T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜYÜKÇEKMECE HAVZASI İÇİN ENTEGRE EDİLMİŞ YÜZEY SUYU VE YERALTI SUYU HİDRODİNAMİK MODELİ

Hekmatullah MOHAMMADI

DANIŞMAN
Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2022

Bu çalışma, 21.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU
Dokuz Eylül Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Uğur BOYRAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin ..... numaralı projesi ile desteklenmiştir.
Bu tez, her hangi bir proje ile desteklenmemiştir.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitim süreçlerim boyunca destek ve bilgi birikimini benden esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr.Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN'a teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Hidrolik anabilim dalı hocalarım, Dr. Öğr. Üyesi Dilek EREN AKYÜZ, Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ, Dr. Öğr. Üyesi Uğur BOYRAZ ile Kaan İlker DEMİREZEN ve İsmail Bilal PEKER'e sonsuz teşekkürler.

Tez çalışma kapasamında ihtiyaç duyulan verilerinin temin edilmesinde DSİ 14. Bölge Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve YAS Şube Müdürlüğüne ve değerli arkadaşım Saffet ALTINDAĞ'a katkılarından dolayı teşekkürlerimi birer borç bilirim.

Tez çalışması ve hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek veren babam Barkatullah MOHAMMADI, annem Saydah MOHAMMADI ve eşim Shahla MOHAMMADI'ya sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Temmuz 2022 Hekmatullah MOHAMMADI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **4**
2.1. BÜYÜKÇEKMECE GÖL HAVZASI 4
2.1.1. Büyükçekmece Göl Havzasının Konumu ve İklimi 4
2.1.2. Büyükçekmece Göl Havzasının Arazi Kullanımı ve Toprak Örtüsü 8
2.1.3. Büyükçekmece Sulak Alan Bölgesi 13
2.2.WMS PROGRAMI 14
2.3. HEC-HMS PROGRAMI 15
2.3.1. SCS Eğri Numarası (SCS-CN) Yöntemi 17
2.3.2. SCS-Birim Hidrograf 18
2.3.3. Nash Sutcliffe Verimlilik Katsayısı 19
2.4. MODFLOW PROGRAMI 19
2.4.1. Yeraltı Suyu Modelleme Sistemi (GMS) 20
2.4.2. MODFLOW Programı Modülleri ve Paketleri 21
2.4.2.1. BOREHOLE Modülü *22*
2.4.2.2. SOLID Modülü *23*
2.4.2.3. River (RIV) Nehir Paketi *23*
2.4.2.4. Genel Yük Sınır Koşulu (General Head Boundary (GHB)) Paketi *25*
2.4.2.5. Besleme (Recharge (RCH)) Paketi *26*
2.4.2.6. Kuyu (Well (WELL)) Paketi *27*
3. MALZEME VE YÖNTEM **28**
3.1. WMS İLE BÜYÜKÇEKMECE GÖL HAVZASI VE ALT HAVZA SINIRLARININ BELİRLENMESİ 28

3.2 HEC-HMS İLE BÜYÜKÇEKMECE HAVZASININ HİDROLOJİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI 32
3.2.1. Hidrolojik model kalibrasyonu 35
3.3. MODFLOW İLE BÜYÜKÇEKMECE GÖLÜ SULAK ALAN BÖLGESİNİN HİDROLİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI 38
3.3.1. MODFLOW ile Yeraltı Suyu Hidrolik Modelinin Oluşturulması 39
3.3.2. MODFLOW ile Oluşturulan Hidrolik Modelin Sınır Koşulları *41*
4. BULGULAR **44**
4.1.HEC-HMS HİDROLOJİK MODEL ÇIKTILARI 44
4.1.1.Kalibrasyon Sonuçları 44
4.1.2. Verifikasyon Sonuçları 47
4.1.2.1. Çakıl Alt Havzası Verifikasyon Sonuçları *48*
4.1.2.2. Sarısu At Havzası Verifikasyon Sonuçları *49*
4.1.2.3. Karasu At Havzası Verifikasyon Sonuçları *50*
4.1.3 Büyükçekmece Havzası Hidrolojik Model Bulguları 54
4.1.4. Sulak Alan Bölgesi için Hidrolojik Model Sonuçları 55
4.2. YER ALTI SUYU HİDROLİK MODEL ÇIKTILARI 58
4.2.1. Kalibrasyon Sonuçları 60
4.2.1.1.MODFLOW Modelinin 2014 Yılına Ait Analiz Sonuçları *60*
4.2.2. Verifikasyon Sonuçları 64
4.2.2.1.MODFLOW Modelinin 2015 Yılına Ait Analiz Sonuçları *64*
4.2.2.2.MODFLOW Modelinin 2016 Yılına Ait Analiz Sonuçları *68*
4.2.2.3.MODFLOW Modelinin 2017 Yılına Ait Analiz Sonuçları *72*
4.2.2.4.MODFLOW Modelinin 2018 Yılına Ait Analiz Sonuçları *75*
4.3. TAŞKIN SENARYOSU 79
5. TARTIŞMA VE SONUÇ **83**
KAYNAKLAR **86**
EKLER ..... Error! Bookmark not defined.
ÖZGEÇMİŞ **89**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Büyükçekmece havzasının konumu (Google Maps).....5
Şekil 2.2:Büyükçekmece Göl Havzasını besleyen Karasu deresi. 5
Şekil 2.3:Büyükçekmece Göl Havzasını besleyen Çakıl deresi. 6
Şekil 2.4:Büyükçekmece Göl Havzasını besleyen Sarısu deresi.....6
Şekil 2.5:Büyükçekmece Barajı (TRT Haber,2020) 7
Şekil 2.6: Büyükçekmece göl havzasının kabartma haritası ve akarsuları.....7
Şekil 2.7: Büyükçekmece göl havzasının arazi kullanımı (CORINE, 2018). 9
Şekil 2.8: Büyükçekmece göl havzasının özet arazi kullanım yüzdeleri. 9
Şekil 2.9: Büyükçekmece göl havzasının hidrolojik toprak grupları (DSI, 1979) 11
Şekil 2.10: Büyükçekmece göl havzasının jeolojisi (DSİ, 1979).....12
Şekil 2.11: Sulak alan bölgesi (Googelearth, 2018).....13
Şekil 2.12: Sulak alanın jeolojik kesidi (DSİ, 1979).....14
Şekil 2.13: WMS programı arayüzü. 15
Şekil 2.14: HEC-HMS programının arayüzü. 16
Şekil 2.15: Alt havza girdilerinin tanımlandığı pencere.....17
Şekil 2.16: GMS programının arayüzü.....21
Şekil 2.17: MODFLOW programının paketleri. 22
Şekil 2.18: Borehole modülü örneği.....23
Şekil 2.19: MODFLOW nehir paketi penceresi. 24
Şekil 2.20: MODFLOW GHB paketinin penceresi.....25
Şekil 2.21: MODFLOW RCH paketinin penceresi. 26
Şekil 2.22: MODFLOW WELL paketinin penceresi. 27
Şekil 3.1: Büyükçekmece Göl Havzası'nın sınırları. 30

Şekil 3.2: Büyükçekmece Göl Havzası'nın 4 ana alt havza sınırı. 30

Şekil 3.3: Büyükçekmece Göl Havzası'na ait 44 alt havza ve yüzölçümleri (alan birimi km^2). 31

Şekil 3.4: WMS programı ile her alt havza için hesaplanmış Eğri Numarası değerleri. 31

Şekil 3.5: HEC-HMS programı ile oluşturulmuş havza modeli. 33

Şekil 3.6: Büyükçekmece Göl Havzası'nın HEC-HMS modeli ve dört ana alt havzanın çıkış noktaları. 37

Şekil 3.7: Sulak alanı içeren HEC-HMS modeli. 37

Şekil 3.8: a) Sulak alan sınırları, b) Sulak alan lokasyonu (GoogleEarth, 2014). 38

Şekil 3.9: MODFLOW programında Sulak Alan bölgesinin akifer tabakalarını temsil eden kuyu kesiti. 39

Şekil 3.10: Yeraltı suyu modelinin boy ve en kesitinin 3 boyutlu görüntüsü. 40

Şekil 3.11: Yeraltı suyu modeli (a) plan (b) 3 boyutlu kesitleri. 40

Şekil 3.12: Yeraltı suyu modelinin yüzey topoğrafyasına ait harita. 42

Şekil 3.13: Yeraltı suyu modelinin sınır koşulları. 42

Şekil 3.14: MODFLOW hidrolik modeli başlangıç hidrolik yükü. 43

Şekil 4.1: Çakıl alt havzası için 2016 yılına ait kalibrasyon grafiği. 46

Şekil 4.2: Sarısu alt havzası için 2016 yılına ait kalibrasyon grafiği. 46

Şekil 4.3: Karasu alt havzası için 2017 yılına ait kalibrasyon grafiği. 46

Şekil 4.4 :Çakıl alt havzasına ait (a) 2014 yılı, (b) 2015 yılı, (c) 2017 yılı ve (d) 2018 yılı verifikasyon grafikleri. 51

Şekil 4.5: Sarısu alt havzasına ait (a) 2014 yılı, (b) 2015 yılı, (c) 2017 yılı ve (d) 2018 yılı verifikasyon grafikleri. 52

Şekil 4.6: Karasu alt havzasına ait (a) 2014 yılı, (b) 2015 yılı, (c) 2016 yılı ve (d) 2018 yılı verifikasyon grafikleri. 53

Şekil 4.7:Büyükçekmece Göl Havzasının Yağış-Akış Hidrografı. 54

Şekil 4.8: Büyükçekmece yağış istasyonuna ait 2014-2018 yıllarında ölçülmüş olan günlük toplam yağış miktarı. 56

Şekil 4.9: Sulak alan bölgesi için 2014 -2018 yıllarında hesaplanmış olan günlük sızma miktarı. 57

Şekil 4.10: Büyükçekmece Gölü'ne ait Ekim 2013-Ağustos 2018 arası gözlemlenen su seviyesi. (DSİ, 2018) 59

Şekil 4.11: Gözlem kuyularında 2014 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzettin..... 62

Şekil 4.12: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2013, (b)Şubat 2014, (c)Nisan 2014, (d)Haziran 2014, (e) Ağustos 2014, (f) Eylül 2014. 63

Şekil 4.13 : Gözlem kuyularında 2015 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzettin..... 66

Şekil 4.14: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2014, (b)Şubat 2015, (c)Nisan 2015, (d)Haziran 2015, (e) Ağustos 2015, (f) Eylül 2015. 67

Şekil 4.15: Gözlem kuyularında 2016 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzetti..... 70

Şekil 4.16: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2015, (b)Şubat 2016, (c)Nisan 2016, (d)Haziran 2016, (e) Ağustos 2016, (f) Eylül 2016. 71

Şekil 4.17: Gözlem kuyularında 2017 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzettin..... 73

Şekil 4.18: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2016, (b)Şubat 2017, (c)Nisan 2017, (d)Haziran 2017, (e) Ağustos 2017, (f) Eylül 2017. 74

Şekil 4.19: Gözlem kuyularında 2018 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzetti..... 77

Şekil 4.20: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2017, (b)Şubat 2018, (c)Nisan 2018, (d)Haziran 2018, (e) Ağustos 2018, (f) Eylül 2018. 78

Şekil 4.21:100 yıllık yağış sırasında Büyükçekmece Göl Havzası çkış debisi. 80

Şekil 4.22:100 yıllık yağış sonucu sulak alanda oluşan sızma miktarı. 80

Şekil 4.23: Hezarfen gözlem kuyusunun 100 yıllık yağıştaki durumu..... 81

Şekil 4.24: Sulak alan bölgesi için 100 yıllık yağıştan oluşan YASS değişimi: (a) 1.saat, (b)4.saat, (c) 9.saat, (d) 12.saat, (e) 19.saat, (f) 24.saat..... 82

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Büyükçekmece göl havzasının arazi kullanım tablosu. 10

Tablo 3.1: HEC-HMS programında oluşturulmuş hidrolojik modelin girdileri.....34

Tablo 3.2:Büyükçekmece göl havzasındaki 3 ana alt havzanın özellikleri. 36

Tablo 4.1: Büyükçekmece alt havzalarına ait kalibre edilmiş Eğri Numarası değerleri. 47

Tablo 4.2: Büyükçekmece alt havzalarına ait verifikasyon sonucu elde edilen Nash Sutcliffe değerleri. 47

Tablo 4.3: Yeraltı suyu modelinin yıllara göre başlangıç su seviyesi. 58

Tablo 4.4: Sulak alan bölgesine ait hidrolik modelin kalibrasyon sonuçları.....58

Tablo 4.5: Gözlem kuyularında hesaplanan ve ölçülen statik su seviyeleri. 61

Tablo 4.6: MODFLOW analizleri 2014-2018 yılları için istatistiksel kalibrasyon ve verifikasyon değerleri 61

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	**: Alan (L^2)**
Ai	**: Alt Havzasının Alanı (L^2)**
C	**: Akiferin İletimlilik Katsayısı (L^2/T)**
CN_i	**: Alt Havza Eğri Numarası**
CN_{ort}	**: Ortalama Eğri Numarası**
h	**: Hidrolik Yük (L)**
K	**: Hidrolik İletkenliği (L/T)**
Q	**: Debi (L^3/T)**
Qe	**: Etkileşim Debi (L^3/T)**
R	**: Yüzeysel Akış Miktarı (L)**
S	**: Potansiyel Maksimum Yağış Tutulması (L)**
S_s	**: Akifer Depolama Katsayısı**
S_y	**: Akiferin Özgül Verim Verimlilik Katsayısı**
t	**: Zaman (T)**
T_c	**: Pike Erme Zamanı (T)**
T_{lag}	**: Gecikme Zamanı (T)**
W	**: Kuyu/Kaynak**
φ	**: Porozite**

Kısaltmalar	Açıklama
AGİ	: Akım Gözlem İstasyonu
CORINE	: Coordination of Information on the Environment)
cm	: Santimetre
CN	: Curve Number
dk	: Dakika
DSİ	: Devlet Su İşleri
ft	: Feet
GD	: Güney Doğu
GMS	: Grounwater Modeling System
HEC-HMS	: Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
HSG	: Hidrolojik Toprak Grubu
KB	: Kuzey Batı
km	: Kilometre
km2	: Kilometre kare
m	: Metre
MAR	: Ortalama Mutlak Artık
MGM	: Meteoroloj Genel Müdürlüğü
mm	: Milimeter
MODFLOW	: Modular Finite Difference Flow Model
MR	: Ortalama Artık
NSE	: Nash Suitcliffe
RMSR	: Karakök Ortalama Artık
s	: Saniye
sa	: Saat
SCS	: Soil Conservation Service
SCS-CN	: Soil Conservation Service-Curve Number
USDA	: U.S. Department of Agriculture
WMS	: Watershed Modeling System

ÖZET

BÜYÜKÇEKMECE HAVZASI İÇİN ENTEGRE EDİLMİŞ YÜZEY SUYU VE YERALTI SUYU HİDRODİNAMİK MODELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hekmatullah MOHAMMADI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

Su kaynaklarının önemli bir parçası olan yeraltı suyunun sürdürülebilirliğini sağlayabilmek için, sulak alanların hidrolojik ve hidrolik modellemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada Büyükçekmece Havzası için yüzey suyu ve yer altı suyu hidrolojik ve hidrolik modellemesi yapılmıştır. Yüzey suyu modellemesi için HEC-HMS programı kullanılmıştır. Bu model ile farklı yağışlar altında bölgede oluşan yüzeysel akış ve sulak alan bölgesindeki sızma miktarı elde edilmiş ve yeraltı su seviyesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca şiddetli yağışlar sırasında oluşabilecek taşkın etkileri değerlendirilmiştir. Büyükçekmece Gölü çevresinde yer alan sulak alan bölgesine ait yeraltı suyu hidrolik modeli MODFLOW programından faydalanılarak oluşturulmuş ve bölgeye ait yeraltı su seviyesi değişimleri elde edilmiştir. HEC-HMS model çıktısı olan sızma miktarı MODFLOW program girdilerinden birini oluşturmuştur.

HEC-HMS modeli için havza özelliklerini içeren parametreler yani havzanın alanı, eğimi ve geçirimliliği, akarsuların boyutları, taban eğimi ve pürüzlülüğü tanımlanmıştır. İlaveten, akım gözlem istasyonlarından ölçülen maksimum aylık debi değerleri, model kalibrasyonu ve verifikasyonu için kullanılmıştır. HEC-HMS modeli ile havza üzerinde oluşan yüzeysel akış hidrografı ve alt havzalarda oluşan sızma miktarı belirlenmiştir. Bataklık bölgesinde oluşan yeraltı suyu akımı modellemesi için akiferin sınır koşulları, tabakaların hidrolik iletkenlikleri, porozitesi ve özgül verimi gibi zemin parametreleri MODFLOW programına tanımlanmış ve analizler yapılmıştır. Bölgede bulunan gözlem kuyularından ölçülmüş olan yeraltı su seviyeleri ile yeraltı suyu hidrolik modelinin kalibrasyonu sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yeraltı su seviyesinin uzun yıllar içerisinde değişimi elde edilmiştir. Son olarak 100 yıllık yağış ile HEC-HMS hidrolojik modelin simülasyonu yapılarak 100 yıllık taşkın debisi elde edilmiş ve buna göre MODFLOW yeraltı suyu hidrolik modeli ile olası taşkın sırasında yeraltı suyu seviyesinde ne kadar değişklik olacağı gözlemlenmiştir.

Temmuz 2022, .105. sayfa.

Anahtar kelimeler: Entegre Yüzey suyu-Yeraltı Suyu Modeli, Büyükçekmece Havzası, Yeraltı suyu, HEC-HMS,WMS, MODFLOW

SUMMARY

AN INTEGRATED SURFACE WATER AND GROUNDWATER HYDRODYNAMIC MODEL FOR BÜYÜKÇEKMECE WATERSHED

M.Sc. THESIS

Hekmatullah MOHAMMADI

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

In order to ensure sustainability of groundwater, which is a major element of water resources, hydrological and hydraulic models for wetlands are needed. In this study, an integrated surface water and groundwater hydrological and hydraulic model is generated for Büyükçekmece Watershed. HEC-HMS program is used for surface water modeling. With this model, surface runoff and infiltration under different rainfall events are obtained and the effects of surface runoff on groundwater table fluctuation is examined. The hydraulic model of groundwater flow for the region is generated by using MODFLOW program and change in groundwater head of the region under different rainfall events is obtained. The output of HEC-HMS model is used as input of the MODFLOW program.

Input parameters for HEC-HMS model consist of watershed characteristics such as area, slope, and permeability and river characteristics such as bottom slope, length and roughness are defined. In addition, the maximum monthly flow rates measured at gauge stations are used for calibration and verification of the model. Soil parameters of the aquifer in the region, such as hydraulic conductivity, porosity and specific yield of the layers, and boundary conditions of the aquifer are defined in MODFLOW program. Calibration of groundwater flow hydraulic model is done by groundwater levels measured at observation wells in the region. According to the results obtained, the time-dependent change of the groundwater level at the wetland site is obtained.

July 2022, 105 pages.

Keywords: Integrated surface water-groundwater model, Büyükçekmece Watershed, HEC-HMS, WMS, MODFLOW

1. GİRİŞ

Nüfus artışıyla beraber kentleşmelerin artması nedeniyle geçirimsiz arazi kullanımın artması ve bunun yanı sıra iklim değişikliği, su kaynaklarının tükenmesi ve kirlenmesi risklerini arttıran en büyük faktörler arasına girmektedir. Su kaynaklarının mevcut durumunu koruyarak daha sürdürebilir hale getirmek için hidrolik ve hidrolojik integre havza modellemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Göller, bataklıklar ve göletler gibi sulak alanların hidrodinamik modellemeleri su kaynakları açısından çok önem arz etmektedir. Sulak alanın hidrolojik modellemesi için litratürdeki çalışmaların bir kısmı şu şekildedir: Yılmaz ve diğ.(2012) Upper Euphrates havzasının kar erimesinden oluşan yüzeysel akışın hesabını Large Basin Runoff Model (LBRM) ve HEC-HMS modelleri üzerinde yaparak bu modellerin hassasiyetlerinin birbirine çok yakın olmasını elde etmiştir.

Halwatura ve diğ. (2013) HEC-HMS programı ile Snyder birim hidrograf ve Clark birim hidrograf yöntemlerini kullanarak tropikal bir havzanın yüzeysel akışını modellemiştir. Yarı-kurak (semi-arid) iklime sahip olan havzanın HEC-HMS modelinde; sızma için SCS eğri numarası ve yüzeysel akış için SCS birim hidrograf yöntemleri kullanılarak tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir (Derdour ve diğ., 2017). Zelelew ve Meles (2018)'in yaptığı çalışmaya göre; Kuzeybatı Etiyopya'da Abbay havzasının yüzeysel akış tahminlerinde HEC-HMS'in uygulanabilirliğini irdeleyerek makul sonuçlar elde edilmiştir. Böylelikle kalibrasyon sırasında; SCS eğri numarası ve sızma hızı duyarlı parametreler olarak bulunmuştur (Zelelew ve Meles, 2018). Tassew ve diğ. (2019) HEC-HMS modelini kullanarak Tana göl havzasının akış simülasyonunu yapmıştır. Khan ve diğ. (2019) HEC-HMS ile Upper Indus havzasının yüzeysel akış hidrografını hesaplayarak kalibrasyon ve verifikasyon modelini yapmıştır.

Mesta ve diğ. (2019) Yenicegörüce havzasının yağış-akış hesaplamasını HEC-HMS modeli ile yapmıştır. Masoud ve diğ.(2019) akım ölçümleri olmayan iki alt havzanın yağış-akış modelini yapmıştır.

Son zamanlarda literatürde iklim değişikliğinden dolayı ortaya çıkan ani taşkınların oluşturacağı pik debi tahminleri, yağmur suyu drenaj sistemi tasarımında ihtiyaç duyulan taşkın pik debisinin hesaplamalarında, HEC-HMS programı çok sık kullanılmaktadır.

Cheah ve diğ.(2019) Malezya'da Selangor havzasının taşkın pik debi modellemesini HEC-HMS ile yapmıştır. Tu ve diğ.(2020)'in taşkın risk yönetimi ile ilgili yaptıkları çalışmada Çin'in Sichuan ilindeki dağlık bir alanda bulunan küçük bir havzanın ani taşkın sürecini simüle etmek ve taşkın hidrograflarındaki değişimi analiz etmek için HEC-HMS modeli kullanmıştır. Böylelikle modelin tatmin edici kalibrasyon ve verifikasyon sonuçlarından yola çıkarak, HEC-HMS'in dağlık alanlarda oluşan ani taşkınların simülasyonunda etkili olduğu gösterilmiştir (Tu ve diğ., 2020).

Bu çalışmaların yanısıra, yüzey suyu modellemelerinde yüzeysel akışın hesaplamalarından sonra bir entegre havza modellemesinde yeraltı suyu modellemeleri için literatürde MODFLOW programı sıklıkla kullanılmıştır. Ayrıca, sulak alanların yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri ile ilgili literatürde farklı çalışmalar yer almaktadır. Yüzey suyu ve yeraltı suyun etkileşimi nedeniyle iki farklı su kaynağında bulunan kirlilik maddeleri su kalitesini etkiler; dolaysıyla sulak alanların hidrolojisini anlayabilmek için, yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimlerinin rolünü anlamak önemlidir (Kazezyılmaz-Alhan ve Medina, 2008). Sulak alandaki yeraltı suyunun hareketi mevsime göre değişmektedir; kış aylarında derinlikteki sıcak su, yüzeydeki soğuk suya tepki göstererek yavaşça yukarıya doğru çıkarken, yaz aylarında ise bu işlemin tersi oluşmaktadır (Gerla ve Matheney, 1996). Kazezyılmaz-Alhan ve Medina (2008)'nın yaptığı çalışmada, yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşim debisi; eğimi yüksek olan sulak alan için eğimi düşük olandan daha fazla çıkmıştır. Kumar ve Nagaraj (2018) Gowri-hole alt havzasının nehir-akifer etkileşimini incelerken; Gowri hole musonlarda akifer deşarjı nedeniyle nehirin beslendiğini, muson sonrası ve yaz aylarında ise nehrin akiferi beslediğini ve yaz aylarının sonuna kadar nehir yatağının sızıntıları nedeniyle bir kaç bölgede nehir yatağının dağıldığını gözlemlemiştir.

Bradford ve Acreman (2003) yaptığı çalışmaya göre MODFLOW programını kullanarak, bir sulak alanın yüzey suyu ve yeraltı suyu seviyelerini incelediğinde; zemin geçirimliliği düşük olan sulak alanlarda yağış ve evapotranspirasyonun çok etkili olduğunu gözlemlemiştir. Yeraltı ve yüzey suyu seviyelerinin korunmasının, yağış ve evapotranspirasyonla yakından bağlantılı olduğu görülmektedir (Gerla ve Matheney, 1996). Liu ve diğ. (2020) kıyı sulak

alanlarındaki yeraltı su seviyesi değişimini incelediği çalışmada yeraltı su seviyeleri ve akış alanının, kıyı şeridinin değişimiyle beraber değişiklik gösterdiğini, arazi alanındaki siltlenmenin neden olduğu genişlemeler ile seviyelerin arttığını ve erozyon bölgesinde hafif bir düşüş sergilediğini gözlemlemiştir (Liu ve diğ., 2020). Tarımsal amaçlı su kullanımı göl/sulak alanlarının su miktarı ve seviyesine önemli ölçüde etki etmektedir (Jiang ve diğ., 2020).

Büyükçekmece havzası, su kaynakları açısından önemli bir rol oynadığı için bir çok araştırmacının inceleme konusu olmuştur. Moroğlu (2007) su kaynakları kirliliğinin giderilmesi ve sürdürebilirliği için Avrupa Birliği Su Çerçeve Yönergesinin uygulamasını Büyükçekmece havzası üzerinde incelemiştir. İmamoğlu (2017) doktora tezi kapsamında Büyükçekmece havzasının toprak türü, toprak nemi, arazi kullanımı vs. gibi hidrolojik parametrelerini uzaktan algılama sistemi ile incelemiştir. Alfars (2011) yüksek lisans tez çalışmasında, Büyükçekmece göl su seviyesinin yıllık değişimini incelemek için bir hidrolojik model yapmıştır.

Büyükçekmece göl havzası üzerinde yapılan önceki çalışmalara ek olarak bu tez çalışmasında havza yüzey suyu ve yeraltı suyu entegre bir hidrodinamik model geliştirilmiştir. Bunun için öncelikle WMS ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) programlarından yararlanılarak havza sınırları, hidrolojik toprak türü ve arazi kullanımı belirlenmiştir. Büyükçekmece göl havzası için HEC-HMS programı ile hidrolojik model oluşturularak yağış-akış ilişkisi kurulmuş ve yüzeysel akış hesaplanmıştır. Daha sonra Büyükçekmece Gölü kıyısında yer alan sulak alan bölgesi için MODFLOW programı ile yeraltı suyu hidrolik modeli oluşturulmuştur ve bölgeye ait yıllık yeraltı su seviyesi değişimi gözlemlenmiştir. Böylelikle su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından önem arz eden entegre havza modeli tamamlanmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. BÜYÜKÇEKMECE GÖL HAVZASI

Tezin bu kısmında çalışma alanı olan Büyükçekmece Göl Havzasının konumu ve coğrafyası, iklimi, arazi kullanımı ve jeolojisi anlatılmıştır.

2.1.1. Büyükçekmece Göl Havzasının Konumu ve İklimi

Büyükçekmece Göl Havzası, İstanbul'un batı yakasında olup, Marmara Denizi kıyısında konumlanmıştır. Doğusunda Küçükçekmece Gölü, batısında Silivri, kuzeyinde Terkos içme suyu havzası ve güneyinde Marmara Denizi bulunmaktadır. Havza içerisinde Büyükçekmece, Çatalca ve Silivri ilçelerine bağlı yerleşkeler bulunmaktadır (TEKİN, 2010). Gölü besleyen drenaj havzası toplam 635 km^2 alana sahip Marmara havzasının alt havzası olan Kuzey Marmara'nın bir alt havzası olarak yer almaktadır (Şekil 2.1). Büyükçekmece göl havzasının içinde Karasu, Sarısu (Hamza dere) ve Çakıl (Tahtaköprü deresi) adlı 3 ana dere bulunmakta olup bu dereler Büyükçekmece Gölü'ne akmaktadır. Büyükçekmece Gölü'nün yüzölçümü ise 28.58 km^2 olup İstanbul'un Avrupa yıkasındaki ikinci tatlı su kaynağı olarak bilinmektedir. Gölün batısında yani deniz tarafında 1988'den bu yana işletmeye alınan Büyükçekmece Barajı bulunmaktadır. Büyükçekmece barajı İstanbul ilinin Büyükçekmece ilçesinde yer almaktadır. İstanbul ilinin içme ve kullanma suyu ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yapılmıştır. Bu barajı besleyen; Karasu (Şekil 2.2), Çakıl (Şekil 2.3) ve Sarısu (Şekil 2.4) derelerinin mevcut durumu ilgili şekillerde gösterilmiştir. Baraj, gövde dolgu tipi zonlu toprak dolgusudur ve 2.020 hm^3 gövde hacmine sahiptir. Yüksekliği (talvegden) 8.6 m, normal su kotunda göl hacmi 161.61 hm^3' tür. Gölün taban kotu 0 kotunda olup maksimum su seviyesi ise 8.6 m'ye kadar çıkmaktadır (DSİ, 2016) (Şekil 2.5)(TRTHaber,2020). Büyükçekmece Havzası daha çok Marmara iklimi hakimiyetindedir. Büyükçekmece ve Çatalca Meteoroloji İstasyonları verilerine göre yıllık ortalama yağış 580.06 mm, yıllık maksimum sıcaklık 38.9 C°, minimum sıcaklık -6.5 C° ve ortalama sıcaklık 13.57 C° dir (DSİ ve MGM , 2018).

Büyükçekmece Havzası'nın topoğrafik yüksekliği 0 ile 330 m arasında değişmekte olup bölgesel eğim Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultuludur. Havzanın kabartma haritası Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Büyükçekmece havzasının konumu (Google Maps).



Şekil 2.2:Büyükçekmece Göl Havzasını besleyen Karasu deresi.



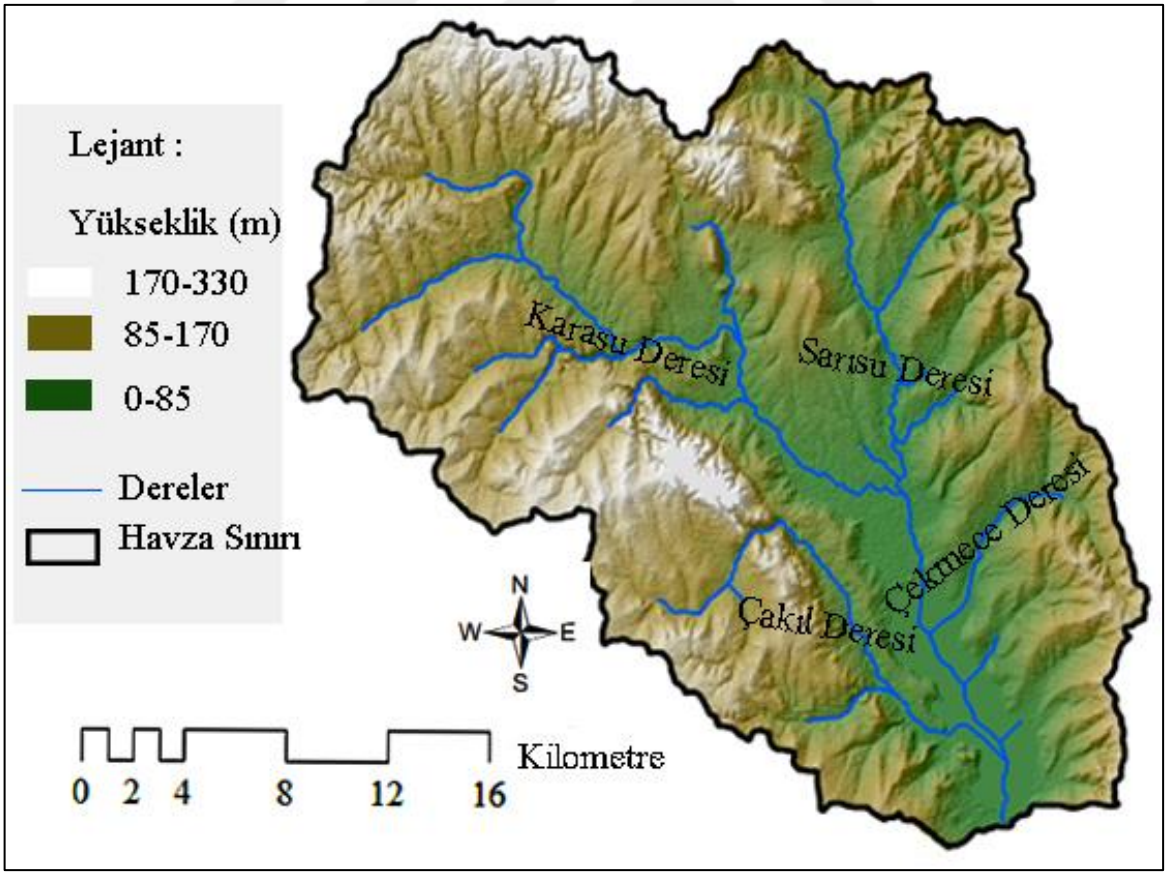
Şekil 2.3:Büyükçekmece Göl Havzasını besleyen Çakıl deresi.



Şekil 2.4:Büyükçekmece Göl Havzasını besleyen Sarısu deresi.



Şekil 2.5:Büyükçekmece Barajı (TRT Haber,2020) .



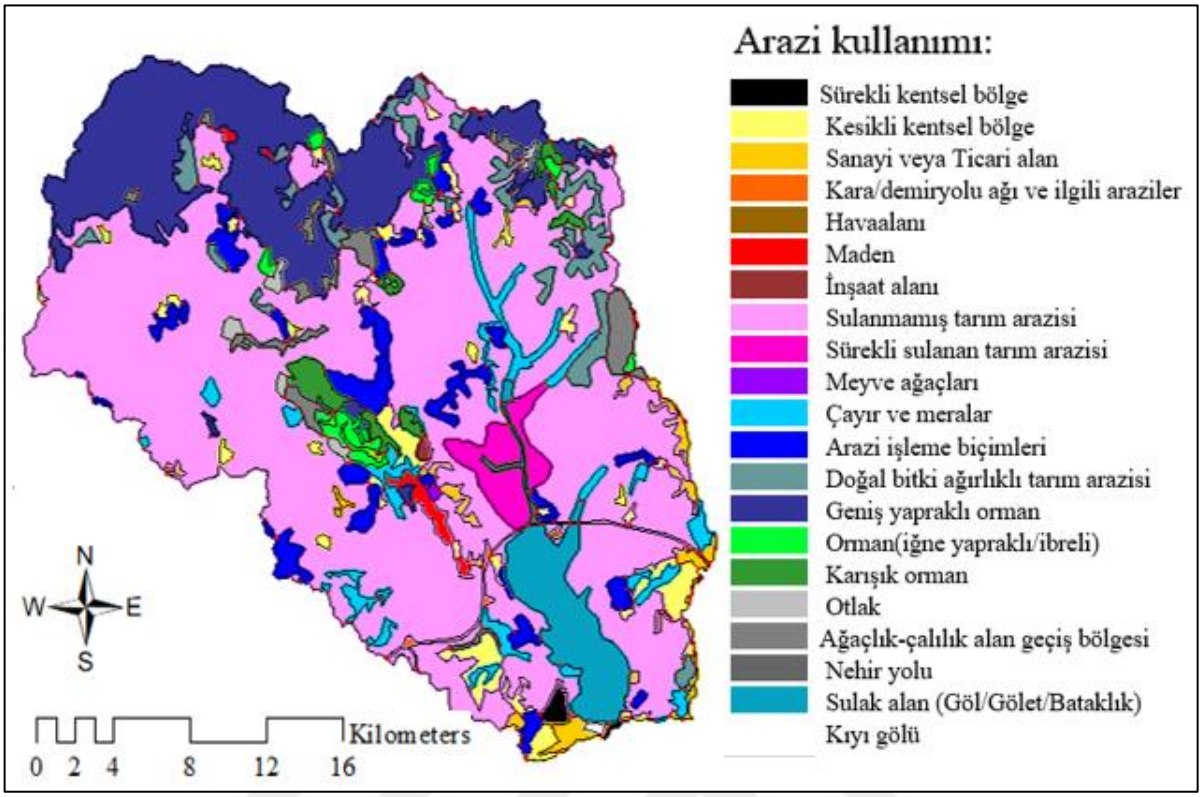
Şekil 2.6: Büyükçekmece göl havzasının kabartma haritası ve akarsuları.

