

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SWAT MODELİ KULLANILARAK FİLYOS ÇAYI HAVZASI'NIN HİDROLOJİK  
ANALİZİ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÖMER GÜNGÖR**

**MART 2018**

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SWAT MODELİ KULLANILARAK FİLYOS ÇAYI HAVZASI'NIN HİDROLOJİK  
ANALİZİ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**Ömer GÜNGÖR**

**DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Kadir ÖZDEMİR**

**ZONGULDAK**

**Mart 2018**

**KABUL:**

Ömer GÜNGÖR tarafından hazırlanan “SWAT Modeli Kullanılarak Filyos Çayı Havzası'nın Hidrolojik Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/03/2018

**Danışman:** Dr. Öğr. Üy. Kadir ÖZDEMİR

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. Handan UCUN ÖZEL

Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üy. Özgür ZEYDAN

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üy. Aycan Murat MARANGOZ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylım. ....../....../2018

Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Ömer GÜNGÖR

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **SWAT MODELİ KULLANILARAK FİLYOS ÇAYI HAVZASI'NIN HİDROLOJİK ANALİZİ**

**Ömer GÜNGÖR**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kadir ÖZDEMİR**

**Mart 2018, 149 sayfa**

Son yıllarda, entegre havza yönetimi çalışmaları Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de önemli bir konu haline gelmiştir. Bunun nedeni, Türkiye'nin su kaynakları açısından zengin bir ülke olmaması ve gelecekte su sıkıntısı çeken ülkeler arasında yer almasının beklenmesidir. Ayrıca Türkiye, Avrupa Birliği'ne (AB) tam üyelik sürecinde Su Çerçeve Direktifi'nde yer alan yükümlülükleri de yerine getirmek zorundadır. Bu kapsamda Orman ve Su İşleri Bakanlığı tarafından havza koruma eylem planları ve yönetim planları çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki aşamada en önemli konulardan birisi hidrolojik ve su kalitesi modelleme çalışmalarıdır. Literatürde Filyos Çayı Havzası için hidrolojik bir model çalışması bulunmamaktadır. Bu çalışmayla, Filyos Çayı Havzası'nda su yönetimi uygulamalarına yardımcı olmak için bir hidrolojik modelleme çerçevesi kurulmuştur.

Bu çalışmada, hidrolojik bileşenlerin belirlenmesi için Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) modeli ile Filyos Çayı Havzası'nın hidrolojisi modellenmiştir. Dört basamaklı

## ÖZET (devam ediyor)

çalışmanın ilk aşamasında, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), arazi kullanımı, toprak ve meteorolojik veriler kullanılarak bir hidrolojik model oluşturulmuştur. Kurulan model, SWAT-Cup otomatik kalibrasyon programı kullanılarak, 1988-1993 yılları arasındaki dönemde kalibre edilmiş, 1988-2000 yılları arasındaki dönemde de doğrulanmıştır. Kalibrasyon ve validasyon süreçlerinde dört farklı akım gözlem istasyonunun verileri kullanılmıştır. Model 1979-2013 yılları arasındaki dönemde çalıştırılmış ve Filyos Çayı Havzası'nın hidrolojik durumunu belirlemek için tüm hidrolojik çıktılar değerlendirilmiştir. Son olarak, iklim değişikliğinin akarsu debisi üzerine olan etkileri araştırılmıştır.

İstasyon gözlemleri model sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, Filyos Derecikviran istasyonunda kalibrasyon dönemi için aylık Nash-Sutcliffe, RSR ve PBIAS performans göstergeleri sırasıyla 0,67, 0,57 ve -14,3, validasyon dönemi için 0,72, 0,52 ve -18,9 olmuştur. Filyos Çayı'nın kolu olan Araç Çayı istasyonunun sonuçları ise, kalibrasyon dönemi için sırasıyla 0,77, 0,48 ve -11,9 ve validasyon dönemi için sırasıyla 0,84, 0,40, ve -13,2 değerlerini göstermektedir. Hidrolojik bileşenler incelendiğinde, tüm çıktılar 1979-2013 döneminde azalma eğilimindedir. Su veriminde % 35, sızma miktarında % 41 ve yeraltı suyu miktarında % 34 gibi ciddi azalmalar dikkat çekmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolojik modelleme, Filyos Çayı Havzası, SWAT modeli, İklim değişikliği

**Bilim Kodu:** 615.01.00.

## **ABSTRACT**

**Ph.D. Thesis**

# **HYDROLOGICAL ANALYSIS OF FILYOS CREEK WATERSHED USING SWAT MODEL**

**Ömer GÜNGÖR**

**Bülent Ecevit University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Environmental Engineering**

**Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Kadir ÖZDEMİR**

**March 2018, 149 pages**

In recent years, integrated watershed management studies have become an important issue in Turkey as well as in the world. The reason is that Turkey is expected not to be a country rich in water resources and to be among the water-stressed countries in the future. Turkey has to fulfill the obligations of Water Framework Directive in the process of full membership to the European Union. In this context, watershed protection action plans and management plans studies were carried out by the Ministry of Forestry and Water Affairs. One of the most important issues in the next stage is hydrological and water quality modeling studies. There is no hydrological model for the Filyos Creek Watershed in the literature. With this study, a hydrological modelling framework has been founded to aid water management applications in the Filyos Creek Watershed.

In this study, the hydrology of the Filyos Creek Basin was modeled using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to determine the hydrological components. In the first phase of the four-stage work, a hydrological model was established using digital elevation model, land use, soil and meteorological data. The model was calibrated during the period 1988-1993 using the

## **ABSTRACT (continued)**

SWATCup automatic calibration program and verified during the period 1988-2000. Data of four different flow monitoring stations were used in the calibration and validation processes. The model has been run between 1979 and 2013, and all hydrological outputs were evaluated to determine the hydrological status of the Filyos Creek Watershed. Finally, the effects of climate change on streamflow have been investigated.

When the observations at the stations are compared with model results, the monthly Nash-Sutcliffe, RSR and PBIAS performance indicators for the calibration period at Filyos Derecikviran station have been 0.67, 0.57 and -14.3, respectively and for the validation period, 0.72, 0.52 and 18.9 respectively. The results for Araç Creek station, which is tributary of Filyos Creek, has shown values of 0.77, 0.48 and -11.9, respectively, for the calibration period, and 0.84, 0.40 and 0.40, -13.2, respectively, for the validation period. When the hydrological components are investigated, all hydrological output tends to decrease in the period 1979-2013. Serious decreases such as 35 % in water yield, 41 % in infiltration amount and 34% in groundwater amount are remarkable.

**Keywords:** Hydrologic modelling, Filyos Creek Watershed, SWAT model, Climate change.

**Science Code:** 615.01.00.



## TEŞEKKÜR

Tez alıőmamda büyük emeği olan, doktora eğitimim süresince büyük ilgi ve anlayıőını gördüğüm, tez çalışmasının baőlamasından bitimine kadar her konuda bana yardımcı olan, tez danıőmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kadir ÖZDEMİR'e sonsuz sayęı ve teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmamda yardımlarını esirgemeyen, tecbeleriyle bana yol gösteren tez izleme komite yeleri Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özgür ZEYDAN ve Dr. Öğr. Üyesi Aycan Murat MARANGOZ'a sonsuz sayęı ve teőekkürlerimi sunarım.

Lisans ve lisansüstü öğrenimim boyunca her konuda yanımda olan değerli arkadaőım Dr. Öğr. Üyesi Ersin AYTAÇ'a sonsuz sayęı ve teőekkürlerimi sunarım.

Her zaman maddi manevi benim yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, hayatımın sonuna kadar minnettar kalacağım aileme en içten teőekkürleri sunarım.



## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| KABUL .....  | ii           |
| ÖZET .....   | iii          |
| ABSTRACT .....   | v            |
| TEŞEKKÜR .....   | vii          |
| İÇİNDEKİLER.....   | ix           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....   | xiii         |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....  | xvii         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                | xix          |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 1 GİRİŞ.....   | 1            |
| <br>   |              |
| 1.1 TEZİN AMACI VE KAPSAMI .....                                   | 3            |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 2 HİDROLOJİK MODELLEME.....                                  | 5            |
| <br>   |              |
| 2.1 HİDROLOJİK MODELLEME PRENSİPLERİ.....                          | 6            |
| 2.2 HİDROLOJİK MODELLERİN SINIFLANDIRILMASI.....                   | 10           |
| 2.3 HİDROLOJİK MODELİN GELİŞTİRİLMESİ .....                        | 13           |
| 2.4 MODEL PARAMETRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ.....                    | 16           |
| 2.4.1 Doğal Parametreler ve Tahmin Yöntemleri .....                | 16           |
| 2.4.2 Performans ve Eşitlik Kriterleri .....                       | 19           |
| 2.4.3 Manuel Kalibrasyon, Otomatik Kalibrasyon ve Belirsizlik..... | 20           |
| 2.5 HAVZALARDA KULLANILAN HİDROLOJİK MODELLER .....                | 23           |
| 2.5.1 SWAT Modeli.....   | 25           |
| 2.5.2 HSPF Modeli .....  | 26           |
| 2.5.3 HEC Modeli .....   | 27           |
| 2.5.4 MIKE SHE Modeli .....  | 28           |
| 2.5.5 WEAP Modeli.....   | 30           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.5.6 TOPMODEL.....  | 31           |
| <b>BÖLÜM 3 SWAT MODELİ VE TARİHÇESİ .....</b>                        | <b>33</b>    |
| 3.1 SWAT MODELİNİN HİDROLOJİK ÇEVİRİM YAKLAŞIMI.....                 | 34           |
| 3.2 HİDROMETEOROLOJİK FAKTÖRLER.....                                 | 44           |
| 3.2.1 Yağış.....   | 44           |
| 3.2.2 Güneş Radyasyonu ve Sıcaklık.....                              | 48           |
| 3.2.3 Bağıl Nem .....  | 49           |
| 3.2.4 Rüzgâr Hızı .....  | 50           |
| 3.2.5 Kar Örtüsü.....  | 50           |
| 3.2.6 Evapotranspirasyon .....                                       | 54           |
| <b>BÖLÜM 4 HİDROLOJİK ANALİZ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR .....</b> | <b>63</b>    |
| 4.1 FİLYOS HAVZASINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR.....                        | 63           |
| 4.2 SWAT MODELİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....                         | 66           |
| 4.3 MODELLERİN KARŞILAŞTIRMASI İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR.....          | 73           |
| <b>BÖLÜM 5 MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                               | <b>77</b>    |
| 5.1 ÇALIŞMA ALANI.....   | 77           |
| 5.2. MODEL SEÇİMİ.....   | 80           |
| 5.3 MODEL GİRDİLERİ VE KURULUMU.....                                 | 81           |
| 5.3.1. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM).....                           | 81           |
| 5.3.2. Eğim Sınıfları.....   | 82           |
| 5.3.3 Toprak Özellikleri.....  | 83           |
| 5.3.4 Arazi Kullanımı .....  | 84           |
| 5.3.5 İklim Özellikleri.....   | 86           |
| 5.3.6 Hidrolojik İşlem Birimleri .....                               | 91           |
| 5.3.7 Mavi ve Yeşil Su.....  | 93           |
| 5.4 MODEL KALİBRASYONU .....   | 94           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 5.5 DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTLERİ.....  | 96           |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....                                       | 101          |
| <br>  |              |
| 6.1 HİDROLOJİK GÖZLEM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....                       | 101          |
| 6.2 KALİBRASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....                             | 102          |
| 6.3 VALİDASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....                              | 106          |
| 6.4 HİDROLOJİK BİLEŞENLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....                             | 110          |
| 6.5 İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN AKIM SONUÇLARINA ETKİLERİNİN<br>DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 123          |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 7.1.3 TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....   | 131          |
| <br>  |              |
| KAYNAKLAR.....  | 133          |
| ÖZGEÇMİŞ .....  | 149          |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>No</u>  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 2.1 Hidrolojik süreçlerin zamansal ve mekânsal ölçekleri .....   | 7            |
| Şekil 2.2 Hidrolojik bir modelin tipik yapısı ve değişkenleri .....  | 9            |
| Şekil 2.3 Bir modelin $Z_1(t)$ ve $Z_2(t)$ çıktı değişkenleri için ürettiği simülasyon hatasının gösterimi .....                 | 10           |
| Şekil 2.4 Hidrolojik modellerin sınıflandırılması .....  | 12           |
| Şekil 2.5 Hidrolojik modelin geliştirilmesi yaklaşımı .....  | 15           |
| Şekil 2.6 Hidrolojik modelin $\theta$ parametreleri kullanılarak kalibrasyon edilmesi prosedürünün şematik olarak gösterimi..... | 18           |
| Şekil 2.7 MIKE SHE tarafından simüle edilen hidrolojik süreçler.....   | 29           |
| Şekil 3.1 SWAT modelinin gelişim süreci.....   | 34           |
| Şekil 3.2 HRU/Alt havza çalışma süreci. ....   | 36           |
| Şekil 3.3 SWAT modelindeki su hareketinin şematik gösterimi. ....  | 37           |
| Şekil 3.4 SCS eğri numarası metodundaki yağış-yüzeysel akış ilişkisi .....   | 42           |
| Şekil 3.5 Alansal örtü alanı ve SNO100 oranı arasındaki ilişki.....  | 53           |
| Şekil 3.6 Toprakta derinlik boyunca buharlaşacak maksimum su miktarı .....   | 60           |
| Şekil 3.7 Farklı esco değerlerindeki, derinlik ve maksimum buharlaşacak su miktarı arasındaki ilişki.....                        | 61           |
| Şekil 5.1 Filyos Çayı Havzası çalışma alanı. ....  | 79           |
| Şekil 5.2 Çalışmaya ilişkin akış şeması .....  | 81           |
| Şekil 5.3 Filyos Çayı Havzası sayısal yükseklik modeli.....  | 82           |
| Şekil 5.4 Filyos Çayı Havzası eğim sınıfları.....  | 83           |
| Şekil 5.5 Filyos Çayı Havzası toprak tipleri .....   | 84           |
| Şekil 5.6 Filyos Çayı Havzası arazi kullanımı .....  | 85           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| <u>No</u>   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 5.7 Filyos Çayı Havzası meteoroloji istasyonları .....                                  | 87           |
| Şekil 5.8 Aylık ortalama yağış miktarı (1979-2013).....                                       | 88           |
| Şekil 5.9 Yıllık toplam yağış miktarı (1979-2013) .....                                       | 89           |
| Şekil 5.10 Çalışma alanında yıllık toplam yağışın değişimi .....                              | 89           |
| Şekil 5.11 Çalışma alanında yıllık maksimum sıcaklık ortalamalarının değişimi .....           | 90           |
| Şekil 5.12 Çalışma alanında yıllık minimum sıcaklık ortalamalarının değişimi .....            | 90           |
| Şekil 5.13 Çalışma alanında günlük ortalama güneş radyasyonu değişimi .....                   | 91           |
| Şekil 5.14 Çalışma alanında yıllık ortalama rüzgar hızı değişimi.....                         | 91           |
| Şekil 5.15 Hidrolojik model çalışmasının özeti .....  | 92           |
| Şekil 5.16 Mavi ve yeşil su bileşenlerinin şematik gösterimi .....                            | 93           |
| Şekil 6.1 Akım gözlem istasyonlarının çalışma alanı içerisindeki konumları .....              | 101          |
| Şekil 6.2 Filyos Çayı Derecikviran AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması .... | 103          |
| Şekil 6.3 Araç Çayı AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....               | 104          |
| Şekil 6.4 Ulusu Afatlar AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması.....            | 105          |
| Şekil 6.5 Mengen Çayı Gökçesu AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....     | 105          |
| Şekil 6.6 Filyos Çayı Derecikviran AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması .... | 107          |
| Şekil 6.7 Araç Çayı AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....               | 107          |
| Şekil 6.8 Ulusu Afatlar AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması.....            | 108          |
| Şekil 6.9 Mengen Çayı Gökçesu AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....     | 109          |
| Şekil 6.10 Çalışma alanı için eriyen kar miktarının aylara göre değişimi (1979-2013) .....    | 111          |
| Şekil 6.11 Çalışma alanı için eriyen kar miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013).....    | 112          |
| Şekil 6.12 Çalışma alanı içerisindeki eriyen kar miktarının dağılımını .....                  | 112          |
| Şekil 6.13 Çalışma alanı için su verimi miktarının aylara göre değişimi (1979-2013) .....     | 114          |
| Şekil 6.14 Çalışma alanı için su verimi miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013).....     | 115          |



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| <u>No</u>  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 6.15 Çalışma alanı içerisindeki su verimi miktarının yıllık dağılımını.....                    | 115          |
| Şekil 6.16 Çalışma alanı için yeşil ve mavi su miktarlarının aylara göre değişimi (1979-2013) .....  | 116          |
| Şekil 6.17 Çalışma alanı için yeşil ve mavi su miktarlarının yıllara göre değişimi (1979-2013) ..... | 117          |
| Şekil 6.18 Çalışma alanı için PET ve ET miktarlarının aylara göre değişimi (1979-2013) ..            | 118          |
| Şekil 6.19 Çalışma alanı için PET ve ET miktarlarının yıllara göre değişimi (1979-2013) ..           | 118          |
| Şekil 6.20 Çalışma alanı içerisindeki yıllık ortalama ET dağılımı .....                              | 119          |
| Şekil 6.21 Çalışma alanı için sızma miktarının aylara göre değişimi (1979-2013) .....                | 120          |
| Şekil 6.22 Çalışma alanı için sızma miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013).....                | 121          |
| Şekil 6.23 Çalışma alanı için yeraltı suyu miktarının aylara göre değişimi (1979-2013).....          | 122          |
| Şekil 6.24 Çalışma alanı için yeraltı suyu miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013) .....        | 123          |
| Şekil 6.25 SRES A1B senaryosu Filyos Çayı Derecikviran istasyonu akım sonuçları .....                | 126          |
| Şekil 6.26 SRES A1B senaryosu Araç Çayı istasyonu akım sonuçları .....                               | 127          |
| Şekil 6.27 SRES A2 senaryosu Filyos Çayı Derecikviran istasyonu akım sonuçları .....                 | 128          |
| Şekil 6.28 SRES A2 senaryosu Araç Çayı istasyonu akım sonuçları .....                                | 129          |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>No</u>   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Çizelge 2.1 Bir amaç fonksiyonu için matematiksel ifadeler.....   | 20           |
| Çizelge 2.2 Bazı hidrolojik simülasyon modelleri .....  | 24           |
| Çizelge 3.1 Toprak gruplarının tarifi.....  | 40           |
| Çizelge 3.2 Bazı tarım, yarı kentleşmiş veya kentleşmiş arazi kullanımına sahip alanların eğri numaraları ..... | 41           |
| Çizelge 5.1 Filyos Çayı ve yan kollarına ilişkin bilgiler .....   | 78           |
| Çizelge 5.2 Filyos Çayı Havzası arazi kullanımını dağılımı.....   | 85           |
| Çizelge 5.3 Daha önceki çalışmalarda kullanılan kalibrasyon parametrelerinin aralık değerleri.....              | 95           |
| Çizelge 5.4 Model kalibrasyonu için kullanılan parametrelerin değişim aralığı .....                             | 96           |
| Çizelge 5.5 Aylık akım sonuçları performanslarının değerlendirilme kriterleri .....                             | 99           |
| Çizelge 6.1 Filyos Çayı Havzası'nda bulunan akım gözlem istasyonlarına ait konum bilgileri .....                | 102          |
| Çizelge 6.2 Kalibrasyon ve validasyon sürecindeki SWAT modelinin hidrolojik performansı.....                    | 110          |
| Çizelge 6.3 SWAT modelinde çalıştırılan küresel çevrim modelleri.....   | 124          |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $Z_{obs}(t)$               | : Hidrolojik modelin farklı çıktı değişkenlerinin herhangi bir t anındaki gözlem değerleri, |
| $X(t)$                     | : Herhangi bir t anındaki girdi değişkenleri,   |
| $Y(t)$                     | : Herhangi bir t anındaki durum değişkenleri,   |
| $BC(t)$                    | : Herhangi bir t anındaki sınır koşulları,  |
| $\theta$                   | : Model parametrelerinin vektörü,   |
| $\varepsilon_Z(t, \theta)$ | : Model hatasının vektörü,  |
| $\varepsilon_Z(t, 0)$      | : Hidrolojik değişken Z için herhangi bir zamandaki hata,                                   |
| $Z_{obs}(t)$               | : t anındaki gözlem verisi,   |
| $Z_{sim}(t)$               | : Herhangi bir t anındaki simülasyon çıktısı,   |
| $\theta$                   | : Hata parametresi fonksiyonu,  |
| $Z_{obs}$                  | : Simülasyon periyodunda $Z(t)$ değişkeninin m gözlem değerini içeren vektör,               |
| $Z_{sim}(\theta)$          | : Simülasyon periyodunda $Z(t)$ değişkeninin n simülasyon değerini içeren vektör,           |
| $\theta$                   | : G modelinin p parametresini içeren vektör,  |
| $X$                        | : m model girdi değişkeninin n değerini içeren vektör,                                      |
| $SW_t$                     | : Herhangi bir t anındaki toprağın su içeriği (mm),   |
| $SW_0$                     | : Başlangıçtaki toprağın su içeriği (mm),   |
| $R_{day}$                  | : Günlük yağış miktarı (mm),  |
| $Q_{surf}$                 | : Günlük yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm),  |
| $E_a$                      | : Günlük buharlaşma ve terleme (mm),  |
| $w_{seep}$                 | : Günlük sızan su miktarı (mm),   |
| $Q_{gw}$                   | : Günlük geri akış su miktarı (mm),   |
| $Q_{surf}$                 | : Yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm),   |
| $R_{day}$                  | : Günlük yağış miktarı (mm),  |
| $S$                        | : Tutulma parametresi (mm),   |
| $CN$                       | : Eğri numarası   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|                      |  |
|----------------------|--|
| $q_{peak}$           | : Pik debi ( $m^3/s$ ),  |
| $C$                  | : Yüzeysel akış katsayısı,   |
| $i$                  | : Yağış şiddeti ( $mm/hr$ ),   |
| $Area$               | : Havza alanı ( $km^2$ ),  |
| $PW$                 | : Islak gün ihtimali,  |
| $NWD$                | : Islak gün sayısı,  |
| $ND$                 | : Aydaki gün sayısı,   |
| $R_{day}$            | : Günlük toplam yağış miktarı ( $mm$ ),  |
| $\mu_{mon}$          | : Ay için ortalama yağış miktarı ( $mm$ ),   |
| $\sigma_{mon}$       | : Ay için günlük yağışın standart sapması ( $mm$ ),                                    |
| $SND_{day}$          | : Gün için hesaplanan standart normal sapma,   |
| $g_{mon}$            | : Ay içerisindeki günlük yağış için asimetrik dağılım katsayısı,                       |
| $SND_{day}$          | : Gün için hesaplanan standart normal sapma,   |
| $rnd_1$ ve $rnd_2$   | : 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı,   |
| $\mu_{mon}$          | : Ay için ortalama yağış miktarı ( $mm$ ),   |
| $rnd_1$              | : 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı,   |
| $rexp$               | : 1 ile 2 arasında girilen üs değeri,  |
| $\alpha_{0.5mon}$    | : Ay için ortalama yarım saatlik yağış kesri,  |
| $adj_{0.5\alpha}$    | : Düzeltme faktörü,  |
| $R_{0.5m}$           | : Ay için yumuşatılmış yarım saatlik yağış miktarı ( $mm$ ),                           |
| $\mu_{mon}$          | : Ay için günlük ortalama yağış miktarı ( $mm$ ),                                      |
| $yr_s$               | : Aylık aşırı yarım saatlik yağışın kullanıldığı veri setinin yıl sayısı,              |
| $day_{wet}$          | : Ay içerisindeki ıslak gün sayısı,  |
| $i$                  | : T anındaki yağış şiddeti ( $mm/sa$ ),  |
| $i_{max}$            | : Sağanak esnasında maksimum veya pik yağış yoğunluğu ( $mm/sa$ ),                     |
| $T$                  | : Sağanak yağışın başladığı zaman ( $sa$ ),  |
| $T_{peak}$           | : Sağanağın başlayıp pik yağış yoğunluğuna ulaştığı noktaya kadar geçen süre ( $sa$ ), |
| $T_{dur}$            | : Sağanak yağışın süresi ( $sa$ ),   |
| $\delta_1, \delta_2$ | : Eşitlik katsayıları ( $sa$ ),  |
| $T_{mx}$             | : Günlük maksimum sıcaklık değeri ( $^{\circ}C$ ),                                     |
| $\mu_{mx_{mon}}$     | : İlgili ay içerisindeki ortalama maksimum sıcaklık ( $^{\circ}C$ ),                   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|                    |   |
|--------------------|---|
| $X_i(1)$           | : Günlük maksimum sıcaklık kalıntısı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $\sigma mx_{mon}$  | : İlgili ay içerisindeki maksimum sıcaklıkların standart sapma değeri ( $^{\circ}\text{C}$ ),   |
| $T_{mn}$           | : Günlük minimum sıcaklık değeri ( $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $\mu mn_{mon}$     | : İlgili ay içerisindeki ortalama minimum sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $X_i(2)$           | : Günlük minimum sıcaklık kalıntısı ( $^{\circ}\text{C}$ ),   |
| $\sigma mn_{mon}$  | : İlgili ay içerisindeki minimum sıcaklıkların standart sapma değeri ( $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $H_{day}$          | : Günlük solar radyasyon değeri ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),   |
| $\mu rad_{mon}$    | : İlgili ay içerisindeki ortalama solar radyasyon değeri, ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),   |
| $X_i(3)$           | : Günlük solar radyasyon kalıntısı ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),  |
| $\sigma rad_{mon}$ | : İlgili ay içerisindeki solar radyasyonun standart sapma değeri ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),  |
| $R_h$              | : Ortalama bağıl nem,   |
| $R_{hmon}$         | : İlgili ay içerisindeki ortalama bağıl nem,  |
| $R_{hUmon}$        | : İlgili ay içerisindeki maksimum bağıl nem,  |
| $R_{hLmon}$        | : İlgili ay içerisindeki minimum bağıl nem,   |
| $R_{hmon,mean}$    | : $R_{hmon}$ , $R_{hLmon}$ ve $R_{hUmon}$ değerlerinin ortalaması,  |
| $rnd_1$            | : 0 – 1 arasındaki rastgele bir sayı,   |
| $\mu_{10m}$        | : Günlük ortalama rüzgâr hızı (m/s)   |
| $\mu wnd_{mon}$    | : Aylık ortalama rüzgâr hızı (m/s),   |
| $rnd_1$            | : 0 – 1 arasındaki rastgele bir sayı,   |
| $SNO$              | : Günlük kar örtüsü içerisindeki su içeriği (mm $\text{H}_2\text{O}$ ),   |
| $R_{day}$          | : İlgili gündeki yağış miktarı (sadece ortalama günlük sıcaklık, sınır sıcaklıktan düşük olduğunda eklenir) (mm $\text{H}_2\text{O}$ ), |
| $E_{sub}$          | : İlgili gündeki süblimleşme miktarı (mm $\text{H}_2\text{O}$ ),  |
| $SNO_{mlt}$        | : İlgili gündeki eriyen kar miktarı (mm $\text{H}_2\text{O}$ ),   |
| $sno_{cov}$        | : Karla kaplanan HRU alanının kısmı,  |
| $SNO$              | : İlgili gündeki kar örtüsü içerisindeki su içeriği (mm $\text{H}_2\text{O}$ ),   |
| $SNO_{100}$        | : %100 kar örtülü eşik derinlik (mm $\text{H}_2\text{O}$ ),   |
| $cov_1$            | : Eğrinin şeklini ifade eden katsayı,   |
| $cov_2$            | : Eğrinin şeklini ifade eden katsayı,   |
| $T_{snow}(d_n)$    | : İlgili gündeki kar yığıcı sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),   |
| $T_{snow}(d_n-1)$  | : Bir önceki gündeki kar yığıcı sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|                |   |
|----------------|---|
| $\ell_{sno}$   | : Kar sıcaklığı gecikme faktörü,  |
| $\bar{T}_{av}$ | : O günkü ortalama hava sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),   |
| $SNO_{mlt}$    | : İlgili gündeki eriyen karın miktarı (mm H <sub>2</sub> O),  |
| $b_{mlt}$      | : Erime faktörü (mm H <sub>2</sub> O/gün - $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $sno_{cov}$    | : Karla kaplanan HRU alanının oranı,  |
| $T_{snow}$     | : İlgili gündeki kar yığını sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),   |
| $T_{mx}$       | : İlgili gündeki maksimumu hava sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),   |
| $T_{mlt}$      | : Karın erimesine izin verilen taban sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $can_{day}$    | : İlgili günde bitki örtüsünün üzerinde tutulabilecek maksimum su miktarı (mm H <sub>2</sub> O),                          |
| $can_{mx}$     | : Bitkinin yaprağı tamamen gelişimini sağladıktan sonra üzerinde tutulabilecek maksimum su miktarı (mm H <sub>2</sub> O), |
| $LAI$          | : İlgili gündeki yaprak alan indeksi değeri,  |
| $LAI_{mx}$     | : Bitkinin maksimum yaprak alan indeksi değeri,   |
| $R_{INT(i)}$   | : İlgili günde başlangıçta bitki üzerinde tutulan su miktarı (mm H <sub>2</sub> O),                                       |
| $R_{INT(f)}$   | : İlgili günün sonunda bitki üzerinde tutulan su miktarı (mm H <sub>2</sub> O),   |
| $R'_{day}$     | : Bitki üzerinde tutulma olmadan önce ilgili gündeki yağış miktarı (mm H <sub>2</sub> O),                                 |
| $R_{day}$      | : İlgili günde toprak yüzeyine ulaşan yağış miktarı (mm H <sub>2</sub> O),  |
| $can_{day}$    | : İlgili günde bitki örtüsünün üzerinde tutulabilecek maksimum su miktarı (mm H <sub>2</sub> O),                          |
| $\lambda E$    | : Potansiyel ısı akı yoğunluğu (MJ/m <sup>2</sup> -gün),  |
| $\Delta$       | : Doymuş buhar basıncı – sıcaklık eğrisinin eğimi (kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ),   |
| $H_{net}$      | : Net radyasyon (MJ/m <sup>2</sup> -gün),   |
| $G$            | : Yerdeki ısı akı yoğunluğu (MJ/m <sup>2</sup> -gün),   |
| $\rho_{air}$   | : Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )  |
| $c_p$          | : Sabit basınçta özgül ısı (MJ/kg- $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $e_z^0$        | : Herhangi bir yükseklikte havanın doymuş buhar basıncı (kPa),  |
| $e_z$          | : Herhangi bir yükseklikte havanın su buhar basıncı (kPa),  |
| $\gamma$       | : Psikrometrik sabit (kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ),  |
| $r_c$          | : Bitki örtüsü direnci (s/m),   |
| $r_a$          | : Hava katmanının difüzyon direnci (aerodinamik direnç) (s/m),  |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|                |  |
|----------------|--|
| $\lambda$      | : Buharlaşmanın potansiyel ısısı (MJ/kg),  |
| $E_t$          | : Maksimum terleme hızı (mm/gün),  |
| $K_1$          | : Boyut katsayısı ( $K_1=8,64 \times 10^4$ ),  |
| $P$            | : Atmosferik basınç (kPa),   |
| $\lambda$      | : Buharlaşmanın potansiyel ısısı (MJ/kg),  |
| $E_0$          | : Potansiyel evapotranspirasyon (mm/gün),  |
| $\alpha_{pet}$ | : Katsayı,   |
| $\Delta$       | : Doymuş buhar basıncı – sıcaklık eğrisinin eğimi (kPa/°C),  |
| $\gamma$       | : Psikrometrik sabit (kPa/°C),   |
| $H_{net}$      | : Net radyasyon (MJ/m <sup>2</sup> -gün),  |
| $G$            | : Yerdeki ısı akı yoğunluğu (MJ/m <sup>2</sup> -gün),  |
| $H_0$          | : Uzay radyasyonu (MJ/m <sup>2</sup> -gün),  |
| $T_{mn}$       | : İlgili gündeki maksimum hava sıcaklığı (°C),   |
| $E_t$          | : İlgili gündeki maksimum terleme miktarı (mm H <sub>2</sub> O),   |
| $E'_0$         | : Bitki örtüsü üzerinde serbest olarak bulunan suyun buharlaşması için düzeltilmiş potansiyel evapotranspirasyon miktarı (mm H <sub>2</sub> O),                |
| $LAI$          | : Yaprak alan indeksi,   |
| $E_s$          | : İlgili gündeki maksimum süblimleşme ve buharlaşma miktarı (mm H <sub>2</sub> O),   |
| $E'_0$         | : Bitki örtüsü üzerinde serbest olarak bulunan suyun buharlaşması için düzeltilmiş potansiyel evapotranspirasyon miktarı (mm H <sub>2</sub> O),                |
| $cov_{sol}$    | : Toprak örtü indeksi,   |
| $CV$           | : Yerin üstündeki biokütle ve kalıntı miktarı (kg/ha), eğer kar yağışı eşdeğer su olarak 0.5 mm'den daha fazla ise, toprak örtü indeksi değeri 0.5 olmaktadır. |
| $E'_s$         | : İlgili gün içerisinde bitkinin kullandığı su için düzeltilmiş maksimum süblimleşme ve topraktan buharlaşma miktarı (mm H <sub>2</sub> O),                    |
| $E_{soil,ly}$  | : Toprak katmanı için buharlaşma talebi (mm H <sub>2</sub> O),   |
| $E_{soil,zl}$  | : Toprak katmanının alt sınırından buharlaşma talebi (mm H <sub>2</sub> O),  |
| $E_{soil,zu}$  | : Toprak katmanının üst sınırından buharlaşma talebi (mm H <sub>2</sub> O),  |
| $esco$         | : Topraktan buharlaşmayı dengeleme katsayısı   |
| $E'_{soil,ly}$ | : Toprak katmanındaki ayarlanmış su içeriği için buharlaşma talebi (mm H <sub>2</sub> O),  |
| $E_{soil.ly}$  | : Toprak katmanı için buharlaşma talebi (mm H <sub>2</sub> O),   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|            |   |
|------------|---|
| $SW_{ly}$  | : Toprak katmanının su içeriği (mm H <sub>2</sub> O),                             |
| $FC_{ly}$  | : Toprak katmanının tarla kapasitesindeki su içeriği (mm H <sub>2</sub> O)        |
| $WP_{ly}$  | : Toprak katmanının solma noktasındaki su içeriği (mm H <sub>2</sub> O).          |
| $NSE$      | : Nash Sutcliffe Etkinlik katsayısı,  |
| $Q_{obs}$  | : Akarsu gözlem debisi (m <sup>3</sup> /s)  |
| $Q_{sim}$  | : Akarsu model debisi (m <sup>3</sup> /s),  |
| $Q_{mean}$ | : İncelenen zaman aralığındaki ortalama akarsu gözlem debisi (m <sup>3</sup> /s), |
| $PBIAS$    | : Ortalamadan sapma yüzdesi,  |
| $RSR$      | : Hata istatistiği katsayısı,   |

## KISALTMALAR

|               |  |
|---------------|--|
| <b>AB</b>     | : Avrupa Birliği   |
| <b>ABD</b>    | : Amerika Birleşik Devletleri  |
| <b>AGİ</b>    | : Akım Gözlem İstasyonu  |
| <b>APS</b>    | : Akustik Profil Çıkarma Sistemi                                     |
| <b>CBS</b>    | : Coğrafi Bilgi Sistemleri   |
| <b>CGCM</b>   | : Kanada Küresel Eşleşme Modeli                                      |
| <b>CN</b>     | : Eğri Numarası  |
| <b>CP</b>     | : Uzlaşma Programlama  |
| <b>CREAMS</b> | : Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems |
| <b>DLBRM</b>  | : Dağıtılmış Büyük Havza Akış Modeli                                 |
| <b>DSİ</b>    | : Devlet Su İşleri   |
| <b>EEA</b>    | : Avrupa Çevre Ajansı  |
| <b>EİE</b>    | : Elektrik İşleri Etüt İdaresi                                       |
| <b>EPIC</b>   | : Erosion Productivity Impact Calculator                             |
| <b>FAO</b>    | : Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü                           |
| <b>GCMs</b>   | : Genel Çevrim Modelleri   |
| <b>GLEAMS</b> | : Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System      |
| <b>GLUE</b>   | : Genelleştirilmiş Olasılık Belirsizlik Tahmini                      |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>HIRHAM</b>        | : Danimarka Bölgesel İklim Modeli  |
| <b>HIT</b>           | : Yüksek Etkili Hedefleme  |
| <b>HRUs</b>          | : Hidrolojik işlem birimleri   |
| <b>HSPF</b>          | : Hidrolojik Simülasyon Programı Fortran                                   |
| <b>IPCC</b>          | : Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli                                 |
| <b>MCDM</b>          | : Çok kriterli karar verme   |
| <b>MCMC</b>          | : Markov zinciri Monte Carlo simülasyonu                                   |
| <b>MGM</b>           | : Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü                                |
| <b>NCEP</b>          | : Ulusal Çevresel Tahmin Merkezi   |
| <b>NOAA</b>          | : Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi                                       |
| <b>NSE</b>           | : Nash Sutcliffe verim katsayısı   |
| <b>ParaSol</b>       | : Parameter çözümü   |
| <b>P BIAS</b>        | : Yüzde sapma  |
| <b>PET</b>           | : Potansiyel evapotranspirasyon  |
| <b>R<sup>2</sup></b> | : Belirleme katsayısı  |
| <b>RMSE</b>          | : Ortalama karekök hata  |
| <b>ROTO</b>          | : Routing Outputs to Outlet  |
| <b>RUSLE2</b>        | : Geliştirilmiş Evrensel Toprak Kaybı Eşitliği                             |
| <b>SAW</b>           | : Basit katkı ağırlığı   |
| <b>SHE</b>           | : Système Hydrologique Européen  |
| <b>STDDEVobs</b>     | : Gözlem verilerinin standart sapmasına                                    |
| <b>SUFI-2</b>        | : Sıralı belirsizlik uyumu   |
| <b>SURLAG</b>        | : Yüzeysel akış gecikme katsayısı  |
| <b>SWAT</b>          | : Toprak ve Su Değerlendirme Aracı   |
| <b>SWM</b>           | : Stanford Havza Modeli  |
| <b>SWMM</b>          | : Yağmur Suyu Yönetim Modeli   |
| <b>SWRRB</b>         | : Simulator for Water Resources in Rural Basins                            |
| <b>SYM</b>           | : Sayısal Yükseklik Modeli   |
| <b>TOPMODEL</b>      | : Topoğrafik tabanlı hidrolojik model                                      |
| <b>TOPSIS</b>        | : İdeal tercih çözümüne benzerlik  |
| <b>UA</b>            | : Uzaktan Algılama   |
| <b>USDA-ARS</b>      | : Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı – Tarımsal Araştırma Merkezi |

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)**

|              |  |
|--------------|--|
| <b>USEPA</b> | : Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı |
| <b>USGS</b>  | : Birleşik Devletler Jeoloji Kurumu      |
| <b>WDM</b>   | : Meteorolojik veri yönetimi             |
| <b>WEAP</b>  | : Su Değerleme ve Planlama Sistemi       |
| <b>WMS</b>   | : Havza Modelleme Sistemi                |



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Su, en küçük organizmadan en büyük canlılara kadar biyolojik hayatın devamı için gerekli olan en temel unsurlardan bir tanesidir. Tarih boyunca yerleşim yerleri su kaynakları yakınında kurulmuş, toplumlar arasındaki çatışmaların çoğu da su için olmuştur. Yeterli ve temiz su kaynağına ulaşamayan medeniyetlerin çöküşlerindeki temel nedenlerden birisi de yine sudur. Bu nedenle toplum refahının sağlanması ve sürdürülebilmesi için insanların temiz ve güvenilir suyun teminine ihtiyaçları vardır.

Su kaynakları, yenilenebilir olmakla birlikte aslında sınırlı olan doğal kaynaklardandır. Bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılmaması günümüzün en önemli problemleri arasında yer almaktadır. Sanayileşme, kentleşme, nüfusun artışı, yanlış uygulanan tarım teknikleri gibi nedenlerden dolayı suya olan talebin artması ve iklim değişikliği su toplama havzaları üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Hidrolojik sistemi etkileyen tüm süreçlerin bir bütün halinde ortaya konması ve doğru şekilde anlaşılması, bu baskının en aza indirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Türkiye’de tüm dünyada olduğu gibi iklim değişikliğinin etkilerini ortaya koyan çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bilinenin aksine su zengini olmayan Türkiye, su kaynaklarını korumalıdır ve gelecekte ortaya çıkacak muhtemel problemlere karşı önlemler almak zorundadır. Bu önlemler alınmadığı takdirde Türkiye ciddi su sorunları ile karşılaşmaya aday bir ülkedir.

Dünya nüfusunun 2025’de 8 milyara ulaşarak, gıda ihtiyacının % 60 artış göstereceği beklenmektedir (Çakmak ve Aküzüm 2009). Gıda ihtiyacının artacak olması, Türkiye gibi suyunun % 75’lik bölümünü tarımsal faaliyetlerde kullanan ülkelerin üzerinde düşünmesi gereken bir konudur. İklim değişikliğinin, arazi kullanımındaki ve özellikle tarımsal alanlarda ekilecek ürünlerdeki değişikliklere sebep olması havza hidrolojisini de etkileyecektir.

Türkiye'nin tarımsal sulamada kullandığı su miktarı göz önüne alındığında, bu etkilerin sonuçlarının şimdiden ortaya konması su kaynakları yönetimi açısından da oldukça önemlidir.

Su kaynaklarını sağlıklı ve etkin bir şekilde yönetebilmek için öncelikli olarak su sistemlerinin havza boyutunda ele alınması, katılımcı, bütüncül ve uzun vadeli bir yaklaşım ile suyun miktarı ve kalitesi için gerekli kriterlerin göz önünde bulundurulduğu havza yönetim planlarına gereksinim duyulmaktadır. Son yıllarda Türkiye'de, tüm Dünyada olduğu gibi bütüncül havza yönetimine yönelik çalışmalar artmaya başlamıştır. Özellikle AB'ye uyum süreci içerisinde Su Çerçeve Direktifi'nin (SÇD) temel gereksinimlerinden bir tanesi olan bütünleşik havza yönetim planlarının Türkiye tarafından oluşturulması gerekmektedir (Directive 2000/60/EC). Direktifin ana hedeflerinden bir tanesi "Sürdürülebilir, dengeli ve eşit su kullanımı için gerekli miktarda iyi kalitede yüzeysel ve yeraltı suyunun tedarik edilmesidir".

Bütünleşik havza yönetimi yaklaşımında, gelişen teknolojinin yardımıyla oluşturulan havza modelleri günümüzde büyük önem kazanmıştır. Geliştirilen modeller yardımıyla hidrolojik süreçlerin analizi ve su bütçesinin ortaya konmasının yanı sıra, aynı zamanda su kalitesinin belirlenmesi de mümkün olmaktadır. Havzaların su miktarı ve kalitesinin ortaya konulması için yapılan kapsamlı çalışmalar tüm dünyada yoğun bir şekilde yürütülürken, Türkiye'de son dönemde artış göstermiş olup, ancak henüz istenen düzeye erişememiştir. Havzadaki birçok etkinliğin yürütülmesindeki temel nokta hidrolojik çevrimdir. Bu kapsamda hidrolojik modelin oluşturulması için, uzun yıllardır dünyanın farklı nehir havzalarında kullanılan ve güvenilirliğini kanıtlamış Toprak ve Su Değerlendirme Aracı modeli seçilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı – Tarımsal Araştırma Merkezi (USDA-ARS) için Dr. Jeff Arnold tarafından geliştirilen model yardımıyla, detaylı bir hidrolojik değerlendirme yapılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, Batı Karadeniz Havzası'nın önemli bir alt havzası olan ve tüm havza alanının yarısını kapsayan Filyos Çayı Havzası'nda SWAT modeli kullanılarak hidrolojik bir analiz gerçekleştirilecektir. Ayrıca farklı iklim senaryolarından yararlanarak akarsu akım sonuçlarının nasıl etkileneceği tahmin edilmeye çalışılmıştır.

## 1.1 TEZİN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmanın amacı, Filyos Çayı Havzası'ndaki su bütçesinin ortaya konması için hidrolojik bir model oluşturulması ve kurulan bu model yardımıyla farklı iklim senaryolarının havza hidrolojisi üzerine olan etkilerinin belirlenmesidir.

Batı Karadeniz Havzası'nda içme ve kullanma suyu, barajlardan ve özellikle yüksek kesimlerden eriyen kar sularının beslediği su kaynaklarından karşılanmaktadır. Ayrıca yerleşim yerlerinde açılan derin kuyular ve akarsulardan da su temini gerçekleştirilmektedir. Karabük, Kastamonu, Bolu, Zonguldak ve Çankırı illerinin büyük bir bölümünü içerisinde bulunduran Filyos Çayı Havzası, Batı Karadeniz Havzası içerisinde yaşayan toplam nüfusun %55,3'üne de sahiptir. Batı Karadeniz Havzası'nda içme ve kullanma suyu olarak kullanılan miktar yıllık 110 milyon m<sup>3</sup> olup, bu miktarın yaklaşık %64'lük (70 milyon m<sup>3</sup>) bölümü de çalışma alanı olan Filyos Çayı Havzası'nda kullanılmaktadır (TÜBİTAK-MAM 2013). Ayrıca çalışma alanının % 50'lik bölümü tarım arazi olarak kullanılmakta olup sulu tarımda yapılmaktadır. Son yıllarda etkisinin yoğun bir şekilde hissedildiği iklim değişikliği havzadaki hem içme ve kullanma suyu miktarında, hem de tarımsal sulama ihtiyacında artışa neden olacaktır. Bazı dönemlerde bölgesel kuraklığa neden olabileceği gibi, yağış şiddetinin arttığı durumlarda taşkınlara da sebep olacaktır. Tüm bu hususlar dikkate alındığında, içme ve kullanma suyunun farklı su kaynaklarından sağlandığı, sulu tarımın yoğun bir şekilde yapıldığı Filyos Çayı Havzası'ndaki mevcut su bütçesinin, hidrolojik bir model yardımıyla ortaya konması gerekmektedir. Ayrıca iklim değişikliğinin havza hidrolojisinde neden olacağı değişiklikler ve özellikle tarımsal alanlarda sulama ile ilgili ortaya çıkması muhtemel problemlerin tespiti ve çözümü içinde hidrolojik model altyapısının kurulması gereklidir. Bu çalışma kapsamı içerisinde;

- SWAT modeli kullanılarak, çalışma alanı için temin edilen veriler yardımıyla hidrolojik model oluşturulmuştur. Sonrasında kalibrasyon ve sınaama süreçleri SWAT modeli için geliştirilen SWAT-CUP kalibrasyon programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.
- Kalibrasyonu ve sınaaması tamamlanan modelin sonuçları hidrolojik bileşenler bazında değerlendirilerek mevcut durum ortaya konmuştur. Son bölümde ise, iklim değişikliğinin akarsu akım sonuçları üzerine olan etkileri araştırılmıştır.





## BÖLÜM 2

### HİDROLOJİK MODELLEME

Tüm canlılar için temel bileşen olan su, dünyanın yüzeyini sahip olduğu kuvvet ile şekillendiren ve yeryüzünde en fazla bulunan maddedir. Bu durum onu, yeryüzünün iklimini belirleyen ve buna bağlı olarak insanlığın varlığı, medeniyetlerin gelişimi açısından önemli bir faktör haline getirmiştir. İnsanlık ve çevresi açısından büyük öneme sahip olan yeryüzü üzerindeki suyun davranışlarını konu alan bilim dalı hidroloji olarak adlandırılmaktadır. Pratik hidrolojinin çalışma konuları içerisinde; hidrolik yapılar, su temini, atıksu arıtımı ve bertarafı, sulama, direnaj, hidroelektrik üretimi, taşkın kontrolü, erozyon ve sediment kontrolü, tuzluluk kontrolü, kirliliğin azaltılması, suyun rekreasyonel kullanılması, balıkçılık, yaban hayatı koruma gibi birbirinden çok farklı gibi gözükse ancak birbirleriyle yakından ilişkili alanlar yer almaktadır. Bu kadar geniş bir çalışma alanı olan hidroloji, su kaynaklarının planlanması ve yönetiminde ilgilendiği konular ışığında önemli role sahiptir (Chow vd. 1988).

Hidrolojik bilgi, okyanus suları, okyanus mühendisliği, deniz bilimleri ve yeryüzündeki arazilerde su kaynaklarının kullanımı ve kontrolü için kullanılmaktadır. Yeryüzündeki suların dağılımı, dolaşımı veya sıcaklığı buzul çağı gibi çok geniş kapsamlı etkilere neden olmaktadır. Suyun dağılımı, dolaşımı, sıcaklığı sadece doğal süreçlerden değil, insan aktivitelerinden de kaynaklanmaktadır. İnsanların toprağı sulaması, arazinin gübrelenmesi, ormansızlaştırma, yer altı sularının çekilmesi, barajların inşa edilmesi, nehir ve göllere atık boşaltılması ve sayılabilecek birçok yapıcı ve yıkıcı aktiviteler doğadaki suyun dolaşımını ve kalitesini etkilemektedir (Chow vd. 1988).

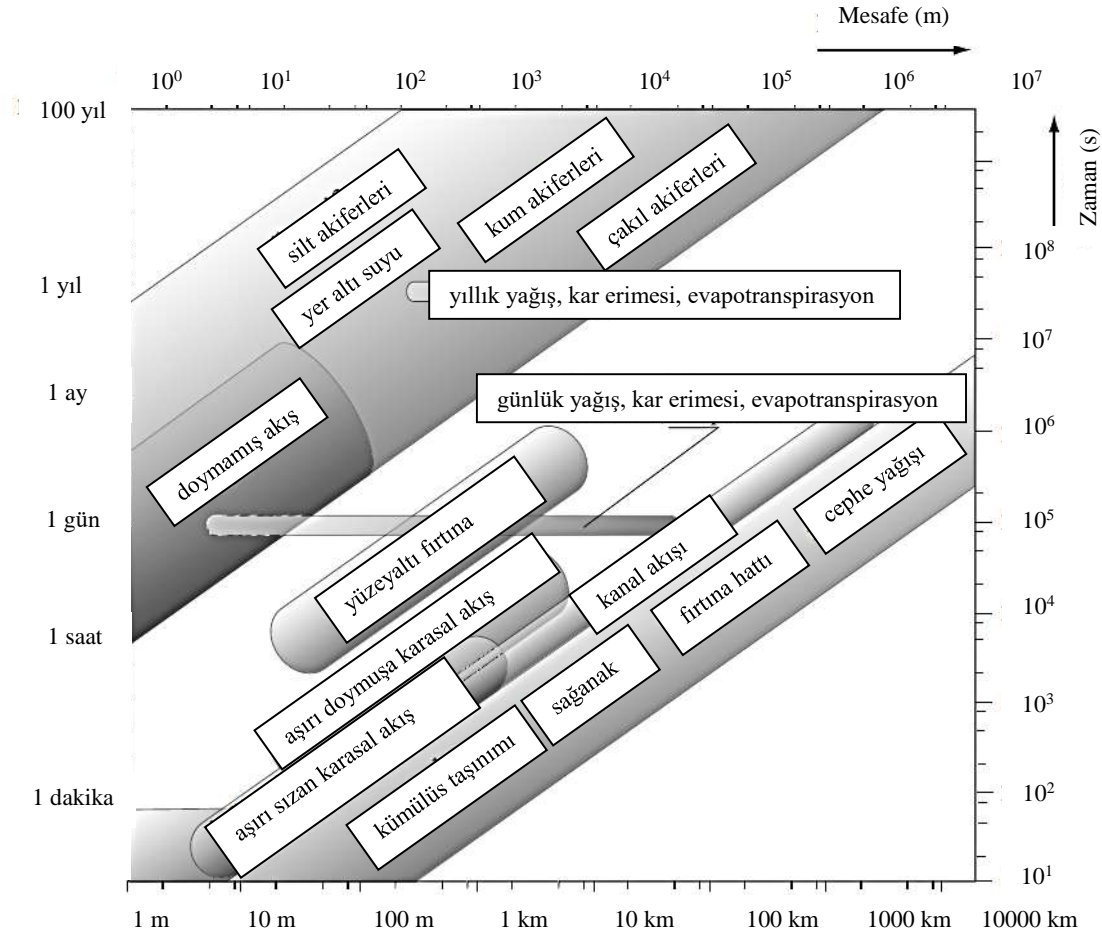
Hidrolojik modelleme, hidrolojik bileşenlerin tahmin edilmesi veya öngörülmesi için kullanılan temel tekniklerden biridir. Bu teknik, elde edilen verilerin güncellenmesine ilişkin mevcut gözlemlerle birlikte aynı zamanda hidroloji alanında yapılan bilimsel araştırmalardaki sonuçların doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Belirli bir su sisteminin hidrolojik davranışlarının bir kısmını veya tamamını matematiksel olarak taklit etmek için kullanılan hidrolojik olaylar bütünü olarak da bilinmektedir (Hingray vd. 2015). Genellikle modelleme çalışmaları yağış alanı ölçeğinde yürütülür. Burada temel modelleme hedefi, havza çıkışında, çeşitli meteorolojik değişkenlere (yağış, sıcaklık) bağlı olarak ortaya çıkan akış bileşenlerini simüle etmektir. Yağış ana belirleyici değişken olduğu için, hidrolojik modeller çoğu zaman yağış-yüzeysel akış modelleri olarak da anılmaktadır (Hingray vd. 2015).

## **2.1 HİDROLOJİK MODELLEME PRENSİPLERİ**

Model, fiziksel bir sistemin ve onun işletilmesi için gerekli olan farklı süreçlerin yönetimini basitleştirmek için yapılan bir tanımlamadır (Hingray vd. 2015). Fiziksel olarak ifade edilebilen bir sistem, fiziksel model olarak tanımlanabilir. Ancak genelde bu sistemler matematiksel olarak ifade edilmektedir. Bu şekilde tanımlanacak modeller, sistemlerin davranışlarına uygun olan yasalar ve kavramlar kullanılarak bir dizi denklem şeklinde açıklanmaktadır. Su sistemlerinde en çok kullanılan modeller drenaj havzaları olmasına rağmen belirli bir tepenin eğimi, arazi parseli gibi daha küçük hidrolojik birimlerde de kullanılmaktadır. Hangi su sistemi olursa olsun, hidrolojik modellemenin amacı hidrolojik davranışının bir kısmını veya tamamını taklit etmektir.

Herhangi bir su sisteminin davranışı son derece karmaşık bir yapıdadır. Bu esas olarak havzanın jeomorfolojisi, arazi kullanımı, toprak özellikleri, jeolojisi ve hidrografik ağın karakteristik özellikleri gibi karmaşıklık ve fiziksel olarak heterojenlikten kaynaklanmaktadır (Bloschl ve Sivapalan, 1995). Ayrıca, zamansal ve mekânsal ölçeklerdeki farklılıklar çoğunlukla hidrolojik süreçleri açıklamaktadır. Çeşitli hidrolojik süreçlerin zamansal ve mekânsal ölçekleri Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.1** Hidrolojik süreçlerin zamansal ve mekânsal ölçekleri (Bloschl ve Sivapalan 1995)

Sonuçta bütün hidrolojik modeller, gerçek su sisteminin ve onun işleyişinin son derece basit bir temsildir. Bu modeller, mekânsal-zamansal ölçeklere ve incelenecek hidrolojik olaylara göre kritik olan süreçleri kolaylaştırmayı hedeflemişlerdir. Örneğin, taşkın dönemlerinde yağış-akış ilişkisini taklit etmek üzere geliştirilen bir model, buharlaşma ve yeraltı suları boşaltımı ile ilgili işlemleri genellikle göz ardı etmektedir. Öte yandan, eğer bu modelin amacı, su kaynaklarının mevsimsellik ve ara dönem değişkenliğini tahmin etmekse, bu bahsi geçen süreçler hesaba katılmalıdır.

Kullanılacak modelin seçimi, simülasyonun sonundaki hedefe bağlıdır. Amaç ne olursa olsun, fiziksel ortamın ve buna bağlı hidrolojik süreçlerin temsil edilmesini basitleştirmenin birçok yolu vardır. Bu nedenle, herhangi bir su sistemi için çok sayıda farklı modelleme seçeneği bulunmaktadır. Model terimi genellikle bir "modelleme sistemi" kavramı ile birlikte yanlış kullanılmaktadır. Bir modelleme sistemi, bir drenaj havzasının hidrolojik davranışını modellenmesi için geliştirilen genelleyici veya özel yazılımın bilgisayar koduna karşılık

gelmektedir. Gerçek model ise, bu kodun belirli özel bir alana uygulanmasına karşılık gelmektedir (Hingray vd. 2015).

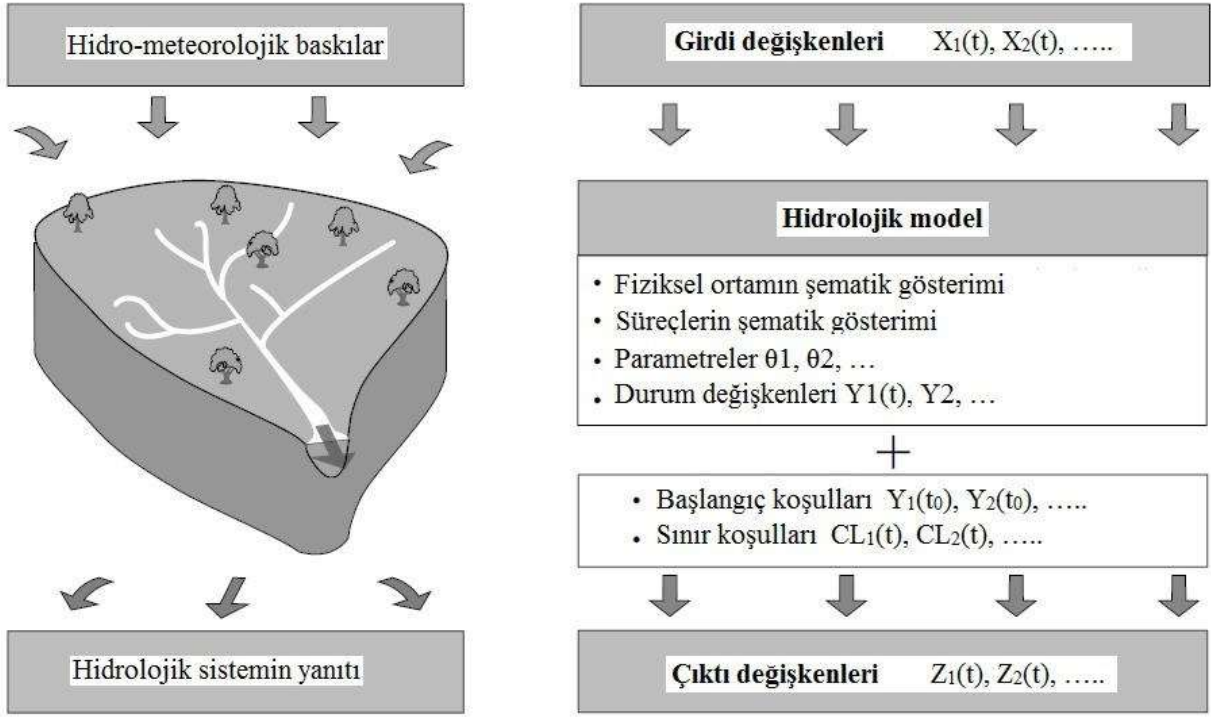
Bir hidrolojik modelin genel yapısı ve değişkenler Şekil 2.2'de, G olarak tasarlanan modele ilişkin eşitlik ise Denklem (2.1)'de gösterilmektedir.

$$Z_{obs}(t) = G[X(t), Y(t), BC(t), \theta] + \varepsilon_Z(t, \theta) \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte;

- $Z_{obs}(t)$  : Hidrolojik modelin farklı çıktı değişkenlerinin herhangi bir t anındaki gözlem değerleri,  
 $X(t)$  : Herhangi bir t anındaki girdi değişkenleri,  
 $Y(t)$  : Herhangi bir t anındaki durum değişkenleri,  
 $BC(t)$  : Herhangi bir t anındaki sınır koşulları,  
 $\theta$  : Model parametrelerinin vektörü,  
 $\varepsilon_Z(t, \theta)$  : Model hatasının vektörü'dür.

Hidro-meteorolojik baskılar, model tarafından kullanılan değişkenler içerisinde yer alan model girdilerini yani X (t)'yi temsil etmektedir. Bu değişkenler genellikle bağımsızdır ve ilgili veriler zaman serileri şeklinde bulunmaktadır. Değişkenlerin kullanımı modelin türüne bağlı olmakla birlikte, esas olarak yağış, evapotranspirasyon ve sıcaklık gibi meteorolojik olaylarla tüm hidrolojik modeller için ortaktır. İlgili veriler çoğunlukla sadece drenaj havzasında bulunan farklı ölçüm istasyonlarına karşılık gelen belirli noktalarda yer almaktadır. Bazı durumlarda, veriler, radar gözlemlerinden türetilen yağış miktarları olduğu gibi, bazı durumlarda bu veriler mekânsal dağılım olarak da kullanılabilirler. Diğer model girdi değişkenleri arasında, yukarı akış drenaj havzalarından gelen sular, sulama için pompalar yardımıyla çekilen su miktarı veya havzalar arası su transferi gibi süreçler yer almaktadır (Chow vd. 1988, Hingray vd. 2015).



