

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**SEDİMENT YÜKÜ VE NEHİR AKIMLARININ SWAT MODELİ  
İLE TAHMİN EDİLMESİ VE FREKANS ANALİZLERİ**

**Erkan KARAKOYUN**

Doktora Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Hidrolik Bilim Dalı

ARALIK 2022

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**SEDİMENT YÜKÜ VE NEHİR AKIMLARININ SWAT MODELİ İLE  
TAHMİN EDİLMESİ VE FREKANS ANALİZLERİ**

Tez Yazarı

**Erkan KARAKOYUN**

Danışman

Doç. Dr. Nihat KAYA

ARALIK 2022

ELAZIĞ

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

---

Başlığı: Sediment Yüğü ve Nehir Akımlarının SWAT Modeli ile Tahmin Edilmesi ve Frekans Analizleri

Yazarı: Erkan KARAKOYUN

İlk Teslim Tarihi: 17.11.2022

Savunma Tarihi: 23.12.2022

---

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Nihat KAYA Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Ömerul Faruk DURSUN İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Fahri ÖZKAN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Erdiñ İKİNCİOĞULLARI Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

*İmza*

Prof. Dr. Burhan ERGEN  
Enstitü Müdürü

## **BEYAN**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım ‘‘Sediment Yüku ve Nehir Akımlarının SWAT Modeli ile Tahmin Edilmesi ve Frekans Analizleri’’ Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteğı olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

23.12.2022

**Erkan KARAKOYUN**



# ÖNSÖZ

Hidroloik yapıların planlandırılmasında ve havza yönetim uygulamalarında akım ve sediment miktarlarının tahmin edilmesi önemli bir unsurdur. Bu doktora tez çalışmasında, fiziksel tabanlı bir model olan Soil and Water Assessment Tool (SWAT) modeli ile Murat Nehri Havzası'nda akım ve sediment tahmini yapılmış ve havzada bulunan iki ölçüm istasyonundan elde edilen değerlerle karşılaştırması yapılmıştır. Bununla beraber havza, alt havza ölçeğinde haritalandırılarak yağış, yüzeysel akış, kar erimesi, buharlaşma gibi hidrolojik parametreleri belirlenmiştir.

Doktora eğitimim süresince desteklerini üzerimden hiç bir zaman eksik bırakmayan, her danıştığım da beni hiçbir zaman eksik bırakmayan, mesleki ve insani yönünü her zaman kemdime örnek alacağım ve kendisini bir ağabeyim gibi gördüğüm ve bunu bana hissettiren saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Nihat KAYA' ya,

Doktora eğitimim süresince kendisinden aldığım dersler boyunca saygı duyduğum, bana mesleki değerler konusunda yol gösterdiğine inandığım kıymetli hocam Prof. Dr. Muhammet Emin Emiroğlu'na,

Anlayış ve desteklerinden dolayı Tez İzleme Komitesi üyesi sayın Prof. Dr. Fahri ÖZKAN' a, teşekkür ve şükranlarımı sunuyorum.

Sadece doktora süresince değil, hayatımın her anında maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen ve haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim kıymetli anneme, babama, ablama ve abilerime,

Her koşulda yanımda olan, her kararımı destekleyen ve bu süreçte ki anlayışı ve sabrı için kıymetli eşim Tuba Karakoyun'a ve varlıklarıyla bizi mutlu eden sevgili çocuklarım Halis Emre ve Elif Betül'e teşekkür ederim.

Tez çalışması için gerekli olan verilerin temininde yardımlarını esirgemeyen DSİ 9. ve DSİ 17. bölge müdürlüklerine teşekkür ederim.

**Erkan KARAKOYUN**

ELAZIĞ, 2022

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÖZET .....	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Çalışmanın Önemi.....	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı.....	3
1.3. Hidrolojik Modelleme .....	4
1.4. SWAT Modeli ve Tarihsel Gelişimi.....	6
1.4.1. SWAT Modeli Hidrolojik Parametreleri.....	8
1.4.2. SWAT Modeli İklim Parametreleri .....	15
<b>2. SWAT MODELİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>18</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>23</b>
3.1. Çalışma Alanı .....	23
3.2. SWAT Modeli Kurulumu ve Analizi için Gerekli Veriler.....	24
3.2.1. Hidrolojik Veriler .....	25
3.2.2. Meteorolojik Veriler .....	29
3.2.3. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM).....	30
3.2.4. Arazi Kullanımı / Arazi Örtüsü Haritaları.....	31
3.2.5. Toprak Haritaları .....	33
<b>4. MURAT NEHRİ HAVZASI ARAZİ ANALİZLERİ.....</b>	<b>36</b>
4.1. Eğim Haritası.....	36
4.2. Bakı Haritası .....	37
4.3. Hipsometrik Eğri ve Hipsometrik İntegral.....	38
<b>5. SWAT MODELİ KURULUM AŞAMALARI VE SONUÇLARI .....</b>	<b>41</b>
5.1. SWAT Modeli Kurulumu .....	41
5.2. Hassasiyet Analizi.....	45
5.3. Belirsizlik Analizi .....	49
5.4. Model Kalibrasyonu İçin Başarı Kriterleri .....	49
<b>6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>52</b>
6.1. SWAT Modeli Kalibrasyonu ve Doğrulaması .....	52
6.1.1. Akım Kalibrasyonu ve Doğrulaması .....	53
6.1.2. Sediment Kalibrasyon ve Doğrulaması.....	62
6.2. Toprak Erozyonu ve Hidrolojik Parametrelerin Değerlendirilmesi.....	67
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>86</b>
KAYNAKLAR .....	88
ÖZGEÇMİŞ	

# ÖZET

## Sediment Yükü ve Nehir Akımlarının SWAT Modeli ile Tahmin Edilmesi ve Frekans Analizleri

**Erkan KARAKOYUN**

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2022, Sayfa: xiii + 93

Havza üzerinde doğru ve güvenilir bir akım ve sediment tahmini yapmak su kaynakları yönetim uygulamalarında önemlidir. Bu çalışmada, su yönetimi uygulamalarını geliştirmek için akarsu akışını, sediment verimini ve toprak erozyonuna yatkın alanların alt havza ölçeğinde belirlenmesi için Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (Soil and Water Assessment Tool, SWAT) kullanılmıştır. Türkiye'nin en büyük ve en yüksek su potansiyeline sahip havzası olan Fırat-Dicle havzasının, Murat Nehri havzası olarak adlandırılan, üst kısmı çalışma alanı olarak seçilmiştir. Oluşturulan model, sediment ve akım tahmini için kalibrasyon (2006-2010) ve doğrulama (2011-2013) periyotlarında çalıştırılmıştır. Aylık akım tahmini için elde edilen değerler, E21A074 ve E21A077 istasyonlarında kalibrasyon periyodunda sırasıyla NSE: 0.57, 0.77, R<sup>2</sup>: 0.57, 0.77 ve PBIAS: -7.4, -6.6 olarak, doğrulama periyodunda ise NSE:0.50, 0.75, R<sup>2</sup>: 0.53, 0.78, PBIAS: 15.6, -3.1 olarak elde edilmiştir. Günlük akım modelleme sonuçlarına göre ise E21A074 ve E21A077 istasyonlarında kalibrasyon periyodunda elde edilen performans istatistiklerine göre sırasıyla NSE: 0.56, 0.45, R<sup>2</sup>: 0.57, 0.46 ve PBIAS: -15.0, 7.7 olarak, doğrulama periyodunda ise NSE: 0.55, 0.50, R<sup>2</sup>: 0.56, 0.50 ve PBIAS: 1.20, 1.20 olarak bulunmuştur. Bununla beraber, her iki istasyondan alınan sediment verileri ile modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve E21A074 istasyonu için kalibrasyon ve doğrulama periyodunda NSE: 0.54, 0.69, R<sup>2</sup>: 0.67, 0.68 ve PBIAS: -33.8, 4.6 olarak, E21A077 istasyonunda ise NSE: 0.62, 0.35, R<sup>2</sup>: 0.68, 0.56 ve PBIAS: -3.2, -77.2 olarak elde edilmiştir.

Akım ve sediment tahmininin yanında SWAT modelinden elde edilen sonuçlar ile havzanın hidrolojik analizi de yapılmıştır. Alt havza ölçeğinde oluşturulan toprak kaybı haritası incelendiğinde toplam havza alanının % 3.9' unun çok şiddetli ve %21.3' ünün ise şiddetli toprak erozyonu koşulları altında olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında havzanın arazi kullanımı ve topografik özellikleri incelendiğinde en yüksek toprak kaybının çorak arazilerde ve arazi eğiminin %25'ten fazla olduğu alt havzalarda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle 65, 66, 74, 75, 76, 137 ve 139 numaralı alt havzalar en yüksek yüzey akışı, tortu verimi ve toprak erozyonunu ürettiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, SWAT modeli Murat Nehri havzasında günlük ve aylık bazda akım ve sediment verimini tahmin etmedeki kullanılabilirliği kanıtlanmış ve bu sonuçların SWAT modelinin su kaynakları yönetiminde araştırmacılara yön gösterecek bir araç olduğu belirlenmiştir. Ayrıca SWAT modelinden elde edilen sonuçlarla havzanın hidrolojik parametreleri belirlenmiş olup sonuçların bu bölgede yapılacak hidrolojik çalışmalara rehberlik edeceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** SWAT, Sediment ve akım tahmini, Erozyon, Havza Modelleme, Murat Nehri Havzası

# ABSTRACT

---

## Modeling Sediment Yield and Streamflow using SWAT Model and Frequency Analysis

**Erkan KARAKOYUN**

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

December 2022, Pages: xiii + 93

---

Predicting accurate and reliable streamflow and sediment in the watershed is crucial in water resource management practices. In this study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used to determine stream flow, sediment yield, and erosion-prone areas at the sub-basin scale to improve water management practices. The Murat River Basin, located in the upper part of the Euphrates-Tigris basin, the largest and highest water potential in Turkey, has been selected as a study area. Calibration (2006-2010) and validation (2011-2013) processes were carried out with these determined parameters. The created model was run in calibration (2006-2010) and validation (2011-2013) periods for sediment and streamflow estimation. Based on the monthly streamflow prediction at the stations E21A074 and E21A077, the values of NSE,  $R^2$ , and PBIAS were calculated as NSE:0.57,0.77,  $R^2$ :0.57, 0.77 and PBIAS:7.4, -6.6 in the calibration period, and NSE:0.50, 0.75,  $R^2$ :0.53, 0.78 and PBIAS: 15.6, -3.1 in the validation period, respectively. For the daily-based simulation, the NSE:0.56, 0.45,  $R^2$ :0.57, 0.46, and PBIAS: -15.0, 7.7 were found in the calibration period, and NSE:0.50, 0.75,  $R^2$ :0.53, 0.78, and PBIAS: 15.6, -3.1 were found in the validation period at the stations E21A074 and E21A077, respectively. Besides, the monthly sediment yield results obtained from two stations were compared with SWAT model results and the values of NSE:0.54, 0.69,  $R^2$ :0.67, 0.68 and PBIAS: -33.8, 4.6 in the calibration and validation period in the station E21A074 and NSE:0.62, 0.35,  $R^2$ :0.68, 0.56 and PBIAS: -3.2, -77.2 were found in the calibration and validation period for the station E21A077.

In addition to the flow and sediment estimation, the hydrological analysis of the basin was also carried out with the results obtained from the SWAT model. It was determined that 3.9% of the total basin was under very severe and 21.3% under severe soil erosion conditions shown in the sub-watershed-based soil erosion map. In addition, based on the land use and topographic characteristics of the basin were examined. It was observed that the highest soil loss occurred in barren lands and sub-basins with a slope of more than 25%. Especially the sub-watersheds 65-66-74-75, 76, 137, and 139 produce the highest surface flow, sediment yield, and soil erosion.

As a result, the applicability of the SWAT model in estimating the flow and sediment yield on a daily and monthly basis in the Murat River basin has been proven and it has been determined that it is a suitable tool that will guide researchers in water resources management. In addition, the hydrological parameters of the basin have been determined with the results obtained from the SWAT model, and it is thought that the results will guide the studies to be carried out in this region.

**Keywords:** SWAT, Sediment and Streamflow Prediction, Erosion, Watershed Management, Murat River Basin

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Hidrolojik döngü (USGS).....	4
Şekil 1.2. Sistem kavramı (Bayazıt, 2013).....	5
Şekil 1.3. SWAT Modeli gelişimsel süreci (Gassman vd., 2007).....	7
Şekil 1.4. SWAT modelinde hidrolojik döngü .....	10
Şekil 1.5. SWAT Modelinde suyun izlediği yol.....	11
Şekil 1.6. SCS Eğri Numarası Metodunda yağış ile yüzeysel akış arasındaki ilişki (Neitsch vd., 2009).....	13
Şekil 1.7. SWAT modeli oluşturma katmanları.....	17
Şekil 3.1. Türkiye havzaları ve çalışma alanı konumu.....	23
Şekil 3.2. Çalışma alanı konumu.....	24
Şekil 3.3. E21A074 istasyonu için aylık ortalama debi .....	25
Şekil 3.4. E21A074 istasyonu için yıllık ortalama debi .....	26
Şekil 3.5. E21A077 istasyonu için aylık ortalama debi .....	26
Şekil 3.6. E21A077 istasyonu için yıllık ortalama debi .....	27
Şekil 3.7. LOADEST simülasyon modeli ara yüzü .....	28
Şekil 3.8. Sediment anahtar eğrileri (a) E21A074, (b) E21A077 .....	29
Şekil 3.9. Murat Nehri Havzasında CFSR tarafından temin edilen istasyonların konumları.....	30
Şekil 3.10. Murat Nehri Havzası sayısal yükseklik modeli Haritası.....	31
Şekil 3.11. Murat Nehri Havzası arazi kullanım haritası .....	32
Şekil 3.12. Murat Nehri Havzası toprak sınıfları haritası.....	34
Şekil 4.1. Murat Nehri Havzası eğim sınıfları haritası.....	37
Şekil 4.2. Murat Nehri Havzası bakı haritası.....	38
Şekil 4.3. Murat Nehri Havzası hipsometrik eğrisi.....	39
Şekil 4.4. Murat Nehri Havzası ortalama kotu .....	40
Şekil 5.1. SWAT modeli otomatik havza sınırları belirleme işlemi.....	41
Şekil 5.2. SWAT modeli HRU belirleme işlemi .....	42
Şekil 5.3. SWAT modeli yükseklik bantları ekleme işlemi.....	43
Şekil 5.4. SWAT modeli meteorolojik veriler işleme.....	43
Şekil 5.5. SWAT modeli kurulum ara yüzü .....	44
Şekil 5.6. SWAT Modeli çalıştırma aşamaları diyagramı.....	45
Şekil 5.7. SWAT Modeli ve optimizasyon yöntemleri arasındaki ilişki şeması .....	46
Şekil 5.8. SUFI-2 çalışma şeması.....	47

<b>Şekil 6.9.</b> Latin Hypercube örnekleme yöntemi aşamaları için oluşturulmuş 2 parametrelili ve 3 simülasyonlu bir örnek.....	48
<b>Şekil 6.1.</b> E21A074 numaralı istasyonun aylık akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu.....	57
<b>Şekil 6.2.</b> E21A077 numaralı istasyonun aylık akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu.....	58
<b>Şekil 6.3.</b> E21A074 numaralı istasyonun günlük akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu.....	59
<b>Şekil 6.4.</b> E21A077 numaralı istasyonun günlük akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu.....	60
<b>Şekil 6.5.</b> Aylık akıma ait kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca elde edilen saçılım grafiği (a) E21A074 (b) E21A077 .....	61
<b>Şekil 6.6.</b> Günlük akıma ait kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca elde edilen saçılım grafiği (a) E21A074 (b) E21A077 .....	61
<b>Şekil 6.7.</b> Havzada bulunan kum ocaklarına bir örnek.....	64
<b>Şekil 6.8.</b> E21A074 numaralı istasyonun aylık sediment ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu.....	65
<b>Şekil 6.9.</b> E21A077 numaralı istasyonun aylık sediment ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu.....	66
<b>Şekil 6.10.</b> Aylık sedimente ait kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca elde edilen saçılım grafiği (a) E21A074 (b) E21A077 .....	67
<b>Şekil 6.11.</b> Farklı arazi kullanımlarında meydana gelen erozyon sınıflandırması grafiği .....	68
<b>Şekil 6.12.</b> Toprak cinsine göre meydana gelen erozyon sınıflandırması grafiği .....	69
<b>Şekil 6.13.</b> Farklı eğim sınıflarında meydana gelen erozyon oranları.....	70
<b>Şekil 6.14.</b> Aylık ortalama yağış miktarları.....	71
<b>Şekil 6.15.</b> Aylık ortalama yağışların havza üzerinde dağılımı .....	71
<b>Şekil 6.16.</b> Aylık ortalama yüzeysel akış miktarları .....	72
<b>Şekil 6.17.</b> Aylık ortalama yüzeysel akışların havza üzerinde dağılımı .....	73
<b>Şekil 6.18.</b> Aylık ortalama ET ve PET miktarları.....	74
<b>Şekil 6.19.</b> Aylık ortalama ET değerlerinin havza üzerinde dağılımı .....	74
<b>Şekil 6.20.</b> Aylık ortalama su verimi miktarları .....	75
<b>Şekil 6.21.</b> Aylık ortalama su verimi değerlerinin havza üzerinde dağılımı.....	75
<b>Şekil 6.22.</b> Aylık ortalama kar erimesi miktarları.....	76
<b>Şekil 6.23.</b> Aylık ortalama kar erimesi değerlerinin havza üzerinde dağılımı .....	77
<b>Şekil 6.24.</b> Aylık ortalama sediment verimi miktarları .....	78
<b>Şekil 6.25.</b> Aylık ortalama sediment verimi değerlerinin havza üzerinde dağılımı .....	78
<b>Şekil 6.26.</b> Yağış, yüzeysel akış ve sediment verimi arasındaki ilişki .....	79

<b>Şekil 6.27.</b> Yağış ve sediment verimi arasındaki ilişki .....	80
<b>Şekil 6.28.</b> Yüzeysel akış ve sediment verimi arasındaki ilişki .....	80
<b>Şekil 6.29.</b> Yağış ve akışların dağılımları .....	81
<b>Şekil 6.30.</b> E21A074 istasyonu için (a) günlük ve (b) aylık debi süreklilik eğrisi.....	82
<b>Şekil 6.31.</b> E21A077 istasyonu için (a) günlük ve (b) aylık debi süreklilik eğrisi.....	83
<b>Şekil 6.32.</b> Yıllık maksimum günlük akımların gözlem ve SWAT modeli sonuçlarının en uygun dağılım fonksiyonlarına göre hesaplanmış taşkın tekerrür debilerinin karşılaştırması .....	85



## TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 1.1.</b> Farklı arazi kullanımlarına göre eğri numaraları (Halley vd, 2000).....	14
<b>Tablo 3.1.</b> Murat Nehri Havzası için arazi kullanım/örtüsü ve SWAT kodları .....	33
<b>Tablo 3.2.</b> Murat Nehri Havzası için toprak türleri ve kapladıkları alanlar .....	33
<b>Tablo 3.3.</b> Çalışmada kullanılan veriler ve kaynakları .....	35
<b>Tablo 4.1.</b> Murat Nehri Havzası oluşturulan eğim sınıfları ve alanları.....	36
<b>Tablo 4.2.</b> Hipsometrik eğri hesaplama değerleri .....	39
<b>Tablo 5.1.</b> SWAT Modeli sıcaklık ve kar parametreleri.....	48
<b>Tablo 5.2.</b> Akım ve sediment modellemesi için önerilen belirsizlik faktörleri aralıkları (Abbaspour, 2022) .....	49
<b>Tablo 5.3.</b> Model sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan performans kriter değer aralıkları (Moriasi vd., 2007; Ayele vd., 2017) .....	51
<b>Tablo 6.1.</b> Gözlem istasyonlarının kalibrasyon ve doğrulama periyotlarındaki istatistiksel değerleri.....	53
<b>Tablo 6.2.</b> Akım modellemesi için global hassasiyet analizi sonuçları .....	53
<b>Tablo 6.3.</b> Aylık ve günlük akım modellemesi için elde edilen hassas parametreler .....	54
<b>Tablo 6.4.</b> Aylık ve günlük SWAT Modeli akım kalibrasyon ve doğrulama istatistikleri.....	56
<b>Tablo 6.5.</b> Sediment modellemesi için kullanılan parametreler .....	62
<b>Tablo 6.6.</b> SWAT Modeli sediment ölçümleri kalibrasyon ve doğrulama istatistikleri.....	64
<b>Tablo 6.7.</b> Farklı arazi kullanımlarında meydana gelen erozyonlar .....	68
<b>Tablo 6.8.</b> Toprak cinsine göre meydana gelen erozyon sınıfları.....	69
<b>Tablo 6.9.</b> Eğim sınıfına göre erozyon oranları.....	70
<b>Tablo 6.10.</b> Gözlem ve Model sonuçlarının tekerrür debileri .....	84

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

---

$\overline{Q}_{obs}$	: Gözlemlenen değerin ortalaması
$\overline{Q}_{sim}$	: Simüle edilen değerin ortalaması
$\mu_{10m}$	: Günlük ortalama rüzgar hızı
$\mu wnd_{mon}$	: Aylık ortalama rüzgar hızı
$E_a$	: Günlük buharlaşma ve terleme miktarı (evapotranspiration)
$E_{sub}$	: Günlük süblimleşme miktarı
$H_i$	: Hipsometrik integral
$H_{max}$	: Maksimum yükselti
$H_{min}$	: Minimum yükselti
$H_{ort}$	: Ortalama yükselti
$I_a$	: Başlangıçta tutulan yağış miktarı
$Q_{gw}$	: Günlük geri dönen su miktarı
$Q_{obs}$	: Gözlemlenen değer
$Q_{sim}$	: Simüle edilen değer
$Q_{surf}$	: Günlük yüzeysel akış miktarı
$R_{day}$	: Günlük yağış miktarı
$R_{day}$	: Günlük yağış miktarı
$SNO_{melt}$	: Günlük eriyen kar miktarı
$SW_0$	: Başlangıçtaki toprağın su miktarı
$SW_t$	: Herhangi bir t anında toprağın tuttuğu su miktarı
$W_{seep}$	: Günlük sızma miktarı
$q_{peak}$	: Pik debi
$rnd_1$	: Rastgele bir sayı (0 ile 1 arasında)
$A$	: Havzanın alanı
$C$	: Akış katsayısı
$CN$	: Eğri numarası
$S$	: Tutulma parametresi
$SNO$	: Günlük kar örtüsü içerisinde ki su muhtevası
$i$	: Yağış şiddeti

## Kısaltmalar

---

95PPU	: 95 Percent Prediction Uncertainty
ANSWERS	: Areal Non-Point Source Watershed Environment Response Simulation
ASTER-GDEM	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model
CFSR	: Climate Forecast System Reanalysis
CORINE	: Coordination of Information on the Environment
CREAMS	: Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System
DEM	: Digital Elevation Model-Sayısal Yükseklik Modeli
DSİ	: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EPIC	: Erosion-Productivity Impact Calculator
ET	: Evapotranspirasyon
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United States
GLEAMS	: Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems
GLUE	: Genelleştirilmiş Olasılık Belirsizlik Tahmini
HBV	: Hydrological Simulatin Model
HEC-HMS	: Hydrologic Engineering Central-Hydrological Modeling System
HRU	: Hydrologic Response Unit-Hidrolojik Tepki Birimi
HWSD	: Harmonized World Soil Database
ISSCAS	: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences
JRC	: Joint Research Centre of the European Commission
MCMC	: Markov zinciri monte carlo
METİ	: Japonya Ekonomi, Ticaret ve Endüstri Bakanlığı
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MIKE-SHE	: Generalized River Modeling Package-Systeme Hydroloque Europeen
NASA	: Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NCEP	: The National Centers for Environmental Prediction
NRCS	: Amerika Birleşik Devletleri Doğal Kaynakları Koruma Servisi
NSE	: Nash-Sutcliffe Efficiency
Parasol	: Parametre Çözümü
PBIAS	: Percent of Bias-Yüzdeler sapma
PET	: Potansiyel Evapotranspirasyon
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
R <sup>2</sup>	: Determinasyon katsayısı
ROTO	: Routing Outputs to Outlet
SİO	: Sediment İletim Oranı
SUFI-2	: Sıralı belirsizlik uyumu
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	: SWAT-Calibration and Uncertainty Program
SWMM	: Storm Water Management Model
SWRRB	: Simulator for Water Resources in Rural Basins
USDA-ARS	: Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı – Tarımsal Araştırma Servisi
WXGEN	: Weather Generator Model

# 1. GİRİŞ

Bu bölümde; yapılan çalışmanın önemi, çalışmanın kapsamı ve SWAT modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler hakkında bilgiler verilecektir.

## 1.1. Çalışmanın Önemi

Dünya üzerindeki yaşamın devamı için gerekli olan hidrolojik çevrimin en önemli bileşeni olan yağışlar, yeryüzü üzerinde bir su akımı meydana getirir. Havza yönetim stratejilerinin belirlenmesinde doğru ve güvenilir bir akım tahmini belirleyebilmek önemli bir unsurdur. Hidrolik yapıların planlanması ve projelendirilmesi, akım tahmini çalışmalarına bağlı olarak da gerçekleştirilmektedir. Bununla beraber akım tahmini; bölgesel tarım stratejilerinin oluşturulmasında, çevresel etkilerin analizinde, toprak ve su koruma çalışmalarında ve taşkın koruma planlarının belirlenmesi gibi çalışmalarda da önemli bir faktördür. Yer kabuğu üzerinde oluşan su akımı rüzgâr gibi etkenlerle beraber yüzey üzerinde erozyon oluşumuna neden olmaktadır. Gerçekleşen bu erozyon ile verimli tarım alanları azalmakta ve bunun tekrar geri oluşabilmesi çok uzun yıllar alabilmektedir. Bunun yanında, rüzgâr ve yüzey akışı gibi etkenlerle de erozyona uğrayan topraklar akarsulara taşınmakta ve akarsularda sediment oluşumuna sebebiyet vermektedir. Akarsuların hareketi sırasında askıda, sürüntü veya sıçrayarak taşıdığı katı maddeye sediment; taşınan bu sedimentin zaman içerisinde çökmesine de sedimentasyon denilmektedir. Oluşan bu erozyon; havzanın morfolojik özelliklerine, toprak cinsine, arazi kullanımına ve eğim gibi havzanın fiziksel özelliklerine de doğrudan bağlıdır. Bu gibi etkenlerle sökülen bu taneler, su akımı ile akarsulara sürüklenir ve birçok akarsulardaki toplam sediment yükünün %80-95 gibi büyük bir oranını sürüklenen bu maddeler meydana getirmektedir (Bayazıt ve Avcı, 2010). Dolayısıyla, sediment yüküne bu denli etki eden akım miktarını doğru tahmin edebilmek, su kaynakları mühendisliği açısından büyük önem arz etmektedir (Djebou, 2018).

Barajlar; tarımsal sulama, elektrik üretimi, taşkın kontrolü ve rekreasyon alanları gibi çeşitli nedenlerle yapılmaktadır. İnşa edilen bu hidrolik yapılar, bir akarsuyun önünde set oluşturarak akarsuyun doğal dengesini değiştirmektedir. Akarsular ile taşınarak baraj gibi hidrolik yapıların önünde biriken sediment, önemli bir sorun teşkil etmektedir. Rezervuarlarda biriken sedimentasyonun hem fiziksel hem de kimyasal etkileri olmaktadır (Alemayehu vd., 2014). Fiziksel etki arasında değerlendirilen ve baraj rezervuarında biriken sediment, barajın kullanılabilir ömrünü azaltmaktadır. Kimyasal olarak ise, akarsu içerisinde biriken tortular kirletici kaynak olarak değerlendirilmekte ve su kalitesini düşürmektedir (Juracek ve Stiles, 2010). Sonuç olarak, büyük bütçelerle inşa edilen barajlar gibi hidrolik yapıların kullanılabilir ömürlerini azaltan sediment miktarını doğru tahmin edebilmek büyük önem arz etmektedir. İnşaat mühendisliğinde hidrolik

yapıların inşasında, taşkın kontrolünde, sulama kanallarının tasarımında, erozyonun önlenmesinde ve benzeri gibi konular ile ilgili farklı sorunları çözmek için akarsuyun debi seviye ilişkisinin ve belirli bir debide taşınacak sediment miktarının bilinmesi gerekmektedir (Bayazit & Avcı, 2010).

Sediment miktarını hesaplamada genellikle ampirik ve fiziksel temelli modeller kullanılmaktadır. Ampirik yöntemler, saha gözlemleri, ölçümler, deneyler ile ilgili istatistiksel yöntemler aracılığıyla önemli faktörlerin tanımlanmasına dayanır. Bu yöntemler erozyon tahmininde faydalıdır fakat belirlenen bölgeye özgüdür ve uzun süreli veriler gerektirirler. Bunun yanında, fiziksel modeller kütle ve enerjinin korunumu yasalarını kullanmaktadır ve farklı etkilerin mekânsal ve zamansal değişimlerini göz önüne alırlar. Bu modeller, yüzeysel akışla nehre taşınan ve çökelen sedimentlerin hesaplanmasında kullanılabilirler. Fiziksel temelli bir yazılım programı olan Soil and Water Assessment Tool (SWAT) bu amaçla literatürde sıklıkla sediment ve akım tahmininde kullanılan bir programdır.

Su erozyonu, yer kabuğu üzerindeki parçacıkların taşınmasıyla oluşmaktadır ve küresel ölçekte toprak aşınmasının ana nedenidir (Efe vd., 2008). Dünyadaki tarım arazilerinin yaklaşık %80'i orta ve şiddetli erozyona maruz kalmaktadır (Ritchie vd., 2003). Erozyon ile birlikte, toprak ve arazi kayıpları, toprak veriminin azalması, çölleşme ve neticesinde taşkın ve heyelanlara neden olmaktadır. Dolayısıyla toprak ve su koruma planları ve havza yönetim planlamalarında bölgesel ölçekte erozyon tahmini yapabilmek çok önemlidir (Dutta, 2016). Esas olarak toprak erozyonu aşınabilir topraklarda, yüksek arazi eğimlerinde ve yoğun yağışlarda meydana gelir (Beskow vd., 2009). Ancak, havzadan aşındırılan tortu parçacıklarının bir kısmı havzanın üst kısmında tutuldukları için tamamı havzanın alt kısımlarına ulaşamaz. Havzanın çıkışına ulaşabilmiş aşınmış malzemeye sediment verimi denilmektedir ve bu parametre hidrolik yapıların tasarımında önemli bir değişkendir (Dutta, 2016; Walling, 1983). Ayrıca, sediment verimi, Sediment İletim Oranı (SİO) kullanılarak da tahmin edilebilir (Ouyang ve Bartholic, 1997). SİO, sedimentasyon ve toprak erozyonun kontrolünde, çevre koruma ve sürdürülebilir yönetim için önemli bir değişkendir. SİO, sediment veriminin, havzadaki toplam erozyona oranı olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle, sediment verimi, sediment iletim oranı ve toprak erozyonu, barajın ekonomik ömrünü belirlemek için sedimentasyonun bir fonksiyonu haline gelir (Dutta, 2016).

Erozyon ve sedimentasyon, ülkemizde olduğu gibi dünya genelinde de tarımsal, çevresel ve ekonomik problemlere neden olmaktadır (Wu ve Chen, 2012; Mosbahi vd., 2013). Bunun yanında, iklim değişikliği, toprak kullanım alanlarının zamanla değişimi gibi insan kaynaklı müdahaleler de toprak erozyonunu daha büyük bir problem haline getirmiştir (Zare vd., 2017). Bu sebeple, erozyonun çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek için alt havza ölçeğinde toprak ve su kaynaklarının korunmasına yönelik çabalara ihtiyaç vardır. Havza ölçeğinde toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, uygun bilimsel çalışmalara dayalı etkin planlamayı ve farklı

kaynaklardan çeşitli girdilerle yağış-akış modellerini kullanmayı gerektirir (Bouslihim, 2020). Bu sebeple, toprak erozyonu ölçümü, sediment ve akım tahmini gibi birçok çevresel sorun havza yönetim planlamalarında uygun çözümler getirebilmek için simüle edilir (Bouslihim, 2020).

Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü'nün yaptığı çalışmaya göre (CEM, 2018); Türkiye'de her yıl maksimum 642 milyon ton toprak erozyon sebebiyle taşınmaktadır ve ortalama 8.24 ton/hektar toprak su erozyonu sonucu her yıl yer değiştirmektedir. Bu değerler ülkemiz yüzölçümünün %5.97'sinde şiddetli ve %6.7'sinde çok şiddetli erozyon sınıfı olarak görülmektedir (CEM, 2018). Bununla beraber, ülkemiz akarsularından her yıl 154 milyon ton toprak taşınmaktadır. Bu değer, yaklaşık olarak yılda 2 ton/hektar toprağın akarsular tarafından taşındığını göstermektedir (CEM, 2018). Havza bazlı yapılan incelemelerde görülmüştür ki, ülkemizde meydana gelen 642 milyon ton toprak erozyonunun 160 milyon tonu Fırat-Dicle havzasında gerçekleşmiştir (CEM, 2018). Bu değer de göstermektedir ki ülkemizdeki toprak erozyonunun yaklaşık dörtte biri sadece Fırat-Dicle havzasında meydana gelmektedir. Ayrıca, ülkemiz akarsularından taşınan 154 milyon ton toprağın da yaklaşık 84 milyon tonu Fırat-Dicle havzasında bulunan akarsular tarafından taşınmaktadır (CEM, 2018). Bu değerler de ülkemiz akarsuları tarafından taşınan toprağın %54 'ü Fırat-Dicle havzasında bulunan akarsular tarafından taşındığı anlamına gelmektedir.

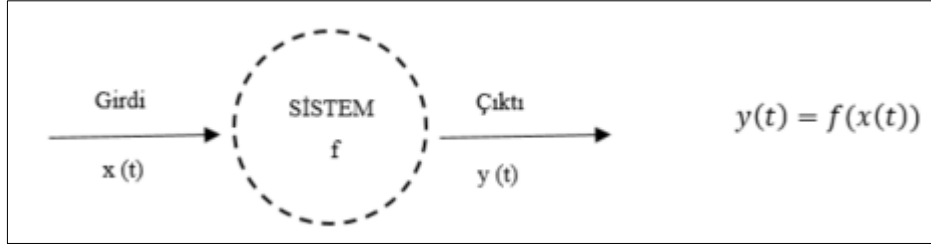
Bütün bu sonuçlar göstermiştir ki akım ve sediment tahmini ve erozyona duyarlı alanların belirlenebilmesi; hidrolik yapıların tasarımında, su kaynakların yönetilmesinde ve havza yönetim planlarının uygulanmasında çok önemlidir. Bununla beraber, ülkemizin en yüksek su potansiyeline sahip Fırat-Dicle havzası üzerinde yapılacak çalışmalarda önem kazanmaktadır.

## 1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada Fırat-Dicle havzasının üst kısmında yer alan Murat Nehri havzasının akım ve sediment tahmini yapılarak, alt havza ölçeğinde erozyona yatkın alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda fiziksel tabanlı hidrolojik bir model olan SWAT modeli kullanılmıştır. Çalışma alanında bulunan iki ölçüm istasyonundan (E21A074, Murat Nehri-Akkonak ve E21A077, Hıms Çayı-Adıvar) alınan günlük ve aylık akım ve aylık sediment verileri SWAT modelinden elde edilen sonuçlarla, istatistiksel metotlar kullanılarak, karşılaştırılmıştır. Çalışmanın detaylı olarak amaçları şu şekilde sıralanabilir;

- SWAT modelinden elde edilen günlük ve aylık akım tahminleri ile aylık sediment tahminlerinin havzada bulunan iki ölçüm istasyonundan alınan akım ve sediment verileri ile karşılaştırmasının yapılması ve modelin havza üzerinde kullanılabilirliğinin belirlenmesi,
- SWAT modelini günlük ölçekte çalıştırarak akım tahmini yapılması ve modelin günlük ve aylık ölçekte karşılaştırmasının yapılması,





Şekil 1.2. Sistem kavramı (Bayazıt, 2013)

Hidrolojik döngü de yağış, buharlaşma, yüzeysel akış ve hidrolojik döngünün diğer parametreleri ile hidrolojik sistem olarak tanımlanabilir (Chow vd., 1998). Hidrolojik sistemde kütle korunumu prensibine dayalı olarak su bütçesi denklemi esastır. Bu denklemde sisteme giren akışlar pozitif olarak, sistemden çıkan akışlar ise negatif olarak belirtilmektedir.

Dünya genelinde, doğada bulunan su miktarı dinamik bir dengededir ve zaman içerisinde toplam su miktarı değişim göstermez. Başka bir deyişle, hidrolojik döngüde yer alan, giren ve çıkan su miktarı, uzun bir zaman periyodu ele alındığında, birbirine eşittir. Örnek olarak bir yıl içerisinde dünya genelinde gerçekleşen yağış miktarı aynı yıl içerisinde buharlaşma vasıtasıyla atmosfere geri dönen su miktarına eşittir (Bayazıt, 2013). Fakat bu olgu, kısa zaman periyotları göz önüne alındığında değişmektedir. Bununla beraber, orman alanlarının azaltılması, bitki örtüsünün değiştirilmesi, şehirleşme gibi insan kaynaklı faktörler de hidrolojik döngüyü etkilemektedir. Örneğin, bitki örtüsünün değişimi ile sızma ve terleme kayıpları etkilenebilmektedir. Ayrıca, orman alanlarının azaltılması, bölgenin erozyona daha duyarlı hale gelmesine ve taşkın ihtimalinin artmasına sebep olabilir. Bununla beraber, şehirleşme gibi etkenler, sızma miktarını azaltarak yüzeysel akışı artırmaktadır ve ayrıca kirletici atıkların akarsulara daha fazla miktarda iletimine sebep olacağı için su kalitesinin de azalmasına sebebiyet verebilmektedir (Bayazıt, 2013). Bütün bu etkilerin sonucu olarak da arazi, toprak ve bitki örtüsü değişimlerinin ve iklim değişikliklerinin havzalar üzerindeki etkisini değerlendirebilmek için farklı hidrolojik modeller geliştirilmiştir (Abdulkareem vd., 2018).

Havza yönetim planlamalarında hidrolojik çevrimdeki parametrelerin sayısallaştırılması oldukça zordur. Bu sebeple, hidrolojik döngüdeki parametrelerin belirlenmesi ve belirlenen değerlere göre havza ve su kaynakları yönetim planlamalarının yapılabilmesi için hidrolojik modeller zaman içerisinde geliştirilmiştir (Yıldırım, 2018). Model, gerçekte var olan bir sistemin basitleştirilmiş bir temsidir ve bu nedenle gerçeğe en yakın sonuçları veren model en iyi model olarak kabul edilmektedir (Devia vd., 2015). Hidrolojik modeller, çalışma alanındaki hidrolojik süreçlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için gerçek bir havza sisteminin basitleştirilmiş bir temsidir (Abdulkareem vd., 2018). Havza bazlı hidrolojik modeller, su kaynaklarının değerlendirilmesi, geliştirilmesi, havza ve su kaynakları yönetim uygulamaları için çok önemlidir.

Bu modeller, akarsulardaki akış miktarını ve su kalitesini, yeraltı suyu geliştirme ve korumayı, su dağıtım sistemleri ve su kullanımlarını ve birçok su kaynakları yönetimi faaliyetlerini analiz etmek için de kullanılmaktadır (Singh ve Woolhiser, 2003).

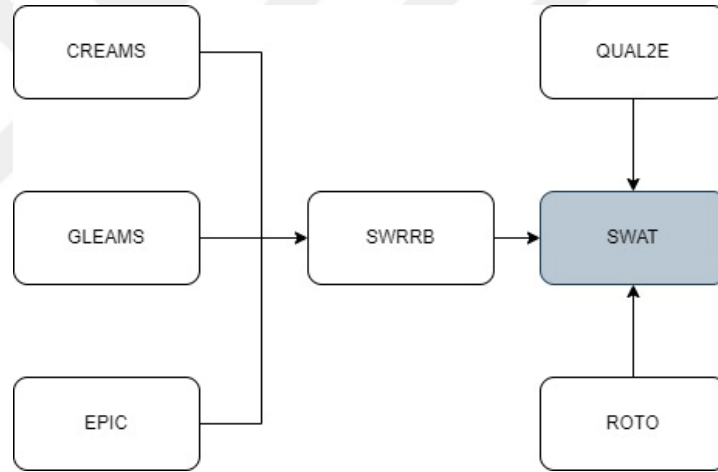
Bilgisayar teknolojisinin son yıllarda hızla gelişmesine paralel olarak hidrolojik modellemelerde de gelişmeler yaşanmıştır. Özellikle, coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde havza modelleme çalışmalarında çok önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Bouslihim, 2020). Hidrolojik modeller, yüzeysel akış, buharlaşma, toprak erozyonu, su kalitesi modellemesi, sediment miktarı tahmini ve yer altı suyu akışı modellenmesi gibi farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Bu modeller arasında; HEC-HMS (Hydrologic Engineering Central-Hydrological Modeling System) (Feldman, 1981), SWMM (Storm Water Management Model) (Metcalf & Eddy, 1971). HBV (Hydrological Simulation Model) (Bergström, 1976), CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System) (Knisel, 1980), ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation) (Beasley vd., 1980), MIKE-SHE (Generalized River Modeling Package-System Hydrologique Europeen) (Refsgaard ve Storm, 1995) ve SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold vd., 1998) bulunmaktadır.

#### **1.4. SWAT Modeli ve Tarihsel Gelişimi**

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeli Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı – Tarımsal Araştırma Servisi (USDA-ARS) ve Texas A&M Üniversitesi tarafından geliştirilen bir havza modelidir (Arnold vd., 1998). SWAT modeli fiziksel tabanlı açık kaynak bir program olup belirlenen bir havza üzerinde yüzeysel akış, sediment, su kalitesi gibi hidrolojik parametreleri modelleyebilmektedir.

