



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZLİ

SWAT MODELİ ARACILIĞIYLA İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN BARTIN
İLİ'NDEKİ SU KAYNAKLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

HAMED MARDANSHAHİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ

BARTIN – 2025



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SWAT MODELİ ARACILIĞIYLA İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN BARTIN İLİ'NDEKİ
SU KAYNAKLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZLİ

Hamed MARDANSHAHI

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ

Üye : Prof. Dr. Hatice ÇITAKOĞLU

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ

BARTIN – 2025

KABUL VE ONAY

HAMED MARDANSHAHI tarafından hazırlanan “SWAT MODELİ ARACILIĞIYLA İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN BARTIN İLİ’NDEKİ SU KAYNAKLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı Yüksek Lisans tezi, 26.11.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ

.....

Üye : Prof. Dr. Hatice ÇITAKOĞLU

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ

.....

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer CEYLAN

Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ danışmanlığında hazırlamış olduğum “SWAT MODELİ ARACILIĞIYLA İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN BARTIN İLİ’NDEKİ SU KAYNAKLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı Yüksek Lisans (Tezli) tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

26.11.2025

Hamed MARDANSHAHI

YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN BEYAN

☒ Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faydalanmadım**.

☐ Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faydalandım**. Bu kapsamda, yapay zekâ destekli araçların kullanımına ilişkin aşağıdaki hususları beyan ederim:

1. Bu çalışmada, yalnızca bilimsel üretim sürecini desteklemek amacıyla yapay zekâ tabanlı araçlardan yararlanılmış olup; kullanılan araçların işlevi, katkı düzeyi ve sınırları açık biçimde eklerde belirtilmiştir. Bu kapsamda kullanılan yapay zekânın kapsamı hipotez geliştirme, teorik tartışma ve yorumlama gibi üst düzey beceri, deneyim ve uzmanlık gerektiren aşamaları içermemektedir.
2. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir.
3. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır.
4. Çalışmanın hazırlanmasında kullanılan yapay zekâ araçları ve işlevleri ekte sunulan tabloda ayrıntılı olarak belirtilmiş olup bu kullanım danışman öğretim üyesinin bilgisi dahilinde gerçekleştirilmiştir.
5. Yukarıda yer alan beyanımın gerçeğe aykırı olduğunun tespiti hâlinde, yükseköğretim mevzuatı, ilgili etik kurallar ve Bartın Üniversitesi disiplin mevzuatı çerçevesinde hakkımda yaptırım uygulanabileceğini bildiğimi ve bu sonuçları kabul ettiğimi taahhüt ederim.

26.11.2025

Hamed MARDANSHAHİ

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının tüm aşamalarında yol gösterici bilimsel katkıları, sabırlı geri bildirimleri ve teşvik edici yaklaşımı için tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ'ye teşekkür ederim. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki değerli hocalarıma, ders ve seminerler sırasında sundukları görüşler ve öneriler için minnettarım.

Veri temini ve teknik desteği için ilgili kurum ve birimlere, özellikle meteorolojik ve hidrometrik gözlemlerin sağlanmasında destek veren uzmanlara teşekkür ederim. Modelleme ve CBS süreçlerinde birlikte çalıştığım arkadaşlarımdan katkıları, bu tezin ortaya çıkmasına önemli ölçüde yardımcı olmuştur.

Bu süreçte sabır ve anlayışlarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim, destekleri olmasaydı bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmayacaktı.

Bu çalışma kapsamında herhangi bir kurumdan maddi destek alınmamıştır.

Hamed MARDANSHAHI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezli

TEZ BAŞLIĞI: SWAT MODELİ ARACILIĞIYLA İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN BARTIN İLİ'NDEKİ SU KAYNAKLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

HAMED MARDANSHAHI

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ

Bartın – 2025, sayfa: 111

Bu tezde, Bartın ili sınırları içerisindeki Bartın Arıt alt havzasında akım rejimi ile su bütçesinin iklim koşullarına duyarlılığı, süreç temelli SWAT2012 havza modeli kullanılarak incelenmiştir. Havzaya ait sayısal yükseklik modeli (DEM), arazi kullanımı/örtüsü ve toprak verileri EPSG:32636 (UTM 36N) koordinat sisteminde ortak çözünürlükte hazırlanmıştır. QSWAT aracılığıyla havza sınırı, akarsu ağı, alt havzalar ve hidrolojik tepki birimleri (HRU) türetilmiştir. Meteorolojik girdiler günlük yağış (PCP) ile maksimum–minimum sıcaklık (TMP) serilerinden oluşturulmuştur. Potansiyel buharlaşma-terleme Penman–Monteith yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Model 2010–2023 dönemi için günlük zaman adımında çalıştırılmıştır. 2010–2011 dönemi ısınma (warm-up) periyodu olarak ayrılmış, değerlendirmeler aylık ölçekte yapılmıştır. Çıkış kesitindeki Darıören Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) için üretilen aylık FLOW_OUT debileri DSİ gözlemleri ile karşılaştırılmıştır. Parametre kalibrasyonu ve doğrulaması, SWAT-CUP yazılımında SUFI-2 algoritması kullanılarak yürütülmüştür. Model alanı ($\approx 130 \text{ km}^2$) ile istasyon drenaj alanı (137 km^2) arasındaki küçük farkı gidermek amacıyla gözlem debileri $130/137 (=0,95)$ alan oranına göre ölçeklenmiştir. Model performansı NSE, KGE, R^2 , RSR ve PBIAS ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Kalibrasyon döneminde (2012–2018) $NSE=0,79$, $R^2=0,84$, $KGE=0,71$, $RSR=0,46$, $PBIAS=-16,9\%$ değerleri elde edilmiştir. Doğrulama döneminde (2019–2023)

ise $NSE=0,78$, $R^2=0,83$, $KGE=0,70$, $RSR=0,47$, $PBIAS=-20,9\%$ elde edilmiştir. Negatif PBIAS değerleri, modelin ortalama debiyi gözlemlere göre yüksek simüle etme eğilimine işaret etmektedir. Ayrıca TxtInOut çıktılarından yağış, gerçek buharlaşma-terleme ve akım bileşenleri derlenerek yıllık su bütçesi tutarlılığı kontrol edilmiştir. Sonuç olarak, kalibre edilmiş SWAT modeli Bartın Arıt alt havzasında akım rejimi ve su bütçesi bileşenlerinin nicel temsili için tekrarlanabilir bir temel sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bartın Arıt alt havzası, hidrolojik modelleme, iklim değişikliği, kalibrasyon-doğrulama, QSWAT, su bütçesi, SWAT-CUP, SWAT2012



ABSTRACT

Master's Thesis

THESIS TITLE: INVESTIGATING THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON WATER RESOURCES IN BARTIN PROVINCE USING THE SWAT MODEL

Hamed MARDANSHAHİ

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Asst. Prof. Dr. Ercan GEMİCİ

Bartın – 2025, pages: 111

In this thesis, the sensitivity of the flow regime and water balance to climatic conditions in the Bartın Arıt sub-basin within the boundaries of Bartın province was investigated using the process-based SWAT2012 watershed model. The digital elevation model (DEM), land use and land cover, and soil datasets were prepared at a common resolution in the EPSG:32636 (UTM 36N) coordinate system. The basin boundary, stream network, sub-basins, and hydrologic response units (HRU) were derived using QSWAT. Meteorological inputs were generated from daily precipitation (PCP) and maximum–minimum temperature (TMP) series, and potential evapotranspiration was calculated using the Penman–Monteith approach. The model was run at a daily time step for the 2010–2023 period. The 2010–2011 period was separated as the warm-up period, and evaluations were performed at a monthly scale. Monthly FLOW_OUT discharges simulated for Darıören Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) at the outlet were compared with DSİ observations. Parameter calibration and validation were conducted in SWAT-CUP using the SUFI-2 algorithm. To address the minor difference between the model area ($\approx 130 \text{ km}^2$) and the station drainage area (137 km^2), observed discharges were scaled by the area ratio of $130/137 (=0.95)$. Model performance was evaluated using NSE, KGE, R^2 , RSR, and PBIAS. In the calibration period (2012–

2018), NSE=0.79, $R^2=0.84$, KGE=0.71, RSR=0.46, and PBIAS=-16.9% were obtained. In the validation period (2019–2023), NSE=0.78, $R^2=0.83$, KGE=0.70, RSR=0.47, and PBIAS=-20.9% were obtained. Negative PBIAS values indicate that the model tends to simulate higher mean discharge compared with observations. In addition, annual water balance consistency was checked by compiling precipitation, actual evapotranspiration, and flow components from the TxtInOut outputs. Overall, the calibrated SWAT model provides a reproducible basis for the quantitative representation of the flow regime and water balance components in the Bartın Arıt sub-basin.

Keywords: Bartın Arıt sub-basin, calibration-validation, climate change, hydrologic modeling, QSWAT, SWAT-CUP, SWAT2012, water balance



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN BEYAN.....	iv
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
EKLER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Bilimsel Temelle	1
1.1.1 İklim Değişikliği ve Su Kaynakları	1
1.1.2 SWAT Modeli ve Uygulama Çerçevesi.....	2
1.2 Araştırma Problemi ve Önemi.....	5
1.2.1 Problem Tanımı.....	5
1.2.2 Çalışmanın Önemi ve Özgünlüğü.....	6
1.3 Araştırmanın Amacı ve Hedefleri	6
1.3.1 Araştırmanın Amacı	7
1.3.2 Hedefler.....	7
1.4 Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları.....	8
1.4.1 Kapsam	9
1.4.2 Sınırlılıklar.....	10
1.5 Araştırmanın Yenilikleri ve Katkıları.....	11
1.5.1 Bilimsel Yenilikler	11
1.5.2 Yöntemsel/İş Akışı Katkıları.....	12
1.5.3 Uygulama ve Politika Katkıları	13
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR	15
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1 Çalışma Alanı	35
3.1.1 Konum ve Topografya	36

3.1.2 Jeolojik ve Hidrojeolojik Yapı.....	37
3.1.3 İklimsel Özellikler.....	39
3.2 Model Girdi Verileri ve Ön İşleme	39
3.2.1 Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)	40
3.2.2 Arazi Kullanımı/Örtüsü (LULC).....	42
3.2.3 Toprak Verisi	43
3.2.4 Meteorolojik Veriler.....	45
3.2.5 Akım Gözlemleri (Darıören AGİ).....	47
3.3 QSWAT Model Kurulumu ve Uygulaması	49
3.3.1 Proje Ortamı ve Veri Entegrasyonu	50
3.3.2 Havza Sınırlarının Belirlenmesi	52
3.3.1 HRU Tanımı ve Eşikler (SWAT2012/QSWAT).....	54
3.3.2 İklim Dosyalarının Tanıtılması	57
3.3.3 Simülasyon Zaman Ayarları ve Çalıştırma	58
3.4 Kalibrasyon ve Validasyon.....	60
3.4.1 Kalibrasyon Stratejisi ve Parametreler	62
3.4.2 SWAT-CUP (SUFI-2) Uygulaması ve İterasyonlar	67
3.4.3 Validasyon ve Performans Ölçütleri.....	70
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	74
4.1 Kalibrasyon ve Validasyon Sonuçları	74
4.1.1 Performans Ölçütleri ve Genel Özet	74
4.1.2 Kalibrasyon Dönemi Sonuçları (2012–2018).....	75
4.1.3 Validasyon dönemi sonuçları (2019–2023).....	76
4.1.4 Grafikselleştirme araçları	77
4.2 Su Bütçesi Bileşenleri	80
4.2.1 Yıllık Su Bütçesi Özeti (2012–2023)	80
4.2.2 Yıllar arası değişkenlik (yıllık P–Q ilişkisi)	81
4.2.3 Aylık/Mevsimsel Dağılım	82
4.2.4 Su bütçesi tutarlılığı ve PBIAS ile ilişki	83
4.2.5 Su Bütçesi Tutarlılık Kontrolü.....	84
4.3 Literatürle Karşılaştırma ve Tartışma.....	84
4.3.1 Kalibrasyon/validasyon performansının literatürle kıyaslanması.....	85
4.3.2 Su bütçesi bileşenlerinin benzer havzalarla kıyaslanması	86

