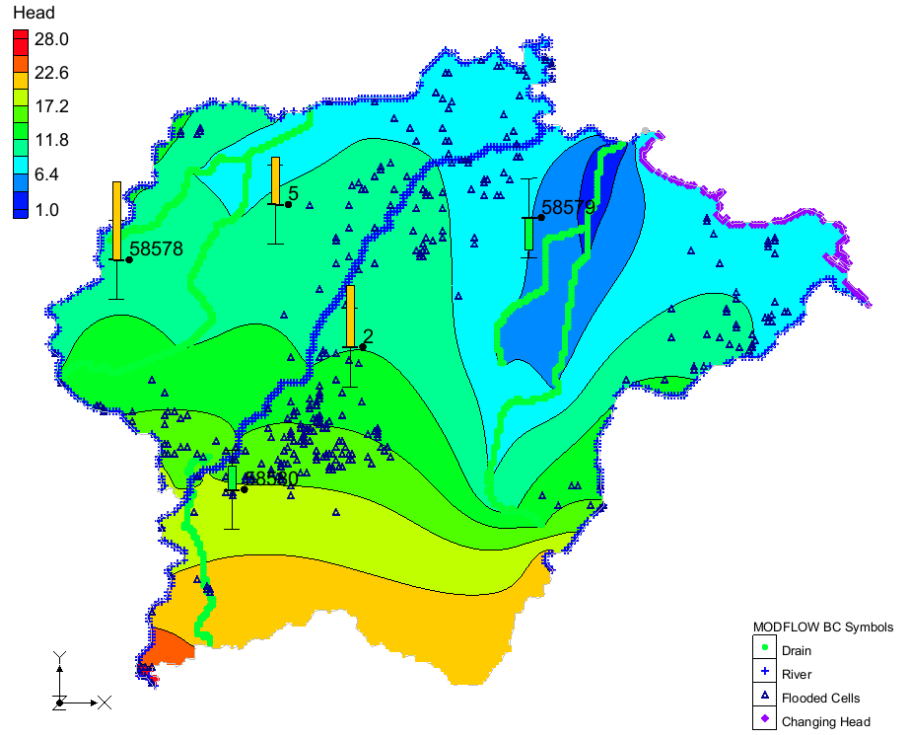
K (m/gün)	YILLIK ORTALAMA MUTLAK HATALAR (m)			3 YILIN ORTALAMASI (m)
	2013	2014	2015	
1	5.1870	8.7211	5.4715	6.459886
5	3.9375	5.7542	3.4785	4.390068
10	3.3539	4.5007	2.7062	3.520252
50	2.4658	2.8946	1.4527	2.271021
100	2.2089	2.5396	1.1640	1.970815



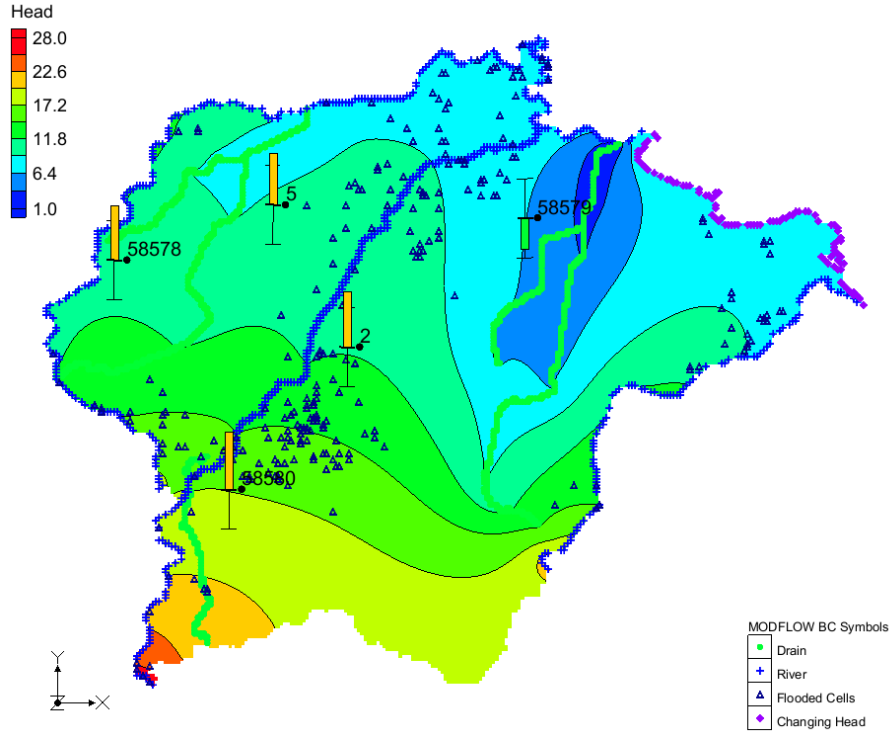
**Şekil 4.1.** Kararlı durum hidrolik iletkenlik kalibrasyonu grafiği (2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait ortalama değerlerdir)

En uygun sonuç hidrolik iletkenlik 100 m/gün alındığında elde edilmiştir (Şekil 4.1). Bu nedenle hidrolik iletkenlik 100 m/gün alınarak simülasyon yapılmış ve çıktılar alınmıştır.

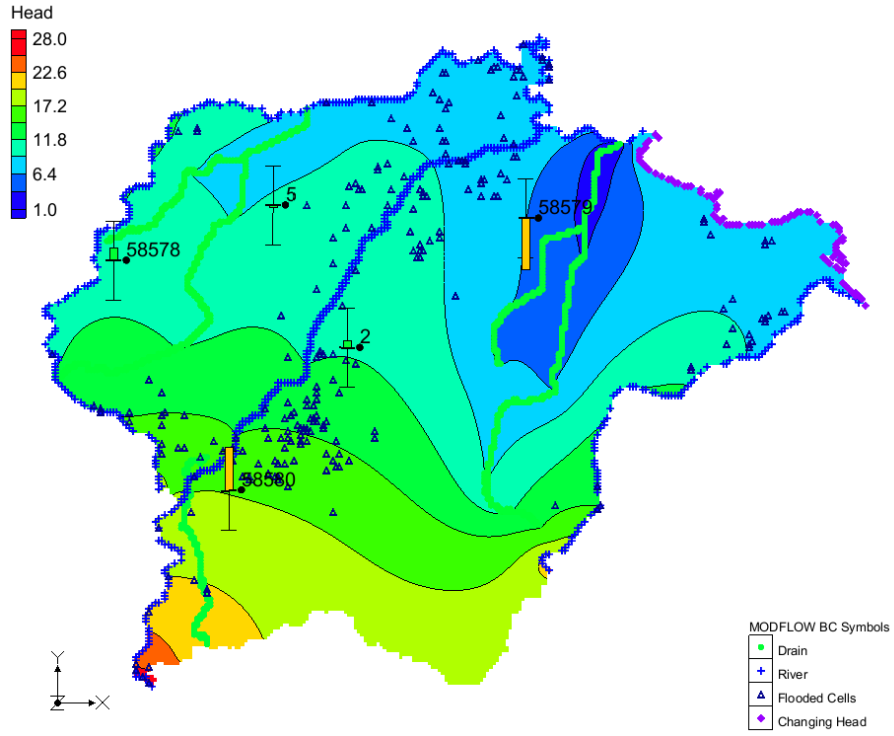
MODFLOW'da üç farklı yıl için (2013-2015) kararlı durum şartlarında çalıştırılan modele ait su seviyeleri elde edilmiştir (Şekil 4.2- Şekil 4.4).



**Şekil 4.2.** Havzanın 2013 yılına ait yeraltı suyu seviyesi dağılımı (kararlı durum)



Şekil 4.3. Havzanın 2014 yılına ait yeraltı suyu seviyesi dağılımı (kararlı durum)



Şekil 4.4. Havzanın 2015 yılına ait yeraltı suyu seviyesi dağılımı (kararlı durum)

Hesaplanan su seviyeleri ile gözlem kuyularının verileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen hata değerleri Çizelge 4.2- Çizelge 4.4'te belirtilmiştir.