2.1.2. Büyükçekmece Göl Havzasının Arazi Kullanımı ve Toprak Örtüsü

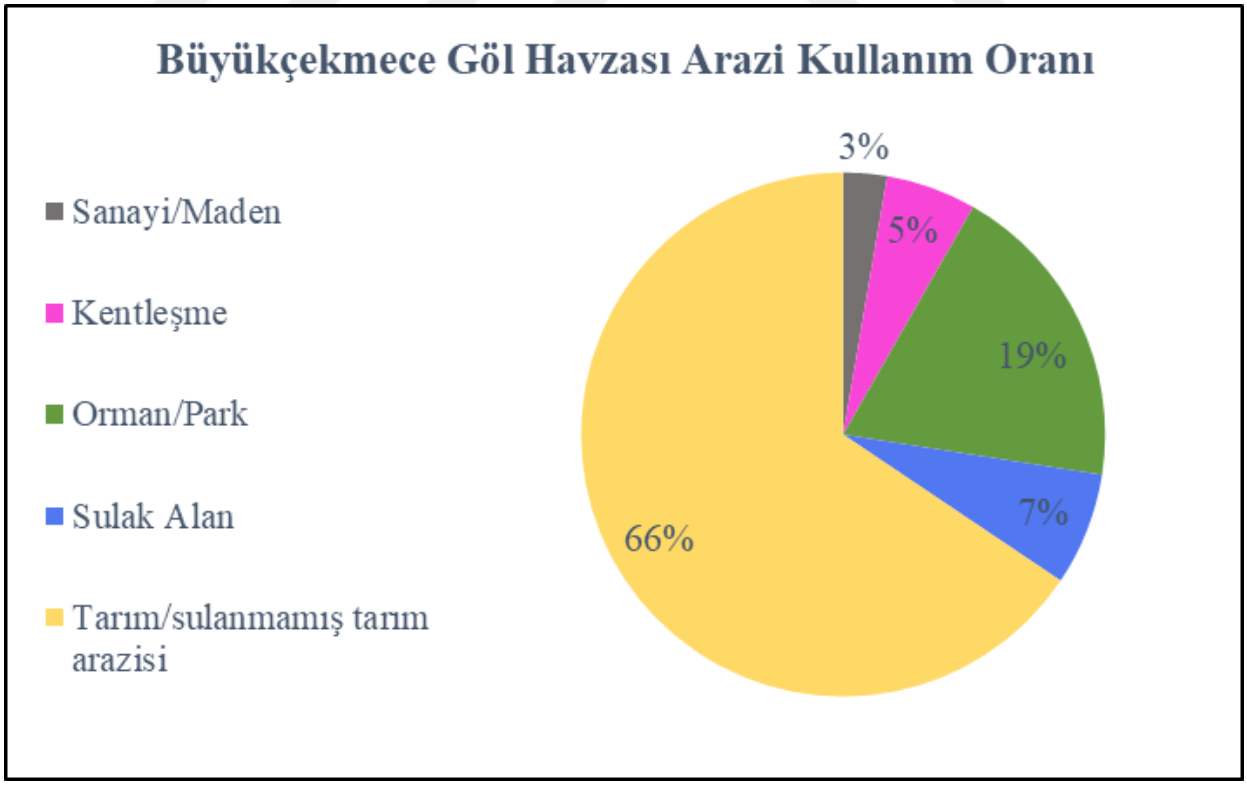
Büyükçekmece Göl Havzası'nın arazi kullanım haritası (CORINE, 2018) Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Büyükçekmece Göl Havzası'nda 21 çeşit arazi kullanımı bulunmakta olup her bir arazi kullanımının adı, kodu ve alanı Tablo 2.1'de verilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan modellemede bölgeye ait yağış eğri numarasını hassas bulabilmek için 21 adet arazi kullanım tipi dikkate alınmıştır. Ayrıca, bölgeye ait özet arazi kullanımı 5 genel arazi türü adı altında toplanıp havza alanına oranlanarak Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

Büyükçekmece Havzası'nda bulunan toprak grupları hidrolojik olarak 4 grupta sınıflandırılmıştır. Bu gruplar, geçirimli (A), yarı-geçirimli (B), yarı-geçirimsiz (C) ve geçirimsiz (D) olarak oluşturulmuştur. Havzanın toprak gruplarının alansal büyüklükleri büyükten küçüğe doğru; D, B, A ve C olarak sıralanmaktadır. Büyükçekmece gölü çevresinde çoğunluk olarak A ve B tipi toprak türü görülmektedir. Bu nedenle yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimi etkin bir şekilde gözlemlenmektedir (Şekil 2.9).

Şekil 2.10'da verilmiş olan Büyükçekmece Göl Havzası'nın jeoloji haritasına bakıldığında; batıdan doğuya doğru, danışment, süloglu, alüvyon ve ihsaniye formasyonları bulunmaktadır. Sulak alan çalışma sahasının tamamında alüvyon, çakıl, kum ve kil karışımı bulunmaktadır. Çalışma alanın batı sınırında kum, silt, kil ve marn karışımı, doğu ve taban sınırlarında ise gre, marn, kil ve kalker bulunmaktadır.



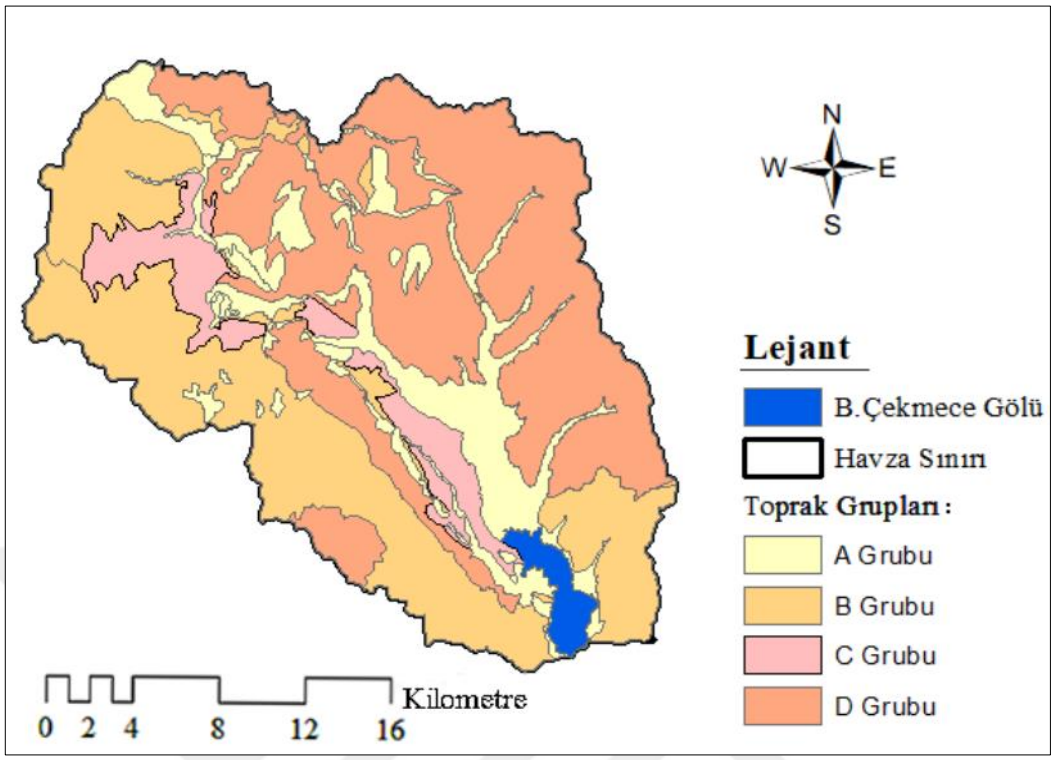
Şekil 2.7: Büyükçekmece göl havzasının arazi kullanımı (CORINE, 2018).



Şekil 2.8: Büyükçekmece göl havzasının özet arazi kullanım yüzdeleri.

Tablo 2.1: Büyükçekmece göl havzasının arazi kullanım tablosu.

No	Kodu	Arazi kullanımı (Land use)	Alan (km^2)
1	111	Sürekli kentsel bölge (Continuous urban fabric)	2.1
2	112	Kesikli kentsel bölge (Discontinuous urban fabric)	26.05
3	121	Sanayi veya Ticari alan (Industrial or commercial units)	13.12
4	122	Kara/demiryolu ağı ve ilgili araziler (Road/rail networks and associated land)	2.93
5	124	Havaalanı (Airports)	0.26
6	131	Maden (Mineral extraction sites)	4.01
7	133	İnşaat alanı (Construction sites)	4.07
8	211	Sulanmamış tarım arazisi (Non-irrigated arable land)	354.07
9	212	Sürekli sulanan tarım arazisi (Permanently irrigated land)	12.87
10	222	Meyve ağaçları (Fruit trees and berry plantations)	0.32
11	231	Çayır ve meralar (Pastures)	18.17
12	242	Arazi işleme biçimleri (Complex cultivation patterns)	25.26
13	243	Doğal bitki ağırlıklı tarım arazisi (Land principally occupied by agriculture)	21.31
14	311	Geniş yapraklı orman (Broad-leaved forest)	94.88
15	312	Orman(iğne yapraklı/ibreli) (Coniferous forest)	5.66
16	313	Karışık orman (Mixed forest)	7.76
17	321	Otlak (Natural grasslands)	3.07
18	324	Ağaçlık-çalılık alan geçiş bölgesi (Transitional woodland-shrub)	13.72
19	511	Nehir yolu (Water courses)	1.35
20	512	Sulak alan (Göl/Gölet/Bataklık) (Water bodies)	24.4
21	521	Kıyı gölü (Coastal lagoons)	0.33



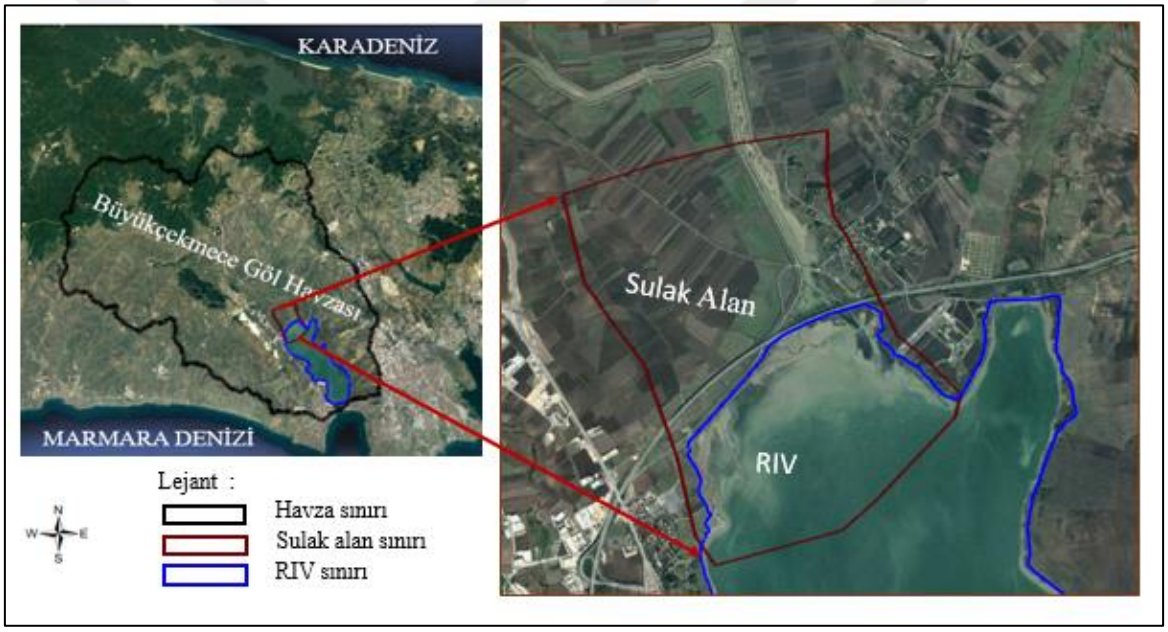
Şekil 2.9: Büyükçekmece göl havzasının hidrolojik toprak grupları (DSI, 1979)



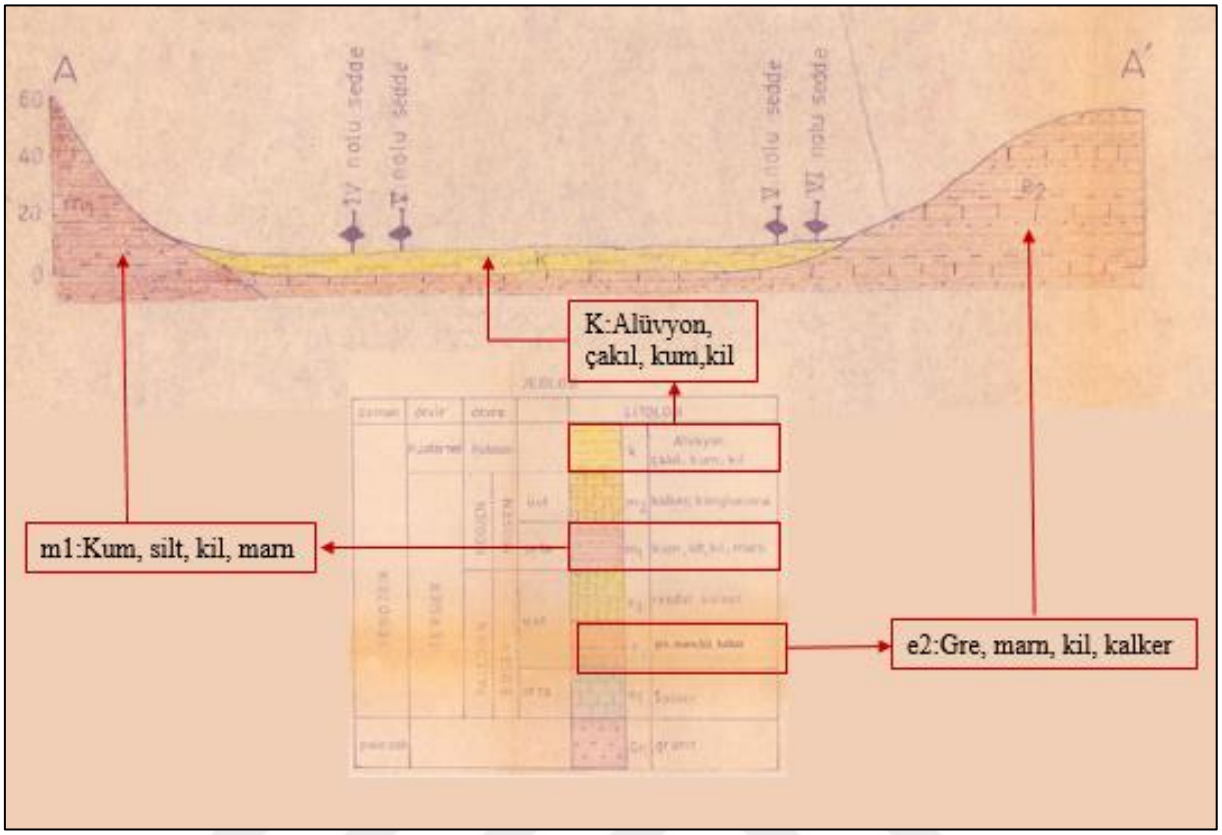
Şekil 2.10: Büyükçekmece göl havzasının jeolojisi (DSİ, 1979)

2.1.3. Büyükçekmece Sulak Alan Bölgesi

Bu tez çalışması kapsamında yeraltı suyu hidrolik modeli Büyükçekmece Gölü'nün çevresinde yer alan sulak alan bölgesi için yapılmıştır. Sulak alan, Karasu deresinin göl deltası alanında bulunmaktadır. Seçilen bölge, Ahmediye, İzzettin ve Bahşayiş mahallelerinin bir kısmını içine almakta olup toplam 8.56 km^2 alana sahiptir. Bu bölgenin seçilme amacı, sulak alan bölgesindeki yüzey suyu ile yer altı suyu arasındaki iletişimi ortaya koyabilmektir (Şekil 2.11). Bölgenin jeoloji haritasına bakıldığında sulak alanın alüvyonlu bir litolojiye sahip olduğu ve etrafının geçirimsiz tabakalarla çevrelendiği, bölgeden alınan A-A′ kesidi üzerinden görülmektedir (Şekil 2.12).



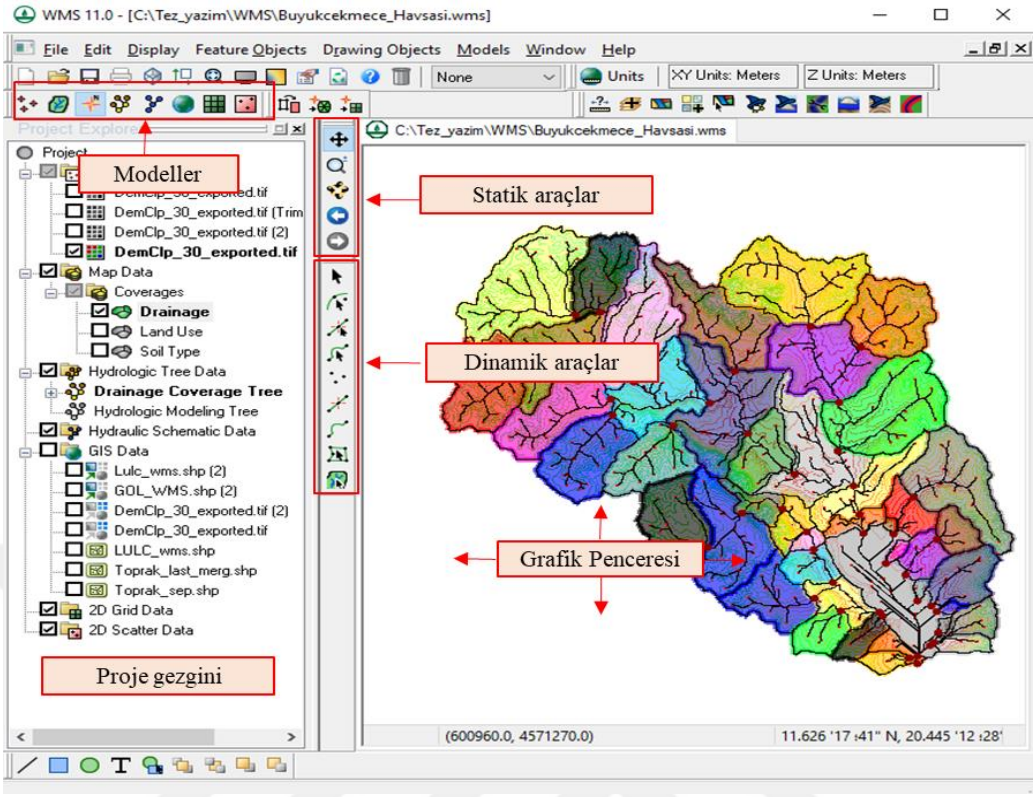
Şekil 2.11: Sulak alan bölgesi (Googelearth, 2018)



Şekil 2.12: Sulak alanın jeolojik kesidi (DSİ, 1979)

2.2.WMS PROGRAMI

Havza modelleme sistemi (WMS) (Watershed Modelling System), mühendislik hizmetleri şirketi olan Aquaveo tarafından geliştirilmiş bir yazılım olup hidrolojik ve hidrolik modellemeler için oluşturulmuş kapsamlı bir arayüze sahip programdır. Brigham Young Üniversitesi'nin Çevresel Modelleme Araştırma Laboratuvarı ve ABD Ordusu Mühendisleri Birliği (US Army Corps of Engineers, USACE) Su Yolları Deney İstasyonu (Waterways Experimental Station) adlı iki kurumun işbirliği ile geliştirilmiştir ve Aquaveo tarafından geliştirilmeye devam etmektedir. WMS, otomatik havza tanımlaması, geometrik parametre hesaplamaları, CBS katman hesaplamaları (CN, yağış yüksekliği, pürüzlülük katsayıları vb.), arazi verilerinden kesit çıkarma gibi modelleme için gerekli olan girdileri oluşturacak güçlü araçlar içermektedir (WMS ver. 10.1). WMS programı, HEC-HMS, HEC-RAS gibi hidrolojik ve hidrolik programların Coğrafi Bilgi Systemi (CBS) ile entegre halinde çalışarak model oluşturabileceği bir yazılımdır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13: WMS programı arayüzü.

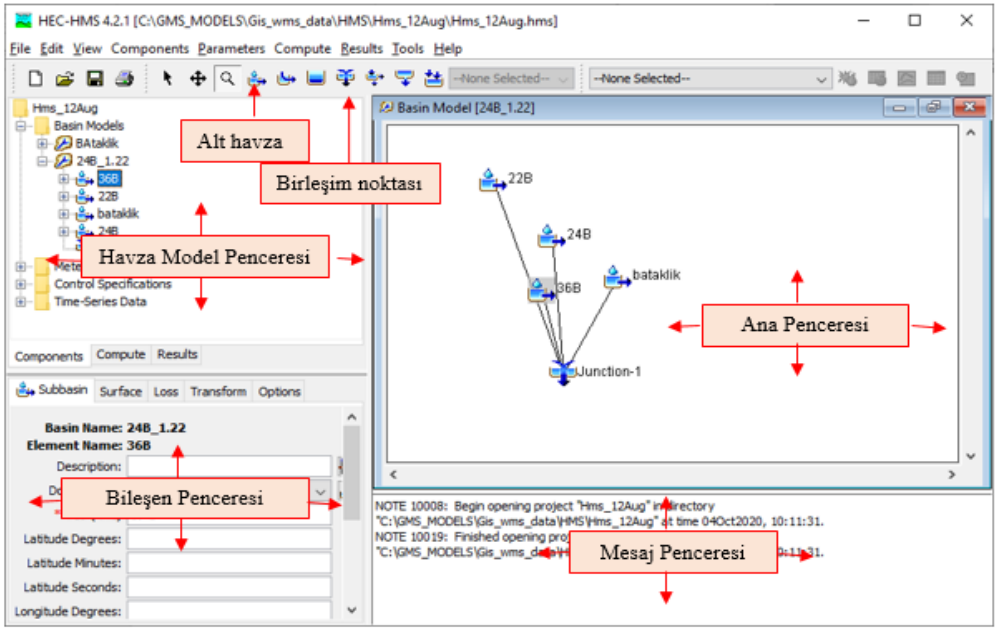
2.3. HEC-HMS PROGRAMI

Hidrolojik Mühendislik Merkezi-Hidrolojik Modelleme Sistemi (HEC-HMS) (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), ABD Ordusu Mühendisleri Birliği (USACE) tarafından geliştirilmiş ve günümüzde akarsu havzasının hidrolojik modellemesini yapan bir program olarak kullanılmaktadır (Scharffenber, 2010).HEC-HMS programı 1992 yılından itibaren hidrolojik modelleme için daha önce bir standart olarak kabul edilen HEC-1'in yerine geçmiş ve zamanla geliştirilmiştir. HEC-HMS'in grafiksel ara yüze sahip olması bir havzanın hidrolojik modelini daha çabuk oluşturabilme ve analiz sonuçlarını daha anlaşılır halde görebilme kolaylığını sağlamaktadır (Fieldman, 2000). HEC-HMS programı akarsu havzaları için sızma, buharlaşma, yüzeysel akış ve taban akışı, akarsular için öteleme süreçlerini modeller (Scharffenber, 2010). Ayrıca, sürekli simülasyonlarda kar erimesi, buharlaşma-terleme ve toprak nemi unsurlarını dikkate alarak modelleme yapabilmektedir. HEC-HMS havza modeli, meteoroloji modeli ve kontrol belirleyicileri adlı 3 temel bileşenden

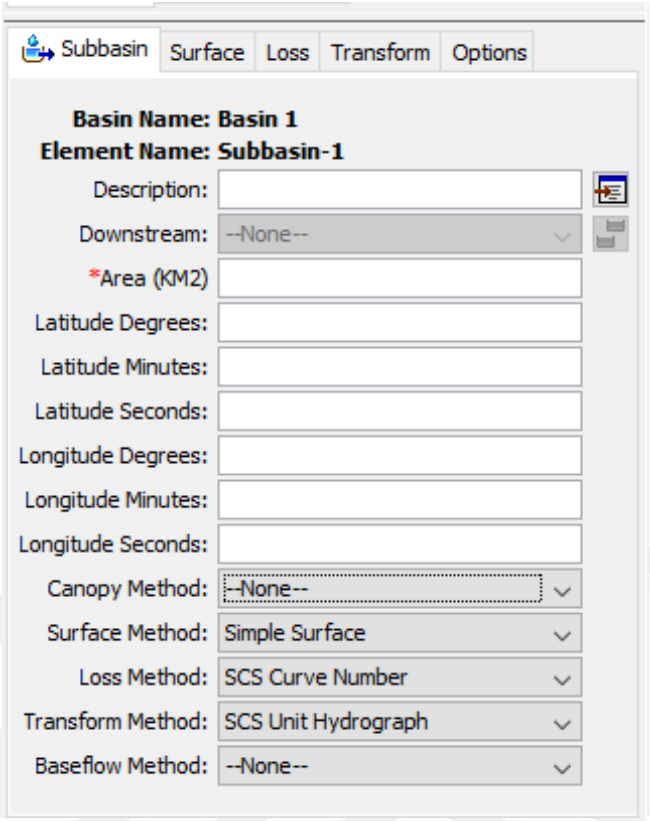
oluşmaktadır. Optimizasyon, derinlik-alan analizi ve tahmin uygulaması ise HEC-HMS'in analiz araçları olarak kullanılmaktadır.

Havza modelinde althavza (subbasin), nehir (reach), hazne (reservoir), junction (birleşim noktası), kaynak (source) gibi elamanlar tanımlanarak hidrolojik model oluşturulmaktadır (Şekil 2.14). Her alt havzaya ait olan alanı ve mansabı tanımladıktan sonra, hidrolojik analizler için tutma, sızma, dönüşüm ve öteleme hesapları için ilgili yöntemler tercih edilerek programa tanımlanmaktadır (Şekil 2.15).

HEC-HMS'in havza modülünde sızma hesabı SCS (Soil Conservation System) yüzey akış eğri numarası (SCS Curve Number), Green&Ampt, Initial/Constant ve Deficit/Constant yöntemlerinden biri seçilerek yapılmaktadır. Havza üzerinde oluşan yüzeysel akış hesabı ise Clark birim hidrograf, SCS birim hidrograf, S-graph, Snyder birim hidrograf, User-Specified birim hidrograf, Kinematic dalga ve ModClark yöntemlerinden biri seçilerek yapılmaktadır. Ayrıca tutma ve yüzey suyu birikintisi hesabı için dinamik kanopi, grid(ızgaralı) basit kanopi, basit kanopi, basit yüzey suyu birikintisi ve grid (ızgaralı) basit yüzey birikintisi yöntemleri yer almaktadır.



Şekil 2.14: HEC-HMS programının arayüzü.



Şekil 2.15: Alt havza girdilerinin tanımlandığı pencere.

2.3.1. SCS Eğri Numarası (SCS-CN) Yöntemi

SCS Eğri Numarası Yöntemi (Soil Conservation Service-Curve Number), 1954 yılında ABD Tarım ve Orman Bölümü (U.S. Department of Agriculture) (USDA) toprak ve koruma servisi, (Soil Conservation Service) (SCS) tarafından sızma hesabı için geliştirilmiştir. Eğri Numarası (*CN*) havzanın sızdırma karakteristiğini yansıtan ve havzaya ait toprak tipi ve arazi kullanımına bağlı olarak değişen değerler almaktadır (Fieldman, 2000).

SCS yöntemine ait denklemler aşağıda verilmiştir:

$$CN_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(CN_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \quad (2.1)$$

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \quad (2.2)$$

$$R = \frac{(P-0.2S)^2}{(P-0.8S)} \quad (2.3)$$

Burada, CN_{ort} tüm alt havzaya ait Ortalama Eğri Numarası, CN_i her bir arazinin Eğri Numarası, A_i her bir arazinin alanı [L^2], S potansiyel maksimum yağış tutulması [L], R yüzeysel akış miktarı [L], P artık yağış miktarı [L] olarak verilmiştir. Potansiyel maksimum yağış tutulması S, ortalama eğri numarasının tayin edileceği havzadaki toprak örtüsü ve arazi kullanımına bağlı olmakla beraber havzadaki çukurluklardaki birikintiler, evaporasyon gibi diğer tüm kayıpları içermektedir (USDA, 1986).

Yüzey akış eğri numarasının belirlenmesinde dikkate alınması gereken faktörler arasında Hidrolojik Toprak Grubu (HSG), Arazi Kullanımı (Cover Type), Hidrolojik Koşul (Hydrologic Condition) ve Önceki Akış Koşulu (Antecedent Runoff Condition) yer almaktadır. Hidrolojik Toprak Grupları (HSG) sızma kapasitesine bağlı olarak 4'e ayrılır: Geçirimli olan toprak tipi A grubu, yarı geçirimli olan toprak tipi B grubu, yarı geçirimsiz olan toprak tipi C grubu ve geçirimsiz toprak tipi D grubu olarak sınıflandırılır. Eğri Numarası (*CN*) 0 ile 100 aralığında değişen değerler almaktadır. Eğri Numarası değeri arttıkça, havzadaki geçirimlilik ve dolayısıyla sızma miktarı azalmaktadır (USDA, 1986).

2.3.2. SCS-Birim Hidrograf

Bu çalışmada yüzeysel akışı hesaplamak için seçilmiş olan SCS-Birim Hidrograf Yöntemi (Soil Conservation Service-Unit Hydrograph) havza üzerindeki artık yağış sonucu oluşan dolaysız akışı hesaplar. HEC-HMS, SCS-Birim Hidrograf yöntemi için artık yağışın ağırlık merkezinden hidrografın pik noktasına olan süre yani gecikme süresini (Lag time) girdi olarak kullanır. Gecikme zamanı hesaplamasında ise aşağıda verilmiş olan Kirpich yöntemine ait farklı havzalarda uygulanabilen denklem kullanılmaktadır (Kirpich, 1940).

$$T_{lag} = 0.6 \times T_c \tag{2.4}$$

$$T_c = 0.0078 \times \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}\right) \tag{2.5}$$

Burda T_{lag} gecikme süresi (*sa*) [T], T_c pik debiye ulaşma zamanı (*sa*) [T], L akarsuyun membasından havzanın çıkış noktasına olan mesafe (*ft*) [L], S akarsuyun eğimi (*ft/ft*) [L/L] olarak tanımlanmaktadır.

2.3.3. Nash Sutcliffe Verimlilik Katsayısı

Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (NSE), Nash ve Sutcliffe tarafından geliştirilmiş ve hidrolojik modellemelerin çoğunda ölçüm-hesap ilişkisinin doğruluğunu belirlemek için kalibrasyon sırasında kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Nash ve Sutcliffe, 1970). NSE, ölçüm ve hesaplanan verilerin ne kadar birbirine yaklaştığını ifade etmekte olup denklem 2.6 ile hesaplanmaktadır:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_m^i - Q_0^i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_0^i - \overline{Q_0})^2} \quad (2.6)$$

Burda, Q_m^i hesaplanan günlük akımların i'inci değeri, Q_0^i ölçülen günlük akımların i'inci değeri, $\overline{Q_0}$ ölçülmüş günlük akımların ortalaması ve N toplam ölçüm sayısını ifade etmektedir.NSE'nin aldığı değer $[-\infty, 1]$ arasında değişmektedir. Burada, NSE'nin 0 ile 1 arasında bir değer alması yapılan kalibrasyonun kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu anlamına gelmektedir. NSE'nin 1 değerini alması ise kalibrasyonun mükemmel olduğunu ifade etmektedir. NSE'nin sıfırdan küçük değer alması ise, ortalama ölçüm değeri ile hesaplanan verinin birbirine yeterince yakın olmadığını ve oluşturulan modelin yetersiz olduğunu göstermektedir (Sevat ve Dezetter,1991).

2.4. MODFLOW PROGRAMI

MODFLOW (Modular Three Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model) programı yeraltı suyu akımını sonlu farklar yöntemi ile 3 boyutlu olarak modelleyebilen bir programdır (McDonald ve Harbaugh, 1988). Yeraltı suyu akımının yanı sıra yeraltı suyundaki kirletici madde taşınımını, yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimlerini, kuyu modelleri ve çalışma sahalarındaki yeraltı suyu dinamiklerini de modelleyebilir (Boyraz, 2017, Boyraz ve diğ., 2018). Program birbirine entegre olarak çalışabilen birçok modülden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında yeraltı suyu akımı denklemini çözümlemek üzere MODFLOW 2005 modülü kullanılmıştır.

Yeraltı suyu denklemi, akifer içerisinde belirlenen bir kontrol hacmine giren ve çıkan akımların Darcy Kanunu ile ifade edilerek kütle korunumu denklemine uygulanması ile elde edilir. 3 boyutlu yeraltı suyu denklemi aşağıda verilmiş olan kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.7)$$

Burada h yeraltı su seviyesi (L), K_{xx},,K_{yy} ve K_{zz} sırasıyla zeminin x, y, z doğrultularındaki hidrolik iletkenliği (L/T), S_s zeminin özgül depolama miktarı (1/L) ve W sistemin hacimsel su kazancı ya da kaybını ifade eden kaynak/kuyu terimidir (1/T). MODFLOW 2005 modülü, modellerde tanımlanan yüzey sularını ya da yeraltı suyuna kaynak/kuyu etkisi yapan diğer etkileri bu denklem içerisindeki W terimi yardımıyla çözümler.