4.3.3 İklim değışikliğı bağlamında bulguların literatürle kıyaslanması	87
4.4 Model Sınırlılıkları ve Belirsizlikler.....	88
4.4.1 Girdi verisi belirsizlikleri (meteoroloji, akım gözlemi, alan farkı/ölçekleme)	89
4.4.2 Parametre belirsizliğı (SUFI-2: 95PPU, p-factor, r-factor).....	90
4.4.3 Model yapısal sınırlılıkları (özellikle pik akımlar/kar süreçleri vb.)	91
4.4.4 Kapsam, varsayımlar ve dışsal belirsizlikler (LULC sabit kabulü vb.).....	92
4.4.5 Belirsizliğı azaltmaya yönelik kısa öneri köprüsü	93
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
5.1 Genel Sonuçlar	95
5.1.1 Model performansı ve doğrulama özeti	95
5.1.2 Su bütçesi bulgularının özeti.....	96
5.1.3 İklim değışikliğı bağlamında çıkarımlar ve senaryolaştırmaya hazırlık.....	97
5.1.4 Çalışmanın ana katkısı	97
5.2 Yönetmel/Pratik Öneriler	98
5.2.1 Havza su yönetimi ve planlama açısından öneriler	98
5.2.2 Taşkın/kuraklık risk yönetimi açısından öneriler	99
5.2.3 İzleme ağı ve veri yönetimi önerileri	100
5.3 Bilimsel/Teknik Öneriler ve Gelecek Çalışmalar	101
5.3.1 Veri geliştirme önerileri (iklim girdileri, ET, kar süreçleri vb.)	101
5.3.2 Model/kalibrasyon geliştirmeleri ve belirsizlik analizi.....	103
5.3.3 Gelecek çalışmalar	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Hidrolojik çevrim ve su bütçesi bileşenleri (P, ET, Q _{surf} , sızma ve taban akımı).....	2
1.2: QGIS ortamında QSWAT arayüzünden bir ekran görüntüsü: alt havzalar (subbasins) ve akarsu ağı (reaches) (EPSG:32636).	3
1.3: SWAT (SWAT2012) modelinin genel işleyiş şeması (girdi–proses–çıktı).....	4
1.4: SWAT2012 modelinde toprak-yeraltı suyu süreçlerinin kavramsal gösterimi: yüzey akışı (Q _{surf}), yanal akış (Q _{lat}), sığ akifer, derin akifer, geri buharlaşma (revap) ve taban akımı (Q _{gw}).....	4
3.1: Çalışma alanı konum haritası: Arıt kolu havza sınırı, akarsu ağı ve Dariören akım gözlem istasyonu (AGİ). Projeksiyon: EPSG:32636 (UTM Zone 36N)	35
3.2: Çalışma alanının konumu.....	37
3.3: Çalışma alanına ait DEM ve eğim (slope) haritaları.	41
3.4: Arazi kullanım/örtüsü (LULC) sınıf dağılım haritası	43
3.5: Toprak haritası ve sınıf dağılımı.....	45
3.6: Meteoroloji istasyonları ve veri kapsama haritası.....	46
3.7: Akım gözlem istasyonu (Dariören AGİ) konumu ve havza akarsu ağı.....	47
3.8: QSWAT3 arayüzünün açılış ekranı (sürüm 1.7.2). Proje oluşturma, alt havza çıkarımı (delineation) ve HRU tanımı için ilk adımlar.....	50
3.9: QGIS 3.40 (LTR).....	51
3.10: QGIS ortamında QSWAT arayüzü: proje oluşturma, havza sınırlandırma (delineation) ve HRU üretimi için temel modüller.	52
3.11: QSWAT delineation çıktısı: havza sınırı, alt havzalar ve akarsu ağı, Dariören AGİ'nin temsil edildiği çıkış kesiti.	53
3.12: Nihai HRU/LSU dağılımı (%5–%5–%10 eşiklerine göre).	56
3.13: Qswat arayüzünde HRU dağılımı (%5–%5–%10 eşik değerlerine göre)	56
3.14: SWAT Weather Database'de WGEN Statistics aracıyla Bartın iklim verilerinden WGEN_Bartın.xlsx (Weather Generator) istatistik dosyasının oluşturulması.....	57
3.15: SWAT Editor'de veritabanı bağlantı ayarları	59
3.16: SWAT model simülasyon ayarları: 01/01/2010–31/12/2023 dönemi, Monthly çıktı seçimi ve warm-up için NYSKIP=2 (SWAT Run Setup penceresi)	60

3.17: SWAT-CUP (SUFI-2) arayüzünde aylık akım (FLOW_OUT_1) için kalibrasyon ve validasyon kurulumunun genel görünümü (warm-up: 2010–2011, kalibrasyon: 2012–2018, validasyon: 2019–2023).	62
3.18: SWAT-CUP (SUFI-2) iterasyonu sonrası kalibrasyon parametrelerinin güncellenmiş en iyi değerleri (Best_Par) ve kullanılan aralıkların özeti.	66
3.19: SWAT-CUP (SUFI-2) kalibrasyonunda FLOW_OUT_1 için 95PPU belirsizlik bandı çıktısı: gözlenen akım (Observed), en iyi benzetim (Best estimation) ve 95PPU bandının (uncertainty envelope) gösterimi.	68
3.20: Validasyon dönemi gözlenen–simüle edilen akım hidroğrafi	72
3.21: SWAT-CUP (SUFI-2) iterasyonu sonunda elde edilen güncellenmiş en iyi parametre değerleri (Best_Par.txt): her parametre için fitted (best) değer ile tanımlanan min–max aralığı ve ilgili objective function sonucu (NSE).	73
4.1: Aylık gözlenen (Qobs) ve simüle edilen (Qsim) akımın zaman serisi karşılaştırması (Darıören AGİ/Reach 1) modelin pik akım ve düşük akım dönemlerindeki uyumunun görsel değerlendirmesi.	75
4.2: Validasyon dönemi (2019–2023) gözlenen ve simüle edilen aylık akım hidroğrafi....	77
4.3: Gözlenen ve simüle edilen aylık akımların 1:1 saçılım diyagramı	78
4.4: Gözlenen ve simüle edilen akımlar için akım süreklilik eğrisi (FDC).	79
4.5: Yıllık P–ET–Q bileşenleri	81
4.6: Yıllık yağış (P) ile akım derinliği (Q) ilişkisi	81
4.7: Aylık ortalama su bütçesi bileşenleri (P, ET ve Q).	83
4.8: Yıllık ortalama akım bileşenleri (SURQ, GW_Q ve WYLD).	83
4.9: 95PPU belirsizlik bandı ile gözlenen ve simüle akımın karşılaştırılması	91

TABLÖLAR DİZİSİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Çalışmanın kapsamı ve kapsam dışı unsurlar	9
1.2: Temel sınırlılıklar ve azaltma yaklaşımı	10
1.3: Araştırmanın yenilik ve katkılarının özeti.....	14
3.1: Jeolojik/Hidrojeolojik Birimler ve SWAT2012’de Beklenen Parametre Eğilimleri	38
3.2: LULC sınıfları ile SWAT kodlarının eşlemesi	43
3.3: Toprak sınıfının havza içindeki alan payı	44
3.4: Çalışmada kullanılan veri setleri, kaynakları ve ön-işleme.....	48
3.5: Havza sınırlandırma ayarları ve temel çıktılar (QSWAT – SWAT2012).....	54
3.6: Landuse dağılımı (HRU sonrası)	55
3.7: HRU eşik değerleri ve sınıflandırma ayarları	55
3.8: Gözlem istasyonları meta verisi (DSİ ve MGM)	58
3.9: SWAT-CUP (SUFI-2) kalibrasyonunda kullanılan parametrelerin tanımı ve akıma beklenen etkisi.....	64
3.10: SWAT-CUP (SUFI-2) kalibrasyon aralıkları ve en iyi parametre değerleri (Best_Par)	66
3.11: Model simülasyon penceresi ve değerlendirme dönemleri (warm-up, kalibrasyon, validasyon)	69
3.12: SWAT-CUP (SUFI-2) proje kurulumu ve koşu ayarları.....	69
3.13: SUFI-2’de kalibrasyona alınan parametreler ve tanımlama biçimi	70
3.14: Kalibrasyon ve validasyon dönemlerinde elde edilen performans ölçütlerinin özeti.	72
4.1: Kalibrasyon ve validasyon dönemlerinde aylık akım için performans ölçütleri (FLOW_OUT_1).....	75
4.2: Yıllık su bütçesi özeti (2012–2023).	80
4.3: Aylık ortalama su bütçesi ve akım bileşenleri (2012–2023 klimatolojisi).....	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ha	: hektar
km	: kilometre
m	: metre
m ²	: metrekare
m ³	: metreküp
P	: Yağış
ET	: Buharlaşma-terleme
Q	: Akım
Qsurf	: Yüzey akışı
BF	: Taban akımı
p	: Korelasyon katsayısı
r	: Serbestlik derecesi
χ^2	: Ki-kare dağılımı

KISALTMALAR

DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli
LULC	: Arazi Kullanımı/Örtüsü
HRU	: Hidrolojik Tepki Birimi
LSU	: Land Segment Unit
NSE	: Nash–Sutcliffe Etkinlik Katsayısı
KGE	: Kling–Gupta Etkinlik Katsayısı
PBIAS	: Yüzde Sapma
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hata
R ²	: Belirlilik Katsayısı
UTM	: Projeksiyon/koordinat sistemi
EPSG	: Projeksiyon/koordinat referans kodu
AGI	: Akım Gözlem İstasyonu

1. GİRİŞ

Bu tezde, iklim değışikliğinin Bartın ili Arıt Deresi havzasındaki su kaynakları üzerindeki olası etkileri SWAT modeli kullanılarak incelenmektedir.

1.1 Bilimsel Temelle

Bu bölümde, çalışmanın yöntemsel yaklaşımını ve elde edilen bulguların nasıl yorumlandığını destekleyen kuramsal çerçeve özetlenmektedir. İklim değışikliğinin hidrolojik döngü üzerindeki etkileri ile havza ölçeğinde süreç temelli modellemenin bu etkileri nicel olarak temsil etme kapasitesi ve sınırlılıkları kısaca ele alınmaktadır. Ayrıca tez kapsamında kullanılan yarı dağılımlı yaklaşımın (SWAT2012) su bütçesi bileşenlerini hangi varsayımlar altında hesapladığı açıklanmaktadır.

1.1.1 İklim Değışikliği ve Su Kaynakları

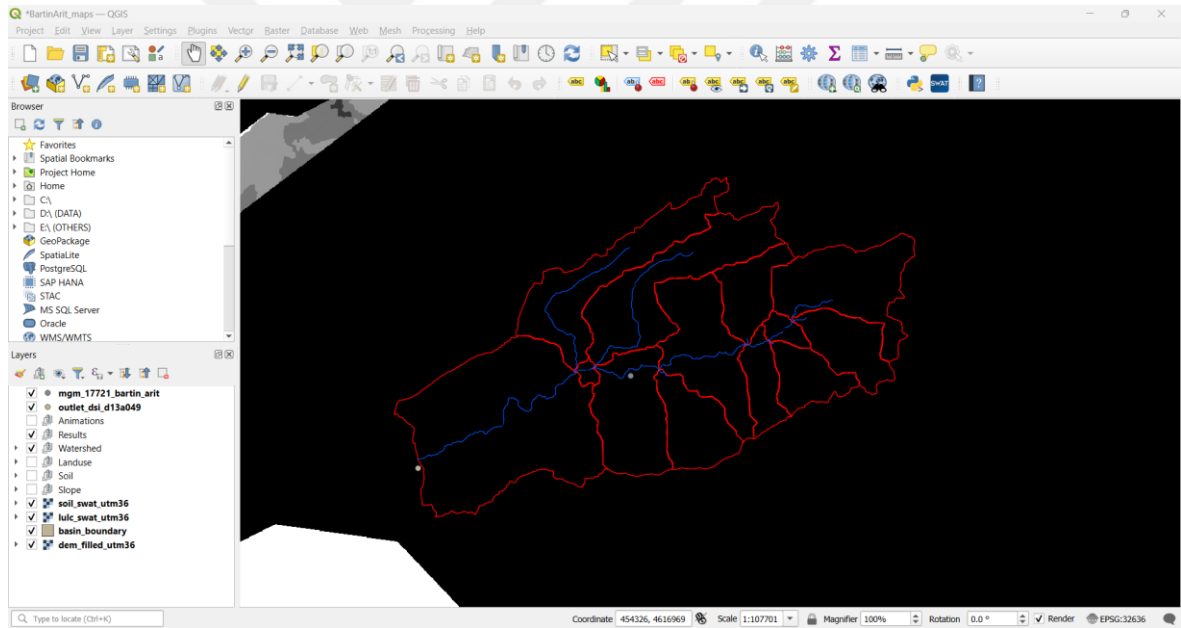
İklim değışikliği, özellikle sıcaklık artışıyla birlikte yağış rejiminde ve atmosferik dolaşım desenlerinde görülen uzun dönemli kaymalar üzerinden hidrolojik döngüyü doğrudan etkiler. Atmosfer ısındıkça havanın su buharı taşıma kapasitesi artar, bu durum yağışın şiddetini, yağış türünü (yağmur/kar) ve yağışın zamanlamasını değıştirebilir. Havza ölçeğinde bu değışimler, yağış (P), buharlaşma-terleme (ET), akım (Q) ve depolamadaki değışim (ΔS) arasındaki su bütçesi dengesinin yeniden şekillenmesine yol açmaktadır (IPCC, 2021; IPCC, 2023). Basit su bütçesi yaklaşımı $P \approx ET + Q + \Delta S$ şeklinde ifade edilebilir, burada ΔS , toprak nemi, yeraltı suyu ve kar birikimi/erimesi gibi depolama bileşenlerini temsil eder (IPCC, 2022).