**Çizelge 4.2.** 2013 yılı için kuyularda ölçülen su seviyeleri ile modelde tespit edilen su seviyeleri ve hata payları (kararlı durum)

Kuyu kodu	Gözlemlenen Seviye (m)	Hesaplanan Seviye (m)	Hata Payı (m)
5	7.189133	9.3256	-2.14
58578	7.124278	10.9697	-3.85
58579	7.564752	5.6273	1.94
58580	16.207927	16.5209	-0.31
2	8.606866	11.1109	-2.50

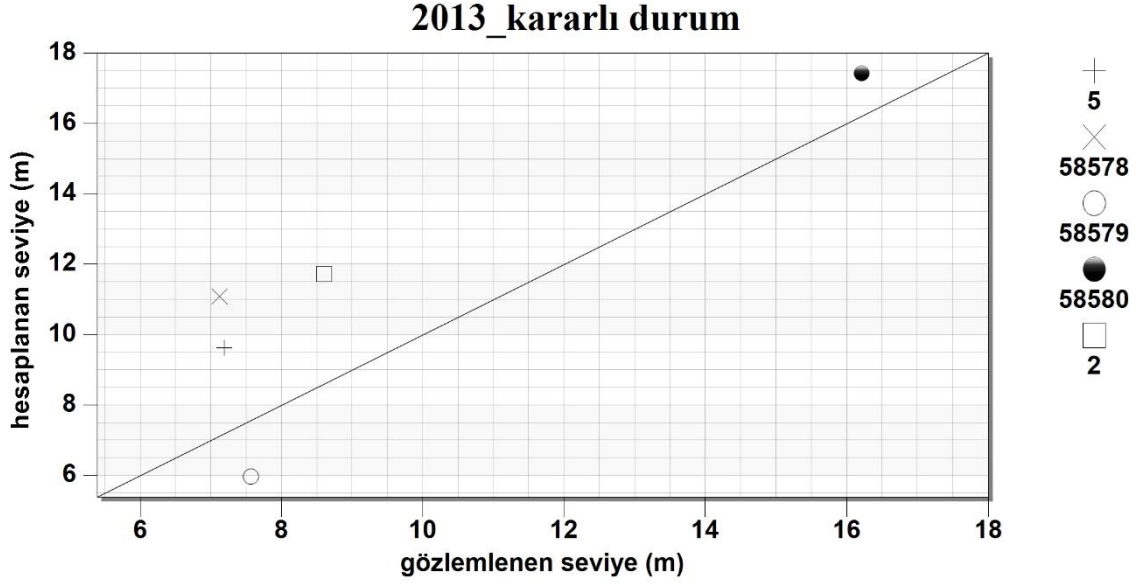
**Çizelge 4.3.** 2014 yılı için kuyularda ölçülen su seviyeleri ile modelde tespit edilen su seviyeleri ve hata payları (kararlı durum)

Kuyu kodu	Gözlemlenen Seviye (m)	Hesaplanan Seviye (m)	Hata Payı (m)
5	6.9238	9.4706	-2.55
58578	8.2973	11.0282	-2.73
58579	7.4484	5.7836	1.66
58580	14.0926	16.7947	-2.70
2	8.7538	11.3974	-2.64

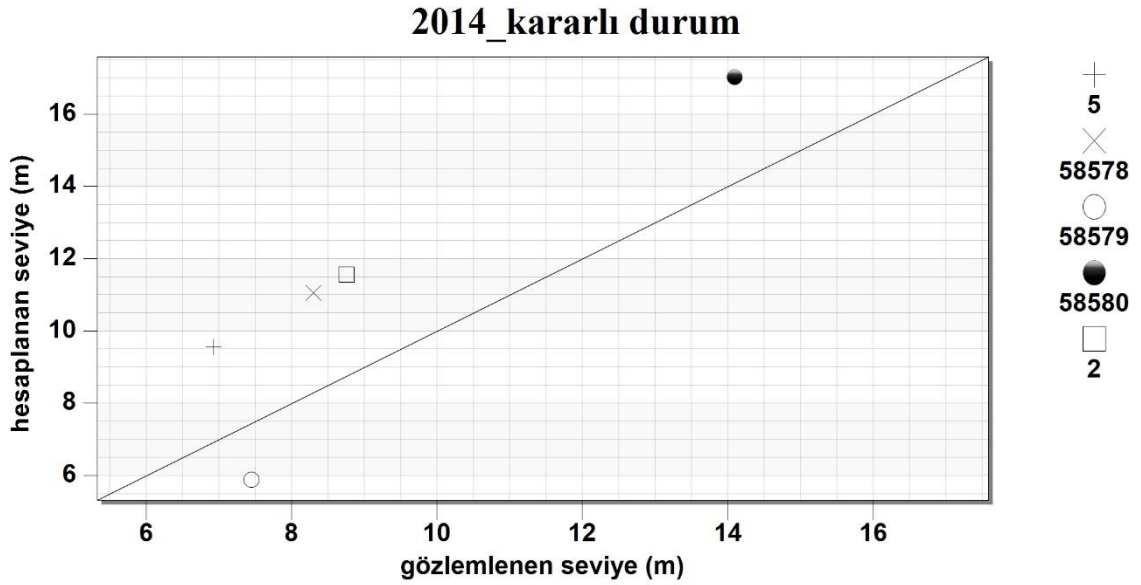
**Çizelge 4.4.** 2015 yılı için kuyularda ölçülen su seviyeleri ile modelde tespit edilen su seviyeleri ve hata payları (kararlı durum)

Kuyu kodu	Gözlemlenen Seviye (m)	Hesaplanan Seviye (m)	Hata Payı (m)
5	9.6528	9.4611	0.19
58578	10.4206	11.0257	-0.61
58579	8.4411	5.7725	2.67
58580	14.7729	16.7174	-1.94
2	11.1770	11.3577	-0.18

Kuyu seviyelerinin gözlem değerlerinden sapması Şekil 4.5- Şekil 4.7'deki grafikler ile gösterilmiştir.

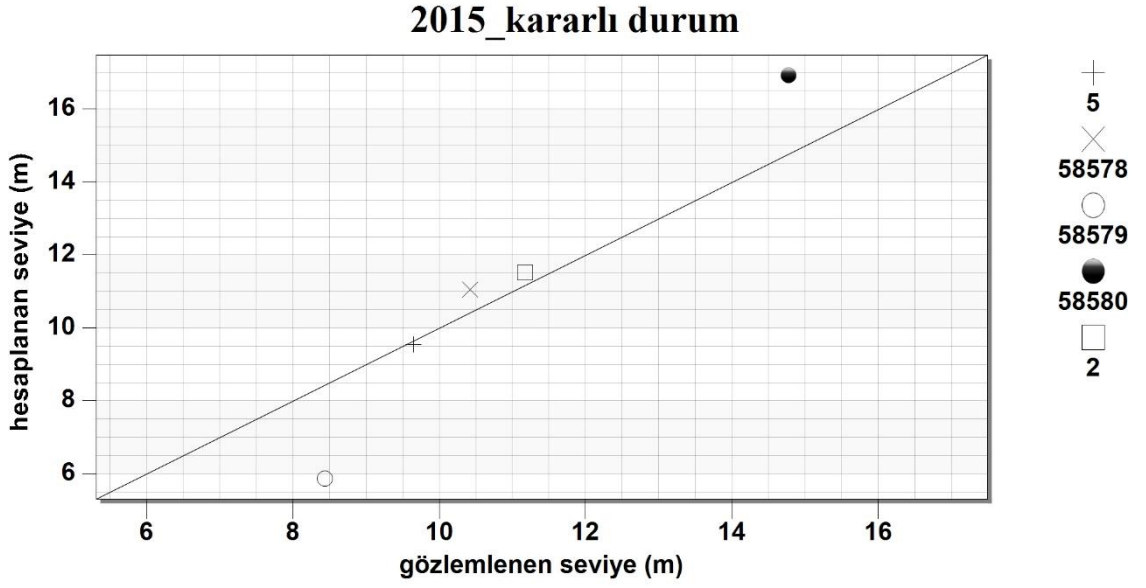


Şekil 4.5. Kuyu seviyeleri için simülasyon verilerinin gözlem değerlerinden sapması-2013 (kararlı durum)



Şekil 4.6. Kuyu seviyeleri için simülasyon verilerinin gözlem değerlerinden sapması-2014 (kararlı durum)





**Şekil 4.7.** Kuyu seviyeleri için simülasyon verilerinin gözlem değerlerinden sapması-2015 (kararlı durum)

Yağış ve buharlaşma verilerinin düşük olduğu 2013 yılında en yüksek hataların havzanın batısında tespit edildiği gözlemlenirken, en düşük hatanın yüksek arazi kotlarına sahip olan güney kesimde oluştuğu görülmektedir.

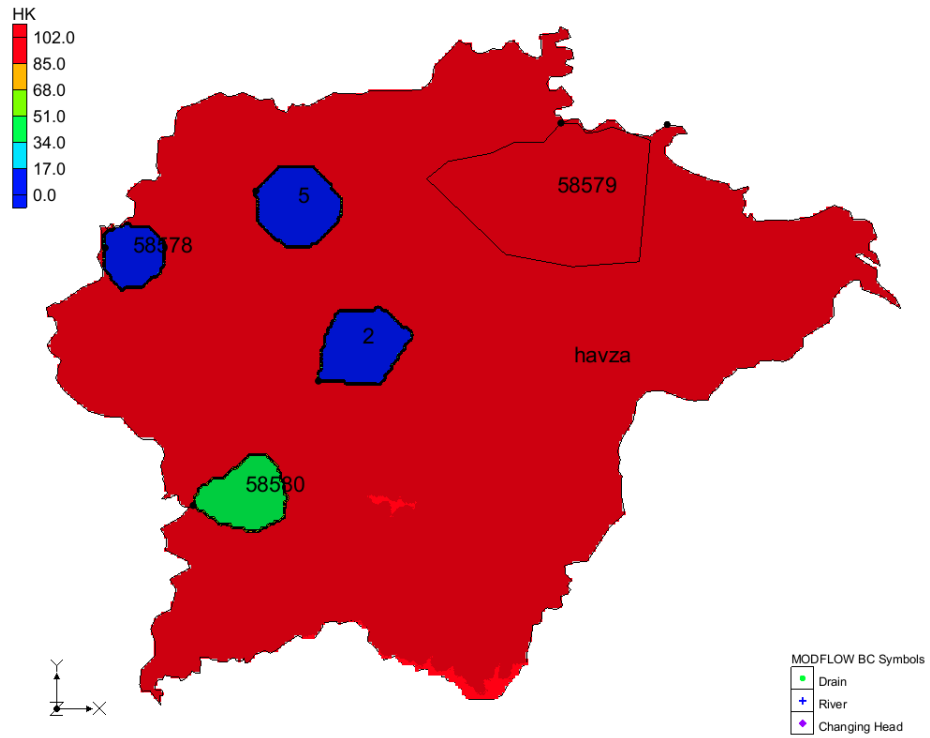
2014 yılı en yüksek yağış ortalamasına ve en düşük ortalama buharlaşma oranına sahiptir ve bunun sonucu olarak kuyulardaki su seviyelerinin diğer yıllara oranla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 2014 yılında havzanın genelinde hatalar diğer yıllara göre daha yüksek çıkmış ve hesaplanan değerlerin ölçülen değerlerden genel olarak daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bir önceki yıla göre buharlaşma değerinin arttığı 2015 yılında ise havzada en düşük kotlara sahip kuzeydoğu kesiminde hataların yüksek çıktığı görülmüştür. Havzada kullanılan hidrolik iletkenliğin yüksek olması, su seviyeleri dağılımlarının yıllara göre benzerlik göstermesine sebep olmuştur.