Tarihsel süreç içerisinde SWAT modelinin geliştirilmesine altyapı sağlayan birçok hidrolojik model bulunmaktadır. 1970'lerin ortalarında, Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı - Tarımsal Araştırma Servisi (USDA-ARS), disiplinler arası bilim adamlarından oluşan bir ekibi saha ölçeği için süreç tabanlı, noktasal olmayan bir kaynak simülasyon modeli geliştirmek için teşvik etmiştir (Krysanova ve Arnold, 2008). Bu araştırmaların sonucunda, arazi yönetiminin sediment, su ve bitkilerin besin maddeleri üzerinde ki etkilerini simüle edebilmek için CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) adlı bir model geliştirilmiştir (Knisel, 1980). Devam eden yıllarda CREAMS modeli tabanlı birçok yazılım daha zamanla geliştirildi. Bu modeller arasında yer alan EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Williams vd., 1984) modeli başlangıçta erozyonun tarım mahsulleri üzerindeki etkilerini simüle etmek için geliştirilse de daha sonra tarımsal yönetim ve noktasal olmayan kaynak yüklerinin değerlendirilmesi için kapsamlı bir tarım alanı ölçeğinde modele dönüşmüştür. Bir diğer model olan GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) (Leonard

vd., 1987) modeli tarımsal ilaçlar ve bitki besin maddelerinin yer altı suları üzerindeki etkilerini incelemek üzere geliştirilmiştir. Yukarıda bahsedilen modellerin geliştirilmesinden sonraki adım, birden çok alt havzaya bölünmüş su havzaları için tasarlanmış SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Arnold vd.,1990) modelinin geliştirilmesiydi. Geliştirilen SWRRB modeli CREAMS, EPIC ve GLEAMS modellerindeki bileşimlerin modifikasyonu sonucu ve bazı eklenen bileşimlerle beraber ölçümü olmayan kırsal havzalar için akım ve sediment taşınımını simüle etmek için kullanılmıştır. Fakat, SWRRB modeli küçük havzaları modellemede başarılı olsa da büyük havzalarda kullanımı sınırlıydı. Özellikle modelin havzayı yalnızca on alt havzaya bölmeye müsaade edecek şekilde çalışması nedeniyle de yeni modeller geliştirilme ihtiyacı ortaya çıkmıştır (Neitsch vd., 2005). Birden fazla SWRRB çalışmasını birbirine bağlayarak alt havzaların birbirleriyle etkileşimlerini değerlendiren ROTO (Routing Outputs to Outlet) programının ve nehir akış kinematiklerinin hesaplanmasında kullanılan QUAL2E modelinin de geliştirilmesiyle birlikte günümüzde kullanılan SWAT modelinin temeli atılmış oldu (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. SWAT Modeli gelişimsel süreci (Gassman vd., 2007)

1990'lı yılların başında geliştirilen SWAT modelini günümüzde halen geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Zaman içerisinde geliştirilen sürümler ve bu sürümlerde gerçekleştirilen bazı özellikler şu şekilde verilmiştir (Williams vd., 2008);

- SWAT94.2 : Birden fazla HRU (Hydrologic Response Unit-Hidrolojik Tepki Birimi) eklendi.
- SWAT96.2 : Yönetim seçenekleri olarak otomatik gübreleme ve otomatik sulama eklendi, Penman-Monteith potansiyel terleme-buharlaştırma eşitliği eklendi.
- SWAT98.1 : Kar erimesi ara yüzü geliştirildi
- SWAT99.2 : Besin döngüsü ara yüzü geliştirildi

- SWAT2000 : Bakteri taşınma ara yüzü eklendi, Green & Ampt sızma eşitliği eklendi, meteorolojik verilerin sisteme tanıtılmasına olanak sağlandı, yükseklik bandı işlemleri geliştirildi, Muskingum yönlendirme metodu eklendi.
- SWAT2005 : Bakteri taşınma ara yüzü geliştirildi, hava tahmin senaryoları eklendi, sediment taşınımı ara yüzü geliştirildi.
- SWAT2009 : Bakteri taşınma ara yüzü geliştirildi, hava tahmin senaryoları geliştirildi, nitrat ve amonyumun ıslak ve kuru birikimi iyileştirildi.
- SWAT2012 : Alt havzalar ölçeğinde akım ve sediment ara yüzü geliştirildi, akım içerisindeki fosfor döngüsü ve toprak ara yüzü geliştirildi.

Bu tez çalışmasında SWAT modelinin SWAT2012 sürümü kullanılmış olmasına rağmen geliştirilen son sürümü SWAT+ versiyonudur.

#### 1.4.1. SWAT Modeli Hidrolojik Parametreleri

SWAT modeli, büyük karmaşık havzalarda arazi yönetimi uygulamalarının su, sediment ve kirleticilerin havzalar üzerindeki etkilerini tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bir hidrolojik modeldir. Pestisitlerin veya sedimentlerin hareketini doğru bir şekilde tahmin etmek için, model tarafından simüle edilen hidrolojik döngü, havzada olup bitenlere uygun olmalıdır (Neitsch vd., 2009). Bu amaçlarla oluşturulan SWAT modeli simülasyonu iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk kısım hidrolojik döngünün kara safhasıdır. Bu safhada hidrolojik döngü su dengesi denkleminde (Denklem 1.1) bağlı olarak her bir alt havzadaki sediment miktarı, su miktarı, bitki besin ve pestisitlerin oluşumları olarak değerlendirilmektedir. Bu aşamada havza çok sayıda alt havzalara bölünmektedir. Elde edilen her bir alt havza için toprak cinsi, bitki örtüsü, arazi kullanımı ve eğim gibi sınıflandırmalarda benzer özellik gösteren alt havzalar Hidrolojik Tepki Birimi (Hydrological Response Unit, HRU) olarak adlandırılan modelin en küçük birimlerine bölünür. Denklem 1.1'de verilen su dengesi elemanları her bir HRU bazında hesaplanarak modeli oluşturmaktadır. İkinci kısımda ise, her bir HRU bazında oluşturulmuş su ve sediment gibi hidrolojik parametrelerin havzanın topografyası yardımıyla havzanın çıkışına doğru yönlendirilen öteleme aşamasıdır.

SWAT modeli temel olarak hidrolojik döngüde aşağıda verilen su dengesi denklemini baz almaktadır.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1.1)$$

Denklemden;

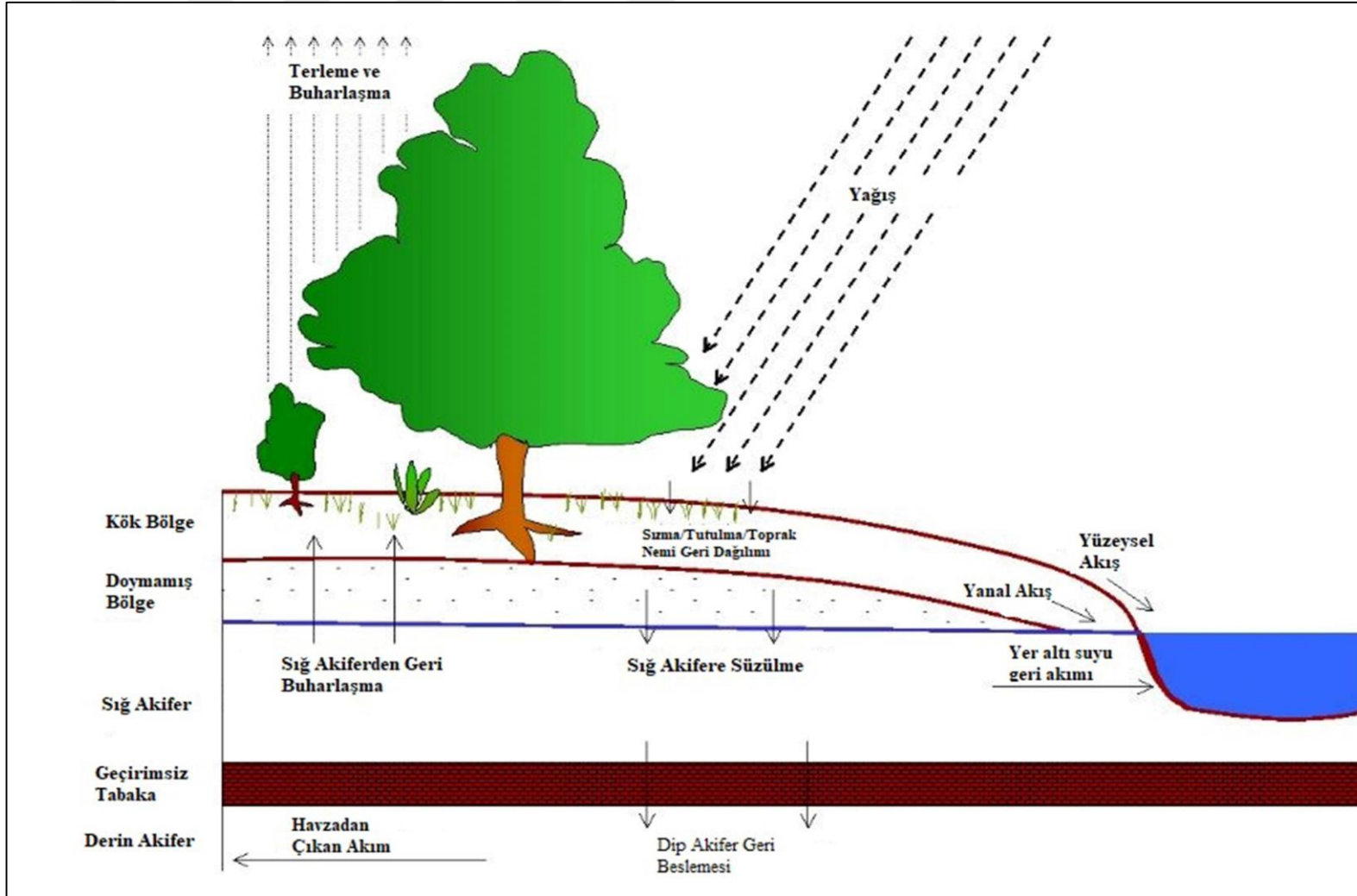
$SW_t$  : Herhangi bir t anında toprağın tuttuğu su miktarı (mm),

$SW_0$  : Başlangıçtaki toprağın su miktarı (mm)

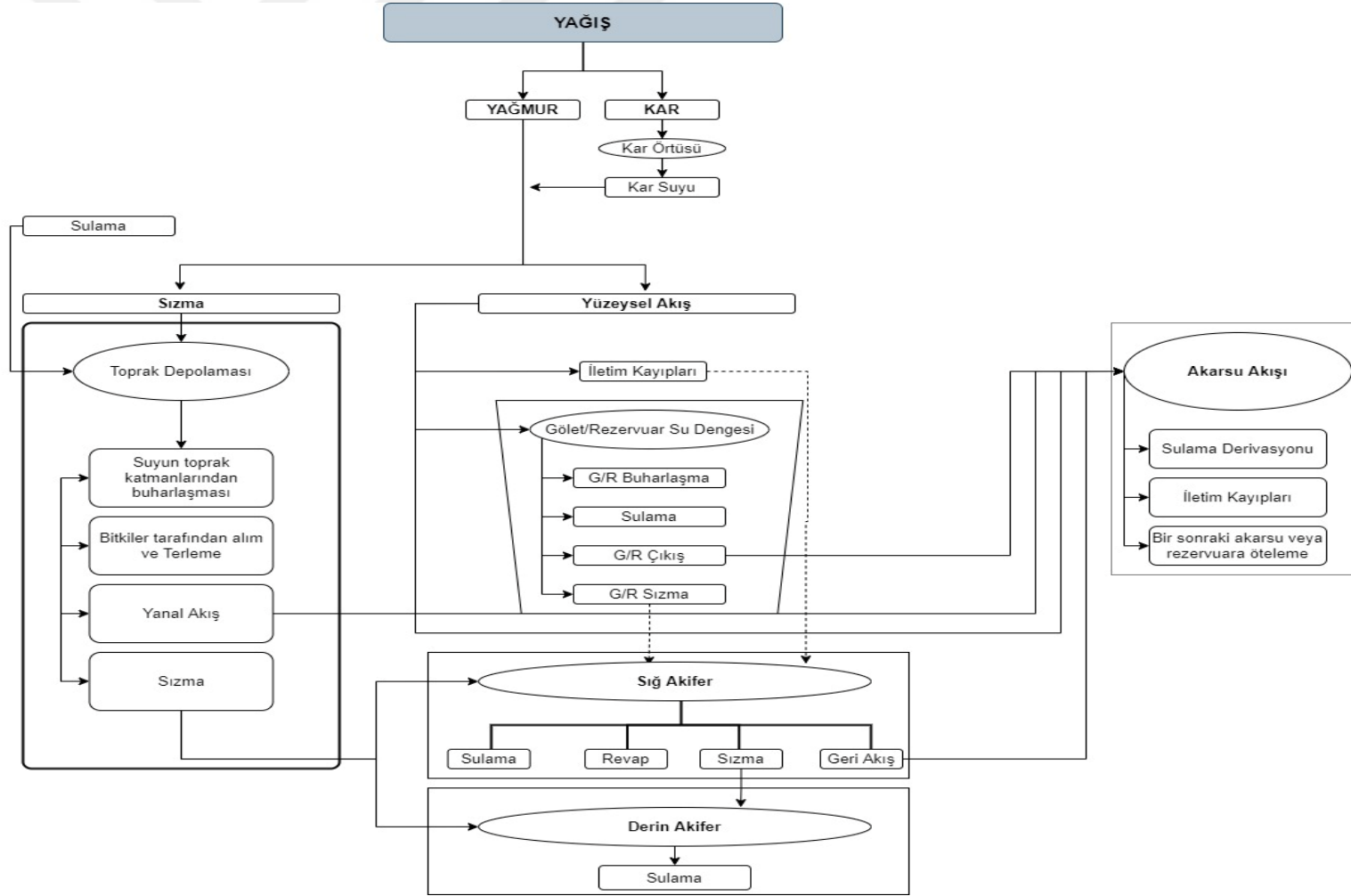
$R_{day}$  : Günlük yağış miktarı (mm)

- $Q_{surf}$  : Günlük yüzeysel akış miktarı (mm)  
 $E_a$  : Günlük buharlaşma ve terleme miktarı (evapotranspiration) (mm)  
 $W_{seep}$  : Günlük sızma miktarı (mm)  
 $Q_{gw}$  : Günlük geri dönen su miktarını (mm) ifade etmektedir.

Havza zerine düşen yağışların bir kısmı bitkiler tarafından tutulmakta, bir kısmı yeryüzüne düşerek doğrudan yüzeysel akışa geçerken bir kısmı da toprak içerisine zamanla sızmaya başlar. Yer ekimi etkisiyle de sızan su sırasıyla kök bölgesine, sığ akifere ve derin akifere doğru aşağı yönlü bir hareket gerçekleştirir. Bu suyun da bir miktarı tekrar geri akışa dönebildiği gibi kılcallık etkisiyle de sığ akiferden yukarı yönlü olarak kök bölgesine geçiş yapabilmekte ve bitkiler tarafından depolanan su da terleme ile tekrar atmosfere geri dönebilmektedir. Gerçekleşen bu su döngüsü şekil 1.4'te gösterilmiştir. Ayrıca SWAT modeli içerisinde suyun izlediği yol detaylı olarak şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.4. SWAT modelinde hidrolojik döngü



Şekil 1.5. SWAT Modelinde suyun izlediği yol

## Yüzeysel Akış

Yüzeysel akış, hidrolojik döngünün en önemli parametrelerindedir. Yer yüzeyine düşen yağışın sızma ve buharlaşma ile oluşan kaybindan geri kalan ve arazinin topoğrafyasına bağlı olarak akışa geçen kısmına yüzeysel akış denilmektedir. Yağışlar öncelikle kuru bir toprak üzerine geldiğinde sızma miktarı daha yüksek olacağından dolayı yüzeysel akış miktarı daha az olacaktır. Bunun yanında, toprağın suya doygunluk oranının artmasına paralel olarak yüzeysel akış miktarı da artacaktır. Ayrıca, yağış miktarının yanı sıra yağış şiddeti de yüzeysel akışı etkileyen faktörlerdendir. SWAT modeli yüzeysel akış hesabını SCS eğri numarası (SCS, 1972) ve Green&Ampt infiltrasyon denklemleri (Green ve Ampt, 1911) kullanarak hesaplayabilmektedir. Green & Ampt denklemi, her zaman yüzeyde fazla su varsayarak sızmayı tahmin etmek için geliştirilmiştir. Denklem, toprak profilinin homojen olduğunu ve önceki nemin profile düzgün bir şekilde dağıldığını varsayar. SCS eğri numarası yönteminde ise toprak neminin düzgün olmayan bir şekilde dağıldığını varsayar. SCS eğri numarası yönteminde ise toprak neminin düzgün olmayan bir şekilde dağılım gösterdiğini varsaymaktadır. SCS eğri numarası yönteminde yüzeysel akışı elde edebilmek için yağış, hidrolojik toprak grupları, arazi kullanımı ve arazi örtüsü gibi parametreler kullanılmaktadır. Bu verilere göre CN değeri 0-100 arasında bir değer olacaktır (Saral, 2010). Bu çalışmada da SWAT modeli içerisinde yüzeysel akış hesabı için SCS CN metodu kullanılmıştır.

SCS eğri numarası yöntemi değişen arazi kullanımı ve farklı toprak türleri altında yüzeysel akışı tahmin etmek için Denklem 1.2 geliştirilmiştir (SCS, 1972).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (1.2)$$

Denklemden;

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

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

$I_a$  : Başlangıçta tutulan yağış miktarı (mm)

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

Denklemden de görüldüğü üzere yüzeysel akışın meydana gelebilmesi için günlük yağın yağış miktarının ( $R_{day}$ ), başlangıçta tutulan su miktarından ( $I_a$ ) fazla olması gerekmektedir.

Tutulma parametresi ( $S$ ), toprak tipine, arazi kullanım durumuna, arazinin eğimine ve toprağın içerdiği su miktarına bağlı olarak değişmektedir ve Denklem 1.3'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Neitsch vd., 2009).

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (1.3)$$

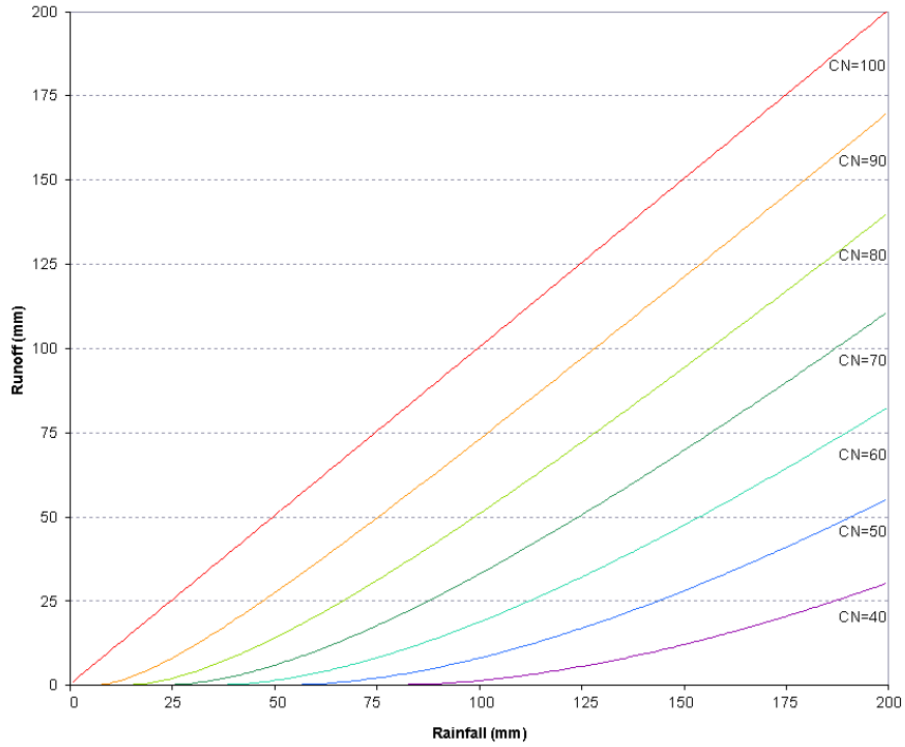
Denklemdede;

$CN$  : Eğri numarasıdır.

Başlangıçta tutulan yağış miktarı ( $I_a$ ), yaklaşık olarak tutulma parametresinin ( $S$ ) 0.2 katıdır ( $I_a = 0.2S$ ). Bu parametre Denklem 1.2’de yerine koyulduğu zaman denklem, Denklem 1.4’ teki gibi olmaktadır;

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (1.4)$$

Eğri numarası ( $CN$ ) ile yağış ve yüzeysel akış arasındaki değişim Şekil 1.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. SCS Eğri Numarası Metodunda yağış ile yüzeysel akış arasındaki ilişki (Neitsch vd., 2009)

Yüzeysel akışı değiştiren en önemli parametrelerden biri toprak tipidir. Amerika Birleşik Devletleri Doğal Kaynakları Koruma Servisi (NRCS), toprağı sızma karakterlerine göre aşağıda verilen şekilde dört sınıfa ayırmıştır.

*Grup A* : Düşük yüzeysel akış potansiyeline ve yüksek sızma oranına sahiptir. Kumlu ve çakıllı topraklardır. Yüksek su geçirme kapasitesi bulunur.

*Grup B* : Orta dereceli veya normal akış potansiyelli toprak tipleridir. Su geçirme kapasiteleri orta derecelidir.

*Grup C* : Yüksek akış potansiyelli ve düşük drenajlı toprak tipleridir. Sızma oranları düşüktür ve düşük su geçirme kapasiteleri mevcuttur.

*Grup D* : Çok yüksek akış potansiyelli ve çok düşük drenajlı toprak tipleridir. Islanınca şişme potansiyeline sahip killi topraklardır. Yüksek taban suyu seviyesine sahip, alt tabakaları geçirimsiz ve çok düşük su geçirme kapasiteleri olan toprak tipleridir.

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan eğri numarası (*CN*), farklı arazi kullanımı, farklı arazi örtüsü ve farklı toprak tipine göre değişken değerler almaktadır. Tablo 1.1' de bazı farklı arazi kullanım şekline ve farklı toprak tipine karşılık gelen eğri numaraları örnek olarak verilmiştir.

**Tablo 1.1.** Farklı arazi kullanımlarına göre eğri numaraları (Halley vd., 2000)

Arazi Kullanımı	Toprak Gruplarına Göre Eğri Numaraları (CN)			
	A	B	C	D
Yüksek Yoğunluklu Yerleşim Alanı	77	85	90	92
Orta Yoğunluklu Yerleşim Alanı	57	72	81	86
Düşük Yoğunluklu Yerleşim Alanı	48	66	78	83
Ticari Alanlar	89	92	94	95
Endüstriyel Alanlar	81	88	91	93
Tarımsal Alanları	67	77	83	87
Çayır, Mera, Otlak Alanlar	30	58	71	78
Sık Orman Alanları	30	55	70	77
Seyrek Orman Alanları	43	65	76	82
Su, Sulak Alanlar	100	100	100	100

Yağış şiddetinin yüksek olduğu zamanlarda pik debilerin oluşması muhtemeldir. SWAT modeli pik debiyi hesaplamak için rasyonel yöntemi (Rational Method) kullanmaktadır (Denklem 1.5) (Neitsch vd., 2009).

$$q_{peak} = \frac{C.i.A}{3.6} \quad (1.5)$$

Denklemdede;

$q_{peak}$  : Pik debi (m<sup>3</sup>/sn)

$C$  : Akış katsayısı

$i$  : Yağış şiddeti (mm/s)

$A$  : Havzanın alanıdır (km<sup>2</sup>).

### **Evapotranspirasyon**

Evapotranspirasyon (ET), yer yüzeyindeki suyun su buharına dönüştüğü tüm süreçleri içeren geniş bir terimdir. Bitki örtüsünden buharlaşmayı, terlemeyi, süblimleşmeyi ve topraktan buharlaşmayı içerir. Potansiyel evapotranspirasyon (PET) ise gerçekleşebilecek maksimum evapotranspirasyondur. Literatürde evapotranspirasyon miktarını hesaplamak için farklı metotlar kullanılmıştır. SWAT modeli ise Penman-Monteith (Monteith, 1965), Priestley-Taylor (Priestly ve Taylor, 1972) ve Hargreaves (Hargreaves ve Samani, 1985) metodunu evapotranspirasyon hesabında kullanmaktadır. Bahsedilen üç metot da farklı parametre girdileri ile hesaplama yapmaktadır. Penman-Monteith metodu için güneş radyasyonu, hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgâr hızı verileri; Priestley-Taylor metodu için güneş radyasyonu, hava sıcaklığı ve bağıl nem gerekiyken, Hargreaves yöntemi için sadece hava sıcaklığı yeterlidir. Bu çalışmada gerekli olan tüm veriler elde edilebildiğinden evapotranspirasyon hesaplamasında Penman-Monteith metodu kullanılmıştır.

#### **1.4.2. SWAT Modeli İklim Parametreleri**

Su, hidrolojik döngü içerisine yağış olarak girdiğinde özellikle güneş radyasyonu hidrolojik döngünün kara fazındaki suyun hareketi üzerinde önemli bir etkendir. Kar yağışı, kar erimesi ve buharlaşma gibi faktörler özellikle hava sıcaklığı ve güneş radyasyonu gibi faktörlerden etkilenmektedir (Neitsch vd., 2009).

Hava sıcaklığı; kimyasal, fiziksel ve biyolojik bir dizi süreci etkiler. Bitkisel üretim, organik madde ayrışması ve mineralizasyon gibi faktörler sıcaklığa güçlü bir şekilde bağlıdır. Günlük hava sıcaklığı modele direkt girdi olarak girilebilir veya ortalama aylık değerlerden türetilir. Ayrıca toprak ve su sıcaklıkları da hava sıcaklıkları kullanılarak elde edilir. Sıcaklık ve güneş radyasyonu

birbirleriyle doğrudan ilişkilidir. Maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık ve güneş radyasyonu değerleri SWAT modelinde girdi olarak kullanılmaktadır (Neitsch vd., 2009).

Eğer buharlaşma ve terleme hesaplamalarında Penman-Monteith eşitliği kullanılarak model oluşturulduysa, rüzgâr hızı değeri de modele girdi olarak girilmelidir. Modelin rüzgâr hızını hesaplamada kullandığı eşitlik şu şekildedir;

$$\mu_{10m} = \mu wnd_{mon} * (-\ln(rnd_1))^{0.3} \quad (1.6)$$

Denklemdede;

$\mu_{10m}$  : Günlük ortalama rüzgar hızı (m/s)

$\mu wnd_{mon}$  : Aylık ortalama rüzgar hızı (m/s)

$rnd_1$  : Rastgele bir sayıdır (0 ile 1 arasında).

SWAT modeli içerisinde WXGEN isimli (Weather Generator Model) iklim üretim modeli, iklim verilerini üretmek ve eksik olan bu verileri tamamlamak için kullanılmaktadır. Gün içerisinde eğer yağış oluşmuş ise bunun bağıl nem, hava sıcaklığı ve güneş radyasyonu üzerinde belirgin ölçüde etkileri olmaktadır. Bu nedenle model, öncelikle o gün içerisindeki toplam yağış değerlerini üretmektedir. Daha sonra, maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, bağıl nem ve güneş radyasyonu o gün için yağmurun olup olmamasına göre üretilir. Son olarak ise rüzgâr hızı hesaplanmaktadır (Neitsch vd., 2009).

Yağış, SWAT modeli içerisinde yağmur veya kar şeklinde sınıflandırılmaktadır. Kar yağışı ise yeryüzü üzerine düşerek kar örtüsünü oluşturmaktadır. Denklem 1.7' den görüldüğü üzere de kar yağışı kar örtüsünü arttırırken, süblimleşme ve kar erimesi de kar örtüsünü azaltmaktadır (Neitsch vd., 2009). Kar SWAT modelinin kar örtüsünü hesaplarken kullandığı eşitlik şu şekildedir;

$$SNO = SNO + R_{day} - E_{sub} - SNO_{melt} \quad (1.7)$$

Denklemdede;

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

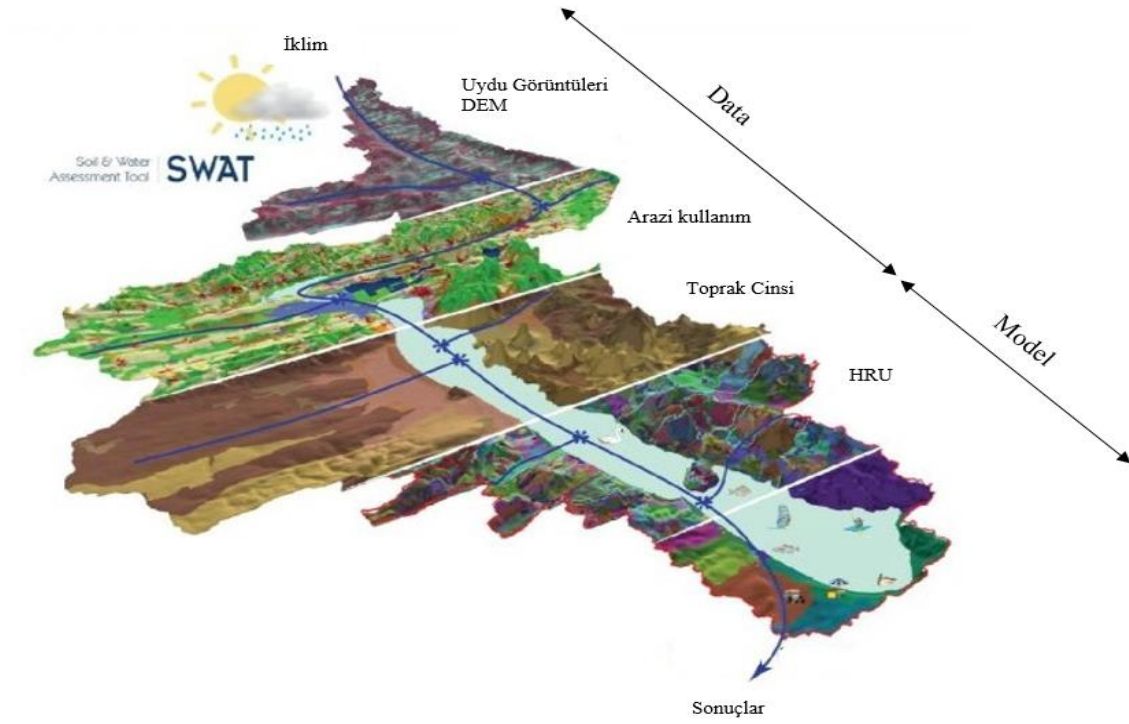
$R_{day}$  : Günlük yağış miktarı (mm H<sub>2</sub>O)

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

$SNO_{melt}$  : Günlük eriyen kar miktarıdır. (mm H<sub>2</sub>O)

SWAT modeli içersine girdi olarak girilen bir diğer iklim verisi bağıl nemdir. Bağıl nem, havada bulunan su buharı miktarıdır. Havanın belirli bir sıcaklıkta ne kadar nem tutabileceğinin yüzdesel ifadesidir. Bu parametre SWAT modelinde evapotranspirasyon hesaplanması yapılırken Penman-Monteith eşitliği kullanılmışsa gereklidir. Ayrıca bitki büyümesi üzerindeki buhar basıncı açığını hesaplamak içinde kullanılmaktadır (Neitsch vd., 2009).

Şekil 1.7’de SWAT modelinin kurulması için gerekli olan katmanlar görselleştirilmiştir. Elde edilen ve model altyapısına uygun hale getirilen parametreler modelin çalışma prensibine göre sırasıyla modele tanıtılır. DEM, arazi kullanım/örtüsü ve toprak cinsi haritaları modele işlenerek hidrolojik tepki birimleri oluşturulur. Havza üzerinde varsa farklı su kullanımları da modele işlenir ve belirlenen zaman periyodunda çalıştırılarak sonuçlar elde edilir.



Şekil 1.7. SWAT modeli oluşturma katmanları

## 2. SWAT MODELİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelerin ve buna paralel olarak Coğrafi Bilgi Sistemlerinde ki gelişmelerin, hidrolojik modellemeler üzerinde de pozitif yönlü yansımaları olmuştur. Bu kapsamda geliştirilen SWAT modeli literatürde son zamanlarda sıklıkla kullanılan ve geniş bir kullanım ağına sahip hidrolojik bir modelleme aracıdır (Akoko vd., 2021). Model, su kaynaklarını değerlendirmek ve arazi kullanımı ve bitki örtüsü değişikliklerini, toprak erozyonu, sediment ve su kalitesi vb. hidrolojik parametrelerin havzalar üzerindeki etkilerini tahmin etmek için geliştirilmiştir. Bu kapsamda SWAT modeli kullanılarak farklı amaçlarla yapılan literatürdeki çalışmaların bazıları bu bölümde aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Vilaysane ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları bir çalışma, SWAT modelinin akım tahmininde uygulanabilirliğini test etmek amacıyla Xedone Nehri üzerinde gerçekleştirilmiştir. 7225 km<sup>2</sup> havza üzerinde yaptıkları çalışmada SWAT modelini hem aylık hem de günlük olarak simülasyonunu sağlamışlar ve 1993-2000 yılları arasında kalibrasyonunu ve 2001-2008 yılları arasında ise doğrulamasını yapmışlardır. Günlük periyotta çalıştırdıkları simülasyonun istatistiksel sonuçlarına göre 0.70 'in üzerinde Nash-Sutcliffe (NSE) ve R<sup>2</sup> değerlerini elde etmişlerdir. Aylık periyotta çalıştırdıkları simülasyonun istatistiksel sonuçlarına göre ise NSE ve R<sup>2</sup> değerlerinde 0.80 değerinin üzerine çıkmışlardır. Sonuç olarak buldukları değerler ile SWAT modelinin çalıştırdıkları havza üzerinde uygulanabilirliğini göstermişlerdir.

Ang ve Oeurng (2018), Kamboçya'da bulunan Stung Pursat nehir havzasındaki ölçümü olmayan alt havzası Tonle Sap havzasındaki nehir akışını SWAT modeli ile test edip modelin havza için uygulanabilirliğine bakmışlardır. Elde ettikleri günlük ve aylık akış için kalibrasyon ve validasyon sonuçlarına göre aylık simülasyon sonuçlarının günlük simülasyondan daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Khalid, (2018) Fas' ta bulunan Mikkes havzasının SWAT ile hidrolojik modellemesini 1979-2007 yılları için yapmıştır. Aylık model simülasyonundan elde ettiği sonuçların istatistiksel değerlendirme sonuçlarına göre kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermişlerdir. (NSE=0.67, PBIAS= 6.78 ve RSR=0.56). Ayrıca, modelden elde ettiği su dengesi sonuçlarına göre, yağışın %65 lik kısmı atmosfere tekrar evapotranspirasyon ile geri döndüğünü, %15 lik kısmının yüzeysel akışa geçtiğini ve %20' lik kısmının ise sızma yoluyla toprağa geçtiğini göstermiştir.

Sisay vd. 2017, Hindistan'da bulunan ölçüm değerleri olmayan Vadodara şehir havzasında SWAT modeli ile hidrolojik modelleme çalışması yapmıştır. Bölgeselleştirme metodu kullanarak nehir debisini tahmin etmiş ve SWAT modelinden elde ettiği akım değerleri ile karşılaştırma yapmıştır. Sonuç olarak SWAT modelinin, ölçümü olmayan Vadodara şehir havzasında 1979-2001 yılları kalibrasyon periyodunda 0.53 NSE ve 0.69 R<sup>2</sup>, 2002-2013 yılları doğrulama periyodunda ise 0.61 NSE ve 0.51 R<sup>2</sup> değerleri ile uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Pott ve Fohrer (2017), tarafından yapılan bir çalışmada, Almanya'nın kuzeyinde bulunan küçük ölçekli bir havzanın SWAT modeli ile hidrolojik analizini gerçekleştirilmiştir. Hem kalibrasyon hem de doğrulama periyotlarında kabul edilebilir düzeyde sonuçlar elde etmişlerdir. Buldukları su bütçesi denkleminde göre havza üzerine düşen yağışın %52.8 yeraltı akışına geçtiğini sadece %5.2'lik kısmının yüzeysel akışa geçtiğini ortaya koymuşlardır.

Alipour ve Hosseini (2018), İran'ın başkenti olan Tahran'ın 100 km kuzey batısında bulunan ve Tahran'ın içme suyunun büyük bir kısmının karşılandığı Karaj barajı havzasında SWAT modeli ile 4 yıllık periyotta modelleme yapmışlardır. Havza üzerinde bulunan bir ölçüm istasyonundan alınan veriler ile SWAT modelinden alınan sonuçların karşılaştırılması sonucunda kalibrasyon periyodunda NSE: 0.58 ve doğrulama periyodunda NSE: 0.62 değerlerini elde etmişlerdir.

Fereidoon ve Koch (2017), İran da bulunan Karkheh havzası üzerinde yapılan bir barajın nehir debisi üzerindeki değişimini SWAT modeli kullanarak belirlemişlerdir. 1985-2004 yılları arasındaki veriler ile çalıştırılan model, havzadaki 8 ölçüm istasyonundan alınan veriler ile karşılaştırılmış ve 0.52 den 0.82 ye kadar değişen aralıklarda NSE değerleri elde etmişlerdir. Karkheh barajının mansap tarafında bulunan iki ölçüm istasyondaki nehir debisi, barajının işletmeye alındığı 2002 yılından önceki ve sonraki karşılaştırmaları yapıldığında debinin %30 ve %50 oranında azaldığını ortaya koymuşlardır.

Noori ve Kalin (2016), yaptıkları çalışma ile ölçümü olmayan Amerika Birleşik Devletleri, Atlanta eyaletinde bulunan bir havzadaki günlük akım tahminini geliştirebilmek için SWAT modeli ile yapay sinir ağları (ANN) tekniğini birleştirerek kullanmışlardır. Araştırmacılar öncelikle, 29 ölçüm istasyonu verilerine göre çalıştırdıkları SWAT modeli ile elde ettikleri yüzeysel akış gibi hidrolojik parametreleri ANN metodunda girdi olarak kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre 29 ölçüm istasyonunun %62 ve %83'ünde sırasıyla yağışlı ve kurak mevsimlerde NSE değerleri için 0.50'nin üzerinde sonuç almışlardır. Sadece SWAT modeli kullanarak elde ettikleri sonuçlarda ise toplam istasyonların %31'i kalibrasyon periyodunda ve %34'ü doğrulama periyodunda NSE>0.50 değeri elde etmiştir. Bu sonuçlara göre SWAT ve ANN tekniğini birleştirerek elde edilen günlük akım tahminlerinin daha iyi bir sonuç verdiğini ortaya koymuşlardır.

Demirel vd. (2009), ANN ve SWAT modelinden elde edilen günlük akım tahminlerini karşılaştırmışlardır. Çalışma alanı için Portekiz'de bulunan Pracana havzası seçilmiştir. Elde ettikleri sonuca göre, günlük akım tahmini için ANN'nin, SWAT modelinden özellikle pik debilerin olduğu zamanlarda daha doğru sonuç vermiştir. Bunun yanında, karşılaştırma yaparken kullandıkları performans değerlendirme kriterlerinden Mean Squared Error (MSE) metoduna göre SWAT modelinin ANN metodundan daha doğru sonuç verdiğini ortaya koymuştur.

Jajarmizadeh vd. (2015) İran'da bulunan Roodan havzasında yaptıkları çalışmada aylık akım tahminlerini SWAT modeli ve Support Vector Machine (SVM, Destek Vektör Makineleri)

metoduyla gerçekleştirmiş ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. SWAT modelinden elde ettikleri NSE: 0.83 ve RMSE: 6.1, SVM'den elde ettikleri NSE: 0.84 ve RMSE: 6.75 değerleri ile

Daramola vd. (2019), Nijerya'da bulunan 32,124 km<sup>2</sup>'lik drenaj alanına sahip Kaduna havzası üzerinde SWAT modeli kullanarak akım tahmininin yanı sıra 1990-2018 yılları arasındaki verileri kullanarak sediment tahmini de gerçekleştirmişlerdir. Havza üzerinde bulunan yaklaşık 600 MW kapasiteli ve 404 bin evin elektrik ihtiyacını karşılayan Shiroro barajının memba tarafında güvenilir herhangi bir ölçüm istasyonu bulunmadığından dolayı çalışmalarını sediment tahmini üzerine gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri 0.71 NSE ve 0.80 R<sup>2</sup> ve 0.86 p-factor değerleri ile modelin havza üzerinde kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, çalışma periyodu boyunca yıllık ortalama sediment miktarını 84.1 t/ha/yıl olarak bulmuşlardır.

Benzer şekilde Ezz-Aldeen vd. (2018), Lesser Zab Nehri (Irak) üzerinde bulunan Dokan baraj havzasının baraja taşıdığı sediment ve akım miktarını tahmin edebilmek için SWAT modelini kullanmışlardır. Dokan baraj havzasındaki ölçüm istasyonunun olmaması sebebiyle bu havzaya bitişik olan ve benzer jeolojik özellikler ve meteorolojik karakteristikler gösteren Derbendekhan havzasında ki veriler ile model çalıştırılarak parametreler kalibre edilmiş ve bölgeselleştirme tekniği ile Dokan baraj havzasına transfer edilmiştir. 0.68 R<sup>2</sup> ve 0.64 NSE değerleri elde ederek SWAT modelinin havza üzerindeki geçerliliğini ortaya koymuşlardır. Bununla beraber, modeli çalıştırdıkları 1959-2014 yılları arasında Dokan baraj havzasına gelen debinin 2100 milyon metreküp olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca yine modeli çalıştırdıkları periyot boyunca havzada oluşan ortalama sediment birikiminin ise 1.63x10<sup>6</sup> ton olarak belirlemişlerdir.

Briak vd. (2016), yaptıkları çalışma ile Fas'ın kuzeyinde bulunan Kalaya havzasında 1976-1993 yılları arasında aylık zaman periyodunda SWAT modeli ile akım ve sediment modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Kalibrasyon periyodunda elde ettikleri 0.76 NSE ve -11.80 PBIAS, doğrulama periyodunda 0.69 NSE ve 7.12 PBIAS değerleri ile SWAT modelinin havzaya uygulanabilirliğini göstermişlerdir.

Hallouz vd. (2018), yaptıkları çalışmada 2004-2009 yıllarını kapsayan SWAT modeli ile Cezayir'de bulunan Wadi Harraza havzasında akım ve sediment tahmini yapmışlardır. Havza üzerinde bulunan iki ölçüm istasyonundan aldıkları akım ve sediment verileri ile SWAT modelinden elde ettikleri sonuçları karşılaştırdıklarında istatistiksel olarak modelin başarısını ortaya koymuşlardır. Bunun yanında havzada oluşan toplam ortalama yıllık sediment miktarını da 54.24 t/ha olarak bulmuşlardır.