**Şekil 2.2** Hidrolojik bir modelin tipik yapısı ve değişkenleri (Hingray vd. 2015)

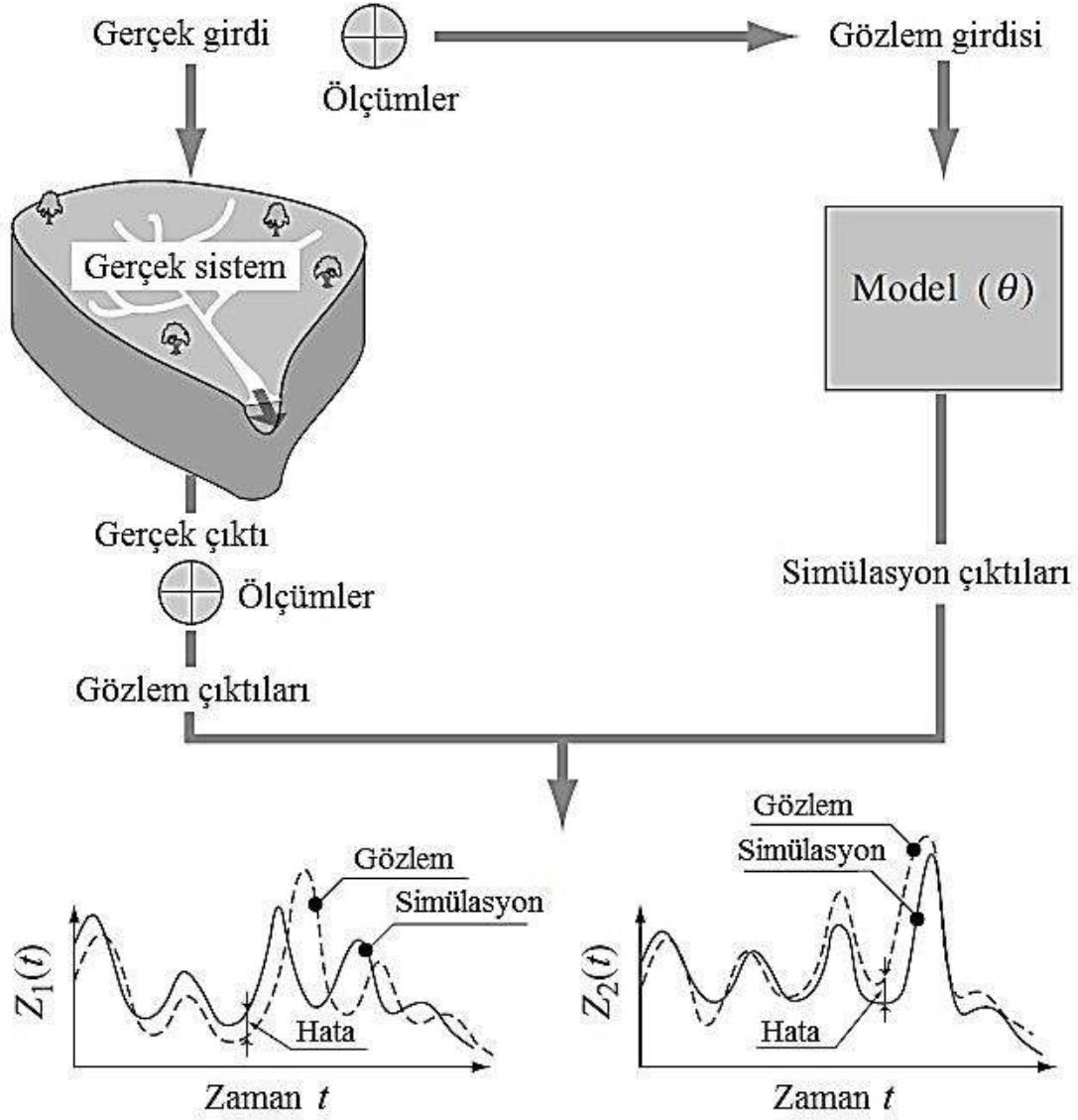
Simülasyon tarafından üretilen model çıktılarının zaman ile arasındaki ilişkiyi ifade eden eşitlik  $Z_{sim}(t, \theta) = G[X(t), Y(t), BC(t), \theta]$  şeklindedir. Herhangi bir hidrolojik modelin temel çıktı değişkeni hidrografik ağdaki bir veya birden daha fazla noktadaki su seviyesi veya debidir. Buna ek olarak, hidrolojik çevrimin diğer değişkenleri olan gerçek buharlaşma miktarı, yeraltı su seviyesi, kar örtüsü ve kar su eşdeğeri gibi hidrolojik unsurlardır.

Eğer gözlem verileri mevcutsa, bu veriler model çıktıları ile karşılaştırılabilirler. Model çıktıları ile mevcut hidrolojik gözlem verileri arasındaki farklar, “artık” olarak da adlandırılan “model hatasını” temsil etmektedir ve bu hata zamanla değişmektedir. Model çıktı değişkeni  $Z$ , Denklem (2.2)’deki şekilde ifade edilir.

$$\varepsilon_Z(t, \theta) = Z_{obs}(t) - Z_{sim}(t, \theta) \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte;

- $\varepsilon_Z(t, \theta)$  : Hidrolojik değişken  $Z$  için herhangi bir zamandaki hata,
- $Z_{obs}(t)$  :  $t$  anındaki gözlem verisi,
- $Z_{sim}(t)$  : Herhangi bir  $t$  anındaki simülasyon çıktısı,
- $\theta$  : Hata parametresi fonksiyonu’dur.



**Şekil 2.3** Bir modelin  $Z_1(t)$  ve  $Z_2(t)$  çıktı değişkenleri için ürettiği simülasyon hatasının gösterimi (Hingray vd. 2015).

## 2.2 HİDROLOJİK MODELLERİN SINIFLANDIRILMASI

Hidrolojik süreçleri açıklayan matematiksel modeller farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Bunlardan ilki, sistemin herhangi bir şekilde rasgele karakterini dikkate almayan, sistemi verilen girdinin her zaman aynı çıktıyı vereceğini kabul eden deterministik modellerdir (Bayazit 1998). Başka bir deyişle, belirli bir model girişi için tek bir çıktı vardır (Hingray vd. 2015). Hidrolojik olarak için deterministik modelin kullanılması ancak hidrolojik olaylarda rasgelelik etkisinin fazla olmaması durumunda mümkün olmaktadır. Bu durumda gerçekte çok karşılaşılan bir olay değildir. Çünkü hidrolojik süreçlerde rastgelelik bulunmaktadır (Bayazit 1998).

Hidrolojik olaylar için kullanılan modellerden birisi de stokastik modellerdir ve kısmen veya tamamen rasgele olan süreçleri simüle etmektedir. Stokastik modelde belirli bir başlangıç koşulları ve sınır koşulları durumunda, farklı uygulamalarda belirli bir girdi için farklı çıktılar verilmektedir. Bunun altında yatan neden, yağış, taşkın, düşük akışlı deşarj gibi dikkate alınan olaylar o kadar karmaşık olan pek çok nedenin sonucudur ki, model girdileri ve çıktılar arasındaki ilişki tam olarak kesin değildir. Bu nedenle, model girdi değişkenlerinin değerlerine bağlı olarak, çıktı değişkeninin olası bir farklılık göstermesi kaçınılmazdır. Çoğu zaman bir veya daha fazla sayıdaki rasgele değişkenden kaynaklanmaktadır (Hingray vd. 2015).

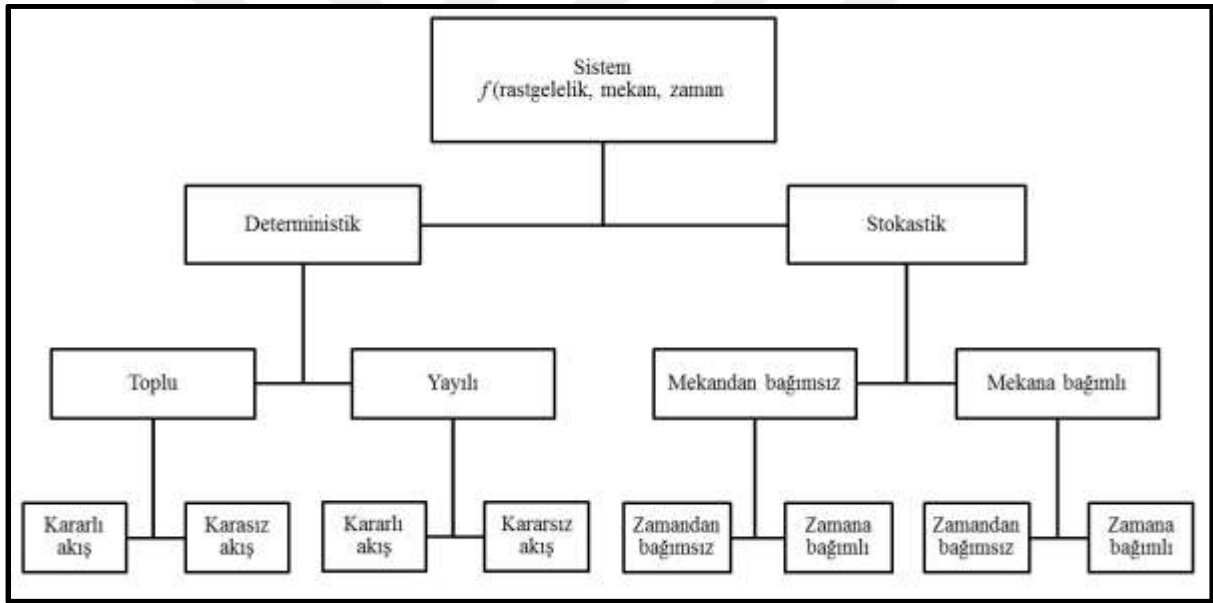
Olay tabanlı modeller, olaylar arasındaki periyotları dikkate almadan seçilen hidrolojik olayları simüle etmek için kullanılmaktadır. Bunlar esas olarak, yağış miktarının akarsudaki akışa dönüşümü ifade edebilme için geliştirilen modellerdir. Olay tabanlı bir model kullanılması için, dikkate alınan her olay simülasyonun başlangıç koşullarının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu olaya dayalı yaklaşımların en temel zorluklarından birisi de bu durumdur. Bir taşkın olayı simüle edileceği zaman, ortalama bir başlangıç koşulu kullanılabilir.

Sürekli simülasyon modelleri havzanın hidrolojik davranışını durmaksızın simüle etmek için kullanılmaktadır. Simülasyonlar, düşük akışlardan sel baskınlarına kadar uzanan çeşitli hidrometeorolojik durumları kapsayan uzun zaman periyotlarında yürütülebilir. Bu modeller, yalnızca sellerin oluşumu gibi belirli hidrolojik olayların ortaya koyduğu durumları değil, drenaj havzasının tepkisini önemli derecede etkileyen tüm faktörleri göz önüne almalıdır. Ayrıca, bu tip modellerde de başlangıç koşullarının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, başlangıç koşullarının beklenen sonuçlara etkisi belirli bir süre sonra önemsiz hale gelmektedir (Hingray vd. 2015).

Hidrolojik büyüklükler sürekli olarak değişim göstermektedir. Eğer bu değişiklikleri dikkate alan modellerden bahsediliyorsa bunlar toplu ve yayılı modeller olarak adlandırılmaktadır. Bu tarz modellerin kullanılması bazı zorluklara neden olabilmektedir. Bu zorlukları aşmak için daha basit bir yaklaşım sunan, her hangi bir büyüklüğün, sistemin tamamından sabit ve ortalama bir değer olduğunun kabul edildiği toplu model yaklaşımıdır (Bayazit 1998).

Hidrolojik büyüklüklerin zamanla değişip değişmediği durumuna göre kabul edilen modellere zamanla değişmeyen ve değişen modeller denmektedir. Bu yukarıda bahsedilen modellere göre çok daha basit bir yapıda olmakla birlikte, hidrolojik süreçlerin simüle edilmesinde çok yaygın olarak kullanılmamaktadır (Hingray vd. 2015).

Hidrolojik süreçlerde yukarıda bahsi geçen model tiplerinin tamamına rastlanmaktadır. Bu modellerden en basit olanları; zamanla değişmeyen, toplu ve deterministik model olanlarıdır. Olaylardaki rastgelelik, zamandaki değişim, değişkenlerin bir veya daha fazlasındaki farklılıklar model yapısı karmaşık hale getirerek kullanımını zorlaştırmaktadır. Fakat bilgisayar donanım teknolojisinin gelişmesi ile birlikte karmaşık modellerin hidrolojik çalışmalarda kullanılması da yaygınlaşmaktadır. Hidrolojik modellerin sınıflandırılmasına ilişkin şema Şekil 2.4'te gösterilmektedir (Bayazıt 1998 ve Chow vd. 1998).



Şekil 2.4 Hidrolojik modellerin sınıflandırılması (Chow vd. 1998)



## 2.3 HİDROLOJİK MODELİN GELİŞTİRİLMESİ

Herhangi bir modelleme yaklaşımında, öncelikle modelleme hedefini ve çerçevesini, yani su sisteminin ve hidrolojik yapının doğasını belirlemek esas olmalıdır. Temel hidrolojik süreçlerin, uygun mekânsal ve zamansal çözünürlüklerdeki verilerle, gerçekçi ve kabul edilebilir kavramların seçimi ile basitleştirilmeleri gerekmektedir. Bu kapsamda model geliştirilirken izlenecek üç aşama şu şekildedir: modelin kurulması, modelin kalibrasyonu, modelin değerlendirilmesi ve validasyonudur.

Veri hazırlama da modelin geliştirilmesinde önemli bir adımdır. Bu aşama genellikle modelin kurulması ile birlikte paralel yürütülmektedir. Hidrometeorolojik verilerin haritalanması ve ön işleme tabi tutulması da bu adımda yer almaktadır. Fiziksel ortamı tanımlamak için haritalama işlemi önem arz etmektedir. Hidrometeorolojik zaman serilerinin kullanılacak model programa göre uygun biçimde derlenmesi de bu aşamanın konusudur. Bu zaman serileri daha sonra modelin girdi verisi olarak kullanılacak ve kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında da bu verilerden faydalanılacaktır. Başlangıç ve sınır koşulları belirlendikten ve tüm bu aşamalar tamamlandıktan sonra model hedeflenen hidrolojik uygulama için kullanıma hazır hale gelmektedir (Hingray vd. 2015).

Modelin yapısını kurgulamak için su sisteminin şeması oluşturulmalıdır. Fiziksel ortamı ve süreçleri temsil etmek üzere seçilen kavramlar matematiksel olarak formüle edilmelidir. Model kurulmasında mutlaka, matematiksel ve nümerik problemlerin çözümü için kullanılacak bilgisayar programının geliştirilmiş olmasına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bahsi geçen tüm bu aşamalar modelin kurulmasında kritik rol oynamaktadır. Bu adımlardan sonra hedeflenen hidrolojik uygulama su sistemine uyarlanabilir.

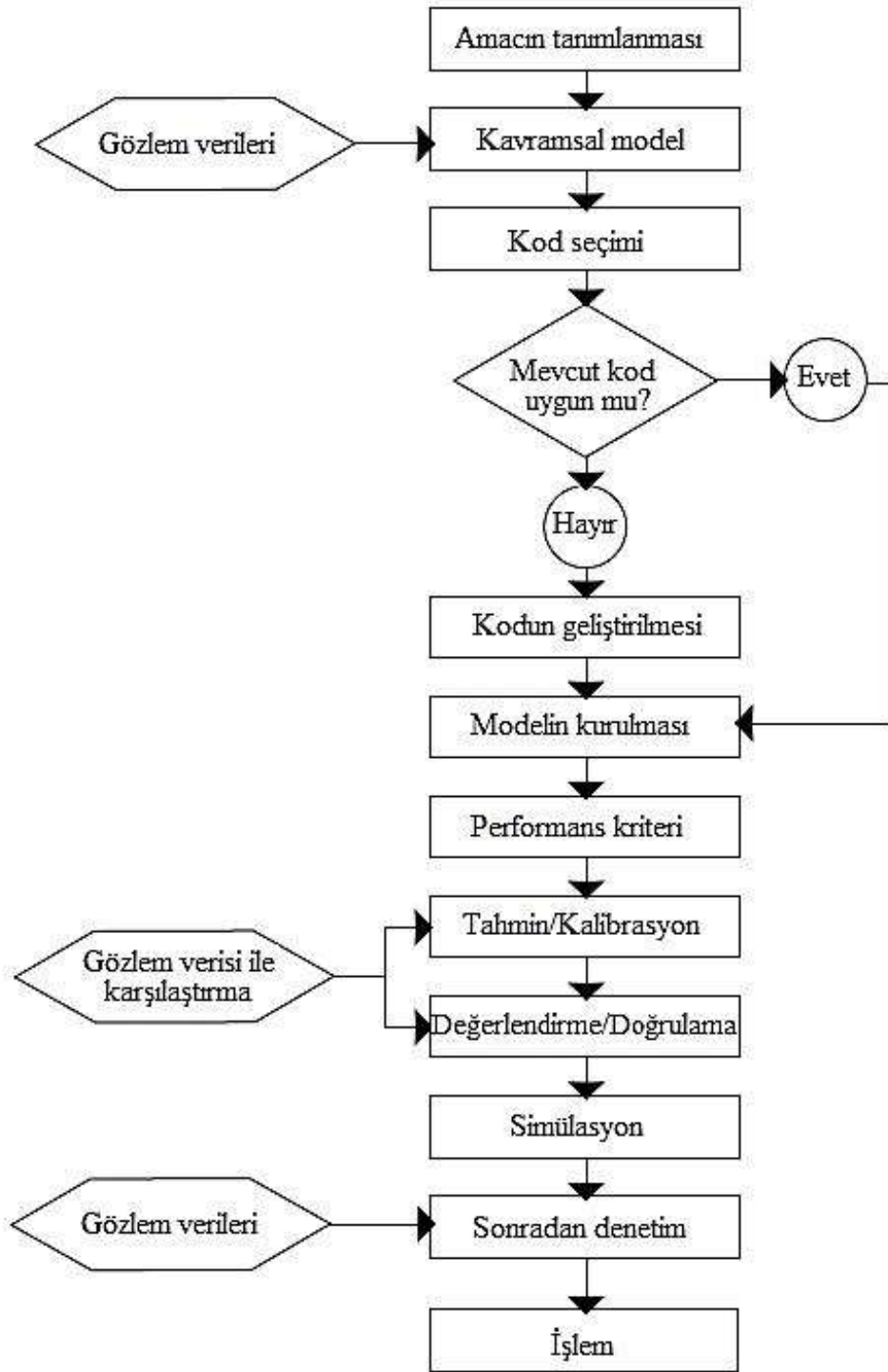
Model kalibrasyonun amacı, modelin yapısını optimize etmek ve model denklemlerinde yer alan, mekânsal olarak farklılık gösteren parametre değerlerinin tahmin edilmesidir. Bu parametreler, ölçülen verilerden veya drenaj havzası için mevcut tematik haritalardan türetilir. Ancak parametrelerin çoğu kalibrasyon süreci ile ayarlanmalıdır. Kalibrasyonda, seçilen kriterlere ve farklı hidrolojik değişkenlere göre ölçülen gözlem verileri ile model çıktı verileri karşılaştırarak gerçekleştirilir.

Değerlendirme aşamasında, farklı kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Model esasen, anlamlı, kabul edilebilir, güçlü ve duyarlı olmalıdır. Validasyon süreci, model kalibrasyonu için kullanılanlardan farklı olan bir veri kümesi üzerinde yürütülmektedir. Fiziksel ortamı, süreçleri ve modelin parametrelerine atanan değerlerin anlamlı olduğunu ortaya koymak için doğrulama işlemi yapılmaktadır. Bir model az sayıda parametre içeriyorsa veya sınırlı sayıda girdi verisine ihtiyaç duyuyorsa, bu modelin çok zayıf olduğu söylenebilir. Girdi değişkenlerin değerleri biraz değiştirildiğinde, kendi içinde ilişkili olan hatalar ve belirsizliklerden dolayı model sonucu farklılaşmayarak ve güçlü bir yapı sergilemektedir. Ancak etkilerinin tahmin edilebileceği değişkenlerin farklılığına da duyarlı kalarak, model hassasiyet göstermektedir. Bir hidrolojik modelin geliştirilmesi yaklaşımı Şekil 2.5'te özetlenmiştir (Refsgaard 1997, Hingray vd. 2015).

Modelleme amacı ne olursa olsun, bir hidrolojik modelin kurulması, drenaj havzasının mekânsal olarak, işlevsel olarak ve tasarım olarak temsil etmesini temel alarak gerçekleştirilmelidir. Bunun için iki farklı yaklaşım izlenebilir.

Bu yaklaşımlardan ilki, genellikle yukarıdan aşağıya bir yaklaşım gösterir ve buradaki hedef genelde tek olmakla beraber bazen birkaç hedef ile sınırlıdır. Sistemin ölçülebilen hidrolojik tepkisinin mümkün olduğunca basite indirgenmesi temeline dayanmaktadır. Belirlenen amaç için en önemli işlemler düşünülür. Bu yaklaşım sistemli ve tümevarımdır. Yeni gözlem verileri elde edildiğinde, drenaj havzasının geometrisi ve süreçler kademeli olarak tekrar revize edilir. Bu yaklaşım daha çok uygulamalı hidrolojide kullanılmaktadır ve hedeflenen amaç için modellerin göreceli olarak geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Hingray vd. 2015).

İkincisi ise aşağıdan yukarıya doğru bir yaklaşımdır. Burada hedefler önceden tanımlanmıştır. Su sisteminin davranışını düzenleyen süreçlerin yeterince bilinmesi ve bu süreçlerin birbirine bağımlılığının doğru bir şekilde temsil edilmesi durumunda, genel hidrosistemin davranışının uygun bir şekilde simüle edilebileceği varsayılmaktadır. Aşağıdan yukarıya doğru olan yaklaşım, daha bilimsel bir yapıdadır ve esas olarak tümünden gelimdir. Modelin karmaşık bir yapıya sahip olmasından dolayı, veri setinin kısıtlı olduğu durumlarda değerlendirmelerde güçlükler yaşanmaktadır. Bu yüzden uygulamalı hidrolojide de bir takım basitleştirmeler ihtiyaç duyulmaktadır (Hingray vd. 2015).



**Şekil 2.5** Hidrolojik modelin geliştirilmesi yaklaşımı (Refsgaard 1997, Hingray vd. 2015)

Kullanılan yaklaşım ne olursa olsun, bir hidrolojik modelin oluşturulması için ideal olarak: 1) kabul edilen su sistemi için hidrolojik olayların ve ilgili hidrolojik süreçlerin gözlemlenmesi ve denenmesi, 2) fiziksel ortamı ve süreçleri temsil etmek için gerekli olan varsayımların matematiksel olarak formüle edilmesi, 3) bu varsayımların test edilmesi, yani doğrulanması veya geçersiz sayılması gerekmektedir. Bu üç ardışık adım genellikle, hidrolojik döngü

bileşenlerinin bir kısmının veya tamamının matematiksel ifade edilmesini, havzaya ait bilginin geliştirilmesini, tekrarlanabilirliği amaçlamaktadır.

## **2.4 MODEL PARAMETRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ**

Hidrolojik modellerin tamamında tahmin edilmesi gereken parametreler bulunmaktadır. Parametreleri sayısı, modelin kavramsallaştırma derecesine ve mekânsal koşullara göre büyük ölçüde değişmektedir (Duan vd. 2003, 2006) Küresel kavramsal modellerin genelde dört ila on farklı parametre ihtiyacı duyarken, mekânsal modellerde bu parametreler düzinelere olabilmektedir. Parametre tahmini, çoğu zaman modelleme sürecindeki hassas adımlardan biri olan model kalibrasyonu sürecinde gerçekleştirilmektedir (Duan vd. 2003; 2006).

Çok farklı parametre tahmin yöntemleri vardır. Bunun nedeni, farklı özelliklere sahip parametrelerin olması ve hepsi için tek bir tahmini metodun tatmin edici sonuçlar vermediğinin yapılan çalışmalarla ortaya konmuş olmasıdır. Parametre tahmini, modelleme hedeflerine bağlı olan bir kalibrasyon stratejisi ile doğru seçimler yapmak anlamına gelmektedir (Duan vd. 2003). Belirlenecek kalibrasyon yöntemi modeli kuran kişinin tecrübesine, önceliklerine ve kişisel tercihlerine bağlıdır. Ayrıca seçilecek modelin çalışma alanı için uygunluğu ve model performansı da diğer önemli faktörler arasında yer almaktadır.

### **2.4.1 Doğal Parametreler ve Tahmin Yöntemleri**

Parametrelerin tahmin edilmesi, doğalarına, modelin türüne ve mevcut verilere bağlıdır. Tahmin işlemi iki şekilde yapılmaktadır. İlk yöntemde drenaj havzasını temsil eden veriler temelinde parametrelere değer atama gerçekleştirilmektedir. Bu veriler, arazide yapılan gözlem çalışmalarından elde edilen ölçümlerden ve havzaya ilişkin tematik haritalardan elde edilmektedir. Bu yaklaşım, genellikle fiziksel bir anlam taşıyan parametreleri belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, her hangi bir parametrenin tahmin edilmesi için uygun bölgesel modeller mevcutsa, bu modellerden de faydalanılabilmektedir.

Modele bağlı olarak, belirli parametrelerin fiziksel anlamı olabilmektedir. Bu durum, bu parametrelerin direkt olarak havzanın fiziksel karakteristikleri ile ilgili olduğunu göstermektedir.

Bazıları, tematik haritalar, SYM veya diğer uzaktan algılama (UA) yöntemi ile elde edilen veriler olabilmektedir. Bir arazi kullanımını sınıfını alt gruplara ayırmak arazi kullanım haritasından temin edilebilir veya akarsu ağ yapısının belirlenmesi, eğim sınıflarının oluşturulması, akış yönlerinin belirlenmesi SYM'lerden çıkarılabilir.

Teorik olarak bazı parametreler çalışma alanında yapılan ölçüm çalışmalarından belirlenebilmektedir. Ancak, örneğin toprağın hidrolik iletkenliği gibi fiziksel bir özelliğin belirlenmesinde zorluklarla karşılaşılmaktadır. İlk olarak, her bir ayırma birimindeki fiziksel ortam genellikle heterojen bir yapıya sahiptir. Bu da ortamın fiziksel karakteristiğinin doğrudan kullanımında sıkıntıya neden olmaktadır. Ölçümlerin kullanılması için, parametrenin iç değişkenliğini tanımlamak için bir yöntem bulma ve ilişkili model parametreleriyle uç değerleri ilişkilendirmek gerekmektedir. Havzadaki her bir noktada ölçüm yapılabilmesi imkânsız olduğu için sadece noktasal ölçüm verilerinden yararlanmak yerine klasik mekânsal interpolasyon yöntemi yardımıyla parametrelerin tahmini önem kazanmaktadır. Bu sayede parametrelerin havzayı temsil etmelerinde yardımcı olunabilir.

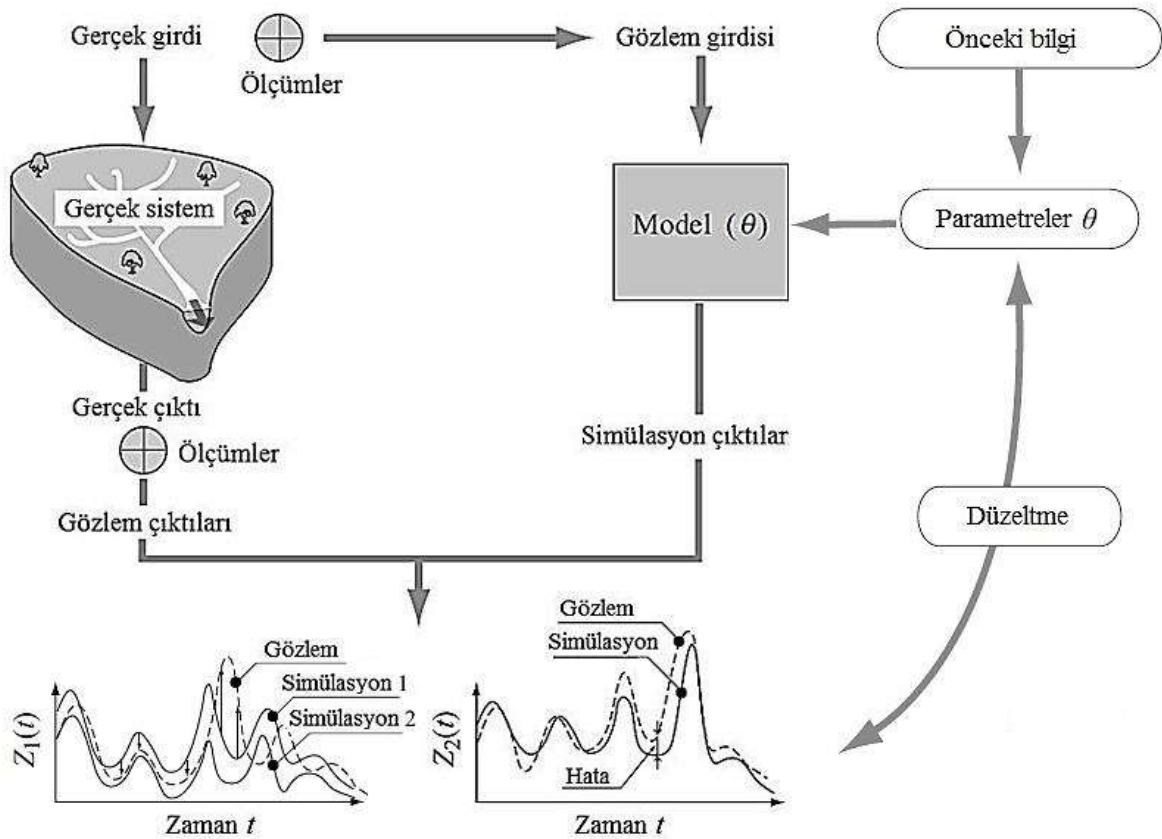
Ölçek ve temsiliyet açısından problemlerin fiziksel anlamı olan parametreleri kalibre etmenin neden gerekli olduğunu açıklamaktadır. Buna örnek, fiziksel temele dayanan SHE (Système Hydrologique Européen) modelidir (Abbott vd. 1986a, 1986b). Bunun için otomatik kalibrasyon prosedürü uygulandığında, bazı parametrelerin fiziksel anlamı büyük oranda değiştirilebilir veya tamamen yok edilebilir, bu yüzden bu işlem sırasında sınır koşulları çok iyi belirlenmelidir.

Fiziksel anlamları olsun veya olmasın parametreler, onları tahmin edebilecek bölgesel bir model mevcut olduğunda, fiziksel ortamın karakteristiklerine dayanarak da tahmin edilebilir. Bu model tahmini için bir hidrolojik bölgeselleştirme prosedürü oluşturulmalıdır. Belirli bir bölge için sıklıkla kullanılan hidrolojik modele ait parametrelerin tahmin edilmesi daha kolaydır. Örneğin, pedotransfer fonksiyonları (Soutter vd. 2007), zeminlerin hidrodinamik özelliklerini, uygun matematiksel fonksiyonlar kullanılarak ve çeşitli ölçülebilir yöntemler yardımıyla parametre tahmininde kullanılmaktadır.

Parametrelerin fiziksel bir anlamları olmasa bile, kalibrasyon prosedürü kullanılarak bu değerler belirlenebilmektedir. Bu deterministik yaklaşımın amacı, model ile elde edilen simülasyon sonuçları ile gözlemlenen veriler arasında mümkün olan en iyi ilişkiyi elde etmek

için parametre değerlerini belirlemektir. Başka bir deyişle model kalibrasyonu yardımıyla, değerlendirilecek olan bileşenin model çıktılarında hata  $\varepsilon_z(t, \theta)$  değerini en aza indirgeyen parametre değerlerini tespit etmektir. Hidrolojik modelin kalibrasyon edilmesi prosedürünün şematik olarak gösterimi Şekil 2.6’da gösterilmektedir.

Hidrolojik modellerin kalibrasyonunda kullanılan prosedürde, kalibrasyon için kullanılacak veri setine, hidrolojik modelin performansının değerlendirilmesi için bir veya daha fazla kritere ve performan kriterine göre parametrelerin optimum değerlerini saptamak için bir yonteme ihtiyaç duyulmaktadır.



**Şekil 2.6** Hidrolojik modelin  $\theta$  parametreleri kullanılarak kalibrasyon edilmesi prosedürünün şematik olarak gösterimi

Kalibrasyon yöntemi her zaman için modellemenin amacına, modelin türüne ve mevcut verilere bağlıdır. Bu aşamadaki belirsizliklerle birlikte saptanan parametre değerleri bir sonraki aşama olan validasyon adımında değerlendirilmelidir.

## 2.4.2 Performans ve Eşitlik Kriterleri

Bir hidrolojik modeli kalibre etmeden önce, bir veya daha fazla performans kriteri belirlemek gerekmektedir. Bunun için çok sayıda istatistiksel kriter bulunmaktadır. Bu kriterleri modelin değerlendirilme aşamasında kullanmakta mümkündür.

Model performansı ilk önce görsel olarak model ve gözlem sonuçlarının karşılaştırılmasıyla nitel olarak değerlendirilebilir. Grafikselsel olarak yapılacak değerlendirmede, farklı zamanlar için ilgili değişkenin değişimi, model konumsal ise, herhangi bir zamandaki ilgili değişken değeri ve ilgili değişkenin (günlük debi, saatlik maksimum taşkın debisi) istatistiksel olarak dağılımı incelenebilir.

Sayısal bir yöntem kullanarak da model performansının belirlemek mümkündür. Genelde kullanılan sayısal yöntemler, gözlem ve model sonuçları arasındaki hatanın matematiksel bir fonksiyonu temeline dayanmaktadır. Herhangi bir hidrolojik değişken için gözlem ve model sonuçları arasındaki mesafeyi belirlemede  $\varepsilon_Z(\theta) = Z_{obs} - Z_{sim}(\theta)$  hata vektörü kullanılmaktadır. Bu ifade amaç fonksiyonu, kriter fonksiyonu, hata fonksiyonu veya olasılık fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak fonksiyon, Denklem (2.3)'teki şekilde gösterilmektedir.

$$F(Z_{obs}, Z_{sim}(\theta)) = F(Z_{obs}, G(X, \theta)) \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte;

- $Z_{obs}$  : Simülasyon periyodunda  $Z(t)$  değişkeninin  $m$  gözlem değerini içeren vektör,
- $Z_{sim}(\theta)$  : Simülasyon periyodunda  $Z(t)$  değişkeninin  $n$  simülasyon değerini içeren vektör,
- $\theta$  :  $G$  modelinin  $p$  parametresini içeren vektör,
- $X$  :  $m$  model girdi değişkeninin  $n$  değerini içeren vektörü'dür.

Literatürde kullanılan çok farklı amaç fonksiyonları bulmakta mümkündür (Singh 1995). Bazı durumlarda sadece bir tanesinin dikkate alınması çelişen durumları ortaya çıkarabilmektedir. Bu fonksiyonlar; simülasyon periyodundaki gözlenen ve simüle edilen akış hacimleri, tüm simülasyon periyodu için mi yoksa, belirli bir zaman içinde gözlemlenen ve simüle edilen akışlar, pik debiler, yükselme süresi, taşkın hacmi gibi taşkın özellikleri ve kullanılabilir

rezerv, azalma faktörleri gibi minimum akış özellikleri arasında iyi bir eşlemeyi saptamak için düzenlenmiştir. Hidrolojik modelleri kalibre etmek ve değerlendirmek için en çok kullanılan temel amaç fonksiyonları Çizelge 2.1’de gösterilmektedir. Tüm ifadeler için  $Q_0(i)$  ve  $Q_s(i)$  değişkenleri herhangi bir zamandaki sırasıyla gözlem ve simülasyon akış değerleri,  $n$  gözlem sayısı,  $\bar{Q}_0$  ve  $\bar{Q}_s$  sırasıyla akış için  $n$  tane gözlem ve simülasyon değerleri,  $\eta$  veri olmadığında oluşacak problemleri önlemek için kullanılan ortalama akış değerinin bir fraksiyonu,  $Q_{po}(k)$  ve  $Q_{ps}(k)$  değişkenleri de  $k$  olayı için sırasıyla gözlem ve simülasyonlar için pik taşkın debisini ifade etmektedir. Elbette bu formülasyonlar diğer hidrolojik bileşenler ve su kalitesi değişkenler için de kullanılabilir.

**Çizelge 2.1** Bir amaç fonksiyonu için matematiksel ifadeler

| Kriter                              | İfade  |
|-------------------------------------|--|
| Bias                                | $F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_0(i) - Q_s(i))$   |
| Karesi alınmış korelasyon katsayısı | $F = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_0(i) - \bar{Q}_0) - (Q_s(i) - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0(i) - \bar{Q}_0)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_s(i) - \bar{Q}_s)^2}$ |
| En küçük kareler                    | $F = \sum_{i=1}^n (Q_0(i) - Q_s(i))^2$   |
| Nash-Sutcliffe                      | $F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0(i) - Q_s(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0(i) - \bar{Q}_0)^2}$   |
| Logaritmali Nash-Sutcliffe          | $F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_0(i) + \eta) - \ln(Q_s(i) + \eta))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_0(i) + \eta) - \ln(\bar{Q}_0 + \eta))^2}$                   |
| Clabour-Moore                       | $F = \frac{\sum_{i=1}^n  Q_0(i) - Q_s(i) }{\sum_{i=1}^n Q_0(i)}$   |
| Pik taşkın debisi                   | $F = Q_{po}(k) - Q_{ps}(k)$  |

### 2.4.3 Manuel Kalibrasyon, Otomatik Kalibrasyon ve Belirsizlik

Modelin kalibrasyonu manuel, otomatik veya ikisinin kombinasyonu ile gerçekleştirilir. Manuel kalibrasyonda, modelin parametre değerleri elle tekrar eden bir şekilde ayarlamayı gerektirmektedir. Her bir ayarlardan sonra model performansı kriterlere bakılarak değerlendirilir. Ulaşılan performans makul olduğunda, kalibrasyon işlemi durdurulur. Bu



karar genellikle sayısal ve grafik performans kriterlerinin ikisinin birden uygun seviyelere ulaşmasından sonra alınmaktadır.

Otomatik kalibrasyon yöntemi, seçilen bir sayısal performans kriterinin optimum değerini sağlayan parametre setini tanımlamak üzerine tasarlanmıştır. Optimizasyon, parametre değerlerine iteratif ve sistematik değişiklikler uygulayarak, ilgili amaç fonksiyonunun simülasyon hatalarını en aza indirmek suretiyle gerçekleştirilir. Otomatik kalibrasyon, matematiksel bir optimizasyon algoritması ve buna karşılık gelen bir bilgisayar kodu gerektirir. Optimizasyon algoritmaları, yerel veya küresel olarak adlandırılan iki yaklaşımı kullanarak gerçekleştirilmektedir (Duan vd 2003, 2006).

Yerel yaklaşımda, parametre alanını belirlemek için önceki bir başlangıç parametre setinden başlayarak aşamalı ve gelişen bir yol izlenmektedir. Alan, seçilen performans kriterleri sağlanana kadar araştırılır ve anlamlı bir gelişme olmadığında işlem durdurulur. Hidrolojide en yaygın kullanılan yöntemler; Rosenbrock (1960), Pattern Search (Hooke ve Jeeves 1961) ve Simplex'dir (Nelder ve Mead 1965). Bu yöntemde parametre alanında birkaç çekim bölgesi olması yöntemin dezavantajlarından biridir.

Yerel yaklaşımdaki dezavantajları gidermek için küresel optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Yöntemde parametre alanından çok daha büyük bir bölüm taramak için kullanılır ve bu nedenle ilke olarak herhangi bir yerel optimumda durmadan uygun parametre seti tespit edilir. Deterministik küresel yöntemlerde, alan sistematik bir şekilde araştırılmaktadır. Alan araştırması yapılırken nesnel fonksiyonun değeri her bir nokta için hesaplanır. Stokastik global yöntemlerde ise, parametre alanını rastgele şekilde taramaktadır. Bu taramada, arama algoritması için bir veya daha fazla başlangıç noktası rasgele seçilebilir. Genetik algoritmalar bu yöntem tipine bir örnektir. Hidrolojinin uygulama alanlarında Franchini vd. (1998), Duan vd. (2003). geliştirdikleri yaklaşımlar küresel optimizasyon yöntemleri olarak kullanılmaktadır.

Tüm bu optimizasyon yöntemleri tek bir gerçek optimum olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bununla birlikte gerçekte birçok parametre seti eşdeğer bir performans sunmaktadır (Hingray vd. 2015). Model parametrelerine verilen değerlerle ilgili belirsizlik, hidroloji alanında çalışanların model parametrelerinin tahmini ile seçtikleri yöntemleri sorgulamalarına yol açmıştır.

Gerçekleştirilen hidrolojik modellerde çalışmalarında simülasyonlar genellikle hatalı sonuç vermektedir. Gözlem verileri ile karşılaştırılabilen her model çıktı değişkeni için, bu kusur zamanla değişen hatalar üretmektedir (Hingray vd. 2015). Bu hataların çoğunlukla rasgele değişkenlerden kaynaklandığı kabul edilmektedir. Tercihen bu hataların, eşvaryanslı, bağımsız ve ortalaması sıfır olan normal dağılımlı olması istenmektedir. Hataların niteliği ne olursa olsun, her zaman için değişkenlerin olduğu sistemlerde belirsizliğinde muhakkak olacağı hususuna dikkat edilmelidir. Çok yaygın bir şekilde yapılmamasına rağmen, hidrolojik model çıktıları ile ilgili belirsizlikleri tanımlamak son derece önemlidir. Bu simüle edilen değerlere bir güven aralığı atamayı mümkün kılar (Pappenberger ve Beven 2006).

Bir model, tek bir kritere veya çoklu ölçütler kullanarak çok sayıda amaç için kalibre edilebilir. Bu seçim, modelin simüle edilecek hidrolojik değişkenlerin herhangi birini veya tümünü yeniden oluşturma gücünü etkiler. Model tek bir simülasyon hedefi için değerlendirilse bile, bir performans kriteri kullanıldığında, sadece kısmi bir performans tespiti yapılmış olur. Bu nedenle, kalibrasyon prosedürleri çok kriterli ve çok amaçlı olmalıdır (Hingray vd. 2015).

Yöntemin performansı, amaç ve kriterlerin birbirinden bağımsız olduğu durumlarda iyi çalışmaktadır. İdeal olanı, modelin taşkın debileri, minimum akışlar gibi çıktı değişkenlerinin farklı özelliklere sahip olması, yüzeysel akış, su tablası yüksekliği, kar örtüsü yüksekliği gibi farklı çıktı değişkenleri olması, belirli mevsimler veya olaylar, saatlik, haftalık ve aylık zaman dilimleri gibi farklı zamansal ölçeklerde bulunması ve mekânsal değişkeninin çözünürlüğünün farklı olmasıdır.

Yılın belirli dönemlerinde birtakım baskın hidrolojik süreçler gerçekleşebileceğinden bunlar dikkate alınmalıdır. İlkbahar döneminde eriyen kar yağışı ile oluşan yüzeysel akış, yazın ve sonbaharda eriyen buzulların eriyerek yer altı suyunu beslemesi, yıl içerisinde gerçekleşen çok sayıdaki yağmurlar zamansal olaylardır.

Zaman ölçekleri, değişkenlerin hangi aşamada değerlendirilmesi konusunda fikir vermektedir. Örneğin, bir modelin ortalama yıllık yüzeysel akış serileri, yağış gibi meteorolojik bileşen, evapotranspirasyon, tutulma gibi hidrolojik dengeyi etkileyen bileşenler yardımıyla yıllık bazda test edilerek değerlendirilebilir. Öte yandan, mevsimsel değerlendirmeler (kar erimesi, yeraltı suyunu besleme, yeraltından su çekilmesi) ortalama aylık yüzeysel akış serileri ile

kullanarak yapılırken, son olarak taşkın olaylarının değerlendirilmesinde saatlik yüzeysel akış serileri dikkate alınmalıdır.

## **2.5 HAVZALARDA KULLANILAN HİDROLOJİK MODELLER**

Hidrolojik problemlere çözüm aramak için özel modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin bazıları ücret karşılığında satılırken, bazıları da internet ortamında ücretsiz olarak paylaşılmaktadır. Kullanılan bazı hidrolojik modellere ilişkin bilgiler Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. Geliştirilen ilk hidrolojik model yağış, sızma, yüzeysel akış gibi hidrolojik bileşenleri simüle etme yeteğine sahip olan Stanford Havza Modeli’dir (SWM) (Crawford ve Linsley 1966). Sonrasında Amerikan Ordu Mühendisleri Birliği tarafından taşkın, yağmur ve kar hidrograflarını belirlemek için HEC-1 (1973) maksimum debinin meydana getireceği nehir geometrisinin tespiti içinde HEC-2 (1976) modellerini geliştirmiştir. Hidrograf, sediment ve atıksu yüklerinin tahmini için Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından Yağmur Suyu Yönetim Modeli (SWMM) geliştirilmiştir (Huber vd. 1981, Roesner vd. 1981).

1973 yılında Amerikan Ordu Mühendisleri Birliği tarafından geliştirilmesine başlanan Hidrolojik Mühendislik Merkezi (HEC) dizisine şehir hidrolojisini devamlı simüle edebilen STORM’u entegre etmişlerdir (HEC 1975). 1980’li yılların sonunda Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı Tarımsal Araştırma Merkezi (USDA-ARS) tarafından SWAT modelinin temeli olan SWRRB, Brigham Young Üniversitesi tarafından Havza Modelleme Sistemi (WMS), Danimarka Hidrolik Enstitüsü tarafından da MIKE (DHI 1999) modelleri geliştirilmiştir.

**Çizelge 2.2** Bazı hidrolojik simülasyon modelleri (Usül 2008)

| <b>Model</b>                                       | <b>Hazırlayan</b>           | <b>Yıl</b> |
|--|-----------------------------|------------|
| Stanford (Stanford watershed model)                | Crawford ve Linsley         | 1966       |
| MITCAT (Event rainfall-runoff urban model)         | Eagleson, 1967              | 1970       |
| HEC-4 (Monthly streamflow simulation)              | HEC                         | 1971       |
| SWMM (Storm water management model)                | US-EPA, Univ. Of Florida    | 1971, 1981 |
| HEC-1 (Flood hydrograph package)                   | HEC                         | 1973       |
| HEC-3 (Reservoir system analysis)                  | HEC                         | 1973       |
| ILLUDAS (Illinois urban drainage area simülâtör)   | Illinois State Water Survey | 1974       |
| SCS-TR20 (Hidrologic simulation)                   | USDA SCS                    | 1974       |
| STORM (Storage, treatment, overflow, runoff model) | HEC, US Army Corps of Eng.  | 1974       |
| USDA HL-74 (Model of watershed hydrology)          | USDA ARS                    | 1975       |
| USGS (Flood routing in urban area)                 | USGS, Dawdy                 | 1975       |
| HEC-2 (water surface profiles)                     | HEC                         | 1976       |
| DWOPER (NWS operational dynamic wave model)        | NWS                         | 1978       |
| HEC-5 (Simulation of flood control system)         | HEC                         | 1979       |
| HSPF (Hydrological simulation program-FORTRAN)     | Hydrocomp, EPA              | 1980       |
| SCS-TR55 (Hidrologic simulation)                   | USDA SCS                    | 1986       |
| SWRRB, SWAT  | USDA ARS                    | 1987, 1994 |
| MIKE Series (Modeling in basins and channels)      | Danish Hydraulic Ins.       | 1987       |
| WMS (Watershed modelling system)                   | Brigham Young Univ.         | 1997       |
| HMS (Hydrologic modelling system)                  | HEC                         | 2001       |

Son yıllarda hidrolojik çalışmalarda Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Nesnelere temas etmeksizin havadan çekilen fotoğraf veya uydu görüntülerini işleyerek bilgi edinme yöntemine uzaktan algılama denilmektedir (Usül 2008). CBS ise, mekânsal tabanlı bilgileri toplama, bu bilgileri çağırma, depolama, sorgulama, çakıştırma, analizlerini yapma işlemlerini gerçekleştirebilen kullanıcı, yazılım ve donanım birlikteliğidir. Hidrolojide veriler mekânsal oldukları için, bu teknikler ile sadece veri toplanmaz, aynı zamanda problem çözümünde de faydalı olmaktadır. Klasik yöntemlerde değişkenler havza veya alan ortalaması olarak girilirken, CBS yardımıyla havzadaki tüm farklılıklar modele kolayca aktarılmaktadır. Bu teknik yardımıyla model parametreleri değiştirilerek kolayca denemeler yapılmakta ve çalışmalar daha detaylı bir hal almaktadır. Bu yöntemler Türkiye’de birçok alanda kullanılmaya başlanmakla birlikte, hidrolojide ve özellikle taşkın çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Usül 2008).

### **2.5.1 SWAT Modeli**

SWAT Dr. Jeff Arnold tarafından USDA-ARS için farklı toprak ve arazi koşullarına sahip büyük ve karmaşık havzaların hidrolojik bileşenleri, sediment ve diğer birçok su kalitesi parametresini tahmin edebilmesi için geliştirilmiş bir modeldir (Neitsch vd. 2009).

SWAT modelinin yaygın olarak kullanılmasının birçok nedeni bulunmaktadır. Bunlar; izleme verileri olmayan havzalarda modelleme çalışmaları, iyi yönetim uygulamaları, iklim senaryoları, bitki örtüsü gibi alternatif senaryo uygulamalarının model çıktıları üzerine olan etkileri, hidroloji bileşenlerinin dışında su kalitesi parametreleri tahmini olarak sayılabilir. Aynı zamanda matematiksel olarak etkili hesaplama yeteneğine sahip olup büyük ölçekli çalışma alanlarında düşük maliyet ve kısa zamanda iyi bir performans ortaya koymaktadır (Neitsch vd 2005). Ayrıca model kullanıcılarına, uzun vadeli tahminler yardımıyla havzanın etkili bir şekilde incelenmesine imkan tanımaktadır (Neitsch vd. 2009).

Model tüm hesaplamaları fiziksel temele dayandırmaktadır. Bu hesaplama işlemlerini uzun süreler boyunca sürekli olarak gerçekleştirebilir. Başlıca model bileşenleri arasında; iklim koşulları, hidroloji, toprak sıcaklığı ve özellikleri, bitki büyümesi, besin maddeleri, tarım ilaçları, böcek ilaçları, bakteriler, patojenler ve arazi yönetimi alanlarını yer almaktadır. Havzaların homojen olmaması nedeniyle, arazi kullanımı, toprak kullanımı ve eğim sınıflarını kullanarak, alt havzalara içerisinde daha küçük hidrolojik işlem birimleri (HRUs)

oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında da kullanılan SWAT modeli hakkında detaylı bilgiye bu tez çalışmasının 4. Bölümünde değinilmiştir.

### 2.5.2 HSPF Modeli

Hidrolojik Simülasyon Programı Fortran (HSPF) modeli, 1960'ların başında Stanford Havza Modeli olarak geliştirilmiştir. 1970'lerde bazı su kalitesi süreçleri modele eklenmiştir. EPA'nın Athen-GA Araştırma Laboratuvarı tarafından finanse edilen HSPF, 1970'li yılların sonunda Fortranın yeni sürümünün tasarlanması ile gelişimine devam etmiştir. 1980'lerde, Birleşik Devletler Jeoloji Kurumu (USGS) ve USEPA tarafından ön işleme ve gelişmiş işlem yazılımı için üretilen algoritmaların yardımıyla şundaki olan halini almıştır.

HSPF, geçirimli ve geçirimsiz arazi yüzeylerinde, iyi karışmış barajlarda ve akarsularda hidrolojik ve ilişkili su kalitesi değişkenlerini uzun dönemli olarak simüle etme yeteneğine sahip olan bir model programdır (Donigian ve Crawford 1976). Akarsu hidrograflarını ve kirleticilerin yüklerini hesaplamak için yağış ve diğer meteorolojik verileri kullanmaya ihtiyaç duymaktadır. HSPF, toprak nemi, yüzeysel akış, ara akış, taban akışı, kar örtüsü derinliği ve su içeriği, eriyen kar miktarı, evapotranspirasyon, yeraltısuyu akışı, çözünmüş oksijen, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD), sıcaklık, pestisitler, fekal koliformlar, sediment taşınımı, pH, amonyak, nitrit, nitrat, organik azot, ortofosfat, organik fosfor, fitoplankton ve zooplankton gibi su kalitesi parametrelerini de içeren geniş bir tahmin olanağına sahiptir (Donigian ve Crawford 1976).

Program, bir veya birden çok nehir bölgesini, rezervuarları, geçirimli veya geçirimsiz alanları simüle etmektedir. Günlük olarak simülasyon yapabilen HSPF, uygun çözünürlükte veri olduğunda bu süreyi bir dakikaya kadar indirebilmektedir (Donigian ve Crawford 1976). Birkaç dakika ile yüzlerce yıl arasındaki herhangi bir dönemi tahmin edebilmektedir. HSPF genellikle, arazi kullanımı değişikliği, rezervuar işlemleri, noktasal veya noktasal olmayan kaynaklı kirleticilerin havza üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca model için geliştirilen meteorolojik veri yönetimi (WDM) programı yardımıyla, model çıktıları istatistiksel ve grafiksel olarak kolaylıkla değerlendirilebilmektedir.

Havza hidrolojik veya su kalitesi bileşenlerini simüle edilebilmek için temel olarak yağış, sıcaklık, rüzgar hızı, bağıl nem gibi meteorolojik verilere ve potansiyel evapotranspirasyon

verisine ihtiyaç duymaktadır. Eriyen kar miktarını hesaplayabilmek için hava sıcaklığı, çiy noktası sıcaklığı, rüzgar hızı ve solar radyasyon verisi gerekmektedir. Su kalitesi bileşenlerinin türene göre hava sıcaklığı, rüzgar, güneş radyasyonu, nem, bulutluluk, toprak işleme uygulamaları, noktasal kaynakları ve tarım ilacı uygulamaları da gerekli olabilir. Fiziksel ölçümler ve ilgili parametreler karasal alanlar, akarsu yatakları ve rezervuarları tanımlamak için gereklidir (Donigian ve Crawford 1976).

HSPF modeli kullanılarak dünyada yüzlerce uygulama yapılmıştır. Bu uygulamalar içerisinde Chesapeake Körfezi'nde yapılan en büyük havza alanına sahip olan çalışmalar arasında yer almaktadır (Shenk vd. 2012). Watkinsville, GA gibi birkaç dönümlük araziye sahip deneysel arazilerde de uygulamalar gerçekleştirilmiştir (Donigian ve Crawford 1976). USGS tarafından ABD'nin farklı havzalarında birçok önemli uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Dinicola 1990).

### **2.5.3 HEC Modeli**

HEC modeli için çalışmalar 1964 yılında başlamış olup su kaynaklarının planlanması ve yönetimindeki yöntemlere önemli katkılar sağlamıştır (HEC 1975). Modelin araştırma ve eğitim programları yıllar geçtikçe havza modelleme, uzaktan algıma ve nehir hidroliğinden, rezervuar sistemleri, istatistiksel hidroloji, sediment taşınımı, su kalitesi, taşkın hasarı belirleme, sistem analizi ve su kontrolü konularına doğru yönelmiştir.

İlk olarak 1966 yılında yüzeysel akış bileşenlerini modellemek için yayınlanmıştır. O dönemde bilgisayar teknolojisinin yetersiz olması nedeniyle çalışmalarda kısıtlı imkânlarda gerçekleştirilmekteydi. Havzalar için yağış ve eriyen kar miktarı, birim hidrografın belirlenmesi, akış yönlendirme, kayıpların hesaplanması ve optimizasyon gibi konular üzerinde durulmuştur. Özellikle optimizasyon konusunda öncü olan model, yağış-akış modellerini otomatik olarak kalibre eden ilk programdır (HEC 1989).

1968 yılında HEC-1 taşkın hidrograf paketi modele entegre edildi (HEC 1989). Bu paket HEC'in temel bileşenlerini içermek olup, bilgisayar teknolojisinin gelişmesine paralel hidrolojik ve proje performansı araştırmaları için yeni modüller modele eklenmiştir. HEC-1, dünyadaki ilk kapsamlı hidrolojik simülasyon modellerinden biridir (HEC 1989). Model, kullanıcıya yağış değişiminde havza tepkilerini analiz etmesine izin vermekle kalmayıp, aynı

zamanda kullanıcılara yağışın yüzeysel akışa dönüşümünde ihtiyaç duyulan analitik yöntem türleri için sayısız seçenek sunmuştur.

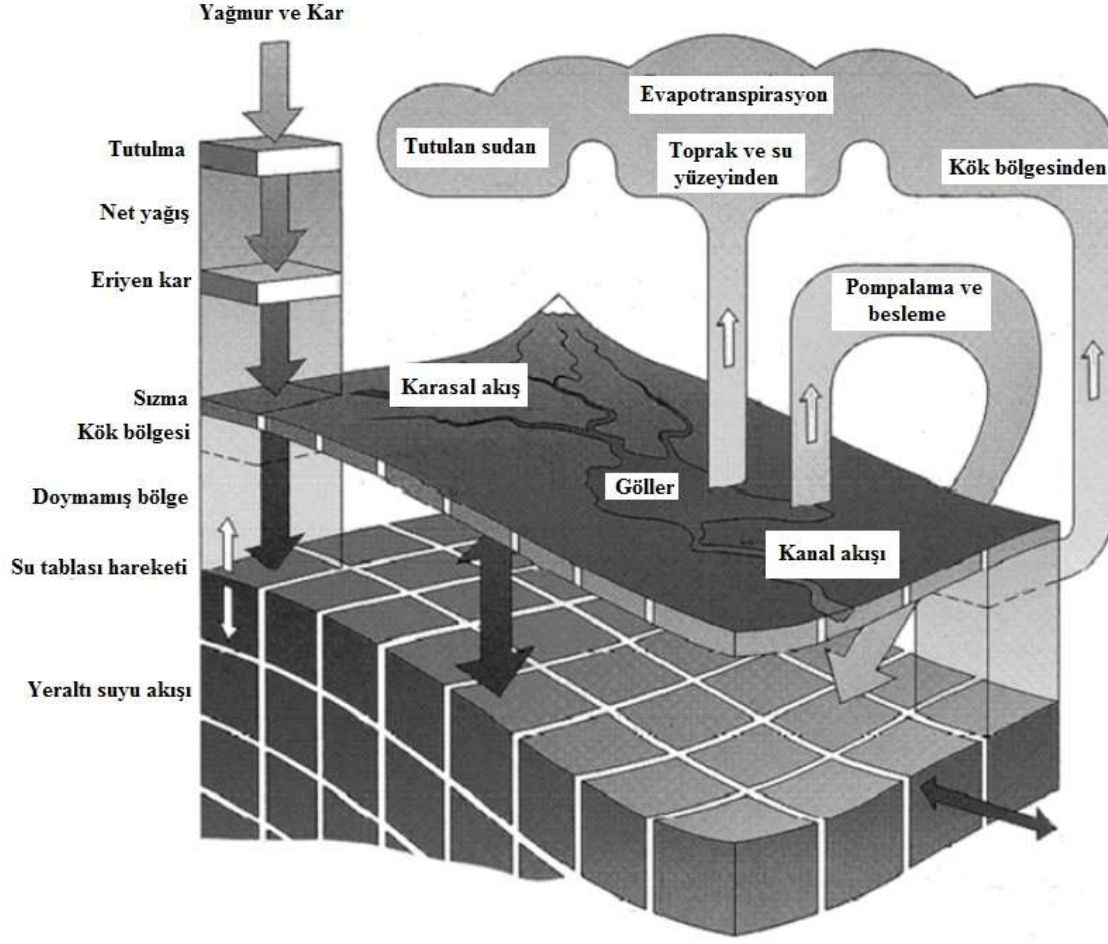
Günümüzde farklı amaçlarla kullanılan yirmiye aşkın HEC modeli bulunmaktadır. Hidrolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılanlardan bir tanesi Hidrolojik Modelleme Sistemidir (HEC-HMS). Mühendislik problemlerinin çözümü için geliştirilen HEC-HMS, yağış, sızma, yüzey akışı, taban akışı, açık kanal akışı gibi su kaynakları mühendisliğinin ilgili alanlarında kullanılmaktadır (HEC 1989). İlk versiyonunda şiddetli sağanak ve fırtına olaylarını simüle edebilmek için geliştirilen model, ikinci versiyonunda sızmanın bileşenlerini modellemek için tasarlanmıştır. Daha sonra rezervuar bileşenleri ile birlikte potansiyel evapotranspirasyon ve eriyen kar miktarını hesaplamak için modüller eklenmiştir. Oluşacak sel hasarının azaltılması, rezervuar ve sistem işletmeciliği, taşkınların kontrolü, çevresel restorasyon, su temini planlaması ve diğer amaçlar gibi birçok alandaki çalışmaların gerçekleştirilmesi için kullanılmaktadır (HEC 1989).

Hidroloji alanında HEC-HMS modeli ile yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Mahmood ve Jia (2016), Pakistan ve Hindistan'da yer alan 60000 km<sup>2</sup> drenaj alanına sahip sınır aşan Jhelum Nehri Havzasında iklim değişikliğinin hidroloji üzerine olan etkilerini belirlemek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kış aylarında yüzeysel akış miktarında artış, yaz döneminde ise kurak sezonların uzadığı model çıktılarından tespit edilmiştir. Çalışmada aynı zamanda HEC-HMS'nin hidrolojik açıdan model performansına da dikkat çekilmiştir. Ayrıca HEC-HMS ile havzalara ait birim hidrografların belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır (Sraj vd. 2010, Adib vd. 2011, Laouacheria ve Mansouri 2015, Szilagyi 2018).

#### **2.5.4 MIKE SHE Modeli**

1969 yılında hidrolojik çevrimi modellemek için Freeze ve Harlan (Freeze ve Harlan 1969) bir plan ortaya koymuşlardır. Bu planda farklı su bileşenlerinin kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilmesi temel alınmıştır. Planda kullanılan denklemlerin hidrolojik döngünün farklı bölümlerindeki fiziksel işlemleri temsil etmesi sağlanmıştır. 1977 yılında Avrupa'da faaliyet gösteren üç kuruluşun oluşturduğu şirketler birliği SHE modelini geliştirerek, bütünleşmiş bir model olan MIKE SHE oluşturulmuştur (Abbott vd. 1986a, Abbott vd. 1986b). Temel aldığı hidrolojik sistem Şekil 2.7'de gösterilmektedir.