## 4.2. Kararsız Durum

Akifer parametrelerinin tespitinde 2013 yılı kalibrasyon, 2014 ve 2015 yılları validasyon için kullanılmıştır. 2013 yılı için bulunan hidrolik iletkenlik ve özgül verim değerleri 2014 ve 2015 yıllarına uygulanarak doğrulama (validasyon) yapılmış, hatalar hesaplanarak çözümün tutarlılığı kontrol edilmiştir.

**Kalibrasyon:** 2013 yılı için hidrolik iletkenlik ve özgül verim PEST ile bulunmuştur. Bu kapsamda 5 adet kuyu civarında oluşturulan kapalı alanlar ile havza bölgelere ayrılmış ve havza genel alanı ile birlikte toplamda 6 adet bölge beraber PEST işleme tabi tutulmuştur (Şekil 4.8).



**Şekil 4.8.** Hidrolik iletkenlik ve özgül verimin PEST ile kalibrasyonu için havzanın bölgelere ayrılması

Hidrolik iletkenlik ( $K$ ) için 1-100 m/gün, özgül verim ( $S_y$ ) için 0,03-0,2 minimum-maksimum değerleri kullanılmıştır. Minimum ve maksimum değerlerin tayininde

hidrolik iletkenlik için Çizelge 2.1, özgül verim için Çizelge 2.2 esas alınmıştır. Bunun sonucunda Çizelge 4.5'teki değerler elde edilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Kalibrasyon işlemi (PEST) sonucu havzanın farklı bölgeleri için elde edilen hidrolik iletkenlik ve özgül verim değerleri (2013 yılı)

BÖLGE	K (m/gün)	S <sub>v</sub>
5 nolu kuyu bölgesi	4.147	0.107
58578 nolu kuyu bölgesi	2.344	0.078
58579 nolu kuyu bölgesi	100.0	0.2
58580 nolu kuyu bölgesi	47.772	0.2
2 nolu kuyu bölgesi	6.626	0.071
Havza genel alanı	100.0	0.2

2013 yılı için yapılan kalibrasyon sonucunda simülasyona ait hata payları RMSE, Nash-Sutcliffe Katsayısı (NSE), Pearson Korelasyonu ( $\rho$ ) kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.6).

**Çizelge 4.6.** 2013 yılı kalibrasyon işlemi sonucu simülasyona ait hata verileri (Kararsız durum)

KUYU NO	MAE	RMSE	NSE KATSAYISI	KORELASYON ( $\rho$ )
5	1.065	1.145	0.822	0.921
58578	1.344	1.548	0.779	0.913
58579	1.352	1.431	-14.957	0.790
58580	0.751	0.990	0.539	0.935
2	0.535	0.687	0.874	0.946

**Doğrulama (Validasyon):** 2013 yılı simülasyonunda elde edilen Çizelge 4.5'teki parametre değerleri kullanılarak 2014 ve 2015 yılları için çözümlene yapılmıştır (Çizelge 4.7, Çizelge 4.8). Yapılan bu işlem ile validasyon değerlendirmesi yapılmıştır.

**Çizelge 4.7.** 2014 yılı simülasyonuna ait hata verileri (Kararsız durum)

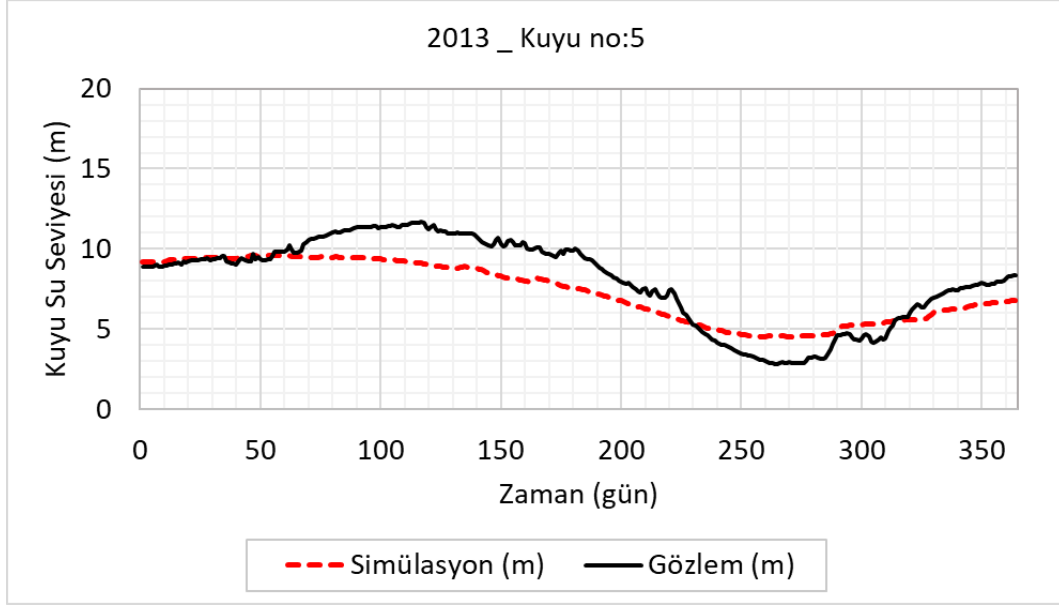
KUYU NO	MAE	RMSE	NSE KATSAYISI	KORELASYON ( $\rho$ )
5	1.247	1.766	0.469	0.929
58578	1.776	2.380	0.433	0.912
58579	0.904	0.985	-16.866	0.343
58580	1.671	2.026	-0.862	0.906
2	0.854	0.958	0.520	0.955

**Çizelge 4.8.** 2015 yılı simülasyonuna ait hata verileri (Kararsız durum)

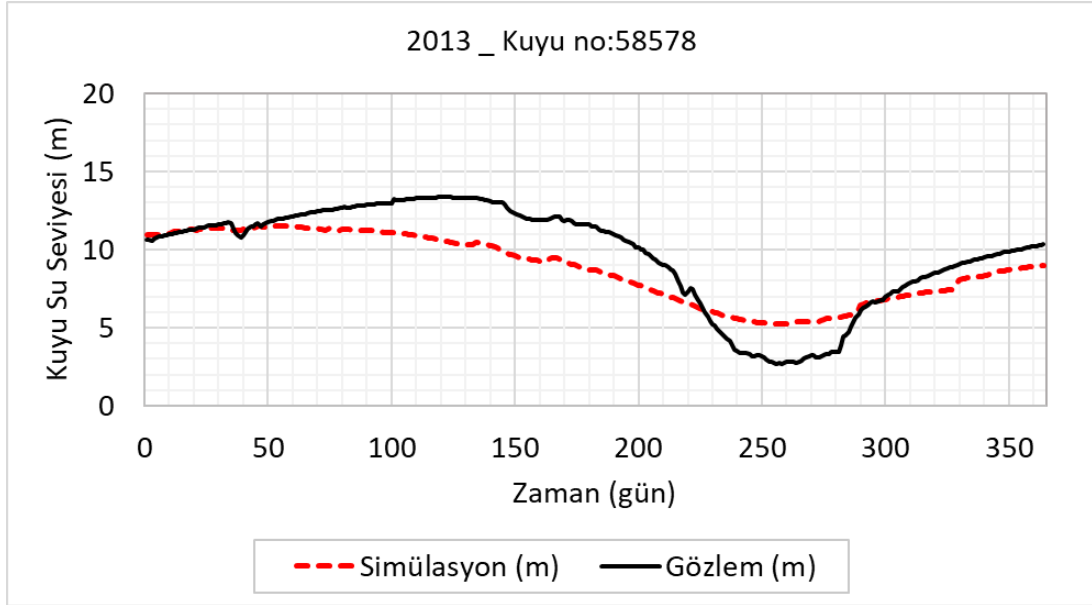
KUYU NO	MAE	RMSE	NSE KATSAYISI	KORELASYON ( $\rho$ )
5	0.931	1.241	0.794	0.937
58578	1.698	2.186	0.492	0.861
58579	1.148	1.354	-6.191	0.093
58580	1.281	1.715	-0.063	0.741
2	0.602	0.779	0.830	0.928

Validasyon sonuçlarına göre 2013 yılına ait girdi verileri 2014 ve 2015 yıllarına büyük oranda uyum sağlamış ve düşük hatalar vermiştir.