Alemayehu vd. (2014), 1976 yılında inşa edilen Oklahoma'da bulunan Kaw Lake barajına üzerinde bulunduğu Arkansas Nehri'nden ne kadar sediment yükünün geldiğini belirleyebilmek için SWAT modelini kullanmışlardır. Çalışmalarına göre, Kaw Lake rezervuarına gelen sediment yükünün %20'si tarımsal alanlardan, %40'ı ise nehirde taşınmaktadır. SWAT modeli sonuçlarına göre, çalışma periyodu boyunca toplam 691 milyon ton sediment Kaw Lake rezervuarına

taşınmıştır. Modellemeden ve havza üzerinde bulunan iki gözlem istasyonundan aldıkları akım ve sediment ölçüm sonuçlarını karşılaştırdıklarında SWAT modelinin Kaw Lake havzasında uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır.

Setegn vd. (2010), Etiyopya'daki Anjeni havzası üzerinde on yıllık meteorolojik veriler ile SWAT modelinin sediment tahmin performansını değerlendirmişlerdir. 1984-1988 yılları arasında oluşturdukları kalibrasyon periyodunda 0.84 NSE ve 1989-1993 arasındaki doğrulama periyodunda 0.89 NSE değerleri elde etmişlerdir. Havza üzerinde bulunan bir ölçüm istasyonundan aldıkları sonuca göre yıllık ortalama sediment yükü 24.6 ton/yıl dır. SWAT modeli ile kalibrasyon periyodunda 27.8 ton/yıl, doğrulama periyodunda ise 30.5 ton/yıl olarak ortalama yıllık sediment yükü sonucunu elde etmişlerdir.

Bu çalışmaların yanında ülkemizde de SWAT modeli ile gerçekleştirilen çalışmalar zaman içerisinde artmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Güngör ve Göncü (2013), Aşağı Porsuk Çayı Havzası hidrolojik analizini SWAT modeli ile gerçekleştirmişlerdir. Model kalibrasyon ve doğrulamasını farklı simülasyon sayıları ile (30, 300, 1500) çalıştırıp elde ettikleri istatistiksel performans ölçütlerini karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak fazla sayıda simülasyon ile modelin başarısının fazla artmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca farklı sulama tiplerinin akış üzerindeki değişimlerini de gözlemlemişlerdir. Genel olarak SWAT modelinin çalıştıkları alan üzerinde istatistiksel olarak başarılı kabul edildiğini ve uygulanacak havza yönetim stratejilerine yol göstereceğini kanıtlamışlardır.

Güngör (2018), Batı Karadeniz'de bulunan Filyos Çayı Havzasının hidrolojik analizini SWAT modeli kullanarak gerçekleştirmiştir. 1979-2013 arasında çalıştırdığı model sonuçlarına göre Filyos Çayı Havzasında su veriminin %35 azaldığını, yeraltı suyu miktarının %34 ve sızma miktarının da %41 azaldığını ortaya koymuştur. Elde ettikleri başarılı performans ölçütlerine göre de SWAT modelinin çalıştıkları havza üzerinde uygulanabilirliğini gösterilmiştir.

Yıldırım (2018), Borçka Barajı havzasında bulunan dört ana kol (Murgul, Hatıla, Fabrika ve Godrahav) üzerinde su kalitesi ve sediment modellemesini SWAT modeli ile analiz etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre genel olarak Borçka Baraj havzasında bulunan suların temiz olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte Murgul ve Hatıla havzalarının bazı zamanlarda diğer alt havzalardan anlamlı seviyede kirli çıktığını tespit etmişlerdir. Ayrıca baraj rezervuarına en fazla sedimentin Murgul alt havzasından taşındığını da göstermişlerdir.

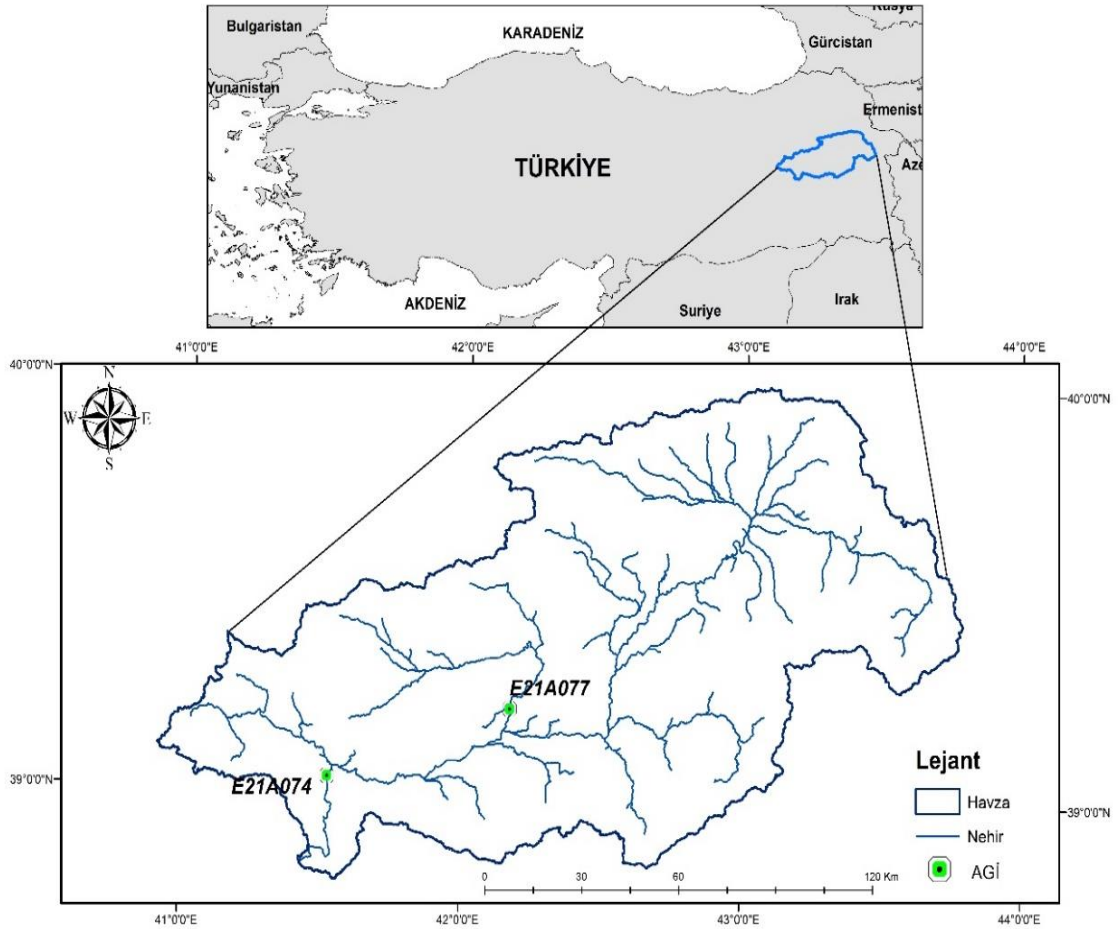
Duru (2015), Ankara' da bulunan Çubuk-I ve Çubuk-II barajları için sediment verimi ve akım tahminini SWAT modeli ile gerçekleştirmiştir. Elde edilen istatistiksel performans ölçüm kriterlerine göre modelin çalışılan havzaya uygulanabilirliği kanıtlanmıştır. Ayrıca yapılan çoklu regresyon analizi ile de yüzeysel akışın, drenaj alanının ve kanal genişliğinin havza üzerinde sediment verimine etki eden en önemli parametreler olarak tespit edilmiştir.

Aasapan (2021), Porsuk Havzası üzerinde iklim değişikliğinin ve arazi örtüsü değişimlerinin hidrolojik parametrelere etkisini incelemiştir. Bu kapsamda öncelikle SWAT modeli ile çalışılan alanın hidrolojik analizini gerçekleştirmiştir. Daha sonra ileriki yıllara ait arazi örtüsü modelleri ve iklim senaryolarına göre iklim parametrelerinin hangi ölçekte değiştiğini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre 2010-2099 periyodunda havza genelinde mavi su akışında azalma öngörülmüştür.





konumları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Çalışma alanı toplam 17865 km<sup>2</sup> olup yükselti değerleri 1239-4033 m arasında değişmektedir. Mart-Mayıs ayları arası havzada en yüksek yağışların ve dolayısıyla en yüksek akım değerlerinin gözlemlendiği aylar olarak görülmektedir. Kış aylarında yoğun kar yağışı alan havza bahar aylarında meydana gelen kar erimesinin etkisiyle havzadaki akarsuların debisini artırmaktadır. Maksimum hava sıcaklığı çalışma periyodu içerisinde (2005-2013) 38.1 °C ile Ağustos 2006 da minimum sıcaklık ise -33.7 °C ile Ocak 2012 yılında ölçülmüştür.



Şekil 3.2. Çalışma alanı konumu

### 3.2. SWAT Modeli Kurulumu ve Analizi için Gerekli Veriler

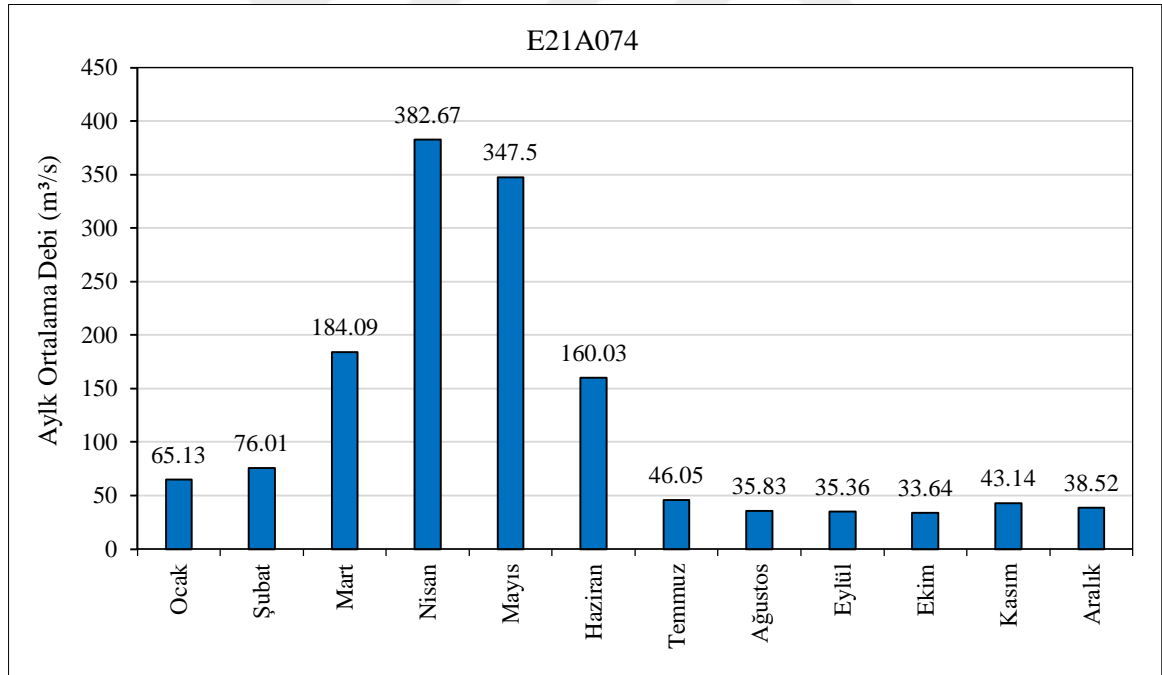
SWAT programı havza yönetiminde su, sediment ve kirletici kaynakların etkilerini verimli bir biçimde ortaya koyan ve bu etkileri ileriye yönelik modelleyebilen hidroloji ve su kalitesi modelidir. SWAT, fiziksel tabanlı bir model olup modeli çalıştırabilmek için çok fazla girdi parametreleri gerektirdiği için çok kapsamlı bir modeldir. Modele girilecek bu denli fazla ve farklı parametreler elde edildiğinden dolayı simülasyon yapılmadan bile havza özellikleri hakkında bir

ön yorumlamaya olanak tanımaktadır. SWAT programı ayrıca, iklim verileri, havzanın topoğrafyası, toprak cinsi, arazi kullanım oranları gibi spesifik bilgiler gerektirir. Bu sayede ölçümü olmayan yerler içinde modelleme yapabilmeye imkân tanır.

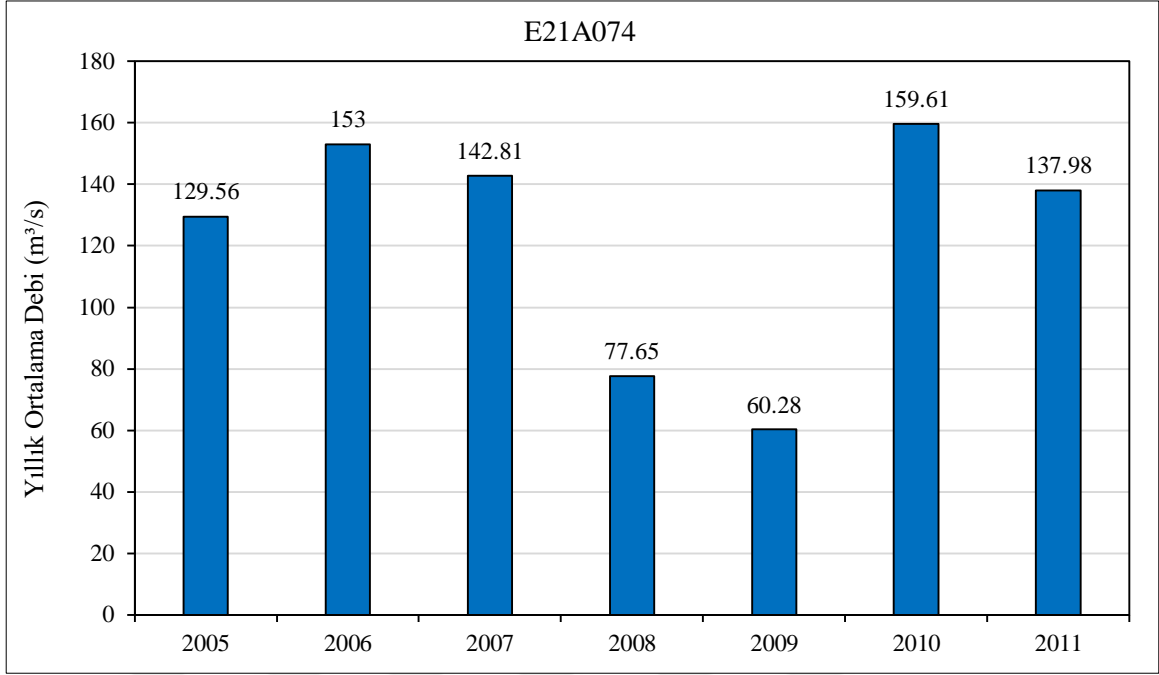
### 3.2.1. Hidrolojik Veriler

SWAT modelinden elde edilen akım ve sediment modelleme sonuçlarının performansının değerlendirilebilmesi için havza üzerinden alınması gereken gerçek zamanlı hidrolojik veriler ile karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, çalışma alanında bulunan iki ölçüm istasyonunun günlük ve aylık akım ve aylık sediment verileri Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından işletilen (E21A074, Murat Nehri-Akkonak ve E21A077, Hınıs Çayı-Adıvar) iki istasyon için alınmıştır.

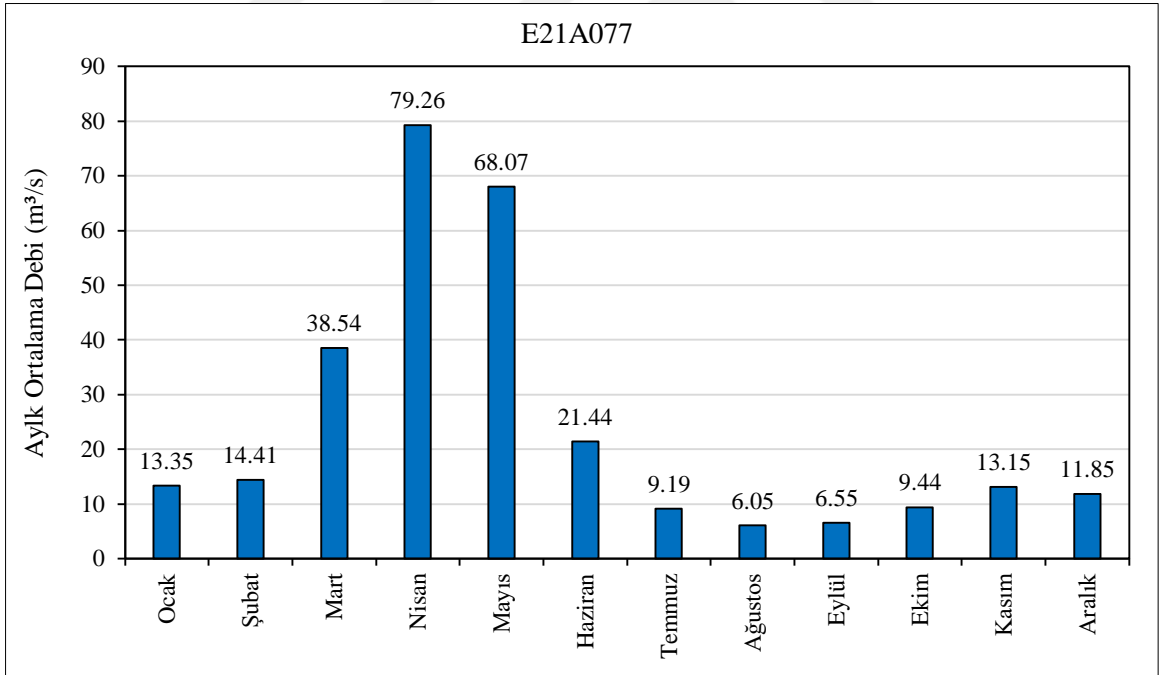
DSİ'den temin edilen E21A074 ve E21A077 istasyonları için SWAT modeli çalışma periyodu aralığında oluşturulmuş aylık ve yıllık ortalama akış değerleri Şekil 3.3-3.6' da verilmiştir.



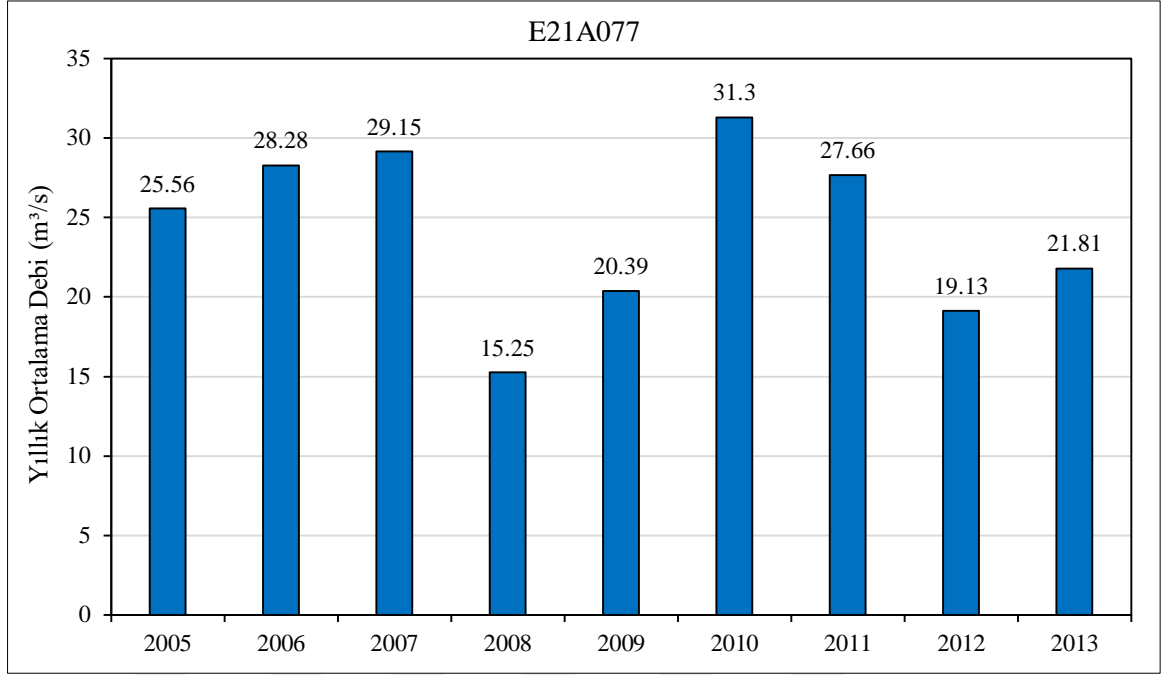
Şekil 3.3. E21A074 istasyonu için aylık ortalama debi



**Şekil 3.4.** E21A074 istasyonu için yıllık ortalama debi



**Şekil 3.5.** E21A077 istasyonu için aylık ortalama debi



**Şekil 3.6.** E21A077 istasyonu için yıllık ortalama debi

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü üzere havzada Nisan ve Mayıs aylarında kar erimesinin de etkisiyle en yüksek akımların gözlemlendiği görülmektedir. En düşük akımların da Ağustos ve Eylül aylarında olduğu görülmüştür. Ayrıca, 2008 ve 2009 yıllarının kurak geçtiği ve diğer yıllara kıyasla çok daha düşük akımların olduğu da gözlenmiştir.

DSİ Genel Müdürlüğünden temin edilen askıda sediment yükü miktarı ölçümlerinin ayda bir ya da iki kez yapıldığı görülmüştür. Bu sebeple bu verileri kullanarak söz konusu ayın genelini temsil edecek sediment tahmin modeli yeterli olmayacaktır. Bu nedenle, temin edilen sediment verileri SWAT modeli için literatürde de kullanılan (Wang vd., 2016; Parajuli, 2022; Duru vd., 2018; Park ve Engel, 2016) LOADEST simülasyon modeli (<https://engineering.purdue.edu/mapserve/LOADEST/>) ile aylık sediment yüklerine dönüştürülmüştür. Günlük akım verileri ve sediment verileri model ara yüzüne işlenmiş ve sediment yüklerinin aylık bazda havzayı temsil edecek şekilde sonuçları elde edilmiştir (Şekil 3.7).

## Water Quality Data Table

*Format:*

- Column 1: Date[yyyymmdd]
- Column 2: Time (24-hour clock; If you do not have the time of sampling, use 1200 in all rows )
- Column 3: Concentration (select units)

*Note that LOADEST requires 12 or more nonzero observations (LOADEST User's Guide, p. 17)*

Date	Time	Concentration	mg/L
20050501	1200	284.5	
20050601	1200	91.9	
20050701	1200	64.3	
20050801	1200	103.5	
20050901	1200	131	
20051001	1200	144.3	
20051101	1200	98.1	
20051201	1200	49.9	
20060301	1200	155.4	
20060401	1200	3721.4	
20060501	1200	361.4	
20060601	1200	105	

Parameter Name

Target Concentration  mg/L

If you prefer, you may

*(File must be in .csv or .txt format)*

If the dataset has a negative value,

---

## Flow Data Table

*If you have flow data, you may enter it (or upload file). Otherwise select "USGS Gage Location Tool" to identify a gage and automatically pull in flow data.*

Date	Flow	cfs
20050101	18.7	
20050201	19.6	
20050301	36.9	
20050401	76.8	
20050501	59.7	
20050601	27.6	
20050701	9.0	
20050801	6.8	
20050901	7.1	
20051001	12.5	

If the dataset has a negative value,

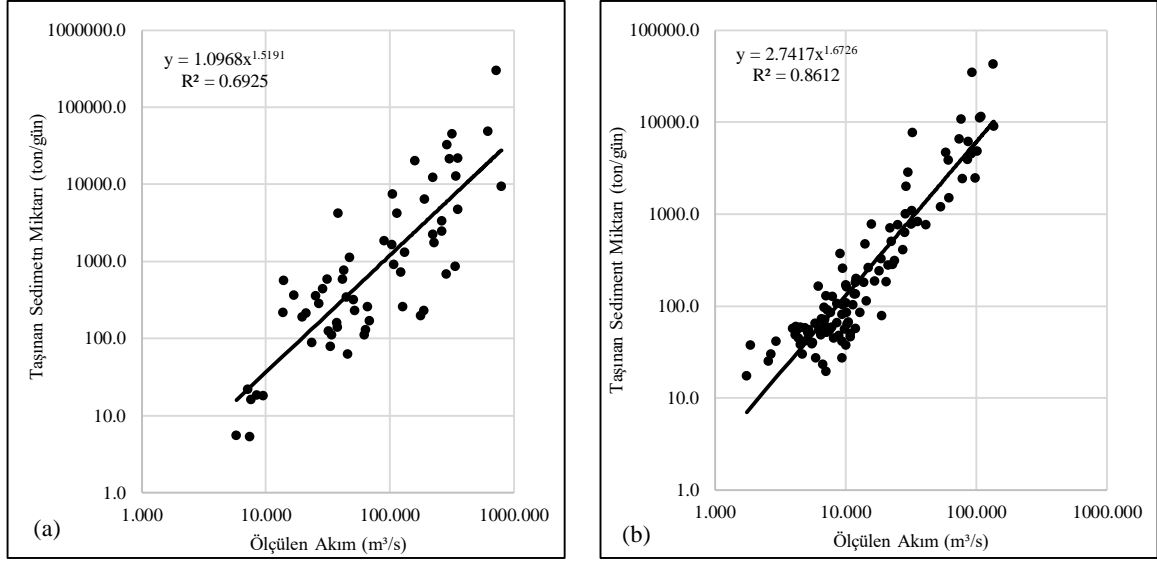
Site Name

Watershed Area from the USGS Station  sq. mi  
*The value will be valid, if the "USGS Gage Location Tool" is used.*

Watershed Area (above monitoring site)  sq. km  
*If you do not know the watershed area, use the*

Şekil 3.7. LOADEST simülasyon modeli ara yüzü

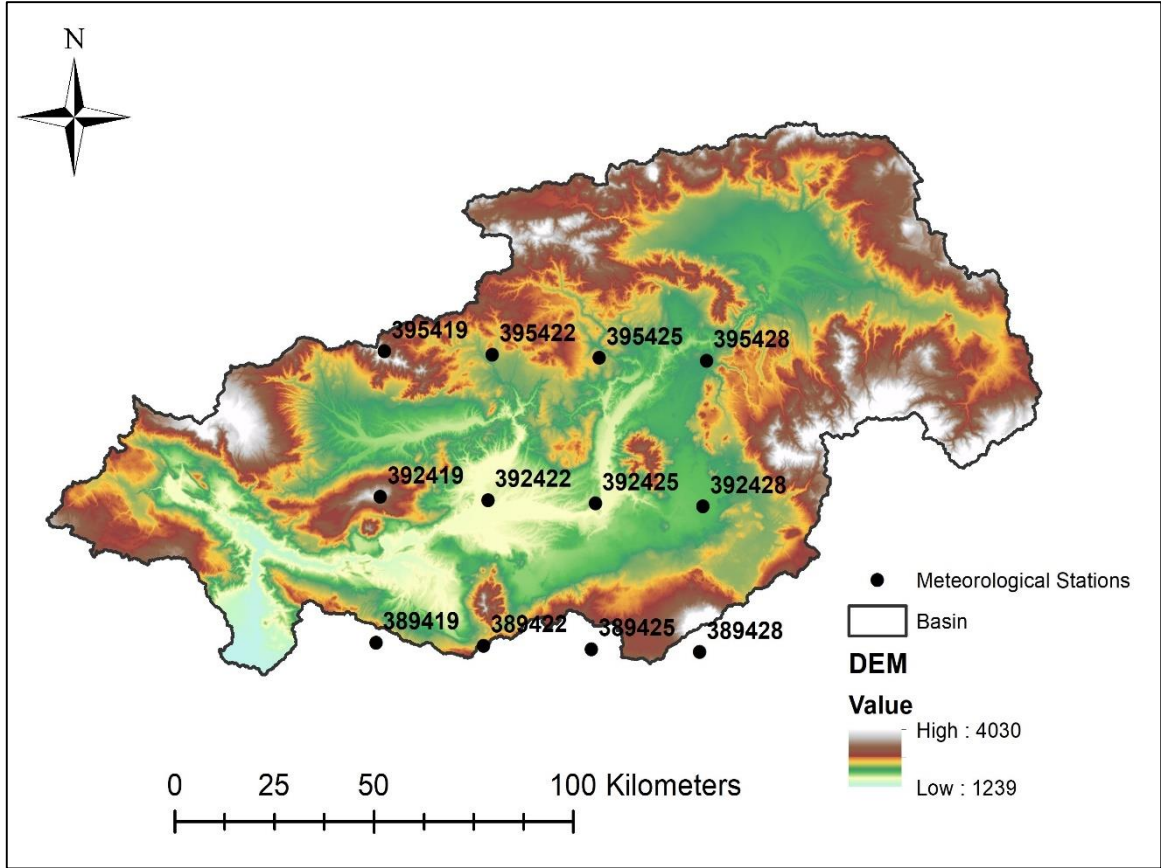
Akarsularda askı halinde bulunan sediment partiküllerinin hareketi akım hızına bağlı olarak değiştiğinden debinin bir fonksiyonu olarak bilinmektedir. Her iki ölçüm istasyonu için debi ile sediment arasındaki ilişkiyi gösteren Sediment Anahtar Eğrileri oluşturulmuş ve eksik olan sediment değerleri bu eğriler yardımıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Sediment anahtar eğrileri (a) E21A074, (b) E21A077

### 3.2.2. Meteorolojik Veriler

SWAT modeli; minimum ve maksimum hava sıcaklıkları, yağış, güneş ışınması, bağıl nem ve rüzgâr hızı gibi meteorolojik verilere ihtiyaç duymaktadır. Ülkemizde bu veriler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen istasyonlardan sağlanmaktadır. Fakat güneş ışınması, bağıl nem ve rüzgâr hızı gibi meteorolojik verilerin her istasyonda ölçümü MGM tarafından yapılmamasından dolayı bu tez çalışmasında kullanılan meteorolojik veriler The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) tarafından sağlanan küresel iklim dataları kullanılmıştır. 1979-2014 yılları arasındaki SWAT modelinin ihtiyaç duyduğu meteorolojik veriler istenilen koordinat çerçevesinde ücretsiz bir şekilde indirilebilmektedir. Ayrıca literatürde de meteorolojik verileri CFSR tarafından temin ederek oluşturulmuş SWAT modelleri sıklıkla yer almakta ve kabul edilebilir ölçüde anlamlı sonuçlar verdiği görülmektedir (Cuceloglu ve Ozturk, 2019; Duru vd., 2018; Omani vd., 2017; Sisay vd., 2017). Çalışma alanı içerisinde CFSR tarafından temin edilen 12 adet ölçüm istasyonu tespit edilmiştir ve bunların çalışma alanı içerisindeki konumları Şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Fakat bu istasyonların konumları fiziki olarak gerçek değildir. Veri asimilasyon teknikleri ve uydu verilerinden alınan bilgiler ile grid yapıda konumlandırılan istasyonların konumları oluşturulmakta ve bu şekilde meteorolojik verilerin gerçeğe en yakın bir biçimde modellenmesi sağlanmaktadır (Ağaçsapan, 2021).



Şekil 3.9. Murat Nehri Havzasında CFSR tarafından temin edilen istasyonların konumları

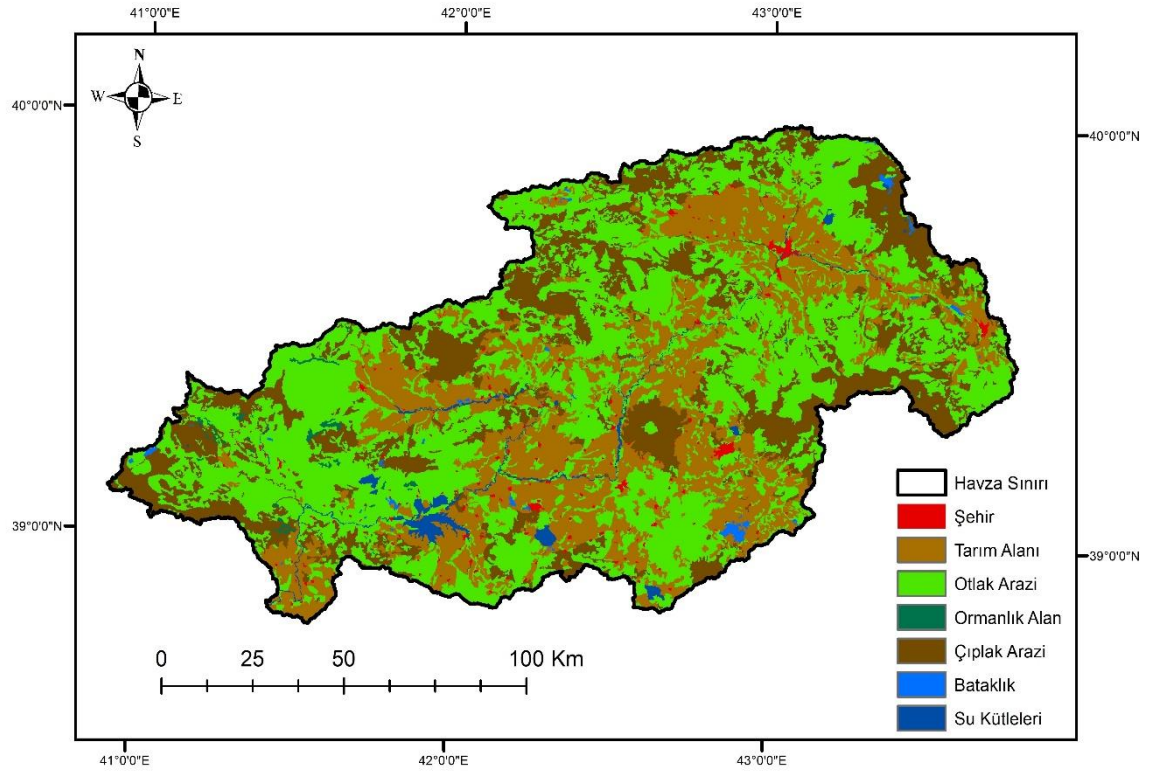
### 3.2.3. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)

Sayısal Yükseklik Modeli, uydu verileri ile temin edilmekte ve yeryüzünün eğimi, yükseklik farkları gibi istenilen bölgenin morfolojik özelliklerini haritalandırmaktadır. SWAT modeli de elde edilen bu haritalar ile belirlenen alanın akım yönünü ve ağını, havza ve alt havza sınırlarını belirlemektedir. Bu çalışmada, SWAT modeli kurulumu için gerekli olan DEM haritası 30m x30 m (1/25000) çözünürlükle Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 3 [ASTGTMv003] uydusundan temin edilmiştir. ASTER GDEM uydusu, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ile Japonya Ekonomi, Ticaret ve Endüstri Bakanlığı (METI)'nin ortak projesi olarak geliştirilmiştir.

İndirilen DEM haritaları ArcGIS-ArcMap 10.7 programında çalışma alanı sınırlarında kesilmiştir. Bununla beraber indirilen ham verilerin çalışma alanı ile aynı projeksiyon sisteminde olması gerekmektedir. Bu sebeple, ham DEM verileri çalışma alanının projeksiyon sistemi olan UTM (Zone-38, WGS84 spheroid) projeksiyon sistemine dönüştürülmüştür (Şekil 3.10). Oluşturulan DEM haritasından görüldüğü gibi çalışılan havza üzerindeki en yüksek nokta 4030 m.



havzası üzerinde otlak arazi kullanımı 8473.92 km<sup>2</sup> ile en yüksek paya sahiptir ve bu değerde toplam havzanın % 47.43'üne tekabül etmektedir. Daha sonra en fazla alanı kaplayan arazi kullanımlarının ise %26.48 ile tarım alanları ve %22.91 ile de çıplak arazi alanları olduğu gorulmektedir. En az paya sahip arazi kullanım sınıfının ise %0.33 ile ormanlık alan, % 0.42 ile bataklık, % 1.2 ile Şehir yapıları ve %1.41 ile de su kutleleri olduğu gozlenmiŐtir. SWAT modeli içerisinde arazi kullanım sınıflarına karşılık gelen kodlar ile arazi kullanım alanları Tablo 3.1'de belirtilmiştir.



Şekil 3.11. Murat Nehri Havzası arazi kullanım haritası

**Tablo 3.1.** Murat Nehri Havzası için arazi kullanım/örtüsü ve SWAT kodları

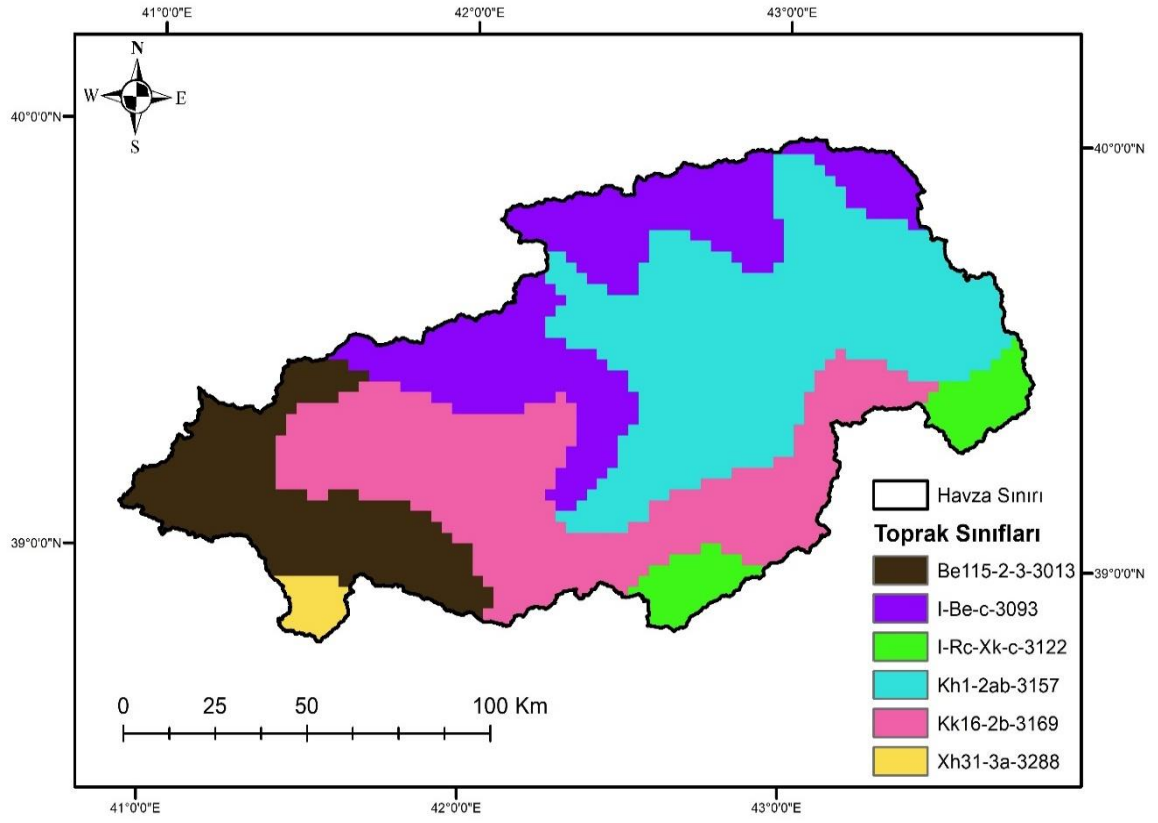
SWAT Arazi Kullanım/Örtüsü Kodları	Arazi Kullanım Sınıfı	Alan (km <sup>2</sup> )	Alan (%)
URBN	Şehir	182.89	1.02
AGRL	Tarım Alanı	4729.94	26.48
PAST	Otlak Arazi	8473.92	47.43
FRST	Ormanlık Alan	58.65	0.33
BARR	Çıplak Arazi	4092.59	22.91
WETL	Bataklık	74.35	0.42
WATR	Su Kütleleri	252.76	1.41

### 3.2.5. Toprak Haritaları

Arazi kullanım haritalarının yanı sıra çalışılan bölgede bulunan toprak cinsi SWAT modelinin gereksinim duyduğu bir diğer önemli parametredir. Bu tez çalışmasında toprak haritaları, Food and Agriculture Organization of the United States (FAO), Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (ISSCAS), Joint Research Centre of the European Commission (JRC) ve başka kuruluşlarının çalışmalarıyla oluşturulmuş olan 1:5 000 000 ölçekli Harmonized World Soil Database v1.2 (HWSD v1.2) verilerinden temin edilmiştir. FAO tarafından sınıflandırılan ve çalışma alanında bulunan toprak tipleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Elde edilen haritalara göre havza üzerinde bulunan toprak türleri: Kastanozems (Kh1-2ab-3157, Kk16-2b-3169), Lithosols (I-Be-c-3093, I-Rc-Xk-c-3122), Cambisols (Be115-2-3-3013) ve Xerosols (Xh31-3a-3288) şeklindedir. Tablo 3.2’de bu toprak türlerinin havza üzerindeki kapladığı alanlar ve toprak kodları verilmiştir. Tablo 3.2’de görüldüğü üzere toplam havza alanının %58.31’i Kastanozems toprak tipine sahiptir. Bunu Lithosols toprak tipi havzanın %25.85’ini, Cambisol tipi topraklar %14.46’ sını ve Xerosols tipi topraklarda %1.38’ini kaplayarak takip etmektedir.

