T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ARCSWAT VE SUFI-2 ALGORİTMASINI KULLANARAK DEBİ TAHMİNİ: AFGANİSTAN'IN PANJSHİR HAVZASI ÖRNEĞİ

Yüksek Lisans Tezi

Abdul Raheem AKBARI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mesut BARIŞ

İstanbul – 2025

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Abdul Raheem AKBARI

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : ArcSWAT ve SUFI-2 Algoritmasını Kullanarak Debi Tahmini: Afganistan'ın Panjshir Havzası Örneği

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 23.06.2025

Sayfa Sayısı : 84

Tez Danışmanları : 1. Dr. Öğr. Üyesi Mesut BARIŞ

Dizin Terimleri : ArcSWAT, Hidrolojik Modelleme, Panjshir Havzası, SUFI-2 Algoritması, Debi Tahmini.

Türkçe Özet :

Afganistan'da Panjshir alt havzasından elde edilen veriler üzerinden gerçekleştirilen bu çalışmada, yüzey akışının yüksek doğrulukla tahmini amacıyla ArcSWAT modeli kullanılarak, çok istasyonlu ve çok çözünürlüklü bir hidrolojik simülasyon model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, kar erimesine dayalı akım rejimi ve dağlık topoğrafyaya sahip bu karmaşık havzada, SUFI-2 algoritması üzerinden istasyon bazlı kalibrasyon ve validasyon döngüleriyle optimize edilmiştir. Araştırma kapsamında, 2009–2017 yıllarına ait yağış, sıcaklık ve debi verileri derlenmiş; Sayısal Yükseklik Modeli (DEM), Arazi Kullanımı/ Bitki Örtüsü (LULC) ve Toprak sınıfları verileri kullanılarak 28HRU düzeyinde detaylandırılmış modelleme

yapılmıştır. Bulgular, modelin dört akım istasyonunda hem aylık hem günlük zaman adımlarında tatmin edici performans (R^2>0.60, NSE>0.50) sergilediğini; yüzey akışının ise yıllık ortalama yağışın yaklaşık üçte biri kadar gerçekleştiğini göstermiştir. Ayrıca PLAPS ve TLAPS gibi yükseklik tabanlı parametrelerle kar-dinamikli süreçler başarıyla modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise ArcSWAT modelinin Panjshir gibi veri kısıtlı havzalarda dahi fiziksel temelli güvenilir tahminler üretebildiğini ortaya koymuş ve bu çıktılar, bölgesel su yönetimi, taşkın kontrolü ve iklim değişikliğine uyum stratejileri açısından uygulanabilir girdiler sunmuştur.

Dağıtım Listesi **:** 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

Abdul Raheem AKBARI

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ARCSWAT VE SUFI-2 ALGORİTMASINI KULLANARAK DEBİ TAHMİNİ: AFGANİSTAN'IN PANJSHİR HAVZASI ÖRNEĞİ

Yüksek Lisans Tezi

Abdul Raheem AKBARI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mesut BARIŞ

İstanbul – 2025

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Abdul Raheem AKBARI

…/…/2025

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Abdul Raheem AKBARI'ın ArcSWAT ve SUFI-2 Algoritmasını Kullanarak Debi Tahmini: Afganistan'ın Panjshir Havzası Örneği adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ anabilim dalı, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ bilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan *Dr. Öğr. Üyesi Ferruh MAHNAMFAR*

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mesut BARIŞ
(Danışman)

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Yasin PAŞA

ONAY
Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.
…/ …/ 2025

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Afganistan'da Panjshir alt havzasından elde edilen veriler üzerinden gerçekleştirilen bu çalışmada, yüzey akışının yüksek doğrulukla tahmini amacıyla ArcSWAT modeli kullanılarak, çok istasyonlu ve çok çözünürlüklü bir hidrolojik simülasyon model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, kar erimesine dayalı akım rejimi ve dağlık topoğrafyaya sahip bu karmaşık havzada, SUFI-2 algoritması üzerinden istasyon bazlı kalibrasyon ve validasyon döngüleriyle optimize edilmiştir. Araştırma kapsamında, 2009–2017 yıllarına ait yağış, sıcaklık ve debi verileri derlenmiş; Sayısal Yükseklik Modeli (DEM), Arazi Örtüsü (LULC) ve Toprak sınıfları verileri kullanılarak 28HRU düzeyinde detaylandırılmış modelleme yapılmıştır. Bulgular, modelin dört akım istasyonunda hem aylık hem günlük zaman adımlarında tatmin edici performans (R^2>0.60, NSE>0.50) sergilediğini; yüzey akışının ise yıllık ortalama yağışın yaklaşık üçte biri kadar gerçekleştiğini göstermiştir. Ayrıca PLAPS ve TLAPS gibi yükseklik tabanlı parametrelerle kar-dinamikli süreçler başarıyla modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise ArcSWAT modelinin Panjshir gibi veri kısıtlı havzalarda dahi fiziksel temelli güvenilir tahminler üretebildiğini ortaya koymuş ve bu çıktılar, bölgesel su yönetimi, taşkın kontrolü ve iklim değişikliğine uyum stratejileri açısından uygulanabilir girdiler sunmuştur.

Anahtar Kelimeler: ArcSWAT, Hidrolojik Modelleme, Panjshir Havzası, SUFI-2 Algoritması, Debi Tahmini.

SUMMARY

In this study, which was carried out on data obtained from Panjshir Sub-basin in Afghanistan, a multi-station and multi-resolution hydrological simulation model was developed using ArcSWAT model in order to estimate surface runoff with high accuracy. The developed model was optimized with station-based calibration and validation cycles via SUFI-2 algorithm in this complex basin with snowmelt-based flow regime and mountainous topography. Within the scope of the research, precipitation, temperature and flow rate data for the years 2009–2017 were collected; detailed modeling was performed at 28HRU level using Digital Elevation Model (DEM), Land Use Lnad Cover (LULC) and Soil slass data. The findings showed that the model exhibited satisfactory performance (R^2>0.60, NSE>0.50) in both monthly and daily time steps at four flow stations; and surface runoff occurred at approximately one third of the annual mean precipitation. In addition, snow-dynamic processes were successfully modeled with elevation-based parameters such as PLAPS and TLAPS. The results obtained showed that the ArcSWAT model can produce reliable physically based estimates even in data-limited basins such as Panjshir, and these outputs provided applicable inputs for regional water management, flood control and climate change adaptation strategies.

Keywords: ArcSWAT, Hydrological Modeling, Panjshir Basin, SUFI-2 Algorithm, Flow Estimation.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
SUMMARY ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
KISALTMALAR ..... **v**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **vii**
ÖNSÖZ ..... **viii**
GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM
GENEL BİLGİLER

1.1. Hidrolojik Döngü 5
1.2. Kuraklık, Su Kıtlığı ve Su Yönetimi 6
1.3. SWAT Modeli: Yapısı, Parametreleri ve Kullanım Alanları 7
1.4. ArcSWAT Arayüzü 9
1.5. Afganistan'da SWAT Uygulamaları ve Panjshir Havzasının Özellikleri 11
1.6. Önceki Araştırmalar 12

İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL METOD

2.1. Çalışmanı Alanı 26
2.2. Veri Toplama 28
2.2.1. Meteorolojik Veriler 28
2.2.2. Hidrolojik Veriler 29
2.3. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) 29
2.4. Arazi Kullanımı / Bitki Örtüsü (LULC) 31
2.5. Toprak Verileri (SOIL) 32
2.6. SWAT Modeli 33
2.6.1. Modelin Uygulanması 33
2.6.2. Modelleme Süreci ve Zamanlama 34
2.6.3. Alt Havza ve HRU Tanımlamaları 34
2.6.4. Modelleme Performansı ve Devam Eden Süreçler 34
2.6.5. Hidrolojik Döngü 35
2.6.6. SWAT Modelinin Kalibrasyonu ve Validasyonu 37

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
KALİBRASYON VE VALİDASYON SONUÇLARI

3.1. Kalibrasyon ve Validasyon Uygulamaları 41

3.2. Çalışma Havzasındaki Kalibrasyon ve Validasyon İstatistiksel Sonuçları 50
3.3. İstasyon Bazlı Kalibrasyon ve Validasyon Performanslarının $R2$ Katsayısına Göre Değerlendirilmesi 53

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma 57
4.2. Sonuç ve Öneriler 58

KAYNAKÇA 61
EKLER 64
ÖZGEÇMİŞ 68

KISALTMALAR

SWAT	**:**	Toprak ve Su Değerlendirme Aracı
SWAT-CUP	**:**	SWAT Kalibrasyon ve Belirsizlik Programı
DEM	**:**	Sayısal Yükseklik Verisi
LULC	**:**	Arazi Kullanımı/Bitki Örtüsü
SOIL	**:**	Toprak Verisi
SUFI-2	**:**	Sequential Uncertainty Fitting Algorithm, Version 2
R^2	**:**	Determinasyon Katsayısı
RSR	**:**	Kök Ortalama Hata
RCP	**:**	Temsili Konsantrasyon Yolu (Representative Concentration Pathway)
HRU	**:**	Hidrolojik İşlem Birimi
PLAPS	**:**	Yağış Lapse Oranı (Precipitation Lapse Rate)
TLAPS	**:**	Sıcaklık Lapse Oranı (Temperature Lapse Rate)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. SWAT Modeli Yıllık Hidrolojik Su Bütçesi Tablosu (mm/yıl).....35
Tablo 2. Ortalama Aylık Havza Değerleri.....37
Tablo 3. PLAPS ve TLAPS Parametrelerinin Kalibrasyon Çıktıları.....42
Tablo 4. Kalibrasyon Sonrası En İyi Parametre Değerleri (SWAT-CUP Iteration 6, En İyi Simülasyon No: 201, Hedef Fonksiyon: Nash-Sutcliffe = 0.506).....42
Tablo 5. Kalibrasyon Sonrası Seçilen Parametrelerin Değerleri (SWAT-CUP Iteration, En İyi Simülasyon No: 4, Nash-Sutcliffe = 0.587).....43
Tablo 6. Panjshir Alt Havzasına Ait SWAT Modeli Aylık Zaman Adımında Kalibrasyon Performans Göstergeleri (2010–2014).....50
Tablo 7. Panjshir Alt Havzasına Ait SWAT Modeli İçin Aylık Zaman Adımında Validasyon Performans Göstergeleri (2015–2017).....50
Tablo 8. Panjshir Alt Havzasına Ait SWAT Modeli İçin Günlük Zaman Adımında Kalibrasyon Performans Göstergeleri (2010–2014).....52
Tablo 9. Panjshir alt havzasına Ait SWAT Modeli İçin Günlük Zaman Adımında Validasyon Performans Göstergeleri (2015–2017).....52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Afganistan su havzaları: Kabil havzası'nın alt havzaları.....26
Şekil 2. Çalışma alanı, Kabil havzası'nın Panjshir alt havzası.....27
Şekil 3. Panjshir Alt Havzasına Ait Yükseklik Dağılım Haritası 30
Şekil 4. Panjshir Alt Havzasına Ait LULC Veri Seti.....31
Şekil 5. Panjshir Alt Havzasına Ait Toprak Sınıflandırma Haritası 32
Şekil 6. Panjshir alt havzasına Ait ArcSWAT / ArcGIS Model Entegrasyonu.....33
Şekil 7. Yıllık Su Bütçesi Bileşenleri.....36
Şekil 8. SWAT-CUP ve SWAT Modeli Arasındaki Bağlantının Şematik Gösterimi.....39
Şekil 9. SUFI-2 Algoritmasının SWAT Modelini Kalibre Etme Süreci.....40
Şekil 10. Bagh-i Lala İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafiği.....44
Şekil 11. Bagh-i Lala İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafiği.....45
Şekil 12. Pul-i Ashwa İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri.....46
Şekil 13. Pul-i Ashwa İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri 47
Şekil 14. Shokhi İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri.....47
Şekil 15. Shokhi İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri 48
Şekil 16. Tang-i Gulbahar İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri.....48
Şekil 17. Tang-i Gulbahar İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri .49
Şekil 18. Bagh-i Lala Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları ($R2$).....53
Şekil 19. Tang-i Gulbahar Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları ($R2$).....54
Şekil 20. Shokhi Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları ($R2$).....55
Şekil 21. Pul-i Ashwa Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları ($R2$).....56

ÖNSÖZ

Bu araştırmanın temel amacı, Afganistan'ın Panjshir Havzası'nda ArcSWAT modeli kullanılarak yüzey akış tahminlerinin fiziksel temelli hidrolojik modelleme yoluyla incelenmesi ve bölgesel su yönetimi stratejilerine katkı sağlanmasıdır. Veri kısıtlı dağlık havzalarda dahi yüksek doğrulukta debi simülasyonları üretmenin mümkün olduğunu ortaya koyan bu çalışma, iklim değişikliği adaptasyonu ve taşkın kontrolü için kritik veriler sunmayı hedeflemiştir.

Araştırma sürecinde bilimsel rehberliğini esirgemeyen, değerli önerileriyle çalışmama yön veren tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Mesut BARIŞ'a, tez jürimde yer alarak katkı sunan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi YASİN PAŞA ve Dr. Öğr. Üyesi Ferruh Mahnamfar'a, meteorolojik ve hidrolojik veri paylaşımıyla katkıda bulunan Afganistan Meteoroloji Genel Müdürlüğü yetkililerine, bu süreçte sabır ve anlayış gösteren sevgili aileme en derin şükranlarımı sunarım.

GİRİŞ

Araştırmanın Problemi

Afganistan'ın doğusunda yer alan ve hidrolojik açıdan stratejik öneme sahip Panjshir Alt Havzası, yüksek dağlık topoğrafyası, kar erimesi odaklı akım rejimi ve sınırlı hidro-meteorolojik ölçüm altyapısı nedeniyle, bölgesel su yönetimi ve mühendislik planlamaları açısından detaylı biçimde modellenmeye ihtiyaç duyan bir alan olarak öne çıkmaktadır. Bu gereklilik, yalnızca su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı açısından değil, aynı zamanda taşkın kontrolü, tarımsal sulama, hidroelektrik enerji üretimi ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesi bakımından da yaşamsal bir öneme sahiptir. Ancak literatürde Panjshir Alt Havzasını doğrudan ele alan ve SWAT-CUP üzerinden istasyon bazlı kalibrasyon ve validasyon süreçlerini detaylı biçimde yürüten özgün bir modelleme çalışmasının bulunmaması, bu alt havza özelinde bilimsel bir boşluk yaratmaktadır.

Afganistan'ın farklı bölgelerinde yapılan SWAT temelli hidrolojik modelleme çalışmalarında, çoğunlukla Kabul Havzası gibi geniş alanlar üzerinden genel analizler yapılmış; ancak bu yaklaşımlar alt havzaların özgün topo-hidrolojik karakteristiklerini dikkate almamıştır (Bromand, 2015; Tanı, 2020; Ayoubi & Dongshik, 2016). Örneğin Ayoubi & Dongshik (2016) tarafından yapılan çalışmada Panjshir Alt Havzası yüzeysel olarak ele alınmış; kalibrasyon-validasyon süreçleri ise sınırlı sayıda istasyona dayalı yürütülmüştür. Aynı şekilde Hussainzada & Lee (2021) ile Aawar & Khare (2020) gibi araştırmalarda da modelleme çalışmaları daha çok genel su bütçesi tahminlerine odaklanmış, detaylı istasyon analizleri ve alt havza seviyesinde hidrolojik davranış farklılıkları kapsam dışı bırakılmıştır.

Rasouli, Kayatsha, Bhattarai, Shrestha, Arian & Armstrong (2015) tarafından Snowmelt Runoff Model (SRM) kullanılarak yapılan çalışma, karla beslenen havzaların modelleme potansiyelini ortaya koymuşsa da, SWAT gibi daha kapsamlı modellerle karşılaştırıldığında sınırlı fiziksel temsiliyete sahiptir. Diğer yandan Hejran, Dawari, Busty & Sangin (2020), Ougahi, Karim & Mahmood (2022) ve Alawi & Özkul (2023) tarafından SWAT modeli ile gerçekleştirilen çalışmalar, veri yetersizliği altında model performansının optimize edilmesinin mümkün olduğunu göstermiş; ancak bu modellerin büyük çoğunluğu, ArcSWAT–SWAT-CUP

entegrasyonunu derinlemesine işlemeden yürütülmüştür. Taraky (2021) ve Shams, Khan, Haleem & Mahmood (2024) gibi iklim değişikliği ve taşkın analizi odaklı çalışmalarda ise havza bazlı hidropolitik değerlendirmeler ön planda tutulmuş, yerel kalibrasyon hassasiyeti arka planda kalmıştır.

Bu doğrultuda Panjshir Alt Havzasına özgü olarak gerçekleştirilecek, istasyon verilerine dayalı, yüksek çözünürlüklü ve SWAT-CUP üzerinden parametrik duyarlılık analizleri içeren bir modelleme çalışması, hem bölgedeki fiziksel su döngüsünün doğru anlaşılması hem de mühendislik uygulamaları için güvenilir referans veriler üretilmesi bakımından büyük bir gereklilik arz etmektedir. Özellikle SUFI-2 algoritması ile çoklu iteratif kalibrasyon döngülerinin uygulanması, belirsizlik analizlerinin yapılması ve karla kaplı dağlık bölgelerin PLAPS-TLAPS gibi irtifa değişkenleriyle modellenmesi, bu çalışmayı literatürdeki önceki çalışmalardan ayıran temel nitelikler arasında yer almaktadır (Abbaspour et al., 2015; Ayoubi et al., 2024).

Bu çalışmada ele alınan problem, Panjshir Alt Havzasında yerel hidrolojik davranışların doğrulukla temsil edilebileceği, gözlemsel verilerle yüksek uyum sağlayan bir ArcSWAT modeli kurularak, bölgesel mühendislik planlamalarına temel oluşturacak nitelikte fiziksel ve nicel çıktılar üretilmesi gerekliliğidir. Literatürdeki çalışmalarda kalibrasyon-parametrizasyon süreçlerinin çoğunlukla düşük çözünürlükte veya genelleştirilmiş parametre aralıklarıyla yürütüldüğü; kar erimesi ve eğimsel faktörlerin etkilerinin ise yetersiz temsil edildiği görülmektedir (Tanı & Tayfur, 2023; Mujeeb, Safi & Shirzad 2025). Dolayısıyla, Panjshir gibi yüksek rakımlı, veri yoksunu ve hidrolojik olarak hassas bir bölgede, çok boyutlu ve istasyon bazlı kalibrasyon-validasyon içeren bu türden özgün bir çalışma hem ulusal hem de bölgesel su kaynakları yönetimi açısından bilimsel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Araştırmanın Amacı

Panjshir alt havzasında yüzey akış miktarının ArcSWAT modeli aracılığıyla nicel olarak tahmin edilmesi bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Özellikle yüksek dağlık topoğrafyası, kar erimesine dayalı akış rejimi ve sınırlı hidro-meteorolojik ölçüm altyapısıyla öne çıkan Panjshir Havzası, havza ölçeğinde kalibre edilmiş, güvenilir bir hidrolojik model kurulumuna duyulan ihtiyacın en belirgin olduğu alt havzalardan biridir. Literatürde Kabil Havzası genelinde yürütülen

modelleme çalışmalarının (Ayoubi & Dongshik, 2016; Bromand, 2015; Tanı, 2020) çoğunlukla bölgesel genellemelere dayalı olduğu ve Panjshir gibi alt havzaların özgün hidrolojik dinamiklerini ayrıntılı biçimde ele almadığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, SWAT-CUP temelli kalibrasyon/validasyon süreçlerinin Panjshir özelinde istasyon bazlı, hassasiyeti yüksek simülasyonlarla yürütüldüğü bir çalışmanın eksikliği dikkat çekmektedir. İnşaat mühendisliği terminolojisiyle ifade etmek gerekirse, bölgenin hidrolojik davranışını doğru tahmin etmek, sürdürülebilir su yapılarının (baraj, bent, sulama altyapısı) boyutlandırılmasında ve işletme rejiminin belirlenmesinde kritik önemdedir. Bu çalışmada, yüzey akışı oluşturan tüm fiziko-mekansal parametreler (DEM, LULC, Soil, Eğim) ArcGIS tabanlı ArcSWAT arayüzü ile modellenmiş; ardından SWAT-CUP yazılımı ile her bir akım istasyonuna özgü kalibrasyon ve validasyon döngüleri SUFI-2 algoritmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda çalışmanın amacı, Panjshir Havzası için sadece tahmine dayalı bir model kurmak değil; aynı zamanda su bütçesi, kar erimesi, buharlaşma ve yeraltı suyu gibi tüm hidrolojik döngü bileşenlerini nicel olarak ortaya koyan, karar vericilere uygulanabilir mühendislik çıktıları sunan, güvenilir ve fiziksel temellere dayanan bir akım modellemesi gerçekleştirmektir. Literatürde eksikliği hissedilen bu alt havza düzeyinde detaylı bir SWAT uygulaması, bölgedeki su yapılarının planlanması ve iklim değişikliği karşısında dirençli mühendislik çözümleri üretimi için özgün bir kaynak niteliğindedir.

Araştırmanın Önemi

Panjshir alt havzasında yüksek rakımlı topoğrafya, kar erimesi temelli akım rejimi ve sınırlı gözlem altyapısı gibi çevresel faktörler, hidrolojik döngünün doğru modellenmesini zorlaştırmakta; bu durum ise su kaynaklarının planlaması, taşkın yönetimi ve sürdürülebilir mühendislik uygulamaları açısından kritik bir belirsizlik kaynağı oluşturmaktadır. Literatürde Panjshir Havzası özelinde gerçekleştirilen ArcSWAT temelli çalışmaların büyük çoğunluğu, sınırlı sayıda istasyona dayalı kalibrasyon süreçleriyle sınırlı kalmış; hidrolojik parametrelerin istasyon bazlı detaylı analizleri ve belirsizlik değerlendirmeleri ihmal edilmiştir. Bu bağlamda, SWAT-CUP arayüzü ile SUFI-2 algoritması kullanılarak yürütülen çoklu iteratif kalibrasyon ve validasyon döngüleriyle güçlendirilmiş bu çalışma, Panjshir özelinde eksikliği

hissedilen yüksek çözünürlüklü hidrolojik simülasyonları ortaya koyması bakımından özgün bir katkı sunmaktadır.

Çalışmanın mühendislik disiplini açısından önemi, yalnızca fiziksel su döngüsünün bileşenlerinin nicel olarak ortaya konmasıyla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda baraj, regülatör, taşkın koruma yapıları ve sulama sistemleri gibi suya dayalı altyapı projelerinin ön tasarım, boyutlandırma ve işletme rejimi analizlerinde kullanılabilecek güvenilir hidrolojik girdilerin sağlanmasını da içermektedir. Kar erimesine duyarlı dağlık havzalarda, PLAPS (Precipitation Lapse Rate) ve TLAPS (Temperature Lapse Rate) gibi yükseklik temelli parametrelerin sahaya özgü kalibrasyonla modellenmesi, eğimsel farklılıkların akış üretimine etkisini simüle etmek açısından mühendislik analizlerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu yönüyle, çalışmada gerçekleştirilen istasyon bazlı parametrik hassasiyet analizleri, bölgesel hidrometeorolojik koşulların mühendislik sistemlerine etkisini istatistiksel olarak test edebilme imkânı sunmaktadır. Ayrıca Panjshir Havzası gibi hidrolojik olarak kırılgan ve veri yoksunu alanlarda gerçekleştirilen bu türden fiziksel tabanlı modellemeler, karar vericiler için sadece mühendislik planlaması açısından değil; aynı zamanda taşkın erken uyarı sistemleri, iklim uyum politikaları ve sınır aşan su kaynakları yönetişimi gibi çok disiplinli alanlarda da stratejik bilgi altyapısı oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu araştırma, Afganistan'ın doğusundaki su kaynaklarının bilimsel temele dayalı olarak yönetilebilmesi adına özgün, yüksek çözünürlüklü ve mühendislik uygulamalarına doğrudan entegre edilebilecek bir modelleme çıktısı üretmeyi amaçlamakta; hem bölgesel su güvenliği hem de altyapı mühendisliği açısından literatürdeki bir boşluğu doldurmaktadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Hidrolojik Döngü

Hidrolojik döngü, yeryüzündeki suyun atmosfer, kara ve okyanuslar arasındaki sürekli dolaşımını ifade eden temel bir kavramdır (MGM, 2025). Bu döngü kapsamında yağmur ve kar şeklindeki yağış, toprağa sızma (infiltrasyon), yüzeysel akış, yeraltı akışı, buharlaşma ve bitkiler yoluyla terleme (evapotranspirasyon) gibi birbirini besleyen süreçler meydana gelmektedir. Su bu süreçler aracılığıyla atmosferde, yerüstü su kütlelerinde (akarsular, göller), toprakta, akiferlerde ve kar örtüsünde depolanarak zaman içinde birikim ve taşıma döngüsünü sürdürmektedir. Hidrolojik döngünün kara üzerindeki en somut çıktılarından biri, akarsulardaki akım miktarı yani debidir. Debi, bir akarsu kesitinden birim zamanda geçen su hacmi olarak tanımlanmaktadır (Becker & Daw, 2005). Örneğin tipik bir birim olarak saniyede metreküp (m^3/s) kullanılır ve bu değer akarsuyun taşıdığı suyun büyüklüğünü nicel olarak ifade eder. Akım ölçümlerinde debi, bir nehir kesitinden belirli bir zaman diliminde geçen su miktarı anlamına gelmekte ve hidrometri çalışmalarının temelini oluşturmaktadır (Van Vliet, Franssen, Yearsley, Ludwig, Haddeland, Lettenmaier & Kabat, 2013).

Akarsu debisi hidrologide merkezi bir değişkendir ve su kaynakları mühendisliği açısından büyük önem taşır. Farklı debi değerleri nehir ekosistemlerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkiler; bu nedenle debi, akarsu ekolojisinde "ana değişken" olarak nitelendirilmektedir. Yüksek akış dönemleri, akarsu yatağındaki büyük enkaz parçalarını, sedimanları ve kayaları yerinden oynatarak fiziksel habitatı yeniden şekillendirebilir; düşük akış dönemlerinde ise su kalitesi, su sıcaklığı, mikrobiyal aktivite ve besin döngüsü üzerinde belirleyici rol oynar. Akarsu debisi; yağış miktarı, arazinin eğimi, toprak tipi, bitki örtüsü ve yeraltı su beslemesi gibi doğal etmenlerin yanı sıra baraj inşaatları, akarsu sularının başka havzalara aktarılması (su transferi), kentleşme ve tarımsal sulama amacıyla su çekimleri gibi insan kaynaklı faktörlerden de etkilenir (Van Vliet et al., 2013). Bu nedenle debinin doğru ölçülmesi ve tahmin edilmesi, hem taşkın ve kuraklık gibi ekstrem durumların öngörülmesi hem de su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için kritik bir gerekliliktir.

1.2. Kuraklık, Su Kıtlığı ve Su Yönetimi

Kuraklık, belirli bir bölgedeki yağışların beklenen ortalamanın altında kalarak uzun bir süre devam etmesi durumunda ortaya çıkan doğal bir afettir (Şahin & Kurnaz, 2014). Başka bir deyişle, yağışların normal düzeylerin çok altına indiği en az bir mevsimlik veya daha uzun süreli kurak periyotlar kuraklık olarak tanımlanır. Kuraklık, kalıcı bir iklim özelliği olan kurak bölgelerin aksine geçici bir meteorolojik sapmadır; yani birkaç hafta süren sıradan sıcak ve yağışsız dönemlerden farklı olarak, aylar hatta yıllar boyunca sürebilen anormal kurak koşullar dizisidir. Etkileri bakımından kuraklık genellikle dört alt türe ayrılır. Bunlar meteorolojik kuraklık (uzun süreli yağış azlığı), tarımsal kuraklık (toprakta nem azalmasına bağlı olarak ürün veriminin düşmesi), hidrolojik kuraklık (baraj, göl ve akifer gibi su kaynaklarında su seviyelerinin alışılmadık biçimde gerilemesi) ve sosyo-ekonomik kuraklık (su talebinin arzı aştığı, toplumsal ve ekonomik etkilerin görülmeye başlandığı durumlardır (Şahin & Kurnaz, 2014). Özellikle meteorolojik kuraklık uzun sürdüğünde önce tarımsal, ardından hidrolojik kuraklığa zemin hazırlayarak su kaynakları üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır.