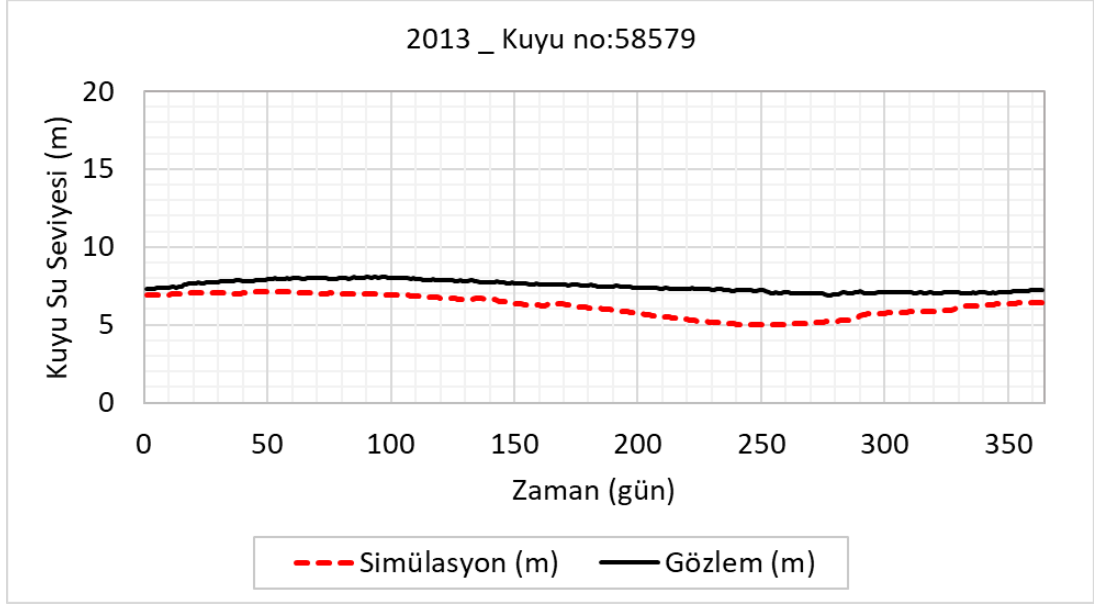
Modelleme yapılan 3 yılda 5 adet kuyu için gözlem ve simülasyon verilerinin zaman serisi grafiği Şekil 4.9 - Şekil 4.23 arasında verilmiştir.



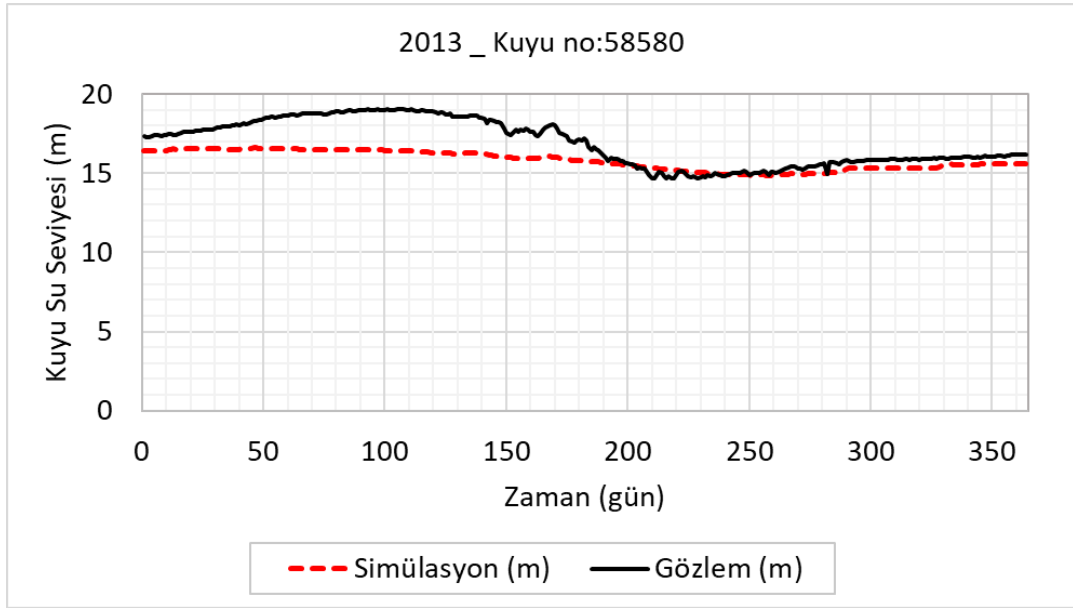
**Şekil 4.9.** 2013 yılı 5 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



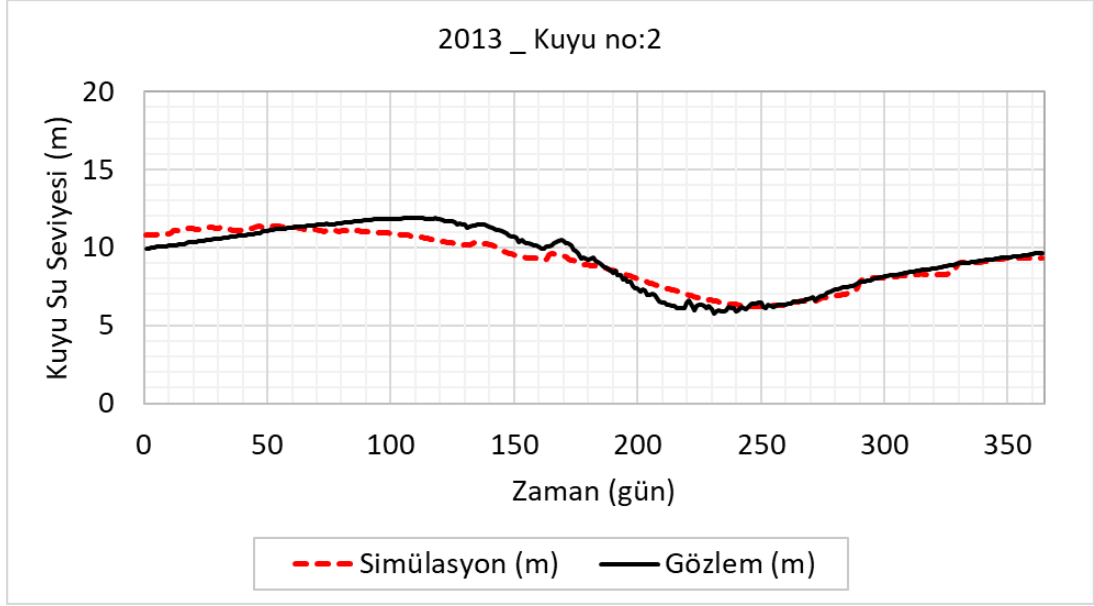
**Şekil 4.10.** 2013 yılı 58578 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



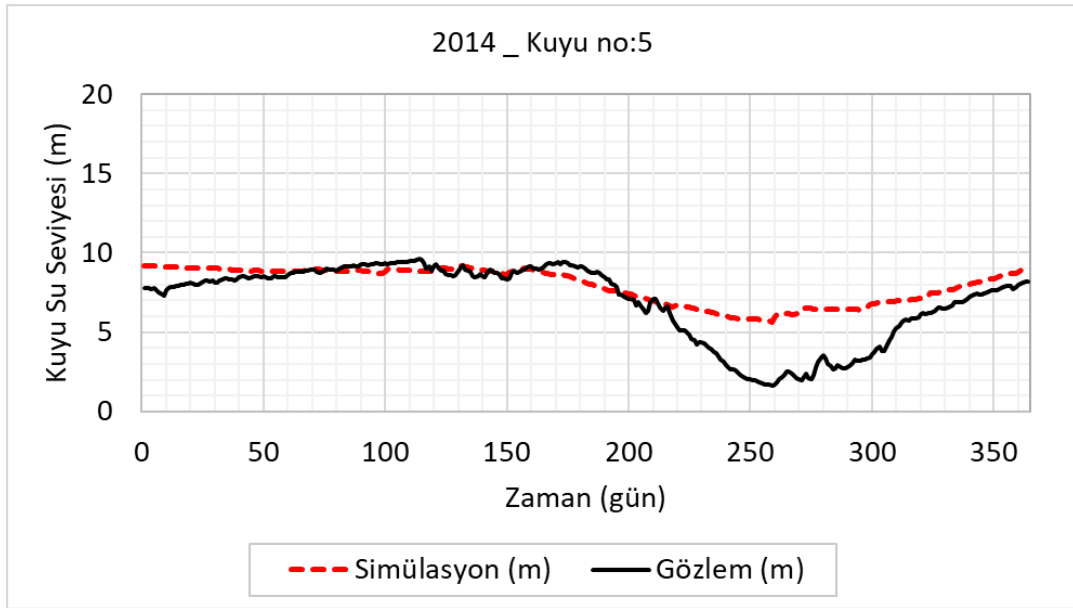
**Şekil 4.11.** 2013 yılı 58579 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