Şekil 2.7 MIKE SHE tarafından simüle edilen hidrolojik süreçler

1980'li yılların ortalarından beri de Danimarka Hidrolik Enstitüsü tarafından MIKE SHE modeli daha da geliştirilmiştir. Günümüzde her bir hidrolojik süreç için basit çözüm teknikleri yardımıyla gelişmiş ve esnek bir hidrolojik modelleme imkânı sunmaktadır. Evapotranspirasyon, kar miktarı, yüzeysel akış, yeraltı suyu akışı, kanal akışı ve bunların etkileşimlerini inceleyebilmektedir. Bu süreçlerin her biri, modelleme çalışmasının hedeflerine, mevcut verilere ve model kullanıcılarının seçimlerine göre farklı mekansal dağılımlarda temsil edilebilir (Butts vd. 2004).

MIKE SHE, kanal akışını simüle etmek için MIKE 11'i kullanmaktadır. MIKE 11 karmaşık kanal ağlarını, gölleri, rezervuarları ve nehir yapılarını modellemek için geniş olanaklara sahiptir. Nehir yapılarının doğru tanımlanabilmesi yönetimleri açısından oldukça önemlidir. Benzer şekilde, MIKE SHE, sağanak sonucu oluşacak fazla suyu, kanalizasyon şebekeleri ve yeraltı suları arasındaki etkileşimi simüle edebilmek için MOUSE kanalizasyon modeliyle de bağlantılıdır (DHI 2011). MIKE SHE tek bir toprak tipine sahip ufak ölçekteki deneysel

havzalarda uygulandığı gibi, 80.000 km<sup>2</sup> drenaj alanına sahip büyük ölçekli Senegal Havzasında da çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Andersen vd. 2001). MIKE SHE, iklimsel ve hidrolojik açıdan değerlendirme yapılan çok sayıda araştırma ve danışmanlık projesi ile kendisini ispat etmiş önemli bir model programdır (Graham ve Butts 2006).

### 2.5.5 WEAP Modeli

Son on yılda su arzı projelerinde olduğu gibi, su kalitesi ve ekosistem korunması konularında da entegre bir yaklaşım uygulanmaya başlamıştır (SEI, 2011). Bu nedenle, Su Değerleme ve Planlama Sistemi (WEAP), su kaynakları planlamasının yapılabilmesini amaçlayarak ortaya çıkmış modellerden birisidir. WEAP'ı diğer modellerden ayıran hususlardan birisi, su sistemlerini simüle etmek için entegre yaklaşımı ve politikaya uyumu öncelik olarak kabul etmesidir. WEAP, alternatif su gelişimi ve yönetim stratejilerini incelemek için kendisini bir laboratuvar olarak tanımlamaktadır. Bir politika analiz aracı olarak WEAP, bir dizi su geliştirme ve yönetim seçeneklerini hesaba katarak değerlendirmesini yapmaktadır.

Hidrolojik döngünün temel prensibiyle çalışan WEAP ile kentsel alanlarda, tarım arazilerinde, karmaşık nehir sistemlerinde uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, sektörel talep analizleri, su koruma, su hakları ve tahsis öncelikleri, ekipman verimliliği, suyun yeniden kullanımı, yeraltı suyu ve akarsu simülasyonları, rezervuar işlemleri, hidroelektrik enerjisi üretimi ve enerji talepleri, kirlilik takibi, ekosistem gereksinimleri, maliyet analizleri ve proje faydaları gibi çok çeşitli konuları ele almaktadır.

WEAP uygulamaları genellikle birkaç adım gerçekleştirilmektedir. Çalışmanın tanımlanması, zaman aralığının seçilmesi, alan sınırının belirlenmesi, sistem bileşenlerini ve sorunun tespiti gibi aşamalar belirlenmektedir. Alternatifli gelecekteki varsayımlar, politikalara, maliyetlere, teknolojik gelişmeye ve talebe, kirliliğe, arza ve hidrolojiyi etkileyen diğer faktörlere dayanmaktadır. Senaryolar, alternatif varsayımlar ya da politikalar kümesinden oluşmaktadır. Son olarak senaryolar, suyun yeterliliği, maliyetleri ve yararları, çevresel hedeflerle uyumluluk ve kilit değişkenlerdeki belirsizliğe duyarlılık açısından da değerlendirilmektedir (SEI 2011).

Diğer modellerle kıyaslandığında göre WEAP ile yapılan çalışma sayısı göreceli olarak daha azdır. Türkiye'de WEAP modeli kullanılarak gerçekleştirilen çalışma sayısı da oldukça

kısıtlıdır. Model, su arz ve talebinin daha iyi ve kötü koşullarını yansıtacak şekilde üç farklı hidro-meteorolojik senaryo altında uygulanmıştır. Modelden elde edilen göstergeler, etkili su yönetiminin, su kaynaklarının çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlara göre sürdürülebilir biçimde kullanılmasının sağlanması için çok önemli olduğunu doğrulamıştır.

Yılmaz ve Harmancıoğlu (2010) WEAP modeli ile gerçekleştirdikleri bir başka çalışmada, Gediz Havzasındaki su bütçesinin kapsamlı bir değerlendirmesi ve özellikle sulama amaçlı olarak tahsis edilen yüzeysel su miktarı üzerinde durmuşlardır. Çalışma, basit katkı ağırlığı (SAW), uzlaşma programlama (CP) ve ideal tercih çözümüne benzerlik (TOPSIS) olmak üzere 3 farklı çok yönlü karar verme (MCDM) metodu temelinde en iyi yönetim alternatifinin belirlenmesi üzerine kurulmuştur. Çalışmanın sonuçları, en iyi alternatif hakkındaki kararın temelde kullanılan çok kriterli karar verme (MCDM) yönteminden bağımsız olduğunu, ancak analizlerde kullanılan verilerin yanı sıra ölçütlere atanan ağırlıklara da duyarlı olduğunu göstermektedir (SEI 2011).

Cüceloğlu ve Ertük (2014), İstanbul'un su talebinin% 12'sini karşılamakta olan ve 209 km<sup>2</sup>'lik yağış alanına sahip Darlık Havzasında WEAP modeli yardımıyla hidrolojik bir model oluşturmak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Su bütçesi bileşenleri ile ilgili hidrolojik bilgi eksikliği su havzasındaki uygun olmayan yönetim stratejilerine neden olabileceği üzerine bir çalışma yapılmıştır (Cüceloğlu ve Ertük 2014). Bu çalışmadan bilim insanları ve karar vericilere, İstanbul mega kenti için kapsamlı havza yönetimi planları hazırlamaya başlamaları için bilgi sağlanması hedeflenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve analizler, Darlık Havzasında su kalitesi araştırmaları ve iklim değişikliği etkileri araştırmalarında daha fazla yer bulacak ve bu sayede çalışmanın havza yönetimi planlarının geliştirilmesini daha da destekleyeceğine dikkat çekilmiştir.

### **2.5.6 TOPMODEL**

TOPMODEL (TOPoğrafik tabanlı hidrolojik MODEL) ilk olarak Beven vd. (1984) tarafından geliştirilmiştir. Sonrasında Obled ve Zin (2004) ve Beven (2012) tarafından revize edilen TOPMODEL'in kullanıcılarına İngilizce ve Fransızca olmak üzere sunduğu iki dil seçeneği bulunmaktadır. TOPMODEL, bir havzadaki mekansal değişimlerin simülasyon sonuçları üzerine olan etkilerini belirlemek için basit bir yaklaşım kullanmaktadır (Beven 1995; Beven 1997). Model kendisine iki amaç edinmiştir. Birinci amacı, pragmatik ve pratik bir tahmin

için sürekli simülasyon modeli geliştirmektir. Diğer amacı ise, hidrolojik süreçlerin basamaklarının ve model prosedürlerinin araştırılabileceği teorik bir çerçeve geliştirmektir.

TOPMODEL'de, aynı zamanda parametrelerin fiziksel olarak yorumlanabilmesi topoğrafik indeks modeline dayanılarak gerçekleştirilirken, havzada sonradan inşa edilen rezervuarların modellenmesini de mümkündür. En basit sürümünde kalibre edilmesi gereken 3 parametre bulunmaktadır. Modelde tanımlanan her bir noktadaki eğim  $\beta_i$  ve bu noktadan yukarıda kalan drenaj alanını  $a_i$  olarak varsayılır ve buna bağlı olarak topoğrafik özelliklere göre hidrolojik işlem birimleri tanımlanmaktadır (Beven 1997). Alt havzalardan daha küçük alanlara sahip olan bu işlem birimleri kullanıcılara daha detaylı bir değerlendirme yapabilme imkânı sunmaktadır. Bununla birlikte TOPMODEL günlük zaman diliminde çalıştırılabilmektedir. CBS ara yüzü ile kullanılan modelin ihtiyaç duyduğu veriler arasında; meteorolojik zaman serileri, topoğrafik özellikleri gösteren haritalar, evapotranspirasyon verileri yer almaktadır (Beven 1997).

TOPMODEL başlangıçta Birleşik Krallık'taki küçük havzaları simüle etmek için geliştirilmiştir (Beven ve Kirkby 1979; Beven vd. 1984). Bu çalışmalar, minimum parametre kalibrasyonu ile kabul edilebilir sonuçlar elde edebileceğini göstermiştir (Beven 1997). Buna benzer kalibrasyon sürecinden sonra yüzeysel akış simülasyonlarının kabul edilebilir performans gösterdiğini gösteren çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir (Franks vd. 1998; Donnelly-Makowecki ve Moore 1999; Güntner vd. 1999). Daha derin yeraltı suyu sistemlerinde veya doymuş bölgelerdeki su hareketinin modellenmesi, yüzeysel akışın modellenmesine göre çok daha zor olabilmektedir. Bu özelliğe sahip havzalarda TOPMODEL kullanılan çalışmalar da gerçekleştirilmiştir (Fisher ve Beven 1995).

TOPMODEL, aynı zamanda Akdeniz iklimi veya savana iklimi özelliklerine sahip çalışma alanlarında diğer modellere göre rakipsiz olduğu nitelendirilmektedir. Bununla birlikte Fransa'nın güneyinde yer alan Cevennes'teki Mont Loz'ere havzasında, bazı parametrelerin kalibrasyonundan sonra TOPMODEL'in, yüzeysel akışın simüle edilmesinde çok başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Durand vd. 1992). Fildişi Sahili'nde (Quinn vd. 1991), Avustralya'da (Barling vd. 1994) Booro-Borotou havzasının modellenmesi ve İspanya Katalonya'daki Prades dağlarındaki havzalarda (Pinol vd. 1997) yapılan çalışmalarda, özellikle yağışın olduğu dönemlerde TOPMODEL'in kabul edilebilir simülasyonlar sonuçları verdiği belirlenmiştir.

## BÖLÜM 3

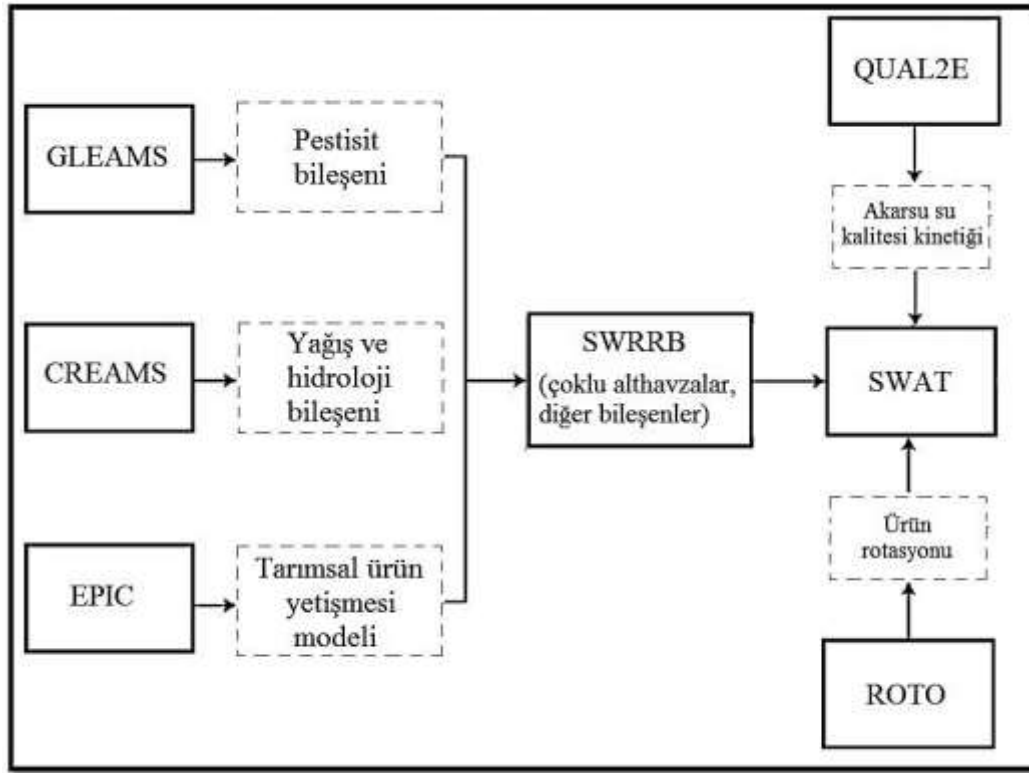
### SWAT MODELİ VE TARİHÇESİ

Dr. Jeff Arnold tarafından USDA-ARS için farklı toprak ve arazi koşullarına sahip büyük havzalarda tarımsal faaliyetler sonucunda ortaya çıkan kirliliğin su, sediment ve gübre verimi üzerine olan etkilerinin tahmin edilmesi için geliştirilmiştir (Neitsch vd. 2009).

SWAT modelinin geçmişi USDA-ARS tarafından geliştirilen birkaç modelin bir araya getirilmesi ile başlamıştır. İlk olarak noktasal olmayan kaynaklı kirliliklerin havzalar üzerine etkilerinin belirlenebilmesi için CREAMS (Knisel, 1980), GLEAMS (Leonard vd. 1987), EPIC (Williams vd. 1984) gibi farklı modeller bir araya getirilerek SWRRB (Williams vd. 1985; Arnold vd. 1990) isimli model oluşturulmuştur. Bu model SWAT'ın temelini oluşturmaktadır. Sonrasında özellikle CREAMS modeli üzerindeki yağışa bağlı olarak hidrolojik bileşenin modifikasyonu ile önemli değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Bu değişiklikler şuanda SWAT'ında temelini oluşturan ve hidrolojik modellemede önemli olan hususları içermektedir. Bunlar; alt havza bazında su miktarının detaylı hesaplanabilmesi, yer altı suyu ve geri akış bileşenlerinin eklenmesi, su ve sedimentin miktarının rezervuarlara bağlı olarak değişiminin hesaplanması, yağış, güneş radyasyonu ve sıcaklık gibi iklim parametrelerinin modele entegrasyonu, pik debilerin tahmini için farklı metotların geliştirilmesi, EPIC içerisindeki bitki büyümesinin mevsimsel olarak değişimini simüle edebilme yeteneğinin eklenmesi, basit taşkın bileşenlerinin eklenmesi, rezervuarlarda, göllerde, vadilerde, akarsu boyunca sediment taşınımı ve bu taşınımına bağlı olarak hareket eden diğer su kalitesi bileşenlerinin eklenmesi ve ilettime bağlı olarak oluşan kayıpların model içerisine dâhil edilmesidir.

Sonraki yıllarda çalışmaların gerçekleştirildiği havzaların alanları büyüdükçe modelin teknik olarak sadece 10 alt havzaya bölünebilme imkanı olması nedeniyle, bu konunun geliştirilmesi üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmıştır (Neitsch vd. 2009). Bunun için büyük drenaj alanına sahip havzalarda akarsu kanalı ve rezervuarlar boyunca öteleme imkânına sahip yüzeysel akışı

simüle edebilen ROTO (Routing Outputs to Outlet) programının kullanma fikri ortaya çıkmıştır. İlk olarak SWRRB programının çıktıları, ROTO programına girdi olarak kullanılmış fakat sonrasında iki program entegre edilerek alt havza sayısına bağlı olarak ortaya çıkabilecek problemlerin önüne geçebilmek için şuanda kullanılan SWAT modeli ortaya çıkmıştır (Neitsch vd. 2005). Modelin gelişim sürecinin anlatımı Şekil 3.1’de gösterilmektedir. İlk kullanılan versiyon SWAT94 olmuştur, sonrasında 1996, 1998, 1999, 2000, 2005 ve 2009 yıllarında güncellenerek kullanılmaya devam etmiştir, günümüzde de kullanılan en son versiyon 23 Aralık 2016’da yayınlanan SWAT2012 rev. 664’tür.



Şekil 3.1 SWAT modelinin gelişim süreci

### 3.1 SWAT MODELİNİN HİDROLOJİK ÇEVİRİM YAKLAŞIMI

SWAT modeli için hidrolojik çevrimde temel alınan su dengesi toprak nemi temel olarak alınmaktadır ve eşitlik Denklem (3.1)’deki gibidir.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte;

$SW_t$  : Herhangi bir t anındaki toprağın su içeriği (mm),

$SW_0$  : Başlangıçtaki toprağın su içeriği (mm),

$R_{day}$  : Günlük yağış miktarı (mm),

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

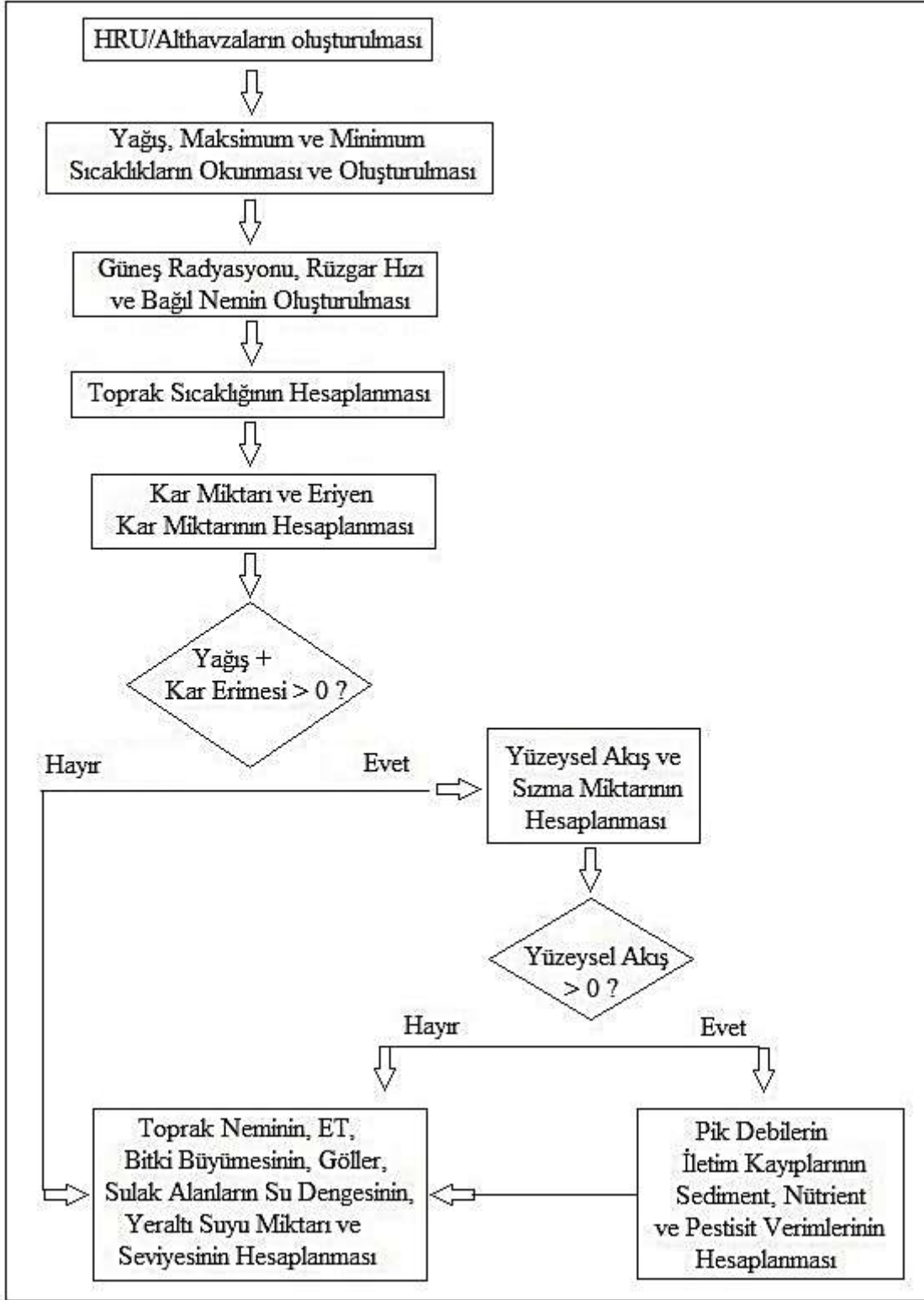
$E_a$  : Günlük buharlaşma ve terleme (mm),

$w_{seep}$  : Günlük sızan su miktarı (mm),

$Q_{gw}$  : Günlük geri akış su miktarı'nı (mm) göstermektedir.

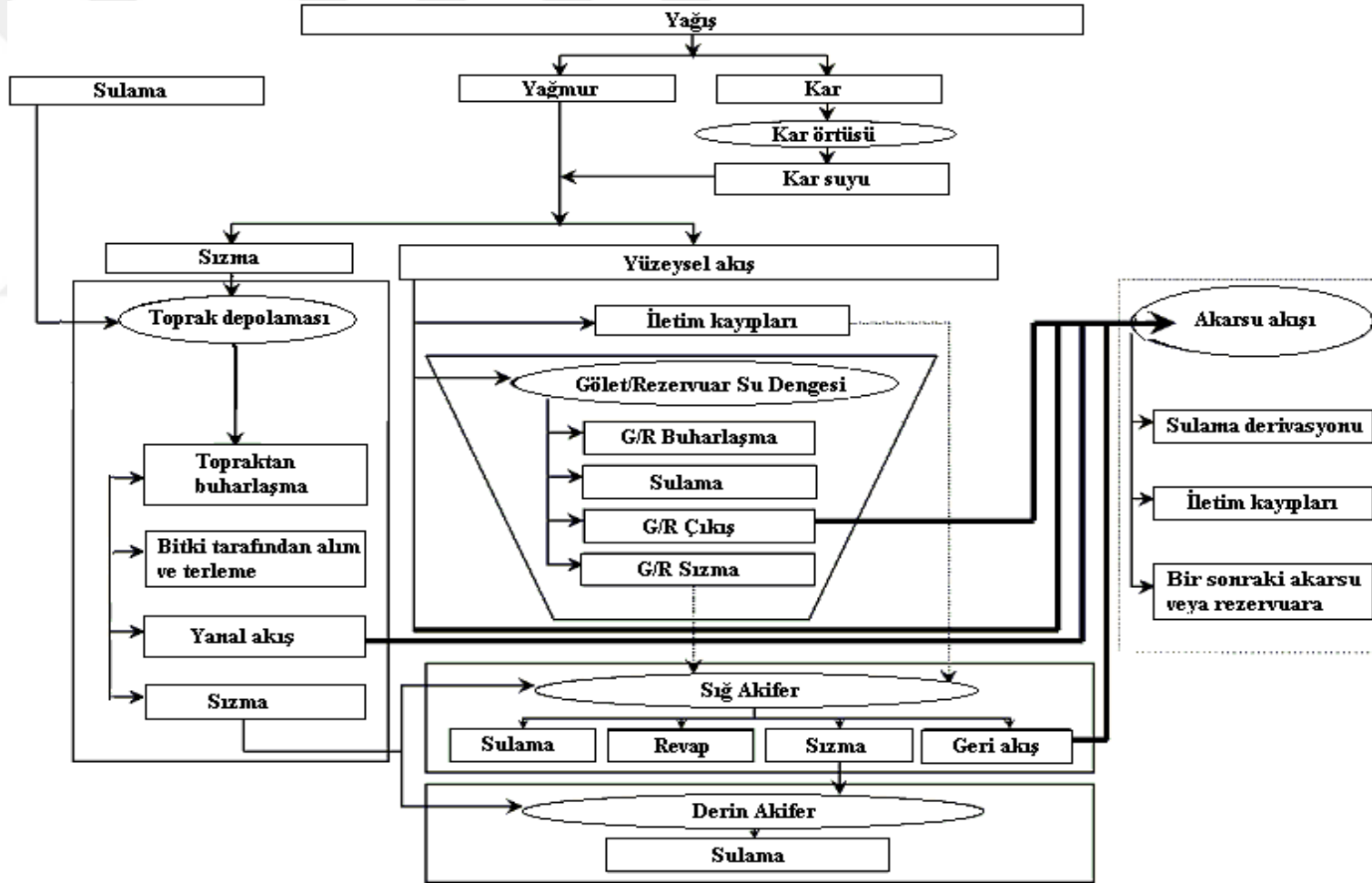
Model ile çalışılan alanda toprak kullanımı ve bitki türlerine bağlı olarak farklı buharlaşma ve terleme miktarları gerçekleşeceği için havzanın alt havzalara ayrılması gerekmektedir. Havzadaki yüzeysel akışa geçen su miktarını belirlemek içinde bu alt havzalarda daha ufak hidrolojik işlem birimlerine (HRUs) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hem su dengesinin fiziksel olarak tanımını verir hemde doğruluğu artırır. Şekil 3.2'de SWAT tarafından HRUs ve alt havzalar için hidrolojik çevrimde yapılan hesaplamaların genel sıralaması gösterilmektedir.

Yağış yağdığı sırada, bitki örtüsünün direk olarak üstüne veya toprak yüzeyine düşer. Toprak yüzeyine düşen su, toprağın katmanları içerisine sızmaya başlar veya yüzeysel akışa geçer. Yüzeysel akış nispeten hızlı bir şekilde gerçekleşirken, kısa süreli olmaktadır. Süzülen su ise, toprakta depolandıktan sonra bir kısmı buharlaşır ve bitkiler tarafından terleme ile atmosfere verilir, diğer kısmında yüzeysel akışı besleyebilir. SWAT tarafından simüle edilen suyun hareketi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.2 HRU/Alt havza çalışma süreci.





Şekil 3.3 SWAT modelindeki su hareketinin şematik gösterimi.

Model bitki örtüsündeki depolanacak ve buharlaşacak su miktarını hesaplayabilmektedir. Yüzeysel akış miktarı hesaplanırken eğri numarası yönteminin (CN) yanısıra, bitki örtüsü tarafından depolanan miktarda dikkate alınmaktadır. Bitkilerin depolayacağı maksimum su miktarını da yaprak alan indeksi yönteminin kullanarak hesaplamaktadır. Bu yöntem ile hesaplama yapılırken model bitkinin büyüme döngüsüne göre yaprak alanında buharlaşma ve terleme ile uzaklaşan su miktarını hesaplarken aynı zamanda yaprak yüzeyinde tutulan miktarı da belirleyebilmektedir (Neitsch vd. 2009).

Sızma, suyun toprak yüzeyinden toprak profiline girmesi olarak ifade edilir. Sızma devam ederken, toprak giderek daha fazla nemlenir ve zamanla sızıntı hızını azaltarak sabit bir değere ulaşmasına neden olur. Başlangıçtaki sızma hızı, toprağın mevcut nem içeriğine bağlıdır. Son sızma hızı ise, toprağın doymuş hidrolik iletkenliğine eşittir (Neitsch vd. 2005). Toprak profiline giren su miktarı, yüzeysel akış ve yağış miktarı arasında fark olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca sızan su miktarını The Green & Ampt sızma yöntemi (Green ve Ampt 1911) ile hesaplamakta mümkündür fakat bu yöntem zamansal anlamda yüksek çözünürlükte yağış verisine ihtiyaç duymaktadır.

Evapotranspirasyon, nehirler, göller gibi yüzey sularından, çıplak arazilerden ve vejetatif yüzeylerden buharlaşma (evaporasyon), bitkilerin yapraklarından terleme (transpirasyon), ve buz, kar yüzeylerinden süblimleşmelerin (süblimasyon) toplamı olarak ifade edilir. Model buharlaşmayı Ritchie (1972)'de tanımlandığı gibi topraktan ve bitkilerden olarak ayrı ayrı hesaplamaktadır. Toprakta potansiyel olarak buharlaşacak miktarı, yaprak alan indeksi yöntemi ve potansiyel evapotranspirasyonun bir fonksiyonu olarak tahmin etmektedir. Gerçek buharlaşacak miktarı ise, toprak derinliği ve nem içeriğine bağlı eksponansiyel bir fonksiyon kullanarak belirlerken, bitki terlemesinde de, potansiye evapotranspirasyon ve yaprak alan indeksinin doğrusal bir fonksiyonunu kullanarak simüle etmektedir.

Potansiyel evapotranspirasyon, toprakta su kısıtlaması olmaksızın, düzenli olarak alanın tamamına dağılmış bitki örtüsü koşullarında gerçekleşecek maksimum buharlaşma ve terlemenin toplamıdır. Bu değer adveksiyon ve ısı depolama etkileri gibi mikro iklim süreçleri tarafında etkilenmediği varsayılmıştır. SWAT modeli evapotranspirasyon miktarını tahmin edebilmek için Hargreaves (Hargreaves ve Riley 1982), Priestley-Taylor (Priestley ve Taylor 1972) ve Penman-Monteith (Monteith 1965) gibi üç farklı yöntem seçeneği sunmaktadır.

Yüzey altı akış veya ara akış, kaya tabakasının bulunduğu yer olan doymuş bölgenin üstünde, hemen yüzeyin altında, akarsuyu beslemektedir ve 0-2 m derinliğindeki toprak profilinde gerçekleştiği hesaplanmaktadır. Model bu değeri hesaplarken, hidrolik iletkenlik, eğim ve toprağın nem içeriğini dikkate almaktadır.

Yüzeysel akış veya karasal akış arazi eğimi boyunca gerçekleşmektedir. Eğer toprağa uygulanan suyun hızı, sızma hızından daha yüksek olursa ortaya çıkmaktadır. Eğer toprak nemi çok düşükse sızma hızı yüksek, yüzeysel akış düşük olacaktır, toprak neme doymaya başladıkça yüzeysel akış miktarında artış gösterecektir (Neitsch vd. 2009). SWAT modeli yüzeysel akış hacmini ve her bir HRU'daki pik debi miktarını, günlük veya saatlik yağış verisini kullanarak simüle etmektedir. Yüzey akışı hacmini hesaplarken SCS-CN (USDA Soil Conservation Service 1972) yöntemi veya The Green & Ampt sızma yöntemini (Green ve Ampt 1911) kullanmaktadır. Eğri numarası yönteminde model, toprağın nem içeriğinin doğrusal olmayan şekilde çeşitlilik gösterdiği varsayımından hareket eder. Eğri numarası değeri toprağın nem içeriğini solma noktasından başlatarak, doygunluk değeri olan 100 değerine kadar artırır. The Green & Ampt sızma yönteminde ise saatlik yağış verisini kullanarak hidrolik iletkenliğin bir fonksiyonu olarak sızma miktarını hesaplamaktadır. Sızamayacak olan miktar ise yüzeysel akışa dönüşür. İlk toprak tabasının sıcaklığı 0 °C'tan daha düşük olduğunda toprağı donmuş toprak tabakası olarak tanımlar ve model yüzeysel akış miktarını yükseltmesine karşılık, donmuş topraklar kuru olduğunda önemli miktarda sızmaya da izin vermektedir.

Toprak tipi ve arazi kullanım sınıfları farklı olan havzalarda uzun süre yapılan çalışmalardan sonra yüzeysel akışa geçen su miktarını belirlemek için Denklem (3.2) geliştirilmiştir (USDA Soil Conservation Service 1972).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{(R_{day} - 0,8S)} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte;

$Q_{surf}$  : Yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm),

$R_{day}$  : Günlük yağış miktarı (mm),

$S$  : Tutulma parametresi'dir (mm).

Tutulma parametresi olarak ifade edilen S değeri, havzanın toprak tipi, arazi kullanımı, eğimi ve toprağın su içeriğinin zamana bağlı olarak değişimine göre farklılık göstermektedir. Denklem (3.3)'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. Toprak tipine göre, toprakların hangi grupta yer aldığı Çizelge 3.1'de, arazi kullanımı ve toprak tipine bağlı olarak farklılık gösteren eğri numaraları da Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

$$S = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte;

$S$  : Tutulma parametresi (mm),

$CN$  : Eğri numarası'dır.

Denklem (3.2)'de görüldüğü gibi yüzeysel akışın oluşabilmesi için günlük yağış miktarının  $0,2S$ 'den büyük olması gerekmektedir. Tutulma parametresi, havzanın topoğrafik özellikleri, arazi kullanımı, toprak özellikleri gibi topraktaki su içeriğini etkileyen etmenlere bağlı olarak farklılık gösteren bir değişkendir (USDA Soil Conservation Service 1972).

SCS-CN yöntemi yardımıyla arazi kullanımı ve toprak tipine göre eğri numaraları belirlenip eşitlikler ile yüzeysel akış miktarını belirlemek mümkün olmaktadır. Aynı zamanda bu yöntem yardımıyla oluşturulan yüzeysel akışı, eğri numarası ve yağış arasındaki ilişkiyi gösteren grafiği kullanarak da tespit etmek mümkündür (USDA 1951). Bu grafik Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

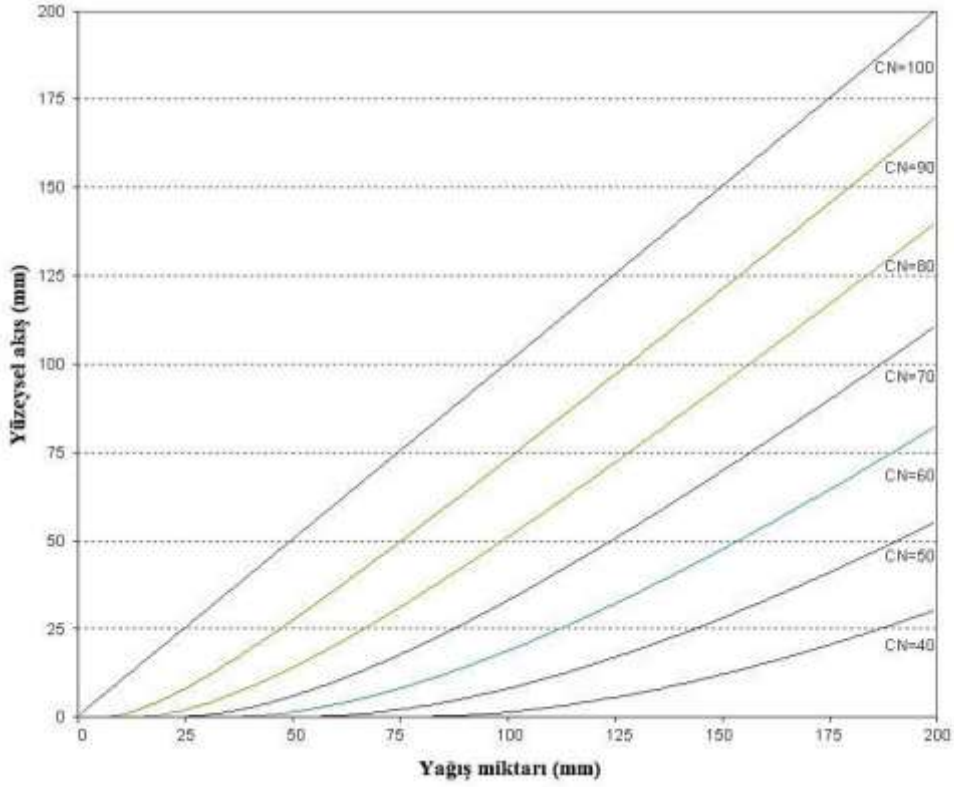
**Çizelge 3.1** Toprak gruplarının tarifi (USDA 1951 ve Usül 2008).

| Toprak Grubu | Toprak Özellikleri  |
|--------------|---|
| Grup A       | En düşük akım potansiyeli: Derin kum, derin lös, topaklanmış silt   |
| Grup B       | Oldukça düşük akım potansiyeli: sığ lös, kumlu lem  |
| Grup C       | Oldukça yüksek akım potansiyeli: killi lem, sığ kumlu lem, organik maddesi az toprak ve genelde kili nol toprak     |
| Grup D       | En fazla akım potansiyeli: Islanınca önemli önemli ölçüde şişen topraklar, ağır plastik kil ve bazı tuzlu topraklar |

**Çizelge 3.2** Bazı tarım, yarı kentleşmiş veya kentleşmiş arazi kullanımına sahip alanların eğri numaraları (USDA 1972 ve Usül 2008).

| Arazi Kullanım Tarifi                              | Hidrolojik Toprak Grubu |    |    |    |
|--|-------------------------|----|----|----|
|  | A                       | B  | C  | D  |
| İşlenmiş arazi: Koruma muamelesi yapılmamış        | 72                      | 81 | 88 | 91 |
| Koruma muamelesi yapılmış                          | 62                      | 71 | 78 | 81 |
| Otlak: Kötü durumda                                | 68                      | 79 | 86 | 89 |
| İyi durumda  | 39                      | 61 | 74 | 80 |
| Mera: İyi durumda                                  | 30                      | 58 | 71 | 78 |
| Baltalık ve orman: Seyrek bitki, zayıf örtü        | 45                      | 66 | 77 | 83 |
| İyi örtü   | 25                      | 55 | 70 | 77 |
| Açıklık alanlar, kırlar, parklar, mezarlıklar, vb. |                         |    |    |    |
| İyi durumda: Alanın 75%'den fazlası otla kaplı     | 39                      | 61 | 74 | 80 |
| Orta durumda: Alanın 50% - 75%'i otla kaplı        | 49                      | 69 | 79 | 84 |
| Ticaret ve iş alanları (85% geçirimsiz)            | 89                      | 92 | 94 | 95 |
| Endüstriyel bölge (72% geçirimsiz)                 | 81                      | 88 | 91 | 93 |
| Yerleşim birimleri                                 |                         |    |    |    |
| Ortalama arazi büyüklüğü                           |                         |    |    |    |
| Ortalama % geçirimsiz                              |                         |    |    |    |
| 1/8 acre* veya küçük                               | 65                      | 77 | 85 | 90 |
| 1/4 acre   | 38                      | 61 | 75 | 83 |
| 1/3 acre   | 30                      | 57 | 72 | 81 |
| 1/2 acre   | 25                      | 54 | 70 | 80 |
| 1/1 acre   | 20                      | 51 | 68 | 79 |
| Kaplamalı otopark, çatılar, araba yolları          | 98                      | 98 | 98 | 98 |
| Sokaklar ve yollar:                                |                         |    |    |    |
| Kaplamalı ve yağmur suyu drenajlı                  | 98                      | 98 | 98 | 98 |
| Çakıl  | 76                      | 85 | 89 | 91 |
| Toprak   | 72                      | 82 | 87 | 89 |

\* 1 acre yaklaşık 4 dönümdür



Şekil 3.4 SCS eğri numarası metodundaki yağış-yüzeysel akış ilişkisi

Sağanak yağışların yoğun olduğu dönemde pik debiler meydana gelmektedir. Bu pik debileri hesaplamak hem hidrolojik açıdan hem de taşınacak sedimentin miktarını belirlemek için oldukça önemlidir. Pik debiyi belirlemek için farklı yöntemler bulunmaktadır (Neitsch vd. 2009). SWAT modeli bunun için rasyonel yöntemi (Rational Method) kullanmaktadır. Bu yöntem genellikle sulama kanalları ve taşkın kontrol yapılarının tasarımında kullanılmaktadır. Yüzeysel pik debi miktarı Denklem (3.4)'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times Area}{3,6} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte;

$q_{peak}$  : Pik debi ( $m^3/s$ ),

$C$  : Yüzeysel akış katsayısı,

$i$  : Yağış yoğunluğu ( $mm/hr$ ),

$Area$  : Havza alanı'dır ( $km^2$ ).

Göletler, alt havzalar içerisinde yüzeysel akışın durduğu yerde bulunan su yapılarıdır. Göletlerin ana kanal dışında konumlandığı ve hiçbir zaman üst havzadan gelen akışın bu göletleri

beslemediği kabul edilmektedir (Neitsch vd. 2009). Göletin depoladığı su miktarı, göletin kapasitesi, günlük olarak giren su miktarı, çıkan su miktarı, sızma ve buharlaşmanın bir fonksiyonudur. Gerekli diğer bir girdi, göletin tam olarak dolduğu andaki yüzey alanıdır (Neitsch vd. 2009).

Akarsu kolları, ana kol ve yan kol olmak üzere iki şekilde tanımlanmaktadır. Yan kollar, ana koldan daha düşük dereceye sahiptir. Bir alt havzada yer alan herhangi bir yan kol sadece bir miktar suyu boşaltır ve akışına yer altı suyu katkısını almaz. Tüm yan kollarındaki akış havzanın ana koluna doğru yönlendirilir ve bırakılır. SWAT alt havza için gecikme zamanını belirlemek için yan kolların özelliklerini kullanmaktadır. Burada bahsi geçen gecikme zamanı kavramı, havzanın en uzak noktasına düşen yağmur damlasının havzanın çıkış noktasına kadar ulaşması için geçen süre olarak tanımlanmaktadır (Neitsch vd. 2009).

İletim kayıpları yatak boyunca yüzeysel akış sırasında gerçekleşen kayıp olarak nitelendirilmektedir. Bu tür kayıplar yılın her döneminde değil sadece belirli zamanlarda yer altı suyu tarafından beslenerek çok kısa sürede akışta kalabilen veya aralıklı olarak akışa geçen akarsularda meydana gelmektedir (Neitsch vd. 2009). SWAT modeli bu kayıpları hesaplamak için SCS Hidroloji El Kitabındaki (USDA Soil Conservation Service 1983) anlatılan yöntemi kullanmaktadır. Kanaldaki su kaybı akış süresi, kanalın uzunluğu ve genişliğinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır.

Geri akış veya taban akışı, yer altı suyu kaynaklı yüzeysel akıştaki su miktarı olarak tanımlanmaktadır. SWAT yer altı suyunda bulunan akifer sistemlerini ikiye ayırır: birincisi sığ bölgede bulunan serbest akifer, diğeri ise geri akışla akarsuyu besleyen basınçlı akiferlerdir (Arnold vd. 1993). Kök bölgesinin altında kalarak sızan su iki bileşene ayrılır ve her bir bileşen akiferlerden birini besler. Geri akışa ek olarak, sığ akiferde depolanan su kurak koşullarda toprak katmanındaki neme destek olur veya direkt olarak bitki tarafında alınabilir. Ayrıca modelde sığ veya derin akiferden pompa yardımıyla suda çekilebilmektedir.

### 3.2 HİDROMETEOROLOJİK FAKTÖRLER

Hidrolojik döngüde su, yağış olarak sisteme dâhil olduğunda süreç başlamaktadır. Sonrasında suyun hareketi için güneş radyasyonu devreye girmekte ve önemli bir rol oynamaktadır. Güneş radyasyonu ve buna bağlı olarak hava sıcaklığının artması ile birlikte karlar eriyerek sistemdeki harekete devam ederken diğer taraftan buharlaşma ile su sistemden uzaklaşmaktadır. Hidrolojik döngüye su girişi yağmur veya yağışı ile olmakta bu nedenle döngünün kontrolünü de yağış tarafından gerçekleştirilmektedir (Neitsch vd. 2009).

SWAT modeli günlük çözünürlükte 6 farklı meteorolojik veriye ihtiyaç duymaktadır. Bunlar: yağış, minimum sıcaklık, maksimum sıcaklık, güneş radyasyonu, mutlak nem ve rüzgâr hızıdır. Kullanıcılar bu verileri günlük bazda temin ederek modele tanıtabilirler veya birkaç yıllık ortalama aylık verileri kullanarak SWAT'ın içerisine gömülü WXGEN (Sharpley ve Williams 1990) modeli yardımıyla veri üretme imkânına da sahiptirler.

Gün içerisinde yağmur gözlenmesi diğer iklim değişkenleri bağıl nem, sıcaklık ve güneş radyasyonu üzerine önemli bir etki yapmaktadır. Bu nedenle WXGEN modeli ilk olarak o gün için toplam yağış miktarı verisini üretir. Eğer sızma için Green & Ampt yöntemi de kullanılıyorsa, yağışın o gün içerisindeki dağılımını da hesaplayabilmektedir. Sonrasında yağışın olup olmamasına bağlı olarak o gün için maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, güneş radyasyonu ve mutlak nem verilerini oluşturur. Son olarak, bu iklim değişkenlerinden bağımsız olarak rüzgâr verisi üretilmektedir.

#### 3.2.1 Yağış

Programın kullandığı yağış modeli, Markov asimetric dağılım zinciri (Nicks 1974) veya Markov üstel zinciri modelidir ve bu iki yaklaşıma göre günlük yağış verisi üretilmektedir. Markov zincirinin temelinde gün ıslak veya kuru olarak tanımlanır. Eğer gün ıslak ise tanımlanmışsa, üretilen yağış miktarı asimetric veya üstel bir şekilde dağıtılır. O gün gerçekleşecek yağış olasılığı, bir önceki günün ıslak veya kuru olmasına bağlı olarak belirlenir. Burada bahsi geçen ıslak gün kavramı 0,1 mm veya daha fazla yağışın gerçekleşmesini ifade etmektedir. Bir günü ıslak veya kuru gün olarak tanımlamak için SWAT 0-1 aralığında rastgele bir sayı üretir. Üretilen sayı ıslak gün/kuru gün olasılığına eşit veya küçük ise, o gün ıslak gün olarak tanımlanır. Eğer bu sayı ıslak gün/kuru gün olasılığından büyük ise de, gün kuru olarak kabul edilir. Ay



içerisindeki ıslak gün sayına göre ıslak gün ihtimali belirlenmektedir. Denklem (3.5)'te gösterildiği şekilde ıslak gün ihtimali hesaplanmaktadır.

$$PW = \frac{NWD}{ND} \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte;

$PW$  : Islak gün ihtimali,

$NWD$  : Islak gün sayısı,

$ND$  : Aydaki gün sayısı'dır.

Yağış miktarını tanımlayabilmek için çok fazla sayıda olasılık dağılım fonksiyonu kullanılmaktadır. SWAT modeli kullanıcılarına asimetrik dağılım ve üstel dağılım seçeneklerini sunmaktadır. Markov asimetrik dağılım zinciri (Nicks 1974) öncesinde anlamlı bir yüzeysel akışı oluşturmak için Fiering'in (1967) kullandığı dağılım modeli yaklaşımı vardı. Islak bir günde oluşacak yağış miktarını hesaplamak için kullanılan bu eşitlik Denklem (3.6)'da gösterilmektedir.

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2 \cdot \sigma_{mon} \cdot \left( \frac{\left[ \left( \frac{SND_{day} - \frac{g_{mon}}{6}}{6} \right) \cdot \left( \frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right) \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte;

$R_{day}$  : Günlük toplam yağış miktarı (mm),

$\mu_{mon}$  : Ay için ortalama yağış miktarı (mm),

$\sigma_{mon}$  : Ay için günlük yağışın standart sapması (mm),

$SND_{day}$  : Gün için hesaplanan standart normal sapma,

$g_{mon}$  : Ay içerisindeki günlük yağış için asimetrik dağılım katsayısı'dır.

Denklem (3.5)'te ifade edilen gün için hesaplanan standart normal sapma değeri  $SND_{day}$  Denklem (3.7)'deki şekilde hesaplanmaktadır.

$$SND_{day} = \cos(6.283 \cdot rnd_2) \cdot \sqrt{-2 \ln(rnd_1)} \quad (3.7)$$

Bu eşitlikte;

$SND_{day}$  : Gün için hesaplanan standart normal sapma,

$rnd_1$  ve  $rnd_2$  : 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı'dır.

Asimetrik dağılıma bir alternatif olarak üstel dağılım geliştirilmiştir (Neitsch vd. 2009). Diğer yaklaşıma göre daha az girdiye ihtiyaç duymaktadır. Çalışacak alanında yağış ile ilgili kısıtlı sayıda veri olduğunda bu yöntemin kullanılması tercih edilir. Üstel dağılım yöntemi kullanılarak günlük yağış miktarının hesaplandığı eşitlik Denklem (3.8)'de gösterilmektedir.

$$R_{day} = \mu_{mon} \cdot (-\ln(rnd_1))^{rexp} \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte;

$R_{day}$  : Günlük toplam yağış miktarı (mm),

$\mu_{mon}$  : Ay için ortalama yağış miktarı (mm),

$rnd_1$  : 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı,

$rexp$  : 1 ile 2 arasında girilen üs değeri'dir.

$rexp$  değerinin artış göstermesi, yıl içerisinde gerçekleşen aşırı yağış olaylarının sayısının artmasını ifade etmektedir. Bu denklem ile ABD'nin (Amerika Birleşik Devletleri) genelinde yapılan test çalışmalarına göre 1,3 değerinin tatmin edici sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Yüzeysel akıştaki pik debiyi belirlemek için yarım saatlik maksimum yağış verisine ihtiyaç vardır. Model bu değeri, günlük yağış verisi ile aylık maksimum yarım saatlik akış verilerini üçgen dağılım yöntemini kullanarak hesaplar veya kullanıcı ilgili aydaki tüm günler için tek bir yarım saatlik maksimum yağış miktarı modele tanımlayabilir. Bu veri sadece yüzeysel akışın olduğu günler için hesaplanmaktadır.

Kullanıcıların, modelin çalıştırılacağı periyottaki yarım saatlik maksimum yağış verisini her bir ay için ayrı ayrı modele girmeleri gerekmektedir. Bu sayede model pik debileri hesaplayabilmektedir. Yarım saatlik maksimum yağış kesirleri hesaplanmadan önce üç aylık ortalama değerler kullanılarak aşırı yarım saatlik yağış verileri düzeltilir. Bu düzeltmenin yapıldığı eşitlik Denklem (3.9)'da ve ortalama yarım saatlik yağış kesrinin hesaplandığı eşitlik Denklem (3.10)'da gösterilmektedir.

$$R_{0.5sm(mon)} = \frac{R_{0.5x(mon-1)} + R_{0.5x(mon)} + R_{0.5x(mon+1)}}{3} \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte;

$R_{0.5sm(mon)}$  : Verilen ay için yumuşatılmış maksimum yarım saatlik yağış miktarı (mm),

$R_{0.5x}$  : Herhangi bir ay için aşırı maksimum yarım saatlik yağış miktarı (mm)'dir.

$$\alpha_{0.5mon} = adj_{0.5\alpha} \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{R_{0.5m(mon)}}{\mu_{mon} \cdot \ln\left(\frac{0.5}{yrs \cdot days_{wet}}\right)}\right) \right] \quad (3.10)$$

Bu eşitlikte;

$\alpha_{0.5mon}$  : Ay için ortalama yarım saatlik yağış kesri,

$adj_{0.5\alpha}$  : Düzeltme faktörü,

$R_{0.5m}$  : Ay için yumuşatılmış yarım saatlik yağış miktarı (mm),

$\mu_{mon}$  : Ay için günlük ortalama yağış miktarı (mm),

$yrs$  : Aylık aşırı yarım saatlik yağışın kullanıldığı veri setinin yıl sayısı,

$days_{wet}$  : Ay içerisindeki ıslak gün sayısı'dır.

Düzeltme faktörü, yarım saatlik yağış kesirleri ve yüzeysel akıştaki pik debinin tahmin edilmesinin geliştirilmesi için kullanıcılar için eşitliğe koyulmuştur.

Gün içerisindeki yağış miktarının dağılımı öğrenmek gerektiğinde, SWAT modeli günlük yağışı küçük zaman aralıklarına bölerek simüle edebilmektedir. Bu işlem CLIGEN (Nicks vd. 1995) yöntemi yardımıyla şiddetli sağanak yağış dönemlerinde kullanılır. Bu yöntemde sağanak dönemlerde yaklaşım çift üstel fonksiyonu temeline dayanır. Bu çift üstel fonksiyonla, yağış yoğunluğu zaman ile bir maksimuma veya pik yoğunluğa doğru üstel bir şekilde artış gösterir. Yağış yoğunluğu pik noktaya eriştikten sonra sağanak yağışın sona erdiği zamana kadar yine üstel bir şekilde azalma gösterir. Sağanak dönemlerinde yağış yoğunluğunun hesaplanması için kullanılan eşitlik Denklem (3.11)'de gösterilmektedir.

$$i(T) = \begin{cases} i_{mx} \cdot \exp\left[\frac{T_{peak} - T}{\delta_2}\right] & 0 \leq T \leq T_{peak} \\ i_{mx} \cdot \exp\left[\frac{T_{peak} - T}{\delta_2}\right] & T_{peak} < T < T_{dur} \end{cases} \quad (3.11)$$

Bu eşitlikte;

$i$  : T anındaki yağış yoğunluğu (mm/sa),

$i_{max}$  : Sağanak esnasında maksimum veya pik yağış yoğunluğu (mm/sa),

$T$  : Sağanak yağışın başladığı zaman (sa),

$T_{peak}$  : Sağanağın başlayıp pik yağış yoğunluğuna ulaştığı noktaya kadar geçen süre (sa),

$T_{dur}$  : Sağanak yağışın süresi (sa),

$\delta_1, \delta_2$  : Eşitlik katsayıları'dır (sa).

Sağanak sırasında pik veya maksimum yağış yoğunluğu hesaplanmaktadır, bu pik yağış yoğunluğunun, yağış şiddetine eşit olduğu varsayılarak yüzeysel pik oranını belirlenmektedir.

### 3.2.2 Güneş Radyasyonu ve Sıcaklık

Güneşten gelen radyasyon, enerjinin tek kaynağı olmakla birlikte yeryüzündeki iklim süreçlerini de etkilemektedir. Hidrolojik döngüde önemli değişkenler arasında olan sıcaklık ve solar radyasyon birbirileri ile direkt olarak ilişkili iklim bileşenleridir. SWAT modelinde maksimum ve minimum sıcaklık ile güneş radyasyonu verisi direkt girdi olarak kullanılmaktadır. Veriye ulaşılamadığı durumlarda, günlük maksimum hava sıcaklığı, minimum hava sıcaklığı ve solar radyasyon için ıslak – kuru gün olasılıklarına göre bir normal dağılım türetilir. Türetilen hava sıcaklığı verisinden suyun ve toprağın sıcaklığı da hesaplanabilmektedir (Neitsch vd. 2009).

İlgili ay ve ıslak - kuru gün olasılığına göre bu değişkenlerde farklılık göstermektedir. Bu verilerin üretimi sırasında oluşabilecek hataları minimuma indirmek için de düzeltme faktörleri kullanılır. Kuru günlerdeki hatalar, ıslak gündeakilere göre nispeten daha düşüktür. Model bu hesaplamaları yaparken uzun dönem standart sapma değerine ihtiyaç duyar. Bu standart sapma değeri ne kadar çok sayıda veriden hesaplanırsa, hata da aynı oranda azalacaktır. SWAT modelinin maksimum hava sıcaklığı, minimum hava sıcaklığı ve güneş radyasyonunu hesaplamak için kullandığı eşitlikler sırasıyla Denklem (3.12), Denklem (3.13) ve Denklem (3.14)'te gösterilmektedir.

$$T_{mx} = \mu m x_{mon} + X_i(1) \cdot \sigma \mu x_{mon} \quad (3.12)$$

$$T_{mn} = \mu m n_{mon} + X_i(2) \cdot \sigma \mu n_{mon} \quad (3.13)$$

$$H_{day} = \mu rad_{mon} + X_i(3) \cdot \sigma rad_{mon} \quad (3.14)$$

Bu eşitliklerde;

- $T_{mx}$  : Günlük maksimum sıcaklık değeri ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\mu mx_{mon}$  : İlgili ay içerisindeki ortalama maksimum sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $X_i(1)$  : Günlük maksimum sıcaklık kalıntısı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\sigma mx_{mon}$  : İlgili ay içerisindeki maksimum sıcaklıkların standart sapma değeri ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{mn}$  : Günlük minimum sıcaklık değeri ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\mu mn_{mon}$  : İlgili ay içerisindeki ortalama minimum sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $X_i(2)$  : Günlük minimum sıcaklık kalıntısı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\sigma mn_{mon}$  : İlgili ay içerisindeki minimum sıcaklıkların standart sapma değeri ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $H_{day}$  : Günlük solar radyasyon değeri ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),  
 $\mu rad_{mon}$  : İlgili ay içerisindeki ortalama solar radyasyon değeri, ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),  
 $X_i(3)$  : Günlük solar radyasyon kalıntısı ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),  
 $\sigma rad_{mon}$  : İlgili ay içerisindeki solar radyasyonun standart sapma değeri'dir ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ).

### 3.2.3 Bağlı Nem

Herhangi bir sıcaklıktaki var olan nemin, aynı sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına oranı bağlı nem olarak adlandırılmaktadır. Daha öncede anlatıldığı gibi, SWAT modeli evapotranspirasyon miktarını tahmin edebilmek için Hargreaves (Hargreaves ve Riley 1985), Priestley-Taylor (Priestley ve Taylor 1972) ve Penman-Monteith (Monteith 1965) isimli üç farklı yöntemi kullanabilmektedir. Bu yöntemlerden biri olan ve sıklıkla kullanılan Penman-Monteith metodu için bağlı nem verisine ihtiyaç duymaktadır. Günlük çözünürlükteki veri, direkt olarak model girilebilirken aynı zamanda SWAT içerisine gömülü WXGEN (Sharpley ve Williams 1990) modeli ile de belirlenebilmektedir. Üçgen dağılım yöntemini temel alarak aylık ortalama bağlı nem, ay içerisindeki maksimum bağlı nem, minimum bağlı nem ve 0 – 1 arasında rastgele bir sayı yardımıyla ortalama bağlı nem değeri hesaplanmasına ilişkin eşitlik Denklem (3.15)'te gösterilmektedir.

$$R_h = R_{hmon} \cdot \frac{R_{hUmon} - (R_{hUmon} - R_{mon}) \left[ \frac{R_{hUmon}(1 - rnd_1) - R_{hLmon}(1 - rnd_1)}{R_{hUmon} - R_{hmon}} \right]^{0.5}}{R_{hmon,mean}} \quad (3.15)$$

Bu eşitlikte;

- $R_h$  : Ortalama bağıl nem,  
 $R_{hmon}$  : İlgili ay içerisindeki ortalama bağıl nem,  
 $R_{hUmon}$  : İlgili ay içerisindeki maksimum bağıl nem,  
 $R_{hLmon}$  : İlgili ay içerisindeki minimum bağıl nem,  
 $R_{hmon,mean}$  :  $R_{hmon}$ ,  $R_{hLmon}$  ve  $R_{hUmon}$  değerlerinin ortalaması,  
 $rnd_1$  : 0 – 1 arasındaki rastgele bir sayı'dır.

### 3.2.4 Rüzgâr Hızı

Bağıl nemde olduğu gibi rüzgâr hızı da, Penman Monteith yöntemi kullanılarak hesaplanan potansiyel evapotranspirasyon değeri için gerekmektedir. SWAT modeli içerisinde geliştirilen üstel bir eşitlik yardımıyla günlük ortalama rüzgâr hızı hesaplanabilmektedir. Kullanılan eşitlik Denklem (3.16)'da gösterilmektedir.

$$\mu_{10m} = \mu w nd_{mon} \cdot (-\ln(rnd_1))^{0.3} \quad (3.16)$$

Bu eşitlikte;

- $\mu_{10m}$  : Günlük ortalama rüzgâr hızı (m/s)  
 $\mu w nd_{mon}$  : Aylık ortalama rüzgâr hızı (m/s),  
 $rnd_1$  : 0 – 1 arasındaki rastgele bir sayı'dır.

### 3.2.5 Kar Örtüsü

SWAT modeli yağışı, yağmur veya donan yağmur/kar olarak sınıflandırmaktadır. Sınır sıcaklık değeri olarak tanımlanan  $T_{s-r}$  değeri yağışın kar veya yağmur olmasını belirlemek için kullanıcılar tarafından tanımlanabilmektedir. Eğer ortalama günlük sıcaklık değeri, sınır sıcaklık değerinden düşükse, yağış HRU'ya kar veya kar yağışının su eşdeğeri olarak girer ve mevcut kar örtüsü üzerine eklenir.

Kar yağışı yüzey zemin üzerinde kar örtüsü olarak depolanmaktadır. Kar örtüsü kar yağışı ile artış göstermekteyken, karın erimesi ve süblimleşme ile azalmaktadır. Modelin kar örtüsünü

hesaplarken kullandığı eşitlik Denklem (3.17)'de gösterilmektedir. Kar miktarı HRU'nun toplam alanının üzerindeki derinlik olarak tanımlanmaktadır.

$$SNO = SNO + R_{day} + E_{sub} + SNO_{mt} \quad (3.17)$$

Bu eşitlikte;

$SNO$  : Günlük kar örtüsü içerisindeki su içeriği (mm H<sub>2</sub>O),

$R_{day}$  : İlgili gündeki yağış miktarı (sadece ortalama günlük sıcaklık, sınır sıcaklıktan düşük olduğunda eklenir) (mm H<sub>2</sub>O),

$E_{sub}$  : İlgili gündeki süblimleşme miktarı (mm H<sub>2</sub>O),

$SNO_{mt}$  : İlgili gündeki eriyen kar miktarı'dır (mm H<sub>2</sub>O).

Kar örtüsünü etkileyen sürüklenme, gölgeleme ve topoğrafya gibi etmenler alt havza içerisindeki toplam alanın üzerine eşit olarak dağıtılmaktadır. Bu faktörler yıldan yıla benzer davranış göstermekle birlikte, herhangi bir zamanda var olan kar miktarı ile karın bölgesel dağılımı arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu korelasyon, alt havzadaki mevcut kar miktarının bir fonksiyonudur ve mevsimsel olarak kar örtüsünün azalması ve artış göstermesini tanımlayan alansal tükenme eğrisi ile açıklanmaktadır (Anderson 1976).

