

**BÜĞDÜZ ALT HAVZASI (BURDUR) HİDROLOJİK
MODELİ**

**HYDROLOGICAL MODELING OF BÜĞDÜZ SUB-BASIN
(BURDUR)**

EMİNE ARSLAN KARADAVUT

DR. ÖĞR.ÜYESİ TÜRKER KUTTAŞ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2024

ÖZET

BÜĞDÜZ ALT HAVZASI (BURDUR) HİDROLOJİK MODELİ

Emine ARSLAN KARADAVUT

Yüksek Lisans, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr.Üyesi Türker KURTTAŞ

Eylül 2024, 75 sayfa

Nehir havzalarında su kaynakları en iyi şekilde yönetmek için akışın çevresel değişimlere göstereceği tepkileri anlamak çok önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında insan kaynaklı faaliyetlerinden su yapılarının Büğdüz Havzasına olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla Burdur Gölü'nü besleyen ana kollardan bir olan Büğdüz Deresinin yan kolu olan Yayla Deresi üzerine 2014 yılında yapılmış olan Büğdüz Göletinden önce ve sonraki dönemlere ait hidrolojik modeller geliştirilmiştir. İnsan kaynaklı faaliyetlerin ve iklim değişikliğinin etkilerini değerlendirmek için çalışmalarda da sık tercih edilen SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hidrolojik modeli kullanılmıştır. Büğdüz Göletinin bulunmadığı 2005-2013 yılları arasında havza parametrelerinin tespit edilmesi için SWAT-CUP programının SUFI-2 algoritması kullanılarak kalibrasyon ve validasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gözlenen akım verileri için havza çıkışında yer alan Büğdüz D. (Suludere) Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) verileri kullanılmıştır. Modelde 2005-2006 yılları warm-up, 2007-2010 yılları kalibrasyon ve 2011-2013 yıllarında validasyon işlemleri uygulanmıştır. Kalibrasyon işlemi sonucunda elde edilen parametrelerin istatistiksel olarak model performans değerleri $R^2= 0,88$ ve $NSE=0,88$ olarak hesaplanırken validasyon işlemi sonucunda $R^2= 0,72$ ve $NSE=0,32$ olarak hesaplanmıştır. Validasyon işleminde NSE değerinin düşük çıkması hesaplanan ve gözlenen akım değerlerinin birbirine yeteri kadar yaklaşmadığını ifade etmektedir. Ancak yinede kalibrasyon ve validasyon işlemleri sonucu ortaya çıkan hidrograflarda gözlenen ve

hesaplanan akım verilerinin pik noktalarının genel olarak uyum içinde olduğu gör÷lmektedir.

Model parametrelerinin elde edildikten sonra 2014-2018 yıllarında B÷gdüz Göletinin bulunduğu ve bulunmadığı 2 farklı model kurulmuştur. Her iki modelde de model girdileri ortak kullanılmıştır. B÷gdüz Göletinin bulunduğu model için rezervuar mod÷lüne girilecek olan gölet alan, hacim ve sulama verileri DSİ (2010) tarafından geliştirilen rapordan temin edilmiş ve kullanılmıştır. Model sonuçlarında elde edilen hidrolojik döngüler ile göletin bulunduğu ve bulunmadığı dönemler için su bütçeleri hesaplanmıştır. B÷gdüz Göletinin bulunmadığı ve bulunduğu dönemler için geliştirilen hidrolojik modeller sonucunda B÷gdüz Havzasında meydana gelen depolamadaki değişim miktarları sırasıyla $9,246 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ ve $7,578 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır. Havzadaki en fazla su kaybının buharlaşma ve terleme yoluyla meydana geldiği ve göletin bulunduğu dönemde buharlaşma ve terleme yoluyla $1,44 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ daha fazla su kaybı meydana geldiği hesaplanmıştır.

Bu tez kapsamında kurulan hidrolojik modeller ile su yapılarının havzadaki hidrolojik döngüde oluşturacağı etkiler ortaya konulmaya çalışılmıştır. Model çalışmalarındaki belirsizlikler dikkate alınarak su yapıları yapılmadan önce model çalışmaları ile su bütçesi çalışmaları yapılarak su havzalarında oluşacak etkiler en aza indirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: B÷gdüz Göleti, SWAT, SWAT_CUP, Hidrolojik Model, İnsan Faaliyetleri Etkileri

ABSTRACT

HYDROLOGICAL MODEL OF BÜĞDÜZ SUB-BASIN (BURDUR)

Emine ARSLAN KARADAVUT

Master of Science, Department of Geology (Hydrogeology) Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Türker KURTTAŞ

September 2024, 75 pages

Understanding the responses of river basin flows to environmental changes is crucial for effectively managing water resources. In this thesis, the impact of human activities and water structures on the Büğdüz Basin has been assessed. For this purpose, hydrological models were developed for the periods before and after the construction of the Büğdüz Pond, which was built in 2014 on the Yayla Stream, a tributary of Büğdüz Stream, one of the main branches feeding Lake Burdur. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model, commonly used in studies to evaluate the effects of human activities and climate change, was employed. Calibration and validation processes were carried out using the SUFI-2 algorithm of the SWAT-CUP program to identify the basin parameters for the 2005-2013 period when the Büğdüz Pond did not exist. Flow data observed at the Büğdüz D. (Suludere) Flow Observation Station (FOS), located at the basin outlet, were used. In the model, the years 2005-2006 were used as a warm-up period, 2007-2010 for calibration, and 2011-2013 for validation. The model performance values for the parameters obtained as a result of the calibration were statistically calculated as $R^2 = 0.88$ and $NSE = 0.88$, while for the validation, they were $R^2 = 0.72$ and $NSE = 0.32$. The low NSE value in the validation indicates that the calculated and observed flow values did not sufficiently converge. However, the hydrographs resulting from the calibration and validation processes show that the peak points of the observed and calculated flow data are generally in agreement.

After obtaining the model parameters, two different models were developed for the years 2014-2018, one with and one without the Būgdūz Pond. The model inputs were used jointly for both models. For the model with the Būgdūz Pond, the reservoir module was provided with pond area, volume, and irrigation data, obtained from the report developed by the State Hydraulic Works (DSİ, 2010). Water budgets for the periods with and without the pond were calculated using the hydrological cycles obtained from the model results. As a result of the hydrological models developed for the periods with and without the Būgdūz Pond, the change in storage in the Būgdūz Basin was calculated as $9.246 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ and $7.578 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, respectively. It was determined that the largest water loss in the basin occurred through evaporation and transpiration, and during the period with the pond, an additional $1.44 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ of water was lost due to evaporation and transpiration.

The hydrological models developed in this thesis aimed to reveal the effects of water structures on the hydrological cycle within the basin. Considering the uncertainties in model studies, water budget analyses should be conducted through modeling studies before the construction of water structures to minimize the impacts on water basins.

Keywords: Būgdūz Pond, SWAT, SWAT_CUP, Hydrological Model, Human Activities Effects

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam ve lisans eğitim hayatım boyunca her türlü bilgi ve tecrübesini esirgemeyen ve yüksek lisans çalışmamda gösterdiği ilgi ve sabrından dolayı çok kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Türker KURTTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresinde iyi niyeti ile değerli yorumları ile model çalışmalarında yol gösteren ve bilgi birikimini aktaran değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Levent TEZCAN'a ve tez çalışmalarında tecrübesiyle yönlendiren ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Harun AYDIN'a, eğitim hayatım boyunca bilgisiyle ve mesleki tecrübeleriyle destek olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet EKMEKÇİ'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmama değerli görüş ve önerileri ile yapmış oldukları katkılardan dolayı değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Özlem YAĞBASAN ve Doç. Dr. Bedri KURTULUŞ'a ve jeoloji bölümündeki katkıları ve desteğinden dolayı değerli hocam Doç. Dr. Erman ÖZSAYIN'a teşekkür ederim.

Tez çalışması süresinde benden desteklerini esirgemeyen Elif BODUR ÇINAR ve Necla AKYOL'a ve T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığındaki yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışması süresinde yaşadığım zorlukları kolaylaştırmak için elinden gelen herşeyi yapan ve bu sürede göstermiş olduğu büyük sabır ve ilgiden dolayı hayat arkadaşım Hasan KARADAVUT'a ve hayatımın her anında yanımda olan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	1
1.2 İnceleme Alanı	2
1.2.1 İklim ve Bitki Örtüsü.....	4
1.2.2 Meteorolojik Verilerin Değerlendirilmesi.....	5
1.3 Önceki Çalışmalar.....	9
2 JEOLojİ.....	13
2.1 Genel Jeoloji	13
2.2 Çalışma Alanının Jeolojisi	14
2.2.1 Yeşilbarak Napına Ait Birimler.....	15
2.2.2 Likya Naplarına Ait Birimler	15
2.2.3 Paraalloktonlar.....	18
2.2.4 Neotokton Örtü Kayları.....	18
2.3 Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri	22
2.3.1 Taneli Ortam Akiferi	22
2.3.2 Karstik Akifer	22
2.3.3 Akitard Ortam.....	22
2.3.4 Akifüj Ortam	23
2.4 Hidroloji.....	24
2.4.1 Yağış.....	24
2.4.2 Buharlaşma-Terleme	25
2.4.3 Su Bütçesi	28

2.4.4	Akış.....	30
3	MATERYAL VE METOD.....	35
3.1	Giriş.....	35
3.2	SWAT Hidrolojik Modeli	35
3.3	Kalibrasyon Çalışmaları.....	41
3.4	Model Performans Değerlendirmesi	45
4	MODEL ÇALIŞMALARI	48
4.1	SWAT Modeli Kurulumu ve Veri Girişi	48
4.1.1	Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)	50
4.1.2	Drenaj Ağı ve Havza Sınırı	51
4.1.3	Arazi Kullanım Haritası.....	52
4.1.4	Toprak Haritası	55
4.1.5	Meteoroloji Verileri	58
4.2	Modelleme Çalışmaları ve Değerlendirmeleri	59
4.2.1	Bügdüz Göleti Öncesi Model Çalışmaları.....	59
4.2.2	Bügdüz Göleti Sonrası Model Çalışmaları.....	62
5	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	68
6	KAYNAKLAR	71
	ÖZGEÇMİŞ.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1 Çalışma alanı yer bulduru haritası	3
Şekil 2 Burdur MGİ'ye ait 1932-2022 yılları aylık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri. 4	
Şekil 3 Çalışma alanı çevresinde yer alan Meteoroloji Gözlem İstasyonları ve Thiessen Poligonları.....	6
Şekil 4 Çalışma alanı çevresinde yer alan MGİ'lere ait yağış-yükseklik ilişkisi.....	7
Şekil 5 Burdur MGİ ile NASA/POWER solar radyasyon verileri ilişkisi.....	8
Şekil 6 Batı Torosların Tektonik Birlikleri (Şenel, 2004)	13
Şekil 7 Çalışma Bölgesine ait Stratigrafik kesit (MTA, 2010).....	14
Şekil 8 Büğdüz Havzası Jeoloji Haritası (MTA, 2010)	15
Şekil 9 Bölgedeki otokton allokton, paraotokton ve paraallokton konumlu kaya birimlerinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesitleri (MTA, 2010).....	17
Şekil 10 İnceleme alanında Çameli formasyonunu temsil eden tabakalı, beyaz, renkli kumtaşı, marn, konglomera ve silttaşı seviyeleri.....	19
Şekil 11 Büğdüz Göleti çevresinde yüzeylenen Kızılcadağ Melanj ve Olistostromu ile Çameli Formasyonu dokanağı	20
Şekil 12 Çalışma alanına ait jeolojik kesitler.....	21
Şekil 13 Çalışma alanındaki birimlerin hidrojeolojik özellikleri.....	23
Şekil 14 Burdur MGİ'de 1977 - 2021 yılları arasında gözlenmiş yıllık yağışlar	24
Şekil 15 Burdur MGİ aylık ortalama yağış ve buharlaşma değerleri	25
Şekil 16 Burdur MGİ verileri ile Thornthwaite yönteminde hesaplanan ortalama aylık ETp - Yağış değişimi	27
Şekil 17 Burdur Gölü su seviyesi, yıllık buharlaşma ve yağış ilişkisi.....	30
Şekil 18 Burdur Gölü seviyesi ve göl hacmi ilişkisi (Pınarlık, vd. 2023)	31
Şekil 19 Çalışma Alanı içinde yer alan D10A027 Nolu AGİ ve Büğdüz Göletinin yeri	33
Şekil 20 Büğdüz Deresi aylık ortalama akım değerleri (m ³ /s)	34
Şekil 21 SWAT modeli hidrolojik döngüsünün şematik gösterimi (Neitsch, vd., 2011)	37
Şekil 22 SWAT modelinde su hareketinin oluşturduğu fiziksel süreçler (Neitsch, vd.,2011;Cüceloğlu, 2019).....	38
Şekil 23 SWAT-CUP programında SWAT ve farklı optimizasyon algoritmaları ilişkisini gösterir şema (Abbaspour, vd., 2015).....	42

Şekil 24 Parametre ile tahmin belirsizlikleri arasındaki ilişkinin şematik örneği (Abbaspour, vd., 2015'ten değiştirilerek).....	43
Şekil 25 SWAT-CUP yazılımında SUFI-2 algoritması iş akış şeması (Abbaspour, vd., 2015).....	44
Şekil 26 SWAT modeli süreci diyagramı Liu, vd. (2024)'den uyarlanmıştır.	49
Şekil 27 Çalışma alanı sayısal yükseklik modeli ve eğim haritası.	51
Şekil 28 Çalışma alanının alt havzaları ve drenaj ağı haritası	52
Şekil 29 Çalışma alanı arazi örtüsü sınıfı haritaları (Url-3).....	53
Şekil 30 Çalışma alanı toprak haritası (FAO, 1995).....	56
Şekil 31 Burdur MGİ Aylık Yağış (mm) ve Sıcaklık (°C) ilişkisi grafiği.....	58
Şekil 32 95PPU güven aralığı ile a) kalibrasyon, b) validasyon işlemlerinde gözlenen ve simüle edilen akım değerleri grafikleri.....	61
Şekil 33 Model parametrelerinin hassasiyet analizi sonuçları.....	62
Şekil 34 2014-2018 yılları için kurulan; a) Büğdüz Göletinin bulunmadığı b) Büğdüz Göletinin bulunduğu hidrolojik model sonuçları.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1 Çalışma alanı çevresinde yer alan meteoroloji istasyonlarına ait bilgiler	5
Çizelge 2 Çalışma alanı çevresinde yer alan MGI'lere ait korelasyon katsayısı ilişkisi...	7
Çizelge 3 Thornthwaite yöntemi ile Burdur MGI için hesaplanmış aylık ETp değerleri	27
Çizelge 4 Burdur MGI'ye için hesaplanan Thornthwaite - Mather su bütçesi çizelgesi.	29
Çizelge 5 Burdur Göller Havzasında yer alan su yapıları (DSİ, 2021)	32
Çizelge 6 Model Performans İstatistikleri için genel değerlendirme (Moriyasi, 2015) ...	47
Çizelge 7 Hidrolojik süreç modelinin kurulumunda kullanılan veri setleri ve kaynak bilgileri.....	50
Çizelge 8 CORINE arazi örtüsü sınıflarının çalışma alanı içerisindeki yüzdesel dağılımı	54
Çizelge 9 CORINE arazi kullanım türünün SWAT arazi kullanımı sınıflarına göre yeniden sınıflandırılması.....	55
Çizelge 10 SWAT modelinde FAO toprak haritası parametreleri.....	57
Çizelge 11 Kalibrasyon parametreleri ve değerleri	60
Çizelge 12 Kalibrasyon ve validasyon işlemleri sonucu model performans verileri	62
Çizelge 13 Model kurulumunda kullanılan Büğdüz Göleti bilgileri (DSİ, 2010)	63
Çizelge 14 Büğdüz Göleti sulama suyu ihtiyaçları (DSİ, 2010'dan değiştirilerek)	64
Çizelge 15 Büğdüz Göletinin bulunmadığı dönemdeki su bütçesi.....	66
Çizelge 16 Büğdüz Göletinin bulunduğu dönemdeki su bütçesi	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	Enlem Düzeltme Faktörü
l/s	Litre/saniye
ha	Hektar
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³ /yıl	Metreküp/yıl
mm	Milimetre
I	Yıllık Sıcaklık İndisi
K	Hidrolik iletkenlik katsayısı (m/gün)
km ²	Kilometrekare
D	Doğu
K	Kuzey
T	Sıcaklık
t	Zaman
SW _t	Nihai toprak su içeriği (mm)
SW ₀	Başlangıç anında toprağın su içeriği (mm)
R _{day}	Günlük yağış miktarı (mm)
Q _{surf}	Yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm)
E _a	Buharlaşma ve terleme (mm)
W _{seep}	Sızan su miktarı (mm)
Q _{gw}	Geri dönüş akış su miktarı (mm)
Q _{yüzeysel}	Yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm)

I_a	Yüzey akış öncesi yüzey depolaması ve infiltrasyon sonucu başlangıç eksilmeleri(mm)
S	Potansiyel su tutulması (mm)
λE	Potansiyel sıcaklık akış yoğunluğu ($MJ m^{-2} d^{-1}$),
E	Buharlaşma derinlik oranı ($mm d^{-1}$),
Δ	Doymun buhar basıncı ile sıcaklık eğrisinin eğimi ($kPa ^\circ C^{-1}$),
ρ_{air}	Hava yoğunluğu ($kg m^{-3}$),
H_{net}	Net radyasyon ($MJ m^{-2} d^{-1}$),
G	Zemin için sıcaklık akış yoğunluğu ($MJ m^{-2} d^{-1}$),
c_p	Sabit basınçta spesifik sıcaklık ($MJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$),
e_z^o	z yükseklikte havanın doymun buhar basıncı (kPa),
e_z	z yükseklikte havanın buhar basıncı (kPa),
γ	Psikrometrik sabiti ($kPa ^\circ C^{-1}$),
r_c	Bitki kanopi direnci ($s m^{-1}$),
r_a	Hava tabakasının yayılma direnci ($s m^{-1}$)
$Q_{göz}^i$	Gözlemlenen akım verisi
$Q_{göz}^{ort}$	Gözlemlenen akım verisinin ortalaması
Q_{sim}^i	Simüle edilen akım verisi
Q_{sim}^{ort}	Simüle edilen akım verisinin ortalaması

Kısaltmalar

AÇA	Avrupa Çevre Ajansı
AGİ	Akım Gözlem İstasyonu
ArcSWAT	SWAT Programı ArcGIS Arayüzü
CN	Curve Number
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DSİ	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
ETg	Gerçek Evapotranspirasyon
ETp	Potansiyel Evapotranspirasyon
FAO/UNESCO	Food and Agricultural Organization/ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
GIS	Geographical Information System
GLUE	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
HRU	Hydrological Response Units
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MGİ	Meteoroloji Gözlem İstasyonu
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
NSE	Nash-Sutcliffe Katsayısı
Parasol	Parameter Solution
PBIAS	Yüzde hata
PSO	Particle Swarm Optimization
POWER	Prediction of Worldwide Energy Resources
R2	The Coefficient of Determination
P	Yağış
SCS	Soil Conservation Service

SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Programs
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
USGS	United States Geological Survey

1 GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Kullanılabilir su kaynaklarının azlığı, hızlı nüfus artışı ile suya olan talebin artması, sanayinin gelişmesi ve tarımsal faaliyetler ile birlikte su tüketiminin artması su kaynaklarının miktar ve kalite açısından verimli şekilde kullanılmasını ve korunmasını zorunlu hale getirmiştir. Son yıllarda etkisini gösteren küresel ısınmaya bağlı olarak dünyanın hemen hemen her yerinde iklim değişiklikleri ve buna bağlı olarak su kaynaklarına etkileri gözlenmektedir. Bu değişiklikler bütün canlıları etkilemektedir ve etkilemeye devam edecektir. Su kaynakları üzerindeki bu tür baskılar, mevcut durumun nedenleri geleceğe yönelik planlamaların yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Göl ve nehir ekosistemleri küresel hidrolojik sistem içerisinde büyük rol oynamaktadır. Yağış, yüzey ve yeraltı sularından gelen akışlarından beslenen göller; sıcaklık, yağış, buharlaşma gibi meteorolojik koşullardaki değişikliklere ve havzadaki antropojenik faaliyetlere duyarlıdır. Nehirler üzerinde kurulan baraj ve gölet gibi su yapıları nehirlerden göle olan su akışının azalmasına sebep olmaktadır. Göl yüzey alanlarında ve dolayısıyla hacimlerinde değişiklikler meydana gelmesinde etkili rol oynadığı düşünülmektedir.

Doğal akış gösteren bir akarsuyun beslemiş olduğu göl ve/veya nehirlerin, su yapılarının kurulmasıyla beslenme miktarları değişmekte ya da beslenme kaynaklarını büyük ölçüde kaybetmektedir. Çünkü depolanan sularda meydana gelen buharlaşma ve mansaptaki akarsu yatağının kaybettiği su nedeniyle daha fazla kurumaya sebep olmakta ve eskiye oranla sızma kayıplarında artış olmaktadır (Ataol, 2010). Buna bağlı olarak akarsuyun beslediği göl ve diğer nehir kolları yeterli olarak beslenememektedir. Bu sebeplerden dolayı göl hacminde ve nehirlerin debilerinde azalmalar meydana gelmektedir.

Yağışlardan, yüzey ve yeraltı sularından beslenen Burdur Gölü tektonik kökenli kapalı bir havza gölü olup Türkiye'nin yüz ölçümü açısından en büyük yedinci gölüdür. Batı Torosların batı kanadında blok faylanma tektoniğinin yaygın olarak gözlemlendiği çöküntü bir alan içerisinde bulunmaktadır (Şener, vd. 2005). Burdur Gölü'nün 1975 yılındaki göl alanı 223,96 km² olarak ölçülürken 2020 yılında 137,49 km² olarak ölçülmüştür. Göl alanında 1975-2020 yılları arasında yaklaşık olarak % 40 oranında küçülme meydana gelmiştir.

Çalışma kapsamında Burdur Gölü'nü besleyen ana akarsu kollarından Büğdüz Deresinin yan kollarından biri olan Yayla Deresi üzerinde yapılmış ve işletmeye açılmış olan Büğdüz Göletinin, havzadaki hidrolojik döngüye etkisinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu amaçla oluşturulan hidrolojik modeller ile Büğdüz Göletinin bulunmadığı ve bulunduğu dönemler olmak üzere iki farklı döneme ait su bütçesi ilişkisi incelenmiştir. Böylelikle Büğdüz Göletinin havzadaki su bütçesi bileşenleri üzerindeki etkisi ortaya konulmaya çalışmıştır.

1.2 İnceleme Alanı

Burdur Göller Havzası, Türkiye'nin güneybatısında 29°-30° doğu boylamları ile 37°-38° kuzey enlemleri arasında yer almakta olup havzanın batısında Eşeler Dağı (1.930 m), Maymun Dağı (1.605 m), doğusunda Kestel Dağı (2.328 m), Çatak Dağı (1.970 m), güneyinde Rahat Dağları (2.094 m), Koru Dağları (2.056 m), kuzeyinde ise Bozdağlar (1.350 m) ve Akdağ'ın (1.894 m) su ayırım çizgileri arasında kalmaktadır.

8.764 km² yağış alanı ile Türkiye'nin yaklaşık %1'ini oluşturan Burdur Göller Havzası sınırları içerisinde Burdur Gölü, Acıgöl, Akgöl, Yarışlı Gölü, Karataş Gölü ve Salda Gölü yer almaktadır. Altı alt havzadan oluşan Burdur Göller Havzasında en geniş yüz ölçümüne sahip olan alt havza, Burdur ve Karataş göllerinin içinde bulunduğu 3.248 km² alan ile Burdur Gölü Alt Havzasıdır. Genişlik itibariyle Acıgöl Alt Havzası 1.864,7 km² (% 28,4) yüzölçümü ile ikinci, Atabey Alt Havzası 602,4 km² (% 9,17) yüz ölçümüyle üçüncü, Yarışlı Gölü Alt Havzası 329,2 km² (% 5) yüz ölçümüyle dördüncü, Akgöl Alt Havzası 298 km² (% 4,5) yüz ölçümüyle beşinci ve Salda Gölü Alt Havzası 221,3 km² (%3,3) yüz ölçümüyle altıncı sırada yer almaktadır (Taş, vd. 2021).

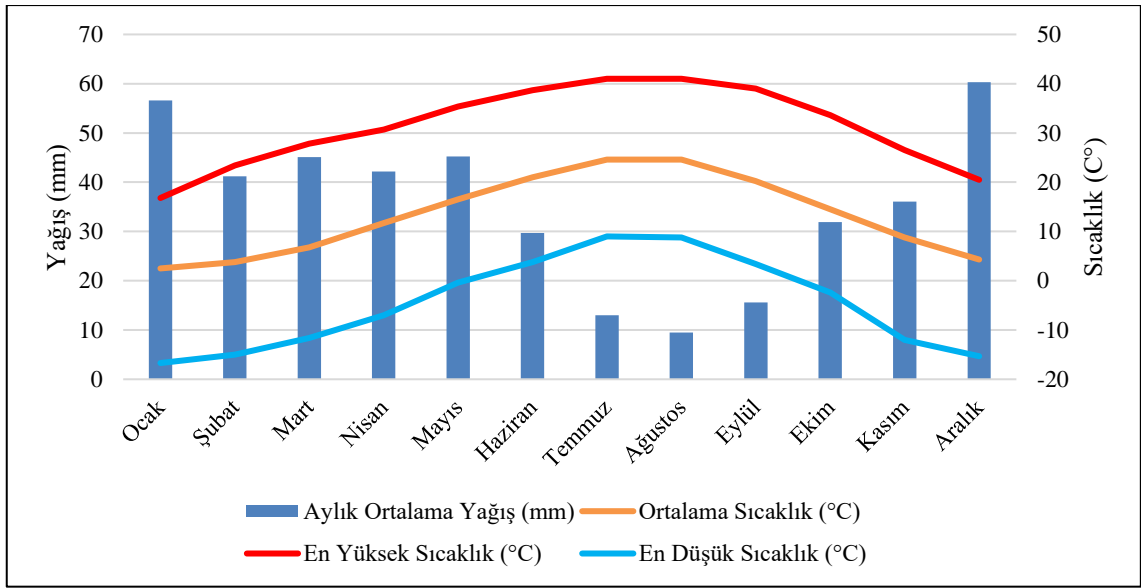
Çalışma alanı, Akdeniz Bölgesinde 251000D / 4156000K - 271000D / 4176000K koordinatları arasında yaklaşık 200 km²'lik bir alan kaplamaktadır. Burdur Göller Havzasının alt havzalarından biri olan Burdur Gölü Alt Havzası sınırları içinde, Burdur ilinin Merkez ve Çeltikçi ilçelerinde kalmaktadır.



1.2.1 İklim ve Bitki Örtüsü

Burdur Göller Havzası İç Anadolu, Akdeniz ve Ege bölgeleri arasında iklim bölgesi özelliğine sahip olsada genel olarak step iklim tipi özelliğini göstermekte olup gece ve gündüz sıcaklık farkı yüksektir. Bölgede kış mevsimi soğuk ve yağışlı, yaz mevsimi ise sıcak ve kurak geçmektedir.

Burdur Meteoroloji Gözlem İstasyonuna (MGI) ait 1932-2022 yılları arasındaki verilere göre Temmuz ayı ortalama sıcaklığı 24,6 °C, Ocak ayı ortalama sıcaklık 2,5 °C, yıllık ortalama sıcaklık ise 13,3 °C'dir. Temmuz ayı yağış ortalaması 13,0 mm, Ocak ayı yağış ortalaması 56,6 mm, yıllık yağış ortalaması 426,4 mm'dir.



Şekil 2 Burdur MGI'ye ait 1932-2022 yılları aylık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri

Arazi yönünden engebeli bir yapıya sahip olan Burdur ilinde ormanlar genel olarak dağlık alanlar ve dik yamaçlarda bulunmaktadır. Eğimin az olduğu yerlerde ise, maki ve sert yapraklardan oluşan bitki örtüsü yer almaktadır. Havzanın doğal bitki örtüsü, Tefenni güneyinde, Burdur - Merkez ve Acıgölün kuzeyinde çok zayıf durumundadır. Bölge bozuk mera özelliğinde olup diğer bölgeler genel olarak ormanlık halindedir.

Burdur ilinin genel topoğrafik yapısını oluşturan dik arazilerde, toprak kalınlığı sığ ve doğal bitki örtüsü açısından zayıf olduğu için su, toprakta yeteri kadar depolanmamaktadır. Böylece yağış ile düşen suyun büyük bir kısmı yüzey akışına geçmektedir (DSİ, 2016).

1.2.2 Meteorolojik Verilerin Değerlendirilmesi

Çalışma alanı içerisinde Meteoroloji Genel Müdürlüğüne ait MGİ bulunmamakta olup çevresinde 7 adet Meteoroloji Genel Müdürlüğüne ait MGİ bulunmaktadır. Bu istasyonlardan en uzun gözlem süresine 1969 yılından günümüze kadar ölçüm yapan Burdur MGİ sahiptir. İstasyonlara ilişkin bilgiler ve gözlem süreleri Çizelge 1’de verilmiştir.