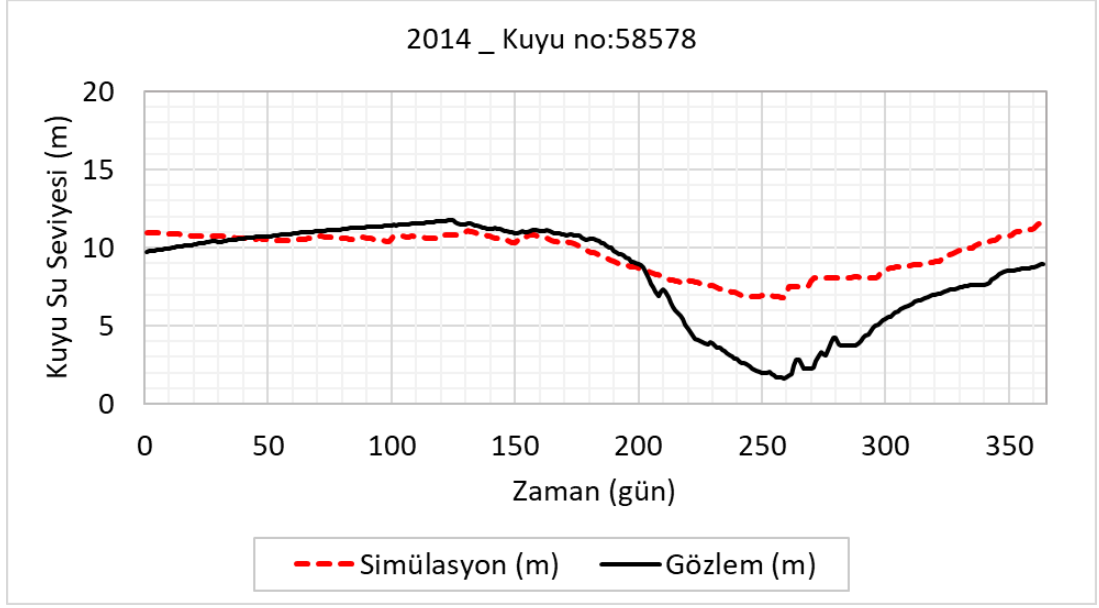
**Şekil 4.12.** 2013 yılı 58580 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



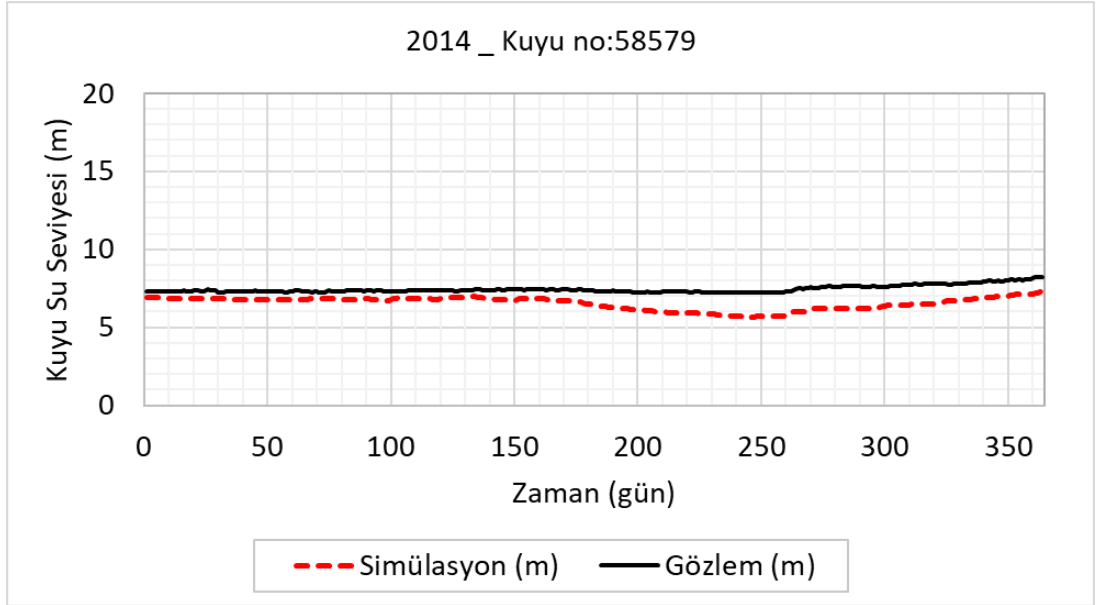
**Şekil 4.13.** 2013 yılı 2 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