Su kıtlığı kavramı ise bir bölgedeki kullanılabilir su kaynaklarının, nüfusun ve ekonomik faaliyetlerin ihtiyaç duyduğu su miktarını karşılamakta yetersiz kalması durumunu ifade eder. Genellikle kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı bu konuda bir gösterge olarak kullanılır: Örneğin, bu değerin 1700 m^3'ün altına inmesi "su stresi" (su sıkıntısı) durumunu, 1000 m^3'ün altına inmesi ise "su fakirliği" (şiddetli su kıtlığı) durumunu işaret etmektedir (Şahin & Kurnaz, 2014). Küresel ölçekte artan nüfus, kentleşme ve iklim değişikliği etkileri, pek çok ülkede su kıtlığı riskini yükseltmektedir. Nitekim Türkiye gibi su stresi yaşayan ülkelerin bile, 2030 itibariyle kişi başına su miktarının kritik eşik olan 1000 m^3 seviyesine yaklaşacağı öngörülmektedir. Öte yandan, Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) iklim değişikliğinin dünya genelinde kuraklıkların şiddetini ve sıklığını artırarak su kaynakları üzerindeki baskıyı büyüttüğüne dikkat çekmektedir (WMO, 2021). Bu tablo ise suyun bütüncül ve sürdürülebilir yönetiminin ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Kuraklık ve su kıtlığının olumsuz etkilerini hafifletmek için entegre su kaynakları yönetimi yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar çerçevesinde talep yönetimi (su tasarrufu ve verimliliği), arz yönetimi (barajlar, göletler ve yeraltı suyu yapıları ile suyun

depolanması), havza ölçeğinde planlama ve kurak dönem eylem planları su yönetiminin temel araçlarıdır. Ayrıca, iklim değişikliğinin mevcut su kaynaklarını daha da azaltacağı öngörüldüğünden, var olan su kaynaklarının ekolojik bir bakış açısıyla korunması ve kirlilik ile aşırı kullanım nedeniyle kaybedilmesinin önlenmesi büyük önem taşımaktadır (Şahin & Kurnaz, 2014). Su yönetimi stratejileri geliştirilirken ekosistemlerin asgari su ihtiyaçlarının karşılanmasına özen gösterilmeli; böylece hem insan kullanımına hem de doğal hayatın devamlılığına yetecek miktar ve kalitede suyun geleceğe taşınması sağlanmalıdır.

1.3. SWAT Modeli: Yapısı, Parametreleri ve Kullanım Alanları

SWAT (Soil and Water Assessment Tool), Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA) tarafından geliştirilmiş fiziksel tabanlı, sürekli çalışan ve yarı dağıtılmış bir hidrolojik modelleme aracıdır (Peker & Cüceloğlu, 2022). Bu model, bir havzadaki su ve kirlilik taşınımını günlük zaman adımlarıyla simüle edebilme kapasitesine sahiptir. "Yarı dağıtılmış" terimi, SWAT'ın çalışma alanını daha küçük alt birimlere bölerek her birini homojen özelliklere sahip olacak şekilde ayrı ayrı değerlendirmesi anlamına gelir. Nitekim SWAT, büyük bir havzayı önce alt havzalara, sonra da Hidrolojik İşlem Birimleri (HİB) denilen daha küçük parçalara ayırır; her bir HİB belirli bir arazi kullanımı, toprak tipi ve eğim sınıfının tek tip kabul edildiği, göreli olarak homojen alt alanlardır (Peker & Cüceloğlu, 2022). Bu sayede farklı arazi ve toprak özelliklerinin suyun akışa katılımı üzerindeki etkileri ayrı ayrı ele alınabilir.

SWAT modelinin çalıştırılması için gereken girdiler mekânsal ve zamansal olmak üzere iki gruba ayrılır. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM), toprak haritası ve arazi kullanımı haritası temel mekânsal girdileri oluşturur ve bu veriler havzanın topografyasını ve yüzey özelliklerini modele kazandırır. Bu mekânsal verilerden yararlanarak model, akarsu ağını ve havzanın sınırlarını belirler, ardından her alt havzadaki HİB'leri tanımlar. Diğer yandan, iklim koşullarını temsil eden zamansal girdiler model için hayati önemdedir: günlük veya aylık yağış miktarları, maksimum ve minimum sıcaklık, nispi nem, rüzgâr hızı ve güneşlenme (ışınım) değerleri SWAT'ın iklim girdilerini teşkil eder (Peker & Cüceloğlu, 2022). Bu dört ana veri katmanı (topoğrafya, toprak, arazi kullanımı ve iklim) sağlandığında SWAT, havzanın su döngüsüyle ilgili süreçlerini simüle etmeye hazır hale gelir.

SWAT modeli, her bir HİB için su bütçesi denklemlerini çözerek yüzeysel ve yeraltı suyu süreçlerini entegre bir şekilde hesaba katar. Modelin temel su dengesi yaklaşımı, yağış ile toprağın nem içeriği arasındaki ilişkiyi gözeterek, yağıştan gelen suyun bir kısmının yüzeysel akışa geçmesi, bir kısmının toprağa sızarak yeraltına ulaşması ve bir kısmının ise bitkiler ve buharlaşma yoluyla atmosfere geri dönmesi prensibine dayanır (Özdemir & Güngör, 2019). Bu kapsamda SWAT, yağış sonrası oluşan yüzey akışını hesaplamak için iki alternatif yöntem sunmaktadır. Bunlar SCS eğri numarası (SCS Curve Number Method) yöntemi ve Green-Ampt infiltrasyon denklemidir. Toprak profili içinde gerçekleşen süzülme (perkolasyon) her bir toprak katmanı için ayrı ayrı hesaplanmakta; eğimli arazilerde yağış suyunun toprak içerisinde yanal akış yoluyla yamaç aşağı hareketi ve taban suyu (akifer) beslemesi gibi süreçler de modele dâhil edilmektedir (Ertürk, Ekdal, Karakaya, Cüceloğlu, Gürel, Ethem & Kadıköy, 2015). Biriken suyun akarsuya tekrar geri dönüşü, hem sığ akiferden beslenen taban akışı hem de yüzeysel akışın dere ağında taşınımı (yani nehir boyu iletim süreci) aracılığıyla modellenir. Buharlaşma ve terleme (evapotranspirasyon)hesaplarında ise Penman-Monteith, Hargreaves veya Priestley-Taylor yöntemlerinden biri kullanıcı tarafından seçilerek kullanılabilir (Özdemir & Güngör, 2019). Yüksek dağlık havzalarda hidrolojik döngü açısından kritik öneme sahip olan kar birikimi ve kar erimesi süreçleri de SWAT modeli tarafından ayrıntılı şekilde temsil edilmektedir; ayrıca akarsu yataklarından sızma (iletim kayıpları) ve küçük su yapılarında (gölet, bent vb.) gerçekleşen buharlaşma/kayıp süreçleri de modelin kapsamına dâhil edilmiştir (Peker & Cüceloğlu, 2022).

SWAT modelinin sahip olduğu çok sayıdaki parametre, farklı havzalara uyarlanırken kalibrasyon yoluyla ayarlanır. Özellikle yüzeysel akış ve akifer akışıyla ilişkili parametreler, modelin tahmin başarısını doğrudan etkilediğinden, gerçek ölçüm verilerine dayalı bir kalibrasyon/doğrulama süreci yürütülmesi şarttır. Bu amaçla SWAT modeli, SWAT-CUP adlı destek yazılımı ile entegre edilerek otomatik kalibrasyon ve belirsizlik analizi yapılabilmesine imkân tanır. Kalibrasyon sürecinde yağış-akış ilişkisini kontrol eden eğri numarası (CN2), toprak nem kapasitesi (SOL_AWC), taban akışı ayrışma sabiti (ALPHA_BF) gibi kritik parametreler, gözlemlere en iyi uyumu sağlayacak şekilde optimize edilir. Doğru kalibre edilmiş bir SWAT modeli, aylık ve yıllık akım değerlerini güvenilir biçimde taklit edebildiği gibi, farklı senaryolar altında (ör. arazi kullanımı veya iklim değişikliği) havzanın hidrolojik

tepkisini öngörmek için de kullanılabilmektedir. SWAT modelinin literatürde geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Başlangıçta tarımsal kaynaklı su kalitesi problemlerini incelemek üzere geliştirilen model, günümüzde su bütçesi ve taşkın analizlerinden iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkilerinin değerlendirilmesine, arazi kullanım değişikliği senaryolarının incelenmesinden nehir havzalarında yayılı kirlilik (besin maddesi ve sediman taşınımı) yüklerinin tahminine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır (Peker & Cüceloğlu, 2022; Özdemir & Güngör, 2019; Ertürk et al., 2015). Ayrıca farklı arazi yönetimi stratejilerinin (ör. erozyon kontrol tedbirleri veya gübre kullanım optimizasyonu gibi) havza ölçeğindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla da SWAT'tan yararlanılmaktadır (Rasouli et al., 2015). Modelin dünya genelinde binlerce araştırmada uygulanmış olması, değişik iklim ve coğrafi koşullarda güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir. Son yıllarda Türkiye'de de gerçekleştirilen bilimsel çalışmalarda SWAT modeli uygulanmış ve çoğunlukla tatmin edici doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir (Hayat, 2022; Alawi & Özkul, 2023; Tanı, 2020; Tanı & Tayfur, 2023). Tüm bu çalışmalar, SWAT modelinin hem hidrolojik tahminler hem de su yönetimi planlamaları için güçlü ve esnek bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

1.4. ArcSWAT Arayüzü

Hidrolojik modellerin coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile entegrasyonu, özellikle büyük havzaların modellenmesinde önemli kolaylıklar sağlamaktadır. CBS tabanlı modelleme sayesinde, arazi yükseklik verileri, toprak ve arazi kullanım haritaları gibi mekânsal veriler doğrudan modele entegre edilerek hem model parametrelerinin belirlenmesi hem de sonuçların görselleştirilmesi pratik hale gelmektedir (Peker & Cüceloğlu, 2022). Nitekim SWAT modelinin farklı CBS platformlarında çalıştırılabilmesi için çeşitli arayüz yazılımları geliştirilmiştir. Kolay kullanılabilen grafik arayüzler yardımıyla model kurulumu, parametre güncellemeleri ve simülasyon çıktılarını harita üzerinde görüntüleme işlemleri CBS ortamında kullanıcı dostu bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. SWAT modelinin en yaygın CBS arayüzlerinden biri ArcSWAT yazılımıdır. ArcSWAT, ESRI firmasının ArcGIS (ArcMap) programı üzerinde eklenti olarak çalışan bir arayüz olup SWAT modelinin coğrafi verilerle etkileşimli kullanılmasına olanak tanır. İlk SWAT-CBS entegrasyonu 1990'larda

GRASS adlı açık kaynaklı CBS yazılımıyla gerçekleştirilmiş, ilerleyen yıllarda Windows tabanlı MapWindow SWAT (MWSWAT) ve ArcGIS tabanlı ArcSWAT arayüzleri geliştirilerek kullanıma sunulmuştur (Peker & Cüceloğlu, 2022). Günümüzde ise ArcGIS'e alternatif olarak açık kaynak kodlu QGIS yazılımı için geliştirilmiş QSWAT arayüzü, CBS tabanlı SWAT modellemesi yapmak isteyen araştırmacılar arasında yaygınlaşmaktadır (Shams, Khan, Haleem & Mahmood, 2024).

ArcSWAT arayüzü, SWAT modeline mekânsal verileri girmek ve havza tanımlama sürecini adım adım yürütmek için kapsamlı araçlar içerir. Tipik bir ArcSWAT çalışma akışında, öncelikle bir SWAT projesi oluşturulur ve modelin kullanacağı veritabanları hazırlanır. Ardından dijital yükseklik modeline (DEM) dayalı olarak havza sınırları ve akarsu ağı otomatik şekilde belirlenir; kullanıcı dilerse belirli bir çıkış noktasını (havzanın mansabı) işaretleyerek bu noktaya göre alt havza sınırlarının çizilmesini sağlayabilir (Betrie, Xuan & Griendsven, 2023). Sonraki aşamada havza alanı içinde yer alan toprak türleri ve arazi kullanım sınıfları, ilgili haritaların yüklenmesiyle modele tanıtılır. Bu işlem, her alt havza için farklı toprak ve arazi kullanımlarının kesişimine dayalı HİB'lerin oluşturulmasını mümkün kılar. Tüm fiziksel veriler hazırlandıktan sonra ArcSWAT, SWAT modelinin ihtiyaç duyduğu girdi dosyalarını otomatik olarak üretir ve kullanıcı model simülasyonunu başlatabilir. Simülasyon tamamlandığında ise ArcSWAT, sonuçları (ör. akım değerleri, su bütçesi bileşenleri) CBS ortamında haritalar ve grafikler şeklinde görselleştirme imkânı sunar. CBS tabanlı bu yaklaşım ise karmaşık hidrolojik analizlerin coğrafi veriler ışığında yürütülmesini sağladığı için günümüzde standart bir uygulama haline gelmiştir. ArcSWAT ve benzeri arayüzler, araştırmacıların az zaman harcayarak kapsamlı havza modelleri kurmasına imkân tanıdığı gibi, sonuçların mekânsal olarak değerlendirilmesine de olanak vermektedir (Rasouli et al., 2015). Bu sayede model çıktıları (örneğin havzanın farklı bölgelerindeki akış yoğunluğu veya taşkın risk dağılımı) harita üzerinde kolayca yorumlanabilmekte ve su yönetimi karar destek süreçlerine somut bir coğrafi temel sunulmaktadır. Ancak ArcSWAT'ın, ArcGIS yazılımı lisansına ihtiyaç duyması nedeniyle maliyetli bir çözüm olabildiği; bu durumda QSWAT gibi ücretsiz alternatiflerin tercih edilebileceği de belirtilmelidir (Peker & Cüceloğlu, 2022; Shams, Khan, Haleem & Mahmood, 2024).

1.5. Afganistan'da SWAT Uygulamaları ve Panjshir Havzasının Özellikleri

Afganistan, su kaynakları rejiminin büyük ölçüde dağlık bölgelerdeki kar birikimi ve erimesine dayandığı, yarı kurak iklim özelliklerine sahip bir ülkedir. Yağışların mevsimsel dağılımı ve kar stokları, akarsu debilerinin yıllık döngüsünü belirleyen ana unsurlardır. Nitekim ülkedeki akarsu akımlarının tahminen %70–80'i, kış mevsiminde yüksek dağlarda biriken karların ilkbahar ve yaz aylarında erimesiyle meydana gelmektedir (Azizi, Akhtar, Tischbein, Borgemeister & Wang, 2025). Bu durum, özellikle ilkbahar aylarında ani kar erimeleriyle nehirlerde taşkın riskinin yükselmesine, yaz sonuna doğru ise akımların ciddi ölçüde azalmasına yol açabilmektedir. Afganistan'ın su varlığı iklimsel dalgalanmalara son derece hassas olup, uzun süreli kuraklık dönemlerinde hem tarım hem de kentsel su temini açısından ciddi su kıtlığı yaşanabilmektedir. Ülkede yıllarca süren çatışma ve kurumsal zafiyet koşulları, hidro-meteorolojik veri ağının gelişimini de sınırlamıştır; birçok havzada akım ve yağış ölçüm istasyonu sayısı yetersizdir (Azizi et al., 2025). Bu nedenle, veri kısıtlı havzalarda model tabanlı çalışmalar yürüterek hidrolojik öngörüde bulunmak, Afganistan gibi altyapı eksiği olan ülkelerde ayrı bir önem kazanmaktadır.

SWAT modelinin Afganistan'daki havzalara uygulanmasına yönelik literatür son yıllarda gelişmeye başlamıştır. Bromand (2015) gerçekleştirdiği çalışmada küresel iklim değişikliği senaryolarının Kabil Nehri havzasındaki su rejimine etkilerini SWAT modeliyle incelemiş ve yüzyılın ortası itibarıyla akım değerlerinde belirgin azalmalar olacağı öngörüsünü ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Ayoubi & Kang (2016) ile Akhtar, Awan, Borgemeister & Tischbein (2021) de SWAT modelini kullanarak Pakistan ve Afganistan'ın farklı havzalarında akım simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Aawar & Khare (2020) ise Kabil Nehri alt havzasında SWAT'ı kalibre ederek gelecekteki iklim projeksiyonları altında akım tahminleri yapmış; doğru kalibrasyon yapıldığında modelin aylık bazda taban akışını bile güvenilir biçimde simüle edebildiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, veri azlığına rağmen SWAT modelinin Afganistan'daki su yönetimi kararları için yararlı bir araç olabileceğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, bugüne kadar yapılan çalışmalar genellikle geniş ölçekli olup ülkenin alt havzalarının detaylı bir şekilde modellenmesi sınırlı kalmıştır. Kabil Havzası geneli için yürütülen araştırmaların (ör. Bromand 2015; Ayoubi & Kang

2016; Tanı, 2020) çoğu, havzanın genel su dengesi üzerinde durmakta ve alt havzaların özgün hidrolojik dinamiklerini yeterince yansıtmamaktadır. Dolayısıyla, Kabil Nehri'nin önemli kollarından biri olan Panjshir Havzası gibi alt bölgelerin kendi iç dinamikleriyle incelenmesi bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Panjshir Havzası, başkent Kabil'in kuzeydoğusunda yer alan ve Kabil Nehri'ne önemli miktarda su katkısı sağlayan dağlık bir alt havzadır. Hindikuş Dağları'nın doğu eteklerinde yükselen zirvelerden beslenen Panjshir Nehri, akım rejimini büyük oranda kar erimelerine dayandırır. Havzada kış aylarında yoğun kar yağışı görülürken, ilkbaharda karların erimesiyle debiler yükselmekte, yaz sonunda ise yağış azlığı nedeniyle akışlar düşmektedir. Panjshir bölgesindeki akım gözlem istasyonlarının sayısı ve kayıt süresi oldukça sınırlıdır; bu da havzanın hidrolojik özelliklerinin tam olarak anlaşılmasını güçleştirmektedir. Nitekim yüksek dağlık topoğrafyası, kar erimesine dayalı akış rejimi ve sınırlı veri altyapısı ile öne çıkan Panjshir Havzası, havza ölçeğinde kalibre edilmiş güvenilir bir hidrolojik model kurulumuna en çok ihtiyaç duyulan alt havzalardan biri olarak kabul edilmektedir.

1.6. Önceki Araştırmalar

Rasouli, Kayastha, Bhattarai, Shrestha, Arian ve Armstrong (2015), Afganistan'ın Hindu Kush Dağları üzerindeki Paghman silsilesinde yer alan Üst Kabul Nehri Havzası'nda kar erimesi kaynaklı akım miktarlarını tahmin etmek amacıyla Snowmelt Runoff Model (SRM)'ini kullanmıştır. Yüzölçümü 1633,8 km² olan bu havzada, 2009 yılı için model kalibrasyonu ve 2011 yılı için validasyonu gerçekleştirilmiştir. Model girdileri arasında günlük yağış, hava sıcaklığı, akım ve kar örtüsü verileri yer almış; modelin çıktıları, gözlemlenen günlük debi değerleriyle yüksek uyum göstermiştir. 2009 yılı için gözlenen ve hesaplanan ortalama yıllık debiler sırasıyla 5,7 m³/s ve 5,6 m³/s olarak belirlenmiş, 2011 yılında ise bu değerler 1,33 m³/s ve 1,31 m³/s olmuştur. Araştırmacılar, iklim değişikliği senaryoları kapsamında sıcaklıkta 1°C ve yağışta %10 artış durumunda kış, yaz ve yıllık akım değerlerinin sırasıyla %39, %18,5 ve %17,9 oranında arttığını; sıcaklıkta 2°C ve yağışta %20 artış senaryosunda ise bu artışların %51,2, %40,8 ve %47,3'e yükseldiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular doğrultusunda, SRM modelinin, karla beslenen üst havzalarda, özellikle de Afganistan'ın dağlık bölgelerinde güvenilir bir akım tahmin aracı olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Bromand (2015), Kabil Nehri Havzası'nda iklim değişikliği, nüfus artışı, arazi kullanım değişiklikleri ve yeraltı suyu mevcudiyeti gibi etkenlerin uzun vadeli etkilerini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmanın temel hedefi, havzanın su potansiyelini nicel olarak belirlemek, çeşitli iklim senaryoları (A2, A1B ve B1) altında yağış ve sıcaklık eğilimlerini analiz etmek, sektör bazlı (tarım, evsel, çevresel ve endüstriyel) su talebini hesaplamak ve havza bazında su stresi düzeyini değerlendirmek olmuştur. Çalışmada hem yerel hem de küresel veri setleri toplanmış; SWAT 2012 modeli kullanılarak yüzey akışı, yağış, kar yağışı, buharlaşma ve potansiyel evapotranspirasyon gibi hidro-dinamik bileşenler modellenmiştir. Modelin 2008–2012 dönemi için kalibrasyonu yapılmış ve R^2 değerleri, modelin debi simülasyon performansını tatmin edici düzeyde yansıttığını göstermiştir. Hassasiyet analizinde TIMP, SMTMP, GW_DELAY ve CN parametrelerinin model çıktıları üzerinde en etkili girdiler olduğu belirlenmiştir. Modelleme sonuçlarına göre, 2046–2064 dönemi için ortalama sıcaklıkta 2.9°C artış, havzada yaklaşık %24 oranında su mevcudiyeti azalmasına neden olacak; bu durumun ise potansiyel evapotranspirasyonu %18 oranında artıracağı öngörülmüştür. Elde edilen bulgular doğrultusunda, SWAT modelinin iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesinde ve havza ölçeğinde su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine katkı sağlayacak öngörülerin üretilmesinde etkili bir araç olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, ileriye dönük tahminlerin yapılması sürecinde modelleme kaynaklı belirsizliklerin tamamen bertaraf edilemeyeceği de vurgulanmıştır.

Ayoubi & Dongshik (2016), Afganistan'ın güneydoğusunda, Kabil Nehri Havzası içinde yer alan Ghurband ve Panjshir alt havzalarının hidrolojik yapısını analiz etmek amacıyla ArcSWAT modeli tabanlı kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada, ArcGIS tabanlı SWAT arayüzü kullanılarak havzanın aylık akım simülasyonu gerçekleştirilmiş ve su bütçesi hesaplamaları yapılmıştır. Araştırmanın temel hedefi, kırsal alanlarda tarımsal sulama ve yeraltı suyu beslemesi için yüzey sularının etkin kullanımını sağlamaya yönelik bir model ortaya koymak olmuştur. Modelde hidro-meteorolojik veriler, sayısal yükseklik modeli (DEM), toprak ve arazi örtüsü katmanları kullanılmış; bu veriler doğrultusunda havza ve 29 alt havza ArcSWAT ve CBS yardımıyla sınırlandırılmıştır. Modelin kalibrasyonu 2010–2012 dönemi için, validasyonu ise 2013 yılı için üç farklı akım gözlem istasyonunda (Omerz, Pul-Ashwa ve Shukhi) SWAT-CUP arayüzü kullanılarak yapılmıştır.

Kalibrasyon sürecinde belirlenen R^2 değerleri sırasıyla 0.82, 0.77 ve 0.90; validasyon sürecinde ise 0.85, 0.91 ve 0.93 olarak hesaplanmış; bu da modelin yüksek doğrulukla çalıştığını göstermiştir. Modelin etkinliğini gösteren Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (NS) ise kalibrasyonda 0.72, 0.73 ve 0.86, validasyonda ise 0.60, 0.86 ve 0.86 değerlerine ulaşmıştır. Elde edilen bulgular, Panjshir Havzası'nda akarsu akımlarının korunması ve su kaynaklarının verimli kullanımını destekleyecek modelleme araçlarının başarıyla uygulanabileceğini ortaya koymuş; çalışma, su yönetimi politikaları için bilimsel bir dayanak oluşturmuştur.

Tanı (2020), Afganistan'daki Kabil Nehri Havzası'nda (KRB) yağış-akış süreçlerini değerlendirmek amacıyla ArcSWAT modeli kullanarak kapsamlı bir hidrolojik modelleme çalışması gerçekleştirmiştir. Yaklaşık 72.000 km²'lik drenaj alanına sahip olan havzada, çalışmanın amaçları; havza akımını etkileyen en duyarlı parametrelerin belirlenmesi, meteorolojik istasyon verilerine dayanarak aylık ve günlük akışların tahmin edilmesi, gözlemlenen ve simüle edilen akım verilerinin farklı istasyonlar için kalibrasyon ve validasyonunun yapılması, ayrıca yüzey akışı ve su veriminin genel miktarının hesaplanması şeklinde yapılandırılmıştır. SWAT-CUP yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen duyarlılık analizinde, başlangıçta test edilen 27 parametreden 20'si en hassas olarak belirlenmiş; özellikle GWQMN.gw (yeraltı suyundan geri akım için gerekli minimum su derinliği), SMTMP.bsn (kar erimesi taban sıcaklığı), CN2.mgt (SCS yüzey akış katsayısı), PLAPS.sub (yağış lapse oranı) ve HRU_SLP.hru (eğim dikliği) gibi parametrelerin model çıktıları üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Modelin simüle ettiği akım değerleri, havzada bulunan yedi farklı hidrolojik istasyondan elde edilen gözlemsel verilerle hem aylık hem de günlük ölçeklerde karşılaştırılarak kalibre ve valide edilmiştir. Model performansı R^2 (determinasyon katsayısı), NSE (Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı) ve RSR (kök ortalama kare hataya oran) gibi kriterlerle değerlendirilmiş ve genel olarak aylık simülasyonların günlük simülasyonlara kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma, ArcSWAT modelinin bölgesel hidrolojik analizlerde kullanılabilirliğini ve akım tahmini açısından etkinliğini ortaya koymuştur.

Hejran, Dawari, Busty & Sangin (2020), Afganistan'ın güneyinde yer alan Arghandab Nehri havzasına bağlı Üst Tarnak alt havzasında, su kıtlığının önemli bir sorun olduğu bu bölgede yüzey akışı simülasyonu gerçekleştirmek amacıyla SWAT

(Soil and Water Assessment Tool) modelini uygulamışlardır. Yirmi yıllık akım verisini temel alarak yapılan bu çalışmada, aylık bazlı akarsu akımının modellenmesi ve bu yolla havzanın su kaynakları yönetimine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Arazi kullanım verileri, jeoloji, topografya ve iklimsel değişkenler ArcSWAT yazılımı aracılığıyla modellenmiş; havza ve alt havza sınırları belirlenerek ilgili veri katmanları entegre edilmiştir. Model, 1979–1980 yılları arasındaki gözlemsel verilerle kalibre edilmiş ve model doğruluğu üç farklı istatistiksel performans katsayısı ile değerlendirilmiştir. Kalibrasyon sürecinde belirlenen R^2 değeri 0.769, Nash–Sutcliffe verimlilik katsayısı (NSE) 0.81 ve yüzdesel yanlılık (PBIAS) değeri -9.31 olarak hesaplanmış; bu da yalnızca %9 oranında fazla tahminleme yapıldığını ve modelin güvenilir şekilde çalıştığını ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, SWAT modelinin özellikle yarı kurak bölgelerde su yönetimi stratejilerinin belirlenmesi açısından etkili bir araç olduğunu ve doğru kalibrasyon yapıldığında aylık taban akışının güvenilir biçimde simüle edilebildiğini göstermiştir. Dolayısıyla çalışma, Afganistan'daki veri kısıtlılığına rağmen SWAT modelinin hidrolojik yönetim kararlarında kullanılabilecek potansiyele sahip olduğunu vurgulamış ve Tarnak Havzası gibi su stresi yaşayan bölgelerde uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.