Bir havzanın iklimdeki bir uyarıya verdiği tepki yalnızca meteorolojik koşullarla açıklanamaz. Arazi örtüsü ve arazi kullanımı, toprakların hidrolik özellikleri, topografya (eğim, bakı, yükselti dağılımı) ve başlangıç nem koşulları, yağışın yüzey akışına (Q_{surf}), sızma-perkolasyona, yanıl akışa ve taban akımına (BF) nasıl paylaştırılacağını belirleyen temel etmenlerdir. Yüksek yükselti farklarının belirgin olduğu havzalarda yağışın yağmur/kar olarak düşmesi, karın depolanması ve daha sonra erime ile akıma katılması, akım rejiminin mevsimselliğini ve yüksek akım zamanlamasını belirgin biçimde

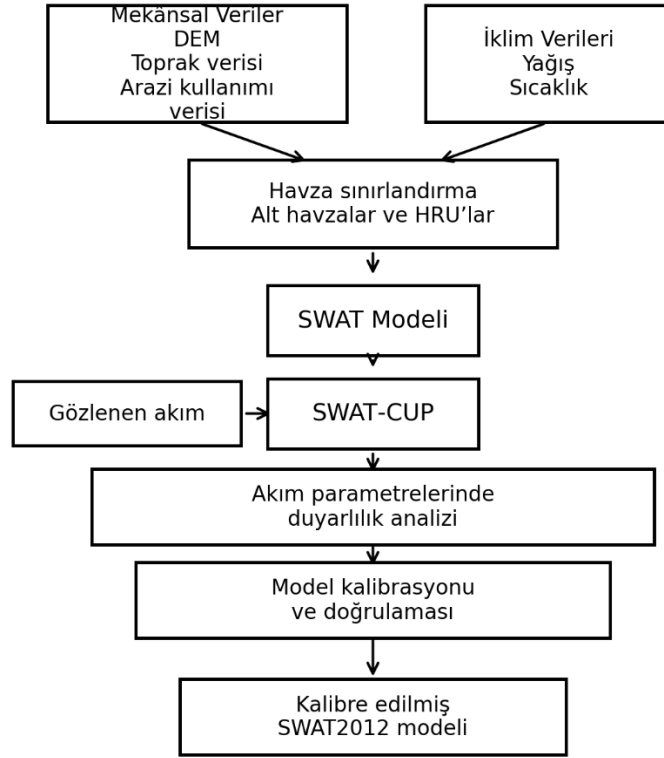
Akım yönlendirmesi kanal geometrisi ve hidrolik parametreler (ör. Manning pürüzlülüğü ve kanal iletkenliği) üzerinden temsil edildiğinden, kanal parametreleri hem pik debilerin sönümlenmesi hem de toplam hacimsel denge üzerinde belirleyicidir (Arnold vd., 1998).

Kar birikimi ve erime süreçleri, sıcaklık eşiklerine dayalı yağmur–kar ayrımı ile derece–gün yaklaşımı kullanılarak modellenmektedir. Bu süreçlerin temsili, SFTMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN ve TIMP gibi parametrelerle kontrol edilmektedir (Neitsch vd., 2011).

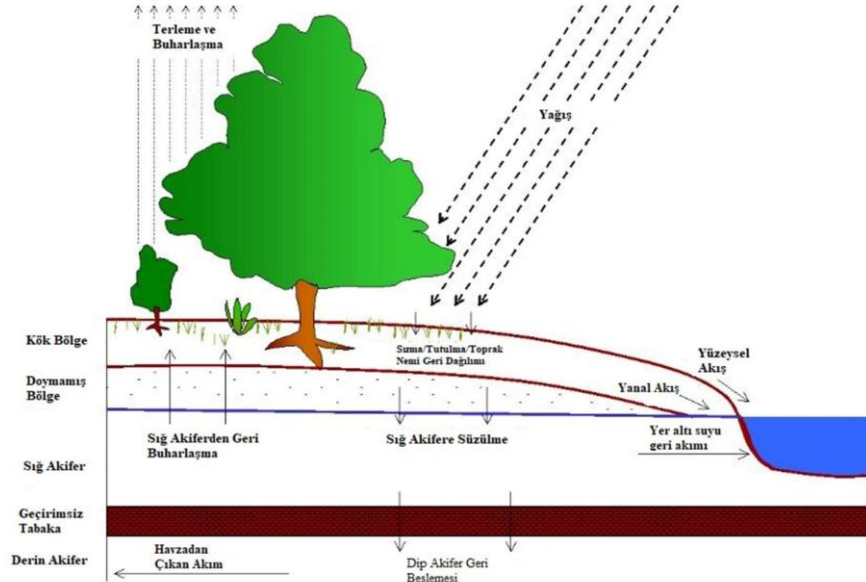
Bu tez kapsamında model kurulumu QGIS ortamında QSWAT eklentisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve simülasyonlar SWAT2012 model motoru ile yürütülmüştür. Parametre kalibrasyonu ve belirsizlik analizi SWAT-CUP yazılımında SUFI-2 algoritması kullanılarak yapılmış, model başarımı NSE, KGE, R^2 , RSR/RMSE ve PBIAS ölçütleri ile raporlanmıştır (Abbaspour, 2007; Abbaspour, 2015).



Şekil 1.2: QGIS ortamında QSWAT arayüzünden bir ekran görüntüsü: alt havzalar (subbasins) ve akarsu ağı (reaches) (EPSG:32636).



Şekil 1.3: SWAT (SWAT2012) modelinin genel işleyiş şeması (girdi–proses–çıktı)



Şekil 1.4: SWAT2012 modelinde toprak-yeraltı suyu süreçlerinin kavramsal gösterimi: yüzey akışı (Q_{surf}), yanal akış (Q_{lat}), sığ akifer, derin akifer, geri buharlaşma (revap) ve taban akımı (Q_{gw})

1.2 Araştırma Problemi ve Önemi

Bu çalışmanın araştırma problemi, iklim değişikliğine bağlı sıcaklık ve yağış rejimi değişimlerinin Bartın ili Arıt Deresi havzasında akım rejimini ve su bütçesi bileşenlerini (yüzeysel akış, yeraltı suyu beslenimi, evapotranspirasyon) hangi yönde ve ne büyüklükte değiştireceğinin yerel ölçekte sayısal olarak yeterince ortaya konulamamasıdır. Bu belirsizlik, Darıören Gözlem İstasyonu'ndaki gözlemlerle desteklenen güvenilir bir hidrolojik model kurulmadığı sürece taşkın ve kuraklık risklerinin yönetimini, su tahsisi ve planlamasını ve ekosistem ihtiyaçlarını dikkate alan sürdürülebilir su kaynakları yönetimini zayıflatmaktadır. Dolayısıyla çalışmanın önemi, SWAT modeli ile havzanın hidrolojik tepkisini temsil edip gözlem verileriyle doğrulanabilir bir altyapı oluşturarak, iklim senaryoları altında olası değişimleri nicel biçimde belirlemek ve karar vericilere bilimsel bir karar destek temeli sağlamaktır.

1.2.1 Problem Tanımı

Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Bartın-Arıt havzası, yüksek eğimli topografyası ve yıl içinde belirgin biçimde değişen yağış rejimi nedeniyle hidrolojik açıdan hassas bir havzadır. Özellikle kış ve erken ilkbaharda kar birikimi ve erime süreçleri, akımın hem zamanlamasını hem de büyüklüğünü belirgin ölçüde etkiler. Bu durum, bazı dönemlerde taşkın riskini artırırken yaz sonu ve sonbahar başında düşük akım koşullarının daha sık görülmesine yol açar. Sıcaklık artışıyla birlikte yağışın türü ve şiddetinde olası değişimler (yağışın kar/yağmur oranı ve yağış şiddeti gibi), bu akım rejiminin gelecekte farklılaşmasına neden olabilir.

Bununla birlikte, havzada hidrometeorolojik gözlem ağının sınırlı olması ve meteorolojik serilerdeki veri eksiklikleri, yüzey akışı, sızma, taban akımı ve kar süreçlerinin eş zamanlı etkileşimiyle birleştiğinde iklim parametrelerinin ölçümlere dayalı olarak doğrudan ve güvenilir biçimde ayrıştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu tezde ele alınan temel sorun, Bartın-Arıt havzasında akım ve su bütçesi bileşenlerini fiziksel açıdan tutarlı ve tekrarlanabilir bir çerçevede temsil edebilecek güvenilir bir hidrolojik model altyapısının kurulmasıdır. Bu amaçla süreç temelli SWAT modeli oluşturulmuş ve model çıktıları Darıören Akım Gözlem İstasyonu'na ait aylık debi verileriyle karşılaştırılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır.

Böylece, havzanın iklim koşullarına duyarlılığını nicel olarak değerlendirmeye ve ileride yapılacak iklim senaryosu analizlerine dayanak oluşturmaya uygun bir model çerçevesi oluşturulması amaçlanmıştır.

1.2.2 Çalışmanın Önemi ve Özgünlüğü

Bu tez, Bartın-Arıt alt havzası ölçeğinde süreç temelli ve yarı dağılımlı SWAT2012 modelinin kurulumu, kalibrasyonu ve doğrulanması için izlenebilir bir iş akışı ortaya koymaktadır. Havza ölçeğinde, kalibre edilmiş SWAT uygulamaları üzerinden akım rejimi ile su bütçesi bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların sınırlı olması, bölgeye özgü hidrometeorolojik koşullar altında geliştirilmiş ve test edilmiş bir modele duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Çalışma kapsamında QGIS ortamında QSWAT ile yürütülen veri hazırlığı ve havza tanımlama adımlarının açık biçimde raporlanması, kurulum sürecinin şeffaflığını ve tekrarlanabilirliğini güçlendirmektedir. Ayrıca SWAT-CUP ortamında SUFI-2 yaklaşımıyla gerçekleştirilen otomatik kalibrasyon ve belirsizlik analizi, parametre duyarlılıklarını ve tahmin belirsizliğini nicel olarak ortaya koyarak literatürde önerilen iyi uygulama ilkeleriyle uyumlu bir uygulama örneği sunmaktadır (Tan vd., 2019, Akoko vd., 2021).

Uygulama açısından aylık akımın ve su bütçesi bileşenlerinin (yağış, evapotranspirasyon, yüzey akışı, taban akımı ve su verimi) tutarlı biçimde tahmin edilebilmesi, taşkın ve kuraklık risklerinin yönetimi, su tahsisi ve altyapı planlaması, ekosistem su gereksinimlerinin gözetilmesi ve havza ölçekli iklim uyum önlemlerinin önceliklendirilmesi gibi süreçler için ölçülebilir bir temel sağlar. Elde edilen çıktılar, DSİ'nin havza yönetim planlarına ve yerel yönetimlerin risk azaltım çalışmalarına girdi sağlayabilecek niteliktedir.

1.3 Araştırmanın Amacı ve Hedefleri

Bu araştırmanın amacı, Bartın ili Arıt Deresi havzası için SWAT modelini kurarak havzanın hidrolojik davranışını güvenilir biçimde simüle etmek ve iklim değişikliği koşullarında akım ile su bütçesi bileşenlerinde oluşabilecek değişimleri nicel olarak ortaya koymaktır.

1.3.1 Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, Bartın ili sınırları içinde yer alan Bartın-Arıt alt havzasında iklim değişikliği ve iklim değişkenliğinin akım rejimi ile su bütçesi üzerindeki olası etkilerini değerlendirmeye temel oluşturacak bir SWAT2012 hidrolojik modeli geliştirmektir. Bu kapsamda model, Darıören Akım Gözlem İstasyonu'ndan temin edilen aylık debi gözlemleri kullanılarak SWAT-CUP (SUFI-2) aracılığıyla kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Sonuçta hidrolojik açıdan tutarlı ve tekrarlanabilir bir simülasyon çerçevesi elde edilmesi hedeflenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda modelin mekansal kurulumu QGIS ortamında QSWAT eklentisi (QSWAT3_12) ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar SWAT2012 Editör üzerinden yürütülmüş, parametre belirsizliği ve model performansı SWAT-CUP (SUFI-2) çerçevesinde nicel olarak değerlendirilmiştir.

1.3.2 Hedefler

Araştırma amacına ulaşmak için çalışma kapsamında aşağıdaki hedefler belirlenmiştir:

Havzaya ait DEM, arazi kullanımı/örtüsü (LULC) ve toprak verilerini temin ederek verileri aynı projeksiyon ve çözünürlükte standartlaştırmak, SWAT'a uygun arazi kullanımı ve toprak tanımlama (lookup) tablolarını oluşturmak ve girdi verilerinin kalite kontrolünü yapmak.

QGIS ortamında QSWAT eklentisini kullanarak havza sınırlarını belirlemek, Darıören Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) çıkış noktasına göre akarsu ağını ve alt havza yapısını türetmek.

Arazi kullanımı, toprak ve eğim katmanlarını birleştirerek HRU (Hidrolojik Tepki Birimi) yapısını seçilen eşik değerleriyle oluşturmak, elde edilen alt havza/HRU istatistiklerini raporlamak.

Günlük meteorolojik girdileri (yağış, maksimum ve minimum sıcaklık) derlemek, eksik iklim değişkenleri için SWAT'ın hava durumu üreticisine (WGEN) ait istatistikleri

hazırlamak, SWAT2012 modelini 2010-2023 dönemi için (2010-2011 ısınma dönemi) çalıştırarak aylık çıktı setini üretmek.

Darıören AGİ'ye ait aylık debi gözlemlerini kalibrasyon ve doğrulamada kullanılabilir biçimde düzenlemek, havza çıkışında simüle edilen aylık akımı ölçülen akımlarla aynı zaman ölçeğinde karşılaştırılabilir hale getirmek ve drenaj alanı farkı bulunması durumunda ölçek düzeltmesini açık şekilde tanımlamak.

SWAT-CUP (SUFI-2) kullanarak 2012-2018 dönemi için otomatik kalibrasyon ve belirsizlik analizini yürütmek, model başarımını NSE başta olmak üzere R^2 , KGE, PBIAS ve RMSE/RSR ölçütleriyle değerlendirmek ve raporlamak.

Kalibre edilen parametre setini değiştirmeden 2019-2023 dönemi için bağımsız doğrulama yapmak, kalibrasyon ve doğrulama sonuçlarını karşılaştırarak modelin genellenebilirliğini ve sınırlılıklarını tartışmak.

Kalibre ve doğrulanmış model kullanılarak havzanın su bütçesi bileşenlerini (yağış, ET, yüzey akışı, yanal akış, yeraltı suyu katkısı, su verimi ve depolama değişimi) aylık ve yıllık ölçekte çözümlmek, akım rejiminin mevsimsel özelliklerini (yüksek ve düşük akım dönemleri) ve su bütçesinde baskın süreçleri belirleyerek bulguları havza su yönetimi ve iklim uyum planlaması açısından değerlendirmektir.