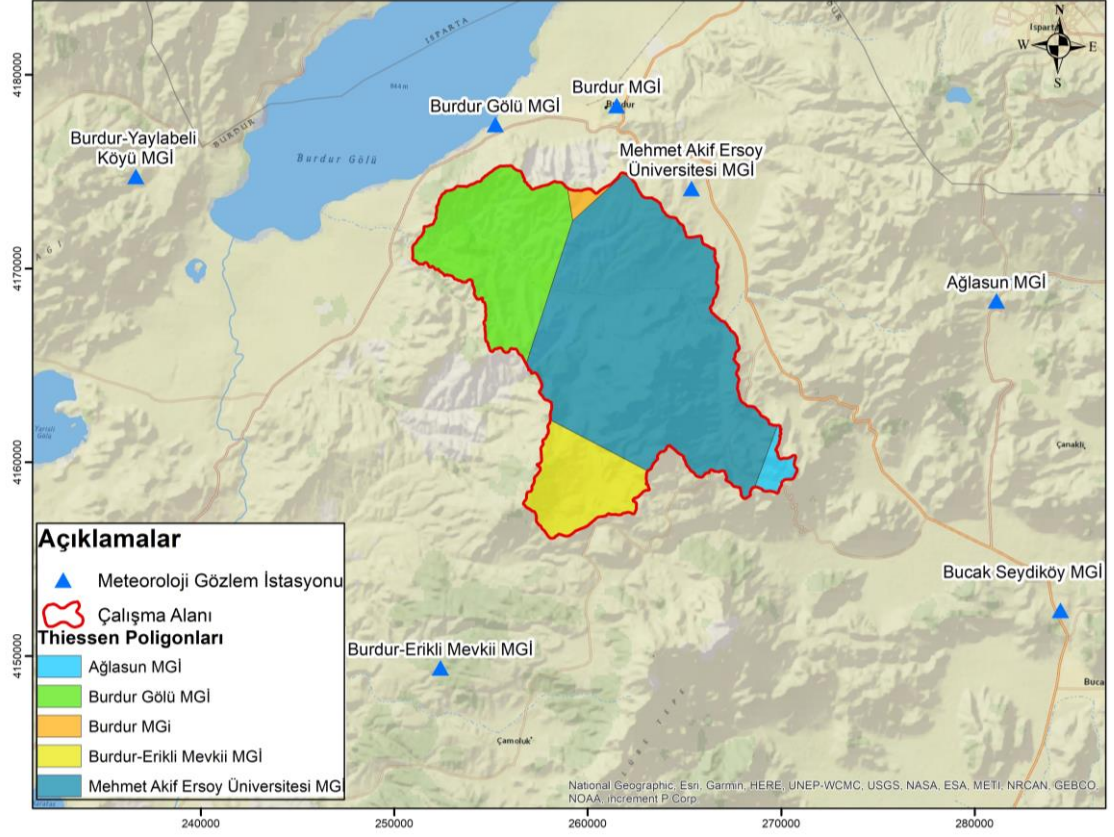
Çizelge 1 Çalışma alanı çevresinde yer alan meteoroloji istasyonlarına ait bilgiler

İstasyon Numarası	İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)	Gözlem Süresi
17238	Burdur MGİ	261503	4178418	957	1969-2021
18314	Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi MGİ	265361	4174142	1230	2014-2021
18622	Burdur-Yaylabeli Köyü MGİ	236644	4174753	1235	2015-2021
18995	Burdur Gölü MGİ	255230	4177438	867	2018-2021
17894	Bucak-Seydiköy MGİ	284441	4152357	875	2015-2021
18112	Ağlasun MGİ	281127	4168334	1138	2012-2021
18621	Burdur-Erikli Mevkii	252394	414938	1360	2014-2021

Çalışma amacına uygun olarak 2005-2018 yılları arasında ölçülen veri setleri kullanılmıştır. Model çalışmalarında Burdur MGİ’ye ait yağış, sıcaklık, nispi nem ve rüzgar hızı ölçüm verileri kullanılmıştır. Diğer istasyonların 2005 - 2018 yılları arasında yağış ölçüm değerlerinin bulunmamasından dolayı ölçüm olan 2019 – 2021 yıllarındaki veriler ile Burdur MGİ verileri aylık olarak oranlanmış ve aylık yağış katsayısı belirlenmiştir. Belirlenen aylık katsayılar 2005 - 2018 yılları Burdur MGİ yağış verileri ile çarpılarak diğer istasyonlar için yağış verileri üretilmiş ve çalışma kapsamında kullanılmıştır.

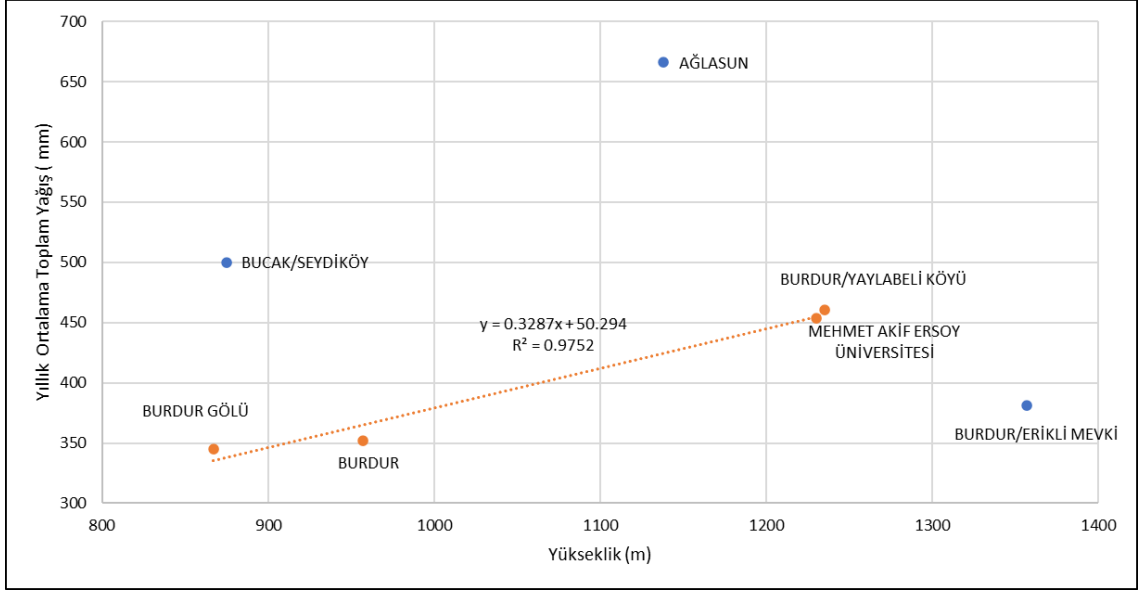
Çalışma alanı çevresinde yer alan MGİ’lerin yağış alanlarını temsil eden Thiessen Poligonları çizilmiştir (Şekil 3). Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi MGİ 123,77 km²,

Burdur Gölü MGİ 47,18 km², Burdur-Erikli Mevkii MGİ 22,99 km², Ağlasun MGİ 3,33 km² ve Burdur MGİ 1,70 km²'lik alanlar ile çalışma alanını temsil etmektedir.



Şekil 3 Çalışma alanı çevresinde yer alan Meteoroloji Gözlem İstasyonları ve Thiessen Poligonları

Yıllık ortalama toplam yağış ve yükseklik ilişkisi grafiği incelendiğinde Burdur, Burdur Gölü, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi ve Burdur-Yaylabeledi Köyü MGİ'ler arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4 Çalışma alanı çevresinde yer alan MGİ'lere ait yağış-yükseklik ilişkisi

MGİ'lere ait korelasyon ilişkileri incelendiğinde $R^2=0,86$ ile Burdur MGİ ve Burdur Gölü MGİ arasında en yüksek uyumun olduğu görülmektedir. $R^2=0,39$ ile Ağlasun MGİ ve Burdur/Yaylabeyi Köyü MGİ arasında en düşük uyumun olduğu görülmektedir.

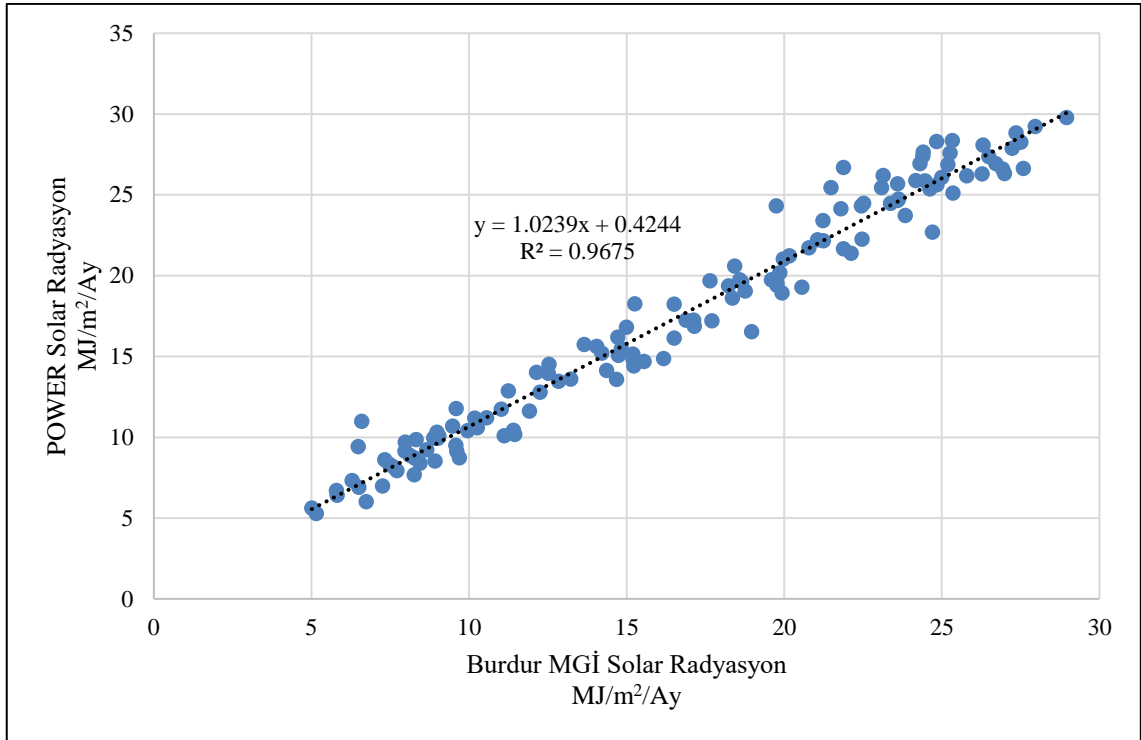
Çizelge 2 Çalışma alanı çevresinde yer alan MGİ'lere ait korelasyon katsayısı ilişkisi

MGİ ADI*	A	B	C	D	E	F	G
A	1,00						
B	0,86	1,00					
C	0,52	0,54	1,00				
D	0,55	0,57	0,76	1,00			
E	0,64	0,67	0,52	0,60	1,00		
F	0,58	0,56	0,39	0,40	0,50	1,00	
G	0,81	0,83	0,62	0,64	0,66	0,50	1,00

*A: Burdur Gölü MGİ, B: Burdur MGİ, C:Ağlasun MGİ, D: Bucak/Seydiköy MGİ, E: Burdur/Erikli MGİ, F: Burdur/Yaylabeyi Köyü MGİ, G: Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi MGİ

MGİ'lerin çalışma sahasındaki Thiessen Poligon alan dağılımları, ortak ölçüm yıllarındaki yağış – yükseklik ilişkileri ve korelasyonları (Çizelge 2) bir bütün olarak değerlendirilerek çalışmada verileri kullanılacak MGİ'ler belirlenmiştir. Bu kapsamda Burdur MGİ, Burdur Gölü MGİ ve Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi MGİ'nin yağış verileri kullanılmıştır.

Model girdi verilerinden biri olan solar radyasyon veri setinin Burdur MGİ'nin ölçüm tarihi 2006 yılına kadar olması sebebiyle kullanılamamıştır. Bunun yerine NASA tarafından yayınlanan Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) projesi ile ücretsiz olarak kullanıma sunulan veri seti değerlendirilmiştir (Url-1). Burdur MGİ ve POWER solar radyasyon veri setlerinin birbiriyle uyumluluğu ortak ölçüm yıllarında (1996 – 2006) test edilmiştir (Şekil 5). Verilerin arasındaki korelasyon incelendiğinde $R^2 = 0,9675$ olarak tespit edildiğinden POWER solar radyasyon veri seti çalışma kapsamında kullanılmıştır.



Şekil 5 Burdur MGİ ile NASA/POWER solar radyasyon verileri ilişkisi

1.3 Önceki Çalışmalar

Şener, vd. (2005), tarafından yapılan çalışmada 1975-2002 yılları arasında Burdur Gölü'nün alan ve hacim değişimleri çok zamanlı uydu görüntülerini kullanarak uzaktan algılama yöntemiyle belirlenmiştir. 1970 yılında ölçülen seviyenin Burdur Gölü için en yüksek seviye olduğu ve 1971-1972 yıllarından itibaren göl su seviyesinin düşmeye başladığı belirtilmiştir. Uydu görüntüleri ile 1975 yılında 210 km² olarak hesaplanan göl alanı 2002 yılında 153 km² olarak hesaplanmıştır. 1988-1995 yılları arasında yaşanan kurak dönem ve buharlaşma miktarındaki artışın göl su seviyesi ve alanındaki düşüşü doğrudan etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Ataol (2010), yapmış olduğu Doktora çalışmasında Burdur Gölü su seviyesinin 1987-2008 yılları arasında yıllık ortalama 45 cm hızla toplam 9,5 m alçaldığını belirterek bu alçalmanın sebebinin karasal iklim koşulları ve gölü besleyen akarsuların üzerine yapılan baraj ve göletlerde depolanan suyun, verimsiz ve plansız olarak tarım arazilerinin sulanması olarak açıklanmıştır. Havzada yer alan baraj ve göletlerin plansız inşa edildiği bu yapıları verimsiz hale getirdiği belirtilmiş ve göl havzasındaki su kullanımının aynı şekilde devam etmesi halinde göl seviyesinin 25 m'ye, derinliğinin ise 36 m'ye düşeceği belirtilmiştir. Bu amaçla Burdur Gölü Havzası için; havza komisyonu, çevresel hedefler, su kullanımının ve önlemlerinin ekonomik analizi ve izleminin olduğu entegre havza yönetimi yaklaşımını temel alan yeni bir su yönetim modeli önermiştir.

Yiğitbaşıoğlu, vd. (2010), tarafından yapılan çalışmada Burdur Gölü'ndeki seviye değişimi ve kirlilik probleminin sebebi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Gölün su seviyesinin azalmasındaki tek başına iklim değişikliği olmadığını ortalama yağış miktarının değişmediği ve ortalamanın üstünde olduğu dönemlerde dahi göl seviyesindeki düşüşün devam ettiği belirtilmiştir. Göl seviyesindeki azalmanın başlıca sebebinin göle ulaşan nehirler üzerine kurulu baraj ve göletlerden dolayı olduğu ve tarımsal sulamada yanlış su kullanımının olduğuna değinmiştir.

Tudryn, vd. (2013), tarihsel dönemlerde Burdur Gölü'nde meydana gelen seviye değişimleri hakkında incelemelerde bulunmuştur. Çalışmanın yapıldığı 2012 yılındaki göl seviyesi ile MÖ 300 yılındaki göl seviyesinin hemen hemen aynı olduğu MS 200-1200 yıllarında maksimum su seviyesine ulaşıldığı belirtilmiştir. 1200 yılından sonra kurak iklim etkisini göstermiş ve 1430 yılında göldeki en düşük su seviyesi gözlenerek

1550-1800 tarihleri arasında gölde su seviyesi düşmeye devam etmiştir. 1550-1800 yılları arasında yaşanan iklim koşulları günümüzde yaşanan iklim koşullarına göre daha kurak olmasına rağmen son 40 yılda yaşanan göl seviyesindeki değişimin (857 m'den 844 m'ye düşmüş) sebebinin iklim kaynaklı değil insan kaynaklı faaliyetlerin olduğu ortaya konulmuştur.

Keskin, vd. (2015), Eğirdir ve Burdur göllerinin su seviyesi değişimlerini incelemek amacıyla göllerin aylık ve yıllık su potansiyeli verileri kullanılarak Run homojenlik testine tabi tutulmuştur. Daha sonra Mann Kendall ve Sen analizleri yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda Burdur Gölü için gerekli tedbirlerin alınmadığında su seviyesindeki azalmanın 100 yıl içinde 31,5 m olacağı belirtilmiştir. Gölün ortalama derinliğinin 6 m olduğu düşünüldüğünde 20 yıl sonra Burdur Gölü'nün tamamen kuruyacağı belirtilmiştir.

Göncü, vd. (2016), Burdur, Eğirdir, Sapanca ve Tuz Göllerinin su seviyelerinin zamansal olarak değişim miktarları parametrik olmayan istatistiksel metotlar ile incelemiştir. 1943-2005 yılları arasında ölçümü alınan göl su seviyelerindeki değişimlerin mevsimsel davranışların etkisinin giderildiği Seasonal-Kendall ve giderilmediği Man-Kendall yöntemleri ile eğilim analizleri yapılmıştır. Bu analizler ile göllerin seviyelerindeki değişimin sebebinin iklimsel veya antropojenik etki olduğu ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda Tuz Gölü'nün su seviyesinde önemli bir değişikliğin olmadığı, Burdur ve Eğirdir Göllerinin seviyelerinin azaldığı, Sapanca Gölü'nde ise su seviyesinin arttığı belirlenmiştir. Burdur Gölü'nün eğilim analizleri sonuçlarına göre su seviyesi azalmasının sezonsal etkilerle olmadığı belirlenmiş olup su seviyesindeki azalmanın sebebini antropojenik etkiler olduğu ileri sürülmüştür.

Gözükara, vd. (2019), tarafından yapılan çalışmada Burdur Gölü seviyesinin azalması sonucunda bazı iklimsel parametreler arasındaki ilişkiyi değerlendirmek ve karasal ortama çıkan lakustrin (yeni arazi parçaları) materyallerin zamana bağlı konumsal ve alansal dağılımları tespit edilmiştir. Burdur Gölü'nün alanı 1975 yılında 211,01 km², 2017 yılında ise 130,11 km² olarak belirlenmiş olup göl hacminin % 38,34 oranında küçüldüğü hesaplanmıştır. 1975 yılından 2017 yılına kadar 14,36 m su seviye kaybı oluşmuştur. Yaşanan su kaybı ile göl alanının küçülmesinden kaynaklı olarak 80,90 km² güncel lakustrin materyalin çıktığı ortaya konulmuştur. Göldeki su seviyesindeki düşüşün iklimsel parametreler ile arasındaki ilişki incelendiğinde sıcaklık ve toplam buharlaşma

arasında yüksek korelasyon tespit edilirken toplam yağış ile arasında herhangi bir korelasyon tespit edilememiştir.

Taş, vd. (2021) Göller Yöresinde bulunan Acıgöl, Akgöl, Burdur Gölü, Karataş Gölü, Salda Gölü ve Yarışlı Gölü için 1985-2021 yılları arasındaki göllerde yaşanan seviye değişiklikleri uzaktan algılama yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma ile göllerde yaşanan genel seviye değişimlerinin yanında mevsimsel seviye değişimleri de belirlenmiştir. İnceleme tarihleri arasında elde edilen sonuçlara göre Salda Gölü dışındaki göllerin suyla kaplı alanlarının % 40 veya daha fazlasını kaybettiği ortaya konulmuştur. Göller Yöresinde 1985-2021 yılları arasında oransal olarak en fazla su kaybına uğrayan göller sırasıyla Acıgöl (% 80,6), Karataş Gölü (% 64,8), Yarışlı Gölü (% 49,7), Burdur Gölü (% 40,1) ve Salda Gölü (% 5) olarak belirlenmiştir.

Li, vd. (2022), Xilin Nehir Havzasındaki 1998-2019 tarihleri arasında doğal koşullar ve insan faaliyetlerinin hidrolojik döngü üzerindeki etkisini araştırmak için SWAT modelini kullanmıştır. İnsan faaliyetlerinin etkisinin olduğu bir dönemde havzanın doğal akışı SWAT modeli ile modellenerek yüzey akışında önemli bir azalma tespit edilmiş ve havzadaki yüzey akışındaki azalmanın % 68'ine karşılık geldiğini belirtmiştir. Ayrıca insan faaliyetlerinin kısa vadeli kuraklık üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve aynı dönemde kuraklığın başlamasında belirli bir geciktirici etkinin olduğunu göstermiştir. Uzun süreli kuraklık durumunda ise insan faaliyetleri kuraklık düzeyini çok az değiştirdiği belirtmiştir.

Sheng, vd. (2023), çalışmasını büyük ölçekli rezervuarların bulunduğu bölgelerde iklim değişikliği ve insan faaliyetlerinin hidrolojik döngüyü etkilemesi üzerine yapmıştır. Meteorolojik veriler dikkate alınarak 1970-1989 referans dönemi ve 1999-2018 test dönemi olarak eşit uzunlukta 2 döneme ayrılmıştır. İklim verileri ve rezervuar çalışma koşulları birleştirilerek 4 farklı senaryo üzerinde çalışılmış ve SWAT modeli ile modellenmiştir. SWAT modelindeki mevcut rezervuar modülünün sınırlı olmasından dolayı çalışma kapsamında “dispatch function (dağıtım fonksiyonu)” kullanılmış ve modele entegre edilmiştir. Rezervuarların işletilmesinin havzadaki yüzey akış hacminde belirli bir azalmaya yol açtığını ancak iklim değişikliğinin yüzey akışı üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır.

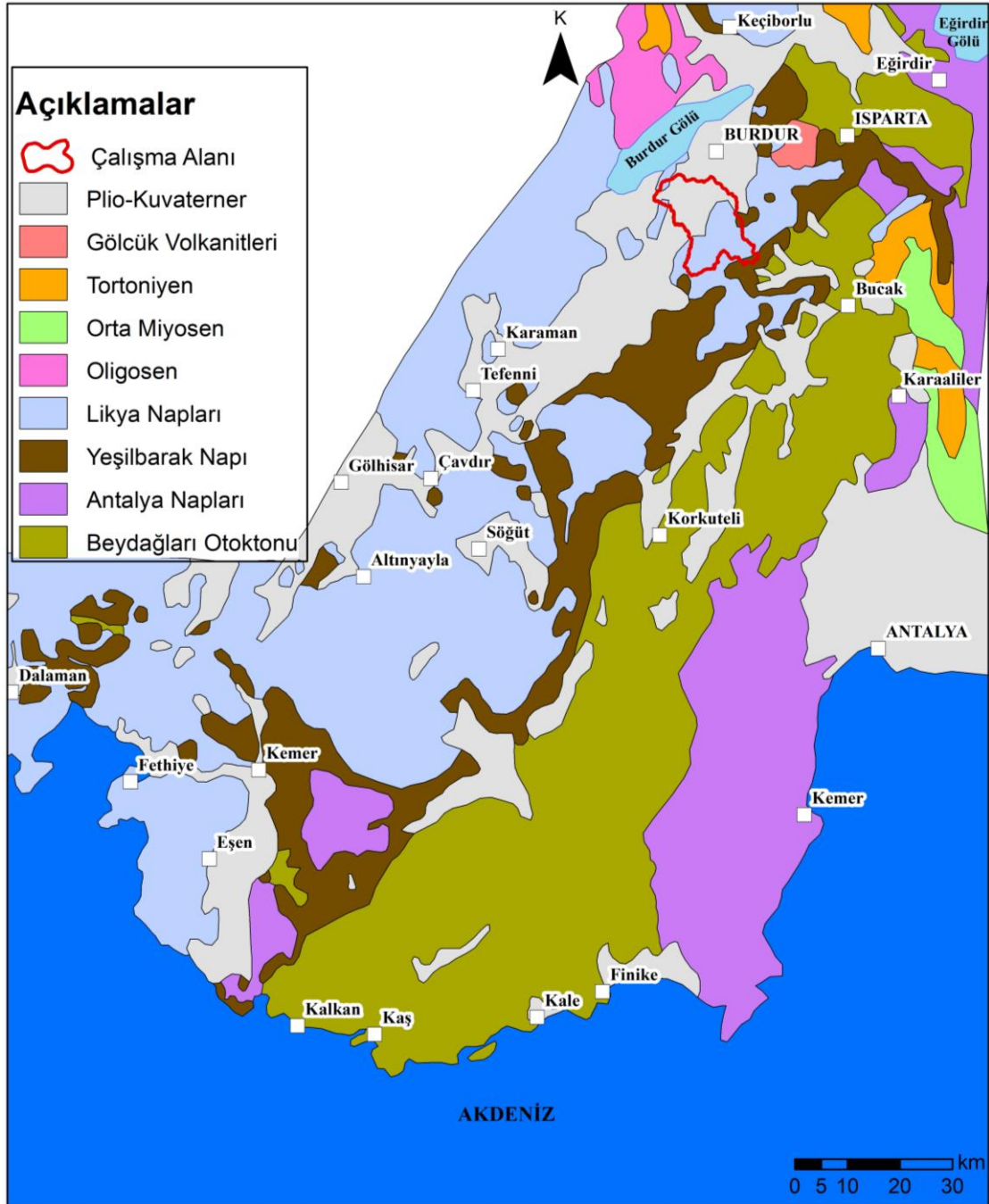
Germeç (2023), yapmış olduğu Doktora çalışmasında gelecek iklim değişikliği ve antropojenik faaliyetlerin Burdur Gölü seviyeleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu

kapsamda yeraltısuyu ve yüzey suyu akış modelleri geliştirilmiştir. Gelecekteki iklim değişiklikleri, yeraltısuyu ve yüzey suyu kullanımlarındaki değişikliklerde Burdur Gölü seviyesinde meydana gelecek olan etkilerinin ortaya koymak için Ocak 2019 - Aralık 2064 (46 yıl) yılları arasında 3 senaryo 6 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Gelecek iklim değişikliği verilerinde RCP 4.5 ile RCP 8.5 senaryoları kullanılmıştır. Geliştirilen birinci senaryonun 2 simülasyonunda sadece iklim değişikliği, ikinci senaryonun 2 simülasyonunda iklim değişikliği ve yeraltısuyu pompajı değerlendirilmiştir. Aralık 2064 tarihinde her iki senaryoda da göl su seviyesi, alanı ve hacminin Aralık 2018 tarihindeki verilere göre azaldığı tespit edilmiştir. Üçüncü senaryonun 2 simülasyonunda iklim değişikliği ve yüzeysularının göle ulaştığı durum değerlendirilmiştir. Simülasyonlar sonucu göl su seviyesi, alanı ve hacminin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

2 JEOLJİ

2.1 Genel Jeoloji

Ülkemizin güneybatısında Menderes Masifi, Likya Napları, Beydağları Otoktonu ve Antalya Napları olarak adlandırılan tektonik birlikleri yüzeylenmektedir. Likya Napları ve Beydağı Otoktonu arasında devamlılık gösteren ve ara zon durumunda olan Yeşilbarak Napına ait birimler yüzeylenmektedir (Şekil 6) (Şenel, 2004).



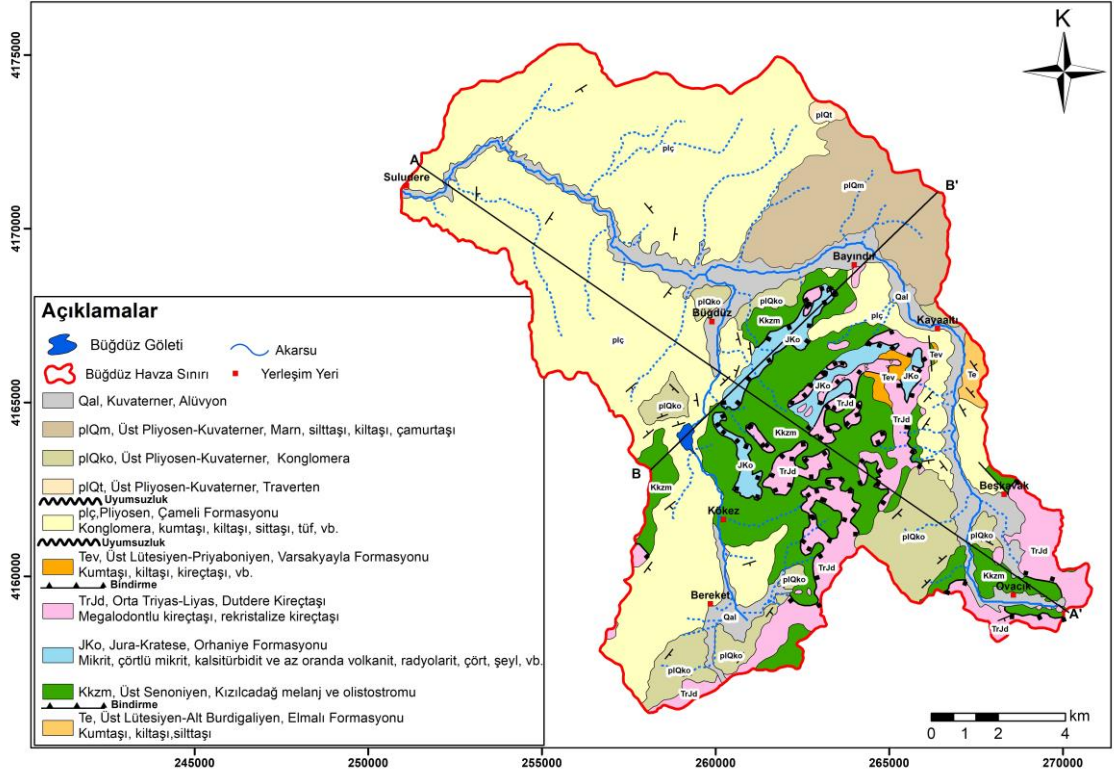
Şekil 6 Batı Torosların Tektonik Birlikleri (Şenel, 2004)

2.2 Çalışma Alanının Jeolojisi

Çalışma alanında, allokton konumlu kaya birimlerinden oluşan Yeşilbarak Napı ve Likya Naplarına ait birimler yüzeylemektedir (Şekil 6). Paraallokton konumlu Üst Lütesiyen-Priyaboniyen yaşlı Varsakyayla Formasyonu (Tev) ve Neotokton konumlu Pliyosen yaşlı Çameli Formasyonu (plç) ve Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşlı kayaçlar yer almaktadır (Şekil 7). Bu çalışmada Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığınca 1997 yılında basılmış olan 1/100.000 ölçekli Isparta-M24 paftasının 2. Baskısından yararlanılmıştır.