Aawar & Khare (2020), Afganistan'daki Kabil Nehri alt havzasında, İstalif istasyonu merkezli olarak gerçekleştirdikleri çalışmada, iklim değişikliğinin akarsu akımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla SWAT modeli uygulamışlardır. Özellikle veri eksikliği nedeniyle modellemenin oldukça güç olduğu bu bölgede, çalışmanın amacı, gelecekteki akım miktarlarını öngörmek ve bu öngörüleri iklim değişikliği senaryolarıyla birlikte değerlendirmektir. Modelin kalibrasyonu, 2003–2010 dönemi için; validasyonu ise 2010–2018 dönemi için aylık debi verileri kullanılarak yapılmıştır. Kalibrasyon ve validasyon süreçleri, SWAT-CUP arayüzü ve SUFI-2 algoritması ile gerçekleştirilmiş; hem manuel hem de otomatik kalibrasyonun yanı sıra duyarlılık ve belirsizlik analizleri de uygulanmıştır. Determinasyon katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (NSE) ve bias (yanlılık) parametreleri bakımından elde edilen değerler, modelin her iki dönemde de yüksek performans gösterdiğini ve gözlemsel verilerle simüle edilen aylık akım değerleri arasında yüksek düzeyde uyum bulunduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, yalnızca yağış ve sıcaklık üzerindeki değişimlerin değil, aynı zamanda yüzey akış, arazi kullanımı/örtüsü değişimi ve farklı senaryoların da akım miktarı üzerinde belirgin etkiler yarattığını

göstermiştir. Sonuç itibariyle iklim değişikliğinin yalnızca iklimsel değişkenleri değil, doğrudan akarsu rejimlerini ve su kaynaklarını da etkilediği vurgulanmış; SWAT modelinin kalibrasyon süreciyle birlikte bu etkilerin detaylı biçimde analiz edilebileceği güvenilir bir araç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Hussainzada & Lee (2021), Afganistan'ın kuzeyindeki yarı kurak ve dağlık bir bölge olan Balkhab Nehri Havzası'nda (BRB) tarımsal su kaynaklarının yönetimine katkı sağlamak amacıyla SWAT modeli kullanarak yüzey akış simülasyonu gerçekleştirmiştir. 2013–2018 dönemini kapsayan aylık bazlı modelleme sürecinde, eğim, yükselti, arazi örtüsü, toprak haritaları ile birlikte sıcaklık, yağış, bağıl nem, rüzgâr hızı ve güneş ışınımı gibi iklimsel değişkenler girdi olarak modele dahil edilmiştir. Özellikle Temmuz-Eylül kurak döneminde alt havza su kaynaklarının büyük ölçüde yeraltı suyuna bağlı taban akışı ile beslendiği ortaya konmuştur. Modelin kalibrasyonu aşamasında, 190 kaynak noktasına ait istasyon bazlı akım verileri kullanılarak taban akışı tahmini yapılmış ve bu tahmin modelin doğruluğunu belirgin biçimde artırmıştır. Elde edilen performans ölçütleri arasında R^2 değerleri 0.70, 0.86, 0.67 ve 0.80; NSE (Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı) değerleri 0.52, 0.83, 0.40 ve 0.57; ve PBIAS değerleri ise sırasıyla 23.4, −8.5, 23.4 ve 17.5olarak hesaplanmıştır. Validasyon aşamasında da bu istatistiklerin tatmin edici düzeyde olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, SWAT modelinin tarımsal sulama uygulamaları ve iklim değişikliği senaryoları çerçevesinde su kaynaklarının değerlendirilmesi açısından etkili bir araç olduğu ve özellikle taban akışın hassas modellemesinin genel simülasyon başarısını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Taraky (2021), Kabil Nehri Havzası'nda (KRB) iklim değişikliği ve kalkınma hedefleri bağlamında sınır aşan su kaynaklarının yönetimine dair çok boyutlu bir doktora araştırması gerçekleştirmiştir. Çalışma, su güvenliği krizlerine neden olan yağış değişkenliği, hidrolojik ekstrem olaylar (sel, kuraklık), kentleşme, baraj inşa yarışları ve iyi yönetim uygulamaları (BMP) gibi faktörleri dikkate alarak, KRB için ekonomik, sosyal ve çevresel faydaları azami düzeye çıkarmayı hedefleyen teknik ve nitel bulgularla desteklenmiş bir "yol haritası" oluşturmuştur. Araştırmada üç ana bileşen öne çıkmıştır: (i) Farklı iklim ve rezervuar senaryoları altında yapılan taşkın frekans analizleri ile kentsel bölgelerdeki taşkın yayılım alanlarının azaltımına yönelik önlemler belirlenmiş ve bu doğrultuda havzaya özgü bir su paylaşım anlaşması

önerilmiştir; (ii) Baş havza rezervuarlarının iklim değişikliği ve taşkın frekansları üzerindeki etkileri modellenmiş, bu süreçte Afganistan-Pakistan arasındaki sınır aşan su iş birliğinin zorlukları ve gereklilikleri değerlendirilmiştir; ayrıca yıllık buzul erimesi hesaplanmış ve buzul geri çekilmeleri üç farklı dönem boyunca projeksiyonlarla tahmin edilmiştir; (iii) Kabul Nehri Havzası'nda standartlaştırılmış akım indeksi ve kuraklık şiddeti indeksi hesaplanarak, su kaynaklarının ve akım rejimlerinin sınır aşan, işbirliğine dayalı bir ortamda nasıl yönetilebileceği gösterilmiştir. Araştırmada SWAT, SWAT-CUP, HEC-RAS, ArcGIS, R-Studio gibi ileri düzey modelleme ve analiz araçları kullanılmış, sonuçlar mevcut kalkınma ve politika literatürü ışığında değerlendirilerek adil su yönetimi için bölgeye özgü anlaşma önerileri geliştirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, hem teknik hem de politika düzeyinde kapsamlı bir hidropolitik çerçeve sunmuş ve iklim değişikliği bağlamında Kabil Havzası'nın yönetişimi için bütüncül çözüm önerileri ortaya koymuştur.

Hayat (2022), Afganistan'ın tamamında yaşanan hidrolojik ve meteorolojik kuraklık eğilimlerini tarihsel veriler ışığında inceleyerek, bu eğilimlerin sınır aşan nehirler üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, 1979–2019 dönemini kapsayan meteorolojik kuraklık analizleri için Standardized Precipitation Index (SPI) ve Reconnaissance Drought Index (RDI) kullanılmış; hidrolojik kuraklık değerlendirmeleri ise Streamflow Drought Index (SDI) aracılığıyla, iki farklı zaman serisi (1960–1979 ve 2008–2020) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ülke genelinde yaygın bir şekilde dağılmış 55 hidro-meteorolojik istasyondan elde edilen uzun dönemli veriler kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmanın yenilikçi yönlerinden biri olarak, dört sınır aşan havzada (RB – River Basins) 1988–2021 dönemine ait Landsat uydu verilerine dayalı uzaktan algılama (RS) teknikleri ile akarsu debisi analizleri yapılmıştır. Sıcaklık ve yağış değişimleri üzerine ise Mann–Kendall ve Sen's slope testleri uygulanarak trend analizleri yapılmış ve bu bağlamda ülke genelini kapsayan on yıllık kuraklık haritaları üretilmiştir. Elde edilen bulgular, Afganistan'daki kuraklık eğilimlerinin hem zamansal hem de mekânsal olarak farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuş; özellikle sınır aşan nehirlerde, herhangi bir uluslararası anlaşma olmaksızın akışın dış ülkelere ulaşmasının, bölgesel su güvenliği açısından önemli bir kırılganlık noktası teşkil ettiğini vurgulamıştır. Sonuç itibariyle çalışma, Afganistan'ın iklimsel olarak su stresi altında olduğunu, bu durumun sınır aşan su ilişkileri ve yönetimi

açısından çok taraflı iş birliği ihtiyacını artırdığını ve ulusal düzeyde stratejik kuraklık yönetim planlarının geliştirilmesi gerektiğini savunmuştur.

Hussainzada & Lee (2022), Afganistan'ın kuzeyinde yer alan Balkhab Nehri Havzası'nda (BRB) yaşanan su kıtlığı, su yetersizliği ve aşağı havza kullanıcıları için adaletsiz su tahsisi sorunlarını ele almak amacıyla SWAT modeli kullanarak kapsamlı bir hidrolojik değerlendirme gerçekleştirmiştir. Modelin tüm havza için kalibrasyonu ve validasyonu tamamlanarak uygun bir model kurulumu sağlanmış; böylece havzanın su kaynakları kapasitesi ve hidrolojik süreçleri güvenilir biçimde analiz edilmiştir. Mevcut sulama kanallarına yapılan su tahsisinin yetersizliği tespit edilmiş ve mevcut tarım arazileri ile ürünlerin su gereksinimlerine göre yeniden düzenlenmiş bir sulama planı SWAT modeline entegre edilmiştir. Bu yeni plan, yukarı havza su tahsisini azaltmaksızın aşağı havzaya daha etkin su dağılımı sağlamayı hedeflemiştir. Özellikle kış ve ilkbahar başında taşkın sularının depolanabilmesi amacıyla orta kesimde bir baraj yapımı önerilmiş, böylece suyun mevsimsel dağılımının dengelemesi öngörülmüştür. Model çıktıları, Balkhab Nehri'nin mevcut yıllık akımının yalnızca mevcut tarım alanlarını değil, aynı zamanda ilave 18.470,6 hektarlık tarım arazisini de sulayabilecek kapasitede olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, çalışmanın bilimsel temelli politika geliştirme, sürdürülebilir tarımsal su yönetimi ve taşkın kontrolü alanlarında karar vericilere katkı sunabileceğini ve BRB için uygulanabilir stratejiler geliştirilmesinde yol gösterici nitelikte olduğunu göstermiştir.

Ougahi, Karim & Mahmood (2022), Afganistan'daki Kabil Nehri Havzası'nda (KRB) iklim değişikliği ile arazi kullanımı/örtüsü (LULC) değişikliklerinin hidrolojik bileşenler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla SWAT modeli uygulamıştır. Çalışmada, 1985–2002 dönemi için model kalibrasyonu, 2003–2012 dönemi için ise validasyonu gerçekleştirilmiş; her iki dönem için de NSE ve determinasyon katsayısı (R^2) değerlerinin 0.7'nin üzerinde çıkması, modelin gözlemsel akım verileriyle yüksek düzeyde uyumlu çalıştığını ortaya koymuştur. Hidrolojik bileşenlerin simülasyonunda, küresel iklim modellerinden (GCMs) türetilmiş senaryolara dayalı indirgenmiş veriler girdi olarak kullanılmış; bu veriler RCP4.5 ve RCP8.5 salım senaryoları altında, 2030–2100 dönemi için geleceğe yönelik analizlerde değerlendirilmiştir. Modelin çıktıları, Kabil Havzası'nda genel olarak sıcaklıkların artacağını ortaya koyarken, yağış öngörüleri GCM'ler arasında tutarsızlık göstermiştir.

21. yüzyıl projeksiyonlarında su verimi (WYLD) ve evapotranspirasyon (ET) değerlerinin düşeceği öngörülmüştür. Ancak farklı LULC senaryolarına göre bu etkilerin yönü değişmiş; tarım baskın senaryoda su verimi artarken, orman ve çayır baskın senaryolarda belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, Kabil Havzası'ndaki su kaynaklarının iklim değişikliği ve arazi örtüsü dinamiklerine karşı hassasiyetini göstermiş ve ilgili kurumlar ile karar vericilere sürdürülebilir su yönetimi için politika geliştirme açısından değerli çıktılar sunmuştur.

Tanı & Tayfur (2023), Afganistan'ın en yoğun nüfuslu ve en önemli su kaynaklarından biri olan Kabil Nehri Havzası'nda, yağış-akış süreçlerini modellemek amacıyla ArcSWAT modeli ile kapsamlı bir hidrolojik çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, dokuz yıllık meteorolojik ve hidrolojik veri kullanılmış; ArcGIS tabanlı toprak sınıflandırması, arazi kullanımı/örtüsü, yükseklik, drenaj ve eğim dağılımı haritaları küresel veri tabanlarından elde edilerek modellemeye entegre edilmiştir. Meteorolojik veriler 18 farklı istasyondan, hidrolojik veriler ise 7 farklı istasyondan temin edilmiştir. Havza, 48 alt havzaya ve toplam 770 hidrolojik tepki birimine (HRU) ayrılarak detaylı bir yapısal modelleme yapılmıştır. Duyarlılık analizleri sonucunda, havzanın akış karakteristiklerinin özellikle yeraltı suyu ve kar erimesinden yüksek düzeyde etkilendiği belirlenmiştir. Model, 2010–2014 dönemi için kalibre edilmiş, 2015–2017 yılları için ise yedi farklı hidrolojik istasyonda valide edilmiştir. Kalibrasyon ve validasyon süreçlerinde SWAT-CUP başarılı biçimde kullanılmış ve günlük akımlar için ortalama korelasyon katsayısı (R) 0.78, aylık akımlar için ise 0.82 olarak hesaplanmıştır. Model çıktılarında, havzanın toplam yıllık su verimi 432.9 mm/yıl olarak tahmin edilmiş; bu da 31.176 milyon m^3/yıl'lık bir akıma karşılık gelmekte olup, 26.512 milyon m^3/yıl olan mevcut su talebini zorlukla karşıladığı ortaya konmuştur. Çalışma, Kabil Nehri Havzası'ndaki hidrolojik kaynakların sınırda bir yeterlilikle sürdürüldüğünü, dolayısıyla bölgesel su yönetimi kararlarında iklimsel ve hidrolojik dengesizliklerin dikkate alınması gerektiğini bilimsel verilerle göstermiştir.

Ayoubi, Reinhardt-Imjela & Schulte (2024), iklim değişikliğinin Afganistan'daki Üst Kabul Nehri Havzası (UKRB) üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yürüttüğü çalışmasında, SWAT modeli kullanarak 2009–2019 dönemine ilişkin hidrolojik model geliştirmiş, bu modeli 2010–2016 yılları

arasında kalibre etmiş ve 2017–2018 dönemi için doğrulamıştır. Modelin hem günlük hem aylık bazda yapılan kalibrasyon ve validasyon süreçlerinde altı gözlem istasyonunda yüzey akış tahminlerinin tatmin edici ile çok iyi düzeyde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. İklim projeksiyonlarını oluşturmak üzere dört farklı Bölgesel İklim Modeli (RCM) kullanmış; bu projeksiyonları RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında 2030–2049 (2040'lar) ve 2080–2099 (2090'lar) dönemlerine göre analiz etmiştir. Model girdisi olarak kullanılan sıcaklık ve yağış verileri, lineer ölçekleme (LS), delta değişim (DC) ve ampirik kantil eşleme (EQM) yöntemleriyle sapma düzeltmesine tabi tutulmuş, bu yöntemler APHRODITE (Asya bölgesi için geliştirilmiş, yüksek çözünürlüklü yağış veri seti) veri setiyle karşılaştırılarak test edilmiş ve lineer ölçekleme yönteminin en başarılı sonuçları verdiği belirlenerek analizlerde kullanılmıştır. Bulgulara göre, sıcaklıkların her iki senaryoda da her mevsimde arttığı, 2040'larda RCP4.5 senaryosunda 1.9°C, RCP8.5'te 3.1°C, 2090'larda ise sırasıyla 2.3°C ve 6.1°C artış beklendiği hesaplanmıştır. Gelecekte yıllık ortalama yağış miktarında artış beklenmesine karşın, 2006–2100 arası uzun vadede düşüş eğilimi gözlemlenmiş; RCP4.5 altında 2040'larda %5, 2090'larda %1; RCP8.5 altında ise 2040'larda %9, 2090'larda %2 civarında artış öngörülmüştür. Mekansal analizlerde, yağış değişimi 2040'larda RCP4.5 için -3% ila +27%, RCP8.5 için ise -3% ila +44% arasında değişim göstermiştir. Ayrıca, yıllık yüzey akışı ve toplam su veriminin gelecekte artacağı; ancak kar erimesi, buzul erimesi, yeraltı suyu beslenimi, süblimasyon ve infiltrasyon oranlarında düşüş yaşanacağı ortaya konmuştur. Tang-i-Gulbahar ve Shukhi istasyonlarında yıllık akım zirvelerinin Mayıs–Haziran'dan Mart–Nisan'a, Tang-i-Saidan istasyonunda ise Nisan'dan Mart'a geri kaydığı tespit edilmiştir. Ayrıca, hem gerçek hem de potansiyel evapotranspirasyon değerlerinin artacağı, bununla birlikte karla beslenen akarsularda akım hacmi ve zamanlamasında önemli değişimlerin olacağı ve bu durumun tarım, şehir içme suyu ve hidroelektrik üretiminde risk oluşturabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Alawi & Özkul (2023), Afganistan'ın Kabil şehrinin kuzeybatısında yer alan Shakardara havzasında, veri yetersizliğinin yoğun olduğu bölgelerde hidrolojik modelleme süreçlerinde kullanılabilecek uydu tabanlı yağış verilerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla SWAT modeli ile kapsamlı bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, gelişmekte olan ülkelerde sıkça karşılaşılan yer tabanlı meteorolojik veri eksikliği sorununa çözüm olarak önerilen üç farklı uydu temelli veri seti

(TRMM_3B42, CHIRPS_v2 ve NASA POWER) karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Modelleme süreci, her bir veri seti için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş; modelin kalibrasyon ve validasyonu ise gözlemsel akarsu debisi verileri üzerinden yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, TRMM_3B42 veri seti, bölgenin hidrolojik modellemesine en uygun ve en doğru sonuçları sağlayan uydu ürünü olarak belirlenmiş; CHIRPS_v2 ve NASA POWER verilerine kıyasla daha yüksek uyum ve daha düşük hata oranları ile çalışmıştır. Bu doğrultuda araştırmacılar, özellikle iklim değişikliği ve su krizi koşullarında su yapılarının planlamasında uydu tabanlı veri kaynaklarının SWAT modeli ile birlikte kullanılmasının etkili bir yöntem sunduğu sonucuna ulaşmıştır. Çalışma, yalnızca Shakardara Havzası özelinde değil, veri yoksunu tüm yarı kurak ve dağlık alanlarda geçerli olabilecek alternatif veri kaynaklarıyla modelleme yapılabileceğini göstermiş ve bölgedeki hidrolojik çalışmalar için uygun veri seti seçiminin model doğruluğu üzerindeki kritik rolüne dikkat çekmiştir.

Alawi & Özkul (2023) yaptıkları diğer çalışmada ise Amu Derya Nehri havzasının bir alt havzası olan Kokcha Havzası'nda, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla SWAT modeli kullanarak ayrıntılı bir iklim senaryosu analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada, geleceğe yönelik projeksiyonlar RCP4.5 ve RCP8.5 salım senaryoları altında 2050–2059 ve 2090–2099 dönemleri için hazırlanmış; bu doğrultuda iklim verileri, CMIP5 kapsamında geliştirilen MIROC5 iklim modeli kullanılarak elde edilmiştir. Senaryo analizleri sonucunda, RCP4.5 altında 2050–2069 döneminde sıcaklıkların 2.47°C ve 2.85°C arttığı, RCP8.5 senaryosunda ise 2080–2099 döneminde artışların 3.38°C ile 5.51°C arasında değiştiği hesaplanmıştır. Aynı senaryolara göre yağış miktarlarında belirgin düşüşler gözlemlenmiş; RCP4.5 altında sırasıyla %30 ve %17.17, RCP8.5 altında ise %9.28 ve %4.52 oranlarında azalma yaşanacağı öngörülmüştür. Ayrıca, geçmişte Mayıs ayında gözlemlenen yıllık akım zirvesinin gelecek projeksiyonlarda bir ay öne kayarak Nisan'a çekildiği; buna ek olarak, özellikle Temmuz yağışlarıyla ilişkili ikinci bir akım zirvesinin oluşmaya başladığı ortaya konmuştur. RCP4.5 senaryosuna göre toplam yüzey akışında %54.56 ve %25.98 oranında, RCP8.5 senaryosuna göre ise %29.18 ve %6.45 oranında azalma gerçekleşeceği belirlenmiştir. Bu değişimlerin hem akarsuların taşıma kapasitesini hem de sulama, içme suyu ve enerji üretimi gibi sektörleri doğrudan etkileyebileceği belirtilmiş; çalışma, özellikle Kokcha Havzası gibi yarı kurak bölgelerde iklim değişikliğine duyarlı su yönetim stratejilerinin

geliştirilmesi gerektiğisonucuna ulaşmıştır. Modelleme bulguları, mevsimsel akım rejimlerinin bozulmaya başladığını, ikincil akım zirvelerinin artan ekstrem yağışlara bağlı oluşabileceğini ve bu nedenle uyarlamalı su yönetiminin kritik hale geldiğini vurgulamıştır.

Shams, Khan, Haleem ve Mahmood (2024), Afganistan'daki Kokcha Nehri üzerinde, iklim ve arazi kullanımı değişikliklerinin taşkın tekrarlanma sıklığı üzerindeki bileşik etkilerini değerlendirdikleri çalışmalarında, 2010–2021 dönemine ait verileri temel alarak 2088–2099 projeksiyon dönemine kadar uzanan kapsamlı bir senaryo analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada kullanılan model, sapma düzeltmesi uygulanarak sıcaklık ve yağış simülasyonlarında yüksek doğruluk sağlamış; model performansı NSE değerleri açısından 0.9 ve 0.69, R^2 açısından ise 0.92 ve 0.78 olarak belirlenmiştir. Geleceğe yönelik akım simülasyonları, taşkınların oluşumunda esas belirleyici etkenin iklim değişikliği olduğunu ortaya koymuş ve bu değişkenin toplam varyans üzerindeki etkisi %101.1 olarak hesaplanırken, arazi kullanım değişikliklerinin katkısı −%1.1 ile sınırlı kalmıştır. Modelleme sonuçları, ilerleyen dönemlerde yağış, ortalama sıcaklık ve akım düzeylerinde kademeli bir düşüş eğilimi yaşanacağını göstermiştir. Ayrıca, 10, 50, 100, 200 ve 500 yıllık tekrar sürelerine göre taşkın frekansı analizleri yapılmış ve farklı senaryolar altında çeşitli büyüklükte taşkınların meydana gelme olasılığı ortaya konmuştur. En yüksek akım artışlarının her iki senaryoda da sıcaklık ve yağış kombinasyonlarının etkisiyle oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda çalışma, özellikle iklim değişikliğine uyum sağlayan ve dirençli arazi kullanım politikalarının geliştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmış; sürdürülebilir su kaynakları yönetimi açısından taşkın riskinin azaltılmasına yönelik önlemlerin önceliklendirilmesini önermiştir. Bulgular, bölgedeki su yönetimi politikalarının iklim temelli yeniden yapılandırılması gerektiğine işaret eden güçlü bilimsel kanıtlar sunmuştur.

Akhundzadah (2024), Afganistan'ın beş ana nehir havzasında, 1980–2022 yılları arasındaki ortalama yıllık sıcaklık, yağış ve akarsu debisi eğilimlerini değerlendirdiği çalışmasında, iklim değişikliğinin ülkedeki su kaynaklarına yönelik sistematik etkilerini ortaya koymuştur. Bu amaçla, İnovatif Eğilim Analizi (ITA), Mann–Kendall testi (MK) ve Sen'in Eğim Tahmini (SS) gibi ileri düzey istatistiksel yöntemleri kullanarak, iklimsel veriler CRU TS v4 ve TerraClimategridded veri setlerinden, debi

verileri ise GloFAS-ERA5 veri tabanından elde edilmiştir. Analizler sonucunda, Afganistan genelinde ortalama yıllık sıcaklıkta 1.5°C'lik belirgin bir artış tespit edilmiş; bu artış, küresel ortalamanın (1.3°C)üzerinde gerçekleşmiştir. Aynı dönemde, yıllık ortalama yağış miktarında 1.2 mm'lik azalma ve nehir debilerinde toplamda −128 m^3/s'lik düşüş olduğu belirlenmiştir. Bu değişimlerin özellikle ülkenin batı kesiminde daha yoğun hissedildiği vurgulanmıştır. Sıcaklık artışı, yağış azalışı ve akım miktarındaki düşüş gibi eğilimler, tarım, ekosistem dengesi ve genel su yönetimi açısından ciddi tehditler oluşturmuş; bu durum Afganistan'ın iklim değişikliğine karşı son derece kırılgan bir hidrolojik yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Araştırmacı, mevcut eğilimlerin gelecekteki su temini, tarımsal üretim ve bölgesel refah üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini belirterek, iklim kaynaklı riskleri azaltmaya yönelik adaptif yönetim stratejilerinin ivedilikle geliştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Ayoubi, Reinhardt-Imjela & Schulte (2024), Batı Hindukuş Bölgesi'nde yer alan Üst Kabul Nehri Havzası'nda (UKRB) iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla 2009–2019 yılları arasında SWAT modeli kullanarak bir hidrolojik model geliştirmiştir. Modelin kalibrasyonu 2010–2016 döneminde altı akım istasyonuna ait aylık verilere dayanarak gerçekleştirilmiş, 2017–2018 dönemindeki verilerle validasyonu yapılmıştır. Model performansı NS değerleri bakımından 0.54 ile 0.91 arasında değişen başarılı sonuçlar üretmiş ve 95% Tahmin Belirsizliği (Prediction Uncertainty) (95PPU) ile belirsizlik analizi yapılmıştır. SWAT-CUP yazılımı ile duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve model parametreleri optimize edilmiştir. Geleceğe yönelik projeksiyonlar, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında 2040'lar (2030–2049) ve 2090'lar (2080–2099) dönemleri için dört farklı bölgesel iklim modeli (RCMs) kullanılarak ve lineer ölçekleme yöntemi ile sapma düzeltmesi uygulanarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, hem 2040'larda hem de 2090'larda yıllık ortalama yağış miktarının artacağı (RCP4.5 senaryosunda sırasıyla %5 ve %1; RCP8.5 senaryosunda ise %9 ve %2 oranlarında) ve buna bağlı olarak yüzey akış miktarlarında da artış yaşanacağı belirlenmiştir. Ancak bu artış, daha erken kar erimesi nedeniyle akım piklerinin mevsimsel olarak öne kaymasına neden olmuş; bu durumun özellikle yaz aylarında suya erişimi zorlaştırarak su stresini artırabileceği, kış ve ilkbaharda ise akımların yükselmesine yol açacağı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, gelecek yıllarda evapotranspirasyon oranlarında artış, buna karşın kar yağışı, kar erimesi, süblimasyon ve yeraltı suyu yenilenme miktarlarında azalma yaşanacağı

öngörülmüştür. Dolayısıyla çalışma, UKRB özelinde iklim değişikliğinin su döngüsünün bileşenlerini hem nicelik hem de zamanlama açısından önemli ölçüde etkilediğini ortaya koyarak, bu hassas bölge için stratejik su yönetimi politikalarının iklim temelli olarak yeniden yapılandırılması gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Mujeeb, Safi & Shirzad (2025), Afganistan'ın yarı kurak Maidan alt havzasında, özellikle Tang-i-Sayedan istasyonu temelinde yürüttükleri çalışmalarında, iklim değişikliğinin akarsu akımları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla SWAT modelini kullanmışlardır. Araştırma, ülkenin su kaynakları açısından en kırılgan bölgelerinden biri olan Maidan Havzası'nda, gelecekteki iklim değişkenliklerinin akım rejimleri üzerinde yaratacağı baskıları ortaya koymayı hedeflemiştir. 2012 Küresel Uyum Endeksi'ne göre iklim değişikliğine karşı en hassas ülkeler arasında yer alan Afganistan özelinde yapılan bu çalışmada, yüzey akımının yüzyıl sonuna kadar yaklaşık %12.54 ile %21.23 arasında azalacağı tahmin edilmiştir. Bu öngörü, özellikle sulamaya dayalı tarımsal üretime bağımlı olan bölgede, su temininde yaşanacak zorlukların gıda güvenliğini ve kırsal geçim kaynaklarını tehdit edebileceğine işaret etmiştir. Modelleme süreci, yerel çevresel faktörlerle iklimsel değişkenler arasındaki hassas ilişkiyi göz önüne alarak, bölgedeki hidrolojik dengenin iklimsel streslere karşı son derece duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar bu bulgular doğrultusunda, iklim öngörülerini dikkate alan uyarlanabilir ve sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin önceliklendirilmesi gerektiğini vurgulamış; yerel toplulukların bu sürece aktif biçimde dahil edilmesinin, iklim değişikliğine karşı direnci artırarak tarımsal üretimin ve su arzının güvence altına alınmasında kritik bir rol oynayacağını savunmuştur.