**Tablo 3.2.** Murat Nehri Havzası için toprak türleri ve kapladıkları alanlar

Toprak Kodu	Toprak Sınıfı	Hidrolojik Grup	Toprak Özelliği (Soil Texture)	Alan (km <sup>2</sup> )	Alan (%)
Be115-2-3-3013	Cambisols	C	CLAY_LOAM	2583.27	14.46
I-Be-c-3093	Lithosols	D	LOAM	3728.07	20.87
I-Rc-Xk-c-3122	Lithosols	D	LOAM	889.67	4.98
Kh1-2ab-3157	Kastanozems	C	LOAM	5718.74	32.01
Kk16-2b-3169	Kastanozems	D	LOAM	4699.02	26.30
Xh31-3a-3288	Xerosols	D	CLAY_LOAM	246.33	1.38



Şekil 3.12. Murat Nehri Havzası toprak sınıfları haritası

SWAT Modeli kurulumu için gerekli veriler ve temin edildiği kaynaklar Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.3.** Çalışmada kullanılan veriler ve kaynakları

<b>Veri</b>	<b>Kaynağı</b>	
Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)	Aster Global Digital Elevation Model version 003	<a href="https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/">https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/</a>
Meteorolojik Veriler	The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	<a href="https://swat.tamu.edu/data/cfsr">https://swat.tamu.edu/data/cfsr</a>
Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü	Coordination of Information on the Environment (CORINE)-CLC 2012	<a href="https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover">https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover</a>
Toprak Tipi Haritası	FAO-Harmonized World Soil Database v1.2 (HWSD v1.2)	<a href="https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/">https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/</a>
Hidrolojik Veriler	Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü	Akım ve Sediment verileri DSİ 9. ve DSİ 17. Bölge müdürlüklerinden temin edildi

## 4. MURAT NEHRİ HAVZASI ARAZİ ANALİZLERİ

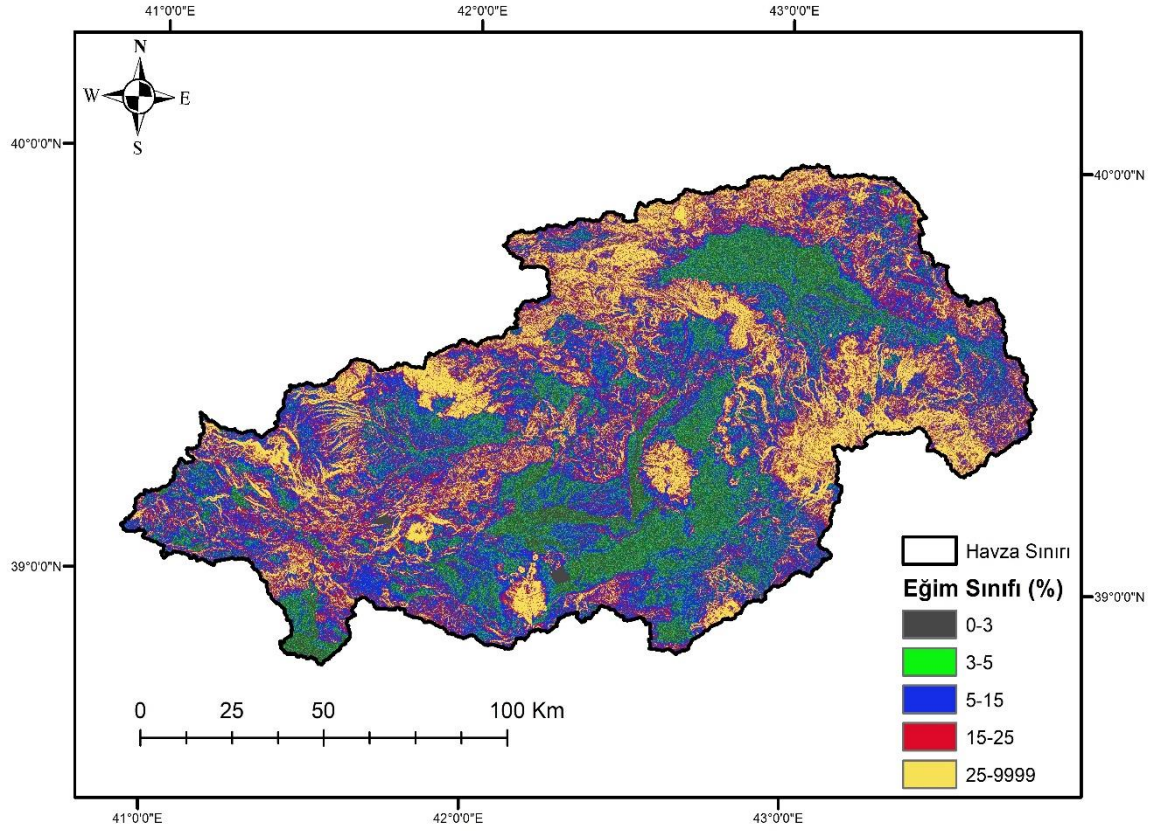
Çalışma alanı olarak seçilen Murat Nehri Havzasının hem hidrolojik hem de topoğrafik özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi amacıyla havzanın eğim haritası, baki haritası ve havzanın ortalama yükseltisi, topoğrafyanın morfolometrik özelliklerinin belirlenebilmesi için de hipsometri eğri ve hipsometrik integral incelenmiştir.

### 4.1. Eğim Haritası

SWAT modelinin havzadaki akışı modelleyebilmesi için eğim haritasının bilinmesi gerekmektedir. Havzanın dağlık yapısı göz önüne alındığında çalışma alanı 5 eğim sınıfına bölünmüştür. Tablo 4.1’de eğim sınıfları ve havza üzerindeki alanları gösterilmiştir. Görülmektedir ki, toplam havza alanının %21’inin eğimi %25’ten büyüktür. Bu sonuçla, havzanın yaklaşık beşte birinin çok eğimli olduğu ve eğimin yüksek olduğu bu bölgelerde özellikle yüzeysel akışa ve erozyona dikkat edilmesi gerektiği çıkarımına varılabilir. Şekil 4.1’de Murat Nehri Havzasının beş eğim sınıfına ayrılmış dağılımı görülmektedir.

**Tablo 4.1.** Murat Nehri Havzası oluşturulan eğim sınıfları ve alanları

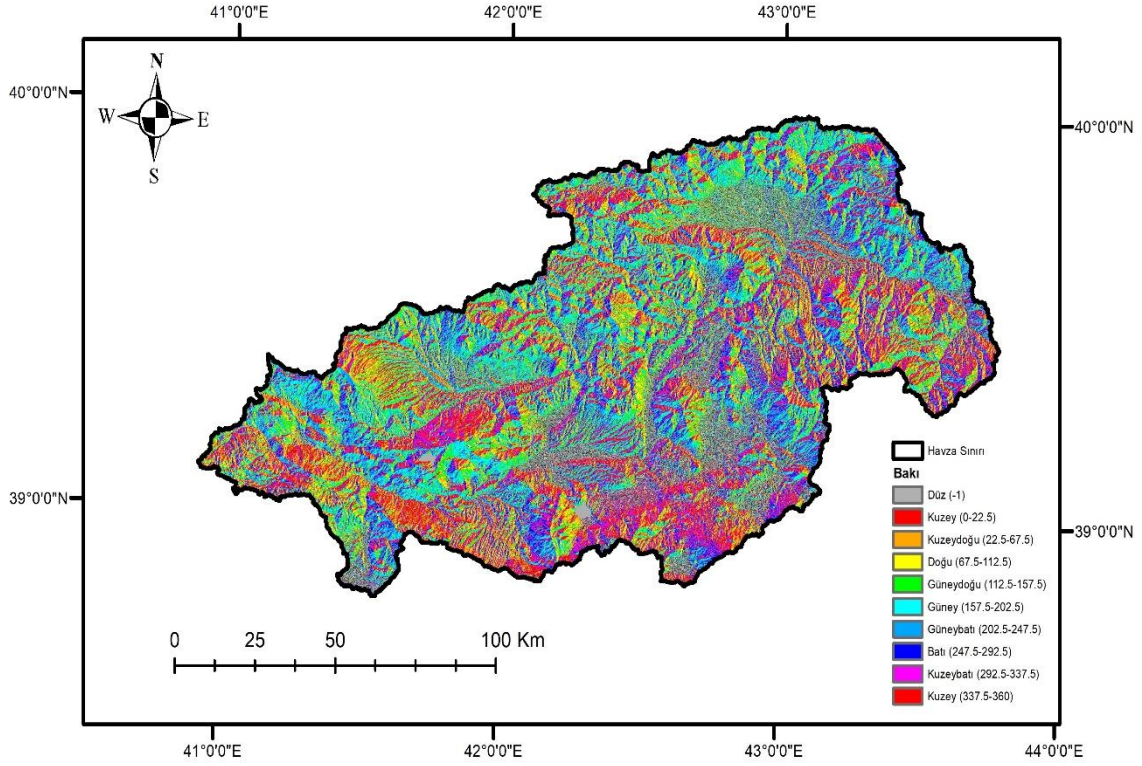
Eğim Sınıfı (%)	Alan (km <sup>2</sup> )	Alan (%)
0-3	2039.45	11.42
3-5	1958.49	10.96
5-15	6454.35	36.13
15-25	3620.41	20.27
>25	3792.39	21.23



Şekil 4.1. Murat Nehri Havzası eğim sınıfları haritası

## 4.2. Bakı Haritası

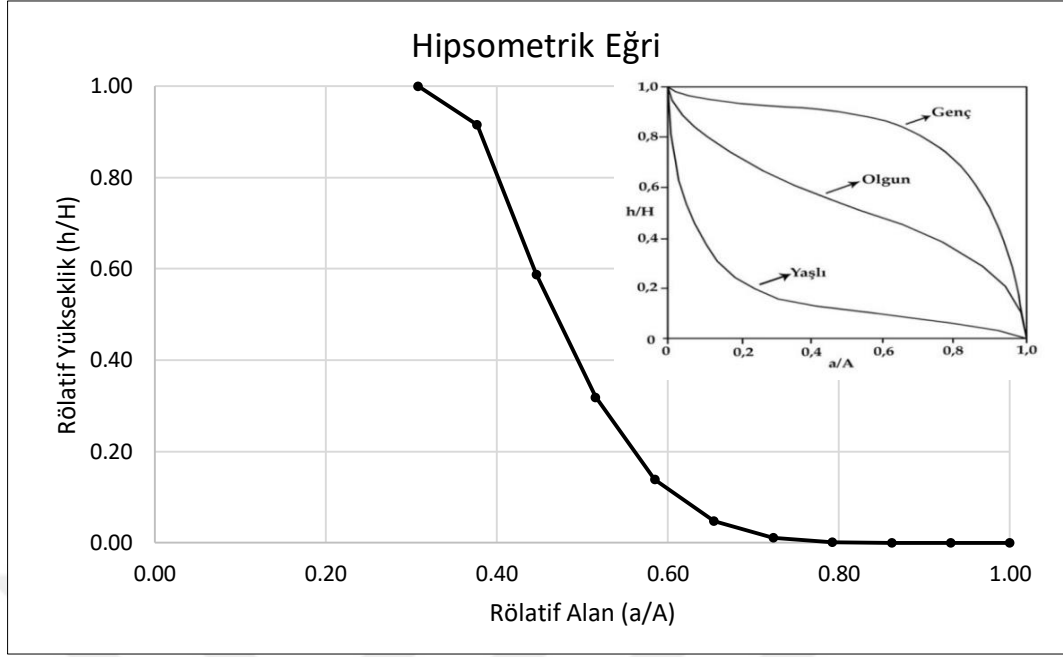
Belirlenen bir bölgedeki dağların güneşe bakan kısmına bakı denmektedir. Bakı bölgede birçok değişimleri etkilemektedir. Bakı kısmında güneşlenme süresi daha uzun olmakta ve bu da bitki örtüsü üzerinde değişime neden olmaktadır. Bakı ayrıca yerleşmeyi de etkileyen faktörlerden biridir. Murat Nehri havzasının arazi özelliklerinin incelenmesi amacıyla Şekil 4.2'de gösterilen bakı haritası oluşturulmuştur.



Şekil 4.2. Murat Nehri Havzası baki haritası

### 4.3. Hipsometrik Eğri ve Hipsometrik İntegral

Belirli bir alanının içinde yer alan yüksekliklerin dağılımına hipsometrik eğri denmektedir. Boyutsuz olan hipsometrik eğri rölatif yükseklik değerinin rölatif alan değeriyle ilişkisini tanımlar. Başka bir ifade ile farklı yükseklik değerlerinin alansal dağılışını ifade eder. Jeomorfolojik gelişim evrelerin (genç, yaşlı, olgun) belirlenmesinde hipsometrik eğri kullanılmaktadır (Köle, 2016). Oluşan eğrinin iç bükey olması havzanın büyük oranda aşındığını ve yaşlılık evresinde olduğunu göstermektedir (Strahler, 1952). Ayrıca, akarsuların aşındırma gücünün azaldığını göstermektedir. Dış bükey eğri ise havzanın genç bir havza olduğunu ve akarsu aşındırma gücünün yüksek olduğunu belirtmektedir (Elbaşı, 2018). Murat Nehri Havzası için de hipsometrik eğri hesaplanmış ve havzanın iç bükey eğri tipine daha yakın olduğu dolayısıyla jeomorfolojik olarak yaşlı evrede olduğu görülmektedir (Şekil 4.3). Hesaplama için havza yükselteleri on sınıfa ayrılmış ve bunlara karşılık gelen rölatif alan ve rölatif yükseklik değerleri bulunmuştur (Tablo 4.2).

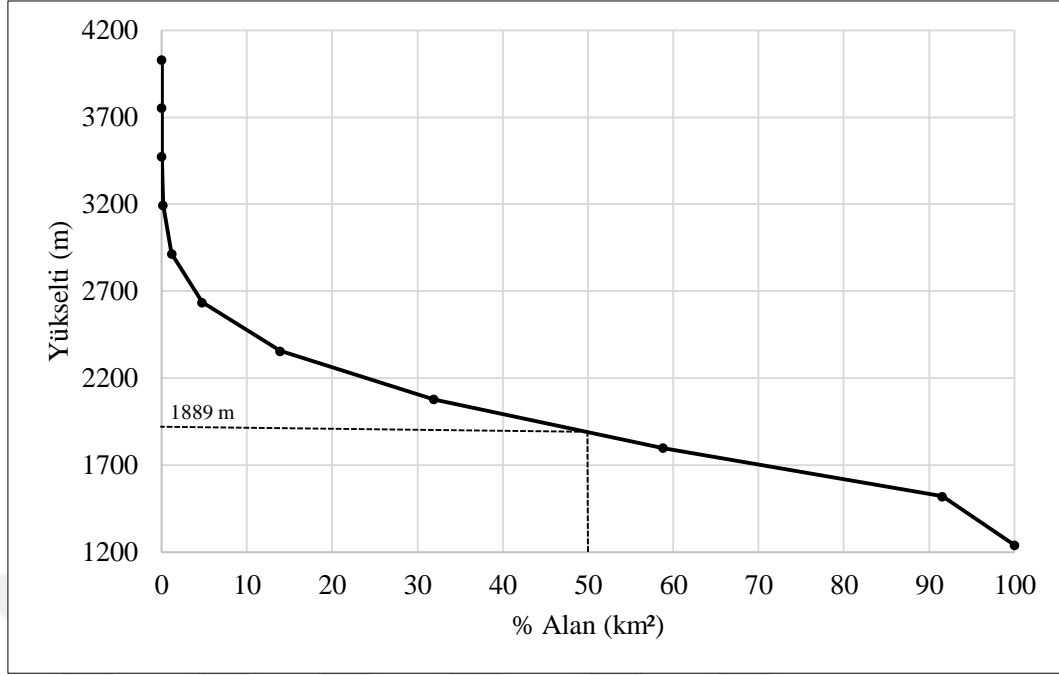


Şekil 4.3. Murat Nehri Havzası hipsometrik eğrisi

Tablo 4.2. Hipsometrik eğri hesaplama değerleri

Yükseklik (h)	Maksimum Yükseklik (H)	Alan (km <sup>2</sup> ) (a)	Havza Alanı (km <sup>2</sup> ) (A)	Rölatif Yükseklik (h/H)	Rölatif Alan (a/A)
1239	4030	17865	17865	0.31	1.00
1519	4030	16353	17865	0.38	0.92
1798	4030	10504	17865	0.45	0.59
2077	4030	5699	17865	0.52	0.32
2356	4030	2482	17865	0.58	0.14
2635	4030	850	17865	0.65	0.05
2915	4030	207	17865	0.72	0.01
3194	4030	33	17865	0.79	0.00
3473	4030	6	17865	0.86	0.00
3752	4030	2	17865	0.93	0.00
4030	4030	0	17865	1.00	0.00

Ayrıca, havzaya ait eş yükselti eğrileri kullanarak düşey eksen yükselti yatay eksene de bu yükselti üzerinde kalan havzanın alanı işaretlenerek oluşturulacak hipsometrik eğri ile de havzanın ortalama yükseltisi (medyan) bulunabilir. Oluşturulan diyagramda havza alanının %50'sine karşılık gelen yükselti havzanın ortalama yükseltisidir. Havzanın ortalama yükseltisi, yağış oranını, sıcaklık ve bitki örtüsünü ve buna bağlı olarak da yağış ve akış miktarını etkileyen önemli bir değerdir. Murat Nehri Havzası için oluşturulan eş yükselti eğrilerinden yararlanılarak hesaplanan ortalama yükselti değeri 1889 m olarak bulunmuştur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Murat Nehri Havzası ortalama kotu

Hipsometrik integral ise hipsometrik eğri altında kalan alanın rakamsal ifadesi olarak tanımlanmaktadır. Havzanın ortalama yükseltisiyle minimum yükseltisi arasındaki farkın, havzanın maksimum yükseltisiyle minimum yükseltisi arasındaki farka oranıdır (Denklem 4.1). Hipsometrik integral değeri 0.6'nın üzerinde olan havzalar genç, 0.3-0.6 arasında olan havzalar olgun ve 0.3'ten küçük havzalar ise yaşlı havzalar olarak tanımlanmaktadır (Strahler, 1952). Murat Nehri Havzası için Denklem 4.1'e göre hesaplanan hipsometrik integral değeri 0.25 bulunmuş ve havzanın yaşlı havza sınıfında olduğu belirlenmiştir.

$$H_i = \frac{H_{ort} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \quad (4.1)$$

Denklemden;

$H_i$  : Hipsometrik İntegral

$H_{ort}$  : Ortalama yükselti

$H_{max}$  : Maksimum yükselti

$H_{min}$  : Minimum yükseltidir.

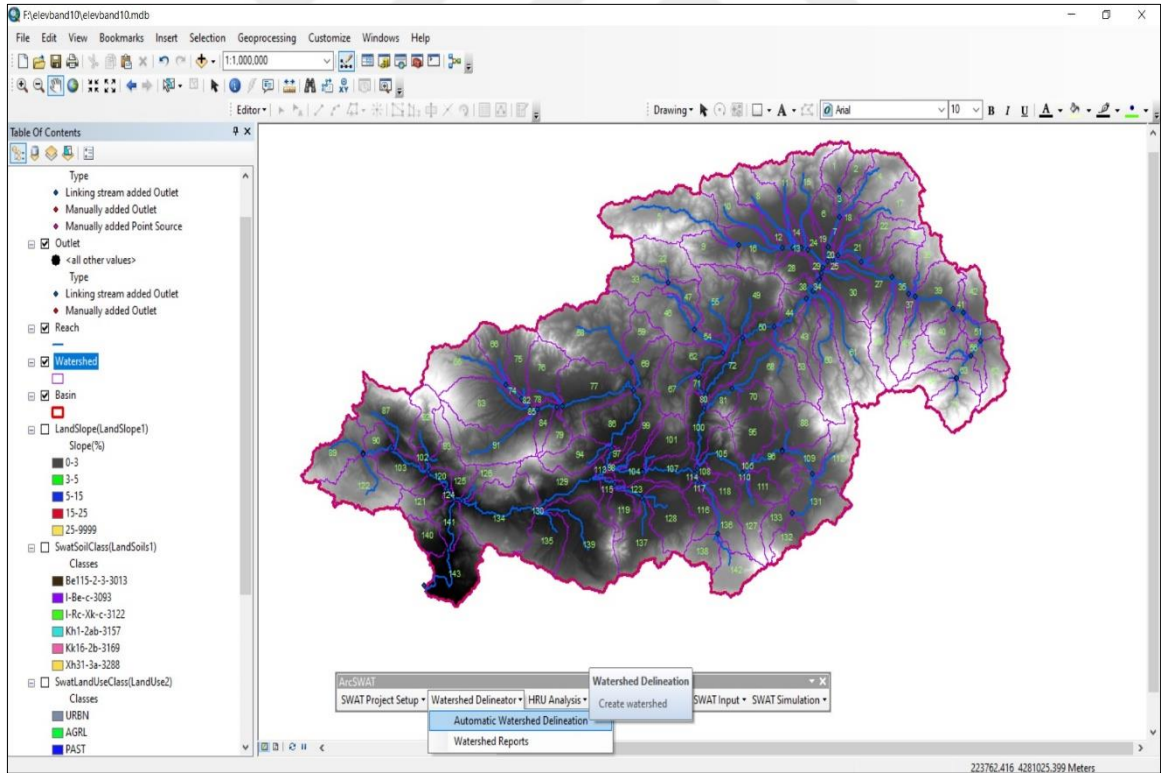
Hipsometrik İntegral hesaplamasında kullanılan Murat Nehri Havzası için yükselti değerleri;  $H_{max} = 4030 \text{ m.}$ ,  $H_{min} = 1239 \text{ m.}$ ,  $H_{ort} = 1945 \text{ m.}$  ve  $H_i = 0.25$  olarak bulunmuştur.

## 5. SWAT MODELİ KURULUM AŞAMALARI VE SONUÇLARI

SWAT modeli ArcGIS programına indirilen bir eklenti yardımıyla çalışmaktadır. Bu bölümde SWAT modelinin ArcGIS programında kurulum aşamaları, model oluşum sırasıyla detaylandırılacaktır.

### 5.1. SWAT Modeli Kurulumu

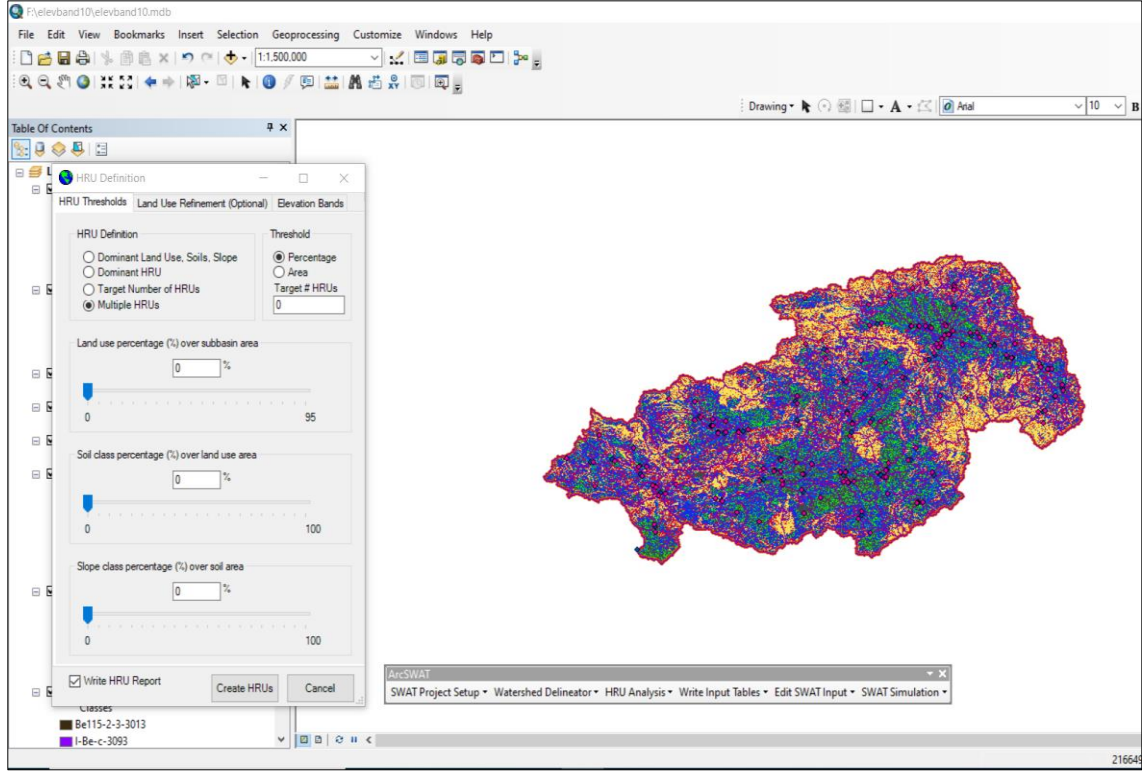
SWAT modeli kurulumu için gerekli meteorolojik, arazi kullanımı/örtüsü, toprak tipi, eğim sınıfları gibi veriler ve modelin kalibrasyonu ve doğrulaması için gerekli olan akım ve sediment verileri temin edildikten sonra model kurulum aşamasına yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında yapılan analizler ArcGIS-ArcMap 10.7 programı ve SWAT modeli de ArcGIS-ArcMap programının bir eklentisi olan ArcSWAT ara yüzü ile gerçekleştirilmiştir. Model kurulumunun ilk aşamasında DEM verisi kullanılarak havza ve alt havza sınırları belirlenmiştir ve toplamda 143 adet alt havza oluşturulmuştur (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. SWAT modeli otomatik havza sınırları belirleme işlemi

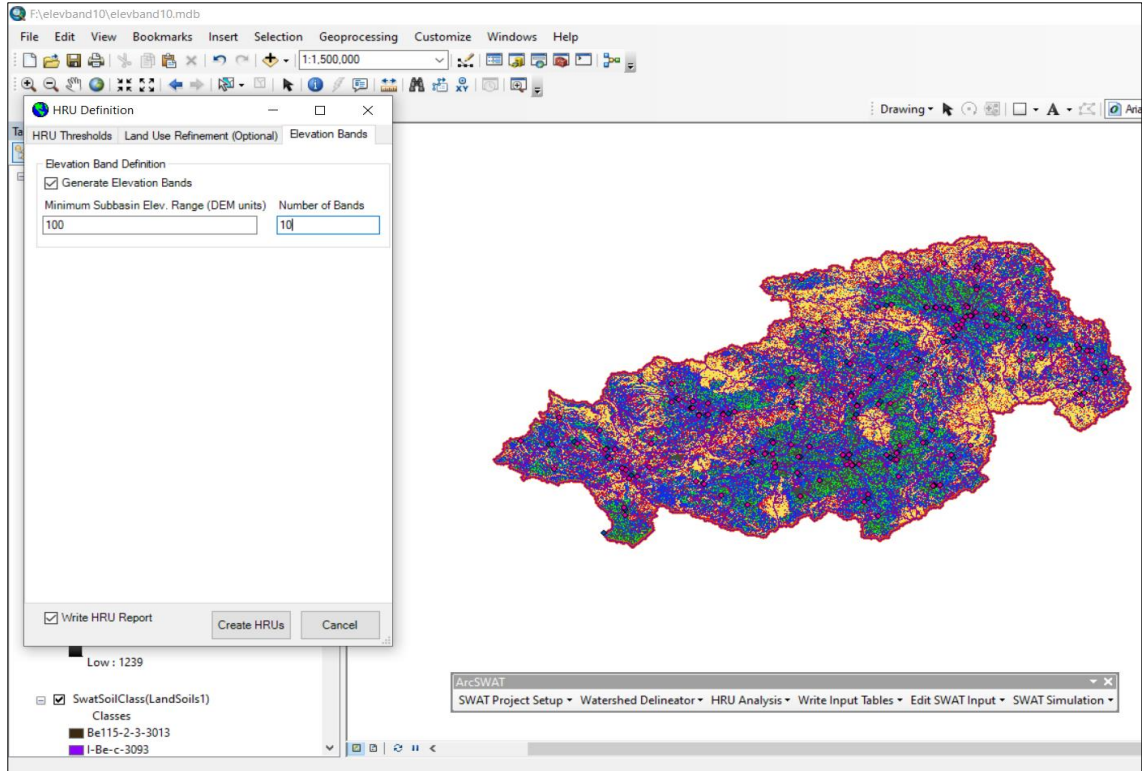
Havza sınırları belirlendikten ve arazi kullanımı/örtüsü, toprak tipi ve eğim sınıfları modele tanıtıldıktan sonra Hidrolojik Tepki Birimi (Hydrologic Response Unit-HRU) belirleme işlemine geçilebilir. HRU, arazi kullanımı/örtüsü, toprak tipi ve eğim sınıfı gibi bileşenlerin homojen olduğu

alt havzalar olarak tanımlanmaktadır. Model bu işlemde arazi kullanımı/örtüsü, toprak tipi ve eğim sınıflarının belirli bir eşik değerinin altında kalmasına olanak tanımaktadır. Belirlenen eşik değerinin altında kalan alanlar modele dâhil edilmeyecektir. Bu çalışmada, eşik değerleri her üç bileşen içinde “0” seçilerek HRU oluşturma işlemi yapılmış ve havzada 4164 adet HRU belirlenmiştir (Şekil 5.2).



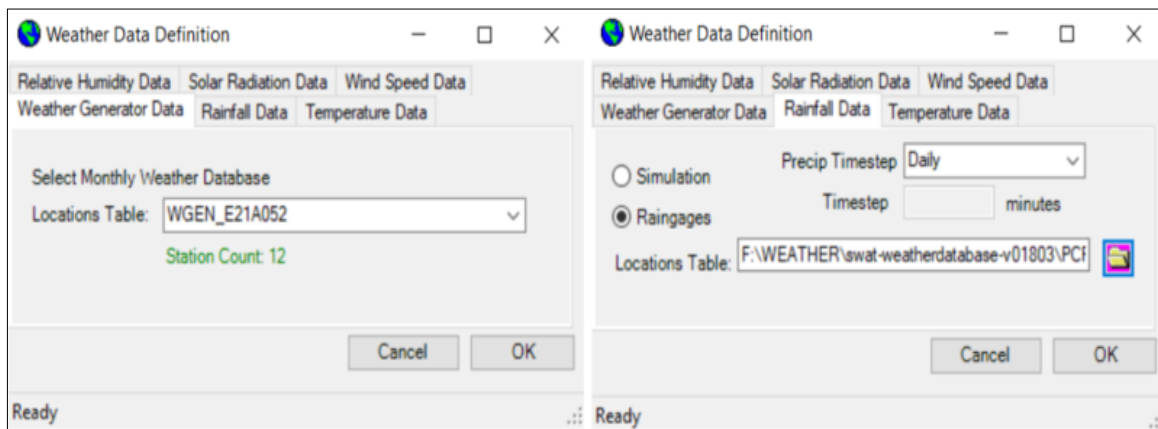
Şekil 5.2. SWAT modeli HRU belirleme işlemi

Model ArcGIS-ArcMap programı içerisinde HRU belirleme işlemi sırasında ayrıca yükseklik bantları oluşturmaya da olanak sağlamaktadır. Çalışma alanının dağlık ve yükseklik farkları olan bir havza olması sebebiyle modele yükseklik bantları eklenmesine karar verilmiştir. Bu işlemin amacı, her bir alt havzada yükseltiye bağlı olarak yağış ve sıcaklıktaki değişiklikleri dikkate alınmasıyla modelin her bir yükselti bandı için ayrı ayrı kar yağışı ve kar erimesini simüle etmesini sağlamaktır (Abbaspour vd., 2007). SWAT modeli en fazla 10 adet yükseklik bantı eklemeye olanak tanımaktadır ve literatürde farklı sayılarda kullanımı görülmektedir (Pradhanang vd., 2011; Luo vd., 2013). Bu sebeple yükseltileri daha detaylı temsil edebilmesi amacıyla 10 adet yükseklik bantı modele tanıtılmıştır (Şekil 5.3).



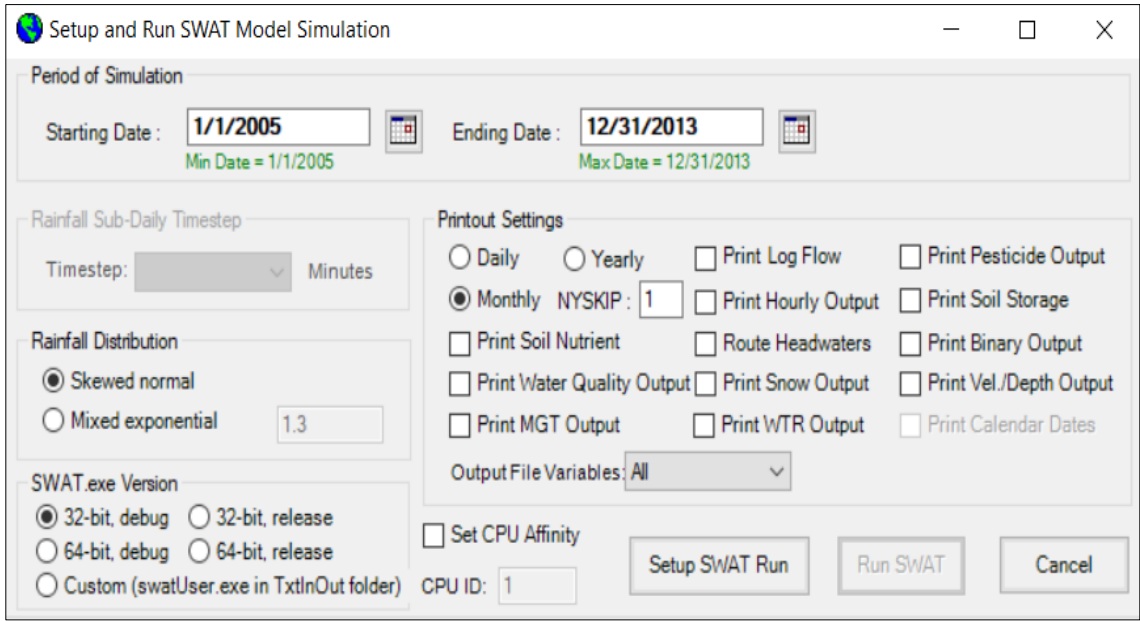
Şekil 5.3. SWAT modeli yükseklik bantları ekleme işlemi

HRU belirleme işleminden sonra, SWAT modelinin gereksinim duyduğu meteorolojik veriler olan yağış, rüzgâr hızı, maksimum ve minimum sıcaklık, buharlaşma, güneş ışınması ve bağıl nem verileri modele işlenmiştir. İndirilen meteorolojik veriler (<https://swat.tamu.edu/software/>) internet sitesinden temin edilebilen “WGN Excel Macro” makrosunda SWAT modelinin istediği formata dönüştürülmüş ve SWAT2012 veri tabanına işlenmiştir. Bu şekilde her bir meteorolojik parametre model ara yüzüne tanıtılmıştır (Şekil 5.4).



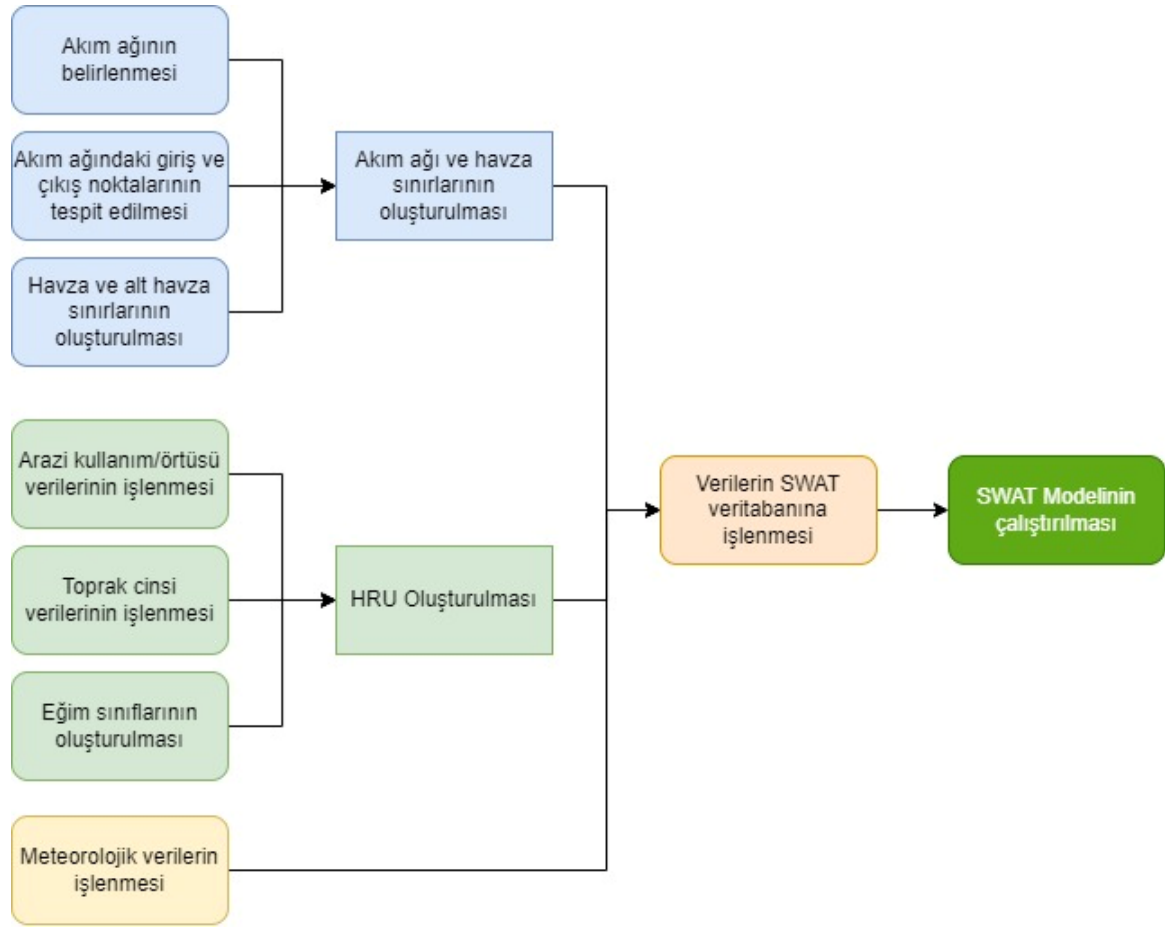
Şekil 5.4. SWAT modeli meteorolojik veriler işleme

Bütün veriler sisteme işlendikten sonra model ara yüzü içerisindeki “Write Swat Input Tables” sekmesi ile SWAT veri tabanı tabloları oluşturulmuş olur. Modele işlenen verilerde bir hata oluşmadığı takdirde, model belirlenen tarihler arasında çalıştırılmaya hazır hale gelir. Bu işlem için ArcSWAT ara yüzü içerisindeki SWAT Simulation menüsünde “Run Swat” sekmesi seçilir. Bu çalışmada, SWAT modeli temin edilen akım ve sediment veri aralığında, 2005-2013 yılları arasında günlük ve aylık olarak çalıştırılmıştır. Model ısınma süresi olarak (NYSKIP sekmesi) 1 yıl seçilmiş ve “Setup SWAT Run” ikonu seçilerek model oluşturulmuş ve “Run SWAT” ikonu seçilerek de model çalıştırılmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. SWAT modeli kurulum ara yüzü

Şekil 5.6’ de SWAT modelinin oluşturulma aşamalarının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, model başlangıcından modelin çalışmasına kadar yapılan işlemlerin gösterildiği akış diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 5.6. SWAT Modeli çalıştırma aşamaları diyagramı

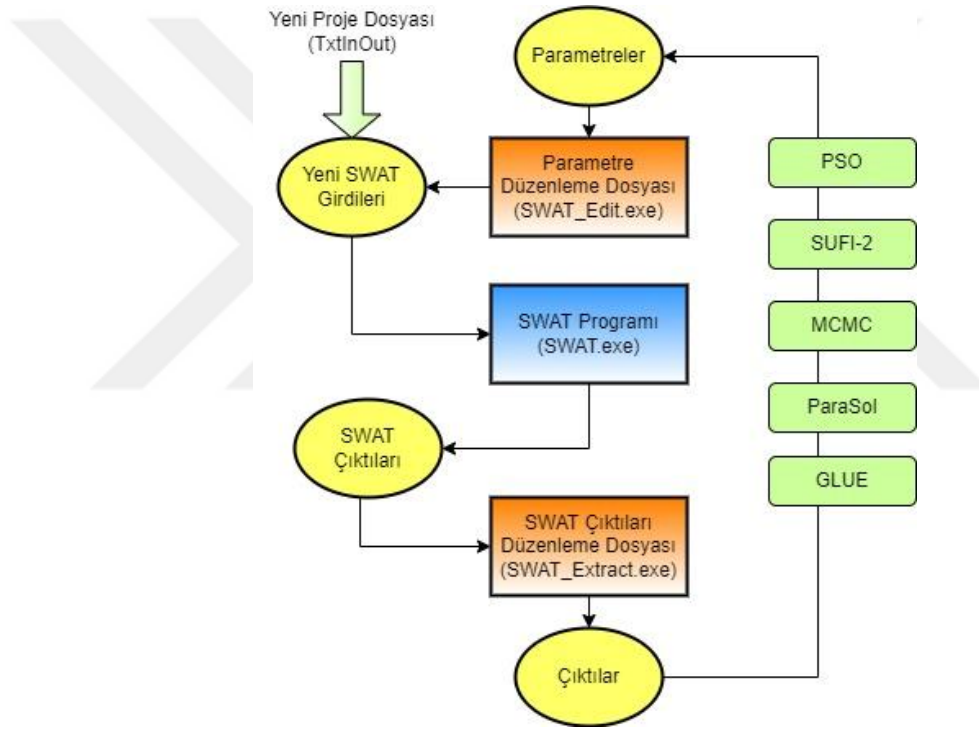
## 5.2. Hassasiyet Analizi

Model sonuçlarının doğruluğunu test edebilmek için havzadan alınan gerçek zamanlı ölçümler ile karşılaştırması yapılmalıdır. Bu amaçla, kalibrasyon ve validasyon işlemi SWAT modelinden elde edilen sonuçlarla gerçekleştirilmektedir. Kalibrasyon ve doğrulama işlemi havzadaki değişimleri etkileyen birçok hidrolojik ve meteorolojik parametreler ile yapılmalıdır. Hassasiyet analizi ise model kalibrasyon ve validasyon işleminin ilk adımıdır ve bir parametredeki değişimin model sonuçlarını hangi ölçüde etkilediğini gösteren önemli bir analizdir. Hassasiyet analizinden elde edilen havzayı etkileyen en hassas parametreler belirlenir ve belirlenen bu parametreler ile kalibrasyon ve doğrulama işlemine devam edilir. Bu şekilde havzayı temsil etmeyen parametreler kalibrasyon işlemini dışında tutularak daha az parametre ile kalibrasyon aşamasına geçilmesi hedeflenmektedir (Abbaspour vd., 2017).

Bu çalışmada model hassasiyet analizi, belirsizlik analizi, kalibrasyon ve doğrulama işlemleri SWAT modeli için geliştirilmiş otomatik bir kalibrasyon programı olan SWAT-CUP (SWAT-Calibration and Uncertainty Program) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Program

SWAT modelinden elde edilen sonuçları kalibrasyon, hassasiyet ve belirsizlik analizini kolayca entegre edebilmektedir (Abbaspour, 2015).