Alan boşaltma eğrisi, kar derinliğinin eşik değerine ihtiyaç duymaktadır. Eşik değerini bilmek için %100'ün kar ile kaplandığı değerde bilinmelidir. Eşik kar derinliği değeri, bitki örtüsünün dağılımı, rüzgârın kar üzerine olan etkisi, yönü ve havzanın kendine özgü özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Tüm bu etkenleri açıklamak için kullanılan alan boşaltma eğrisi doğal logaritmayı temel almaktadır. Eşitlik Denklem (3.18)'de gösterilmektedir.

$$sno_{cov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \cdot \left( \frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp \left( cov_1 - cov_2 \cdot \frac{SNO}{SNO_{100}} \right) \right)^{-1} \quad (3.18)$$

Bu eşitlikte;

$sno_{cov}$  : Karla kaplanan HRU alanının kısmı,

$SNO$  : İlgili gündeki kar örtüsü içerisindeki su içeriği (mm H<sub>2</sub>O),

$SNO_{100}$  : %100 kar örtülü eşik derinlik (mm H<sub>2</sub>O),

$cov_1$  : Eğrinin şeklini ifade eden katsayı,

$cov_2$  : Eğrinin şeklini ifade eden katsayı'dır.

Alan boşaltma eğrisinin, % 50 kar örtüsü ile kaplı bir alanda farklı eşik derinliklerine göre değişimlerini gösteren grafikler Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

Karın erimesini, hava sıcaklığı, kar örtüsünün sıcaklığı, erime hızı ve karın alansal dağılımı kontrol etmektedir. Eriyen kar için, tıpkı yağışta olduğu gibi yüzeysel akış ve sızma hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Erime esnasında hidrolojik döngü içerisine dahil edilen su miktarı 24 saatlik dilim boyunca eşit olarak dağıtılmaktadır.

Kar yığınının sıcaklığı, bir önceki gün boyunca ortalama hava sıcaklığı ve nemin bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır (Anderson 1976). Bir önceki gün kar yığın sıcaklığının, o günkü kar yığını sıcaklığı üzerine olan etkileri gecikme faktörü ( $\ell_{sno}$ ) tarafından kontrol edilmektedir. Bu faktörü etkileyen etmenler ise; kar yığını yoğunluğu, kar yığını derinliği, meteoroloji ve diğer faktörlerdir. Kar yığını sıcaklığını hesaplamak için kullanılan eşitlik Denklem (3.19)' da gösterilmektedir.

$$T_{snow(d_n)} = T_{snow(d_{n-1})} \cdot (1 - \ell_{sno}) + \bar{T}_{av} \cdot \ell_{sno} \quad (3.19)$$

Bu eşitlikte;

$T_{snow(d_n)}$  : İlgili gündeki kar yığının sıcaklığı (°C),

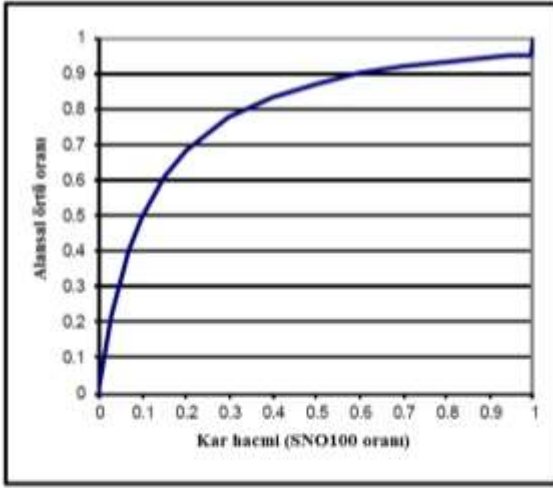
$T_{snow(d_{n-1})}$  : Bir önceki gündeki kar yığın sıcaklığı (°C),

$\ell_{sno}$  : Kar sıcaklığı gecikme faktörü,

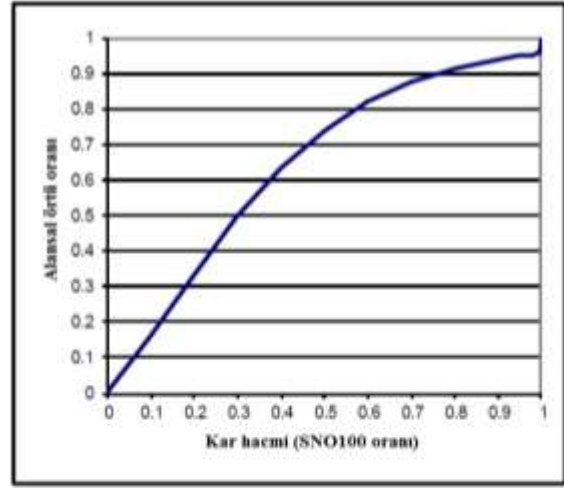
$\bar{T}_{av}$  : O günkü ortalama hava sıcaklığı'dır (°C).

Gecikme faktörü ( $\ell_{sno}$ ) 1'e doğru yaklaştıkça, o günkü ortalama hava sıcaklığının da gittikçe artmakta olduğu, karın erimesinin hızlandığı ve bir önceki günün kar yığını sıcaklığından daha az etkilendiği anlaşılmaktadır. Eşik sıcaklık değerine kadar artış olmadığı takdirde karda erime başlamayacaktır. SWAT modeli eriyen karın miktarının hesaplamak için ortalama kar yığını ve maksimum hava sıcaklığı arasındaki farkın lineer bir fonksiyonunu kullanmaktadır. Bu eşitlik Denklem (3.20)'de gösterilmektedir.

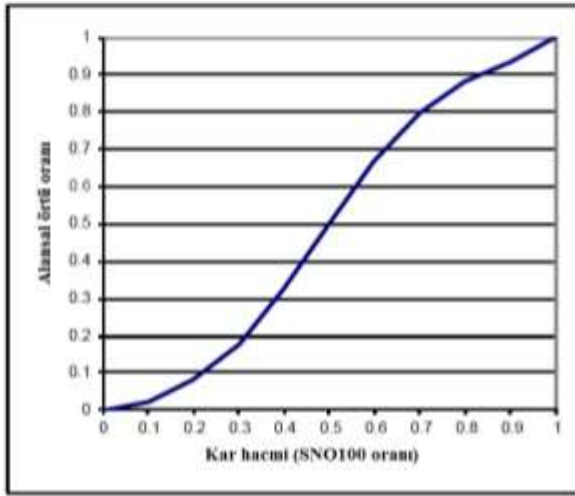




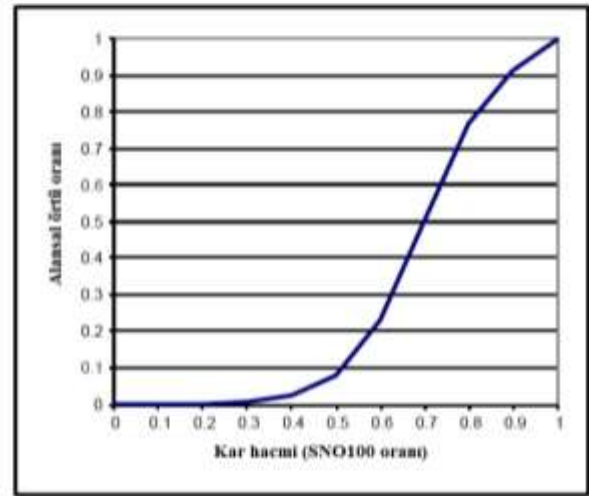
(a) Kar hacmi = % 10, Alansal örtü oranı = % 50



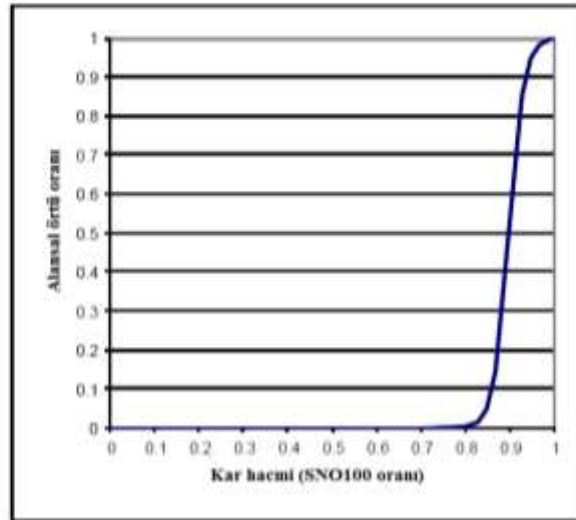
(b) Kar hacmi = % 30, Alansal örtü oranı = % 50



(c) Kar hacmi = % 50, Alansal örtü oranı = % 50



(d) Kar hacmi = % 70, Alansal örtü oranı = % 50



(e) Kar hacmi = % 90, Alansal örtü oranı = % 50

Şekil 3.5 Alansal örtü alanı ve SNO100 oranı arasındaki ilişki

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} \cdot sno_{cov} \cdot \left[ \frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mlt} \right] \quad (3.20)$$

Bu eşitlikte;

$SNO_{mlt}$  : İlgili gündeki eriyen karın miktarı (mm H<sub>2</sub>O),

$b_{mlt}$  : Erime faktörü (mm H<sub>2</sub>O/gün - °C),

$sno_{cov}$  : Karla kaplanan HRU alanının oranı,

$T_{snow}$  : İlgili gündeki kar yığının sıcaklığı (°C),

$T_{mx}$  : İlgili gündeki maksimumu hava sıcaklığı (°C),

$T_{mlt}$  : Karın erimesine izin verilen taban sıcaklığı'dır (°C).

Yapılan çalışmalarda kırsal alanlardaki erime faktörünün 1.4 ile 6.9 mm H<sub>2</sub>O/gün-°C arasında değiştiği tespit edilmiştir (Huber ve Dickson 1988). Erime faktörünün kentsel alanlar için belirlenebilmesi için İsveç'te yapılan çalışmada ise, özellikle taşıtların ve yayaların kar yığınları üzerine yaptıkları sıkıştırma nedeniyle bu değer 3.0 ile 8.0 mm H<sub>2</sub>O/gün-°C arasında değiştiği gözlenirken (Bengston 1981, Westerstrom 1981), asfaltta bu değer 1.7 ile 6.5 mm H<sub>2</sub>O/gün-°C arasında değiştiği tespit edilmiştir (Westerstrom 1984).

### 3.2.6 Evapotranspirasyon

Evapotranspirasyon, yeryüzündeki suyun, su buharına dönüştüğü tüm süreçleri içeren kolektif bir terimdir. Bu terim, bitki örtüsünden buharlaşma, terleme, süblimleşme ve topraktan buharlaşmanın tamamını içermektedir. Evapotranspirasyondaki temel mekanizma suyun havzadan uzaklaştırılmasıdır. Kıtalar üzerine düşen toplam yağış miktarının % 62'si buharlaşma ve terleme ile su döngüsündeki hareketine devam etmektedir. Dünyadaki birçok nehir havzasında ve Antarktika dışındaki tüm kıtalarda evapotranspirasyon miktarı, yüzeysel akışa geçen su miktarından fazladır (Dingman 1994).

Yağış miktarı ve evapotranspirasyon miktarı arasındaki fark, insanoğlunun kullanabilmesi için uygun olan su miktarıdır. Evapotranspirasyonun doğru tahmin edilebilmesi, su kaynaklarının yönetimi, iklim değişikliği ve arazi kullanımındaki değişikliklerin bu kaynaklar üzerine olan etkilerini belirleyebilmek için kritik bir öneme sahiptir.

Bitki örtüsü, sızmayı, yüzeysel akışa geçecek su miktarını ve evapotranspirasyonu anlamlı bir şekilde etkilemektedir. Yağmur yağdııkça bitki örtüsü üzerine düşen su damlalarının eroziv enerjisini azaltma açısından da diğer bir öneme sahiptir. Bu etki direkt olarak bitki türlerinin morfolojisi ve bitki örtüsü yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak kabul edilmektedir. SWAT modeli bitki üzerinde tutulacak günlük su miktarını hesaplayabilmek için yaprak alan indeksi yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yaklaşım Denklem (3.21)'de gösterilmektedir.

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (3.21)$$

Bu eşitlikte;

- $can_{day}$  : İlgili günde bitki örtüsünün üzerinde tutulabilecek maksimum su miktarı (mm H<sub>2</sub>O),
- $can_{mx}$  : Bitkinin yaprağı tamamen gelişimini sağladıktan sonra üzerinde tutulabilecek maksimum su miktarı (mm H<sub>2</sub>O),
- $LAI$  : İlgili gündeki yaprak alan indeksi değeri,
- $LAI_{mx}$  : Bitkinin maksimum yaprak alan indeksi değeri'dir.

Yağmur başladıktan sonra, yere düşmeden önce bitkilerin yaprakları üzerinde tutulabilme kapasiteleri dolana kadar tutulurlar. Bu miktarı hesaplamak için kullanılan eşitlikte Denklem (3.22)'de gösterilmektedir.

$$\begin{cases} R_{INT(f)} = R_{INT(i)} + R'_{day} \text{ ve } R_{day} = 0 & R'_{day} \leq can_{day} \leq R_{INT(i)} \\ R_{INT(f)} = can_{day} \text{ ve } R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{INT(i)}) & R'_{day} > can_{day} - R_{INT(i)} \end{cases} \quad (3.22)$$

Bu eşitliklerde;

- $R_{INT(i)}$  : İlgili günde başlangıçta bitki üzerinde tutulan su miktarı (mm H<sub>2</sub>O),
- $R_{INT(f)}$  : İlgili günün sonunda bitki üzerinde tutulan su miktarı (mm H<sub>2</sub>O),
- $R'_{day}$  : Bitki üzerinde tutulma olmadan önce ilgili gündeki yağış miktarı (mm H<sub>2</sub>O),
- $R_{day}$  : İlgili günde toprak yüzeyine ulaşan yağış miktarı (mm H<sub>2</sub>O),
- $can_{day}$  : İlgili günde bitki örtüsünün üzerinde tutulabilecek maksimum su miktarı'dır (mm H<sub>2</sub>O).

Thornthwaite (Thornthwaite 1948) iklim sınıflandırma şemasının bir parçası olarak potansiyel evapotranspirasyon (PET) ifadesini tanımlamıştır. PET, bitkinin sürekli büyüyerek tüm alanı kapladığı ve yeterli miktarda suyun sağlandığı koşullarda, buharlaşarak ve terleyerek uzaklaşacak su miktarı olarak ifade edilmektedir. Daha sonraki yıllarda Penman (Penman 1956) bitki kaynaklı suyun terleme ile uzaklaşan kısmını çimleri referans alarak tanımladı fakat sonrasında araştırmacılar (Jensen vd. 1990) en uygun bitki boyunun 30 ile 50 cm arasında olması gerektiğini öne sürmüşlerdir.

PET değerini tahmin edebilmek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan öne çıkanlar ve SWAT modeli tarafından kullanılan; Hargreaves ve Riley (1985), Priestley ve Taylor (1972) ve Monteith (1965) yöntemleri olurken, ayrıca model kullanıcılarına farklı bir PET yöntemi kullanarak hesaplanan PET değerlerinin modeli girilmesine de olanak sağlamaktadır. Bu metotlardan Penman – Monteith, güneş radyasyonu, hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgâr hızına, Priestley – Taylor, güneş radyasyonu, hava sıcaklığı ve bağıl neme, Hargreaves ise sadece hava sıcaklığı verisine ihtiyaç duymaktadır.

Penman Monteith eşitliği, sürdürülebilir buharlaşmanın ihtiyaç duyduğu enerjinin açıklanması için ortaya konan bir denklemdir. Buradaki mekanizma enerji bütçesi ve kütle korunumu prensiplerini kullanmaktadır. Bu eşitlik Denklem (3.23)'te gösterilmektedir.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot \frac{[e_z^0 - e_z]}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(\frac{1 + r_c}{r_a}\right)} \quad (3.23)$$

Bu eşitlikte;

- $\lambda E$  : Potansiyel ısı akı yoğunluğu (MJ/m<sup>2</sup>-gün),
- $\Delta$  : Doymuş buhar basıncı – sıcaklık eğrisinin eğimi (kPa/°C),
- $H_{net}$  : Net radyasyon (MJ/m<sup>2</sup>-gün),
- $G$  : Yerdeki ısı akı yoğunluğu (MJ/m<sup>2</sup>-gün),
- $\rho_{air}$  : Havanın yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)
- $c_p$  : Sabit basınçta özgül ısı (MJ/kg-°C),
- $e_z^0$  : Herhangi bir yükseklikte havanın doymuş buhar basıncı (kPa),
- $e_z$  : Herhangi bir yükseklikte havanın su buhar basıncı (kPa),
- $\gamma$  : Psikrometrik sabit (kPa/°C),

$r_c$  : Bitki örtüsü direnci (s/m),

$r_a$  : Hava katmanının difüzyon direnci'dir (aerodinamik direnç) (s/m).

Denklem (3.22) Jensen (Jensen vd. 1990) tarafından logaritmik bir rüzgâr profilinde, kararlı atmosfer koşulları altında, bitkilerin iyi sulandığı varsayılarak bir başka eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlik Denklem (3.24)'te gösterilmektedir.

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot \left(0.622 \cdot \lambda \cdot \frac{\rho_{air}}{P}\right) \cdot \frac{(e_z^0 - e_z)/r_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (3.24)$$

Bu eşitlikte;

$\lambda$  : Buharlaşmanın potansiyel ısısı (MJ/kg),

$E_t$  : Maksimum terleme hızı (mm/gün),

$K_1$  : Boyut katsayısı ( $K_1=8,64 \times 10^4$ ),

$P$  : Atmosferik basınç'tır (kPa).

Penman-Monteith yönteminde çok sayıda değişken olması nedeniyle Priestley ve Taylor (1972) tarafından yüzeyin ıslak olduğu durumda daha basit bir yöntem geliştirilmiştir. Penman – Monteith'den farklı olarak bu yöntemde aerodinamik bileşen çıkartılmış ve ortamın ıslak veya nemli olduğu koşullarda  $\alpha_{pet}=1,28$  katsayısı eklenmiştir. Priestley ve Taylor tarafından geliştirilen bu yöntem Denklem (3.25)'te gösterilmektedir.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \quad (3.25)$$

Bu eşitlikte;

$\lambda$  : Buharlaşmanın potansiyel ısısı (MJ/kg),

$E_0$  : Potansiyel evapotranspirasyon (mm/gün),

$\alpha_{pet}$  : Katsayı,

$\Delta$  : Doymuş buhar basıncı – sıcaklık eğrisinin eğimi (kPa/°C),

$\gamma$  : Psikrometrik sabit (kPa/°C),

$H_{net}$  : Net radyasyon (MJ/m<sup>2</sup>-gün),

$G$  : Yerdeki ısı akı yoğunluğu'dur (MJ/m<sup>2</sup>-gün).

Priestley ve Taylor denklemi de potansiyel evapotranspirasyon miktarının tahmini için kullanılmaktadır. Yarı kurak ve kurak bölgelerde enerji denkleminin adveksiyon bileşeni önemli olduğu için, bu yöntemle hesaplanan potansiyel evapotranspirasyon değerleri daha düşük tahmin edilecektir.

Diğer bir metot olan Hargreaves yöntemi, ilk olarak California – Davis Üniversitesi'nde 8 yıl boyunca serin hava koşullarında buharlaşma sonucu bitkinin su kaybını belirlemek için kullanılan lizimetre ölçüm verileri yardımıyla geliştirilmiştir (Hargreaves 1975). Daha sonra orijinal denklem üzerinde çalışmalar gerçekleştirilerek gelişme kaydedilmiştir. SWAT modeli şuanda yöntemin 1985'te oluşturulan formunu kullanmaktadır (Hargreaves ve Samani 1982 ve 1985). Yönteme ilişkin eşitlik Denklem (3.26)'da gösterilmektedir.

$$\lambda E_0 = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (3.26)$$

Bu eşitlikte;

- $\lambda$  : Buharlaşmanın potansiyel ısısı (MJ/kg),
- $E_0$  : Potansiyel evapotranspirasyon (mm/gün),
- $H_0$  : Uzay radyasyonu (MJ/m<sup>2</sup>-gün),
- $T_{mx}$  : İlgili gündeki minimum hava sıcaklığı (°C),
- $T_{mn}$  : İlgili gündeki maksimum hava sıcaklığı (°C),
- $\bar{T}_{av}$  : İlgili gündeki ortalama hava sıcaklığı'dır (°C).

Her zaman ilk olarak potansiyel evapotranspirasyon belirlenmeli ve sonrasında gerçek evapotranspirasyon hesaplanmalıdır. SWAT modeli öncelikle bitki örtüsü üzerine düşen yağışı buharlaştırır. Sonrasında maksimum terleme ve Richtie (1972) yaklaşımını kullanarak topraktan buharlaşma veya süblimleşme ile uzaklaşacak maksimum su miktarını hesaplamaktadır. Daha sonra, topraktan buharlaşan veya süblimleşen gerçek miktarı belirlemektedir. Son olarak HRU'da kar yağışı varsa, süblimleşmeyi başlatır, eğer herhangi bir kar yağışı yoksa da, topraktan buharlaşma sürecini başlatacaktır.

Bitki örtüsü üzerinde tutulan fazla su her zaman buharlaşma için uygundur. Bu durum özellikle orman arazilerinde gerçek evapotranspirasyon miktarını etkilemektedir. Bazı durumlarda yağmur ile bitki örtüsünde tutulan su miktarı, terleme ile uzaklaşan miktardan daha fazla olmaktadır.

Potansiyel evapotranspirasyonun hesaplandığı yöntemlerde terleme miktarı yaprak alan indeksi kavramını temel alarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. Eşitlikler Denklem (3.27) ve Denklem (3.28)'de gösterilmektedir.

$$E_t = \frac{E'_0 \cdot LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (3.27)$$

$$E_t = E'_0 \quad LAI > 3.0 \quad (3.28)$$

Bu eşitliklerde;

$E_t$  : İlgili gündeki maksimum terleme miktarı (mm H<sub>2</sub>O),

$E'_0$  : Bitki örtüsü üzerinde serbest olarak bulunan suyun buharlaşması için düzeltilmiş potansiyel evapotranspirasyon miktarı (mm H<sub>2</sub>O),

$LAI$  : Yaprak alan indeksi'dir.

Denklem (3.26) ve Denklem (3.27) ile hesaplanan terleme miktarları, ideal koşullar altında büyüyen bitkileri için geçerlidir. Toprak profilindeki su miktarının yetersiz olduğu durumlarda gerçek terleme miktarı da olması gereken değerden daha düşük olabilmektedir. Terlemenin yanında süblimleşme ve topraktan buharlaşmada evapotranspirasyon miktarını önemli oranda etkilemektedir. Süblimleşme ve topraktan buharlaşma miktarı gölgenin derecesine göre değişiklik gösterecektir. Bu miktar aşağıda gösterilen Denklem (3.29), Denklem (3.30) ve Denklem (3.31)'de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$E_s = E'_0 \cdot cov_{sol} \quad (3.29)$$

$$cov_{sol} = exp(-5.0 \times 10^{-5} \cdot CV) \quad (3.30)$$

$$E'_s = \min \left[ E_s, \frac{E_s \cdot E'_0}{E_s + E_t} \right] \quad (3.31)$$

Bu eşitliklerde;

$E_s$  : İlgili gündeki maksimum süblimleşme ve buharlaşma miktarı (mm H<sub>2</sub>O),

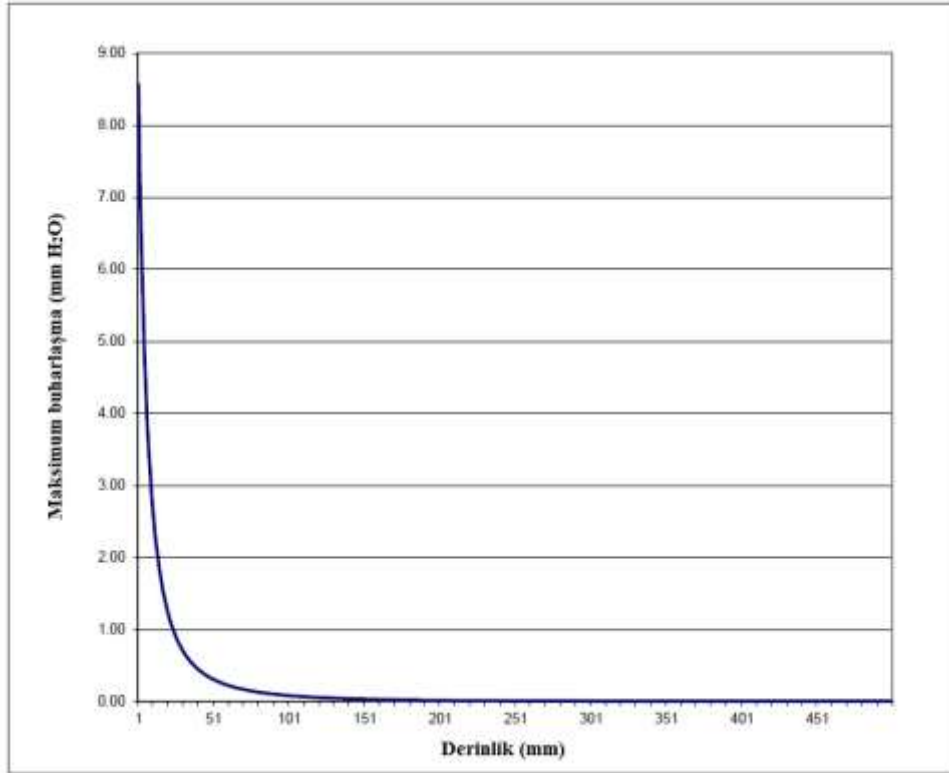
$E'_0$  : Bitki örtüsü üzerinde serbest olarak bulunan suyun buharlaşması için düzeltilmiş potansiyel evapotranspirasyon miktarı (mm H<sub>2</sub>O),

$cov_{sol}$  : Toprak örtü indeksi,

$CV$  : Yerin üstündeki biokütle ve kalıntı miktarı (kg/ha), eğer kar yağışı eşdeğer su olarak 0.5 mm'den daha fazla ise, toprak örtü indeksi değeri 0.5 olmaktadır.

$E'_s$  : İlgili gün içerisinde bitkinin kullandığı su için düzeltilmiş maksimum süblimleşme ve topraktan buharlaşma miktarı'dır (mm H<sub>2</sub>O).

SWAT modeli topraktan buharlaşacak su miktarını belirlerken, en fazla 100 mm'deki derinliğe kadar buharlaşmaya imkân tanımaktadır. Bu işlemi, toprak katmanını 1mm'lik parçalara ayırarak gerçekleştirmektedir. Derinliğe bağlı olarak gerçekleşecek maksimum buharlaşma miktarı arasındaki ilişki Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Toprakta derinlik boyunca buharlaşacak maksimum su miktarı

Toprakta buharlaşacak su miktarının % 50'lik kısmı toprak profili içerisinde üstte kalan 10 mm'lik bölümden sağlanmaktadır. SWAT modeli buharlaşacak ihtiyacı toprak profilinin diğer katmanlarından sağlanmasına izin vermez. Eğer toprakta yeterli miktarda su yoksa HRU için gerçek evapotranspirasyon miktarında da azalma olacaktır. Toprak katmanından buharlaşmaya bağlı talep edilen miktar, toprak tabakasının üst ve alt sınırları arasındaki farka göre belirlenir. Buharlaşacak bu miktarı hesaplanması için aşağıda gösterilen Denklem (3.32) kullanılmaktadır.



$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \cdot esco \quad (3.32)$$

Bu eşitlikte;

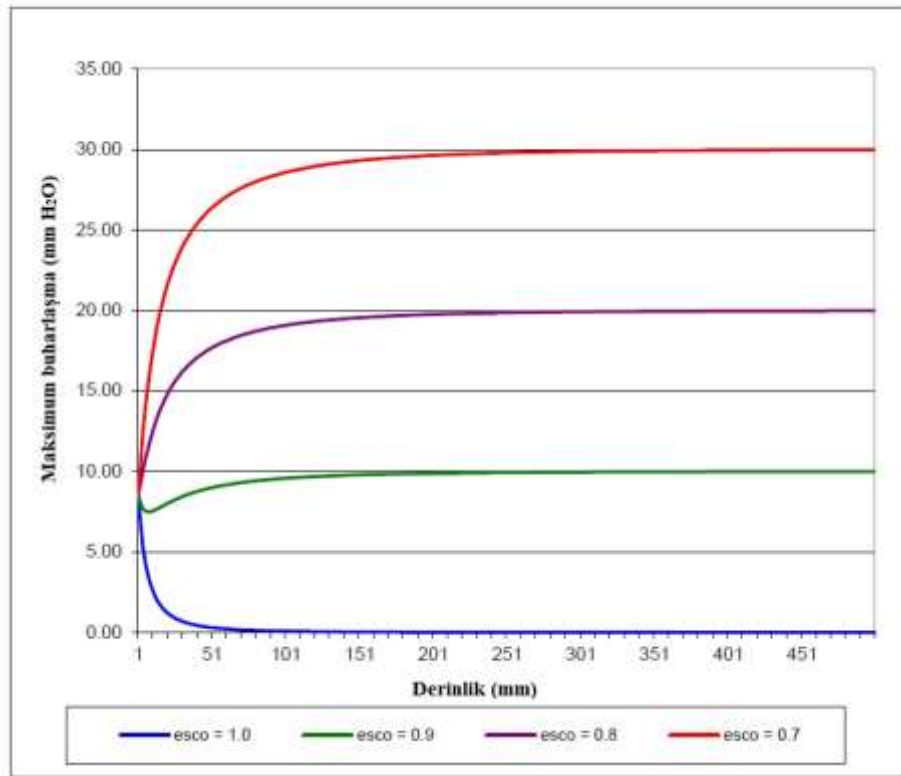
$E_{soil,ly}$  : Toprak katmanı için buharlaşma talebi (mm H<sub>2</sub>O),

$E_{soil,zl}$  : Toprak katmanının alt sınırından buharlaşma talebi (mm H<sub>2</sub>O),

$E_{soil,zu}$  : Toprak katmanının üst sınırından buharlaşma talebi (mm H<sub>2</sub>O),

$esco$  : Topraktan buharlaşmayı dengeleme katsayısı'dır.

Derinliğe ve farklı buharlaşma dengeleme katsayılarına göre topraktan buharlaşacak maksimum su miktarı arasındaki ilişki Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.7** Farklı esco değerlerindeki, derinlik ve maksimum buharlaşacak su miktarı arasındaki ilişki

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi sabit derinlikte esco değeri düştükçe topraktan buharlaşacak su miktarı da artış göstermektedir. Toprak tabakası içerisindeki su içeriği eğer tarla kapasitesinden düşük ise toprak tabakasından buharlaşacak su miktarını hesaplamak için kullanılan eşitlik Denklem (3.33) ve Denklem (3.34)'te gösterilmektedir.

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \cdot \exp\left(\frac{2.5 \cdot (SW_{ly} - FC_{ly})}{FC_{ly} - WP_{ly}}\right) \quad SW_{ly} < FC_{ly} \quad (3.33)$$

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \quad SW_{ly} \geq FC_{ly} \quad (3.34)$$

Bu eşitlikte;

$E'_{soil,ly}$  : Toprak katmanındaki ayarlanmış su içeriği için buharlaşma talebi (mm H<sub>2</sub>O),

$E_{soil,ly}$  : Toprak katmanı için buharlaşma talebi (mm H<sub>2</sub>O),

$SW_{ly}$  : Toprak katmanının su içeriği (mm H<sub>2</sub>O),

$FC_{ly}$  : Toprak katmanının tarla kapasitesindeki su içeriği (mm H<sub>2</sub>O)

$WP_{ly}$  : Toprak katmanının solma noktasındaki su içeriği'dir (mm H<sub>2</sub>O).

## BÖLÜM 4

### HİDROLOJİK ANALİZ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 4.1 FİLYOS HAVZASINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürde, Filyos Çayı havzasındaki su kaynakları yönetimi üzerine yapılan çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Söz konusu bu çalışmalarda, daha çok mevcut durum irdelenmiş ve az sayıda akım tahminleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öztürk vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'deki 25 nehir havzasının su potansiyeli ortaya konmaya çalışılmış, kalibrasyon için Devlet Su İşleri'nin (DSİ) tüm Türkiye için olan verileri kullanılmış, ancak havzalar bazında detaylı bir kalibrasyon çalışması gerçekleştirilmemiştir. Bu kapsamda, Filyos Çayı havzasının bir bütün halinde ele alındığı detaylı bir hidrolojik model çalışması bulunmamaktadır.

Batı Karadeniz havzası özelinde mevcut durumun ortaya konması için yapılan en detaylı çalışmalardan birisi Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından TÜBİTAK-MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü'ne yaptırılan Batı Karadeniz Havza Koruma Eylem Planı Hazırlama Projesi'dir. Söz konusu proje kapsamında, havzadaki mevcut yüzey, yeraltı ve kıyı sularının miktarlarının, özelliklerinin ve kirlilik durumlarının, havzadaki kentsel, endüstriyel, tarımsal, ekonomik vb. faaliyetlere bağlı olarak oluşan baskı ve etkilerinin tespit edilmesi; havzada mevcut su kaynaklarının miktarı ve kullanım potansiyeli ile havza bazında tespit edilen kirlilik kaynaklarının ve yüklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi; su kalitesi haritalarının oluşturulması; çevresel altyapı durumunun tespit edilmesi; havzanın korunması, kirliliğin azaltılması ve iyileştirilmesi için havzadaki tüm paydaşların katılımı ile kısa, orta ve uzun vadede alınacak tedbirlere yönelik plan, programın yapıldığı detaylı bir çalışma gerçekleştirilmiştir (TÜBİTAK-MAM 2013).

Shiri ve Kişi (2010) tarafından yapılan çalışmada, dalgacık, sinir ağları modeli ve bulanık mantık modelinin birleştirilmesi ile elde edilen hibrit bir model yardımıyla Filyos ayı'ndaki günlük, aylık ve yıllık debiler tahmin edilmiştir. Yüksek güvenilirlikte sonuçların bulunduğu çalışmada, bu hibrit modelin hava sıcaklığı, su seviyesi ve evapotranspirasyon gibi hidrolojik bileşenlerin tahmininde de kullanılabileceğine vurgu yapılmaktadır.

Kişi (2010) yapmış olduğu başka bir çalışmada, Filyos ayı'nda iki farklı akım gözlem istasyonunda dalgacık regresyon modeli kullanarak, kısa dönem akım tahmini üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca, yapay sinir ağları ile 2-3 günlük tahmin sonuçları karşılaştırılmış olup, dalgacık regresyon modelinin, yapay sinir ağlarına göre daha güvenilir sonuçları verdiğini tespit etmiştir.

Akyüz vd. (2014) tarafından Filyos ayı'nda yapılan çalışmada, nümerik bir model kullanılarak, akarsu akış hızları hesaplanmış ve bunun yardımıyla taşkın risk alanları belirlenmiştir. Bu alanların belirlenmesi için, akış hızlarının ve eğimin bulunması amacıyla kullanılan nümerik modelin yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Kkcali (2014) tarafından, Filyos ayı üzerinde kurulan Tefen Kk lekli Hidroelektrik Santrali'nin çevresel risklerinin değerlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çevresel akış, su kalitesi, balıkların geçişleri, nehir havzaları ve nesli tükenme tehdidi altında olan türlerin korunmaları gibi çevresel risklerin üzerinde durulduğu çalışma sonucunda Avrupa İmar ve Kalkınma standartlarına göre tesisin tüm kriterleri sağlayamadığı sonucuna varılmıştır.

şeker vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada, UA verileri yardımıyla Filyos ayı'ndaki mendereslenme morfolojisi üzerine bir araştırma yapılmıştır. Çalışma ile nehrin ve drenaj alanının hidrolik, hidrolojik ve topoğrafik genel karakteristik özelliklerini belirleyebilmek için UA verileri ve tekniklerinin kullanılabileceği gösterilmiştir.

zler vd. (2009) tarafından Batı Karadeniz Havzası'nda 18 meteoroloji istasyonunda temel bileşen analizi yardımıyla havzadaki farklı iklim özellikleri gösteren bölgeler tespit edilmeye çalışılmış ve bunun sonucunda 6 farklı iklim bölgesi tespit edilmiştir.

Akner ve Akkoyunlu (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yapay sinir ağı tekniği kullanılarak Batı Karadeniz Havzası'nda yer alan Melen Havzası'ndaki akımın modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Özellikle Düzce civarındaki meteorolojik verilerin eksikliği ve yetersizliği nedeniyle SWAT modeli yardımıyla eksik veriler tamamlanmıştır.

Rouholahnejad vd. (2014 ve 2017), Tuna, Dnieper, Don, Kuban, Kızılırmak ve Sakarya havzalarının da yer aldığı 2,3 milyon km<sup>2</sup> alana sahip Karadeniz havzasında SWAT modeli kullanarak akım, nitrat ve ürün verimi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca iklim değişikliği ve arazi kullanımındaki değişimin su kaynakları üzerine olan etkileri de incelenmiştir. Model 1973 ile 2006 yılları arasında kalibre ve valide edilmiştir. Sonrasında Danimarka Bölgesel İklim Modeli (HIRHAM) ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) emisyon senaryoları üzerine hazırlanan raporlarındaki (SRES) A2 ve B2 iklim senaryoları ve arazi kullanımındaki değişikliklerin modele entegre etmişlerdir. 2017 – 2050 yılları arasında çalıştırılan model sonuçlarına göre, tatlı su kaynaklarında % 30 ile % 50 oranında azalmalar olduğunu tespit etmişlerdir. Senaryolara göre havzanın bütününde yıllık ortalama yağış miktarında % 5 ile % 15 oranında azalma, özellikle Tuna Havzasının doğusunda bu oranın % 25 seviyelerine ulaşacağına değinilmiştir.

Sarлак (2014), yaptığı çalışmada 1963-1997 yılları arasında ağaç halkası ve akım verileri arasındaki ilişkiyi parametrik olmayan yöntemler ile araştırmıştır. Standart istatistiksel teknikler kullanılarak doğrulama yapıldıktan sonra, paleo-hidrolojik döneme ait ağaç-halka verileri yardımıyla (1657-1963) akış verilerinin yeniden yapılandırılması sağlanmıştır.

Cengiz ve Cengiz (2017), Filyos Nehri Deltasının sürdürülebilir peyzaj yönetimi stratejileri geliştirilmesini amaçlamıştır. Bu bölgenin doğal ve kültürel peyzaj özellikleri ile ilgili önceki çalışmalardan ve saha çalışmalarından faydalanılmıştır. Çalışma alanının peyzaj özellikleri dengeli arazi kullanımı ve gelişimi açısından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak doğal, kültürel ve tarihi geçmişe sahip Filyos Nehri Deltasının taşkın riski, düzensiz sanayileşme, aşırı tarımsal faaliyetler, biyoçeşitlilik kaybı, nehir yatağı üzerindeki kum ve çakıl madenciliği gibi ciddi çevresel sorunların olduğu ortaya konmuştur. Daha da önemlisi, sürekli artan çevresel etkilerin kalıcı olması ile bölge halkının sağlık, güvenlik ve refahına zarar verme olasılığının yüksek olduğuna vurgu yapılmıştır.

## 4.2 SWAT MODELİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Havza yönetimine yönelik çeşitli araştırmalarda uzun yıllardır SWAT modeli yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Santhi vd. 2001; Santhi vd. 2006; Arabi vd. 2007; Lee vd. 2008; Karcher vd. 2013, Chen vd. 2014, Zhang vd. 2015).

Santhi vd. (2001), Teksas'ta Kuzey Bosque Nehri Havzasında noktasal ve noktasal olmayan kirletici kaynaklarının çok fazla sayıda olması nedeniyle en iyi yönetim uygulamalarını belirlemek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma ile SWAT modeli kullanılarak büyük havzalardaki noktasal ve noktasal olmayan kaynaklardan gelen kirlilik kontrolü için alternatif yönetim senaryolarının etkilerini incelemenin yararlı olabileceğini göstermiştir.

Santhi vd. (2001), noktasal olmayan kirletici kaynağının olduğu bir havzada su kalitesi yönetim planlarını oluşturulması için bir çalışma gerçekleştirmiştir. SWAT modeli ile en iyi yönetim uygulamalarının yük miktarının azalmasında etkili olduğu farklı senaryolar yardımıyla ortaya konmuştur. Bu çalışma, büyük su havzalarında su kalitesi yönetim programlarının etkilerini tahmin edebilmek için bir modelleme yaklaşımının kullanılabileceğini göstermiştir.

SWAT modeli ile Afrika'da, Amerika'da, Avrupa ve Uzakdoğu'da çok büyük ölçekli havzalarda model performansını test etmek için çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalardan birinde Rossi ve vd. (2009), 630000 km<sup>2</sup> alana sahip ve Laos, Vietnam, Tayland, Kamboçya ve Çin'i güneyini kapsayan Aşağı Mekong Nehri havzasında hidrolojik bir model çalışması gerçekleştirmişlerdir. Model 1985 ile 1992 yılları arasında kalibre edilmiş, 1993 ile 2000 yılları arasında da validasyon süreçleri uygulanmıştır. Model sonuçlarına göre günlük ve aylık bazda Nash-Sutcliffe değeri 0,8 ile 1 arasında, yani oldukça iyi bir model performansı ortaya konmuştur. Havza alanının çok büyük olması nedeniyle güçlü bir bilgisayar donanımı ve zaman gereksinimi olduğuna çalışmada dikkat çekilmiştir.

Zhang vd. (2016), yaptıkları çalışmada, hidrolojik, biyojeokimya, su kalitesi ve ekoloji gibi birçok süreci bir arada değerlendirebilecek klasik bir hidrolojik model oluşturmuşlardır. Model performansını istatistiksel indekslerle de çoğu bileşen için makul sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Yüzeysel akış sonuçlarında korelasyon ve Nash-Sutcliffe değerlerinin sırasıyla 0,85 ve 0,70 olduğu, günlük amonyum konsantrasyonlarında ise korelasyon katsayısının 0,67

olarak bulunduğu tespit edilmiştir. Bu entegre su sistemi modelinin, simülasyon performansı için işlevselliğinin yaygınlaştırılması, iyileştirmesi ve entegre nehir havzası yönetiminde uygulanması için bilimsel bir temel oluşturduğu belirtilmiştir.

Chen vd. (2014), SWAT modelini kullanarak sediment ve besin maddelerinin (amonyum azotu, nitrat azotu) taşınması ile ilgili olarak alınacak havza yönetim tedbirlerinin etkilerinin araştırılmasını amaçlamışlardır. Çalışmada özellikle noktasal olmayan kirletici kaynaklarının etkisi üzerinde durulmuştur. Çin'in Xiangjiang ve Zhengshui nehirleri için Ulusal On İkinci Beş Yıllık Plan çerçevesinde su kalitesi standartlarına ulaşmak için beş farklı plan varsayımı yapılmıştır. Bu planlarda ekonomik ve sosyal unsurlarda dikkate alınmıştır. Senaryo yardımıyla kurulan beş plan içinde havza çıkışındaki kirletici yüklerinde % 10'dan fazla azalma olduğu tespit edilmiştir.

Programın genel yapısı havzadaki tarımsal aktivitelerin modellenmesine yönelik olduğu için çalışmaların büyük bir bölümü bu konu üzerinde yoğunlaşmaktadır (Van Liew vd. 2003, Tuppad vd. 2010, Srinivasan vd. 2010, Xie vd. 2015).

Tuppad vd. (2010), Texas'taki Bosque Nehir Havzasında, yoğun gübre kullanımı, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklı deşarjlar dolayısıyla yüksek miktarda sediment, besin maddesi ve bakteri içeren sulara, havzanın korunması için iyi yönetim uygulamalarından birkaç tanesi ile bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadaki genel hedef SWAT model yaklaşımı ile kirleticilerin uzun vadedeki etkilerini ortaya koymak olmuştur. Sonuç olarak, iyi yönetim uygulamaları sayesinde sedimentte havza çıkışında % 3 ile % 37 oranında, toplam azot yükünde % 1 ile % 24 oranında azalma, toplam fosfor yükünde % 3 artış ile % 30 azalma oranında başarı sağlamışlardır. Buna göre SWAT'ın modelleme yaklaşımının özellikle tarımsal alanda iyi yönetim uygulamalarının hem simüle edilebileceğini hem de bu sonuçlara göre alınacak tedbirler vasıtasıyla kirletici yüklerin önemli oranlarda azaltılabileceğini göstermiştir.

Srinivasan vd. (2010), Yukarı Mississippi Nehri Havzasında SWAT modeli kullanarak hidrolojik bütçe ve ürün verimini incelemek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadaki kritik nokta model için herhangi bir kalibrasyon ve validasyon süreçlerinin gerçekleştirilmemiş olmasıdır. Daha önce havza için gerçekleştirilmiş üç farklı çalışma sonuçları ile yapılan çalışma karşılaştırıldığında benzer sonuçların elde edildiğine, modelin

kalibre edilmemiş olmasına rağmen hem hidrolojik bileşenler için hem de ürün verimi açısından kabul edilebilir sonuçlar verdiği üzerine vurgu yapılmıştır.

Van Liew vd. (2003), çalışmada tarımsal faaliyetlerin yoğun olarak yürütüldüğü ufak bir havza seçerek, bu alanda SWAT ve HSPF modellerinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. HSPF kalibrasyon döneminde daha iyi sonuçlar verirken, SWAT'ın validasyon kısmında daha başarılı sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, SWAT modelinin yüzeysel su kaynakları çalışmaları için özellikle uzun dönem iklim değişikliği etkilerinin araştırılmasında HSPF'e göre daha iyi sonuçlar verebileceği üzerinde durulmuştur.

Çeşitli geliştirme çalışmaları ile programda yapılan yenilikler sayesinde su bütçesine yönelik çalışmalar da artık daha yaygın bir şekilde sürdürülmektedir (Mekonnen vd. 2009, Qiu vd. 2011, Güngör ve Göncü 2013, Wu ve Chen 2013, Ahmed vd. 2014, Kim vd. 2014, Tao vd. 2015, Zhang vd. 2008, Pott ve Fohrer 2017).

Qui vd. (2011),1999 yılında Çin Hükümeti tarafından toprak erozyonu ve bitki örtüsünün bozulmasının önüne geçmek için yürürlüğe giren “Çevre ve Orman Dönüştürme Programı” kapsamında 10 yıl içerisinde alınan önlemler sonrasında Jinghe Nehir havzasının su bütçesinin nasıl etkilendiğini görmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda yağış oranlarında % 12'lik bir azalma, nem miktarında % 25,2'lik azalma olmasına karşın, program ile alınan tedbirler sayesinde yüzeysel akışta % 15 ile % 20 aralığında artış gözlemlendiğine dikkat çekilmiştir.

Güngör ve Göncü (2013)'te Aşağı Porsuk Çayı havzasında en iyi su yönetimi stratejilerini belirlemek için SWAT modeli ile bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında havza için 1978 – 2009 yılları arasında detaylı bir hidrolojik model oluşturulmuştur. Kalibrasyon ve validasyon süreçlerinde kabul edilir sonuçlar elde edilmiş olup, yoğun tarımsal faaliyetlerin gerçekleştirildiği havzada birde sulama senaryosu uygulanmıştır. Bu senaryoda mevcut sulama sistemlerinin klasik oluk sulama sisteminden, damlama sulama sistemine geçildiği varsayılarak yıl boyunca akarsu akışındaki değişim tespit edilmiştir. Bu senaryoya göre havza çıkışındaki yüzeysel su miktarında tüm yıl boyunca ortalama % 87 oranında bir artış olacağı ortaya konmuştur.



Wu ve Chen (2013), Muson ikliminin baskın olduğu Çin'in güneyinde, kıyı bölgeye yakın mesafede bulunan Doğu Nehri havzasını etkileyen doğal ve insan kaynaklı süreçleri ortaya koymak için SWAT modelini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 1973 – 1980 ve 1981 – 1988 yılları arasındaki iki farklı 8 yıllık dönem sırasıyla kalibrasyon ve validasyon için kullanılmıştır. Sonuçlara göre kalibrasyon döneminde 0,93, validasyon döneminde ise 0,90 gibi çok yüksek Nash-Sutcliffe değerleri ile güvenilir bir model hidrolojik model altyapısı kurmuşlardır. Çalışmada ayrıca karar vericilerin havzadaki su kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesi için model çıktılarını kullanılabileceğine vurgu yapılmıştır.

Tao vd. (2015), Doğu Çin'deki Poyang Gölü havzasında SWAT modeli kullanarak farklı arazi kullanımı senaryolarının hidrolojik süreçler üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Kalibrasyon sürecinde 12 parametre kullanılmış olup, model 1982 – 1988 yılları arasında kalibre, 1991-1998 yılları arasında valide edilmiştir. Sırasıyla kalibrasyon döneminde 0,88, validasyon döneminde 0,94 Nash-Sutcliffe değerleri elde edilerek modelin çok iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Daha sonra, arazi kullanımındaki değişikliklerin havzanın hidrolojisine etkileri üzerine odaklanarak, modelle birkaç farklı arazi kullanım senaryosu simüle edilmiştir. Bu senaryolara göre orman arazisi, tarımsal alanlar ve kentsel alanların oranlarında azalma olduğunda, yer altı suyu miktarında ve evapotranspirasyonda artış olduğu, yüzeysel akışta azalma olduğu tespit edilmiştir.

Pott ve Fohrer (2017), Almanya'nın Kuzeyinden 462 km<sup>2</sup> alana sahip ufak ölçekli, kırsal alanda bulunan bir Stor Havzasında hidrolojik model çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın hem kalibrasyon hem de validasyon aşamalarında model performansı oldukça iyi olmakla birlikte, su bütçesinin, % 52,8'inin yeraltısu akışı, % 7,7'sinin yüzeysel akış, % 34,3'ünün drenaj akışı ve % 5,2'sinde yüzeysel akış olduğu ortaya konmuştur

Programın özellikle sediment ve temel besin maddelerinden kaynaklanan azot ve fosfor bileşiklerinin modellenmesine yönelik çeşitli çalışmalar da literatürde bulunmaktadır (Kirsch vd. 2002, Di Luzio vd. 2005, Srinivasan vd. 2005, Moriasi vd. 2011, Gebremicael vd. 2013, White vd. 2015).

Gebremicael vd. (2013) Mavi Nil Nehri Havzasında yaptıkları çalışmada, istatistiki modeller kullanarak yüzeysel akış ve sedimenti simüle etmeyi, istatistiki modellerden buldukları sonuçları SWAT modeli çıktılarıyla karşılaştırma yapmayı ve arazi kullanımındaki

değişikliklerin havzayı nasıl etkileyeceğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Öncelikle akım verilerine Mann-Kendall ve Pettitt testleri uygulanarak yüzeysel akışın anlamlı bir şekilde artış gösterdiğini tespit ederlerken yağışta anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. 1970 – 2000 yılları arasında SWAT modeli ile yüzeysel akış ve sedimenti değişimleri incelenerek istatistiksel model ile benzerlikler olduğu anlaşılmıştır. Son olarak da, 1970 ve 2000 yılları arazi kullanım haritaları incelenerek bitki örtüsünün geniş alanlara yayılı tarım arazilerine dönüşerek sediment yükünde artışa neden olduğunu belirlemişlerdir.

Moriasi vd. (2011), Oklahoma'nın Güney batısında yer alan Cobb Çayı Havzasında kısıtlı sayıda veri ile sediment taşınımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Öncelikli olarak akarsu için jeomorfolojik bir değerlendirme, veri sayısı kısıtlı olduğu için kalibrasyon ve validasyon öncesinde SWAT ile parametrisasyon, akustik profil çıkarma sistemi (APS) ile rezervuardaki yıllık ortalama sediment miktarı belirlenmiştir. Sonuç olarak ölçüm sonucunda yıllık ortalama sediment miktarının 1,7 ile 3,5 ton/ha-yıl arasında değiştiğini, SWAT model sonucunun ise 2,4 ton/ha-yıl olarak tespit edilmiştir. Rezervuar çevresindeki bitki örtüsündeki değişimin sediment miktarı üzerine olan etkisini belirlemek için gerçekleştirilen senaryoda, askıda sediment konsantrasyonlarının % 68 ile % 73 oranında azaldığına ve bu uygulamaların rezervuarın ömrünü uzatma potansiyeline sahip olduğu konusuna dikkat çekilmiştir.

Kirsch vd. (2002), yoğun noktasal olmayan kaynak kirliliğine sahip Rock Nehri Havzasında sediment ve fosfor taşınımına üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma ile Rock Nehri ve tüm yan kollarına mevcut arazi kullanımı ve yönetimi koşullarında yıllık ortalama 764000 kg fosfor yükü girdiği tespit edilmiştir. Bu girdinin %41'ine noktasal kirletici kaynaklarının, % 59'una da noktasal olmayan kirletici kaynaklarının neden olduğu belirlenmiştir. Yine aynı koşullar altında tüm kollar üzerinde taşınan sediment yükünün 160000 ton olduğunu, bu miktarın toprak işleme de yapılacak iyileştirme çalışmaları sayesinde % 20 oranında azalacağı model sonuçları ile ortaya konmuştur.

Di Luzio vd. (2005), Mississippi'deki Goodwin Çayı havzasında farklı coğrafi bilgi sistemi verilerinin akış ve sediment miktarına etkilerini belirlemek için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Etkiyi daha net tespit edebilmek için 21,3 km<sup>2</sup> gibi düşük bir alana sahip havza çalışılmıştır. Çalışmada bunun için iki farklı sayısal yükseklik modeli, üç farklı arazi kullanımı haritası ve iki farklı toprak haritası olmak üzere bunlardan oluşturulacak 12 farklı veri gurubu seti kullanılmıştır. Sayısal yükseklik modeli verilerindeki farklılığın alt havza sınırlarında bir

miktar farklılığına neden olduğu, toprak haritalarının da sınırlı bir etki yarattığını ancak arazi kullanımı haritalarının sediment verimi üzerinde önemli etki oluşturduğu uygulamalarda belirlenmiştir. Aynı zamanda bu etkinin detaylandırılması için bu konuda yeni araştırmaların yapılması gerekliliği üzerinde de durulmuştur.

Son yıllarda iklim değişikliği ve arazi kullanımına yönelik değişimlerin incelendiği çalışmalarda da kullanılmaya başlamıştır (Lee ve Chung 2007, Abbaspour vd. 2009, Li vd. 2013, Fischer vd. 2014, Glavan vd. 2013, Krysanova ve Srinivasan 2015, Boluwade ve Madramootoo 2015, Jha vd. 2015).

Lee ve Chung (2007), SWAT modelini kullanarak yaz dönemlerinde iklimin akarsu akışı, yer altısuyunun çekilmesi ve arazi kullanımına etkileri araştırmışlardır. Model, 30 yıllık bir dönemde çalıştırılmıştır. Kurak dönemdeki yağış miktarı, bir önceki yağışa kadar geçen süre, maksimumu sıcaklık, güneş radyasyonu gibi iklimsel faktörler üzerinde durulmuştur. Çalışmada kurak dönemde 3 °C'lık bir artışın, toplam yüzeysel akışı % 27,9 oranında azalttığı, bunun yanı sıra kurak dönemde yeraltısuyunun çekilmesi ve arazi kullanım değişikliklerinin (kentleşme) hidrolojiyi olumsuz etkilediği ortaya konmuştur. Son olarak muson iklimine sahip çalışma alanında toplam yüzeysel akışın, iklim, yeralsularının geri çekilmesi ve kentsal alan oranı arasındaki ilişkiden çok değişkenli bir denklem de üretilmiştir.

Abbaspour vd. (2009), tarafından İran'da iklimin su kaynakları üzerine olan etkilerinin tespit edilmesi için bir çalışma yapılmıştır. SWAT modeli 1980 ile 2002 yılları arasında çalıştırılmış olup, yüzeysel akış ve buğday üretim verileri yardımıyla model kalibre edilmiştir. 2010 - 2040 ve 2070 - 2100 yılları arasında A1B, B1 ve A2 iklim senaryoları için Kanada Küresel Eşleşme Modeli (CGCM 3.1) tarafından üretilen meteorolojik veri setleri İran'daki 37 iklim istasyonuna uyarlanmıştır. Daha sonra hidrolojik model ile iklimin, yağış, mavi su, yeşil su ve buğday verimi üzerine olan etkilerini araştırmak için belirlenen dönemlerde model çalıştırılmıştır. Yapılan yağış yoğunlukları analizinde, yağış alan bölgelerde, yağış şiddetlerinde ve sellerde artış, kurak bölgelerde ise uzun kurak dönemlerin olduğu görülmüştür. Üç farklı senaryoda da alt havzadaki sonuçlar yağışlı dönem için benzer olmasına karşın, kurak dönemlerde farklı sonuçlar ortaya koymuştur.

Li vd. (2013), kurak ve yarı kurak havzalarda SWAT modelinin yüzeysel akış ve sediment açışından model performansının kabul edilebilir olduğunu ortaya koymak için bir çalışma

gerçekleştirmiştir. Çalışma alanı olarak Çin'in Kuzeybatısındaki Loess Platosu'nda yer alan Jihe Havzası seçilmiştir. Kurulan model 1962 – 1981 yılları arasında kalibre edilmiş 1982 – 2008 validasyon yapılmıştır. Sonuçlar, hem yüzeysel akış, hem de sediment için Nash - Sutcliffe değerinin yaklaşık 0,7 olduğunu, mutlak hatanın % 15'ten düşük olduğunu, korelasyon katsayısının da 0,7'den büyük olduğunu göstermektedir. Validasyon döneminde kalibrasyona göre modelin daha iyi performans ortaya koyduğu, sayısal yükseklik modeli verisinin çözünürlüğünün hidrolojik açıdan sonuçlar üzerinde anlamlı bir değişiklik yapmamasına rağmen, sediment verimi değerlerinde dikkate değer etkiler olduğu tespit edilmiştir.

Fischer vd. (2014), yaptıkları çalışmada iklimin, Batı Ukrayna'daki Dobrotvir Havzasının hidrolojisi üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. IPCC tarafından hazırlanan A2 ve B1 senaryoları çerçevesinde üretilen bölgesel iklim modeli (COSMO) sonuçları kullanılmıştır. Su yönetimi sektöründe çalışanlar ve karar vericiler için olası riskler ve fırsatların belirlenmesinde iklimsel ve hidrolojik indeksler oluşturulmuştur. Daha genel bir yaklaşımla, tarım, ormancılık, ekoloji, enerji ticareti ve insan sağlığı konularında iklim değişikliği sonuçları literatürdeki diğer çalışmalar ile de karşılaştırılmıştır. 2071 ile 2100 yılları arasında çalıştırılan modelden elde edilen sonuçlara göre, yükselen sıcaklıkların su verimini düşüreceğine, ormancılığı olumsuz yönde etkileyeceğine, tarım verimliliğinin artırabilme fırsatı olmasına karşın zararlı böceklerin aşırı üremeleri ile tarım alanlarının olumsuz etkileneceğini ortaya koyan detaylı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Glavan vd. (2013), Slovenya'da bulunan küçük ölçekli Reka ve Dragonja Havzalarına ait 1787, 1827, 1940, 1984 ve 2009 yılları arazi kullanım haritalarını kullanarak mavi su ve yeşil su miktarlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma ile hedeflenen, gerçekleşen tarihsel değişikliğin, gelecekteki arazi kullanımı ve su yönetimi için bir referans olacağını düşünmektir. Model sonuçlarına göre Dragonja Havzasında yaz dönemlerinde yeşil su miktarlarında azalma, mavi su miktarında ise artış gözlenmiştir. Reka Havzasında ise ormanların azalması, otlakların artmasına bağlı olarak bahar ve yaz dönemlerinde mavi ve yeşil su miktarlarında benzer eğilimlerin olduğu tespit edilmiştir.

Zuo vd. (2016), yaptıkları çalışmada Çin'in Loess Platosunda yer alan Huangfuchuan Nehri Havzasında arazi kullanımı ve iklim değişikliğinin su ve sediment verimi üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Model 1954 ile 2012 yılları arasında çalıştırılmış olup, 1980 ve

2005 yıllarına ait iki farklı arazi kullanımı haritası yardımıyla değişikliğin etkisi belirlenmiştir. Model sonuçlarında hem yıllık sediment miktarı, hem de yıllık yüzeysel akış miktarlarında azalma eğilimi gözlenirken, yıllık yağışta çok düşük oranda azalma fakat yıllık ortalama sıcaklıkta anlamlı bir artış görülmüştür.

Jha vd. (2015), tarafından Yukarı Mississippi Havzasında (492000 km<sup>2</sup>) iklim değişikliği etkilerinin su verimi ve azot yükü üzerine olan etkilerini belirlemek için çalışma yapılmıştır. Çalışmada SWAT modeli kullanılmış ve genel çevrim modellerinden (GCMs) yararlanılmıştır. Model sonuçlarına göre, özellikle kış döneminde yüksek debiler, yaz döneminde ise (temmuz ayı) debilerde % 41 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca havzanın tamamında akarsu debisinde yıllık % 5'lik bir oranda azalma, azot yükünde ise 1kg/ha'lık ufak bir artış olduğu gözlenmiştir.

#### **4.3 MODELLERİN KARŞILAŞTIRMASI İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Havzaların su bütçelerinin ortaya konması için sıklıkla kullanılan hidrolojik modellerden en önemlileri SWAT ve HSPF modelleridir. Bu modellerin aynı havza için model performanslarının karşılaştırıldığı çalışma sayıları kısıtlıdır. Bu çalışmalarda modellerin üstün yanları ve dezavantajları ortaya konmuştur (Saleh ve Du 2004, Singh vd. 2005, Im vd. 2003, Xie ve Lian 2013, Gebremariam ve Martin 2014).

Im vd. (2003) Virginia'daki 12048 ha büyüklüğündeki Polecat Havzasında SWAT ve HSPF modellerini kullanarak yüzeysel akış, sediment ve azot yüklerini simüle etmişlerdir. 1996 ile 2000 yılları arasında yüzeysel akış ve su kalitesi verileri yardımıyla havza her iki model ile kalibre edilmiş, 1994 ile 1995 yılları verileri ile de validasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Model sonuçlarına göre her iki modelinde yüzeysel akış, sediment ve azot yüklerini iyi performans ile simüle ettiği vurgulanmıştır. HSPF'in SWAT modeline göre biraz daha iyi performans gösterdiği ancak çok fazla sayıda parametrenin tanımlanması gerektiği, bununda parametrelerin kontrolü için güçlük yarattığı, dolayısıyla SWAT'ın HSPF modeline göre kullanıcı için daha avantajlı olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Saleh ve Du (2004), çalışmalarında önemli iki model SWAT ve HSPF'in 5 farklı akarsuda yüzeysel akış, sediment ve azot yükü performanslarını karşılaştırmışlardır. 1994 – 1995 yılları arasında kalibrasyon, 1995 – 1999 yılları arasında validasyon işlemi gerçekleştirilmiş olup,

her iki süreçte de günlük olarak yüzeysel akış, sediment ve azot miktarlarının tamamında SWAT modelinin HSPF göre, gözlem verilerine daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Özellikle azot yükü açısından SWAT modelinin HSPF modeline göre çok başarılı olduğu konusuna vurgu yapılmıştır.