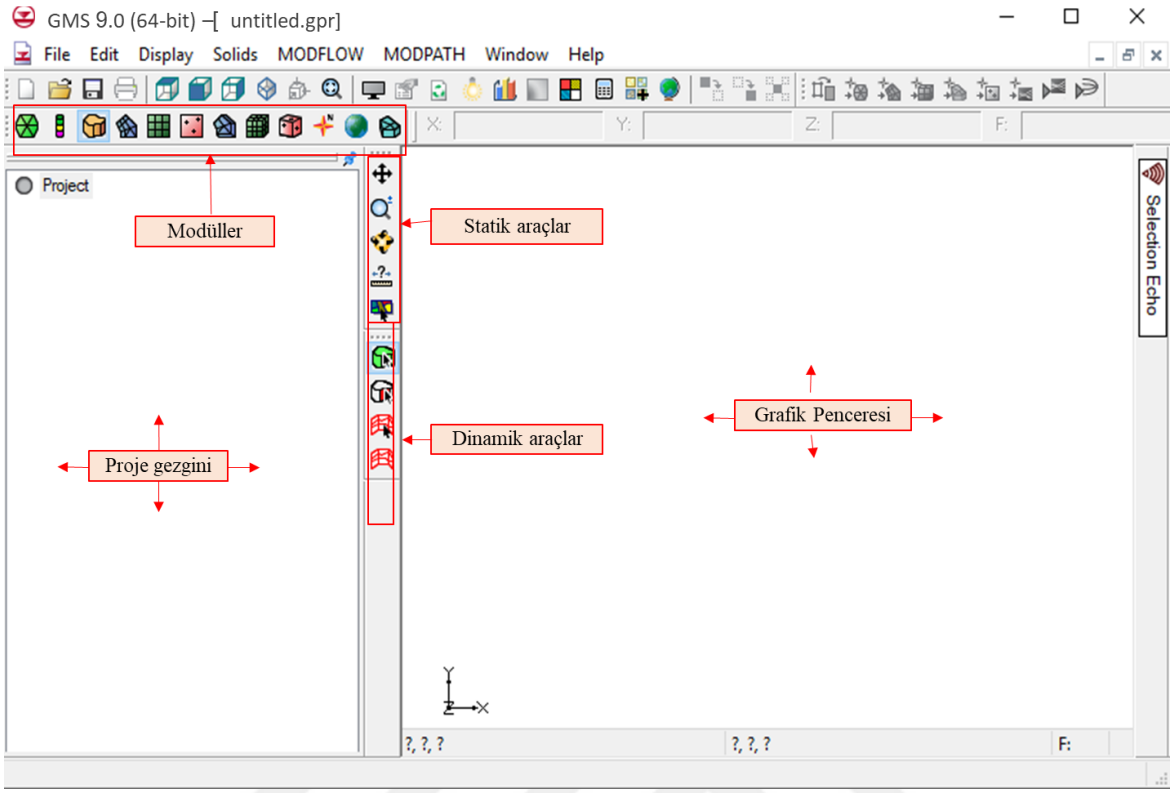
MODFLOW, nehir, göl ya da bataklık gibi yeraltı suyuna sınır koşulu oluşturan yüzey suları ile yeraltı suyu arasındaki etkileşim debisini her iki formasyon arasında Darcy denklemini uygulayarak hesaplar (Prudic, 1989):

$$Q_e=-K_{yatak}\frac{\partial h}{\partial z}\times A \quad (2.8)$$

Bu denklemde Q_e etkileşim debisi (L^3/T), K_{yatak} nehir yatağının hidrolik iletkenliği (L/T), A etkileşimin gerçekleştiği yüzey alanıdır (L^2). Bu denklem nehir-akifer etkileşimleri için özelleştirildiğinde, nehir boyunca belirli bir mesafede gerçekleşen etkileşimlerin nehrin genişliği boyunca akifere geçiş yaptığı kabul edilerek etkileşimin gerçekleştiği yüzey alanı belirlenir.

2.4.1. Yeraltı Suyu Modelleme Sistemi (GMS)

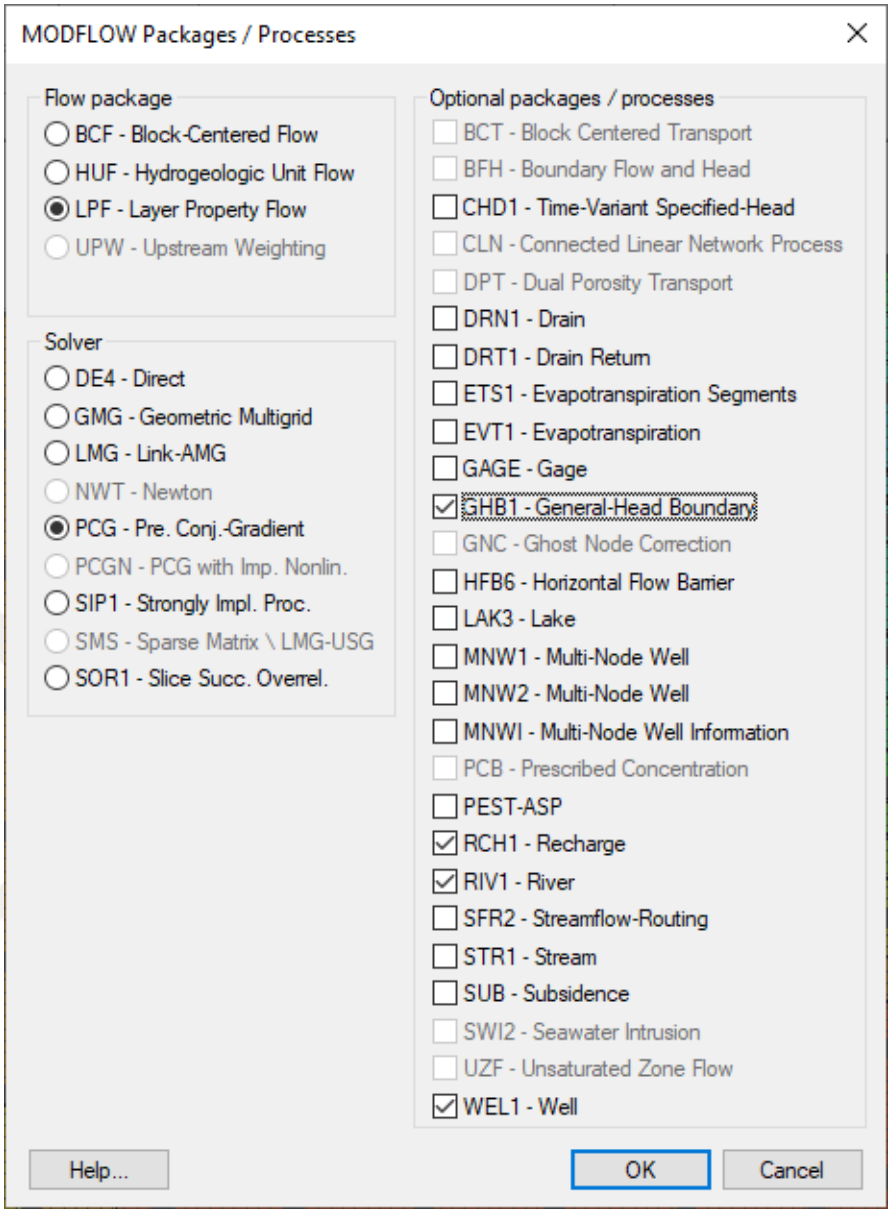
Yeraltı Suyu Modelleme Sistemi (Groundwater Modeling System) (GMS) yeraltı suyu modellemeleri için kullanılan farklı modüllerin entegre edildiği ve Aquaveo şirketinin geliştirdiği bir arayüzdür. GMS, yüzey suyu ve yeraltı suyu etkileşimlerini, katı madde taşınımı, su bütçesi hesabı gibi analizleri 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak modelleyen ve aynı zamanda CBS ile entegre olarak çalışabilmekte ve GMS programında MODFLOW, MODPATH, MT3DMS, RT3D, FEMWATER, SEEP2D ve UTEXAS gibi modüller bulunmaktadır. Bu program sayesinde yeraltı suyu simülasyonları, jeoistatistik, akiferin jeolojik yapısına bağlı stratigrafik modellemeler ve kavramsal model yaklaşımları hassas bir şekilde yapılabilmektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16: GMS programının arayüzü.

2.4.2. MODFLOW Programı Modülleri ve Paketleri

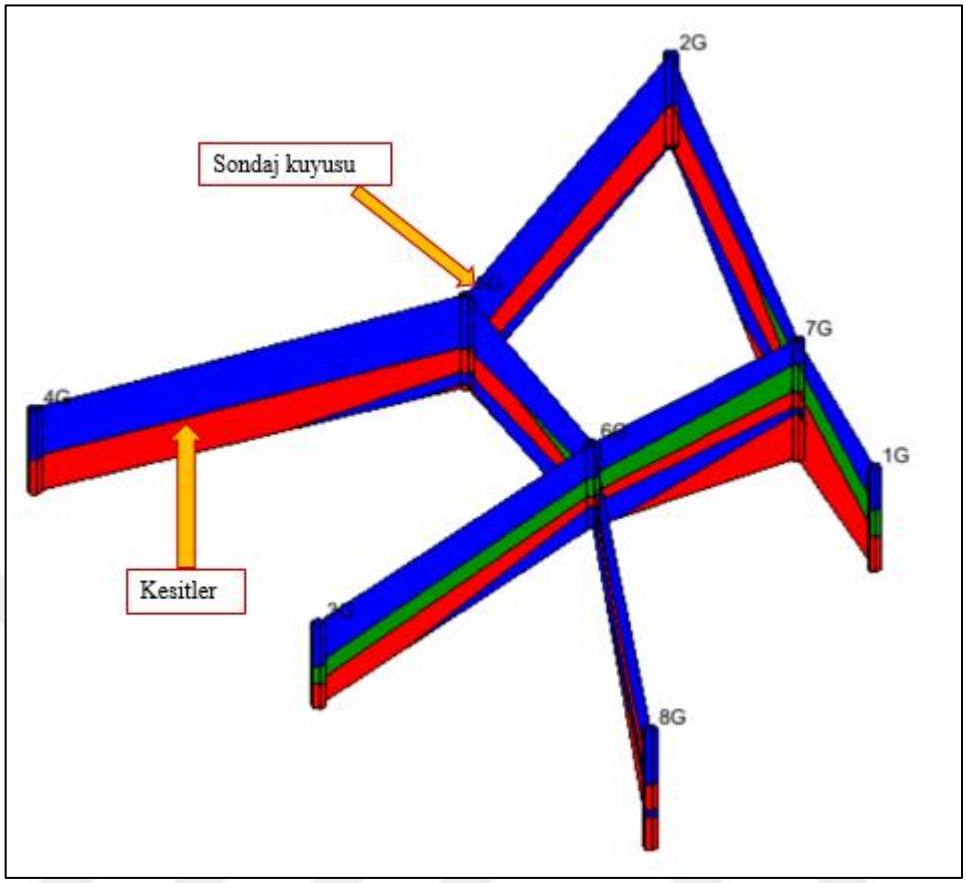
MODFLOW programında MODPATH, MT3DMS, RT3D, BOREHOLE, SOLID, SEEP2D, FEMWATER ve UTEXAS adlı modüller bulunmaktadır. Ayrıca, MODFLOW paketleri ve çözümleyicileri içeren pencere Şekil 2.17' de gösterilmiş olup genel sınır koşulu (GHB), nehir (RIV), kuyu (WELL), besleme (RECHARGE), göl (LAKE) vb. adlı paketler, Preconditioned Conjugate-Gradient Package (PCG), Strongly Implicit Procedure Package (SIP1), Slice-Successive Overrelaxation Package (SOR1) gibi sayısal çözümleyiciler programda yer almaktadır.



Şekil 2.17: MODFLOW programının paketleri.

2.4.2.1. BOREHOLE Modülü

BOREHOLE modülü ile sondaj kuyuları tanımlanmaktadır. Bu modül yardımıyla Şekil 2.18'de gösterildiği gibi bir akiferin jeolojisini temsil edebilmek üzere modelde sondajlar yerleştirilir ve kuyuların arasında katman kesitleri çizilebilir.



Şekil 2.18: Borehole modülü örneği.

2.4.2.2. SOLID Modülü

SOLID modülü bir akiferin katmanlarını 3 boyutlu modelleyebilmek için kullanılır. SOLID modülü, BOREHOLE modülünde yer alan sondaj kuyu loglarından ve kuyular arası çizilen kesitlerden yararlanarak akiferin 3 boyutlu geometrisini ortaya koymaktadır.

2.4.2.3. River (RIV) Nehir Paketi

River (nehir) paketi göl, bataklık, gölet ve nehir gibi sulak alanların yüzey altı sularıyla etkileşimde olduğu bölgeleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu paketin arayüzü Şekil 2.19'de gösterilmiş olup yüzey suyu yatağı taban kotu [L], yüzey suyu seviyesi [L] ve iletimlilik (conductance) [L^2/T] parametrelerini içermektedir.

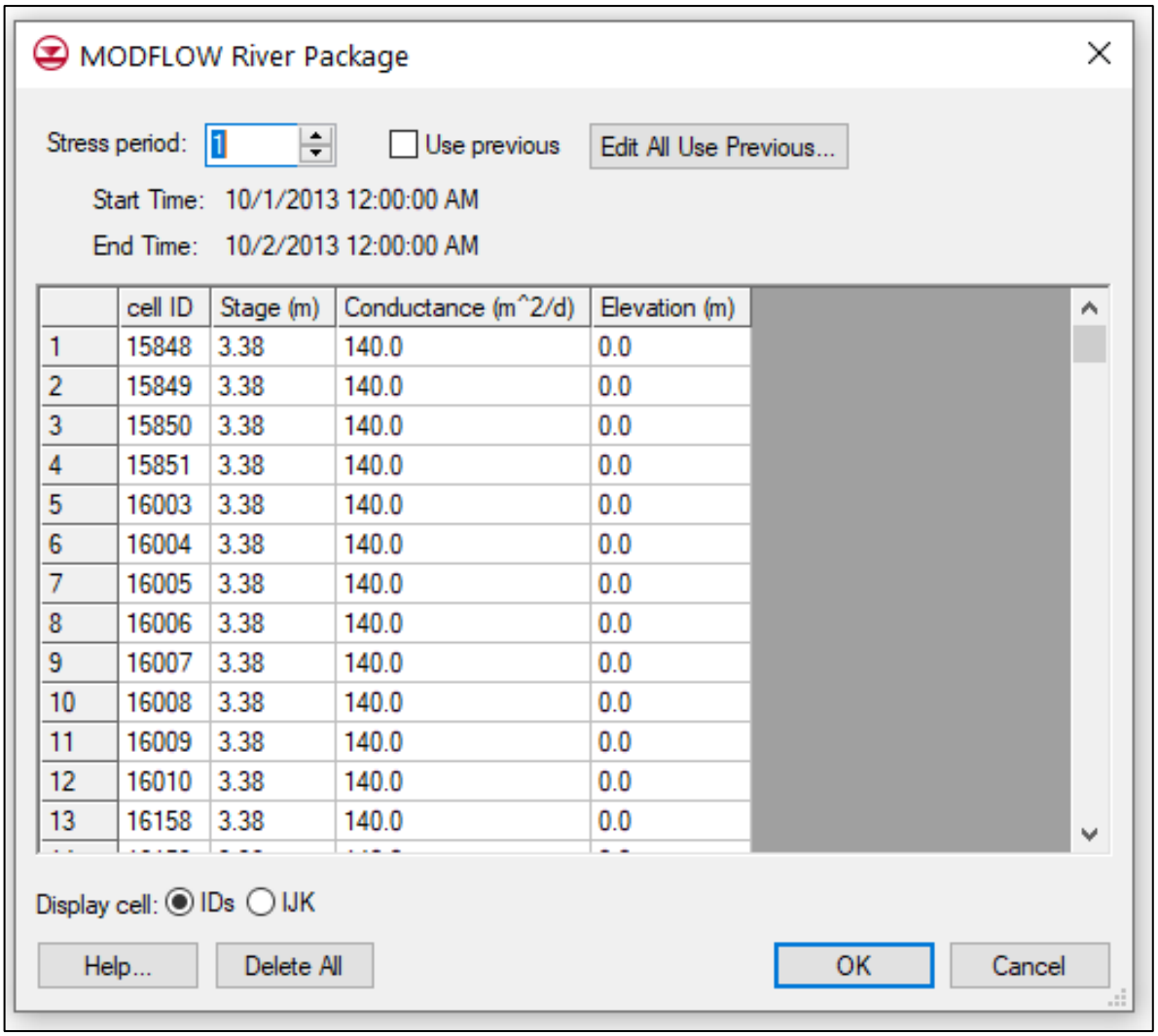
İletimlilik katsayısı Darcy denklemi kullanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$Q_e = K_{yatak} \times \frac{\Delta h}{L} \times A \tag{2.9}$$

$$Q_e = C \times \Delta h \tag{2.10}$$

$$C = K_{yatak} \times \frac{1}{L} \times A \tag{2.11}$$

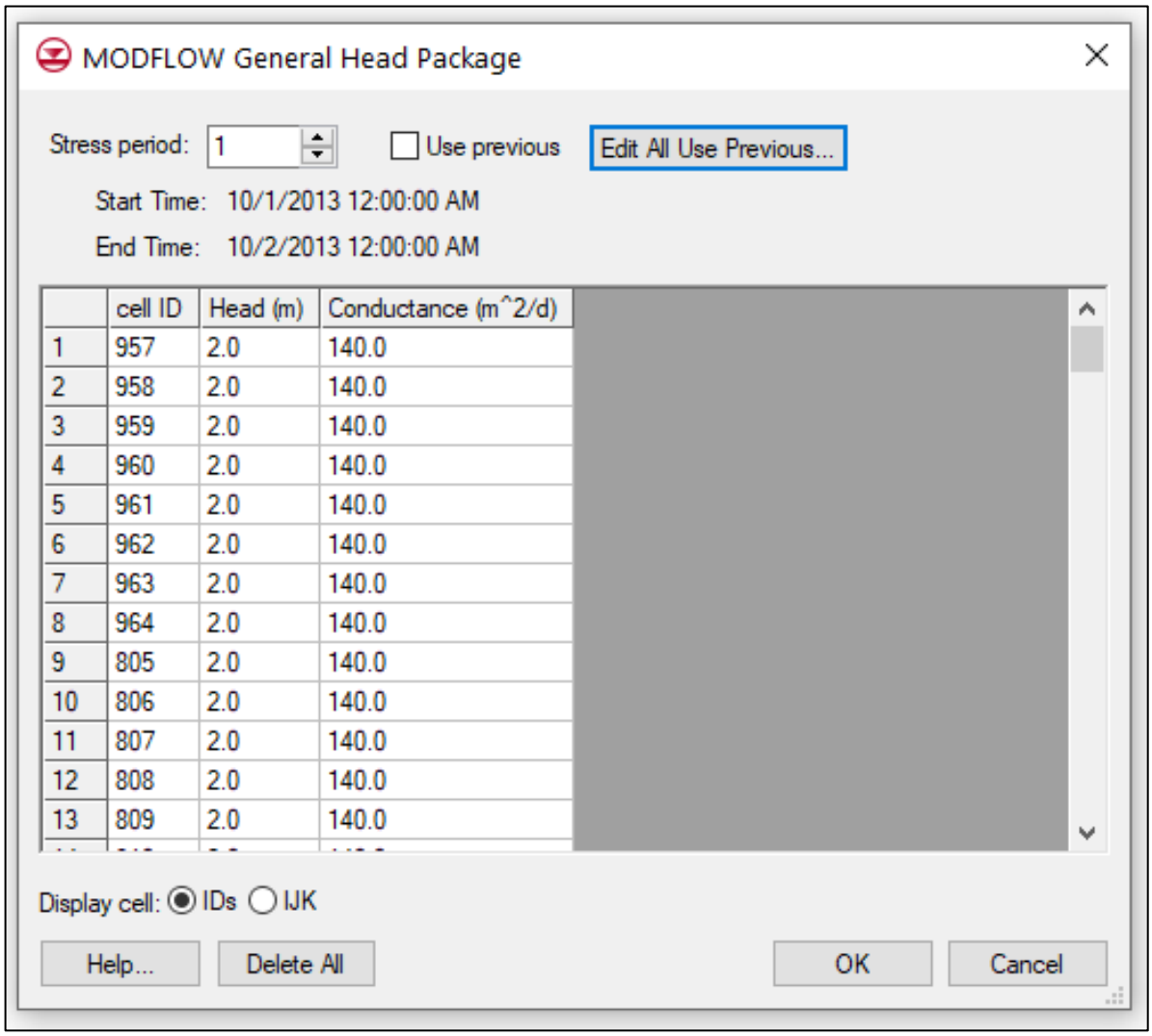
Burda Q_e etkileşim debisi (L^3/T), C iletimlilik (Conductance) [L^2/T], K_{yatak} hidrolik iletkenlik [L/T] ve A akıma dik kesit alanını [L^2] tanımlamaktadır.



Şekil 2.19: MODFLOW nehir paketi penceresi.

2.4.2.4. Genel Yük Sınır Koşulu (General Head Boundary (GHB)) Paketi

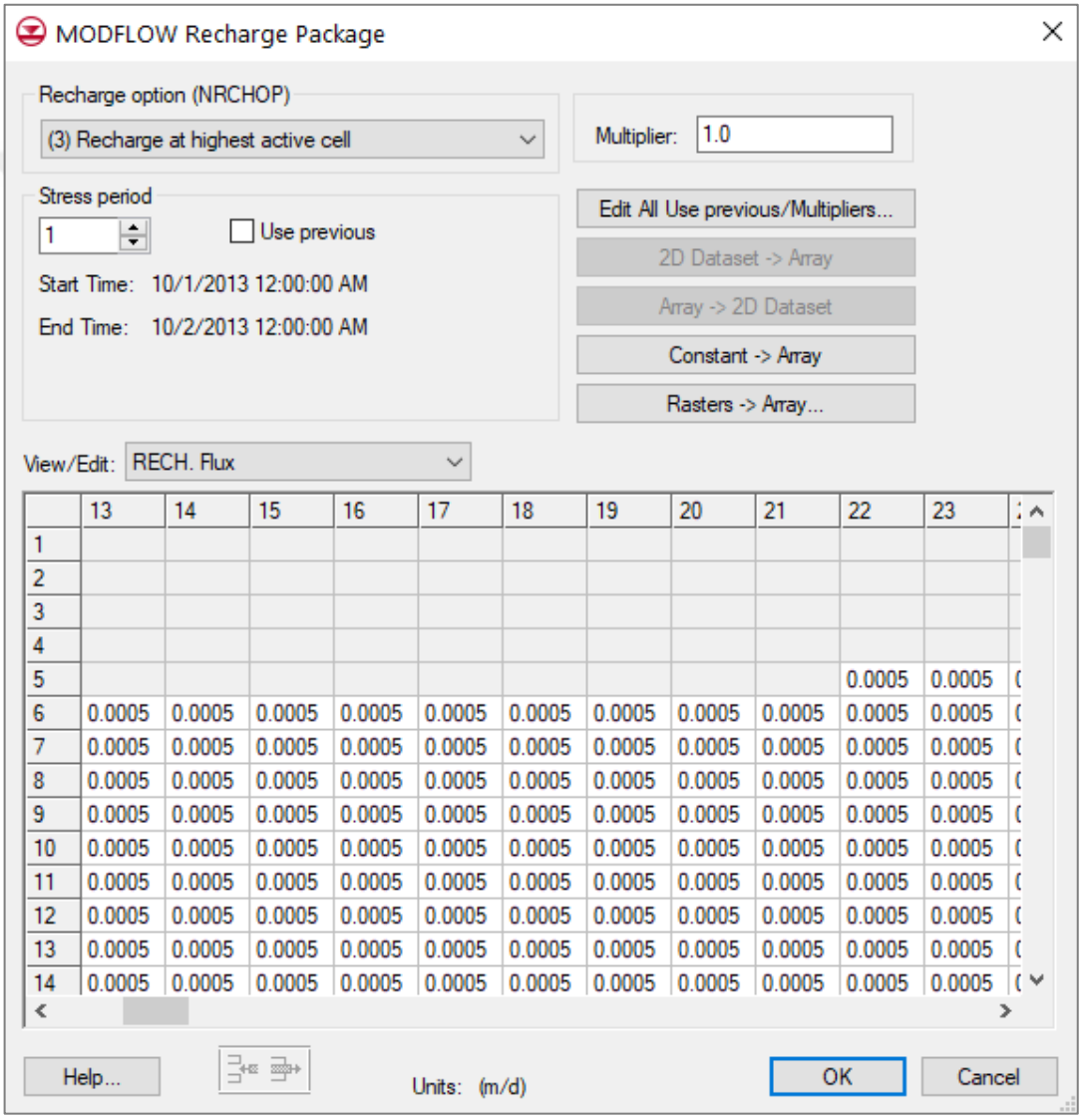
Genel Yük Sınır Koşulu (General Head Boundary (GHB)) paketi göl veya akiferin sınır koşullarını tanımlamak için kullanılmakta olup zamana bağlı bir şekilde çalışmaktadır. Bu paketin arayüzü Şekil 2.20'de gösterilmiş olup gereken girdileri sınır koşulu olan su seviyesi (head) [L] ve iletimlilik (conductance) [L^2/T] parametrelerini içermektedir.



Şekil 2.20: MODFLOW GHB paketinin penceresi.

2.4.2.5. Besleme (Recharge (RCH)) Paketi

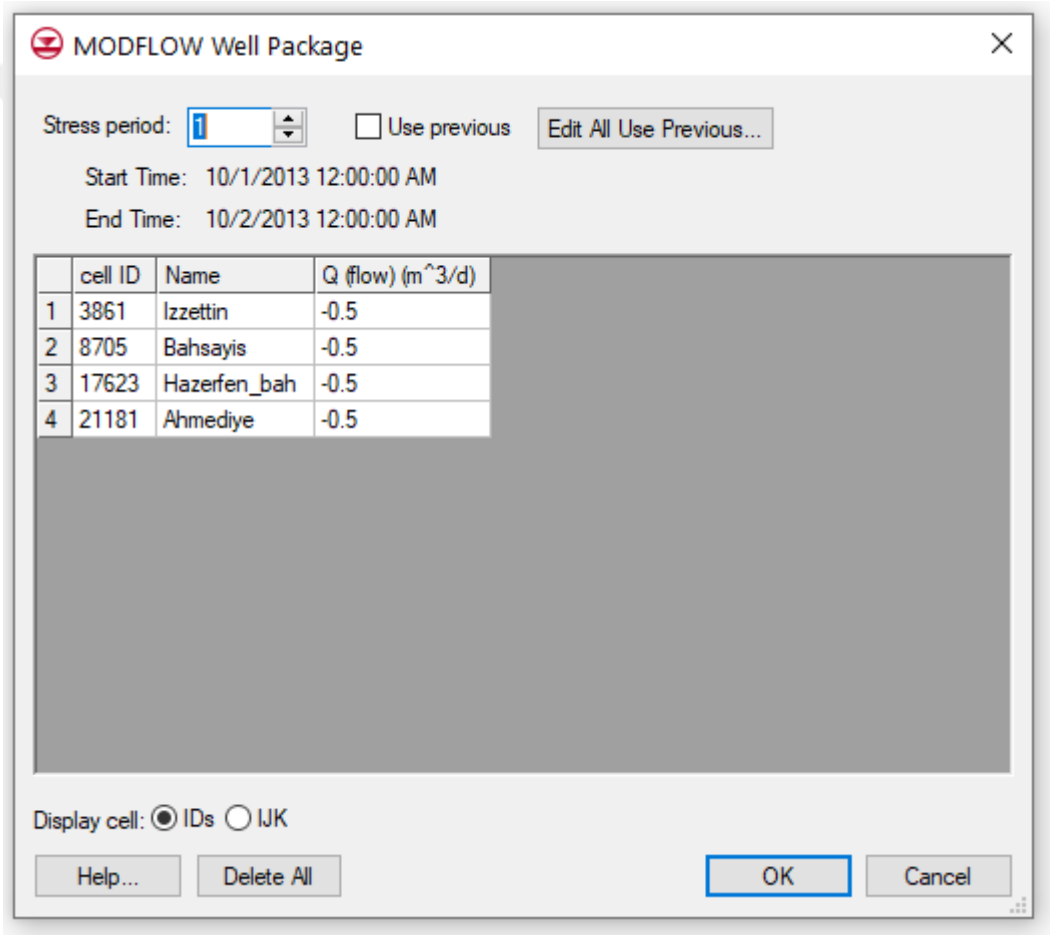
Besleme (Recharge (RCH)) paketi ile genel anlamda akiferi besleyen yüzey suyu ya da bir akiferin yüzeyinde yağış sırasında oluşan sızma miktarı akifere besleme değeri olarak tanımlanabilmektedir. Besleme miktarı akiferin tamamı veya belirli bir bölgesinde hücre bazında sabit veya değişken bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu paketin arayüzü Şekil 2.21'de gösterilmiş olup gereken girdi parametresi sadece bölgedeki besleme miktarıdır [L].



Şekil 2.21: MODFLOW RCH paketinin penceresi.

2.4.2.6. Kuyu (Well (WELL)) Paketi

Kuyu (Well (WELL)) paketi bir akiferde belli bir noktada çekilen su ya da pompajı tanımlamak üzere kullanılır. Kuyu paketi tanımlanırken eğer girilen debi pozitif ise kuyuya su pompalandığını, negatif ise kuyudan su çekildiğini göstermektedir. Bu paketin arayüzü Şekil 2.22'de gösterilmiş olup gereken girdi parametresi sadece bölgedeki kuyularda pompalanan veya çekilen debi [L^3/T] değeridir.



Şekil 2.22: MODFLOW WELL paketinin penceresi.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde WMS, HEC-HMS ve MODFLOW bilgisayar programları ile oluşturulmuş olan yüzey suyu ve yeraltı suyu için hidrolik ve hidrolojik modellemeler anlatılmıştır.

3.1. WMS İLE BÜYÜKÇEKMECE GÖL HAVZASI VE ALT HAVZA SINIRLARININ BELİRLENMESİ

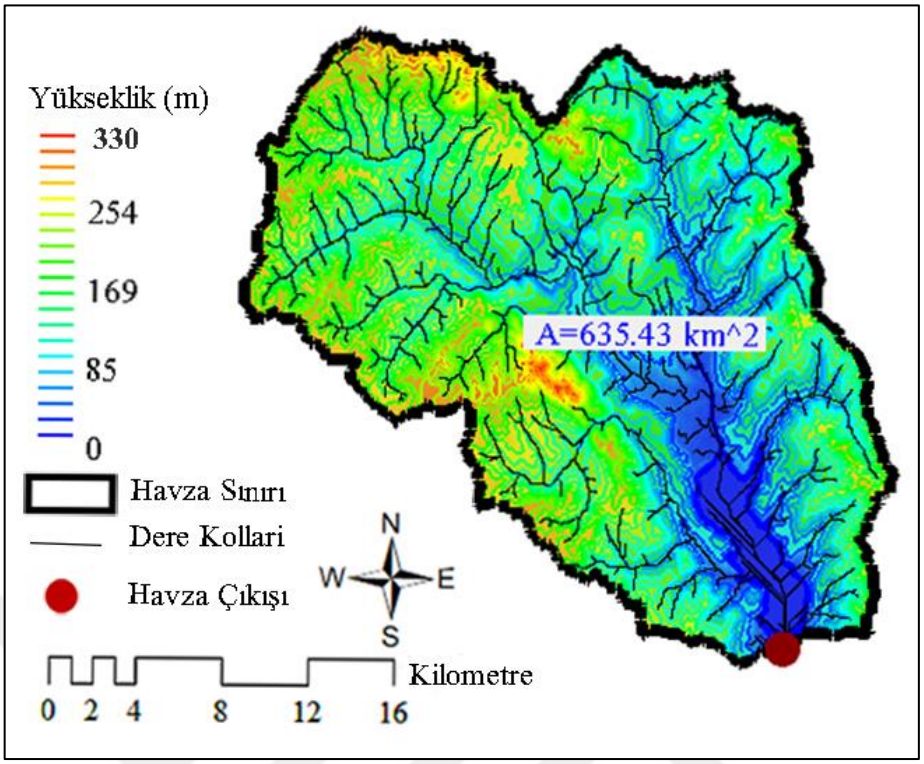
WMS, bir havzanın alanı, çevresi, eğimi, uzunluğu, genişliği, havza çıkış noktasının merkeze uzaklığı gibi karekteristik özellikleri ile beraber hidrolik ve hidrolojik programların modelleme yöntemine göre havza temel özelliklerini belirlemektedir. Bu program ile Büyükçekmece, Çatalca ve Silivri ilçelerinin yer aldığı Büyükçekmece Göl Havzası'nın hidrolojik akarsu havza sınırı oluşturulmuştur.

Büyükçekmece Göl Havzası için yapılan hidrolik ve hidrolojik analizler için gerekli altlık ve girdileri WMS programı ile hazırlanmıştır. Havzanın hidrolojik modeli HEC-HMS programı ile oluşturulduğundan WMS'in otomatik olarak hesapladığı drenaj havzasının özelliklerinin yanısıra HEC-HMS modelinde sızma ve dönüşüm yöntemleri olarak seçilmiş olan SCS Eğri Numarası ve SCS Birim Hidrograf yöntemleri için her alt havzaya ait eğri numarası (*CN*), geçirimsizlik oranı ve gecikme süresi WMS ile belirlenmiştir. Hesaplanan parametreler için gerekli olan Sayısal Yükseklik Haritası (DEM (14.4x14.4m) UTM Zone 35, Northern Hemisphere, World wide elevation map) ve Arazi Kullanımı (CLC2018) haritalarına WMS ile ulaşılmış; hidrolojik toprak grupları ise Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün İstanbul-($F_{20}(b_3, b_4, c_1, c_2, c_3, c_4)$, $F_{21}(a_4, d_1, d_4)$) (DSİ, 2019) paftalarından referans alınmıştır. Hesaplamalar yapıldıktan sonra Hidroloji Modülünden HEC-HMS'in girdisi oluştrulmuştur.

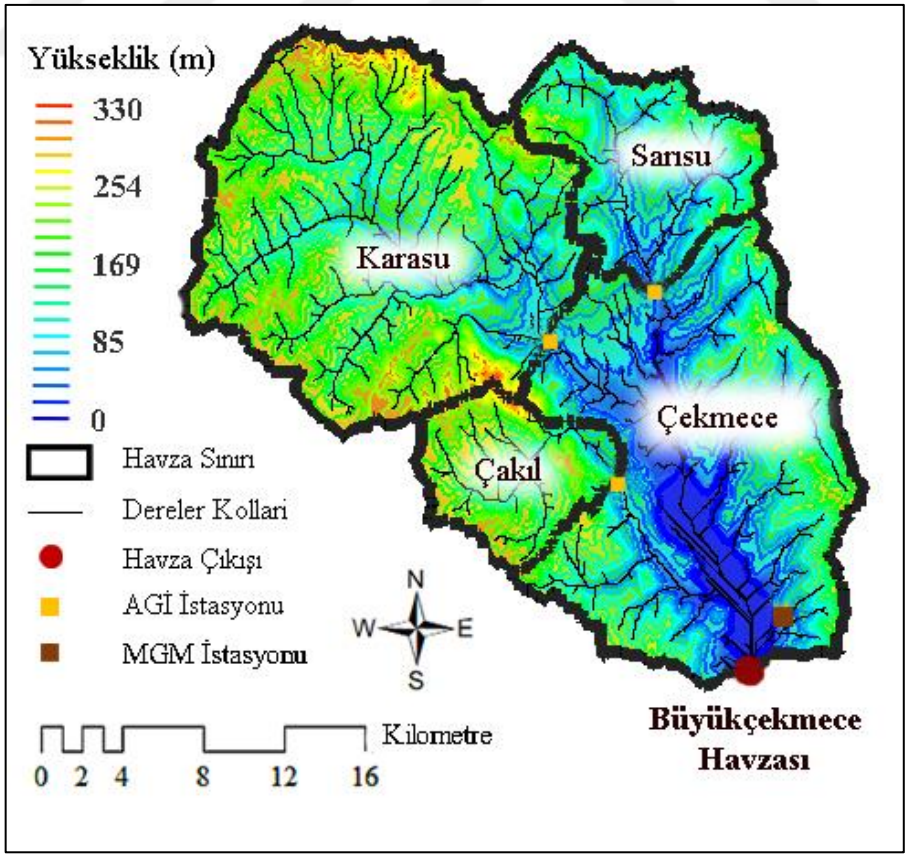
İlk olarak Büyükçekmece Göl Havzası'nın sınırlarını belirlemek için bölgeye ait 14.4x14.4m olan sayısal yükseklik haritası kullanılarak akarsu havzasının çıkış noktası olan Büyükçekmece Gölü'nün mansabında yani Marmara Denizi'ne deşarj olduğu bölgede bir çıkış noktası (outlet) belirlenmiş ve WMS'in TOPAZ modülüyle Büyükçekmece Göl Havzası'nın toplam 635.43 km^2'lik drenaj alanı sınırları oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Daha sonra, göl havzasında Çakıl, Sarısu ve Karasu dereleri üzerinde bulunan 3 adet akım gözlem istasyonu (AGİ) dikkate alınarak 4 adet ana alt havza oluşturulmuştur (Şekil 3.2).