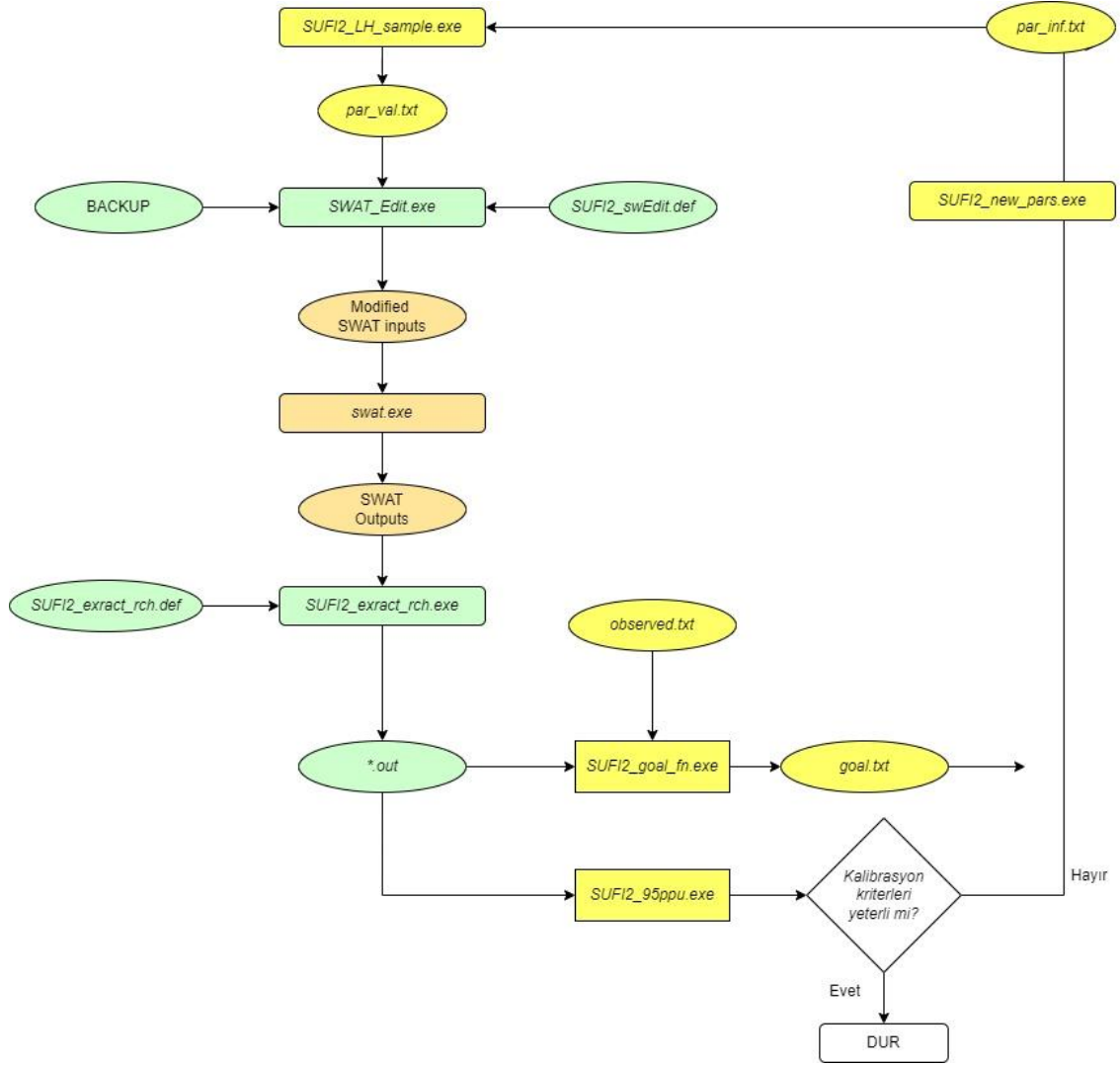
Program, kalibrasyon ve belirsizlik analizi için beş farklı algoritma kullanmaktadır. Bunlar; parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Markov zinciri monte carlo (MCMC), sıralı belirsizlik uyumu (SUFI-2), parametre çözümü (Parasol) ve geliştirilmiş olasılık belirsizlik tahmini (GLUE) yöntemleridir (Abbaspour vd., 2007). Şekil 5.7' de SWAT programı ile yukarıda belirtilen beş algoritma arasındaki bağlantı gösterilmiştir. Belirlenen parametreler ve aralıkları seçilen algoritma ve performans kriterlerine göre değerlendirilir. Yeterli uygunluk sağlanmadığı takdirde yeni parametre dizisi için yeni çıktılar üretilir ve en iyi performans değerleri bulunana kadar süreç devam eder.



Şekil 5.7. SWAT Modeli ve optimizasyon yöntemleri arasındaki ilişki şeması

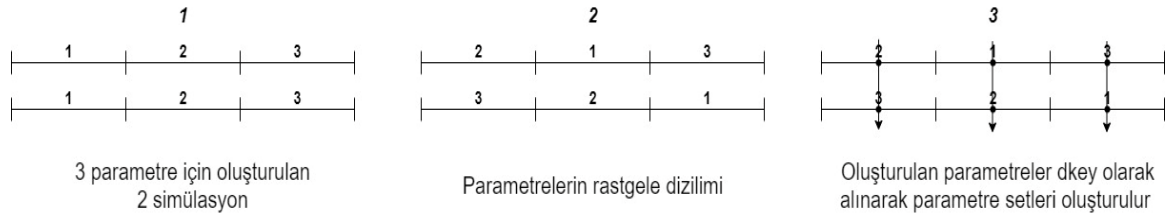
Bu çalışmada, beş farklı algoritma arasında en yaygın kullanılan SUFI-2 algoritması hassasiyet ve belirsizlik analizi, model kalibrasyonu ve doğrulaması amacıyla kullanılmıştır. Bu algoritma, gözlemlenen değerlerin neden olduğu değişimin simüle edilmiş değerleri üzerinde hangi parametrenin en fazla etkiye sahip olduğunu belirleyen hassasiyet analizine dayanmaktadır. SUFI-2 algoritmasının SWAT modelinde kalibrasyon aşamaları Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekilde belirtilen *par.inf.txt* dosyasında analize girecek parametreler ve bunların alt ve üst sınır değerleri girilir ve algoritma girilen bu sınır değerlerine göre bir parametre kombinasyonu oluşturur. Elde edilen bu parametre dizini için model çalıştırılır ve sonuçlarının performans kriterlerini karşılayıp

karışılmadığına bakılır. İstenilen sonuçlara ulaşılmadığı takdirde süreç yeni parametre değer aralıkları ile tekrar çalıştırılır. İstenilen sonuçların elde edilmesi halinde süreç tamamlanır ve en iyi simülasyon sonuçlarına ulaşılmış olunur.



Şekil 5.8. SUFI-2 çalışma şeması

SWAT-CUP programında hassasiyet analizi için iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar; Global hassasiyet analizi ve local hassasiyet analizi (one-at-a-time)'dir. Global hassasiyet analizinde parametreler bir bütün olarak değerlendirilerek sonuçlar toplu halde elde edilirken, local hassasiyet analizinde parametreler teker teker kontrol edilmektedir. Bu çalışmada kalibrasyon ve doğrulama işlemleri için kullanılacak olan parametreler Latin hypercube örnekleme yöntemi ile Global hassasiyet analizi kullanılarak belirlenmiştir. Latin hypercube örnekleme yönteminde seçilen parametrelerin değer aralıkları belirlenen simülasyon sayısına bölünür, daha sonra rastgele sıralanır ve elde edilen parametre setleri kullanılır (Abbaspour, 2015) (Şekil 5.9).



**Şekil 5.9.** Latin Hypercube örnekleme yöntemi aşamaları için oluşturulmuş 2 parametrelili ve 3 simülasyonlu bir örnek

Murat Nehri havzasının dağlık bir topoğrafyaya sahip olmasından dolayı hassasiyet analizine başlamadan önce bazı kar ve sıcaklık parametrelerinin kalibrasyonunun yapılarak en iyi model sonucuna ulaşıldıktan sonra parametrelerin bu değerlere sabitlenerek model kalibrasyon ve doğrulama işleminden çıkarılması gerekmektedir. Bu şekilde model kalibrasyonunun parametre etkileşimlerinden kaçınılması sağlanmaktadır (Abbaspour vd., 2017). Bu amaçlarla öncelikle SWAT modeli içerisinde tanımlanan yağış değişim oranı (PLAPS) ve sıcaklık değişim oranı (TLAPS) parametreleri için en uygun değer bulunmuş ve modele sabitlenmiştir. Daha sonra modelde bulunan beş kar parametreleri içinde aynı işlem gerçekleştirilmiştir (Karakoyun ve Kaya, 2022). Sıcaklık ve kar parametrelerine ait elde edilen değerler ve parametre tanımları Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.1.** SWAT Modeli sıcaklık ve kar parametreleri

Parametre	Tanım	En uygun parametre değeri	
Sıcaklık Parametreleri	PLAPS	Yağış değişim oranı (mm H <sub>2</sub> O/km)	586.0
	TLAPS	Sıcaklık değişim oranı (°C/km)	9.9
Kar Parametreleri	SFTMP	Kar yağma sıcaklığı (°C)	-8.1
	SMTMP	Kar erime taban sıcaklığı (°C)	-3.7
	SMFMX	21 Haziran erime faktörü (mm H <sub>2</sub> O/ °C-gün)	3.95
	SMFMN	21 Aralık erime faktörü (mm H <sub>2</sub> O/ °C-gün)	9.05
	TIMP	Kar kütlesi sıcaklık gecikme faktörü	0.53

Hassas parametreleri belirleyebilmek için ise *t-stat* ve *p-value* değerleri kullanılmaktadır. *t-stat* parametrelerin standart hatasıyla bölünmesi ile elde edilen katsayıdır ve *p-value* ise o parametrenin önemini belirtmektedir. *t-stat* mutlak değerinin yüksek, *p-value* değerinin ise sıfıra yakın olması parametrenin hassas olduğunu tanımlamaktadır (Abbaspour, 2015).

### 5.3. Belirsizlik Analizi

Modelin kalibrasyonu ve belirsizliği arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır ve modelin sonuçlarını değerlendirirken beraber düşünülmesi gereken iki önemli faktördür (Abbaspour, 2015). SUFI-2 algoritmasında tanımlanan parametrelerin belirsizliği ölçülen değişkenlerle simülasyon değişkenleri arasındaki uyumsuzluk olarak tanımlanır ve bu belirsizlik parametre aralığı olarak ifade edilmektedir. Modellenen sonuçlar ve gözlemlenen değerler SUFI-2 algoritmasında %95 tahmin aralığında (95PPU-95 Percent Prediction Uncertainty) tanımlar. Belirlenen parametreler Latin hypercube örnekleme ile elde edilecek bir çıktının kümülatif frekans dağılımının %2.5 ve %97.5 seviyelerinde hesaplanır. Elde edilecek sonuçların performansı ve modelin belirsizliği “p-factor” ve “r-factor” olarak tanımlanan iki ölçütle değerlendirilmektedir. P-factor gözlemlenen değerlerin 95PPU bandı içerisinde kalan yüzdesi olarak tanımlanmaktadır ve 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Başka bir değişle (1- p-factor) oluşturulan modelin hata yüzdesi olarak belirtilebilir (Abbaspour vd., 2017). P-factor değerinin 1’e yaklaşması model performansının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. R-factor ise 95PPU bandının kalınlığı olarak tanımlanmaktadır ve 0 ile  $\infty$  arasında değer almaktadır. Akım modellemesi için elde edilecek 0.70 p-factor ve 1’e yakın r-factor değerleri modelin kabul edilebilir olduğuna belirtmektedir. Bunun yanında daha küçük p-factor ve daha yüksek r-factor değerleri de sediment modellemesi için kabul edilebilir sonuçlardır (Abbaspour, 2015). Abbaspour, 2022 yaptığı çalışmada sediment ve akım değerleri için önerdiği p-factor ve r-factor aralıkları Tablo 5.2’ de verilmiştir.

**Tablo 5.2.** Akım ve sediment modellemesi için önerilen belirsizlik faktörleri aralıkları (Abbaspour, 2022)

Belirsizlik faktörü	Akım	Sediment
p-factor	$\geq 0.7$	$\geq 0.4$
r-factor	$\leq 1.5$	$\leq 2$

### 5.4. Model Kalibrasyonu İçin Başarı Kriterleri

Oluşturulan modelin başarılı sayılabilmesi için gözlemlenen değerler ile karşılaştırılması gerekmektedir. Modelin performans kriterini belirlemede SUFI-2 algoritması içerisinde bulunan çeşitli amaç fonksiyonları bulunmaktadır. Bu çalışmada kalibrasyon işlemlerinde SUFI-2

algoritmasında Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), performans kriteri olarak seçilmiştir. Bununla beraber determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) ve percent of bias (yüzdelerik sapma) (PBIAS) modelin başarı kriterlerini belirlerken NSE ile birlikte kullanılmıştır. NSE,  $R^2$  ve PBIAS performans kriterlerini elde etmede kullanılan formüller aşağıda belirtilmiştir.

- (1) Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE): Simüle edilmiş verilere karşı gözlemlenen verilerin grafiğinin 1:1 çizgisine ne kadar iyi uyduğunu belirtir ve 0 ile 1 arasında değerler almaktadır (Denklem 5.1). NSE değerinin 1'e yaklaşması model performansının artması anlamına gelmektedir (Nash ve Sutcliffe, 1970). 0'dan küçük bir NSE değerinin elde edilmesi halinde ise model sonuçlarının kabul edilebilir olmadığını göstermektedir.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5.1)$$

- (2) Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ): Gözlenen ve simüle edilen veriler arasındaki doğrusal ilişkinin ne kadar güçlü olduğu olarak tanımlanabilir (Denklem 5.2).  $R^2$  değerleri 0-1 arasında değerler almaktadır ve 1'e yakın değerlerin elde edilmesi model performansının yüksek olduğunu tanımlamaktadır.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}) * (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5.2)$$

- (3) Percent of bias-Yüzdelerik Sapma (PBIAS): Gözlenen ve simüle edilen veriler arasındaki yüzde sapmayı hesaplar (Denklem 5.3). Model performansının en yüksek olduğu PBIAS değeri "0" dır. Negatif veya pozitif değer olabildiği gibi değerlerin negatif olması modelin gözlemlenen değerlerin altında tahmin sonucu verdiğini, pozitif olması ise tam tersi şekilde modelin gözlemlenen değerlerin üzerinde tahmin sonucu verdiğini göstermektedir (Gupta vd., 1999).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (5.3)$$

Yukarıda verilen Denklem 5.1, 5.2 ve 5.3' de;

$Q_{obs}$  : Gözlemlenen değer

$\overline{Q_{obs}}$  : Gözlemlenen değerlerin ortalaması

$Q_{sim}$  : Simüle edilen değer

$\overline{Q_{sim}}$  : Simüle edilen değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen model sonuçları yukarıda verilen NSE,  $R^2$  ve PBIAS performans kriterleri ile değerlendirilmiş olup bu kriterlerin akım ve sediment tahmini için yeterli olup olmadığı

Moriassi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (Moriassi vd., 2007), elde ettikleri performans kriter aralıklarına göre değerlendirilmiştir. Literatürde SWAT modeli ile yapılan çalışmalarda performans kriterlerinin değerlendirilmesinde bu kriter aralıkları kullanılmaktadır (Al-Mukhtar, 2018; Van Liew ve Mittelstet, 2018; Tesema ve Leta, 2020; Gitau ve Chaubey, 2010; Dutta ve Sen, 2018; Ayele vd., 2017). Tablo 5.3’ de sediment ve akım tahmini için oluşturulacak modelin performans kriterlerinin başarı ölçütlerini değerlendirme aralıkları verilmiştir. Buna göre oluşturulan model sonuçlarında NSE ve R<sup>2</sup> değerlerinin 0.5’ten büyük ve PBIAS değerlerinin de en az ±15 ile ±25 değerleri arasında olması modelin kabul edilebilir olması anlamına gelmektedir.

**Tablo 5.3.** Model sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan performans kriter değer aralıkları (Moriassi vd., 2007; Ayele vd., 2017)

Performans Ölçütü	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS (%)	
			Akım	Sediment
Çok iyi	0.7 < R <sup>2</sup> < 1	0.75 < NSE < 1.00	PBIAS < ±10	PBIAS < ±15
İyi	0.6 < R <sup>2</sup> < 0.7	0.65 < NSE < 0.75	±10 < PBIAS < ±15	±15 < PBIAS < ±30
Yeterli	0.5 < R <sup>2</sup> < 0.6	0.50 < NSE < 0.65	±15 < PBIAS < ±25	±30 < PBIAS < ±55
Yeterli Değil	R <sup>2</sup> < 0.5	NSE < 0.50	PBIAS > ±25	PBIAS > ±55

## 6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Fırat-Dicle havzasının içerisinde bulunan Murat Nehri havzası üzerinde SWAT modeli kullanılarak akım ve sediment modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modellemeden elde edilen akım ve sediment değerleri, havza üzerinde bulunan akım gözlem istasyonlarından alınan veriler ile karşılaştırılarak istatistiksel başarı kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca SWAT modelinden alınan toprak kaybı sonuçları ile de havzanın toprak kaybı haritası alt havzalar ölçeğinde çıkarılmıştır. Bununla beraber sediment miktarı, yüzey üstü akış gibi parametrelerde alt havza ölçeğinde haritalandırılarak bu değerlerin havzanın hangi bölgesinde kritik oldukları belirlenmiştir. Toprak kaybının arazi cinsi, toprak cinsi, arazi eğimi gibi parametrelerden de hangi ölçüde etkilendiği grafiksel olarak verilmiştir. Ayrıca oluşturulan model ve gözlem sonuçlarına göre oluşturulan debi-süreklilik eğrileri ve frekans analizi de model başarısı ile uygulanabilirliği hakkında yorumlamaya olanak tanımıştır.

### 6.1. SWAT Modeli Kalibrasyonu ve Doğrulaması

SWAT modelinden elde edilen günlük ve aylık akım ve aylık sediment sonuçları havza üzerinde bulunan E21A074 ve E21A077 nolu ölçüm istasyonlarından alınan ölçümlerle SWAT-CUP programı vasıtasıyla kalibrasyon ve doğrulama işlemleri yapılmıştır. Akım ve sediment tahmini için oluşturulan model kalibrasyonu E21A074 istasyonu için 2006-2009 yılları arasında, doğrulaması ise 2010-2011 yılları için yapılmıştır. E21A077 istasyonu için ise model kalibrasyonu 2006-2010 yılları arasında, doğrulaması ise 2011-2013 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon ve doğrulama analizlerinde kullanılacak veriler istatistiksel olarak birbirinden çok farklı olmamalıdır. Yani kurak geçen yılların kalibrasyonda yağışlı geçen yılların ise doğrulama periyodunda kullanılması sonuçlarda tutarsızlık meydana getirebilir. Bu nedenle, analizde kullanılan verilerin elde edildiği iki istasyonun akım ve sediment ölçümlerinin ortalaması ve standart sapması kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca hesaplanmıştır (Tablo 6.1). Elde edilen sonuçlara göre kalibrasyon ve doğrulama periyotlarına göre hesaplanan akım ve sediment verilerinin ortalaması ve standart sapmasının istatistiksel olarak çok farklılık göstermediği tespit edilmiştir.

**Tablo 6.1.** Gözlem istasyonlarının kalibrasyon ve doğrulama periyotlarındaki istatistiksel değerleri

		Sediment (ton)		Akım (m <sup>3</sup> /s)	
		Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma
E21A077	Kalibrasyon	1855	4145	24.7	29.1
	Doğrulama	1451	3428	22.9	25.4
E21A074	Kalibrasyon	3960	5185	108	155
	Doğrulama	5595	5064	149	142

### 6.1.1. Akım Kalibrasyonu ve Doğrulaması

SWAT modelinden elde sonuçlar SWAT-CUP programında kalibrasyon işlemi yapılmadan önce debiyi etkileyen hassas parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için belirlen 25 parametre ile hassasiyet analizi yapılmış ve global hassasiyet analizi sonucunda da debiyi etkileyen parametreler t-stat ve p-value değerleri ile değerlendirilerek belirlenmiştir (Tablo 6.2).

**Tablo 6.2.** Akım modellemesi için global hassasiyet analizi sonuçları

Sıralama	Parametre	Açıklaması	t-stat	p-value
1	CN2	SCS Eğri Numarası	-47.319	0.0000
2	ESCO	Topraktan buharlaşma dengeleme faktörü	-5.200	0.0000
3	ALPHA_BF	Taban akımı alfa faktörü	-3.882	0.0001
4	CANMX	Maksimum kanopi katsayısı	2.068	0.0388
5	CH_K2	Ana kanalın efektif hidrolik iletkenliği	2.057	0.0398
6	OV_N	Manning akış pürüzlülüğü	1.893	0.0587
7	CH_N2	Nehir için Manning katsayısı	1.7678	0.0774
8	RCHRG_DP	Dip akifer sızma katsayısı	-1.735	0.0829
9	SOL_Z	Toprak derinliği	1.580	0.1143
10	GW_DELAY	Yer altı suyu gecikme süresi	1.453	0.1465
11	EPCO	Bitki su alım dengeleme faktörü	0.976	0.3292
12	SOL_AWC	Kullanılabilir su kapasitesi	0.961	0.3367
13	FFCB	Başlangıçtaki toprak su depolaması	0.942	0.3464
14	SURLAG	Yüzey akışı gecikme katsayısı	-0.858	0.3908
15	SLSOIL	Yanal yüzey altı akışın eğim uzunluğu	0.792	0.4283
16	REVAPMN	“Revap” oluşabilmesi için sığ akiferdeki eşik su derinliği	0.655	0.5127
17	DEEPST	Derin akiferin başlangıç derinliği	0.631	0.5278
18	SOL_K	Doygun hidrolik iletkenlik	-0.594	0.5525

**Tablo 6.2'** nin devamı

19	SHALLST	Sığ akiferdeki suyun başlangıçtaki derinliği	0.499	0.6173
20	GW_REVAP	Yer altı suyu revap katsayısı	0.414	0.6791
21	LAT_TIME	Yanal akış ulaşım süresi	-0.329	0.7419
22	GWQMN	Geri akışın oluşabilmesi için sığ akiferdeki eşik su derinliği	-0.247	0.8051
23	SOL_ZMX	Toprak yüzeyinden itibaren maksimum kök derinliği	0.210	0.8338
24	HRU_SLP	Ortalama yamaç eğimi	0.059	0.9526
25	SOL_BD	Toprak hacimsel yoğunluğu	0.014	0.9884

Hassasiyet analizi sonucu akım modellemesini etkilediği belirlenen 15 hassas parametre ile aylık ve günlük akım kalibrasyon ve doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen bu parametrelerin başlangıç değer aralıkları ve sabitlenen değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Görüldüğü üzere SCS Eğri numarası (CN2) akım modellenmesi için en hassas parametre olarak bulunmuştur. Bunu sırasıyla topraktan buharlaşma faktörü (ESCO), taban akımı alfa faktörü, (ALPHA\_BF) ve maksimum kanopi katsayısı (CANMX) izlemiştir. Bunlara karşılık akım modellemesi için en az hassas parametre ise toprak hacimsel yoğunluğu (SOL\_BD) olarak tespit edilmiştir. Bunu ortalama yamaç eğimi (HRU\_SLP) ve toprak yüzeyinden itibaren maksimum kök derinliği (SOL\_ZMX) izlemiştir.

**Tablo 6.3.** Aylık ve günlük akım modellemesi için elde edilen hassas parametreler

Hassas Parametreler	Başlangıç Değer Aralığı	Sabitlenen Değer
r_CN2	-0.3 - 0.01	-0.11
v_ESCO	0.25 - 0.8	0.29
v_ALPHA_BF	0 - 0.4	0.32
v_CANMX	10 - 100	71
v_CH_K2	50 - 100	101.71
v_OV_N	0 - 0.75	0.24
v_CH_N2	-0.01 - 0.3	-0.004
v_RCHRG_DP	0 - 1	0.27
r_SOL_Z	-0.2 - 0.2	-0.05
v_GW_DELAY	100 - 300	269
v_EPCO	0 - 0.6	0.04
r_SOL_AWC	-0.2 - 0.01	-0.15
v_FFCB	0.15 - 0.55	0.18
v_SURLAG	1 - 24	17.65
v_SLSOIL	0 - 150	128.75

\*v: parametre değerini verilen değer ile değiştirmek, r: parametreyi oransal olarak artırmak veya azaltmak

SWAT-CUP programı kalibrasyon için parametre değişimlerini üç farklı metot kullanarak yapmaktadır. Tablo 6.3'te de gösterilen parametrelerin önündeki harfler parametre değişim metotlarını ifade etmektedir. Bu metotlar şu şekildedir;

- r (oransal) : parametre değerini yüzde (%) oranında arttırmak ya da azaltmak,  
v (değişim) : parametrenin direkt olarak verilen değer ile değiştirilmesi,  
a (mutlak) : parametreye bir değer eklemek ya da çıkarmak.

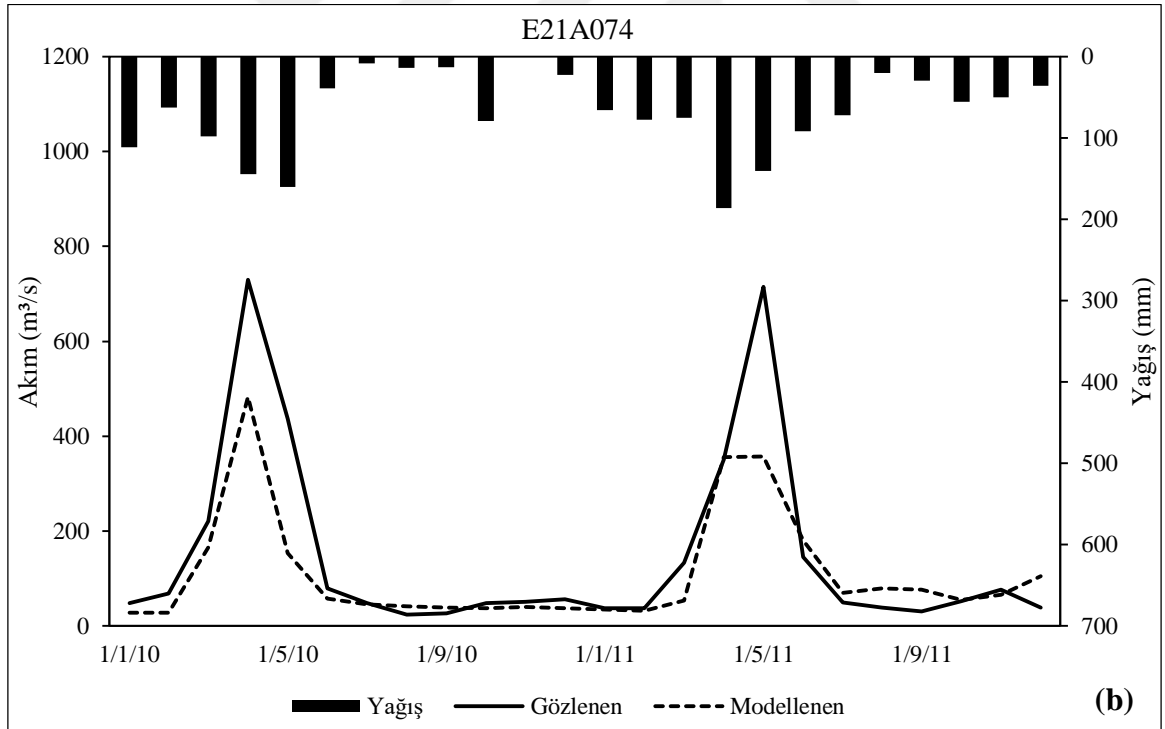
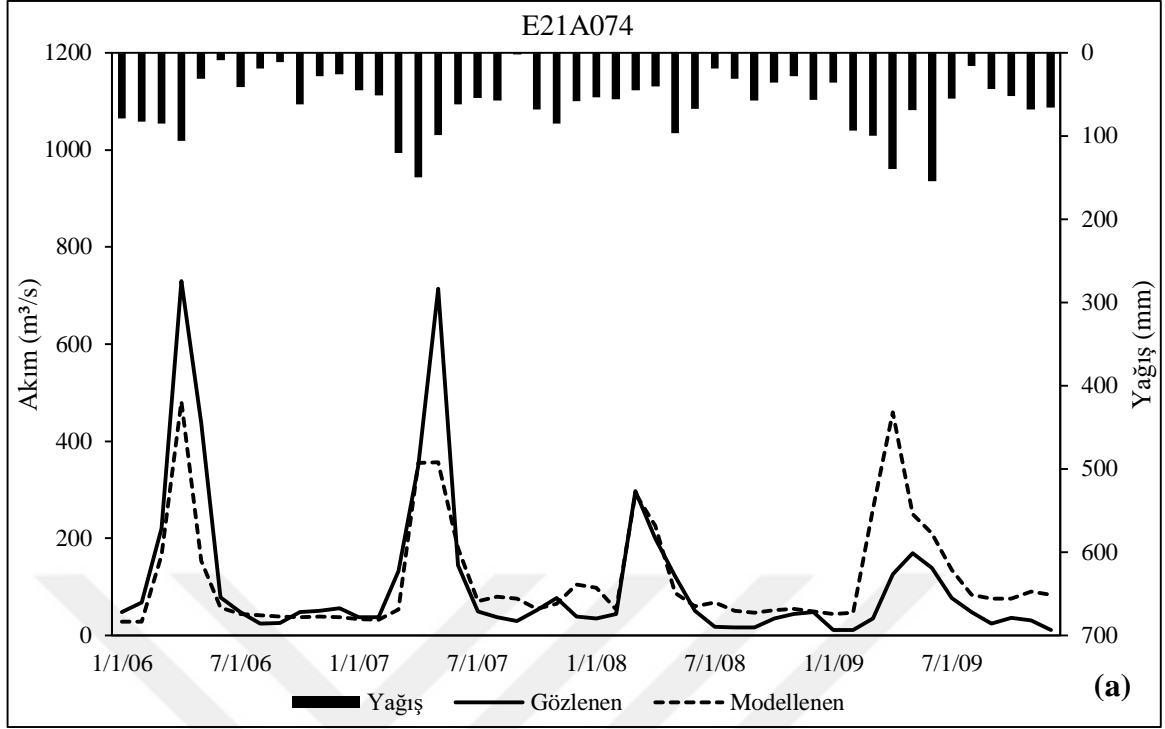
SWAT modelinde akım tahmini hem günlük zaman aralığında hem de aylık zaman aralığında çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçların kalibrasyon ve doğrulama işlemleri SWAT-CUP programında havza üzerinde bulunan iki ölçüm istasyonlarından elde edilen veriler ile gerçekleştirilmiştir. E21A074 ölçüm istasyonunda aylık akım modellemesi performans değerleme kriterleri ve belirsizlik analizi sonuçlarına göre NSE: 0.57, 0.50, R<sup>2</sup>: 0.57, 0.53, PBIAS: -%7.4, %15.6, p-factor: 0.65, 0.54 ve r-factor: 1.08, 1.31 değerleri olarak sırasıyla kalibrasyon ve doğrulama periyotlarında bulunmuştur. E21A077 istasyonu için ise bu değerler NSE: 0.77, 0.75, R<sup>2</sup>: 0.77, 0.78, PBIAS: -%6.6, -%3.1, p-factor: 0.72, 0.86 ve r-factor: 1.14, 1.22 olarak kalibrasyon ve doğrulama aralıklarında elde edilmiştir (Tablo 6.4). SWAT modelinden elde edilen sonuçlar ile ölçüm istasyonlarındaki aylık akım değerlerinin karşılaştırılması sonucu her iki istasyonda elde edilen performans ölçütlerine (Tablo 5.3) ve belirsizlik analizi sonuçlarına göre (Tablo 5.2) modelin yeterli sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Günlük zaman aralığında oluşturulan SWAT modeli sonuçlarına göre ise E21A074 numaralı ölçüm istasyonunda elde edilen istatistiksel performans değerleme sonuçları NSE: 0.56, 0.55, R<sup>2</sup>: 0.57, 0.56, PBIAS: -%15, %1.2, p-factor: 0.80, 0.42 ve r-factor: 1.11, 0.79 olarak sırasıyla kalibrasyon ve doğrulama periyotları için bulunmuştur. E21A077 istasyonu için ise bu değerler NSE: 0.45, 0.50, R<sup>2</sup>: 0.46, 0.50, PBIAS: -%7.7, %1.20, p-factor: 0.74, 0.62 ve r-factor: 0.90, 0.57 olarak kalibrasyon ve doğrulama aralıklarında elde edilmiştir (Tablo 6.4). Sonuçların E21A074 numaralı istasyonda kabul edilebilir düzeylerde olmasına rağmen E21A077 numaralı istasyonda bu sınırın biraz altında kaldığı görülmektedir (NSE, R<sup>2</sup> <0.5). Ayrıca elde edilen sonuçlara göre aylık akım model sonuçları günlük zaman aralığında oluşturulan modelden daha iyi sonuçlar vermektedir. Benzer sonuçlar literatürde de gözlemlenmiştir (Yang vd., 2016; Duru vd., 2018).

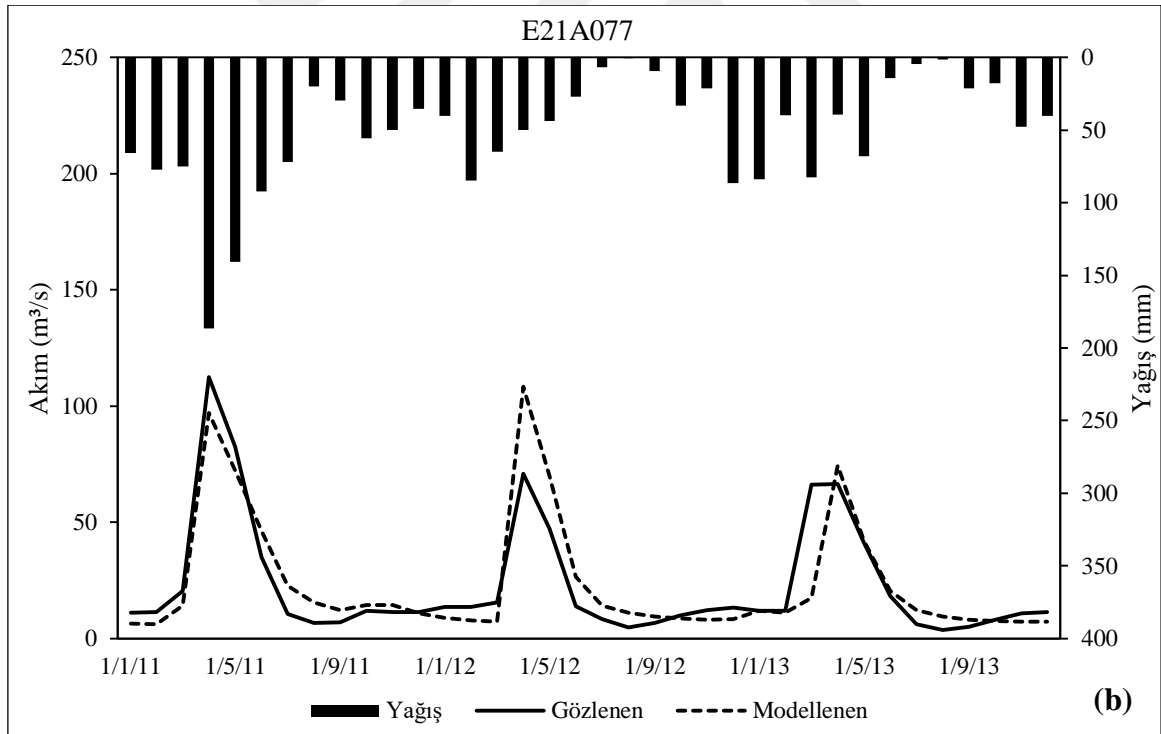
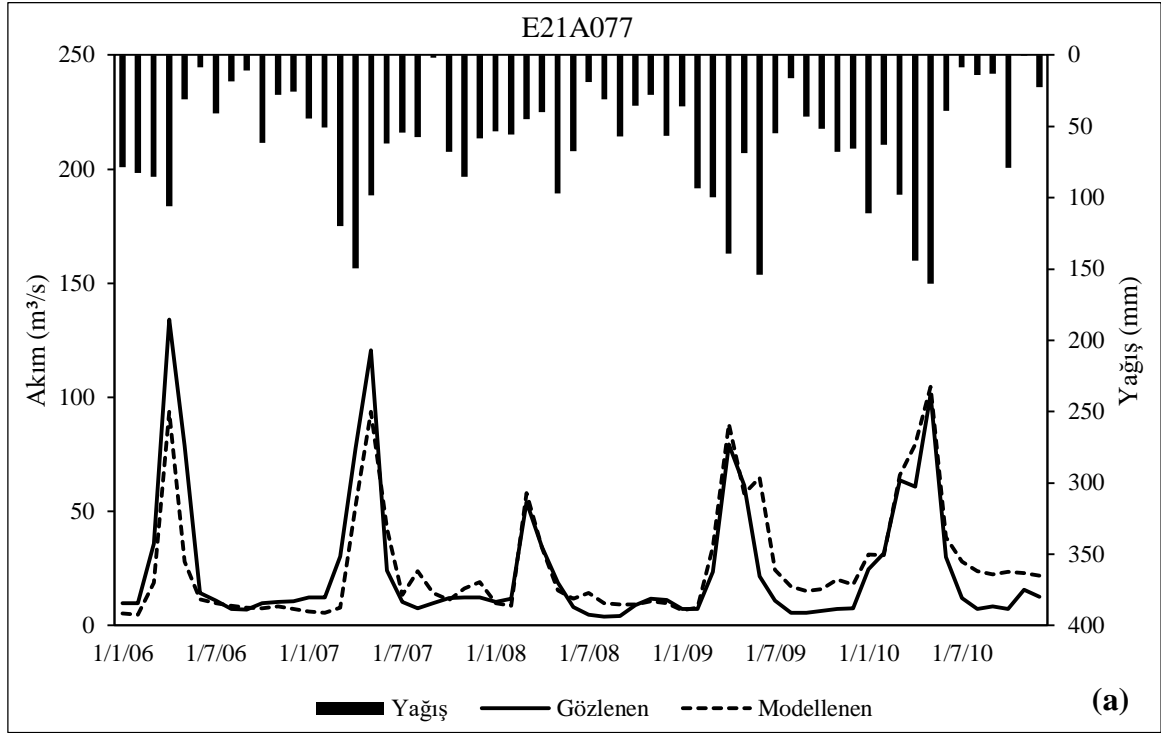
**Tablo 6.4.** Aylık ve günlük SWAT Modeli akım kalibrasyon ve doğrulama istatistikleri

			<b>NSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>PBIAS (%)</b>	<b>p-factor</b>	<b>r-factor</b>
Aylık	E21A074	Kalibrasyon (2006-2009)	0.57	0.57	-7.4	0.65	1.08
		Doğrulama (2010-2011)	0.50	0.53	15.6	0.54	1.31
	E21A077	Kalibrasyon (2006-2010)	0.77	0.77	-6.6	0.72	1.14
		Doğrulama (2011-2013)	0.75	0.78	-3.1	0.86	1.22
Günlük	E21A074	Kalibrasyon (2006-2009)	0.56	0.57	-15.0	0.80	1.11
		Doğrulama (2010-2011)	0.55	0.56	1.20	0.42	0.79
	E21A077	Kalibrasyon (2006-2010)	0.45	0.46	7.7	0.74	0.90
		Doğrulama (2011-2013)	0.50	0.50	1.20	0.62	0.57

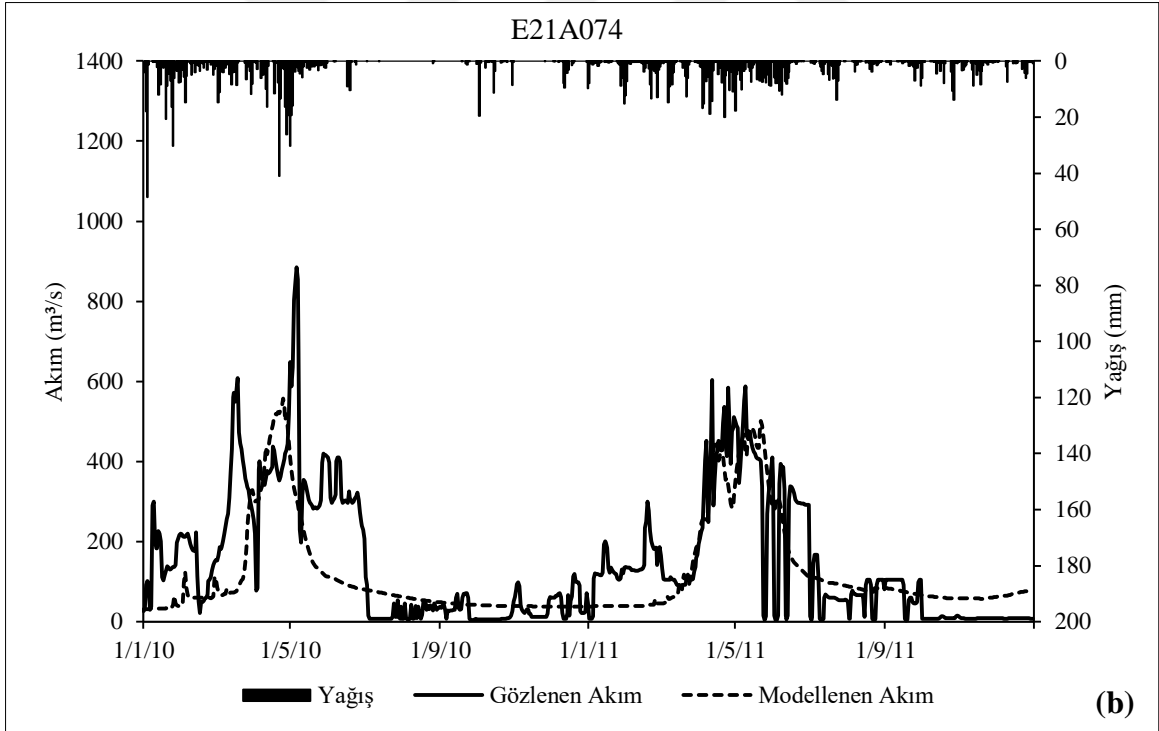
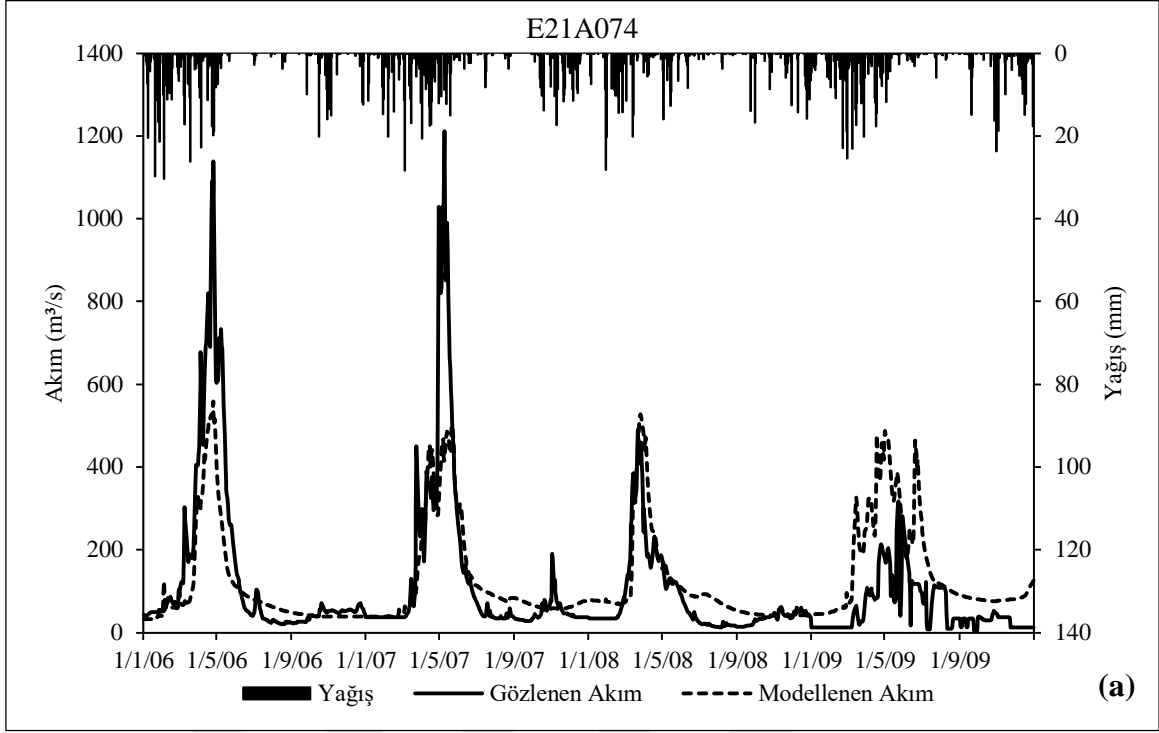
SWAT modelinden elde edilen günlük ve aylık akım modellemelerinin kalibrasyon ve doğrulama periyotları boyunca elde edilen sonuçları ile havza üzerinde bulunan E21A074 ve E21A077 numaralı istasyonundan alınan ölçümlerin karşılaştırılması ile elde edilen sonuçlar Şekil 6.1-6.4'te gösterilmiştir. Hidrograflardan elde edilen aylık modellenen sonuçlara bakıldığında her iki istasyon içinde gözlemlenen ve modellenen akımların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bununla beraber E21A074 istasyonunda özellikle 2006-2007 yıllarında nisan ayında oluşan pik debilerde modellenen akımların gözlemlenen akımlardan daha yüksek değerler izlediği bunda modelin başarısını kısmen olumsuz etkilediği belirlenmiştir. E21A077 istasyonu içinde aynı farklar gözlemlenmesine karşın E21A074 istasyonundan daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. Havzanın kar yağışı miktarının fazla olması ve Nisan ve Mayıs gibi bahar aylarında kar erimesi miktarının da artmasına bağlı olarak akarsu debisinde ciddi artışlar meydana gelmektedir (Karakoyun ve Kaya, 2022). SWAT modeli oluşan bu pik debilerde daha yüksek veya daha az model sonuçları üretebilmektedir. Benzer sonuçlar literatürde de gözlenmektedir (Koltsida vd., 2021; Demirel vd., 2009; Hoang vd., 2014). Kar erimesine paralel olarak özellikle bahar aylarında oluşan pik debilerdeki gözlemlerden elde edilen sonuçlar ile SWAT modelinin ürettiği sonuçlar arasındaki farklar günlük bazda çalıştırılan modelde de her iki istasyon için kısmen görülmektedir. Özellikle E21A074 numaralı istasyonda görülen gözlenen değerdeki iniş çıkışlar model performansını kısmen düşürmüştür. Debi üzerindeki bu değişimlerin sebebinin ölçüm hatası olabilmesi veya modellemeye dâhil edilmeyen fakat havzada olabilecek tarımsal amaçlı su kullanımı da muhtemel sebepler arasında olabilmektedir.