	YAŞ	SEMBOL	AÇIKLAMALAR
Neotokton Örtü Kayaçları	Kuvaterner	Qal	Alüvyon
	Üst Pliyosen-Kuvaterner	plQm	Marn, silttaşı, kiltası, çamurtaşı
		plQko	Konglomera
		plQt	Traverten
Pliyosen	plç	Çameli Formasyonu Konglomera, kumtaşı, kiltası, silttaşı, tüf, vb.	
Paraallokton	Üst Lütesiyen-Priyaboniyen	Tev	Varsakyayla Formasyonu Kumtaşı, kiltası, kireçtaşı, vb.
Likya Napı	Kretase	JKo TrJd Kkzm	Bindirme Orta İriyas-Liyas, Duldere Kireçtaşı (TrJd) Megalodontlu kireçtaşı, rekristalize kireçtaşı Jura-Kretase, Orhaniye Formasyonu (JKo) Mikrit, çörtlü mikrit, kalsitürbidit ve az oranda volkanit, radyolarit, çört, şeyl, vb. Üst Senoniyen Kızılcaadağ melanj ve olistostromu (Kkzm)
Yeşilbarak Napı	Üst Lütesiyen-Alt Burdigaliyen	Te	Bindirme Elmalı Formasyonu Kumtaşı, kiltası, silttaşı

Şekil 7 Çalışma Bölgesine ait Stratigrafik kesit (MTA, 2010)



Şekil 8 Büğdüz Havzası Jeoloji Haritası (MTA, 2010)

2.2.1 Yeşilbarak Napına Ait Birimler

Likya napı ve Beydağları otoktonu arasında uzun mesafelerce süreklilik gösteren ve ara zon konumunda olan Yeşilbarak napı, iki yapısal birimden oluşmaktadır. Alt birimini Gömbe, üst birimini ise Yavuz birimi oluşturmaktadır. Çalışma alanında Gömbe birimine ait geç Lütesiyen - Erken Burdigaliyen yaşlı türbiditik kumtaşı ve şeyllerden oluşan Elmalı formasyonu yüzeylenmektedir. Yavuz birimine ait kaya birimleri çalışma alanında ayırtılamamış ve bunlar Elmalı Formasyonu (Te) olarak haritalanmıştır (MTA, 2010).

2.2.2 Likya Naplarına Ait Birimler

Çalışma alanında Marmaris ofiyolit napı, Gülbahar napı ve Domuzdağ napı ile temsil edilen Likya napları, Erken Langiyen döneminde Beydağları otoktonu üzerine yerleşmiştir.

2.2.2.1 Marmaris Ofiyolit Napı

Yapısal olarak Yeşilbarak napının üzerinde Gülbahar ve Domuzdağ napları altında bulunan Marmaris ofiyolit napı, çalışma alanında Kızılcaadağ melanj ve olistostromu ile temsil edilmektedir.

Kızılcadağ Melanj ve Olistostromu (Kkzm)

Poisson (1977) tarafından adlandırılmış olan ofiyolitli melanj ve olisrostromla temsil edilen birim serpantinit, serpantinleşmiş harzburgit, dunit vb. kaya türlerinden oluşmaktadır. Birim Gülbahar ve Domuzdağ naplarına ait kayalar içermektedir (MTA, 2010).

2.2.2.2 Gülbahar Napı

Yapısal olarak Gülbahar napı, Marmaris ofiyolit napı üzerinde, Domuzdağ napı altında bulunmaktadır. Çörtlü kireçtaşlarından oluşan ve oldukça kıvrımlı ve kırıklı yapıya sahip olan birim ilk olarak Poisson (1977) tarafından “Gülbahar Ünitesi”, Şenel vd. (1989) tarafından “Gülbahar Grubu”; Şenel ve Bölükbaşı (1994) tarafından “Turunç Birimi” adıyla tanımlanmıştır (Arslan, 2023). Bu alanda Gülbahar napının yalnızca Orhaniye formasyonu haritalanabilmiştir.

Orhaniye Formasyonu (JKo)

Meşhur vd. (1989) tarafından adlandırılan Orhaniye formasyonu radyolarit-çört-şeyl (tabakalı çört üyesi) ara düzeyli çörtlü mikritlerden oluşmaktadır. Kızılcadağ melanj ve olistostromu üzerine tektonik olarak gelmiştir (Poisson, 1977; Yalçinkaya, vd. 1986; Çakmak, 2016). Kaya türü benzerliği nedeniyle Gülbahar napının tabanını oluşturan Orta-Geç Triyas yaşlı Orluca formasyonu, çoğu alanda Orhaniye formasyonundan ayırtlanamamıştır (MTA, 2010).

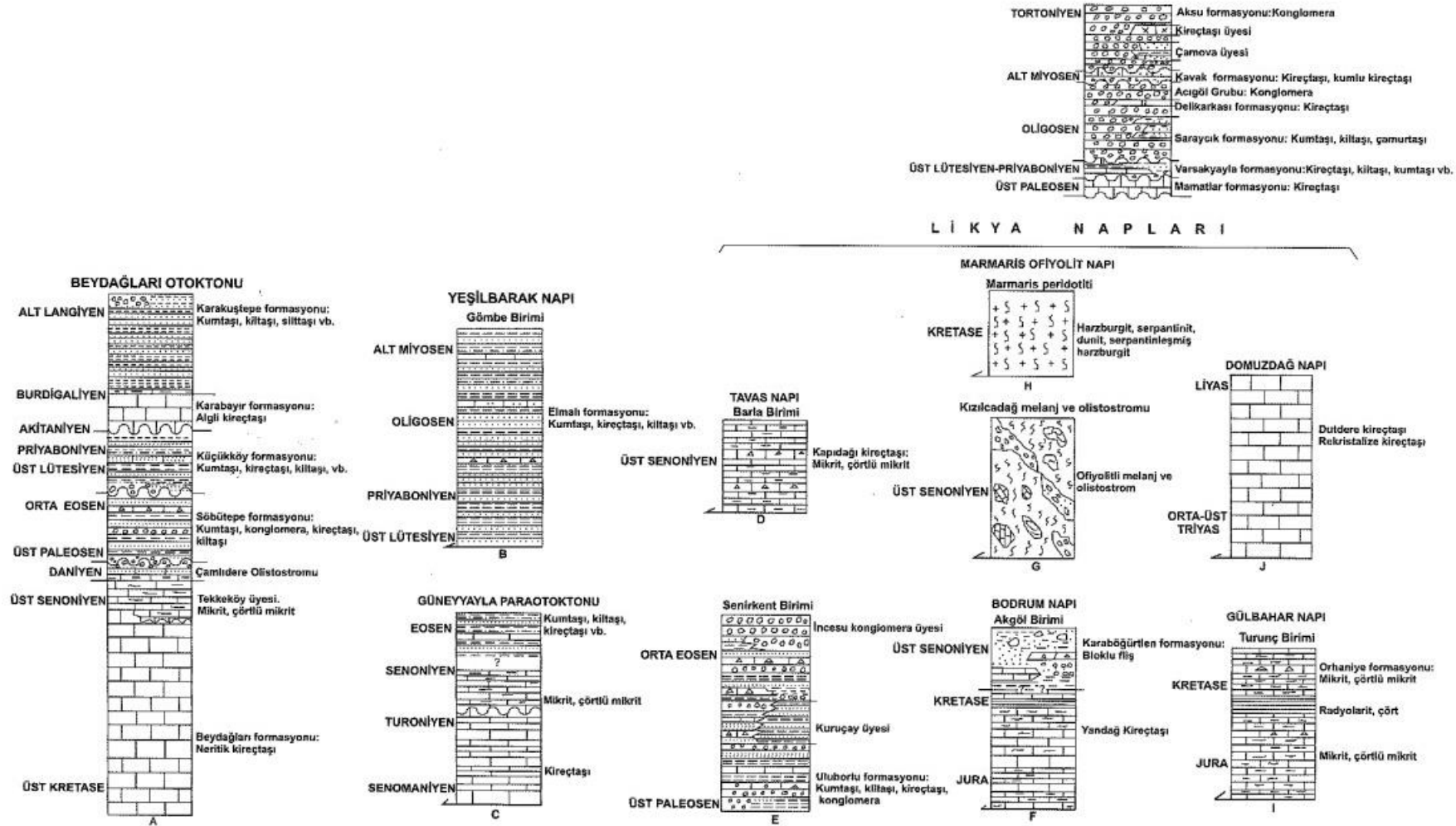
2.2.2.3 Domuzdağ Napı

Domuzdağ napı genel olarak OrtaTriyas-Liyas yaşlı kristalize kireçtaşları (Dutdere kireçtaşı) ile temsil edilmekte olup Likya naplarının en üst yapısal birimidir.

Dutdere Kireçtaşı (TRJd)

Poisson (1977) tarafından Domuzdağı Formasyonu olarak adlandırılan birim daha sonra Ersoy (1989,1990) tarafından Dutdere Kireçtaşı olarak adlandırılmış (Şenel vd., 1989; Bilgin vd., 1990) ve bu tanıma bağlı kalınmıştır (Arslan, 2023). Bölgede aktif ve yoğun tektonizmanın etkisiyle bindirmeler ile yüzeye çıkan Dutdere kireçtaşları kendisinden daha genç birimler ile birlikte görülmektedir (Çakmak, 2016).

Birim orta-kalın tabakalı, yer yer masif, gri-beyaz yer yer megalodontlu ya da algi rekrystalize kireçtaşlarından oluşmaktadır.



Şekil 9 Bölgedeki otokton allokon, paraotokton ve paraallokon konumlu kaya birimlerinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesitleri (MTA, 2010)

2.2.3 Paraalloktonlar

Likya napları üzerinde 4 kez transgresiyon gelişmesine bağlı olarak Mamatlar formasyonu (Üst Paleosen), Varsakyayla formasyonu (üst Lâtesiyen-Priyaboniyen), Acıgöl grubu (Oligosen) ve Kavak formasyonu (Alt Miyosen) gelişmiştir. Çalışma alanında Varsakyayla formasyonu haritalanmıştır.

Varsakyayla Formasyonu (Tev)

Birim ince-orta-kalın tabakalı, bej, gri, yeşilimsi gri, açık kahve, kirli sarı vb. renklerde kireçtaşı, kumlu-killi kireçtaşı ara düzeyli kumtaşı, kıltaşı ve siltaşlarından oluşmakta olup bazen konglomera düzeylerine de rastlanmaktadır (MTA, 2010).

Varsakyayla formasyonu, Mamatlar formasyonu ile Likya napları üzerinde açısız uyumsuz olarak bulunmaktadır. Formasyon üstte Acıgöl grubu tarafından uyumsuz olarak örtülmüştür (MTA, 2010).

2.2.4 Neotokton Örtü Kayları

Bölgedeki neotokton örtü kaya birimleri, Tortoniyen yaşlı molas karakterindeki Aksu formasyonu ve Pliyosen- Kuvaterner yaşlı farklı karasal oluşumundaki tortullardan oluşmaktadır. Çalışma alanında Pliyosen-Kuvaterner yaşlı örtü birimleri haritalanmıştır.

Çameli Formasyonu (plç)

Pliyosen yaşlı Çameli formasyonu, ince-orta-kalın tabakalı, beyaz, kirli beyaz, kirli sarı, açık gri, yeşil vb. renklerde kıltaşı, kumtaşı, marn, konglomera ve siltaşlarından oluşmaktadır. Birim içinde yer yer tilf ve tilfit düzeyleri izlenmektedir. Burdur çevresinde birim içinde orta-kalın tabakalı, bej, krem renkli, gözenekli karbonat düzeyleri (Alt Kireçtaşı üyesi, plçk₁) ile üstte ince-orta-kalın tabakalı, kirli sarı, bej, krem, açık kahve renkli kireçtaşı ve travertenler (Kireçtaşı üyesi, plçk) yer almaktadır (MTA, 2010).



Şekil 10 İnceleme alanında Çameli formasyonunu temsil eden tabakalı, beyaz, renkli kumtaşı, marn, konglomera ve silttaşı seviyeleri

Çameli formasyonu Likya napları üzerinde açısız uyumsuz olarak bulunmaktadır. Üstten Kuvaterner yaşlı birimler tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Bilgin, vd. 1990). Birimin kalınlığı, bölgede 0-650 metre arasında değişmektedir.



Şekil 11 Bügdüz Gölü çevresinde yüzeylenen Kızılcaadağ Melanj ve Olistostromu ile Çameli Formasyonu dokanağı

Adlanmamış Pliyo-Kuvaterner Travertenleri (plQt)

Gevşek tutturulmuş yuvarlak çakıllı konglomera, kumtaşı ve çamurtaşlarından oluşmaktadır. Eski akarsu ve göl kenarı oluşuklarıdır. Birim Geç Pliyosen-Pleyistosen yaşlı kabul edilmiştir.

Adlanmamış Pliyo-Kuvaterner Konglomeraları (plQko)

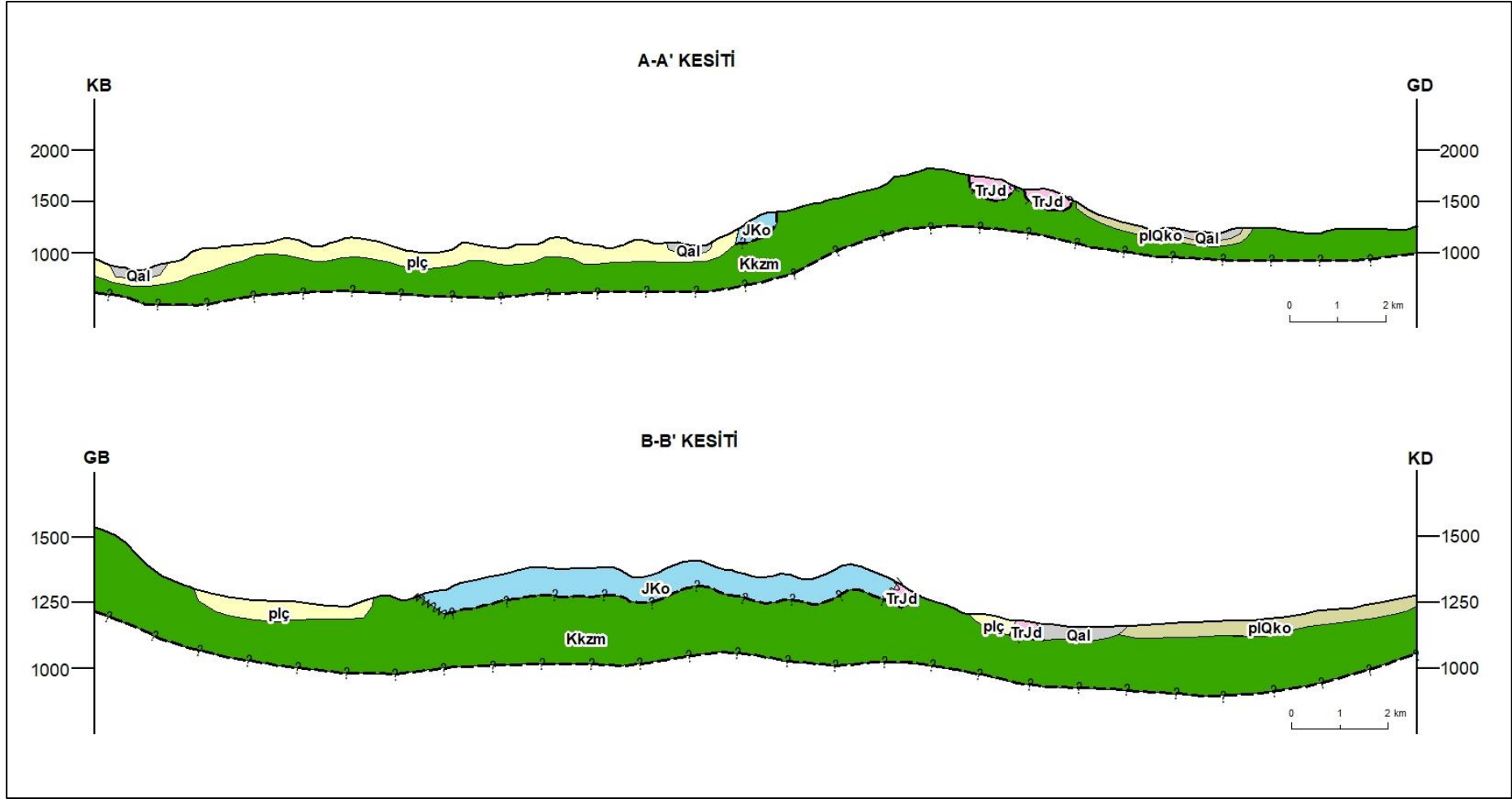
Gevşek tutturulmuş karasal karakterde polijenik konglomeralardan oluşmaktadır.

Adlanmamış Pliyo-Kuvaterner Marn, Siltaşı, Kilitaşı, Çamurtaşı (plQm)

Yer yer çakıllı, gevşek tutturulmuş marn, siltaşı, kilitaşı ya da çamurtaşlarından oluşmaktadır.

Alüvyon (Qal)

Nehir yataklarında veya deltasında ve göl kenarlarındaki çakıl, kum, kil, silt ve çamur birikimlerinde oluşmaktadır.



Şekil 12 Çalışma alanına ait jeolojik kesitler

2.3 Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri

Hidrojeolojik özellikler, jeolojik birimlerin yapısal ve litolojik özellikleri ile daha önceden bölgede yapılmış çalışmalarda belirlenen birimlerin geçirimsizliği, gözeneklilik yapısı, kalınlığı, yayılımı ve akifer olma durumu birlikte değerlendirilerek belirlenmiştir. Litolojik birimlerin akifer olabilme potansiyelleri ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak taneli ortam akifer, karstik akifer, akitard ortam ve akifüj ortam olarak sınıflandırma yapılmıştır (Şekil 13).

2.3.1 Taneli Ortam Akiferi

Çalışma alanında bulunan Üst Pliyosen - Kuvaterner ve Kuvaterner yaşlı farklı derecelerde yuvarlaklaşmış çakıllardan ve ova kenarlarında gevşek, az yuvarlak, köşeli veya yuvarlak çakıl ile az oranda kum ve çamurtaşlarından oluşan birimler yeraltısuyunu depolayan ve verimi fazla olan yaygın verimli akiferi temsil etmektedir. 2016 yılında DSİ tarafından yapılan Hidrojolojik Etüd Raporunda, akiferin yeraltısuyu verimlilik derecesinin orta olduğu ve özgül debinin 0,5 l/s/m ile 2 l/s/m arasında değiştiği belirtilmiştir. Akiferin çalışma alanındaki yayılımı 49,67 km²'dir.

2.3.2 Karstik Akifer

Orta Triyas - Liyas yaşlı Dutedere kireçtaşı bölgedeki aktif ve yoğun tektonik aktiviteler sonucu Kızılcadağ Melanj ve olistostromu içerisinde ayırtılarak yüzeylenmiştir. Kırık - çatlak ve erime boşluklarına sahip olan Dutedere kireçtaşı birimi, yeraltısuyunu bünyesinde bulundurması ve suyun hareketine izin vermesinden dolayı karstik akifer olarak değerlendirilmektedir. Akiferin yeraltısuyu verimlilik derecesinin iyi olduğu ve özgül debinin 2 l/s/m'den büyük olduğu belirtilmiştir (DSİ, 2016). Çalışma alanının güney ve güneybatısında yüzeylenen Dutedere kireçtaşının yayılımı 19,06 km²'dir.

2.3.3 Akitard Ortam

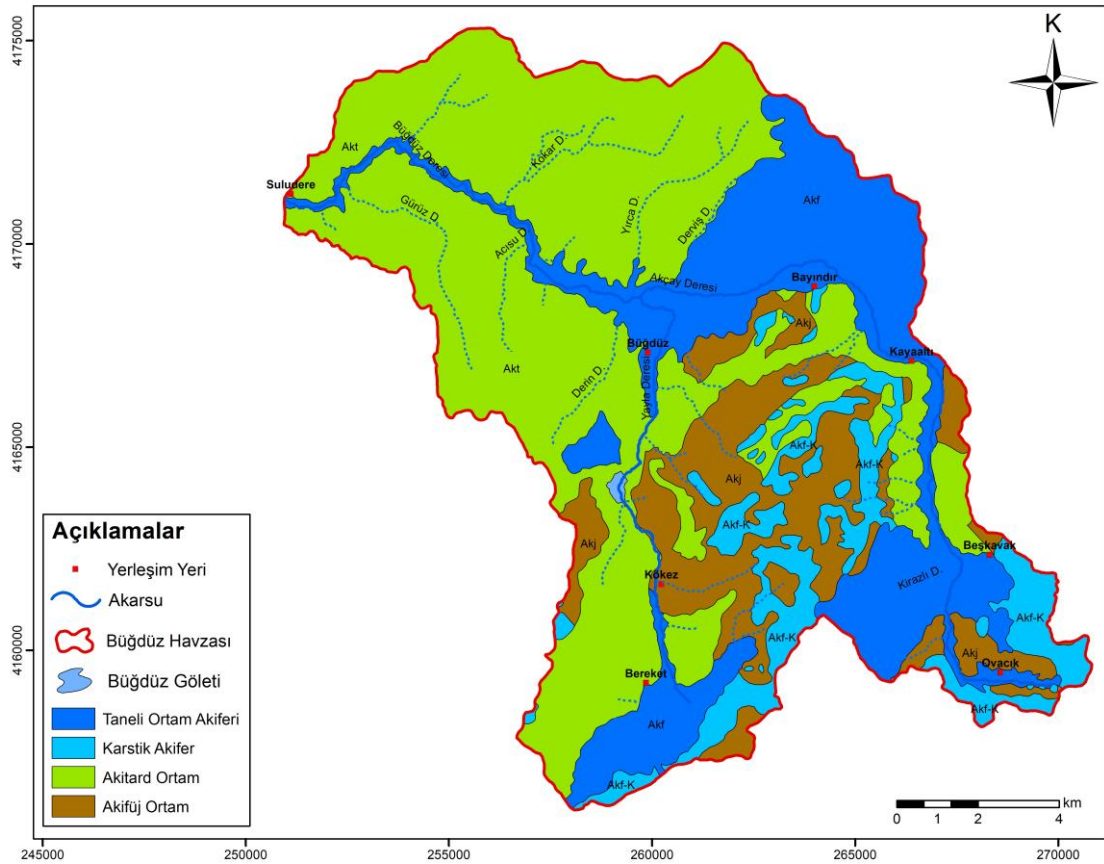
Kızılcadağ ofiyolitlerin içerisinde yüzeylenen bazik volkanit, radyolarit, çört, şeyl ara düzeyli çörtlü mikrit ve dolomitik kireçtaşlarından oluşan Orhaniye formasyonu, içerisindeki kalsitürbidit seviyeleri ve dolomitik kireçtaşları az miktarda su bulundurabilselerde volkanitler, radyolarit-çört-şeyl ara düzeyli çörtlü mikritler su bulundurma özelliğine sahip olmadığı için akitard ortam olarak değerlendirilmektedir (Çakmak, 2016).

Çalışma alanını da kapsayan Burdur Gölü Alt Havzası için yapılan jeofizik rezistivite etüdünde, birçok noktada ölçüm yapılmıştır. Gerek bu ölçüm sonuçlarına gerekse Burdur Gölü Alt Havzasında açılmış çok sayıda DSİ sondaj kuyu verilerine göre Pliyosen çökellerin kalınlığı 300 m'den fazla olabildiği ortaya konulmuş olup akiferin verimlilik derecesinin orta olduğu ve özgül debinin 0,5 l/s/m ile 2 l/s/m arasında değiştiği belirtilmiştir (DSİ, 2016). Ancak formasyon içerisinde bulunan kiltası, marn ve killi kireçtaşı seviyelerinin geçirimsiz olmasından dolayı birimin akifer özelliği kısıtlanarak akitard ortam olarak değerlendirilmektedir (Çakmak, 2016).

Çalışma alanının geniş alanını kaplayan ve akitard ortam olarak değerlendirilen Pliyosen yaşlı Çameli Formasyonu ve daha az yayılıma sahip Orhaniye Formasyonunun çalışma bölgesindeki yayılımı 100,44 km²'dir.

2.3.4 Akifüj Ortam

Genel olarak çalışma alanının güney ve güneybatısında yüzeylenen Kızılcadağ Melanj ve olistostromu, Varsakyayla formasyonu ve Elmalı formasyonu geçirimsiz birimler olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 13 Çalışma alanındaki birimlerin hidrojeolojik özellikleri

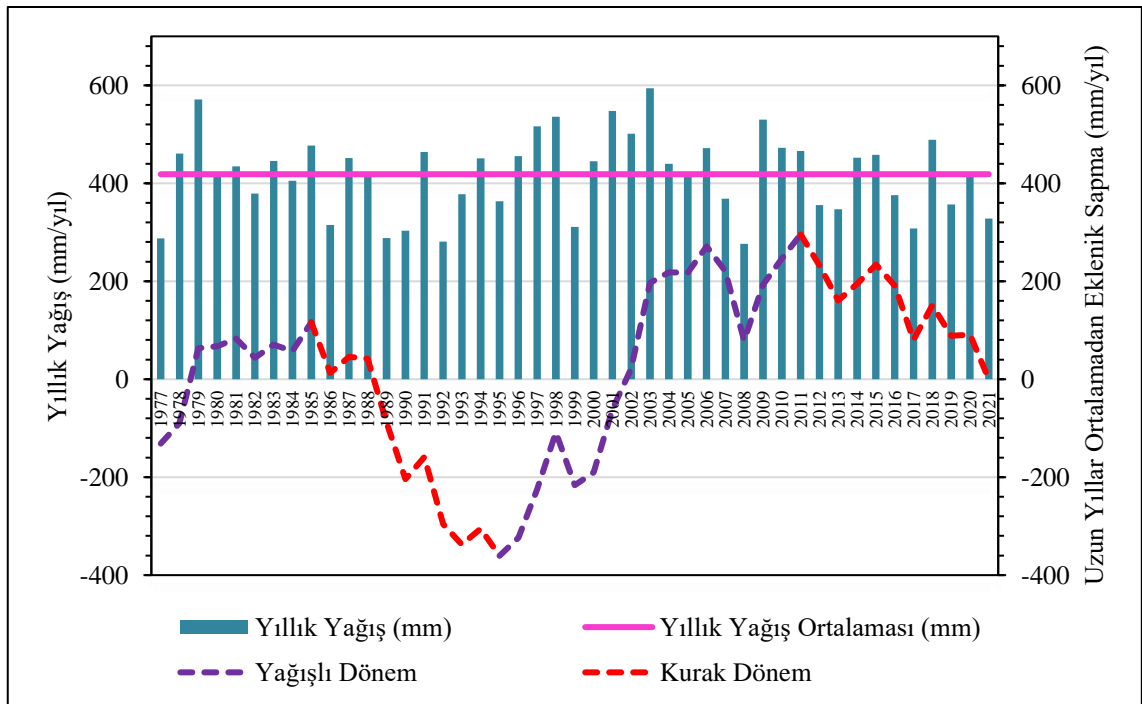
2.4 Hidroloji

Bügdüz Havzasının çevresinde bulunan Burdur MGI'nin uzun yıllara ait meteorolojik ölçüm verilerinden yararlanılarak havzanın hidrolojik özellikleri değerlendirilmiş ve bölgeye ait su bütçe bileşenleri Thornthwaite- Matter yöntemi ile hesaplanmıştır.

Çalışma alanı içerisinde yer alan DSİ tarafından işletilen D10A027 nolu Bügdüz D. (Suludere) isimli Akım Gözlem İstasyonunun (AGİ) 1978-2018 yılları arasındaki ölçüm verileri değerlendirilmiştir.