Literatürde görüldüğü üzere, Afganistan'daki farklı nehir havzalarında gerçekleştirilen çok sayıda çalışma, SWAT ve ArcSWAT modellerinin hem mevcut su kaynaklarının yönetiminde hem de iklim değişikliği senaryoları altında gelecekteki akım tahminlerinde etkin araçlar olduğunu ortaya koymuştur. Gerek kar erimesi (Rasouli et al., 2015), gerekse buzul rejimi (Ayoubi, 2024) ve yüzey akışı bileşenleri (Tanı, 2020; Ayoubi & Dongshik, 2016) açısından yapılan modellemelerde yüksek determinasyon katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (NSE) ve düşük PBIAS değerleri elde edilerek modelin güvenilirliği vurgulanmıştır. Ayrıca SWAT-CUP arayüzü ile gerçekleştirilen hassasiyet ve belirsizlik analizleri, yeraltı suyu, kar

erimesi, evapotranspirasyon ve eğim gibi parametrelerin hidrolojik model çıktıları üzerindeki kritik etkisini ortaya koymuştur (Tanı & Tayfur, 2023; Hussainzada & Lee, 2021). İklim projeksiyonlarıyla desteklenen çalışmalar ise, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında sıcaklık artışı, yağış belirsizliği, akım zamanlamasında kaymalar ve akım miktarlarında düşüşler gibi eğilimleri tespit ederek (Alawi & Özkul, 2023; Ayoubi, Reinhardt-Imjela & Schulte, 2024), su yönetim stratejilerinin gelecekteki riskleri dikkate alarak uyarlanması gerektiğini savunmuştur. Panjshir, Ghurband ve Kokcha gibi alt havzalarda yürütülen istasyon bazlı validasyonlar, modelin yerel düzeyde detaylı sonuçlar üretebildiğini ve kırsal alanlar için su bütçesi oluşturma, sulama planlaması ya da taşkın kontrolü gibi uygulamalarda bilimsel zemin sağladığını göstermiştir (Bromand, 2015; Shams, Khan, Haleem & Mahmood, 2024; Hussainzada & Lee, 2022). Bu bağlamda, mevcut çalışmamızın Panjshir Havzası özelinde ArcSWAT ve SUFI-2 algoritmasıyla gerçekleştirdiği detaylı kalibrasyon/validasyon süreci, hem literatürdeki boşlukları tamamlayıcı nitelikte hem de iklim ve coğrafi açıdan hassas kabul edilen bu bölge için sürdürülebilir su kaynakları yönetimine katkı sunacak özgün bir yaklaşım oluşturmaktadır.

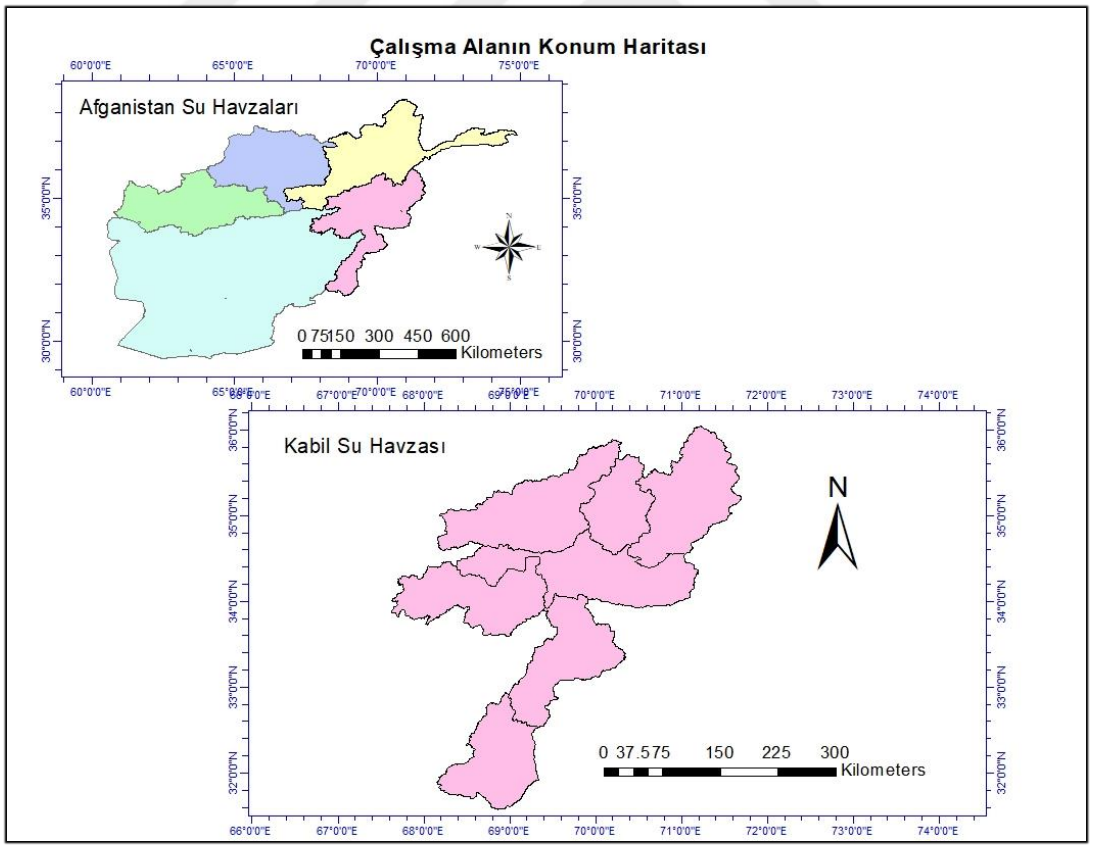
İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

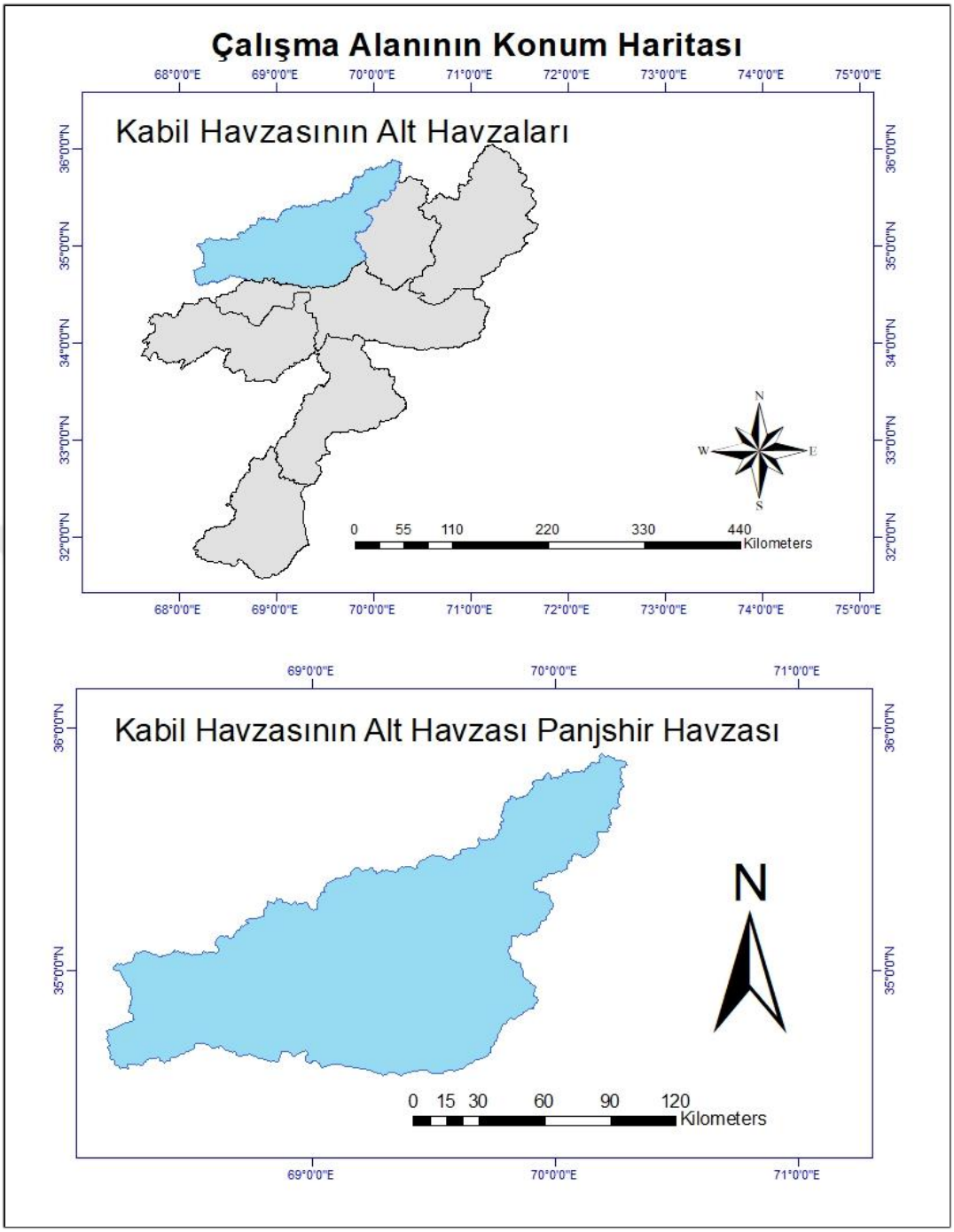
2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmanın uygulama alanı, Afganistan'ın doğusunda yer alan Panjshir Alt Havzasıdır. Panjshir, ülkenin beş ana hidrolojik havzasından biri olan Kabul Havzasının bir alt havzası olup, yaklaşık 13.000 km² yüzölçümüne sahiptir. Kabul Havzası; ülkenin doğu, kuzeydoğu ve merkezi bölgelerini kapsayan, hidrolojik açıdan stratejik öneme sahip bir alandır. Panjshir ise bu havzanın kuzeydoğusunda yer almakta ve topoğrafik yapısı, akarsu ağı ve karla kaplı yüksek dağları ile dikkat çekmektedir.

Aşağıdaki haritadalar, Afganistan genelindeki ana hidrolojik havzalar gösterilmekte olup, çalışma alanı olan Panjshir Alt Havzası, Kabul Havzası sınırları içerisinde açık renk ile gösterilmiştir:



Şekil 1. Afganistan su havzaları: Kabil havzası'nın alt havzaları



Şekil 2. Çalışma alanı, Kabil havzası'nın Panjshir alt havzası

Panjshir Havzası, özellikle kar erimesine bağlı yüzey akışlarının yoğun olduğu dönemlerde su üretimi açısından yüksek potansiyele sahiptir. Bu nedenle havza, bölgedeki akarsu rejiminin modellenmesi ve su kaynakları yönetimi açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir.

2.2. Veri Toplama

Panjshir alt havzasında gerçekleştirilen bu çalışmada, SWAT modelinin güvenilir biçimde çalışabilmesi için hem mekânsal hem de zamansal nitelikli veri setleri titizlikle derlenmiştir. Modelde kullanılacak meteorolojik ve hidrolojik girdilerin süreklilik göstermesi, özellikle kalibrasyon ve validasyon süreçlerinin başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, modelleme dönemi olarak 2009–2017 yılları arası seçilmiş; yalnızca bu döneme ait eksiksiz ve güvenilir veriler sisteme entegre edilmiştir. Meteorolojik veriler kapsamında 7 istasyondan yağış ve sıcaklık bilgileri elde edilmiş; hidrolojik veriler ise 4 farklı akım gözlem istasyonundan temin edilmiştir. Meteorolojik verilerin yalnızca yağış ve sıcaklık değişkenleri ile sınırlandırılması, Afganistan'daki ölçüm altyapısının sınırlılığına dayanmaktadır. Bununla birlikte, elde edilen veri setleri, modelleme süreci için yeterli sürekliliğe ve mekânsal temsiliyete sahiptir. Benzer veri sınırlılıkları, daha önce Afganistan'da gerçekleştirilen birçok hidrolojik modelleme çalışmasında da görülmüş ve bu gibi durumlarda model performansının optimize edilebileceği ortaya konmuştur (Hejran et al., 2020; Rasouli et al., 2015). Ayoubi & Dongshik (2016) tarafından yürütülen araştırmada da sınırlı sayıdaki istasyon verisiyle Panjshir ve Ghurband havzalarında SWAT modeli başarıyla uygulanmıştır. Bu doğrultuda mevcut çalışmanın veri temini yöntemi, literatürde kabul gören ve sınırlı gözlem ağına sahip yarı kurak havzalar için önerilen uygulamalarla örtüşmektedir.

2.2.1. Meteorolojik Veriler

ArcSWAT modellemesi için gerekli olan meteorolojik veriler arasında yağış, sıcaklık, bağıl nem, rüzgar hızı ve güneşlenme süresi yer almaktadır. Ancak saha koşullarındaki ölçüm kısıtlılıkları nedeniyle sadece yağış ve sıcaklık verileri 2008–2020 dönemi için temin edilebilmiştir. Panjshir Havzası'na ait 7 meteoroloji istasyonuna ait günlük yağış ve sıcaklık verileri içerisinde yalnızca 4 istasyon için 2008–2017 dönemi eksiksiz ve kullanılabilir bulunmuştur. Bu nedenle modelin giriş verileri bu döneme göre sınırlandırılmıştır.

2.2.2. Hidrolojik Veriler

Yüzey akışının tahmini ve modelin kalibrasyonu için 4 hidrolojik istasyondan elde edilen günlük debi verileri değerlendirilmiştir. Yapılan ön incelemeler sonucunda, yalnızca 2009–2017 yılları arasındaki verilerin kalibrasyon ve validasyon için yeterli süreklilikte olduğu belirlenmiştir. Buna göre:

• 2009 yılı modelin ısıtma periyodu olarak,

• 2010–2014 arası kalibrasyon dönemi olarak,

• 2015–2017 arası ise validasyon dönemi olarak tanımlanmıştır.

2.3. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)

Havza modellemesinde, yüzey akışı ve yönlendirmelerin gerçekçi biçimde belirlenebilmesi için Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) kritik bir temel veri seti olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, Panjshir alt havzasının topografik özelliklerini yansıtmak amacıyla 30 metre çözünürlükteki SRTM DEM verileri kullanılmıştır. DEM katmanı, havzanın otomatik olarak alt havzalara bölünmesinden, akım yönlerinin ve drenaj ağının tanımlanmasına, eğim sınıflarının belirlenmesinden HRU ayrıştırılmasına kadar modelleme sürecinin tüm aşamalarında aktif olarak kullanılmıştır. Ayrıca Panjshir Havzası'nın dağlık yapısını daha hassas temsil edebilmek amacıyla yükseklik zonlaması uygulanmış ve HRU'lar 15 farklı rakım bandına göre sınıflandırılmıştır.

DEM verisi, modelleme sürecinde aşağıdaki işlemlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır:

• Havza ve alt havza sınırlarının belirlenmesi,

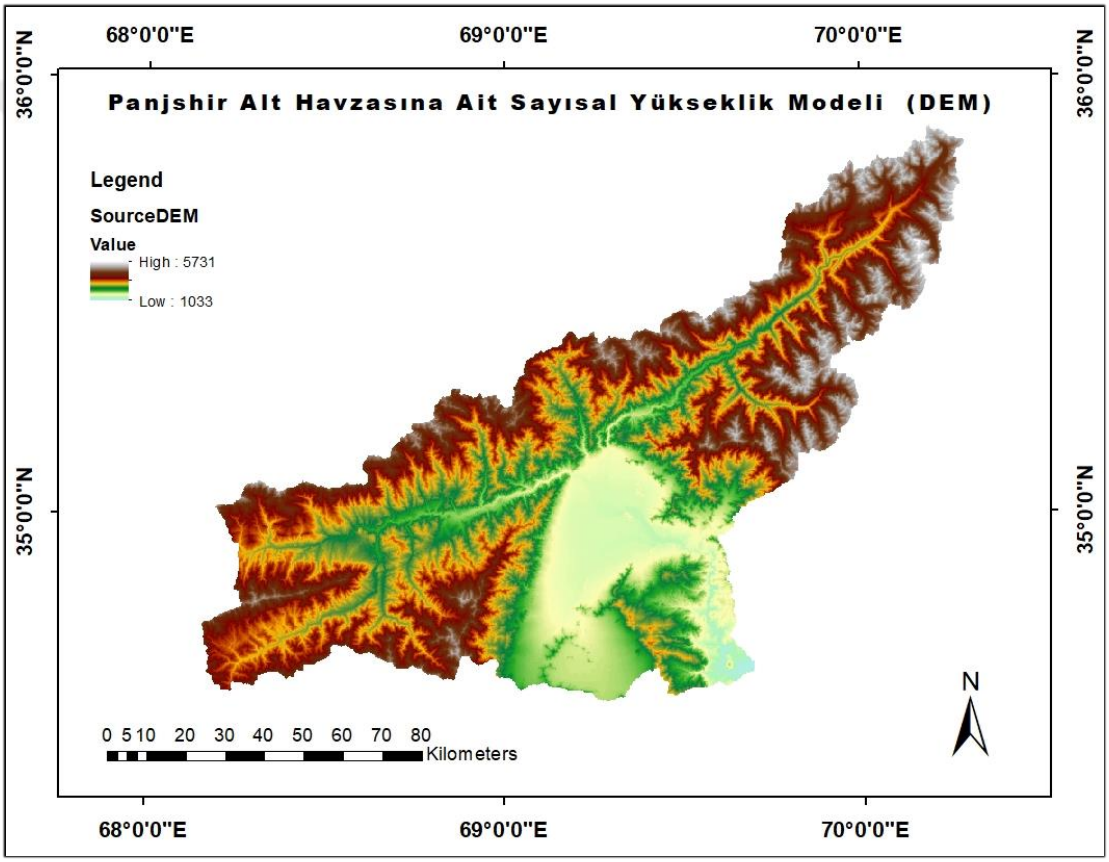
• Yüzey eğimi, akım yönü ve akım birikimi hesaplamaları,

• Drenaj ağı, çıkış noktası ve rezervuar konumlarının tanımlanması,

• Yükseklik bantlarının oluşturularak HRU'lara dikey farklılıkların yansıtılması.

DEM verilerinin bu şekilde kullanımı da önceki birçok çalışmada model hassasiyetini artırıcı bir unsur olarak değerlendirilmiştir. Özellikle Tanı & Tayfur (2023), Kabil Nehri Havzası'nda yaptıkları çalışmada, DEM temelli yükseklik

analizlerinin yüzey akışı üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamıştır. Hussainzada & Lee (2021) tarafından yürütülen modelleme sürecinde de DEM'in doğru tanımlanması, eğim değişimlerinin yüzey akış üretimine etkisinin gerçekçi biçimde temsil edilmesini sağlamıştır. Bu nedenle mevcut çalışmada DEM üzerinden yapılan topografik detaylandırma, sadece havza sınırlarının değil; aynı zamanda kar erimesine dayalı akım rejiminin de fiziksel doğruluğunu destekleyici bir rol oynamaktadır (Ayoubi et al., 2024). Aşağıda Panjshir Alt Havzasına ait DEM verisi kullanılarak ArcGIS ortamında oluşturulan yükseklik dağılım haritası sunulmuştur.

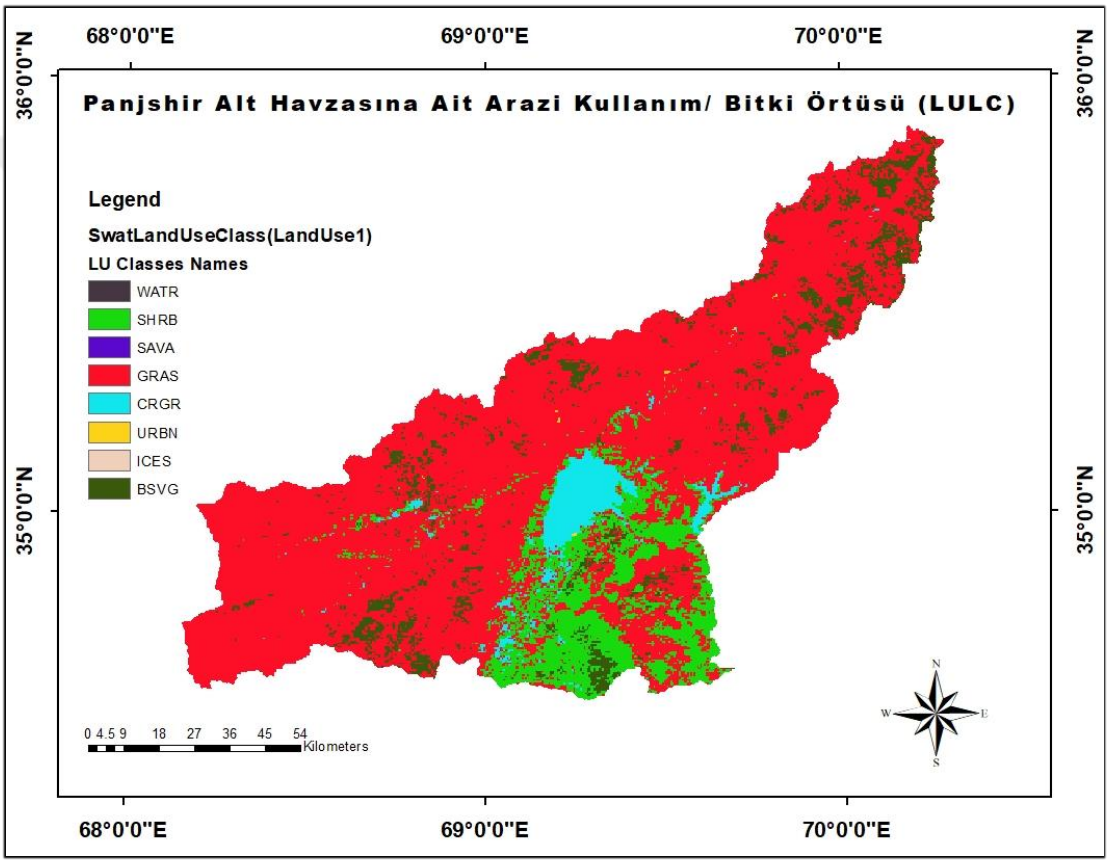


Şekil 3. Panjshir Alt Havzasına Ait Yükseklik Dağılım Haritası

DEM verisi üzerine inşa edilen bu topografik yapı, modelin yüzey akışı ve akarsu yönlendirmelerini hassasiyetle hesaplamasına olanak tanımış; havzanın hidrolojik dinamiklerinin gerçekçi şekilde simüle edilmesini sağlamıştır.

2.4. Arazi Kullanımı / Bitki Örtüsü (LULC)

SWAT modeli, havza bazlı hidrolojik modellemelerde yüzey koşullarını tanımlayabilmek için arazi kullanımı ve bitki örtüsü (LULC) verilerini temel parametrelerden biri olarak kullanmaktadır. Panjshir Alt Havzası için güncel ve doğrulanmış arazi kullanım haritaları mevcut olmadığından, bu çalışmada MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) uydu görüntülerine dayalı olarak üretilmiş hazır LULC veri seti kullanılmıştır. Aşağıdaki harita Panjshir Alt Havzası için kullanılan LULC veri setinin görsel temsilini sunmaktadır.

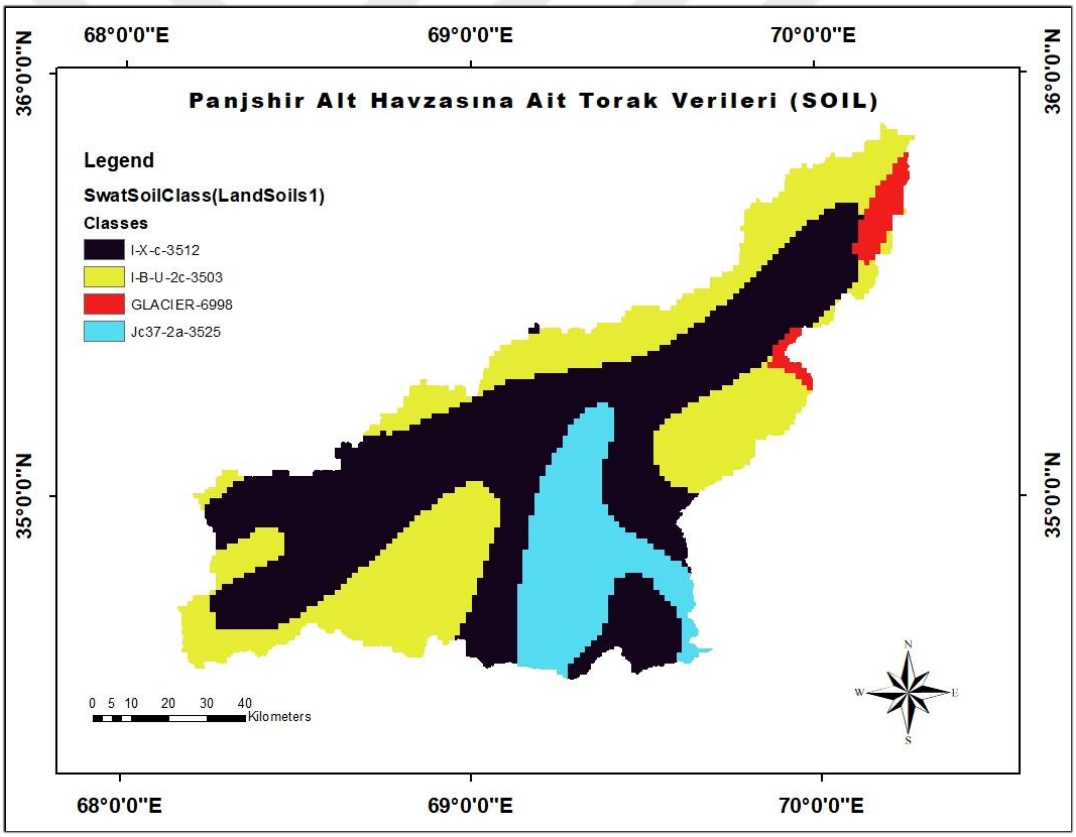


Şekil 4. Panjshir Alt Havzasına Ait LULC Veri Seti

Bu sınıflandırma sayesinde modelin her bir HRU'nun hidrolojik davranışını belirlerken arazi kullanımının etkilerini doğru biçimde yansıttığı öngörülmüştür. Özellikle tarım alanlarının bulunduğu alt havzalarda yüzey akışı artış gösterirken, ormanlık alanların yoğun olduğu bölgelerde yer altı suyu beslenmesinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

2.5. Toprak Verileri (SOIL)

SWAT modelinin temel fiziksel bileşenlerinden biri olan toprak verileri, yüzey akışı, infiltrasyon, yer altı suyu hareketi ve buharlaşma süreçlerinin modellenmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Panjshir alt havzasına ait detaylı yerel toprak haritaları mevcut olmadığından, bu çalışmada FAO Global Soil Map veritabanından elde edilen hazır toprak sınıflandırma katmanı kullanılmıştır. Modelleme kapsamında kullanılan toprak verileri; geçirgenlik, hidrolik iletkenlik, su tutma kapasitesi ve drenaj sınıfıgibi parametrelere dayalı olarak sınıflandırılmıştır. Panjshir Havzası içerisinde yer alan toprak yapısı, modelleme sırasında dört ana toprak sınıfına ayrılmıştır. Bu sınıflar; havzanın farklı hidrolojik tepkilerini tanımlayacak şekilde gruplandırılmıştır.