1.4 Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları

Bu çalışmanın kapsamı, Arıt Deresi havzası için SWAT modelinin QGIS–QSWAT ile kurulması, gerekli mekânsal ve meteorolojik verilerle modelin hazırlanması ve Darıören istasyonu akım gözlemleriyle karşılaştırmalı değerlendirme yapılmasıdır. Çalışmanın başlıca sınırlılıkları; veri çözünürlüğü ve temsil gücü, gözlem verilerindeki olası eksiklikler, HRU eşik değerleri ve model parametrelerinin belirsizliği ile iklim senaryolarına bağlı belirsizliklerin sonuçlara yansımalarıdır.

1.4.1 Kapsam

Bu çalışma, Bartın ili Arıt Deresi Havzası için SWAT2012 modeli kullanılarak akımın simülasyonu ve su bütçesi bileşenlerinin değerlendirilmesini kapsamaktadır. Model 2010-2023 dönemi için günlük zaman adımıyla çalıştırılmış, sonuçlar havza çıkışında yer alan Darıören Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) ölçümleriyle aylık ölçekte karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında CBS tabanlı veri hazırlığı ve havza/HRU üretimi (QGIS/QSWAT), SWAT2012 giriş dosyalarının hazırlanması ve model çalıştırmaları ile SWAT-CUP (SUFI-2) üzerinden kalibrasyon-doğrulama ve belirsizlik analizleri yürütülmüştür. Çalışma su miktarı (hidroloji) odağında planlanmış olup su kalitesi, sediman ve besin taşınımı süreçleri kapsam dışında bırakılmıştır.

Tablo 1.1: Çalışmanın kapsamı ve kapsam dışı unsurlar

Başlık	Kapsam	Kapsam dışı
Zaman aralığı	2010–2023 (günlük simülasyon, aylık raporlama), warm-up periyodu: 2010–2011, kalibrasyon: 2012–2018, validasyon: 2019–2023	2010 öncesi, 2023 sonrası
Çalışma alanı	Bartın Arıt Havzası (alt havzalar ve HRU temsili), değerlendirme kesiti: Darıören AGİ	Bartın dışındaki havzalar
Süreçler	Su miktarı süreçleri: yağış (P), gerçek ET, yüzey akışı, yanal akış, taban akımı, su verimi (WYLD) ve depolama bileşenleri	Su kalitesi, sediman, besin taşınımı, ekosistem-biyokimyasal modüller vs.
kullanılan Araçlar	QGIS + QSWAT, SWAT Editor, SWAT2012, SWAT-CUP (SUFI-2), veri düzenleme/grafikler için ofis araçları	
Metot	Aylık akım kalibrasyon-validasyon, çoklu performans ölçütleri, SUFI-2 belirsizlik çerçevesi	

1.4.2 Sınırlılıklar

Çalışmanın bulguları, kullanılan veri setleri ve modelin yapısal varsayımları nedeniyle belirli sınırlılıklar içermektedir. Meteorolojik verilerde özellikle yağış ve sıcaklık kayıtlarındaki boşluklar ve ölçüm belirsizlikleri ile tek veya az sayıda istasyonun havzayı temsil etmesi, hem pik akımlarda hem de düşük akım dönemlerinde sapmalara yol açabilmektedir. Ayrıca nem, rüzgar ve güneşlenme gibi yardımcı meteorolojik değişkenlerin doğrudan ölçülemediği durumlarda bu değişkenlerin model içinde üretilmesi, ET hesabında ve buna bağlı su bütçesi bileşenlerinde ek belirsizlikler oluşturabilmektedir.

SWAT2012 yarı dağılımlı bir yaklaşım olduğu için HRU genellemesi ve süreçlerin kavramsal temsilindeki sadeleştirmeler, özellikle kısa süreli taşkın piklerinin zamanlaması ve şiddetinde, ayrıca kurak dönem akımlarında farklı düzeylerde sapmalara neden olabilmektedir. Buna ek olarak parametre eşdeğerliliği, benzer performans değerleri üreten birden fazla parametre setinin elde edilmesine yol açabileceğinden, sonuçların belirsizlikleri dikkate alınarak raporlanması ve yorumlanması önemlidir.

Bu çalışmada değerlendirmelerin aylık ölçekte yapılması, hacimsel uyumun ve mevsimselliğin daha kararlı incelenmesine imkan vermiştir. Ancak günlük veya olay bazlı piklerin ayrıntılı temsili aylık zaman adımında sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle yorumlar yapılırken aylık zaman adımının pikleri yumuşatma etkisi göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 1.2: Temel sınırlılıklar ve azaltma yaklaşımı

Sınırlılık	Olası etki	Azaltma yaklaşımı
Yağış/sıcaklık serilerinde boşluklar ve temsil sorunu	Pik ve düşük akım dönemlerinde sapma	Kalite kontrolü, istasyon verilerinin tutarlılık kontrolü,
Yardımcı meteorolojik değişkenlerin eksikliği (RH, rüzgar, radyasyon vb.)	ET ve su bütçesi bileşenlerinde belirsizlik	WGEN/varsayımsal üretim tercihinin açıkça belirtilmesi, duyarlılık ve belirsizlik yorumunun eklenmesi

Drenaj alanı uyumsuzluğu (model alanı–istasyon alanı)	Gözlem–simülasyon karşılaştırmasında hacimsel sapma	Alan oranı ile gözlem serisinin alan uyumlu ölçeklenmesi, yöntemin gerekçesiyle raporlanması
HRU genellemesi ve mekansal veri çözünürlüğü	Akım	DEM/LULC/toprak verilerini ortak projeksiyon ve çözünürlükte standardize etme, eşik ve sınıf seçimlerini raporlama
Parametre eşdeğerliliği	Tek bir en iyi setin aşırı yorumlanması	SUFI-2 belirsizlik yaklaşımı, çoklu performans ölçütleriyle birlikte değerlendirme
Aylık zaman adımıyla değerlendirme	Piklerin yumuşaması, olay bazlı hataların görünmemesi	Tanı grafikleri ve mevsimsel yorum, günlük ölçekte yorum yapılmadığının açıkça belirtilmesi

1.5 Araştırmanın Yenilikleri ve Katkıları

Bu araştırmanın yeniliği, Arıt Deresi havzası için güncel verilerle QGIS–QSWAT tabanlı bir SWAT model altyapısı kurarak iklim değişikliğinin akım rejimi ve su bütçesi bileşenleri üzerindeki etkilerini yerel ölçekte nicel olarak ortaya koymasındır. Çalışmanın katkısı, Darıören gözlemleriyle desteklenen tekrarlanabilir bir yöntem sunması ve havzada taşkın/kuraklık risk yönetimi ile su planlamasına bilimsel karar desteği sağlamasıdır.

1.5.1 Bilimsel Yenilikler

Bu tezde Ant Deresi havzası için SWAT2012 modeli kurulmuş ve aylık akım gözlemleriyle kalibre edilerek doğrulanmıştır. Bölgedeki hidrometeorolojik veri sınırlılıkları dikkate alındığında, kurulum adımlarının açık biçimde belgelenmesi ve sonuçların belirsizlikleriyle birlikte raporlanması çalışmanın bilimsel katkısını güçlendirmektedir.

Çalışmanın öne çıkan bilimsel yenilikleri aşağıda özetlenmiştir:

Ant Deresi alt havzası için 2010-2023 dönemini kapsayan SWAT2012 kurulumunun oluşturulması ve 2012-2018 kalibrasyon ile 2019-2023 doğrulama kurgusu üzerinden modelin aylık akım rejimini temsil edebilme kapasitesinin nicel olarak gösterilmesi.

Akım simülasyonu ile su bütçesi bileşenlerinin aynı çerçevede birlikte değerlendirilmesi ve havzada akım üretimini kontrol eden baskın süreçlerin süreç temelli yorumlanması.

Model performansının tek bir ölçüte indirgenmemesi ve NSE, KGE, PBIAS, R^2 ve RMSE gibi metriklerin tanısallık grafiklerle birlikte kullanılarak model davranışının çok boyutlu biçimde sorgulanması.

Kış dönemlerinde kar birikimi ve erimesine bağlı zamanlama sapmalarının hedefli parametre testleriyle incelenmesi ve kar sinyalinin aylık hidrograf üzerindeki olası rolünün tartışılması. İstasyon temsil gücü, yardımcı meteorolojik değişken eksikliği, drenaj alanı farkı ve parametre eşdeğerliliği gibi belirsizlik kaynaklarının açık biçimde ortaya konması ve SUFI-2 belirsizlik analizi ile sonuçların belirsizlikler dikkate alınarak raporlanmasına katkı sağlanması.

1.5.2 Yöntemsel/İş Akışı Katkıları

Bu tezde SWAT2012 tabanlı havza modellemesinin veri hazırlığından kalibrasyon ve doğrulamaya uzanan adımları, QGIS ortamındaki QSWAT arayüzü ile SWAT-CUP yazılımını tutarlı ve izlenebilir bir iş akışı içinde birleştirecek şekilde ele alınmıştır. İş akışı, DEM, arazi kullanımı ve toprak verilerinin aynı projeksiyon ve çözünürlükte standardize edilmesi, meteoroloji ve akım verilerinin kalite kontrolü, QSWAT ile havza sınırlandırması ve alt havza ile HRU üretimi, TxtInOut çalışma dizininin oluşturulması ve son olarak SWAT-CUP ile duyarlılık, kalibrasyon ve belirsizlik analizlerinin yürütülmesi şeklinde dört ana adımda tanımlanmıştır.

Çalışma sırasında saha verisi ve model kurulumundan kaynaklanabilecek teknik sorunların kalibrasyon sonuçlarını fark ettirmeden etkilemesini önlemek için kontrol ve düzeltmeler uygulanmıştır. Darıören AGİ için raporlanan drenaj alanı 137 km² iken model çıkış alanı yaklaşık 130 km² olduğundan, akım karşılaştırmasını sistematik biçimde etkilememesi için

gözlem debisine alan oranına dayalı yaklaşık 0,95 katsayısı ile ölçek düzeltmesi yapılmıştır. Meteorolojik gözlemler yalnızca yağış ile maksimum ve minimum sıcaklıkla sınırlı olduğunda, Penman-Monteith tabanlı potansiyel evapotranspirasyon hesabı için gereken yardımcı değişkenler WXGEN istatistikleri kullanılarak türetilmiş ve SWAT Editor üzerinden dosya uyumluluğu kontrol edilmiştir. Ayrıca istasyon ile alt havza eşleşmesi ve doğru çıkış kesiti seçimi deneme çalışmaları ile test edilmiş, SWAT-CUP ve SUFI-2 kalibrasyonunda parametre tipi ve aralık tanımları kontrollü biçimde gözden geçirilmiştir. Bu kontroller, kurulum adımlarının izlenebilirliğini artırmıştır.

1.5.3 Uygulama ve Politika Katkıları

Bu tez kapsamında geliştirilen SWAT2012 model kurulumu, Ant Deresi alt havzası için kalibrasyona açık, güncellenebilir ve denetlenebilir bir model altyapısı oluşturmuştur. Model, DSİ Dariören Akım Gözlem İstasyonu verileriyle doğrulanmış olup akım rejiminin mevsimselliğini, düşük akım ve yüksek akım dönemlerinin genel davranışını ve su bütçesi bileşenlerinin görelî katkılarını nicel olarak ortaya koymaktadır. Bu nedenle çalışma, havza ölçeğinde iklim odaklı değerlendirmeler için tekrar üretilebilir bir çerçeve sunmaktadır.

Uygulama ve politika açısından temel katkı, model çıktılarının karar süreçlerinde kesin hüküm üreten sonuçlar olarak değil, veri kalitesi, zaman ölçeği ve model varsayımları ile birlikte değerlendirilmesi gereken nicel girdiler olarak kullanılabilir olmasıdır. Düşük akım dönemleri ve taban akımı bileşeninin izlenmesi kuraklık yönetimi, su tahsisi ve ekosistem su ihtiyacı değerlendirmelerine destek olabilir. Yüksek akım dönemlerinde mevsimsel akım hacminin izlenmesi taşkın riskinin zamanlaması ve büyüklüğüne ilişkin değerlendirmeleri güçlendirebilir. Meteorolojik veri seti güncellendikçe veya arazi kullanımı değişikçe model hızlı biçimde güncellenerek su bütçesi göstergeleri yeniden üretilebilir. Bununla birlikte, model çıktılarının karar destek amaçlı kullanımında belirsizlikler açık biçimde dikkate alınmalı ve sonuçlar şeffaf biçimde raporlanmalıdır.

Tablo 1.3: Araştırmanın yenilik ve katkılarının özeti

Tür	Kısa tanım	Sağlanan değer / kullanım
Bilimsel	Bartın Arıt Havzası'nda SWAT2012 ile aylık akım ve su bütçesi bileşenlerinin birlikte incelenmesi	Havza ölçeğinde süreç-temelli yorum, düşük akım–zirve davranışının bütüncül değerlendirilmesi
Yöntemsel	QSWAT (SWAT2012)–SWAT Editor–SWAT-CUP (SUFI-2) entegrasyonuna dayalı standart iş akışı	Tekrarlanabilir kurulum, veri/harita uyumluluğu ve girdi eşleştirmelerinin izlenebilirliği
Değerlendirme	Çoklu metrik (NSE, KGE, PBIAS, R ² , RMSE) ve SUFI-2 belirsizlik çıktılarının birlikte kullanılması	Performansın tek metrikle sınırlanmaması, belirsizliğin raporlanması ve karşılaştırılabilirlik
Uygulama	Güncellenebilir temel model altyapısı ve raporlanabilir çıktılar	Yerel su bütçesi okuması için teknik zemin, ileride veri iyileştirmeleriyle geliştirilebilir bir çerçeve

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR

Bu bölümde, Bartın Arıt Havzası özelinde yürütülen çalışmanın yöntemsel çerçevesini desteklemek amacıyla SWAT2012 tabanlı havza ölçeği hidrolojik modelleme çalışmalarına ilişkin ulusal ve uluslararası literatür derlenmiştir. Literatürde kullanılan temel veri setleri ve veri ön-işleme yaklaşımları (DEM, arazi kullanımı/örtüsü, toprak ve meteorolojik seriler), GIS tabanlı model kurulum süreçleri (QSWAT) ile kalibrasyon–validasyon ve belirsizlik analizi uygulamaları (SWAT-CUP/SUFI-2) özetlenmiş, iklim ve arazi kullanım senaryoları altında raporlanan akım rejimi ve su bütçesi bileşenlerindeki değişimler ile model performansının NSE, KGE, PBIAS, R^2 gibi ölçütlerle değerlendirilmesine ilişkin ortak bulgular kısaca tartışılmıştır. Bu bölümde, tezin yöntem ve değerlendirme tercihlerini destekleyen kuramsal arka plan özetlenmiştir.