2.4.1 Yağış

Burdur MGI'ye ait 1977 - 2021 yılları arasındaki verilerine göre Temmuz ayı yağış ortalaması 15,15 mm, Ocak ayı yağış ortalaması 51,88 mm, yıllık yağış ortalaması 418,45 mm'dir. Aylık yağış değerleri incelendiğinde, en yüksek yağış değerleri Aralık - Ocak ayları arasında olduğu en düşük yağış değerlerinin Temmuz - Eylül ayları arasında gözlenmektedir.



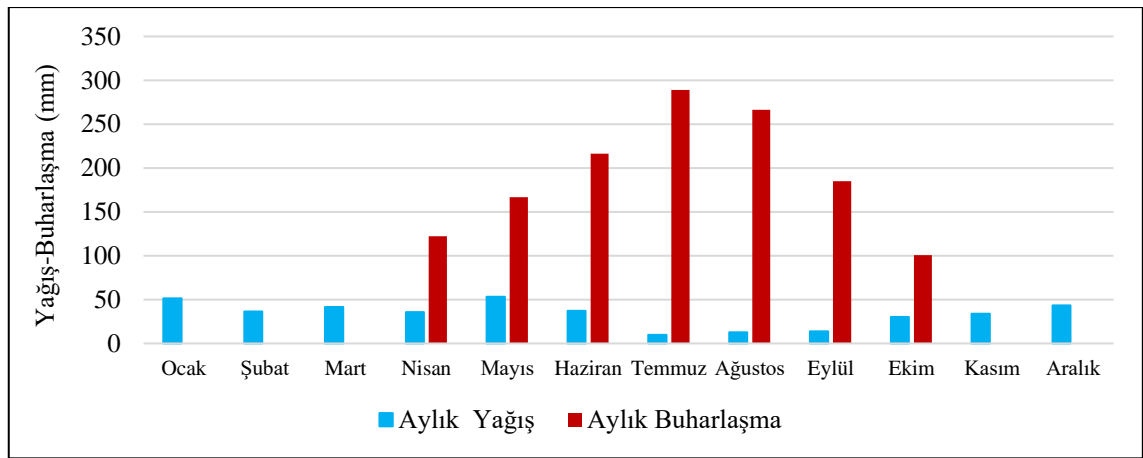
Şekil 14 Burdur MGI'de 1977 - 2021 yılları arasında gözlenmiş yıllık yağışlar

Burdur MGI'nin yağışın zaman içindeki değişimini anlamak için, 1977 - 2021 yılları arasında gözlenmiş yıllık yağış verilerinden eklenik sapma grafiği çizilmiştir. 1977 - 1985 yılları arasında yıllık yağışın artış eğiliminde, sonraki 10 yıl (1986 - 1995) boyunca yağışın düşüş eğiliminde ve 16 yıl (1996 - 2011) artış eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır.

2007 - 2008 yılları arasında Türkiye genelinde meydana gelen kuraklıktan dolayı yağış kısa süreliğine düşüş eğilimine girmiştir (Kurnaz, 2014). 2012 - 2021 yılları arası yıllık yağışın düşüş eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır.

2.4.2 Buharlaşma-Terleme

Serbest yüzey buharlaşması 2007 - 2020 yılları arasında Burdur MGİ tarafından Nisan ve Ekim aylarında ölçülmüş ve en yüksek buharlaşmanın Temmuz ayında meydana geldiği anlaşılmaktadır. Çalışma bölgesinde Nisan ve Ekim aylarındaki aylık toplam yağış ve buharlaşma ortalama değerleri karşılaştırıldığında Temmuz ayında ortalama buharlaşmanın ortalama yağıştan yaklaşık 30 kat daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 15 Burdur MGİ aylık ortalama yağış ve buharlaşma değerleri

Suyun sıvıdan gaz (su buharı) formuna dönüştüren sürece buharlaşma (evaporasyon); bitkilerin topraktan su alması ve yapraklarından havaya su buharı bırakması sürecine terleme (transpirasyon) adı verilir. Suyun buharlaşma ve terleme yoluyla kara yüzeyinden atmosfere doğru hareket ettiği tüm süreçlerin toplamına ise evapotranspirasyon adı verilmektedir (USGS, 1991). Evapotranspirasyon, potansiyel ve gerçek olmak üzere iki şekilde değerlendirilmektedir. Potansiyel evapotranspirasyon (ETp), su temininin kısıtlanmadığı varsayımı altında belirli bir bölgede elde edilebilecek maksimum evapotranspirasyonu ifade eder ve yağış ile birlikte bölgesel kuruma ve ıslanma koşullarını belirlemektedir (Li, vd. 2022). Gerçek evapotranspirasyon (ETg) ise yağış ve zemindeki mevcut nem ile kısıtlı olup ETp'den az olabilmektedir.

Evapotranspirasyon değerinin ölçümü büyük su ve kara kütlelerinde günümüz için mümkün değildir. Potansiyel evapotranspirasyonu hesaplamak için birçok teorik ve

ampirik model geliştirilmiş ve çalışma kapsamında en yaygın kullanılan metotlardan biri olan Thornthwaite - Matter (1948) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılmıştır.

Aylık sıcaklık ortalama değerine göre ETp değeri aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

$$1) T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \text{ETp} = 0$$

$$2) 0 \leq T \leq 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \text{ETp} = 16x \left(\frac{10T}{I} \right)^a x b$$

$$3) T > 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \text{ETp} = -415,85 + 32,24 x T - 0,43 x T^2$$

Burdur MGI'nin 1977 - 2021 yılları arasında gözlemlenen aylık ortalama sıcaklık değerleri $0 \leq T \leq 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ arasında olduğu için 2. Thornthwaite eşitliği kullanılarak potansiyel buharlaşma-terleme (ETp) hesaplanmıştır (Çizelge 3) (Thornthwaite, 1948).

$$\text{ETp} = 16x \left(\frac{10T}{I} \right)^a x b$$

Bu eşitliğe göre;

ETp: Aylık potansiyel evapotranspirasyon (mm)

T: Aylık ortalama sıcaklık ($^\circ\text{C}$)

I: Yıllık sıcaklık indeksi

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \text{ olmak üzere}$$

$$I = \sum_{n=1}^{n=12} i_n \text{ 'dir.}$$

b: Enlem düzeltme katsayısı

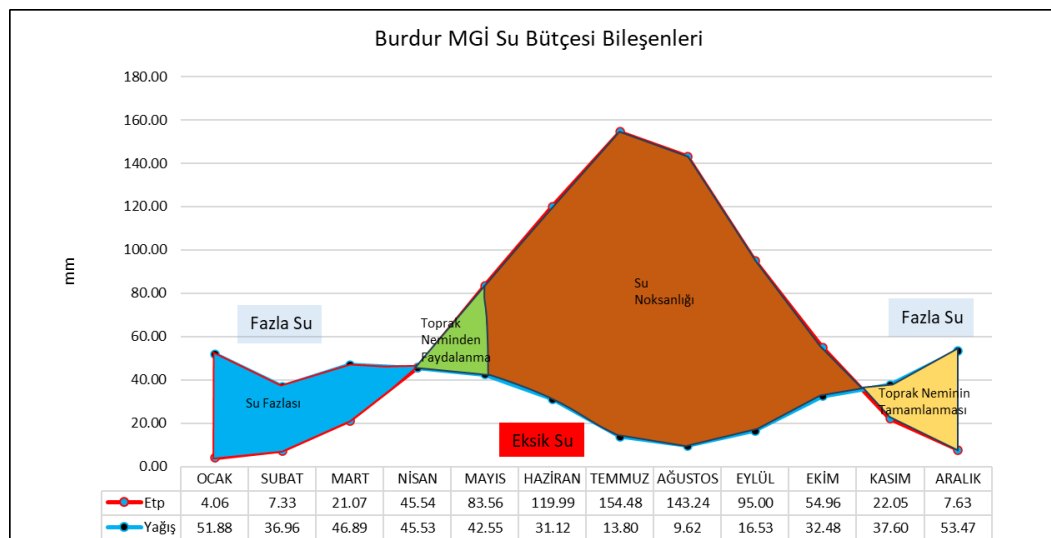
$$a = (6,7510x10^{-7} x I^3) - (7,7110x10^{-5} x I^2) + (1,791 x 10^{-2} * I) + 0,49239$$

Enlem düzeltme katsayısı (b), Aylık evapotranspirasyonun hesaplanmasında kullanılmakta olup ortalama güneşlenme süresine göre hazırlanmış bir değerdir. Thornthwaite tarafından çizelge olarak yayınlanmış ve çalışma kapsamında kullanılmıştır (Thornthwaite, 1948).

Çizelge 3 Thornthwaite yöntemi ile Burdur MGİ için hesaplanmış aylık ETp değerleri

Burdur MGİ	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)	Enlem Düzeltme Katsayısı (37°)	ETp (mm)
Ocak	2,60	0,86	4,06
Şubat	3,97	0,84	7,33
Mart	7,16	1,03	21,07
Nisan	11,68	1,10	45,54
Mayıs	16,56	1,22	83,56
Haziran	21,16	1,23	119,99
Temmuz	24,93	1,25	154,48
Ağustos	24,76	1,17	143,24
Eylül	20,35	1,03	95,00
Ekim	14,52	0,97	54,96
Kasım	8,45	0,85	22,05
Aralık	4,12	0,83	7,63

Thornthwaite methodu ile Burdur MGİ için yıllık toplam ETp değeri 758,93 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 16 Burdur MGİ verileri ile Thornthwaite yönteminde hesaplanan ortalama aylık ETp - Yağış değişimi

Yağışların ETp'den yüksek olduğu aylarda (Ocak, Şubat, Mart, Kasım, Aralık) yağışın etkisi ile zemindeki su miktarı eksilmemektedir. Sıcaklığında artması ve yağışların azalması sonucu ETp'nin yağıştan büyük olduğu dönemlerde suya olan ihtiyaç yağışlardan karşılanamadığı için toprak neminden karşılanmaktadır. Mayıs ayından Ekim ayının ortalarına kadar düşük yağış ve yüksek buharlaşmadan dolayı su eksikliği oluşmaktadır. Ekim ayının yarısından sonra yağışların artmasıyla birlikte toprak nemi tamamlanmaya başlamaktadır.

2.4.3 Su Bütçesi

İnceleme alanındaki su bütçesinin hesaplanabilmesi için aylık bazlı ampirik bir yaklaşım olan Thornthwaite - Mather (1955) su bütçe bileşen yaklaşımından faydalanılmıştır. Bu yaklaşımda, toprak zonunda aylık bazda, yağış, buharlaşma - terleme ve depolamadaki değişim arasında bir denge oluşturulmuş, depolama tam kapasitede iken fazla su, akış ve süzülme olarak değerlendirilmiştir.

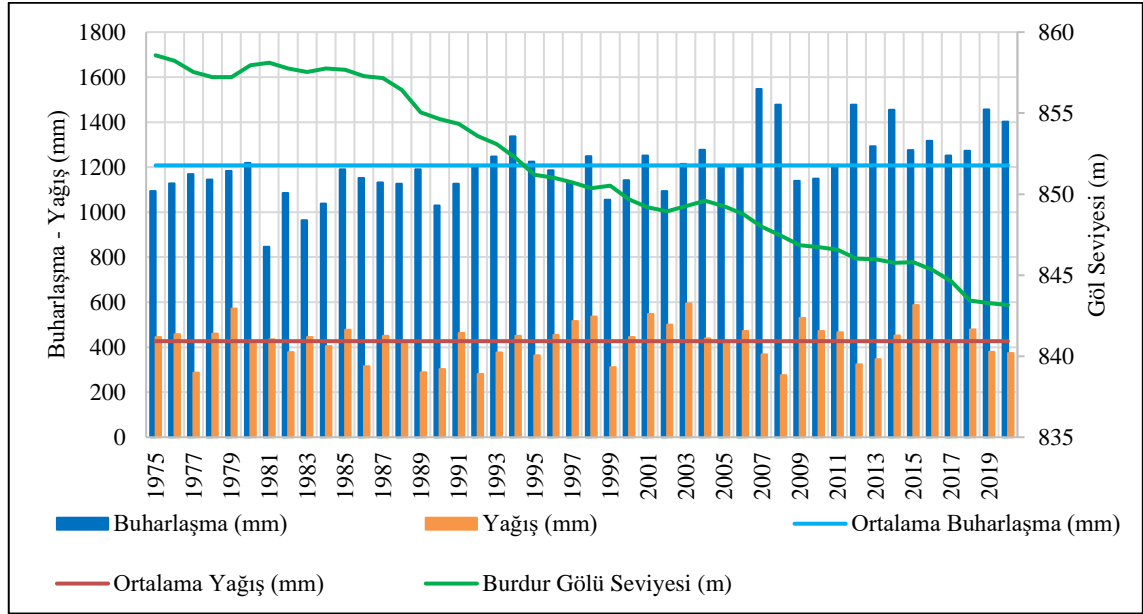
Thornthwaite eşitliği kullanılarak elde edilen ETp değeri ve Burdur MGI'ye ait 1977 - 2021 yılları toplam ortalama aylık yağış değerleri kullanılarak su bütçesi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada yıllık toplam ortalama yağış 418,45 mm olan bölge için yıllık toplam ortalama 353,78 mm suyun buharlaşma ve terleme yoluyla atmosfere döndüğü anlaşılmaktadır. Aylık ortalama en yüksek gerçek buharlaşma değeri 154,48 mm ile Temmuz ayında, en düşük ise 4,06 mm ile Ocak ayında meydana gelmiştir. Yıllık rezerv su miktarı 535,92 mm iken yıllık dönemde eksik su miktarı 405,14 mm, fazla su miktarı ise 103,27 mm olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4 Burdur MGI'ye için hesaplanan Thornthwaite - Mather su bütçesi çizelgesi

	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK	TOPLAM
Sıcaklık (T)	2,60	3,97	7,16	11,68	16,56	21,16	24,93	24,76	20,35	14,52	8,45	4,12	
Yağış (P)	51,88	36,96	46,89	45,53	42,55	31,12	13,80	9,62	16,53	32,48	37,60	53,47	418,45
Potansiyel Buharlaşma Terleme(ETp)	4,06	7,33	21,07	45,54	83,56	119,99	154,48	143,24	95,00	54,96	22,05	7,63	758,93
Rezerv Su	100,00	100,00	100,00	99,99	58,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,55	61,39	
P- ETp	47,82	29,63	25,82	-0,01	-41,01	-88,87	-140,68	-133,62	-78,48	-22,48	15,55	45,84	-340,48
Gerçek Buharlaşma Terleme(ETg)	4,06	7,33	21,07	45,54	83,56	90,11	13,80	9,62	16,53	32,48	22,05	7,63	353,78
Eksik Su	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,89	140,68	133,62	78,48	22,48	0,00	0,00	405,14
Fazla Su	47,82	29,63	25,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,27
Akış	23,93	26,78	26,30	13,15	6,58	3,29	1,64	0,82	0,41	0,21	0,10	0,05	103,27

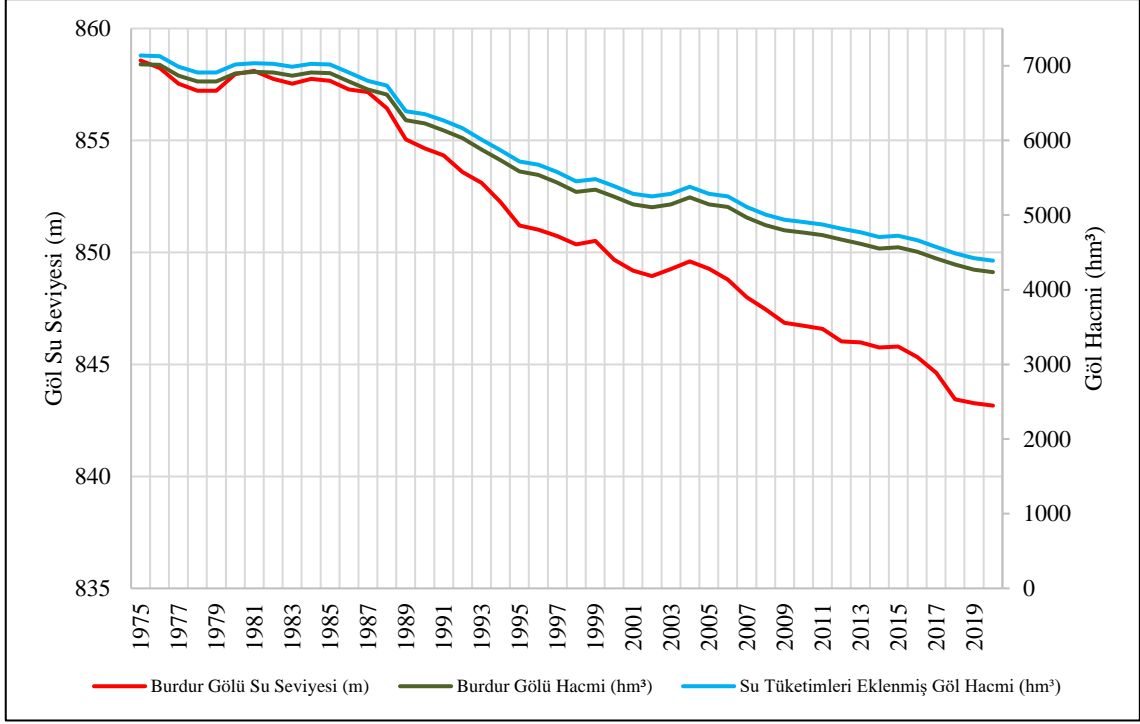
2.4.4 Akış

Burdur Gölü'nün 1975 yılında ki göl alanı 223,96 km² olarak ölçülürken 2020 yılında 137,49 km² olarak ölçülmüştür. 1975-2020 yılları arasında yaklaşık olarak % 40 oranında göl alanında küçülme meydana gelmiştir. Burdur MGI'nin yıllık buharlaşma ve yağış değerleri ile Burdur Gölü su seviyesi incelendiğinde 2007 yılına kadar yağış ve buharlaşma değerlerinde ciddi farklar gözlenmemesine rağmen göl su seviyesinin düşmeye devam ettiği görülmektedir. 2007 yılından sonra yıllık buharlaşma değerlerinde artışların meydana geldiği ancak yağış değerlerinde büyük farkların olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumun sebebi 2007-2008 yılında ülkemiz genelinde yaşanan kuraklığın etkisi olarak değerlendirilebilmektedir. Yıllık yağış değeri ortalama yağış değerinin altına düştüğünde yıllık buharlaşma değerlerinde artışın meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 17 Burdur Gölü su seviyesi, yıllık buharlaşma ve yağış ilişkisi

1985 yılına kadar göl su seviyesi iklimsel koşullara bağlı olarak artış ve azalış göstermesine rağmen 1985 yılından sonra yağışlı dönemlerde bile göl su seviyesinde düşüşler gözlenmiştir. Havzadaki mevcut su tüketiminin 1989 yılından sonra arttığı gözlenmektedir. Pınarlık, vd. (2023), havzadaki su tüketiminin “tarımsal sulamalar, yüzey ve yeraltı suyu kullanımı, içme suyu kayıpları, baraj ve göletlerde depolamalardan doğan kayıpların toplamı” olarak nitelendirmiştir. Bu durumda göl seviyesi ve havzadaki mevcut su tüketimi arasında ters orantılı ilişkinin olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 18 Burdur Gölü seviyesi ve göl hacmi ilişkisi (Pınarlık, vd. 2023)

Pınarlık, vd. (2023) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 1975 yılında göl hacmi 7.018,97 hm³ olarak ölçülürken 2020 yılında 4.236,02 hm³ olarak ölçülmüş ve 45 yılda göl hacminde yaklaşık % 40 (2.782,95 hm³) oranında kayıp olduğu ve 45 yılda yıllık ortalama 61,84 hm³ su kaybının olduğu hesaplanmıştır. Havzada kullanılan net su miktarı 1975 yılında 118,85 hm³, 2020 yılında 153,61 hm³ olarak belirlenmiş ve su tüketim miktarının 45 yılda % 30 (34,76 hm³) oranında arttığı ve 45 yılda yıllık ortalama 0,77 hm³ su tüketimin olduğu hesaplanmıştır. Bu veriler birlikte değerlendirildiğinde Burdur Gölü'ndeki su kayıplarını açıklamaya su kullanımının tek başına yeterli olmayacağı anlaşılmaktadır.

Burdur İl Tarım ve Orman Müdürlüğünden temin edilen bilgilere göre Burdur Göller Havzasında; 3 adet baraj, 15 adet gölet ve 1 adet depolama yapısı bulunmaktadır)-(Çizelge 5).

Çizelge 5 Burdur Göller Havzasında yer alan su yapıları (DSİ, 2021)

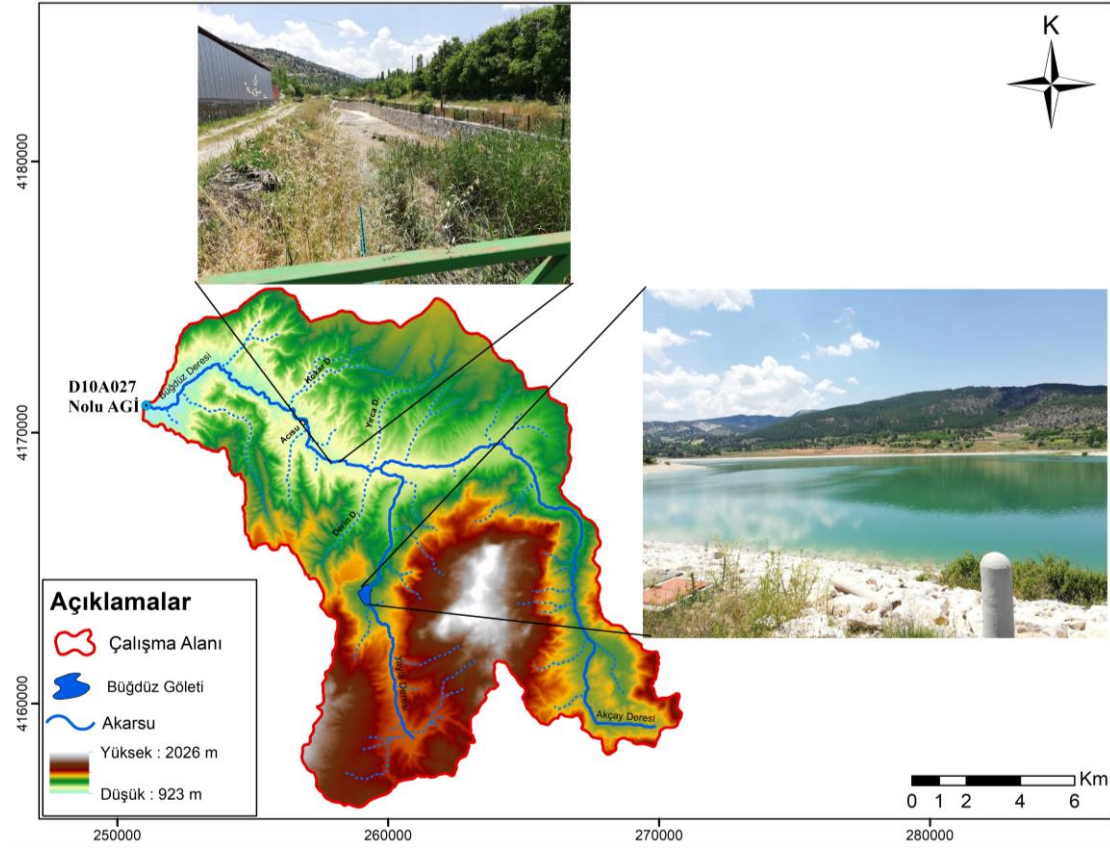
Adı	Depolama/Baraj/ Gölet	İli / İlçesi	İnş. Başl.Yılı	İnş. Bitiş Yılı	İşletmeye Alındığı Yıl	Akarsu Adı	Max.Göl Hacmi (hm ³)	Min.Göl Hacmi (hm ³)	Max Alan (km ²)	Min Alan (km ²)	
Belenli	Gölet	Burdur-Kemer	1986	1990	1990	Belenli	2.02	0.10	0.35	0.17	
Dereköy		Burdur-Yeşilova	1979	1981	1981	Dereköy	0.26	0.06	0.04	0.01	
Tefenni		Burdur-Tefenni	1988	1990	1990	Yayla ve Çampınar Dereleri	1.21	0.07	0.19	0.04	
Değimendere		Burdur-Yeşilova	1998	2006	2006	Değimendere	1.35	0.10	0.14	0.02	
Çaylı		Burdur-Tefenni	2012	2014	2014	Baynaz Deresi	2.92	0.92	0.23	0.13	
Bügdüz		Burdur-Merkez	2012	2014	2016	Yayla Deresi	2.03	0.61	0.20	0.01	
Kayı		Burdur-Kemer	2013	2014	2015	Yunusoğlu	1.53	0.27	0.20	0.06	
Beyköy		Burdur-Tefenni	2014	2016	2015	Yayla Deresi	2.37	0.27			
Azziye Kocapınar		Burdur-Merkez	2014	2016	2016	Küçük Demirli	1.22	0.05	0.12	0.02	
Doğanbaba		Burdur-Yeşilova	1991	1997	1997	Doğanbaba Deresi	1.02	0.09	0.16	0.03	
Kayadibi		Burdur-Yeşilova	2016	2018	2018	Ardıçoluk Deresi	0.82	0.02	0.15	0.01	
Kozluca		Burdur-Merkez	1995	1999		Kozluca Deresi	1.27	0.16	0.17	0.04	
Askeriye		Burdur-Merkez				Değimendere Deresi	1.09				
Alanköy		Burdur-Yeşilova				Akçaköy Deresi	1.70				
Gökçebağ		Burdur-Merkez	1987	1989		Boğaz Deresi	1.19				
Karamanlı		Baraj	Burdur-Karamanlı	1970	1974	1987	Değimendere	24.81	1.06		
Bademli			Burdur-Karamanlı	1993	1996	1999	Bademli	6.59	0.42		
Karaçal			Burdur-Merkez	1992	2012	2013	Bozçay	76.00	12.50		
Karataş Depolaması	Depolama	Burdur			1974	Bozçay, Bademli Deresi	60.74	4.60	14.60	3.93	
TOPLAM							190.16	21.29	16.55	4.46	

DSİ 18. Bölge Müdürlüğünden alınan veriler doğrultusunda Burdur Göller Havzasında yer alan su yapılarına ilişkin bilgiler Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelgeye göre Burdur Göller Havzasında sadece su yapılarında tutulan ve/veya tutulması planlanan toplam maksimum hacimin 190,16 hm³, minimum hacmin ise 21,29 hm³ olduğu ve 2000 yılından sonra işletmeye alınan su yapılarında maksimum hacmin 88,25 hm³, minimum hacmin ise 14,74 hm³ olduğu anlaşılmaktadır. Karataş Depolaması haricinde 2000 yılı öncesinde işletmeye alınan su yapılarında maksimum hacmin 41,17 hm³, minimum hacmin ise 1,65 hm³ olup bu değer 2006 - 2018 yılları arasında işletmeye alınan su yapılarının maksimum hacimlerinin yarısından daha azdır.

Su yapılarının etkisiyle meydana gelen su kayıplarını değerlendirmek için Burdur Göller Havzasının alt havzalarından bir olan Bügdüz Havzası çalışma alanı olarak seçilmiştir. 2014 yılında inşaat çalışmaları biten ve 2016 yılında sulamaya başlayan Bügdüz Göletinden önce ve sonrası için hidrolojik model geliştirilerek havzaya olan etkisi araştırılmaya çalışılmıştır. DSİ, (2010) Burdur-Merkez Bügdüz Göleti Planlama Raporunda, Bügdüz Göletine su sağlayan Yayla Deresinin yıllık ortalama akımın 2,33 hm³/yıl olduğu belirtilmiştir. Bügdüz Göletinin 4,5 km mansabında Yayla Deresi, Bügdüz Deresine katılmaktadır. Yayla Deresi üzerinde AGİ bulunmadığı için modelde Bügdüz Deresinin AGİ verileri kullanılacaktır (Şekil 19).