**Şekil 4.14.** 2014 yılı 5 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği

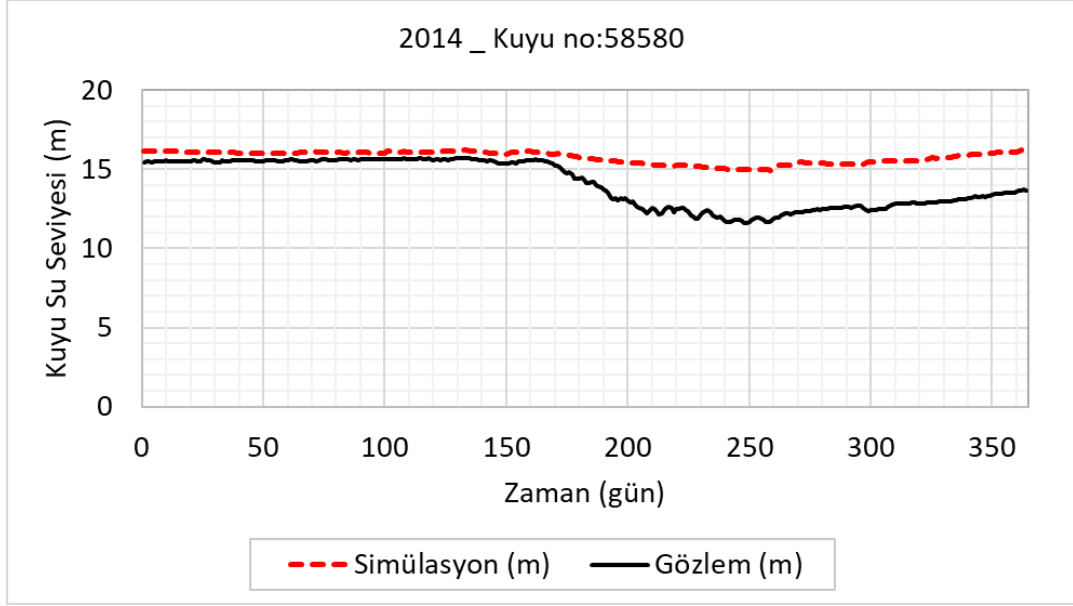


**Şekil 4.15.** 2014 yılı 58578 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği

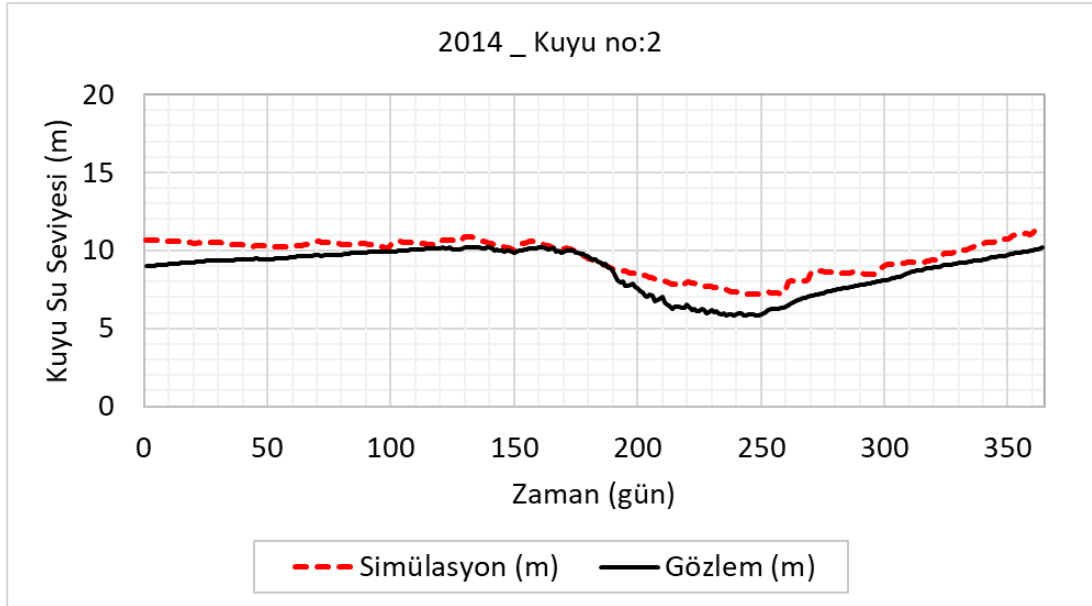


**Şekil 4.16.** 2014 yılı 58579 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği

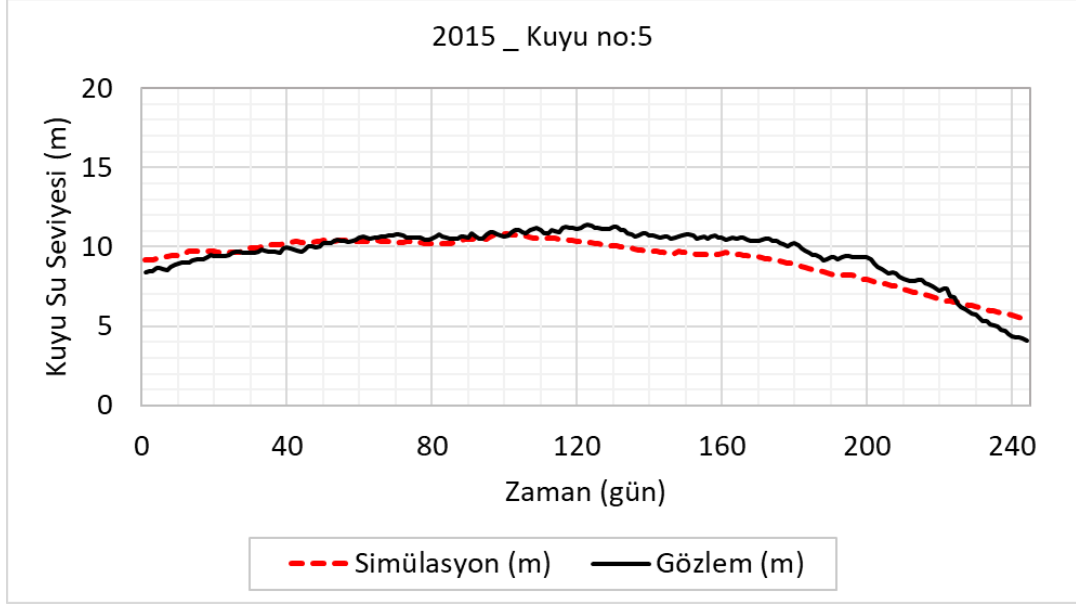




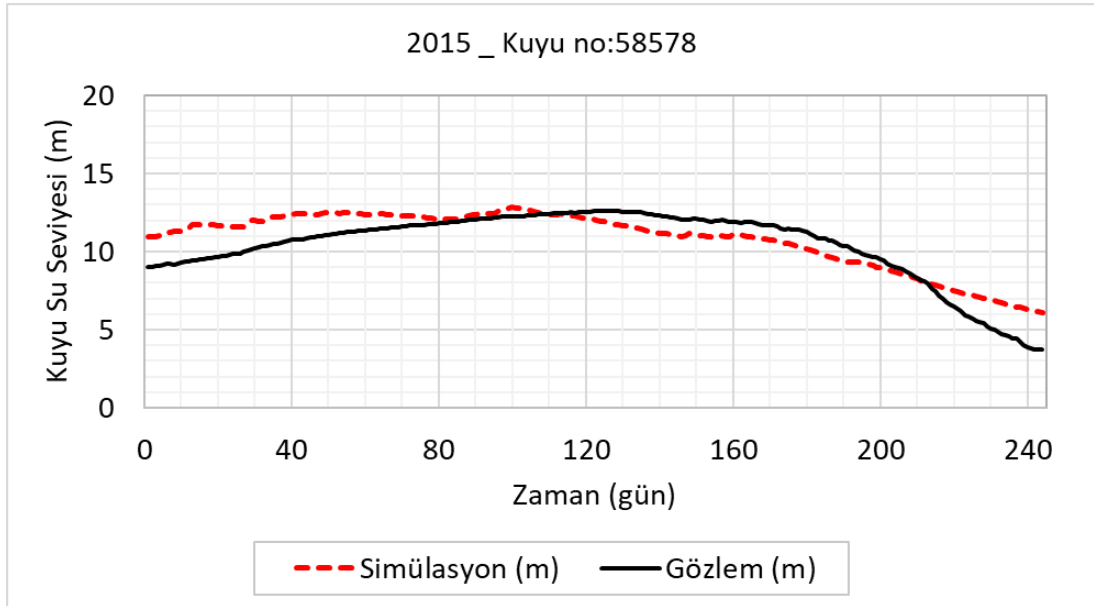
**Şekil 4.17.** 2014 yılı 58580 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



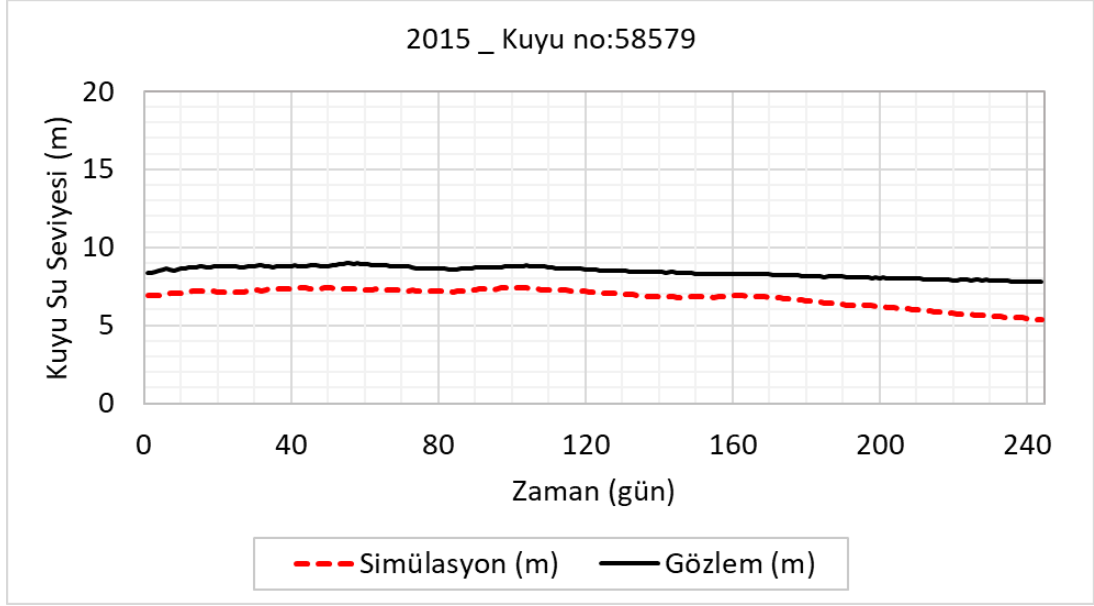
**Şekil 4.18.** 2014 yılı 2 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



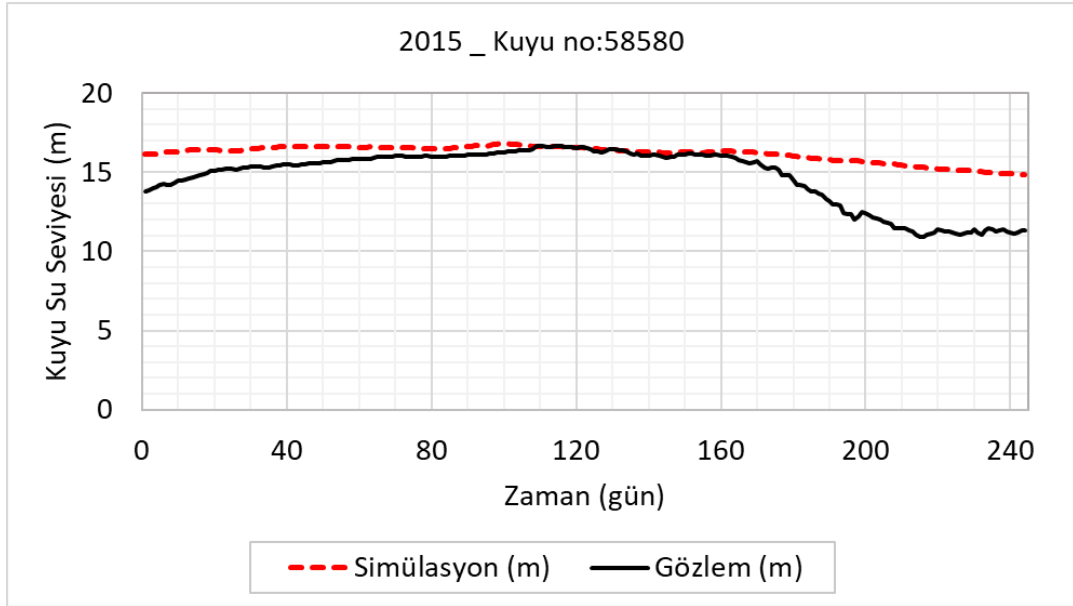
**Şekil 4.19.** 2015 yılı 5 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



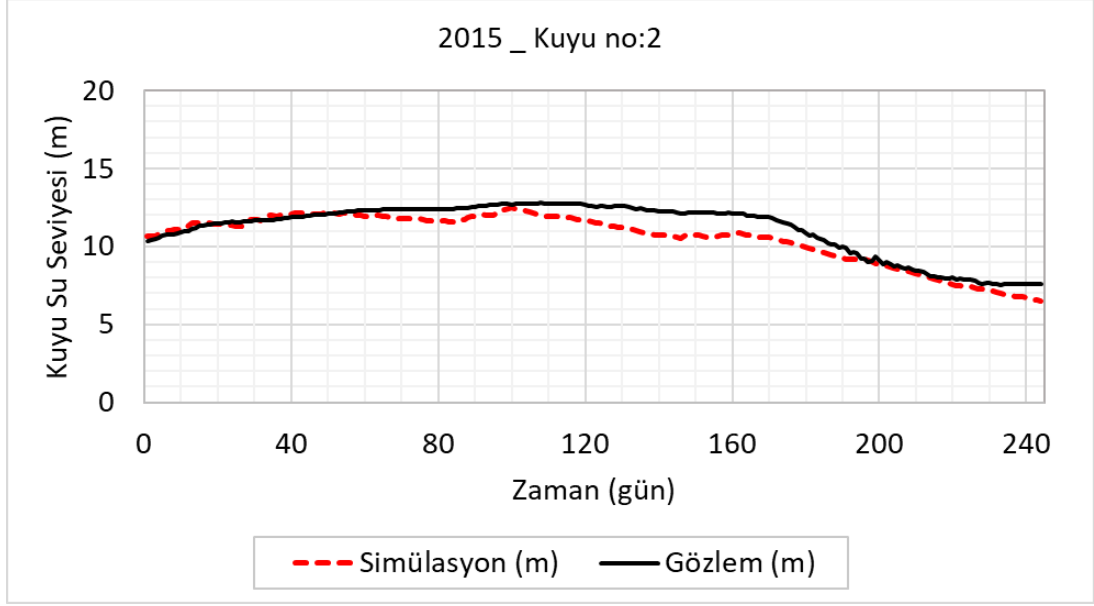
**Şekil 4.20.** 2015 yılı 58578 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