Şekil 5. Panjshir Alt Havzasına Ait Toprak Sınıflandırma Haritası

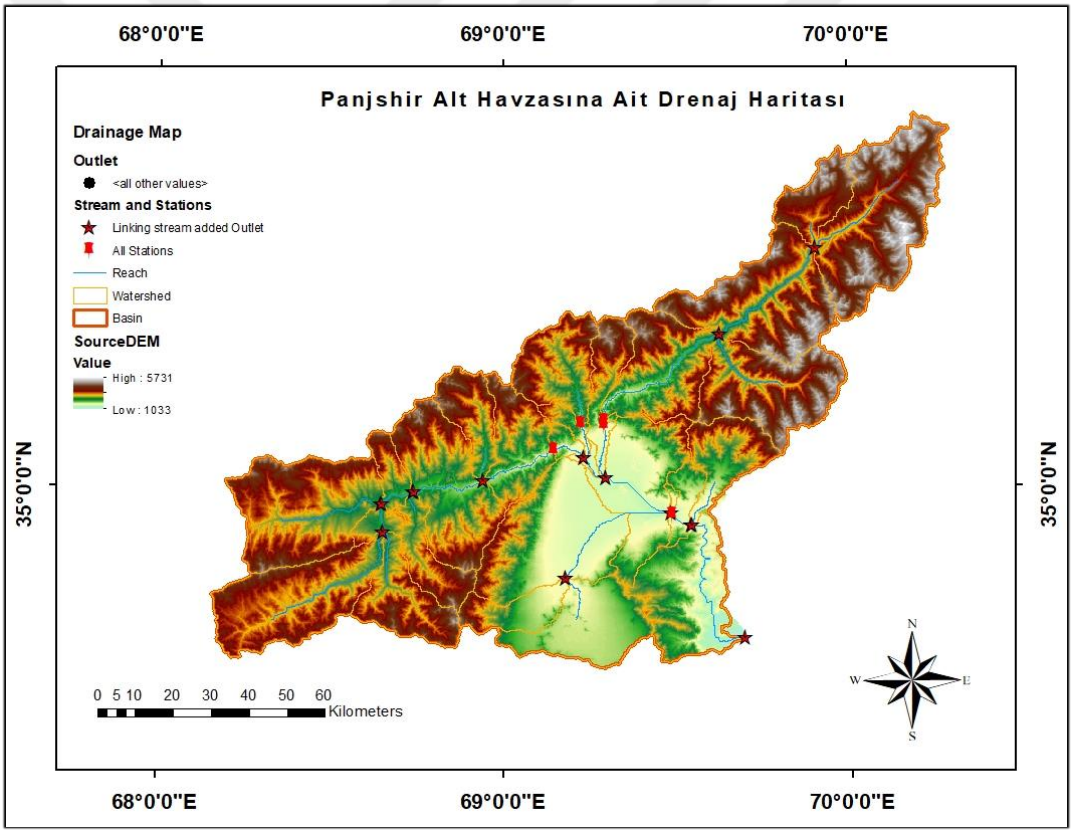
Yukarıda çalışma sahasına ait SWAT arayüzünde oluşturulmuş toprak sınıflandırma haritası yer almaktadır. Toprak sınıfları modeldeki HRU'ların hidrolojik tepkilerini doğrudan etkilediği için her HRU'nun toprak yapısı, model tarafından ayrı ayrı değerlendirilmiş ve sonuçlara dahil edilmiştir

2.6. SWAT Modeli

SWAT modeli geniş ölçekli ve karmaşık havzalarda kullanılabilen, yarı dağılımlı, sürekli ve fiziksel tabanlı bir hidrolojik modeldir Oldukça kapsamlı bir model olan SWAT, çok parametreli olduğu için fiziksel yapısının yanında kavramsal bir yöne de sahiptir.

2.6.1. Modelin Uygulanması

Panjshir alt havzasına yönelik yapılan bu çalışmada, yüzey akışı (discharge) modellemesi için SWAT hidrolojik modelinden yararlanılmıştır. Modelleme sürecinin ilk aşaması, çalışma alanına ait tüm fiziksel girdilerin sistematik bir biçimde hazırlanarak SWAT'ın giriş formatına uygun hale getirilmesidir.



Şekil 6. Panjshir alt havzasına Ait ArcSWAT / ArcGIS Model Entegrasyonu

Bu doğrultuda sayısal yükseklik modeli (DEM), arazi kullanımı/bitki örtüsü (LULC) ve toprak türü (SOIL) katmanları temel mekânsal veri setlerini oluşturmuştur. Yukarıdaki görselde, model kurulumu için kullanılan tüm veri katmanlarının ArcSWAT/ArcGIS ortamındaki entegrasyonu gösterilmektedir. Haritada alt havzalar,

akım yönü, LULC, toprak sınıfları ve eğim analizleri aynı çerçevede görselleştirilmiştir

2.6.2. Modelleme Süreci ve Zamanlama

SWAT modelinde fiziksel altyapının tanımlanmasının ardından, model ısıtma, kalibrasyon ve validasyon aşamalarına geçilmiştir. Model veri periyodu ve işlem adımları şu şekildedir:

• Model Veri Periyodu: 2008–2017

• Isıtma Periyodu: 2009–2010 (1 su yılı)

• Kalibrasyon Dönemi: 2010–2014 (5 su yılı)

• Validasyon Dönemi: 2015–2017 (3 su yılı)

Modelleme hem aylık hem de günlük zaman adımıyla çalıştırılmış ve SWAT-CUP üzerinden kalibrasyon-validasyon döngüleri gerçekleştirilmiştir.

2.6.3. Alt Havza ve HRU Tanımlamaları

ArcSWAT arayüzü kullanılarak yapılan işlemde çalışma havzası, otomatik olarak alt havzalara ayrılmış ve ardından her alt havza kendi içinde Hydrologic Response Unit (HRU)'lara bölünmüştür. HRU'lar; toprak tipi, arazi kullanımı ve eğim sınıfının birleşimiyle oluşturulmuştur. Ayrıca modelde topografik farklılıkların daha iyi temsil edilebilmesi amacıyla HRU'lar 15 adet yükseklik bandı temelinde detaylandırılmıştır. Bu işlem, eğimin akış hızına etkisini ve karlı bölgelerde kar erimesine bağlı akışları daha hassas hesaplamaya olanak tanımıştır

2.6.4. Modelleme Performansı ve Devam Eden Süreçler

Başarılı biçimde çalıştırılan baz modelin ardından, parametrizasyon, hassasiyet analizi, kalibrasyon ve validasyon adımları gerçekleştirilmiştir. Modelin hidrolojik döngü içerisindeki bileşenleri (runoff, evapotranspirasyon, su yüzey akışı vb.) analiz edilerek sonraki bölümlerde detaylı tablolar ve grafiklerle raporlanmıştır. Modelden elde edilen sonuçlar, SWAT-CUP ile yapılan çoklu iterasyonlara dayalı SUFI-2 algoritması üzerinden değerlendirilmeye devam etmiş ve elde edilen akım tahminleri gözlem verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu analizlere ilişkin detaylar "Kalibrasyon ve Validasyon" bölümünde sunulmuştur.

2.6.5. Hidrolojik Döngü

Modelleme süreci sonucunda Panjshir alt havzasına ait yıllık ortalama hidrolojik döngü bileşenleri elde edilmiştir. SWAT model çıktıları; yağış, yüzey akışı, yer altı akışı, evapotranspirasyon ve sediman taşınımı gibi hidrometeorolojik süreçlerin bir bütün halinde analizine olanak tanımaktadır. Aşağıda yer alan şekil, model çıktılarından elde edilen yıllık su bütçesi bileşenlerini görsel olarak ifade etmekte ve yağışın havza içi davranışını katmanlar bazında göstermektedir.

Tablo 1. SWAT Modeli Yıllık Hidrolojik Su Bütçesi Tablosu (mm/yıl)

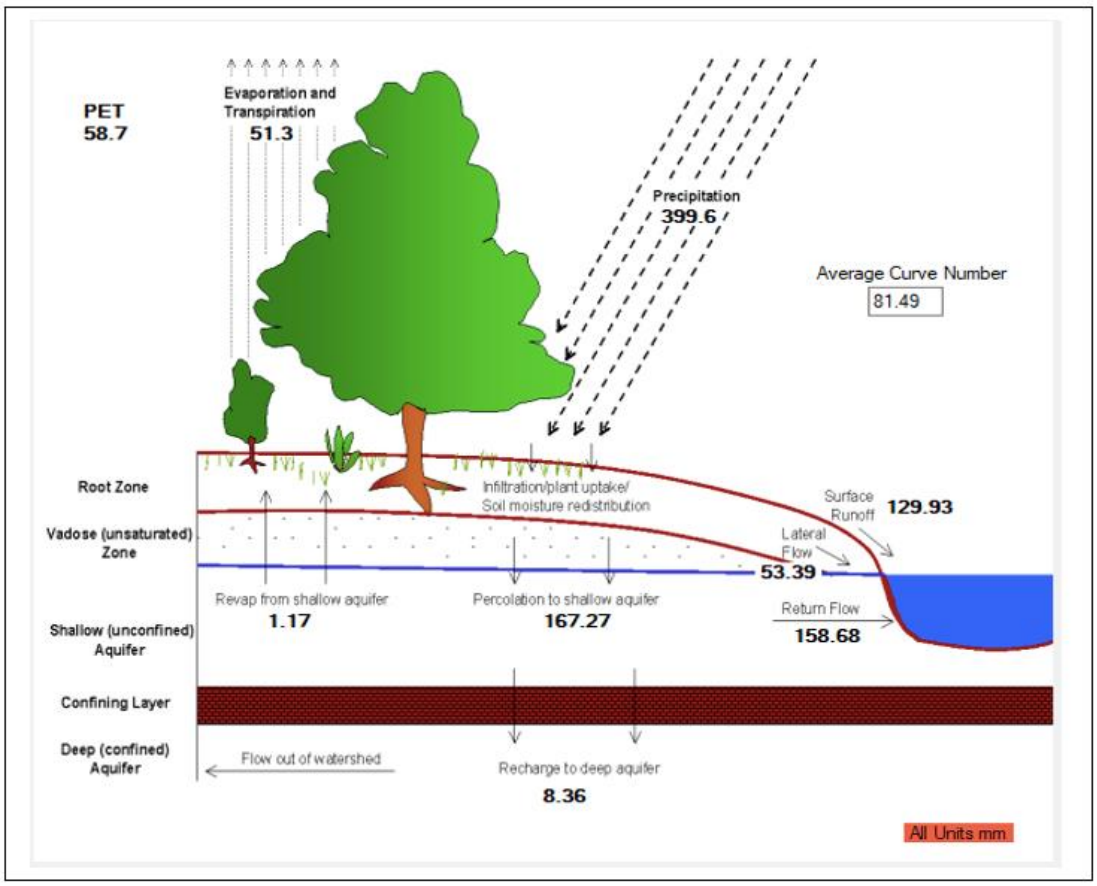
Bileşen	**Değer (mm)**
Yağış (Precipitation)	399.6
Potansiyel Buharlaşma (PET)	58.7
Gerçek Buharlaşma (ET)	51.3
Yüzey Akışı (Surface Runoff)	129.93
Lateral Akış	53.39
Geri Dönüş Akışı (Return Flow)	158.68
Sığ Akuifere Sızma	167.27
Derin Akuifere Sızma	8.36
Revap	1.17
Ortalama Curve Number (CN)	81.49

Tabloda görüldüğü üzere hidrolojik döngüdeki bu bileşenler, sadece yer altı ve yüzey akışını değil; aynı zamanda buharlaşma, sızma ve infiltrasyon gibi süreçlerin de bölgedeki su dengesindeki payını göstermektedir. Ortalama eğri numarası (Curve Number) değeri 81.49 olup, havzanın akışa duyarlılığının orta-yüksek seviyede olduğunu göstermektedir. Bu durum, bölgedeki arazi örtüsü ve toprak geçirgenliği ile uyumludur. SWAT modelinde yüzey akışının hesaplanmasında kullanılan Curve Number yöntemi, aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, için\ P > 0.2 \quad (1)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Burada Q, yüzey akış (mm), P, toplam yağış (mm), CN, Curve Number ve S, maksimum potansiyel su tutma kapasitesi (mm)'dir.



Şekil 7. Yıllık Su Bütçesi Bileşenleri

Hem şekilde hem de aşağıdaki tabloda görüldüğü üzere, yıllık ortalama toplam yağış 399.6 mm olup, bunun yaklaşık 129.93 mm'si yüzey akışı olarak çıkışa ulaşmaktadır. Geriye kalan suyun büyük bir bölümü toprak profilinden geçerek; sığ akifere süzülme (167.27 mm) ve geri dönüş akışı (158.68 mm) gibi alt yüzey bileşenlerine dağılmaktadır. Gerçekleşen evapotranspirasyon (51.3 mm) ile birlikte revap, yani sığ akiferden yukarıya doğru gerçekleşen nem dönüşümü 1.17 mm olarak kaydedilmiştir. Yıllık potansiyel evapotranspirasyon (PET) ise 58.7 mm olarak hesaplanmıştır.

Aşağıdaki tablo2 ise 2009–2017 dönemi arasında elde edilen aylık ortalama su bileşenlerini göstermektedir. Tablo2; yağış (Rain), kar (Snowfall), yüzey akışı (SURQ), yan akış (LATQ), toplam su verimi (Water Yield), buharlaşma (ET),

potansiyel buharlaşma (PET) ve sediman taşınımını (Sed. Yield) birlikte değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Tablo 2. Ortalama Aylık Havza Değerleri

Month	Rain (mm)	Snow Fall (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	Water Yield (mm)	ET (mm)	Sed Yield (t/ha)	PET (mm)
1	43.24	15.37	11.6	3.34	23.13	0.52	11.02	0.55
2	100.0	37.81	38.06	8.06	59.03	1.2	31.41	1.38
3	78.84	12.27	37.9	11.18	72.95	4.0	49.5	4.64
4	67.42	1.95	24.21	12.93	68.29	6.45	22.15	7.22
5	30.9	0.0	5.44	7.06	45.25	9.62	7.97	10.44
6	8.07	0.0	0.98	2.13	25.53	6.6	1.23	7.57
7	5.01	0.0	0.72	0.58	14.24	8.31	0.55	9.76
8	6.2	0.0	1.0	0.86	8.85	6.6	0.32	7.87
9	6.83	0.03	0.79	0.7	5.32	5.05	0.38	5.99
10	16.04	0.84	2.1	1.56	6.4	2.09	1.18	2.41
11	21.57	0.82	3.14	2.97	9.9	0.73	2.47	0.79
12	14.56	2.79	3.65	1.96	11.1	0.1	2.56	0.1

İlkbahar ve erken yaz aylarında yüksek yüzey akışı ve sediment taşınımı gözlemlenirken, yaz sonu ve sonbahar aylarında bu bileşenler önemli ölçüde azalmaktadır.

2.6.6. SWAT Modelinin Kalibrasyonu ve Validasyonu

SWAT modelinin Panjshir Alt Havzasına uygulanmasında kalibrasyon ve doğrulama işlemleri, SWAT-CUP yazılımı aracılığıyla otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. ArcSWAT içerisinde manuel kalibrasyon olanağı bulunsa da, çok parametreli yapılar ve belirsizlik analizlerinin entegre biçimde yürütülmesi açısından SWAT-CUP tercih edilmiştir. Model kalibrasyonu sürecinde, Sequential Uncertainty Fitting, Version 2 (SUFI-2) algoritması kullanılmıştır. SUFI-2, SWAT-CUP bünyesinde yer alan beş algoritmadan biridir ve su tahmini çalışmalarında en sık tercih edilen yöntemlerden biridir. Diğer algoritmalar arasında Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Genelleştirilmiş Olasılık Belirsizliği Tahmini (GLUE), Parametre Çözüm Algoritması (ParaSol) ve Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) yer almaktadır. SUFI-2 algoritması, kalibrasyon sürecinde tanımlanan parametrelerin alt ve üst sınırları arasında rassal kombinasyonlar oluşturarak SWAT modelini tekrar tekrar

çalıştırmakta ve simülasyon çıktılarının gözlemsel verilerle uygunluğunu değerlendirmektedir. Bu değerlendirme, özellikle belirsizlik analizinin iki temel göstergesi olan P_faktör (ölçülen verilerin yüzde kaçının %95 güven aralığında yer aldığı) ve R_faktör (bu güven aralığının genişliği) temelinde yürütülmektedir.

P_faktör, aşağıdaki denklemle hesaplanmakta ve simüle edilen akımın güven aralığı içerisinde kalan gözlemlerin oranını ifade etmektedir.

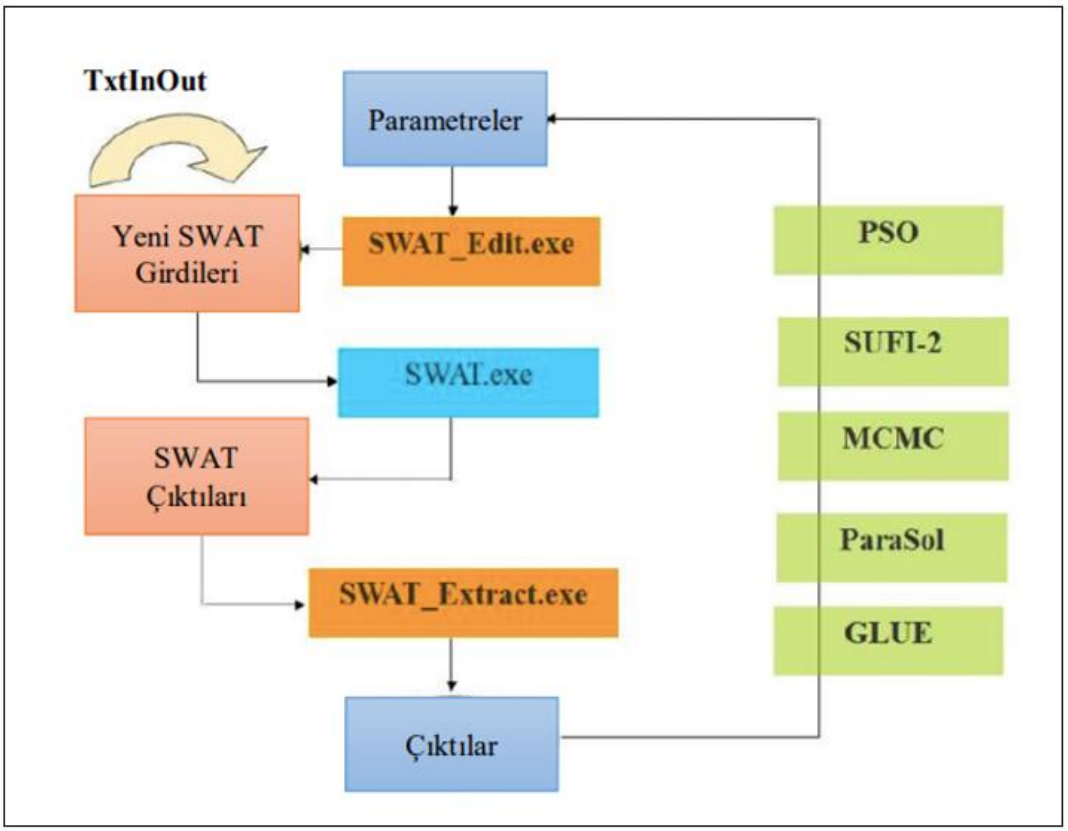
$$P_{faktör} = \frac{95PPU\ bandı\ içinde\ kalan\ gözlemlerin\ sayısı}{Toplam\ gözlem\ sayısı} \tag{3}$$

$R_{faktör}$ ise %95 güven aralığının genişliğini temsil etmekte ve aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır.

$$R_{faktör} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{UB_i - LB_i}{\sigma o_i} \tag{4}$$

Burada UB_i ve LB_i, simülasyonun i. zaman adımında üst ve alt sınırlarını, σo_i ise o andaki gözlem verisinin standart sapmasını ifade etmektedir.

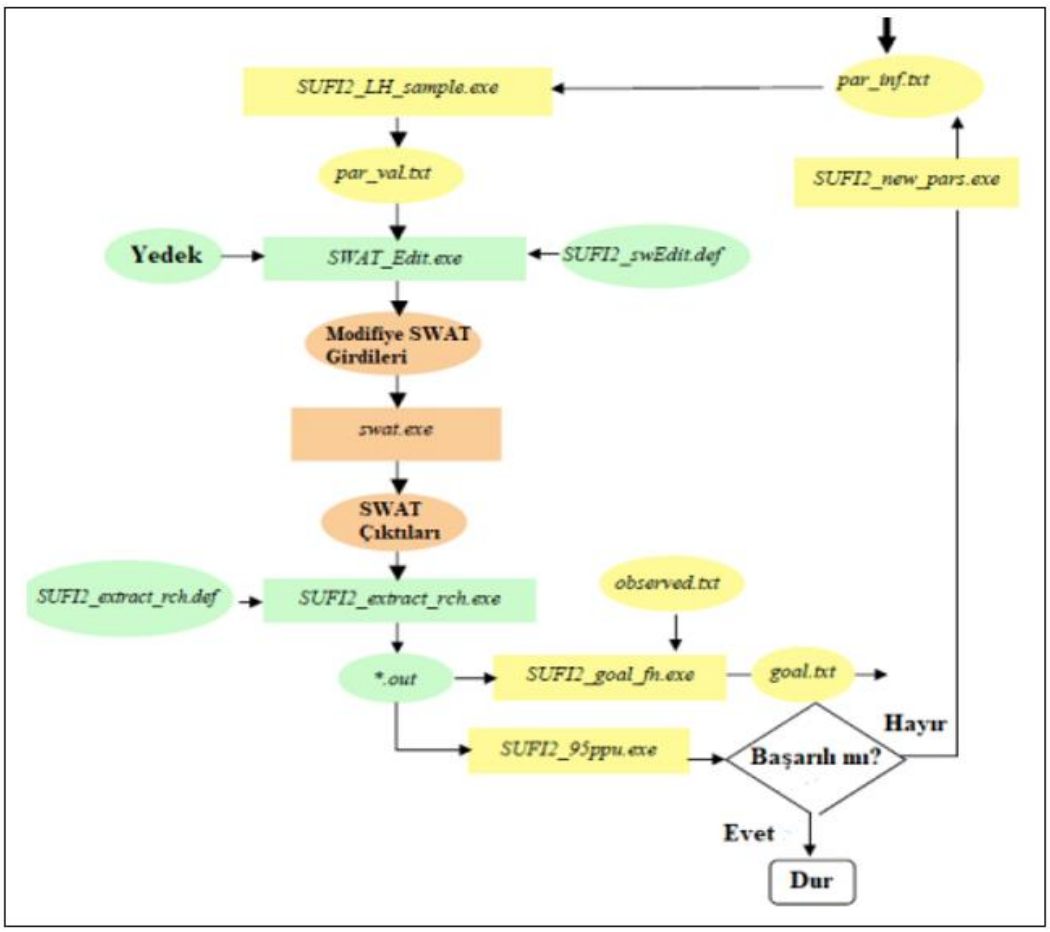
Akım tahmini için P_faktör'ün %70'in üzerinde, R_faktör'ün ise 1 civarında olması önerilmektedir (Abbaspour et al., 2015). Modelleme süreci Şekil a'da SWAT-CUP ile SWAT modeli arasındaki genel bağlantı mantığı ile görselleştirilmiştir. Girdilerden çıktılara kadar olan tüm işlemler TxtInOut dizininde yürütülmektedir. Parametre seti, SWAT_Edit.exe aracı ile yeni SWAT girdilerine uygulanmakta, SWAT.exe ile model koşturulmakta ve çıktılar SWAT_Extract.exe ile analiz edilmektedir. Her döngü sonunda elde edilen sonuçlar uygunluk kriterlerine göre değerlendirilerek algoritma yeniden çalıştırılmaktadır.



Şekil 8. SWAT-CUP ve SWAT Modeli Arasındaki Bağlantının Şematik Gösterimi

Aşağıdaki grafikte ise SUFI-2 algoritmasının kalibrasyon döngüsü detaylandırılmıştır. Bu süreçte modelin girdi parametreleri (.inf), varyasyonlar (.val), hedef dosyalar (.goal) ve gözlemsel veriler (.obs) döngüsel olarak işlenmekte; %95 güven aralığı içindeki en iyi sonuçlar belirlenmektedir. Kalibrasyon, tatmin edici doğruluk seviyelerine ulaşılana dek iteratif olarak sürdürülmektedir. Süreç, en uygun simülasyon çıktısının elde edilmesiyle sonlandırılır.

Modelin parametrizasyon aşamasında, özellikle kar erimesi ve yağış-sıcaklık değişim katsayıları (PLAPS, TLAPS)gibi parametreler sabitlenmiştir. Çünkü bu değişkenlerin SWAT içerisinde farklı hidrografik senaryoları doğrudan etkileyebileceği bilinmektedir. Özellikle yüksek dağlık bölgeleri kapsayan Panjshir Alt Havzası için karla kaplı alanların hidrolojik döngüdeki rolü kritik olduğundan, bu parametrelerin literatürle uyumlu biçimde sabitlenmesi modelin fiziksel tutarlılığı açısından önem arz etmektedir (Abbaspour et al., 2015).



Şekil 9. SUFI-2 Algoritmasının SWAT Modelini Kalibre Etme Süreci

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

KALİBRASYON VE VALİDASYON SONUÇLARI

3.1. Kalibrasyon ve Validasyon Uygulamaları

Dış kapak Model içerisinde 7 adet kar yağış ve erime sürecine dair parametre mevcuttur. SWAT modeli kapsamında kar yağışı, birikimi ve erimesi gibi kış mevsimine özgü hidrolojik süreçlerin temsil edilmesi, model performansı açısından önem taşımaktadır. Bu bağlamda model, karla ilişkili 7 adet temel parametreyi içermekte olup; bunlar kar sıcaklık eşiği, kar erime oranı, kar yoğunluğu gibi fiziksel süreçleri yansıtmaktadır. Buna ek olarak, modelin yüksek rakımlı havzalarda daha doğru sonuçlar verebilmesi amacıyla yağış ve sıcaklık değişim oranlarına karşılık gelen iki eğimsel parametre de (PLAPS ve TLAPS) dikkate alınmaktadır. PLAPS (Precipitation Lapse Rate) yağışın irtifaya göre değişimini, TLAPS (Temperature Lapse Rate) ise sıcaklık düşüş oranını ifade etmektedir. Bu iki parametreye dayalı yükseklik bazlı sıcaklık ve yağış düzeltmeleri SWAT modeli içerisinde aşağıdaki denklemlerle hesap edilmektedir:

$$T_i = T_{ref} - TLAPS \cdot (Z_i - Z_{ref}) \quad (5)$$

$$P_i = P_{ref} + PLAPS \cdot (Z_i - Z_{ref}) \quad (6)$$

T_i, P_i, i. noktadaki düzeltilmiş sıcaklık ve yağış (°C, mm), T_ref, P_ref, referans istasyondaki sıcaklık ve yağış, Z_i ise i. noktanın rakımı (m), Z_ref, referans noktanın rakımı (m), TLAPS, temperature laps rate (°C/km), PLAPS ise precipitation lapse rate (mm/km)'dir. Modelleme sürecinde bu iki eğim parametresinin duyarlılık analizine dâhil edilmesi ile birlikte, özellikle dağlık ve karlı bölgelerdeki hidrolojik davranışın modellenmesinde önemli kazanımlar elde edilmiştir. Aşağıda verilen tablo, Panjshir Havzası'na özgü PLAPS ve TLAPS parametrelerinin kalibrasyon çıktısını göstermekte olup, SUFI-2 algoritmasıyla yapılan en iyi parametre uyum değerlerini içermektedir:

Tablo 3. PLAPS ve TLAPS Parametrelerinin Kalibrasyon Çıktıları

Parametre	**Fitted değeri**	**Min**	**Maks**
PLAPS	645.214	306.022	922.724
TLAPS	-9.778	-16.762	-5.388

Yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere, PLAPS değeri 645.21 mm/km ve TLAPS değeri -9.77 °C/km olarak kalibre edilmiştir. Her iki parametre de modelin yüksekliğe bağlı hidrolojik tepkiyi doğru biçimde yansıtması için kritik rol oynamaktadır. Bu nedenle PLAPS ve TLAPS, modelin diğer kalibrasyon parametrelerinden ayrı tutularak, uzaktan algılama temelli uydu verileri ile desteklenmiş ve sabitlenmiştir.