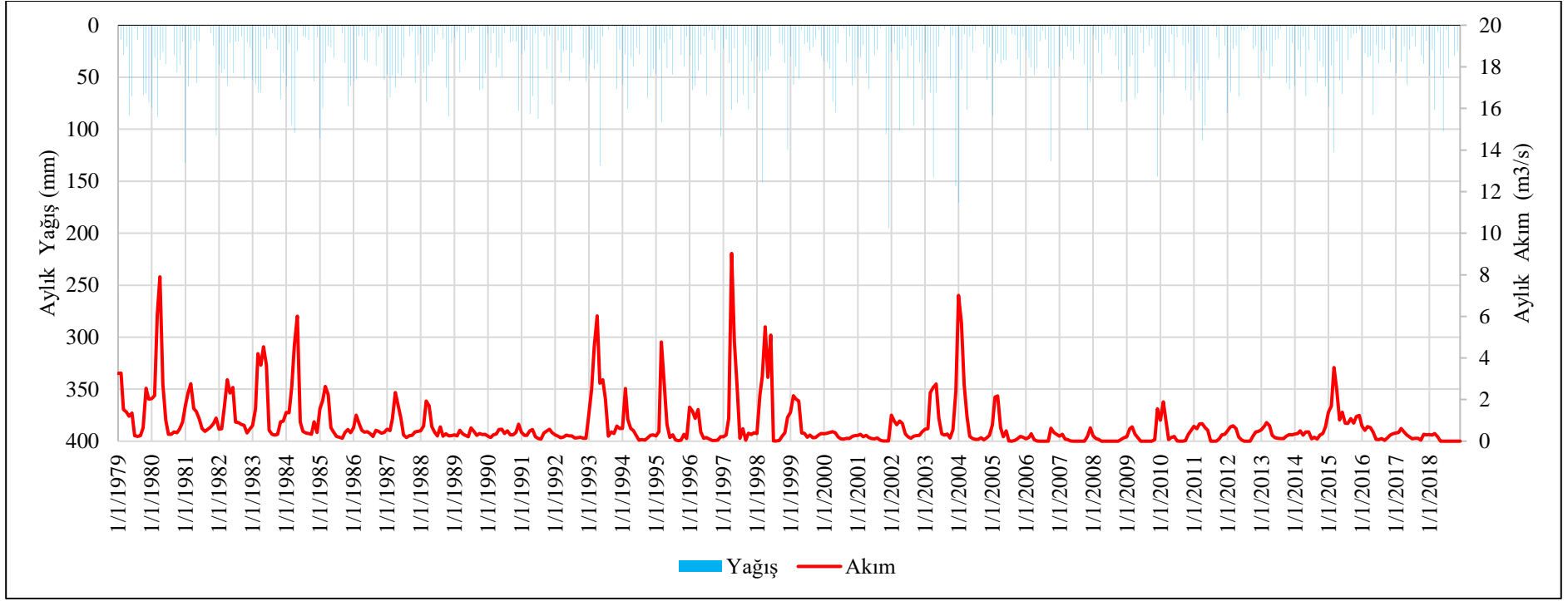
DSİ tarafından işletilen D10A027 nolu Bügdüz D. Suludere isimli AGİ, 1978 yılında işletmeye açılmış olup Nisan ayında ilk ölçüm verisini kaydetmiştir. 1978 - 1989, 1991 - 1996, 1998 - 2001 ve 2004 - 2018 (Nisan 2018 tarihinden sonra ölçüm verisi

bulunmamaktadır) yılları arasında ölçüm yapılmıştır. 2002 yılında meydana gelen taşkından etkilenen istasyon, 2004 su yılının başında mansaba taşınmıştır. Tahrip olduğu su yıllarında (2002 ve 2003) günlük debi ölçümü yapılamamış ve AGİ kesitinde müteferrik debi ölçümleri alınmıştır. Mansaba alınması ile birlikte daha önce AGİ'nin mansabında kalan sulama kanalı membada kalmıştır. Yani 2004 su yılına kadar AGİ'nin akımlarına dahil olan sulama kanalı akımları, 2004 su yılından itibaren ayrı değerlendirilmeye başlanmıştır (DSİ, 2010).



Şekil 19 Çalışma Alanı içinde yer alan D10A027 Nolu AGİ ve Bügdüz Göletinin yeri

Bügdüz Deresi AGİ ölçüm süresinde aylık minimum akım değeri $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ve en yüksek akım değeri $9,03 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak ölçülmüştür. 1988 - 1993 ve 2005 - 2015 yılları arasındaki akım değerlerinin diğer ölçüm yıllarına kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Düşük akımların sebebi mevsimsel koşullar ve su kullanımları olarak yorumlanabilmektedir.



Şekil 20 Büğdüz Deresi aylık ortalama akım değerleri (m³/s)

3 MATERYAL VE METOD

3.1 Giriş

İnsan kaynaklı yapıların etkilerini görmek üzere Burdur Gölü Havzasının alt havzası olan Büğdüz Havzasında kurulmuş olan Büğdüz Göletinin etkisi araştırmaya konu olmuştur. Büğdüz Göletinin bulunduğu ve bulunmadığı dönemlerin karşılaştırılması için çalışma kapsamında hidrolojik model kullanılmıştır.

3.2 SWAT Hidrolojik Modeli

İnsan faaliyetleri ile iklim değişikliği arasındaki etkileşim, nehir akış değişimleri üzerinde birleşik bir etkiye sahiptir (Omer, vd. 2016). İklim değişikliği sonucu artan kuraklık ve sel afetlerinin etkilerinden korunmak için insan müdahalesinin artmasına ve özellikle nehirler üzerinde yapılan su yapılarının artmasına sebep olmuştur. Baraj ve göletlerin varlığı ile bölgede sulama faaliyetleri değişiklik göstererek arazi kullanımında değiştirmektedir (Sheng, vd. 2023). Sonuç olarak su kaynaklarının yönetimi ve planlaması için iklim değişikliği ve insan kaynaklı faaliyetlerin akış ve havza beslenimi üzerindeki etkilerinin anlaşılması önem taşımaktadır.

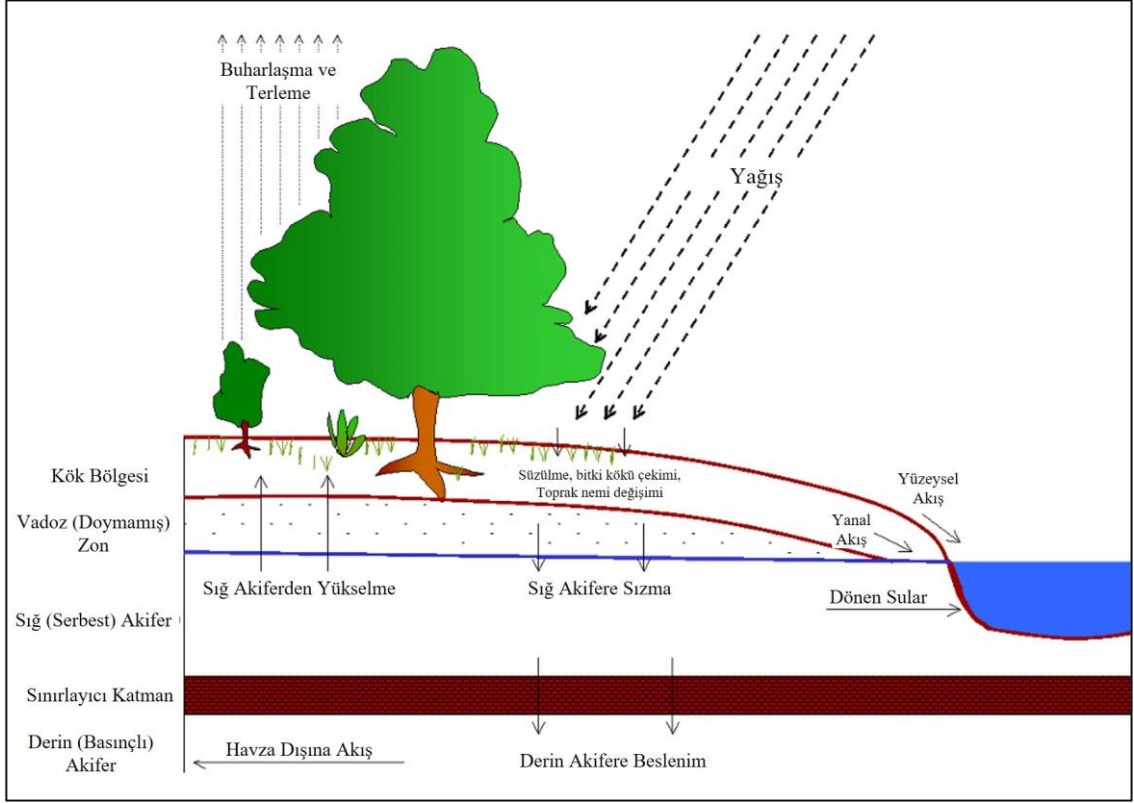
Son yıllarda yapılan birçok çalışma, havzalar üzerindeki insan faaliyetleri ve iklim değişikliklerinin hidrolojik etkilerinin birbiriyle ilişkili olduğunu ve ayrımın kolayca yapılamayacağını ortaya koymuştur (Liu, vd. 2004; Xu, vd. 2013; Zhang, 2006; Wang, 2014; Yan, 2015; El-Khoury, 2015; Omer, 2016). Hidrolojik etkilerin değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler kullanılmakta olup bu yöntemlere istatistiksel yöntemler, iklim duyarlılık analizi, dağıtılmış hidrolojik modeller, vb. örnek verilebilir. Bu teknikler arasında meteorolojik koşulları ve arazi kullanım özelliklerini hesaplamaya dahil eden dağıtılmış hidrolojik modeller, etki değerlendirme çalışmaları için en iyi yöntemden biridir (Mango, 2011). Hidrolojik modeller arasında havza ölçeğinde arazi kullanımı/arazi örtüsü değişikliklerine ve iklim değişikliklerini değerlendirmek için yaygın kullanılan yarı-dağıtımlı modellerden biri “Soil and Water Assessment Tool (SWAT)” modelidir. Tez çalışmasının amacı olan insan kaynaklı faaliyetlerin yüzeysuların beslenimine etkisinin ortaya koymak, arazi kullanımındaki değişiklikleri ve su yapılarının akış üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için SWAT modeli çalışma kapsamında kullanılmıştır.

SWAT, iklim ve arazi yönetimi uygulamalarının bir havzanın su miktarı, tortu ve besin yükleri davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için geliştirilmiş ArcGIS arayüzlü, sürekli zamanlı, fiziksel tabanlı (eko)hidrolojik bir modeldir (Arnold, vd. 1998; Abbaspour, vd., 2007). SWAT, sürdürülebilir nehir havzası yönetimi için son derece önemli olan havza su dengesinin tahmin edilmesine olanak tanıdığından, su kaynaklarının ideal yönetimi için çoğunlukla hesaplama verimliliği ve açık erişim nedeniyle, havza ölçeğinde en yaygın kullanılan hidrolojik modellerden biridir (Fu, vd., 2019).

Model çeşitli ölçeklerdeki havzalar üzerindeki iklim ve antropojenik değişikliklerinin fiziksel süreçlerindeki etkilerini izlemek ve tahmin etmek için başarıyla uygulanmaktadır. Ayrıca çevresel koşullar için su kaynakları ve noktasal olmayan kaynak kirliliği sorunlarını değerlendirmede etkili bir araç olduğu gösterilmiştir (Gassman, vd., 2007). SWAT, farklı zaman dilimlerinde havza su dengesi bileşenlerini benzeştirmek için topoğrafya, toprak özellikleri ve arazi kullanımı verilerine ek olarak yağış, hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı ve güneş radyasyonu gibi meteorolojik verilere gereksinim duymaktadır (Al Houry, 2023).

Modelin ana bileşenleri olan hidroloji, iklim, sediman, toprak sıcaklığı, bitki büyümesi, besinler, pestisitler ve tarımsal yönetimi simüle etmektedir (Neitsch, vd., 2011). Buharlaşma ve terleme, süzülme, yüzey akışı, yanal akış, sığ ve derin akifere sızma başlıca modellenen hidrolojik süreçler arasında yer almaktadır (Arnold, vd., 1998).

SWAT ile çalışılan problemin türü ne olursa olsun, model için en önemli adım havzadaki su dengesidir. Pestisitlerin, çökeltilerin veya besin maddelerinin hareketini doğru bir şekilde tahmin etmek için, model tarafından benzeştirilen hidrolojik döngünün havzadaki süreçlere uygun olması gerekmektedir. Model, havzanın hidrolojik döngüsünü iki ana bölüme ayırarak hesaplama yapmaktadır. İlk bölüm hidrolojik döngünün kara aşamasıdır. Bu bölümde oluşturulan her alt havzadaki ana kanala gelen su miktarı, sediment miktarı, besin ve pestisit yüklemelerinin miktarı hesaplanmaktadır. İkinci bölümde ise suyun, çökeltilerin vb. havzanın kanal ağı boyunca çıkışa doğru hareketi olarak tanımlanabilecek hidrolojik döngünün su veya yönlendirme aşaması olup havzanın çıkış noktasına kadar akışa geçen akım modellenmektedir (Neitsch, vd., 2011).



Şekil 21 SWAT modeli hidrolojik döngüsünün şematik gösterimi (Neitsch, vd., 2011)

SWAT modelinde su bütçesi hesaplamaları yapılmakta olup Şekil 21’de verilen hidrolojik döngüdeki parametreler esas alınmaktadır. SWAT modelinin su bütçesi hesaplamalarında dikkate aldığı denklem aşağıdaki şekilde ile ifade edilmektedir.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Burada (değerler günlük olmak üzere);

SW_t : nihai toprak su içeriği (mm)

SW_0 : günün başlangıç toprak su içeriği (mm)

R_{day} : günlük yağış miktarı (mm)

Q_{surf} : gün içindeki yüzey akış miktarı (mm)

E_a : günlük buharlaşma ve terleme miktarı (mm)

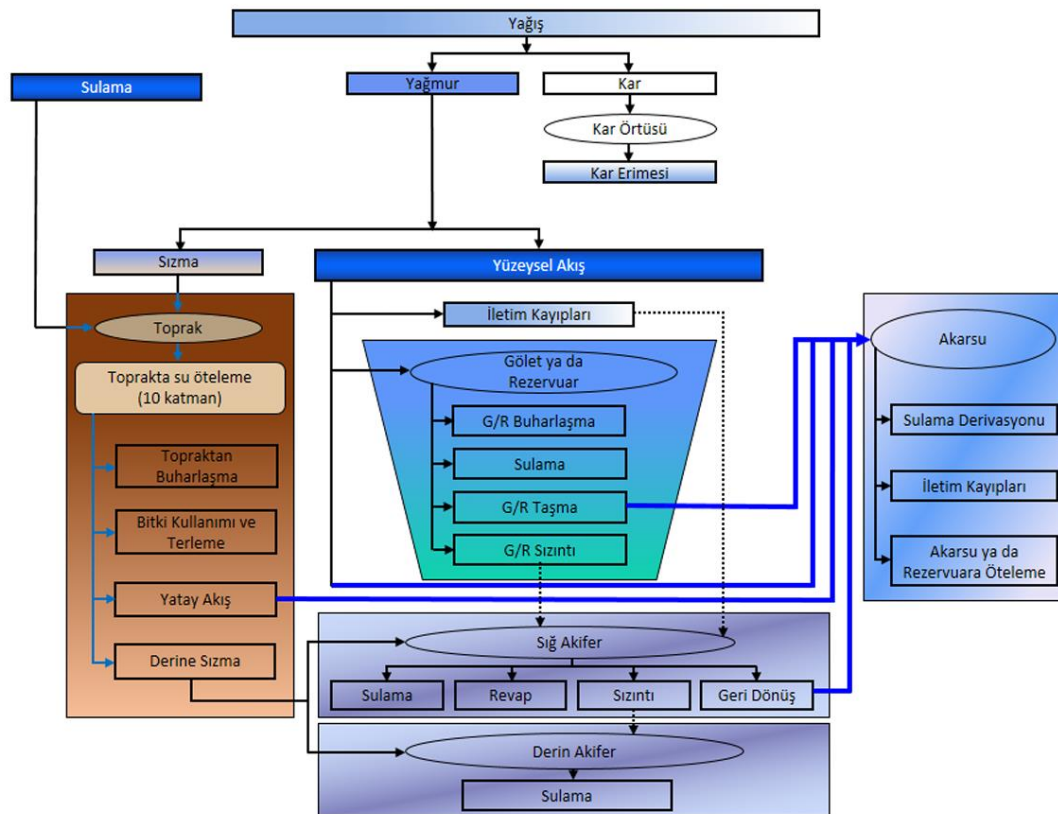
W_{seep} : sızan su miktarı (mm)

Q_{gw} : geri dönüş su miktarı (mm)

t : zaman (gün)

olarak tanımlanmaktadır (Neitsch, vd., 2011).

Yağış hızı ve miktarına bağlı olarak toprağa düşen sular süzülme yoluyla toprağa sızar veya yüzeysel akışa geçmektedir. Toprağa sızan su, toprakta tutulabilir ve daha sonra buharlaşabilir veya yer altı akış kanalları boyunca akifere ve/veya akarsuya katılır. SWAT modeli kurulumu esnasında oluşturulan hidrolojik müdahale birimlerinde (HRU) benzeştirilen potansiyel su hareketi yolları Şekil 22’te gösterilmiştir.



Şekil 22 SWAT modelinde su hareketinin oluşturduğu fiziksel süreçler (Neitsch, vd.,2011;Cüceloğlu, 2019)

Yüzeyle düşen yağışın hızı infiltrasyon oranını aştığı durumlarda yüzeysel akış meydana gelmektedir. Kuru olan toprak için başlangıçta infiltrasyon hızı yüksek iken toprak nemlendikçe infiltrasyon hızı yavaşlayacaktır. Bu durumda yüzeysel akış artacaktır. SWAT, yüzey akışını tahmin etmek için saatlik ve günlük zaman olarak iki yöntem kullanılabilir. Bunlar; günlük zaman dilimi olan SCS eğri numarası (Soil Conservation Service Curve Number) prosedürü (SCS, 1972) ve saatlik zaman dilimi Green & Ampt sızma yöntemidir (1911).

- SCS CN, akışı tahmin etmek için benimsenen en yaygın yöntemdir ve yağış yoğunluğunu ve süresini dikkate almaz, yalnızca toplam yağış hacmini dikkate almaktadır (Kuwanjima, 2013).
- Green & Ampt yöntemi zamana dayalı bir modeldir ve yağış yoğunluğu ve süresi ile sızma süreçlerinin etkilerini simüle edebilmektedir (Kuwanjima, 2013).

Çalışma kapsamında günlük veriler kullanıldığı için yüzeysel akış hesabı için SCS CN yöntemi seçilmiş ve uygulanmıştır. Kannan ve diğ., (2006) yapmış oldukları çalışmada günlük yüzey akış tahmin değerleri karşılaştırıldığında SCS CN yöntemi, Green & Ampt yöntemine göre daha güvenilir sonuç verdiği belirtilmiştir.

SCS eğri numarası formülü (SCS, 1972):

$$Q_{yüzeysel} = \frac{(R_{gün} - I_a)^2}{(R_{gün} - I_a + S)}$$

Denklemden veriler günlük olmak üzere;

$Q_{yüzeysel}$: yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm)

$R_{gün}$: Günlük yağış miktarı (mm)

I_a : yüzey akış öncesi yüzey depolaması ve infiltrasyon sonucu başlangıç eksilmeleri (mm)

S : potansiyel (muhtemel) su tutulmasını (mm) ifade etmektedir.

Potansiyel su tutulması (S) verisi toprak, arazi kullanımı ve eğime bağlı olarak toprak su içeriği değişiklik gösterir. Bu durumda S yeniden eğri numarasına bağlı olarak aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır.

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

CN, günlük yüzey akış eğri numarası olarak tanımlanmaktadır.

I_a değeri genel olarak $0,2S$ olarak kabul edilmektedir. Bu durumda yeni eşitlik:

$$Q_{yüzeysel} = \frac{(R_{gün} - 0,2S)^2}{(R_{gün} - 0,8S)}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Kıtalara düşen yağışın yaklaşık % 62'si buharlaşmaktadır ve evapotranspirasyon, suyun bir havzadan uzaklaştırılmasını sağlayan birincil mekanizmadır. Evapotranspirasyon

Antarktika ve birçok nehir havzası haricinde tüm kıtalarda yüzey akışından fazladır (Dingman, 1994; Neitsch, vd., 2011).

Yağış ve buharlaşma - terleme arasındaki fark, insanların kullanımı ve yönetimi için mevcut olan su miktarıdır. Buharlaşmanın doğru tahmini, su kaynaklarının değerlendirilmesinde ve iklim ve arazi kullanımı değişikliğinin bu kaynaklar üzerindeki etkisinde kritik öneme sahiptir (Neitsch, vd. 2011).

Potansiyel evapotranspirasyonun tahmini için SWAT modeline dahil edilen 3 yöntem bulunmaktadır. Bunlar; Penman - Monteith yöntemi (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen vd., 1989), Priestley - Taylor Yöntemi (Priestley ve Taylor, 1972) ve Hargreaves Yöntemidir (Hargreaves, vd., 1985). Model aynı zamanda ölçülmüş günlük potansiyel evapotranspirasyon değerlerindeki okuyabilmektedir.

SWAT'ta yer alan potansiyel evapotranspirasyon yöntemleri, ihtiyaç duyulan meteorolojik verilerin varlık durumuna göre kullanılabilir. Penman-Monteith yöntemi solar radyasyon, sıcaklık, bağıl nem ve rüzgar hızına ihtiyaç duymaktadır. Priestley-Taylor yöntemi solar radyasyon, sıcaklık ve bağıl neme ihtiyaç duymaktadır. Hargreaves yöntemi sadece hava sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır.

Çalışma kapsamında günlük solar radyasyon, sıcaklık, bağıl nem ve rüzgar hızı verilerinin bulunmasından dolayı yapılan çalışmalarda da tercih edilen Penman - Monteith yöntemi kullanılmıştır.

Penman - Monteith eşitliği;

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)}$$

Burada;

λE : Potansiyel sıcaklık akış yoğunluğu ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),

E : Buharlaşma derinlik oranı (mm d^{-1}),

Δ : Doygun buhar basıncı ile sıcaklık eğrisinin eğimi ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),

ρ_{air} : Hava yoğunluğu (kg m^{-3}),

H_{net} : Net radyasyon ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),

G : Zemin için sıcaklık akış yoğunluğu ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),

c_p : Sabit basınçta özgül sıcaklık ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),

e_z^0 : z yükseklikte havanın doygun buhar basıncı (kPa),

e_z : z yükseklikte havanın buhar basıncı (kPa),

γ : Psikrometrik sabiti (kPa °C⁻¹),

r_c : Bitki kanopi direnci (s m⁻¹),

r_a : Hava tabakasının yayılma direnci (s m⁻¹)

olarak tanımlanmaktadır.

3.3 Kalibrasyon Çalışmaları

Hidrolojik modellerin en zorlu ve zaman alıcı bölümü kalibrasyon aşamasıdır (Sohel, 2012). Manuel kalibrasyon, otomatik kalibrasyon ve manuel ve otomatik kalibrasyonun kombinasyonunu içeren farklı kalibrasyon yaklaşımları türleri bulunmaktadır. Manuel kalibrasyon, modelleyicinin deneyimine bağlı olarak daha uzun zaman ve sabır gerektirirken otomatik kalibrasyon bunu oldukça hızlı yapabilmektedir. Ancak genel olarak manuel kalibrasyon, otomatik kalibrasyondan daha iyi performans göstermektedir (Hormann vd., 2009; Van Liew vd., 2005; Sohel, 2012). Bu nedenle, iyi bir model performansı elde etmek amacıyla çalışma kapsamında manuel ve otomatik kalibrasyon uygulanmıştır.

Otomatik model kalibrasyonu, belirsiz model parametrelerinin sistematik olarak değiştirilmesini, modelin çalıştırılmasını ve gerekli çıktılarını (ölçülen verilere karşılık gelen) model çıktı dosyalarından çıkarılmasını gerektirmektedir (Abbaspour, vd. 2015).

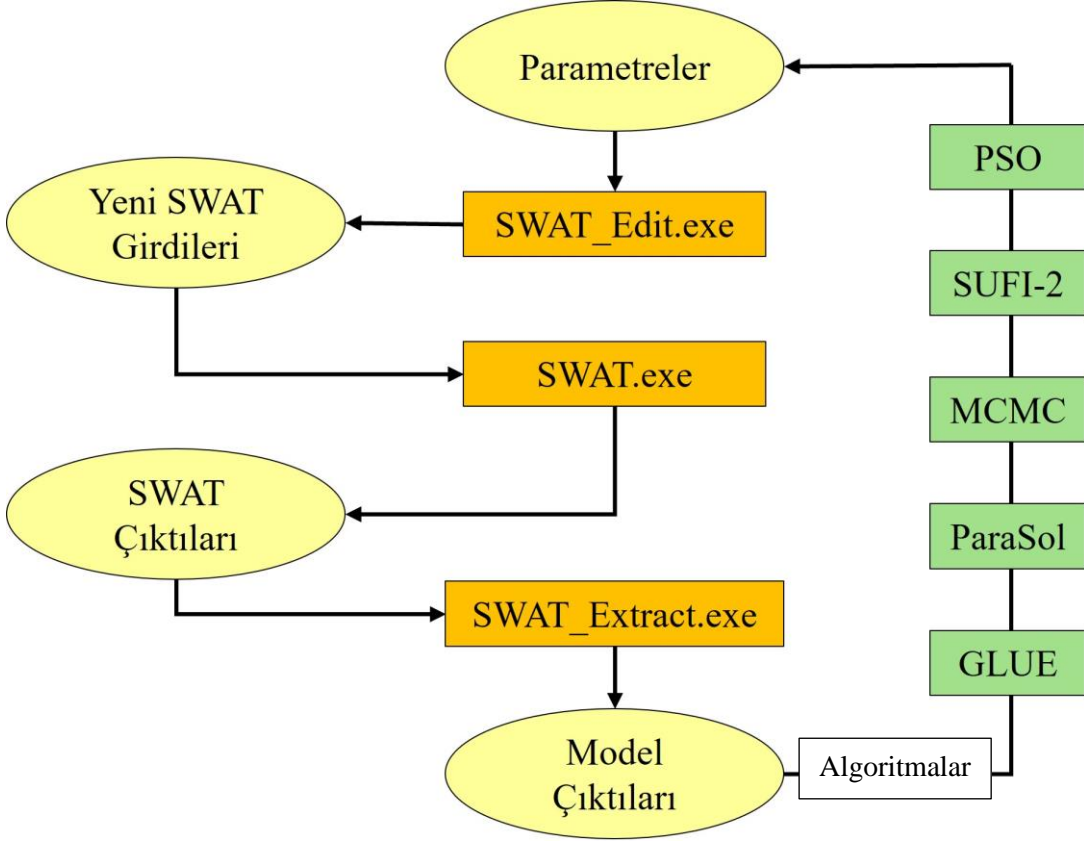
SWAT hidrolojik modelinin otomatik kalibrasyonu, validasyonu ve belirsizlik analizinin yapılabilmesi için İsviçre Federal Enstitüsü tarafından SWAT-CUP (Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Program) arayüz programı geliştirmiştir. Bu arayüz kullanılarak herhangi bir kalibrasyon/belirsizlik veya hassasiyet programı kolaylıkla SWAT modeline bağlanabilmektedir (Sarı, 2018).

SWAT-CUP arayüzünde kalibrasyon ve belirsizlik analizinin yapılabilmesi için;

1. Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2), (Abbaspour vd., 2004; Abbaspour vd., 2007; Abbaspour, 2015),
2. Parameter Solution (ParaSol), (van Griensven ve Meixner, 2006),
3. Particle Swarm Optimization (PSO), (Eberhart ve Kennedy, 1995),

4. Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) (Beven ve Binley, 1992),
5. Markov Chain Monte Carlo (MCMC) (Kuczera ve Parent, 1998; Vrugt vd., 2003; Marshall vd., 2004; Yang vd., 2007),

olmak üzere 5 farklı optimizasyon algoritmaları ile çalışılabilmekte olup program ile arasındaki bağlantının şeması Şekil 23’de gösterilmiştir (Cüceloğlu, 2019).