Büyükçekmece Göl Havzası'nın drenaj alanı toplam 635.43 km^2 olup göl alanı ise 28 km^2 dir. Drenaj havzasının hidrolojik modelinden daha hassas sonuçlar elde etmek için 4 ana alt havza WMS ortamında Şekil 3.3'te gösterildiği gibi farklı alanlara sahip toplam 44 adet küçük alt havzaya ayrılmıştır. WMS programında bölgenin toprak haritası ve arazi kullanım haritası kullanılarak bu 44 alt havzanın Eğri Numarası değerleri çıkarılmıştır ve Şekil 3.4'te görüldüğü gibi suyun olduğu alt havzada Eğri Numarası değeri 0, diğer alt havzalarda Eğri Numarası değerleri 30 ile 84 arasında değişmektedir.

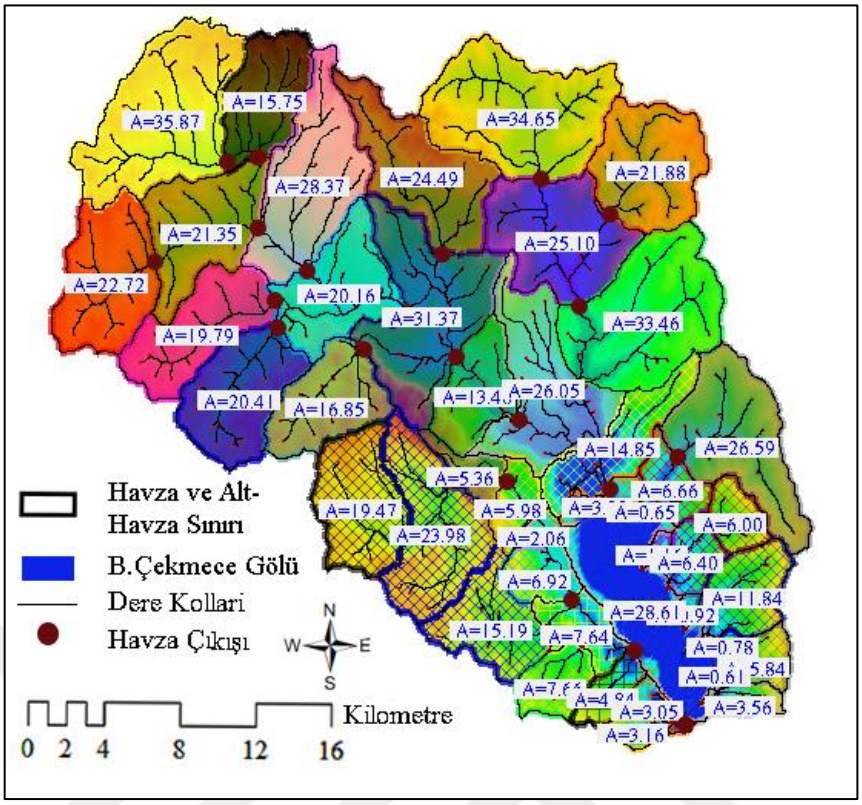
Hidrolojik modele başlamadan önce Büyükçekmece göl havzasının sınırlarının belirlenmesi, alt havzalara bölünmesi, toprak örtüsü ve arazi kullanımından yola çıkarak tüm alt havzaların eğri numaraları, geçirimsizlik oranları ve gecikme sürelerinin hesaplanması WMS programı ile tamamlanmıştır.



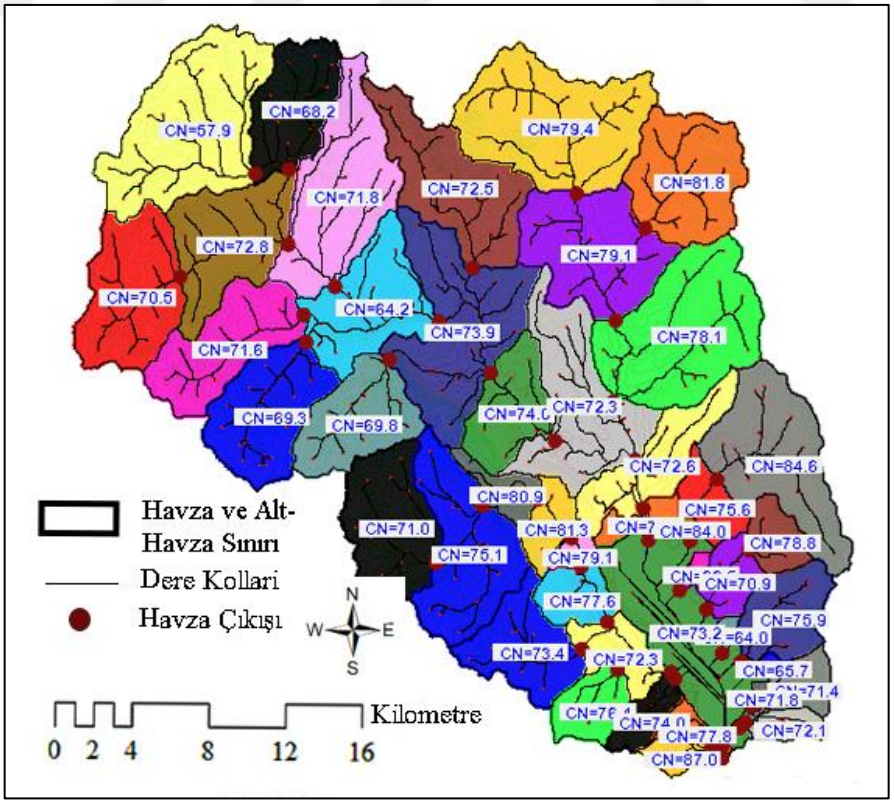
Şekil 3.1: Büyükçekmece Göl Havzası'nın sınırları.



Şekil 3.2: Büyükçekmece Göl Havzası'nın 4 ana alt havza sınırı.



Şekil 3.3: Büyükçekmece Göl Havzası'na ait 44 alt havza ve yüzölçümleri (alan birimi km^2).

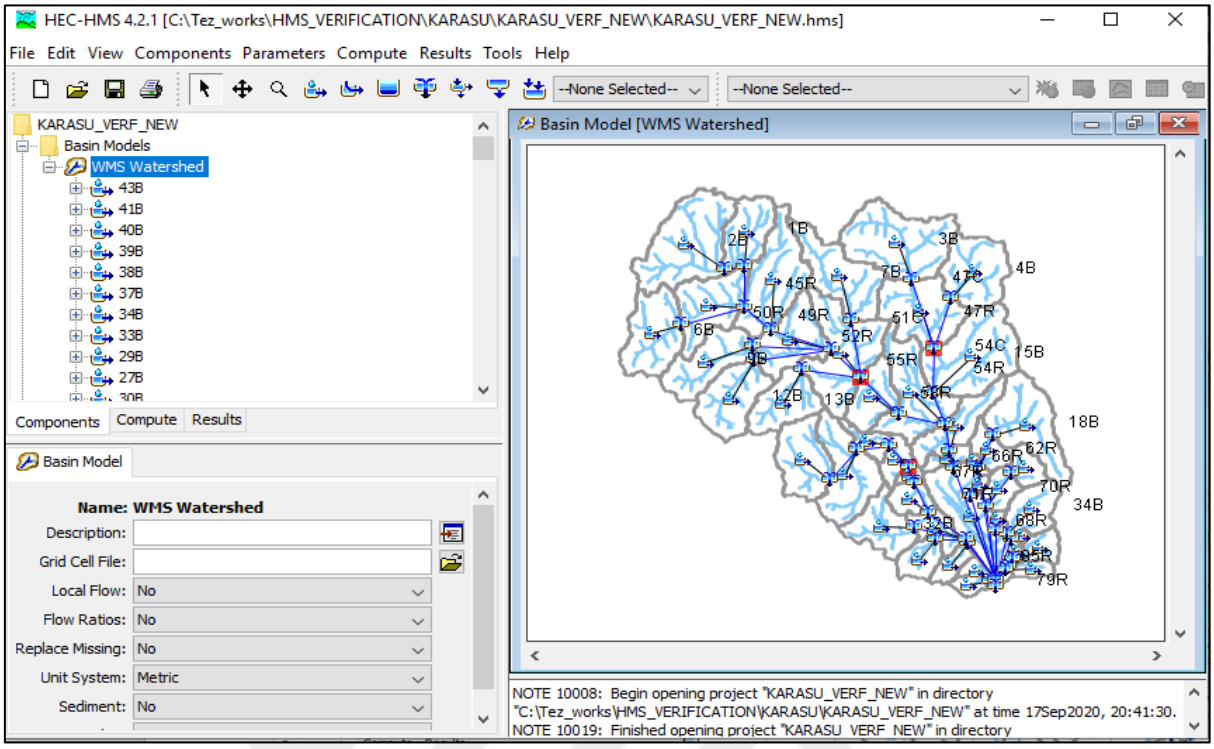


Şekil 3.4: WMS programı ile her alt havza için hesaplanmış Eğri Numarası değerleri.

3.2 HEC-HMS İLE BÜYÜKÇEKMECE HAVZASININ HİDROLOJİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

WMS'de oluşturulan hidrolojik model girdileri HEC-HMS programında tanımlandıktan sonra ilave olarak meteorolojik veriler olan yağış ve buharlaşma ve akım gözlem istasyonundan (AGİ) elde edilen akım verileri zaman serisi olarak modelde girdi oluşturulmuştur.

HEC-HMS programında Havza Modülü altında çukur alanlarda birikecek yağmur suyu hesabı için basit yüzey yöntemi (Simple Surface), sızma hesabı için SCS Eğri Numarası yöntemi (SCS Curve Number), havza üzerinde artık yağış sonucu oluşan yüzeysel akış hesabı için SCS Birim Hidrograf yöntemi (SCS Unit Hydrograph) seçilmiştir. Meteoroloji Modülü altında ise evapotranspirasyon hesabı için aylık ortalama (Monthly Average) ve yağış serisi hesabı için tanımlı hidrograf (Specified Hydrograph) yöntemleri seçilmiştir. HEC-HMS modelinde seçilen yöntemler için gerekli olan Alt Havza Alanı (km^2), ortalama kotu (m), Eğimi (%) Akarsu Uzunluğu (m) Akarsu Eğimi (%) Yüzey depolaması (mm), Geçiş Süresi Tc (dk), Gecikme Süresi (dk), Eğri Numarası (CN), Geçirimsizlik yüzdesi (%) gibi tüm parametreler Tablo 3.1'de gösterildiği gibi tanımlandıktan sonra simülasyonlar yapılarak alt havzaların bağlantı noktalarından (Junction) elde edilen akım hidrografı ile AGİ'den elde edilen gözlem hidrografı karşılaştırılmıştır ve kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. HEC-HMS ile oluşturulan hidrolojik model Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: HEC-HMS programı ile oluşturulmuş havza modeli.

Tablo 3.1: HEC-HMS programında oluşturulmuş hidrolojik modelin girdileri.

Alt Havza No	Alan (km^2)	Kot_{ort} (m)	Alt Havza Eğimi (%)	Akarsu Uzunluğu (m)	Akarsu Eğimi (%)	Yüzey depolması (mm)	Geçiş Süresi Tc (dk)	Gecikme Süresi (dk)	Eğri Numarası CN	Geçirimsizlik (%)
1B	15.75	176	10.09	6900	3.27	35	170.7	102.4	68.04	2.23
2B	35.87	172	8.26	10011	1.84	35	329.9	197.9	57.88	0.15
3B	34.65	106	10.29	9689	2.18	10	159.8	95.9	79.57	3.42
4B	21.88	108	13.21	7661	2.39	10	109.3	65.6	81.70	3.61
5B	21.35	118	7.76	8213	1.94	35	197.9	118.8	72.56	0.36
6B	22.72	162	8.09	6968	1.81	35	179.9	107.9	70.48	1.17
7B	24.49	134	9.08	10658	2.40	35	225.4	135.2	72.56	5.28
8B	28.37	124	7.23	12599	1.99	35	296.0	177.6	71.66	1.24
9B	19.79	151	7.01	8511	1.35	35	220.0	132.0	71.61	3.31
10B	25.10	55	6.33	9040	1.56	10	196.9	118.2	78.86	2.56
11B	20.16	91	7.77	9230	1.53	35	270.5	162.3	64.32	1.73
12B	20.41	159	7.41	8042	1.74	35	218.0	130.8	69.24	1.62
13B	16.85	204	10.93	6807	2.06	35	154.4	92.7	69.88	3.91
14B	31.37	81	8.13	9334	1.61	35	206.5	123.9	73.86	3.83
15B	33.46	69	8.13	10024	1.72	35	185.7	111.5	79.38	2.23
16B	13.48	65	7.22	6676	4.56	35	167.5	100.5	73.89	18.58
17B	26.05	32	3.35	11150	1.35	35	369.4	221.7	74.01	3.69
18B	26.59	98	8.50	9593	1.73	35	147.6	88.5	84.68	17.95
19B	5.36	155	17.86	5119	4.95	5	69.9	41.9	80.87	6.43
20B	23.98	154	7.71	8308	1.53	5	181.6	109.0	76.00	3.21
21B	19.47	165	6.10	6714	2.26	5	199.2	119.5	70.83	2.78
22B	14.85	40	4.98	8718	1.97	35	247.0	148.2	74.24	0.20
23B	5.98	95	8.77	3469	1.49	5	69.6	41.8	82.37	20.50
24B	3.90	14	2.99	3441	1.62	35	140.6	84.3	76.85	11.40
25B	0.65	10	3.53	1650	2.06	35	45.1	27.0	90.40	11.80
26B	6.66	41	5.24	5115	1.80	35	121.2	72.7	82.79	3.92
27B	6.00	109	7.95	3088	4.50	35	75.0	45.0	78.61	12.88
28B	2.06	52	6.38	2048	2.31	35	63.9	38.4	76.65	20.09
29B	1.16	22	6.82	2443	1.94	35	79.9	48.0	72.62	0.00
30B	6.40	43	5.69	4295	2.88	35	140.7	84.4	71.76	0.97
31B	6.92	76	7.07	5276	3.17	35	123.5	74.1	78.23	12.98
32B	15.19	118	7.22	6708	2.32	35	172.9	103.7	72.90	11.75
33B	0.92	19	4.93	2371	2.62	35	104.0	62.4	68.00	0.00
34B	11.84	86	7.83	5964	2.93	35	136.4	81.9	76.47	41.04
35B	7.66	102	6.88	4521	3.11	35	118.7	71.2	75.86	31.38
36B	28.60	5	1.80	11811	0.24	35	258.2	154.9	94.09	3.83
37B	3.56	77	10.18	4308	4.54	35	107.6	64.5	71.03	13.71
38B	5.84	99	9.23	5192	3.60	35	126.4	75.9	72.36	14.36
39B	0.61	20	6.66	1596	3.05	35	50.1	30.1	77.40	40.00
40B	0.78	41	7.28	2290	4.41	35	88.5	53.1	65.67	0.00
41B	4.84	73	8.22	4490	3.48	35	112.5	67.5	74.42	27.61
42B	7.64	44	7.98	6698	1.49	35	167.5	100.5	72.18	13.89
43B	3.16	38	4.95	3423	3.76	35	78.1	46.9	86.97	88.52
44B	3.05	23	4.34	4485	2.57	35	93.1	55.9	89.72	51.81

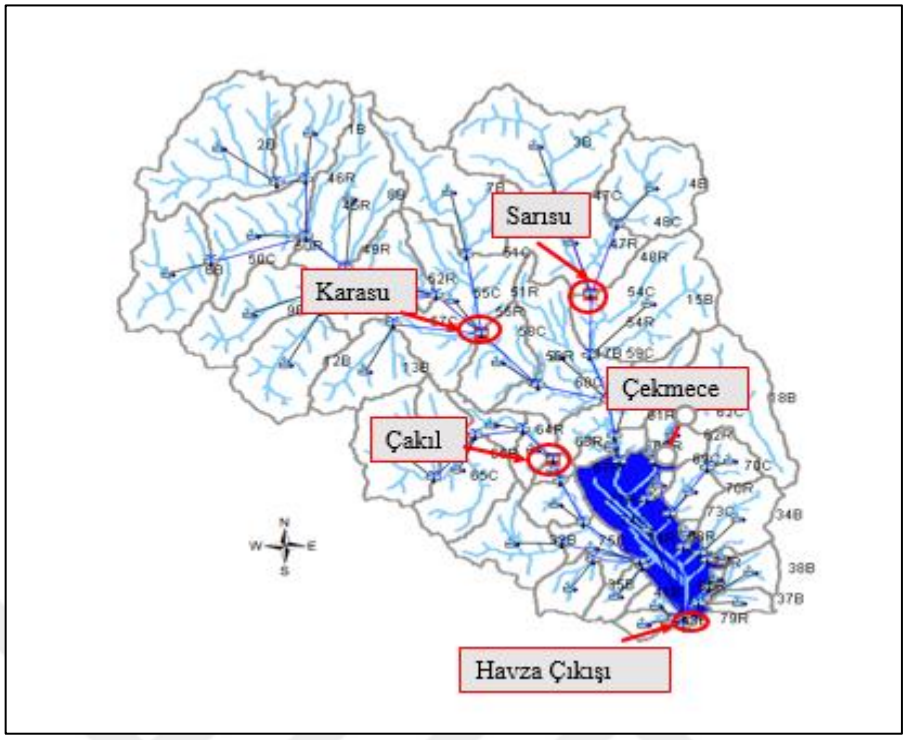
3.2.1. Hidrolojik model kalibrasyonu

Çalışmanın bu aşamasında HEC-HMS programında oluşturulan hidrolojik modelin kalibrasyonu için her ana alt havzanın çıkışına denk gelen AGİ'lerde kaydedilmiş akım verileri programa gözlem veri serisi olarak tanımlanmış ve Eğri Numarası değerlerinin optimizasyonu için göl havzasının 2014-2018 yılları arasında yağış-akış simülasyonları yapılmıştır. Daha sonra gözlem hidrografları ile hesaplanan hidrograflar incelenerek hata değeri optimize edilmiş ve kalibrasyon ile en uygun Eğri Numarası değerleri elde edilmiştir (Tablo 3.2). Kalibrasyon işlemi 3 ana alt havza için yani Büyükçekmece Göl Havzası alanının 62%'sini oluşturan Çakıl, Sarısu ve Karasu alt havzaları için ayrı ayrı yapılmıştır (Şekil 3.6).

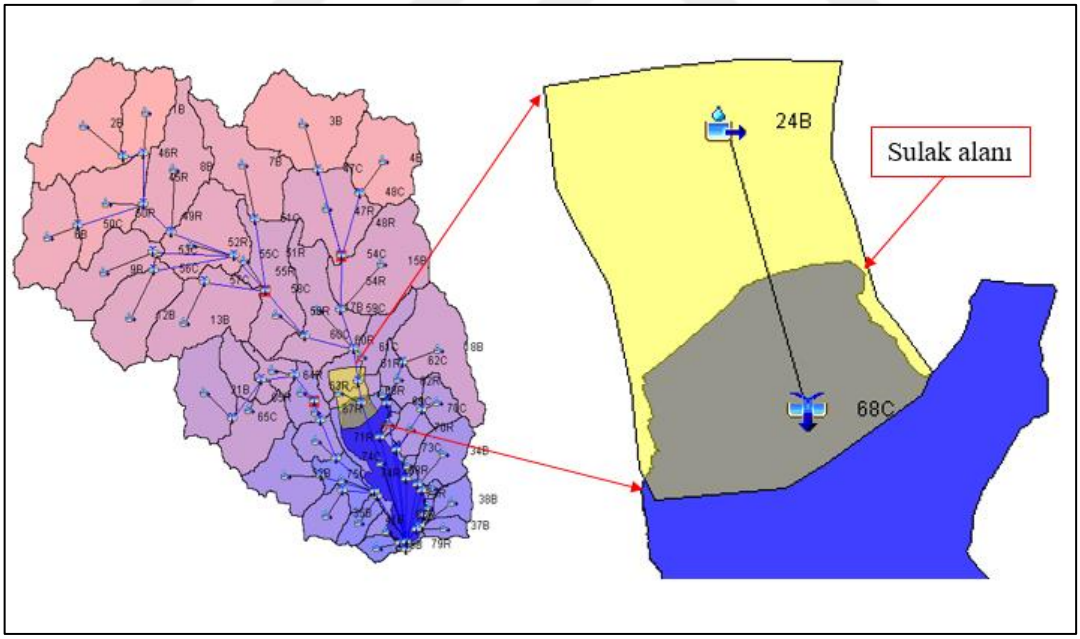
Daha sonra yeraltı suyu modellemesi yapılmış olan sulak alan bölgesine ait Eğri Numaraları, havza sınırları içerisinde bulunan 3 alt havzanın kalibrasyon sonuçları dikkate alınarak elde edilmiştir. Kalibre edilmiş alt havzalara ait kalibrasyon sonucu ile elde edilen eğri numarası değerleri bu havzalardaki başlangıç eğri numarası değerlerine oranlanmış ve 1,22 değerinde bir katsayısı elde edilmiş; sonrasında elde edilen 1,22 katsaysı ile sulak alan bölgesinin bulunduğu alt havzanın başlangıç eğri numaraları 1,22 sayısna bölünerek buraya ait nihai eğri numaraları da elde edilmiştir. Sulak alan bölgesinin 24B alt havzasında yer aldığı Şekil 3.7 de görülmektedir.

Tablo 3.2:Büyükçekmece göl havzasındaki 3 ana alt havzanın özellikleri.

Çıkış noktası	Alt havza	Alan (Km^2)	Toplam alan (Km^2)	Başlangıç CN değeri	Kalibre edilmiş CN değeri
Çakıl (67C)	19B	5.36	54.79	79.077	57.126
	20B	23.98		37.842	35.443
	21B	19.47		40.013	35.204
	23B	5.98		89.198	71.623
Sarısu (54C)	10B	25.10	81.63	78.86	55
	3B	34.65		79.57	35.188
	4B	21.88		81.7	99
Karasu (58C)	1B	15.75	257.13	68.04	65.43
	11B	20.16		64.32	41.182
	12B	20.41		69.24	65.545
	13B	16.85		40.268	40.268
	14B	31.37		77	43.483
	2B	35.87		57.88	56.162
	5B	21.35		38.416	38.416
	6B	22.72		70.48	46.047
	7B	24.49		41.364	41.364
	8B	28.37		71.66	66.097
	9B	19.79		42	42



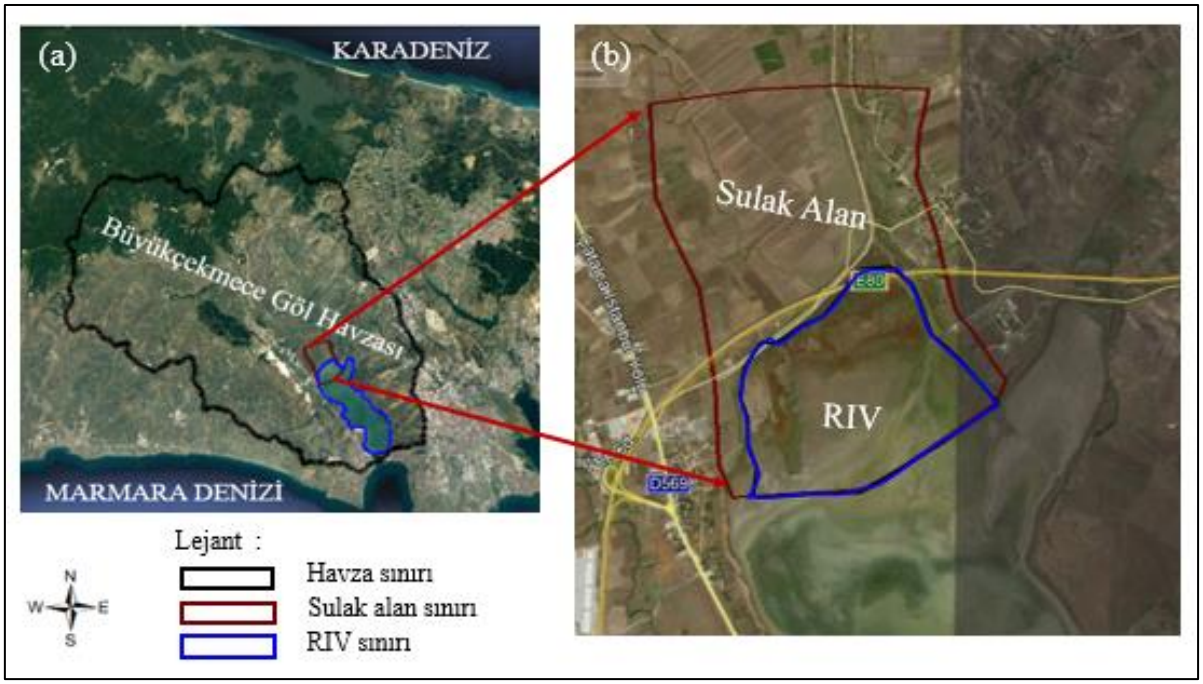
Şekil 3.6: Büyükçekmece Göl Havzası'nın HEC-HMS modeli ve dört ana alt havzanın çıkış noktaları.



Şekil 3.7: Sulak alanı içeren HEC-HMS modeli.

3.3. MODFLOW İLE BÜYÜKÇEKMECE GÖLÜ SULAK ALAN BÖLGESİNİN HİDROLİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

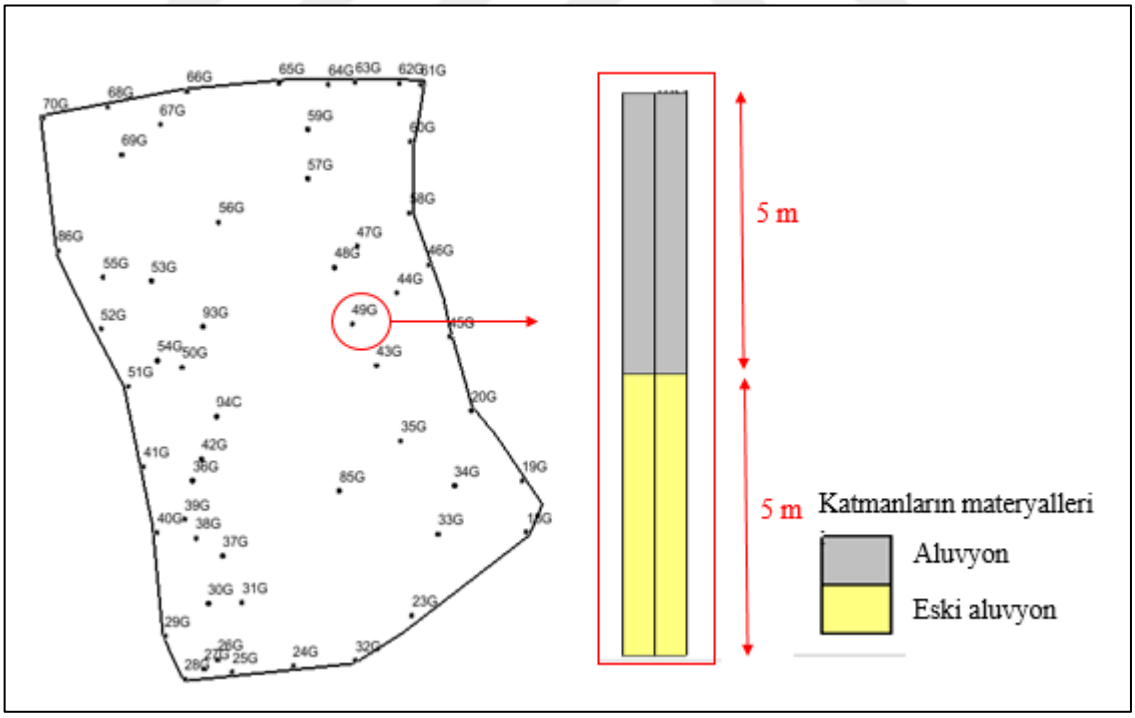
Tezin bu aşamasında Büyükçekmece Gölü kenarında yer alan sulak alan bölgesi için yeraltı suyu hidrolik modeli oluşturulmuştur. Önce modellemenin yapılacağı bölgenin sınırları uydu görüntüsü ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanılarak çizilmiştir ve daha sonra MODFLOW programına modelin sınırları olarak tanıtılmıştır (Şekil 3.8).



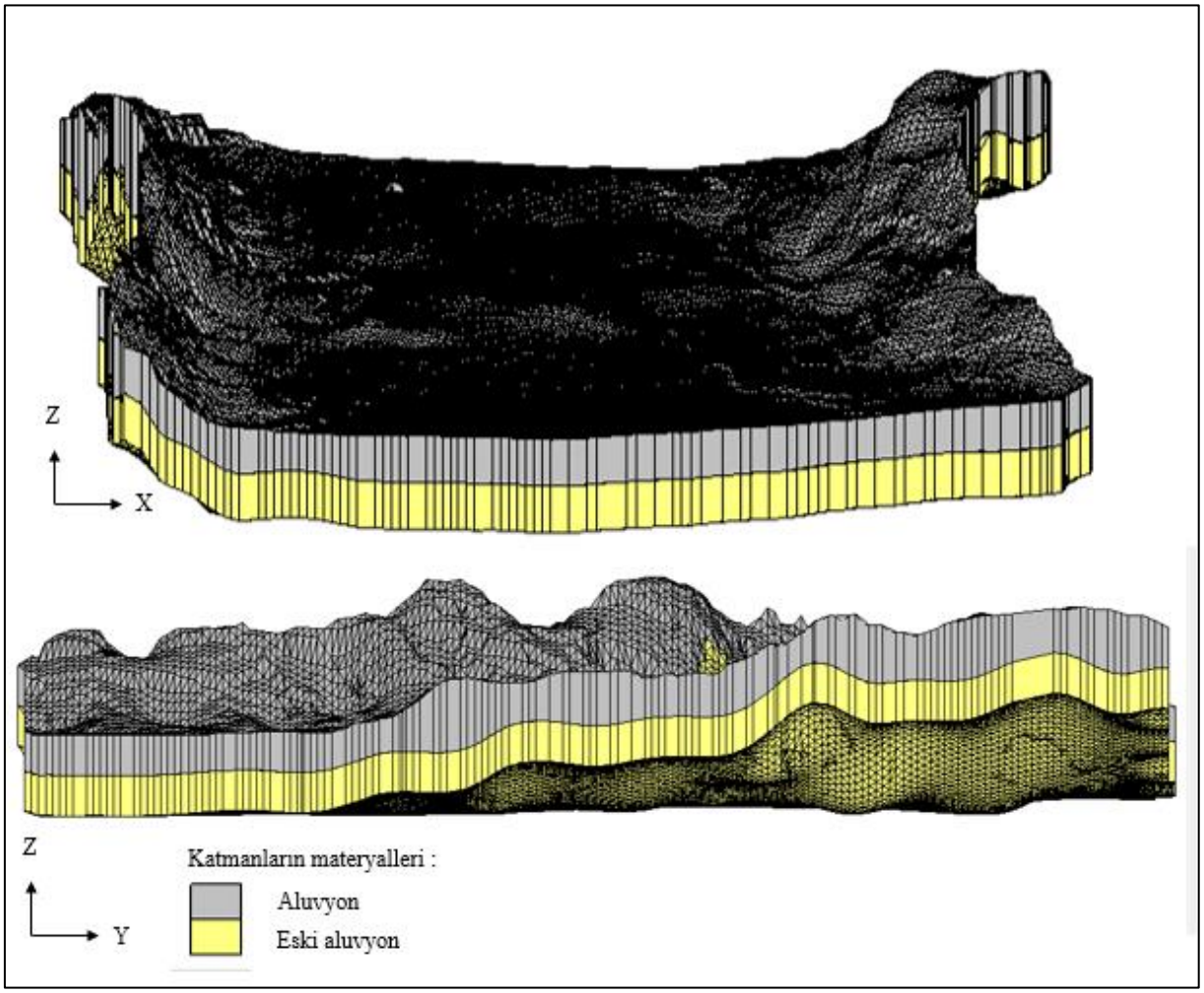
Şekil 3.8: a) Sulak alan sınırları, b) Sulak alan lokasyonu (GoogleEarth, 2014).

3.3.1. MODFLOW ile Yeraltı Suyu Hidrolik Modelinin Oluşturulması

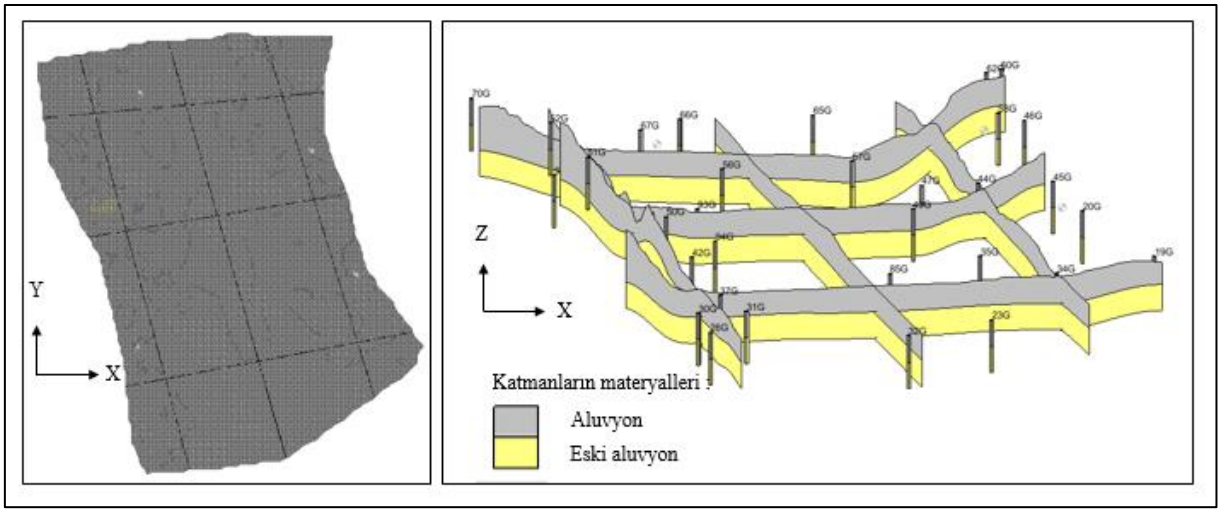
Hidrolik modelin oluşturulması için ilk olarak DSİ'den alınmış olan jeoloji haritası incelenmiş ve sulak alan bölgesinin çakıl, kum, kilden oluşan ve yaklaşık 10 m lik bir kalınlığa sahip alüvyon tabakası üzerinde yer aldığı görülmüştür (Şekil 2.10 ve Şekil 2.12). Bu bilgiler doğrultusunda 10 m lik alüvyon tabakasını eski alüvyon tabakası ve alüvyon tabakası diye ayırarak iki katmanlı bir akifer oluşturulmuştur. Bunun için MODFLOW programında Borehole modülünden yararlanarak, üst ve alt katmanların topoğrafik kotlarını tanımlayabilmek için, 94 eşit derinlikte kuyu logları tanımlanmış ve toprak yapısı bu loglar yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 3.9). Daha sonra kuyuların üst kotlarını tanımlamak için bir önceki adımda WMS programında indirilen, bölgeye ait 14.4x14.4m çözünürlüğünde sayısal yükseklik haritasından (DEM) yararlanılmıştır. Derinlikleri ise tabakaların derinliği kadar (şekil 2.10 ve şekil 2.12 'den çıkartılarak) yani 10 m olarak tanımlanmış ve 3 boyutlu model hazırlanmıştır (Şekil 3.10). Modelin x ve y yönü boyunca 3 boyutlu kesitleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.9: MODFLOW programında Sulak Alan bölgesinin akifer tabakalarını temsil eden kuyu kesiti.



Şekil 3.10: Yeraltı suyu modelinin boy ve en kesitinin 3 boyutlu görüntüsü.