PLAPS ve TLAPS oranlarının etkili olup olmadığını değerlendirmek için ön testler yapılmış, bu iki parametrenin model çıktıları üzerindeki etkisi doğrulandığında, SWAT-CUP kalibrasyonu öncesinde bu değerler sabitlenmiştir. Akabinde, karla ilişkili 5 parametre daha hassasiyet analizi kapsamında değerlendirilmiş ve aşağıda sunulan şekildeki gibi kalibrasyon sürecine dahil edilmiştir.

Tablo 4. Kalibrasyon Sonrası En İyi Parametre Değerleri (SWAT-CUP Iteration 6, En İyi Simülasyon No: 201, Hedef Fonksiyon: Nash-Sutcliffe = 0.506)

Parametre	**Fitted değeri**	**Min**	**Maks**
v__SMTMP.bsn	0.900000	–5.000000	5.000000
v__SFTMP.bsn	0.220000	–5.000000	5.000000
v__SMFMX.bsn	3.540000	1.000000	10.000000
v__SMFMN.bsn	0.800000	0.000000	10.000000
v__TIMP.bsn	0.922000	0.000000	1.000000

SUFI-2 algoritması kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon sürecinde, Panjshir alt havzasındaki kar erimesine duyarlı akım rejimini temsil eden beş temel parametre optimize edilmiştir. SMTMP (kar erimesi sıcaklık eşiği) 0.9°C olarak kalibre edilerek kar erimesi sürecinin yüksek hassasiyetle modellendiği, SFTMP'nin ise 0.22°C olarak belirlenmesiyle karla yağmur ayrımı eşik değerinin bölge koşullarına özgü şekilde ayarlandığı anlaşılmaktadır. Kar erime oranlarını temsil eden SMFMX (maksimum erime hızı) 3.54 mm/°C-gün ve SMFMN (minimum erime hızı) 0.8 mm/°C-gün değerleriyle yüksek eğimli alanlarda kar çözülmesinin mevsimsel olarak değişken hızlarda gerçekleştiği dikkate alınmıştır. Zaman ağırlıklı sıcaklık indeksini temsil eden

TIMP değeri ise 0.922 olarak kalibre edilerek, sıcaklık değişimlerinin kar kütlesi üzerindeki etkisinin kısa süreli ve yüksek tepkili olduğunu göstermektedir. Parametre aralıklarının fiziksel sınırlar içinde kalması ve Nash-Sutcliffe katsayısının (NSE = 0.506) kabul edilebilir düzeyde olması, kalibrasyon başarısının yeterli olduğunu ve modelin kar-dinamikli süreçleri temsil etmekte etkili bir yapı kurduğunu göstermektedir.

SWAT hidrolojik modelinin çalıştırılması sonucu elde edilen akım değerleri yine modelin bir eklentisi olan SWAT_CUP programı kullanılarak kalibre edilmiştir. SWAT_CUP programında bu süreç için 2010-2017 yılları kullanılmıştır. Kalibrasyon evresinde, tanımlanan farklı parametre optimizasyon algoritması içerisinden SUFI-2 algoritması kullanılmıştır. Havzanın hidrolojik süreçlerini etkileyen 13 parametreye ulaşılmıştır. Belirlenen bu parametreler ile SWAT_CUP programı çalıştırılmış tekrarlanan iterasyonun sonunda her seferinde 250 simülasyon yapılarak en uygun parametre aralıkları elde edilmiştir. Bu kapsamda Panjshir havzasının hidrolojik özelliklerini etkileyen toplam 13 hassas parametre belirlenmiş ve aşağıda gösterilmiştir.

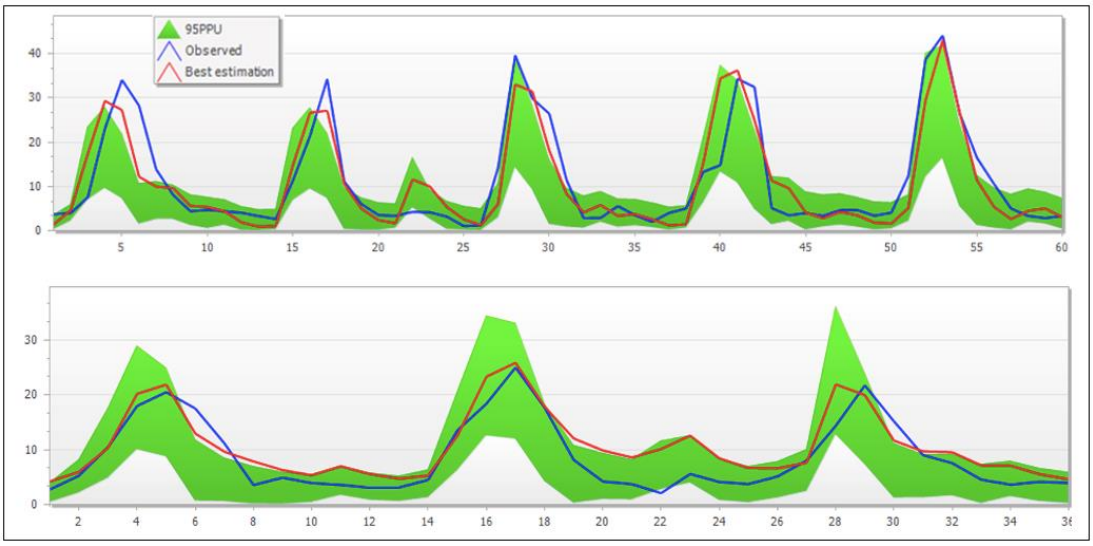
Tablo 5. Kalibrasyon Sonrası Seçilen Parametrelerin Değerleri (SWAT-CUP Iteration, En İyi Simülasyon No: 4, Nash-Sutcliffe = 0.587)

Parametre	**Fitted değeri**	**Min**	**Maks**
r__CN2.mgt	–0.199200	–0.200000	0.200000
r__SOL_AWC(..).sol	0.062000	0.000000	1.000000
r__ESCO.hru	–0.766000	–1.000000	1.000000
v__GWQMN.gw	470.000000	0.000000	500.000000
v__GW_REVAP.gw	0.072920	0.020000	0.200000
v__REVAPMN.gw	387.000000	0.000000	500.000000
r__HRU_SLP.hru	0.354000	0.000000	1.000000
r__OV_N.hru	0.218600	0.000000	0.800000
r__SLSUBBSN.hru	0.233000	0.000000	0.400000
r__ALPHA_BF.gw	0.406000	0.000000	1.000000
v__GW_DELAY.gw	146.759995	0.000000	450.000000
v__SURLAG.bsn	15.150000	0.000000	25.000000
r__SOL_K(..).sol	–0.034440	–0.200000	0.200000

SUFI-2 algoritmasıyla yürütülen parametrik kalibrasyon sürecinde Panjshir alt havzasına özgü 13 hassas hidrolojik parametre optimize edilmiştir. En kritik yüzey akış parametresi olan CN2, –0.1992 ile maksimum azaltım sınırına yakın belirlenmiş ve bu durum, havzada bitki örtüsü ve toprak geçirgenliğinin yüzey akış üretimi üzerindeki baskın etkisine işaret etmiştir. Yer altı suyu bileşenleri açısından, GWQMN

(470 mm), GW_DELAY (146.76 gün) ve REVAPMN (387 mm) değerleri, yer altı akımının geç tepkili fakat geri beslemeli karakterini yansıtmaktadır. ESCO'nun –0.766 olarak kalibre edilmesi, bitki kök bölgesinden buharlaşma kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. ALPHA_BF = 0.406 ise taban akış sürecinin orta düzeyde bir sönümleme ile aktığını göstermektedir. SURLAG = 15.15 değeri, yüzey akışının kanal sistemine ulaşımında belirli bir gecikmeye işaret etmekte, bu da kar erimesi sonrası akımların yayılımını düzenleyen bir etkendir. Toprak parametreleri (SOL_AWC, SOL_K) ve eğimle ilişkili bileşenler (HRU_SLP, SLSUBBSN) ise havzanın infiltrasyon kapasitesi ve yüzey akış zamanlamasını etkileyen kritik girdiler olarak, modelin fiziksel tutarlılığını güçlendirmiştir. NSE = 0.587 düzeyine ulaşılması, bu parametrik yapı ile modelin tatmin edici düzeyde akım tahmini sunduğunu ve kalibrasyon sürecinin hidrolojik davranışı gerçekçi biçimde temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

Bagh-i Lala hidrolojik istasyonuna ait kalibrasyon sürecinde elde edilen 95PPU bandı, gözlemlenen akım verileri ile modelin tahmin ettiği değerler arasında güçlü bir örtüşme olduğunu göstermektedir. Gözlemlenen (mavi), simüle edilen (kırmızı) ve %95 güven aralığı (yeşil) ile gösterilen 95PPU bandı arasındaki yakınlık, kalibrasyon başarısını ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Bagh-i Lala İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafiği

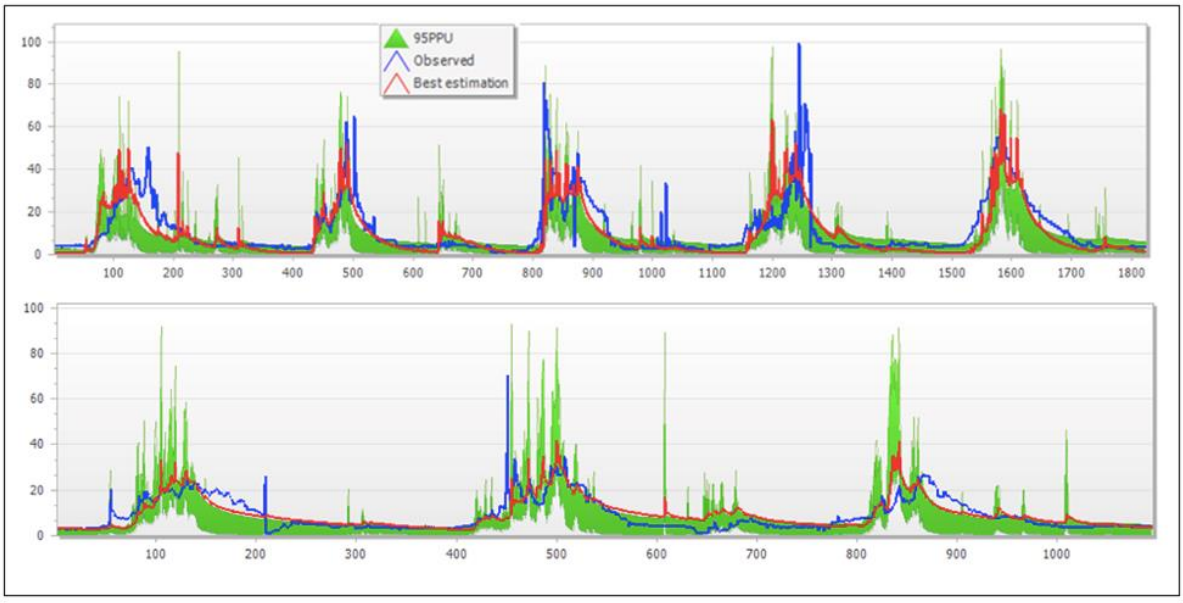
Validasyon sürecinde ise aynı istasyon için modelin daha önce kalibrasyonla belirlenen parametrelerle çalıştırılması sağlanmış ve elde edilen model çıktıları

gözlemlenen değerlerle karşılaştırılmıştır. Validasyon sonucunda elde edilen grafik, özellikle pik akış dönemlerinde modelin gözlem verilerini yüksek oranda temsil ettiğini, bazı düşük akım dönemlerinde ise sapmaların belirli bir tolerans aralığında kaldığını göstermektedir. Model performansına ilişkin istatistiksel değerlendirmeler (R^2, NSE, P_faktör, R_faktörr) genel olarak tatmin edici düzeydedir ve Panjshir alt havzasında SWAT modelinin hem kalibrasyon hem de doğrulama adımlarında güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur. Ek olarak modelin ortalama tahmin sapmasını ortaya koyan Percent Bias (PBIAS) katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^{n} Q_{obs,i}} \quad (7)$$

Negatif PBIAS değeri modelin aşırı tahmin eğiliminde olduğunu, pozitif PBIAS ise eksik tahmin eğiliminde olduğunu göstermektedir.

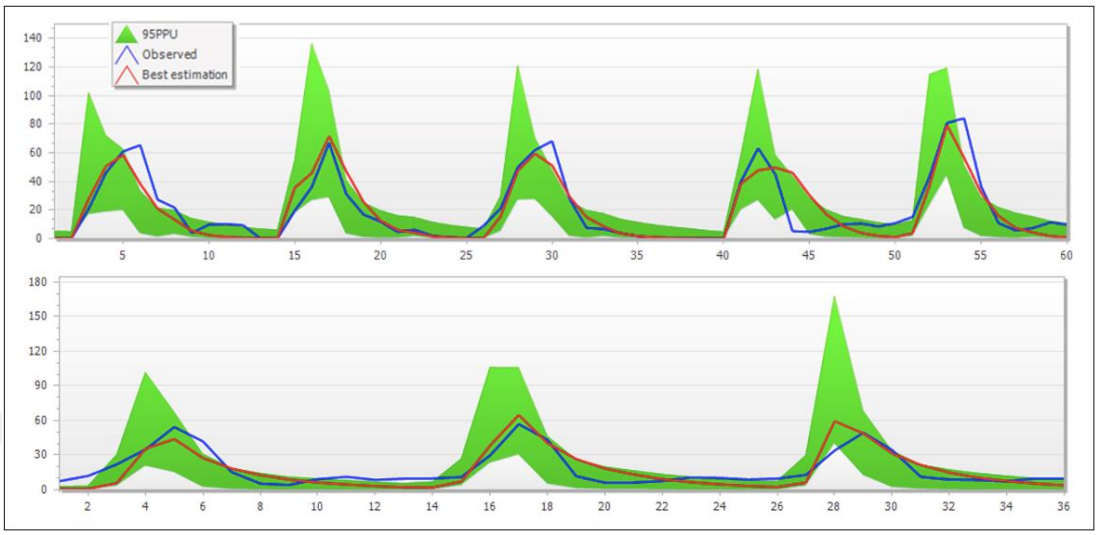
Aşağıda ise modelin kalibrasyon ve validasyon performansı, Bagh-ı Lala istasyonu için günlük zaman çözünürlüğünde yürütülen SUFI-2 algoritmasına dayalı 95PPU analizleriyle değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Bagh-i Lala İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafiği

Kalibrasyon grafiğinde model çıktılarının büyük oranda gözlenen verileri kapsadığı, özellikle taşkın piklerinin ve düşük debi dönemlerinin çoğunun 95PPU

aralığına girdiği gözlenmektedir. Gözlenen ve simüle edilen akımlar arasındaki yakınlık, hem model parametrelerinin etkin kalibrasyonunu hem de hidrolojik döngü bileşenlerinin doğru temsil edildiğini ortaya koymuştur.

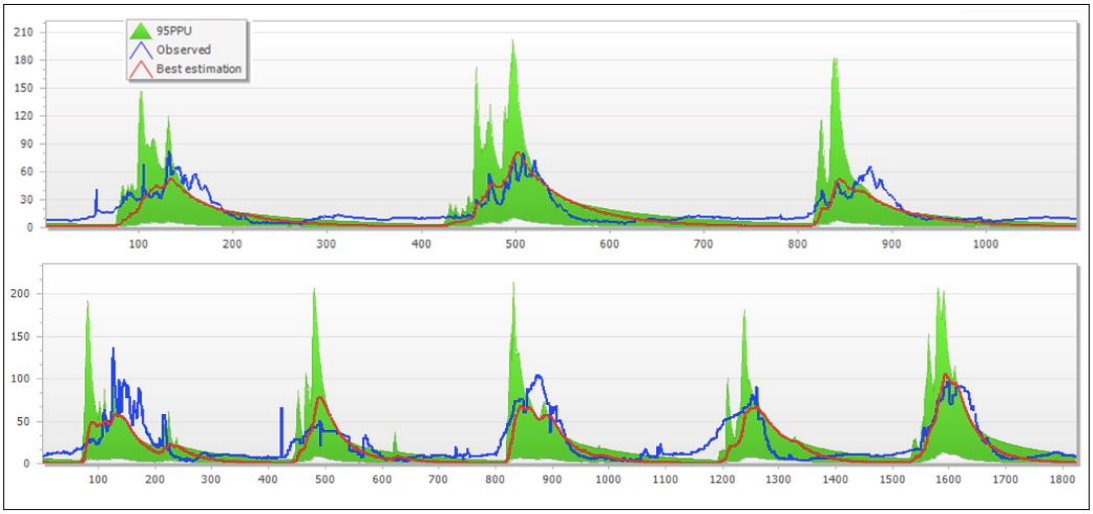


Şekil 12. Pul-i Ashwa İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri

Yukarıdaki Pul-ı Ashwa istasyonuna ait aylık kalibrasyon ve validasyon grafiklerine bakıldığında modelin kalibrasyon dönemi boyunca birçok taşkın pikini başarılı biçimde yakalayabildiği görülmektedir. Özellikle 5., 15., 30. ve 50. zaman adımlarında model çıktısı, hem pik zamanlamasında hem de genliğinde yüksek düzeyde uyum göstermektedir. Gözlenen verilerin %95'lik güven aralığı (95PPU) içinde kalması ve bu aralığın dar bir yapı sergilemesi, modelin belirsizlik seviyesinin düşük olduğunu ve güvenilir simülasyonlar ürettiğini göstermektedir. Bu bulgular doğrultusunda SWAT modelinin Pul-ı Ashwa istasyonu için kalibrasyon sürecinde hem yüksek açıklayıcılığa (R^2 = 0.81) hem de etkinlik katsayısına (NSE = 0.80) ulaştığı söylenebilir.

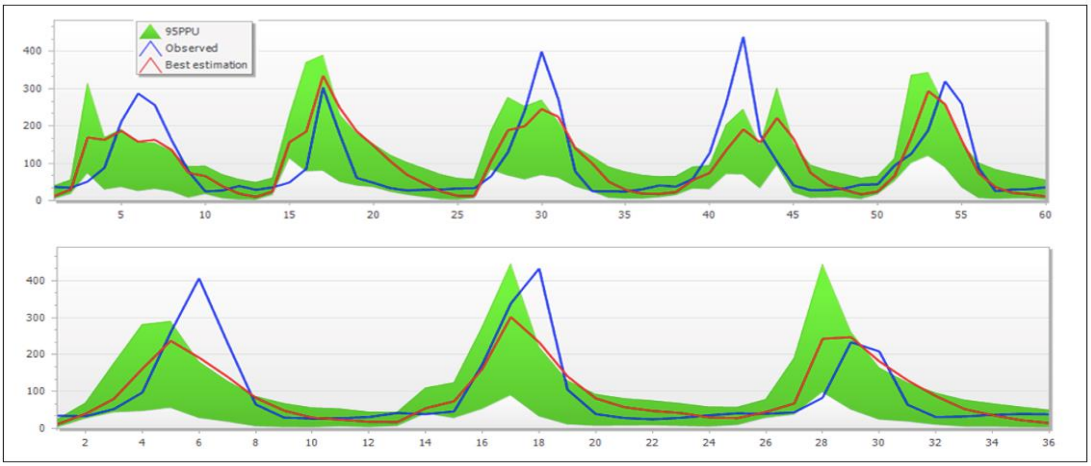
Modelin davranışı, yüksek akımların ve düşük akımların çoğunu başarıyla kapsayacak düzeydedir. Validasyon dönemi için üretilen simülasyon sonuçlarında ise bu dönemde model, 6., 16. ve 28. zaman adımlarındaki yüksek debili akımları ve düşüşlerini kalibrasyona kıyasla daha az isabetle tahmin etmiş olsa da genel eğilim açısından gerçek verilerle yakınsayan bir uyum göstermektedir. 95PPU bandının, özellikle validasyonun bazı noktalarında genişlemesi (örneğin 28. zaman adımı) model

belirsizliğinin bu dönem için kısmen arttığını göstermektedir. (R^2 = 0.75 ile NSE = 0.67).



Şekil 13. Pul-i Ashwa İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri

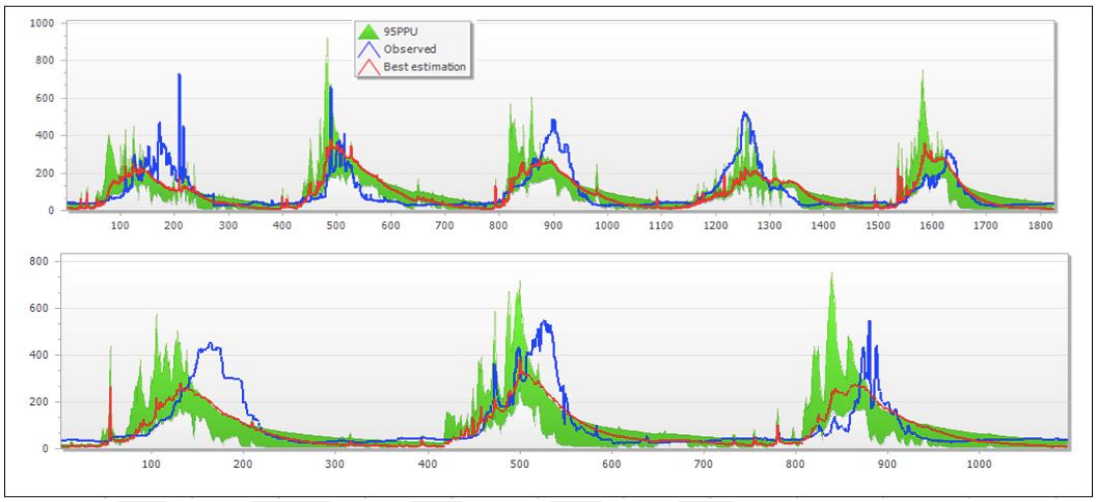
Pul-ı Ashwa istasyonuna ait günlük zaman adımlı kalibrasyonda, modelin özellikle yüksek akış dönemlerinde zirveleri kısmen düşük tahmin ettiği; ancak genel akım desenini başarılı şekilde yansıttığı görülmektedir. Belirsizlik bandı gözlenen değerleri büyük ölçüde kapsamakta olup, gözlem-simülasyon uyumu istikrarlıykan, validasyon grafiğinde ise modelin, taşkın piklerini daha gerçekçi temsil ettiği ve tahmin bandının daralarak daha güvenilir sonuçlar sunduğu görülmüştür.



Şekil 14. Shokhi İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri

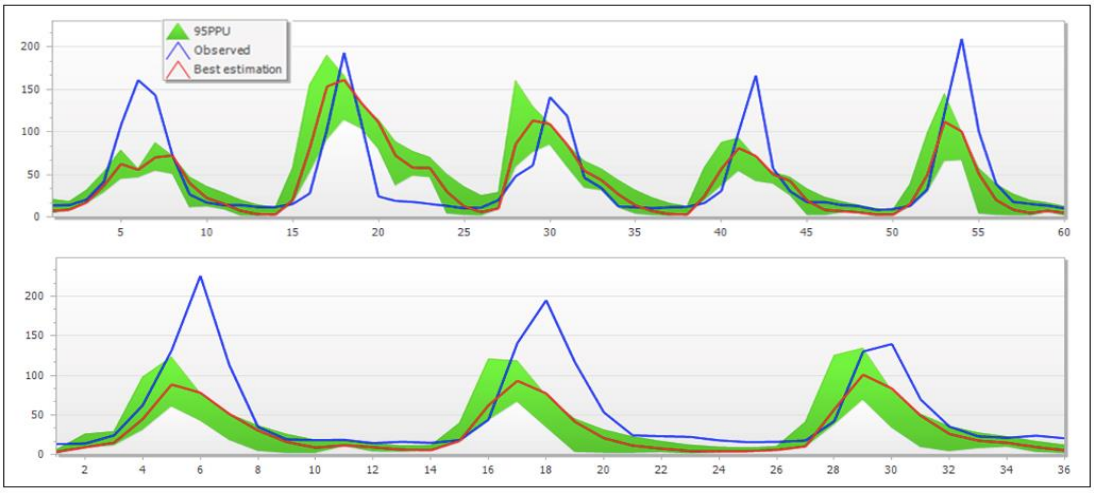
Shokhi istasyonuna ait aylık kalibrasyon ve validasyon grafiklerinde, kalibrasyon döneminde hem gözlem hem simülasyon eğrileri uyumlu bir şekilde

ilerlerken, belirsizlik bandının genişliği makul düzeyde kalmakta ve akım deseni güvenilir şekilde yansıtılmaktadır. Validasyon döneminde ise modelin sistematik sapmalar üretmeden taşkın rejimini genel olarak doğru tahmin ettiği lakin bazı ani yükselişlerde gözlemsel değerlerin altında kaldığı saptanmıştır.



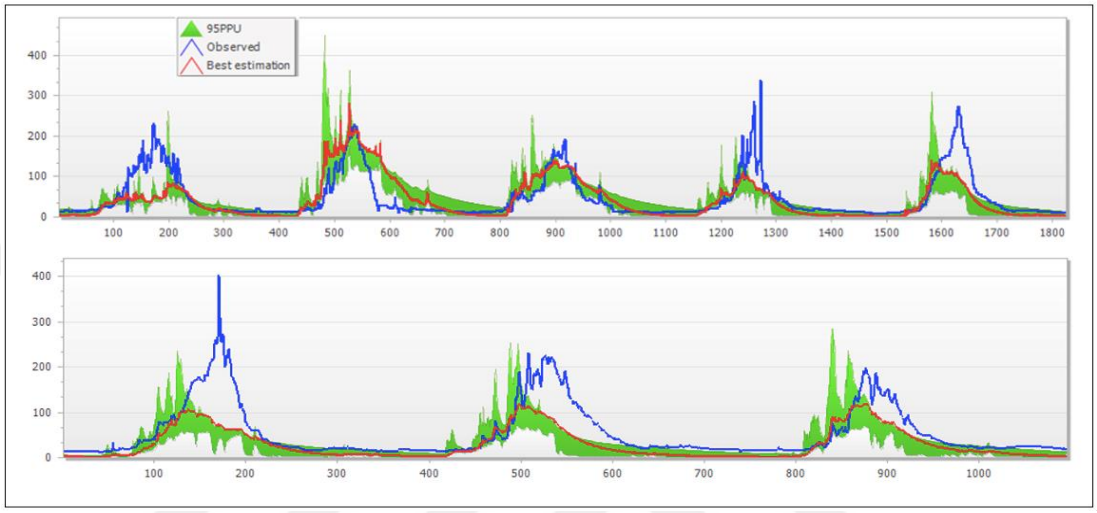
Şekil 15. Shokhi İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri

Kalibrasyon sürecinde yüksek akımların simülasyonunda yer yer sapmalar bulunsa da, düşük akım dönemlerindeki stabil model davranışı dikkat çekmektedir. Validasyon sürecinde ise modelin erken zirve üretme eğilimi kısmen artmış, genel desen ise korunmuştur (R^2 = 0.66, *NSE* = 0.63).



Şekil 16. Tang-i Gulbahar İstasyonuna Ait Aylık Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri

Tang-i Gulbahar istasyonuna ait aylık kalibrasyon ve validasyon grafiklerine bakıldığında, modelin mevsimsel akım desenlerini makul düzeyde yakalayabildiği; validasyon sürecinde ise, gözlenen akımların zirve noktalarının bir kısmında modelin simülasyon değerleri altında kaldığı ve zirve tahminlerinde kısmen sönümleme eğilimi gösterdiği dikkat çekmektedir. R^2 ve NSE değerlerinin kabul edilebilir sınırların üzerinde olması, modelin istasyon bazlı doğrulama performansını desteklemektedir.



Şekil 17. Tang-i Gulbahar İstasyonuna Ait Günlük Kalibrasyon ve Validasyon Grafikleri

Tang-ı Gulbahar istasyonuna ait günlük kalibrasyon ve validasyon grafiklerine göre, modelin kısa vadeli akım değişimlerini yakalamakta daha sınırlı bir başarı gösterdiği, özellikle taşkın piklerinde gözlenen değerleri önemli ölçüde eksik tahmin ettiği gözlenmektedir.