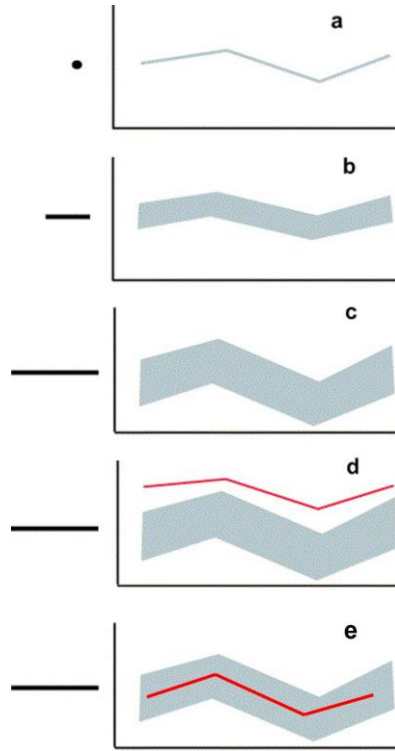


Şekil 23 SWAT-CUP programında SWAT ve farklı optimizasyon algoritmaları ilişkisini gösterir şema (Abbaspour, vd., 2015)

Bu çalışma kapsamında duyarlılık analizi ve kalibrasyon analizi için Abbaspour vd. (2007) tarafından geliştirilen SUFI-2 algoritması kullanılmıştır. SUFI-2 algoritmasında parametrelerdeki belirsizlikler ve diğer belirsizlikler (meteorolojik veriler, akım verileri, kavramsal model, sıcaklık ve yağış kontrol değişkenleri, vb.) uniform dağılım olarak aralıklar ile ifade edilmektedir. Modele giriş parametrelerinin neden olduğu parametre belirsizlik dağılımı model çıktısında da belirsizliğe sebep olmaktadır. Parametrelerdeki belirsizlikler % 95 tahmin aralığı içerisinde gösterilmektedir. Bu aralık, Latin hiperküp örnekleme kullanılarak parametrelere ilişkin çıktı değişkeninin kümülatif dağılımı % 2,5 ve % 97,5 seviyeleri arasında gösterilir. Buna % 95 tahmin belirsizliği veya 95PPU denilmektedir. Bu 95PPU'lar stokastik kalibrasyon yaklaşımındaki model çıktıları olup

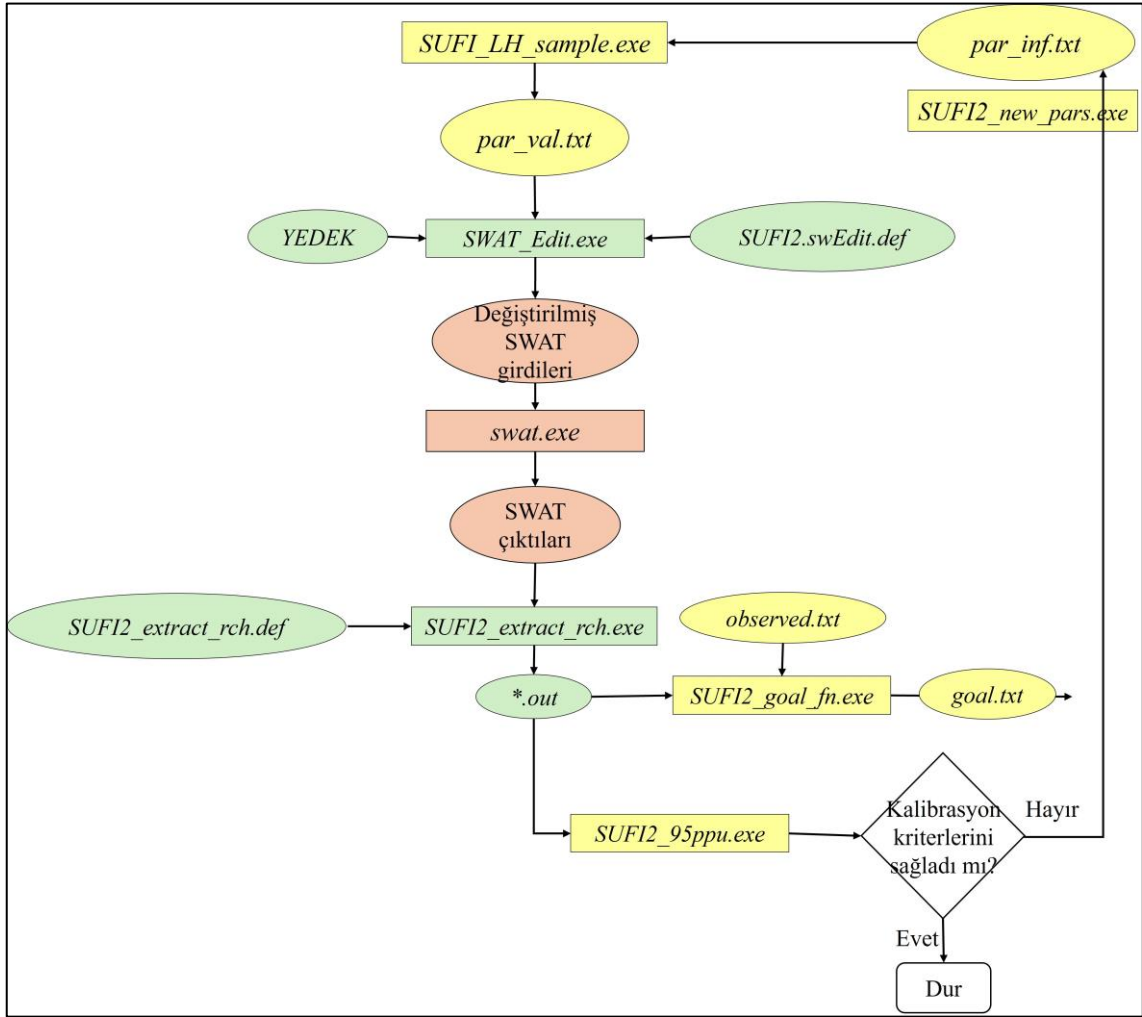
model çıktısını temsil eden tek bir değer yerine belirli parametre aralıkları ile temsil edildiğini göstermektedir (Abbaspour, vd., 2015).

Kalibre edilen modelin performans ve belirsizliğini ölçmek için iki faktör kullanılmaktadır. Bunlardan; p-faktörü, modelleme sonucu olan 95PPU tarafından kapsanan gözlemlenen verilerin yüzdesini, r-faktörü ise 95PPU tahmin aralığının kalınlığıdır. p-faktörü 0 ile 1 arasında, r-faktörü ise sonsuz ile 0 arasında değişen değerler ile temsil edilmektedir. Şekil 24'te farklı gözlem serilerine ait grafikler yer almaktadır. Bu grafiklerde (x eksenini zaman, y eksenini debi/simüle edilen veri olmak üzere); (a) nokta ile gösterilen tek bir parametrenin değerinin model çıktısını, (b) çizgi ile gösterilen parametre yayılım aralığının (95PPU) model çıktısını, (c) parametrelerin belirsizliğinin artması ile yayılım aralığını genişlemesini, (d) model çıktısı ile tanımlanan parametrelerin gözlem verisinden farklı olduğunu ifade etmektedir (Abbaspour, vd. 2007; Abbaspour, vd. 2015). Kalibrasyon sonucu Şekil 24 (d) grafiğinin elde edilmesi durumunda kavsamsal modelin yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. (e) grafiği ise kalibrasyon sonucu en iyi eşleşmenin olduğunu ifade etmektedir. p-faktörü ve r-faktörü için kabul edilebilir değerlere ulaşıldığında, parametre belirsizliklerinin istenen parametre aralıkları olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 24 Parametre ile tahmin belirsizlikleri arasındaki ilişkinin şematik örneği (Abbaspour, vd., 2015'ten değiştirilerek)

SUFI-2 algoritmasının SWAT-CUP yazılımındaki işleyişine ilişkin iş akış şeması Şekil 25’de verilmiştir.



Şekil 25 SWAT-CUP yazılımında SUFI-2 algoritması iş akış şeması (Abbaspour, vd., 2015)

SWAT gibi hidrolojik modellerin gerçekçi simülasyonlar ortaya çıkarma yeteneği, sağlanan girdi bilgilerinin kalitesine, detayına ve modelin denklemlerinde kullanılan parametrelerin değerlerine bağlıdır (Baffaut, 2015). Parametre değerlerinin farklı kombinasyonları, eş sonluluk olarak bilinen benzer model sonuçları sağlayabilmektedir. Elde edilen değerlerin eleştirel bir şekilde gözlemlenmemesi, model istatistiksel olarak tatmin edici olsa bile temsili olmayan bir modele ve hatalı sonuçlara yol açabilir (Moriassi, 2015). Bu tür modellerdeki parametrelerin çokluğu ve bunların mekansal değişkenliği, hepsi için yerinde ölçülen verilerin kullanılmasını engellemektedir. Bu nedenle model performansı üzerinde en güçlü etkiye sahip parametreler için en gerçekçi değerlerin bir

kalibrasyon süreci ile belirlenmesi gerekmektedir (Gharari, 2014; Moriasi, 2015; Sánchez-Gómez, 2022)

Kalibrasyon sırasında, bir değişkenin (örn. akım verisi) simülasyonu, simüle edilen gözlemlenen verilere mümkün olan en iyi uyumunu sağlamak amacıyla parametre değerleri değiştirilerek optimize edilir. En iyi parametre değerleri elde edildikten sonra model çıktısı farklı bir zaman diliminde doğrulanır (Arnold, vd., 2012).

Tez çalışması kapsamında 2005-2010 yılları arasında kalibrasyon işlemi uygulanmıştır. 2005-2006 yılları warp-up olarak çalıştırılmış 2007-2010 yıllarında kalibrasyon yapılmıştır. Gözlenen akım verilerini ve en iyi akım verilerini benzeştiren parametreler elde edilmiştir. Bu parametreler ile 2011-2013 yılları arasında doğrulama (validasyon) işlemi gerçekleştirilmiştir.

Hidrolojik modele girilen parametrelerin sürece dayalı olmasından dolayı gerçekçi bir belirsizlik aralığında bulunmalıdır. SWAT modelinde kalibrasyon ve validasyon sürecinin ilk adımı, çalışılan havza veya alt havza için en hassas parametrelerin belirlenmesi işidir. Duyarlılık analizi ile model giriş parametrelerindeki değişiklikler doğrultusunda model çıktısındaki değişim oranı belirlenmektedir.

SWAT için geliştirilen SWAT-CUP hem manuel hem to otomatik kalibrasyon tekniğini kullanarak hassasiyet ve belirsizlik analizini birleştiren yarı otomatik bir yaklaşımı (SUFI-2) içeren bir karar verme çerçevesi sağlamaktadır. SUFI-2, parametre duyarlılığı analizi, kalibrasyon ve belirsizlik analizine odaklanmaya yardımcı olur ve modelin gözlem verileriyle uyumuna ilişkin istatistiksel veri sağlamaktadır (Arnold, vd., 2012).

3.4 Model Performans Değerlendirmesi

Hidrolojik modellemede istatistiksel yöntemler; determinasyon katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı (NSE) ve yüzde hata istatistiği (PBIAS) gibi ölçümler kullanılarak modellerin performansını değerlendirmek için kullanılır (Moriasi, vd., 2015). Ancak bu değerlendirmelerde, benzeştirilen ve gözlemlenen hidrografın görsel olarak karşılaştırılması ve su dengesinin değerlendirilmesi ile tamamlanmalıdır.

R^2 , bir modelde gözlemlenen ve simüle edilen veriler arasında istatistiksel olarak uyumlu olup olmadığını gösteren bir katsayıdır. Regresyon bağlamında, regresyon çizgisinin gerçek verilere ne kadar iyi yaklaştığının istatistiksel bir ölçüsü olup bir istatistiksel modelin gelecekteki sonuçları tahmin etmek veya hipotezleri test etmek için kullanımında

önemlidir. 0 ile 1 arasında değerler alabilen R^2 , 1 değerine yaklaştıkça simüle edilen ve gözlemlenen verilerin birbiriyle uyumlu olduğu ifade edilmektedir. Ancak, yüksek bir R^2 değerinin regresyon modeli için her zaman iyi olduğu söylenemez. Katsayının kalitesi; değişkenlerin ölçü birimleri, modelde kullanılan değişkenlerin doğası ve uygulanan veri dönüşümü dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, bazen yüksek bir katsayı regresyon modeliyle ilgili sorunlara işaret edebilir .

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{göz}^i - Q_{göz}^{ort})(Q_{sim}^i - Q_{sim}^{ort})]}{\sum_{i=1}^n [(Q_{göz}^i - Q_{göz}^{ort})^2] \sum_{i=1}^n [(Q_{sim}^i - Q_{sim}^{ort})^2]}$$

Burada; i. zamanda $Q_{göz}^i$ gözlemlenen akım verisi, $Q_{göz}^{ort}$ gözlemlenen akım verisinin ortalaması, Q_{sim}^i simüle edilen akım verisi ve Q_{sim}^{ort} simüle edilen akım verisinin ortalama değerini ifade etmektedir.

NSE, gözlemlenen ve simüle edilen verilerin birbirine yaklaşma oranını ifade etmektedir. $-\infty$ ile 1 arasında değişen NSE değeri 1 değerine yaklaştıkça model başarısının kabul edilebilir olduğu anlamına gelmektedir.

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{göz}^i - Q_{sim}^i)^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{göz}^i - Q_{sim}^{ort})^2 \right]}$$

Burada; i. zamanda $Q_{göz}^i$ gözlemlenen akım verisi, Q_{sim}^i simüle edilen akım verisi ve Q_{sim}^{ort} simüle edilen akım verisinin ortalama değerini ifade etmektedir

PBIAS, simüle edilen verilerin gözlemlenen emsallerinden daha büyük veya daha küçük olma durumunun ortalama eğilimini ölçmektedir. PBIAS değeri, 0 değerine yaklaştıkça model çıktılarının başarılı olduğunu ifade etmektedir. Pozitif ve negatif değerler alabilen PBIAS'ın, pozitif değer alması durumunda gözlem verilerine göre fazla tahmin yaptığını negatif değer alması durumunda ise gözlem verisine göre eksik tahmin yaptığını ifade edilmektedir.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{göz}^i - Q_{sim}^i)}{\sum_{i=1}^n (Q_{göz}^i)}$$

Burada; i. zamanda $Q_{göz}^i$ gözlemlenen akım verisi ve Q_{sim}^i simüle edilen akım verisi değerini ifade etmektedir.

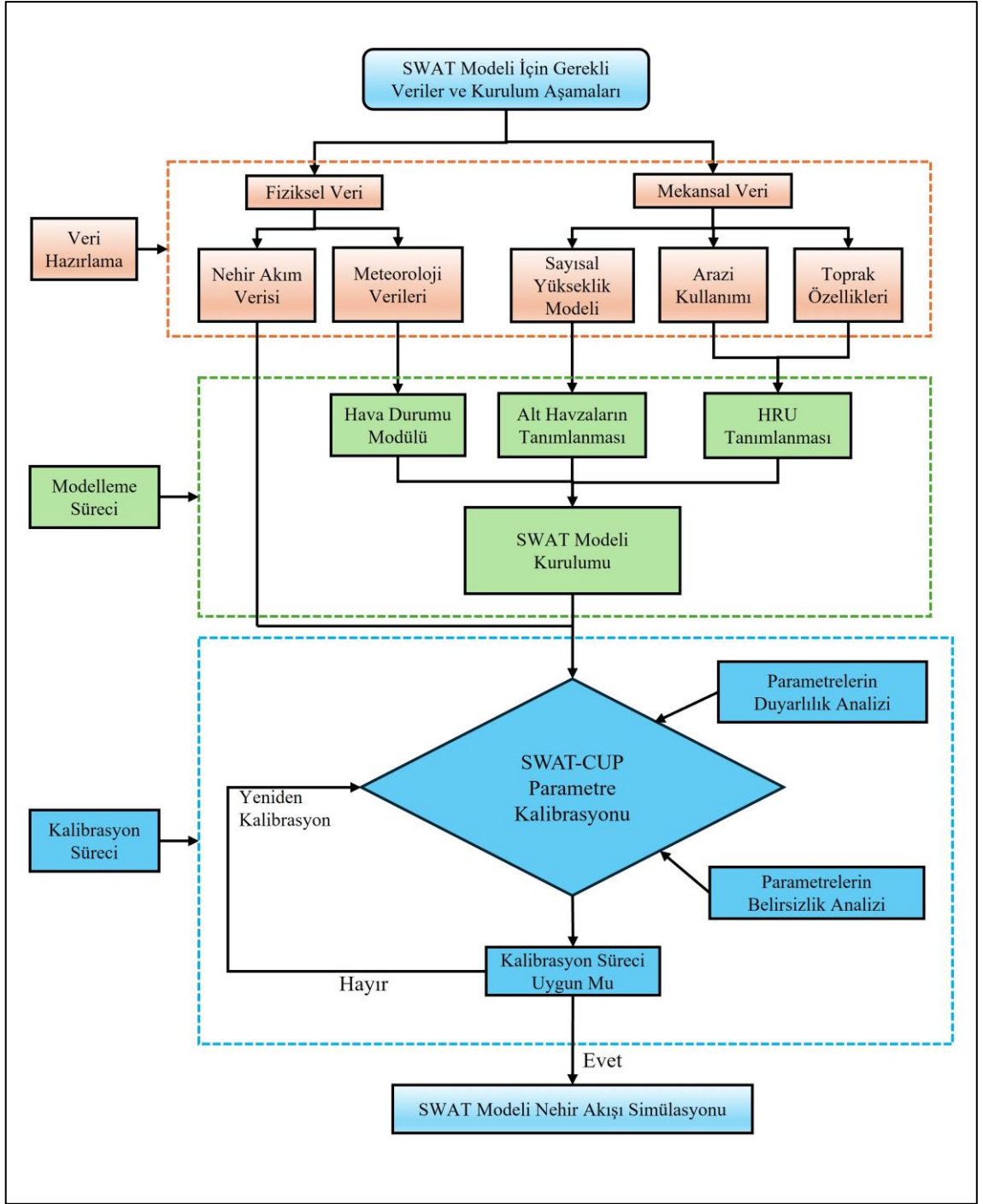
Çizelge 6 Model Performans İstatistikleri için genel değerlendirme (Moriasi, 2015)

Parametre	Akım Modeli İçin Model Başarısı			
	Çok İyi	İyi	Başarılı	Başarısız
R^2	$R^2 > 0,85$	$0,75 < R^2 \leq 0,85$	$0,60 < R^2 \leq 0,75$	$R^2 \leq 0,60$
NSE	$NSE > 0,80$	$0,70 < NSE \leq 0,80$	$0,50 < NSE \leq 0,70$	$NSE \leq 0,50$
PBIAS	$PBIAS > \pm 10$	$\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$	$\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 25$

4 MODEL ÇALIŞMALARI

4.1 SWAT Modeli Kurulumu ve Veri Girişi

Model kurulumu için çalışma alanına ait Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), arazi kullanımı verisi, toprak özellikleri, meteorolojik veriler ve model kalibrasyonunda kullanılmak üzere nehir akım gözlem verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Öncelikle SYM verisi kullanılarak drenaj ağı oluşturulmaktadır. Daha sonra SWAT, drenaj havzasını alt havzalara ayırarak hidrolojik tepki birimlerini (HRU) oluşturur. Oluşturulan her HRU, eğim, toprak yapısı ve arazi kullanımı açısından benzersiz birimleri temsil etmektedir. Model, oluşturulan HRU'lar arasında herhangi bir etkileşim olmadığını ve bir alt havza içindeki süreçlerin toplandığını ve daha sonraki hesaplamalar için toplam alt havza çıktısı olarak kullanıldığını varsaymaktadır (Arnold, vd., 2012).



Şekil 26 SWAT modeli süreci diyagramı Liu, vd. (2024)'den uyarlanmıştır.

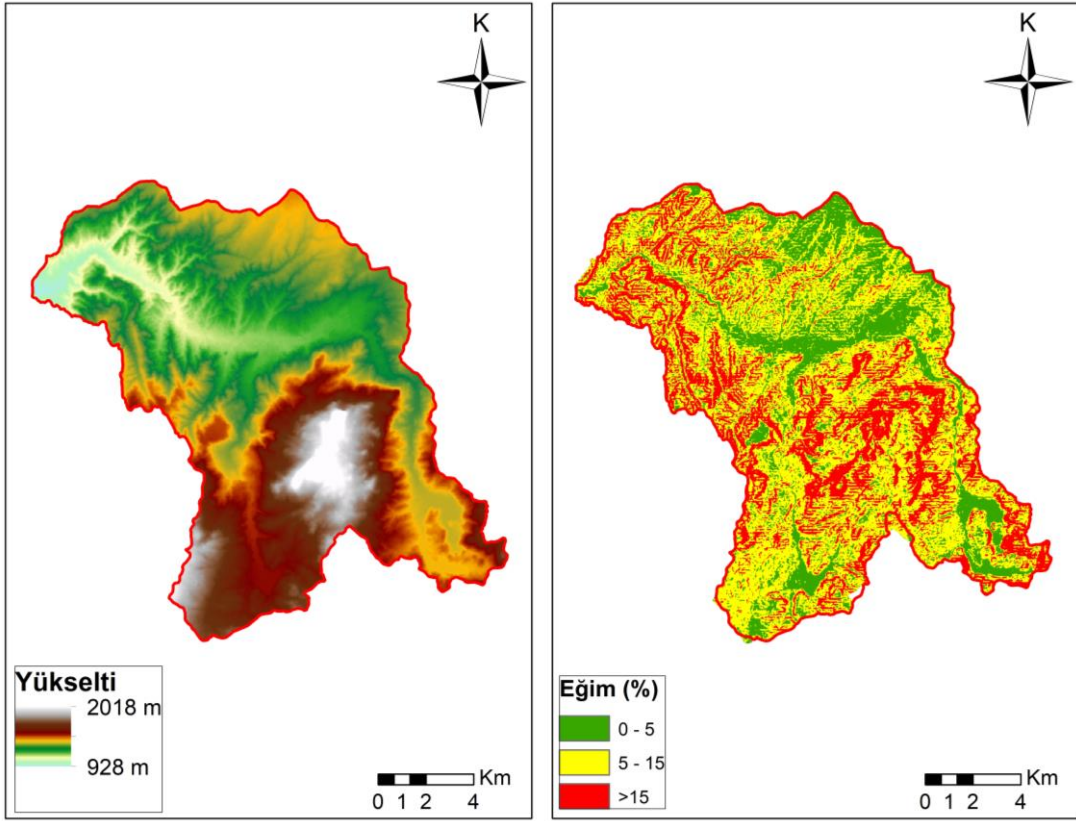
SWAT, hidrolojik süreç modeli için sayısal yükseklik modeli, drenaj ağı, toprak haritası, arazi kullanım haritası ve meteoroloji (sıcaklık, yağış, rüzgar hızı, nispi nem ve güneş radyasyonu) verilerine ihtiyaç duymaktadır. Gerekli veriler Çizelge 7'de belirtilen çeşitli kaynaklardan elde edilmiştir.

Çizelge 7 Hidrolojik süreç modelinin kurulumunda kullanılan veri setleri ve kaynak bilgileri

Veri Seti	Veri Kaynakları	Veri Çözünürlüğü	Referans
Sayısal Yükseklik Modeli	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global	30 m x 30 m	(Url-2)
Toprak Verisi	FAO-UNESCO Küresel Toprak Veri Seti (1995)	5 km x 5 km	(Url-3)
Arazi Kullanım Verisi	European Environment Agency CORINE Land Cover (2012-2018)	100 m	(Url-4)
Meteoroloji Veri Setleri (Sıcaklık, Yağış, Nispi Nem, Rüzgar Hızı)	Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) (2005-2018)	Burdur İstasyonu	Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)
Meteoroloji Veri Setleri (Solar Radyasyon)	NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)	1° x 1°	(Url-1)
Akım Rasatları	Devlet Su İşleri (DSİ)	Bügdüz D. (Suludere) AĞI	Devlet Su İşleri (DSİ)

4.1.1 Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)

Hidrolojik modellemede SYM, belirli bir alanın yüksekliğini mekansal çözünürlükte analiz etmek için kullanılmaktadır. SRTM tarafından hazırlanan ve ücretsiz olarak paylaşılan 30 m x 30 m çözünürlükteki SYM çalışma kapsamında kullanılmış ve çalışma alanındaki alt havza sınırları, drenaj ağı ve havza eğimi belirlenerek Şekil 27’de gösterilmiştir.

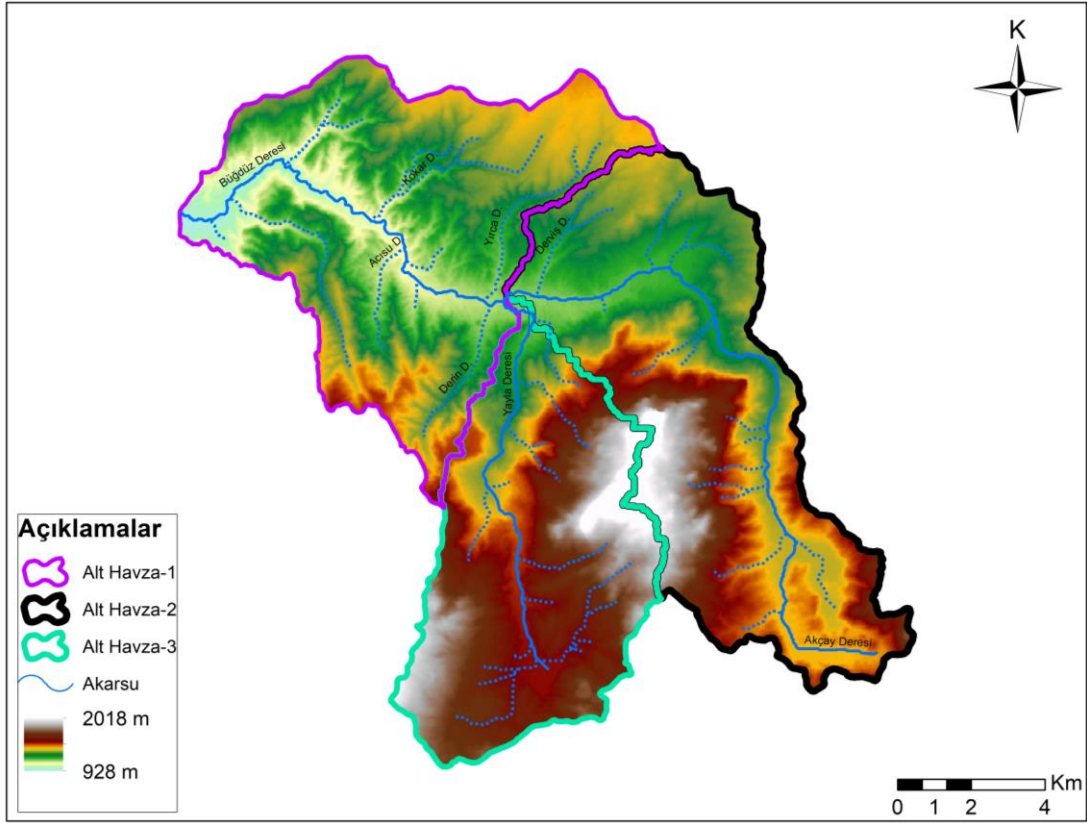


Şekil 27 Çalışma alanı sayısal yükseklik modeli ve eğim haritası.

STRM sayısal yükseklik haritası verisine göre Bügdüz Havzasının en düşük yüksekliği 928 m, en çok yüksekliği 2018 m arasında değişmekte olup ortalama yüksekliği 1325 m'dir. Çalışma sahasının en yüksek bölgesinin güney ve güneybatı kısmında olduğu görülmektedir.

4.1.2 Drenaj Ağı ve Havza Sınırı

Çalışma bölgesini oluşturan alt havza sınırlarını ve drenaj ağını ortaya çıkarmak için ArcSWAT yazılımının Watershed Delineation modülü kullanılmıştır. Modülde havza sınırlarının belirlenmesinde 400 ha eşik değeri olarak belirlenmiştir. Çalışma sahasında arazi yüksekliği, eğimi, drenaj ağı, arazi kullanımı, sulama alanı vb. dağılımlarının homojen olmamasından dolayı havza 3 alt havzaya ayrılmıştır. Alt havza sınırları ayrıca topoğrafik haritadan da kontrol edilmiştir. Çalışma alanına ait alt havza sınırları ve drenaj ağı Şekil 28'de gösterilmiştir.

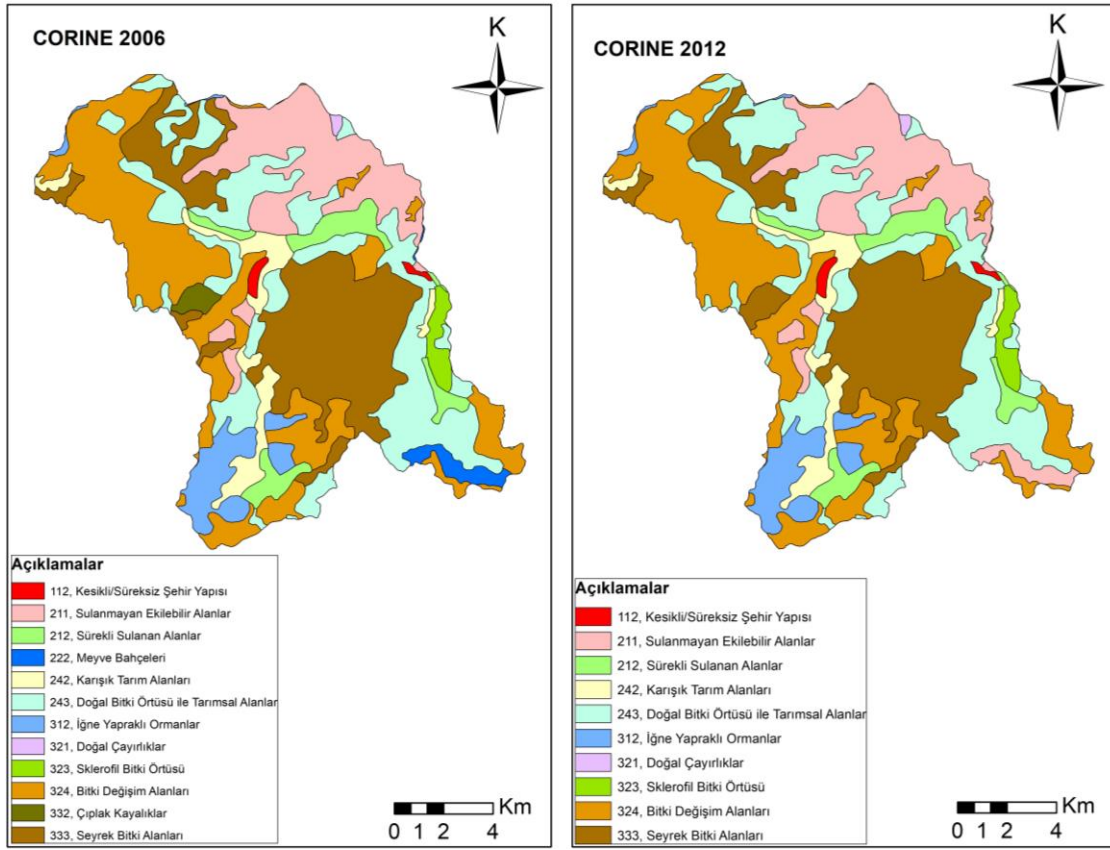


Şekil 28 Çalışma alanının alt havzaları ve drenaj ağı haritası

Model kurulumunda Büğdüz Havzası 3 alt havzaya ayrılmış ve 1. alt havzanın alanı 71,85 km², 2. alt havzanın alanı 71,73 km² ve 3. alt havzanın alanı 55,43 km² olarak hesaplanmıştır. Tez çalışması amacına yönelik Büğdüz Deresi üzerinde bulunan D10A027 nolu Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) drenaj alanının bitiş noktası olarak belirlenmiştir.