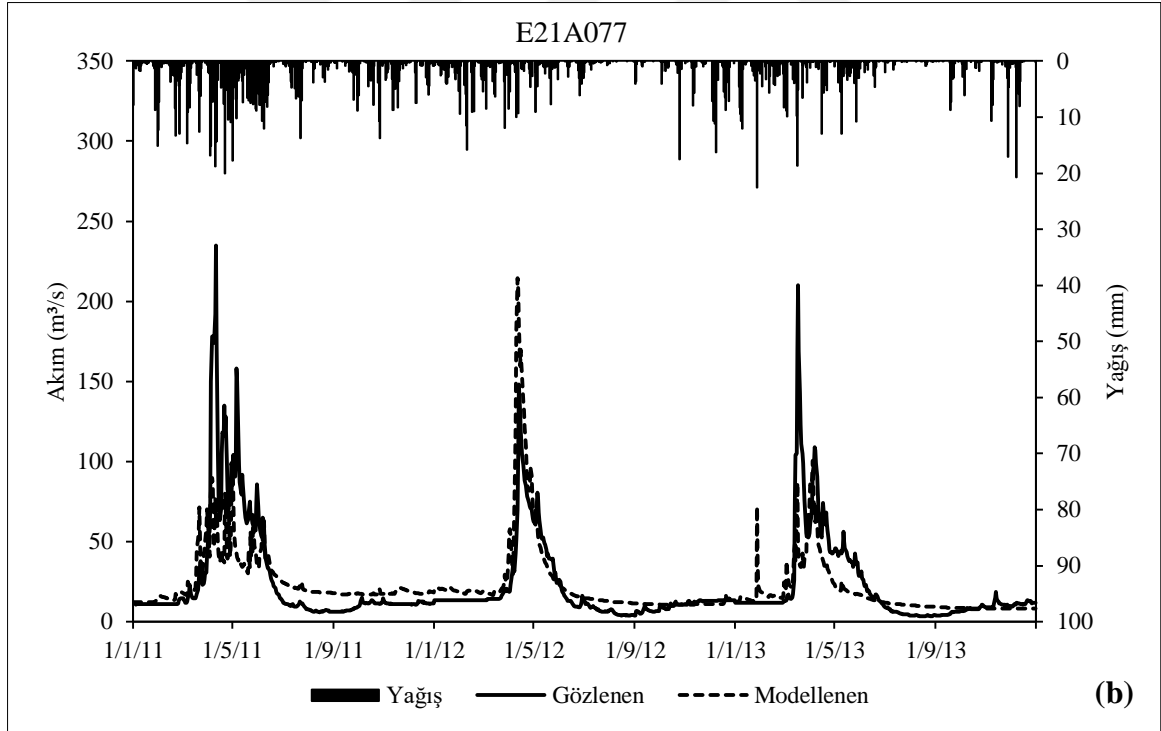
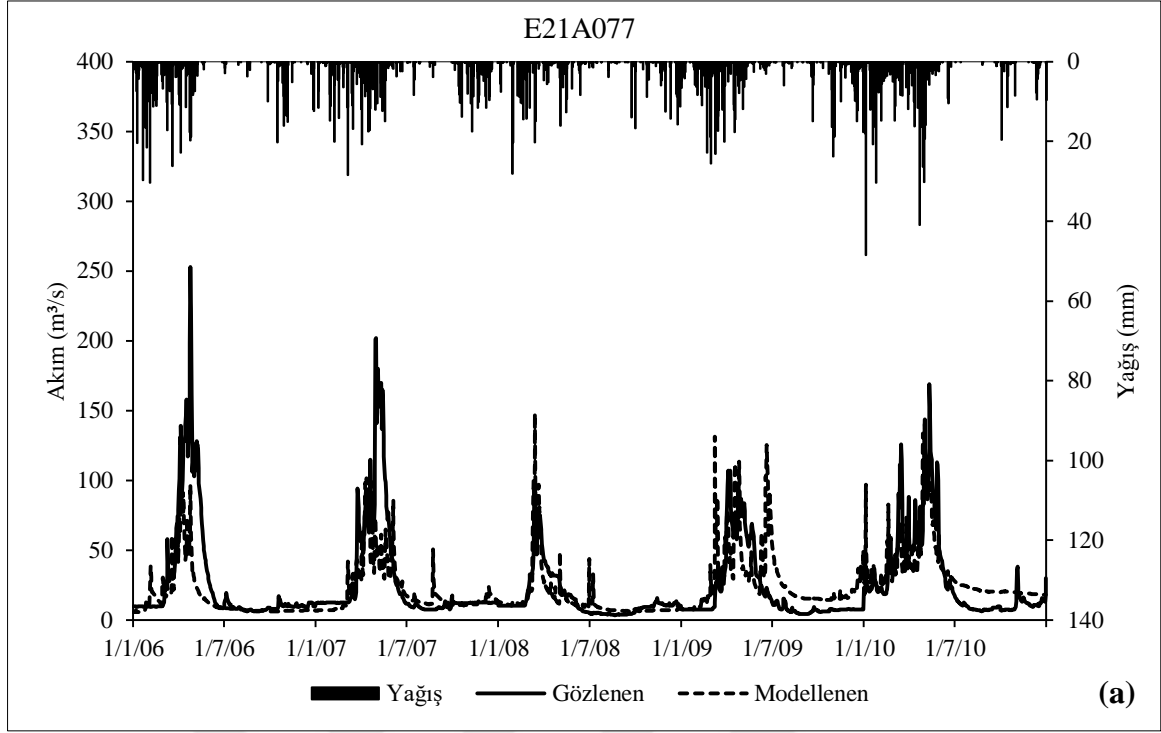
**Şekil 6.1.** E21A074 numaralı istasyonun aylık akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu



**Şekil 6.2.** E21A077 numaralı istasyonun aylık akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu



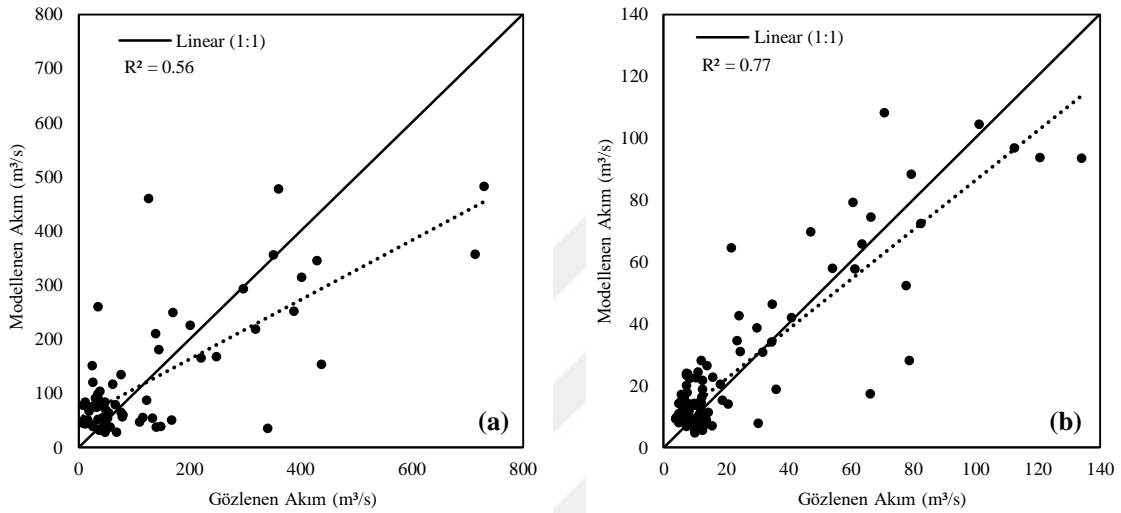
**Şekil 6.3.** E21A074 numaralı istasyonun günlük akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu



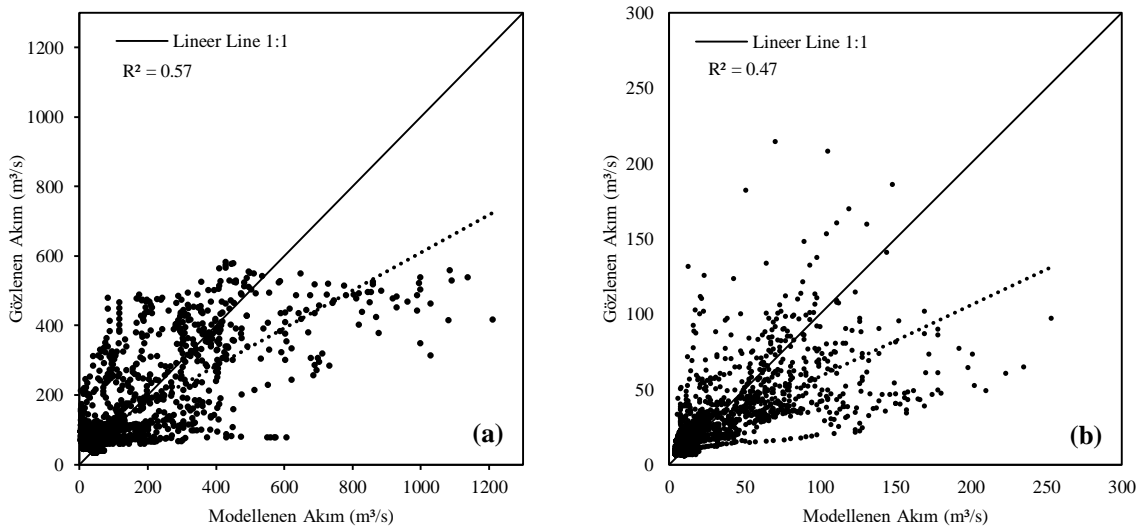
**Şekil 6.4.** E21A077 numaralı istasyonun günlük akım ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu

Her iki istasyon için gözlenen ve modellenen akımların karşılaştırıldığı hidrograflarını yanı sıra değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla saçılma grafikleri de oluşturulmuştur (Şekil 6.5-6.6). Gözlemlenen ve modellenen aylık ve günlük akımların E21A074 numaralı

istasyonu için elde edilen korelasyon değerleri kalibrasyon ve doğrulama periyotlarında boyunca sırasıyla 0.56 ve 0.57 olarak bulunmuştur. E21A077 istasyonu için elde edilen gözlenen ve modellenen aylık ve günlük model sonuçları kalibrasyon ve doğrulama periyotları boyunca sırasıyla 0.77 ve 0.47 olarak bulunmuştur. Elde edilen günlük ve aylık SWAT modeli sonuçlarının genel olarak kabul edilir düzeyde bulunduğu yalnızca E21A077 numaralı istasyonda günlük model sonuçlarının kabul edilebilir sınırlar altında kaldığı görülmüştür ( $R^2 < 0.5$ ).



**Şekil 6.5.** Aylık akıma ait kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca elde edilen saçılım grafiği (a) E21A074 (b) E21A077



**Şekil 6.6.** Günlük akıma ait kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca elde edilen saçılım grafiği (a) E21A074 (b) E21A077

### 6.1.2. Sediment Kalibrasyon ve Doğrulaması

Akım, havza içerisindeki ana kontrol parametresi olduğu için diğer parametreleri etkilememesi gerekmektedir (Abbaspour, 2015). Bu nedenle sediment kalibrasyonunun genellikle akım değerlerinin kalibrasyonu yapıldıktan sonra yapılması gerekmektedir. Tablo 6.3'te akım modellemesi için kullanılan hidrolojik parametre değerleri sabit tutularak sediment değerlerini etkileyen ve Tablo 6.5'te verilen parametreler eklenerek sediment kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 6.5.** Sediment modellemesi için kullanılan parametreler

Hassas Parametreler	Başlangıç Değer Aralığı	Sabitlenen Değer
r_USLE_K	0 - 0.2	0.144
v_CH_COV1	0 - 0.1	0.005
r_ADJ_PKR	0 - 0.2	0.018

SWAT modelinden elde edilen sediment değerleri ile havza üzerindeki gözlem istasyonlarından alınan sediment değerleri SWAT-CUP programı vasıtasıyla kalibrasyon ve doğrulama işlemine tabi tutulmuştur. E21A074 ve E21A077 numaralı gözlem istasyonlarından elde edilen sediment değerleri ile SWAT modelinden elde edilen sonuçların kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca gösterdikleri değerler Şekil 6.8 ve 6.9'da karşılaştırılmıştır. Model sonuçlarının performans değerlendirme kriterleri akım modellemesinde olduğu gibi SWAT-CUP programında gerçekleştirilmiştir. E21A074 ölçüm istasyonunda sediment modellemesi performans değerlendirme kriterleri ve belirsizlik analizi sonuçlarına göre NSE: 0.54, 0.69,  $R^2$ : 0.67, 0.68, PBIAS: -%33.8, %4.6, p-factor: 0.83, 0.42 ve r-factor: 2.38, 0.43 değerleri olarak sırasıyla kalibrasyon ve doğrulama periyotlarında bulunmuştur. E21A077 istasyonu için ise bu değerler NSE: 0.62, 0.35,  $R^2$ : 0.68, 0.56, PBIAS: -%3.2, -%77.2, p-factor: 0.77, 0.20 ve r-factor: 0.79, 0.49 olarak kalibrasyon ve doğrulama aralıklarında elde edilmiştir (Tablo 6.6). Elde edilen sonuçlara göre sediment modellemesi E21A074 istasyonu için performans değerlendirme ölçütlerine göre iyi ve yeterli sınıfa girdiğini ortaya koymuştur. E21A077 istasyonu için ise kalibrasyon periyodunda modelin NSE (0.62),  $R^2$  (0.68) ve PBIAS (-%3.2) ölçütlerine göre iyi sınıfa girdiğini fakat doğrulama periyodunda ise bu değerlerin yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle 2011 yılında yağışın ve debinin yüksek olduğu Nisan ve Mayıs aylarında modelin gözlenen değerlerden daha düşük kaldığı görülmektedir. Benzer şekilde kalibrasyon periyodu boyunca da 2006 ve 2007 yıllarında oluşan pik debi ve yağışlarda modelin gözlem değerlerinin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte model 2006 ve 2007 yıllarında yine yağışın daha yüksek olduğu bahar aylarında gözlem değerlerinden daha yüksek değerler üretmiştir. Model değerlerin bu periyotlarda yüksek değerler üretmesinin çeşitli sebepleri olabilmektedir. Havza üzerinde modellemeye girmeyen fakat havza

üzerinde gerçekleşebilecek bazı aktiviteler ve tesisler model belirsizliklerini oluşturabilmektedir. Örneğin yoğun yağışlar sonrası oluşabilecek toprak kayıpları, akarsu kenarlarına veya üzerine dökülen inşaat artığı topraklar, havza üzerindeki yol, tünel gibi uzun zaman süren inşaatlar ve nehir kenarlarına inşa edilen bazı kum ocağı gibi tesisler zaman içerisinde akarsu boyunca sediment miktarına etki edebilecek faktörler arasındadır (Abbaspour, 2015). Havza üzerinde yapılan incelemelerde de Murat Nehri kenarında inşa edilmiş farklı konumlarda kum ocakları gözlenmiştir (Şekil 6.7). Uzun yıllar boyunca işletilen bu tesislerden rüzgâr ve yağışlar vasıtasıyla akarsuya karışabilecek yüksek miktarda sediment yükü oluşturabilecek maddeler bulunabilmektedir. Buna benzer aktiviteler model içerisinde tanıtılmadığı takdirde modelin performansını etkileyebilmektedir.

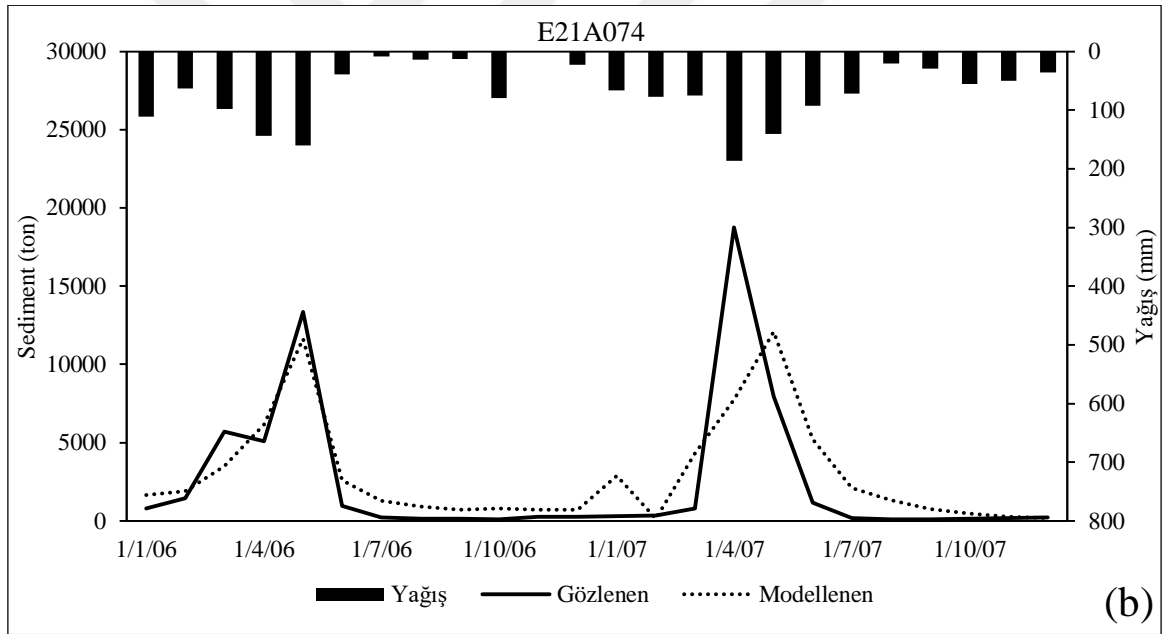
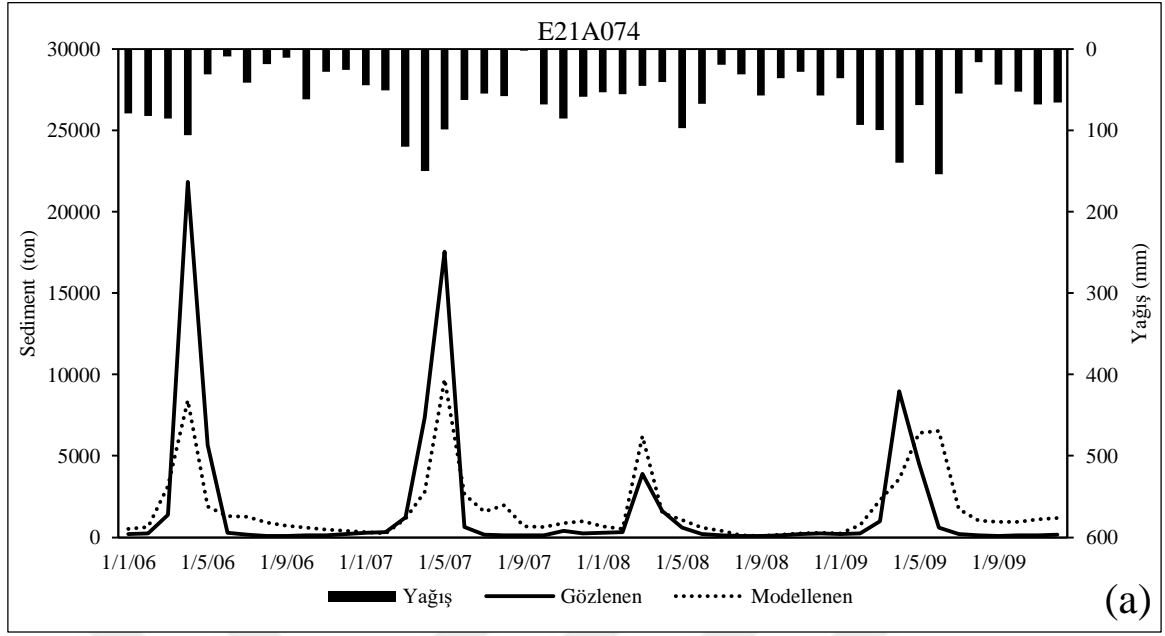
Elde edilen bütün sonuçlar değerlendirildiğinde, genel olarak SWAT modeli ile oluşturulan modelin sediment tahmin sonuçlarının E21A077 numaralı istasyonun doğrulama periyodu hariç yeterli sonuçlar verdiği görülmüştür.



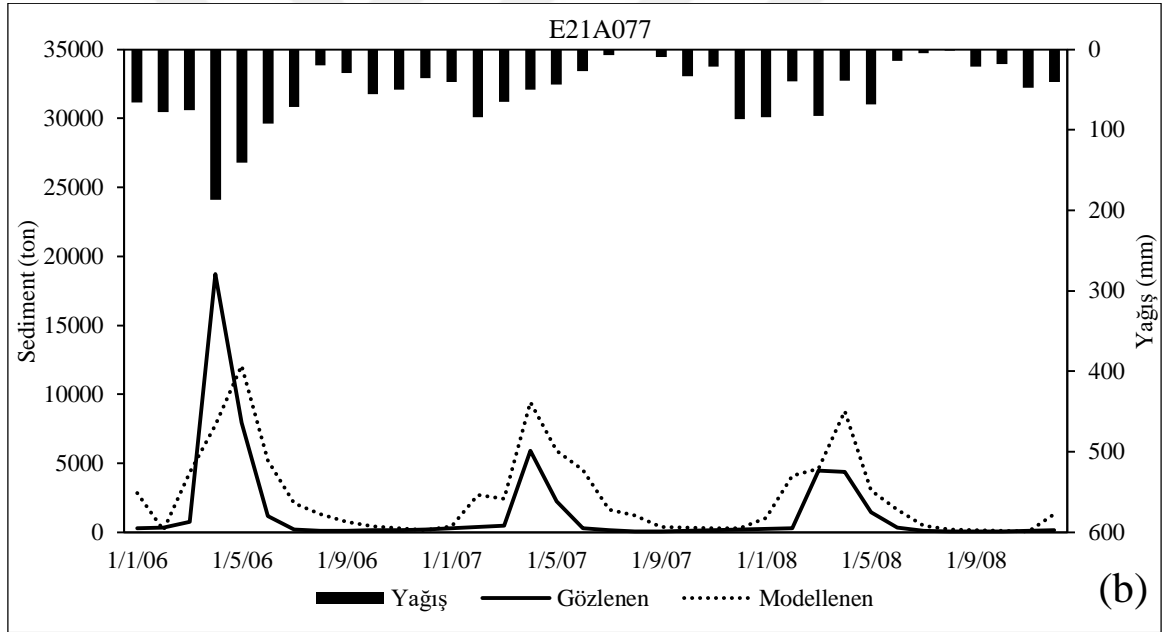
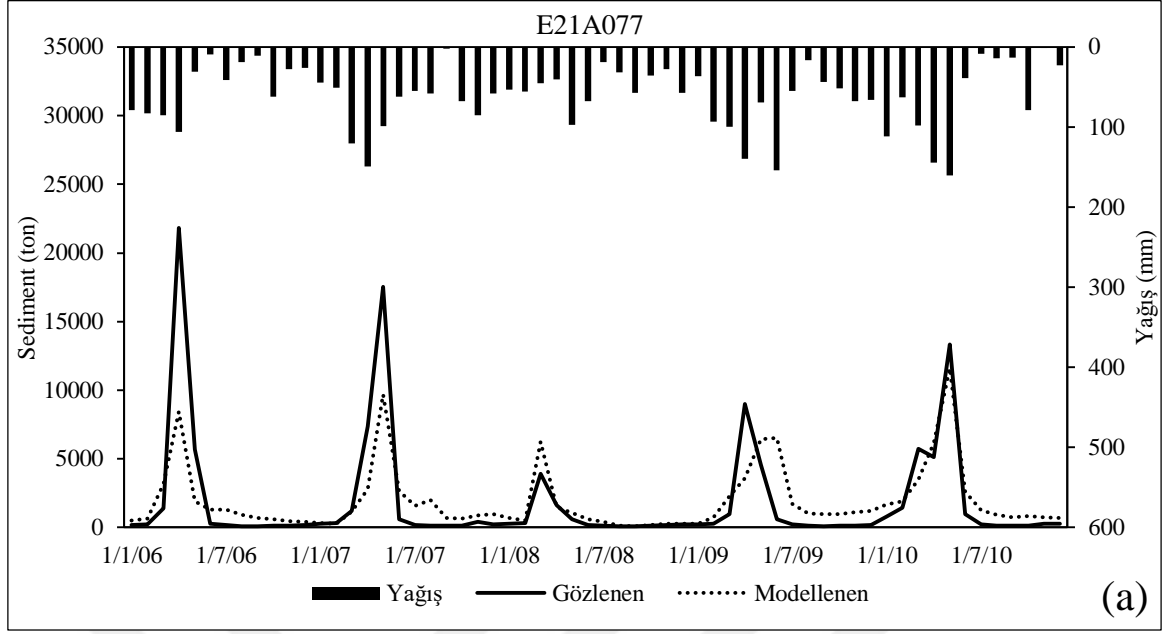
**Şekil 6.7.** Havzada bulunan kum ocaklarına bir örnek

**Tablo 6.6.** SWAT Modeli sediment ölçümleri kalibrasyon ve doğrulama istatistikleri

		NSE	R <sup>2</sup>	PBIAS (%)	p-factor	r-factor
E21A074	Kalibrasyon (2006-2009)	0.54	0.67	-33.8	0.83	2.38
	Doğrulama (2010-2011)	0.69	0.68	4.6	0.42	0.43
E21A077	Kalibrasyon (2006-2010)	0.62	0.68	-3.2	0.77	0.79
	Doğrulama (2011-2013)	0.35	0.56	-77.2	0.20	0.49

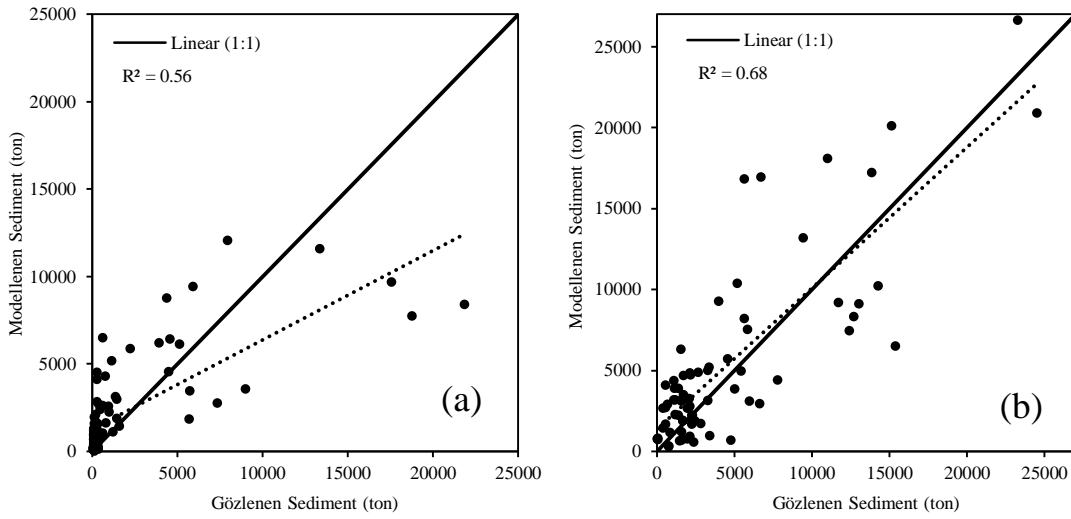


**Şekil 6.8.** E21A074 numaralı istasyonun aylık sediment ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu



**Şekil 6.9.** E21A077 numaralı istasyonun aylık sediment ve SWAT modeli sonuçları karşılaştırması (a) kalibrasyon ve (b) doğrulama periyodu

SWAT modelinden elde edilen sonuçlar ve havza üzerinde bulunan iki ölçüm istasyonundan alınan sediment değerlerinin birbirleriyle olan ilişkilerini belirleyebilmek için saçılma diyagramları oluşturulmuştur (Şekil 6.10). E21A074 ve E21A077 istasyonları için gözlenen ve SWAT modelinden elde edilen sediment değerleri kalibrasyon ve doğrulama periyodları boyunca elde edilen korelasyon katsayıları 0.56 ve 0.68 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.10. Aylık sedimente ait kalibrasyon ve doğrulama periyodu boyunca elde edilen saçılım grafiği (a) E21A074 (b) E21A077

## 6.2. Toprak Erozyonu ve Hidrolojik Parametrelerin Değerlendirilmesi

Erozyon, toprak ve su kaynaklarının korunmasına yönelik en büyük tehditlerden biridir. Toprak kaybının ölçülmesi, doğal kaynaklar ve çevre planlamasındaki en büyük zorluklardan biridir (Mosbahi vd., 2013). Bu nedenle, tahmine dayalı erozyon modelleri, toprak erozyonunu değerlendirmek ve toprak erozyonu yönetim planlarını geliştirmek için faydalı araçlarındandır (Imamoglu ve Dengiz, 2017). Bilgisayar simülasyon modelleri; coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri ile beraber çeşitli arazi kullanımı ve yönetim uygulamaları için toprak kaybını tahmin etmede giderek daha yaygın hale gelmiştir (Mosbahi vd., 2013). Bu çalışmada da fiziksel tabanlı bir program olan SWAT modeli ile Murat Nehri havzasının hidrolojik modellemesinin yanı sıra erozyon haritası da çıkarılmıştır. Alt havza ölçeğinde oluşturulan bu haritalar ile havza üzerinde erozyona duyarlı bölgeler belirlenebilmiştir. Havza üzerinde gerçekleşen erozyon 5 sınıfa ayrılarak aşağıda belirtilen aralıklarda kategorize edilmiştir (CEM, 2018).

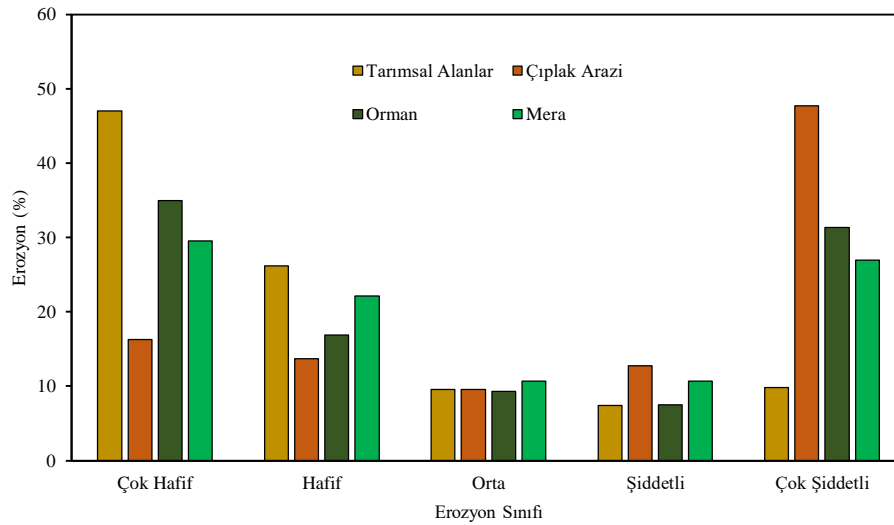
Çok hafif	:<1 $\text{tha}^{-1}\text{y}^{-1}$
Hafif	:1-5 $\text{tha}^{-1}\text{y}^{-1}$
Orta	:5-10 $\text{tha}^{-1}\text{y}^{-1}$
Şiddetli	: 10-20 $\text{tha}^{-1}\text{y}^{-1}$
Çok Şiddetli	:>20 $\text{tha}^{-1}\text{y}^{-1}$

Çalışma alanı üzerinde meydana gelen erozyon ile havzanın arazi kullanımı/arazi örtüsü, toprak tipi ve arazi eğimi gibi havza özellikleri ile değişimleri incelenmiştir. Farklı arazi kullanımlarında meydana gelen erozyonlar incelendiğinde çıplak arazilerde meydana gelen şiddetli

ve çok şiddetli erozyonlar dikkat çekmiştir. Toplam çalışma alanının %22.9'u çıplak araziden meydana gelmektedir ve bu alanında %48'si çok şiddetli, %13'ü ise şiddetli erozyon sınıfına girmektedir (Tablo 6.7). Bunun temel nedeninin çıplak araziler üzerinde herhangi bir bitki örtüsü bulunmamasından kaynaklı olduğu bilinmektedir. Bununla beraber ormanlık alanların %31'inde meydana gelen toprak kaybı çok şiddetli erozyon sınıfında yer almaktayken tarımsal alanların %10'unda çok şiddetli erozyon meydana geldiği görülmektedir. Şekil 6.11'de de meydana gelen erozyonların arazi kullanımlarına göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

**Tablo 6.7.** Farklı arazi kullanımlarında meydana gelen erozyonlar

	Çok Hafif (%)	Hafif (%)	Orta (%)	Şiddetli (%)	Çok Şiddetli (%)
Tarımsal Alanlar	47	26	10	7	10
Çıplak Arazi	16	14	10	13	48
Mera	30	22	11	11	27
Orman	35	17	9	8	31



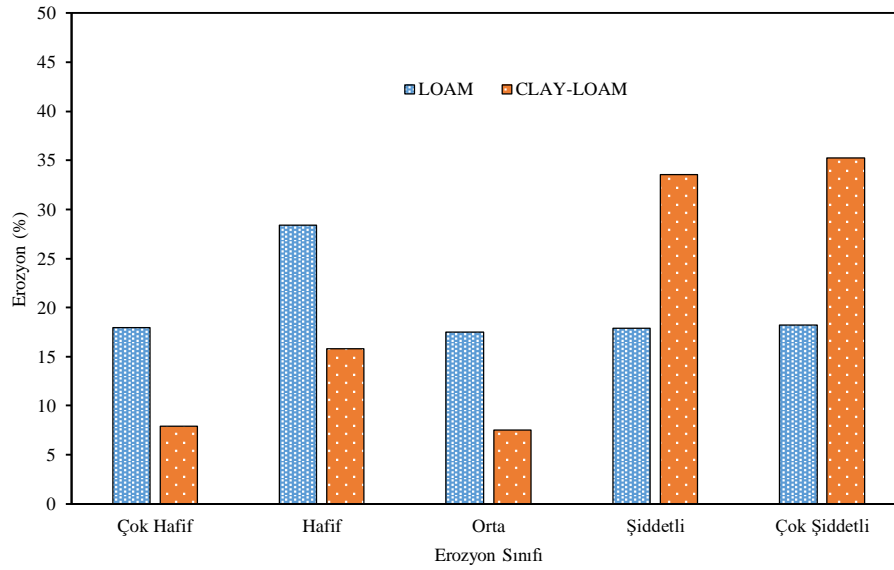
**Şekil 6.11.** Farklı arazi kullanımlarında meydana gelen erozyon sınıflandırması grafiği

Havzada meydana gelen erozyonun toprak cinsine göre sınıflandırılması ve elde edilen değerler Tablo 6.8 ve Şekil 6.12'de verilmiştir. Havzanın toplam alanının %84'ü LOAM (tınlı) toprak özelliğindedir ve bunlarında %58.31'i Kastanozems toprak sınıfına aittir. CLAY-LOAM (killi-tınlı) toplam havza alanının %16'sını oluşturmaktadır. Kastanozem topraklar kuru çayır ve organik maddece zengin koyu kahverengi topraklardır. Su erozyonu ve rüzgâr özellikle nadasa bırakılan arazilerde Kastanozemler için sorun yaratmaktadır (Erdogan, 2013) ve bu toprak cinsi havzanın toplam alanının yarısından fazlasını kaplaması nedeniyle de erozyon açısından dikkate

alınması gereken bir unsurdur. Lithosols toprak sınıfı da havza toplam alanının %25.85'ini kaplayarak havzadaki en fazla bulunan ikinci toprak cinsidir. Lithosoller taşlı, çakıllı topraklardır ve genellikle dağların eğimli yamaçlarında bulunur. Tarım için elverişli topraklar değildir ve ülkemizde genellikle İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde rastlanmaktadır. Çalışma alanı için oluşturulmuş eğim haritasına da baktığımızda da Lithosol toprak cinsine sahip alanlar genellikle eğimin yüksek olduğu yerlerde bulunduğu gözlenmiştir. Havza üzerinde bulunan toprak cinsleri LOAM ve CLAY-LOAM olarak iki ana grupta toplanarak elde edilen erozyon, Tablo 6.8 ve Şekil 6.12 te verilmiştir.