**Şekil 4.21.** 2015 yılı 58579 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



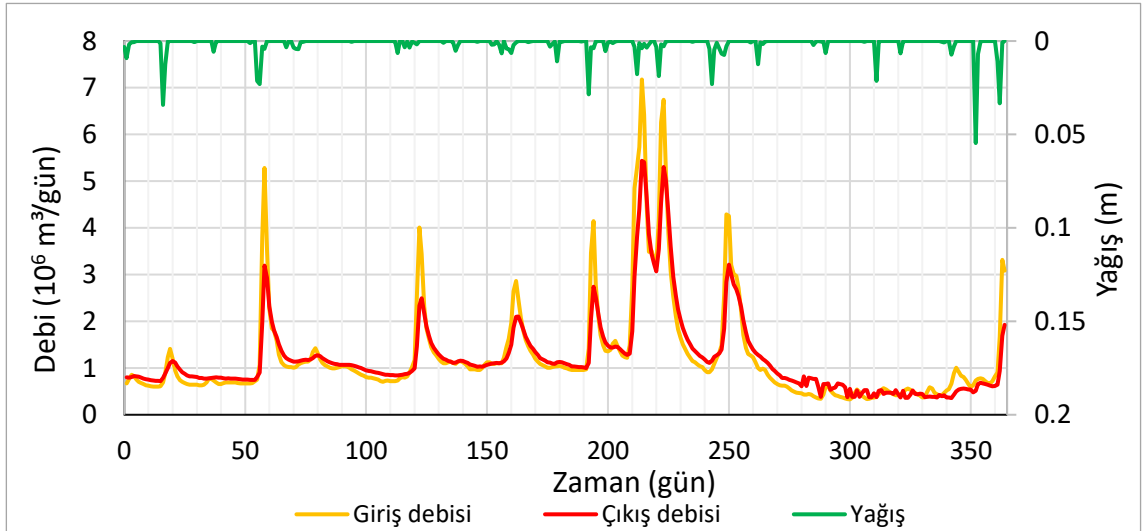
**Şekil 4.22.** 2015 yılı 58580 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği



**Şekil 4.23.** 2015 yılı 2 nolu kuyuya ait seviyelerin gözlem ve simülasyon değerlerinin grafiği

#### 4.3. AGİ Verileri ile Çözüm

1 Ekim 2013 – 30 Eylül 2014 tarihleri arası bir yıllık AGİ değerleri ile yapılan simülasyon verileri şu şekildedir:



**Şekil 4.24.** AGİ değerleri ile yapılan simülasyon (1 Ekim 2013 – 30 Eylül 2014)

Grafikten görüldüğü üzere yağışlar akarsu debisini yükseltmiştir. Piklerde çıkış debisinin sönümlenmesinin nedeni akarsudan akifere debi kaybıdır. Genel olarak çıkış debisinin giriş debisinden bir miktar az olduğu görülmektedir. Bu durum akarsudan akifere debi kaybı olduğunu göstermektedir. Bu durum Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Susurluk Çayı Yahyaköy AGİ için giriş ve çıkış debi değerleri

AGİ-Yahyaköy	Akış Hacmi (m <sup>3</sup> )	Ortalama Debi (m <sup>3</sup> /sn)
Giriş (Yıllık toplam)	448131898.5	5186.7
Çıkış (Yıllık toplam)	438795679.3	5078.7
Fark	9336219.1	108.1

#### 4.4. Değerlendirme

Kararlı durumda yapılan kalibrasyon sonucunda elde edilen hidrolik iletkenlik değeri 100 m/gün’dür. Bu değer birkaç küçük bölge haricinde kararsız durum simülasyonunda da havzanın geneli için geçerlidir. Kararsız durum modellemesinde bağımsız olarak yapılan simülasyon sonucunda da hidrolik iletkenlik için aynı değer (100m/gün) elde edilmesi yapılan modellemenin tutarlılığını desteklemiştir.

Kararsız durumda 2013 yılında yapılan kalibrasyon sonucunda elde edilen veriler ile 2014 ve 2015 yıllarında yapılan simülasyon genel olarak düşük hatalar vermiş ve kalibrasyon sonucu elde edilen parametre değerlerini doğrulamıştır.

Kararsız durum ile kararlı durum modellemeleri karşılaştırıldığında kararsız durum modellemesinin arazi verilerine daha iyi uyum sağladığı ve gerçek değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Kararlı durumda ortalama mutlak hata 2013, 2014 ve 2015 yılları için sırasıyla 2,21 , 2,54 , 1,16 bulunmuş iken kararsız durumda ortalama mutlak hata ise belirtilen yıllar için sırasıyla 1,01 , 1,29 , 1,13 bulunmuştur. Kararsız durumun yeraltı suyu modellemesi için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 4.5. Tartışma

Kararsız durum modellemesinde negatif yönde yüksek NSE değerleri ile karşılaşılmıştır. Bu durum NSE katsayısının formülizasyonundan (Eşitlik 2.28) kaynaklanmaktadır. Formülün paydasındaki ifadeden dolayı gözlem değerleri ile gözlem ortalaması çok yakın ise sonuç eksi sonsuza yakınsamaktadır. Diğer bir ifade ile gözlem değerleri yatay bir doğruya yakın bir grafik çizdiği ölçüde sonuç da eksi sonsuza yaklaşmaktadır. Modellemede özellikle 58579 nolu kuyunun gözlem verilerinin Şekil 4.11, Şekil 4.16, ve Şekil 4.21'den de görüleceği üzere doğrusala yakın olması NSE değerlerinin aşırı tepki vermesine neden olmuştur. NSE literatürde daha ziyade akım hidrografi için önerilmiştir. Kuyu seviyelerinin hata ölçümünde RMSE ve  $\rho$  korelasyonunun daha sağlıklı ölçücüler olduğu görülmüştür.

MODFLOW simülasyonunda düşük  $S_y$  (özgül verim) değerleri akiferdeki depolama kabiliyetini azalttığı için su seviyelerinde (gözlem verilerine göre) yüksek dalgalanmalara sebep olmaktadır.  $S_y$ 'nin artırılması bu sıçramaları azaltmaktadır.

Simülasyonda kullanılan düşük  $K$  (hidrolik iletkenlik) değerleri akiferde suyun daha yavaş yayılmasına, bunun sonucu olarak hesaplanan su seviyelerinin gözlem değerlerine göre yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.  $K$ 'nın artırılması ile bu sorun çözülmektedir.

Map Data altında kavramsal modelde yapılan her değişikliğin mutlaka MODFLOW'a aktarılması (Map to MODFLOW komutu) gerekmektedir. Aksi takdirde MODFLOW kavramsal modelde yapılan değişikliği hesaba katmadan işlem yapmaktadır.

Kararsız durumda bazı simülasyonlarda, ilk aylarda su seviyelerinde gözlem değerlerinden çok daha yüksek değerlerle karşılaşılmıştır. Bunun sebebi, kararsız durum simülasyonu başlatıldığında, modelin ilk birkaç günlük yağışı baz alarak önce kararlı durum simülasyonu yaparak başlangıç seviyelerini belirlemesidir. Bunun önüne geçebilmek için ya ilk birkaç günlük yağış değerleri düşürülmeli ya da başlangıç değerleri başka bir simülasyondan kopyalanmalıdır.

MODFLOW simülasyonu erken sonlandırıyor ise, bu durum izin verilen maksimum iterasyon sayısının yetersiz olmasından kaynaklanabilmektedir. Sekmeler kısmından MODFLOW>PCGN Solver'dan (veya hangi çözücü kullanılıyor ise) maksimum iterasyon sayısı artırılabilir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada Susurluk havzasının Bursa ili Karacabey ve Mustafakemalpaşa ilçe sınırları içinde kalan kısmının yeraltı suyu dağılımının sayısal modellemesinin yapılmıştır. Modelleme çalışması kapsamında, havzaya ait 2013-2015 yılları arasını kapsayan zaman aralığı için veriler toplanmış, CBS ortamında havza boyutlandırılmış, işlenmiş ve havza elemanları çizilmiştir. GMS'e aktarılan havza yağış, buharlaşma ve diğer veriler girilmek suretiyle MODFLOW'da modellenmiştir. Modellemenin doğruluğunu tespit etmek amacıyla hata payları hesaplanmış, hataları minimize edecek kalibrasyonlar yapılmıştır. Havzanın hidrojeolojik davranışını temsil eden bir sayısal model oluşturulmuştur.