Ahmad vd. (2025), iklim değişikliğinin Pakistan'daki Shyok Nehri havzasının hidrolojik döngüsü, su mevcudiyeti ve sedimantasyon dinamikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Metodolojik olarak, 2003 ve 2014 yılları arasındaki günlük nehir deşarj verileri kullanılmış, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), SWAT+ modeli, uzaktan algılama ve istatistiksel tekniklerden yararlanılmıştır. İklim değişkenlerini analiz etmek için ERA5 yeniden analiz veri seti kullanılmış ve bu verilerin anlamlılığı Mann-Kendall testi ve Sen'in eğim analizi ile değerlendirilmiştir. Çalışma, son 20 yılda sıcaklığın yaklaşık 1.5°C arttığını, kış aylarında yağışların arttığını ve Temmuz'dan Ekim'e kadar olan dönemde su akışında bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Model çıktıları, kanalda yaklaşık 40 megaton/hektar oranında aktif bir erozyon olduğunu göstermektedir.

Demir ve Muratoglu (2025), Ceyhan Havzası (Türkiye) için Su Ayak İzi (WF) tahminini, SWAT hidrolojik modelini entegre ederek iyileştirmek, böylece etkin yağış tahminlerini geliştirmek, WF'deki mekansal ve zamansal değişimleri yakalamak ve veri tutarsızlıklarını gidermeyi amaçlamıştır. Metodolojik olarak, havzanın tahıl ekili alanının yaklaşık %90'ını temsil eden sekiz ana ürün için rafine edilmiş bir yeşil WF hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Model, evapotranspirasyon ve verim arasındaki tutarsızlıkları çözmek amacıyla bitki büyümesini ideal koşullar altında simüle etmiştir. Çalışmanın sonuçları, bazı ürünler için su ayak izinde beş kata varan önemli mekansal değişkenlikler olduğunu ortaya koymuştur, en yüksek WF pamukta (2822 m³/t) görülürken, en büyük tatlı su tüketimi mısırdan (289

milyon m3) kaynaklanmıştır. Mavi WF, yetersiz yağış nedeniyle havzanın kuzey kesimlerinde daha belirgin, yeşil WF güneyde baskın çıkmıştır. Bu bulgular, Ceyhan Havzası'nda su kullanım verimliliğini artırmak için bölgeye özgü ürün stratejilerinin ve optimize edilmiş sulama planlamasının önemini vurgulamaktadır.

Poudel ve Srinivasan (2024) tarafından sunulan çalışma, SWAT modelinin Louisiana'daki kıyı havzalarında çevresel süreçleri modellemedeki fırsatlarını ve zorluklarını genel bir bakış açısıyla ele almaktadır. Araştırmanın temel amacı, su kalitesini modellemek, tarımsal kaynaklı noktasal olmayan kirlilik için kritik alanları belirlemek ve modelin bu özel ortamlardaki sınırlılıklarını değerlendirmek için SWAT'ı uygulamaktır. Metodolojik olarak çalışma, Bayou Plaquemine Brule gibi havzalarda yapılan vaka analizlerini içermekte ve akış, sediment ve besin yüklerini kalibre etmek için yüksek çözünürlüklü LiDAR verileri, arazi kullanım haritaları ve yerel iklim verileri ile ArcSWAT modelini kullanmaktadır. Çalışma, SWAT'ın kirlilik sıcak noktalarını belirlemede etkili olmasına rağmen, kıyı bölgelerindeki düz arazilerin karmaşık drenaj ağlarını modellemede ve seyrek akış verileri nedeniyle önemli zorluklarla karşılaştığı sonucuna varmıştır. Ayrıca, eski SWAT versiyonlarının gelgit etkilerini modellemede yetersiz kaldığı ve bu sorunun üstesinden gelmek için SWAT+ versiyonunun taşkın yataklarını ve su alanlarını daha iyi simüle etme yeteneğiyle önemli bir fırsat sunduğu belirtilmektedir.

Garcia vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, SWAT+ ile birleştirilmiş S+HydPower adında yeni bir araç tanıtarak, su kıtlığı çeken bölgelerdeki küçük hidroelektrik santraller (SHP) üzerinde iklim değişikliği ve havza yönetimi etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Metodolojik olarak bu araç, İspanya'nın Katalonya bölgesindeki Katalan Nehir Havzası Bölgesi'nde (CRBD) nehir tipi SHP'ler üzerindeki çevresel akışların uygulanmasının ve çeşitli iklim değişikliği senaryolarının (SSP126, SSP370 ve SSP585) sonuçlarını araştırmak için kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, sadece çevresel akışların uygulanmasının bile SHP üretiminde %27'lik önemli bir azalmaya yol açacağını, ancak bu düşüşün bölgenin mevcut enerji talebinin sadece %0.25'ini temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, çevresel akışlar ve iklim değişikliğinin birleşik etkilerinin, yüzyılın sonuna kadar SHP üretiminde %38 ila %73 arasında potansiyel bir azalmaya neden olabileceği öngörülmektedir, bu durum, CRBD'nin elektrik arzına nehir tipi SHP'lerin katkısında önemli bir düşüşe işaret etmektedir.

Kışlioğlu vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de ilk defa uygulanma özelliğini taşıyan SWAT+ hidrolojik modelinin ve SWAT+ Toolbox yazılımının Güney Marmara Havzası'ndaki performansının araştırılması amaçlanmıştır. Metodolojik olarak, Güney Marmara Havzası için meteoroloji, toprak özellikleri, topografya ve arazi kullanımı gibi detaylı veriler kullanılarak SWAT+ hidrolojik modeli kurulmuş ve kalibrasyon süreci SWAT+ Toolbox v0.7.6 ve DDS (Dynamically Dimensioned Search) algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda, modelin performansının hem kalibrasyon (NSE 0,596) hem de doğrulama (NSE 0,516) dönemlerinde kabul edilebilir seviyede olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, SWAT+ modelinin ve ilişkili araçlarının Türkiye'deki hidrolojik modelleme çalışmalarına önemli bir esneklik ve ek işlevler getireceğini ve temel SWAT modeliyle benzer bir başarıyla kullanılabileceğini ortaya koyan ilk çalışma olma niteliğindedir.

Özdemir vd. (2024), SWAT modeli kullanılarak, öngörülen iklim değişikliği senaryolarının (RCP 4.5 ve RCP 8.5) Türkiye'deki Gordes Baraj Havzası'nda 2031-2060 dönemi için akarsu akışı, azot yükleri ve mahsul verimleri üzerindeki etkilerinin incelenmesini amaçlamıştır. Metodolojik olarak, model performansını iyileştirmek ve hesaplama süresini kısaltmak için SWAT'ın hidrolojik tepki birimlerini (HRU) tanımlamaya yönelik hiyerarşik bir yaklaşım ve Hızlı Otomatik Kalibrasyon Aracı (FACT) kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim değişikliği senaryoları altında rezervuara giren ortalama yıllık deşarjın artacağı öngörülmüştür. Azot yüklerinin de artması beklenirken , tarımsal üretim sonuçları değişkenlik göstermiştir, haşhaş, tütün, kışlık arpa ve kışlık buğday verimlerinin bir miktar artacağı, ancak mısır, salatalık ve patates verimlerinin olumsuz etkileneceği tahmin edilmektedir.

Dolgorsuren vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Moğolistan'ın sosyo-ekonomik açıdan önemli bir merkezi olan ve artan çevresel baskı altında bulunan Tuul Nehri Havzası'nın üst kısmında, geleceğe yönelik öngörülen arazi kullanımı/arazi örtüsü değişikliğinin (LULCC) ve iklim değişikliğinin (CC) hidrolojik rejimler üzerindeki bireysel ve birleşik etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Metodolojik olarak, üç farklı Temsili Konsantrasyon Yolu (RCP2.6, RCP4.5 ve RCP8.5) senaryosu altında on farklı Küresel İklim Modeli (GCM) topluluğundan elde edilen sıcaklık ve yağış projeksiyonları, kalibre edilmiş Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) modeline üç farklı gelecek dönemi (yakın, orta ve uzak

gelecek) için girdi olarak kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, hem LULCC hem de CC senaryolarının hidrolojik bileşenler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir, iklim değişikliği senaryoları evapotranspirasyonda bir artış eğilimi gösterirken, toprak suyu içeriği, yüzey akışı ve su veriminde bir azalma eğilimi ortaya koymuştur. Yalnızca arazi kullanımı değişikliği senaryosu ise yüzey akışı, yeraltı suyu akışı ve su veriminde bir artışa neden olmuştur. Bu eğilimlerin, $RCP8.5 > RCP4.5 > RCP2.6$ emisyon senaryolarının şiddetiyle uyumlu olduğu ve havza için acil bir adaptif su kaynağı yönetimi ihtiyacını ortaya koyduğu sonucuna varılmıştır.

Wijaya vd. (2025) yaptıkları çalışmada, Sutami Barajı havzasında (Sutami Reservoir Watershed) erozyon ve sedimantasyon miktarlarını SWAT modeli ile tahmin etmeyi ve modelin gerçek koşulları ne ölçüde temsil ettiğini test etmeyi amaçlamıştır. Metodolojik olarak, havzaya ait DEM, arazi kullanımı ve toprak haritaları ile 2019–2023 yağış ve iklim parametreleri (rüzgâr, sıcaklık, nem, güneş radyasyonu) modele girdi olarak tanımlanmış; akım gözlemleri ise 2022 yılı için kalibrasyon, 2023 yılı için doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Modelin hidrolik uygunluğu akım üzerinden değerlendirilmiş (NSE, R^2) ve ardından SWAT ile hesaplanan erozyon/sedimantasyon çıktıları, bağımsız bir yöntem olarak USLE hesaplarıyla karşılaştırılarak sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre SWAT simülasyonları, toplam erozyonu 5.280,45 ton/ha/yıl ve toplam sedimantasyonu 11.662.851,94 ton/yıl olarak üretmiştir. USLE yöntemi ile hesaplanan değerler ise 5.178,98 ton/ha/yıl erozyon ve 11.060.798,14 ton/yıl sedimantasyon olup, iki yaklaşımın benzer büyüklükler vermesi SWAT çıktılarının “makul doğrulukta” olduğunu göstermiştir. Akım kalibrasyon/doğrulama performansında $NSE=0,778$ (kalibrasyon, 2022) ve $NSE=0,660$ (doğrulama, 2023) elde edilmiş; buna paralel olarak $R^2=0,786$ (kalibrasyon) ve $R^2=0,724$ (doğrulama) raporlanmıştır. Yazarlar bu performans düzeyinin, SWAT modelinin bu havza için akım-erozyon-sedimantasyon süreçlerini temsil etmede kullanılabilir bir temel sunduğu sonucuna varmıştır.

Abghari ve Erfanian (2023) yaptıkları çalışmada, Urmia Gölü havzası için kritik bir su kaynağı olan Simineh Nehri'nin aylık debisini SWAT modelini kullanarak simüle etmeyi ve iklim değişikliğinin bu debi üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Metodolojik olarak, 2011-2030 dönemi için geleceğe yönelik iklim projeksiyonları, HadCM3 genel iklim modelinin A2, B1 ve A1B emisyon senaryoları altındaki çıktıları kullanılarak LARS-WG

hava üretici ile ölçek küçültme (downscaling) yöntemiyle elde edilmiştir. Bu tahmin edilen iklim verileri, daha önceden kalibre edilmiş olan SWAT modeline girdi olarak kullanılmış ve arazi kullanımının sabit kaldığı varsayımı altında sadece iklim değişikliğinin etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, iklim değişikliği senaryoları altında nehir debisinde gelecekte %25'e varan bir azalma yaşanacağı öngörülmüştür. Bu durumun, Simineh Nehri'nin Urmia Gölü'ne olan yıllık ortalama katkısını 570 milyon metreküpten, A2, B1 ve A1B senaryoları altında sırasıyla 394, 398 ve 440 milyon metreküpe düşüreceği tahmin edilmektedir. Urmia Gölü'nün toplam su girdisinin %11'ini sağlayan Simineh Nehri'ndeki bu potansiyel düşüşün, gölün korunması için yenilikçi sulama yöntemleriyle su kaynaklarının daha verimli kullanılmasını zorunlu kıldığı sonucuna varılmıştır.