**Tablo 6.8.** Toprak cinsine göre meydana gelen erozyon sınıfları

Toprak Cinsi	Çok Hafif (%)	Hafif (%)	Orta (%)	Şiddetli (%)	Çok Şiddetli (%)
LOAM	18	28	18	18	18
CLAY-LOAM	8	16	7	34	35



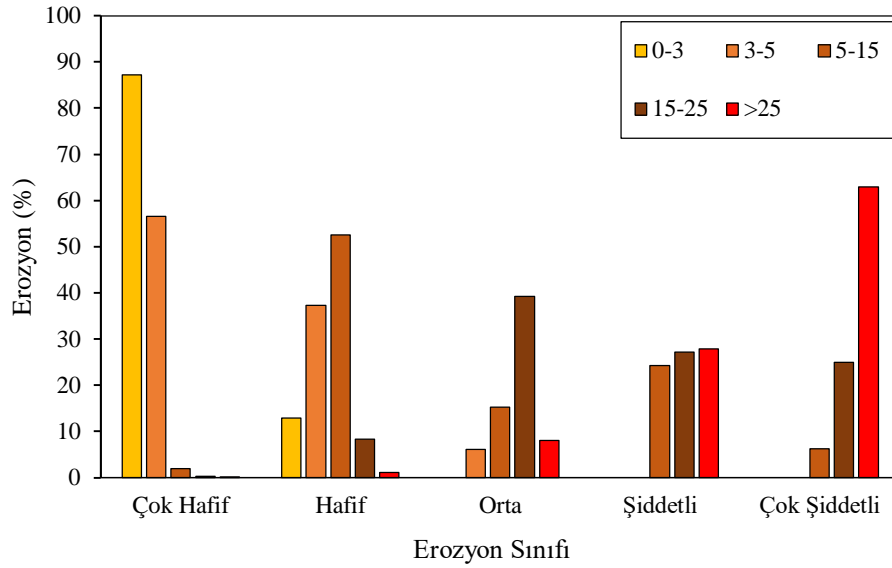
**Şekil 6.12.** Toprak cinsine göre meydana gelen erozyon sınıflandırması grafiği

Şekil 6.12'den de görüldüğü üzere CLAY-LOAM toprak grubuna sahip alanlarda meydana gelen erozyonun %35'i çok şiddetli ve %34'ü şiddetli erozyon sınıfına girmektedir. LOAM toprak grubunda ise meydana gelen erozyonun %18'i çok şiddetli ve %18'i şiddetli erozyon sınıfında yer almaktadır.

Havzada gerçekleşen erozyon miktarını etkileyen bir diğer parametre havzanın eğimidir. Bu çalışmada havza 5 eğim sınıfına bölünmüştür ve bu eğim sınıflarına karşılık gelen erozyon oranları Tablo 6.9 ve Şekil 6.13'te verilmiştir.

**Tablo 6.9.** Eğim sınıfına göre erozyon oranları

Eğim Sınıfı (%)	Çok Hafif (%)	Hafif (%)	Orta (%)	Şiddetli (%)	Çok Şiddetli (%)
0-3	87	13	0	0	0
3-5	57	37	6	0	0
5-15	2	53	15	24	6
15-25	0	8	39	27	25
>25	0	1	8	28	63

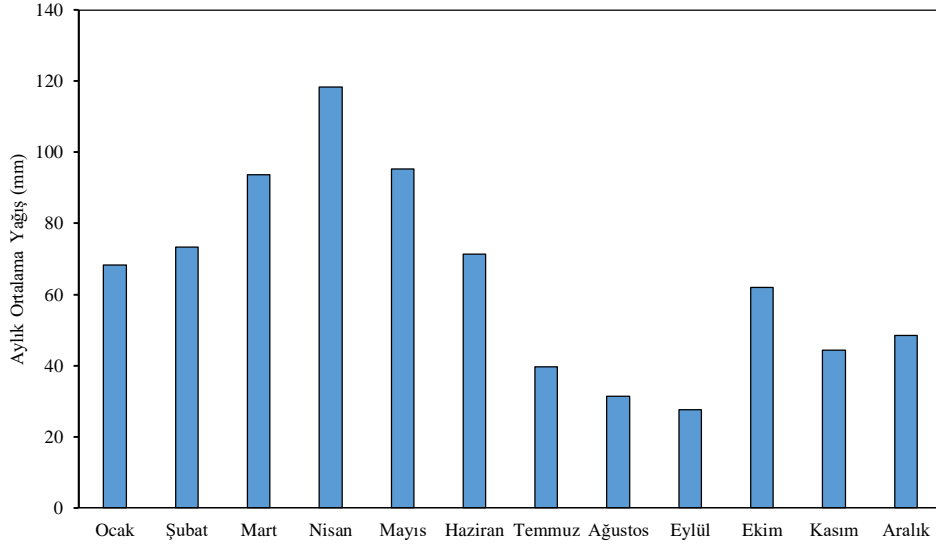


**Şekil 6.13.** Farklı eğim sınıflarında meydana gelen erozyon oranları

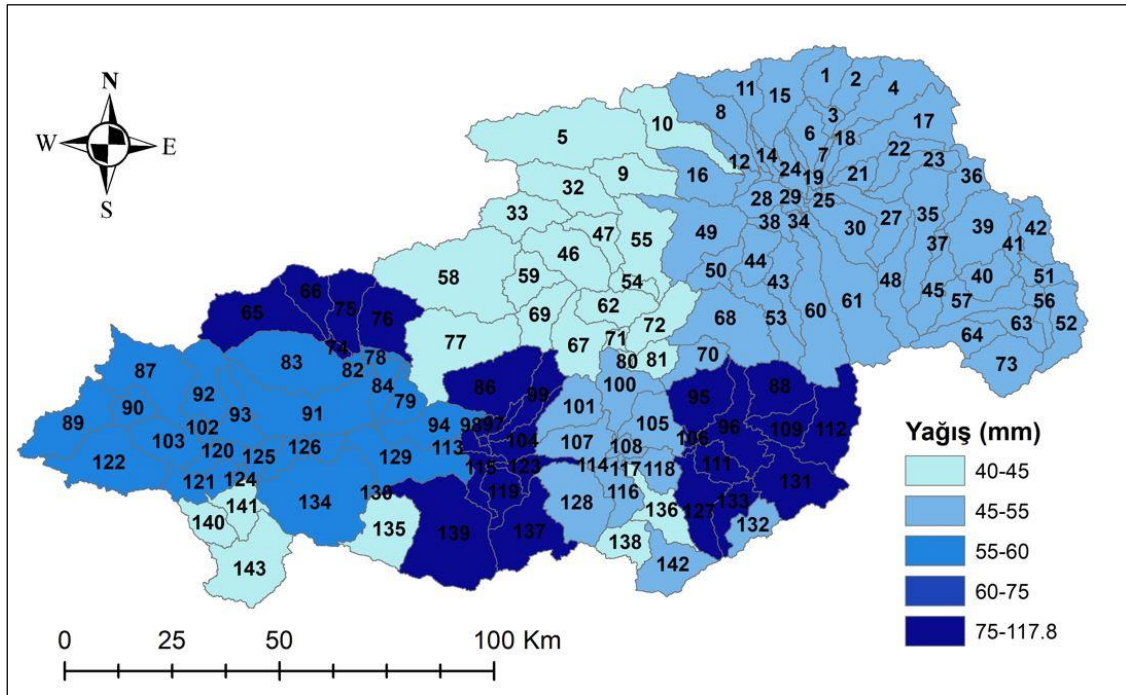
Şekil 6.13'ten de görüldüğü ve beklendiği üzere en yüksek erozyon yüksek eğimlerde en düşük erozyon ise eğimin daha az olduğu düz arazilerde görülmüştür. Eğim sınıfı 0-3 olan bölgelerde meydana gelen erozyonun %87'si çok hafif erozyon sınıfında yer alırken %3- %5 eğim sınıfına sahip olan bölgelerde ise meydana gelen erozyon %57 ile çok hafif ve %37 ile hafif erozyon sınıfında yer almıştır. Çalışma için belirlenen en yüksek eğim sınıfında ise (> %25) gerçekleşen erozyonun % 63'ü çok şiddetli %28'i ise şiddetli eğim sınıfına sahiptir. Elde edilen bu değerlerde erozyon miktarının havzanın eğimi ile doğru orantı gösterdiğini kanıtlamaktadır. Yüksek eğimli bölgelerde eğim etkisiyle toprak yüzeyi üzerindeki tanecikler rüzgâr ve yağmur etkisiyle daha kolay yer değiştirmekte ve bunun doğal sonucu olarak da bu bölgeler erozyona daha duyarlı hale gelmektedir. Buna benzer sonuçlar literatürde de gözlenmiştir (Panda vd., 2021; Zhang vd., 2015).

SWAT modeli havzayı 143 alt havzaya bölmüştür. Havzaya etki edecek hidrolojik parametrelerin ve erozyonun hangi alt havzalarda daha yoğun veya daha az olduğunun belirlenmesi ve haritalandırılması, bölgede yapılabilecek olan toprak koruma ve su kaynakları çalışmalarına yardımcı olacaktır. Çalışma periyodu boyunca elde edilen aylık ortalama yağış miktarı Şekil 6.14'te

gösterilmiştir. En fazla yağış Nisan ayında ortalama 118.36 mm ile en az yağış ise Eylül ayında 27.52 mm ile elde edilmiştir. Yağışların havza üzerindeki dağılımı Şekil 6.15'te haritalandırılmıştır. Görüldüğü üzere havzanın alt bölgeleri üst bölgelere göre daha fazla yağış almaktadır. Özellikle 65-66-74-75-76-137 ve 139 numaralı alt havzalar yağışın en fazla olduğu bölgelerdir.



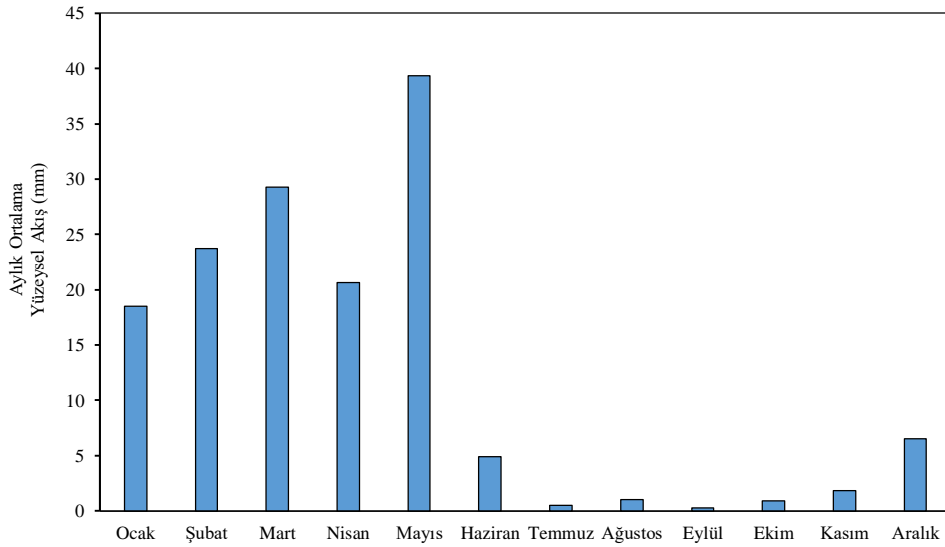
Şekil 6.14. Aylık ortalama yağış miktarları



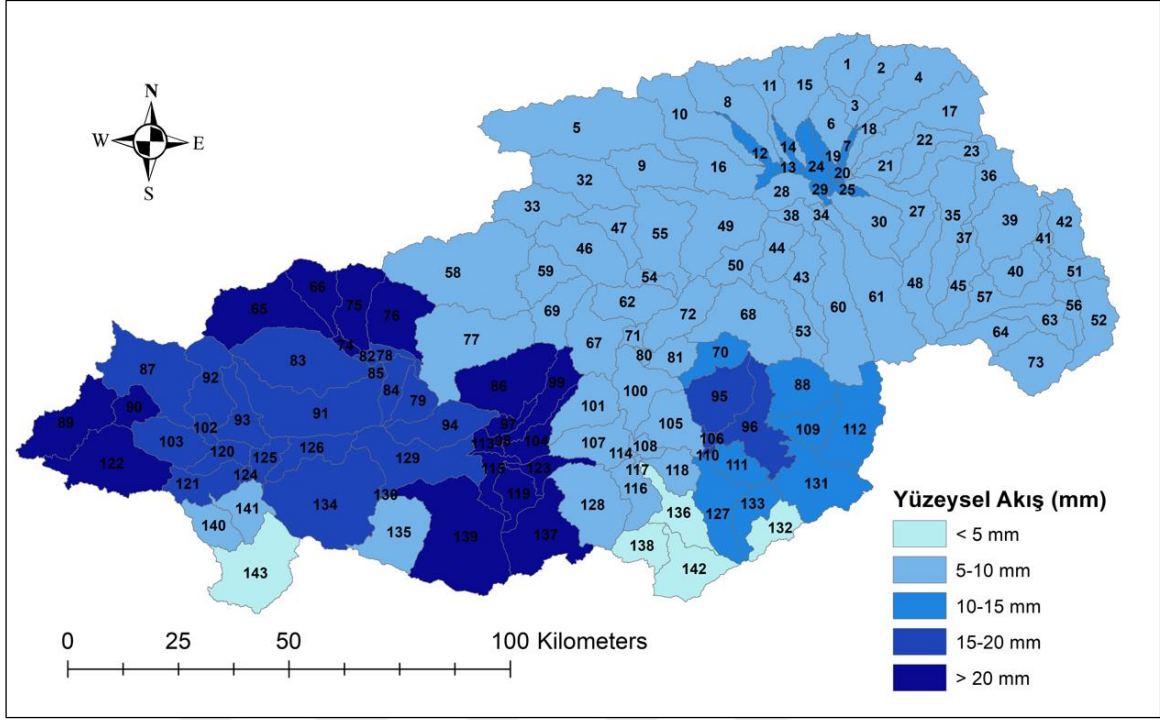
Şekil 6.15. Aylık ortalama yağışların havza üzerinde dağılımı

Yağış ve yüzeysel akış birbirlerine bağlı parametrelerdir. Toprak cinsi, arazi kullanımı gibi parametreler de dikkate alındığında en fazla yağışın olduğu bölgelerde yüksek yüzeysel akış beklenmektedir. Şekil 6.16’ da aylık ortalama yüzeysel akış değerleri ve Şekil 6.17’ de alt havza bazlı yüzeysel akışların havza üzerindeki dağılımı gösterilmiştir. Beklendiği üzere yüzeysel akış yağışların meydana geldiği bahar aylarında gözlenmiş ve en yüksek aylık ortalama değerini 39.36 mm ile Mayıs ayında elde etmiştir. Yaz aylarından sonra özellikle Ekim ayından sonra artmaya başlayan yağış miktarı yüzeysel akış miktarlarında çok fazla bir artışa neden olmadığı görülmüştür. Yaz ayları boyunca kuruyan toprakların bahar aylarına kadar olan yağışlarla toprak su doygunluğunun arttığı ve bahar aylarındaki yağışlar ve kar erimesiyle de yüzeysel akışın arttığı gözlenmiştir.

Yüzeysel akışın havza üzerinde dağılımı incelendiğinde en fazla değerlerin yağışın yüksek olan bölgelerde olduğu görülmüştür. Bunun yanında 64-73-88-109-112 numaralı alt havzalarda da yağışın çok yüksek olmamasına rağmen yüzeysel akışın fazla olduğu gözlenmiştir. Bu bölgelerin eğiminin çok yüksek olması bunun nedenleri arasında düşünülebilir.

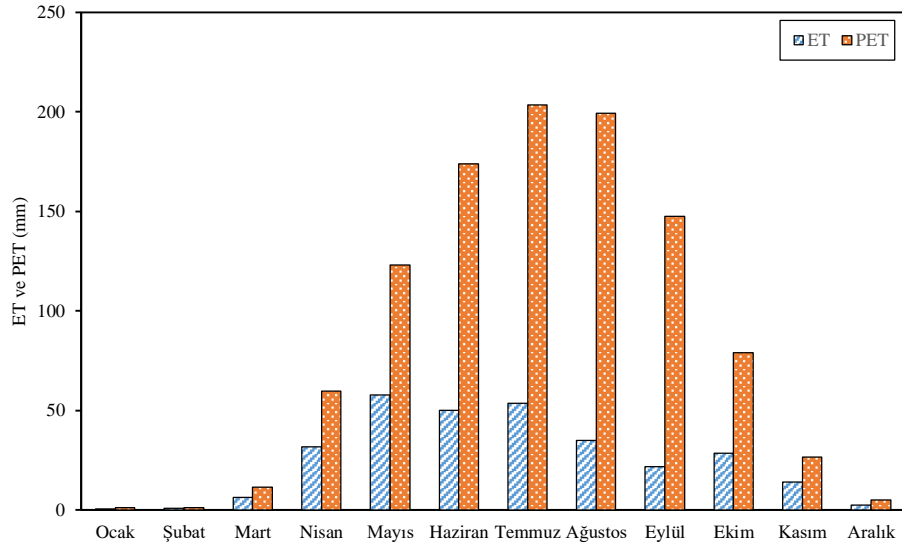


Şekil 6.16. Aylık ortalama yüzeysel akış miktarları

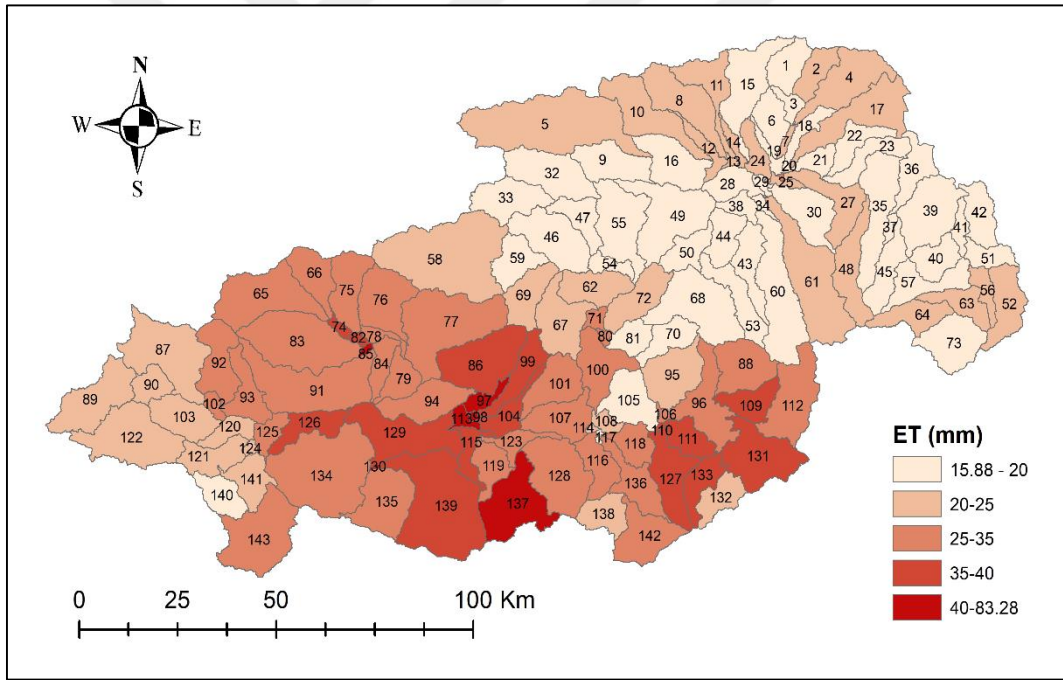


Şekil 6.17. Aylık ortalama yüzeysel akışların havza üzerinde dağılımı

Evapotranspirasyon, bir diğer önemli hidrolojik parametredir. Bitkilerin su ihtiyacının belirlenmesinde, su kaynakları projelerinde ve iklim değişikliği incelemelerinde de evapotranspirasyon önemli bir etkidir. Gerçek (ET) ve Potansiyel Evapotranspirasyon (PET) olarak ikiye ayrılmaktadır. ET, buharlaşma ve terlemenin toplamı, yani gerçekleşen evapotranspirasyon olarak tanımlanırken, PET ise gerçekleşebilecek maksimum evapotranspirasyon miktarıdır. Toprakta yeterli nemin olduğu durumlarda ET ile PET eşit değerlendirilmektedir. Şekil 6.18’ de çalışma alanının aylık ortalama ET ve PET değişimleri gösterilmiştir. Model sonuçlarına bakıldığında PET ve ET değerlerinin Kasım ayından Nisan ayına kadar birbirine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. PET değerinin ET değerine yakın olması toprakta bulunan nemin çok az olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Fakat Mayıs ayından itibaren bu fark açılmış ve Ağustos ayında maksimuma seviyeye ulaşmıştır. Yağışların da Ağustos ayında minimum seviyeye inmesi sebebiyle evapotranspirasyonun bu aylarda havza hidrolojisine olan etkisi artmaktadır. Şekil 6.19’da ET değerlerinin havza üzerinde dağılımları haritalandırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi genel olarak yağışın daha fazla görüldüğü havzanın alt kısımlarında ET değerleri de yüksek oranlarda görülmektedir.



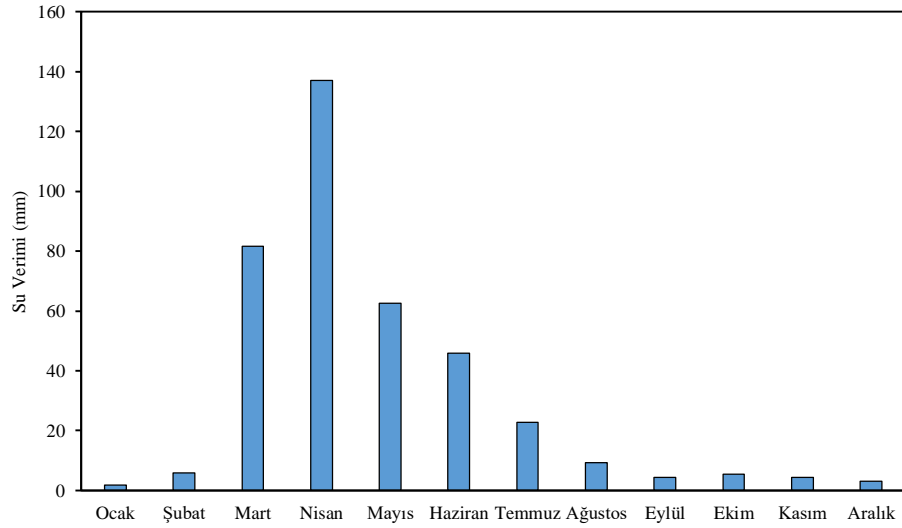
Şekil 6.18. Aylık ortalama ET ve PET miktarları



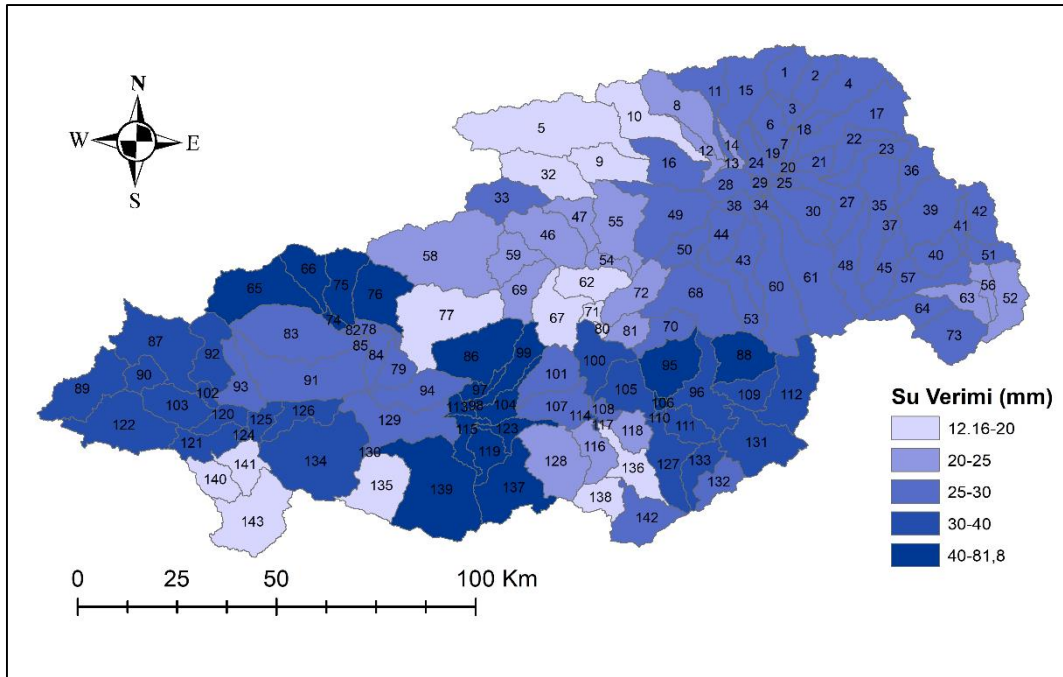
Şekil 6.19. Aylık ortalama ET değerlerinin havza üzerinde dağılımı

Su verimi parametresi SWAT modelinde yüzeysel akış, yüzey altı akışı ve yeraltı suyunun akarsuyu beslediği miktarının toplamından iletim kayıpların çıkarılması ile elde edilmektedir. Diğer bir deyişle su verimi, HRU'lardan ayrılan ve ana kanala giren suyun toplamına denilmektedir. Dolayısıyla su verimi havzada yapılacak su yönetimi ve planlaması için önemli bir parametredir (Ayivi ve Jha, 2018). Çalışma havzası için oluşturulmuş aylık ortalama su verimi Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Eylül-Aralık ayları arasında oluşan yağışların yüzeysel akışa

katkılarının az olması ve Ocak-Şubat aylarında kar örtüsü sebebiyle su verimi bu aylarda düşük seviyelerde kalmıştır. Ocak ayında en düşük seviyesi olan ortalama 1.79 mm olarak gözlenmiştir. Mart ayından itibaren başlayan yağışlar ve kar erimesi ile beraber ortaya çıkan yüzeysel akışlar yardımıyla su veriminde de artışlar gözlenmiştir. Nisan ayında görülen 137.1 mm ile de maksimum seviyesine ulaşmıştır. Şekil 6.21’de su verimi değerlerinin alt havzalarda dağılımı haritalandırılmıştır. En yüksek su verimi değerinin 139 ve 137 numaralı alt havzalarda sırasıyla 81.8 mm ve 80.76 mm olduğu görülmüştür.

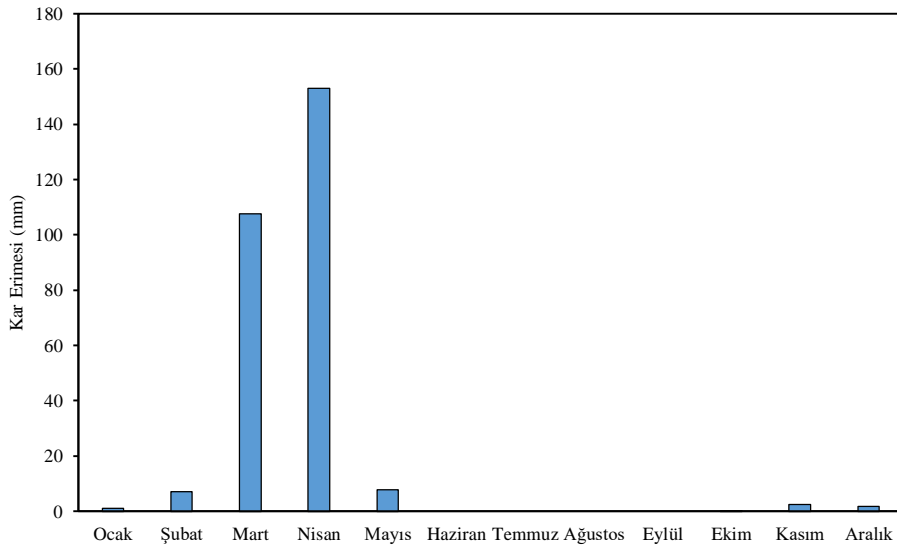


Şekil 6.20. Aylık ortalama su verimi miktarları

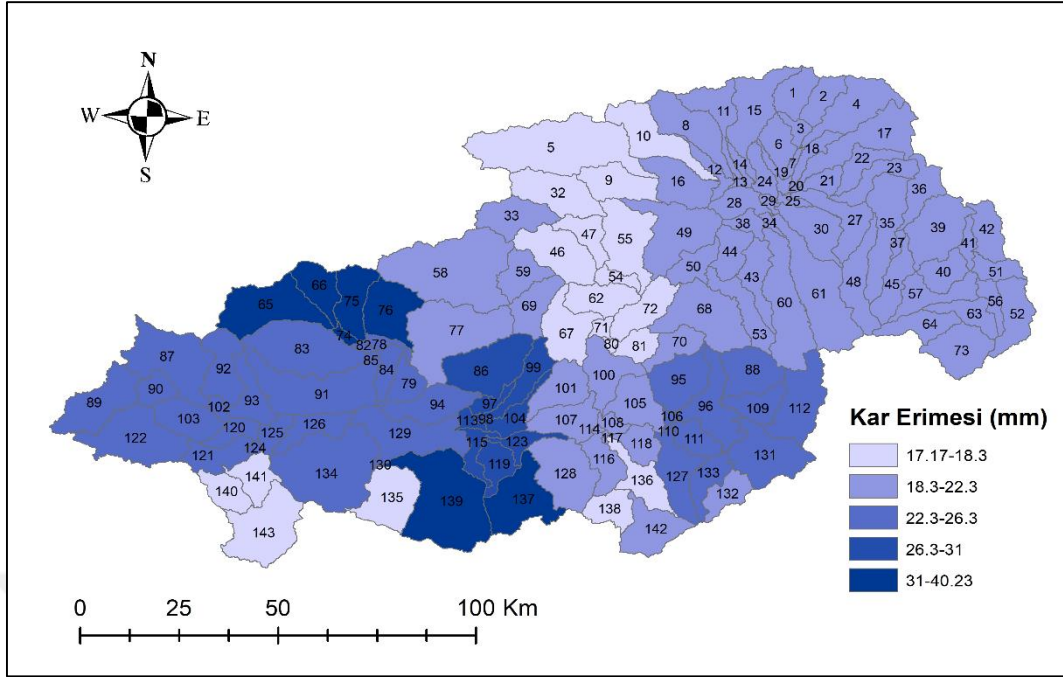


Şekil 6.21. Aylık ortalama su verimi değerlerinin havza üzerinde dağılımı

Havzanın yükseltisinin fazla olması kar yağışı miktarını da etkilemektedir. Dolayısıyla kar erimesi miktarları da akarsu debisini etkileyen faktörler arasında önemli yer tutmaktadır. Şekil 6.22’de çalışma alanında elde edilen aylık ortalama kar erimesi miktarları görülmektedir. Kış aylarında yağın yoğun kar, bahar ayları ile erimekte ve aynı aylarda yüzeysel akış miktarı ve su verimini de dolaylı olarak arttırmaktadır. Yaz aylarında kar erime miktarları 0 olmakla beraber Nisan ayında ortalama 153.1 mm ile maksimum değerine ulaşmıştır. Mart ve Nisan aylarında ortalama düşen yağış miktarları sırasıyla 83.85 ve 106.8 mm iken kar erimesi miktarları 107.61 ve 153.1 mm ile yağıştan daha fazla bir etkiyle havza hidrolojisine katkıda bulunmuştur. Bu değerlerde havzadaki kar erimesi miktarlarının özellikle Mart ve Nisan ayında çok önemli bir parametre olduğunun göstergesidir. Şekil 6.23’te, elde edilen kar erimesi değerlerinin havza genelinde dağılımı gösterilmiştir. En yüksek aylık ortalama kar erimesi değeri 40.23 mm ile 137 numaralı alt havzada gözlenmiştir. 137 numaralı alt havza en yüksek yüzeysel akış ve yağış değerleri ile de dikkat çekmektedir.



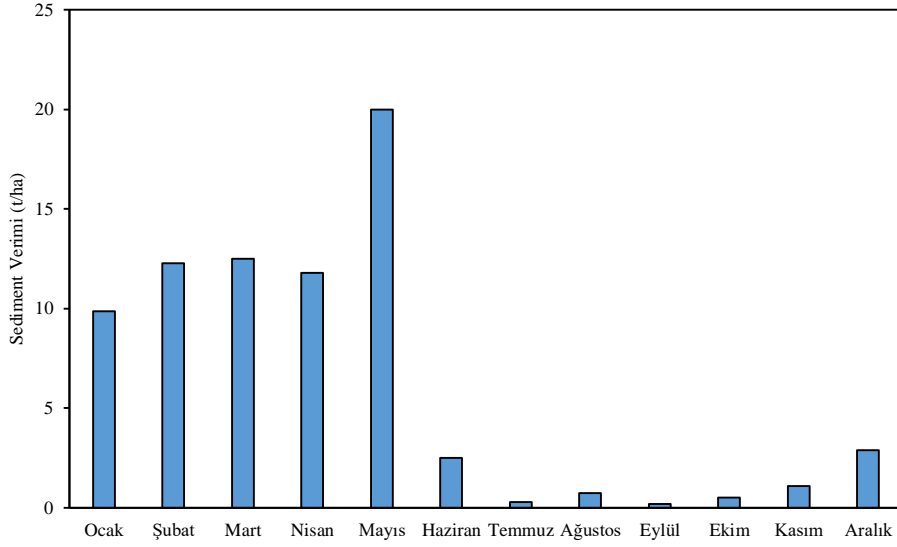
Şekil 6.22. Aylık ortalama kar erimesi miktarları



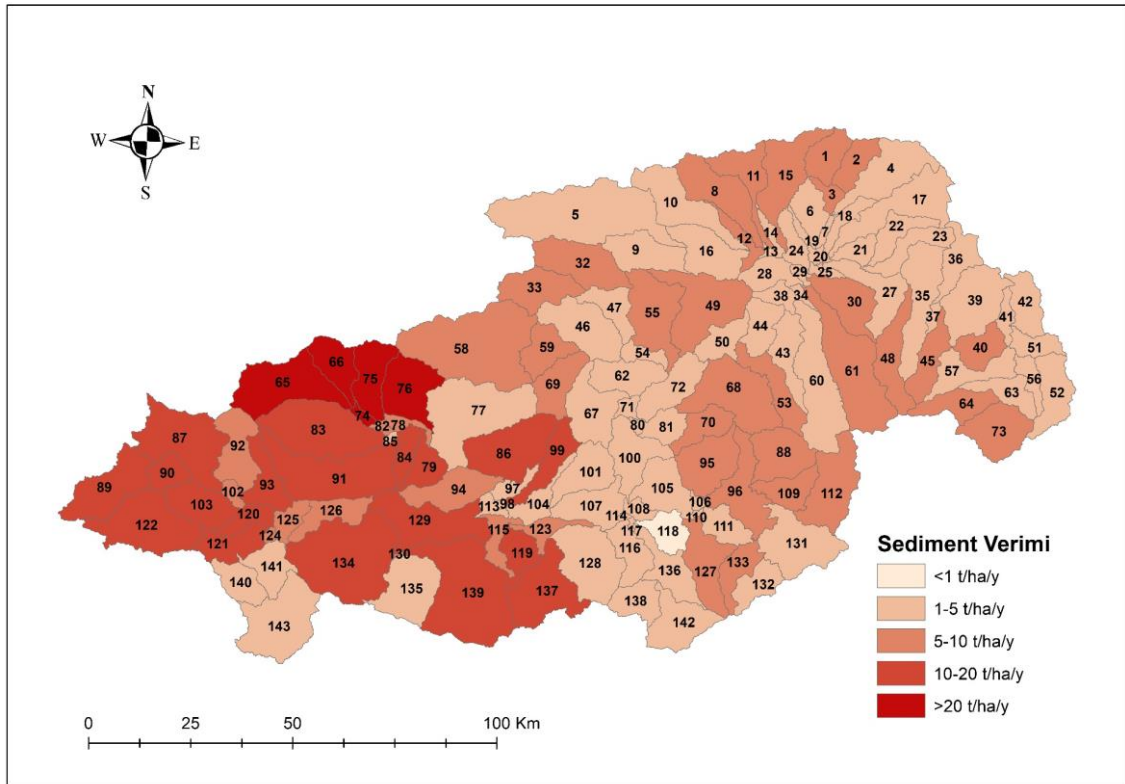
Şekil 6.23. Aylık ortalama kar erimesi değerlerinin havza üzerinde dağılımı

Havza hidrolojisini etkileyen bir diğer önemli parametre sediment verimidir. Havzanın belirli bir bölgesinden belirli bir zamanda geçen toplam sediment miktarına sediment verimi denilmektedir. Sediment verimi, taşkın önlemleri ve hidrolik yapıların planlama ve tasarım aşamalarında dikkate alınması gereken ve büyük barajların rezervuarlarının aktif ve ölü hacimlerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir (Cambazoğlu ve Göğüş, 2004). Çalışma periyodu boyunca SWAT modelinden elde edilen aylık ortalama sediment verimi Şekil 6.24'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere Mayıs ayında en yüksek sediment verimi 19.99 t/ha/y değeri ile elde edilmiştir. Bu değeri 12.49 t/ha/y ile Mart ayında elde edilen sediment verimi takip etmektedir. Sediment verimi yağış, yüzeysel akış, toprak cinsi, arazi kullanımı ve arazi eğimi gibi birçok parametre ile doğrudan ilişkilidir. Bahar aylarında yüksek değerlerde seyreden yüzeysel akış ve yağış değerleri sediment veriminde de gözlenmiştir. Elde edilen sediment verimi değerleri alt havza ölçeğinde Şekil 6.25'teki gibi haritalandırılmıştır. En yüksek sediment veriminin görüldüğü 74 numaralı alt havzada ortalama 32.57 t/ha/y değeri elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla 76, 75 ve 66 numaralı alt havzalarda 24.62 t/ha/y, 24.53 t/ha/y ve 24.23 t/ha/y sediment verimleri gözlenmiştir. Özellikle 76, 75 ve 66 numaralı alt havzalar incelendiğinde bunların çıplak arazi tipine, yüksek yüzeysel akış değerlerine ve en yüksek eğim sınıfına sahip oldukları görülmüştür. En düşük sediment verimleri ise sırasıyla 118, 117 ve 114 numaralı alt havzalarda 0.78 t/ha/y, 1.02 t/ha/y ve 1.1 t/ha/y değerleri ile görülmüştür. Sediment veriminin düşük olduğu belirlenen alt havzaların özellikleri incelendiğinde ise, bu alanların tarım arazisi ve kısmen şehirleşme yapısında bulunduğu ve arazi eğiminin de az olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan çıkarımla çıplak arazilerin, yüzeysel

akış değerlerinin ve havza eğiminin sediment verimine doğrudan katkısı olmakla birlikte tarımsal alanların ve düz yerleşimlerin sediment verimini azaltacak yönde etkisi olduğu söylenebilir.

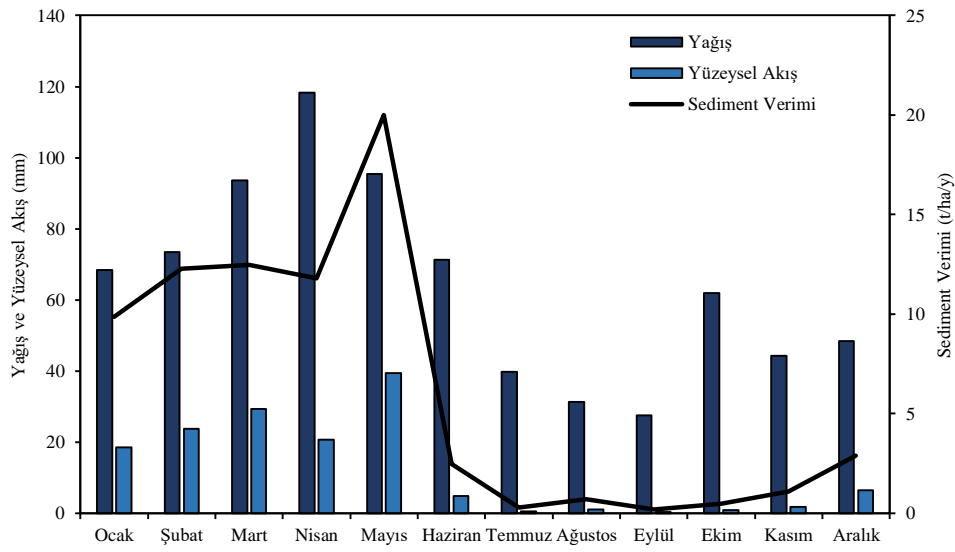


Şekil 6.24. Aylık ortalama sediment verimi miktarları



Şekil 6.25. Aylık ortalama sediment verimi değerlerinin havza üzerinde dağılımı

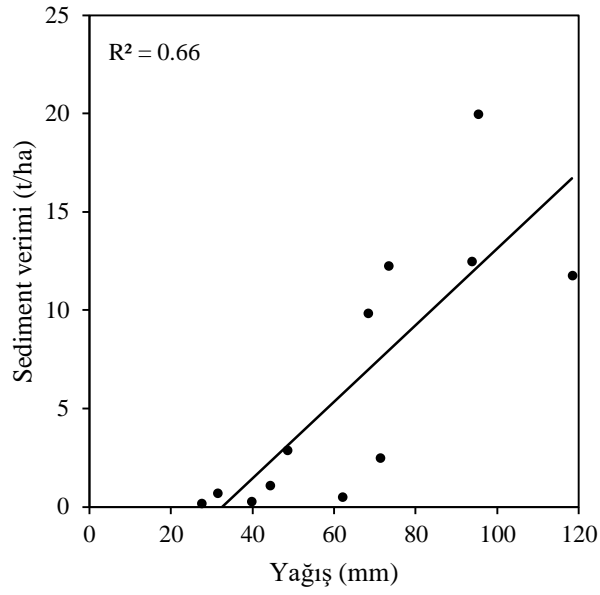
Sediment verimini yağış ve yüzeysel akış değerleri doğrudan etkilemektedir. Şekil 6.26’da yüzeysel akış ve yağış değerleri ile sediment veriminin aylık bazda nasıl değiştiğini gösteren grafik verilmiştir. En yüksek yağış ve yüzeysel akış değerleri Mart, Nisan ve Mayıs aylarında gerçekleşirken, bu aylarda sediment veriminde yüksek değerlerde olduğu gözlenmektedir. Bununla beraber, görülmektedir ki artan yüzeysel akış değerleri ile sediment veriminde doğrusal bir ilişki olmasına karşın bu ilişki tam olarak yağış için geçerli değildir. Örneğin Mart ayında gerçekleşen 93.71 mm yağışa karşılık 12.49 t/ha/y sediment verimi gerçekleşirken daha fazla yağışın gerçekleştiği Nisan (118.36 mm) ayında daha az sediment verimi (11.79 t/ha/y) gerçekleşmiştir.