Singh vd. (2005), Orta Batı Illinois'te bulunan 2150 mi<sup>2</sup> alana sahip Iroquois Havzasında SWAT ve HSPF modellerinin su bütçesi çıktıları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için Nash – Sutcliffe değeri, korelasyon katsayısı ve gözlem ve model sonuçları arasındaki toplam hata yüzdesi kullanılmıştır. Hem aylık model sonuçları, hem de yıllık model sonuçları kullanılarak hesaplanan bu istatistiksel indekslerin tamamında SWAT ve HSPF modellerinin benzer performans gösterdiği tespit edilmiştir.

ABD Illinois Nehri Havzasının yönetimindeki karar vericiler modelleme araçları olarak SWAT ve HSPF modellerini seçmişlerdir. Bu kapsamda Xie ve Lian (2013), yaptıkları çalışmada havzanın hidrolojik modelini oluşturarak bir rapor hazırlamışlardır. Bu çalışmada iki modelin kalibrasyonu sürecinde, çok kriterli yaklaşımlar ve genelleştirilmiş olasılık belirsizlik tahmini (GLUE) yöntemi kullanılmıştır. Her iki model ile de benzer ve tatmin edici sonuçlar alınmıştır. HSPF modelinin kalibrasyona ihtiyacının SWAT modeline göre daha fazla olduğu, bu nedenle özellikle veri setinin kısıtlı olduğu çalışma alanlarında SWAT modelinin tercih edilmesinin bir avantaj olabileceği belirtilmiştir.

Gebremariam ve Martin (2014), Maumee Havzasında kritik akış miktarlarını simüle edebilmek için SWAT, HSPF ve Dağıtılmış Büyük Havza Akış Modeli (DLBRM) kullanmışlardır. Üç farklı modelde de kabul edilebilir sonuçlar elde edilmesine rağmen, modellerin olağandışı hava olaylarında (şiddetli sağanak yağış) yüzeysel akışı simüle etmede yeteneğinin kısıtlı olduğu tespit edilmiştir. Hidrolojik açıdan modeller kıyaslandığında, en iyi sonuçları HSPF modeli verirken, SWAT'ın tarımsal yönetim uygulamalarını değerlendirmek için en fazla seçenek sunduğuna dikkat çekilmiştir.

Dennedy-Frank vd. (2016), Amerika Birleşik Devletleri'nde Indiana'daki Wildcat Çayı Havzası ve Georgia'daki Yukarı Upatoi Çayı Havzasında SWAT ve InVEST modellerinin hidrolojik çıktıları karşılaştırmışlardır. Wildcat Havzasında benzer sonuçlar varken, Yukarı Upatoi Çayı Havzasında farklı yüzeysel akış tahminleri ortaya çıkmıştır. InVEST modelinin

taban akışı etkisinin anlamlı olduğu havzalarda, yüzeysel akış tahminlerinde SWAT modeline göre daha zayıf kaldığı tespit edilmiştir.

Sommerlot vd. (2013), yaptıkları çalışmada Raisin Havzasında rastgele seçilmiş 41 farklı tarım alanından kaynaklı sediment miktarının tahmini için Geliştirilmiş Evrensel Toprak Kaybı Eşitliği (RUSLE2), Yüksek Etkili Hedefleme (HIT) ve SWAT model sonuçlarının arasındaki farkı değerlendirmeyi, tarım arazilerinin sediment taşınımına etkilerini belirlemeyi hedeflemişlerdir. SWAT ve RUSLE2 tatminkâr ve benzer sonuçları verirken, HIT modeli sediment taşınımı açısından iyi bir performans gösterememiştir.







## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 5.1 ÇALIŞMA ALANI

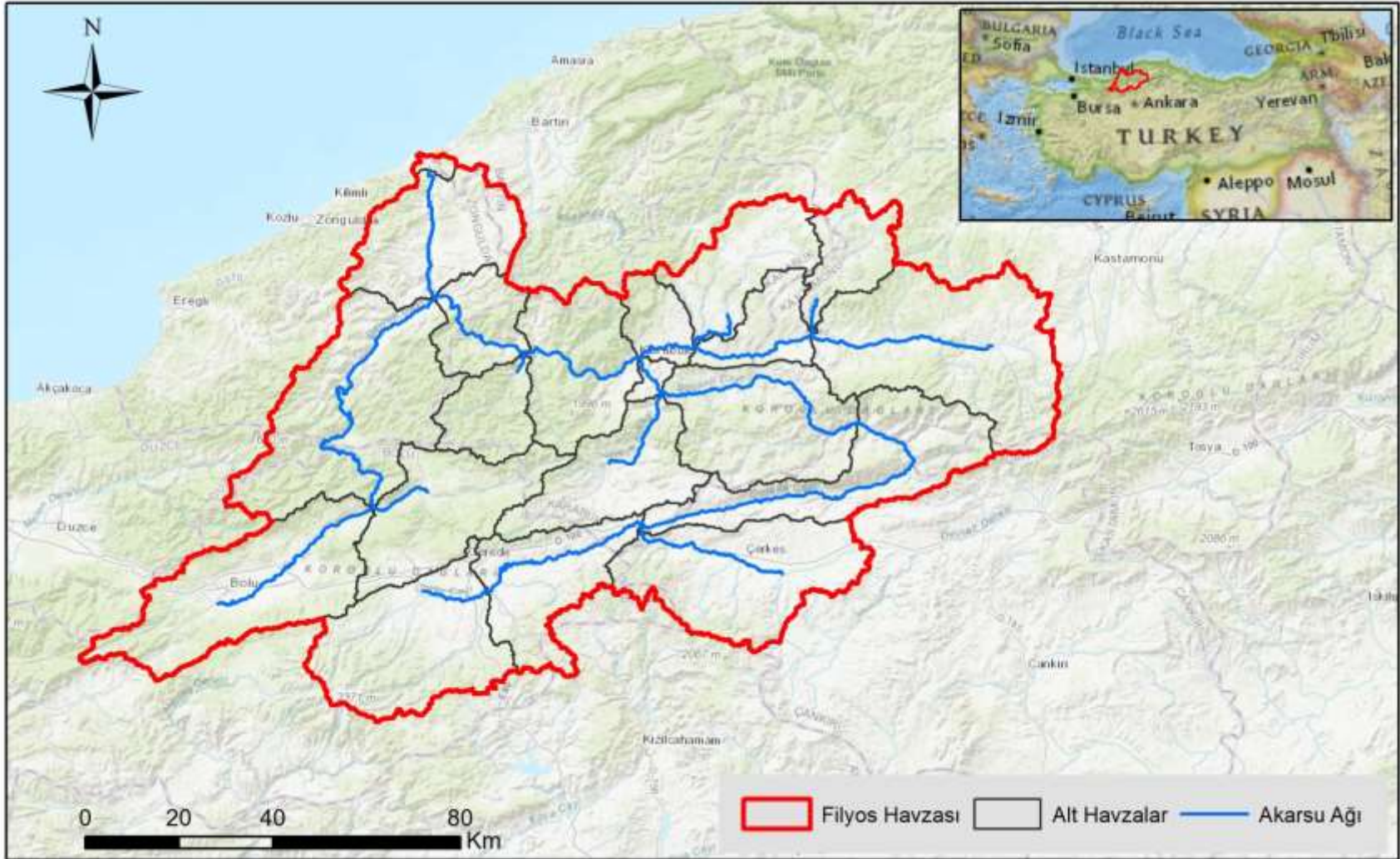
Filyos Çayı, Batı Karadeniz Havzası'nda bulunan Seben kasabasının kuzeyinde yer alan Benli Dağı eteklerinden doğan, Ulusu olarak adlandırılan ve yaklaşık 360 km uzunluğunda bir nehirdir. Çok fazla sayıda kola ayrıldığı için farklı bölgelerin isimleri ile anılmaktadır. Yenice Nehri, Köroğlu Deresi, Ulu Su, Gerece Çayı, Melan Çayı, Akçay, Soğanlı Çayı gibi birçok şekilde adlandırılmaktadır. Filyos Çayı, ilk olarak Gerece yaylasına kadar inerek, Gerece Çayı ile birleşir ve kuzeydoğu yönünde akar. Ilgaz dağı eteklerinden gelen çok sayıdaki dere ile birleşerek akış yönünü kuzeybatıya çevirir. Safranbolu yakınlarında Araç Çayı ile birleştikten sonra Karabük ve Yenice kent merkezlerini geçerek kuzeye doğru yönelir ve Çaycuma ovasına iner. Burada Bolu Dağları'nda yer alan Efteni Gölü'nden doğan, Devrek Çayı ile birleşerek Hisarönü mevkinde Karadeniz'e dökülür. Filyos Çayı Havzasında çok sayıda akarsu kolu yer almaktadır. Bunlara ilişkin bilgiler Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Zonguldak il sınırları içerisinde Karadeniz'e dökülen Filyos Çayı Havzası aynı zamanda, Bolu, Kastamonu, Karabük ve Bartın ile sınırları içerisinde de geçmektedir. Filyos Çayı Alt Havzası, Melen Çayı Havzası, Devrakani Çayı Alt Havzası ve Bartın Çayı Alt Havzası ile birlikte Batı Karadeniz Havzasını oluşturmaktadır. Batı Karadeniz Havzasının yağış alanının % 45'ini kaplayan Filyos Havzası, aynı zamanda Batı Karadeniz Havzası içerisinde yaşayan nüfusun % 55'ine de sahiptir. Batı Karadeniz Havzası'nda içme ve kullanma suyu olarak kullanılan miktar yıllık 110 milyon m<sup>3</sup> olup, bu miktarın yaklaşık % 64'lük (70 milyon m<sup>3</sup>) bölümü de çalışma alanı olan Filyos Çayı Havzası'nda kullanılmaktadır (TÜBİTAK-MAM 2013).

**Çizelge 5.1** Filyos Çayı ve yan kollarına ilişkin bilgiler

| Akarsu           | Toplam Uzunluk (km) | Debisi (m <sup>3</sup> /s) |
|------------------|---------------------|----------------------------|
| Filyos Çayı      | 360                 | 102,2                      |
| Yenice Çayı      | 63                  | 61,5                       |
| Devrek Çayı      | 95                  | 26,3                       |
| Çaycuma Çayı     | 25                  | 3,0                        |
| Kokaksu Çayı     | 35                  | 1,1                        |
| Araç Çayı        | 150                 | 18,7                       |
| İndere           | 20                  | 18,9                       |
| Eflani Deresi    | 43                  | 3,8                        |
| Soğanlı Deresi   | 70                  | 28,1                       |
| Barsak Deresi    | 22,5                | 3,3                        |
| Gürleyik Deresi  | 12                  | 13,0                       |
| Karakaya Deresi  | 14                  | 18,0                       |
| Kocadere         | 18                  | 17,8                       |
| Doksan Deresi    | 20                  | 16,7                       |
| İncedere         | 22,5                | 19,9                       |
| Keleman Deresi   | 15                  | 82,0                       |
| Şimşir Deresi    | 27,5                | 18,8                       |
| Köşeçakıl Deresi | 1                   | 2,5                        |
| Gelecek Deresi   | 10                  | 18,9                       |
| Pınarbaşı Deresi | 11                  | 5,3                        |

Batı Karadeniz Havzası'nın en büyük akarsuyu olan Filyos Çayının su toplama havzasının alanı 13319 km<sup>2</sup>'dir. Yıllık ortalama 104,6 m<sup>3</sup>/s olan nehrin debisi Nisan ayında 230 m<sup>3</sup>/s ile en yüksek, Ağustos ayında ise 28 m<sup>3</sup>/s ile en düşük seviyededir. Karadeniz'e yılda ortalama 2,91 km<sup>3</sup> su boşaltan nehir aracılığıyla yılda 4,18 x 10<sup>6</sup> ton askıda katı madde ve 0,9 x 10<sup>6</sup> ton da dip sürüntü malzemesi taşınır. Nehrin taşkın değerleri Q(5):1649, Q(10):2064, Q(25):2588, Q(50):2977 ve Q(100):3362 m<sup>3</sup>/s olarak hesaplanmıştır. Son yirmi yılda yapılan ölçümler, taşkın dönemlerinde nehirdeki su kütlesinin, ortalama akışının 3.18 ila 19.94 katlarına ulaşabildiğini göstermektedir. Nehirde çok sayıda menderes yer almakta ve örgülü akış şekli göstermektedir (Zonguldak ÇŞİM, 2011). Çalışma alanının Türkiye'deki konumu, havza sınırları ve akarsu ağ yapısı Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Filyos Çayı Havzası çalışma alanı.

## 5.2. MODEL SEÇİMİ

SWAT modeli, hidrolojik çevrimde suyun hareketini detaylandırarak simüle edebilme yeteneğine sahiptir. Örneğin tanımlanabilecek farklı yükseklik seviyeleri ve meteorolojik koşullar yardımıyla, yağışı havzanın farklı noktalarına yağmur veya kar olarak düşürebilmektedir. Oluşan kar örtüsünü meteorolojik şartlara göre eritebilmekte ve hidrolojik çevrim içerisindeki hareketine devam edebilmesini dikkate almaktadır.

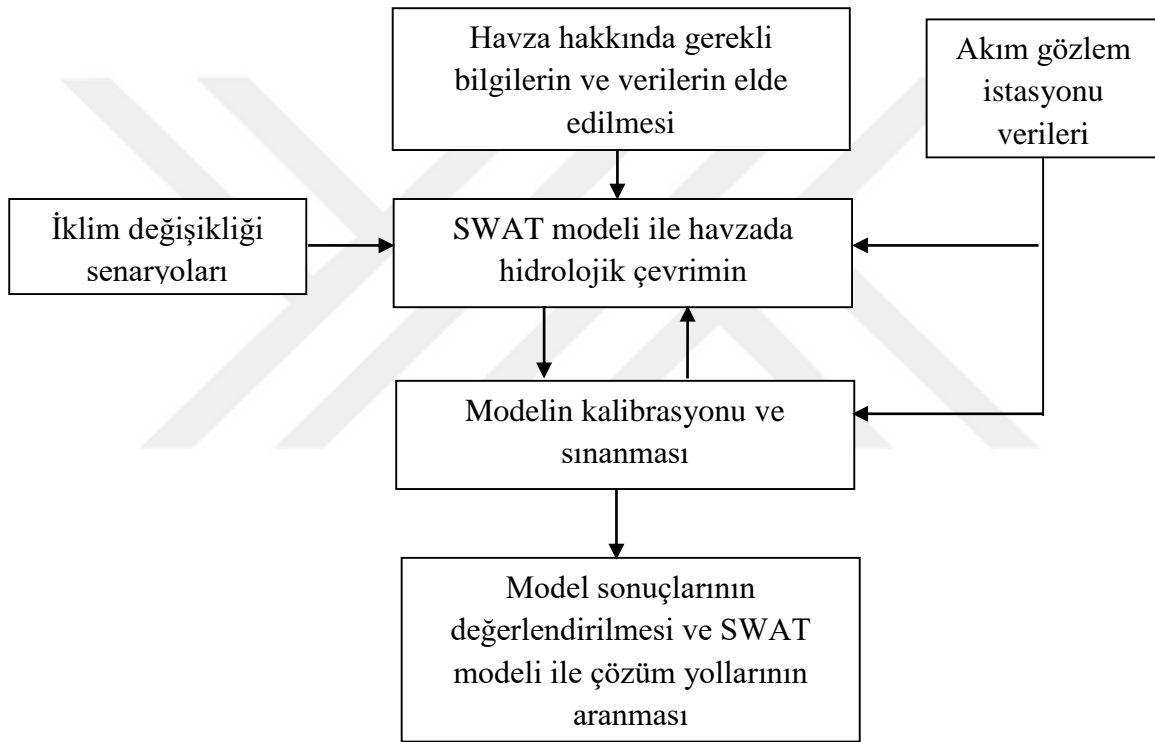
Modelin bir başka güçlü olduğu nokta, tarımsal uygulamalardır. Hidrolojik çevrimdeki suyun hareketinde önemli olan tarımsal sulama faaliyetleri için detaylı seçenekler model içerisinde mevcuttur. Sulama ihtiyacı havza içerisinde bulunan gölet, baraj, akarsu kolu, sığ veya derin akiferden sağlanabilmekte ve ayrıca havzalar arası su transferi de model yardımıyla simüle edilebilmektedir.

Modelleme çalışmalarından beklenen sonuçlar, havzanın davranışını anlayarak geleceğe dair öngörülerini nicel bazda ortaya koymak ve sorunlara alternatifli çözümler üretmektir. Bunun için çalışmalarda en önemli husus verilerin yeterliliği ve güvenilirliğidir. Dolayısıyla modeli seçmeden önce erişilebilecek veriler göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışma için kullanılması planlanan SWAT modelinin seçiminde bazı kriterler dikkate alınmıştır. Bunları; ihtiyaç duyulan verilere ulaşabilme ve küresel veri kullanım imkânı, tarımsal uygulamaların detaylı simüle edilebilmesi, modelin ücretsiz ve açık kaynak kodlu olması, model geliştirici grubun sağladığı teknik destek ve ayrıntılı belgelendirmenin yapılmış olması, coğrafi bilgi sistemi yazılımları ile destekleniyor olması, model kalibrasyonu ve sonuçlarının değerlendirilmesi sürecinde model için oluşturulan SWAT-CUP, SWATPlot, VizSWAT gibi destek yazılımların olması şeklinde sıralayabiliriz.

Modelin önemli diğer bir özelliği de arazi kullanım sınıfları, toprak tipleri ve eğim sınıflarının kombinasyonlarından oluşan, her bir alt havzayı daha ayrıntılı bir şekilde incelemeye olanak sağlayan hidrolojik işlem birimleridir (HRU). Bu sayede her bir HRU'daki yüzeysel akış miktarını ve havzanın bütündeki toplam su miktarına HRU'ların yaptığı katkıyı belirlemekte mümkün olmaktadır (Neitsch vd. 2005).

### 5.3 MODEL GİRDİLERİ VE KURULUMU

İlk olarak çalışma için temin edilen veriler yardımıyla, model oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise kalibrasyon ve sınam süreçleri, Dr. Karim Abbaspour tarafından SWAT için geliştirilen SWAT-CUP kalibrasyon programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyonu ve sınaması tamamlanan modelin sonuçları değerlendirilmiş, problemleri görülen noktalar için model yardımıyla çözümler üretilmiştir. Son bölümde ise, iklim değişikliğini havza hidrolojisine olan etkileri ortaya konmuştur. Özet olarak çalışmanın kapsamına ilişkin akış şeması Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

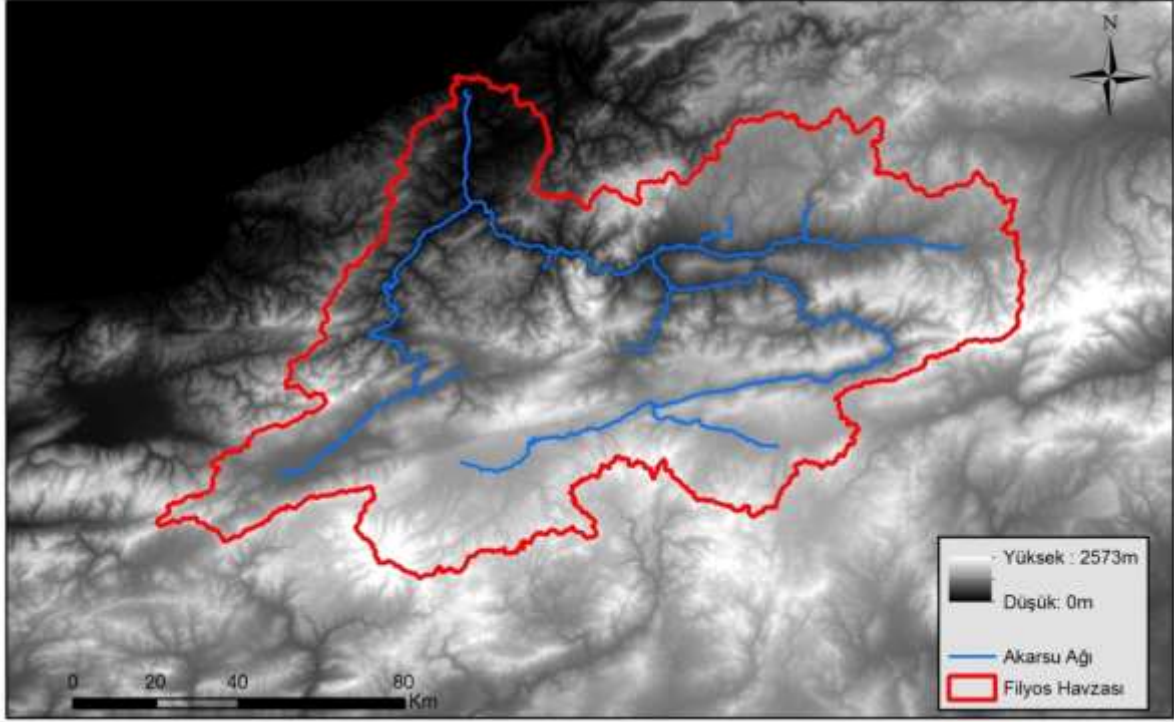


Şekil 5.2 Çalışmaya ilişkin akış şeması

#### 5.3.1. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)

Fiziksel temele dayalı olan SWAT modeli dört temel girdi verisine ihtiyaç duymaktadır. Bunlardan ilki alt havzaların oluşturulması, havza sınırlarının tespit edilmesi, eğim sınıflarının belirlenmesi, akarsu ağ yapısı karakteristiklerinden kanal eğimi, uzunluğu ve genişliğinin saptanması için kullanılacak olan sayısal yükseklik modelleridir. Çalışmada Filyos Çayı Havzası için 90x90 m çözünürlüklü SYM ve radar uydusu topoğrafik verileri (Space Shuttle

Radar Topography Mission-SRTM) kullanılmıştır. Filyos Çayı Havzası için kullanılan SYM Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



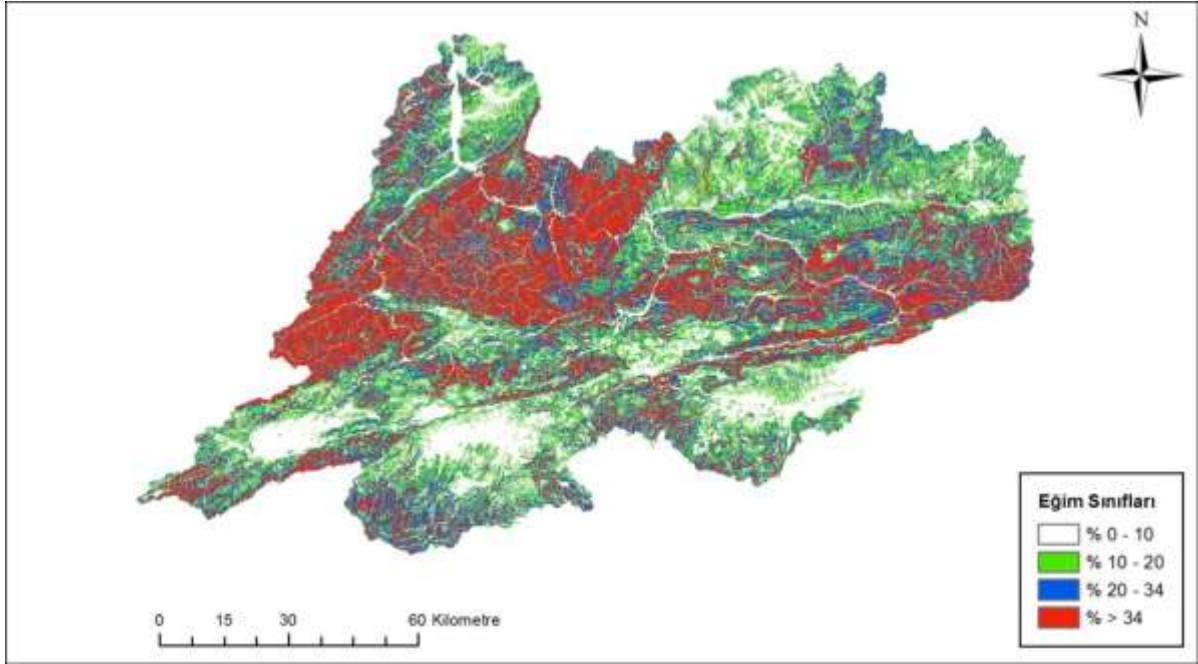
**Şekil 5.3** Filyos Çayı Havzası sayısal yükseklik modeli (Jarvis vd. 2008)

İlk olarak ArcGIS 10.3 CBS yazılımı yardımıyla, SYM kullanılarak suyun akış yönleri tespit edilmiştir. Sonrasında akış yönlerine bağlı olarak akarsu ağ yapısı ve sırasıyla alt havza çıkış noktaları, alt havza sınırları ve havzanın genel sınırı belirlenmiştir. Filyos Çayı Havzasının topoğrafik özelliklerine bakıldığında, havzanın Karedeniz'e kıyısı olması ve dağlık alanların bulunması nedeniyle yükseklik farkının fazla olduğu görülmektedir. Havza alanındaki yükseklik dağılımındaki standart sapma değerinin 413m olması bu farkı ortaya koymaktadır. Bu fark özellikle yüzeysel akışa geçecek su miktarını etkilemektedir. Havzadaki ortalama yükseklik kotu 1025m olurken, minimum yükseklik kotu deniz seviyesi olan 0 m, en yüksek noktası ise 2398m'dir.

### 5.3.2. Eğim Sınıfları

13319 km<sup>2</sup> yağış alanına sahip havzanın % 50'lik bölümü 1054 m'den daha yüksek kote sahip, % 10'luk kısımda 1542 m'den daha yüksektir. Havza sınırları ve akarsu ağ yapısı belirlendikten sonra, eğim sınıfları tespit edilmiştir. Bu işlem sırasında havza alanının dört eşit

parçaya bölünmesi dikkate alınarak % 0-10, % 10-20, % 20-34 ve %>34 olmak üzere dört farklı eğim sınıfı oluşturulmuştur. Havza alanının % 25'inin eğiminin % 34'ten daha yüksek olması yükseklik farkını bir kez daha ortaya koymaktadır. Belirlenen eğim sınıfları Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



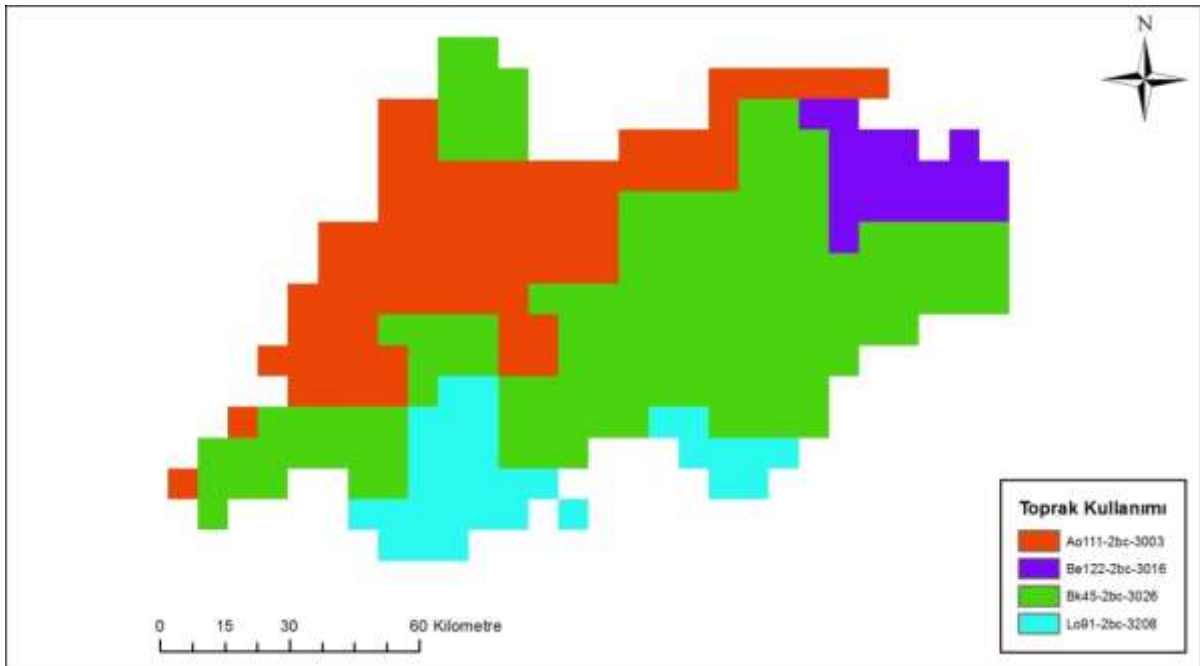
Şekil 5.4 Filyos Çayı Havzası eğim sınıfları

### 5.3.3 Toprak Özellikleri

Bir diğer girdi, toprak tekstürü ve su tutma kapasitesi, hidrolik iletkenlik gibi fiziko-kimyasal özellikleri gösteren toprak haritalarına gereksinim duymaktadır. Bu özellikler için de Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından modele uygun formatta oluşturulan toprak haritaları kullanılmıştır. Bu toprak haritalarının özelliği, havzaya ait çok sayıda toprak ile ilgili veriyi içerisinde barındırmasıdır. Bunlar; toprağın hidrolojik grubu, toprağın yoğunluğu, maksimum kök derinliği, boşluk oranı, toprak içerisindeki katmanlar ve bu katmanların derinlikleri, doymuş hidrolik iletkenlik, su tutma kapasitesi, organik karbon içeriği, kil, silt, kum, kaya içerikleri, toprağın albedosu, erozyon duyarlılığı faktörü, elektriksel iletkenlik gibi çok sayıda fiziksel ve kimyasal özelliklerdir. Çalışma alanının büyüklüğü de dikkate alındığında bu haritaların oluşturulması ayrı bir çalışmanın konusu olmakla birlikte, literatürde FAO'nun toprak haritaları kullanılarak yapılan çok sayıda çalışma

bulunmaktadır. Çalışma alanının içerisinde yer alan ve FAO tarafından sınıflandırılan dört farklı toprak tipi olmakla birlikte buna ait harita Şekil 5.5’de gösterilmektedir.

Çalışma alanının tamamındaki toprak tipi killi toprak olarak tanımlanmaktadır. Toprak yapısına bağlı olarak sızma hızının düşük olması havzanın hidrolojik toprak grubunun C ve D olarak sınıflandırmıştır. Havza alanının % 88’inin hidrolojik toprak grubu C iken, kalan %12’lik kısım D grubudur. Bu tip topraklardaki sızma hızı düşük olduğu için, yüksek yüzeysel akış potansiyellerine sahiptirler.



Şekil 5.5 Filyos Çayı Havzası toprak tipleri (FAO, 2003)

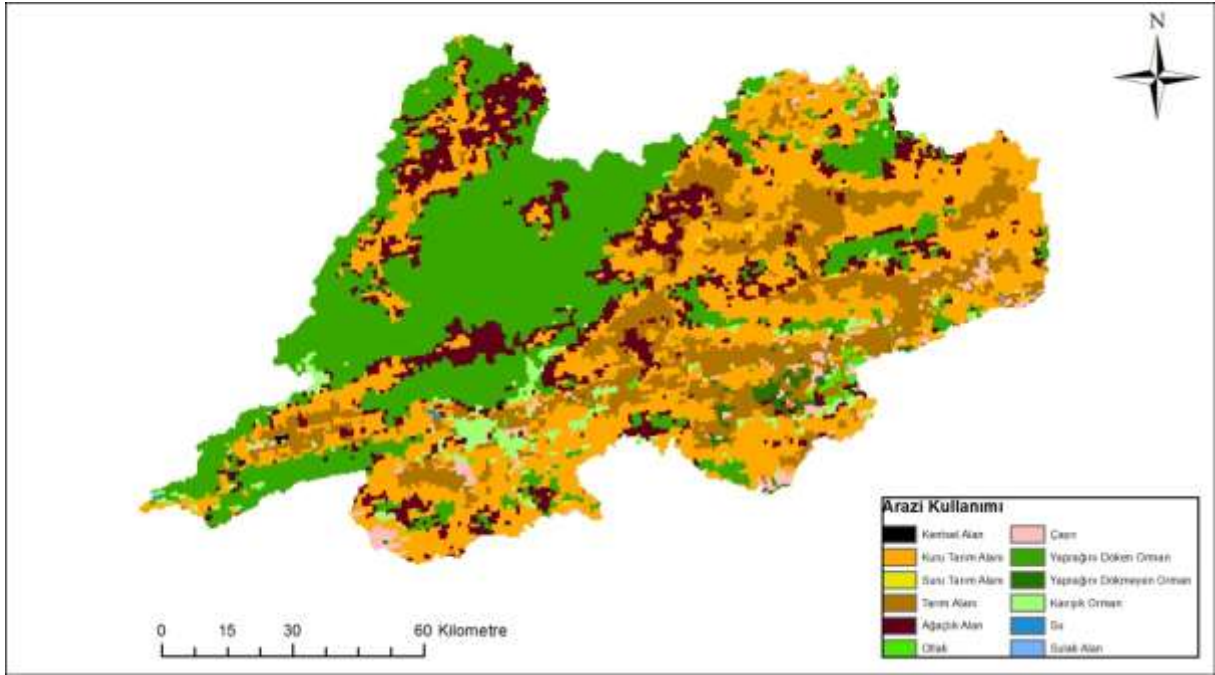
#### 5.3.4 Arazi Kullanımı

Havzada oluşan yüzeysel akış, buharlaşma, terleme ve taşınacak sediment miktarını büyük oranda etkileyen arazi kullanımı haritaları da Avrupa Çevre Ajansı’ndan (EEA) sağlanmıştır. Model bu haritalar sayesinde yüzeysel akışın hesaplanmasında kullanılan eğri numaraları belirlenebilmektedir. Filyos Çayı Havzasında 12 farklı arazi kullanım sınıfı yer almakta olup Şekil 5.6’da gösterilmektedir.

Filyos Çayı Havzasının büyük bir kısmı tarım ve orman arazileri ile kaplıdır. Havzanın % 48’i orman arazilerinden, % 49,5’i tarım arazilerinden, kalan kısmıda ova, mera, kentsel alan, su



ve sulak alanlardan oluşmaktadır. Çalışma alanındaki arazi kullanımı dağılımına ilişkin bilgiler Çizelge 5.2’de gösterilmektedir. Orman arazilerinin çok büyük bir kısmı havzanın kuzeybatısında, eğim sınıfının % 34’ten büyük olduğu bölgede yer almaktadır. Tarım arazileri incelendiğinde ise bunun aksi bir durumu ile karşılaşmaktadır. Eğim sınıfının % 20’den düşük olduğu alanlarda tarımsal faaliyetler gerçekleştirirken, özellikle sulu tarımın yapıldığı bölgelerin havzanın ana su kolu etrafında daha yoğun bir şekilde gerçekleştirildiği Şekil 5.6’da görülmektedir.



Şekil 5.6 Filyos Çayı Havzası arazi kullanımı (USGS, 2000)

Çizelge 5.2 Filyos Çayı Havzası arazi kullanımı dağılımı

| Arazi Kullanımı                   | Alan (km <sup>2</sup> ) | %          |
|-----------------------------------|-------------------------|------------|
| Tarım arazisi (sulu)              | 2073,77                 | 15,57      |
| Tarım Arazisi (susuz)             | 4520,47                 | 33,94      |
| Orman arazisi (yapraklı dökken)   | 5868,35                 | 44,06      |
| Orman arazisi (yapraklı dökmeyen) | 524,77                  | 3,94       |
| Mera                              | 58,60                   | 0,44       |
| Ova                               | 255,72                  | 1,92       |
| Kentsel alan (orta yoğunluk)      | 9,32                    | 0,07       |
| Su                                | 6,66                    | 0,05       |
| Sulak alan                        | 1,33                    | 0,01       |
| <b>Toplam</b>                     | <b>13319</b>            | <b>100</b> |

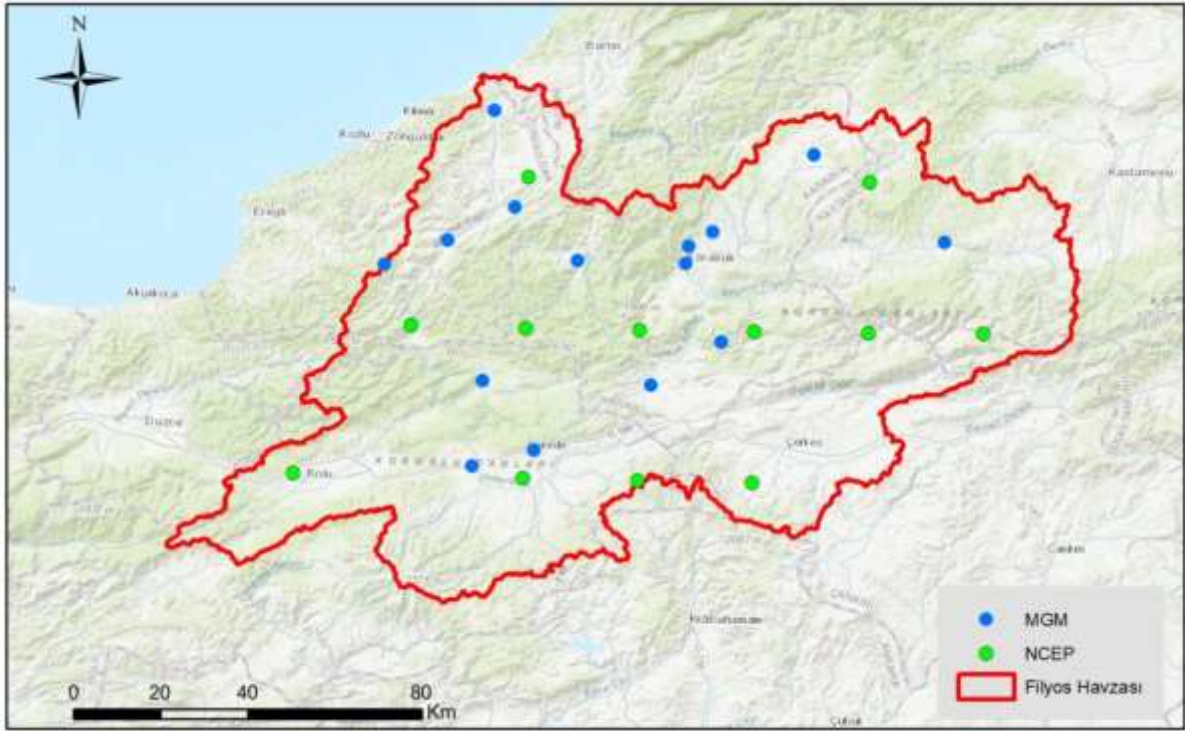
Havzada bulunan hem orman arazilerinde ağaçların büyük kısmının yaprağını döken türde olması, hem de tarım arazilerinin varlığı modelin kullandığı yaprak alan indeksi yaklaşımı açısından oldukça önemlidir. Günlük meteorolojik koşullar ve su miktarına bağlı olarak model bitkilerin yapraklarını büyütmede, bu da yaprak yüzeyinde tutulacak su miktarını, yapraktan terleme ile uzaklaşacak su miktarını ve bitki köklerinden alınacak su miktarını etkilemektedir. Bu nedenle model kurulurken tarım arazileri sulu ve susuz tarım yapılan alanlar, orman arazileri de yaprağını döken ve dökmeyen orman arazileri olarak modele tanımlanmıştır.

### 5.3.5 İklim Özellikleri

Hidrolojik süreçlerde önemli rol oynayan meteorolojik verileri için ise Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden (MGM) çalışma alanı içerisinde yer alan meteoroloji istasyonlarının verilerinden yararlanılmıştır. Ayrıca Amerika Birleşik Devletleri'nin Dünya'daki hava ve deniz olaylarını incelemek amacıyla kurulmuş olan Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi'ne (NOAA) bağlı olarak faaliyet gösteren Ulusal Çevresel Tahmin Merkezi'nin (NCEP) çalışma alanı için ürettiği meteorolojik verilerden de faydalanılmıştır. Temin edilen veriler; günlük yağış, maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, güneş ışınması, rüzgar hızı ve mutlak nemdir. Bu veriler işlenerek modelin ihtiyaç duyduğu çığ noktası sıcaklıkları, kuru gün sayısı, kuru günü takip eden ıslak gün olasılığı, standart sapmalar vb. gibi veriler üretilmiştir. Thiessen Poligon yöntemi yardımıyla ArcGIS 10.3 coğrafi bilgi sistemleri programı kullanılarak hangi alt havzanın, hangi meteoroloji istasyonu verisini kullanacağı belirlenmiştir. Eğer aynı alt havza içerisinde hem MGM'nin meteoroloji istasyonu, hem de NCEP meteorolojik verisi bulunuyorsa, MGM istasyon verileri kullanılmış, MGM istasyon verilerinin yetersiz kaldığı durumlarda da NCEP verileri kullanılmıştır. Filyos Çayı Havzası içerisinde yer alan meteoroloji istasyonlarına ilişkin bilgiler Şekil 5.7'de gösterilmektedir.

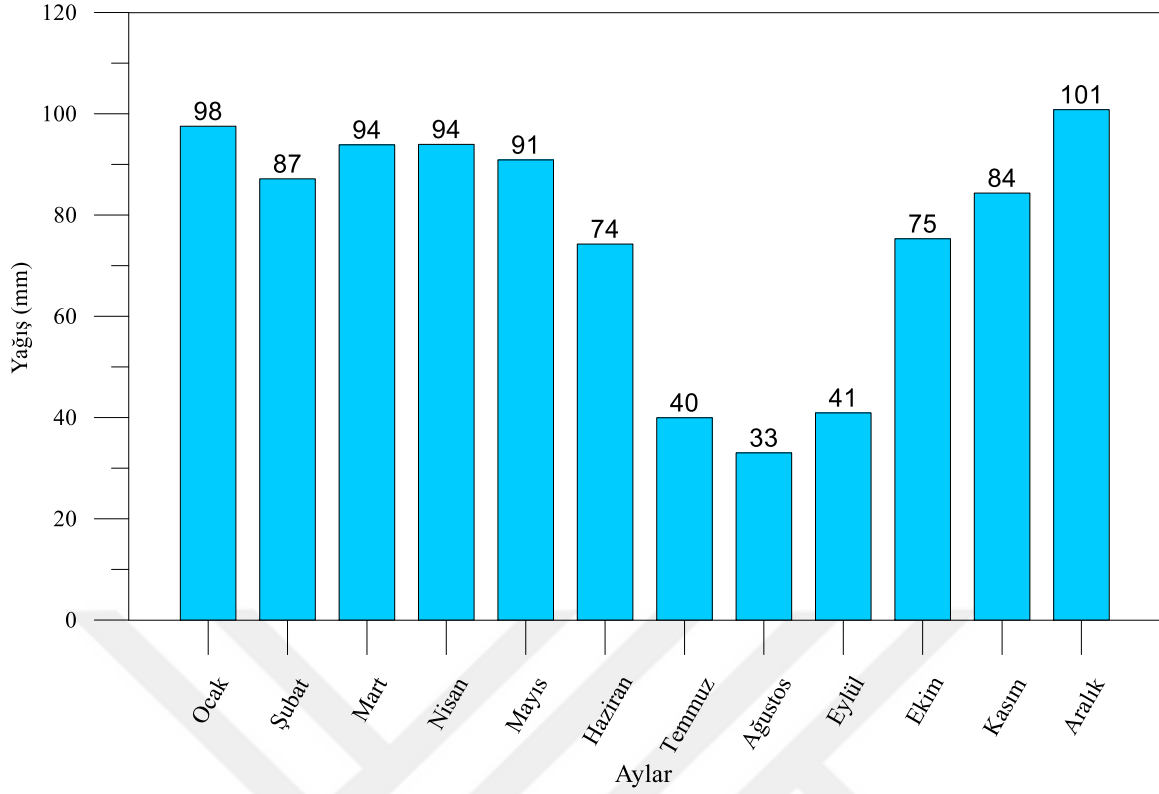
Tez çalışmasının 3. Bölümünde SWAT modelinin hidrolojik yaklaşımı ve suyun hareketi detaylı olarak anlatılmıştır. Model suyun hareketini yağış ile başlatmaktadır. Yağış, yağmur veya kar olarak gerçekleşmekte fakat model girdi olarak sadece yağmur verisini kabul etmektedir. Dolayısıyla havzanın hangi alanlarına yağışın kar olarak düştüğünü belirleyebilmek için yükseklik bantlarının modele girilmesi gerekmektedir. SYM kullanılarak her bir alt havza için yükseklik raporları oluşturulmuştur. Bu raporlar yardımıyla alt havzanın

minimum, maksimum ve ortalama kotları belirlenmiş olup, ayrıca bir metre çözünürlükte hangi yüksekliğin alt havza alanının yüzde kaçını kapladığı bilgisi tespit edilmiştir. Sonrasında, her bir alt havza için belirlenen yükseklik sınıf aralıklarının, alt havzanın yüzde kaçını kapladığı model girilmiştir. Bu sayede havzaya düşen kar miktarı da hesaplanmış olmaktadır. Model, düşen kar yağışını kar örtüsü olarak kabul etmekte, uygun meteorolojik koşullar oluştuğunda ise karın eridiğini varsaymakta, eriyen karı tıpkı yağmurda olduğu gibi hareketine devam ettiğini kabul ederek hidrolojik döngüdeki diğer bileşenler içerisinde dahil etmektedir.



Şekil 5.7 Filyos Çayı Havzası meteoroloji istasyonları

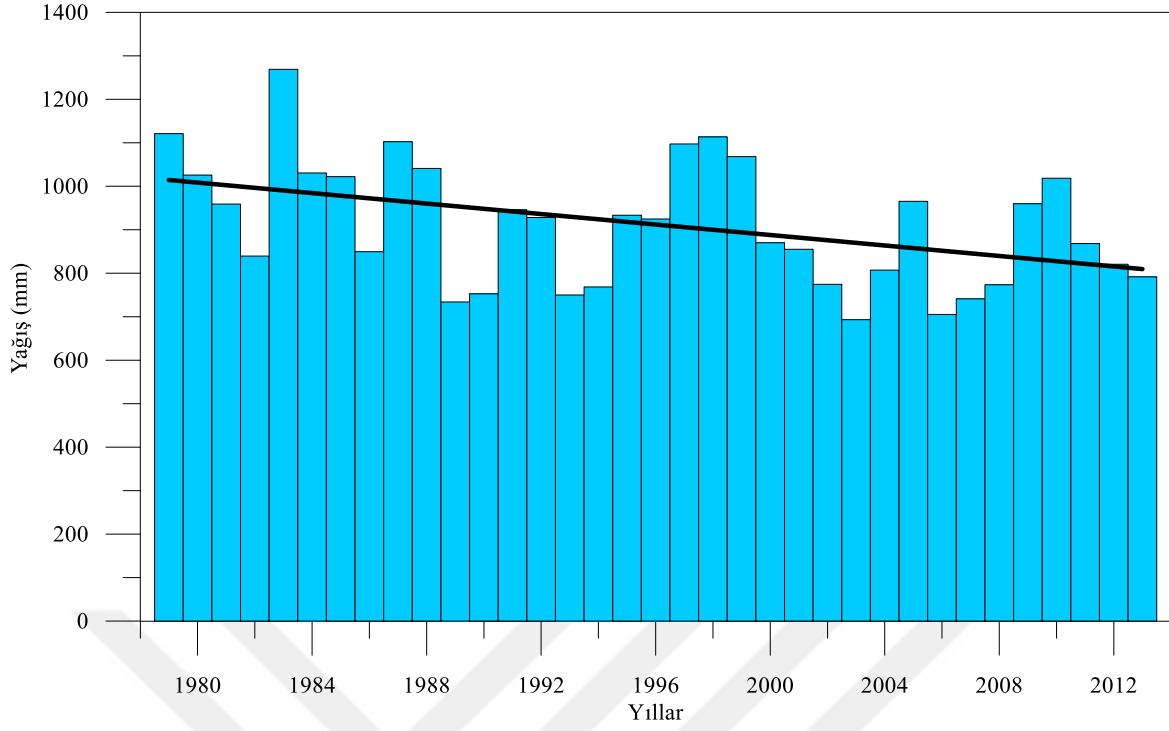
Çalışma alanı Karadeniz Bölgesi'nde yer aldığı için yılın tamamında yağış almaktadır. Havzanın toplam yıllık yağış miktarının uzun dönem ortalaması 912 mm'dir. 1979-2013 yılları arasında minimum yıllık toplam yağış 693 mm, maksimum yıllık toplam yağış ise 1269 mm olarak gerçekleşmiştir. Uzun dönem ortalamada aylık ortalama yağışın en fazla düştüğü ay 101 mm ile Aralık ayı olurken, aylık ortalama yağış miktarının en düşük olduğu ay ise 33 mm ile Ağustos ayıdır. Aylık ortalama yağış miktarı değişimi Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



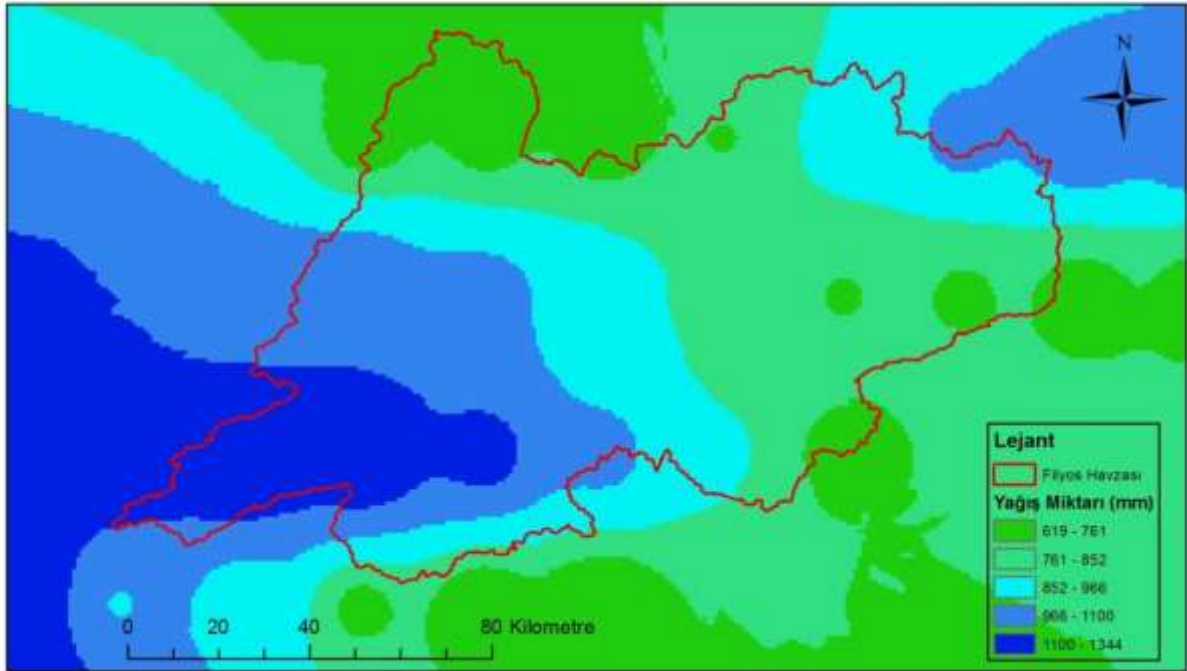
**Şekil 5.8** Aylık ortalama yağış miktarı (1979-2013)

Yıllık bazda yağışın değişim incelendiğinde ise, ciddi bir azalma göze çarpmaktadır. 1979-1988 yılları arasındaki ortalama yağış miktarı ile 2004-2013 yılları arasındaki ortalama yağış miktarında yaklaşık % 18’lik bir azalma göze çarpmaktadır. İncelenen 35 yıllık yağış verisi içerisinde havzaya düşen en yüksek 10 yağış miktarı son 15 yılda gerçekleşmemiştir. Buda havza genelinde yağış miktarının azaldığını ortaya koymaktadır. Uzun dönem yıllık toplam yağış miktarının değişimi Şekil 5.9’da gösterilmektedir.

Daha öncede değinildiği gibi çalışma alanında yükseklik farkı 2398 m’dir. Bu durum havza bütününde çok farklı meteorolojik koşullara sebep olmaktadır. Örneğin, yıllık toplam yağış miktarı havzanın güney batısından, kuzey doğu yönüne gidildikçe 1300 mm seviyelerinden 700 mm seviyelerine doğru azalmaktadır. Çalışma alanına ait yıllık toplam yağışın dağılımı Şekil 5.10’da gösterilmektedir. Yıllık maksimum sıcaklık ortalamalarındaki durum, güneydoğu yönünden kuzey batı yönüne doğru gidildikçe 17 °C’den 13 °C değerine doğru azalmaktadır. Bunun en önemli sebebi, havzanın güneyi ile kuzeyi arasındaki yükseklik farkıdır.



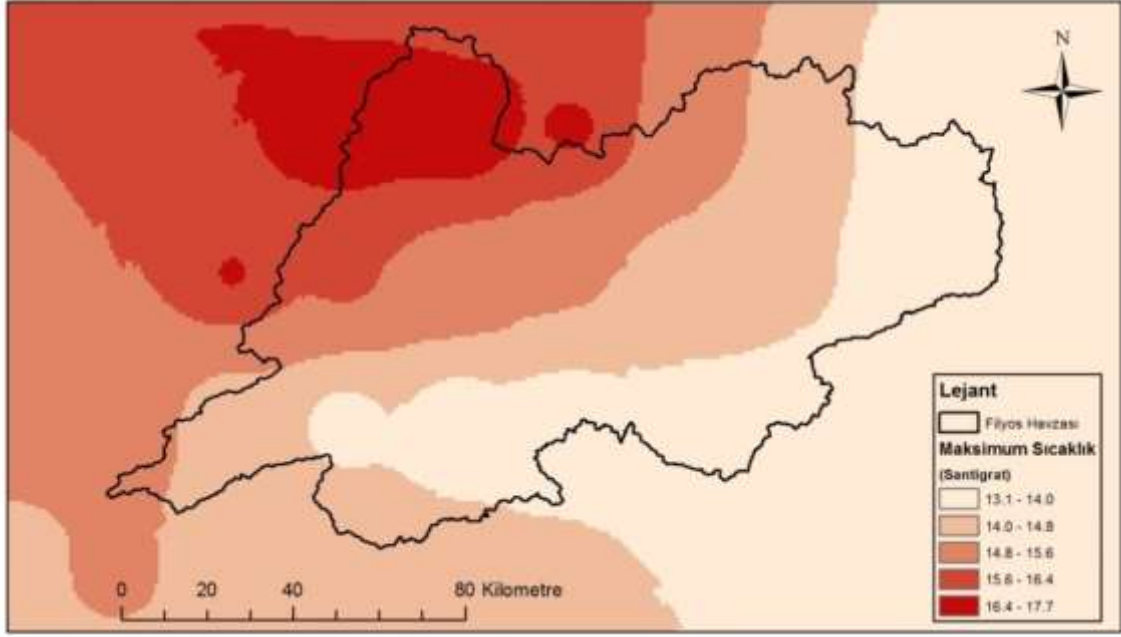
Şekil 5.9 Yıllık toplam yağış miktarı (1979-2013)



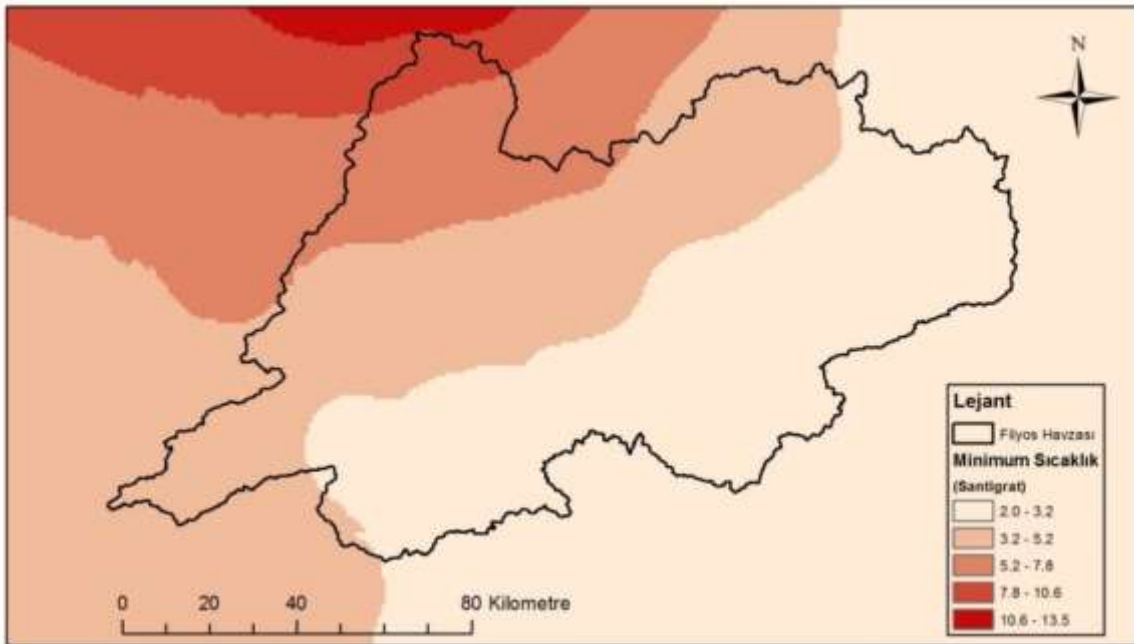
Şekil 5.10 Çalışma alanında yıllık toplam yağışın değişimi

Şekil 5.11’de yıllık maksimum sıcaklık ortalamaları gösterilmektedir. Yıllık minimum sıcaklık ortalamaları da benzer özellik gösterip havzanın güneyinden kuzeyine doğru 13°C ile 2 °C arasında değişmektedir. Buradaki farkın maksimumu sıcaklığa göre daha büyük

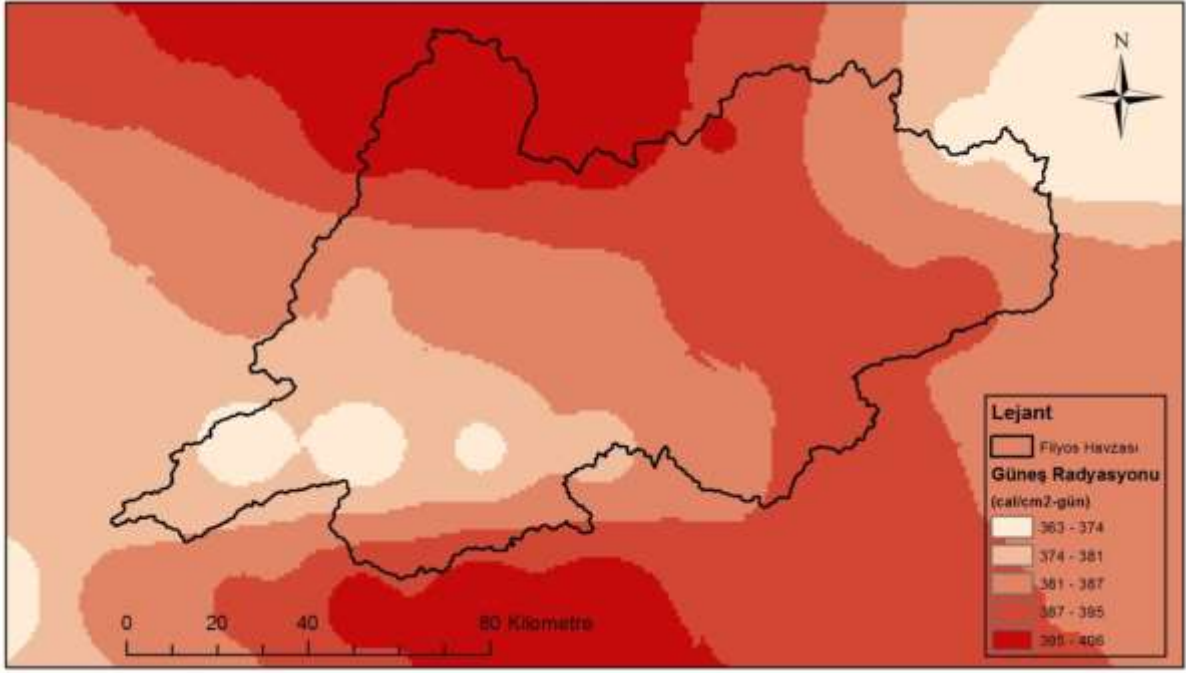
olmasının temel sebebi, havzanın güneyinde 2000 metreden daha yüksek alanların bulunmasıdır. Yıllık minimum sıcaklık ortalama dağılımları Şekil 5.12’de gösterilmektedir. Şekil 5.13’te gösterilen günlük ortalama güneş radyasyonu havza genelinde farklılık göstermekle birlikte kıyılarda daha yüksektir. Yıllık ortalama rüzgar hızında güneyden kuzeye doğru gidildikçe topoğrafyaya bağlı olarak rüzgar hızı artmakta olup, dağılım Şekil 5.14’de gösterilmektedir.