4.1.3 Arazi Kullanım Haritası

Arazi kullanım değişikliği bitki örtüsünü, toprak dokusunu ve yüzey pürüzlülüğünü değiştirerek yüzey suyu akışı süreçlerini doğrudan, tarımsal faaliyetlerde sulama ve şehirleşme sürecinde yeraltısuyunun çekilmesi nehir akışını dolaylı yoldan etkileyebilmektedir. Arazi kullanım değişikliklerinde meydana gelen büyük ölçekli değişiklikler atmosferdeki enerji dengesini ve su döngüsünü değiştirerek küresel iklimi de etkileyecektir. Bütün değişiklikler yüzey suyu akışı üzerinde uzun vadeli etkiler yaratacaktır (Liu, vd., 2024).



Şekil 29 Çalışma alanı arazi örtüsü sınıfı haritaları (Url-3)

Coordination of Information on the Environment (CORINE) Arazi Örtüsü Projesi, 1980'lerde Avrupa'daki arazi durumuna ilişkin veri toplamayı standartlaştırmak ve çevre politikasını desteklemek amacıyla kurulmuştur (Url-5). 1994 yılı itibariyle CORINE Projesi Avrupa kıtası ve ülkemizde, Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) tarafından belirlenmiş olan arazi örtüsü sınıflandırmasıyla uydu görüntüleri ile 1/100.000 ölçekte arazi örtüsü haritaları üretilmektedir (Url-5).

CORINE Projesi; tarımsal, ormanlık ve diğer arazilerdeki değişimlerin ekosistem üzerindeki etkileri, iklim değişikliği etkilerinin belirlenmesi, kentsel yayılma, su yönetimi, vb. gibi arazi kullanımındaki değişimleri konu alan çalışmalara önemli katkı sağlamaktadır (Url-6).

Ülkemiz için 1990, 2000, 2006, 2012 ve 2018 yılları ve ilgili yıllar arasındaki değişimleri gösteren arazi örtüsü veri setleri bulunmaktadır. CORINE 2006 ve 2012 yıllarının veri setlerinin çalışma alanı içerisindeki arazi örtü sınıflandırılmasının alansal ve dağılımı Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8 CORINE arazi örtüsü sınıflarının çalışma alanı içerisindeki yüzdesel dağılımı

KOD	Arazi Örtüsü Sınıfları	CORINE 2006		CORINE 2012		Fark (%)
		Alan (km ²)	Alansal Dağılım (%)	Alan (km ²)	Alansal Dağılım (%)	
112	Kesikli/Süreksiz Şehir Yapısı	0,92	0,46	0,92	0,46	0,00
211	Sulanmayan Ekilebilir Alanlar	27,35	13,75	29,99	15,08	9,67
212	Sürekli Sulanan Alanlar	8,47	4,26	8,76	4,40	3,29
222	Meyve Bahçeleri	2,74	1,38	0,00	0,00	100,0
242	Karışık Tarım Alanları	9,02	4,54	9,03	4,54	0,00
243	Doğal Bitki Örtüsü ile Tarımsal Alanlar	43,19	21,72	45,14	22,70	4,51
312	İğne Yapraklı Ormanlar	9,46	4,76	9,51	4,78	0,42
321	Doğal Çayırliklar	0,31	0,16	0,31	0,16	0,00
323	Sklerofil Bitki Örtüsü	2,68	1,35	2,66	1,34	0,74
324	Bitki Değişim Alanları	47,94	24,11	48,30	24,29	0,75
332	Çıplak Kayalıklar	1,54	0,77	0,00	0,00	100,0
333	Seyrek Bitki Alanları	45,23	22,75	44,24	22,25	2,20

CORINE 2006 ve 2012 yıllarının arazi örtüsü değişim oranları incelendiğinde 2006 yılında meyve bahçeleri ve çıplak kayalıklar arazi örtüsünün bulunduğu ancak bu arazi örtülerinin 2012 yılında bulunmadığı anlaşılmaktadır. Ancak çalışma alanı içerisindeki toplam yüzdesel dağılımlarının % 2,15 olmasından dolayı model çalışmalarında etkin değişikliklere sebep olmayacağı değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasında 2005-2018 yılları arasındaki veri setleri kullanılmış olup 2006 ve 2012 yılları arasında arazi kullanım verilerinde ciddi değişimler olmadığı için modelleme çalışmaları esnasında 2006 yılı CORINE veri seti kullanılmıştır. Model çalışmasında kullanılan 2006 yılı CORINE veri seti ile SWAT modeli veritabanı ilişkilendirilmesi Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 9 CORINE arazi kullanım türünün SWAT arazi kullanımını sınıflarına göre yeniden sınıflandırılması

CORINE Kodu	Tanım	SWAT Kodu	Yüzdesel Dağılım (%)
112	Kesikli/Süreksiz Şehir Yapısı	URBA	0,46
211	Sulanmayan Ekilebilir Alanlar	OATS	13,75
212	Sürekli Sulanan Alanlar	TOMA	4,26
222	Meyve Bahçeleri	ORCD	1,38
242	Karışık Tarım Alanları	AGRL	4,54
243	Doğal Bitkisi Örtüsü ile Tarımsal Alanlar	AGRR	21,72
312	İğne Yapraklı Ormanlar	FRSE	4,76
321	Doğal Çayırliklar	RNGE	
323	Sklerofil Bitki Örtüsü	RNGE	25,62
324	Bitki Değişim Alanları	RNGE	
332	Çıplak Kayalıklar	SWRN	
333	Seyrek Bitki Alanları	SWRN	23,52

4.1.4 Toprak Haritası

SWAT modeli için önemi bir girdi olan toprak haritası farklı katmanlar için doku, kum, silt ve kil içeriği, mevcut nem içeriği, hidrolik iletkenlik, kütle yoğunluğu ve organik karbon içeriği gibi toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin verileri gerektirmektedir. Çalışma alanında toprak ölçümleri bulunmadığından ve tez kapsamında ölçüm çalışmaları yapılmadığından dünyada ve ülkemizde yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılan Food and Agricultural Organization/ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (FAO/UNESCO) tarafından 5 km x 5 km çözünürlüğünde hazırlanmış olan dünya toprak haritası veri seti kullanılmıştır.

FAO toprak veri setleri birçok araştırmacı tarafından modellerinde başarıyla uygulanmıştır (Schuol vd., 2008a; Abbaspour vd., 2015; Cüceloğlu vd., 2017; Yaykırın vd., 2019, Cüceloğlu, vd., 2019). SWAT modelinin toprak veri tabanı ile FAO toprak veri setlerinin yapısının uyumlu olması birçok araştırmacıya kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Çalışma alanını temsil eden toprak haritası Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30 Çalışma alanı toprak haritası (FAO, 1995)

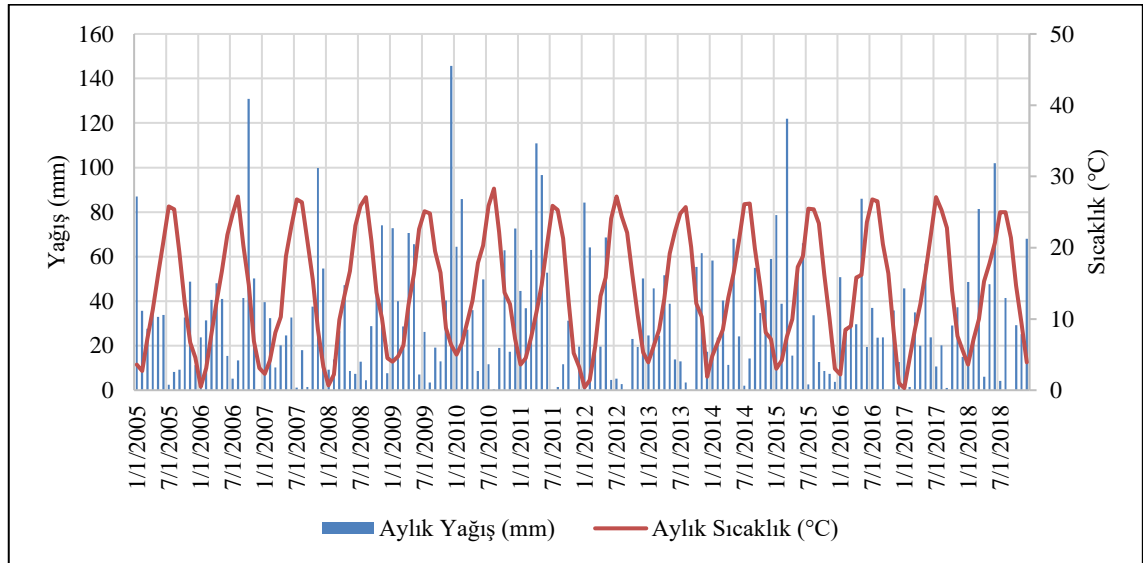
FAO tarafından düzenlenen toprak gruplarından çalışma alanında 3 farklı toprak sınıflandırması yapılmış ancak üçünün de toprak yapısının “Tın (Loam)” olduğu anlaşılmaktadır. FAO ve SWAT modeli parametreleri detaylı olarak Çizelge 10’da verilmiştir.

Çizelge 10 SWAT modelinde FAO toprak haritası parametreleri

OBJECTID/ PARAMETRELER	1632	1713	1734
SEQN	3026	3114	3139
SNAM	Bk45-2bc-3026	I-Lc-E-2b-3114	Jc49-1-3a-3139
NLAYERS	2.00	2.00	2.00
HYDGRP	C	D	C
SOL_ZMX	660.00	460.00	1000.00
ANION_EXCL	0.50	0.50	0.50
SOL_CRK	0.50	0.50	0.50
TEXTURE	LOAM	LOAM	LOAM
SOL_Z1	300.00	300.00	300.00
SOL_BD1	1.30	1.30	1.20
SOL_AWC1	0.12	0.08	0.18
SOL_K1	8.49	8.21	13.39
SOL_CBN1	1.20	1.20	1.10
CLAY1	22.00	23.00	23.00
SILT1	40.00	35.00	33.00
SAND1	39.00	42.00	43.00
ROCK1	0.00	0.00	0.00
SOL_ALB1	0.05	0.05	0.06
USLE_K1	0.27	0.24	0.31
SOL_EC1	0.00	0.00	0.00
SOL_Z2	1000.00	1000.00	1000.00
SOL_BD2	1.50	1.50	1.30
SOL_AWC2	0.12	0.08	0.18
SOL_K2	2.67	2.58	8.30
SOL_CBN2	0.60	0.60	0.30
CLAY2	27.00	34.00	24.00
SILT2	38.00	30.00	33.00
SAND2	35.00	36.00	43.00
ROCK2	0.00	0.00	0.00
SOL_ALB2	0.15	0.15	0.27
USLE_K2	0.27	0.24	0.31

4.1.5 Meteoroloji Verileri

Hidrolojik döngüyü etkileyen en önemli faktörlerden biri meteorolojik verilerdir. Bu verilerden yağış parametresi hidrolojik döngü içerisinde doğrudan etkili olan ana bileşendir (Gölpınar, 2017). Hidrolojik döngüdeki su bütçesinin hesaplanabilmesi için günlük periyotta ölçülmüş olan yağış (mm), sıcaklık (°C), bağıl nem (%), rüzgar hızı (m/s) ve toplam solar radyasyon veri setlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle çalışma amacına uygun olarak 2005-2018 yılları arasında kesintisiz ve ihtiyaç duyulan ölçüm verilerine sahip tek istasyon olan Burdur MGİ verileri kullanılmıştır. Diğer istasyonların 2005 - 2018 yılları arasında yağış ölçüm değerlerinin bulunmamasından dolayı ölçüm olan 2019 – 2021 yıllarındaki veriler ile Burdur MGİ verileri aylık olarak oranlanmış ve aylık yağış katsayısı belirlenmiştir. Belirlenen aylık katsayılar 2005 - 2018 yılları Burdur MGİ yağış verileri ile çarpılarak diğer istasyonlar için yağış verileri üretilmiştir. MGİ'lerin çalışma sahasındaki Thiessen Poligon alan dağılımları, ortak ölçüm yıllarındaki yağış – yükseklik ilişkileri ve korelasyon katsayıları bir bütün olarak değerlendirilerek çalışma kapsamında Burdur MGİ, Burdur Gölü MGİ ve Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi MGİ'nin yağış verileri kullanılmıştır.



Şekil 31 Burdur MGİ Aylık Yağış (mm) ve Sıcaklık (°C) ilişkisi grafiği

Model çalışması döneminde aylık toplam yağış ortalaması 33,70 mm, en yüksek aylık yağış miktarı ise 145,6 mm ile Aralık ayında gerçekleşmiştir. Sıcaklık veri seti incelendiğinde aylık ortalama sıcaklık, yaz aylarında artmakta kış aylarında ise azalmakta olup çalışma dönemi içinde ortalama sıcaklıkta kayda değer artış ve azalış değeri görülmemektedir.

Model girdi verilerinden biri olan solar radyasyon veri setinin Burdur MGİ'nin ölçüm tarihi 2006 yılına kadar olması sebebiyle çalışma kapsamında kullanılamamıştır. Bu nedenle NASA tarafından yayınlanan Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) projesi ile ücretsiz olarak kullanıma sunulan veri seti kullanılmıştır. Verilerin arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) = 0,9675 olarak tespit edildiğinden POWER solar radyasyon veri seti çalışma kapsamında kullanılmıştır.

4.2 Modelleme Çalışmaları ve Değerlendirmeleri

Burdur Gölü'nü besleyen ana kollardan biri olan Büğdüz Deresi üzerinde kurulmuş olan Büğdüz Göletinin etkisinin araştırılması için göletten önce ve sonra hidrolojik modeller geliştirilmiştir. Öncelikle 2005-2013 yılları arasında hidrolojik model kurularak modelin kalibrasyon ve validasyon işlemleri tamamlanmıştır. Kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler ile 2014-2018 yıllarına ait Büğdüz Göletinin bulunduğu ve göletin bulunmadığı 2 farklı hidrolojik model geliştirilerek göletin etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Geliştirilen modeller aşağıda detaylıca açıklanmıştır.

4.2.1 Büğdüz Göleti Öncesi Model Çalışmaları

Büğdüz Göletinin olmadığı 2005-2013 yılları arasında ilk model geliştirilmiş ve çalıştırılmıştır. Büğdüz Havzası 3 alt havzaya ayrılmıştır. Arazi kullanımı olarak 2005-2013 yıllarını temsil etmek üzere CORINE 2006 veri seti kullanılmıştır. Toprak veri seti olarak FAO'dan temin edilen veriler kullanılmıştır. Havza çıkışında yer alan D10A027 nolu DSİ'ye ait AGİ verileri modelin kalibrasyon ve validasyon işlemi sırasında kullanılmıştır. Modelde 2005-2006 yılları warm-up olarak çalıştırılmış 2007-2010 yıllarında kalibrasyon, 2011-2013 yıllarında validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Parametreler için uygun bir değer elde etmek amacıyla SUFI-2 algoritması kullanılarak otomatik ve manuel kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Model kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi aşamasında literatür taraması yapılmıştır (Sohel, 2012). Su akışını etkileyen yaygın olarak kullanılan parametreler seçilerek hassasiyet analizleri sonuçları değerlendirildikten sonra model kalibrasyonunda kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerin farklı kombinasyonları ile simülasyonlar oluşturularak çalışma sahasının çıkışında bulunan AGİ'nin akım verileri ile en uygun değer aralıkları için en iyi parametre değerleri elde edilmiştir. Model

parametrizasyonunun tamamlanmasının ardından kalibrasyon işlemi tamamlanarak validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Model kalibrasyonunda kullanılan parametrelerin en küçük ve en büyük değerleri ile kalibrasyon sonucu elde edilen en iyi değerler Çizelge 11’de verilmiştir.

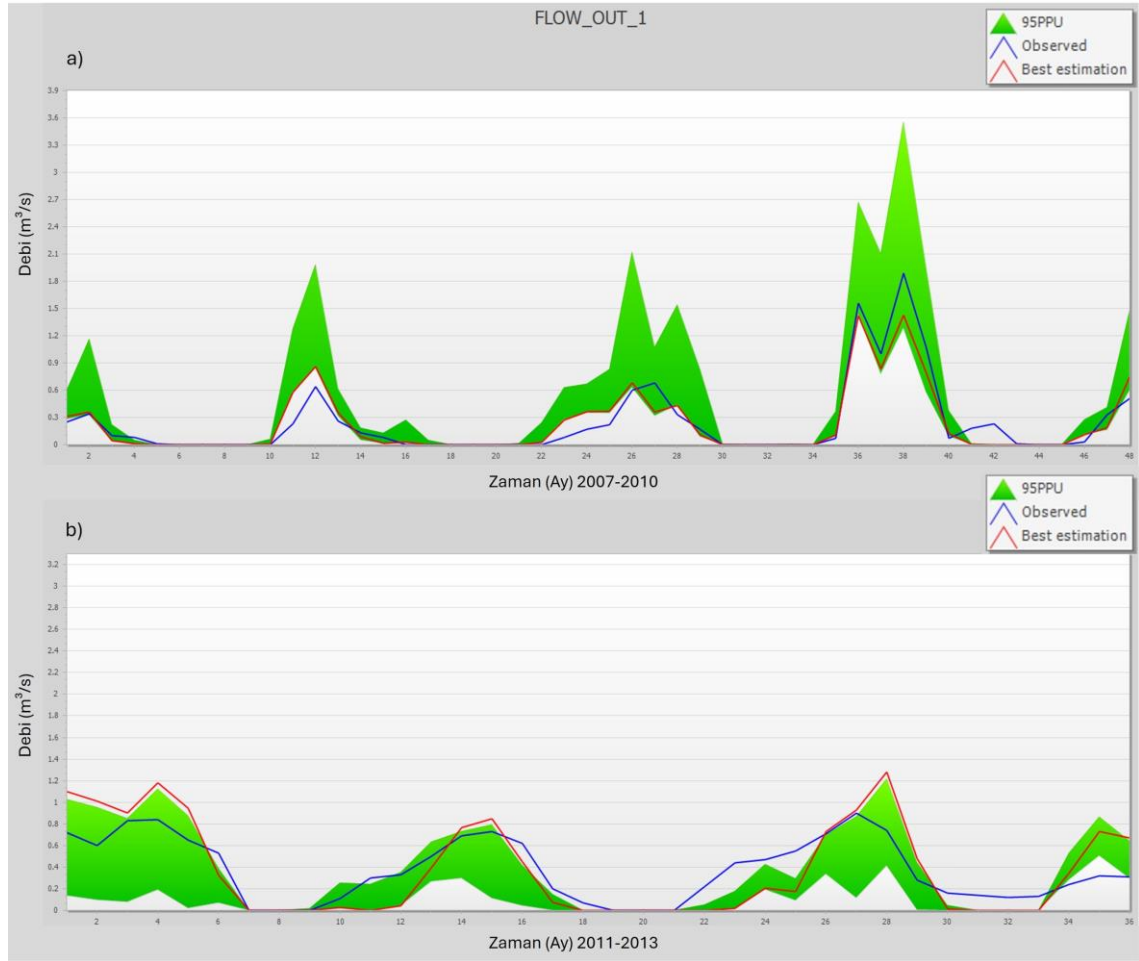
Çizelge 11 Kalibrasyon parametreleri ve değerleri

Model Parametreleri	Parametre Açıklaması	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Sabitlenen Değer
r_CN2.mgt	SCS yüzey akış eğri sayısı	-1,00	1,00	0,90
r_ESCO.hru	Toprak buharlaşması faktörü	0,51	0,89	0,82
v_GWQMN.gw_____1	Sığ akiferden geri dönüş suyu için	1785,55	2019,97	1873,46
v_GWQMN.gw_____2	eşik su derinliği	1000,00	2300,00	1669,50
v_GWQMN.gw_____3	(mm)	1631,77	2439,16	2225,20
v_GW_REVAP.gw	Yeraltı suyu revap. Katsayısı	0,01	0,03	0,02
v_REVAPMN.gw	‘revap’ değeri için sığ akiferde eşik su derinliği (mm)	294,98	376,14	312,43
r_SOL_AWC ().sol_____1	Toprağın kullanılabilir su tutma	0,51	1,21	0,78
r_SOL_AWC ().sol_____2	kapasitesi	0,39	0,96	0,71
r_SOL_AWC ().sol_____3	(mm H ₂ O/mm toprak)	0,36	1,23	0,84
v_ALPHA_BF.gw_____1		0,09	0,13	0,10
v_ALPHA_BF.gw_____2	Baz akım alfa faktörü (gün)	0,04	0,07	0,05
v_ALPHA_BF.gw_____3		0,07	0,11	0,09
v_OV_N.hru	Yüzey akışı için Manning "n" değeri	0,00	0,40	0,27
r_SOL_K ().sol	Toprak iletkenliği (mm/sa)	0,55	1,39	0,58

Çizelgede yer alan “r” harfi mevcut parametrenin belirlenen parametre ile çarpıldığını, “v” harfi mevcut parametrenin belirlenen parametre ile yer değiştireceğini ve “()” ilgili parametrenin her katmanında değişiklik yapılacağını ifade etmektedir. Örneğin “r_SOL_AWC ().sol_____1” için; 1 nolu alt havzada SOL_AWC parametresi için bütün katmanlarıdaki değerlerin 0,78 değeri ile çarpılacağını ifade etmektedir. SWAT-CUP programında parametreler havza, arazi kullanımı, hidrolojik grup, yükselti, toprak özellikleri ve eğim gibi birçok özelliğin spesifik olarak belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Böylelikle kullanıcılara çalışma alanında genelden özele çözüm seçenekleri sunmaktadır (Abbaspour, 2015). Tez çalışması kapsamında 3 alt havzaya ayrılan çalışma alanı için hassasiyet analizinde hassasiyeti yüksek olan değerler için havza bazlı değerlendirme yapılmıştır.

Model performans değerlendirmesi için Moriasi vd. (2007) tarafından yapılmış oldukları havza modellerinin gözlemlenen ve benzeştirilen akış verilerinin model performans değerlendirmesi ile Abbaspour (2015) tarafından SWAT-CUP programının model başarısı ve simülasyondaki belirsizlikleri dikkate alan p-faktör ve r-faktör değerlendirmeleri kullanılmıştır. Modelin başarılı olarak değerlendirilmesi için p-

faktörünün 0,7 değerinden büyük ve r-faktörünün 1 değerine eşit ve/veya yakın değer almalıdır (Abbaspour, 2015).



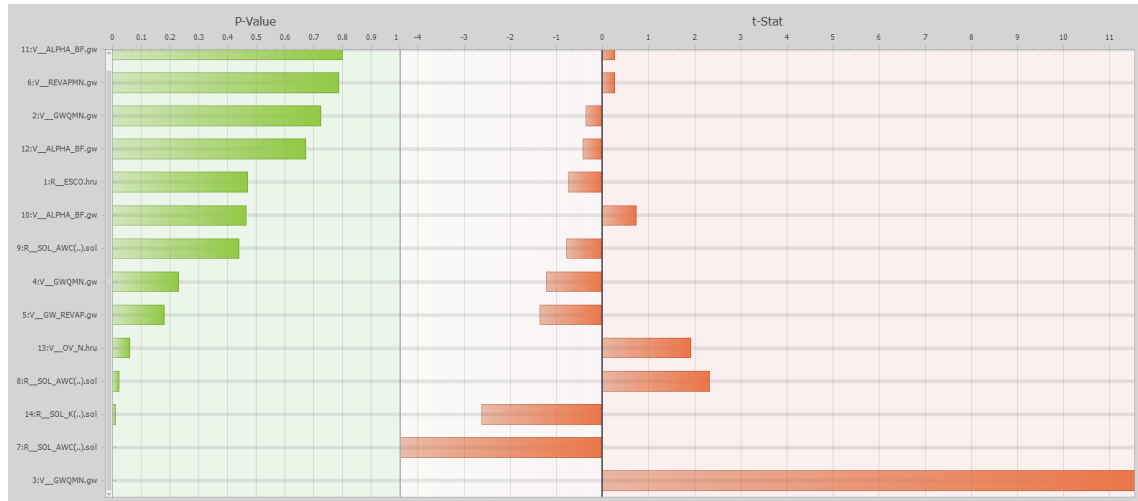
Şekil 32 95PPU güven aralığı ile a) kalibrasyon, b) validasyon işlemlerinde gözlenen ve simüle edilen akım değerleri grafikleri

Kalibrasyon işleminde en iyi sonuca ait model performansı Şekil 32 a) grafiğinde verilmiştir. Kalibre edilmiş parametreler ile 2011-2013 yılları arasındaki akım verileri için doğrulanmıştır (Şekil 32 b). Model performans verilerine göre kalibrasyon serisinin istatistiksel olarak çok iyi olarak değerlendirildiği ancak validasyon işleminin NSE değeri için başarısız olarak değerlendirildiği anlaşılmaktadır. Kalibrasyon ve validasyon işlemlerinde akım gözlem verilerinin % 95 güven aralığı içerisinde kalan güven aralığını ifade eden p-faktörünün düşük kaldığı anlaşılmaktadır. Model çalışmaları sonucunu değerlendirmesi simüle edilen ve gözlemlenen hidrografın görsel olarak karşılaştırılması önem taşımaktadır. Validasyon akım grafiğine bakıldığında simüle edilen akım veri seti ile gözlemlenen akım veri setlerinin pik noktalarını yakaladığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 12 Kalibrasyon ve validasyon işlemleri sonucu model performans verileri

Model Performans Değerleri	R ²	NSE	PBIAS	p-factor	r-factor
Kalibrasyon	0,88	0,88	2,6	0,46	0,92
Validasyon	0,72	0,32	-1,4	0,58	1,12

SWAT-CUP programında yeralan Global Sensivity Analysis metodu ile belirlenen model parametreleri hassasiyet verileri grafiği Şekil 33'te gösterilmiştir. t-stat ve p-değeri, sırasıyla SUFI-2 algoritması tarafından duyarlılığın ölçüsünü ve önemini göstermektedir. Sıfıra yakın p değeri (p-value) ve mutlak büyük t değerine (t stat) sahip olan parametreler hassas parametreyi ifade etmektedir. Kalibrasyon sonucuna göre GWQMN, SOL_AWC, ve SOL_K parametreleri en hassas parametreler olarak belirlenmiştir.



Şekil 33 Model parametrelerinin hassasiyet analizi sonuçları

4.2.2 Büğdüz Göleti Sonrası Model Çalışmaları

Büğdüz Göletinin olduğu 2014-2018 yılları arasında iki farklı model geliştirilmiş ve çalıştırılmıştır. Yine ilk model çalışmasında olduğu gibi Büğdüz Havzası 3 alt havza olarak incelenmiştir. Arazi kullanımı olarak 2006 ve 2012 CORINE verilerinde büyük fark olmadığı için CORINE 2006 veri seti kullanılmıştır. Toprak veri seti olarak FAO'dan temin edilen veriler kullanılmıştır.

Büğdüz Göleti yapılmadan önceki dönem için oluşturulan modelin kalibrasyon ve validasyon işlemi sonucunda elde edilen parametler kullanılarak 2014 ve 2018 yılları

arasında Būğdüz Gölentinin bulunduğu ve bulunmadığı 2 farklı model kurulmuştur. Her iki modelde de 2014 yılı warm-up olacak şekilde çalıştırılmıştır. Modellerin kurulumunda ihtiyaç duyulan SYM, arazi kullanımı, toprak verisi ve meteorolojik veri setleri ortak kullanılmıştır. Būğdüz Gölentinin bulunduğu model için gölete ait alan, hacim ve sulama verileri DSİ tarafından onaylanan *Burdur–Merkez Būğdüz Gölü Planlama Raporundan* temin edilmiştir (DSİ, 2010).