Kalibrasyon döneminde (2010–2014) simüle edilen değerler, yüksek akış dönemlerinde gözlemleri genel olarak izlese de zirvelerin altında kalma eğilimindedir; validasyon döneminde (2015–2017) bu fark daha da belirginleşmiş ve model zirve değerleri sistematik biçimde küçültmüştür. Bununla birlikte düşük akış dönemlerinde daha tutarlı tahminler sağlanmış; 95PPU bandı gözlemleri önemli oranda kapsayarak parametre belirsizliğinin kontrol altında tutulduğunu göstermektedir. R^2 ve *NSE* gibi istatistiksel performans göstergeleri modelin genel eğilimleri yansıttığını ancak taşkın olayları gibi ekstrem durumların iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.2. Çalışma Havzasındaki Kalibrasyon ve Validasyon İstatistiksel Sonuçları

ArcSWAT modeli ile gerçekleştirilen hidrolojik simülasyonun güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla Panjshir alt havzasına ait dört akım gözlem istasyonunda aylık ve günlük zaman adımlarında kalibrasyon ve validasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, modelin belirsizlik düzeyini ($P_{faktör}$, $R_{faktör}$), gözlemsel ve simüle edilen veriler arasındaki doğrusal ilişkiyi (R^2), tahmin başarımını (*NSE*) ve hata düzeyini (RSR) ortaya koyan istatistiksel performans göstergeleri dikkate alınmıştır. Aşağıda sunulan tablolarda ise her bir istasyon için ayrı ayrı hesaplanan performans ölçütleri aracılığıyla modelin hem kalibrasyon hem de validasyon dönemlerinde sergilediği genel tutarlılığı ve tahmin kapasitesi ortaya konulmuştur.

Tablo 6. Panjshir alt havzasına Ait SWAT Modeli Aylık Zaman Adımında Kalibrasyon Performans Göstergeleri (2010–2014)

İstasyon	$\mathbf{P_{faktör}}$	$\mathbf{R_{faktör}}$	$\mathbf{R^2}$	**NSE**	**RSR**
Tang-i Gulbahar	0.68	0.61	0.55	0.54	0.68
Shokhi	0.75	1.08	0.54	0.54	0.68
Pul-i Ashwa	0.82	1.15	0.81	0.80	0.45
Bagh-i Lala	0.80	0.88	0.80	0.80	0.45

Tablo 7. Panjshir alt havzasına Ait SWAT Modeli İçin Aylık Zaman Adımında Validasyon Performans Göstergeleri (2015–2017)

İstasyon	$\mathbf{P_{faktör}}$	$\mathbf{R_{faktör}}$	$\mathbf{R^2}$	**NSE**	**RSR**
Tang-i Gulbahar	0.50	0.52	0.76	0.48	0.72
Shokhi	0.83	1.01	0.68	0.67	0.57
Pul-i Ashwa	0.67	1.72	0.75	0.67	0.57
Bagh-i Lala	0.89	1.50	0.81	0.72	0.53

$P_{faktör}$ değerlerinin tüm istasyonlarda %50'nin üzerinde olması, ölçülen verilerin büyük çoğunluğunun %95 güven aralığı içinde yer aldığını göstermekte ve modelin belirsizlik analizinde kabul edilebilir sınırda çalıştığını ortaya koymaktadır. Özellikle Pul-ı Ashwa (0.82/0.67) ve Bagh-ı Lala (0.80/0.89) istasyonlarında bu değerler optimum düzeye yakındır. $R_{faktör}$ ise güven aralığının genişliğini ifade etmekte olup, özellikle Shokhi (1.08/1.01) ve Pul-ı Ashwa (1.15/1.72)istasyonlarında daha geniş bir varyasyon aralığına işaret etmektedir. Bu durum, modelin yüksek akım değerlerinde tahmin hassasiyetini korurken bazı düşük debili dönemlerde sapmalara açık olduğunu göstermektedir.

Simüle edilen değerler ile gözlemlenen değerler arasındaki doğrusal ilişkiyi ifade eden determinasyon katsayısı (R^2), aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^{n} (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right)^2 \quad (8)$$

Modelin açıklayıcılığını gösteren R^2 değerleri, tüm istasyonlarda ≥ 0.54 ile kabul edilebilir sınırların üzerindedir; özellikle Pul-ı Ashwa ve Bagh-ı Lala istasyonlarında ≥ 0.80 düzeyine ulaşması, modelin gözlemsel verilerle güçlü korelasyon içinde çalıştığını göstermektedir. Model doğruluğunu değerlendirmede yaygın olarak kullanılan *NSE*, aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (9)$$

Burada $Q_{(obs,i)}$, i. gözleme göre akım (m3/s), $Q_{(sim,i)}$, i. model tahmini ($m^3/2$) ve Q_{obs} ise gözlemlenen akım ortalamasıdır. *NSE*, modelin gözlemsel verilere olan uyum derecesini daha doğrudan yansıtmaktadır. *NSE* > 0.5 kriteri sağlandığı sürece modelin "tatmin edici" kabul edildiği literatürde ifade edilmiştir (Moriasi vd., 2007). Validasyon sürecinde bile tüm istasyonlarda bu eşik geçilmiş; Pul-ı Ashwa ve Shokhi gibi istasyonlarda >0.65 seviyelerinde kalması, modelin genellenebilirliğini teyit etmektedir. Model hatalarının gözlemsel verilerin varyansına oranı olan RSR değeri ise aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}} \quad (10)$$

RSR, ne kadar düşük olursa, model performansının o kadar iyi olacağı söylenebilecektir. Dolayısıyla *RSR* değerlerinin <0.7 olması, model hatalarının makul düzeyde kaldığını göstermektedir. Pul-ı Ashwa (0.45/0.57) ve Bagh-ı Lala (0.45/0.53) istasyonlarında düşük *RSR* değerleri, simülasyonların stabil ve güvenilir olduğunu desteklemektedir.

Tablo 8. Panjshir alt havzasına Ait SWAT Modeli İçin Günlük Zaman Adımında Kalibrasyon Performans Göstergeleri (2010–2014)

İstasyon	$P_{faktör}$	$R_{faktör}$	R^2	NSE	RSR
Tang-i Gulbahar	0.73	0.70	0.53	0.49	0.71
Shokhi	0.71	0.86	0.53	0.52	0.69
Pul-i Ashwa	0.65	1.17	0.69	0.59	0.64
Bagh-i Lala	0.71	0.80	0.67	0.64	0.60

Tablo 9. Panjshir alt havzasına Ait SWAT Modeli İçin Günlük Zaman Adımında Validasyon Performans Göstergeleri (2015–2017)

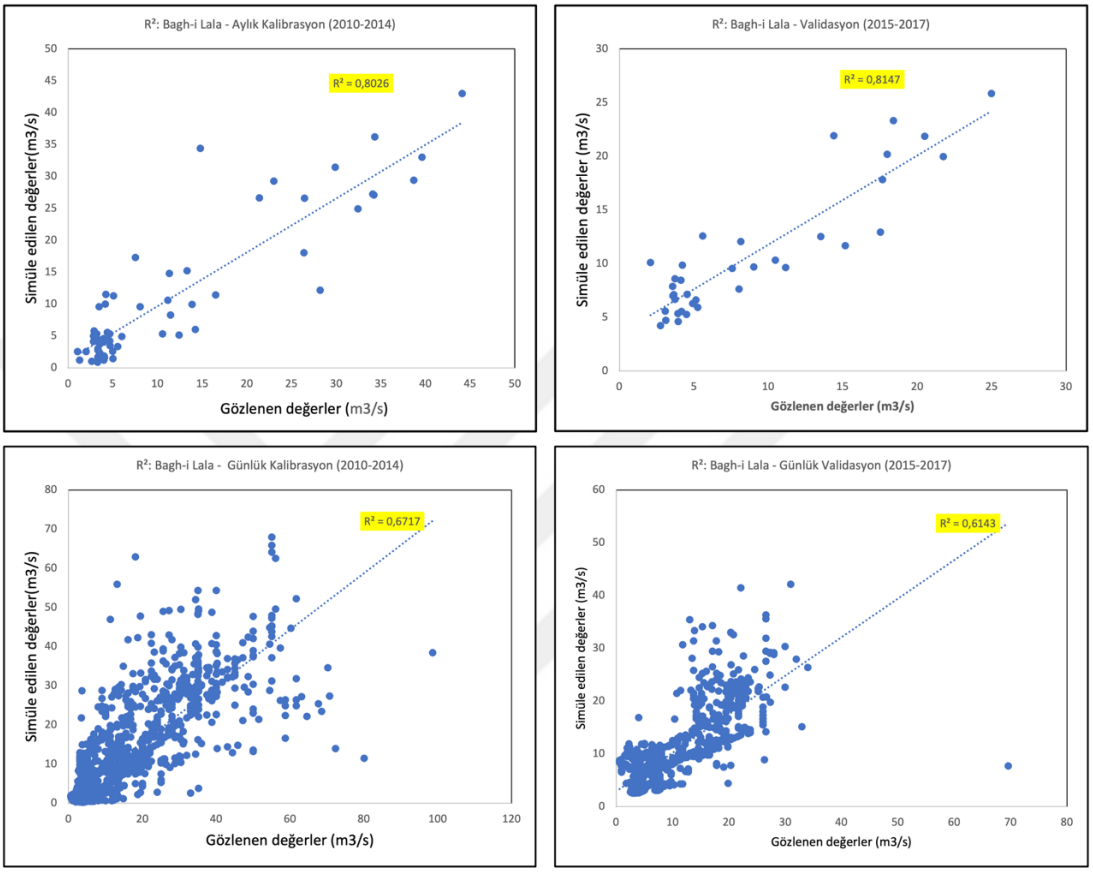
İstasyon	$P_{faktör}$	$R_{faktör}$	R^2	NSE	RSR
Tang-i Gulbahar	0.44	0.56	0.71	0.46	0.74
Shokhi	0.68	0.81	0.66	0.63	0.61
Pul-i Ashwa	0.53	1.48	0.74	0.63	0.61
Bagh-i Lala	0.75	1.44	0.61	0.59	0.64

Kalibrasyon evresinde $P_{faktör}$ değerlerinin 0.65–0.73 aralığında yer alması, modelin gözlemsel verinin büyük kısmını %95 güven bandında başarıyla temsil ettiğini göstermektedir Validasyon aşamasında ise Tang-ı Gulbahar istasyonunda $P_{faktör}$'ün 0.44'e düşmesi modelin düşük performans gösterdiğini, buna karşın Shokhi ve Bagh-ı Lala gibi istasyonlarda kabul edilebilir doğruluk düzeyini koruduğunu ortaya koymaktadır. $R_{faktör}$ değerleri validasyon sürecinde genellikle 1'in üzerinde (özellikle Pul-ı Ashwa ve Bagh-ı Lala için), bu da belirsizlik bandının genişlediğini ve model hassasiyetinin azaldığını düşündürmektedir.

R^2 değerleri validasyon aşamasında 0.61–0.74 arasında değişmiş ve özellikle Shokhi ve Pul-ı Ashwa'da güçlü korelasyonlara ulaşılmıştır. Bu, modelin simülasyon ve gözlemsel veriler arasında doğrusal bağı oldukça iyi temsil ettiğini gösterir. *NSE* > 0.5 olan tüm istasyonlar için modelin kabul edilebilir düzeyde çalıştığı söylenebilir. En yüksek *NSE* değeri kalibrasyonda Pul-ı Ashwa (0.59), validasyonda yine Pul-ı Ashwa (0.63) için kaydedilmiştir. *RSR* değerlerinin 0.60–0.74 arasında olması ise model hatalarının gözlemsel verilerin varyansına oranla orta düzeyde olduğunu ve genel model doğruluğunun kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.

3.3. İstasyon Bazlı Kalibrasyon ve Validasyon Performanslarının R^2 Katsayısına Göre Değerlendirilmesi

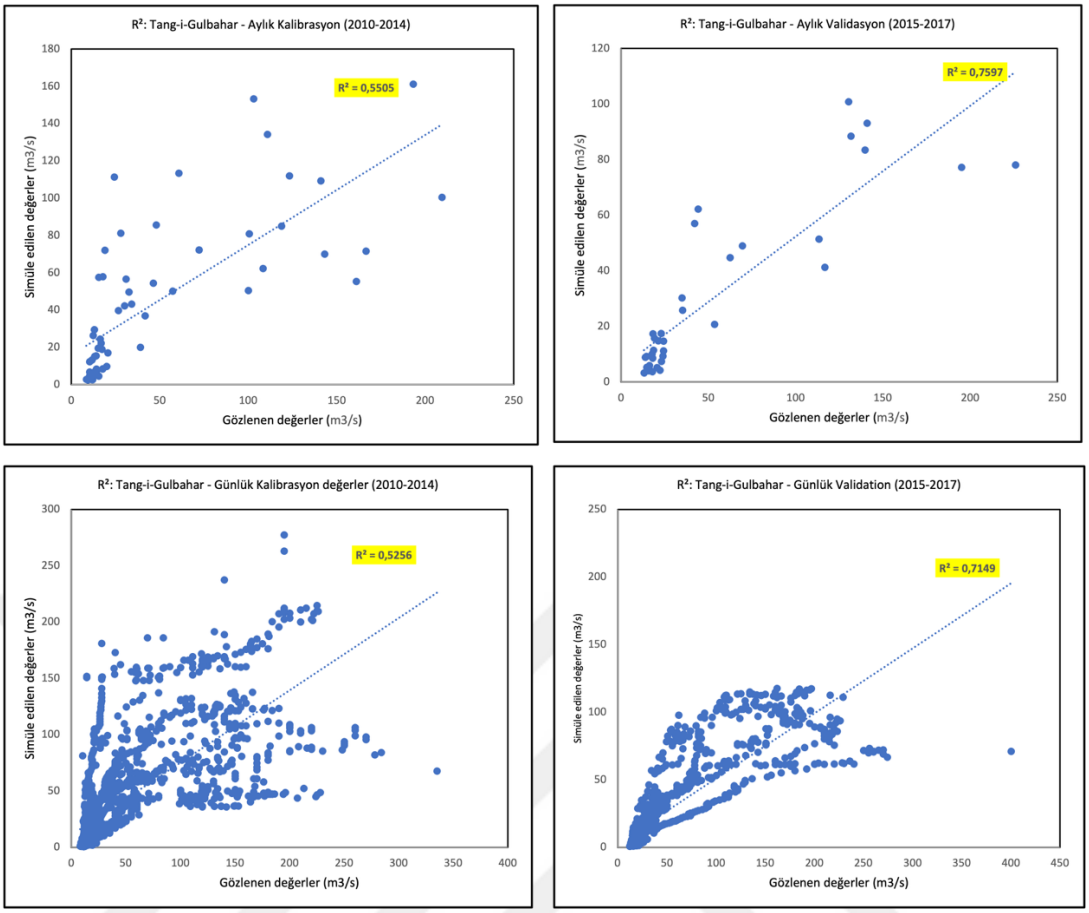
Determinasyon katsayısı, simülasyon ve ölçülen veriler arasındaki bağımlılığı aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 18. Bagh-i Lala Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları (R^2)

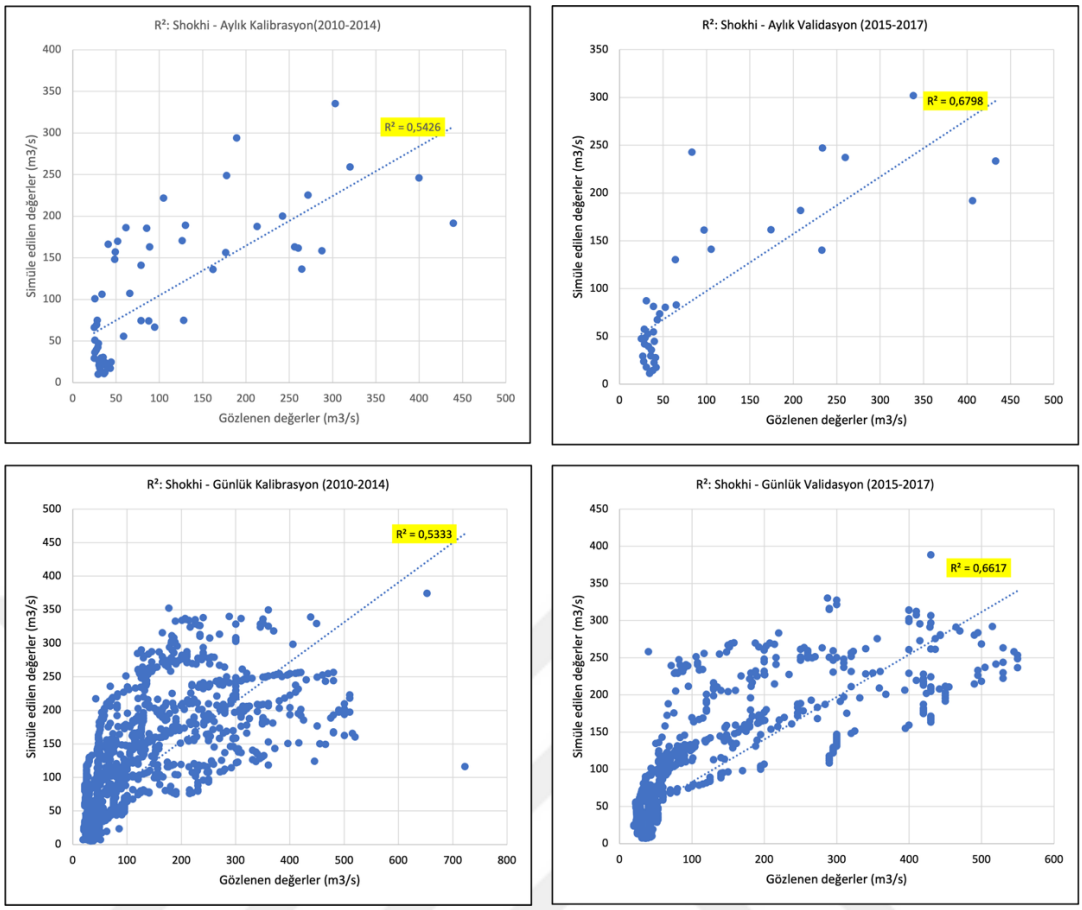
Bagh-ı Lala istasyonu, gerek aylık gerekse günlük zaman adımlarında yüksek determinasyon katsayılarıyla modelin istikrarlı ve güvenilir bir performans sergilediği lokasyonlardan biridir. Aylık kalibrasyon (R^2= 0.8026) ve validasyon (R^2= 0.8147) değerleri, gözlemsel ve simüle edilen veriler arasında güçlü bir korelasyona işaret etmektedir.

Günlük çözünürlükteki kalibrasyon (R^2 = 0.6717) ve validasyon (R^2 = 0.6143) değerleri, özellikle kısa vadeli tahminlerde mevsimsel sapmaların kısmen etkili olduğunu gösterse de, genel eğilimlerin başarıyla temsil edildiğini ortaya koymaktadır. Modelin, bu istasyonda hem düşük hem yüksek debili dönemleri kapsayacak şekilde dengeli bir performans gösterdiği söylenebilir.



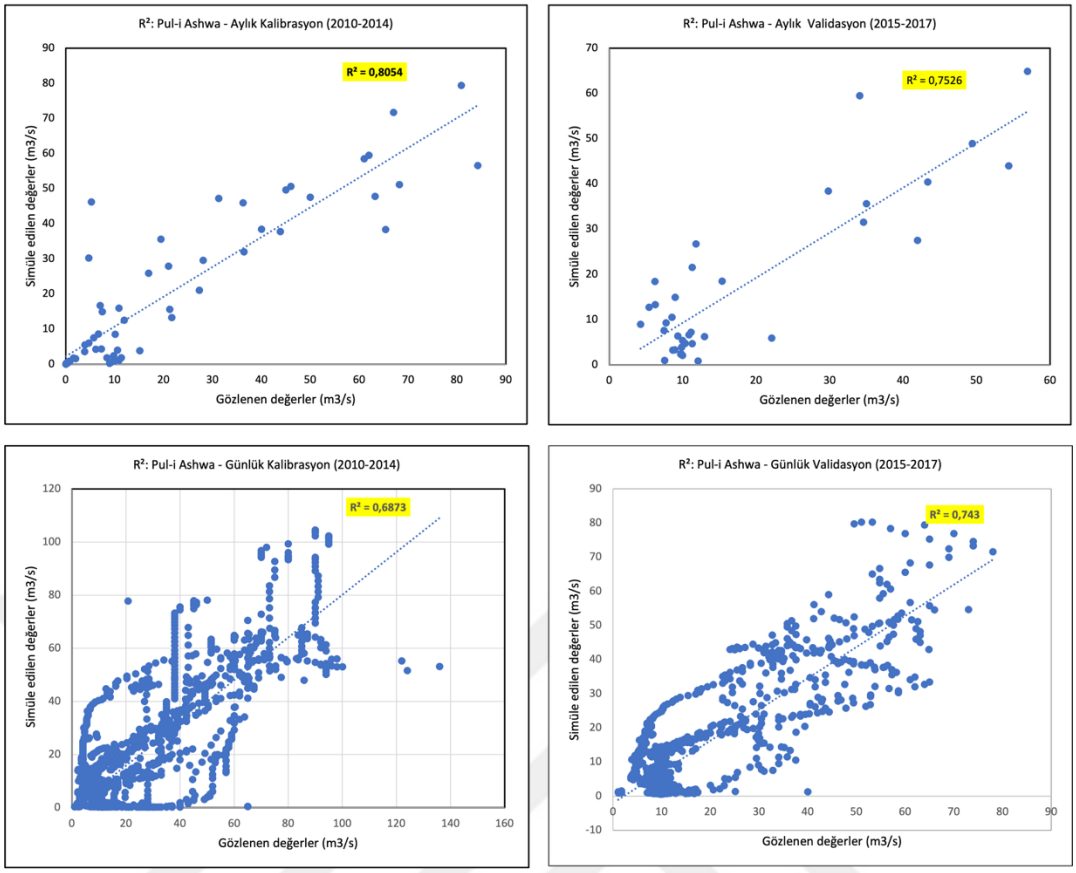
Şekil 19. Tang-i Gulbahar Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları (R^2)

Tang-ı Gulbahar istasyonu için modelin validasyon döneminde kalibrasyon aşamasına kıyasla daha yüksek performans sergilediği dikkat çekmektedir. Aylık validasyonda R^2= 0.7597'ya ulaşılması, modelin özellikle ileri dönem tahminlerinde kuvvetli korelasyon sağladığını göstermektedir. Ancak kalibrasyon döneminde R^2= 0.5506 değeri, modelin geçmiş veriler üzerinde daha sınırlı bir başarı sağladığını göstermektedir. Günlük bazda da benzer bir tablo gözlenmekte; validasyon R^2= 0.7149 ile yüksek doğruluk sağlarken, kalibrasyon değeri R^2= 0.5256 ile orta düzeyde kalmaktadır. Bu durum, parametrik optimizasyonun ileri dönemler için daha etkili çalıştığını göstermekte ve istasyonun belirsizlik analizlerinin dikkatle değerlendirilmesini gerektirmektedir.



Şekil 20. Shokhi Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları ($\boldsymbol{R^2}$)

Shokhi istasyonu, özellikle günlük validasyon aşamasında R^2= 0.6617 ile modelin zamanla güçlenen genellenebilirliğini göstermektedir. Aylık validasyon değeri de R^2= 0.6798 olup, modelin mevsimsel akım değişimlerini başarılı şekilde yakalayabildiğini göstermektedir. Buna karşın kalibrasyon dönemlerinde hem aylık (R^2= 0.5426) hem de günlük (R^2= 0.5333) değerlerin görece düşük kalması, parametre ayarlamalarının ilk dönemlerde sınırlı kaldığını; buna karşılık modelin test edilen dönemlerdeki davranışının daha öngörülebilir olduğunu düşündürmektedir. Modelin bu istasyonda, validasyon döneminde hidrometeorolojik gerçekliği daha isabetli şekilde temsil ettiği anlaşılmaktadır.



Şekil 21. Pul-i Ashwa Kalibasyon ve Validasyon Çıktıları ($\boldsymbol{R^2}$)

Pul-i Ashwa istasyonu, tüm zaman adımlarında elde edilen yüksek R^2değerleriyle çalışmadaki en güçlü istasyon performansına sahiptir. Aylık düzeyde kalibrasyon R^2= 0.8054 ve validasyon R^2= 0.7526 ile modelin mevsimsel akım varyasyonlarını başarıyla yansıttığını göstermektedir. Günlük analizlerde de kalibrasyon (R^2= 0.6873) ve validasyon (R^2= 0.743) sonuçları, kısa vadeli tahmin doğruluğunun da oldukça güçlü olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle validasyon sürecinde günlük simülasyonların gözlemsel verilerle yüksek korelasyon göstermesi, modelin parametrik tutarlılığının sağlandığını ve bu istasyonun diğerlerine kıyasla daha kararlı hidrometeorolojik yapı sunduğunu işaret etmektedir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Panjshir Alt Havzası için geliştirilen bu SWAT modelleme çalışması, yalnızca bu spesifik havzaya özgü bir yüzey akış tahmin sistematiği ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda Afganistan'daki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak tartışıldığında, çeşitli modelleme parametrelerinin ve yaklaşım felsefelerinin etkinliğine ilişkin önemli ipuçları sunmaktadır. Rasouli et al. (2015) tarafından SRM modeliyle üzerinde çalışılan Üst Kabil Havzası'nda kar erimesine dayalı akım öngörülerinin güvenilirliği vurgulanmış olsa da, modelin fiziksel temsiliyeti SWAT gibi bütüncül bir yapıya kıyasla sınırlı kalmaktadır. Benzer şekilde Bromand (2015) ve Ayoubi & Dongshik (2016) tarafından yapılan çalışmalarda, model parametrelerinin hassasiyeti yüksek olmasına rağmen, alt havza seviyesindeki parametrik farklılıklar yeterince vurgulanmamış, bu da model genellemelerini sınırlandırmıştır.

Panjshir Alt Havzası gibi topoğrafik olarak karmaşık, kar erimesine duyarlı alanlarda, PLAPS ve TLAPS gibi yükseklik temelli parametrelerin kalibrasyon dahilinde sabitlenmesinin model performansını anlamlı ölçüde artırdığı görülürken; bu sonuçla Tanı & Tayfur (2023) ile Alawi & Özkul (2023)'un araştırmalarındaki sonuçlar da dolaylı olarak desteklenmiştir. Bahsi geçen çalışmalarda uydu verileri kullanılarak arazi örtüsü ve topoğrafya hassasiyeti optimize edilmiş; bu da modelin yerel özelliklere uyum yeteneğini artırmıştır. Ancak bu çalışma, PLAPS ve TLAPS oranlarını saha verileriyle destekleyerek daha yerel odaklı bir temsil sağlamış ve bu yönüyle literatüre katkı sunmuştur.

Kabul Havzası'nın genelinde yapılan modelleme çalışmalarının çoğu (Taraky, 2021; Ougahi, Karim & Mahmood, 2022; Shams, Khan, Haleem & Mahmood, 2024), iklim değişikliği etkilerini öngörme ve su yönetimi planlamaları için önemli bulgular sunmuş; ancak çoğu çalışmanın alt havza seviyesinde istasyon bazlı parametrik kalibrasyona yeterince ağırlık vermediği görülmüştür. Bu çalışma ise SWAT-CUP aracılığıyla SUFI-2 algoritması kullanarak Pul-ı Ashwa, Shokhi, Bagh-ı Lala ve Tang-ı Gulbahar gibi çeşitli istasyonlar üzerinden iteratif kalibrasyon ve validasyon

yürütmüş; R^2, *NSE*, $P_{faktör}$, $R_{faktör}$ve *PBIAS* gibi performans göstergeleriyle modelin çıktıları istatistiksel olarak güçlü biçimde desteklenmiştir. Alawi & Özkul (2023) tarafından TRMM ve CHIRPS verileriyle yapılan uydu doğrulamalarının da model uyumu açısından önemli bulgular ortaya koyduğu; ancak bu çalışmadaki gibi istasyon verileri ile doğrudan kalibrasyon gerçekleştirilmediği görülmüştür.