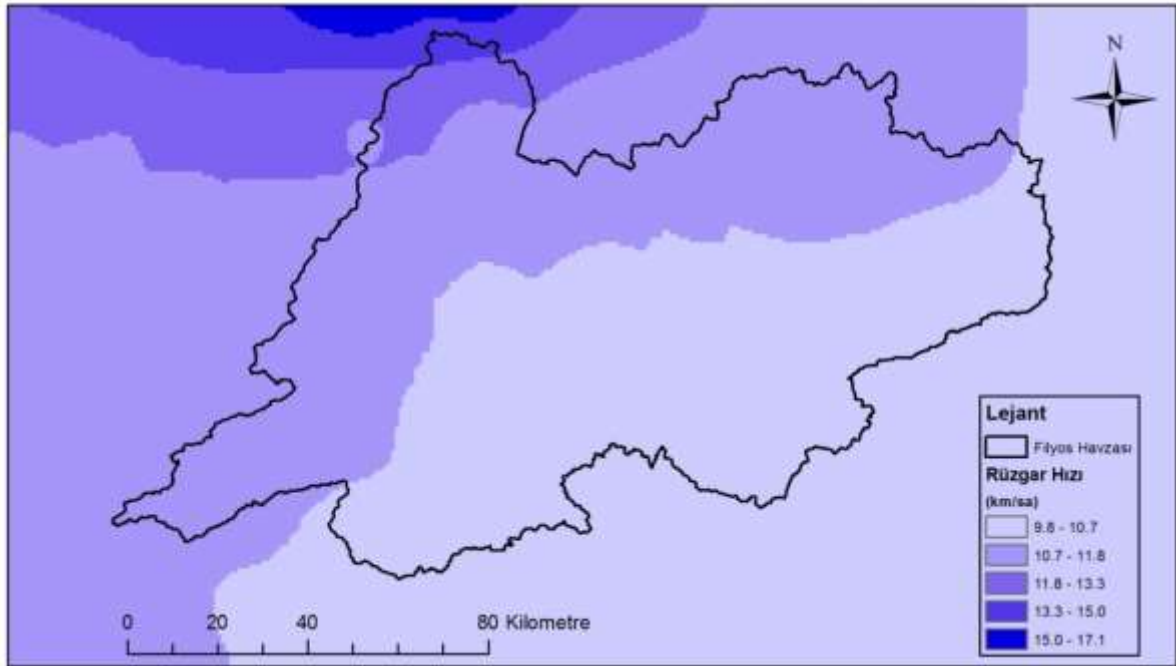
Şekil 5.11 Çalışma alanında yıllık maksimum sıcaklık ortalamalarının değişimi



Şekil 5.12 Çalışma alanında yıllık minimum sıcaklık ortalamalarının değişimi



Şekil 5.13 Çalışma alanında günlük ortalama güneş radyasyonu değişimi



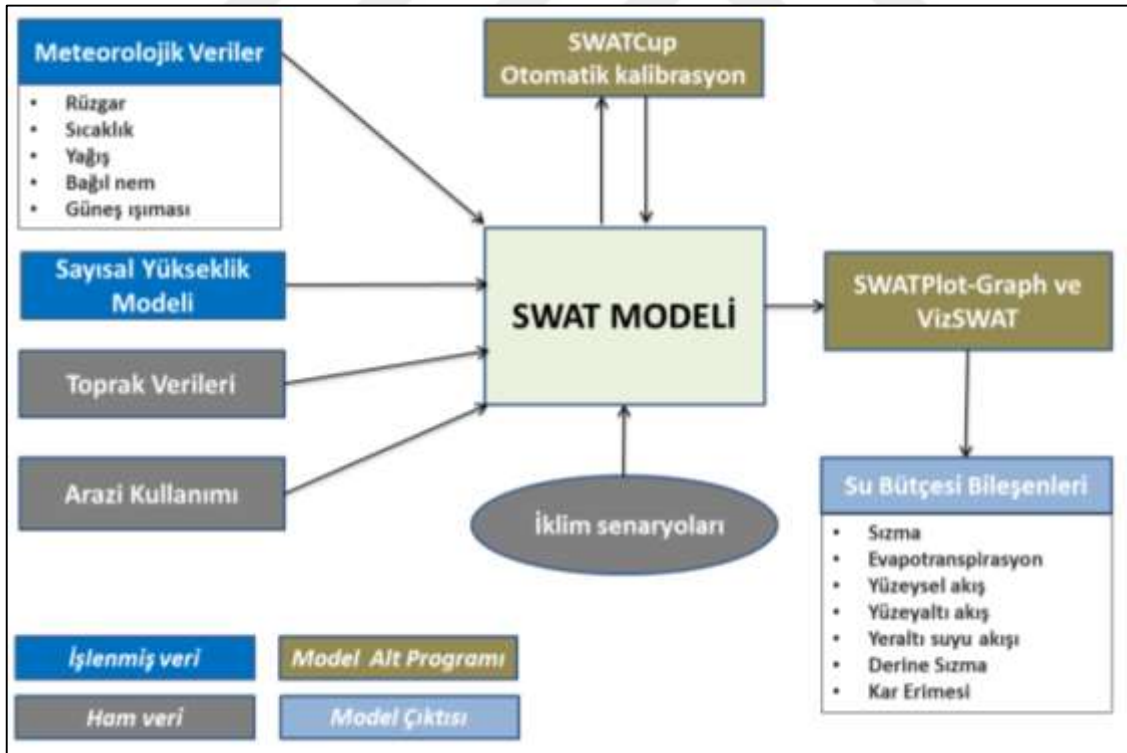
Şekil 5.14 Çalışma alanında yıllık ortalama rüzgar hızı değişimi

### 5.3.6 Hidrolojik İşlem Birimleri

Model için başka bir önemli nokta hidrolojik işlem birimlerinin belirlenmesidir. Bunun için arazi kullanımı haritaları, toprak kullanımı haritaları ve eğim sınıflarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıda bahsedildiği üzere havzada 12 farklı arazi kullanım sınıfı, 4 farklı

toprak tipi ve 4 farklı eğim sınıfı yer almaktadır. Bu verilerin kendi içlerindeki kombinasyonları ile havza için toplam 839 adet hidrolojik işlem birimi oluşturulmuştur. Bu sayede kurulan hidrolojik model altyapısı sadece 19 alt havza için değil, alt havzalar içerisine dağılmış 839 ufak hidrolojik işlem birimi içinde kullanılabilir.

Model kurulum aşamasını özetleyecek olursak; temin edilen SYM, arazi kullanımı haritaları, toprak haritaları ve meteorolojik veriler kullanılarak akarsu ağ yapıları, alt havza sınırları, havza sınırları, eğim sınıfları, hidrolojik işlem birimleri, yükseklik bantları, arazi kullanım sınıfları, toprak sınıfları belirlenmiş ve model altyapısı oluşturulmuştur. Sonrasında alt havzalar arasında su taşınımının hidrolojik açıdan kütle denklikleri kontrol edilerek modelin doğru çalışılıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Sonrasında SWAT-CUP otomatik kalibrasyon programı kullanılarak kalibrasyon ve sına işlemleri gerçekleştirilerek hidrolojik model altyapısı tamamlanmıştır. Farklı iklim senaryoları modele entegre edilerek hidrolojik olarak değerlendirmeler yapılarak çalışma sonlandırılmıştır. Çalışmanın özeti Şekil 5.15'te gösterilmektedir.

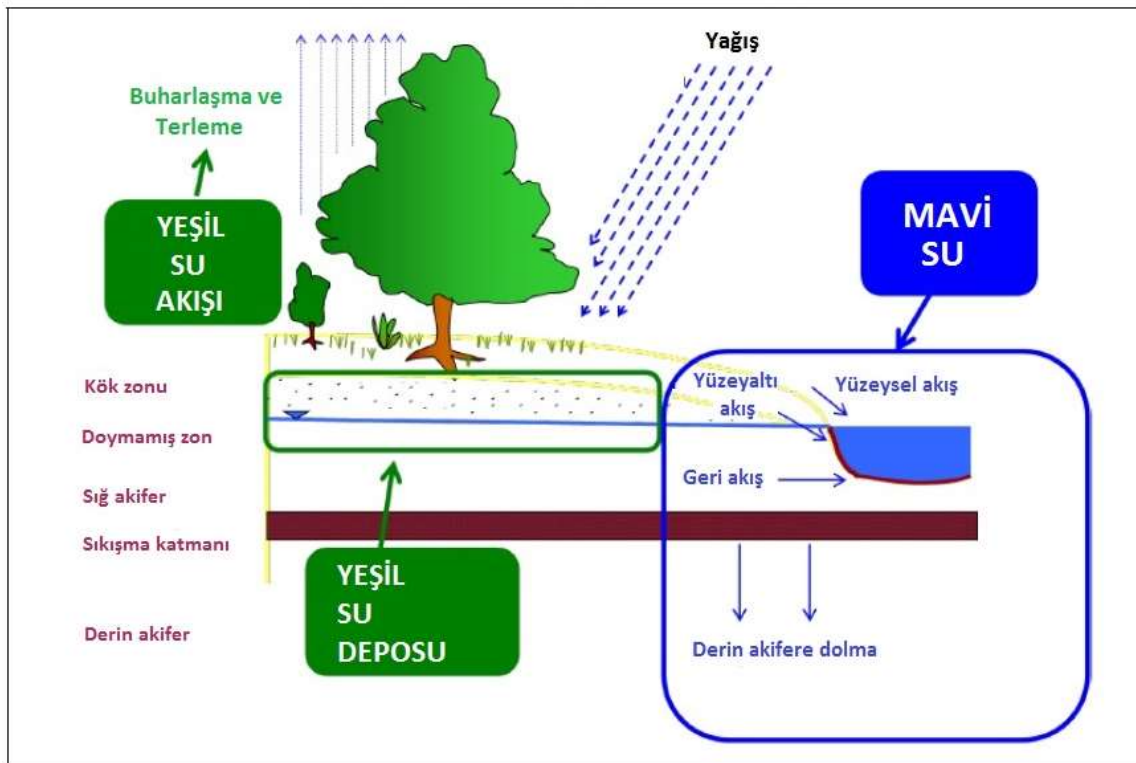


Şekil 5.15 Hidrolojik model çalışmasının özeti



### 5.3.7 Mavi ve Yeşil Su

Hidrolojik döngü açısından su kaynakları mavi su ve yeşil su olarak iki bileşene ayrılmaktadır. Mavi su, nehirler, göller, barajlar ve yeraltında suyun depolandığı miktar olarak, yeşil su ise buharlaşan, terleyen ve toprakta depolanan su miktarının toplamı olarak tanımlanmaktadır. Toprak nemi olarak bulunan kısma yeşil su deposu, buharlaşma ve terleme ile uzaklaşana yeşil su akışı da denmektedir. (Falkenmark ve Rockström, 2006). Mavi su ve yeşil su kavramları şematik olarak Şekil 5.16'da gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Mavi ve yeşil su bileşenlerinin şematik gösterimi (Abbaspour vd. 2010)

Su kaynakları değerlendirmelerinde ağırlıklı olarak mavi su kavramının toplumun refahı ve ekonomik gelişimi için faydalı olduğu düşünülmektedir (Xu 1997, Shiklomanov 2000, Döll 2002). Yeşil su genellikle ihmal edilmiştir. Aslında yeşil su, gıda üretimi ve ekosistemin sağlıklı bir şekilde işleyebilmesi için çok önemlidir (Gerten vd. 2005, Schiermeier 2008; Rockström vd. 2009, Engdahl vd. 2012, Zhang vd. 2014).

## 5.4 MODEL KALİBRASYONU

Temel girdi verileri yardımıyla model oluşturulduktan sonra kalibrasyon ve doğrulama süreçleri gerçekleştirilmiştir. Modelin kalibrasyonu için SWAT-CUP 2012 versiyon 5.1.6 programı kullanılmıştır. Program duyarlılık analizi, kalibrasyon ve doğrulama işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Bu analizleri gerçekleştirirken genelleştirilmiş olasılık belirsizlik tahmini (GLUE) (Beven ve Binley 1992), parameter çözümü (ParaSol) (Van Griensven ve Meixner 2007), sıralı belirsizlik uyumu (SUFI-2) (Abbaspour vd. 2004; Abbaspour vd. 2007) ve Markov zinciri Monte Carlo simülasyonu (MCMC) (Kuczera ve Parent 1998; Vrugt vd. 2003) gibi farklı algoritmaları kullanmaktadır (Abbaspour vd. 2007). Bu çalışmada diğer yöntemlere göre daha az sayıda simülasyon gereksinimi duyması ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi nedeniyle SUFI-2 algoritması tercih edilmiştir (Yang vd. 2008). Özellikle havza alanı büyük ve karmaşık bir yapıya sahipse bu yöntem kalibrasyon sırasında zaman açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır (Abbaspour vd. 2004; Schuol vd. 2008).

Hidrolojik modelin oluşturulması aşamasında, kalibrasyon öncesi parametrelerin seçimi için duyarlılık analizi gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Duyarlılık analizi model girdilerindeki değişimin model sonuçlarına üzerine olan etkisini belirleyen bir süreçtir. Kalibrasyon için kilit parametrelerin belirlenebilmesi için oldukça önemlidir (Ma, 2002). Kapsamlı bir literature araştırması sonucu saptanan 15 parametrenin kalibrasyon sırasındaki değişim aralıkları belirlenmiş ve Çizelge 5.3'te özetlenmiştir. Duyarlılık analizi sonrasında belirlenen parametreler ile kalibrasyon işlemi yürütülmüştür. Sonrasında ise doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

SWAT-CUP programında ilk olarak kalibrasyonda üzerinde değişiklik yapılacak parametrelerin hangi yöntemle değiştirileceği belirlenmelidir. Program da üç farklı şekilde değişiklik gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan ilki parametrenin yerine direkt olarak verilen aralıktaki değeri atama, ikincisi  $\pm$  % olarak değiştirmek, yani belirli bir yüzde oranında parametrenin değerini arttırma veya azaltma işlemi, üçüncüsü ise mevcut değişken değerinin üzerine yine belirlenen aralıkta sayısal bir büyüklüğün eklenmesi veya çıkartılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu üç farklı seçenek ile ilgili kesin bir kısıtlama olmadığı gibi, koşullara göre uygun değişim türünün seçilmesi daha doğru olacaktır.

**Çizelge 5.3** Daha önceki çalışmalarda kullanılan kalibrasyon parametrelerinin aralık değerleri (Güngör ve Göncü 2013)

| Parametre | Değer Aralığı   | Kaynak                                    | Parametre | Değer Aralığı  | Kaynak                                    |
|-----------|---|---|-----------|--|---|
| ALPHA_BF  | [0, 1]<br>[0,17, 0.34]<br>[0,99]  | a,c,e,g,h,i,j,k,l,m<br>b<br>d             | CH_K2     | [0,01, 150]<br>[4, 14]<br>[0, 150]   | a<br>b<br>c,k                             |
| CN2       | [0,03, 0,06]<br>[-0,2, 0,2]<br>[0,045, 0,085]<br>[-0,1, 0,1]<br>[-0,15]<br>[-0,25, 0,15]<br>[-0,05, 0,05]<br>[-0,25, 0,25]<br>[-0,08, 0,08] | f<br>a<br>b<br>c<br>d<br>e<br>i<br>j<br>m | SOL_AWC   | [0, 5]<br>[-0,2, 0,2]<br>[-0,17, 0,3]<br>[-0,5, 0,5]<br>[-0,25]<br>[-0,3, 2]<br>[-0,12, 0,68]<br>[0, 1]<br>[-0,25, 0,25] | j<br>a<br>b<br>c<br>d<br>e<br>g<br>i<br>j |
| GW_REVAP  | [0,02, 0,2]<br>[0,1]<br>[-0,036, 0,036]   | a,c,e,h,i,k,l,m<br>d<br>j                 | GWQMN     | [0, 5000]<br>[0, 100]<br>[0, 300]  | a,c,e,j<br>h<br>i                         |
| SURLAG    | [0, 10]<br>[0, 4]<br>[1, 12]<br>[0,1, 1]<br>[0, 8]<br>[0,001, 15]   | a,k,l,m<br>c<br>e<br>f<br>g<br>h          | GW_DELAY  | [0, 50]<br>[0,74]<br>[0, 100]<br>[1, 500]<br>[1, 20]<br>[0,001, 100]   | a<br>b<br>c,k<br>e<br>f<br>h              |
| ESCO      | [0, 1]<br>[0,85]<br>[0,01, 1]<br>[0,001, 1]   | a,c,i,j,k<br>d<br>l,m<br>e,h              | RCHRG_DP  | [0, 1]<br>[0, 0,2]<br>[0, 0,8]<br>[0,01, 0,75]   | a,i,k<br>c<br>f<br>h                      |
| CH_N2     | [0, 0,3]<br>[0,01, 0,15]<br>[0,05, 0,1]   | b<br>h<br>i                               | REVAPMN   | [0, 500]<br>[0, 100]   | a,c,j<br>h                                |
| SOL_Z     | [-0,5, 0,5]   | c   | SOL_BD    | [-0,027, 0,3]  | b   |
| SOL_K     | [0,19, 0,5]<br>[-0,5, 0,5]<br>[-0,5, 1]<br>[-0,7, 0,5]<br>[-0,5, 0]   | b<br>c<br>e<br>g<br>l                     |           |  |   |

a (Zhang Srinivasan vd. 2008), b (Abbaspour vd. 2007), c (Ahl Woods vd. 2008), d (Benaman vd. 2005), e (Cibin vd. 2010), f (Eckhardt ve Arnold 2001), g (Li vd. 2009), h (Muleta and Nicklow 2005), i (Pisinaras vd. 2010), j (Setegn vd. 2010), k (Sudheer vd. 2007), l (Xu vd. 2009), m (Zhang vd. 2008).

Program, kalibrasyon işlemini günlük, aylık ve yıllık olarak gerçekleştirebilmektedir. Alt havza bazında gerçekleştirilen kalibrasyon işleminde, duyarlılık analizinde öne çıkan parametre değerlerinin yanı sıra çalışma alanı için ölçüm değeri hakkında herhangi bir bilgi olmayan bazı parametre değerleri de kalibrasyon işlemine tabi tutulabilmektedir. Tüm alt havzalar ayrı ayrı veya bir arada kalibre edilmekle birlikte, istenirse akım, sediment, azot ve fosfor gibi farklı bileşenlerde aynı anda kalibre edilerek zamanı etkin kullanmakta mümkündür. Özellikle havzanın büyük ve karmaşık olması durumunda tüm bileşenlerin teker teker kalibrasyonu uzun zaman alacaktır. Kalibrasyon işlemi sırasında kritik noktalardan bir

tanesi, kalibrasyona çalışma alanının yukarısında yer alan alt havzalardan başlamaktır. Bu sayede yukarı havzalar kalibre edilerek menbada mansaba doğru ilerlemek doğru bir yaklaşım olacaktır.

İlk olarak havza için Çizelge 5.3'te gösterilen parametreler kullanılarak duyarlılık analizi gerçekleştirilerek hidrolojik açıdan etkin parametreler belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler çalışma alanı içerisinde yer alan 19 alt havza içinde aynı değer aralıkları arasında kalibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Kalibrasyon 1988 ile 1993 yılları arasında gerçekleştirilmiş olup, 1988 ile 2000 yılı aralığı da validasyon için kullanılmıştır. 19 alt havza için belirlenen 10 adet parametre ve bu parametrelerin kalibrasyon sürecindeki değişim aralığı Çizelge 5.4'te gösterilmektedir.

**Çizelge 5.4** Model kalibrasyonu için kullanılan parametrelerin değişim aralığı

| Parametre        | Tanım  | Değişim Aralığı |
|------------------|--|-----------------|
| r__CN2.mgt       | Nem durumu II için SCS akış eğrisi sayısı                                | -0,35 – 0,35    |
| r__GWQMN.gw      | Geri akış için sığ akiferdeki suyun eşik derinliği (mm)                  | -0,8 – 0,8      |
| r__GW_REVAP.gw   | Yeraltı suyu katsayısı   | -0,4 – 0,4      |
| r__REVAPMN.gw    | Sığ akiferdeki eşik derinliği  | -0,4 – 0,4      |
| r__SOL_AWC().sol | Toprakta mevcut su depolama kapasitesi (mm H <sub>2</sub> O / mm toprak) | -0,5 – 0,5      |
| r__ESCO.hru      | Topraktaki buharlaşma kompanzasyon faktörü                               | - 0,5 – 0,5     |
| r__GW_DELAY.gw   | Yeraltı suları gecikme süresi (gün)                                      | -0,4 – 0,4      |
| r__RCHRG_DP.gw   | Derin akifer sızdırma fraksiyonu   | 0,3 – 0,5       |
| r__CH_N2.rte     | Ana kanal için Manning faktörü   | -0,4 – 0,4      |
| r__CH_K2.rte     | Ana kanaldaki etkili hidrolik iletkenlik (mm/sa)                         | -0,6 – 0,6      |

## 5.5 DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTLERİ

Modellerin performansları nitel olarak zaman serisi grafikleri, nicel olarak ise gözlem ve model verilerin karşılıklı karşılaştırılmalarıyla hesaplanan belirlenme katsayısı ( $R^2$ ), Nash

Sutcliffe verim katsayısı (NSE), yüzde sapma (PBIAS) gibi istatistiksel sonuçlar yardımıyla değerlendirilmektedir (Tolson ve Shoemaker 2007).

Modellerin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan NSE ölçülen verilerin varyansı ile hata varyansının mutlak büyüklüğünü karşılaştıran normalize edilmiş bir istatistiksel ifadedir (Nash ve Sutcliffe 1970). NSE katsayısı Denklem (5.1)'de gösterilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean})^2} \right] \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte;

$NSE$  : Nash Sutcliffe Etkinlik katsayısı,

$Q_{obs}$  : Akarsu gözlem debisi ( $m^3/s$ )

$Q_{sim}$  : Akarsu model debisi ( $m^3/s$ ),

$Q_{mean}$  : İncelenen zaman aralığındaki ortalama akarsu gözlem debisi'dir ( $m^3/s$ ).

NSE  $-\infty$  ile 1 arasında değişim göstermektedir. Bu katsayı için en uygun değer 1 olup, genel bakışa göre 0-1 aralığındaki NSE kabul edilebilir bir sonuçken, NSE katsayısı  $\leq 0$  olduğu durumlarda model sonuçlarının kabul edilemeyecek performansa sahip olduğu düşünülmektedir (Moriasi vd. 2007).

Diğer bir değerlendirme kriteri PBIAS'tır. Bu değer simülasyon değerlerinin ortalamadan ne kadar büyük veya küçük olduğunu ifade eden bir istatistiksel bir göstergedir. Denklem (5.2)'de gösterilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \right] \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte;

$PBIAS$  : Ortalamadan sapma yüzdesi,

$Q_{obs}$  : Akarsu gözlem debisi ( $m^3/s$ ),

$Q_{sim}$  : Akarsu model debisi'dir ( $m^3/s$ ).

PBIAS için en uygun değer sıfırdır. Bu değer sıfırdan büyük ise model sonuçları, gözlem verilerinden daha düşük tahmin edilmekte sıfırdan küçük ise model sonuçları, gözlem verilerinden daha yüksek tahmin edilmektedir (Gupta vd. 1999)

RSR yoğun olarak kullanılan hata indeks istatistiği olan hataların ortalama karekökünün (RMSE), gözlem verilerinin standart sapmasına (STDDEV<sub>obs</sub>) oranlanmasıyla hesaplanan bir değerlendirme kriteridir (Legates ve McCabe 1999). RSR Denklem (5.3)'te gösterilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDDEV_{obs}} = \left[ \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean})^2}} \right] \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte;

$RSR$  : Hata istatistiği katsayısı,

$Q_{obs}$  : Akarsu gözlem debisi ( $m^3/s$ ),

$Q_{sim}$  : Akarsu model debisi ( $m^3/s$ ),

$Q_{mean}$  : Akarsu gözlem debisi'dir ( $m^3/s$ ).

Bir başka istatistiki değerlendirme ise yaygın olarak kullanılan Pearson korelasyon katsayısı ( $r$ ) ve belirleme katsayısı olarak geçen ( $R^2$ )'dir. Gözlem ve model sonuçlar arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak ifade ederler. Pearson korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değişmekte ve gözlem ile model verileri arasındaki lineer ilişkiyi ifade etmektedir. Eğer  $r$  değeri 0 ise lineer bir ilişkinin olmadığı, -1 veya +1 olduğunda ise negatif veya pozitif anlamda lineer ilişkinin olduğu söylenebilmektedir. Belirleme katsayısı ise, ölçülen ve model varyanslarının oranı olarak tanımlanmaktadır. 0-1 arasında değişiklik gösteren  $R^2$  değeri için, hidrolojik çalışmalarda kabul edilebilir değerin 0,5'ten daha büyük olması istenmektedir. Hem  $r$  hem de  $R^2$  modellerin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmalarına rağmen uç değerlere karşı fazlasıyla duyarlıdır (Moriasi vd. 2007).

Hidrolojik çalışmalarda uygun bir kalibrasyonun gerçekleşip gerçekleşmediğinin belirlenmesi için değerlendirme kriterlerinin hangi aralık değerlerine sahip olmaları gerektiği Çizelge 5.5'te gösterilmektedir.

**Çizelge 5.5** Aylık akım sonuçları performanslarının değerlendirilme kıstasları (Moriasi vd. 2007)

| <b>Başarı derecesi</b> | <b>NSE</b>             | <b>RSR</b>                | <b>PBIAS (%)</b>             |
|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Çok iyi                | $0,75 < NSE \leq 1,00$ | $0,00 \leq RSR \leq 0,50$ | $PBIAS < \pm 10$             |
| İyi                    | $0,65 < NSE \leq 0,75$ | $0,50 < RSR \leq 0,60$    | $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ |
| Kabul edilebilir       | $0,50 < NSE \leq 0,65$ | $0,60 < RSR \leq 0,70$    | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ |
| Kabul edilemez         | $NSE \leq 50$          | $RSR > 0,70$              | $PBIAS \geq \pm 15$          |



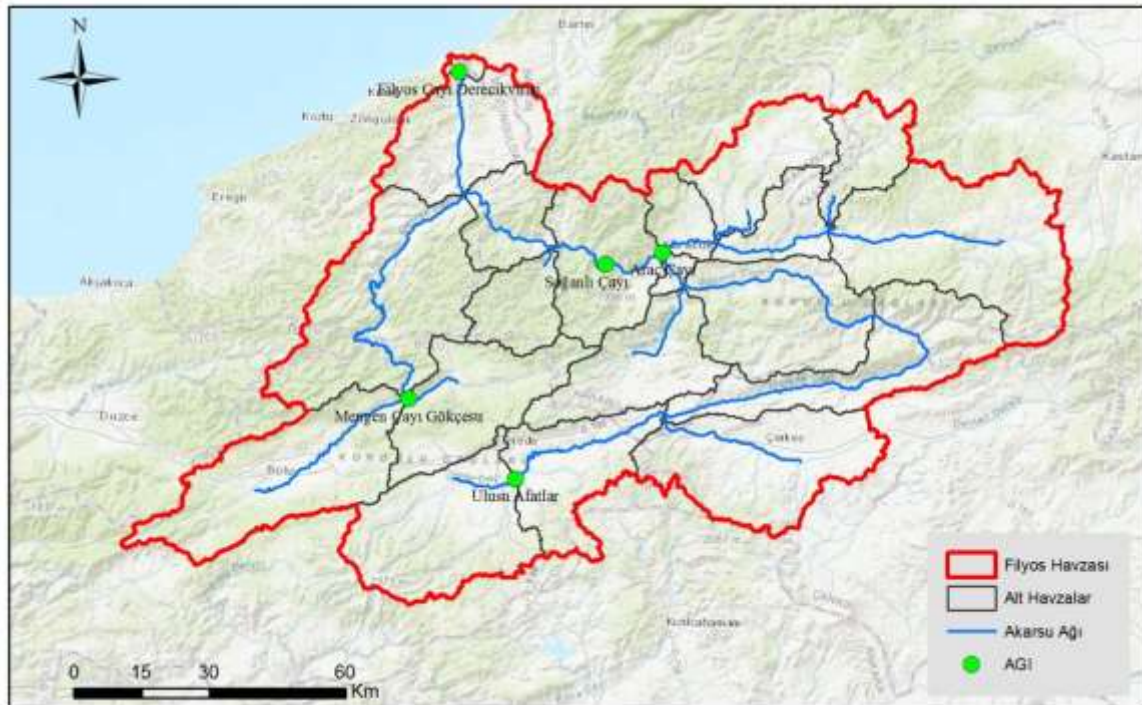


## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

#### 6.1 HİDROLOJİK GÖZLEM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Filyos Çayı Havzası için en önemli hidrolojik veri DSİ ve eski adıyla Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) şimdiki adıyla Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'ne ait debi ölçüm verileridir. Çalışma için 1989-2000 yılları arasında temin edilen yüzeysel akım verileri kullanılarak modelin kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Havzada Filyos Çayı Derecikviran, Araç Çayı, Mengen Çayı Gökçesu, Ulusu Afatlar ve Soğanlı Çayı olmak üzere 5 farklı akım gözlem istasyonu (AGİ) yer almaktadır. Soğanlı Çayı istasyonu teknik olarak alt havza çıkışında konumlandırılmadığı için bu istasyon kalibrasyon sürecinde kullanılmamıştır. Akım gözlem istasyonlarının havza içerisindeki konumları Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Akım gözlem istasyonlarının çalışma alanı içerisindeki konumları

Havza için en önemli gözlem istasyonlarından birisi Filyos Çayı'nın Karadeniz'e dökülmeden hemen önce havzanın çıkışında yer alan Filyos Çayı Derecikviran istasyonudur. Havza çıkışında konumlanması nedeniyle yağış alanının tamamını içeren istasyon, dolayısıyla havzada en yüksek debinin gözlemlendiği yerdir. Aylık ortalama maksimum debide  $650 \text{ m}^3/\text{s}$  seviyelerine ulaşan istasyonda taban akışı seviyeleri  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  seviyelerindedir. Havza için kalibrasyonda kullanılan diğer bir gözlem istasyonu 4 alt havzanın etkisi altında olan Araç Çayı'dır. Bu istasyon Filyos Çayının önemli bir kolu olmakla beraber, çalışma alanının % 21'lik yağış alanını içeren ikinci önemli istasyondur. Bu istasyonda aylık ortalama maksimum debi miktarı  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lere çıkarken taban akışı kış aylarında  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye kadar düşmektedir. Yukarı havza gözlem istasyonlarından birisi Mengen Çayı Gökçesu istasyonudur. Sadece bir alt havzadaki yağışın beslediği istasyon, toplam alanın yaklaşık %5,5'lük kısmından etkilenmektedir. Yaz aylarındaki debi miktarı  $2-3 \text{ m}^3/\text{s}$  gibi çok düşük değerlerde kalırken, yağışlı dönemde maksimum  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  büyüklüğüne ulaşmaktadır. Mengen Çayı Gökçesu istasyonu gibi yukarı havza istasyonu olan Ulusu Afatlar, çalışma alanının en yüksek rakıma sahip olduğu alt havzanın çıkışında yer almaktadır. Kış aylarında yoğun kar yağışının gözlemlendiği istasyondaki debi  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  çıkarken, yaz aylarında ise akarsu kolu zaman zaman kurumakta ve  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ 'den daha düşük debi gözlenmektedir. İstasyonların konumlarına ait bilgiler Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.

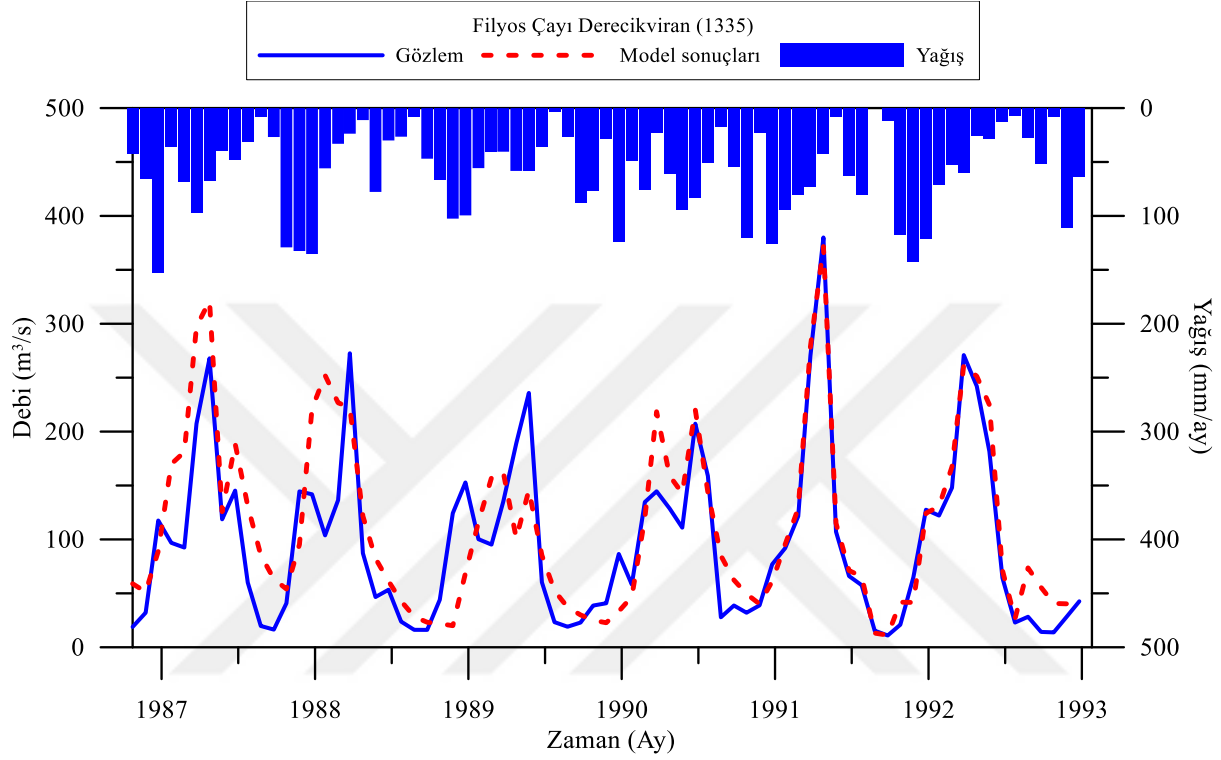
**Çizelge 6.1** Filyos Çayı Havzası'nda bulunan akım gözlem istasyonlarına ait konum bilgileri

| İstasyon Adı             | İstasyon Kodu | Koordinatlar |             |
|--------------------------|---------------|--------------|-------------|
|                          |               | Kuzey        | Doğu        |
| Filyos Çayı Derecikviran | 1335          | 41° 32' 49"  | 32° 04' 44" |
| Araç Çayı                | 1333          | 41° 11' 45"  | 32° 37' 26" |
| Ulus Afatlar             | 1327          | 40° 44' 30"  | 32° 15' 01" |
| Mengen Çayı Gökçesu      | 1319          | 40° 53' 44"  | 31° 58' 04" |
| Soğanlı Çayı             | 1314          | 41° 10' 11"  | 32° 28' 32" |

## 6.2 KALİBRASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çizelge 5.4'te gösterilen parametrelerin değişim aralıkları kullanılarak Filyos Çayı Derecikviran, Araç Çayı, Ulusu Afatlar ve Mengen Çayı Gökçe su akım gözlem

istasyonlarına ait 1988 – 1993 yılları arasındaki 6 yıllık debi verisi kullanılarak SWAT-CUP 2012 versiyon 5.1.6 programı yardımıyla kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Filyos Çayı Derecikviran akım gözlem istasyonu verileri ve hidrolojik model sonuçları arasındaki karşılaştırmanın yapıldığı grafik Şekil 6.2’de gösterilmektedir.

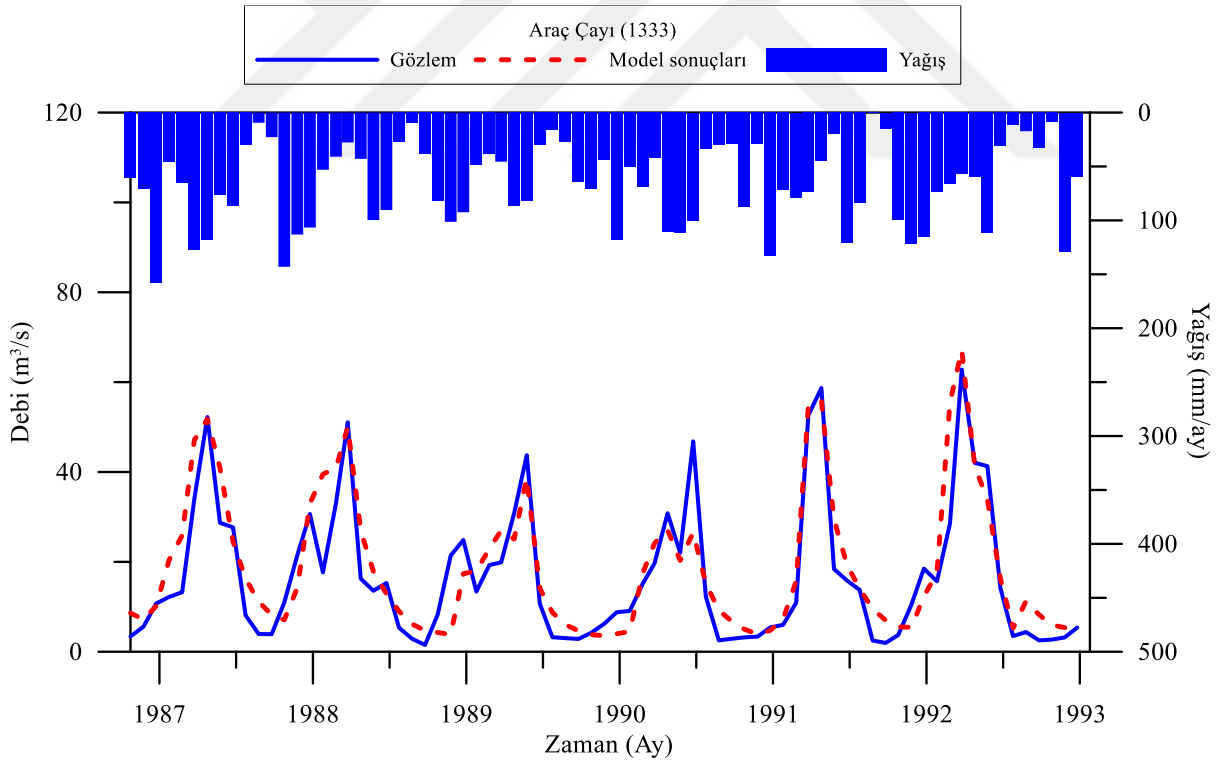


**Şekil 6.2** Filyos Çayı Derecikviran AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.2’de gösterilen sonuçlarda yağış miktarındaki artışa bağlı olarak model sonuçlarının buna tepkisiz kalmadığı, yağış sonrası oluşan pik debilerin model sonuçları ile uyum gösterdiği, yağışların sonlanması ve yüzeysel akışın geri çekilişindeki taban akışının uyumlu olduğu görülmektedir. Geri çekilme sırasında bir miktar kayma gözlenmektedir. Bunun sebebi de yüzeysel akış gecikme katsayısı olan SURLAG parametresinin alt havza bazında değiştirilemiyor olması ve çalışma alanı için tek bir parametre değerinin modele girilmesi olarak açıklanabilir (Ahl vd. 2008). SURLAG parametresi tüm AGİ verileri ve model sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. İstatistiksel indeklere göre yapılan değerlendirmede ise NSE değerinin 0,67, PBIAS’ın -14,3, RSR’nin 0,57 ve r değerinde 0,86 olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre model performansının iyi ve çok iyi sınıfına girdiği görülmektedir (Moriasi vd. 2007). İstasyonun konumunun havzanın çıkış noktasında yer

alması dikkate alındığında çalışmada başarılı bir hidrolojik model performans ortaya konduğuda ortaya çıkmaktadır.

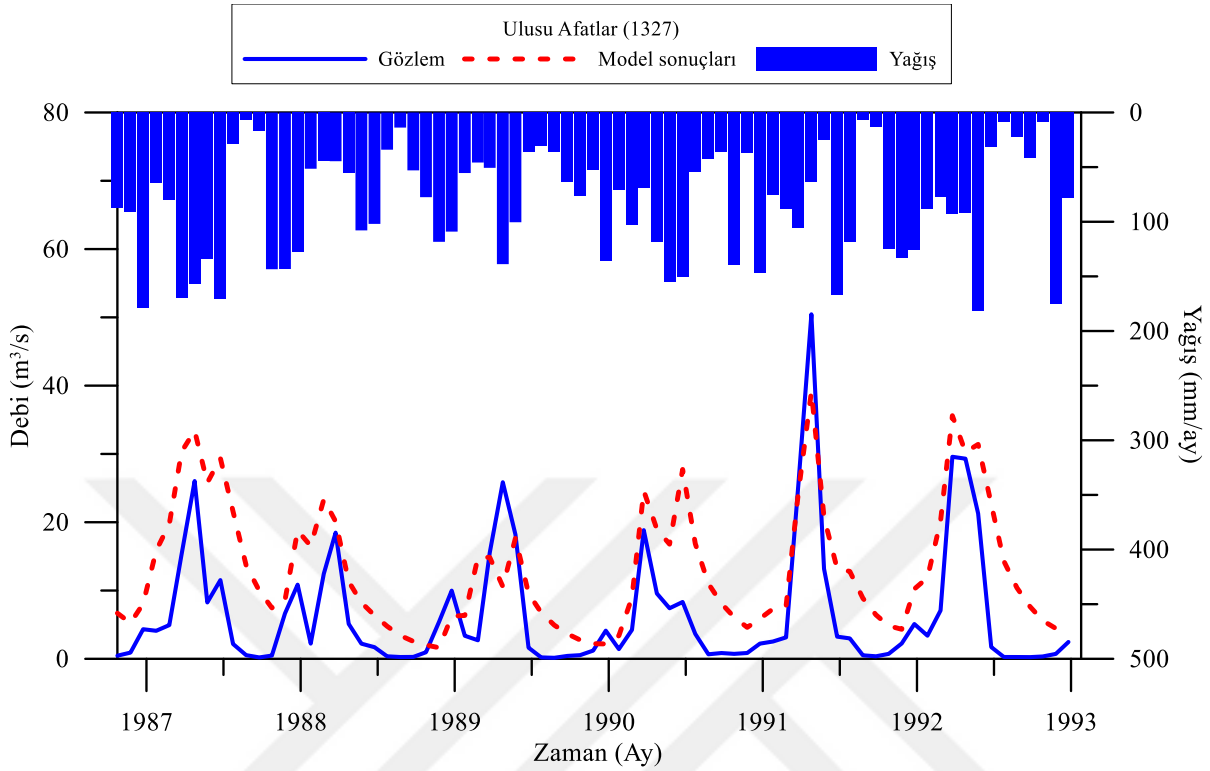
Kalibrasyonda kullanılan diğer gözlem istasyonu olan 1333 kodlu Araç Çayı'dır. Bu istasyonda Araç Çayı ve yan kollarının Filyos Çayına karışmadan önce taşınan yüzeysel akım gözlemi yapılmaktadır. Çalışma alanının % 21'lik yağış alanı kısmı 4 farklı alt havzadan geçerek bu istasyona ulaşmaktadır. Gözlem model sonuçları grafik üzerinde incelendiğinde hem pik debilerde hemde taban akışında oldukça uyumlu oldukları gözlenmektedir. İstatistiksel olarak yapılan değerlendirmelerde ise NSE değerinin 0,77, PBIAS'ın -11,9, RSR'nin 0,48 ve r değerinde 0,90 olduğu tespit edilmiştir. Filyos Çayı Derecikviran gibi istatistiksel göstergeler açısından modelin performansının iyi ve çok iyi olduğu görülmektedir (Van Liew vd. 2007). Çalışma alanı içerisinde yer alan gözlem istasyonları ile model sonuçları arasındaki en iyi performans bu istasyona aittir. Araç Çayı AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 6.3'te gösterilmektedir.



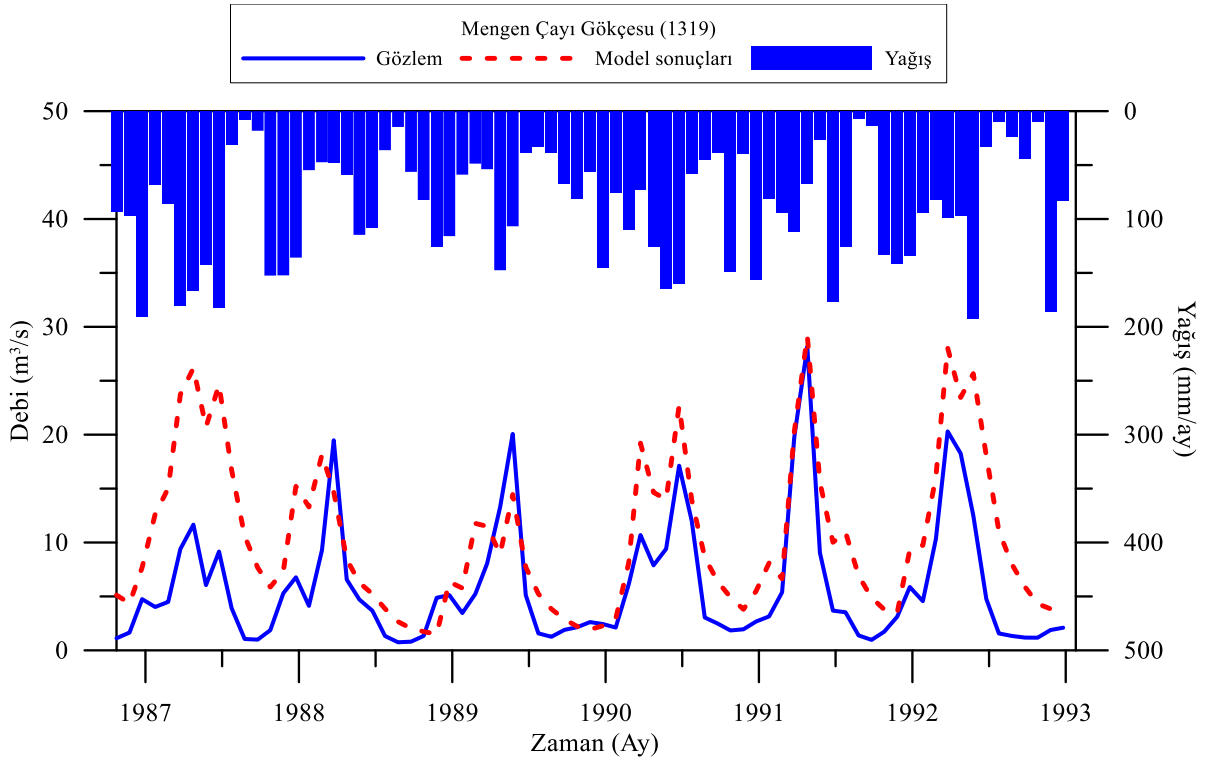
**Şekil 6.3** Araç Çayı AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Kalibrasyonda kullanılan diğer gözlem istasyonları 1327 kodlu Ulusu Afatlar ve 1319 kodlu Mengen Çayı Gökçesu'dür. Şekil 6.4 Ulusu Afatlar, Şekil 6.5'te Mengen Çayı Gökçesu gözlem sonuçları ve model sonuçları arasındaki karşılaştırmanın gösterildiği grafiklerde bazı

dönemlerde sonuçların uyumlu olduğu ancak genel olarak modelin gözlem sonuçlarının üzerinde akım değerleri tahmin ettiği görülmektedir.



Şekil 6.4 Uluşu Afatlar AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması



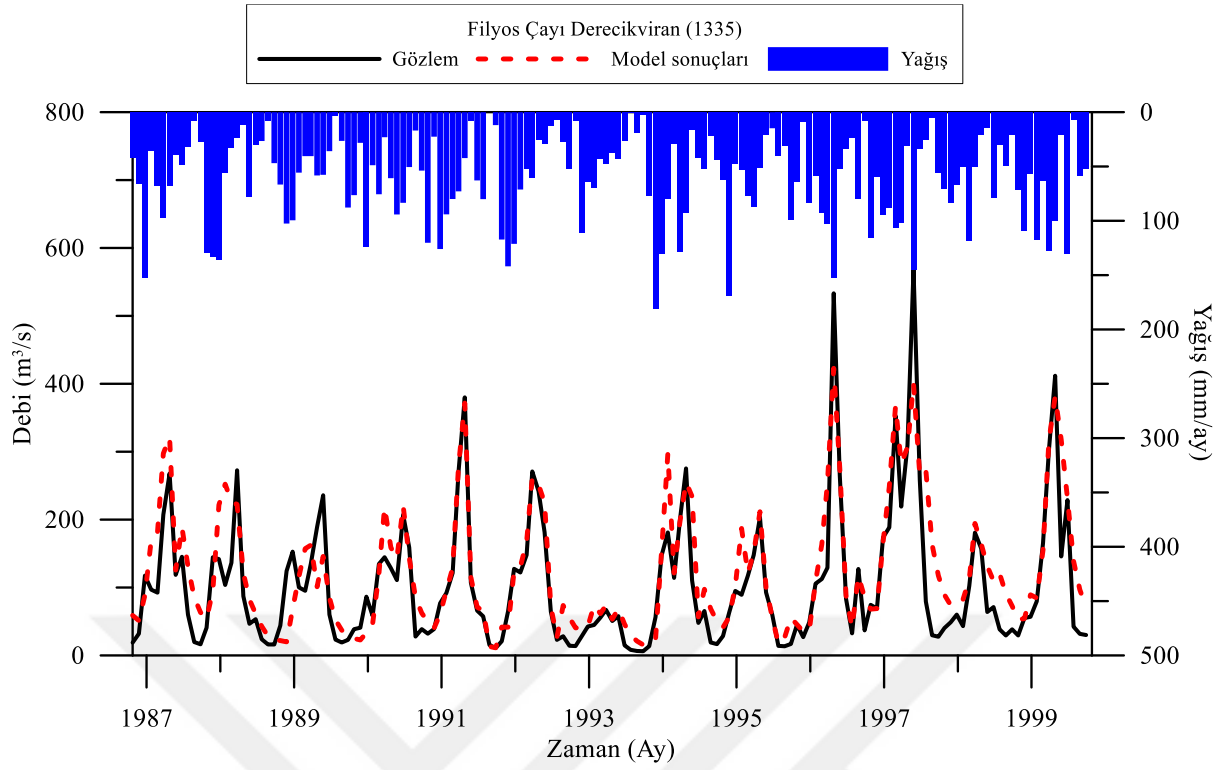
Şekil 6.5 Mengen Çayı Gökçesu AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Ulus Afatlar ve Mengen Çayı Gökçesu istasyonları için istatistiki göstergeler sırasıyla NSE değeri 0,06 ile 0,23, PBIAS'ın -93,85 ile -74,11, RSR'nin 0,97 ile 1,11 ve r değeri de 0,76 ile 0,78 olduğu hesaplanmıştır. Ulus Afatlar istasyonu en yukarı alt havzanın çıkışında yer almaktadır. Toplam alanının sadece % 5.5'luk kısmında etkilenen istasyonun bulunduğu alt havzada hem MGM hem de NCEP'e ait meteorolojik veri bulunmamaktadır (Cao vd. 2006). Aynı zamanda çalışma alanı içerisindeki en yüksek kot seviyelerine sahip olan iki alt havzaya da yoğun şekilde kar yağışı düştüğü tahmin edilmektedir. Fakat istasyonun etkilendiği alt havzalarda meteorolojik verinin olmaması model tahminlerindeki sapmalara da neden olmaktadır.

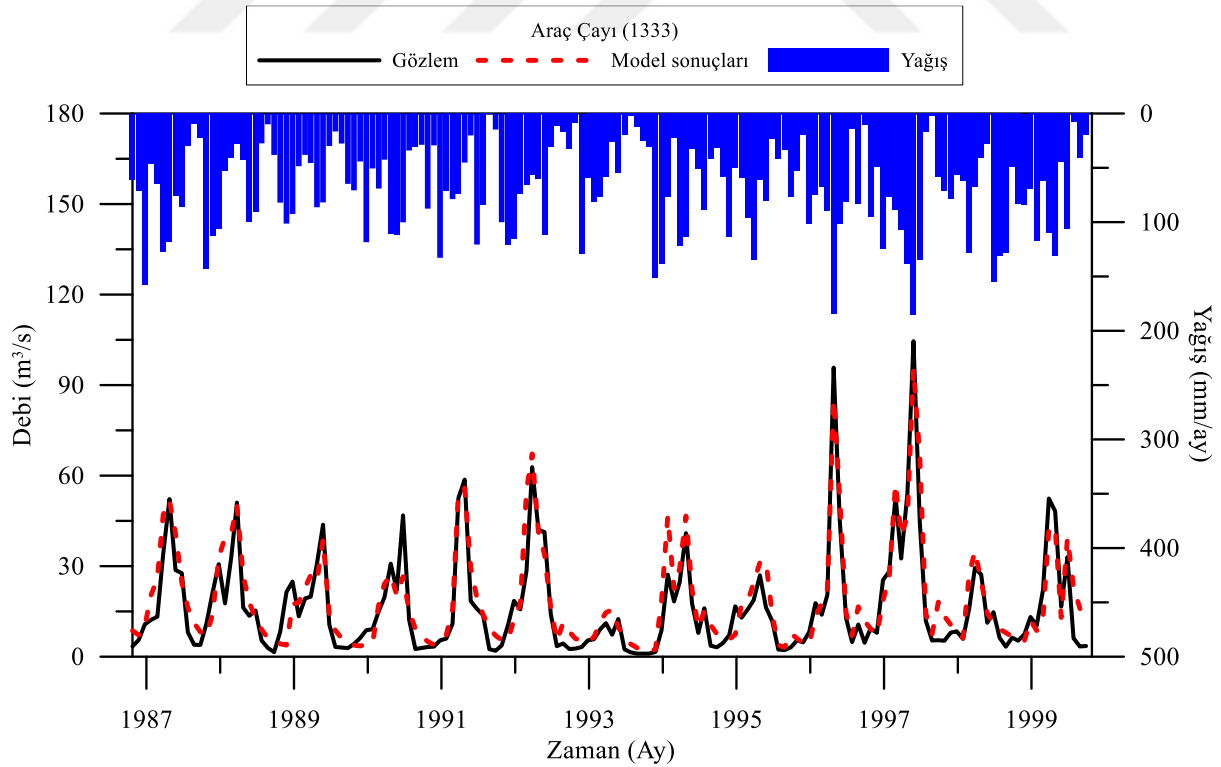
### **6.3 VALİDASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Model gözlem verileri yardımıyla kalibre edildikten sonra 1988 ile 2000 yılları arasındaki 13 yıllık veri kullanılarak validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel indeklere göre yapılan değerlendirmede validasyon dönemi için NSE değerinin 0,72, PBIAS'ın -18,9, RSR'nin 0,52 ve r değerinde 0,88 olduğu belirlenmiştir. Filyos Çayı Derecikviran için kalibrasyonda olduğu gibi validasyonda da model oldukça iyi bir performans göstermiştir (Santhi vd. 2001). Validasyon dönemi için Filyos Çayı Derecikviran AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Pik debilerin ve taban akışının gözlem verileri ile oldukça uyumlu olduğu Şekil 6.6'da görülmektedir.

Validasyon dönemi için Araç Çayı AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 6.7'de gösterilmektedir. 1988-2000 yılları arasındaki sonuçlar incelendiğinde, kalibrasyon dönemine göre modelin daha da iyi bir model performansı ortaya koyduğu göze çarpmaktadır. 1996 ve 1997 yılındaki yüksek pikler dışında tüm pik debiler ve taban akışı model sonuçları ile uyumludur. İstatistiki olarak yapılan değerlendirmelerde, NSE değerinin 0,84, PBIAS'ın -13,2, RSR'nin 0,40 ve r değerinde 0,93 olduğu belirlenmiştir. Çizelge 5.5'de belirtilen akım sonuçları performanslarının değerlendirilme kıstaslarına göre NSE ve RSR'de model performansının çok iyi, PBIAS'ın ise iyi olduğu ortaya konmuştur (Moriassi vd. 2007). Bu da Araç Çayı yukarısında yer alan 4 alt havzadaki model performansının ne kadar başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

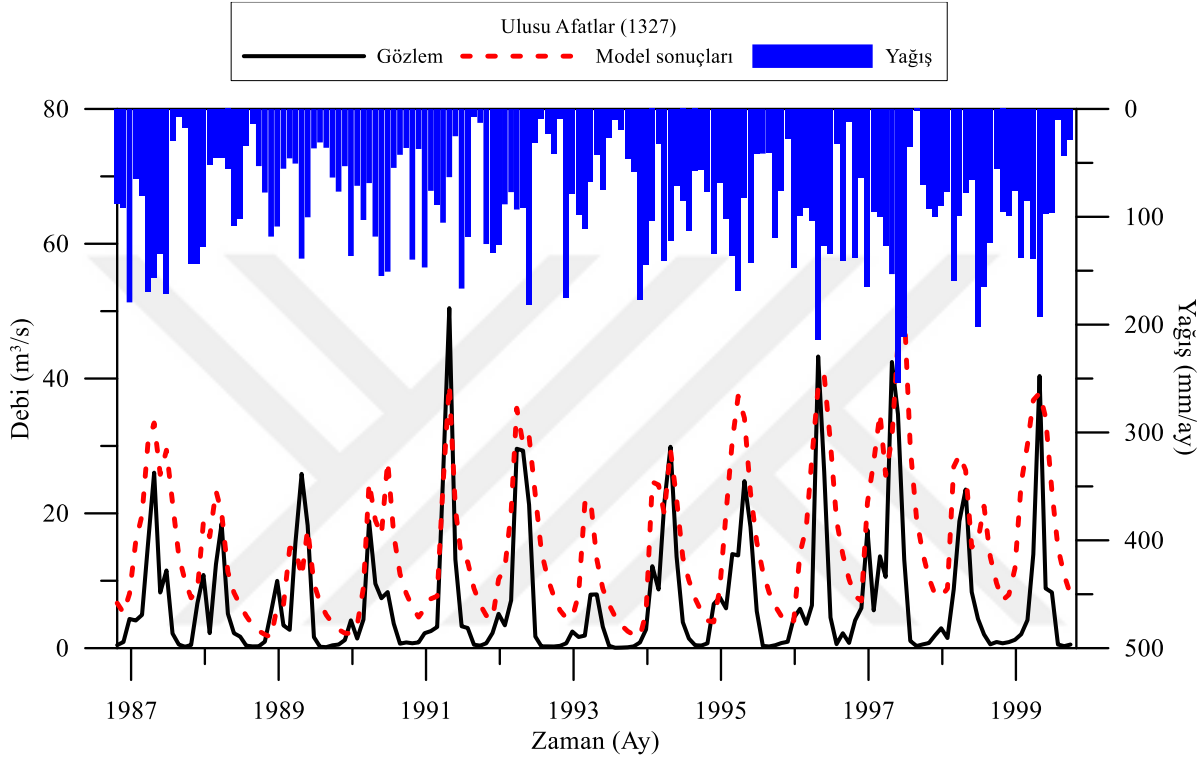


Şekil 6.6 Filyos Çayı Derecikviran AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.7 Araç Çayı AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması

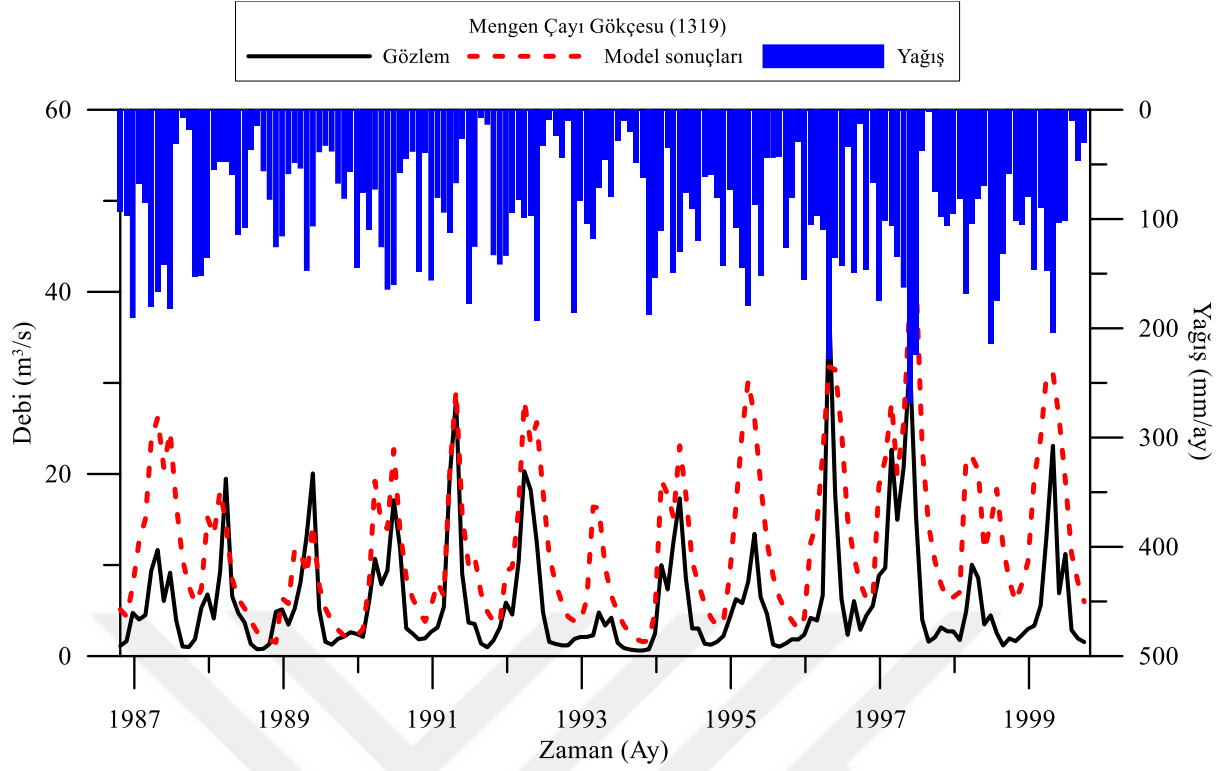
Validasyon dönemi için değerlendirmenin yapıldığı son iki istasyon Ulusu Afatlar ve Mengen Çayı Gökçesu'dur. Şekil 6.8'de Ulusu Afatlar, Şekil 6.9'da ise Mengen Çayı Gökçesu AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırıldığı grafikler gösterilmektedir. Kalibrasyonda ortaya çıkan problemlerin validasyon döneminde de devam ettiği grafiklerde gözlenmektedir. Her iki istasyon için de model sonuçları gözlem sonuçlarını olduğundan daha fazla tahmin etmektedir.