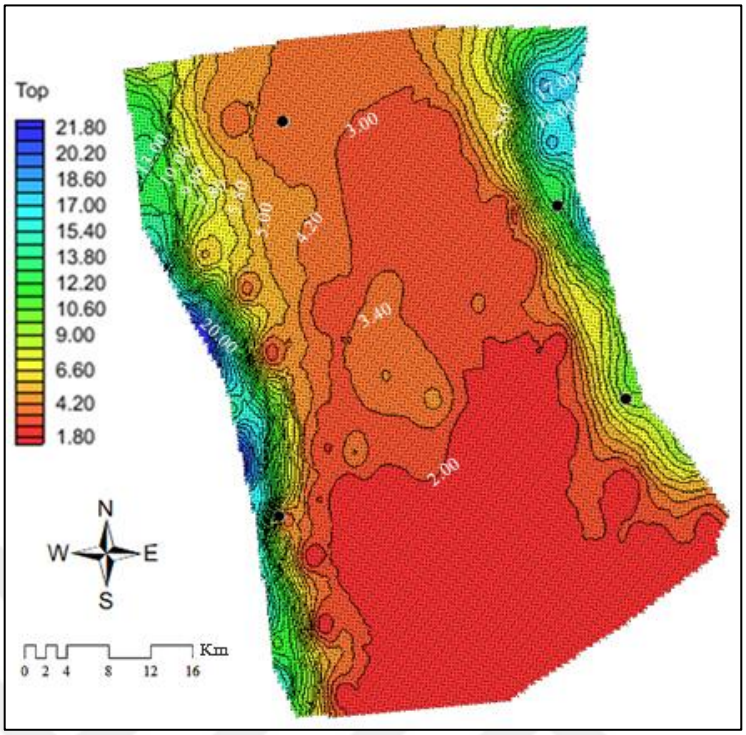


Şekil 3.11: Yeraltı suyu modeli (a) plan (b) 3 boyutlu kesitleri.

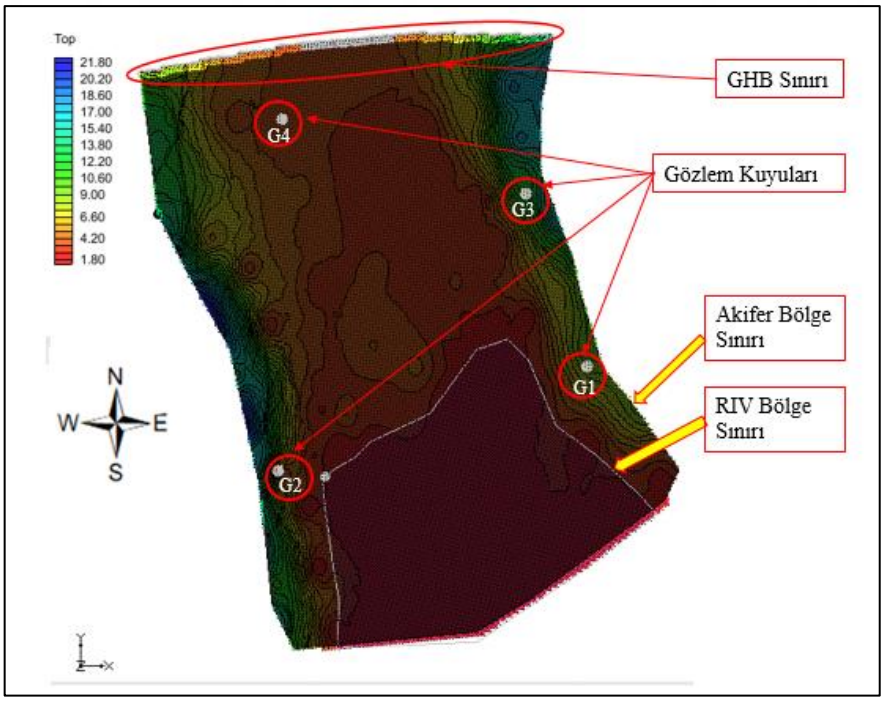
3.3.2. MODFLOW ile Oluşturulan Hidrolik Modelin Sınır Koşulları

Sulak alanın MODFLOW ile hidrolik modelinin oluşturulması için öncelikle bölgenin sayısal yükseklik haritası yatay düzlemde 20mx20m boyutlarında hücrelere bölünmüştür. Daha sonra akiferin her hücresine ilgili topoğrafik yükseklik değeri üst tabakaya tanımlanmıştır (Şekil 3.12). Sulak alanın sınırlarında bulunan 4 adet gözlem kuyusu modelde akifere yerleştirilmiştir ve daha sonra sınır koşulları tanımlanmıştır. Bölgenin kuzey tarafında sınır koşulu olarak Genel Yük Koşulu (GHB) tanımlanmıştır. Bu sınır koşulunu tercih etme sebebi ise sınırın üst tarafı da aynı jeolojik birime sahip olup ve akiferin devamını temsil etmesidir. Akiferin güney tarafında yani göl-sulak alan sınırına nehir (RIV) sınır koşulu tanımlanmıştır. Sulak alan-göl etkileşimi ve davaranışını zaman içerisinde doğru bir şekilde temsil edebilmesi için RIV paketi tercih edilmiştir. Sulak alanın doğu ve batı tarafında ise bölgenin jeolojik yapısına göre (Şekil 2.10 ve Şekil 2.12) geçirimsiz tabakalar mevcut olduğundan Neumann sınır koşulu yani akış geçirmeyen sınır tanımı yapılmıştır (Şekil 3.13).

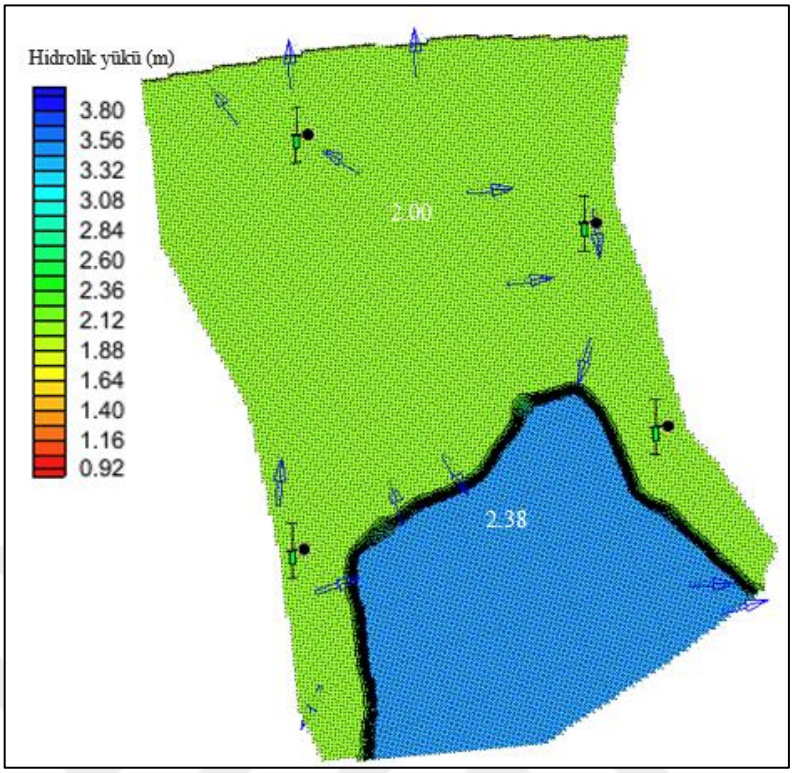
MODFLOW modeli kapsamında 2014-2018 yılları arası için yapılan tüm analizler su yılı dikkate alınarak yapılmıştır. 10 Ekim 2013 tarihindeki göl su seviyesi 2.38m (Şekil 4.8) olup hidrolik yük başlangıç değerini bölgedeki statik su seviyesi değeri dikkate alınarak 2 m olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.12: Yeraltı suyu modelinin yüzey topoğrafyasına ait harita.



Şekil 3.13: Yeraltı suyu modelinin sınır koşulları.



Şekil 3.14: MODFLOW hidrolik modeli başlangıç hidrolik yükü.

4. BULGULAR

Tezin bu bölümünde önce HEC-HMS ile yapılmış olan hidrolojik modelin kalibrasyon ve verifikasyon sonuçları verilmiştir. Daha sonra MODFLOW ile yapılmış olan hidrolik modelin kalibrasyon ve verifikasyon sonuçları sunulmuştur. Son olarak kalibre edilmiş modeller kullanılarak 100 yıllık yağış sırasında oluşacak taşkın hidrografı ve yeraltı su seviyesi grafikleri sunulmuştur.

4.1.HEC-HMS HİDROLOJİK MODEL ÇIKTILARI

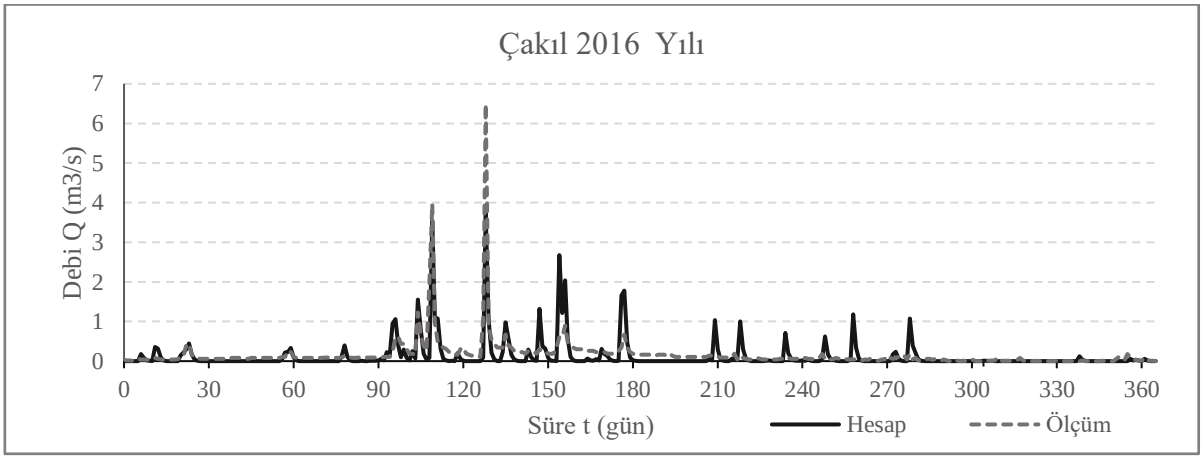
Tezin bu bölümünde Büyükçekmece Göl Havzası'nın HEC-HMS ile oluşturulmuş hidrolojik modeline ait analiz sonuçları paylaşılmıştır.

4.1.1.Kalibrasyon Sonuçları

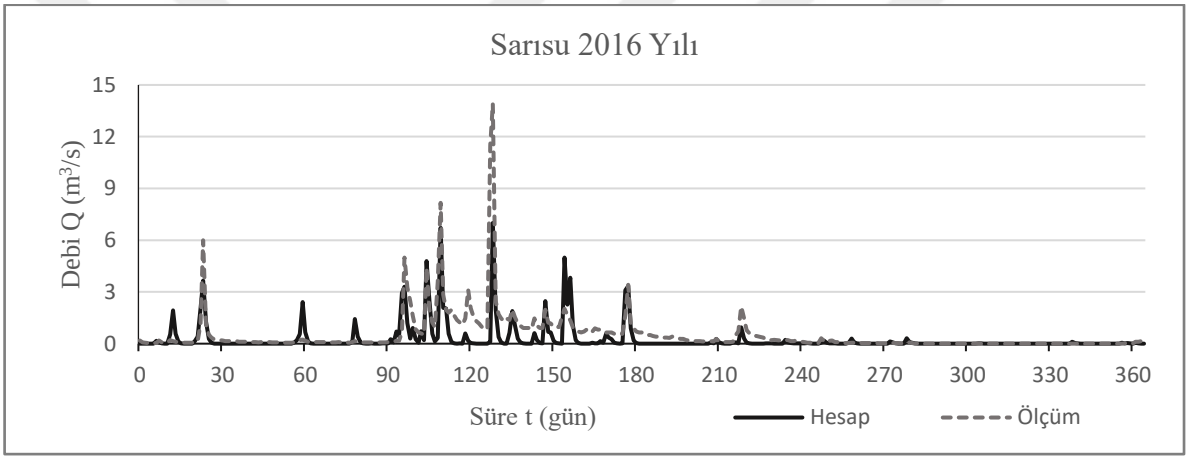
Büyükçekmece Göl Havzası'nın 3 ana alt havzası olan Çakıl, Sarısu ve Karasu alt havzalarının parametrelerinin belirlenmesi için 3 ayrı kalibrasyon yapılmıştır. Bu üç ana alt havzanın çıkış noktasında DSİ'nin akım gözlem istasyonları (AGİ) bulunmaktadır. AGİ'lerden 2014-2018 yılları arasında ölçülmüş olan günlük ortalama akım verileri alınmıştır. Her alt havzanın çıkış noktasında modelleme ile elde edilen hesap debisi ile AGİ'lerden elde edilmiş ölçüm debisi hidrografları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.1-4.3). 2014-2018 yılları için farklı Eğri Numarası değerleri kullanılarak yapılan simülasyonlar ile elde edilen hidrograflar incelenerek NSE değerleri hesaplanmış ve 1'e en yakın NSE değerini veren Eğri Numarası değerleri seçilerek kalibrasyon tamamlanmıştır.

Kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra her alt havzaya ait kalibre edilmiş Eğri Numarası değerleri tablo halinde verilmiştir (Tablo 4.1). Çakıl ve Sarısu alt havzaları için yapılan kalibrasyonda 2016 yılı akım verileri kullanılmış olup en uygun NSE değerleri sırayla 0.51 ve 0.44 olarak elde edilmiştir (Tablo 4.2). Çakıl ve Sarısu alt havzalarına ait 2016 yılı için elde edilen çıkış hidrografları ve ölçüm verileri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sunulmuştur. Karasu alt havzası için yapılan kalibrasyonda 2017 yılı akım verileri kullanılmış olup en uygun NSE değeri 0.59 olararak elde edilmiştir (Tablo 4.2). Karasu alt havzasına ait 2017 yılı için elde edilen çıkış hidrografı ve ölçüm verileri Şekil 4.3'te sunulmuştur.

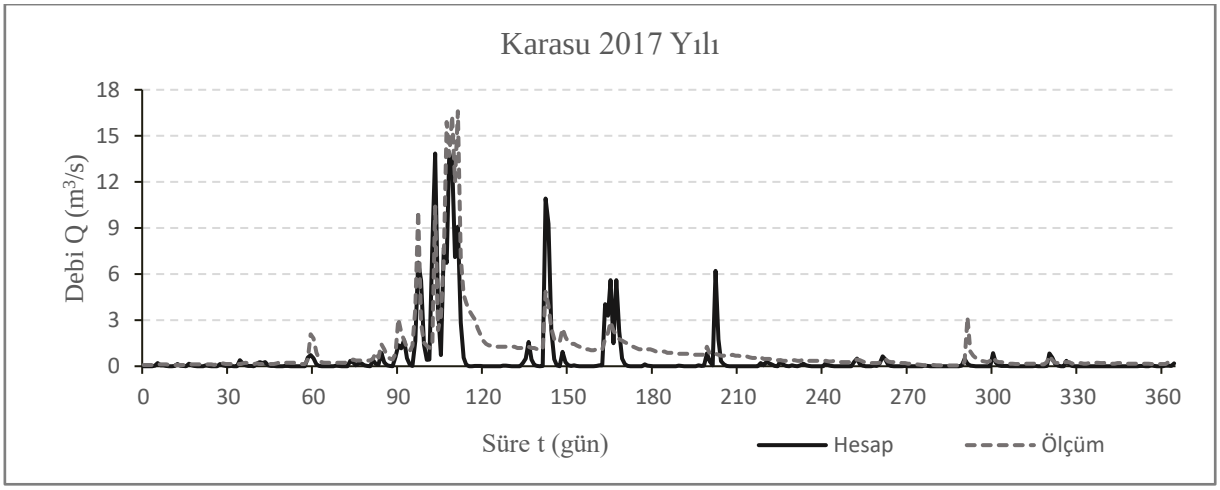
Ana alt havzaların çıkış hidrografları incelendiğinde Çakıl alt havzasında maksimum debi Şubat ayında 6.48 m^3/s, Sarısu alt havzasında maksimum debi Şubat ayında 13.9 m^3/s ve Karasu alt havzasında maksimum debi Ocak ayında 16.6 m^3/s olduğu görülmüştür (Şekil 4.1-4.3). Her 3 alt havza için akım değerlerinin sonbahar mevsiminden itibaren artarak kış mevsiminde pik değerlere ulaştığı ve daha sonra yaz mevsiminde minimum değerini aldığı, hatta Sarısu alt havzasının tamamiyle kuruduğu görülmektedir. Hidrorgraflar incelendiğinde model sonuçlarının pik debileri genellikle ölçülen pik debi değerlerinin biraz altında hesapladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1: Çakıl alt havzası için 2016 yılına ait kalibrasyon grafiği.



Şekil 4.2: Sarısu alt havzası için 2016 yılına ait kalibrasyon grafiği.



Şekil 4.3: Karasu alt havzası için 2017 yılına ait kalibrasyon grafiği.

Tablo 4.1: Büyükçekmece alt havzalarına ait kalibre edilmiş Eğri Numarası değerleri.

Ana alt havza	Alt havza	Çıkış noktası	Alan (km^2)	Toplam alan (Km^2)	Başlangıçtaki CN değeri	Kalibre edilmiş CN değeri
Çakıl	19B	67C	5.36	54.79	79.077	57.126
	20B		23.98		37.842	35.443
	21B		19.47		40.013	35.204
	23B		5.98		89.198	71.623
Sarısu	10B	54C	25.10	81.63	78.86	55.00
	3B		34.65		79.57	35.188
	4B		21.88		81.70	99.00
Karasu	1B	58C	15.75	257.13	68.04	65.43
	11B		20.16		64.32	41.182
	12B		20.41		69.24	65.545
	13B		16.85		40.268	40.268
	14B		31.37		77.00	43.483
	2B		35.87		57.88	56.162
	5B		21.35		38.416	38.416
	6B		22.72		70.48	46.047
	7B		24.49		41.364	41.364
	8B		28.37		71.66	66.097
	9B		19.79		42.00	42.00

4.1.2. Verifikasyon Sonuçları

HEC- HMS programında kalibrasyon sonucuna göre elde edilmiş parametreler modelde tanımlanarak geri kalan yıllar için modelin verifikasyonu yapılmıştır. Verifikasyon sonucunda elde edilen NSE değerleri Tablo 4.2'de sunulmuştur.

Tablo 4.2: Büyükçekmece alt havzalarına ait verifikasyon sonucu elde edilen Nash Sutcliffe değerleri.

Yıl	Çakıl	Sarısu	Karasu
2014	0.14	0.33	-
2015	0.13	0.12	0.20
2016	0.51	0.44	0.11
2017	0.41	0.34	0.59
2018	0.39	0.40	0.30

4.1.2.1. Çakıl Alt Havzası Verifikasyon Sonuçları

Çakıl alt havzasının 2016 yılı akış verileri kullanılarak yapılmış olan kalibrasyon sonucuna göre elde edilmiş parametreler, hidrolojik modelde tanımlanarak 2014-2015-2017-2018 yılları akış verileri ile modelin verifikasyonu yapılmıştır. Alt havzanın çıkış noktasında model sonucu elde edilen hesap debisi ile AGİ'den elde edilmiş ölçüm debisi hidrografları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.4 (a-d)).

Buna göre havzanın çıkış hidrograflarına bakıldığında, 2014 yılına ait ölçüm debisi Mart ayında 4.07m^3/s ve hesap debisi ise Haziran ayında 2.83m^3/s ile en yüksek değere ulaşmıştır. Şekil 4.4 (a)'da görüldüğü üzere ölçülen ve hesap edilen pik debiler özellikle kış aylarında dikkate değer bir şekilde farklılaşmış, yaz ve sonbahar mevsimlerinde ise akımlar minimum değerleri almıştır.

2015 yılına ait ölçüm debisi Nisan ayında 10.3m^3/s ve hesap debisi ise Mayıs ayında 8.97m^3/s ile en yüksek değere ulaşımıştır. Şekil 4.4 (b)'de gösterildiği gibi; hesaplanan pik debiler sonbahar ve kış mevsimlerinde ölçüm debilerinden daha düşük, daha sonra ilkbahar mevsiminden itibaren ise hesap edilen pik debiler ölçüm debilerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum kışın artan kar yağışıyla beraber ilkbaharda kar erimesinin yüzeysel akıştaki artışı geciktirmesi ile açıklanabilir.

2017 yılına ait ölçüm debisi ve hesap debisi Ocak ayında 7m^3/s ve 5.46m^3/s ile en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.4 (c)'de gösterildiği gibi Ocak ayında hesaplanan pik debiler ölçüm debilerinden daha düşük, ancak Mart ayından itibaren yazın sonuna kadar hesaplanan pik debiler ise ölçüm debilerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum bölgede oluşan sızma miktarının olması gerekenden bir miktar düşük olarak hesaplanmış olmasıyla açıklanbilir.

2018 yılına ait ölçüm debisi ve hesap debisi Şubat ayında 4m^3/s ve 1.77m^3/s ile en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.4 (d)'de gösterildiği gibi; Aralık, Ocak ve Şubat aylarında ölçüm debileri hesaplanan debilerden daha yüksek çıkarken, geri kalan aylarda ölçülen ve hesaplanan debiler biribirine yakındır.

Çakıl alt havzası için yapılmış olan verifikasyon sonuçlarına bakıldığında, havzanın çıkış hidrografından en yüksek ve en düşük pik debi değerleri sırasıyla, 2015 yılında 10.3 m^3/s ve 2014 yılında 4.07 m^3/s olarak elde edilmiştir.

4.1.2.2. Sarısu At Havzası Verifikasyon Sonuçları

Sarısu alt havzasının 2016 yılı akış verileri kullanılarak yapılmış olan kalibrasyon sonucuna göre elde edilmiş parametreler hidrolojik modelde tanımlanarak 2014-2015-2017-2018 yılları akış verileri ile modelin verifikasyonu yapılmıştır. Alt havzanın çıkış noktasında model sonucu elde edilen hesap debisi ile AGİ'den elde edilmiş ölçüm debisi hidrografları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5 (a-d)).

Buna göre havzanın çıkış hidrograflarına bakıldığında, 2014 yılına ait ölçüm debisi ve hesap debisi Eylül ayında sırasıyla 18.9m^3/s ve 15.89m^3/s ile en yüksek değere ulaşılmıştır. Şekil 4.5 (a)'da görüldüğü üzere Mart ayına kadar ölçüm debisi daha yüksek iken, Nisan ayından itibaren hesaplanan pik debiler daha yüksek çıkmaya başlamıştır.

2015 yılına ait ölçülen pik debisi Aralık ayında 15.1m^3/s ve hesaplanan pik debisi ise Ocak ayında 12.71m^3/s ile en yüksek değere ulaşımıştır. Şekil 4.5 (b)'de gösterildiği gibi; Mayıs ve Haziran aylarında hesap edilen debiler daha yüksek çıkmış, ancak 2015 yaz mevsiminde Sarısu deresi kuruduğundan dolayı ölçüm debisi sıfır olup, onun dışında yılın geri kalan aylarında ölçüm debisi daha yüksek veya da hesaplanan debiye çok yakın çıkmıştır.

2017 yılına ait ölçüm debisi ve hesap debisi Ocak ayında 35.9 m^3/s ve 10.73 m^3/s ile en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.5(c)'de gösterildiği gibi; Ekim ayından itibaren Şubat ayına kadar hesaplanan pik debileri ölçüm debilerinden daha düşük, ancak 2017 yaz mevsiminde Sarısu deresi kuruduğu için ölçüm debisi sıfır olup, geri kalan aylarda ise hesap edilen debiler daha yüksek çıkmıştır. Bu durum bölgede oluşan sızma miktarının olması gerekenden bir miktar düşük olarak hesaplanmış olmasıyla açıklanbilir.

2018 yılına ait ölçüm debisi Aralık ayında 13.6 m^3/s ve hesap debisi Ocak ayında 7.81m^3/s ile en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.5(d)'de gösterildiği gibi; Şubat ve Mart aylarında ölçüm debileri hesaplanan debilerden daha yüksek çıkmıştır, ancak 2018 yaz mevsiminde Sarısu deresi kuruduğu için ölçüm debisi sıfır olup, geri kalan aylarda hesaplanan ve ölçülen debiler birbirlerine çok yakın çıkmıştır.

Sarısu alt havzsı için yapılmış olan verifikasyon sonuçlarına bakıldığında, havzanın çıkış hidrografından en yüksek ve en düşük pik debileri sırayla, 2017 yılında 35.9m^3/s ve 2018 yılında 13.6m^3/s olarak elde edilmiştir.

4.1.2.3. Karasu At Havzası Verifikasyon Sonuçları

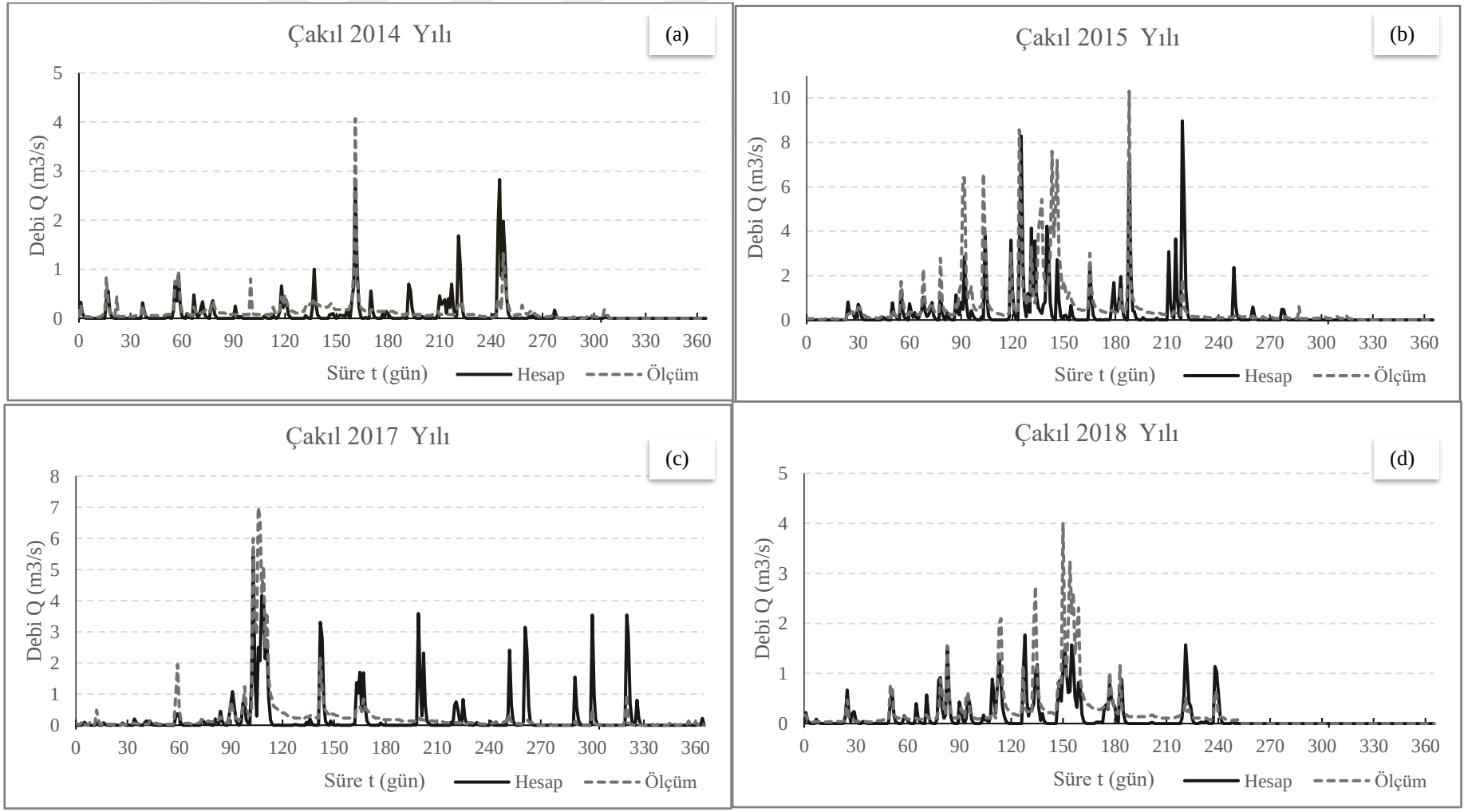
Karasu alt havzasının 2017 yılı akış verileri kullanılarak yapılmış olan kalibrasyon sonucuna göre elde edilmiş parametreler hidrolojik modelde tanımlanarak 2014-2015-2016-2018 yılları akış verileri kullanılarak modelin verifikasyonu yapılmıştır. Alt havzanın çıkış noktasında model sonucu elde edilen hesap debisi ile AGİ'den elde edilmiş ölçüm debisi hidrografları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.6a-d).

Buna göre havzanın çıkış hidrograflarına bakıldığında; 2014 yılında akım gözlem istasyonundan ölçüm yapılmadığı için sadece hesap edilen debiler gösterilmiştir. Şekil 4.6 (a)'da görüldüğü üzere hesaplanan pik debisi Ağustos ayında 20m^3/s ile en yüksek değere ulaşılmıştır.

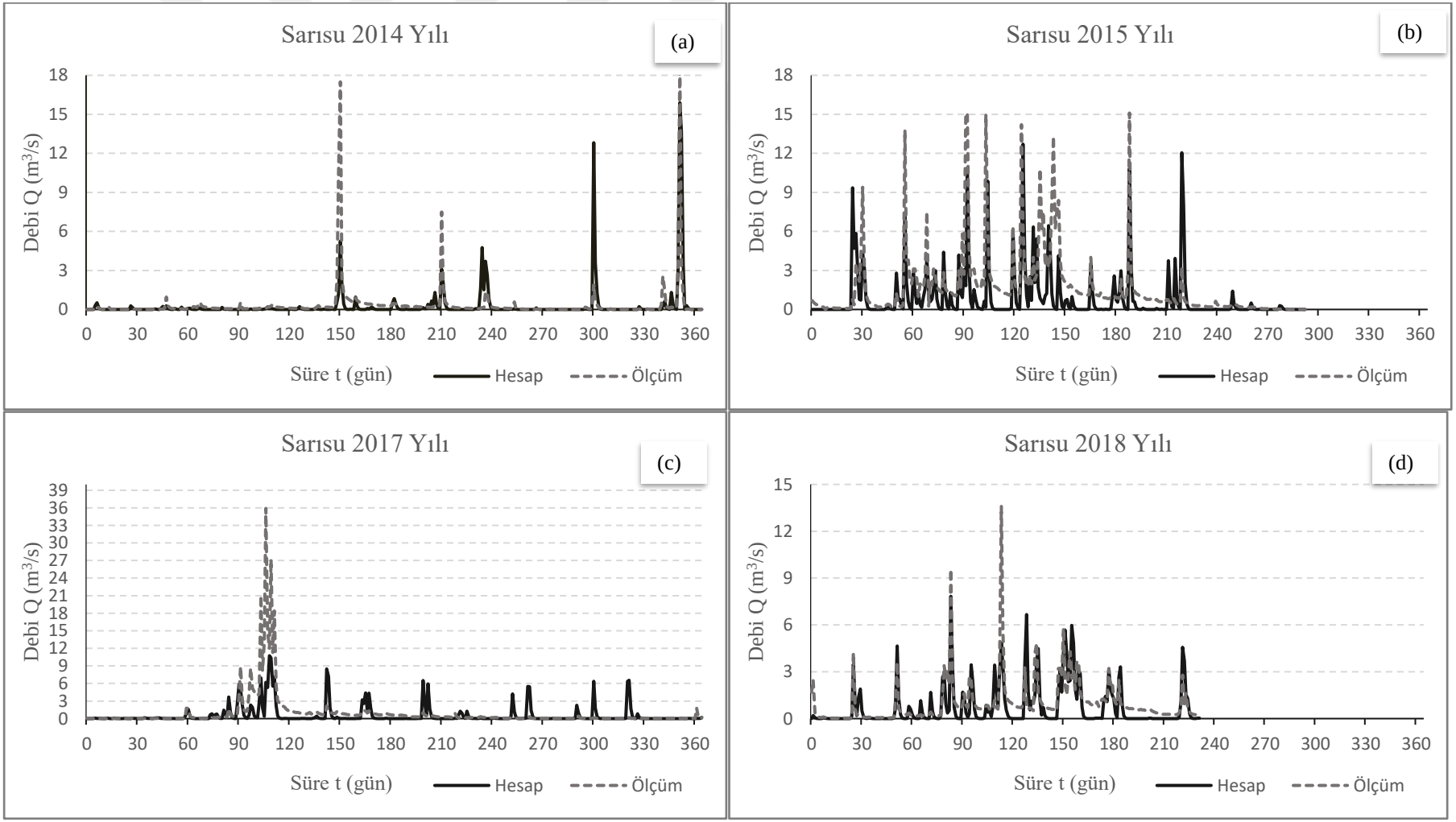
2015 yılına ait ölçüm debisi Şubat ayında 54.1 m^3/s ve hesap debisi ise Nisan ayında 43.93m^3/s ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. Şekil 4.6(b)'de gösterildiği gibi; Ocak ayından itibaren Nisan ayının sonuna kadar ölçüm debileri çok yüksek değerlere, geri kalan aylarda ise hesaplanan debiler daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

2016 yılına ait ölçüm debisi ve hesap debisi Şubat ayında 14m^3/s ve 20.39 m^3/s ile en yüksek değerlerine ulaştığı görülmüştür. Şekil 4.6(c)'de gösterildiği gibi; Ocak ayının ortasından Mart ayının sonuna kadar hesap edilen debi değerlerinde bir yükseliş olup, geri kalan aylarda ölçüm debisi hesap edilen debiye çok yakın çıkmıştır.