Karla beslenen alanlarda yüzey akış üzerindeki etkilerin temsilinde, bu çalışmanın kullandığı kar parametreleri (SMTMP, SFTMP, SMFMX, SMFMN, TIMP) ile elde edilen Nash-Sutcliffe katsayısının 0.50–ü geçmesi, Mujeeb, Safi & Shirad (2025) tarafından sunulan iklim bazlı modellerdeki tahmin seviyeleriyle karşılaştırıldığında modelin fiziksel temsiliyetinin daha güçlü olduğunu göstermiştir. Aawar & Khare (2020) tarafından da belirtildiği gibi, manuel kalibrasyonun yetersiz kaldığı durumlarda SUFI-2 algoritmasının kullanımı, model belirsizliklerini azaltmakta çok daha başarılı bir strateji sunmaktadır. Bu doğrultuda Panjshir Alt Havzası için geliştirilen bu ArcSWAT modeli, hem literatürdeki çoğu çalışmanın sınırlandığı istasyon sayısı, hem de parametrik kalibrasyon derinliği bakımından daha kapsamılı bir yaklaşım sunmuş; iklim, yükseklik, kar erimesi ve yüzey örtüsü gibi faktörleri entegre eden çok katmanlı bir modelleme çerçevesi kurmuştur. Bu yönüyle sadece Panjshir için değil, benzer jeo-klimatik özelliklere sahip özellikle de Orta Asya ve Güney Asya dağlık havzaları için de örnek teşkil edebilecek bir uygulama ve sonuçlar ortaya konulmuştur.

4.2. Sonuç ve Öneriler

Yüzey akışı tahmininde fiziksel tabanlı hidrolojik modelleme ihtiyacının yüksek olduğu Panjshir Alt Havzası özelinde gerçekleştirilen bu çalışmada, ArcSWAT modeli kullanılarak detaylı bir akım simülasyonu gerçekleştirilmiş; SUFI-2 algoritmasına dayalı parametrik kalibrasyon ve validasyon süreçleri yürütülmüştür. Yüksek dağlık topoğrafya, kar erimesine dayalı akım rejimi ve sınırlı hidro-meteorolojik gözlem altyapısı nedeniyle karmaşık yapıya sahip olan bu havzada, çalışmanın temel amacı, güvenilir, istasyon bazlı ve çoklu çözünürlükte çalışan bir hidrolojik model kurmak olmuştur. Çalışmada 2009–2017 dönemine ait meteorolojik ve hidrolojik veri setleri derlenmiş; sayısal yükseklik modeli (DEM), arazi kullanımı (LULC) ve toprak haritaları ArcGIS destekli ArcSWAT arayüzü ile entegre edilerek 28 adet HRU üzerinden havza modellenmiştir. Modelin kalibrasyon ve validasyon

aşamalarında dört farklı akım istasyonuna ilişkin günlük ve aylık zaman adımları kullanılmış, *PLAPS* ve *TLAPS* gibi yükseklik temelli parametreler sabitlenmiş ve özellikle kar erimesi dinamiklerini yansıtan *SMTMP*, *SMFMX*, *SFTMP*, *TIMP* gibi değişkenlerin optimizasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon döneminde *NSE*, R_2, $P_{faktör}$ ve $R_{faktör}$gibi performans göstergeleri genel olarak literatürde kabul gören sınırların üzerinde değerler üretmiş; özellikle Pul-ı Ashwa ve Bagh-ı Lala istasyonlarında yüksek doğruluk ve düşük belirsizlik elde edilmiştir. Validasyon süreci de benzer biçimde istasyonel tutarlılığı göstermiştir. Yıllık ortalama yağış 399.6 mm olarak belirlenmiş, bunun yaklaşık üçte biri yüzey akışına dönüşürken önemli bir kısmı yer altı akışına ve sızmaya yönelmiştir. SWAT modeliyle gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre ise Panjshir gibi veri konusunda kısıtlı alanlarda güvenilir akım tahmini yapılabileceğini ve fiziksel temelli model çıktılarının mühendislik tasarım kararlarında doğrudan kullanılabilecek nitelikte olduğunu ortaya koymuştur.

Önerilere gelindiğinde ise;

1) Panjshir alt havzasında yürütülen bu çalışmada kullanılan dört akım istasyonuna ait veri seti, modelin kalibrasyonu ve validasyonu açısından yeterli düzeyde sonuçlar üretmiştir; ancak model performansının daha ileri düzeyde iyileştirilebilmesi için istasyon sayısının artırılması ve özellikle yüksek rakımlı, kar erimesi etkili bölgelerde uzun dönemli gözlem verilerinin toplanması büyük önem arz etmektedir.

2) Yükseklik temelli sıcaklık ve yağış gradyanlarının model performansı üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, PLAPS ve TLAPS parametrelerinin sahada kurulacak otomatik meteoroloji istasyonlarıyla doğrulanması, gelecekteki model çalışmalarına önemli katkılar sağlayacaktır. Bu değişkenlerin farklı alt havzalarda farklı tepkiler üretme potansiyeli, lokal kalibrasyonların önemini daha da artırmaktadır.

3) Kar erimesi kaynaklı yüzey akışlarının modellenmesinde kullanılan SMTMP, SMFMX ve SMFMN gibi parametreler, SWAT modelinde hidrolojik döngünün kritik bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu parametrelerin NASA MODIS ya da ESA Sentinel uydu ürünleriyle karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmesi, modelin fiziksel temsiliyetini artıracaktır.

4) Pul-ı Ashwa ve Shokhi gibi istasyonlarda validasyon döneminde belirsizlik bandının genişlemesi göz önüne alındığında, bu alt havzalara özel olarak su tutma kapasitesi (CN2), eğim sınıfı (HRU_SLP), yeraltı su gecikme süresi (GW_DELAY) gibi parametrelerin yeniden optimize edilmesi, modelin lokal başarısını artıracaktır. Parametre duyarlılığı, belirsizlik kontrolü ile birlikte yürütülmelidir.

5) Modelin taşkın piklerini düşük tahmin ettiği, bazı düşük debi dönemlerinde sapmalar gösterdiği istasyonlar için mevsimsel akım tahmini yapan alt modellerin oluşturulması önerilmektedir. Bu doğrultuda, SWAT modeline entegre edilecek regresyon temelli ya da makine öğrenimi destekli bir taşkın bileşeni, özellikle erken uyarı sistemleri için faydalı olabilecektir.

6) Model çıktılarının yalnızca akademik düzeyde kalmaması adına, Panjshir ve genel olarak Kabil Havzası'nda su yönetimi ile sorumlu yerel ve bölgesel kurumlarla işbirliğine gidilmesi önem arz etmektedir. SWAT-CUP sonuçlarının, baraj işletme rejimi, taşkın kontrol stratejileri ve sulama planlaması gibi mühendislik uygulamalarına entegre edilmesi önerilmektedir.

7) Panjshir Havzası gibi iklim değişikliğine duyarlı alanlarda, RCP senaryolarına dayalı iklim projeksiyonlarının (RCP4.5, RCP8.5 vb.) modele entegre edilerek yüzey akış rejimi, kar-zamanlaması ve buharlaşma bileşenlerinde yaşanacak değişimlerin senaryo bazlı değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede ise modelin genişletilerek adaptif bir karar destek sistemi niteliği kazanması sağlanmalıdır.

KAYNAKÇA

Aawar, T., Khare, D. (2020). Assessment of climate change impacts on streamflow through hydrological model using SWAT model: A case study of Afghanistan. *Modeling Earth Systems and Environment, 6*(3), 1427–1437.

Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, Srinivasan. B., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of hydrology, 524*, 733-752.

Akhtar, F., Awan, U. K., Borgemeister, C., Tischbein, B. (2021). Coupling remote sensing and hydrological model for evaluating the impacts of climate change on streamflow in data-scarce environment. *Sustainability, 13*(24), 14025.

Akhundzadah, N. A. (2024). Analyzing temperature, precipitation, and river discharge trends in Afghanistan's main river basins using innovative trend analysis, Mann–Kendall, and Sen's slope methods. *Climate, 12*(12), 196.

Alawi, S. A., Özkul, S. (2023). Evaluation of satellite-based precipitation data sets in hydrological modeling using Soil Water Assessment Tool (SWAT). *Arabian Journal of Geosciences, 16*(5), 340.

Alawi, S. A., Özkul, S. (2023). Impact assessment of climate change on water resources of the Kokcha watershed: A sub-basin of the Amu Darya river basin in Afghanistan. *Journal of Water and Climate Change, 14*(5), 1656–1671.

Ayoubi, T. (2024). Assessing the impact of climate change on water resources in Upper Kabul River Basin, Afghanistan, *Yayımlanmamış doktora tezi*, Freie Universität Berlin.

Ayoubi, T., Dongshik, K. (2016). Panjshir watershed hydrologic model using integrated GIS and ArcSWAT interface. *Journal of Earth and Environmental Science, 6*, 145–161.

Ayoubi, T., Kang, D. (2016). Assessing impacts of landuse/landcover change on surface runoff for panjshir watershed: a watershed modelling approach. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 6*(1).

Ayoubi, T., Reinhardt-Imjela, C., Schulte, A. (2024). Assessment of water resources under climate change in Western Hindukush Region: A case study of the Upper Kabul River Basin. *Atmosphere, 15*(3), 361.

Azizi, A. H., Akhtar, F., Tischbein, B., Borgemeister, C., Wang, Q. (2025). Understanding Water Storage Dynamics in Afghanistan: An Integrated Perspective. *Global Water Storage*, https://www.globalwaterstorage.info/en/understanding-water-storage-dynamics-in-afghanistan-an-integrated-perspective#:~:text=Understanding%20Water%20Storage%20Dynamics%20in,term%20water%20storage%20trends

Becker, M. W., Daw, A. (2005). Influence of lake morphology and clarity on water surface temperature as measured by EOS ASTER. *Remote sensing of environment, 99*(3), 288-294.

Betrie, G. D., Xuan, Y., Griendsven, A. (2023). *ArcGIS Interface for Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*, Texas Agricultural Experiment Station, Texas A.M University.

Bromand, M. T. (2015). Impact assessment of climate change on water resources in the Kabul River Basin, Afghanistan, *Yayımlanmamış doktora tezi*, Ritsumeikan University, Japan.

Ertürk, A., Ekdal, A., Karakaya, N., Cüceloğlu, G., Gürel, M., Ethem, İ., Kadıköy, İ. (2015). *Yeraltı Suyuna Bağlı Ekosistemler: Köyceğiz–Dalyan Örnek Çalışması*. Conference Paper.

Hayat, E. (2022). Hydrological and meteorological drought and trend analysis in Afghanistan and their implications on transboundary rivers, *Yayımlanmamış doktora tezi*, Izmir Institute of Technology, Turkey.

Hejran, A. W., Dawari, A. S., Busty, M. S., Sangin, E. (2020). Runoff modeling of the Upper Tarnak River Basin, Afghanistan: Based on SWAT. *International Journal of Academic Research and Development, 5*(6), 24-29.

Hussainzada, W., Lee, H. S. (2021). Hydrological modelling for water resource management in a semi-arid mountainous region using the Soil and Water Assessment Tool: A case study in northern Afghanistan. *Hydrology, 8*(1), 16.

Hussainzada, W., Lee, H. S. (2022). Effect of an improved agricultural irrigation scheme with a hydraulic structure for crop cultivation in arid northern Afghanistan using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Scientific Reports, 12*(1), 5186.

MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü). (2025). *Hidrolojik Sistemleri ve Süreç Modelleme*, https://www.mgm.gov.tr/genel/hidrolojikmodelleme.aspx?s=4#:~:text=Hidrolojik%20döngü%2C%20dünyadaki%20suyun%20dolaşımı,akiferleri%20ve%20kar%20örtüsü%20gibi

Mujeeb, M., Safi, L., Shirzad, M. D. (2025). Assessment of climate change impacts on streamflow in the Maidan Sub-River Basin. *Journal of Natural Science Review, 3*(1), 169–194.

Ougahi, J. H., Karim, S., Mahmood, S. A. (2022). Application of the SWAT model to assess climate and land use/cover change impacts on water balance components of the Kabul River Basin, Afghanistan. *Journal of Water and Climate Change, 13*(11), 3977–3999.

Özdemir, K., Güngör, Ö. (2019). Filyos çayı havzasında SWAT modelinin uygulaması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1*(2), 90-102.

Peker, İ. B., Cuceloglu, G. (2022). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye'deki Uygulamaları. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik, 23*(1), 9-26.

Rasouli, H., Kayastha, R. B., Bhattarai, B. C., Shrestha, A., Arian, H., Armstrong, R. (2015). Estimation of discharge from Upper Kabul River Basin, Afghanistan using the snowmelt runoff model. *Journal of Hydrology and Meteorology, 9*(1), 85–94.

Shams, H., Khan, A., Haleem, K., & Mahmood, S. (2024). Assessing the effects of climate and land-use change on flood recurrence in Kokcha River, Afghanistan. *Journal of Water and Climate Change, 15*(5), 2464–2483.

Şahin, Ü., Kurnaz, L. (2014). İklim değişikliği ve kuraklık. *İstanbul Politikalar Merkezi, Kuraklık Raporu*, İstanbul.

Tanı, H. (2020). Modelling rainfall-runoff processes in Kabul River Basin using Arc SWAT model, *Yayımlanmamış yüksek lisans tezi*, Izmir Institute of Technology, Turkey.

Tanı, H., Tayfur, G. (2023). Modelling rainfall-runoff process of Kabul River Basin in Afghanistan using ArcSWAT model. *Journal of Civil Engineering and Construction, 12*(1), 1–18.

Taraky, Y. M. (2021). Transboundary water resources in the context of developmental goals and climate change, the case of the Kabul River Basin, *Yayımlanmamış doktora tezi*, University of Guelph.

Van Vliet, M. T., Franssen, W. H., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., Kabat, P. (2013). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change, 23*(2), 450-464.

WMO. (2021). *Dünya Meteoroloji Örgütü'ne Göre İklim Krizi*, https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-58804155#:~:text=Dünya%20Meteoroloji%20Örgütü%27ne%20göre%20iklim,baskıyı%20artırdığını%3B%20iklim%20değişikliğinin

EKLER

Bagh-i-Lala İstasyonu					
Tarih	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**	**Tarih**	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**
Jan.10	3,703226	1,388	Jan.14	3,377419	1,828
Feb.10	3,966071	4,597	Feb.14	4,035714	1,596
Mar.10	7,519355	17,32	Mar.14	12,419354	5,155
Apr.10	23,016666	29,32	Apr.14	38,700001	29,43
May.10	34,08387	27,27	May.14	44,096775	43,049999
Jun.10	28,226667	12,19	Jun.14	26,466667	26,620001
Jul.10	13,867742	9,95	Jul.14	16,516129	11,44
Aug.10	8,045161	9,61	Aug.14	10,57	5,371
Sep.10	4,39	5,593	Sep.14	4,990334	2,62
Oct.10	4,662903	5,339	Oct.14	3,322581	4,457
Nov.10	4,383333	4,38	Nov.14	2,833333	5,019
Dec.10	4,025806	1,872	Dec.14	3,322581	3,034
Jan.11	3,289677	0,9158	Jan.15	2,754839	4,233
Feb.11	2,621428	1,052	Feb.15	5,258572	5,946
Mar.11	11,325161	14,81	Mar.15	10,477742	10,35
Apr.11	21,406666	26,65	Apr.15	17,986666	20,209999
May.11	34,232258	27,11	May.15	20,516129	21,879999
Jun.11	11,143333	10,62	Jun.15	17,533333	12,96
Jul.11	6,013871	4,953	Jul.15	11,175161	9,647
Aug.11	3,517742	2,384	Aug.15	3,575161	7,878
Sep.11	3,336667	1,684	Sep.15	4,926667	6,295
Oct.11	4,228387	11,56	Oct.15	3,922581	5,367
Nov.11	4,142667	10,01	Nov.15	3,602	7,008
Dec.11	3,179032	5,34	Dec.15	3,076452	5,587
Jan.12	1,030323	2,553	Jan.16	3,127742	4,719
Feb.12	1,272069	1,227	Feb.16	4,508276	5,29
Mar.12	14,219677	6,034	Mar.16	13,525806	12,54
Apr.12	39,626667	33,05	Apr.16	18,401333	23,33
May.12	29,9	31,46	May.16	24,998711	25,870001
Jun.12	26,4	18,06	Jun.16	17,670666	17,85
Jul.12	11,466774	8,292	Jul.16	8,157419	12,06
Aug.12	2,838387	4,128	Aug.16	4,22258	9,879
Sep.12	2,888	5,798	Sep.16	3,734	8,605
Oct.12	5,546774	3,341	Oct.16	2,091548	10,13
Nov.12	3,513667	3,739	Nov.16	5,590667	12,6
Dec.12	1,989032	2,594	Dec.16	4,130322	8,467
Jan.13	4	1,21	Jan.17	3,74129	6,672
Feb.13	4,996428	1,483	Feb.17	5,1375	6,625
Mar.13	13,29129	15,25	Mar.17	8,037419	7,655
Apr.13	14,796667	34,43	Apr.17	14,392667	21,92
May.13	34,322582	36,22	May.17	21,752903	19,98
Jun.13	32,433334	24,94	Jun.17	15,181334	11,68
Jul.13	5,080323	11,31	Jul.17	9,027419	9,712
Aug.13	3,459677	9,582	Aug.17	7,573226	9,558
Sep.13	3,966667	4,071	Sep.17	4,547333	7,15
Oct.13	3,322581	2,801	Oct.17	3,645161	7,113
Nov.13	4,633333	4,223	Nov.17	4,161	5,548
Dec.13	4,677419	3,477	Dec.17	3,948065	4,619

Tang-i Gulbahar İstasyonu					
Tarih	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**	**Tarih**	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**
Jan.10	13,5	7,232	Jan.14	8,403226	2,938
Feb.10	14,103572	8,471	Feb.14	9,303572	2,645
Mar.10	20,570969	17,17	Mar.14	13,080646	15,27
Apr.10	41,613335	36,919998	Apr.14	32,533333	49,709999
May.10	108,254837	62,299999	May.14	123,225807	112
Jun.10	160,96666	55,450001	Jun.14	209,333328	100,599998
Jul.10	143,093552	70,120003	Jul.14	100	50,560001
Aug.10	72,161293	72,269997	Aug.14	39,064518	20,049999
Sep.10	26,530001	39,75	Sep.14	17,700001	8,57
Oct.10	16,838709	22,309999	Oct.14	15,403226	4,643
Nov.10	14	15,48	Nov.14	13,366667	7,133
Dec.10	13,941936	7,079	Dec.14	10,290322	4,846
Jan.11	11,619355	3,241	Jan.15	13,135484	3,296
Feb.11	11,671429	2,695	Feb.15	13,814285	8,938
Mar.11	15,16129	19,58	Mar.15	24,170967	14,75
Apr.11	27,82	81,239998	Apr.15	62,383335	44,82
May.11	102,922577	153,399994	May.15	131,580643	88,550003
Jun.11	193,133331	161,300003	Jun.15	225,96666	78,139999
Jul.11	110,825806	134,300003	Jul.15	113,3871	51,419998
Aug.11	24,264517	111,5	Aug.15	34,80645	30,290001
Sep.11	18,940001	72,209999	Sep.15	19,066668	15,78
Oct.11	17,77742	57,990002	Oct.15	18,051613	8,603
Nov.11	15,366667	57,650002	Nov.15	18,57	11,51
Dec.11	13,025806	29,540001	Dec.15	14,406451	9,219
Jan.12	10,340968	12,37	Jan.16	16,116129	5,986
Feb.12	11,176552	5,791	Feb.16	14,702069	5,281
Mar.12	19,906452	9,895	Mar.16	18,120001	17,34
Apr.12	47,993332	85,669998	Apr.16	44,036667	62,290001
May.12	60,629032	113,5	May.16	140,809677	93,209999
Jun.12	140,899994	109,300003	Jun.16	195,050003	77,309998
Jul.12	118,741936	85,129997	Jul.16	116,599998	41,330002
Aug.12	46,322582	54,439999	Aug.16	53,419353	20,76
Sep.12	34,013332	43,34	Sep.16	24,296667	11,27
Oct.12	12,261291	26,450001	Oct.16	23,129032	7,446
Nov.12	11,563334	13,38	Nov.16	22,256666	4,288
Dec.12	10,330968	6,79	Dec.16	17,812902	3,766
Jan.13	11,629032	3,342	Jan.17	15,683871	4,096
Feb.13	11,914286	2,75	Feb.17	16,067858	5,552
Mar.13	16,338709	24,469999	Mar.17	17,596775	10,11
Apr.13	30,809999	56,740002	Apr.17	42,026669	57,080002
May.13	100,458061	81,029999	May.17	130,241928	100,9
Jun.13	166,46666	71,730003	Jun.17	139,75	83,5
Jul.13	57,180645	50,25	Jul.17	69,438713	49,029999
Aug.13	30,093548	42,360001	Aug.17	35,22258	25,889999
Sep.13	17,313334	19,049999	Sep.17	22,879999	17,530001
Oct.13	17,567741	8,479	Oct.17	21,122581	14,82
Nov.13	14,08	6,876	Nov.17	23,84	9,332
Dec.13	12,651613	5,275	Dec.17	20,487097	5,257

Pul-i-Ashwa İstasyonu					
Tarih	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**	**Tarih**	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**
Jan.10	0,4	0,2799	Jan.14	8,4355	1,843
Feb.10	0,3	0,4005	Feb.14	10,8393	1,033
Mar.10	21,028999	27,860001	Mar.14	15,1452	3,802
Apr.10	46	50,630001	Apr.14	43,866699	37,77
May.10	61	58,470001	May.14	80,871002	79,379997
Jun.10	65,389999	38,299999	Jun.14	84,196701	56,57
Jul.10	27,316099	21,059999	Jul.14	36,403198	31,959999
Aug.10	21,664499	13,26	Aug.14	10,8787	15,95
Sep.10	3,9123	5,509	Sep.14	5,726	7,468
Oct.10	9,7703	2,38	Oct.14	7,2968	4,304
Nov.10	10,2	1,13	Nov.14	11,3333	1,829
Dec.10	9,3226	0,523	Dec.14	9,871	0,8406
Jan.11	0,1	0,2589	Jan.15	7,519355	0,9737
Feb.11	0,17	0,2237	Feb.15	12,075	0,7955
Mar.11	19,419399	35,580002	Mar.15	22,093548	5,891
Apr.11	36,233299	45,93	Apr.15	34,990002	35,639999
May.11	67	71,690002	May.15	54,390324	43,990002
Jun.11	31,2467	47,16	Jun.15	41,959999	27,5
Jul.11	16,9226	25,879999	Jul.15	15,337097	18,48
Aug.11	11,9284	12,49	Aug.15	5,412903	12,73
Sep.11	4,6633	6,017	Sep.15	4,241333	8,905
Oct.11	6,1458	4,197	Oct.15	9,323871	6,324
Nov.11	2	1,59	Nov.15	11,296667	4,626
Dec.11	0,8	0,7426	Dec.15	8,629032	3,245
Jan.12	0,34	0,3984	Jan.16	9,729033	2,284
Feb.12	8,9724	0,1901	Feb.16	9,948276	2,026
Mar.12	21,2258	15,63	Mar.16	11,112904	7,201
Apr.12	50	47,509998	Apr.16	29,828333	38,419998
May.12	62	59,450001	May.16	56,941936	64,870003
Jun.12	68,206703	51,16	Jun.16	43,345001	40,439999
Jul.12	28,0613	29,6	Jul.16	11,783871	26,700001
Aug.12	7,4716	14,96	Aug.16	6,214516	18,440001
Sep.12	6,6593	8,539	Sep.16	6,257	13,31
Oct.12	3,8639	3,594	Oct.16	7,710968	9,238
Nov.12	1,6	1,74	Nov.16	10,83	6,589
Dec.12	0,7	0,8356	Dec.16	10,329032	4,709
Jan.13	0,33	0,4668	Jan.17	8,939355	3,314
Feb.13	0,3	0,2622	Feb.17	9,758572	2,45
Mar.13	0,08	0,0931	Mar.17	12,939033	6,184
Apr.13	0,003	0,0019	Apr.17	34,080002	59,48
May.13	40	38,389999	May.17	49,41613	48,889999
Jun.13	63,256699	47,779999	Jun.17	34,59	31,549999
Jul.13	45	49,619999	Jul.17	11,272903	21,540001
Aug.13	5,2071	46,169998	Aug.17	8,976774	14,91
Sep.13	4,7	30,23	Sep.17	8,514667	10,49
Oct.13	7,0026	16,709999	Oct.17	7,425161	7,582
Nov.13	10,0933	8,468	Nov.17	9,941334	5,391
Dec.13	10,5871	4,013	Dec.17	9,832258	3,843

Shokhi İstasyonu					
Tarih	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**	**Tarih**	**Gölemlenen**	**Simüle edilen**
Jan.10	36,780643	11,91	Jan.14	43	16,870001
Feb.10	34,857143	30,26	Feb.14	44	24,34
Mar.10	51,490322	169,600006	Mar.14	94,5	66,480003
Apr.10	88,446663	163	Apr.14	126	170,5
May.10	212,516129	187,600006	May.14	189	293,899994
Jun.10	287,366669	158,100006	Jun.14	320	258,799988
Jul.10	256,064514	163	Jul.14	260	161,399994
Aug.10	161,593552	136	Aug.14	87,599998	74,089996
Sep.10	78,546669	74,440002	Sep.14	25,200001	36,299999
Oct.10	24,67742	65,980003	Oct.14	30	20,98
Nov.10	27,033333	39,200001	Nov.14	31	17,02
Dec.10	39,483871	19,02	Dec.14	36	10,75
Jan.11	29,196774	9,892	Jan.15	34,80645	11,56
Feb.11	35,539288	24,76	Feb.15	33,32143	39,740002
Mar.11	48,935482	156,800003	Mar.15	52,645161	80,589996
Apr.11	85,269997	185,300003	Apr.15	97,5	161,5
May.11	302,806458	335	May.15	260	237,399994
Jun.11	177,28334	248,699997	Jun.15	406,333344	192,100006
Jul.11	61,05484	186	Jul.15	233,161285	140,5
Aug.11	48,180645	147,800003	Aug.15	65,322578	83,169998
Sep.11	33,666668	105,900002	Sep.15	29,5	48,59
Oct.11	27,467741	69,279999	Oct.15	26,806452	29,42
Nov.11	29,333334	47,060001	Nov.15	27,9	24,049999
Dec.11	30,096775	25,360001	Dec.15	31,032259	18,110001
Jan.12	32,496773	12,8	Jan.16	42,161289	17,639999
Feb.12	32,996552	12,21	Feb.16	38,931034	54,98
Mar.12	65,725807	106,900002	Mar.16	46,258064	73,790001
Apr.12	129,866669	188,899994	Apr.16	174,330002	161,800003
May.12	241,870972	199,800003	May.16	338,345154	302
Jun.12	399,451599	245,899994	Jun.16	432,966675	233,5
Jul.12	271,533325	225	Jul.16	105,383873	141,300003
Aug.12	78,545158	140,800003	Aug.16	39,08387	81,459999
Sep.12	25,433332	100,5	Sep.16	28,4	57,77
Oct.12	25,32258	50,860001	Oct.16	25,064516	47,740002
Nov.12	24,5	28,99	Nov.16	28,866667	42,099998
Dec.12	30,67742	18,9	Dec.16	35,903225	29,83
Jan.13	40,712902	18,059999	Jan.17	41,483871	28,049999
Feb.13	37,80357	23,27	Feb.17	39,971428	44,880001
Mar.13	58,645161	55,509998	Mar.17	43,548386	67,75
Apr.13	128	74,5	Apr.17	83,236664	242,800003
May.13	264,354828	136,300003	May.17	233,764511	247,399994
Jun.13	439,200012	191,300003	Jun.17	208,626663	181,800003
Jul.13	176,232254	156,100006	Jul.17	64,39032	130,399994
Aug.13	104,6129	221,699997	Aug.17	30,775806	87,580002
Sep.13	40,599998	166,100006	Sep.17	32,723331	52,889999
Oct.13	28,064516	74,690002	Oct.17	36,612904	35,98
Nov.13	28,799999	42,279999	Nov.17	39,723331	22,58
Dec.13	32,570969	29,52	Dec.17	38,493549	14,65

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :Abdul Raheem AKBARI

Uyruğu : Afgan