**Şekil 6.8** Ulusu Afatlar AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Bölgede meteoroloji istasyonlarının olmaması bu durumu ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla model Thiessen Poligon yöntemi ile diğer alt havzalar içerisinde yer alan meteoroloji istasyonlarının verilerini kullanmaktadır. İlgili havzaların dağlık bölgeler olması da meteorolojik özelliklerinin farklı olmasına neden olmakta, bu da modele girilen meteorolojik verilerin bu havzaları temsil edemediğini göstermektedir.





**Şekil 6.9** Mengen Çayı Gökçesu AGİ verileri ile model sonuçlarının karşılaştırılması

İstatistiksel olarak yapılan değerlendirmelerde de Ulusu Afatlar ve Mengen Çayı istasyonları için sırasıyla NSE değerlerinin -0,36 ile -0,73, PBIAS'ın -114,8 ile -103,3, RSR'nin 1,17 ile 1,32 ve r değerinde 0,72 ile 0,76 olduğu saptanmıştır. Bu sonuçlara göre iki istasyon için modelin performansının yetersiz kaldığı söylenebilir ancak 0,72 ve 0,76'lık pearson korelasyon katsayıları aslında model ve gözlem sonuçları arasında bir ilişki olduğunu ancak gözlem sonuçlarına göre modelin çok yüksek akım sonuçları tahmin etmesinden dolayı diğer istatistiksel gösterge değerlerinde sapmalar ortaya çıkmaktadır (Gupta vd. 1999). Bu iki istasyonun etkilendiği alt havzaların alanları, çalışma alanının yaklaşık %12'sini içerdiği için ve buna bağlı olarak akım büyüklükleri daha düşük olduğundan modelin genel performansına olumsuz etkisi çok az düzeyde gerçekleşmektedir. Çizelge 6.2'de kalibrasyon ve validasyon sürecindeki SWAT modelinin istatistiksel olarak hidrolojik performansı özetlenmiştir.

**Çizelge 6.2** Kalibrasyon ve validasyon sürecindeki SWAT modelinin hidrolojik performansı

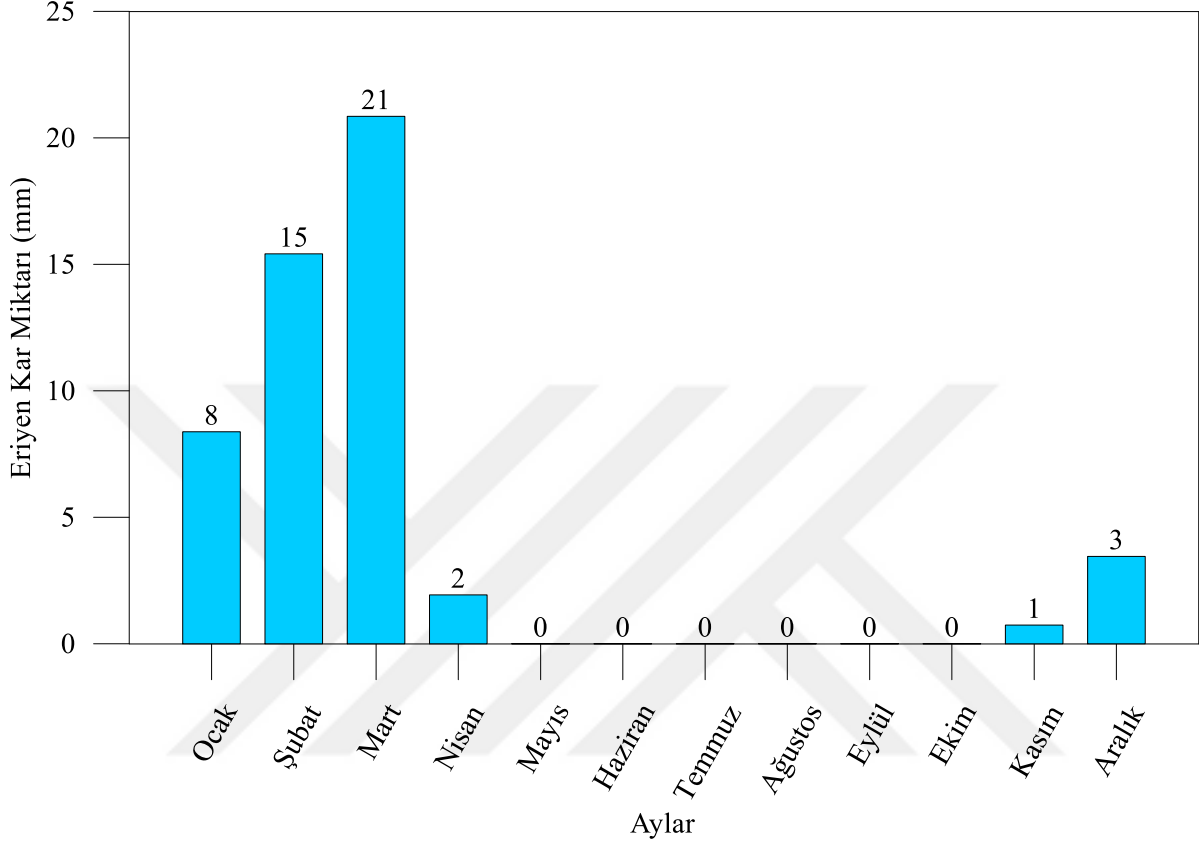
|                    | Filyos Çayı Derecikviran |      |        | Araç Çayı           |      |        |
|--------------------|--------------------------|------|--------|---------------------|------|--------|
|                    | NSE                      | RSR  | PBIAS  | NSE                 | RSR  | PBIAS  |
| <b>Kalibrasyon</b> | 0,67                     | 0,57 | -14,3  | 0,77                | 0,48 | -11,9  |
| <b>Validasyon</b>  | 0,72                     | 0,52 | -18,9  | 0,84                | 0,40 | -13,2  |
|                    | Ulus Afatlar             |      |        | Mengen Çayı Gökçesu |      |        |
|                    | NSE                      | RSR  | PBIAS  | NSE                 | RSR  | PBIAS  |
| <b>Kalibrasyon</b> | 0,06                     | 0,97 | -93,9  | -0,23               | 1,11 | -74,1  |
| <b>Validasyon</b>  | -0,36                    | 1,17 | -103,3 | -0,73               | 1,32 | -114,8 |

#### 6.4 HİDROLOJİK BİLEŞENLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma alanının Batı Karadeniz Havzası'nda yer almasından dolayı yılın tüm aylarında yağış almaktadır. Sadece Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında yaklaşık 35 - 40 mm aralığında yağış alan bölge yılın diğer aylarında 75 mm altına düşmemekte, Aralık ve Ocak aylarında bu miktar 100 mm'lere kadar çıkmaktadır. Havzanın kuzeyinde, kıyıya doğru gidilen alan dışındaki bölgeler yüksek rakıma sahip alanlardır. Özellikle çalışma alanının güneyinde deniz seviyesinin 2000 m üstünde bulunan alanlar bulunmaktadır. Bu da kış aylarında bölgeye yağışın kar olarak düşmesi anlamına gelmektedir. Hidrolojik model sonuçlarına göre eriyen kar miktarının mm cinsinden su eşdeği aylık olarak Şekil 6.10'da gösterilmektedir.

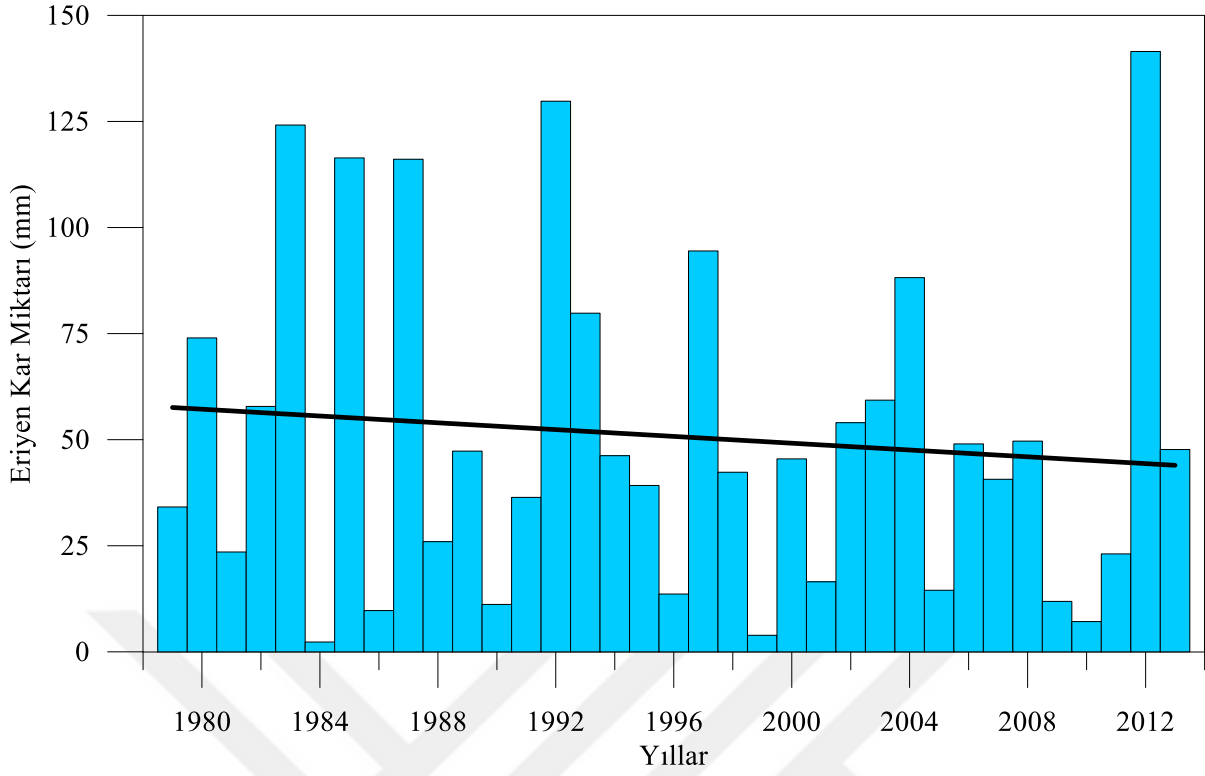
Model sonuçlarına göre 1979 – 2013 yılları arasında 35 yıllık dönemde Mayıs ile Ekim ayları arasında eriyenkar su eşdeğeri olmazken, Şekil 6.10'da görüldüğü gibi eriyen kar Kasım ayında başlamakta, Nisan ayında son bulmaktadır. Özellikle Ocak ile Mart aylarında artış gösteren bu miktar Mart ayında 21 mm ile yıl içerisindeki maksimumuna ulaşmaktadır. Çalışma alanına uzun dönem ortalamada Mart ayında yıllık olarak 94 mm yağış düşerken bu miktarın yaklaşık % 22'si kadar eriyen kar su eşdeğeri eklenmekte ve hidrolojik döngüdeki su hareketine dâhil olmaktadır. Şekil 6.11'de gösterilen çalışma alanı için eriyen kar miktarının yıllara göre değişimi grafiğinde, bazı yıllarda eriyen kar miktarının 100 mm'nin üzerinde

gerçekleştiği, bazı yıllarda ise bu miktarın 2 mm gibi çok düşük miktarlarda olduğu görülmektedir. Uzun dönemde yağış gibi eriyen kar miktarında da azalma gözlenirken, bu diğer tüm hidrolojik bileşenleri de etkileyecektir (Fickling ve Barnhart, 2014).

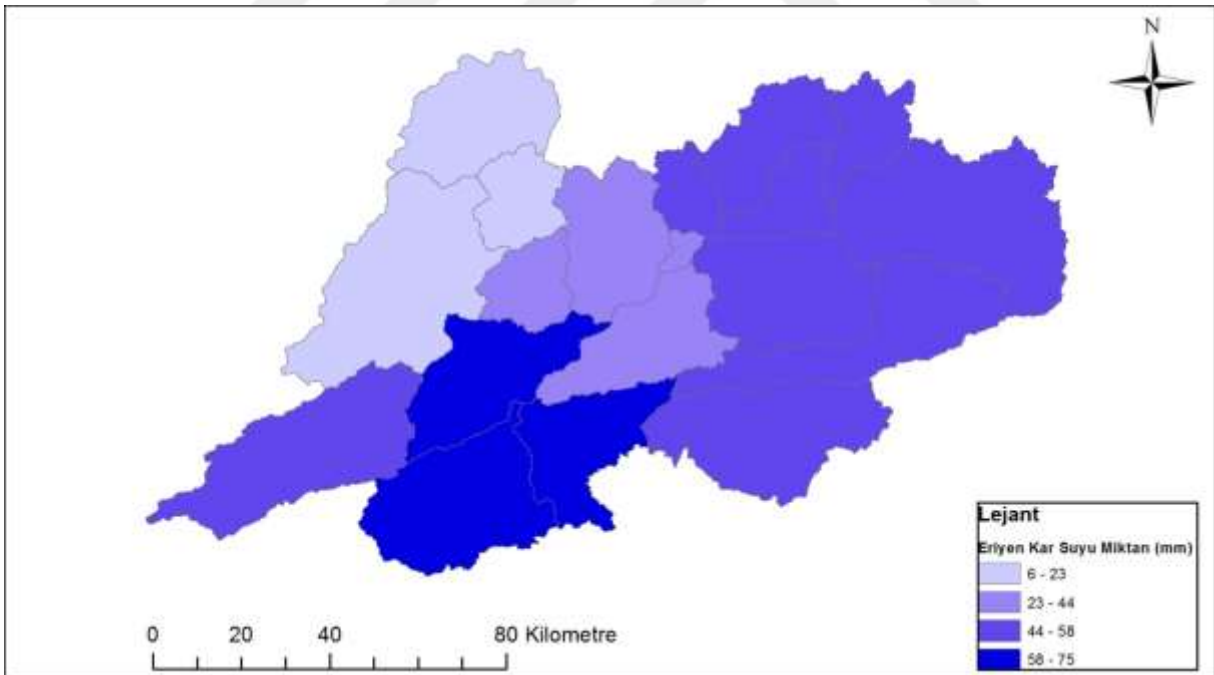


**Şekil 6.10** Çalışma alanı için eriyen kar miktarının aylara göre değişimi (1979-2013)

Uzun dönem eriyen kar miktarının havza içerisindeki dağılımını gösteren harita Şekil 6.12’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre havzanın özellikle güney batısında yer alan Köroğlu Dağları etkisiyle Mengen, Gerede, Dörtdivan, Bolu Merkez ve civarının en yüksek eriyen kar miktarına sahip olduğu, sonrasında çalışma alanının batısını kaplayan ve Araç, Bayramören, Ovacık, Eflan ve Safranbolu gibi geniş bir bölgeyi içeren kısım gelmektedir. Membadan mansaba doğru gidildikçe yüksekliğin azalmasına bağlı olarak bu miktarda azalmakta, Devrek Çayı ve Filyos Çayı mansabına yer alan Devrek, Gökçebey, Çaycuma Filyos mevkilerinde doğru en düşük seviyeye inmektedir.



**Şekil 6.11** Çalışma alanı için eriyen kar miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013)



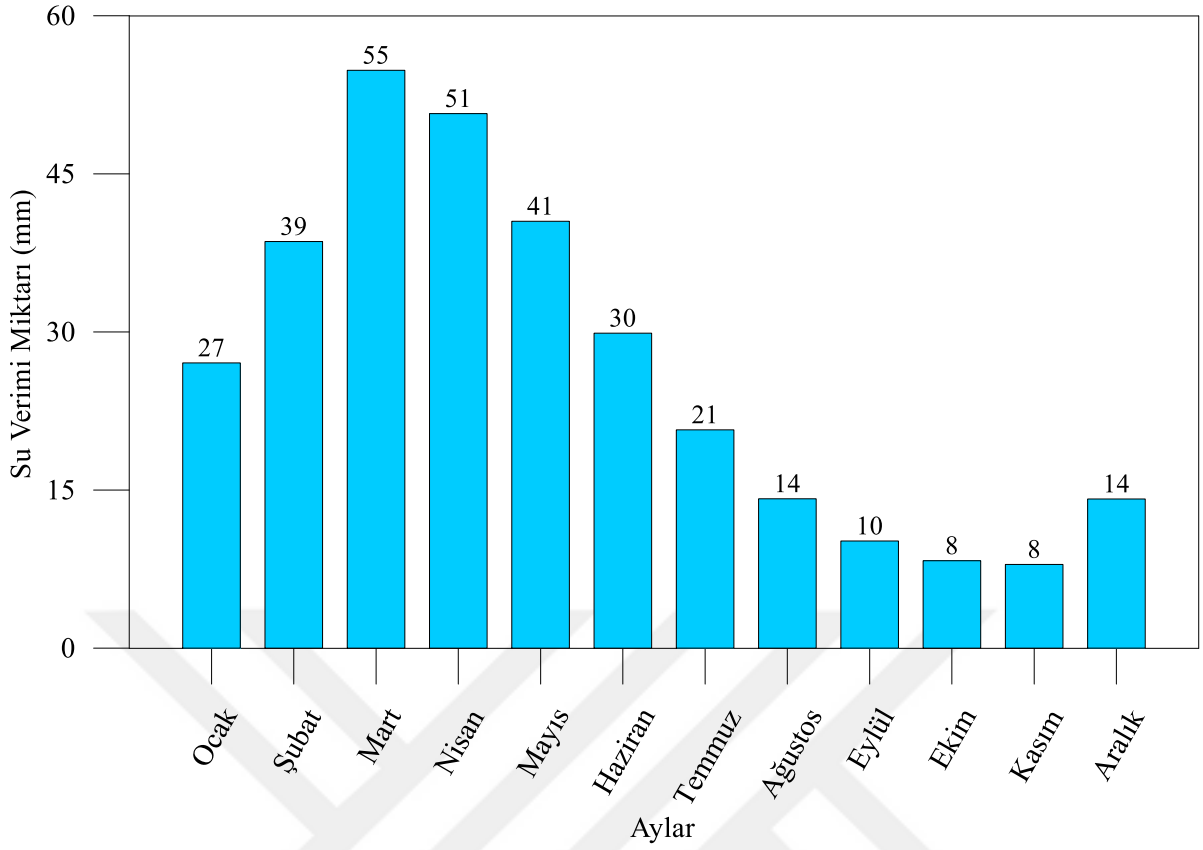
**Şekil 6.12** Çalışma alanı içerisindeki eriyen kar miktarının dağılımını

Diğer hidrolojik bileşenlerden birisi su verimi kavramıdır. Su verimi her bir HRU'dan ayrılıp ana kanalı besleyen su miktarı olarak ifade edilmektedir. Sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için tahmin edilmesi önemli olan bir parametredir. SWAT modeli; su verimi

miktarını, yüzeysel akış, yüzeyaltı akış ve yeraltısuyunun akarsuyu beslediği miktarı toplar, sonrasında bu iletimler sırasında oluşan kayıpları çıkartarak hesaplamaktadır. Çalışma alanı için su verimi miktarının aylara göre değişimi Şekil 6.13'te gösterilmektedir.

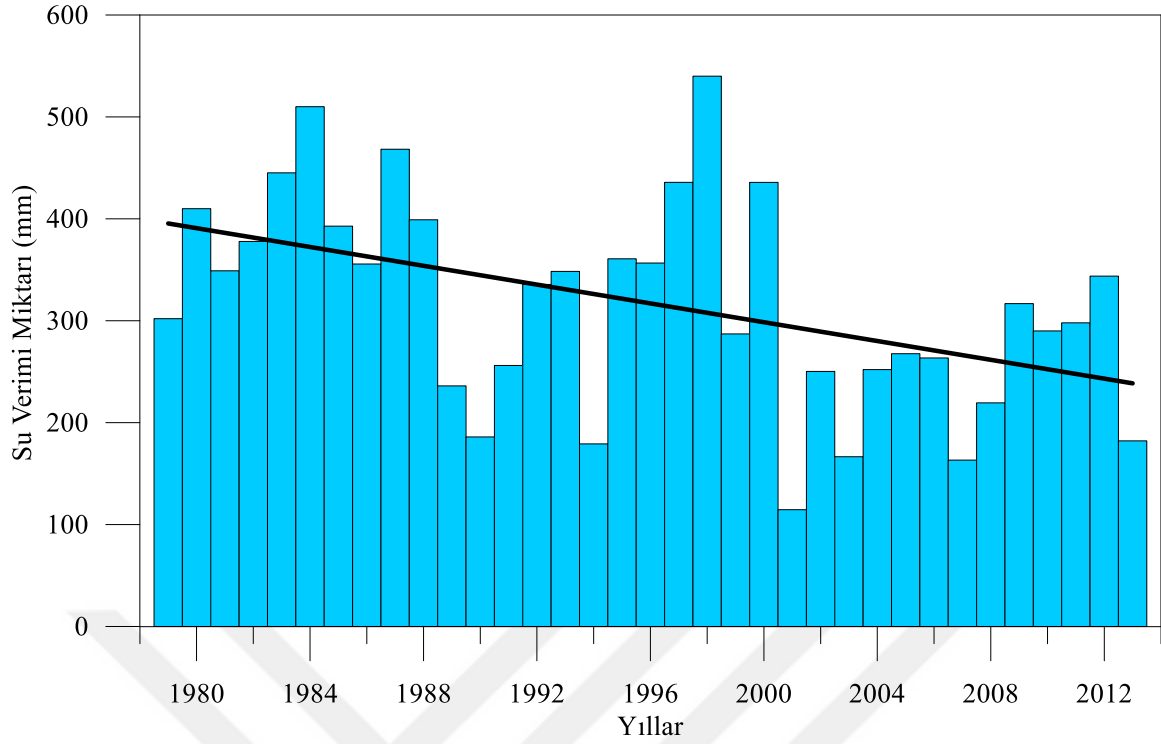
Model sonuçlarına göre, uzun dönem ortalamalarda yıllık toplam su verimi miktarı 318 mm'dir. Bu miktarın % 76'lık kısmı Ocak-Haziran ayları arasında gerçekleşirken, maksimum miktar 55 mm ile Mart ayında oluşmaktadır. Bunun en temel nedeni Mart ayında 21 mm ile eriyen kar miktarının maksimumda olmasıdır. Ayrıca eriyen kara ek olarak Mart ayında ortalama 94 mm'lik yağış düşmesi de su verimine katkı sağlamaktadır. Yıl içerisinde en fazla yağışın gerçekleştiği aylar sırasıyla 101 mm ve 98 mm ile Aralık ve Ocak aylarıdır. Buna rağmen Aralık ve Ocak aylarında su verimi miktarı 14 mm ve 27 mm'de kalmaktadır. Havza için yüzeysel akışın beslediği en önemli kaynak kar yağışı ve sonrasında bu karın erimesi ile harekete başlaması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle Aralık ve Ocak aylarında havzaya düşen yağış fazla olmasına rağmen yüzeysel akışı besleyen su verimi miktarı düşük kalmaktadır (Kim vd. 1998).

Yılın tamamı incelendiğinde toplam yağış miktarı 912 mm olurken, bu yağışın % 35'i olan 318 mm'lik su verimi miktarı gerçekleşmektedir. Havza içerisinde Ekim ayından başlayarak Haziran ayına kadar yoğun bir şekilde devam eden yağış, özellikle Ocak ayından sonra toprak neminin maksimuma ulaşmasını sağlamaktadır. Nisan ayında sadece 2 mm eriyen kar miktarı olmasına rağmen, o dönemde hem yağışın 94 mm gibi yüksek miktarda gerçekleşmesi, hemde toprağın neme doymuş olması sebebi ile 51 mm gibi yüksek bir su verimi miktarı ortaya çıkmaktadır. Bu durum havza için kar yağışının su verimi üzerine olan olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır (Pradhanang vd. 2011).

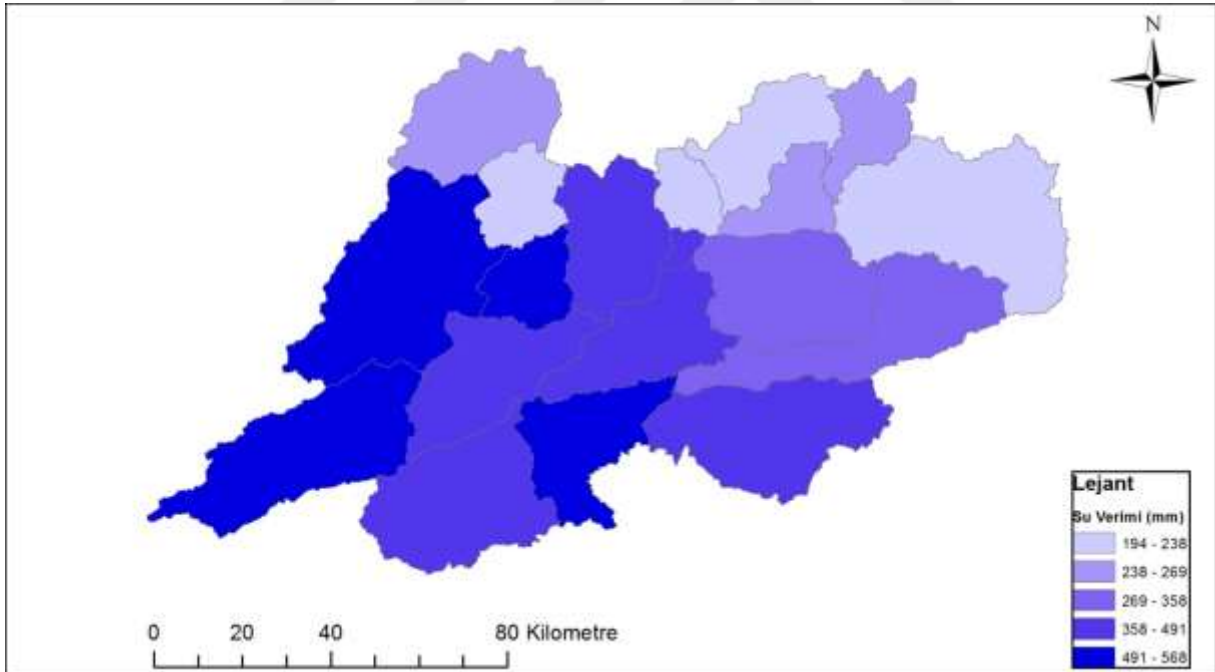


**Şekil 6.13** Çalışma alanı için su verimi miktarının aylara göre değişimi (1979-2013)

Çalışma alanı için su verimi miktarının yıllara göre değişimi Şekil 6.14'te gösterilmektedir. 1979 ile 1988 arasındaki 10 yıllık periyot ve 2004 ile 2013 arasında dönem karşılaştırıldığında gerçekleşen yıllık ortalama su verimi miktarı sırasıyla 401 mm ve 260 mm olmaktadır. Buda yaklaşık olarak % 35'lik bir azalmaya karşılık gelmektedir. Havza bazındaki incelemeye bakıldığında ise çalışma alanının batısında yer alan Bolu, Devrek, Mengen, güneyde Köroğlu Dağları, Gerede'nin bulunduğu alt havzalarda daha yüksek su verimi gerçekleşirken, havzanın doğusuna doğru gidildikçe miktarın azaldığı gözlenmektedir. Bunun temel nedeni bu bölgelerin daha fazla yağış alması, ve yüksekliğe bağlı olarak yağış tipinin de kar olmasıdır. Çalışma alanı içerisindeki su verimi miktarının alt havza bazındaki dağılımı Şekil 6.15'te gösterilmektedir.



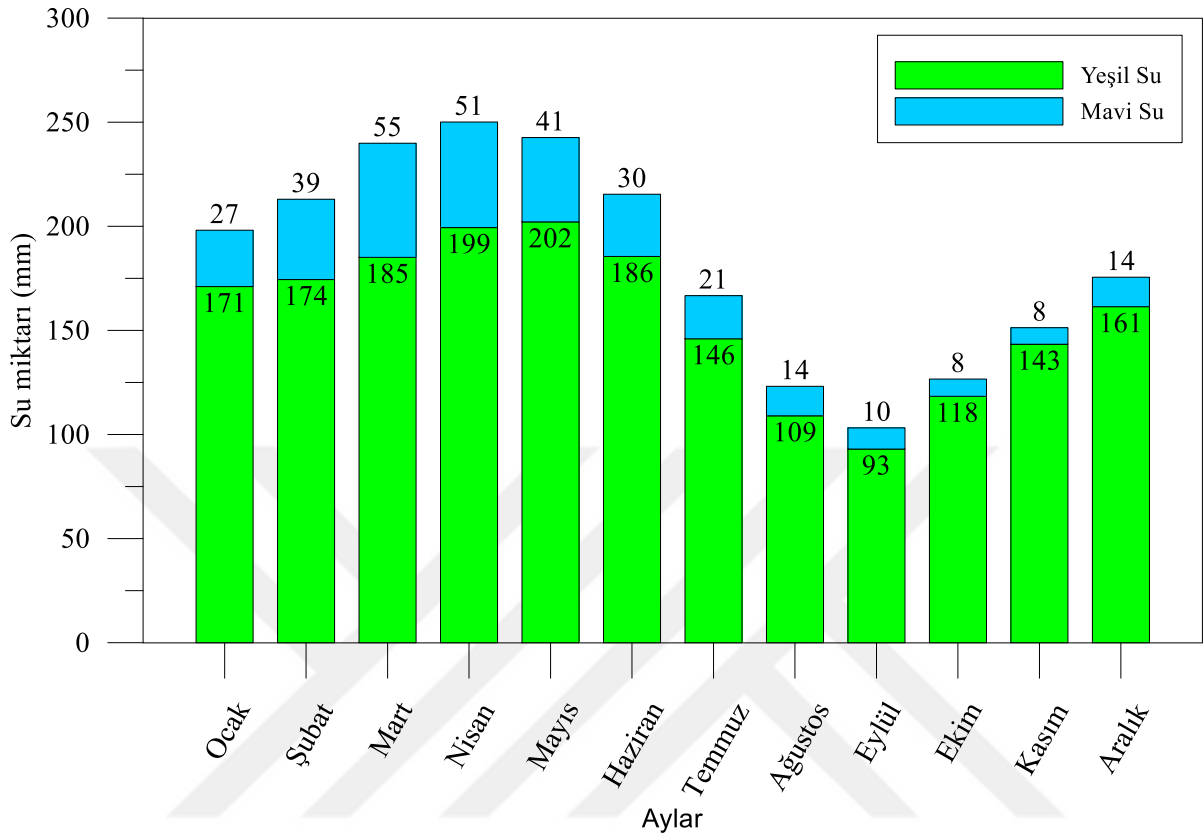
Şekil 6.14 Çalışma alanı için su verimi miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013)



Şekil 6.15 Çalışma alanı içerisindeki su verimi miktarının yıllık dağılımını

Yeşil ve mavi su için aylık model sonuçları incelendiğinde, her ikisinde de yılın ilk 6 ayında yağış ve toprak nemine bağlı olarak su miktarları artmakta, sonraki 6 ayda göreceli olarak

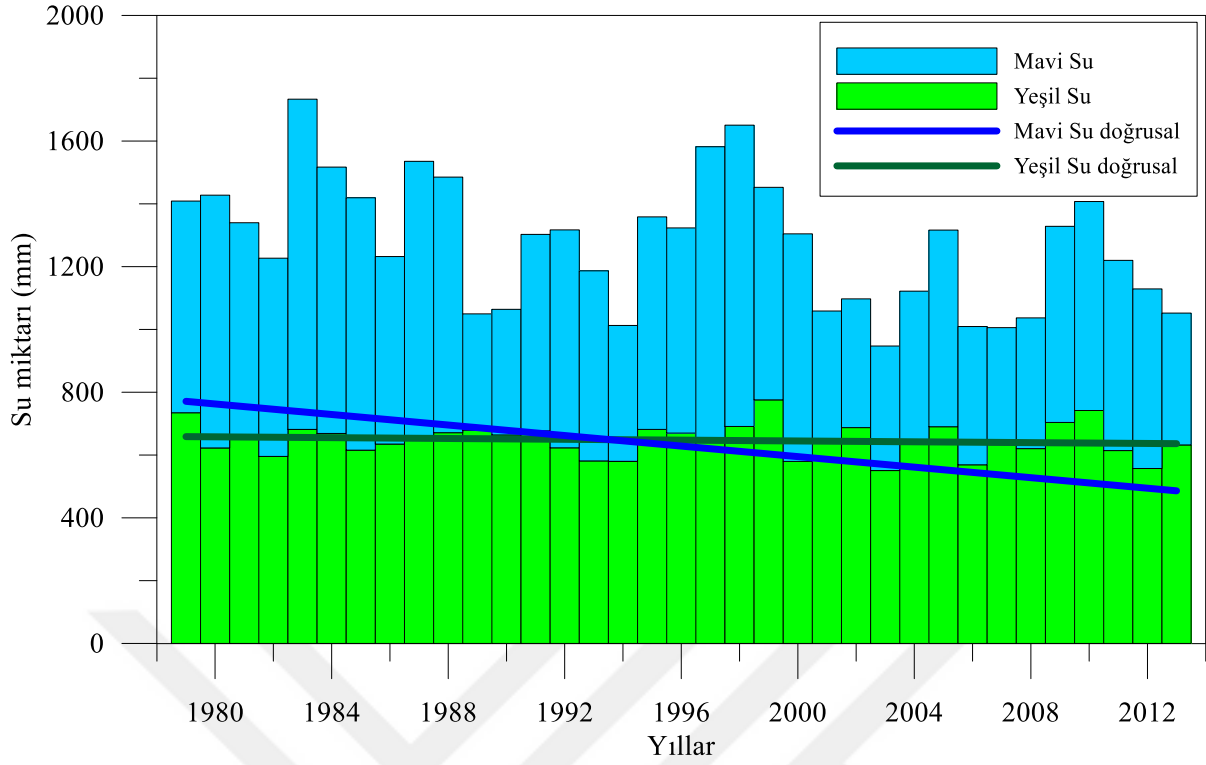
azalış göstermektedir. Çalışma alanı için yeşil su ve mavi su miktarlarının aylık değişimleri Şekil 6.16'da, yıllık değişimler ise Şekil 6.17'de gösterilmektedir.



**Şekil 6.16** Çalışma alanı için yeşil ve mavi su miktarlarının aylara göre değişimi (1979-2013)

Model sonuçlarına göre aylık bazda yeşil su miktarı yağışların artması, kar sularının erimesi ve toprak neminin iyice doyması ile birlikte Nisan ve Mayıs aylarında maksimuma erişmektedir. Sonrasında yağışların azalması ile bu miktar azalmakta fakat hava sıcaklarının artmasına bağlı olarak evapotranspiasyonun da artış göstermesi nedeniyle belirli bir seviyenin altına düşmemektedir (Quinteiro vd. 2015). Mavi su, Aralık ayında yağışların yoğunlaşması ile birlikte artmaya başlamakta, Mart ayındaki yoğun eriyen kar ile birlikte 55 mm ile maksimuma erişmektedir. Yaz aylarında ise sıcaklığa bağlı olarak çok düşük seviyelere inmektedir. Yıllık olarak değişimler incelendiğinde yeşil su miktarında uzun dönemde anlamlı bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Mavi suda ise durum bu şekilde olmamakla birlikte, çalışma periyodunun ilk on ve son on yılı arasındaki azalma miktarı %35'tür. Buda kullanma amaçlı erişilebilir su miktarında ciddi bir azalmanın olduğunu ortaya koymaktadır.

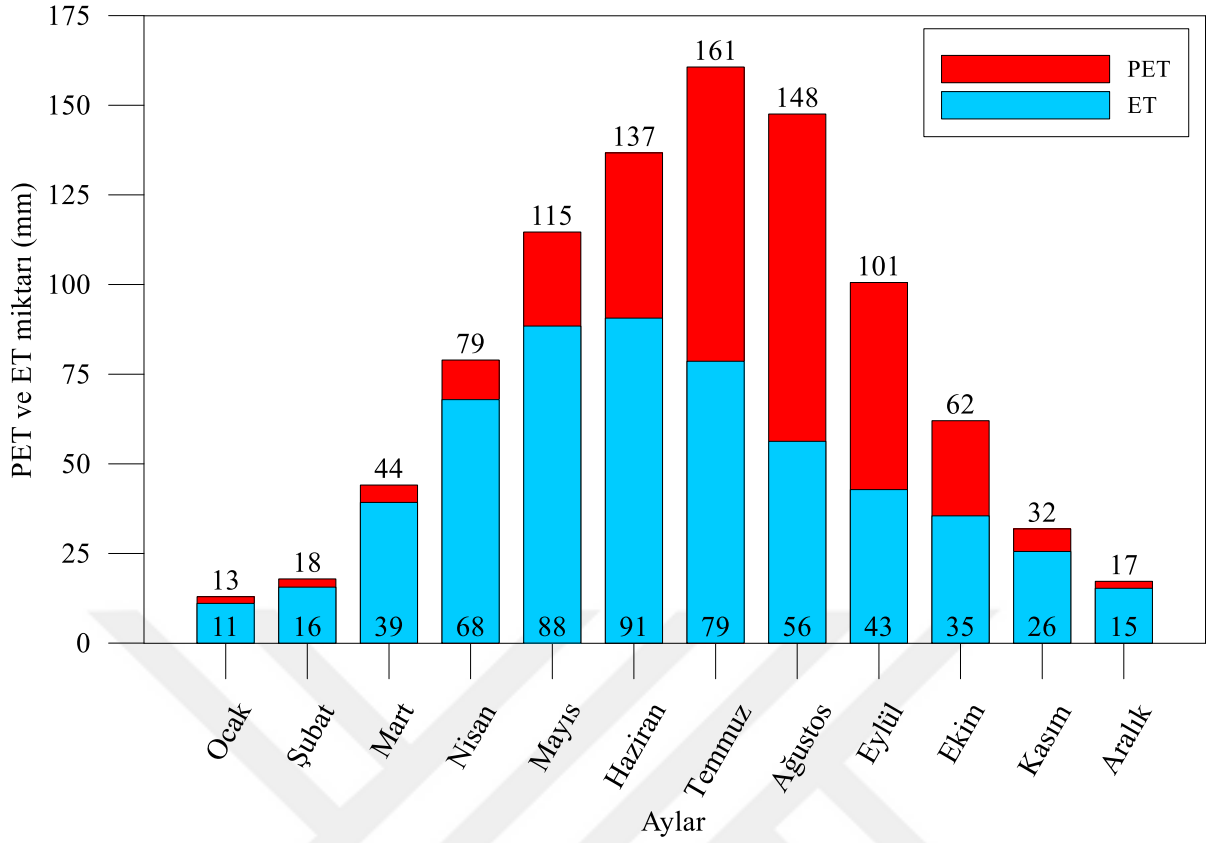




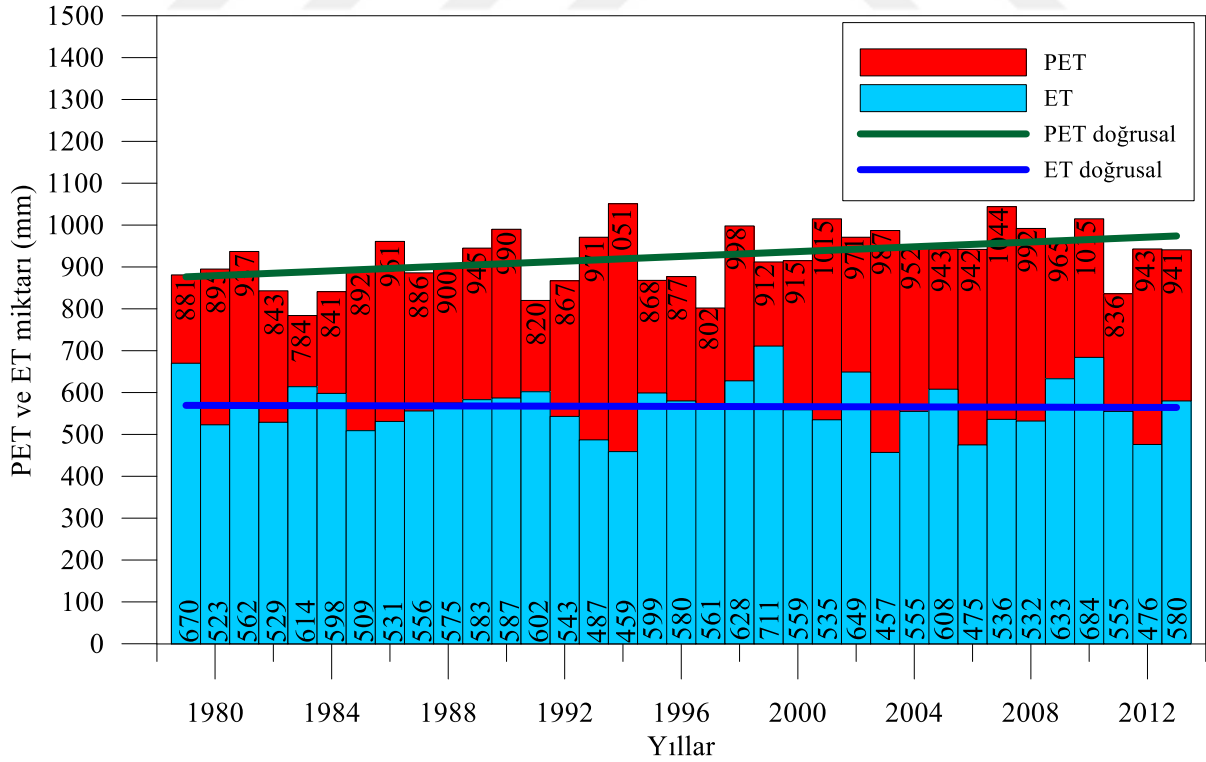
**Şekil 6.17** Çalışma alanı için yeşil ve mavi su miktarlarının yıllara göre değişimi (1979-2013)

Diğer bir önemli hidrolojik bileşen ET ve PET miktarlarıdır. ET, buharlaşma ve terleme toplamı, PET ise toprakta su kısıtlaması olmaksızın, düzenli olarak alanın tamamına dağılmış bitki örtüsü koşullarında gerçekleşecek maksimum buharlaşma ve terlemenin toplamıdır. Çalışma alanı için PET ve ET miktarlarının aylara göre değişimi Şekil 6.18’de gösterilmektedir.

Aylık model sonuçları incelendiğinde, Ekim ayından Mayıs ayına kadar PET’un %80’inden daha fazla ET gerçekleştiği, başka bir deyişle kısmen de olsa yeterli miktarda suyun var olduğu söylenebilir. Ancak Mayıs ayından itibaren aradaki fark daha açılarak Ağustos ayında 92 mm ile maksimumu bulmaktadır. Yağış verileri incelendiğinde Haziran – Ağustos arası üç aylık yaz döneminde havzaya toplam 147 mm yağış düşerken, uygun koşullarda gerçekleşecek maksimumu terleme ve buharlaşma miktarı 446 mm, gerçekleşen ET miktarı ise 226 mm olmuştur. Yaz döneminde düşen toplam yağışın % 153’ü kadar bir ET gerçekleşmekte, yılın tamamında ise bu oran % 62’dir. Bu da yaz aylarında gerçekleşen buharlaşma ve terlemenin, havza hidrolojisini etkileyen en önemli bileşen olduğunu göstermektedir (Sun vd. 2014). Çalışma alanı için PET ve ET miktarlarının yıllara göre değişimi (1979-2013) Şekil 6.19’da gösterilmektedir.



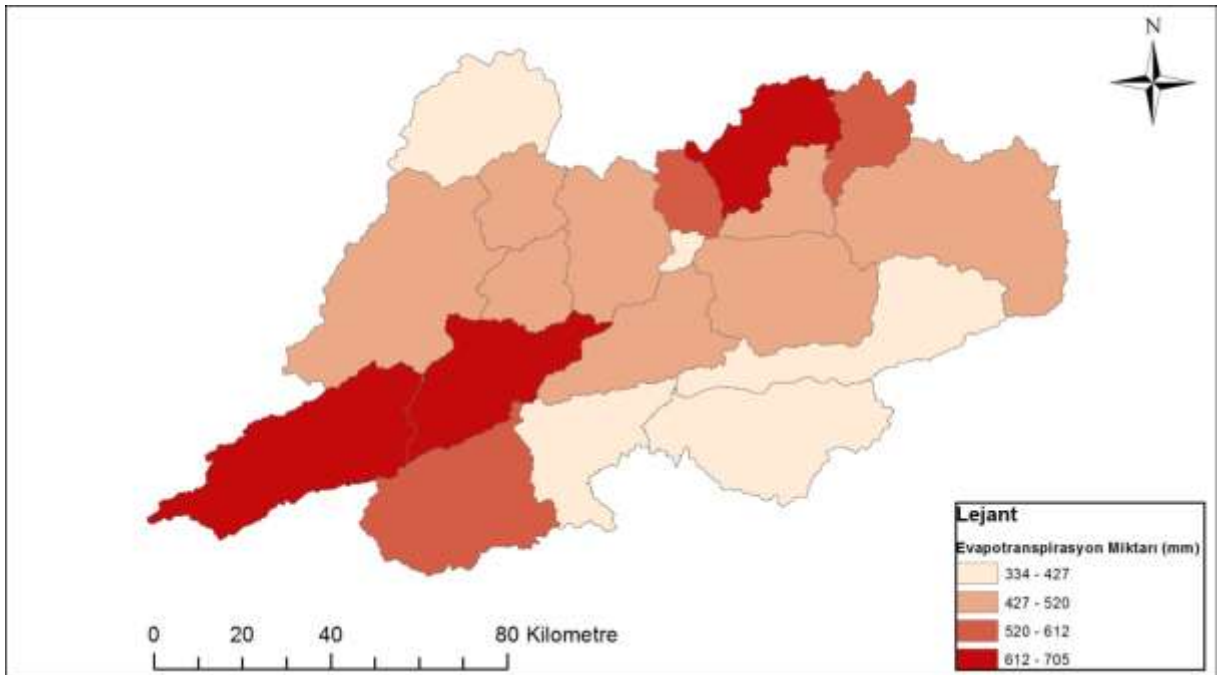
Şekil 6.18 Çalışma alanı için PET ve ET miktarlarının aylara göre değişimi (1979-2013)



Şekil 6.19 Çalışma alanı için PET ve ET miktarlarının yıllara göre değişimi (1979-2013)

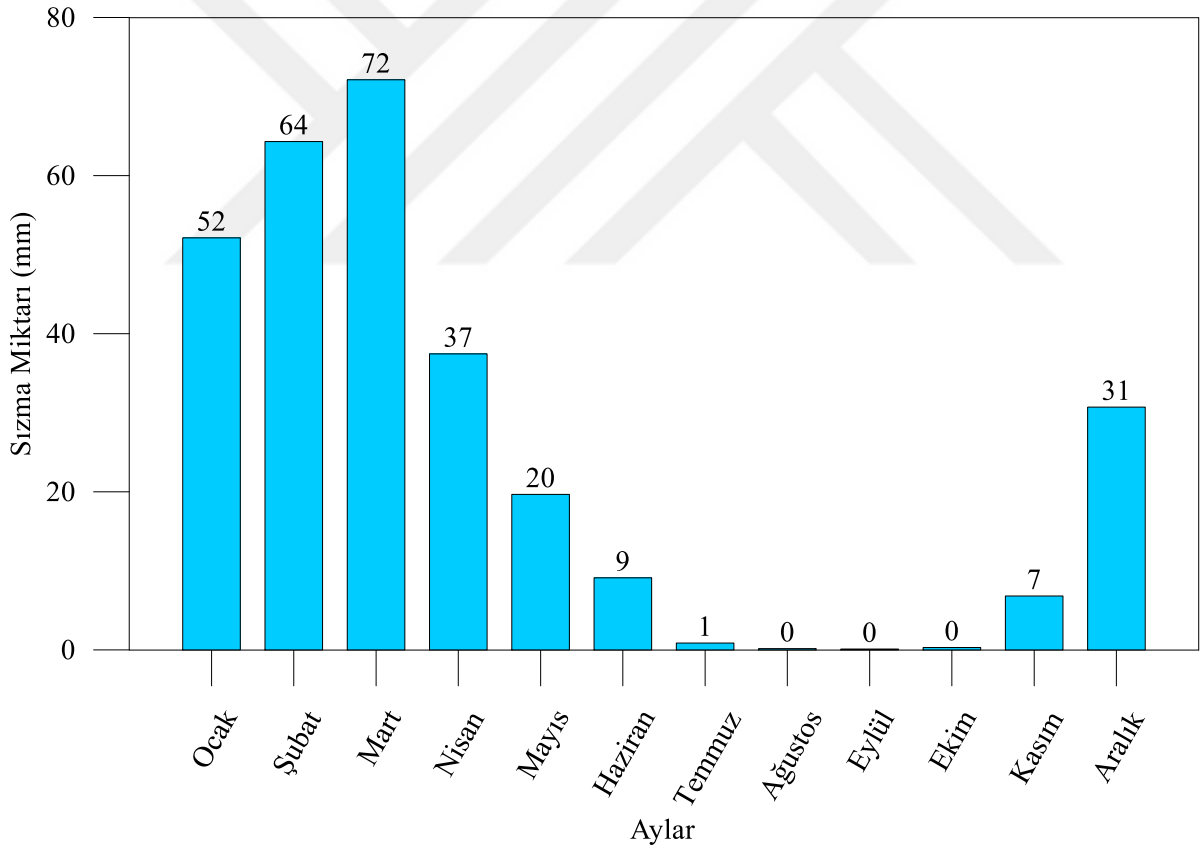
Çalışma periyodundaki yıllık PET ve ET sonuçlarına bakıldığında, ET miktarlarında herhangi bir değişimin olmadığı, PET miktarlarında ise ilk on ve son on yılı arasında yaklaşık % 8.5 gibi çokta yüksek olmayan bir artış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle PET miktarlarının artmasına rağmen, ET sonuçlarında bir değişiklik olmaması yılın bazı dönemlerinde havzada yeterli su olmaması nedeniyle ET sonuçlarında artışın gözlenememesine yol açtığı ile açıklanabilir. Bu sonuçlara göre tüm hidrolojik bileşenlerde uzun dönemde azalma gözlenirken buharlaşma ve terleme miktarındaki değişim olmaması, azalmadaki temel nedenin yağış miktarının düşmesi olduğunu ortaya koymaktadır (Samadi 2017).

Şekil 6.20’de gösterilen çalışma alanı içerisindeki yıllık ET miktarının dağılımı incelendiğinde, özellikle havzanın güney batısındaki Bolu, Mengen ve Gerede’nin yer aldığı havzalarda gerçekleşen buharlaşma ve terleme miktarlarının maksimuma ulaştığı gözlenmektedir. Bu bölgedeki güneş radyasyonunun minimum değerlerde olmasına rağmen, düşen yağış miktarının 1100 ile 1344 mm arasında maksimum değerlere ulaşması gerçekleşen ET miktarının yüksek seviyelere çıkmasını sağlamıştır. Çalışma alanının kuzey doğusunda yer alan Araç Çayın’ın bulunduğu bölgedeki yüksek ET miktarları ise, düşen yağışın yaklaşık 800-900 mm aralığı gibi düşük yağış miktarı olmamasına rağmen çalışma alanı için maksimum güneş radyasyonu alanı içerisinde yer alması ile açıklanabilmektedir (Samadi 2017).



Şekil 6.20 Çalışma alanı içerisindeki yıllık ortalama ET dağılımı

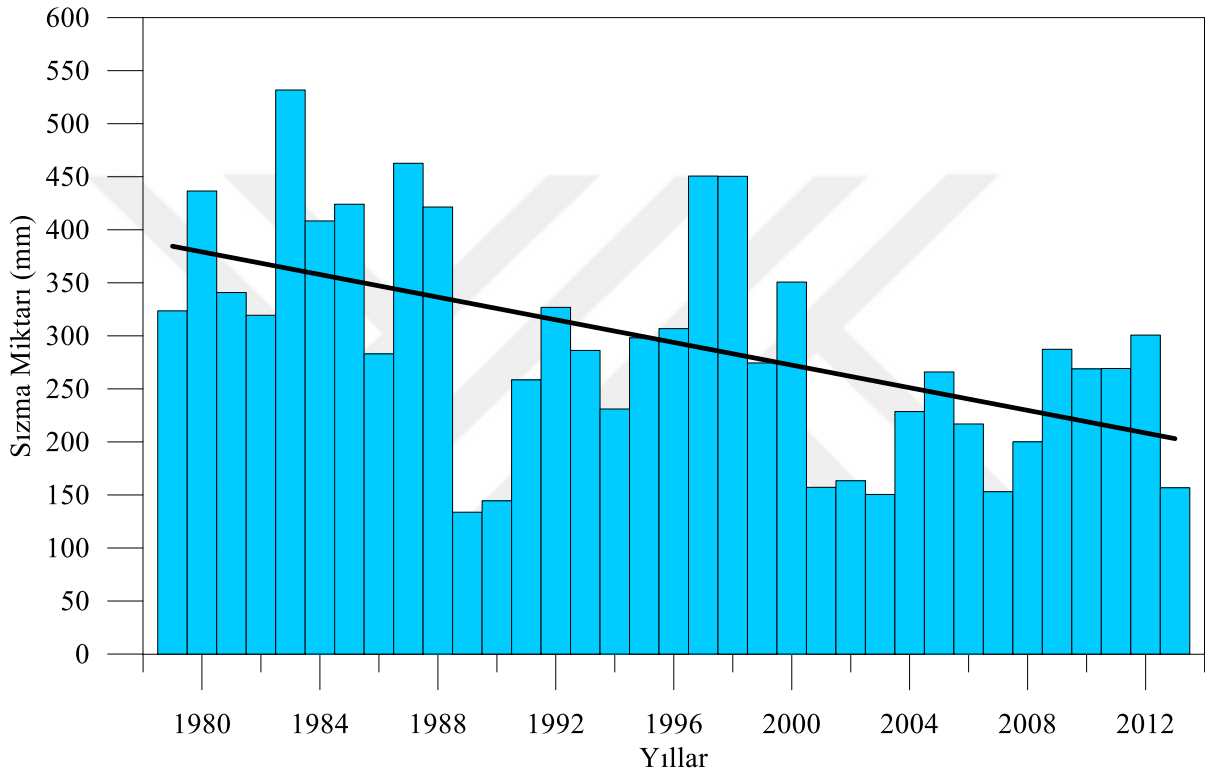
Bir diğer hidrolojik bileşen olan sızmaya ait aylık olarak değişim Şekil 6.21’de gösterilmektedir. Kök bölgesinin sızdırdığı su miktarı olan bileşen, Aralık – Nisan döneminde hem yağış, hem de eriyen kar suları ile artış göstermektedir. Uzun dönem yıllık toplam sızma miktarı 293 mm olmakla birlikte, çalışma alanına düşen yıllık toplam yağışın % 32’sini oluşturmaktadır. Kök bölgesinden sızan su, yeraltı suyu, yüzeysel altı akışı ve yüzeysel akışıda beslemektedir. Sızma miktarları, su verimi miktarları ile karşılaştırıldığında Aralık-Mart döneminde sızma miktarlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun en önemli nedenlerinden birisi bu dönemde toprak neminin yüksek olmasına bağlı olarak, gerçekleşen yüksek yağış ile sızan su miktarının artışıdır. Diğer bir neden ise Nisan ayı itibariyle buharlaşma ve terlemenin artması ile sızma miktarının azalması, yaz döneminde maksimuma ulaşan ET miktarı, düşen toprak nemi ve yağış miktarına bağlı olarak sızan su miktarı da azalmaktadır (Tripathi vd. 2006).



**Şekil 6.21** Çalışma alanı için sızma miktarının aylara göre değişimi (1979-2013)

Yıllık model sonuçları incelendiğinde hidrolojik bileşenler içerisindeki en keskin azalma eğiliminde olan sızma miktarıdır. 1979 ile 1988 arasındaki 10 yıllık dönem ve 2004 ile 2013 arasındaki son 10 yıllık dönem karşılaştırıldığında gerçekleşen yıllık ortalama sızma miktarı

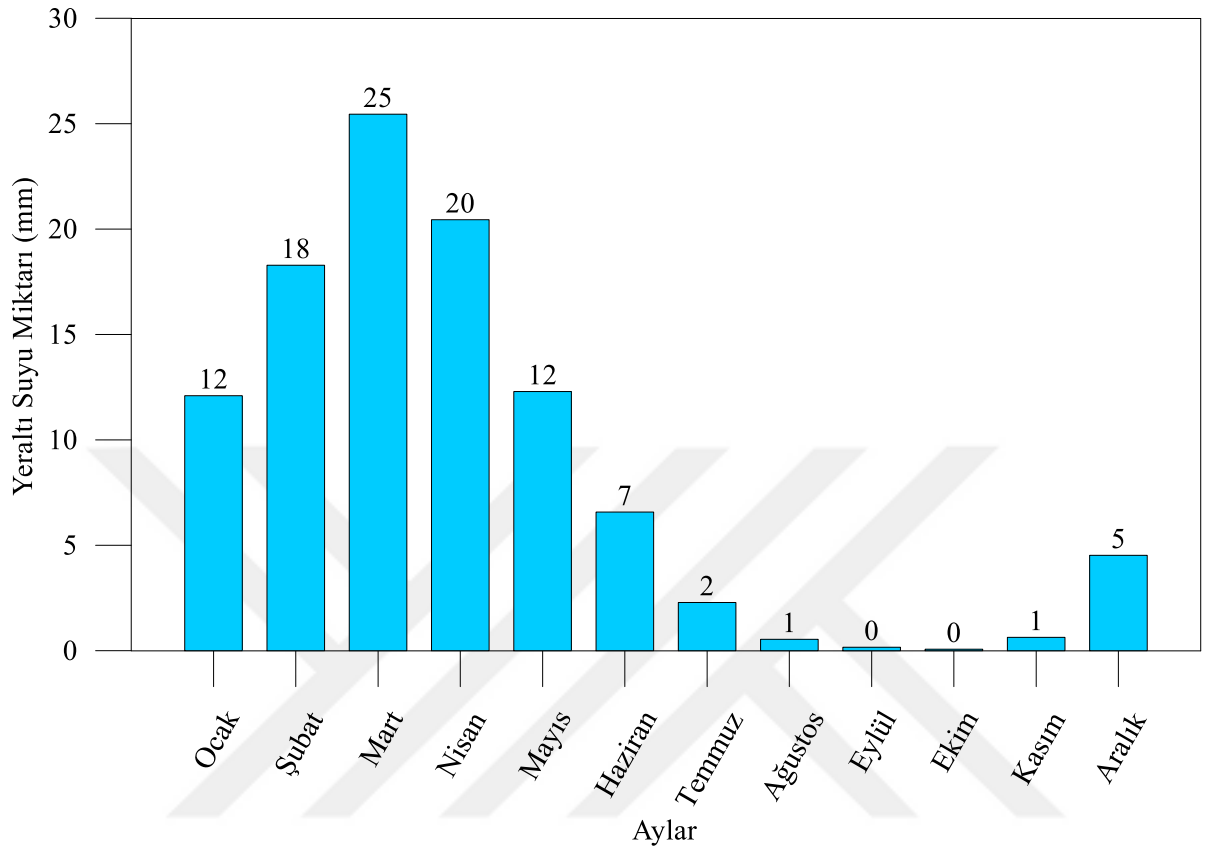
sırasıyla 395 mm ve 235 mm olup, bu iki dönem arasında yaklaşık % 41 oranında bir azalma olduğu görülmektedir. Son 13 yılda gerçekleşen sızma miktarlarından sadece biri 7 mm gibi küçük bir fark ile uzun dönem ortalamasının üzerinde kalabilmiştir. Belirtilen aynı dönemde yağış miktarlarında yaklaşık % 18’lik bir azalma gözlenirken, sızma miktarındaki hızlı düşüşün temel nedeni, eriyen kar miktarının azalması ve her geçen yıl toprak neminin azalması etkisinin kümülatif olarak devam etmesi sonucu daha fazla hissedilmesidir. Çalışma alanı için sızma miktarının yıllara göre değişimi Şekil 6.22’de gösterilmektedir.