Çizelge 13 Model kurulumunda kullanılan Būğdüz Gölü bilgileri (DSİ, 2010)

Būğdüz Gölü Bilgileri
Akarsu Adı: Yayla Deresi
Yağış alanı (Göl): 40,60 km ²
Yayla Deresi Yıllık Ort.Akım: 2,33 hm ³ /yıl
Maksimum Su Seviyesi: 1253,51 m
Minimum Su Seviyesinde Göl Hacmi: 0,61 hm ³
Minimum Su Seviyesinde Göl Alanı: 0,103 km ²
Normal Su Seviyesinde Göl Hacmi: 2,07 hm ³
Normal Su Seviyesinde Göl Alanı: 0,236 km ²
Maksimum Su Seviyesinde Göl Hacmi: 2,65 hm ³
Maksimum Su Seviyesinde Göl Alanı: 0,279 km ²
Aktif Göl Hacmi: 1,46 hm ³
Sulamaya Verilen Yıllık Su Miktarı: 1,22 hm ³ /yıl
Su Haklarına Verilen Yıllık Su Miktarı: 0,23 hm ³ /yıl

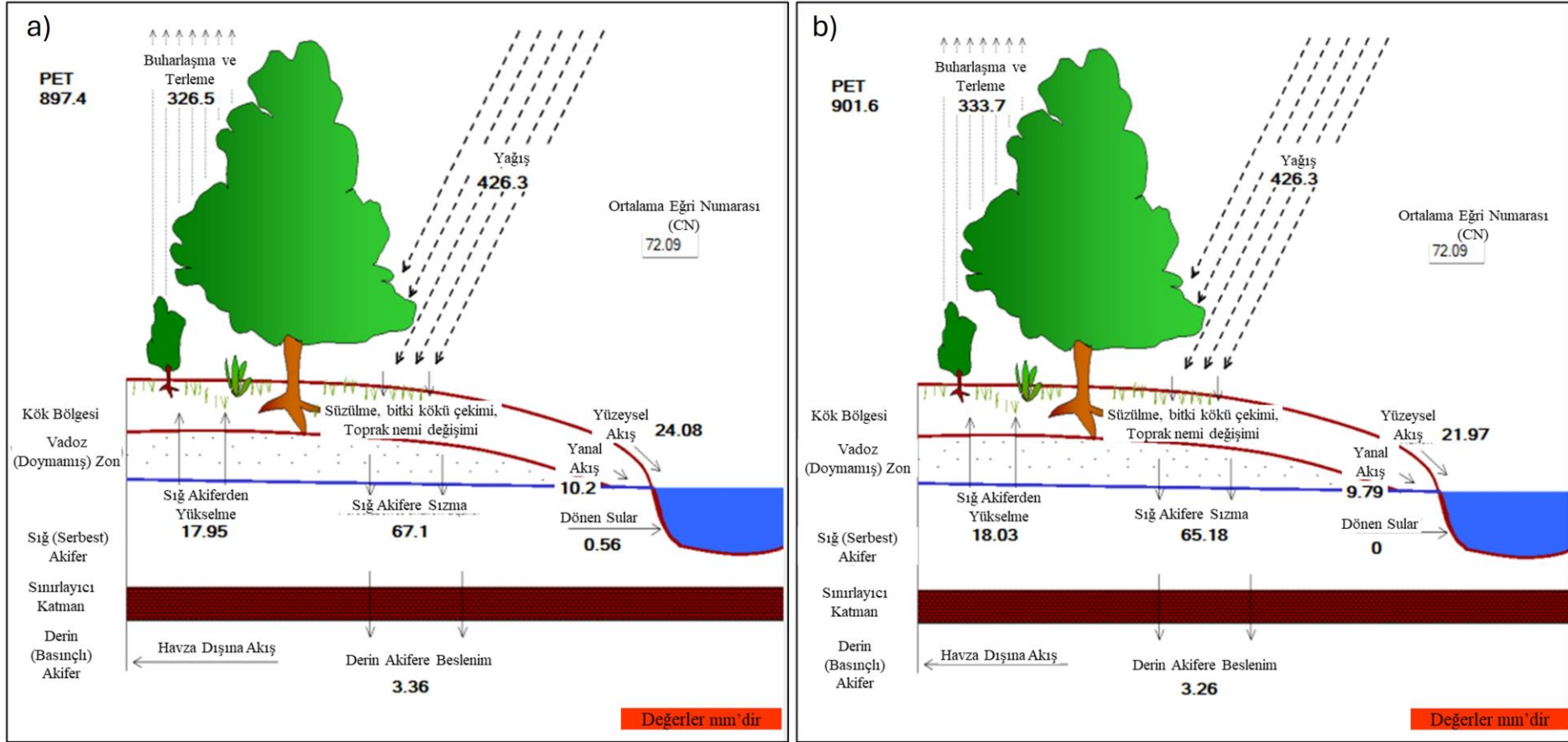
Būğdüz Gölü ile Mayıs-Ekim aylarında sulama yapılması planlanmıştır. DSİ (2010) tarafından Būğdüz Gölü ile sulanacak arazilerin bitki su ihtiyaçları projeli durumda bitki paterni dikkate alınarak Blaney-Criddle metodu ile hesaplanmıştır (Çizelge 14). Proje kapsamında net sulama alanı 286 ha, brüt sulama alanı ise 328 ha olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında sulama alanı ortalama olarak 300 ha olarak alınmıştır. Būğdüz Gölentinin bulunduğu dönemdeki model çalışmalarında 3. alt havzada yer alan

tarımsal alanlar için sulama yapıldığı ve sulama suyunun gölet tarafından sağlandığı rezervuar modülüne girilmiştir.

Çizelge 14 Büğdüz Göleti sulama suyu ihtiyaçları (DSİ, 2010'dan değiştirilerek)

AYLAR	Sulama Suyu İhtiyacı (l/s/ha)	Sulama Suyu İhtiyacı (m³/s)
OCAK	0.00	0.00
ŞUBAT	0.00	0.00
MART	0.00	0.00
NİSAN	0.00	0.00
MAYIS	0.05	0.015
HAZİRAN	0.33	0.099
TEMMUZ	0.55	0.165
AGUSTOS	0.50	0.150
EYLÜL	0.17	0.051
EKİM	0.02	0.01
KASIM	0.00	0.00
ARALIK	0.00	0.00

Geliştirilen model sonuçları Şekil 34'te verilmiştir. Model sonuçlarına göre Büğdüz Göletinin bulunmadığı senaryoda yıllık ortalama buharlaşma ve terlemenin 326,5 mm, yüzeysel akışın 24,08 mm, yanal akışa geçen su miktarının 10,2 mm ve yeraltısuyundan göle olan beslenimin ise 0,56 mm; Büğdüz Göletinin bulunduğu dönemde ise yıllık ortalama buharlaşma ve terlemenin 7,2 mm, potansiyel buharlaşma ve terlemenin 4,2 mm arttığı, yüzeysel akışın 2,11 mm, yanal akışın 0,41 mm azaldığı ve yeraltısuyundan göle olan beslenimin 0 mm olduğu anlaşılmaktadır. Rezervuarlarda (baraj, gölet, vb.) biriken suyun önemli bir miktarı buharlaşma yoluyla atmosfere geri döndüğü bilinmekte olup model sonucunda da Büğdüz Göletinin bulunduğu dönemde buharlaşma ve terlemenin arttığına ulaşılmıştır.



Şekil 34 2014-2018 yılları için kurulan; a) Büğdüz Göletinin bulunmadığı b) Büğdüz Göletinin bulunduğu hidrolojik model sonuçları

Havzada Būgdūz Gōletinin bulunduđu ve bulunmadıđı dōnemlerdeki su bütçeleri kütlenin korunumu eřitliđi dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge 15 ve Çizelge 16'da verilmiřtir.

$$\text{Beslenim} - \text{Boşalım} = \pm \text{Depolamadaki Değişim } (\Delta S)$$

$$\text{Depolamadaki Değişim } (\Delta S) = \text{Girenler} - \text{Çıkanlar} = 0$$

Burada; beslenim, havza alanında gerçekteşen beslenim miktarını, boşalım, havza alanından gerçekteşen boşalım miktarını ifade etmektedir.

Būgdūz Gōletinin bulunmadığı dōnemde havzaya giren su miktarının $92,228 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ havzadan çıkan su miktarı $82,982 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ iken gōletin bulunduğu dōnemde bu değerler havzaya giren su miktarının $91,612 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ havzadan çıkan su miktarı ise $84,034 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 15 Būgdūz Gōletinin bulunmadıđı dōnemdeki su bütçesi

Havzaya Girenler	mm/yıl	$10^6 \times \text{m}^3/\text{yıl}$	Havzadan Çıkanlar	mm/yıl	$10^6 \times \text{m}^3/\text{yıl}$
Yağış	426,3	85,26	Buharlaşma ve Terleme	326,5	65,3
Yūzeyysel Akıř	24,08	4,816	Sıđ Akiferden Yūkselme	17,95	3,59
Yanal Akış	10,2	2,04	Sığ Akifere Sızma	67,1	13,42
Dōnen Sular	0,56	0,112	Derin Akifere Beslenim	3,36	0,672
Toplam	461,14	92,228	Toplam	414,91	82,982

$$\text{Depolamadaki Değişim } (\Delta S)(1) = \text{Havzaya Girenler} - \text{Havzadan Çıkanlar}$$

$$= 92,228 \times 10^6 - 82,982 \times 10^6 = 9,246 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

Būgdūz Gōletinin bulunmadıđı dōnemde Būgdūz Havzasının depolamasındaki deđerimin $9,246 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olduđu tespit edilmiřtir.

Çizelge 16 Büğdüz Göletinin bulunduğu dönemdeki su bütçesi

Havzaya Girenler	mm/yıl	10⁶ x m³/yıl	Havzadan Çıkanlar	mm/yıl	10⁶ x m³/yıl
Yağış	426,3	85,26	Buharlaştırma ve Terleme	333,7	66,74
Yüzeysel Akış	21,97	4,394	Sığ Akiferden Yükselme	18,03	3,606
Yanal Akış	9,79	1,958	Sığ Akifere Sızma	65,18	13,036
Dönen Sular	0	0	Derin Akifere Beslenme	3,26	0,652
Toplam	458,06	91,612	Toplam	420,17	84,034

Depolamadaki Değişim (ΔS)(2) = Havzaya Girenler - Havzadan Çıkanlar

$$= 91,612 \times 10^6 - 84,034 \times 10^6 = 7,578 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Fark} = (\Delta S)(1) - (\Delta S)(2) = 1,66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

Büğdüz Göletinin bulunduğu ve bulunmadığı dönemlerde Büğdüz Havzasının depolamasındaki değişim farkının $1,66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olduğu hesaplanmıştır.

Göletin bulunduğu dönemde Büğdüz Havzasından $1,66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ daha az su çıkışının olduğu anlaşılmaktadır. Dönemler arasındaki en büyük su kaybının $1,44 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ ile buharlaştırma ve terleme yoluyla olduğu hesaplanmıştır.

Büğdüz Göletinin üzerinde kurulduğu Yayla Deresinin yıllık ortalama akımı $2,33 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ 'dır (DSİ, 2010). Gölet yapılmamış olsaydı bu miktar yüzey suyu akışı boyunca sızma, kullanma, buharlaştırma ve terleme gibi kayıplardan sonra Büğdüz Deresine katılım sağlayacaktı. Ancak göletin varlığı ile yılda $1,44 \times 10^6 \text{ m}^3$ suyun buharlaştırma ve terleme yolu ile kaybedildiği ortaya konulmuştur. 2014 – 2018 (Nisan ayına kadar) yıllarında Büğdüz Deresinin yıllık ortalama akımı $1,54 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olup bu dönemde Yayla Deresinden $0,22 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ suyun Büğdüz Deresine katıldığı tespit edilmiştir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

İnsan kaynaklı etkilerin araştırılması için model çalışmaları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla ülkemizde ve dünyada sıklıkla kullanılan havza modeli olan SWAT hidrolojik model tercih edilmiştir. SWAT modeli yeterli sayıda gözlem verisi ve hidrometeorolojik verisi bulunmayan havzalarda bile su bütçesi çalışmalarının yapılmasına olanak vermesi ve ücretsiz olmasından dolayı araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Bu model çeşitli ölçeklerdeki havzalar üzerindeki iklim ve antropojenik değişikliklerinin fiziksel süreçlerindeki etkilerini izlemek ve tahmin etmek için başarıyla uygulanmış ve birçok çalışmaya konu olmuştur.

Tez çalışması ile Büğdüz Havzasındaki hidrolojik döngünün Büğdüz Göleti ile nasıl değiştiğine ilişkin araştırma yapılmıştır. Burdur Gölü'nü besleyen ana kollardan biri olan Büğdüz Deresi üzerinde kurulmuş olan Büğdüz Göletinin etkisinin araştırılması için göletten önceki dönemde SUFI-2 algoritması ile modelin 2005-2006 yılları arasında warm up 2007-2010 yılları arasında kalibrasyon ve 2011-2013 yılları arasında validasyon adımları gerçekleştirilmiştir. Model kalibrasyonunda, su akışını etkileyen parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerin farklı kombinasyonları ile simülasyonlar oluşturularak çalışma sahasının çıkışında bulunan AGİ'nin akım verileri ile en uygun değer aralıkları için en iyi parametre değerleri elde edilmiştir. Model parametrelerinin tamamlanmasının ardından kalibrasyon işlemi tamamlanarak validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Model kalibrasyon işlemi sonucunda R^2 değeri 0,88, NSE değeri 0,88 ve PBIAS değeri 2,6 olarak hesaplanmıştır. Model başarısı genel olarak çok iyi olarak değerlendirilmektedir. Validasyon işlemleri sonucu R^2 değeri 0,72, NSE değeri 0,32 ve PBIAS değeri -1,4 olarak hesaplanmıştır. R^2 değerinin 0,72 olarak hesaplanması gözlenen ve hesaplanan akım verileri arasında istatistiksel olarak yüksek dereceli ilişki bulunduğunu göstermektedir.

Model parametrizasyonu sonucu elde edilen parametreler kullanılarak Büğdüz Göletinin bulunduğu ve bulunmadığı senaryoları ile iki farklı model kurulmuştur. İlk öncelikle 2014 yılında inşaat yapımı tamamlanan ve su tutmaya başlayan Büğdüz Göletinin bulunduğu 2014-2018 yılları arasında hidrolojik model oluşturulmuştur. Büğdüz Göletinin bulunduğu modelde gölete ait alan, hacim ve sulama verileri DSİ (2010) tarafından onaylanan rapordan temin edilerek modele tanımlanmış ve model çalıştırılmıştır. Daha sonra aynı veriler kullanılarak göletin bulunmadığı durumdaki 2014-2018 yılları

arasındaki senaryo kurgulanmış ve model çalıştırılmıştır. Bu durumda elde edilen hidrolojik modeller karşılaştırılmış ve göletin bulunmadığı senaryoda çalıştırılan modelde yıllık ortalama buharlaşma ve terlemenin 326,5 mm, yüzeysel akışın 24,08 mm, yanal akışa geçen su miktarının 10,2 mm ve yeraltısuyundan göle olan beslenimin ise 0,56 mm olduğu hesaplanmıştır. Büğdüz Göletinin bulunduğu dönemde ise yıllık ortalama buharlaşma ve terlemenin 7,2 mm, potansiyel buharlaşma ve terlemenin 4,2 mm arttığı, yüzeysel akışın 2,11 mm, yanal akışın 0,41 mm azaldığı ve yeraltısuyundan göle olan beslenimin 0 mm olduğu hesaplanmıştır.

Havzada Büğdüz Göletinin bulunmadığı dönemdeki depolamadaki değişim $9,246 \times 10^6$ m³/yıl, Büğdüz Göletinin bulunduğu dönemdeki depolamadaki değişim $7,578 \times 10^6$ m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durumda göletin bulunduğu dönemlerde $1,66 \times 10^6$ m³/yıl daha az beslenme olduğu tespit edilmiştir. Modeller arasındaki en büyük su kaybı farkının $1,44 \times 10^6$ m³/yıl ile buharlaşma ve terleme yoluyla olduğu tespit edilmiştir.

Hesaplanan su bütçelerinde havza beslenme ve boşalım değerleri arasında yaklaşık %10 hata payları bulunmaktadır. Bunun sebebi model çalışmalarında kullanılan modele girilen toprak verileri, meteorolojik veriler, su kullanımları, arazi kullanımları, vb., özelliklerinin yeterli hassasiyette olmaması olarak değerlendirilebilir.

Bu tez çalışmasında yüzeysuları üzerine kurulan su yapılarının etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçta Büğdüz Göletinin bulunmadığı dönemde yüzeysuyu akışının daha fazla olduğu buharlaşma ve terleme değerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında su yapılarının yüzeysuları besleniminde ve hidrolojik döngüde fark yaratacak etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Gelecekteki çalışmalara yön vermek amacıyla model kurulumu aşamasında verilerdeki ve kullanılan programlardaki belirsizliklerin giderilmesi halinde daha başarılı sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir. Modelin kurulumunda kullanılan arazi kullanım verileri, toprak verileri, meteorolojik ve akım verileri ile SUFI-2 parametrelerdeki belirsizlikler değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin, bölge halkı ile yapılan görüşmelerde tarımsal sulama amacıyla Büğdüz Deresinden pompaj yöntemi ile suyun çekildiği hakkında bilgi alınmıştır. Ancak sulamada kullanılan suyun miktarı ve zamanı hakkında net bir bilgi bulunmadığı için model kurulumuna dahil edilememiştir. Yine arazi kullanımı için yıllara göre bitki deseni bilgileri bulunmadığından CORINE veri seti kullanıldığından toprağın su tutma kapasitesi ve sulama ihtiyacına dair eksiklikler model aşamasında yetersiz

kalmaktadır. Çalışma alanı içerisinde ve çevresinde yeterli sayıda uzun dönem gözlem verisine sahip meteoroloji gözlem istasyonlarının bulunmamasından kaynaklı belirsizliklerde model performansına etki edebilmektedir. Tüm bu eksikliklere rağmen simüle edilen akım veri seti ile gözlemlenen akım veri setlerinin pik noktalarını yakaladığı görülmektedir.

Havzada çevresel ve hidrolojik etkileri incelemek için kurulması planlanan su yapılarının memba ve mansabında uzun dönem akım ölçümleri yapılmalıdır. Böylelikle sonraki dönemlerde kurulacak olan hidrolojik modelde su yapılarının hidrolojik döngüde yaratacağı etki daha iyi ortaya konulabilir.

Hassasiyet analizi sonucu en hassas parametrelerin toprak verilerinin olduğu tespit edilmiştir. İlerleyen zamanlarda bu bölgede yapılması düşünülen çalışmalarda özellikle toprağın kullanılabilir su tutma kapasitesi ve toprak iletkenliği parametrelerinin elde edilerek model girilmesi durumunda daha iyi sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.

SWAT modelinin zayıflığı olarak model kurulumuna jeolojik ve hidrojeolojik yapının dahil edilmemesi birçok araştırmacı tarafından da belirtilmiştir (Kim vd. 2008; Nguyen vd. 2018; Senent-Aparicio vd. 2020; Molina-Navarro vd. 2019; Sánchez-Gómez, 2022). SWAT, modeldeki her HRU için tek katmanlı, sığ, sınırlandırılmamış bir akifer kurar ancak bu geçirimsiz alanların her alanda gerçekçi olmayacağı açıktır. Yüzeysel akış, sızma, depolama ve yeraltısuyuna akış hidrolojik döngüdeki su dengesini etkileyen önemli faktörlerdir. SWAT modelinin güvenilirliğini arttırmak için yüzey ve yeraltısuyu akış süreçlerini birleştiren entegre bir model olan SWAT-MODFLOW modelinin kullanılması önerilmektedir.

6 KAYNAKLAR

- Açıklı, Ş. (2012). Gökova-Azmac (Muğla) Karst Kaynaklarında Akım ve Tuzlu Su Karışımı Dinamiğinin Kavramsal Modellenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- Al Khoury, I., L. Boithias and D. Labat (2023). "A Review of the Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in Karst Watersheds." *Water* 15(5): 954.
- Alina Tudryn, P. T., Nevzat Özgür, Elisabeth Gibert, Omer Elitok, Zuheyr Kamaci, Marc Massault, André Poisson & Bernard Platevoet (2013). "A 2300-year record of environmental change from SW Anatolia, Lake Burdur, Turkey." *Journal of Paleolimnology*.
- Arslan, G. (2023). Örencik Ofiyoliti (Burdur-Acıgöl) Tabanındaki Metamorfik Dilime Ait Kayaçların Kökeni ve Jeotermobarometrik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- Ataol, M. (2010). Burdur Gölü Havzası için yeni bir su yönetim modeli önerisi.
- Baffaut, C., S. M. Dabney, M. D. Smolen, M. A. Youssef, J. V. Bonta, M. L. Chu, J. A. Guzman, V. S. Shedekar, M. K. Jha and J. G. Arnold (2015). "Hydrologic and water quality modeling: Spatial and temporal considerations." *Transactions of the ASABE* 58(6): 1661-1680.
- Bilgin, Z. R., T. Karaman, Z. Öztürk, M. A. Şen and A. R. Demirci (1990). "Yeşilova-Acıgöl Civarının Jeolojisi: MTA Raporu. 9429, Ankara."
- Çakmak, M. (2016). Yarışlı Gölü (Burdur) Sulak Alanının Hidrojeoloji ve Hidrojeokimyasal İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Cüceloğlu, G. (2019). İklim Değişikliğinin İstanbul'un Yüzeysel Su Kaynaklarına Etkisi ve Kuraklık Dirençli Bütünleşik Su Yönetimi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- DSİ (2010). Burdur-Merkez Büğdüz Göleti Planlama Raporu, Yayınlanmamış. 13.Bölge Planlama Şube Müdürlüğü Isparta.
- DSİ (2016). "Burdur Göller Havzası Yeraltısuyu Planlama (Hidrojeolojik Etüd) Raporu Yapım İşi (Yayınlanmamış)." Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Erakman, B., M. Meşhur, M. Gül, H. Alkan, Y. Öztaş and M. Akpınar (1982). "Fethiye-Köyceğiz-Tefenni Elmalı-Kalkan Arasında Kalan Alanın Jeolojisi, Türkiye, 6. Petrol Kongresi, Ankara, 23-31."
- Ersoy, Ş. (1989). Fethiye (Muğla)-Göhlisar (Burdur) Arasında Güneydağı ile Kelebekli Dağ ve Dolaylarının Jeolojisi. Doktora Tezi (Yayınlanmamış). İÜ. Fen Bilimi Ens., 246 s.
- Ersoy, Ş. (1990). Batı Toros (Likya) Napları'nın Yapısal Öğelerinin ve Evriminin Analizi, T.M.M.O.B., J.M.O., Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 37, 5-16.

- Fu, B., W. S. Merritt, B. F. Croke, T. R. Weber and A. J. Jakeman (2019). "A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects." *Environmental modelling & software* 114: 75-97.
- Germeç, H. K. (2023). Assessment of the impacts of future climatic variations and anthropogenic activities on Burdur lake levels, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Göncü, S., E. A. Albek and M. ALbek (2016). "Burdur, Eğirdir, Sapanca ve Tuz Gölleri Su Seviyelerinin Nonparametrik İstatistik Yöntemler ile Eğilim Analizi." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
- Gözükara, G., S. Altunbaş and S. Mustafa (2019). "Burdur Gölü'ndeki seviye değişimi sonucunda ortaya çıkan lakustrin materyalin zamansal ve mekansal değişimi." *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi* 34(3): 386-396.
- Keskin, M. E., E. D. Taylan and T. Aslanbaş (2015). "Eğirdir ve Burdur Gölleri su seviyelerinde olası azalma eğilimleri. 4." *Su Yapıları Sempozyumu*. Antalya.
- Kurnaz, L. (2014). "Drought in Turkey." *İstanbul Policy Center, Sabancı Üniversitesi-İstanbul*.
- Kuwajima, J. I., P. P. A. Júnior, R. B. de Miranda and F. F. Mauad (2013). Comparison of Green-Ampt and Curve Number Infiltration Methods in a single-gauged Brazilian watershed. *Proceedings*.
- Li, W., W. Wang, Y. Wu, Q. Quan, S. Zhao and W. Zhang (2022). "Impact of Human Activities on Hydrological Drought Evolution in the Xilin River Basin." *Atmosphere* 13(12): 2079.
- Li, Y., Y. Qin and P. Rong (2022). "Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman–Monteith equation in environmental sensitive areas of China." *Atmospheric Research* 273.
- Liu, C. and J. Xia (2004). "Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China." *Hydrological Processes* 18(12): 2197-2210.
- Liu, W., J. Wu, F. Xu, D. Mu and P. Zhang (2024). "Modeling the effects of land use/land cover changes on river runoff using SWAT models: A case study of the Danjiang River source area, China."
- Mango, L. M., A. M. Melesse, M. E. McClain, D. Gann and S. Setegn (2011). "Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management." *Hydrology and earth system sciences* 15(7): 2245-2258.
- Meşhur, M., O. Yoldemir, M. Akpınar, Y. Öztaş and H. Alkan (1989). "Batı Toroslar'ın jeolojisi ve petrol olanakları raporu: TPAO Rapor no: (yayımlanmamış)."
- MGM (2016). "Thornthwaite İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi." *T.C. Orman Ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü*

- Moriasi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai and P. Daggupati (2015). "Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria." Transactions of the ASABE 58(6): 1763-1785.
- MTA (2010). 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Harita Serisi: Isparta M24 Paftası, 2. Baskı, MTA (Maden Tetkik ve Arasştırma Enstitüsü Genel Müdürlüğü).
- Omer, A., W. Wang, A. K. Basheer and B. Yong (2016). "Integrated assessment of the impacts of climate variability and anthropogenic activities on river runoff: a case study in the Hutuo River Basin, China." Hydrology Research 48(2): 416-430.
- Önalın, M. (1979). Elmalı-Kaş (Antalya) Arasındaki Alanın Jeolojisi. İ.Ü.F.F Monografileri. Doktora Tezi. Sayı. 29. 139 s. İstanbul. .
- Pınarlık, M., İ. Abdulkadir and Z. Selek (2023). "İklim Değişikliği Etkisi Altında Burdur Gölü Su Seviyesi Değişimlerinin İstatistiksel Olarak İncelenmesi." Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 11(1): 81-93.
- Poisson, A. (1977). "Recherches geologiques dans les Taurides occidentales (Turquie). These, Universite Paris-sud, 795 p., Orsay. ."
- Sánchez-Gómez, A., S. Martínez-Pérez, F. M. Pérez-Chavero and E. Molina-Navarro (2022). "Optimization of a SWAT model by incorporating geological information through calibration strategies." Optimization and Engineering 23(4): 2203-2233.
- Şenel, M. (2004). "Batı Toroslardaki Yeşilbarak Napının Stratigrafik ve Yapısal Özellikleri, GD Anadoludaki ve Kuzey Kıbrıs'taki Benzer Birimlerle Karşılaştırılması." MTA Dergisi, 128.
- Şenel, M. and A. Bölükbaşı (1997). "1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, No: 7, Antalya - L10 Paftası, MTA Jeoloji Etüd Dairesi, Ankara."
- Şenel, M., H. Selçuk, Z. R. Bilgin, M. A. Şen, T. Karaman, M. A. Dinçer, E. Durukan, A. Arbas, S. Örçen and C. Bilgi (1989). "Çameli (Denizli)- Yeşilova (Burdur)- Elmalı (Antalya) ve Kuzeyinin Jeolojisi. MTA Rap: 9429, Ankara."
- Şener, E., A. Davraz and T. İsmailov (2005). "Burdur Gölü Seviye Değişimlerinin Çok Zamanlı Uydu Görüntüleri İle İzlenmesi." Türkiye Kuvaterner Sempozyumu.
- Sheng, S., Q. Chen, J. Li and H. Chen (2023). "The Improved Reservoir Module of SWAT Model with a Dispatch Function and Its Application on Assessing the Impact of Climate Change and Human Activities on Runoff Change." Water 15(14): 2620.
- Sohel, M. S. I. (2012). Ecohydrological Modelling of a Mediterranean Catchment (Quarteira, Portugal) using SWAT: Model Setup, Calibration and Validation Christian-Albrechts-University, Kiel, Germany
- Taş, M. A. and E. Akpınar (2021). "Burdur havzasındaki göllerde yaşanan seviye değişikliklerinin coğrafi bilgi sistemleri (cbs) ve uzaktan algılama (ua) ile tespiti." Doğu Coğrafya Dergisi 26(46): 37-54.
- Thornthwaite, C. W. (1948). "An Approach toward a Rational Classification of Climate." Geographical Review Vol. 38, No. 1. (Jan., 1948), pp. 55-94.

- USGS (1991). "National Water Summary 1988-89--Hydrologic Events and Floods and Droughts: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2375, p. 99-104."
- W. Gassman, P., M. R. Reyes, C. H. Green and J. G. Arnold (2007). "The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions." Transactions of the ASABE 50(4): 1211-1250.
- Xu, X., H. Yang, D. Yang and H. Ma (2013). "Assessing the impacts of climate variability and human activities on annual runoff in the Luan River basin, China." Hydrology Research 44(5): 940-952.
- Yalçınkaya, S., A. Ergin, Ö. P. Afşar and K. Taner (1986). "Batı Torosların Jeolojisi, MTA Raporu, No. 7779 Ankara."
- Yiğitbaşıoğlu, H. and U. Abdullah (2010). "Burdur Gölü havzasında arazi kullanım özelliklerinden kaynaklanan çevre sorunları." Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi 2(2): 129-143.
- Url-1 < <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> >, Erişim Tarihi 28.11.2022
- Url-2 < <https://srtm.csi.cgiar.org/> >, Erişim Tarihi 01.10.2022
- Url-3 < <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en/> >, Erişim Tarihi 01.10.2022
- Url-4 < <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover> >, Erişim Tarihi 01.10.2022
- Url-5 < <https://corine.tarimorman.gov.tr/corineportal/kapsam.html> >, Erişim Tarihi 22.08.2024
- Url-6 < <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/land-use> >, Erişim Tarihi 22.08.2024