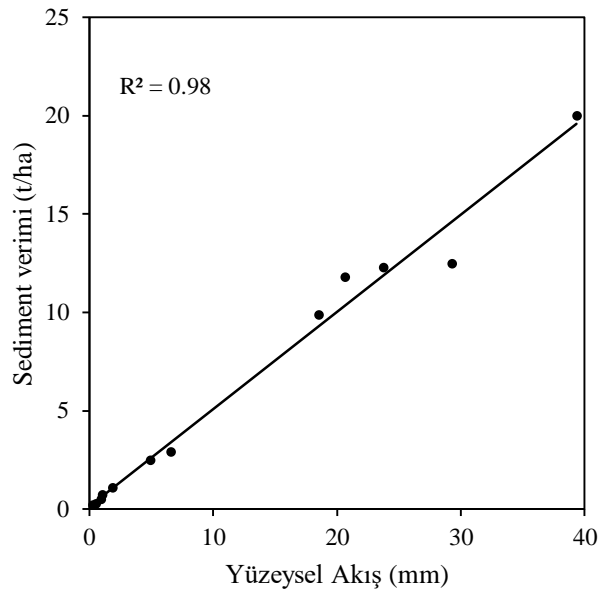
Şekil 6.26. Yağış, yüzeysel akış ve sediment verimi arasındaki ilişki

Şekil 6.26’den da görüldüğü gibi yüzeysel akış sediment verimi için önemli faktördür. En yüksek yüzeysel akış değeri 139 ve 137 nolu alt havzalarda 46.11 mm ve 46.08 mm değerleri ile elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 6.17 ve Şekil 6.25’ten de görüleceği üzere yüzeysel akışın yüksek olduğu bölgelerde sediment veriminin de yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Yağışlar, havza üzerindeki hidrolojik parametrelerin oluşabilmesi için başlangıç parametresi olarak görülebilir ve bu nedenle her türlü hidrolojik parametreye doğrudan veya dolaylı yollarla etki edebilmektedir. Yağışların ve yüzeysel akışın sediment verimini ne denli etkilediğini ve aralarındaki ilişkiyi inceleyebilmek için aylık ortalama sediment verimi ile yağışlar arasında korelasyon analizi yapılmış ve yağış için  $0.66 R^2$  ve yüzeysel akış için  $0.98 R^2$  değeri elde edilmiştir (Şekil 6.27 - 6.28). Bu sonuçlardan çıkarımla yüzeysel akışın sediment verimi üzerinde yağışlardan daha fazla etkiye sahip olduğu söylenebilmektedir.



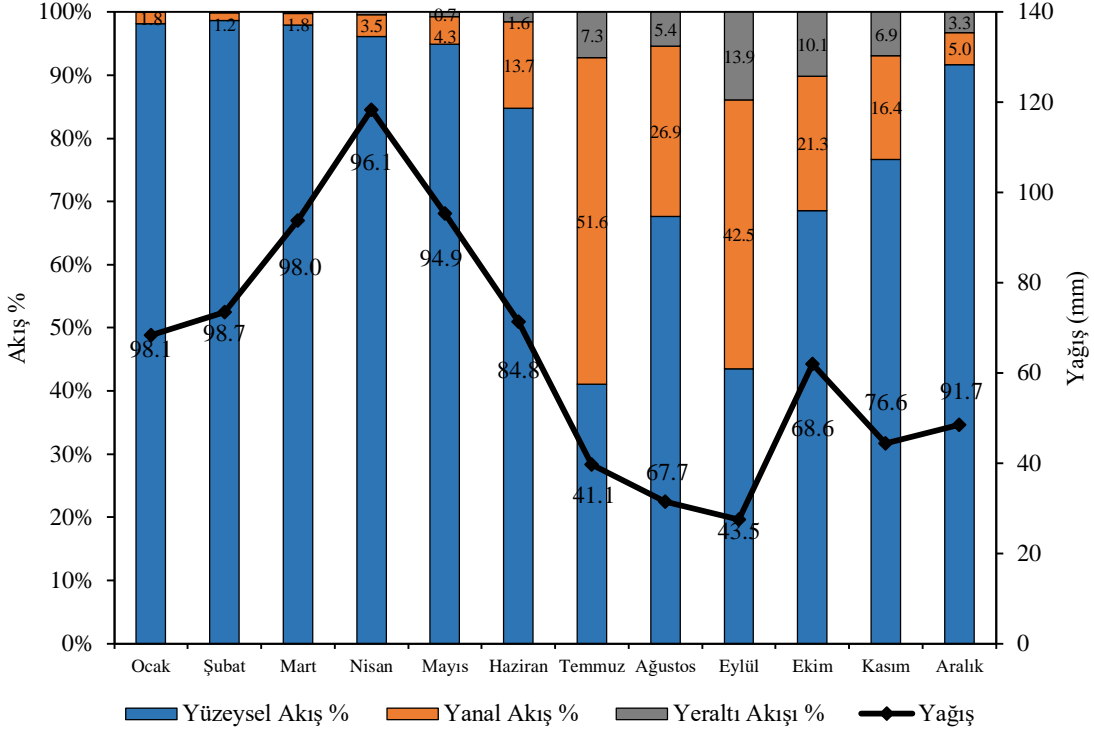
**Şekil 6.27.** Yağış ve sediment verimi arasındaki ilişki



**Şekil 6.28.** Yüzeysel akış ve sediment verimi arasındaki ilişki

Ayrıca havza üzerine gelen yağışın hangi oranlarda farklı akışlar olarak dağıldığını bilmek havza hidrolojik yapısı hakkında yorum yapmamıza olanak sağlamaktadır. Şekil 6.29’da aylık ortalama yağışların hangi oranlarda yüzeysel akışa, yeraltı taban akışına ve yanal akışa dönüştüğü ile ilgili grafik verilmiştir. Ocak, Şubat ve Mart aylarında yüzeysel akış toplam akışların yaklaşık olarak %98’ini oluştururken bu değer Temmuz ayında %41.1 ile minimum orana inmiştir. Yüzeysel akışın en yüksek oranda olduğu Ocak, Şubat ve Mart aylarında yanal akış minimum olmakta,

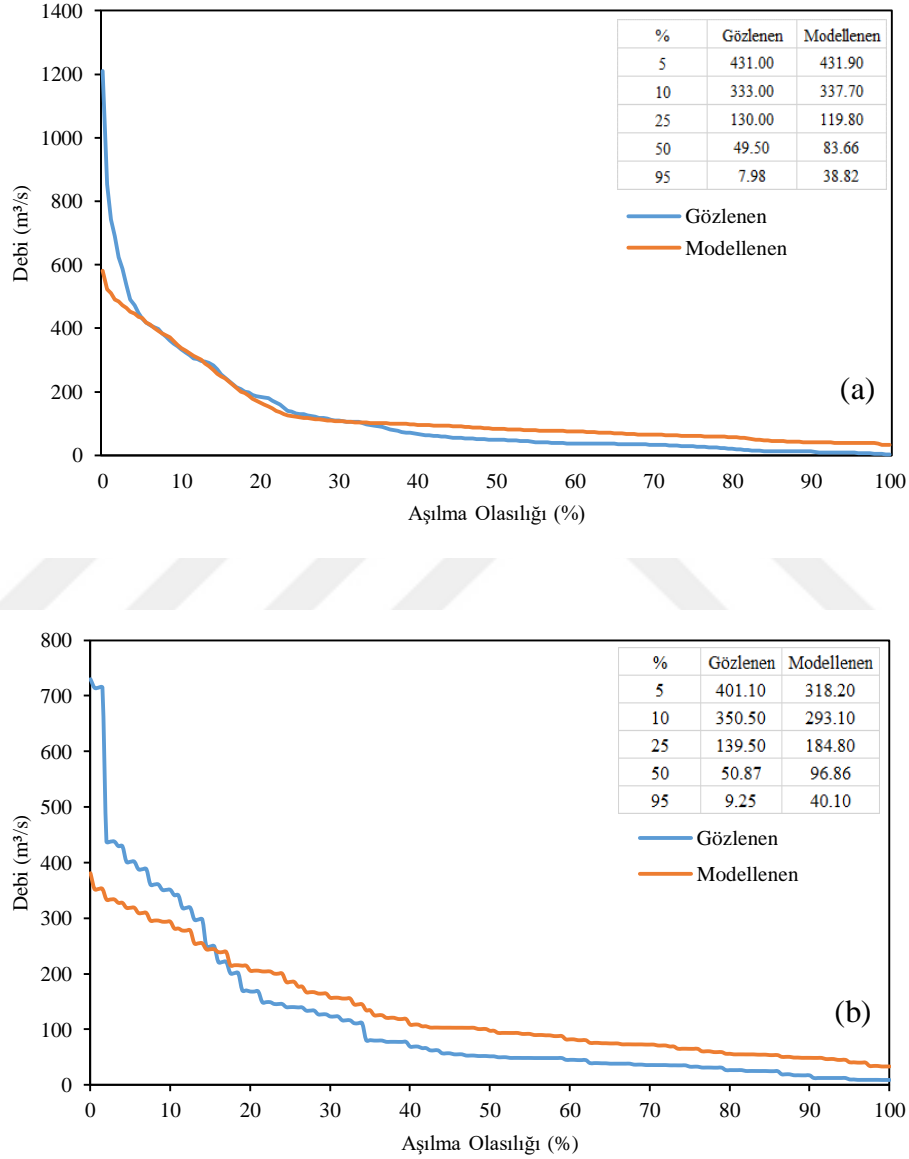
Temmuz ayında ise %51.6 ile maksimum oranda görülmektedir. Bunun sebebinin bahar aylarında yüksek oranda oluşan yağışlar ve kar erimesi ile doymuş toprağın yanıl akış şeklinde hareketine devam etmesi olarak görülebilir. Bunun yanında, doymuş toprakla beraber Eylül ayında yeraltı akışına geçen oran %13.9 ile de maksimum seviyesinde gözlenmiştir.



Şekil 6.29. Yağış ve akışların dağılımları

Havzanın hidrolojik açıdan değerlendirilmesi için kullanılan bir diğer parametre debi süreklilik çizgisidir. Debi süreklilik çizgisi, belirli bir süre boyunca belirtilen debinin eşitlendiği veya aşıldığı zamanın yüzdesini gösteren kümülatif bir frekans eğrisidir (Searcy, 1959). Başka bir deyişle, belirlenen periyot boyunca belirli debi değerlerinin aşılma ve görülme yüzdelerini belirten eğriye denmektedir. Taşkın planlama, su temini ve hidroelektrik santralleri planlama gibi işlemlerde debi süreklilik eğrisi kullanılmaktadır. Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'de havza üzerinde ölçümleri alınan ve modellenen iki istasyon verilerinin günlük ve aylık debi süreklilik eğrileri çizilmiştir. E21A074 istasyonu için günlük ve aylık zaman diliminde oluşturulan debi süreklilik çizgilerinde görüldüğü üzere, pik debilerde gözlem ve model sonuçları arasında farklılıklar görülse de genel olarak eğriler birbirine yakın sonuçlar göstermiştir. Özellikle günlük zaman dilimi için oluşturulan egride aşılma olasılığı %5 ile %35 arasında kalan kısımda model ve gözlem değerleri birbirine çok yakın değerler üretmiştir. Örneğin E21A074 istasyonunda alınan ölçüm sonuçlarına göre zamanın %5, %10 ve %25'inde geçen akım değeri sırasıyla 431.0 m<sup>3</sup>/s 333.0 m<sup>3</sup>/s, 130.0 m<sup>3</sup>/s

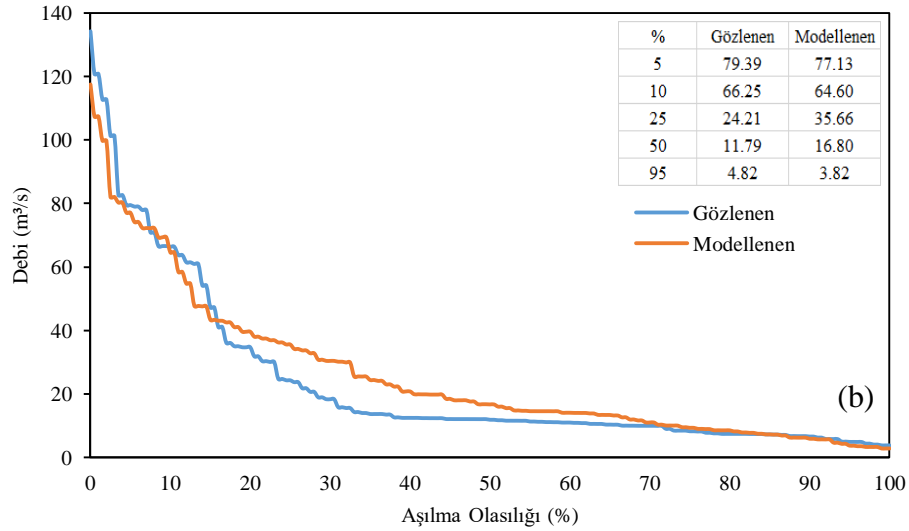
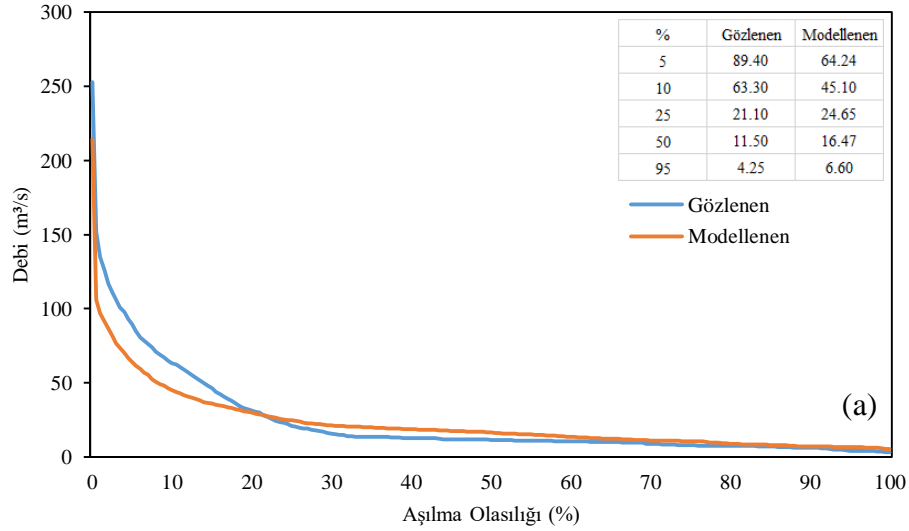
olurken bu değer SWAT modeli sonucuna göre 431.90 m<sup>3</sup>/s, 337.70 m<sup>3</sup>/s ve 119.80 m<sup>3</sup>/s olarak bulunmuştur. Aşılma olasılığı %40'ın üstünde kalan debilerde gözlem ve model sonuçları arasında kısmi farklar gözlenmiştir ve %95'in üstünde kalan debilerde gözlem sonucuna göre debi günlük ve aylık akım sonuçlarına göre sırasıyla 7.98 m<sup>3</sup>/s ve 9.25 m<sup>3</sup>/s olurken model sonucuna göre 38.82 m<sup>3</sup>/s ve 40.10 m<sup>3</sup>/s olarak bulunmuştur.



şekil 6.30. E21A074 istasyonu için (a) günlük ve (b) aylık debi süreklilik eğrisi

E21A077 istasyonu için oluşturulan günlük ve aylık debi süreklilik eğrilerinde model ve gözlem eğrileri de birbiriyle uyumlu sonuçlar üretmiştir. Günlük zaman ölçeğinde aşılma olasılığı %5 ile %20, aylık zaman ölçeğinde aşılma olasılığı %20 ile %70 arasında kısmi farklar görülse de genel olarak birbirine yakın çizgiler elde edilmiştir. Özellikle düşük ve yüksek akım değerlerinde

sonuçlar orta akımlardan daha yakın sonuçlar üretmiştir. Ayrıca, hidrolik yapıların da güvenilir enerji hesaplamalarında kullanılan aşılma olasılığı %95'in üzerinde kalan akım değerleri (Yalçın, 2020), gözlem sonucuna göre günlük ve aylık akımda sırasıyla 4.25 m<sup>3</sup>/s ve 4.82 m<sup>3</sup>/s olurken bu değer model sonucuna göre 6.60 m<sup>3</sup>/s ve 3.82 m<sup>3</sup>/s olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak oluşturulan debi süreklilik eğrileri sonuçları incelendiğinde de model sonuçlarının kullanılabilirliği her iki istasyon içinde gösterilmiştir.



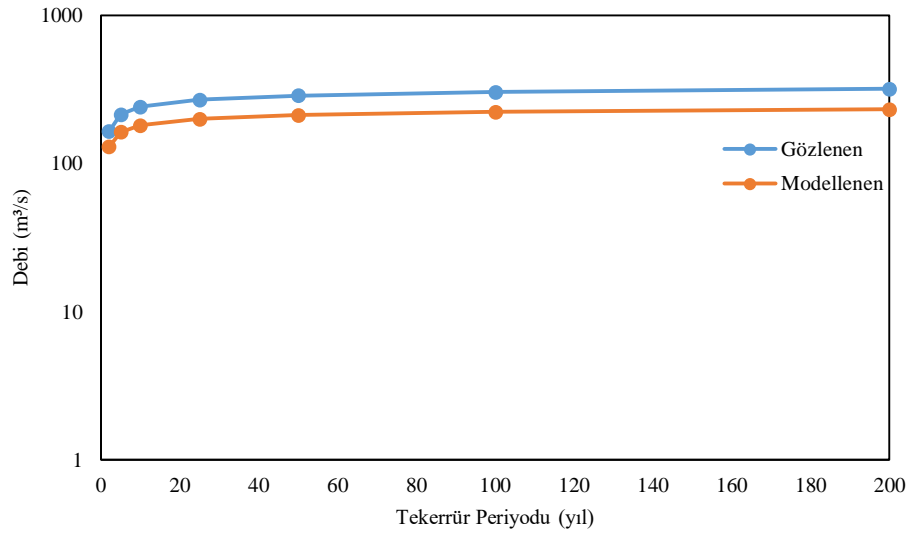
**Şekil 6.31.** E21A077 istasyonu için (a) günlük ve (b) aylık debi süreklilik eğrisi

Havza üzerindeki hidrolik yapıların boyutlandırılması ve planlanması, taşkın yatağındaki risklerin tanımlanması gibi birçok parametre taşkın frekans analizi ile gerçekleştirilmektedir. Taşkın frekans analizi, belirli bir dönüş periyoduna karşılık gelen taşkın debisinin tahmin

edilmesine denir. SWAT modelinden elde edilen akım değerleri ile havza üzerindeki E21A077 ölçüm istasyonundan alınan akım verileri üzerinden taşkın frekans analizi gerçekleştirilmiş ve en uygun dağılım belirlenerek 2, 5, 10, 25, 50, 100 ve 200 yıllık tekerrür debileri hesaplanmıştır. SWAT modelinden elde edilen akım değerleri ile ölçüm istasyonundan alınan akım verilerinin tekerrür debilerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu sebeple model için 2006-2013 yılları arası yıllık maksimum günlük akım değerleri kullanılmıştır. Mevcut bulunan 8 yıllık akım değerleri frekans analizi için kısa bir periyot olsa da model ve gözlem sonuçlarını karşılaştırabilmek için değerlendirmeye alınmıştır. EasyFit 5.5 paket programında gerçekleştirilen E21A077 numaralı istasyon için model ve gözlenen yıllık maksimum günlük akım değerlerine Normal dağılımın en uygun dağılım olduğu gözlenmiştir. Bu dağılımın fonksiyonları kullanılarak gözlem ve model sonuçları için elde edilmiş 2, 5, 10, 25, 50, 100 ve 200 yıllık tekerrür periyodu debileri Tablo 6.10'da verilmiştir. Gözlem ve model değerlerinden elde edilen tekerrür debilerinin grafik gösterimi Şekil 6.32'de verilmiştir. Gözlenen ve modellenen tekerrür debileri arasındaki fark oranının ortalama %25 olmasına karşın yıllık maksimum günlük akışlarının karşılaştırılması sonucu elde edilen korelasyon değeri,  $r=-0.62$ , olarak bulunmuştur.

**Tablo 6.10.** Gözlem ve Model sonuçlarının tekerrür debileri

Tekerrür Periyodu	Debi	
	Gözlenen (m <sup>3</sup> /s)	Modellenen (m <sup>3</sup> /s)
2	164.12	129.35
5	214.47	162.94
10	240.79	180.50
25	268.86	199.22
50	286.99	211.31
100	303.30	222.19
200	318.22	232.15



**Şekil 6.32.** Yıllık maksimum günlük akımların gözlem ve SWAT modeli sonuçlarının en uygun dağılım fonksiyonlarına göre hesaplanmış taşkın tekerrür debilerinin karşılaştırması

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Havza üzerinde meydana gelen hidrolojik parametrelerin doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi; havza yönetim uygulamaları, su yapılarının tasarımı ve planlaması gibi faktörler açısından büyük önem taşımaktadır. Fakat bazı havzaların karlı ve dağlık yapısı akım ve sediment ölçümleri gibi parametrelerin düzenli periyotlarla ve doğru bir şekilde alınmasını güçleştirmektedir. Bu sebeple, bu tez çalışmasında ülkemizin en büyük ve en yüksek su potansiyeline sahip havzası olan Fırat-Dicle havzasının üst tarafında bulunan, Murat Nehri havzası olarak adlandırılan, havzada akım ve sediment tahmini yapılmıştır. Fiziksel tabanlı hidrolojik bir model olan SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeli Murat Nehri havzasında akım ve sediment tahmini yapmak için kullanılmıştır. Havza üzerinde bulunan E21A074 ve E21A077 numaralı ölçüm istasyonlarından alınan akım ve sediment verileri modelin kullanılabilirliğini test etmek amacıyla kullanılmıştır. Hassasiyet, kalibrasyon, doğrulama ve belirsizlik analizleri SWAT-CUP programı ile gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan SWAT modeli, aylık zaman ölçeğinde her iki istasyon sonuçları için akım ve sediment modellemesi ve günlük zaman ölçeğinde yine her iki istasyon için akım modellemesi elde etmek için geliştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle, havzanın akım ve sediment değerlerine etki eden en hassas parametrelerin bulunması amaçlanmıştır. Latin Hypercube and One-factor At-a-Time (LH-OAT) tekniği kullanılarak hassas parametreler elde edilmiş ve belirlenen hassas parametreler ile kalibrasyon ve doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen model sonuçlarının performanslarının değerlendirilmesi amacıyla NSE,  $R^2$  ve PBIAS gibi istatistiksel metotlar kullanılmıştır. E21A074 istasyonu için günlük ve aylık akım tahmin sonuçlarının istatistiksel performans değerlendirme kriterlerine göre kalibrasyon ve doğrulama periyotları boyunca NSE, 0.50-0.57 arasında,  $R^2$ , 0.53-0.57 arasında ve PBIAS değerleri -15 ile 15.6 arasında değişiklik göstermiştir. E21A077 istasyonu için ise aynı kriterler NSE için 0.45-0.77 arasında,  $R^2$ , 0.46-0.78 arasında ve PBIAS değerleri -6.6 ile 7.7 arasında elde edilmiştir. Aylık sediment modelleme sonuçlarının ve E21A074, E21A077 istasyonlarında elde edilen sonuçlarının performans ölçütlerine göre karşılaştırılmasıyla elde edilen NSE değerleri sırasıyla, 0.54-0.79 ve 0.35-0.62 arasında;  $R^2$ , 0.67-0.68 ve 0.56-0.68 arasında ve PBIAS değerleri 4.6 ile -33.8 ve -3.2 ile -77.2 arasında elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre SWAT modelinin Murat Nehri havzasında akım ve sediment tahmininde yeterli düzeyde sonuçlar ürettiği ve havza için kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

SWAT modelinden elde edilen toprak kayıpları verileri havzada oluşturulan her bir alt havza ölçeğinde belirlenmiş ve haritalandırılmıştır. Ayrıca sediment verimi, yağış, yüzeysel akış, kar erimesi ve evapotranspirasyon gibi hidrolojik parametreler ve arazi kullanım durumu, toprak cinsi ve havza eğimi gibi parametreler de analiz edilerek alt havza ölçeğinde haritalandırılmış ve çalışma alanının hidrolojik yorumlanmasına olanak sağlamıştır. Genel olarak yüzeysel akışın ve eğimin

yüksek olduğu alt havzalarda sediment veriminin de yüksek oranlarda olduğu gözlenmiştir. Çalışma alanında gerçekleşen en yüksek yağış, yüzeysel akış, kar erimesi ve bu parametreler ile doğrudan bağlantısı bulunan sediment veriminin Mart, Nisan ve Mayıs aylarında gözlemlendiği görülmüştür.

Elde edilen diğer bir sonuçlara göre toplam havza alanının yaklaşık olarak yarısının (%47.43) arazi kullanım durumunun mera olduğu ve bu alanlarında %11'inin şiddetli ve %27' sinin çok şiddetli erozyon sınıfında olduğu görülmüştür. Bununla beraber çıplak arazi kullanımında olan alanların ise %48'sinin çok şiddetli %13'ünün ise şiddetli erozyon altında olduğu gözlenmiştir. Ayrıca havzada eğimin %25'ten fazla olduğu bölgelerde meydana gelen erozyonun da %63'ünün çok şiddetli ve %28'inin şiddetli erozyon sınıfında olduğu görülmüştür. Hidrolojik parametrelerin her bir alt havza ölçeğinde değerlendirilmesi neticesinde özellikle 65-66-74-75-76-137 ve 139 numaralı alt havzalarda yüksek oranda yağış, yüzeysel akış, erozyon değerlerinin gözlenmesi havza yönetim ve toprak koruma uygulamalarının bu alt havzalarda önceliklendirilmesine yol göstermiştir.

Veri eksikliği ve belirsizliğine rağmen SWAT modeli Murat Nehri havzasında havza yönetim uygulamaları ve su kaynakları yapılarının projelendirilmesi için gerekli olan akım ve sediment tahminlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir. Ayrıca modelden elde edilen erozyon ve diğer hidrolojik parametrelerin alt havzalar ölçeğinde belirlenmesi ve haritalandırılması Murat Nehri havzasında gerçekleştirilecek su kaynakları yönetimine ve toprak koruma uygulamalarına rehberlik edecektir.

Bundan sonraki çalışmalara öneri olarak oluşturulacak modelin daha uzun zaman serileri ve daha fazla sayıda ölçüm istasyonu verileri ile oluşturulması modelin havzayı daha iyi temsil etmesine olanak sağlayabilecektir. Bununla beraber, çalışma alanında, akarsular tarafından yüksek miktarda sediment taşınımının olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple SWAT modeli ile yapılabilecek su kalitesi çalışmaları da önemli olabilecektir.

## KAYNAKLAR

- Abbaspour, K. C. (2015). SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. *Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00402-009-1032-4>
- Abbaspour, K. C. (2022). The fallacy in the use of the “best-fit” solution in hydrologic modeling. *Science of the Total Environment*, 802, 149713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149713>
- Abbaspour, K.C., Vejdani, M., & Haghghat, S. (2007). SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT. *In Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07)*, 1603–1609.
- Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., & Srinivasan, R. (2017). A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. *Water (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*.
- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W.N.A., Jamil, N. R. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 1577–1605. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0509-y>
- Ağaçsapan, B. (2021). *İklim Değişiklikleri Ve Arazi Örtüsü Değişiminin Hidrolojik Parametrelere Etkisinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Destekli Analizi: Porsuk Havzası Örnelemi*. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., Kato, T. (2021). A review of swat model application in africa. *Water (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/w13091313>
- Al-Mukhtar, M. (2018). Integrated approach to forecast future suspended sediment load by means of SWAT and artificial intelligence models, a case study. *FOG - Freiberg Online Geoscience*, 51(June), 52–77
- Alemayehu, D., Srinivasan, R., Daggupati, P. (2014). Application of soil and water assessment tool model to estimate sediment yield in Kaw Lake. *American Journal of Environmental Sciences*, 10(6), 530–545. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2014.530.545>
- Alipour, M., & Hosseini, M. (2018). Simulation of surface runoff in Karaj dam basin, Iran. *Applied Water Science*, 8(5), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0782-y>
- Ang, R., Oeurng, C. (2018). Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Science*, 32(1), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.002>
- Arnold, J. G., Srinivisan R., Muttiah, R.S., Williams, J. (1998). Large Area Hydrological Modeling And Assessment Part I: Model Development. *Journal of American Water Resoruces Association*, 34(1), 73–89. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(00\)00483-4](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(00)00483-4)
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D., Sammons, N. B. (1990). SWRRB- A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management. *Texas A&M Press, College Station, TX*
- Ayele, G. T., Teshale, E. Z., Yu, B., Rutherford, I. D., Jeong, J. (2017). Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia. *Water (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/w9100782>
- Ayivi, F., Jha, M. K. (2018). Estimation of water balance and water yield in the Reedy Fork-Buffalo Creek Watershed in North Carolina using SWAT. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(3), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.007>
- Bayazit, M. (2013). *Hidroloji*. Birsen Yayınevi. İstanbul
- Bayazit, M., Avcı, İ. (2010). *Akarsularda Akım ve Sediment Taşınımı*. Birsen Yayınevi. İstanbul
- Beasley, D. B., Huggins, L. F., Monke, E. J. (1980). ANSWERS: A Model for Watershed Planning.

- Transactions of the ASAE*, 23(4), 938–0944. <https://doi.org/10.13031/2013.34692>
- Bergström, S. (1976). In *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*. SMHI Norrköping, Report RH07.
- Beskow, S., Mello, C. R., Norton, L. D., Curi, N., Viola, M. R., Avanzi, J. C. (2009). Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, 79(1), 49–59. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2009.05.010>
- Bouslihim, Y. (2020). *Hydrological and soil erosion modeling using SWAT model and Pedotransfert Functions: a case study of Settat-Ben Ahmed watersheds, Morocco*. Université Hassan Ier Settat
- Briak, H., Moussadek, R., Aboumaria, K., & Mrabet, R. (2016). Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.002>
- Cambazoğlu, K., Göğüş, M. (2004). Sediment Yields of Basins in the Western Black Sea Region of Turkey. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 28, 355–367.
- CEM. (2018). DEMİS Türkiye Su Erozyonu İstatistikleri, Teknik Özet. *Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, Türkiye*.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W., Ven Te Chow, David R. Maidment, L. W. M. (1998). *Applied Hydrology Chow 1988.pdf* (pp. 1–294). [http://ponce.sdsu.edu/Applied\\_Hydrology\\_Chow\\_1988.pdf](http://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf)
- Cuceloglu, G., Ozturk, I. (2019). Assessing the Impact of CFSR and Local Climate Datasets on Hydrological Modeling Performance in the Mountainous Black Sea Catchment. *Water*, 11(2277)
- Daramola, J., Ekhwan, T. M., Mokhtar, J., Lam, K. C., Adeogun, G. A. (2019). Estimating sediment yield at Kaduna watershed, Nigeria using soil and water assessment tool (SWAT) model. *Heliyon*, 5(7), e02106. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02106>
- Demirel, M. C., Venancio, A., Kahya, E. (2009). Flow forecast by SWAT model and ANN in Pracana basin, Portugal. *Advances in Engineering Software*, 40(7), 467–473. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.08.002>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/J.AQPRO.2015.02.126>
- Duru, U. (2015). *Modeling Sediment Yield and Deposition Using the Swat Model : A Case Study Of Cubuk I And Cubuk II Reservoirs, Turkey*. Colorado State University.
- Duru, U., Arabi, M., Wohl, E. E. (2018). Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey. *Physical Geography*, 39(3), 264–289. <https://doi.org/10.1080/02723646.2017.1342199>
- Dutta, S. (2016). Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir: a review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0182-y>
- Dutta, Subhasri, Sen, D. (2018). Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield. *Sustainable Water Resources Management*, 4(3), 447–468. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0127-2>
- Efe, R., Ekinci, D., Cürebal, I. (2008). Erosion analysis of Şahin creek watershed (NW of Turkey) using GIS based on Rusle (3d) method. *Journal of Applied Sciences*, 8(1), 49–58. <https://doi.org/10.3923/JAS.2008.49.58>
- Elbaşı, E. (2018). *Marmara Denizi Akarsu Havzalarının Morfometrik Analizi* (Issue 36). İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü
- Erdogan, E. H. (2013). *Dünya Toprak Kaynakları Referans Sistemi, Uluslararası Sınıflandırma, İlişkilendirme ve İletişim için Bir Çerçeve, FAO -Dünya Toprak Kaynakları Raporu No:103 (Çeviri)*.
- Ezz-Aldeen, M., Hassan, R., Ali, A., Al-Ansari, N., Knutsson, S. (2018). Watershed sediment and its effect on storage capacity: Case study of Dokan Dam Reservoir. *Water (Switzerland)*, 10(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w10070858>
- Feldman, A. D. (1981). Hec Models for Water Resources System Simulation: Theory and Experience. *Advances in Hydroscience*, 12, 297–423. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-021812-7.50010-9>

- Fereidoon, M., Koch, M. (2017). SWAT-modeling of the effects of the construction of a dam on streamflow in the Karkheh basin, Iran. *Journal of Thai Interdisciplinary Research*, 12(4), 79–86. <https://doi.org/10.14456/jtir.2017.32>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., Arnold, J. G. (2007). The Soil And Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, And Future Research Directions Invited Review Series. *Asabe*, 50(4), 1211–1250
- Gitau, M. W., Chaubey, I. (2010). Regionalization of SWAT model parameters for use in ungauged watersheds. *Water (Switzerland)*, 2(4), 849–871. <https://doi.org/10.3390/w2040849>
- Green, W., Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Güngör, Ö. (2018). *Swat Modeli Kullanılarak Filyos Çayı Havzası'nın Hidrolojik Analizi*. Bulent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Güngör, Ömer, Göncü, S. (2013). Application of the soil and water assessment tool model on the Lower Porsuk Stream Watershed. *Hydrological Processes*, 27(3), 453–466. <https://doi.org/10.1002/hyp.9228>
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Halley, M. C., White, S. O., Watkins, E. W. (2000). ArcView GIS extension for estimating curve numbers. *ESRI User Conference*
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Alirahmani, S., Keddar, A. (2018). Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). *Water Science*, 32(1), 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.004>
- Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hoang, L., Griensven, A. Van, Brussel, V. U., Keur, P. Van Der, Refsgaard, J. C. (2014). *Comparison and Evaluation of Model Structures for the Simulation of Pollution Fluxes in a Tile- Drained River Basin*. January 2016. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0398>
- Imamoglu, A., Dengiz, O. (2017). Determination of soil erosion risk using RUSLE model and soil organic carbon loss in Alaca catchment (Central Black Sea region, Turkey). *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 28, 11–23. <https://doi.org/10.1007/s12210-016-0556-0>
- Jajarmizadeh, M., Kakaei Lafdani, E., Harun, S., Ahmadi, A. (2015). Application of SVM and SWAT models for monthly streamflow prediction, a case study in South of Iran. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 345–357. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0060-y>
- Juracek, K. E., Stiles, T. C. (2010). The Role Of Reservoir Sediment Studies In The Tmdl Process In Kansas. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2003(4), 1091–1102. <https://doi.org/10.2175/193864703784828273>
- Karakoyun, E., Kaya, N. (2022). Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: a case study of Murat River Basin, Turkey. *Journal of Hydroinformatics*, 24(6), 1175–1193. <https://doi.org/10.2166/HYDRO.2022.056>
- Khalid, C. (2018). Hydrological modeling of the Mikkés watershed (Morocco) using ARCSWAT model. *Sustainable Water Resources Management*, 4(1), 105–115. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0145-0>
- Knisel, W. G. (1980). CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. *USDA Conservation Research Report*, 26(1), 36–64.
- Köle, M. M. (2016). Devrez Çayı Vadisinin Tektonik Özelliklerinin Morfometrik İndisler ile Araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Dergisi*, 33, 21–36.
- Koltsida, E., Mamassis, N., Kallioras, A. (2021). Hydrological modeling using the SWAT Model in urban and peri-urban environments: The case of Kifissos experimental sub-basin (Athens, Greece). *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-482>

- Krysanova, V., Arnold, J. G. (2008). Advances in ecohydrological modelling with SWAT-a review. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5), 939–947. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.939>
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., Still, D. A. (1987). GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1403–1418. <https://doi.org/10.13031/2013.30578>
- Luo, Y., Arnold, J., Liu, S., Wang, X., Chen, X. (2013). Inclusion of glacier processes for distributed hydrological modeling at basin scale with application to a watershed in Tianshan Mountains, northwest China. *Journal of Hydrology*, 477, 72–85. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.11.005>
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design, 2nd ed* (2nd ed.). Prentice Hall
- Metcalf, Eddy. (1971). *Storm Water Management Model, Volume IV - Program Listing*, "EPA Report 11024 DOC 10/71 (NTIS PB-203292), U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and Environment In: The state and movement of water in living organism. *Proceedings of the Society for Experimental Biology, Symposium No. 19*, 205–234
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mosbahi, M., Benabdallah, S., Boussema, M. R. (2013). Assessment of soil erosion risk using SWAT model. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10), 4011–4019. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0658-7>
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. L, Arnold, J. G, Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2009). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 1–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*
- Noori, N., Kalin, L. (2016). Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 533, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.050>
- Omani, N., Srinivasan, R., Karthikeyan, R., Smith, P. K. (2017). Hydrological modeling of highly glacierized basins (Andes, Alps, and Central Asia). *Water (Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/w9020111>
- Ouyang, D., Bartholic, J. (1997). Predicting sediment delivery ratio in Saginaw Bay watershed. *22nd National Association of Environ-Mental Professionals Conference Proceedings*, 659–671
- Panda, C., Das, D. M., Raul, S. K., Sahoo, B. C. (2021). Sediment yield prediction and prioritization of sub-watersheds in the Upper Subarnarekha basin (India) using SWAT. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07170-8>
- Parajuli, P. B. (2022). Assessment of Best Management Practices on Hydrology and Sediment Yield at Watershed Scale in Mississippi Using SWAT. *Agriculture*, 12(518). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture12040518> Academic
- Park, Y. S., Engel, B. A. (2016). Identifying the correlation between water quality data and LOADEST model behavior in annual sediment load Estimations. *Water (Switzerland)*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/w8090368>
- Pott, C. A., Fohrer, N. (2017). Hydrological modeling in a rural catchment in Germany. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science*, 10(1), 7–16. <https://doi.org/10.5935/paet.v10.n01.01>
- Pradhanang, S. M., Anandhi, A., Mukundan, R., Zion, M. S., Pierson, D. C., Schneiderman, E. M., Matonse, A., Frei, A. (2011). Application of SWAT model to assess snowpack development and streamflow in the Cannonsville watershed, New York, USA. *Hydrological Processes*, 25(21), 3268–3277. <https://doi.org/10.1002/HYP.8171>
- Priestly, C. H. B., Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)

- Refsgaard, J. C., Storm, B. (1995). *Computer models of watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch. Water Resources Publications
- Ritchie, J. C., Walling, D. E., Peters, J. (2003). Application of geographic information systems and remote sensing for quantifying patterns of erosion and water quality. *Hydrological Processes*, 17(5), 885–886. <https://doi.org/10.1002/HYP.1167>
- Saral, A. (2010). *Çok Kriterli Karar Verme Ve Bilgi Difüzyonu Yöntemleri Yardimiyla, Taşkın Risk Analizi Yaziliminin Gerçekleştirilmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü
- SCS. (1972). *Section 4: Hydrology In National Engineering Handbook*. SCS. [https://books.google.com.tr/books/about/SCS\\_National\\_Engineering\\_Handbook\\_Sectio.html?id=sjOEf-5zjXgC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.tr/books/about/SCS_National_Engineering_Handbook_Sectio.html?id=sjOEf-5zjXgC&redir_esc=y)
- Searcy, J. (1959). *Flow-Duration Curves Manual of Hydrology:Part 2. Low-Flow Techniques*.
- Setegn, S. G., Dargahi, B., Srinivasan, R., Melesse, A. M. (2010). Modeling of Sediment Yield From Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model<sup>1</sup>. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 514–526. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00431.x>
- Singh, V. P., Woolhiser, D. A. (2003). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers*, 345–367. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270))
- Sisay, E., Halefom, A., Khare, D., Singh, L., Worku, T. (2017). Hydrological modelling of ungauged urban watershed using SWAT model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(2), 693–702. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0328-6>
- Sohoulane Djebou, D. C. (2018). Assessment of sediment inflow to a reservoir using the SWAT model under undammed conditions: A case study for the Somerville reservoir, Texas, USA. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(3), 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.003>
- Strahler, A. N. (1952). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38, 913–920. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Tesema, T. A., Leta, O. T. (2020). Sediment Yield Estimation and Effect of Management Options on Sediment Yield of Kesem Dam Watershed, Awash Basin, Ethiopia. *Scientific African*, 9, e00425. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00425>
- Van Liew, M. W., Mittelstet, A. R. (2018). Comparison of three regionalization techniques for predicting streamflow in ungaged watersheds in nebraska, USA using SWAT model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 110–119. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3528>
- Vilaysane, B., Takara, K., Luo, P., Akkharath, I., Duan, W. (2015). Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28(Sustain 2014), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.047>
- Walling, D. E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65(1–3), 209–237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Wang, G., Jager, H. I., Baskaran, L. M., Baker, T. F., Brandt, C. C. (2016). SWAT Modeling of Water Quantity and Quality in the Tennessee River Basin: Spatiotemporal Calibration and Validation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2016(January). <https://doi.org/10.5194/hess-2016-34>
- Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., Green, C. H. (2008). History of model development at Temple, Texas. *Hydrological Sciences-Journal-Des Sciences Hydrologiques*, 53(5), 948–960. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.948>
- Williams, J. R., Jones, C. A., Dyke, P. T. (1984). A Modeling Approach to Determining the Relationship Between Erosion and Soil Productivity. *Transactions of the ASAE*, 27(1), 129–0144. <https://doi.org/10.13031/2013.32748>
- Wu, Y., Chen, J. (2012). Modeling of soil erosion and sediment transport in the East River Basin in southern China. *Science of The Total Environment*, 441, 159–168.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.09.057>

- Yalçın, E. (2020). Karlı Dağlık Bir Havzada Günlük ve Aylık Akım Değerlerinin SWAT Modeliyle Değerlendirilmesi : Bitlis Çayı Havzası Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 651-671
- Yang, X., Liu, Q., He, Y., Luo, X., Zhang, X. (2016). Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(3), 959–972. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1099-0>
- Yıldırım, S. (2018). *Borçka Barajı Havzasında Su Rejimi, Su Kalitesi ve Sediment Veriminin SWAT Kullanarak Belirlenmesi ve Modellenmesi*. Artvin Çoruh Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Zare, M., Panagopoulos, T., Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy*, 67, 558–572. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2017.06.028>
- Zhang, Z., Sheng, L., Yang, J., Chen, X. A., Kong, L., Wagan, B. (2015). Effects of Land Use and Slope Gradient on Soil Erosion in a Red Soil Hilly Watershed of Southern China. *Sustainability* 2015, Vol. 7, Pages 14309-14325, 7(10), 14309–14325. <https://doi.org/10.3390/SU71014309>