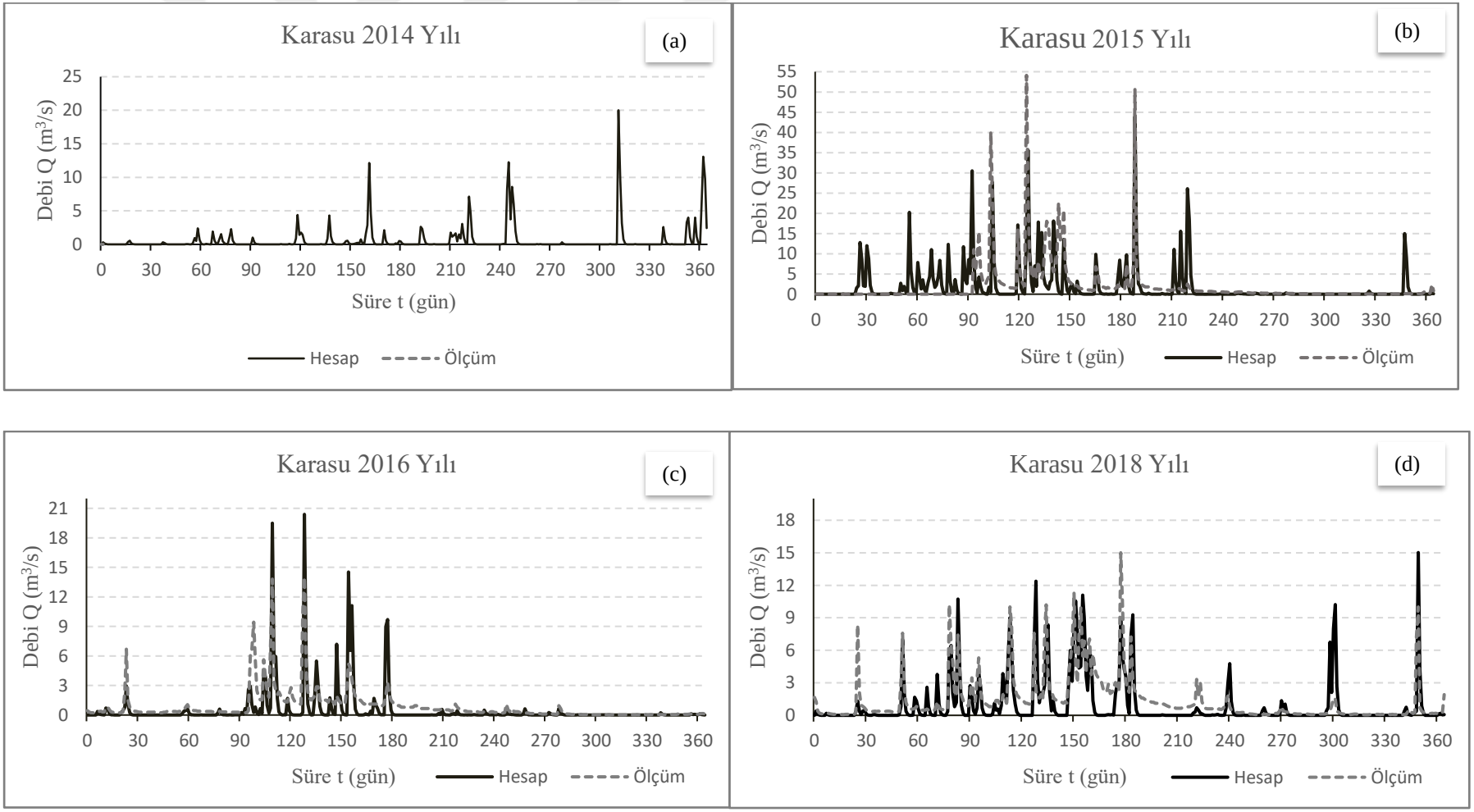
2018 yılına ait ölçüm debisi Mart ayında 15 m^3/s ve hesap edilen debi Ocak ayında 15.02 m^3/s ile en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.6(d)'de gösterildiği gibi; pik ölçüm debileri Hazirana kadar bir artış içinde olup hesaplanan değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Hesap edilen pik debileri, Hazirandan itibaren Eylülün sonuna kadar yükselmeye devam etmiştir. Bu durum bölgede oluşan sızma miktarının olması gerekenden bir miktar düşük olarak hesaplanmış olmasıyla açıklanbilir. Karasu alt havzsı için yapılmış olan verifikasyon sonuçlarına bakıldığında, havzanın çıkış hidrografından en yüksek ve en düşük pik debileri sırasıyla, 2015 yılında 54.1m^3/s ve 2018 yılında 15m^3/s olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4 :Çakıl alt havzasına ait (a) 2014 yılı, (b) 2015 yılı, (c) 2017 yılı ve (d) 2018 yılı verifikasyon grafikleri.



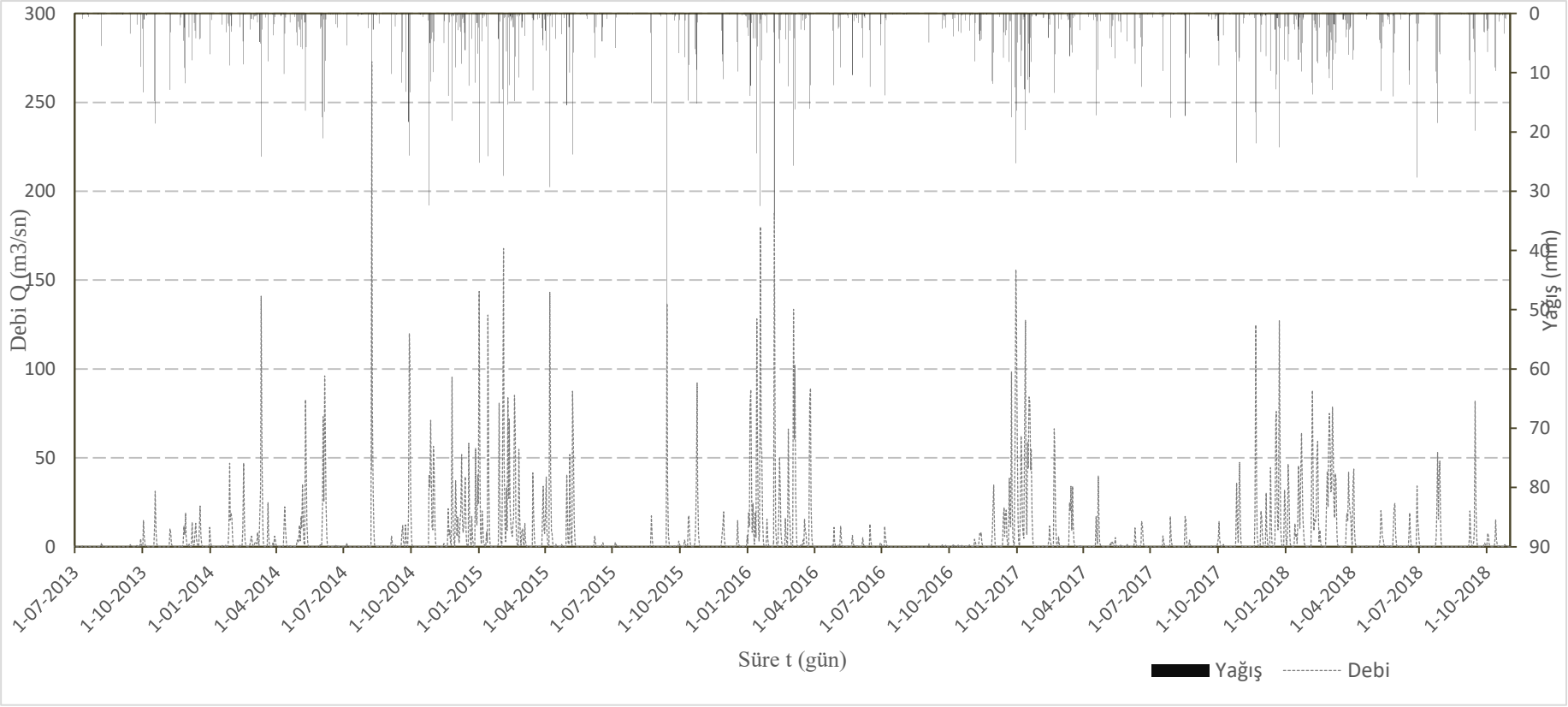
Şekil 4.5: Sarısu alt havzasına ait (a) 2014 yılı, (b) 2015 yılı, (c) 2017 yılı ve (d) 2018 yılı verifikasyon grafikleri.



Şekil 4.6: Karasu alt havzasına ait (a) 2014 yılı, (b) 2015 yılı, (c) 2016 yılı ve (d) 2018 yılı verifikasyon grafikleri.

4.1.3 Büyükçekmece Havzası Hidrolojik Model Bulguları

2014-2105-2016-2017-2018 yılları için Büyükçekmece Havzası'nın çıkış noktasında hidrolojik modelleme ile elde edilen hidrograf aşağıda verilmiştir (Şekil 4.7). Bu grafikten görüldüğü üzere en büyük debi 08/08/2014 tarihinde 272.9 m^3/s olarak hesaplanmıştır.

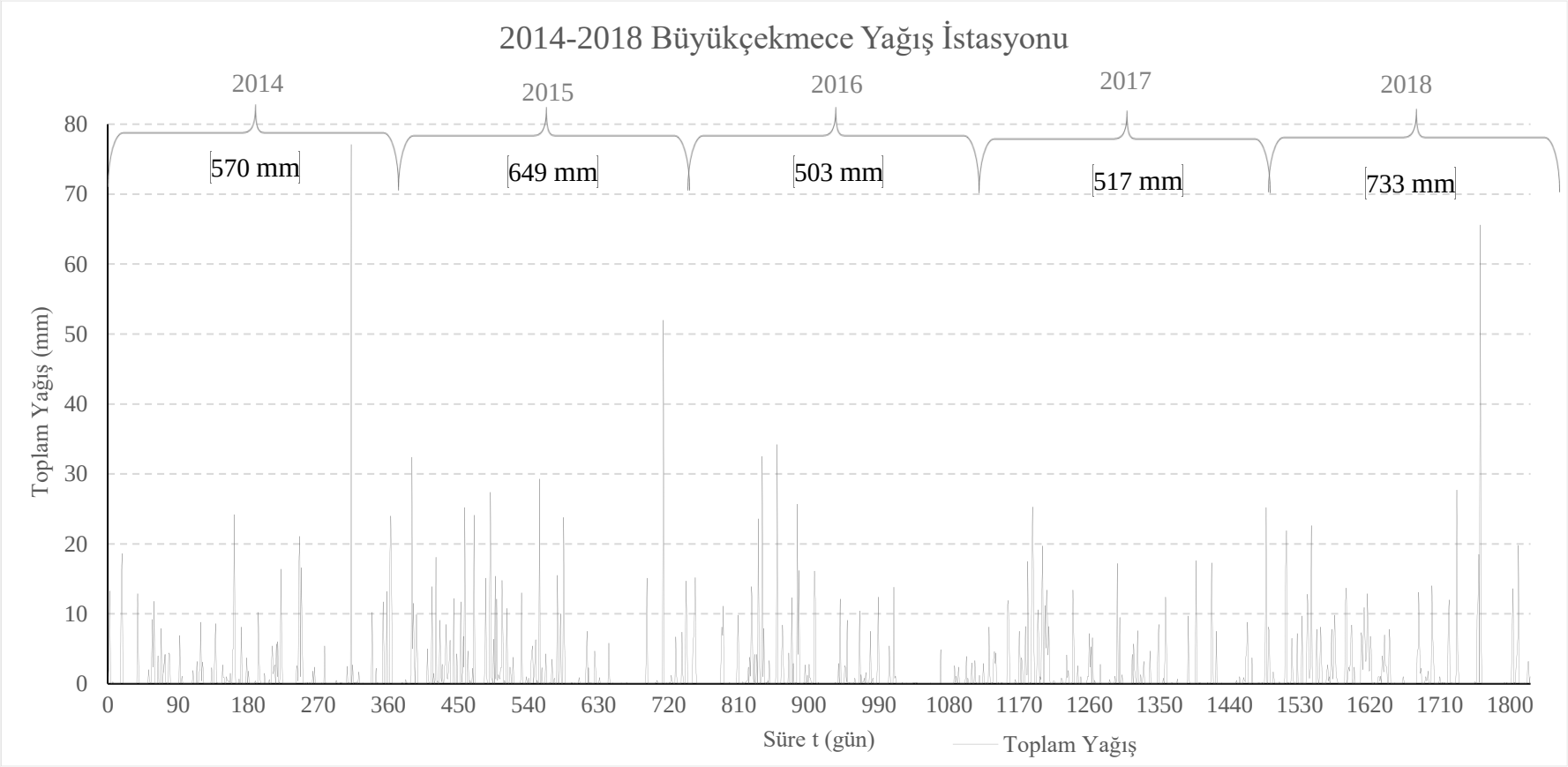


Şekil 4.7:Büyükçekmece Göl Havzasının Yağış-Akış Hidrografı.

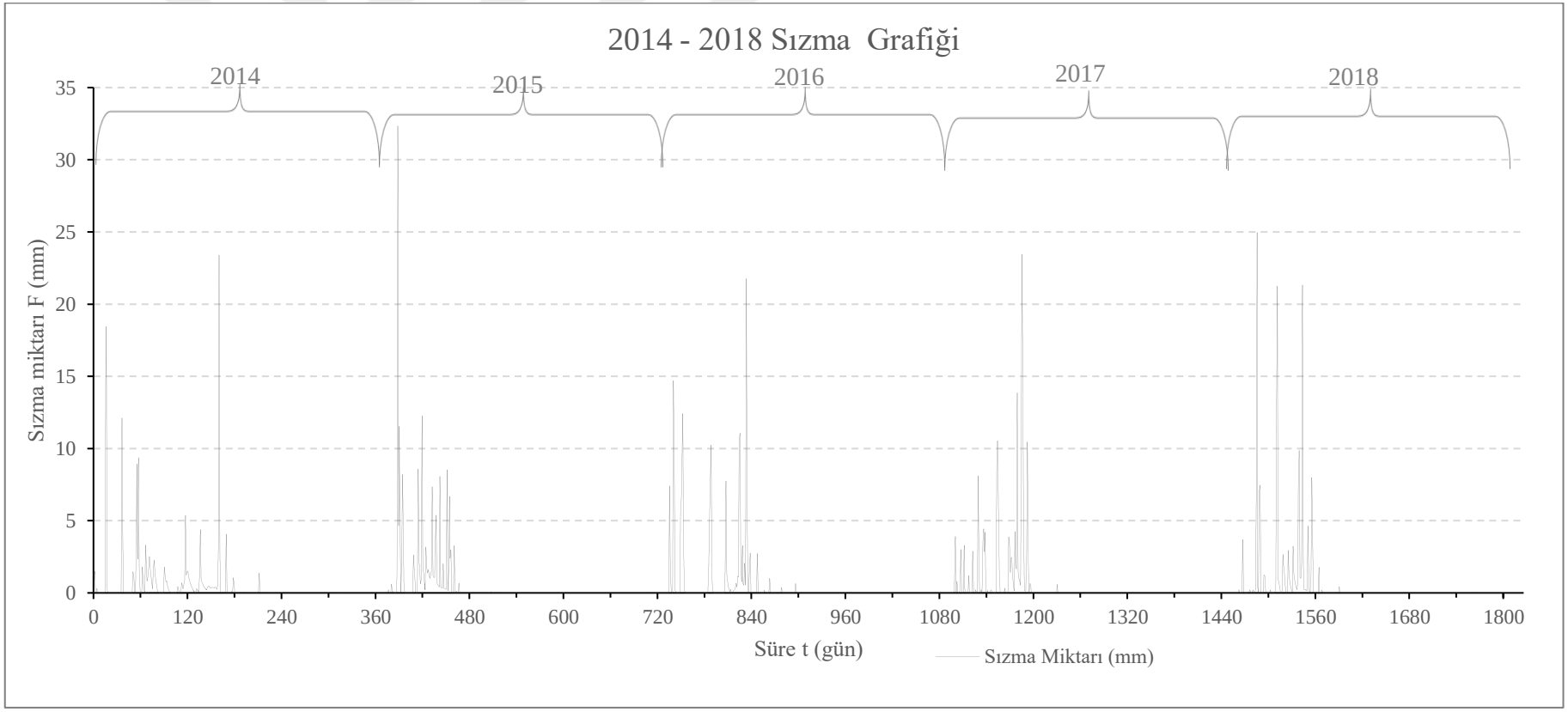
4.1.4. Sulak Alan Bölgesi için Hidrolojik Model Sonuçları

Sulak alan bölgesinin yer aldığı 24B adlı alt havzada 2014-2018 yılları arasında oluşan sızma miktarı hesaplamaları için kalibre edilmiş HEC-HMS hidrolojik modeli kullanılmıştır. Sızma miktarları, MODFLOW ile yapılmış olan yeraltı suyu hidrolik modelinde akiferin besleme girdi değeri olarak kullanılmıştır.

2014-2018 yılları arası simülasyonlarda kullanılan günlük yağış verileri Şekil 4.8'de ve yeraltı suyu modelinde kullanılacak akifer besleme (Recharge) değerleri yani sulak alan bölgesi için HEC-HMS'de hesaplanan sızma miktarı Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Şekil 4.9'da gösterilmiş olan sızma miktarlarının maksimum değerlerine bakıldığında; Ekim 2014'de 32.34 mm ile en yüksek değere ulaşmıştır. Diğer yılların maksimum değerleri ise; Ekim 2017'de 24.96 mm, Aralık 2016'da 23.46 mm, Mart 2014'de 23.39 mm ve Ocak 2016'da 21.77 mm olduğu görülmektedir. Yıllık ortalama toplam sızma miktarı ise 179.83 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8: Büyükçekmece yağış istasyonuna ait 2014-2018 yıllarında ölçülmüş olan günlük toplam yağış miktarı.



Şekil 4.9: Sulak alan bölgesi için 2014 -2018 yıllarında hesaplanmış olan günlük sızma miktarı.

4.2. YER ALTI SUYU HİDROLİK MODEL ÇIKTILARI

GMS programında MODFLOW modülü ile yer altı suyu hidrolik modelini oluşturduktan sonra 2014-2018 yılları için yapılacak analizler için gerekli olan başlangıç sınır değerleri modele tanımlanmıştır. Sulak alan bölgesinin başlangıç hidrolik yük değeri 2014'deki yer altı su seviyesinin ortalama değeri olan 1.91 m (Şekil 4.10) ve Eylül 2014 yılında göl su seviyesinin topoğrafik kotu olan 2 m değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Dolayısıyla akiferin başlangıç hidrolik yükü 2014 yılının analizleri için 2 m olarak kabul edilmiştir. Sonraki yıllar için yapılan analizlerde ise bir önceki yıla ait analiz sonucuna göre son güne ait hidrolik yük değeri bir sonraki yılın analizleri için başlangıç hidrolik yük değeri olarak kabul edilmiş ve son iki yılın analiz sonuçlarına bakıldığında başlangıç hidrolik yük değeri 2.47 m seviyesinde kararlı hale gelmiştir (Tablo 4.3).

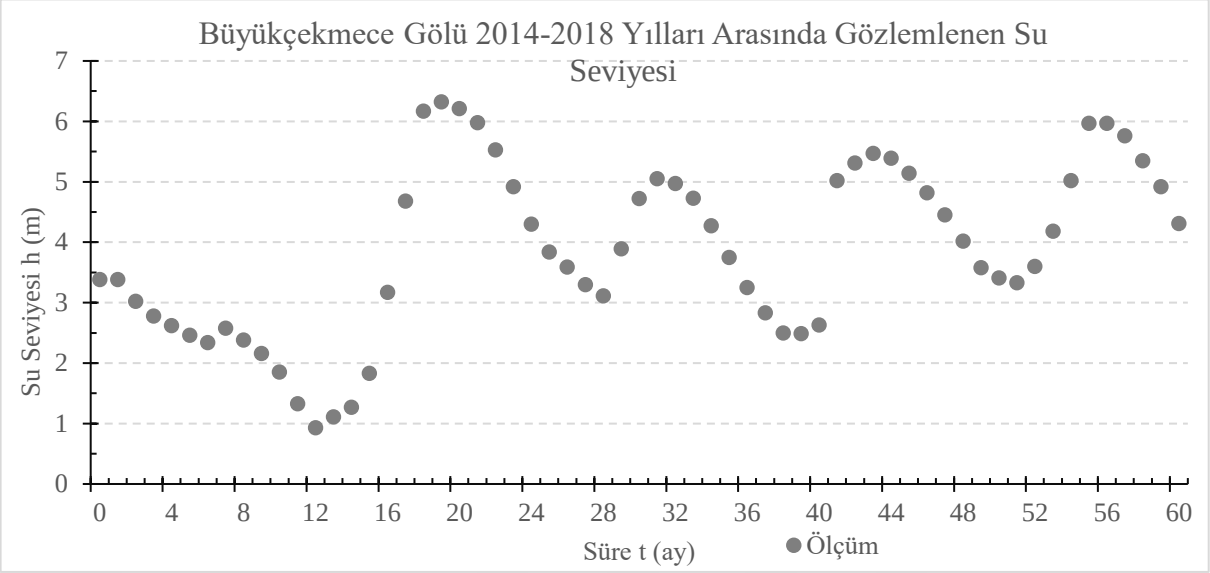
Hidrolik modelin kalibrasyonu için Tablo 4.4'de sunulmuş olan kalibrasyon aralığı dikkate alınmış ve akifere ait hidrolik iletkenlik (*K*), iletimlilik (*C*), özgül verimlilik (*Sy*) ve porozite (φ) parametrelerinin kalibrasyon sonrası değerleri 2014 yılına ait gözlemlenen statik su seviyesi verileri kullanılarak deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Daha sonra kalibre edilmiş parametre değerleri ile 2015-2018 yıllarına ait gözlemlenen statik su seiyesi verileri kullanılarak modelin verifikasyonu yapılmıştır.

Tablo 4.3: Yeraltı suyu modelinin yıllara göre başlangıç su seviyesi.

Yıl	Başlangıç hidrolik yükü *h* (m)
2014	2.00
2015	2.22
2016	2.36
2017	2.47
2018	2.47

Tablo 4.4: Sulak alan bölgesine ait hidrolik modelin kalibrasyon sonuçları.

Parametre	Kalibrasyon aralığı	Kalibrasyon değeri
Hidrolik iletkenlik *K* (m/s)	1.0E-06 - 1.0E-02	4.05E-05
İletimlilik *C* (m^2/s)	0.00004-0.4	0.00162037
Özgül verimlilik *Sy*	0.25 - 0.35	0.31
Porozite φ	0.30 - 0.50	0.45



Şekil 4.10: Büyükçekmece Gölü'ne ait Ekim 2013-Ağustos 2018 arası gözlemlenen su seviyesi. (DSİ, 2018)

4.2.1. Kalibrasyon Sonuçları

MODFLOW modelinin girdileri tamamlandıktan sonra 2014-2018 yılları arası için her yıla ait ölçülen aylık göl su seviyesi RIV paketi ile, ölçülen yıllık statik su seviyesi WELL paketi ile ve HEC-HMS hidrolojik modeli ile hesaplanan sızma miktarı ise günlük besleme miktarı olarak RCH paketi ile MODFLOW hidrolik modeline tanıtılmıştır. Oluşturulan yeraltı suyu hidrolik modelin önce 2014 yılı verileri kullanılarak kalibrasyonu tamamlanmış ve sunulmuştur.

4.2.1.1.MODFLOW Modelinin 2014 Yılına Ait Analiz Sonuçları

2014 yılı için model simülasyonu Ekim 2013'den başlatılmış ve başlangıç statik su seviyesi 2 m olarak kabul edilerek model 1 günlük zaman aralığıyla bir yıl boyunca çalıştırılmıştır.

2014 yılı için hesaplanan yeraltı su seviyesi 4 adet gözlem kuyusunun bulunduğu bölge için Şekil 4.11'de ve 4 adet gözlem kuyusunda okunan yeraltı su seviyesi ile hesaplanan su seviyesi Tablo 4.5'de sunulmuştur. Gözlemlenen su seviyeleri ile hesaplanan su seviyeleri arasındaki hata değerleri ise Tablo 4.6'da sunulmuştur. Bu tablodan görüldüğü üzere MODFLOW sonucu ile gözlemlenen yeraltı su seviyeleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Dolaysıyla MODFLOW ile yapılan hidrolik modelin kalibrasyonu doğru bir şekilde tamamlanmıştır.

Simülasyon sonuçlarına göre 4 gözlem kuyusunun olduğu yerde yer altı su seviyesi 2 m'den 2.53 m seviyesine kadar yükselmiştir ve maksimum değerine 180.günde yani Nisan ayında ulaşmıştır. 2014 yılı içinde 180. günden 244. güne kadar yani Haziran ayına kadar yeraltı su seviyesi maksimum seviyede seyretmiş olup Haziran ayından sonra yavaş yavaş düşmeye başlamıştır.

Yeraltı su seviyesi için gözlem kuyuları arasında bir karşılaştırma yapıldığında genelde benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Hezarfen ve Ahmediye bölgesi, Bahşayiş ve İzzettin bölgesine göre göle daha yakın olduğundan bu iki lokasyonda yeraltı su seviyesi daha hızlı yükselmiştir.

Şekil 4.12'de 2014 yılı simülasyonuna ait Aralık, Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos ve Eylül ayları için sulak alan bölgesindeki yeraltı su seviyesi dağılımı görülmektedir. Buna göre

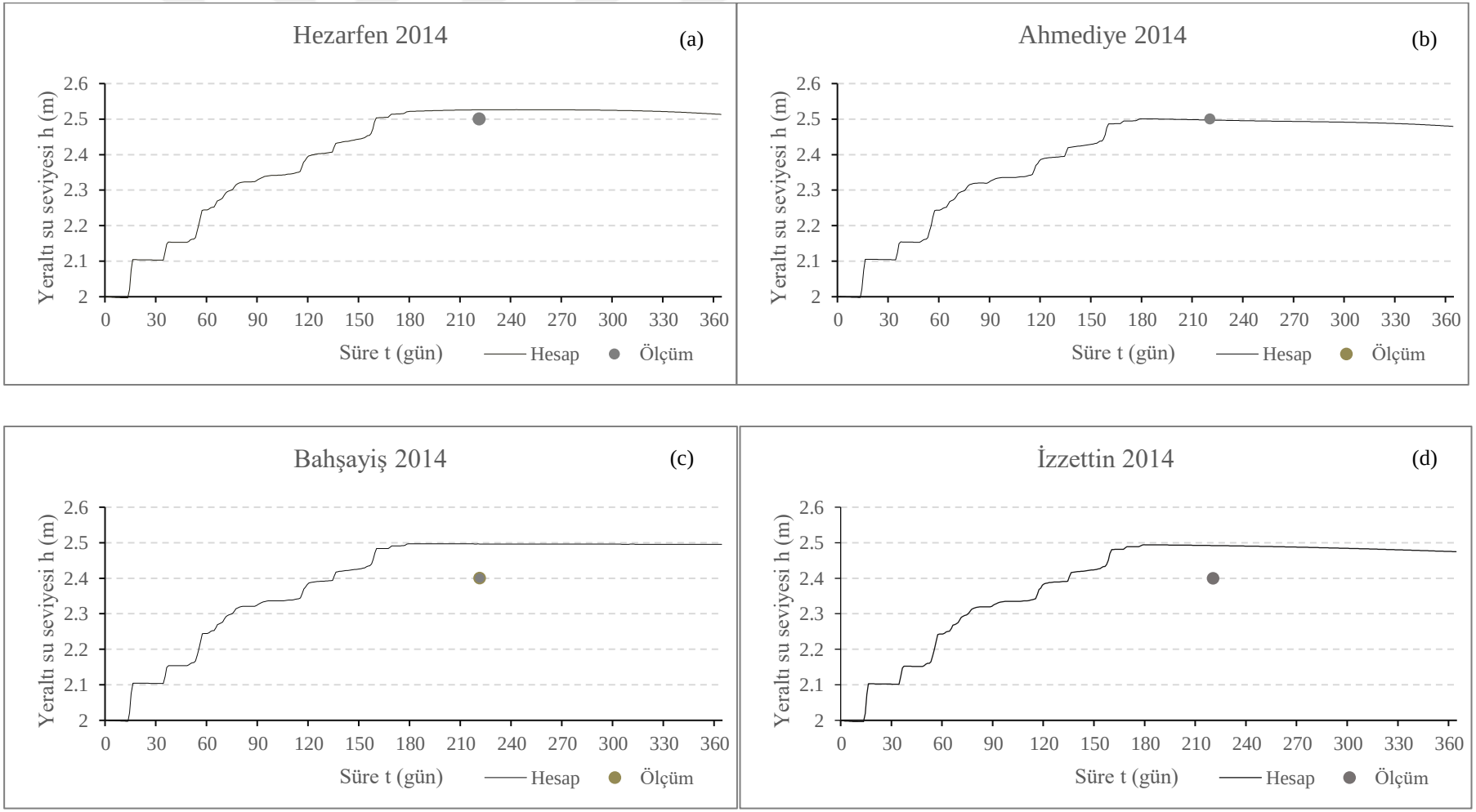
Aralık 2013 ayında göl su seviyesi yeraltı su seviyesini beslerken zaman içerisinde göl su seviyesi düşmüş ve Nisan ayından itibaren yeraltı su seviyesinin de altına düşmüş olduğundan yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimi yön değiştirmiştir. Yani Aralık 2013'de göl, sulak alan bölgesindeki yeraltı suyunu beslerken Nisan ayından itibaren yeraltı suyu gölü beslemeye başlamıştır. Bu durumda yeraltı suyu maksimum seviyesine 2.60m olarak 2014 Nisan ayında ulaşmıştır. Nisan ayından itibaren yıl sonuna kadar göl su seviyesi azalmaya devam ettiğinden yeraltı suyu da gölü beslemeye devam etmiş ve en son Eylül ayında 0.93m'ye kadar düşmüştür.

Tablo 4.5: Gözlem kuyularında hesaplanan ve ölçülen statik su seviyeleri.

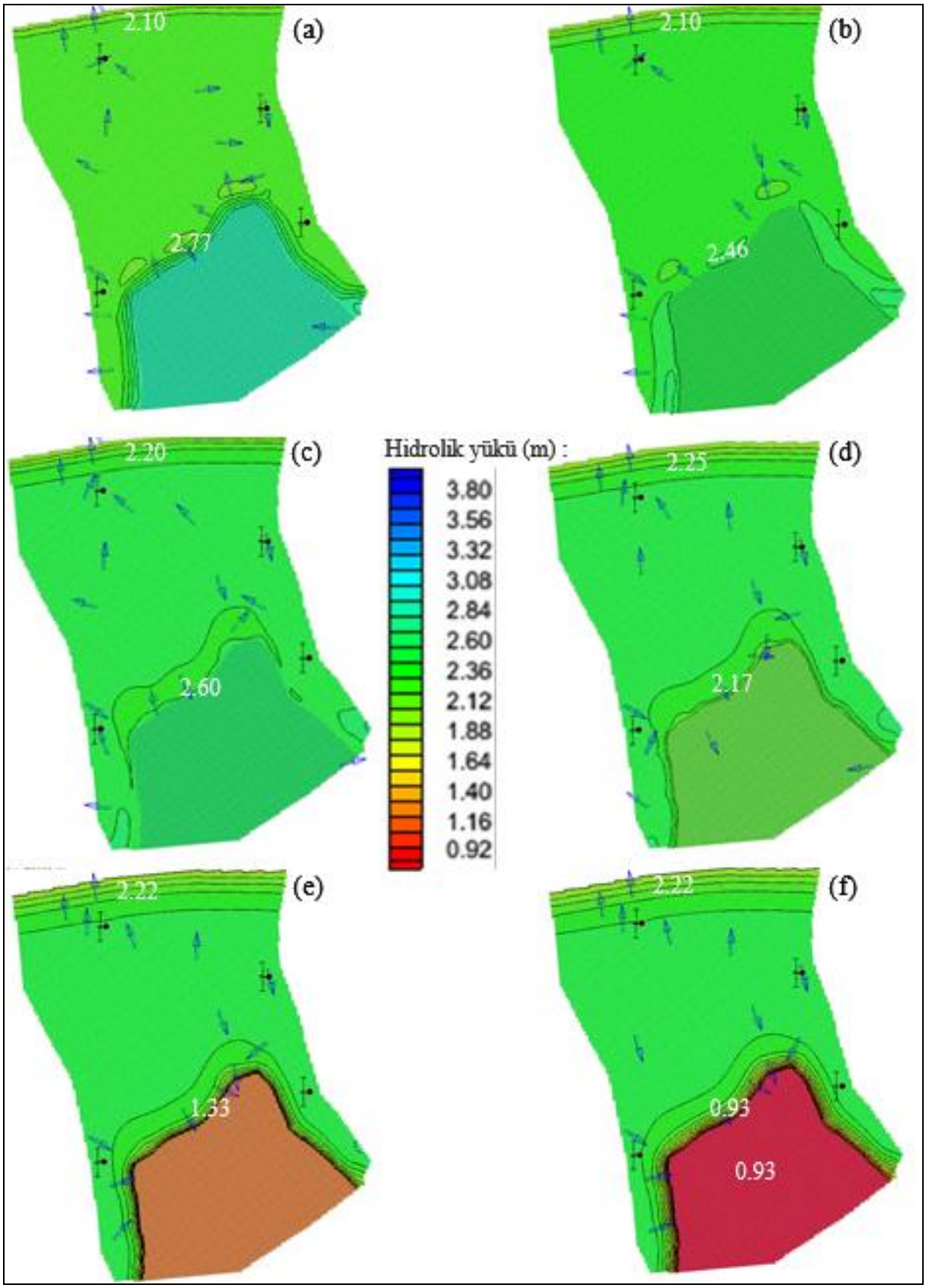
Tarih	Hezarfen		Ahmediye		Bahşayiş		İzzettin		Göl su seviyesi h (m)
	Hesap (m)	Ölçüm (m)	Hesap (m)	Ölçüm (m)	Hesap (m)	Ölçüm (m)	Hesap (m)	Ölçüm (m)	
05/10/2014	2.53	2.50	2.50	2.50	2.50	2.40	2.49	2.40	2.38
06/09/2015	2.80	3.00	2.86	3.00	2.79	2.85	2.78	2.85	5.98
04/30/2016	2.98	3.00	2.98	3.00	2.92	2.85	2.92	2.85	4.97
06/10/2017	2.57	2.50	2.62	2.55	2.46	2.40	2.46	2.40	5.14
05/10/2018	3.10	3.20	3.13	3.25	3.04	3.00	3.03	2.95	5.97

Tablo 4.6: MODFLOW analizleri 2014-2018 yılları için istatistiksel kalibrasyon ve verifikasyon değerleri

İstatistik özellikleri	Kalibrasyon	Verifikasyon			
	2014	2015	2016	2017	2018
Ortalama Artık (MR)	0.09	0.20	0.07	-0.05	0.11
Ortalama Mutlak Artık (MAR)	0.12	0.22	0.15	0.08	0.18
Karakök Ortalama Artık (RMSR)	0.21	0.32	0.25	0.17	0.29



Şekil 4.11: Gözlem kuyularında 2014 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzettin.



Şekil 4.12: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2013, (b)Şubat 2014, (c)Nisan 2014, (d)Haziran 2014, (e) Ağustos 2014, (f) Eylül 2014.

4.2.2. Verifikasyon Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında MODFLOW ile yapılan hidrolik model için kalibre edilmiş parametreler ile 2015-2018 yıllarına ait veriler kullanılarak verifikasyon analizleri yapılmıştır.

4.2.2.1.MODFLOW Modelinin 2015 Yılına Ait Analiz Sonuçları

2015 yılı için model simülasyonu Ekim 2014'den başlatılmış ve başlangıç statik su seviyesi ise bir önceki yılın Eylül ayındaki ortalama statik su seviyesi değeri olan 2.2 m olarak kabul edilerek model 1 günlük zaman aralığıyla bir yıl boyunca çalıştırılmıştır.

2015 yılı için hesaplanan yeraltı su seviyesi 4 adet gözlem kuyusunun bulunduğu bölge için Şekil 4.13'de ve 4 adet gözlem kuyusunda okunan yeraltı su seviyesi ile hesaplanan su seviyesi Tablo 4.5'de sunulmuştur. Gözlemlenen su seviyeleri ile hesaplanan su seviyeleri arasındaki hata değerleri ise Tablo 4.6'da sunulmuştur. Bu tablodan görüldüğü üzere MODFLOW sonucu ile gözlemlenen yeraltı su seviyeleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Dolaysıyla MODFLOW ile yapılan hidrolik modelin verifikasyonu doğru bir şekilde tamamlanmıştır.

Simülasyon sonuçlarına göre 4 gözlem kuyusunun olduğu yerde yer altı su seviyesi 2.2 m'den 3.16 m seviyesine kadar yükselmiştir ve maksimum değeri Bahşayiş ve İzzettin bölgesi için 102. günde yani Ocak ayında ve Ahmediye Hezarefen bölgesi için 365.günde yani Eylül ayında ulaşmıştır. 2015 yılı içinde; Bahşayiş ve İzzettin bölgesi, 167. günden 365. güne kadar yani Eylül ayına kadar yeraltı su seviyesi maksimum seviyede seyretmiş ancak Hezarfen ve Ahmediye bölgesi Eylül ayına kadar bir yükseliş içinde olup daha sonra yavaş yavaş düşmeye başlamıştır.