Çolak (2022) tarafından yapılan çalışmada, artan su çekimi ve iklim değişikliğine maruz kalan Konya ve Burdur kapalı havzalarındaki göllerin haritalanması, izlenmesi ve tuzluluğunun tespiti için optik uydu verilerinin kullanımının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Metodolojik olarak, göllerin yüzey alanını haritalamak için Landsat 5-8 ve Sentinel-2 verilerinden Modifiye Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (MNDWI) kullanılmış ve bu değişiklikler Standardize Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI) gibi meteorolojik parametrelerle birleştirilmiştir. Ayrıca, göllerin elektriksel iletkenliğini (EC) haritalamak için 2020-2022 yıllarında toplanan saha ölçümleri ile Sentinel-2 bantları (özellikle 1, 2 ve 3) arasında anlamlı bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda, Sentinel-2'nin daha yüksek çözünürlüğü sayesinde daha iyi alansal haritalama sağladığı, Landsat mirasının ise 1984'ten bu yana uzun vadeli izleme için büyük bir fırsat sunduğu belirtilmiştir. Göl yüzey alanlarındaki değişimin, yağış ve buharlaşmadaki değişimle ilişkili olduğu ve Burdur Gölü için yapılan bütçe hesaplamalarının, mevcut su kullanımının devam etmesi halinde gölün önümüzdeki 60 yıl içinde kuruma tehlikesiyle karşı karşıya kalacağını gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Peker ve Cüceloğlu (2022) yaptıkları derleme çalışmasında, SWAT modelinin 2008-2022 yılları arasında Türkiye'deki uygulamalarını inceleyerek araştırmacılar için kolay erişilebilir bir kaynak oluşturmayı amaçlamıştır. Bu kapsamda, 46 makale ve 19 tez olmak üzere toplam 65 çalışma, kullanılan veri setleri, kaynakları ve genel kapsamı (hidroloji ve su kalitesi) bakımından metodolojik olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, Türkiye'deki SWAT uygulamalarında mekansal veri girdileri için en çok SRTM, CORINE ve FAO-

UNESCO veri setlerinin, zamansal iklim verileri için Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) ve model kalibrasyonunda kullanılan akım verileri için ise Devlet Su İşleri (DSİ) verilerinin tercih edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, incelenen çalışmaların çoğunda model kalibrasyon ve validasyon sonuçlarının genel kabul görmüş performans göstergelerine göre tatmin edici düzeyde olduğu ortaya konulmuştur.

Yılmaz vd. (2022), Türkiye'deki Yukarı Çoruh Havzası'nda gelecekte yaşanabilecek hidrometeorolojik kuraklıkların, 13 farklı Avrupa Koordineli Bölgesel Ölçek Küçültme Deneyi (CORDEX) çıktısı ve iki farklı temsili konsantrasyon yolu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) senaryosu kullanılarak incelenmesini amaçlamıştır. Metodolojik olarak, SWAT hidrolojik modelinin parametre kalibrasyonu için iki farklı optimizasyon algoritması (SWAT-CUP'ın SUFI-2 algoritması ve PEST'in SCE algoritması) test edilmiş, bias düzeltmesi yapılmış CORDEX iklim projeksiyonları SWAT modeline entegre edilmiş ve ardından meteorolojik ve hidrolojik kuraklıkları değerlendirmek için sırasıyla standartlaştırılmış yağış indeksi (SPI) ve standartlaştırılmış akım indeksi (SSI) kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, kalibrasyon için SCE algoritmasının SUFI-2'den daha iyi parametre çözümleri ürettiği ve gelecek projeksiyonlarına göre yıllık yağış ile maksimum ve minimum sıcaklıklarda önemli değişiklikler beklendiği belirtilmiştir. Özellikle 2030-2059 dönemi için hidrolojik kuraklık sürelerinin sıklığının artacağı, ancak yirmi birinci yüzyılda hem hidrolojik hem de meteorolojik kuraklığın daha belirgin hale geleceğini iddia etmek için yeterli kanıt olmadığı sonucuna varılmıştır.

Akoko vd. (2021) gerçekleştirdikleri kapsamlı derleme çalışmasında, Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) modelinin Afrika'daki uygulamalarını bütüncül bir şekilde ele alarak temel bulguları özetlemeyi, karşılaşılan zorlukları analiz etmeyi ve gelecek araştırmalar için potansiyel iyileştirmeleri belirlemeyi hedeflemiştir. Bu hedef doğrultusunda, 2005-2019 yılları arasında yayımlanmış 206 hakemli makale metodolojik olarak incelenmiş ve bu çalışmalar, su kaynakları, erozyon, arazi kullanımı, iklim değişikliği ve model parametrisasyonu olmak üzere beş ana tema altında sınıflandırılmıştır. Çalışmanın temel sonucu, Afrika genelinde SWAT kullanımındaki en büyük engelin veri eksikliği ve kalitesi olmasına rağmen, modelin özellikle veri kıtlığı olan bölgeler için oldukça yetenekli ve kullanışlı bir araç olduğudur. Bu doğrultuda, modelin etkinliğini artırmak için gelecekte yerel veri toplama kapasitesinin güçlendirilmesi, çok boyutlu analiz yaklaşımlarının

benimsenmesi ve araştırmaların bölgesel politikalarla uyumlu hale getirilmesi tavsiye edilmektedir.

Oo vd. (2020) tarafından yapılan çalışma, iklim değişikliğinin Myanmar'daki Yukarı Ayeyarwady Nehri Havzası'nın akış rejimi üzerindeki potansiyel etkilerini SWAT modelini kullanarak öngörmeyi amaçlamaktadır. Metodolojik olarak, SWAT modeli on farklı Küresel İklim Modeli (GCM) ıktısı ve üç farklı RCP senaryosu (2.6, 4.5 ve 8.5) kullanılarak gelecek dönemler (2021-2095) için kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Araştırmanın temel bulguları, havzanın gelecekte kurak mevsimlerde daha sıcak ve az yağışlı, yağışlı mevsimlerde ise daha nemli ve sıcak olacağını göstermektedir. Tüm iklim senaryoları altında yıllık nehir akışının azalacağı öngörölürken, en ciddi düşüşün %11.92'ye varan oranlarla RCP8.5 senaryosunda yaşanması beklenmektedir. Sonuç olarak, gelecekte kurak mevsimlerde su kıtlığı ve kuraklık riskinin artacağı, yağışlı mevsimlerde ise sel ve suyla ilgili afetlerin daha sık görüleceği, çünkü düşük ve yüksek akışlar arasındaki farkın büyüyeceği öngörülmektedir.

Tan vd. (2019) tarafından yapılan derleme alışması, Güneydoğu Asya'daki (SEA) SWAT modeli uygulamalarını kapsamlı bir şekilde sentezleyerek bölgedeki temel bulguları özetlemeyi, mevcut zorlukları tartışmayı ve gelecekteki araştırma yönelimlerini belirlemeyi amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda, Web of Science ve CARD veri tabanlarından 2006'dan bu yana yayımlanmış 126 hakemli makale metodolojik olarak analiz edilmiş, bu çalışmaların çoğunlukla Vietnam ve Tayland'da yoğunlaştığı ve model yetenekleri, arazi kullanımı ve iklim değişikliği gibi konulara odaklandığı tespit edilmiştir. Çalışmanın en temel sonucu, bölgedeki araştırmacılar için en büyük engelin güvenilir ve erişilebilir veri eksikliği olduğudur. Bu nedenle, geleceğe yönelik olarak bölge için güvenilir yerel girdi verilerinin geliştirilmesi, SWAT modelinin bitki büyüme modülünün yağmur ormanları ve palmiye gibi tropikal bitki örtüsüne daha uygun hale getirilmesi ve modelin sel gibi ekstrem olayların simölasyonu için daha fazla kullanılması önemle tavsiye edilmektedir.

Brighenti vd. (2019) yaptıkları çalışmada, SWAT modelini kullanarak akış (Q) ve askıda katı madde (SS) simölasyonu yaparken iki farklı kalibrasyon yöntemini, sıralı (sequential) ve eş zamanlı (simultaneous) kalibrasyonu, karşılaştırmayı amaçlamıştır. Metodolojik olarak, Brezilya'nın güneyindeki küçük bir havzada, SWAT modeli SUFI-2 algoritması ile birleştirilerek çok-noktalı (multi-site) ve çok-amaçlı (multi-objective) bir yaklaşımla

kullanılmıştır. Sıralı yöntemde önce akış, sonra sediment parametreleri kalibre edilirken, eş zamanlı yöntemde her iki değişkenin parametreleri birlikte kalibre edilmiştir. Çalışmanın temel sonucu, eş zamanlı kalibrasyon yönteminin, özellikle askıda katı madde simülasyonunda daha doğru sonuçlar vermesi, daha az zaman alması ve daha az parametre gerektirmesi nedeniyle sıralı yöntemle göre daha avantajlı olduğudur. Ayrıca, kalibrasyonda birden fazla gözlem noktasının kullanılmasının (multi-site), özellikle sediment modellemesinin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığı da tespit edilmiştir.

Nazari-Sharabian vd. (2019), farklı Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) çözünürlüklerinin SWAT modelindeki akış simülasyonu ve parametre hassasiyeti üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Metodolojik olarak, İran'daki Mahabad Barajı havzası için 12.5 m, 30 m ve 90 m olmak üzere üç farklı DEM çözünürlüğü kullanılarak SWAT modeli kurulmuş ve SWAT-CUP programı ile akış parametrelerinin hassasiyet analizi yapılmıştır. Çalışmanın temel bulguları, DEM çözünürlüğünün havza alanı, eğim dağılımı ve sonuç olarak akış miktarı üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu göstermiştir. En ince çözünürlüklü (12.5 m) DEM, en yüksek ve gözlemlenen değerlere en yakın akış miktarını üretirken, çözünürlük kabalaştıkça üretilen akış miktarı azalmıştır. Ayrıca, farklı çözünürlüklerde farklı model parametrelerinin daha hassas hale geldiği, örneğin ince çözünürlükte yüzey parametrelerinin (örn. Manning 'n' katsayısı) öne çıktığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, araştırmacıların daha doğru sonuçlar için ince çözünürlüklü DEM'leri tercih etmeleri, ancak hesaplama süresini azaltmak için küçük bir doğruluk payından feragat ederek daha kaba çözünürlükleri de kullanabilecekleri belirtilmiştir.

Mengistu vd. (2019), Güney Afrika'daki veri kıtlığı olan kurak bir havzada SWAT modelini kurmayı, kalibre etmeyi ve doğrulamayı amaçlamıştır. Çalışmanın temel hedefi, akış gözlem verisi olmayan bir havzada modelleme yapabilmek için fiziksel benzerliğe dayalı bölgeselleştirme (regionalization with physical similarity) yaklaşımını test etmektir. Metodolojik olarak, hedef havzaya (Soutloop) fiziksel ve iklimsel olarak benzeyen ancak gözlem verisine sahip olan bir "donör" havza (A21C) seçilmiştir. İlk olarak, donör havza için kurulan SWAT modeli, SWAT-CUP programı kullanılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Ardından, bu süreçte elde edilen optimize edilmiş model parametreleri, veri kıtlığı olan hedef havzanın SWAT modeline transfer edilmiştir. Son olarak, hedef havza modelinin sonuçları, bölgedeki önceki çalışmalarla karşılaştırılarak ve havza içindeki sınırlı sayıdaki

yerinde toprak nemi ölçümleriyle manuel olarak doğrulanarak daha da iyileştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, bölgeselleştirme yaklaşımının veri kıtlığı olan kurak bölgelerde SWAT modelini uygulamak için değerli bir teknik olduğu, ancak sadece parametre transferinin tek başına yeterli olmadığı ve önemli belirsizlikler içerebileceği vurgulanmıştır. Modelin güvenilirliğini artırmak için, transfer edilen parametrelerle elde edilen ilk sonuçların, mevcut diğer yerel verilerle (toprak nemi vb.) karşılaştırılarak daha ileri düzeyde manuel kalibrasyon ve doğrulamaya tabi tutulmasının kritik bir adım olduğu sonucuna varılmıştır.