Havzanın modellenmesi kararlı ve kararsız durum için yapılmıştır. Kararsız durum simülasyonunun daha az hata değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak sonuçlar arazi verilerine uyum sağlamış ve hatalar kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır.

AGİ verileri ile yapılan simülasyonda havza boyunca pik debilerin ve ortalama debinin azaldığı görülmüştür. Nehir akifere su kaybetmektedir.

Modellemede hatalarının azalması ve daha iyi sonuçlar elde edebilmek için;

- Havzada bulunan çok sayıda sulama kanallarının modele dahil edilmesi
- Havzayı daha iyi temsil edecek iyi dağılıma sahip daha fazla rasat kuyusu olması
- Daha fazla AGİ ve Göl gözlem istasyonu kurulması
- Havza içinde buharlaşma istasyonu kurulması
- Tarım ve sanayi bölgelerinde pompaj kuyularından çekilen debilerin belirlenmesi
- Yeraltı suyu modeli ile yüzey akışı modelinin beraber çalıştırılması

durumunda daha iyi bir model elde edileceği düşünülmektedir.

Yapılan çalışmanın, havzada yapılacak planlama çalışmaları için bilgi kaynağı olarak kullanılabilceği düşünülmektedir. Ayrıca modellenmenin, havzanın yeraltı suyu seviyesinin daha kolay ve daha ucuz yolla takibine imkân sağlayacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Ambroggi, R.P. 1977.** Underground reservoirs to control the water cycle. *Scientific American* 236(5): 21–27.
- Anonim, 2002.** 1/500 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, İstanbul ve İzmir paftaları. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Anonim, 2012.** TÜBİTAK MAM Çevre Enstitüsü. Proje Adı: Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması-*Susurluk Havzası*.pdf, 01:151-152
- Back, W., Rosenshein, J.S., Seaber, P.R. 1988.** Hydrogeology. The Geology of North America, Vol. O-2. The Geological Society of North America, Boulder, Colorado.
- Banta, E.R. 2000.** MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-Documentation of Packages for Simulating Evapotranspiration with a Segmented Function (ETS1) and Drains with Return Flow (DRT1). Open-File Report 00-466.
- Boughariou, E., Allouche, N., Jmal, I., Mokadem, N., Ayed, B., Hajji, S., Khanfir, H., Bouri, S. 2018.** Modeling aquifer behaviour under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 141:118-129.
- Berner, E.K., Berner, R.A. 1987.** The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Chen, X., Huang, Y., Ling, M., Hu, Q., Liu, B. 2012.** Numerical modeling groundwater recharge and its implication in water cycles of two interdunal valleys in the Sand Hills of Nebraska. *Physics and Chemistry of the Earth*, 53-54:10-18.
- Diver Office, 2015.** Van Essen Instruments B.V. Delftechpark 20, Delft, Netherlands.
- Gaur, S., Chahar, B. R., Graillot, D., 2011. Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13:127-139.
- Doble, R.C., Pickett, T., Crosbie, R.S., Morgan, L.K., Turnadge, C., Davies, P.J. 2017.** Emulation of recharge and evapotranspiration processes in shallow groundwater systems. *Journal of Hydrology*. 555. 10.1016/j.jhydrol.2017.10.065.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979.** Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Garrels, R.M., Mackenzie, F.T., Hunt, C. 1975.** Chemical Cycles and the Global Environment: Assessing Human Influences. Kaufman, Los Altos, California.
- 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.
- Johnson, A.I. 1967.** Specific yield - compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D:74
- Korkmaz, S., Pekkan, E., Güney, Y. 2016.** Transient Analysis with MODFLOW for Developing Water-Diversion Function. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21:1-10
- Lachal, F., Mlayah, A., Bédir, M., Tarhouni, J., Leduc, C. 2012.** Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine–Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia). *Computers & Geosciences*. 48. 187–198. 10.1016/j.cageo.2012.05.007.
- Liggett, J.E., Knowling, M.J., Werner, A.D., Simmons, C.T. 2013.** On the implementation of the surface conductance approach using a block-centred surface–

- subsurface hydrology model. *Journal of Hydrology*. 496:1–8. 10.1016/j.jhydrol.2013.05.008.
- Liu M., Jiang, Y., Xu, X., Huang, Q., Huo Z., Huang, G. 2018.** Long-term groundwater Dynamics affected by intense agricultural activities in oasis areas of arid inland river basins, Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203: 37-52.
- Maheswaran, R., Khosa, R., Gosain, A.K., Lahari, S., Sinha, S.K., Chahar, B.R., Dhanya, C.T. 2016.** Regional Scale groundwater Modelling Study for Ganga River Basin. *Journal of Hydrology*. 541. 10.1016/j.jhydrol.2016.07.029.
- Maurits la Rivière, J.W. 1989.** Threats to the world's water. *Scientific American* 261:48–55.
- Mc Donald, M. G., Harbaugh A. W. 1988.** A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of water-resources investigations, U.S. Geological Survey, Denver, 586.
- Moharir, K., Pande, C., Patil S. 2017.** Inverse modelling of aquifer parameters in basaltic rock with the help of pumping test method using MODFLOW software. *Geoscience Frontiers*, 8-6:1385-1395.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. 1970.** River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3):282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Nkhonjera, G. K., Dinka, M. O. 2017.** Significance of direct and indirect impacts of climate change on groundwater resources in the Olifants River basin: A review. *Global and Planetary Change*, 158:72-82.
- Owen, S. J., Jones, N. L., Holland, J. P. 1996.** A comprehensive modeling environment for the simulation of groundwater flow and transport. *Eng. Comput.*, 12(3–4):235–242.
- Panday, S., Huyakorn, P. S. 2004.** A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, 27:361-382.
- Qiu, S., Liang, X., Xiao, C., Huang, H., Fang, Z., Lv, F. 2015.** Numerical Simulation of Groundwater Flow in a River Valley Basin in Jilin Urban Area, China. *Water*. 7. 5768-5787. 10.3390/w7105768.
- Refsgaard, J. C., Storm, B. J. 1995.** MIKE SHE. In: Computer Models of Watershed Hydrology (ed. by V. P. Singh), 809-846. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.
- Shu, Y., Villholth, K.G., Jensen, K.H., Stisen, S., Lei, Y. 2012.** Integrated hydrological modeling of the North China Plain: Options for sustainable groundwater use in the alluvial plain of Mt. Taihang. *Journal of Hydrology*. 464–465:79–93. 10.1016/j.jhydrol.2012.06.048.
- Sobeih, M. M., El-Arabi, N. E., Helal, E. El D. Y., Awad, B.S. 2017.** Management of water resources to control groundwater levels in the southern area of the western Nile delta, Egypt. *Water Science*, 31-2:137-150.
- Surinaidu, L., Gurunadha Rao V.V.S., Srinivasa Rao, N., Srinu, S. 2014.** Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India. *Water Resources and Industry*. 7-8. 10.1016/j.wri.2014.10.002.
- Tam, V. T., Nga, T. T. V. 2018.** Assessment of urbanization impact on groundwater resources in Hanoi, Vietnam. *Journal of Environmental Management* 227: 107-116

**Wang, H., Gao, J. E., Zhang, M., Li, X., Zhang, S., Jia, L. 2015.** Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. *CATENA*, 127:80-91.

**Yang, Q. C., Liang, J., Yang, Z. P. 2012.** Numerical Modeling of Groundwater Flow in Daxing (Beijing), China. *Energy Procedia*, 14:1671-1676.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammed Zakir KESKİN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Siirt – 19.03.1989  
Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Ahmet Hamdi Gökbayrak AÖL - Bursa  
Lisans : Kocaeli Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü - İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı - Hidrolik Bilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Orhangazi Belediyesi–İmar ve Şehircilik Müdürlüğü /Bursa

İletişim (e-posta) : mzk\_16@hotmail.com

Yayımları :

**Keskin, M.Z., Korkmaz, S. 2018.** MODFLOW ile Yeraltı Suyu Akımının Sayısal Modeli: Bursa İli, Karacabey ve Mustafakemalpaşa Ovası Uygulaması, Ulusal Hidrojeoloji ve Su Kaynakları Sempozyumu, 27-29 Eylül 2018, HÜ-UKAM, Ankara.  
**Korkmaz, S., Keskin, M.Z. 2019.** Numerical model of groundwater flow using MODFLOW: Application to western Bursa, Turkey, 11th World Congress on Water Resources and Environment (EWRA 2019), Madrid, 25-29 June 2019.  
**Korkmaz, S., Keskin, M.Z. 2019.** Numerical modeling of a phreatic aquifer flow in western Bursa, International Science and Technology Conference, Prague, July 03-05, 2019.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	Muhammed Zakir KESKİN
Tez Adı	YERALTI SUYU AKIMININ MODFLOW KULLANILARAK SAYISAL MODELLENMESİ: BURSA İLİ KARACABEY VE MUSTAFAKEMALPAŞA OVASI UYGULAMASI
Enstitü	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği
Tez Türü	Yüksek Lisans
Tez Danışmanı	Doç. Dr. Serdar KORKMAZ
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama izni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Bursa Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 14.10.2019

İmza :