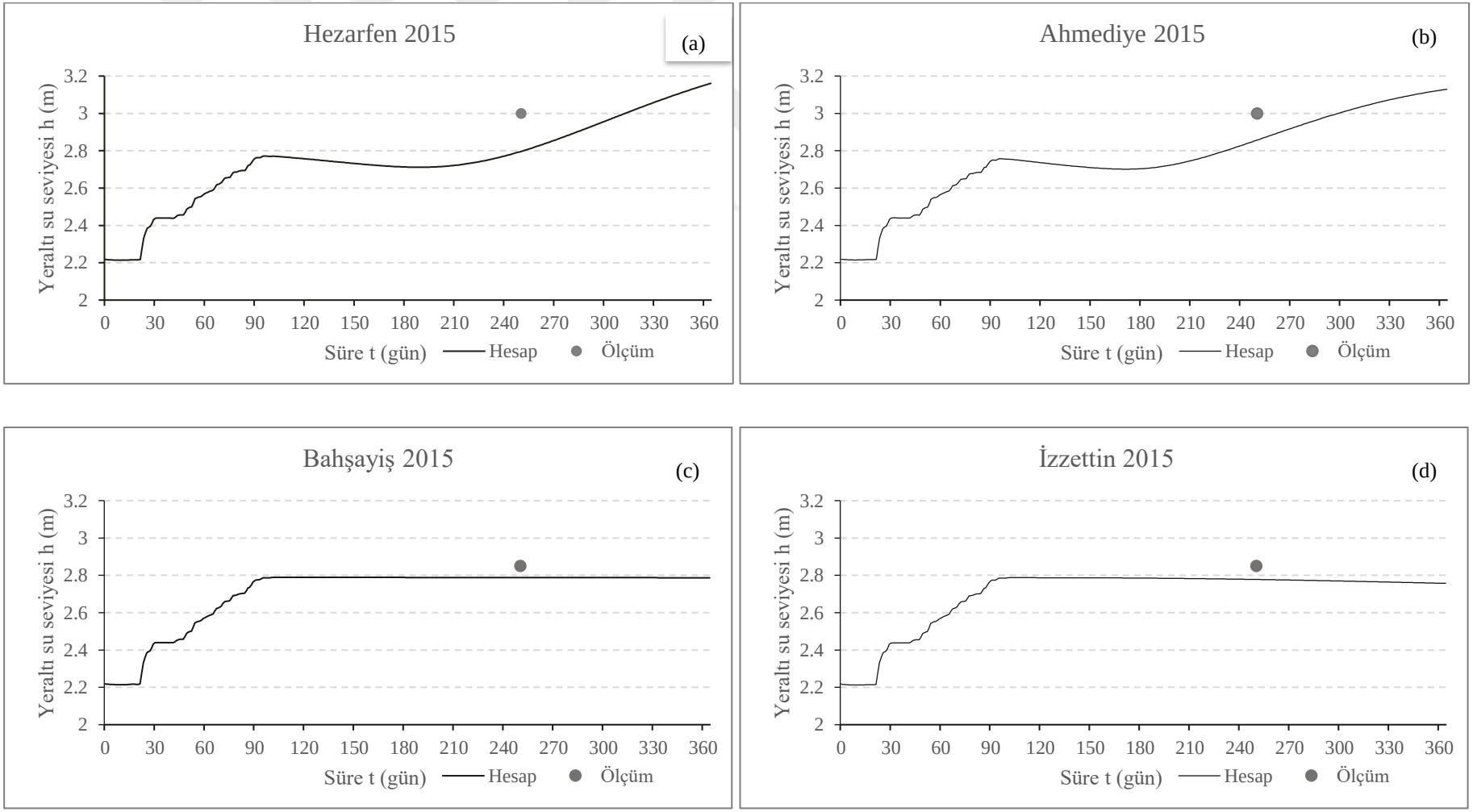
Yeraltı su seviyesi için gözlem kuyuları arasında bir karşılaştırma yapıldığında genelde benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Hezarfen ve Ahmediye bölgesi, Bahşayiş ve İzzettin bölgesine göre göle daha yakın olduğundan bu iki lokasyonda yeraltı su seviyesi daha hızlı yükselmiştir.

Şekil 4.14'de 2015 yılı simülasyonuna ait Aralık, Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos ve Eylül ayları için sulak alan bölgesindeki yeraltı su seviyesi dağılımı görülmektedir. Buna göre Aralık 2014 ayında yeraltı su seviyesi göl su seviyesini beslerken zaman içerisinde göl su

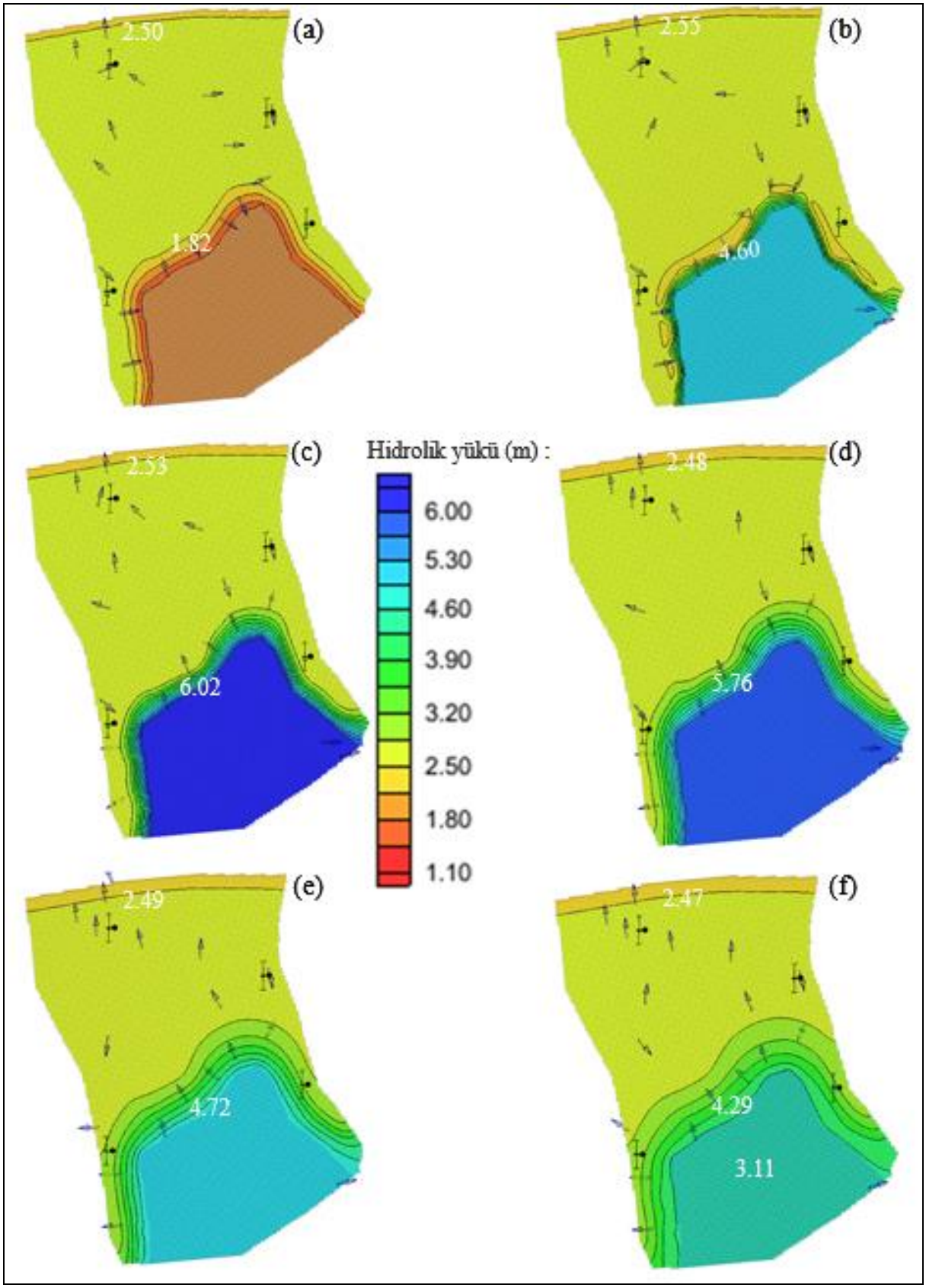
seviyesi yükselmiş ve Şubat ayından itibaren yeraltı su seviyesinin de üzerine çıkmış olduğundan yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimi yön değiştirmiştir. Yani Aralık 2014'te sulak alan bölgesindeki yeraltı suyu gölü beslerken Şubat ayından itibaren Eylül ayına kadar göl suyu yeraltı suyunu beslemiş ve Eylül ayından itibaren yıl sonuna kadar tekrar yeraltı suyu gölü beslemeye başlamıştır.

Bu durumda yeraltı suyu maksimum seviyesine 3.16 m olarak 2015 Eylül ayında ulaşmıştır. Eylül ayından itibaren yıl sonuna kadar göl su seviyesi azalmaya devam ettiğinden ve yeraltı su seviyesinin de altına düştüğünden dolayı yeraltı suyu göl suyunu beslemeye başlamış ve en son Eylül ayının sonunda 3.11m'ye kadar düşmüştür.

2015 yılı yağışlı bir dönem olup göl su seviyesi 2014 yılına göre daha hızlı yükselmiştir. Şekil 4.14'den görüldüğü üzere Nisan ayında 6.32 m'ye kadar yükselmiş ve göl suyu yeraltı suyunu besleyerek Ahmediye ve Hezarfen bölgesinde yeraltı su seviyesi 3.16m'ye kadar ulaşmıştır. Buna göre 2015 yılına ait su seviyesi eğrilerinin daha sık ve etkileşim debisinin 2014 yılına göre daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 4.13 : Gözlem kuyularında 2015 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzettin.



Şekil 4.14: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2014, (b)Şubat 2015, (c)Nisan 2015, (d)Haziran 2015, (e) Ağustos 2015, (f) Eylül 2015.

4.2.2.2.MODFLOW Modelinin 2016 Yılına Ait Analiz Sonuçları

2016 yılı için model simülasyonu Ekim 2015'den başlatılmış ve başlangıç statik su seviyesi ise bir önceki yılın Eylül ayındaki ortalama statik su seviyesi değeri olan 2.36 m olarak kabul edilerek model 1 günlük zaman aralığıyla bir yıl boyunca çalıştırılmıştır.

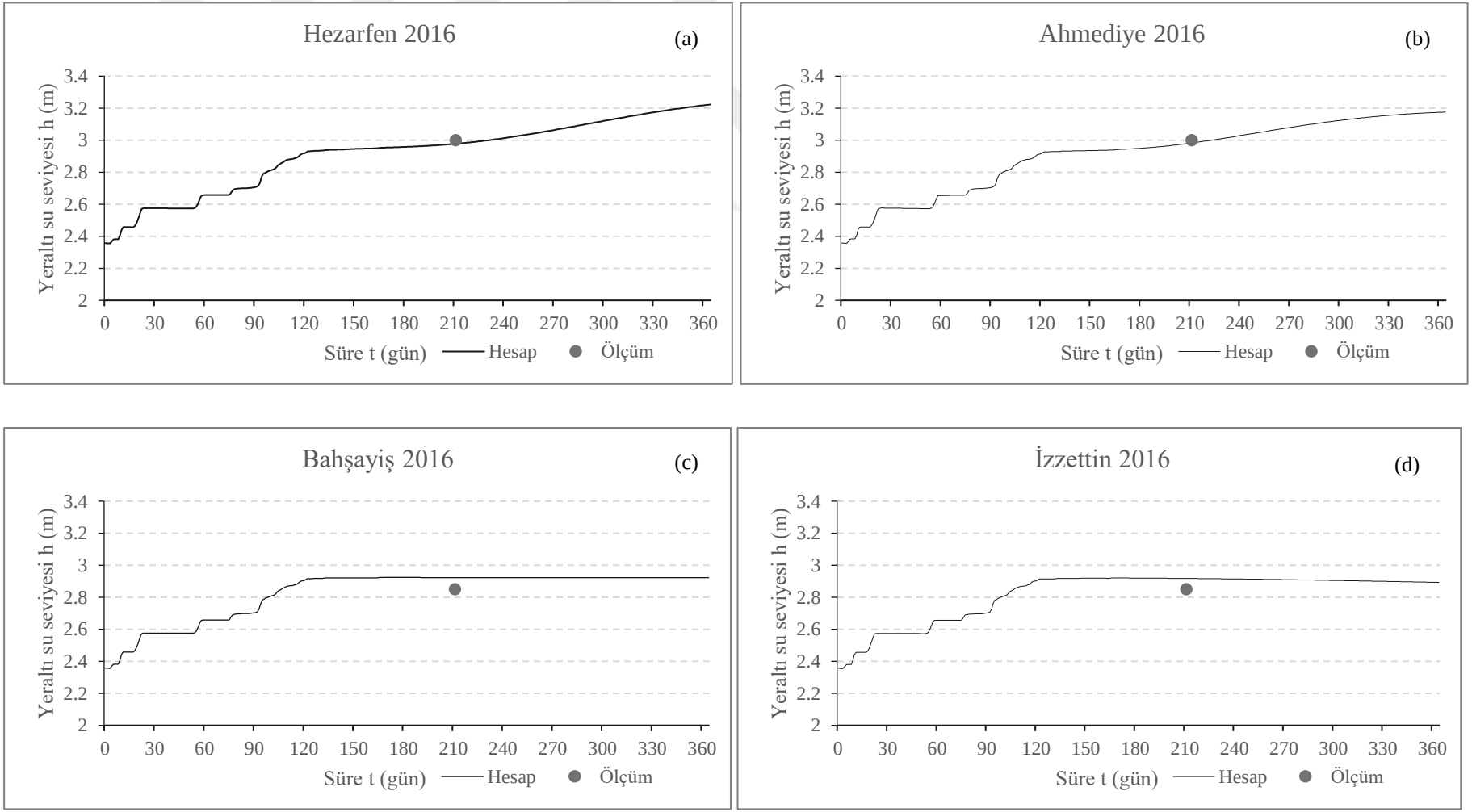
2016 yılı için hesaplanan yeraltı su seviyesi 4 adet gözlem kuyusunun bulunduğu bölge için Şekil 4.15'de ve 4 adet gözlem kuyusunda okunan yeraltı su seviyesi ile hesaplanan su seviyesi Tablo 4.5'de sunulmuştur. Gözlemlenen su seviyeleri ile hesaplanan su seviyeleri arasındaki hata değerleri ise Tablo 4.6'da sunulmuştur. Bu tablodan görüldüğü üzere MODFLOW sonucu ile gözlemlenen yeraltı su seviyeleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Dolaysıyla MODFLOW ile yapılan hidrolik modelin verifikasyonu doğru bir şekilde tamamlanmıştır.

Simülasyon sonuçlarına göre 4 gözlem kuyusunun olduğu yerde yer altı su seviyesi 2.36 m'den 3.22 m seviyesine kadar yükselmiştir ve maksimum değeri Bahşayiş ve İzzettin bölgesi için 167. günde yani Mart ayında ve Ahmediye Hezarefen bölgesi için 365. günde yani Eylül ayında ulaşmıştır. 2016 yılı içinde; Bahşayiş ve İzzettin bölgesi, 167. günden 213. güne kadar yani Mayıs ayına kadar yeraltı su seviyesi maksimum seviyede seyretmiş ve daha sonra yavaş yavaş düşmeye başlamış ancak Hezarfen ve Ahmediye bölgesi Eylül ayına kadar bir yükseliş içinde olup sonra yavaş yavaş düşmeye başlamıştır.

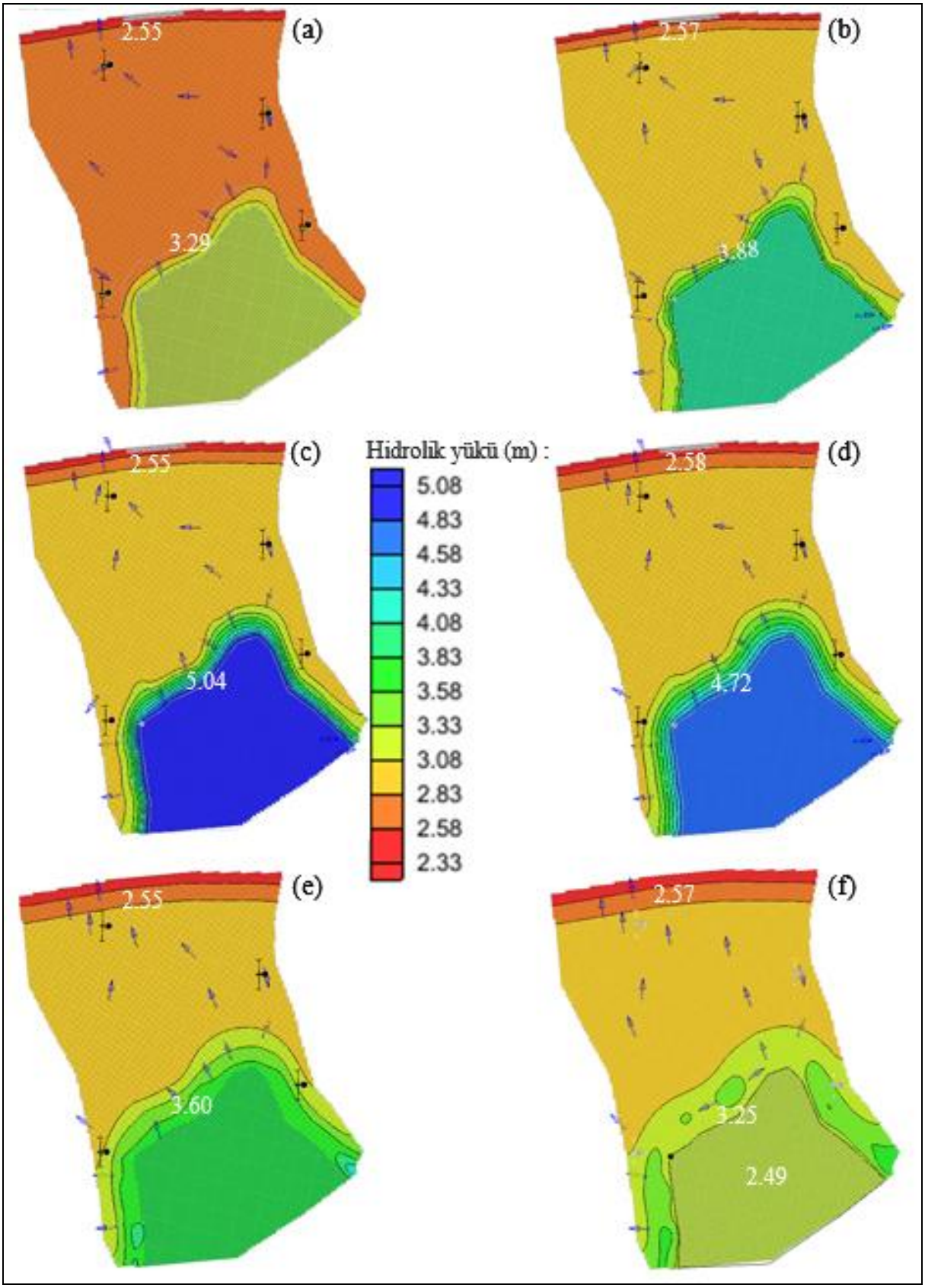
Yeraltı su seviyesi için gözlem kuyuları arasında bir karşılaştırma yapıldığında genelde benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Hezarfen ve Ahmediye bölgesi, Bahşayiş ve İzzettin bölgesine göre göle daha yakın olduğundan bu iki lokasyonda yeraltı su seviyesi daha hızlı yükselmiştir.

Şekil 4.16'da 2016 yılı simülasyonuna ait Aralık, Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos ve Eylül ayları için sulak alan bölgesindeki yeraltı su seviyesi dağılımı görülmektedir. Buna göre Aralık 2015 ayında yeraltı suyu göl suyunu beslerken zaman içerisinde göl su seviyesi yükselmiş ve Şubat ayından itibaren yeraltı su seviyesinin de üzerine çıkmış olduğundan yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimi yön değiştirmiştir. Yani Aralık 2015'te sulak alan bölgesindeki yeraltı suyu gölü beslerken Şubat ayından itibaren Eylül ayına kadar göl suyu yeraltı suyunu beslemiş ve Eylül ayından itibaren yıl sonuna kadar tekrar yeraltı suyu gölü beslemeye başlamıştır.

Bu durumda yeraltı suyu maksimum seviyesine 3.22 m olarak 2016 Eylül ayında ulaşmıştır. Eylül ayından itibaren yıl sonuna kadar göl su seviyesi azalmaya devam ettiğinden ve yeraltı su seviyesinin de altına düştüğünden dolayı yeraltı su seviyesi göl su seviyesini beslemeye başlamış ve en son Eylül ayının sonunda 2.49m'ye kadar düşmüştür. Buna göre 2016 yılı simülasyonu, 2015 yılı simülasyonu ile karşılaştırınca, ortalama yağış değerleri düştüğü için su sevilyeleri ortalama 0,80m daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.15: Gözlem kuyularında 2016 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzetti



Şekil 4.16: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2015, (b)Şubat 2016, (c)Nisan 2016, (d)Haziran 2016, (e) Ağustos 2016, (f) Eylül 2016.

4.2.2.3.MODFLOW Modelinin 2017 Yılına Ait Analiz Sonuçları

2017 yılı için model simülasyonu Ekim 2016'den başlatılmış ve başlangıç statik su seviyesi ise bir önceki yılın Eylül ayındaki ortalama statik su seviyesi değeri olan 2.47 m olarak kabul edilerek model 1 günlük zaman aralığıyla bir yıl boyunca çalıştırılmıştır.

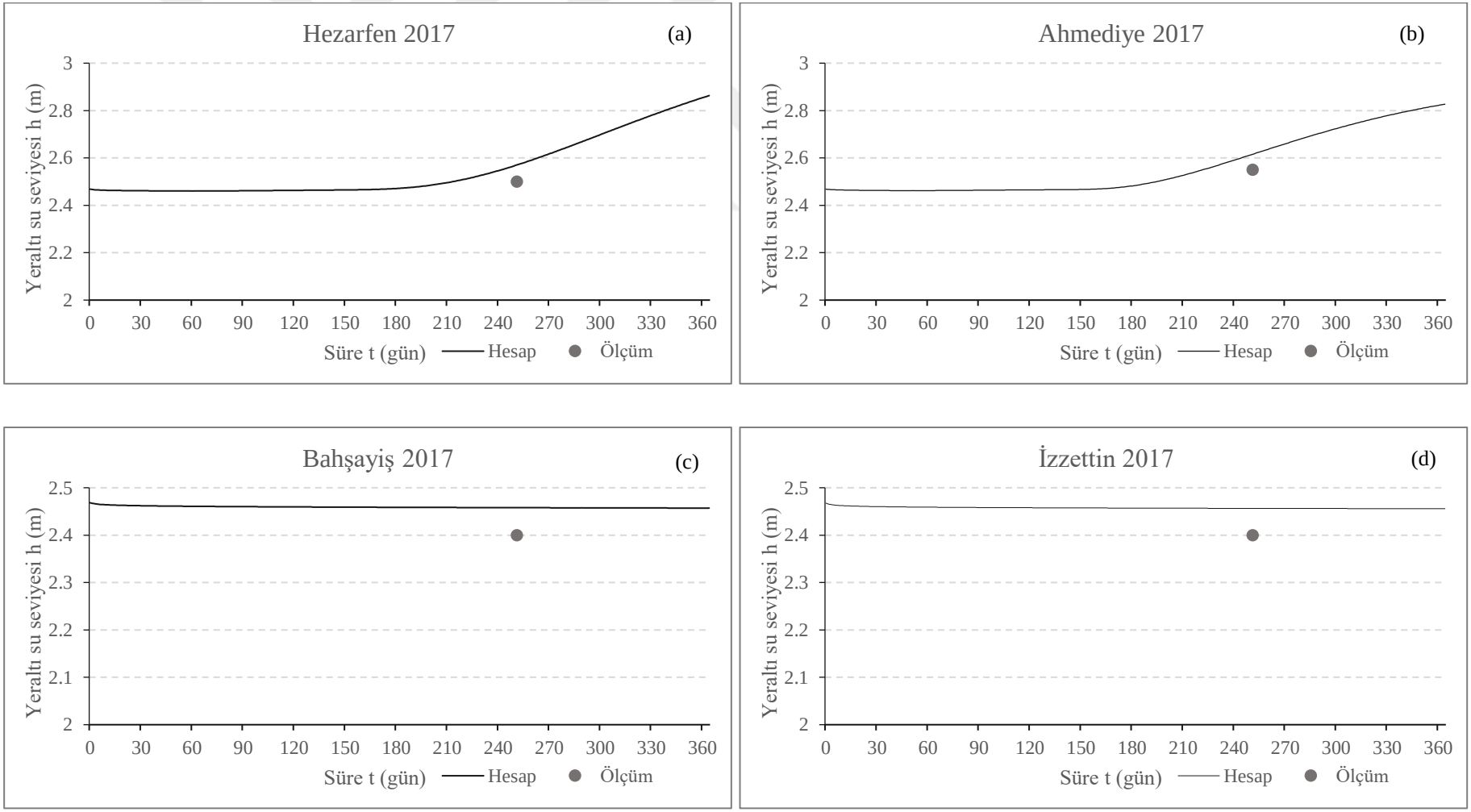
2017 yılı için hesaplanan yeraltı su seviyesi 4 adet gözlem kuyusunun bulunduğu bölge için Şekil 4.17'de ve 4 adet gözlem kuyusunda okunan yeraltı su seviyesi ile hesaplanan su seviyesi Tablo 4.5'de sunulmuştur. Gözlemlenen su seviyeleri ile hesaplanan su seviyeleri arasındaki hata değerleri ise Tablo 4.6'da sunulmuştur. Bu tablodan görüldüğü üzere MODFLOW sonucu ile gözlemlenen yeraltı su seviyeleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Dolayısıyla MODFLOW ile yapılan hidrolik modelin verifikasyonu doğru bir şekilde tamamlanmıştır.

Yeraltı su seviyesi için gözlem kuyuları arasında bir karşılaştırma yapıldığında genelde benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Hezarfen ve Ahmediye bölgesi, Bahşayiş ve İzzettin bölgesine göre göle daha yakın olduğundan bu iki lokasyonda yeraltı su seviyesi daha hızlı yükselmiştir.

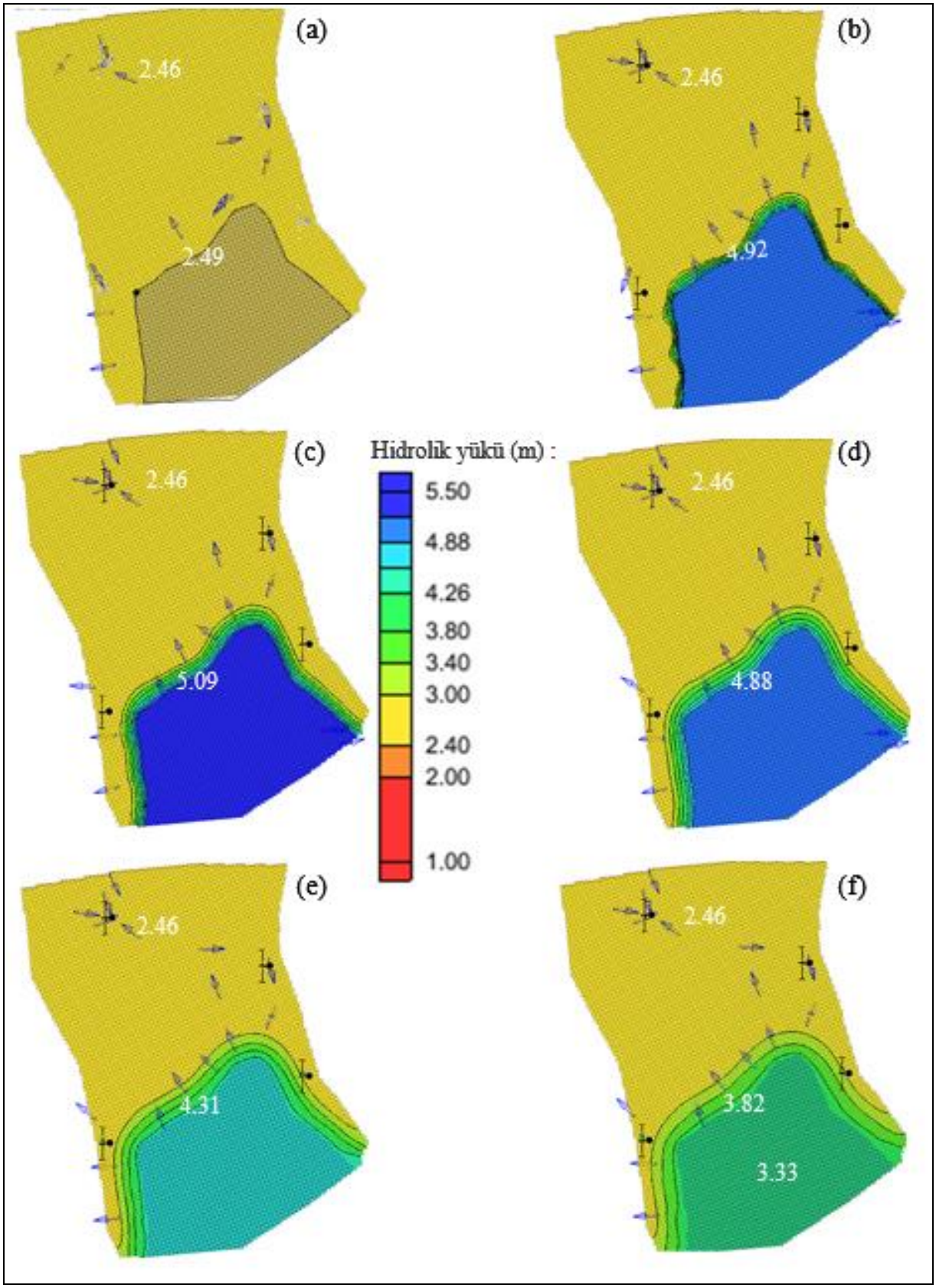
Simülasyon sonuçlarına göre 4 gözlem kuyusunun olduğu yerde yer altı su seviyesi 2.36 m'den 2.87 m seviyesine kadar yükselmiştir ve maksimum değeri yıl sonuna kadar göl yeraltı su seviyesini beslediği için her iki bölgede Eylül ayında ulaşılmıştır.

Şekil 4.18'de 2017 yılı simülasyonuna ait Aralık, Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos ve Eylül ayları için sulak alan bölgesindeki yeraltı su seviyesi dağılımı görülmektedir. Buna göre Aralık 2016 ayında göl su seviyesi yeraltı su seviyesinden daha yüksek seviyelere ulaşmıştır.

Bu durumda yeraltı suyu maksimum seviyesine 2.86 m olarak 2017 Eylül ayında ulaşmıştır. Yıl boyunca göl su seviyesi yeraltı su seviyesinden daha yüksek olduğu için beslemye devam etmiştir. 2017 yılı bir önceki yıla göre nisbeten yağışlı bir dönem olup göl su seviyesi daha hızlı yükselmiştir. Buna göre su seviyesi eğrilerine bakarak 2017 yılında göl-yeraltı seviyenin etkileşim debisinin 2016 yılına göre daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 4.17: Gözlem kuyularında 2017 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzettin.



Şekil 4.18: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2016, (b)Şubat 2017, (c)Nisan 2017, (d)Haziran 2017, (e) Ağustos 2017, (f) Eylül 2017.

4.2.2.4.MODFLOW Modelinin 2018 Yılına Ait Analiz Sonuçları

2018 yılı için model simülasyonu Ekim 2017'den başlatılmış ve başlangıç statik su seviyesi ise bir önceki yılın Eylül ayındaki ortalama statik su seviyesi değeri olan 2.47 m olarak kabul edilerek model 1 günlük zaman aralığıyla bir yıl boyunca çalıştırılmıştır.

2018 yılı için hesaplanan yeraltı su seviyesi 4 adet gözlem kuyusunun bulunduğu bölge için Şekil 4.19'de ve 4 adet gözlem kuyusunda okunan yeraltı su seviyesi ile hesaplanan su seviyesi Tablo 4.5'de sunulmuştur. Gözlemlenen su seviyeleri ile hesaplanan su seviyeleri arasındaki hata değerleri ise Tablo 4.6'da sunulmuştur. Bu tablodan görüldüğü üzere MODFLOW sonucu ile gözlemlenen yeraltı su seviyeleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Dolaysıyla MODFLOW ile yapılan hidrolik modelin verifikasyonu doğru bir şekilde tamamlanmıştır.

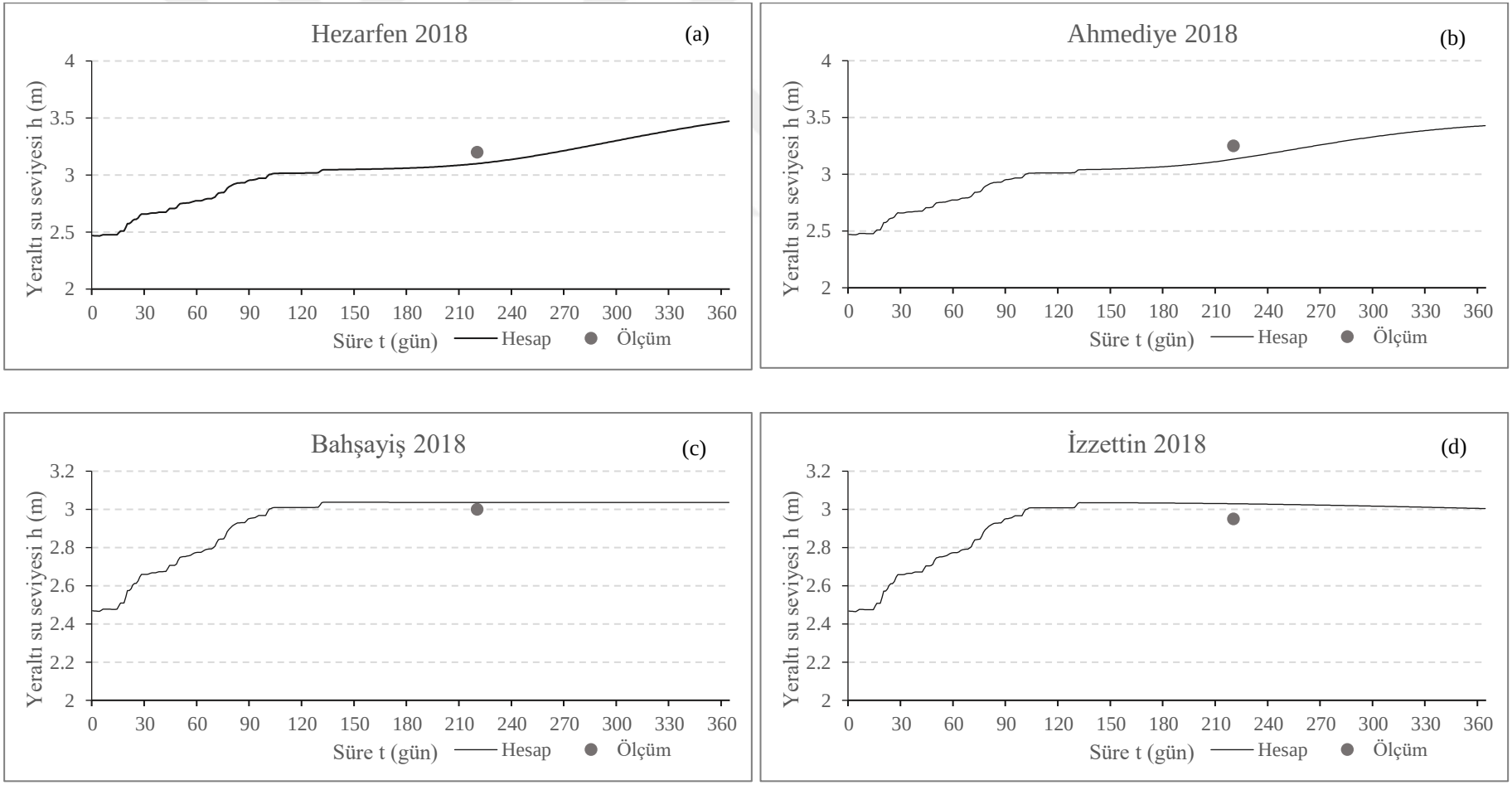
Yeraltı su seviyesi için gözlem kuyuları arasında bir karşılaştırma yapıldığında genelde benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Hezarfen ve Ahmediye bölgesi, Bahşayiş ve İzzettin bölgesine göre göle daha yakın olduğundan bu iki lokasyonda yeraltı su seviyesi daha hızlı yükselmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre 4 gözlem kuyusunun olduğu yerde yer altı su seviyesi 2.46 m'den 3.47 m seviyesine kadar yükselmiştir ve maksimum değeri Bahşayiş ve İzzettin bölgesi için 147. günde yani Şubat ayında ve Ahmediye Hezarefen bölgesi için 365. günde yani Eylül ayında ulaşmıştır. 2016 yılı içinde; Bahşayiş ve İzzettin bölgesi, 147. günden yıl sonunua kadar yeraltı su seviyesi maksimum seviyede seyretmiş ancak Hezarfen ve Ahmediye bölgesi göl su seviyesi daha yüksek olduğu için Eylül ayına kadar bir yükseliş içindedir.