Tanksali ve Soraganvi (2020) çalışmalarında, Krishna Havzası'nda baraj yapımı sonrasında yukarı havzada gerçekleşen arazi kullanım/örtüsü (LULC) değişimlerinin yarı kurak bir havzanın hidrolojik tepkisini (özellikle su verimi, yüzey akışı, evapotranspirasyon ve yeraltısuyu beslenimi) nasıl değiştirdiğini QSWAT/SWAT modeli ile değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda QSWAT modeli 1982–2013 dönemini kapsayacak şekilde çalıştırılmış; ilk yıllar ısınma (warm-up) olarak ayrılmış, 1982–2008 dönemi kalibrasyon ve 2008–2013 dönemi doğrulama için kullanılmış; kalibrasyon/doğrulama ve belirsizlik analizi SWAT-CUP ortamında SUFI-2 algoritması ile yürütülmüş ve performans NSE ile R^2 göstergeleri üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca Landsat görüntülerinden türetilen 14 sınıflı LULC haritaları ile baraj öncesi (1998) ve baraj sonrası (2009) koşullar senaryo olarak modele tanımlanmış ve su dengesi bileşenleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, LULC değişimleri ve barajla oluşan rezervuar koşullarının havza su dengesini belirgin biçimde etkilediğini; yıllık su veriminin yaklaşık %28,97 ve yüzey akışının %29,91 azaldığını, evapotranspirasyon kaybının ise (yağışta azalma eğilimiyle birlikte) yaklaşık %6 arttığını göstermiştir; ayrıntılı bileşen karşılaştırmalarında evapotranspirasyonun yağışa oranının yaklaşık %43'ten %49'a yükseldiği, yeraltısuyu besleniminin %42'den %39'a ve yüzey akışının %15'ten %12'ye gerilediği raporlanmıştır. Modelin aylık ölçekte gözlemle iyi uyum verdiği (kalibrasyonda $NSE \approx 0,89$ ve $R^2 \approx 0,96$; doğrulamada $NSE \approx 0,79$ ve $R^2 \approx 0,83$) belirtilerek, bu tür LULC-hidroloji etki analizlerinin su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından, özellikle baraj gibi büyük insan müdahaleleri öncesinde yapılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Hoang vd. (2019), veri kıtlığı yaşanan Cau Nehri havzasında (Vietnam) su kalitesi modellemesi için SWAT ve QUAL2K modellerinin entegre edildiği yeni bir yaklaşım

geliştirmiştir. Bu yöntemin temel amacı, özellikle nehir kolları ve nehir boyunca yayılan kirletici kaynaklar için yeterli gözlem verisi olmadığında, bir havza modeli (SWAT) ile nehir içi su kalitesi modelini (QUAL2K) birleştirerek bu veri boşluğunu doldurmaktır. Metodolojik olarak, havzanın üst kısımlarındaki yan kollar ve ana nehre komşu alt havzalar için akış ve deşarj verileri SWAT modeli ile simüle edilmiştir. Daha sonra bu hidrolojik çıktılar, gözlemlenen kirletici konsantrasyon verileri ve tahmin edilen kirlilik yükleri ile birleştirilerek QUAL2K modeline girdi olarak kullanılmıştır. Model, 2014 yılındaki iki farklı dönem için kalibre ve valide edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, PBIAS, NSE, RSR ve R^2 gibi performans değerlendirme metrikleri kullanılarak yapılan analizlerde, entegre modelin "çok iyi" bir performans sergilediği ve özellikle PBIAS değerlerinin $<15\%$ aralığında kalarak su kalitesindeki belirsizliklere rağmen güvenilir sonuçlar ürettiği kanıtlanmıştır. Bu entegre yaklaşımın, Cau Nehri havzasındaki su kalitesi yönetimi ve kirlilik kontrolü için karar vericileri destekleyecek değerli bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Melaku vd. (2018) yaptıkları çalışmada, Etiyopya'nın dağlık bölgelerinde uygulanan toprak ve su koruma (SWC) yapılarının akış ve erozyon süreçleri üzerindeki etkilerini SWAT modelini kullanarak araştırmayı amaçlamıştır. Bu hedef doğrultusunda, biri 2011 yılında taş ve toprak teras gibi SWC önlemleri uygulanmış (işlem görmüş havza - TW), diğeri ise referans olarak bırakılmış (işlem görmemiş havza - UW) iki komşu havzada karşılaştırmalı bir modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Metodolojik olarak, her iki havza için ayrı SWAT modelleri kurulmuş ve 2011-2013 dönemi için günlük akış ve sediment verileriyle kalibre edilmiş, 2014-2015 dönemi için ise doğrulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, SWAT modelinin her iki havza için de günlük akış rejimini başarılı bir şekilde simüle ettiğini (kalibrasyon için R^2 değerleri $\sim 0.77-0.78$), ancak günlük sediment verimi tahmininde daha mütevazı bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Modelin sediment tahminindeki zayıflığı, kısa süreli ve yoğun yağışların neden olduğu ani erozyon olaylarını günlük zaman adımlarında yakalamadaki zorluğa bağlanmıştır. Bununla birlikte, model sonuçları, SWC yapılarının işlem görmüş havzadaki toprak kaybını, işlem görmemiş havzaya kıyasla 25% ila 38% oranında önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Sonuç olarak, SWAT'ın Etiyopya'nın dağlık bölgelerinde SWC yapılarının etkisini değerlendirmek ve daha geniş alanlara ölçeklendirmek için potansiyel bir araç olduğu kanıtlanmıştır.

Shivhare vd. (2018) tarafından yapılan bu çalışmanın temel amacı, Ganj Nehri havzasında SWAT modelinin akış ve sediment verimini tahmin etme performansını test etmek ve üç farklı kalibrasyon algoritmasını (SUFI-2, GLUE ve ParaSol) karşılaştırarak en iyi tekniği belirlemektir. Metodolojik olarak, Uttar Pradeş'in güneyinde 15,621 km²'lik bir havzada, SRTM DEM, Landsat-8 uydu görüntüleri, toprak verileri ve günlük meteorolojik veriler kullanılarak SWAT modeli kurulmuştur. Havza 46 alt havzaya bölünmüş ve ardından üç farklı algoritma kullanılarak model kalibrasyonu yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, daha az model çalıştırması gerektirmesi ve en iyi sonuçları vermesi nedeniyle SUFI-2'nin, incelenen diğer iki algoritmaya göre kalibrasyon için daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. SUFI-2 ile yapılan kalibrasyon sonrası, beş parametrenin (CH_K2, USLE_P, CH_N2, SURLAG ve SOL_AWC) havza modellemesi için en hassas parametreler olduğu tespit edilmiştir.

Park vd. (2018) tarafından, SWAT ve MODFLOW modellerinin uygulanması ve değerlendirilmesi için QSWATMOD adında, QGIS tabanlı yeni bir açık kaynaklı grafik kullanıcı arayüzü (GUI) tanıtılmaktadır. Bu arayüzün temel amacı, model çalıştırılması için girdi verilerinin hazırlanması, SWAT-MODFLOW seçeneklerinin yapılandırılması ve model sonuçlarının görüntülenip yorumlanması gibi süreçleri kolaylaştırarak, bu karmaşık birleşik modelleri daha geniş bir kullanıcı kitlesi için erişilebilir kılmaktır. Metodolojik olarak QSWATMOD, Python programlama dili ile yazılmış bir QGIS eklentisi olarak geliştirilmiştir, bu eklenti, SWAT ve MODFLOW modelleri arasında bağlantı dosyaları oluşturur, simülasyonu çalıştırır ve sonuçları doğrudan QGIS ortamında görselleştirir. Arayüzün işlevselliği, Teksas'ın merkezindeki 471 km²'lik Orta Bosque Nehri Havzası'nda bir vaka çalışması ile gösterilmiştir. Sonuç olarak, QSWATMOD'un, kullanıcı ve varsayılan yapılandırma ayarlarını saklama, coğrafi işlem fonksiyonlarını kullanma ve model sonuçlarını görüntüleme gibi yetenekleri sayesinde, dünya çapında artan SWAT-MODFLOW kullanıcıları için projeleri oluşturma ve yönetmede değerli bir yardımcı araç olacağı kanıtlanmıştır.

Duru vd. (2017) yaptıkları çalışmada, SWAT modelinin Türkiye'deki Ankara Nehri Havzası'nda akış ve sediment verimini tahmin etme performansını ve uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Metodolojik olarak, veri kıtlığı olan bu havzada SWAT modeli kurulmuş, kalibrasyon (1989-1996) ve doğrulama (1982-1984) için 13 yıllık günlük

ve aylık akış ile aylık sediment verileri kullanılmıştır. Modelin kalibrasyonu, Nash-Sutcliffe (NSE) ve R^2 gibi istatistiksel ölçütler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, SWAT modelinin hem hidrolojiyi hem de sediment verimini tatmin edici bir şekilde simüle ettiği (kalibrasyonda aylık akış için NSE=0.79, sediment için NSE=0.81) bulunmuştur. Modelin ürettiği toprak erozyonu haritası, özellikle akarsu ağına yakın olan kentleşmiş ve yoğun tarım yapılan alanların erozyona karşı daha savunmasız olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, SWAT'ın benzer özelliklere sahip havzalarda su kaynakları planlaması için kullanılabilecek faydalı bir karar verme aracı olduğu, ancak daha doğru sonuçlar için yerel veri toplama çalışmalarının artırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Pignotti vd. (2017) yaptıkları çalışmada, geleneksel HRU (Hidrolojik Tepki Birimi) tabanlı SWAT modelini, mekansal olarak daha detaylı olan grid tabanlı SWATgrid modeliyle karşılaştırmayı amaçlamıştır. Araştırmanın temel hedefleri, SWATgrid için uygun bir çözünürlük aralığı belirlemek, iki modelin akış ve su kalitesi simülasyon sonuçlarını karşılaştırmak ve farklı çözünürlüklerin kalibre edilmiş parametre değerleri üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Metodolojik olarak, Indiana, ABD'deki tarımsal bir havza olan Cedar Creek Havzası'nda, her iki model yaklaşımı da 30 m'den 1000 m'ye kadar çeşitli mekansal çözünürlüklerde çalıştırılmıştır. Karşılaştırmaları standartlaştırmak için, bir 30m HRU modeli kalibre edilmiş ve bu kalibrasyondaki parametreler diğer modellere aktarılmıştır. Çalışmanın temel sonuçları, grid tabanlı yaklaşımın (SWATgrid), standart HRU modeline kıyasla akışı %5 ile %50 arasında daha düşük tahmin ettiğini göstermiştir. Ayrıca SWATgrid, fosfor ve sediment yüklerini daha düşük, nitrat yükünü ise daha yüksek öngörmüştür. Önemli bir bulgu, SWATgrid'in hesaplama süresinin artan çözünürlükle katlanarak artması ve bu nedenle 90 metreden daha ince çözünürlüklerde çalıştırılmasının pratik olmamasıdır. Sonuç olarak, SWATgrid'in mevcut haliyle mekansal detayın önemli olduğu küçük havzalar için daha kullanışlı olduğu, ancak daha geniş çaplı uygulamalar için hesaplama verimliliğinin ve yönlendirme algoritmalarının iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Khorashadi Zadeh vd. (2017) yaptıkları çalışmada, SWAT modeline uygulanan iki farklı Küresel Hassasiyet Analizi (GSA) yaklaşımını karşılaştırmayı amaçlamıştır: yaygın olarak kullanılan varyans tabanlı Sobol' yöntemi ve daha yeni olan moment-bağımsız PAWN yöntemi. Araştırmanın temel hedefleri, bu iki yöntemin 26 SWAT parametresini sıralama ve

eleme (önemli veya önemsiz olarak belirleme) sonuçlarını karşılaştırmak ve önemsiz parametreleri belirlemek için bir "kukla parametre" (dummy parameter) yaklaşımı önermektedir. Metodolojik olarak, Belçika'daki Zenne Nehri havzası için geliştirilmiş bir SWAT modeline hem Sobol' hem de PAWN yöntemleri uygulanmış ve parametrelerin model performansı (NSE ve ME metriklerine göre) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, her iki GSA yönteminin de aynı 12 parametreyi "etkili" olarak belirlediği, yani eleme sonuçlarının tutarlı olduğu bulunmuştur. Ancak, bu etkili parametrelerin önem sırası (ranking) iki yöntemde farklılık göstermiştir, PAWN yönteminin, özellikle simetrik olmayan model çıktılarında, parametreler arasında daha net bir ayırım ve sıralama sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, önerilen "kukla parametre" yaklaşımının, önemsiz parametreleri belirlemek için pratik ve etkili bir eşik değeri sağladığı doğrulanmıştır. Bu çalışma, Vrije Universiteit Brussel'deki (Belçika) araştırmacılar tarafından yürütülmüştür.

Gull vd. (2017), Hindistan'daki Lolab havzasının akış ve sediment verimini tahmin etmek için SWAT modelini kullanmıştır. Araştırmanın temel amaçları, modelin performansını kalibrasyon ve doğrulama yoluyla değerlendirmek ve en fazla sediment üreten sorunlu alt havzaları belirlemektir. Metodolojik olarak, ArcSWAT 2005 modeli, SRTM DEM, arazi kullanımı, toprak ve yerel meteoroloji verileri gibi girdilerle kurulmuştur. Model, 1993-2000 dönemi verileriyle kalibre edilmiş ve 2001-2004 dönemi verileriyle doğrulanmıştır, bu süreçte hem manuel hem de otomatik kalibrasyon teknikleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, SWAT modelinin hem aylık hem de yıllık bazda akış ve sediment verimini başarılı bir şekilde tahmin ettiği, kalibrasyon ve doğrulama dönemleri için yüksek R^2 ve NSE değerleri elde edildiği gösterilmiştir. Hassasiyet analizi, akış için CN2'nin ve sediment için SPCON'un en etkili parametreler olduğunu ortaya koymuştur. Model ayrıca, dik yamaç eğimleri nedeniyle belirli alt havzaların (24, 25, 28 ve 38) sediment üretimi açısından yüksek risk taşıdığını tespit etmiştir. Sonuç olarak, SWAT modelinin çalışma alanındaki su kaynakları planlaması ve yönetimi için yetkin bir araç olduğu kanıtlanmıştır.

Sinnathamby vd. (2017) yaptıkları çalışmada, SWAT gibi havza ölçekli hidrolojik modellerde genellikle ihmal edilen bitki büyüme alt-modellerinin kalibrasyonunun önemini vurgulamayı amaçlamıştır. Çalışmanın özel hedefleri, mısır ve sorgum için tarla ölçeğindeki verileri kullanarak SWAT'ın bitki parametrelerini kalibre etmek ve doğrulamak, ayrıca bir biyoenerji bitkisi olan tatlı sorgum için yeni bir parametre seti geliştirmektir. Metodolojik

olarak, Kansas ve Oklahoma'daki (ABD) iki farklı araştırma sahasından elde edilen tarla ölçekli ürün verimi verileri kullanılmıştır. Mısır ve sorgum için modelin kalibrasyonu Kansas'taki 10 yıllık verilerle yapılırken, doğrulama işlemi Oklahoma'daki 5 yıllık verilerle gerçekleştirilmiştir. Tatlı sorgum için ise 4 yıllık verilerle yeni bir parametre seti geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, bitki parametrelerinin kalibrasyonunun modelin ürün verimi tahmin performansını artırdığı görülmüştür. Mısır için yapılan kalibrasyon, farklı bir iklim ve yönetim koşullarına sahip ikinci sahada da başarılı sonuçlar verirken, sorgum için yapılan doğrulama kuraklık koşullarından ciddi şekilde etkilenmiş ve başarılı olmamıştır. Çalışma, SWAT'ta tatlı sorgumun modellenmesi için önemli bir başlangıç parametre seti sunmuştur. En önemli sonuç, doğru hidrolojik modelleme için varsayılan veya başka bir sahadan alınmış parametreler yerine, sahaya özgü tarla ölçeğindeki verilerle bitki-büyüme parametrelerinin kalibre edilmesinin kritik önem taşıdığıdır.