**Şekil 6.22** Çalışma alanı için sızma miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013)

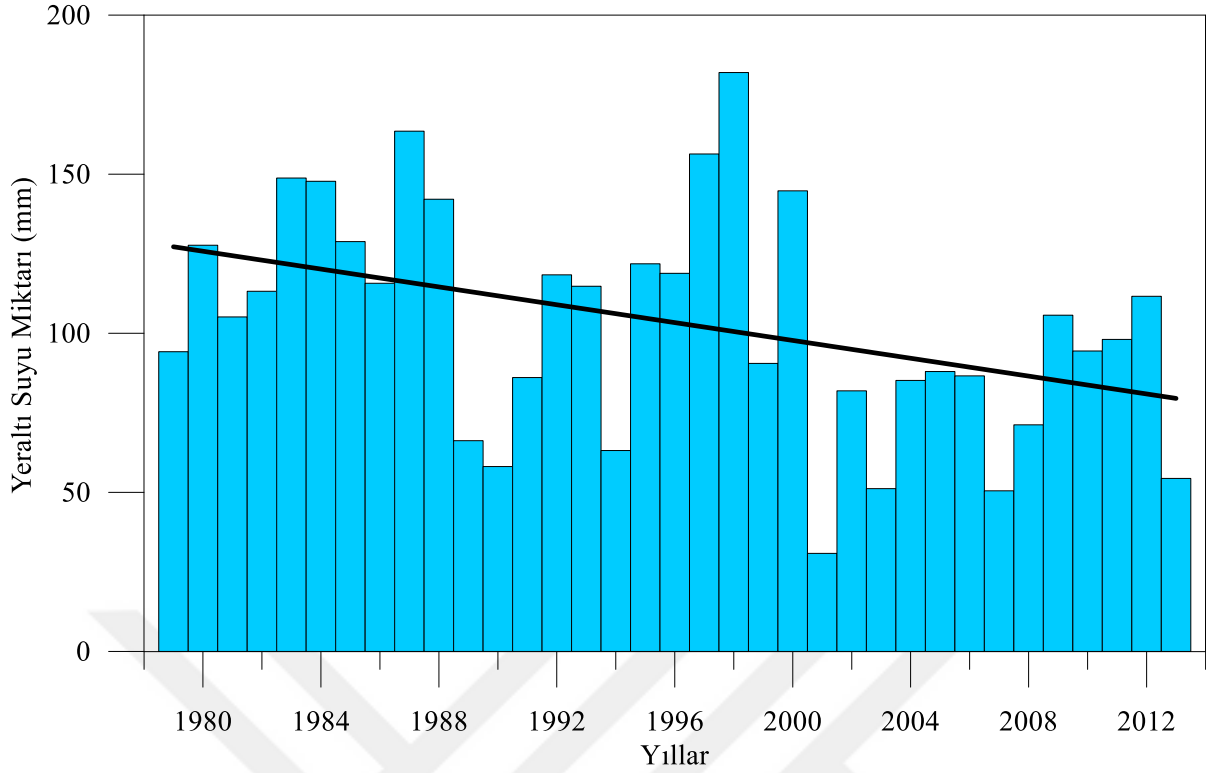
Önemli hidrolojik bileşenlerden birisi de yer altı suyu miktarıdır. Yer altı suyu, sızma sırasında toprak içerisinde kalan toprak nemi ve yüzeysel akışı besleyen kısım çıkarıldıktan sonra derin akifere ulaşan miktardır. Toprak boyunca filtrelenen suyun içerisindeki kirleticilerin toprak tarafından tutulması nedeniyle yüzeysel sulara göre daha kaliteli su kaynağı olarak kabul edilmektedir (Appleyard 1993). Çalışma alanı için yeraltı suyu miktarının aylara göre değişimi Şekil 6.23’te, yeraltı suyu miktarının yıllara göre değişimi ise Şekil 6.24’de gösterilmektedir. Yıllık toplam yeraltı suyuna ulaşan miktar 103 mm olup yıllık toplam yağışın %11,3’üne karşılık gelmektedir. Havzada bitki örtüsüne bağlı olarak terleme

miktarı çok yüksek olması nedeniyle düşen yağışın büyük bir kısmı yer altı suyuna ulaşmadan terleme ve buharlaşma yoluyla atmosfere salınmaktadır (Briones vd. 2016).



**Şekil 6.23** Çalışma alanı için yeraltı suyu miktarının aylara göre değişimi (1979-2013)

Şekil 6.23 incelendiğinde, eriyen kar miktarının aylık değişimi ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ocak ayından itibaren başlayan artışın en büyük sebebi eriyen kar miktarının büyük oranda yeraltı suyunu beslemesinden kaynaklanmaktadır (Troin ve Caya 2014). Modelin çalışma süresindeki (1979-2013) ilk 10 yıllık ve son 10 yıllık dönem arasındaki azalma değişiminin % 34 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.24 Çalışma alanı için yeraltı suyu miktarının yıllara göre değişimi (1979-2013)

## 6.5 İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN AKIM SONUÇLARINA ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Nüfus artışı, ekonomik gelişmeler, arazi kullanımındaki değişim ve kentleşme sonucunda iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki mevcut baskısının artacağı düşünülmektedir. Bölgesel ölçekte, dağlardaki kar örtüsü, küçük buzullar tatlı su kullanımında hayati bir rol oynamaktadır. Buzullardaki yaygın kütle kayıpları ve son on yılda kar örtüsünün azalması durumu 21. yüzyıl boyunca hızlanarak devam etmesi beklenmektedir. Bu da havzalardaki su potansiyelini etkilemekle birlikte, bölgelerdeki akışların mevsimselliğini de değiştirmektedir. Yağışlardaki ve sıcaklıklardaki değişimler ulaşılabilir su miktarını da olumsuz yönde etkilemektedir. Kuraklığa bağlı olarak tarım, enerji, su temini, sağlık alanlarındaki sektörler negatif etkilere olacaktır. Ayrıca bölgesel olarak, iklim değişikliği sonucunda sulama suyu talebinde büyük artışlar öngörülmektedir (IPCC AR4 2007).

Yapılan çalışmada bu etkilerin Filyos Çayı Havzası'na olan hidrolojik etkilerinin ortaya konulması için kalibrasyonu ve validasyonu yapılan hidrolojik modelin iklim senaryoları

altında nasıl etkileneceği ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışmada farklı araştırma merkezleri tarafından Küresel Çevrim Modellerinden (GCM) üretilen ölçeği küçültülmüş A1B ve A2 isimli iki farklı iklim senaryosu kullanılmıştır (CMIP3 data, Meehl vd. 2007). SWAT modelinde çalıştırılan küresel çevrim modellerine ilişkin bilgiler Çizelge 6.3'te gösterilmektedir.

**Çizelge 6.3** SWAT modelinde çalıştırılan küresel çevrim modelleri

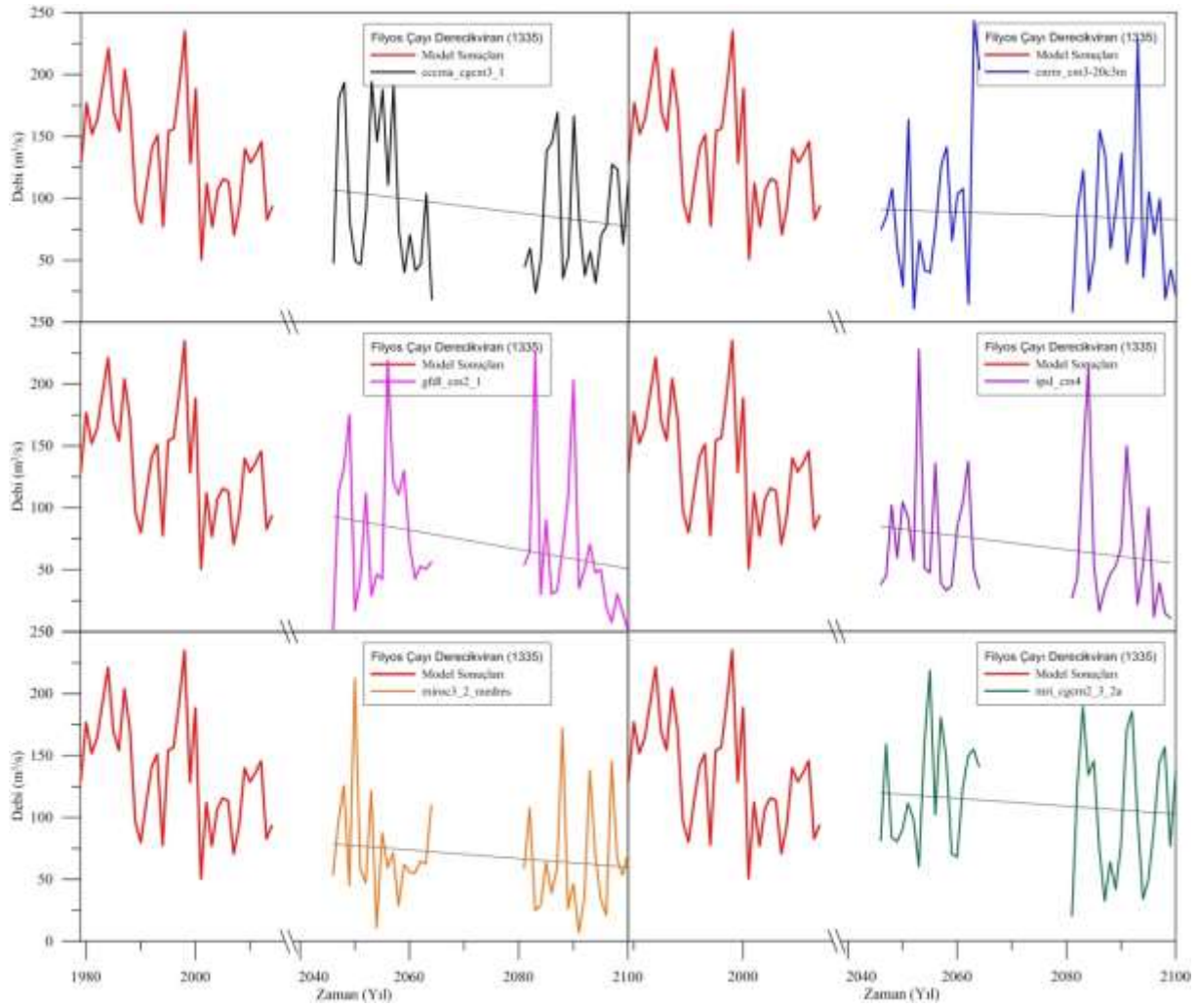
| Model Numarası | Model Grubu   | CMIP3 Model     |
|----------------|---|-----------------|
| 1              | Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis   | cccma-cgcm3.1   |
| 2              | Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques, France  | cnrm-cm3        |
| 3              | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA  | gfdl-cm2.1      |
| 4              | Institut Pierre Simon Laplace, France   | ipsl-cm4        |
| 5              | Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan | miroc3.2_medres |
| 6              | Meteorological Research Institute, Japan  | mri-cgcm2.3.2a  |

A1 senaryo ailesi, çok hızlı bir ekonomik büyümenin gerçekleşeceği, gelecekteki dünya nüfusunun yüzyılın ortalarında maksimuma ulaşacağı ve sonrasında tekrar azalacağını öngörmektedir. Ayrıca, daha verimli teknolojilerin kullanımının artacağı varsayımında bulunmaktadır. Bölgelerin arasında farklılığın azalacağı, toplumlar arasında sosyal ve kültürel etkileşimin artacağı ve kişi başına düşen gelirdeki bölgesel farklılıklarda önemli bir azalma olacağı kabulü de yapılmaktadır. A1 senaryo ailesinde, enerji sistemindeki teknolojik değişimi tanımlayan 3 alt grup senaryo bulunmaktadır. Bunlar; fosil yakıtların yoğun kullanıldığı A1FI, yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğunlukla kullanıldığı A1T ve her ikisinin dengeli bir şekilde kullanıldığı A1B senaryolarıdır. A2 senaryo ailesinde ise, dünya heterojen olarak tanımlanmıştır. Bu senaryoda bölgeler arasında doğurganlık farklılıklarının devam edeceği ve bu nedenle nüfusun sürekli artacağı varsamında bulunmaktadır. Ülkeler arasındaki ekonomik farkların devam edeceği, teknoloji ve gelir dağılımındaki yakınlaşmanın minimum seviyede kalacağı bir dünya öngörülmektedir. Günümüzdeki heterojen dünya yapısına en yakın olan senaryolardan birisi olan A2 senaryosu yaygın olarak kullanılmaktadır (IPCC 2000).



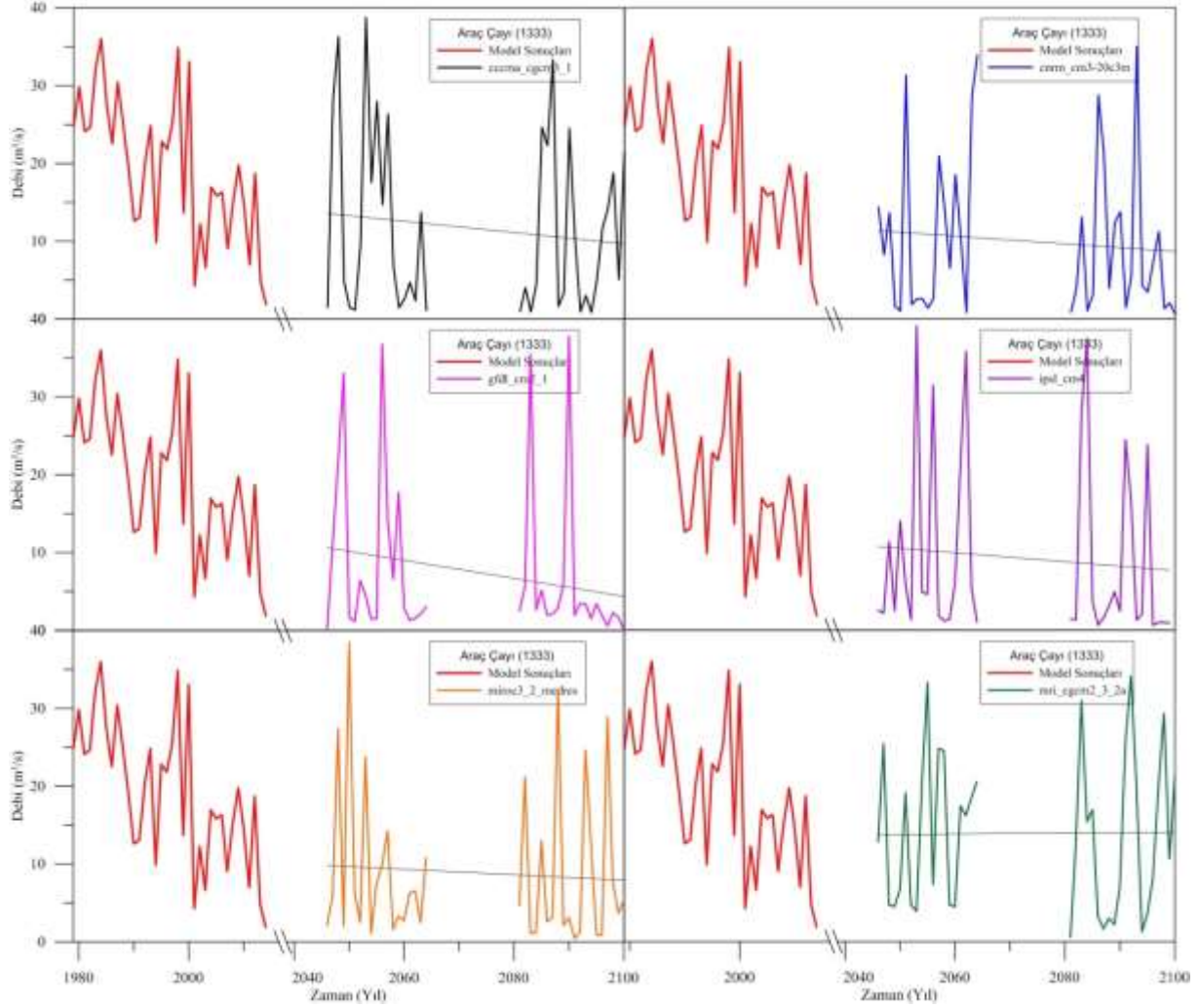
A1B ve A2 senaryolarına ait meteorolojik veriler model entegre edilerek 2046-2064 (birinci dönem) ve 2081-2100 (ikinci dönem) yılları arasındaki iki dönemde model çalıştırılmıştır. Akım sonucu değerlendirmeleri, performans kriterleri iyi ve çok iyi başarı derecesine sahip olan Filyos Çayı Derecikviran ve Araç Çayı istasyonları için gerçekleştirilmiştir (Moriassi 2007). SRES A1B senaryosu Filyos Çayı Derecikviran istasyonu akım sonuçları Şekil 6.25'te, Araç Çayı istasyonu akım sonuçları Şekil 6.26'da gösterilmektedir.

Filyos Çayı Derecikviran istasyonu akım sonuçları, A1B senaryosunda 6 model grubu için de azalan bir eğilim içerisinde. Şekil 6.26 incelendiğinde tüm sonuçlarda, belirli dönemlerde yağışa bağlı olarak yüksek ve düşük akım seviyeleri görülmüştür. Birinci dönemde yıllık akım miktarlarındaki azalma % 13 ile % 45 arasında gerçekleşirken, ikinci dönemde bu oran artarak %26 ile %55 seviyelerine çıkmıştır. Model gruplarının ortalamalarına bakıldığında, 1979-2013 yılları arasındaki yıllık ortalama debi  $137,7 \text{ m}^3/\text{s}$ 'den birinci dönemde ortalama % 34 azalarak  $91,5 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye, ikinci dönemde ortalama % 45 azalarak  $75,7 \text{ m}^3/\text{s}$  olmuştur (Paraluji 2010).



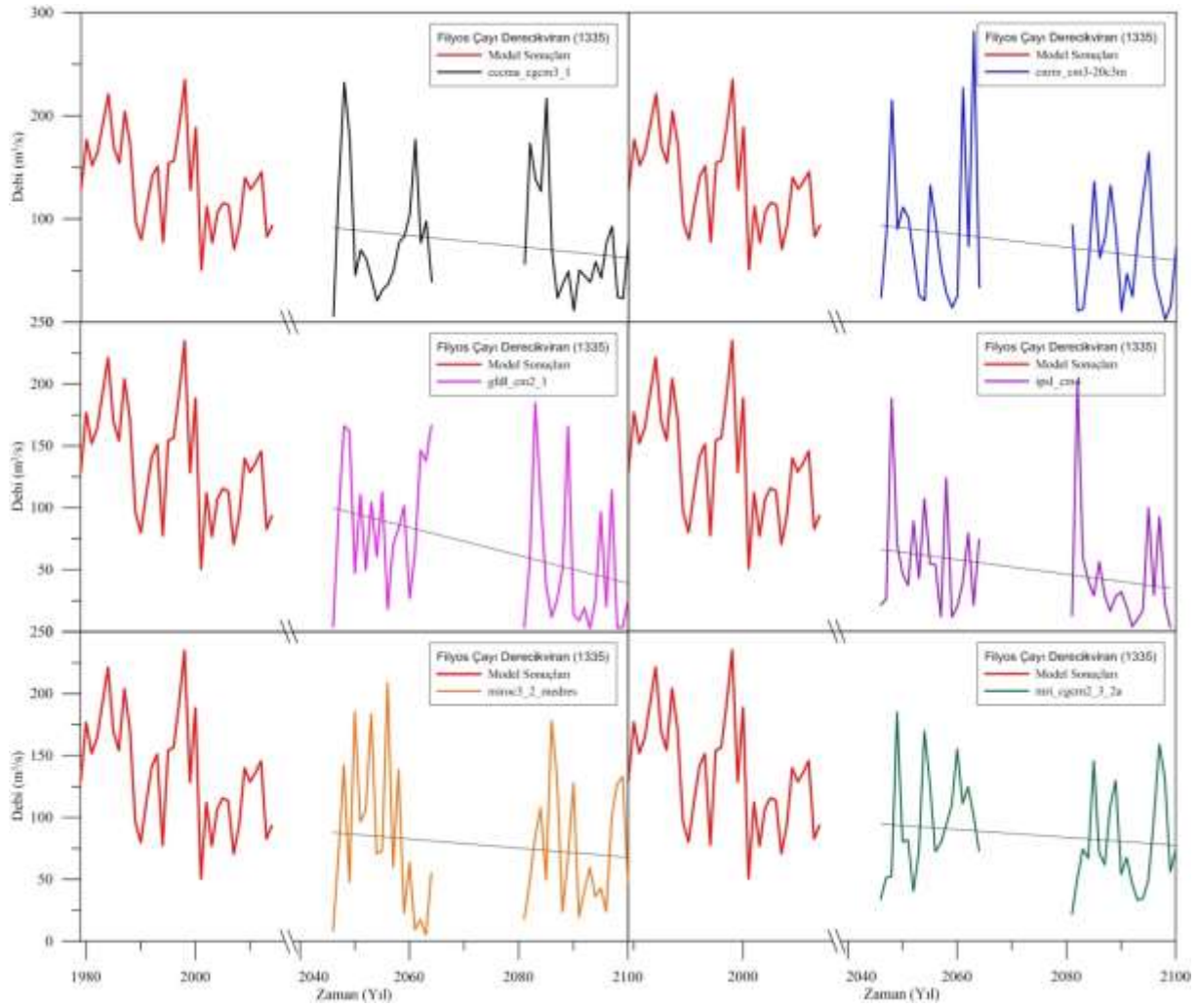
**Şekil 6.25** SRES A1B senaryosu Filyos Çayı Derecikviran istasyonu akım sonuçları

Araç Çayı istasyonu akım sonuçları A1B senaryosunda 6 model grubu için de Filyos Çayı'na göre daha yüksek bir azalma göstermiştir. Bunun nedeni istasyonun bulunduğu bölgenin yağış miktarının, çalışma alanının ortalama yağış miktarından daha düşük olması ve aynı zamanda havza içerisindeki en yüksek güneş radyasyonunun bu bölgede gerçekleşmesidir. Birinci dönemde yıllık akım miktarlarındaki azalma % 27 ile % 53 arasında gerçekleşirken, ikinci dönemde bu oran artarak % 32 ile % 65 seviyelerine çıkmıştır. Model gruplarının ortalamalarına bakıldığında, 1979-2013 yılları arasındaki yıllık ortalama debi  $19,7 \text{ m}^3/\text{s}$ 'den birinci dönemde ortalama % 42 azalarak  $11,4 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye, ikinci dönemde ortalama % 52 azalarak  $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$  olmuştur (Al-Mukhtar vd. 2014).



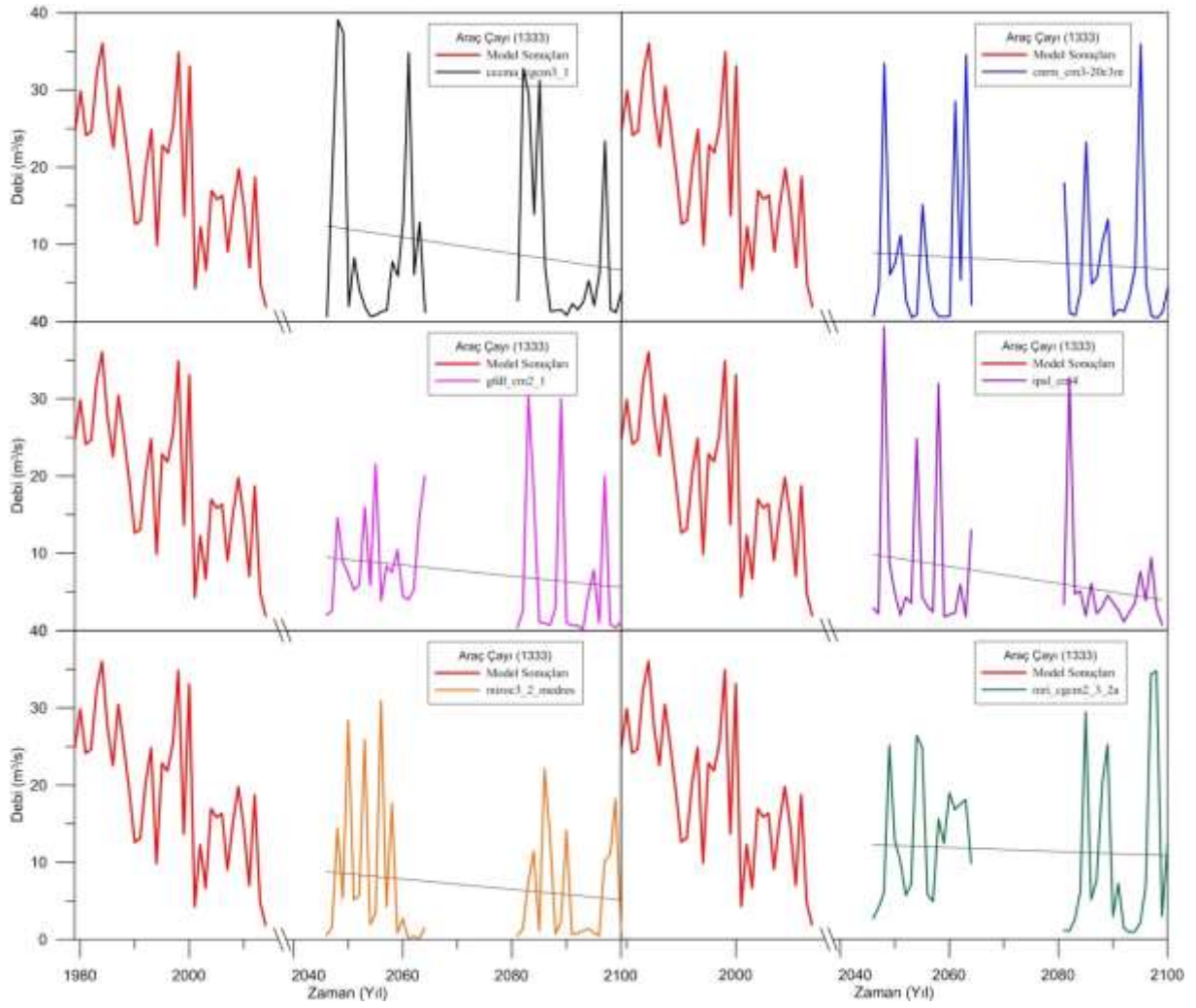
**Şekil 6.26** SRES A1B senaryosu Araç Çayı istasyonu akım sonuçları

SRES A2 senaryosu Filyos Çayı Derecikviran istasyonu akım sonuçları Şekil 6.27’de, Araç Çayı istasyonu akım sonuçları Şekil 6.28’de gösterilmektedir. A2 senaryosunda da akım miktarlarında önemli azalmalar gerçekleşmiştir. Filyos Çayı Derecikviran istasyonu için birinci dönemde yıllık akım miktarlarındaki azalma % 31 ile % 57 arasında gerçekleşirken, ikinci dönemde bu oran artarak % 44 ile % 69 seviyelerine çıkmıştır (Ficklin vd. 2016). Model gruplarının ortalamalarına bakıldığında, 1979-2013 yılları arasındaki yıllık ortalama debi  $137,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ’den birinci dönemde ortalama % 40 azalarak  $83 \text{ m}^3/\text{s}$ ’ye, ikinci dönemde ortalama % 54 azalarak  $62,7 \text{ m}^3/\text{s}$  olmuştur.



**Şekil 6.27** SRES A2 senaryosu Filyos Çayı Derecikviran istasyonu akım sonuçları

Araç Çayı istasyonu için birinci dönemde yıllık akım miktarlarındaki azalma % 35 ile % 57 arasında gerçekleşirken, ikinci dönemde bu oran artarak % 48 ile % 73 aralığında gerçekleşmiştir. Model gruplarının ortalamalarına bakıldığında, 1979-2013 yılları arasındaki yıllık ortalama debi  $19,7 \text{ m}^3/\text{s}$ 'den birinci dönemde ortalama % 52 azalarak  $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye, ikinci dönemde ortalama % 63 azalarak  $7,3 \text{ m}^3/\text{s}$  olmuştur (Lee ve Chung 2007).



Şekil 6.28 SRES A2 senaryosu Araç Çayı istasyonu akım sonuçları



## BÖLÜM 7

### TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Batı Karadeniz Havzası'nın en büyük alt havzası olan Filyos Çayı Havzası için SWAT modeli kullanılarak bir hidrolojik model altyapısı kurulmuştur. Kurulan bu model altyapısı sayesinde; su verimi, eriyen kar miktarı, potansiyel evapotranspirasyon, evapotranspirasyon, mavi ve yeşil su miktarları gibi birçok hidrolojik bileşenin sonuçları elde edilerek, bu sonuçlar üzerine değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Detaylı bir kalibrasyon ve validasyon sürecine tabi tutulan modele, farklı iklim araştırma merkezlerinden elde edilen küresel çevrim modelleri sonuçları yardımıyla A1B ve A2 senaryoları uygulanmıştır. Bu senaryolara ait meteorolojik veriler 1946-2064 ve 2081-2100 yılları arasındaki iki farklı dönemdedir. Modele entegre edilen meteorolojik verilerle, senaryoların akım sonuçları üzerine olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde çalışma alanı için bu kadar kapsamlı bir hidrolojik model uygulaması olmaması çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

Hidrolojik modelin performansı değerlendirildiğinde, özellikle ana kol üzerinde ve havza için Devrek Çayı ile birlikte önemli iki yan koldan birisi olan Araç Çayının bulunduğu alt havzalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Mengen Çayı ve Ulusu Afatlar bölümünde yer alan alt havzalarda ise model sonuçları tatmin edici şekilde olmamıştır. Bu iki havza, çalışma alanı içerisindeki en yüksek rakıma sahip olan alt havzalardır. Buna bağlı olarak bu bölgedeki meteorolojik koşullar havza geneline göre farklılık göstermektedir. Model performansındaki yetersizliğin en önemli nedeni ise, meteorolojik gözlem istasyonu olmamasına bağlı olarak meteorolojik verinin yetersiz kalmasıdır. Fakat bu iki alt havzanın toplam alanın sadece %12'lik bölümünü oluşturması sebebiyle, bu durum modelin genel hidrolojik performansını olumsuz yönde etkilememiştir.

Hidrolojik bileşenlerin tamamında 1979-2013 yılları arasındaki uzun dönemde azalma eğilimindedir. Su veriminde % 35, sızma miktarında % 41, yeraltı suyu miktarında ise % 34 gibi ciddi azalmalar dikkat çekmektedir. Modele uygulanan A1B ve A2 iklim senaryo

sonuçları da akım miktarlarında azalmalara neden olmuştur. Ayrıca iklim değişikliğine bağlı olarak arazi kullanımındaki değişikliklerle hidrolojik bileşenlerin tamamını olumsuz yönde etkileyecektir. Bu nedenle havzalar bir bütün olarak değerlendirilmeli, karar vericilerin alacağı tedbirler kullanıcılar tarafından en iyi şekilde uygulanarak suyun etkin bir şekilde kullanılması sağlanmalıdır. Aksi takdirde gelecekte insani, endüstriyel veya tarımsal amaçlı su temininde problemler yaşanacaktır.

Havzanın topoğrafyasına bağlı olarak alt havzalar arasında meteorolojik koşullar farklılık göstermektedir. Alt havzalar arasında 2398 m'lik farkın olmasından dolayı özellikle havzanın güneyinde yer alan Köroğlu Dağları, Mengen ve Yenice Ormanları gibi yüksek kesimlerde kış aylarında yağış yoğunlukla kar olarak düşmektedir. Bu bölgelerde meteorolojik istasyonların olmaması veya sınırlı sayıda kalmaları nedeniyle bu alanlarda model performansı zayıf kalmıştır. Bu durumun ortadan kaldırılması için ilgili bölgelere yeni meteorolojik istasyonların kurulması ve düzenli bir şekilde işletilmesi gerekmektedir. Bu sayede hidrolojik açıdan daha sağlıklı bir değerlendirme mümkün kılınacaktır.

Havza model çalışmalarında hidrolojik altyapının kurulması, sonrasında oluşturulacak su kalitesi modelleri için en önemli unsurdur. Filyos Çayı Havzası için detaylı bir hidrolojik model altyapısının kurulduğu bir çalışma literatürde yer almamaktadır. Bu çalışma sayesinde bu eksiklik giderilmeye çalışılmıştır. Kurulan hidrolojik model; havza için sediment başta olmak üzere, azot ve fosfor gibi su kalitesi bileşenlerinin modellenmesinde de kullanılabilir. Elde edilen veriler yeni çalışmaların planlanmasında önemli bir boşluğu dolduracak ve sonraki çalışmalarda bu doktora tezinin yol gösterici olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Abbaspour K C, Johnson C A, and Van Genuchten M T** (2004) Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3 (4): 1340-1352.
- Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J and Srinivasan, R** (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333 (2-4): 413-430.
- Abbaspour K C, Faramarzi M, Ghasemi S S, and Yang H** (2009) Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45: 1-16.
- Abbaspour K C, Faramarzi M and Rouholahnejad E** (2010) Hydrological Modeling of Alberta Using SWAT Model. A preliminary Report, *EAWAG*.
- Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, Oconnell P E and Rasmussen J** (1986a) An Introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, SHE. 1. History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*, 87 (1-2): 45–59.
- Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, Oconnell P E and Rasmussen J** (1986b) An Introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, SHE. 2. Structure of a Physically- Based, Distributed Modeling System. *Journal of Hydrology*, 87 (1-2): 61–77.
- Adib A, Salarijazi M, Shoostari M M, and Akhondali A M** (2011) Comparison between Characteristics of Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph Be Produced by Gciuh Based Clark Model and Clark Iuh Model. *Journal of Marine Science and Technology-Taiwan*, 19 (2): 201-209.
- Ahl R S, Woods S W and Zuuring H R** (2008) Hydrologic Calibration and Validation of SWAT in a Snow-Dominated Rocky Mountain Watershed, Montana, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, 44 (6): 1411-1430.
- Ahmed S I, Singh A, Rudra R, and Gharabaghi B** (2014) Comparison of CANWET and HSPF for water budget and water quality modeling in rural Ontario. *Water Quality Research Journal of Canada*, 49 (1): 53-71.
- Akner M E and Akkoyunlu A** (2012) Modeling and forecasting river flow rate from the Melen Watershed, Turkey. *Journal of Hydrology*, 456: 121-129.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Akyüz D E, Kaya S, Seker D Z, and Kabdasli S** (2014) Definition of Flood Risky Areas with Calculation of Stream Water Velocity Via Using Numerical Model: Case Study of Filyos River, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23 (12): 3022-3028.
- Al-Mukhtar M, Dunger V and Merkel B** (2014) Assessing the Impacts of Climate Change on Hydrology of the Upper Reach of the Spree River: Germany. *Water Resources Management*, 28: 2731-2749.
- Anderson E A** (1976) A point energy and mass balance model of snow cover. *NOAA Technical Report NWS 19, U.S. Dept. of Commerce, National Weather Service*.
- Andersen J, Refsgaard H C and Jensen K H** (2001) Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin - model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247 (3-4): 200-214.
- Appleyard S J** (1993) Impact of stormwater infiltration on ground water quality, Perth metropolitan region, Western Australia. *Environmental Geology*, 21(4): 227-236.
- Arabi M, Govindaraju R S and Hantush M M** (2007) A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. *Journal of Hydrology*, 333 (2-4): 459-471.
- Arnold J G, Williams J R, Nicks A D and Sammons N B** (1990) SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. *Texas A&M Univ. Press, College Station, TX*.
- Arnold J G, Allen P M and Bernhardt G** (1993) A comprehensive surfacegroundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142: 47-69.
- Barling R D, Moore I D and Grayson R B** (1994) A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*, 30 (4): 1029-1044.
- Bayazit M** (1998) *Hidrolojik Modeller. I*, ISBN: 975-561-133-9 İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 228.
- Benaman J, Shoemaker C A and Haith D A** (2005) Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10 (5): 363-374.
- Bengston L** (1981) Snowmelt-generated runoff in urban areas. 15-19 Haziran 1981, Illinois, USA, *Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage Yen B C* (Ed.), Water Resources Publications, Littleton, 444-451.
- Beven K J and Kirkby M J** (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24 (1): 43-69.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Beven K, Kirby M, Schofield N. and Tagg A** (1984) Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, 69: 119-143.
- Beven K and A Binley** (1992) The Future of Distributed Models - Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes* 6 (3): 279-298.
- Beven K J** (1995) Linking parameters across scales: Sub-grid parameterisations and scale dependent hydrological models. *Hydrological Processes*, 9: 507-525.
- Beven K J** (1997) *Distributed Hydrological Modelling: Applications of the TOPMODEL Concept*, ISBN: 978-0-471-97724-7, JohnWiley & Sons, Chichester UK, 356 pp/s.
- Beven K J** (2012) *Rainfall-Runoff modeling*, ISBN: 978-0-470-71459-1, Wiley-Blackwell, Chichester UK, 488 pp/s.
- Blosch G and Sivapalan M** (1995) Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes*, 9 (3-4): 251-290.
- Boluwade A and Madramootoo C** (2015) Determining the Influence of Land Use Change and Soil Heterogeneities on Discharge, Sediment and Phosphorus. *Journal of Environmental Informatics*, 25 (2): 126-135.
- Briones R U, Ella V B and Bantayan N C** (2016) Hydrologic Impact Evaluation of Land Use and Land Cover Change in Palico Watershed, Batangas, Philippines Using the SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Management*, 19: 96-107.
- Butts M B, Payne J T, Kristensen M and Madsen H** (2004) An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow prediction, *Journal of Hydrology*, 298: 242-266.
- Cao W Z, Bowden W B, Davie T and Fenemor A** (2006) Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes*, 20: 1057-1073.
- Cengiz B and Cengiz C** (2017) Strategies for sustainable landscape management in the Filyos river delta, Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 38 (6): 885-892.
- Chen Y, Shuai J B, Zhang Z, Shi P J and Tao F L** (2014) Simulating the impact of watershed management for surface water quality protection: A case study on reducing inorganic nitrogen load at a watershed scale. *Ecological Engineering*, 62: 61-70.
- Chow T V, Maidment D R and Mays L W** (1988) *Applied Hydrology*, ISBN: 007070242X, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, ABD, 572 pp/s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Cibin R, Sudheer K P and Chaubey I** (2010) Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Processes*, 24 (9): 1133-1148.
- CMIP3** (2010) *Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multi-model dataset*, The World Climate Research Programme's (WCRP's).
- Cuceloglu G and Erturk A** (2014) Model Supported Hydrological Analysis of Darlik Creek Watershed, Istanbul Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23 (12A): 3110-3116.
- Crawford N H and Linsley R K** (1966) *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Tech Rept. No.39, Department of Civil Engineering Stanford University, Stanford, California, USA, 210 pp/s.
- Çakmak B and Aküzüm A** (2009) Küresel Kriz, Türkiye ve Gıda Güvencesi Tarımsal Altyapı ve Sulama. *Ziraat Mühendisleri Odası. Sempozyumu*, 15 Ekim 2009. Çağdaş Sanatlar Merkezi Ankara.
- Dennedy-Frank P J, Muenich R L, Chaubey I, Ziv G** (2016). Comparing two tools for ecosystem service assessments regarding water resources decisions. *Journal of Environmental Management* 177: 331-340.
- DHI** (1999) *Mike 11 User Manual*. Danish Hydraulic Institute, Danimarka.
- DHI** (2011) *Mike She User Manual*. Volume 1 User Guide, Danish Hydraulic Institute, Danimarka.
- Di Luzio M, Arnold J G and Srinivasan R** (2005) Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrological Processes*, 19 (3): 629-650.
- Dingman S L** (1994) *Physical hydrology*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Dinicola R S** (1990) *Characterization and simulation of rainfall-runoff relations for headwater basins in western King and Snohomish Counties*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4052.
- Directive 2000/60/EC** (2000) *European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. European Union.
- Donigian A S and Crawford N H** (1976) *Modeling Pesticides and Nutrients on Agricultural Lands*. Rep No EPA-600/2-76-043, USEPA, Athens.
- Donnelly-Makowecki L M and Moore R D** (1999) Hierarchical testing of three rainfall-runoff models in small forested catchments. *Journal of Hydrology*, 219: 136-152.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Döll P** (2002) Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climate Change*, 54 (3): 269-293.
- Duan Q Y, Gupta H, Sorooshian S, Rousseau A N and Turcotte R** (2003) *Calibration of watershed models*. Water Science and Application 6. American Geophysical Union, Washington, DC, 345 pp/s.
- Duan Q, Schaake J, Andreassian V, Franks S, Goteti G, Gupta H V, Gusev Y M, Habets F, Hall A, Hay L, Hogue T, Huang M, Leavesley G, Liang X, Nasonova O N, Noilhan J, Oudin L, Sorooshian S, Wagener T, Wood E F**, (2006) Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology*, 320 (1-2): 3-17.
- Durand P, Robson A and Neal C** (1992) Modelling the hydrology of sub-Mediterranean montane catchments (Mont Loz`ere, France), using TOPMODEL: Initial results. *Journal of Hydrology*, 139: 1–14.
- Eagleson P S** (1967) Optimum Density of Rainfall Networks. *Water Resources Research*, 3 (4): 1021-1033.
- Eckhardt K and Arnold J G** (2001) Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 251 (1-2): 103-109.
- Engdahl N B, Ginn T R and Fogg G E** (2012) Using groundwater age distributions to estimate the effective parameters of fickian and non-fickian models of solute transport. *Advances in Water Resources*, 54: 11-21.
- FAO** (2003) *The Digital Soil Map of the World, Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Version 3.6, FAO.
- Falkenmark M and Rockström J** (2006) The New blue and green water paradigm: breaking New ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132 (3): 129-132.
- Ficklin D L and Barnhart B L** (2014) SWAT hydrologic model parameter uncertainty and its implications for hydroclimatic projections in snowmelt-dependent watersheds. *Journal of Hydrology*, 519: 2081-2090.
- Ficklin D L, Letsinger S L, Stewart I T and Maurer E P** (2016) Assessing differences in snowmelt-dependent hydrologic projections using CMIP3 and CMIP5 climate forcing data for the western United States. *Hydrology Research*, 47: 483-500.
- Fiering M B** (1967) *Streamflow synthesis*. ISBN: 0674189272, Harvard University Press, Cambridge.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Fischer S, Pluntke T, Pavlik D and Bernhofer C** (2014) Hydrologic effects of climate change in a sub-basin of the Western Bug River, Western Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 72 (12): 4727-4744.
- Fisher J and Beven K J** (1995) Modelling of streamflow at Slapton Wood using TOPMODEL within an uncertainty estimation framework. *Field Studies*, 8: 577-584.
- Franchini M, Helmlinger K R, Foufoula-Georgiou E and Todini E** (1996) Stochastic storm transposition coupled with rainfall-runoff modelling for estimation of exceedence probability of design floods. *Journal of Hydrology*, 175: 511-532.
- Franks S W, Gineste P, Beven K J and Merot P** (1998) On constraining the predictions of a distributed model: The incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process. *Water Resources Research*, 34: 787-797.
- Freeze R A and Harlan R L** (1969) Blueprint of a physically-based, digitally simulated hydrologic response model, *Journal of Hydrology*, 9: 237-258.
- Gebremicael T G, Mohamed Y A, Betrie G D, van der Zaag P and Teferi E** (2013) Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the Upper Blue Nile basin: A combined analysis of statistical tests, physically-based models and landuse maps. *Journal of Hydrology*, 482: 57-68.
- Gebremariam S Y and Martin J F** (2014) A comprehensive approach to evaluating watershed models for predicting river flow regimes critical to downstream ecosystem services. *Environmental Modelling & Software*, 61: 121-134.
- Gerten D, Hoff H, Bondeau A, Lucht W, Smith P and Zaehle S** (2005) Contemporary “green” water flows: simulations with a dynamic global vegetation and water balance model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30 (6): 334-338.
- Glavan M, Pintar M, and Volk M** (2013) Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments-lessons for the future. *Hydrological Processes*, 27 (26): 3964-3980.
- Graham D N and Butts M B** (2006) *Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE Watershed Models*. ISBN: 0849336090, CRC Press, 245-272.
- Green W H and Ampt G A** (1911) Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4: 11-24.
- Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O** (1999) Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4 (2): 135-143.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Güngör Ö and Göncü S** (2013) Application of the soil and water assessment tool model on the Lower Porsuk Stream Watershed. *Hydrological Processes*, 27 (3): 453-466.
- Güntner A, Uhlenbrook S, Seibert J and Leibundgut Ch** (1999) Multi-criterial validation of TOPMODEL in a mountainous catchment. *Hydrological Processes*, 13: 1603-1620.
- Hargreaves G H** (1975) Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18: 980-984.
- Hargreaves G H and Samani Z A** (1982) Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108 (3): 225-230.
- Hargreaves G H and Riley J P** (1985) Agricultural benefits for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111 (2): 113-124.
- Hargreaves G H and Samani Z A** (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1: 96-99.
- HEC-1** (1973) *Hydrologic Engineering Center: HEC-1 Flood Hydrograph Package: User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California USA.
- HEC** (1975) *Hydrologic Engineering Center: Urban Storm Water Runoff: STORM, Generalized Computer Program 723-58-L2520*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California USA.
- HEC-2** (1976) *Hydrologic Engineering Center: HEC-2 Water Surface Profiles: User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California USA.
- HEC** (1989) *Hydrologic Engineering Center: A Quarter Century 1964-1989*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California USA.
- Hingray B, Picouet C and Musy A** (2015) *Hydrology A Science for Engineers*, ISBN: 9781466590595, CRC Press Taylor & Francis Group, USA.
- Hooke R and Jeeves T A** (1961) Directed search solutions of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM*, 8: 212-229.
- Huber W C, Heaney J P, Nix S J, Dickinson R E and Pollmann D J** (1981) *Storm Water Management Model User's Manual*, Version III, EPA-600/2-84-109a, Environmental Protection Agency, Athens, GA, USA.
- Huber W C and Dickinson R E** (1988) *Storm water management model*. Version 4: user's manual, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Im S, Brannan K, Mostaghimi S and Cho J** (2003) *A Comparison of SWAT and HSPF Models for Simulating Hydrologic and Water Quality Responses from an Urbanizing Watershed*. 2003 ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, USA

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- IPCC AR4** (2007) *Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team*. Pachauri, IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC** (2000) *Emissions Scenarios Summary for Policymakers 2000: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Writing Team*, IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jarvis A, Reuter H I, Nelson A and Guevara E** (2008) *Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database*. Adres: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Jensen M E, Burman R D and Allen R G** (1990) *Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70*, ASCE, N.Y., 332 pp/s.
- Jha M K, Gassman P W and Panagopoulos Y** (2015) Regional changes in nitrate loadings in the Upper Mississippi River basin under predicted mid-century climate. *Regional Environmental Change*, 15 (3): 449-460.
- Karcher S C, VanBriesen J M and Nietch C T** (2013). Alternative Land-Use Method for Spatially Informed Watershed Management Decision Making Using SWAT. *Journal of Environmental Engineering*, 139 (12): 1413-1423.
- Kim J, Miller N L, Guetter A K and Georgakakos K P** (1998) River flow response to precipitation and snow budget in California during the 1994/95 winter. *Journal of Climate*, 11: 2376-2386.
- Kim Y J, Kim H D and Jeon J H** (2014) Characteristics of Water Budget Components in Paddy Rice Field under the Asian Monsoon Climate: Application of HSPF-Paddy Model. *Water*, 6 (7): 2041-2055.
- Kirsch K, Kirsch A and Arnold J G** (2002) Predicting sediment and phosphorus loads in the Rock River basin using SWAT. *Transactions of the Asae*, 45 (6): 1757-1769.
- Kisi O** (2010) Wavelet regression model for short-term streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*, 389 (3-4): 344-353.
- Knisel W G** (1980) *CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. USDA Conservation Research Rept. No. 26.
- Krysanova V and Srinivasan R** (2015) Assessment of climate and land use change impacts with SWAT. *Regional Environmental Change*, 15 (3): 431-434.
- Kucukali S** (2014) Environmental risk assessment of small hydropower (SHP) plants: A case study for Tefen SHP plant on Filyos River. *Energy for Sustainable Development*, 19: 102-110.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kuczera G and Parent E** (1998) Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211 (1-4): 69-85.
- Laouacheria F and Mansouri R** (2015) Combination of Hydrological Modelling and Gis for Runoff Hydrograph Prediction in Small Urban Catchment. *Engineering Geology for Society and Territory, River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources*, 3: 453-458.
- Lee K S and Chung E S** (2007) Hydrological effects of climate change, groundwater withdrawal, and land use in a small Korean watershed. *Hydrological Processes*, 21 (22): 3046-3056.
- Lee K S, Chung E S and Kim Y O** (2008) Integrated watershed management for mitigating streamflow depletion in an urbanized watershed in Korea. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33 (5): 382-394.
- Legates D R and McCabe G J** (1999) Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35 (1): 233-241.
- Leonard R A, Knisel W G and Still D A** (1987) GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*, 30: 1403-1418.
- Li Z, Liu W Z, Zhang X C and Zheng F L** (2009) Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2): 35-42.
- Li Q Y, Yu X X, Xin Z B and Sun Y W** (2013) Modeling the Effects of Climate Change and Human Activities on the Hydrological Processes in a Semiarid Watershed of Loess Plateau. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18 (4): 401-412.
- Ma H W** (2002) Stochastic multimedia risk assessment for a site with contaminated groundwater. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 16 (6): 464-478.
- Mahmood R and Jia S F** (2016) Assessment of Impacts of Climate Change on the Water Resources of the Transboundary Jhelum River Basin of Pakistan and India. *Water* 8 (246): 1-18.
- Meehl G A, Covey C, Delworth T, Latif M, McAvaney B, Mitchell J F B, Stouffer R J and Taylor K E** (2007) The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88: 1383-1394.
- Mekonnen M A, Worman A, Dargahi B and Gebeyehu A** (2009) Hydrological modelling of Ethiopian catchments using limited data. *Hydrological Processes*, 23 (23): 3401-3408.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Monteith J L** (1965) Evaporation and Environment In: The state and movement of water in living organism. *19th Symp. Soc. Exptl. Biol. P.*, 205-234.
- Moriassi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D and Veith T L** (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50 (3): 885-900.
- Moriassi D N, Steiner J L and Arnold J G** (2011) Sediment Measurement and Transport Modeling: Impact of Riparian and Filter Strip Buffers. *Journal of Environmental Quality*, 40 (3): 807-814.
- Muleta M K and Nicklow J W** (2005) Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology* 306 (1-4): 127-145.
- Nash J E and Sutcliffe J V** (1970) River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R and Williams J R** (2005) *Soil And Water Assessment Tool Theoretical Documentation*, Version 2005, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas, A.B.D.
- Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R and Williams J R** (2009) *Soil And Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Version 2009, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas, A.B.D.
- Nelder J A and Mead R** (1965) A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 7: 308-313.
- Nicks A D** (1974) Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. In Proc. Symposium, Ağustos-Eylül 1971, U.S. Gov. Print. Office, Washington DC, 154-171
- Nicks A D, Lane L J, and Gander G A** (1995) Chapter 2: Weather generator. In D.C. Flanagan and M.A. Nearing (ed.) USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation, 2.1-2.22
- Özölçer I H, Aydın H, Aksoy B, and Komurcu M I** (2009) Pirincipal Component Analysis of the Annual Precipitation of West Black Sea Hydrological Basin in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(5A): 776-782.
- Öztürk I, Ertürk A and Ekdal A** (2013) Effects of Climate Change on Water Resources in Turkey. *Proceedings of AASSA Regional Workshop*, Barnaul.
- Pappenberger F and Beven K J** (2006) Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 42 (5): 1-8.
- Parajuli P B** (2010) Assessing sensitivity of hydrologic responses to climate change from forested watershed in Mississippi. *Hydrological Processes*, 24: 3785-3797.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Pradhanang S M, Anandhi A, Mukundan R, Zion M S, Pierson D C, Schneiderman E M, Matonse A and Frei A** (2011) Application of SWAT model to assess snowpack development and streamflow in the Cannonsville watershed, New York, USA. *Hydrological Processes*, 25: 3268-3277.
- Penman H L** (1956) Evaporation: An introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4: 7-29.
- Pinol J, Beven K J and Freer J** (1997) Modelling the hydrological response of Mediterranean catchments, Prades, Catalonia: The use of distributed models as aids to hypothesis formulation. *Hydrological Processes*, 11: 1287-1306.
- Pisinaras V, Petalas C, Gikas G D, Gemitzi A and Tsihrintzis V A** (2010) Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination* 250 (1): 274-286.
- Pott C A and Fohrer N** (2017) Hydrological modeling in a rural catchment in Germany. *Applied Research & Agrotechnology*, 10 (1): 7-16.
- Priestley C H B and Taylor R J** (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.
- Qiu G Y, Yin J, Tian F and Geng S** (2011) Effects of the "Conversion of Cropland to Forest and Grassland Program" on the Water Budget of the Jinghe River Catchment in China. *Journal of Environmental Quality*, 40 (6): 1745-1755.
- Quinn P F, Beven K J, Chevallier P and Planchon O** (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5: 59-79.
- Quinteiro P, Dias A C, Silva M, Ridoutt B G and Arroja L** (2015) A contribution to the environmental impact assessment of green water flows. *Journal of Cleaner Production*, 93: 318-329.
- Refsgaard J C** (1997) Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, 28 (2): 65-84.
- Ritchie J T** (1972) A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8: 1204-1213.
- Rockström J, Falkenmark M, Karlberg L, Hoff H, Rost S, Gerten D** (2009) Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resources Research*, 45 (7): W00A12.
- Roesner L A, Shubinski R P and Aldrich J A** (1981) *Storm Water Management Model User's Manual*, Version III: Addendum I, Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Rosenbrock H H** (1960) An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. *The Computer Journal*, 3 (3): 175-184.
- Rossi C G, Srinivasan R, Jirayoot K, Duc T L, Souvannabouth P, Binh N and Gassman P W** (2009) Hydrologic evaluation of the lower Mekong River basin with the Soil and Water Assessment Tool model. *International Agricultural Engineering Journal*, 18: 1-13.
- Rouholahnejad E, Abbaspour K C, Srinivasan R, Bacu V and Lehmann A** (2014) Water resources of the Black Sea Basin at high spatial and temporal resolution. *Water Resources Research*, 50 (7): 5866-5885.
- Rouholahnejad E, Abbaspour K C and Lehmann A** (2017). Water of the Black Sea Cathment under Future Climate and Landuse Change Projections. *Water*, 9 (598): 1-18.
- Saleh A and Du B** (2004) Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the Upper North Bosque River watershed in Central Texas. *Transactions of the Asae*, 47 (4): 1039-1049.
- Samadi S Z** (2017) Assessing the sensitivity of SWAT physical parameters to potential evapotranspiration estimation methods over a coastal plain watershed in the southeastern United States. *Hydrology Research*, 48: 395-415.
- Santhi C, Arnold J G, Williams J R, Hauck L M, and Dugas W A** (2001) Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. *Transactions of the Asae*, 44 (6): 1559-1570.
- Santhi C, Srinivasan R, Arnold J G and Williams J R** (2006) A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. *Environmental Modelling & Software*, 21 (8): 1141-1157.
- Sarlak N** (2014) Filyos River Streamflow Reconstruction from Tree-Ring Chronologies with Nonparametric Approaches. *Journal of the American Water Resources Association* 50 (5): 1102-1110.
- Schiermeier Q** (2008) Water: a long dry summer. *Nature* 452 (7158): 270-273.
- Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R and Yang H** (2008) Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 352 (1-2): 30-49.
- SEI** (2011) *WEAP User Guide*, Stockholm Environment Institute, USA.
- Seker D Z, Kaya S, Musaoglu N, Kabdasli S, Yuasa A and Duran Z** (2005) Investigation of meandering in Filyos River by means of satellite sensor data. *Hydrological Processes*, 19 (7): 1497-1508.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Setegn S G, Srinivasan R, Melesse A M and Dargahi B** (2010) SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrological Processes* 24 (3): 357-367.
- Sharpley A N and Williams J R** (1990) *EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Technical Bulletin, 1768 pp/s.
- Shenk G. W, Wu J, Linker L C** (2012) Enhanced HSPF Model Structure for Chesapeake Bay Watershed Simulation. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 138 (9): 949-957.
- Shiklomanov I A** (2000) Appraisal and assessment of world water resources. *Water International*, 25 (1): 11-32.
- Shiri J and Kisi O** (2010) Short-term and long-term streamflow forecasting using a wavelet and neuro-fuzzy conjunction model. *Journal of Hydrology*, 394 (3-4): 486-493.
- Singh V P** (1995) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resource Publications, Highlands Ranch, CO, 1144 pp/s.
- Singh J, Knapp H V and Demissie M** (2005) Hydrological modeling of the iroquois river watershed using HSPF and SWAT." *Journal of the American Water Resources Association*, 41 (2): 343-360.
- Sommerlot A R, Sommerlot A R, Woznicki S A, Giri S and Prohaska M D** (2013) Evaluating the capabilities of watershed-scale models in estimating sediment yield at field-scale. *Journal of Environmental Management*, 127: 228-236.
- Soutter M, Mermoud A and Musy A** (2007) *Ingénierie des sols et des eaux, processus et aménagements*. PPUR, Lausanne.
- Sraj M, Dirnbek L and Brilly M** (2010) The Influence of Effective Rainfall on Modeled Runoff Hydrograph. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58 (1): 3-14.
- Srinivasan M S, Gerard-Marchant P, Veith T L, Gburek W J and Steenhuis T S** (2005) Watershed scale modeling of critical source areas of runoff generation and phosphorus transport. *Journal of the American Water Resources Association*, 41 (2): 361-375.
- Srinivasan R, Zhang X and Arnold J** (2010) Swat Ungauged: Hydrological Budget and Crop Yield Predictions in the Upper Mississippi River Basin. *Transactions of the Asabe*, 53 (5): 1533-1546.
- Sudheer K P, Chaubey I, Garg V and Migliaccio K W** (2007) Impact of time-scale of the calibration objective function on the performance of watershed models. *Hydrological Processes*, 21 (25): 3409-3419.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Sun S L, Chen H S, Ju W M, Yu M, Hua W J and Yin Y** (2014) On the attribution of the changing hydrological cycle in Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology*, 514: 214-225.
- Szilagyi J** (2018) On the Clark Unit Hydrograph Model of HEC-HMS. *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, 62 (1): 277-279.
- Tao C, Chen X L, Lu J Z, Gassman P W, Sabine S, and Jose-Miguel S P** (2015). Assessing impacts of different land use scenarios on water budget of Fuhe River, China using SWAT model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8 (3): 95-109.
- Thorntwaite C W** (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38: 55-94.
- Tolson B A, Shoemaker C A** (2007) Cannonsville Reservoir Watershed SWAT2000 model development, calibration and validation. *Journal of Hydrology*, 337 (1–2): 68-86.
- Tripathi M P, Raghuwanshi N S and Rao G P** (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes*, 20: 1137-1156.
- Troin M and Caya D** (2014) Evaluating the SWAT's snow hydrology over a Northern Quebec watershed. *Hydrological Processes*, 28: 1858-1873.
- Tuppad P, Kannan N, Srinivasan R, Rossi C G, and Arnold J G** (2010) Simulation of Agricultural Management Alternatives for Watershed Protection. *Water Resources Management*, 24 (12): 3115-3144.
- TÜBİTAK-MAM** (2013) *Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması Batı Karadeniz Havzası Proje Nihai Raporu*, Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, Kocaeli.
- USGS** (2000) *Global Land Cover Characteristics Data Base Version 2.0*. United States Geological Survey.
- USDA Soil Conservation Service** (1951) *Soil Survey Manual*. #18, U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C
- USDA Soil Conservation Service** (1972) *Section 4: Hydrology In National Engineering Handbook*. U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C..
- USDA Soil Conservation Service** (1983) *National Engineering Handbook Section 4 Hydrology*, U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.
- Usül N** (2008) *Mühendislik Hidrolojisi*. ISBN: 9789944344579, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık v İletişim A.Ş. Yayınları ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 408 pp/s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Van Griensven A and T Meixner** (2007) A global and efficient multi-objective auto-calibration and uncertainty estimation method for water quality catchment models. *Journal of Hydroinformatics*, 9 (4): 277-291.
- Van Liew M W, Arnold J G and Garbrecht J D** (2003) Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the Asae*, 46 (6): 1539-1551.
- Van Liew M W, Veith T L, Bosch D D and Arnold J G** (2007) Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12 (2): 173-189
- Vrugt J A, Gupta H V, Bastidas L A, Bouten W and Sorooshian S** (2003) Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research*, 39 (8): 1-19.
- Westerstrom G** (1981) Snowmelt runoff from urban plot. *Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage*, 15-19 Haziran 1981, Illinois USA, Water Resources Publications, Littleton, 452-459.
- Westerstrom G** (1984) Snowmelt runoff from Porson residential area. *Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage*, Haziran 1984, Lulea Sweden, Chalmers University, Goteborg, 315-323.
- White M, Harmel D, Yen H, Arnold J, Gambone M and Haney R** (2015) Development of Sediment and Nutrient Export Coefficients for US Ecoregions. *Journal of the American Water Resources Association*, 51 (3): 758-775.
- Williams J R, Jones C A and Dyke P T** (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the Asae*, 27 (1): 129-144.
- Williams J R, Nicks A D and Arnold J G** (1985) Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (6): 970-986.
- Wu Y P and Chen J** (2013) Analyzing the Water Budget and Hydrological Characteristics and Responses to Land Use in a Monsoonal Climate River Basin in South China. *Environmental Management*, 51 (6): 1174-1186.
- Xie H and Lian Y Q** (2013) Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*, 481: 119-131.
- Xie H, Chen L and Shen Z Y** (2015) Assessment of Agricultural Best Management Practices Using Models: Current Issues and Future Perspectives. *Water*, 7 (3): 1088-1108.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Xu CY** (1997) Application of water balance models to different climatic regions in China for water resources assessment. *Water Resource Management*, 11 (1): 51–67.
- Xu Z X, Pang J P, Liu C M and Li J Y** (2009) Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. *Hydrological Processes*, 23 (25): 3619-3630.
- Yang J, Reichert P, Abbaspour K C, Xia J and Yang H** (2008) Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358 (1-2): 1-23.
- Yılmaz B and Harmancioglu N B** (2010) Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey. *Water Sa* 36 (5): 563-576.
- Zhang X Y, Liu X M, Luo Y Z and Zhang M H** (2008) Evaluation of water quality in an agricultural watershed as affected by almond pest management practices. *Water Research*, 42 (14): 3685-3696.
- Zhang X, Srinivasan R, Van Liew M** (2008) Multi-Site Calibration of the Swat Model for Hydrologic Modeling. *Transactions of the Asabe*, 51 (6): 2039-2049.
- Zhang W, Zha X, Li J, Liang W, Ma Y, Fan D and Li S** (2014) Spatiotemporal Change of Blue Water and Green Water Resources in the Headwater of Yellow River Basin, China. *Water Resources Management*, 28: 4715-4732.
- Zhang D J, Chen X W and Yao H X** (2015) Development of a Prototype Web-Based Decision Support System for Watershed Management. *Water*, 7 (2): 780-793.
- Zhang Y Y, Shao Q X, Ye A Z, Xing H T and Xia J** (2016) Integrated water system simulation by considering hydrological and biogeochemical processes: model development, with parameter sensitivity and autocalibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20 (1): 529-553.
- Zonguldak ÇŞİM** (2011) *Zonguldak İl Çevre Durum Raporu*. Zonguldak Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Zonguldak.
- Zonguldak ÇŞİM** (2013) *Zonguldak İl Çevre Durum Raporu*. Zonguldak Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Zonguldak.
- Zuo D P, Xu Z X, Yao W Y, Jin S. Y, Xiao P Q and Ran D C** (2016) Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 544: 238-250.



## ÖZGEÇMİŞ

Ömer GÜNGÖR, 1982 yılında Keşan Edirne’de doğdu. İlköğretim ve liseyi İstanbul’da tamamladı. 2007 yılında Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2011 yılında ise Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisansını tamamladı. Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde 2011 yılından itibaren Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

### **ADRES BİLGİLERİ:**

Adres: Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü 67100  
İncivez /ZONGULDAK

Tel: 0 372 291 19 59

E-posta: omer.gungor@beun.edu.tr