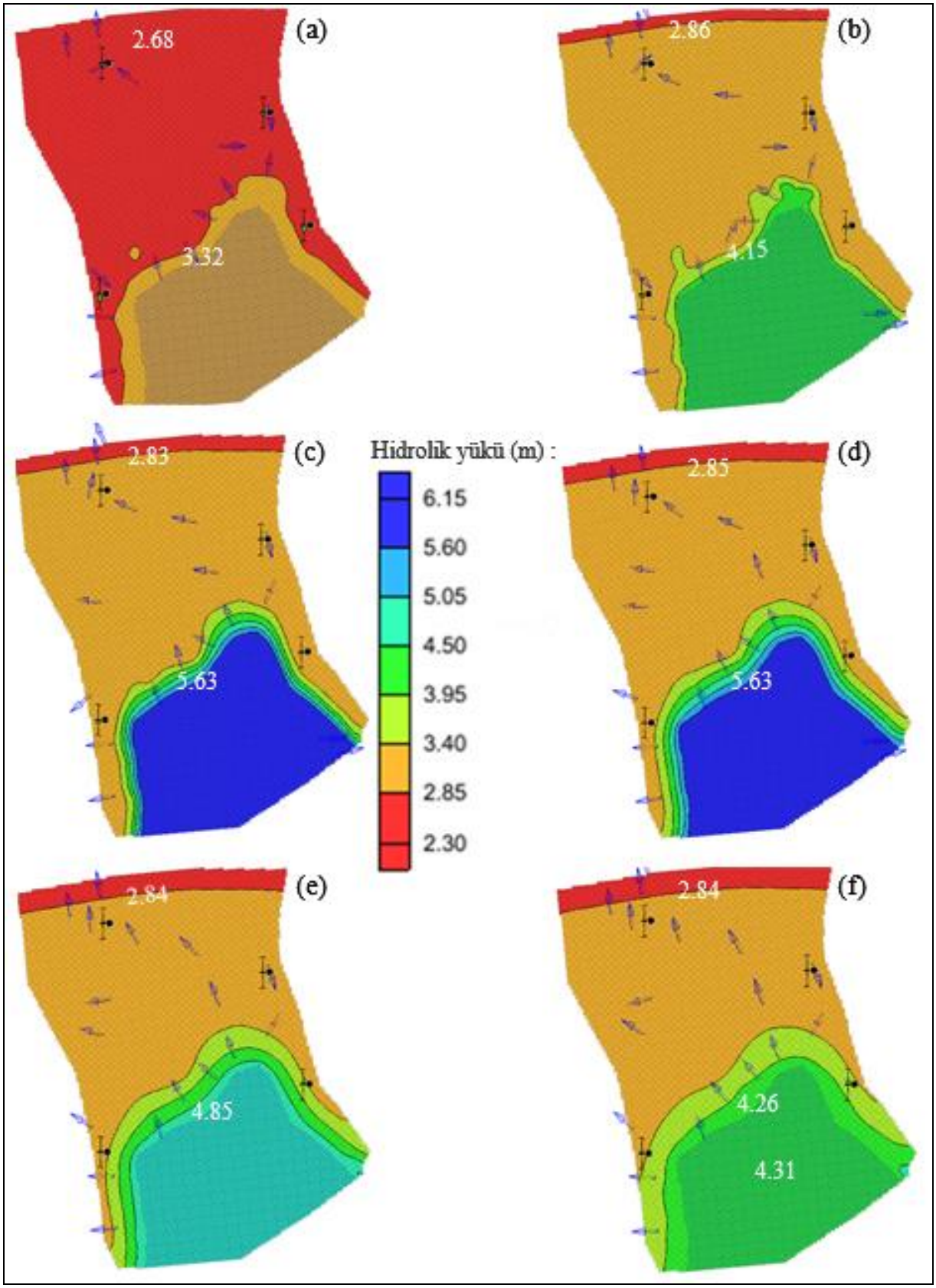
Tüm gözlem kuyularında su seviyesi Ocak ayında 2.46m değerine ulaşmaktadır; ancak Ocak ayından sonra gözlem kuyuları arasında bir farklılık gözlenmektedir. İzzettin ve Bahşayiş kuyularında su seviyesi uzunca bir süre maksimum değerinde devam etmekte, diğer yandan göle yakın olan Hezarfen ve Ahmediye gözlem kuyularında ise su seviyesi yükselmeye devam etmektedir. 2018 yılı yağışlı bir dönem olup göl su seviyesi 2017 yılına göre daha hızlı yükselmiş ve 5.97 m'ler seviyesine çıkmış olup bunun karşılık Hezarfen ve Ahmediye istasyonlarında da yeraltı su seviyesinin bir önceki yıla göre daha fazla yükseldiği ve 3.47m'lere ulaştığı gözlenmiştir. Dolaysıyla 2018 yılının çok verimli bir yıl olduğu ve yeraltı suyu kaynaklarımızın beslendiği sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.20’de 2018 yılı simülasyonuna ait Aralık, Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos ve Eylül ayları için sulak alan bölgesindeki yeraltı su seviyesi dağılımı görülmektedir. Buna göre Aralık 2017 ayında göl su seviyesi yeraltı su seviyesinden daha yüksek olup yıl sonuna kadar yeraltı suyunu beslemeye devam etmiştir.

Bu durumda yeraltı suyu maksimum seviyesine 2.76 m olarak 2017 Eylül ayında ulaşmıştır. Yıl boyunca göl su seviyesi yeraltı su seviyesinden daha yüksek olduğu için yeraltı suyunu beslemeye devam etmiştir. 2018 yılı bir önceki yıllara göre yağışlı bir dönem olduğu için göl su seviyesi daha hızlı yükselmiştir. Buna göre su seviyesi eğrilerine bakarak 2018 yılında göl-yeraltı suyu etkileşim debisinin diğer yıllara kıyasla daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 4.19: Gözlem kuyularında 2018 yılına ait yer altı su seviyesi değişimi (a) Hezarfen, (b) Ahmediye, (c) Bahşayiş, (d) İzzetti



Şekil 4.20: Sulak alan bölgesi için YASS değişimi: (a) Aralık 2017, (b)Şubat 2018, (c)Nisan 2018, (d)Haziran 2018, (e) Ağustos 2018, (f) Eylül 2018.

4.3. TAŞKIN SENARYOSU

Tezin bu aşamasında Büyükçekmece Havzası ve sulak alan bölgesi için taşkın senaryosu analizleri yapılmıştır. Bunun için önce HEC-HMS ile yapılmış hidrolojik modelle MGM tarafından Florya istasyonu'nda ölçülmüş yağış verileri kullanılarak elde edilmiş 100 yıllık yağış serisi ile 24 saatlik simülasyon yapılmıştır. Simülasyon sonucunda Büyükçekmece Havzası çıkışı için taşkın hidrografı (Şekil 4.21) ve sulak alan bölgesinin bulunduğu alt havza için sızma mikarı elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen sızma MODFLOW ile yapılmış hidrolik modelde besleme değeri olarak kullanılarak yeraltı su seviyesindeki değişim incelenmiştir.

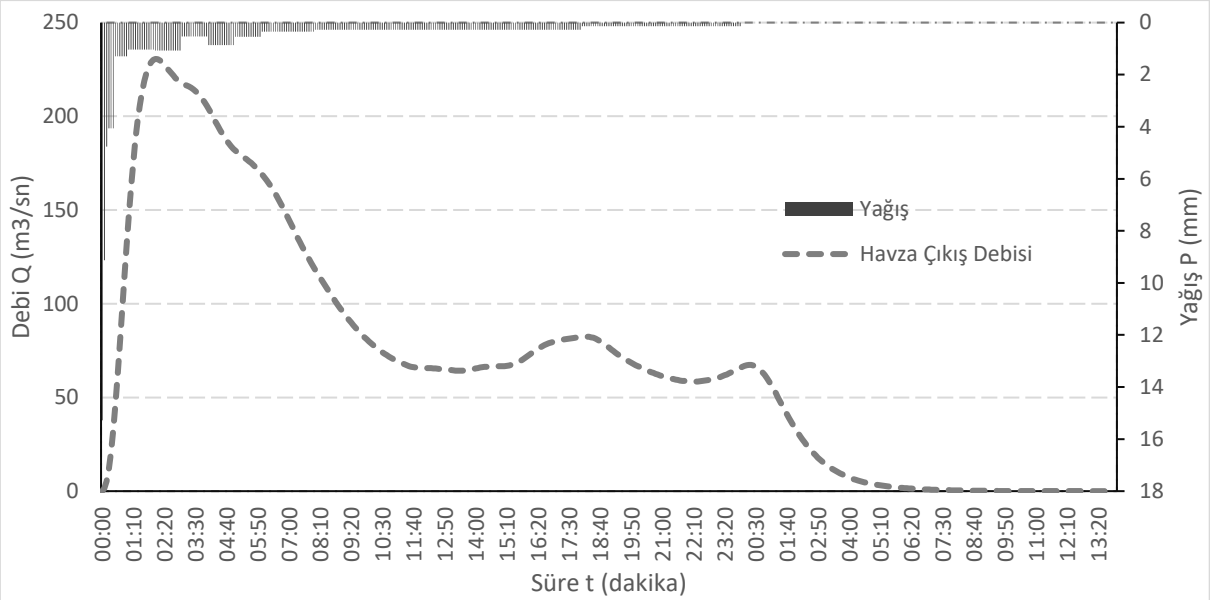
HEC-HMS ile yapılmış hidrolojik model simülasyon sonucuna göre taşkın hidrografı pik debisi 230.59 m^3/s olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.21). 24 saatlik analiz sonucunda sulak alanda oluşan toplam sızma miktarı ise 131 mm olarak elde edilmiştir. Şekil 4.22'de görüldüğü üzere sızma miktarı ilk iki saat içerisinde 10 mm olarak maksimum değerini almış; zaman ilerledikçe düşmeye devam ederek 13. saatten sonra yaklaşık 1 mm olarak minimum değere ulaşmış ve 24. saat sonuna kadar bu değerle devam etmiştir.

Hidrolojik model ile elde edilen sızma miktarı MODFLOW ile yapılmış hidrolik modele besleme değeri olarak tanımlanmıştır. Modele göl su seviyesi 2014-2018 arasındaki en yüksek göl su seviyesi olan 6.32 m ve başlangıç yeraltı suyu seviyesi ise 2018 yılına ait simülasyon sonucu ulaşılmış olan 3.1 m olarak tanımlanmıştır. Model 24 saat boyunca 1 saatlik zaman aralığıyla çalıştırılmıştır.

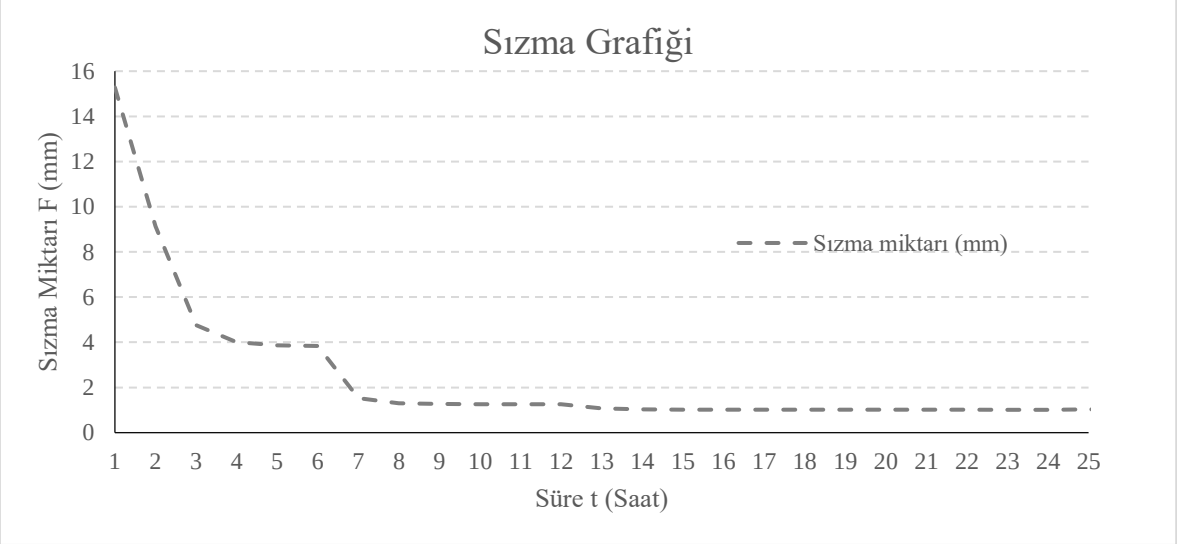
Taşkın senaryosu sonucu bölgeyi temsil edecek şekilde 4 gözlem kuyusunun bulunduğu yere ait yeraltı su seviyesi grafikleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere 4 lokasyonda da yeraltı su seviyesi başlangıç değeri olan 3.10m'den başlayarak sürekli yükselmiş olup 24. saatin sonunda 5.41m seviyelerine kadar çıkmıştır. 100 yıllık yağış çok şiddetli olduğu için göle yakın olan piyezometrelerle gölden uzakta olan piyezometreler arasında büyük bir fark gözlenmeden tüm piyezometrelerin seviyeleri hızlı bir şekilde yükselmiştir.

Şekil 4.24'de simülasyon boyunca 1., 4., 9., 14., 19. ve 24. saatler için bölgedeki yeraltı su seviyesi dağılımı görülmektedir. Buna göre 1. saatten itibaren 24. saate kadar hem göl su seviyesi hem yeraltı su seviyesi yükselmiştir. 1. saat sonunda göl su seviyesi 9.34m'ye yani

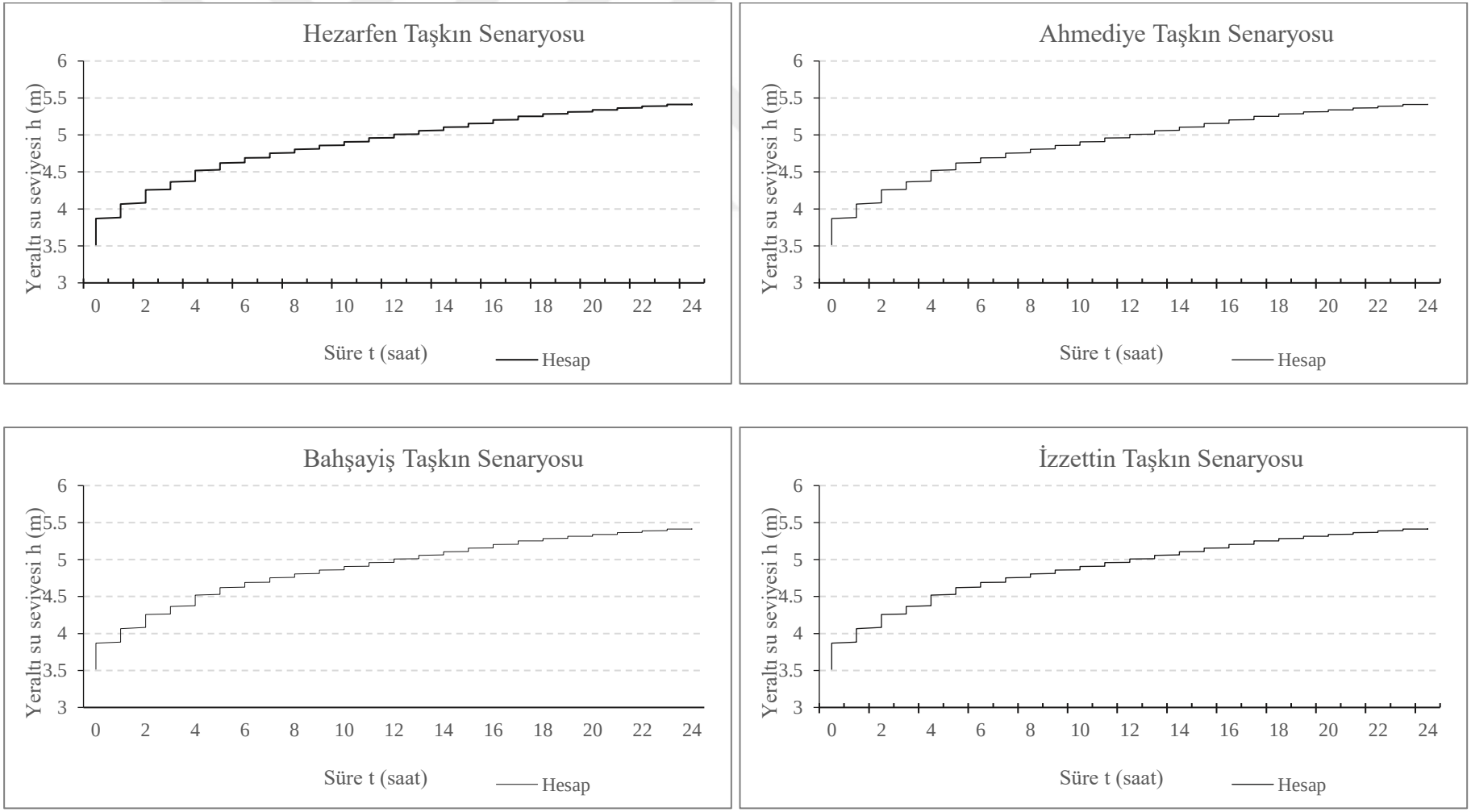
maksimum değere ulaşmış ve daha sonra göl su seviyesi düşüşe geçmesine rağmen göl su seviyesi yeraltı su seviyesinin üzerinde kaldığından göl yeraltı suyunu beslemiş ve hatta bölgenin topoğrafik yapısından dolayı sulak alan sular altında kalmıştır.



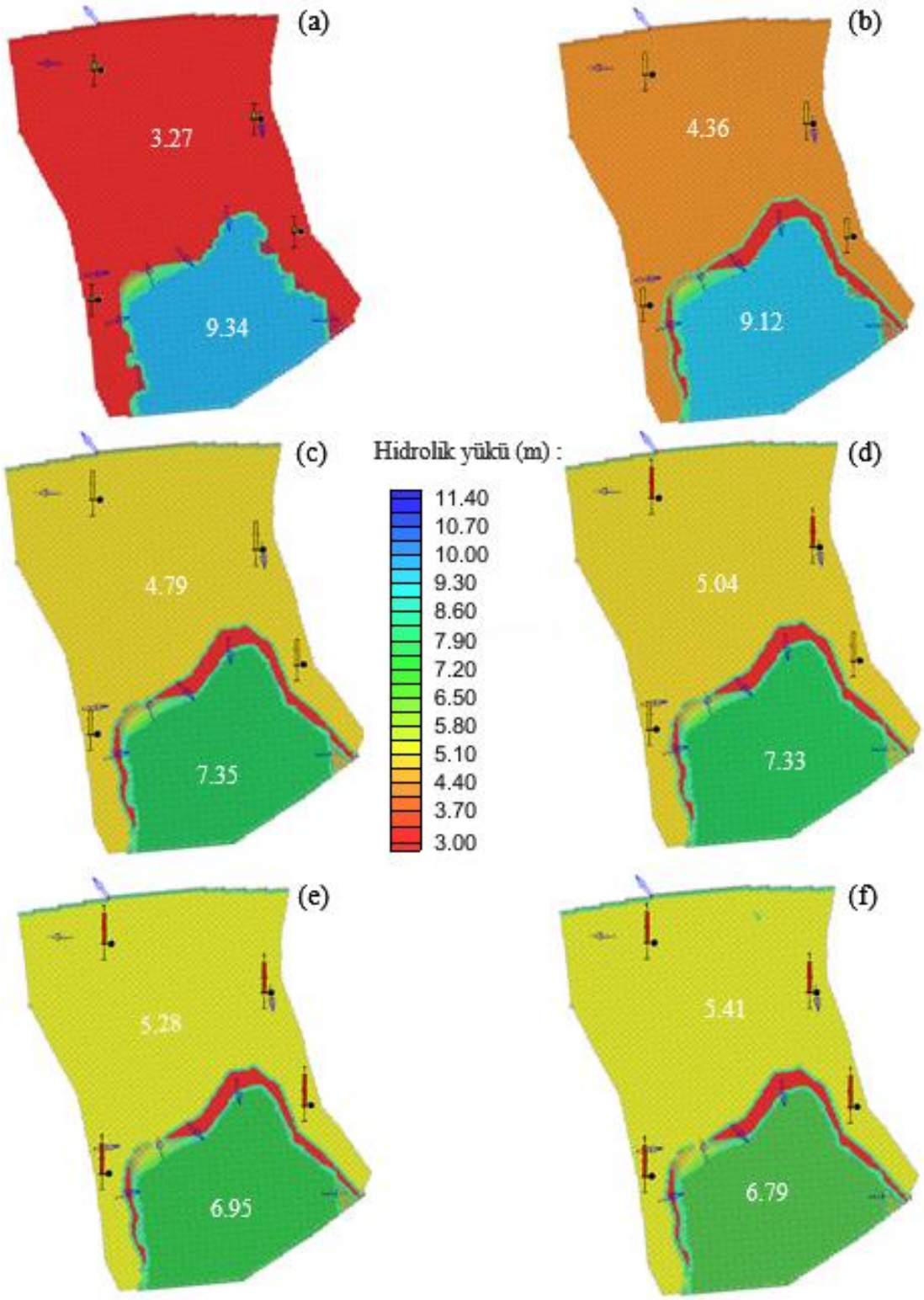
Şekil 4.21:100 yıllık yağış sırasında Büyükçekmece Göl Havzası çkış debisi.



Şekil 4.22:100 yıllık yağış sonucu sulak alanda oluşan sızma miktarı.



Şekil 4.23: Gözlem kuyuların 100 yıllık yağıştaki durumu.



Şekil 4.24: Sulak alan bölgesi için 100 yıllık yağıştan oluşan YASS değişimi: (a) 1.saat, (b)4.saat, (c) 9.saat, (d) 12.saat, (e) 19.saat, (f) 24.saat.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

- Bu çalışma kapsamında Büyükçekmece Havzası için yüzey suyu ve yer altı suyu hidrolojik ve hidrolik modellemesi yapılmıştır.
- Büyükçekmece Havzası hidrolojik modeli için HEC-HMS programı kullanarak 2014-2018 yıllar arası yağış-akış analizleri SCS yöntemi ile yapılmıştır ve daha sonra bu yıllara ait hidrograflar elde edilmiştir.
- HEC-HMS programında elde edilen yüzeysel akış sonuçlarına göre, pik debilerin maksimum değerleri 2015 yılında ve minimum değeri ise 2014 yılında gözlemlenmiştir.
- Hidrolojik modellemelerde, Eğri numarası (CN) gibi bazı parametrelerin hassasiyeti günlük analizler ile aylık analizler arasında farklılık göstermekterdir (Singh ve Jha, 2021). Dolaysıyla HEC-HMS programı ile yapılmış olan analizlerde NSE değerlerinin düşük çıkmasının bir nedeni, uzun yıllara ait günlük verilerin kullanılmasından kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir.
- Büyükçekmece Havzası'nda yer alan sulak alan yeraltı suyu hidrolik modeli için MODFLOW programı kullanılmıştır. MODFLOW modelinin en önemli girdilerinden biri olan beslenim değerleri için HEC-HMS analizlerinden elde edilen sızma değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, MODFLOW programında akifer-göl etkileşimini gözlemleyebilmek için RIV paketi kullanılmıştır.
- Yeraltı suyu hidrolik modeli ile 2014-2018 yılları için yeraltı suyu analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre 2014 yılı için yeraltı suyu seviyesi dağılımı ve etkileşim yönü diğer yıllardan farklılık göstermekte olup ağırlıklı olarak yeraltı suyu, göl suyunu beslemektedir.
- Göl su seviyesi 2015 yılında 6.20 m ile maksimum değerine ulaşırken, 2014 yılında ise 0.93 m ile minimum değeri gözlemlenmiştir.
- 100 yıllık yağış ile oluşturulan taşkın senaryosu için HEC-HMS ve MODFLOW hidrodinamik modeli çalıştırılmıştır. Taşkın senaryosu için model 24 saat boyunca çalıştırılmış ve ilk saat sonunda sulak alan bölgesinin sular altında kaldığı görülmüştür.

- Büyükçekmce Göl Havzası, İstanbul ilinin tatlı su ihtiyacının karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla bu havzadaki mekansal ve zamansal değişimi veren entegre modeller çok önem arz etmektedir. Bu çalışma ile oluşturulmuş olan entegre modelin hedefi, havzadaki su kaynaklarının durumunu incelemek, riskli olan bölgeleri belirleyerek risk seviyelerinin durumuna göre tedbirler ve önlemler geliştirip bölgedeki su kaynaklarını korumak ve geliştirmektir.
- Çalışma için gerekli olan veriler, bazı bölgeler ve bazı zaman aralıkları için kısıtlı ya da yetersiz kalmıştır. Bahsedilen veri sorunu, özellikle AGİ'lerden elde edilen akış verilerinin sağlıklı olmaması, Karasu gibi uzun ve büyük debili bir derenin üzerinde akım istasyon sayısının yetersiz olması nedeniyle bölgedeki taban akışı değerlerinin belirlenmesini zorlaştırmıştır. Dolayısıyla HEC-HMS hidrolojik modeli ile elde edilen yağış-akış hidrograflarında bazı dönemlerde hesap-ölçüm uyumsuzluğu gözlemlenmiştir.
- Havzada bulunan Karasu, Sarısu ve Çakıl dereleri için su seviye ölçümleri bulunmadığından dolayı MODFLOW ile oluşturulan hidrolik modelde herhangi bir dere (stream) tipi sınır koşulu olarak tanımlanmamıştır. Dolayısıyla gelecekte yapılacak çalışmalarda bu durum dikkate alınarak su seviyesi ölçümleriyle birlikte daha iyi bir modelleme yapılabilir ve bölgedeki su yönetimi planı için daha iyi bir model geliştirilebilir.
- Saha gözlemi sonucunda, çekilen fotoğraflarda görüldüğü üzere, Karasu deresindeki akım gözlem istasyonunun bulunduğu yerde, derede biriken sedimentler, takılan dallar ve yetişen bitkilerin var olması, bazı hatalı ölçümlere neden olabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla, akım gözlem istasyonlarının düzenli bakımı ve cihazların kalibrasyonu, doğru gözlem bakımından önem arz etmektedir.
- Havzanın yeraltı suyu modelinde tanımlanan gözlem kuyularında üzün süreli yeraltı su seviyesi değerlerinin olmaması nedeni ile, göl-akifer etkileşimi ve yeraltı suyu seviyesi değişimi ancak yaklaşık olarak analiz edilebilmiştir.
- Yeraltı suyu modellerine bakıldığında 2014 yılının kurak geçmiş olması nedeni ile göl su seviyesi mimum değerine yani 0.93m'ye düşmüştür. Böyle bir durumun bir daha tekrarlanmaması için ve göl su seviyesini daha verimli ve sürdürebilir hale getirebilmek adına, havzanın jeolojik yapısına ve dere yataklarının müsaitliğine göre gölet yapımı ve yeraltı suyu barajları önerilebilir. Böylelikle kurak dönemlerde

gölet/yeraltı barajları göl su seviyesini besleyerek, göl su seviyesinin minimum değerlere düşmemesini sağlayacaktır.

- Bu çalışma kapsamında yapılmış olan Büyükçekmece Havzası'na ait entegre havza modeli, bölgeye ait su yönetimi ve havza yönetimi kapsamında yapılacak çalışmalar için bir atlık oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

Alfars, Y, 2011, *Büyükçekmece Gölü Hġdrolojġk Modeli, Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

BOYRAZ, U. Mohammadi, H. Ve KAZEZYILMAZ ALHAN, C. M. 2018 . *Nehir-Akifer Etkileşimlerinin Visual Modflowile Modellenmesi, Su Kaynakları , cilt.2, ss.8-13*

Boyraz, U., 2017, *Nehir-akifer etkileşimlerinin hidrodinamiğini belirleyen entegre yaklaşımlar: matematiksel ve deneysel modellemeler [Integrated approaches to identify the hydrodynamics of stream-aquifer interactions: mathematical & experimental modeling], Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Türkiye.*

BRADFORD, R. B. ve ACREMAN, M. C. 2003. *Applying MODFLOW to wet grassland in-field habitats: a case study from the Pevensey Levels, UK. Hydrology and Earth System Sciences, 7, 43-55.*

CHEAH, R., BILLA, L., CHAN, A., TEO, F. Y., PRADHAN, B. ve ALAMRI, A. M. 2019. *Geospatial Modelling of Watershed Peak Flood Discharge in Selangor, Malaysia. Water, 11.*

CORINE, 2012, *Land Cover Change (LCC) 2000-2018, Version 18.5, Dataset, Date of publication: Mar 10 2016, https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018/view, [Erişim 20 Aralık 2020*

DERDOUR, A., BOUANANI, A. ve BABAHAMED, K. 2017. *Hydrological modeling in semi-a Zelelew rid region using HEC-HMS model. case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW-Algeria). Journal of Fundamental and Applied Sciences, 9.*

Devlet Su İşleri (DSİ), 1979, *Büyükçekmece Havzasının Jeolojisi, Devlet Su İşleri 14.Bölge. Yeraltı Suyu ve Geoteknik Müdürlüğü, Editör: Necdet Özgül*

Devlet Su İşleri (DSİ), 2016, *Meriç Ergene Ve Kuzey Marmara Havzaları Master Planı Hidrojeoloji Raporu, syf 69.*

Fieldman, A. D. 2000, *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manuel. U.S. Army Corps of Engineers,Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC), Davis, CA.Geological Survey, Open file report 88–729.*

GERLA, P. J. ve MATHENEY, R. K. 1996. *Seasonal variability and simulation of groundwater flow in a prairie wetland. Hydrological Processes, 10, 903-920.*

Google Earth, 2014, *https://earth.google.com/web/, [Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2020].*

Google Maps, https://www.google.com/maps, *[Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2020].*

HALWATURA, D. ve NAJIM, M. M. M. 2013. *Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. Environmental Modelling & Software, 46, 155-162.*

İmamoğlu, M. Z., 2017, *Aktif uzaktan algılama verileri ve CBS destekli hidrolojik model kullanılarak Büyükçekmece havzasının incelenmesi, Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

JIANG, M. Y., XIE, S. T. ve WANG, S. X. 2020. *Water Use Conflict and Coordination between Agricultural and Wetlands-A Case Study of Yanqi Basin. Water, 12.*

KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M. ve MEDINA, M. A. 2008. *The effect of surface/ground water interactions on wetland sites with different characteristics. Desalination, 226, 298-305.*

KHAN, M. I. 2019. *Hydrological Modeling of Upper Indus Basin Using HEC -HMS. Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences, 14.*

Kirpich, Z. 1940, *Time of concentration of small agricultural watersheds. Civ. Eng. 10, 362.*

KUMAR, S. H. ve NAGARAJ, M. K. 2018. *Assessment of Interactions between River and Aquifer in the Gowri-hole Sub-catchment. Journal of the Geological Society of India, 92, 435-440.*

LIU, Q., LIANG, L. Q., YUAN, X. M., MOU, X. ve SU, L. Y. 2020. *Effects of Groundwater Level Changes Associated with Coastline Changes in Coastal Wetlands. Wetlands, 40, 1647-1656.*

MASOUD, M. H., BASAHI, J. ve NIYAZI, B. 2019. *Assessment and modeling of runoff in ungauged basins based on paleo-flood and GIS techniques (case study of Wadi Al Dawasir-Saudi Arabia). Arabian Journal of Geosciences, 12.*

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988, *A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model, United States Government Printing Office, Washington, 01-985-83961.*

MESTA, B., KARGı, P. G., TEZYAPAR, İ., AYVAZ, M. T., GÖKTAŞ, R. K., KENTEL, E. ve TEZEL, U. 2019. *Determination of Rainfall – Runoff Relationship in Yenicegoruce Basin with HEC-HMS Hydrologic Model. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 25, 949-955.*

Moroğlu, M, 2007, *Avrupa Birliği su çerçeve yönergesi ve yönergenin Türkiye'de uygulanması Büyükçekmece havzası örneği, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe, 1970. *River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3), 282–290.*

Prudic, D.E., 1989, *Documentation of A Computer Program To Simulate Stream-AquiferRelations Using A Modular, Finite-Difference, Ground-Water Flow Model. U.S.*

Scharffenber W., Ely P., Daly S., Fleming M., Pak J., 2010, *Hydrologic modeling system Physically-based simulationcomponents, 2nd Joint Federal Interagency Conference, June 27–July 1, Las Vegas, NV, USA., ss.1-8*

Scharffenber W., Ely P., Daly S., Fleming M., Pak J., 2010, *Hydrologic modeling system Physically-based simulationcomponents, 2nd Joint Federal Interagency Conference, June 27–July 1, Las Vegas, NV, USA., ss.1-8*

Sevat, E. and Dezetter A. 1991. *Selection of Calibration Objective Functions in the Context of Rainfall-Runoff Modeling in a Sudanese Savannah Area. Hydrological Sci. J. 36(4): 307-330.*

SINGH, A., JHA, S. K. 2021. Identification of sensitive parameters in daily and monthly hydrological simulations in small to large catchments in Central India. Journal of Hydrology, 601.

TASSEW, B. G., BELETE, M. A. ve MIEGEL, K. 2019. *Application of HEC-HMS Model for Flow Simulation in the Lake Tana Basin: The Case of Gilgel Abay Catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Hydrology, 6.*

TEKİN, H, 2010, *Büyükçekmece gölü havzasında arazi kullanma sorunları, Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

TRT Haber Ajansı, 2020, *https://www.haberturk.com/buyukcekmece-golunde-su-seviyesi-yuzde-30-lara-dustu-2767692, [Ziyaret tarihi: 9 Ağustos 2020].*

TU, H., WANG, X., ZHANG, W., PENG, H., KE, Q. ve CHEN, X. 2020. *Flash Flood Early Warning Coupled with Hydrological Simulation and the Rising Rate of the Flood Stage in a Mountainous Small Watershed in Sichuan Province, China. Water, 12.*

Usda., Scs., 1986 , *Urban Hydrology for Small, Soil Conservation, (Technical Release 55 (TR-55)), s. 164. Available at: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Urban+Hydrology +for+Small+watersheds#1.*

USGS, 2019*, Dijital Yükseklik Haritası, https://earthexplorer.usgs.gov/, [Ziyaret tarihi: 5 Ocak 2019]*

Watershed Modeling System, 2015, *User Manual (v10 . 1) The Watershed Modeling System, ss. 1–738.*

YILMAZ, A. G., IMTEAZ, M. A. ve OGWUDA, O. 2012. *Accuracy of HEC-HMS and LBRM Models in Simulating Snow Runoffs in Upper Euphrates Basin. Journal of Hydrologic Engineering, 17, 342-347.*

ZELELEW, D. ve MELESSE, A. 2018. *Applicability of a Spatially Semi-Distributed Hydrological Model for Watershed Scale Runoff Estimation in Northwest Ethiopia. Water, 10.*