Kumar vd. (2017), Hindistan'daki Tons Nehri Havzası'nda akış tahmini yapmak amacıyla SWAT modelinin kalibrasyonunu, validasyonunu ve belirsizlik analizini gerçekleştirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışmanın bir diğer hedefi de havzanın en hassas hidrolojik parametrelerini belirlemektir. Metodolojik olarak, SWAT modeli 1979-2000 dönemi için kalibre edilmiş ve 2001-2011 dönemi için doğrulanmıştır. Kalibrasyon ve belirsizlik analizi süreçlerinde, SWAT-CUP programı içerisinde yer alan SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) algoritması kullanılmıştır. Modelin performansı R^2 , NSE, PBIAS ve RSR gibi istatistiksel metrikler ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, modelin hem kalibrasyon (NSE=0.73, R^2 =0.74) hem de validasyon (NSE=0.69, R^2 =0.75) dönemlerinde tatmin edici bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Parametre hassasiyet analizi, taban akışı alfa faktörünün (ALPHA_BF) en hassas parametre olduğunu ortaya koymuş, bu da yeraltı suyu süreçlerinin havza hidrolojisi için önemini vurgulamıştır. Sonuç olarak, SUFI-2 algoritması ile kalibre edilen SWAT modelinin, Tons Nehri Havzası'nda akış tahmini ve su kaynakları yönetimi için güvenilir bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Malagó vd. (2017), Avrupa'nın en büyük ikinci nehri olan Tuna Havzası için SWAT modelini kullanarak su ve nutrient (azot ve fosfor) akışlarını modelleyen yenilikçi ve süreç tabanlı bir yaklaşım geliştirmeyi ve uygulamayı amaçlamıştır. Bu çalışmanın temel hedefi, mevcut tarımsal yönetim uygulamalarını da dikkate alarak, Avrupa çevre politikalarının uygulanmasını destekleyecek güvenilir bir modelleme aracı oluşturmaktır. Metodolojik

olarak, 800,000 km²'lik Tuna Havzası'nın tamamı için bir SWAT modeli kurulmuş ve bu model, literatürde bir yenilik olarak, sıralı bir kalibrasyon stratejisiyle (önce ürün verimi, sonra akış ve en son nutrientler) kalibre edilmiştir. Bir diğer önemli metodolojik yenilik ise, modelin nutrient kalibrasyonunda genellikle kullanılan yük (ton/yıl) değerleri yerine doğrudan nutrient konsantrasyonlarının (mg/L) kullanılmasıdır. Model, 1995-2009 dönemi için çok sayıda gözlem istasyonundan alınan verilerle başarılı bir şekilde kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, modelin akış, nitrat, toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) konsantrasyonlarını başarılı bir şekilde simüle ettiği görülmüştür. Havzadaki nutrient dengesi analizleri, azotun %58'inin ve fosforun %92'sinin bitkiler tarafından alındığını ve bitki alımının en büyük nutrient yutağı olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen konsantrasyon bazlı kalibrasyon yaklaşımının, politika hedeflerini (örn. su kalitesi standartları) değerlendirmede daha sağlam bir temel sunduğu ve Tuna Havzası'ndaki su ve nutrient akışları hakkında güncel ve güvenilir bir bilimsel bilgi tabanı oluşturduğu vurgulanmıştır.

Kumar vd. (2017), Hindistan'daki Ken Nehri Havzası'nın hidrolojisini, sediment verimini ve su dengesini değerlendirmek amacıyla SWAT modelini kullanmıştır. Metodolojik olarak, havza 10 alt havzaya ve 143 hidrolojik tepki birimine (HRU) bölünmüş ve model, Banda gözlem noktasından alınan günlük ve aylık akış ve sediment verileri kullanılarak 1985-1995 dönemi için kalibre edilmiş ve 1996-2005 dönemi için doğrulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, modelin günlük akış simülasyonunda iyi ($R^2 > 0.76$), aylık akış simülasyonunda ise çok iyi ($R^2 > 0.94$) bir performans sergilediğini göstermiştir. Sediment simülasyonu ise günlük bazda kabul edilebilir ($R^2 > 0.37$), aylık bazda ise iyi ($R^2 > 0.72$) sonuçlar vermiştir. Su dengesi analizi, yıllık ortalama yağışın yaklaşık %44.6'sının buharlaşma ve terleme (evapotranspirasyon) yoluyla kaybolduğunu ortaya koymuştur. Havzanın yıllık ortalama sediment verimi 15.41 ton/hektar olarak hesaplanmış, bu da bölgenin yüksek erozyon riski altında olduğunu göstermektedir.

Briak vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Fas'ın kuzeyindeki Kalaya havzasında akış ve sediment konsantrasyonunu simüle etmek amacıyla güvenilir bir hidrolojik model geliştirmek hedeflenmiştir. Metodolojik olarak, 1971-1993 yıllarını kapsayan tarihsel veriler kullanılarak SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeli kurulmuş, modelin kalibrasyonu ve doğrulanması ise SWAT-CUP içerisindeki SUFI-2 algoritması ile aylık

zaman adımlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, modelin hem akış (kalibrasyon dönemi için $NSE=0.76$) hem de sediment konsantrasyonu (kalibrasyon dönemi için $NSE=0.69$) için tatmin edici bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Model, havzadaki ortalama toprak erozyon oranını yaklaşık 55 t/ha/yıl olarak tahmin etmiş ve en yüksek sediment üretiminin dik yamaçlardaki tarım arazilerinde meydana geldiğini ortaya koymuştur. Yazarlar, başarıyla kalibre edilen bu modelin, bölgedeki erozyon kontrol yapılarının planlanması, su kaynakları yönetimi ve gelecekteki arazi kullanımı ile iklim değişikliği senaryolarının etkilerini değerlendirmek için güvenilir bir araç olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Tuo vd. (2016) yaptıkları çalışmada, Alp havzalarında farklı yağış girdi verilerinin SWAT modeli simülasyonları üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Bu kapsamda, model performansının ve parametre belirsizliklerinin farklı yağış veri setlerine göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Metodolojik olarak, İtalya'daki Adige nehir havzasının üç alt havzasında, dört farklı günlük yağış veri seti (yerel gözlem istasyonları (OP), Ters Mesafe Ağırlıklandırma (IDW) ile enterpole edilmiş veriler ve iki uydu ürünü olan CHIRPS ve TRMM) SWAT modeline girdi olarak kullanılmıştır. Modeller, SWAT'ın yükselti bandı düzeltme özelliği kullanılarak ve kullanılmadan çalıştırılmış ve sonuçlar gözlemlenen akış verileriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel sonucu, bu Alp havzalarında su bütçesini doğru bir şekilde modelleyebilmek için yükselti bandı düzeltmesinin mutlak bir gereklilik olduğudur. Yükselti bandı düzeltmesi uygulandığında, IDW ile oluşturulan yağış verisinin en iyi model performansını (NS ve R^2 değerleri açısından) sağladığı görülmüştür. Ayrıca CHIRPS uydu verisinin de tatmin edici sonuçlar verdiği ve veri kıtlığı olan bölgeler için uygun bir alternatif olabileceği belirtilmiştir. Çalışma, kullanılan yağış girdisinin, kalibre edilen model parametrelerini önemli ölçüde etkilediğini ve bu durumun, havzadaki hidrolojik süreçlerin yorumlanmasında farklılıklara yol açtığını vurgulamıştır.

Addis vd. (2016), Etiyopya Dağlık Bölgesi'ndeki bir havzada SWAT modelinin akış ve sediment dinamiklerini modelleme performansını ve toprak ile su koruma (SWC) önlemlerinin etkisini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Metodolojik olarak, 53.7 km² büyüklüğündeki Gumara-Maksegnit havzasında, mevcut taş terasların (stone bunds) etkisini modele dahil etmek için yüzey akış eğri numarası (CN2) ve USLE destek uygulama faktörü (P-faktörü) gibi parametreler değiştirilerek SWAT modeli kurulmuştur. Model, 2011-2012

dönemi için kalibre edilmiş ve 2013 dönemi için doğrulanmıştır, bu süreçte günlük akış ve sediment verileri kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, modelin günlük akış simülasyonunda tatmin edici bir performans gösterdiğini (kalibrasyon için $NSE=0.56$) ortaya koymuştur. Ancak, günlük sediment verimi simülasyonu, özellikle kısa süreli ve yoğun yağış olaylarının model tarafından tam olarak yakalanamaması nedeniyle yetersiz kalmıştır (kalibrasyon için $NSE=0.07$). Buna rağmen model, yıllık ortalama 21.08 Mg/hm^2 gibi yüksek bir sediment verimi tahmin ederek bölgedeki ciddi erozyon riskini vurgulamıştır. Sonuç olarak, günlük sediment tahminindeki sınırlılıklara rağmen SWAT'ın, Etiyopya Dağlık Bölgeleri'nde sürdürülebilir tarım için SWC müdahalelerinin planlanmasını destekleyecek bir araç olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışma, Viyana Doğal Kaynaklar ve Yaşam Bilimleri Üniversitesi'ndeki (Avusturya) araştırmacılar tarafından yürütülmüştür.

Dile vd. (2016), SWAT modeli için QSWAT adında yeni bir açık kaynak kodlu Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanıcı arayüzü geliştirmeyi ve tanıtmayı amaçlamıştır. Bu çalışmanın temel motivasyonu, SWAT modelinin kullanılabilmesi için gerekli olan ve lisans ücreti gerektiren ArcSWAT arayüzüne ücretsiz ve açık kaynaklı bir alternatif sunarak modelin küresel ölçekte erişilebilirliğini artırmaktır. Metodolojik olarak, QSWAT arayüzü, açık kaynak kodlu QGIS platformu için Python programlama dili kullanılarak bir eklenti olarak geliştirilmiştir. Bu yeni arayüz, havza ve hidrolojik tepki birimi (HRU) tanımlama gibi standart ArcSWAT fonksiyonlarını yerine getirmesinin yanı sıra, küçük alt havzaları birleştirme ve model çıktılarını statik ve dinamik olarak görselleştirme gibi ek yeteneklerle donatılmıştır. Geliştirilen arayüzün performansı, Etiyopya'daki Gumera havzasında bir vaka çalışması ile test edilmiş ve modelin kurulumu, kalibrasyonu ve doğrulaması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, QSWAT'ın, SWAT için güvenilir ve başarılı bir arayüz olduğu ve vaka çalışmasında kurulan modelin akış simülasyonlarında oldukça iyi bir performans (kalibrasyon için $NSE=0.86$) sergilediği kanıtlanmıştır. Sonuç olarak QSWAT, özellikle ticari CBS yazılımlarına erişimi olmayan araştırmacılar için SWAT modelinin kullanımını kolaylaştıran ve ek işlevsellikler sunan değerli bir araç olarak sunulmuştur.

Buakhao ve Kangrang (2016) yaptıkları çalışmada, Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) çözünürlüğünün, SWAT modeli kullanılarak havzaların fiziksel özelliklerinin otomatik olarak çıkarılması süreci üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Çalışma, bu etkiyi

farklı büyüklükteki (küçük, orta, büyük) ve farklı topografik özelliklere sahip (düz ve dağlık) havzalarda karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Metodolojik olarak, Tayland'daki dört farklı havza için 5 m (LDD DEM), 30 m (ASTER DEM) ve 90 m (SRTM DEM) olmak üzere üç farklı çözünürlükteki DEM verisi, SWAT modelinin havza tanımlama aracında kullanılmıştır. Ardından, her bir çözünürlük için elde edilen havza alanı, şekli, havza eğimi, toplam akarsu uzunluğu ve ana kanal eğimi gibi fiziksel özellikler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, DEM çözünürlüğünün havza büyüklüğü ve şekli üzerinde çok büyük bir etki yaratmadığı, ancak havza eğimi ve toplam akarsu uzunluğu gibi parametreleri önemli ölçüde değiştirdiği tespit edilmiştir. Özellikle, daha ince çözünürlükteki (örn. 5 m) DEM'lerin daha uzun toplam akarsu ağları oluşturduğu, ancak hesaplanan ortalama havza eğimini düşürdüğü görülmüştür. Sonuç olarak, daha ince çözünürlüklerin yüksek hesaplama maliyeti ve potansiyel veri kalitesi sorunları göz önüne alındığında, 30 metrelik ASTER DEM'in model kalibrasyonu ve doğrulaması için zaman tasarrufu sağlayan ve yeterli doğruluğu sunan iyi bir uzlaşma olduğu önerilmiştir.

Cibin vd. (2016) yaptıkları çalışmada, ticari biyoenerji bitkisi üretiminin havza ölçeğindeki hidroloji ve su kalitesi üzerindeki potansiyel etkilerini tahmin etmek için SWAT modelinin geliştirilmiş bir versiyonunu kullanmayı amaçlamıştır. Bu araştırmanın temel hedefi, mısır sapı (stover) toplanması veya tarım arazilerinin çok yıllık enerji bitkileri olan filotu (*Miscanthus*) ve dallı darı (switchgrass) üretimine dönüştürülmesini içeren çeşitli arazi kullanım senaryolarının çevresel sonuçlarını kantitatif olarak değerlendirmektir. Metodolojik olarak, ABD'nin Ortabatı bölgesinde yer alan iki farklı havza için geliştirilmiş SWAT modeli kullanılmıştır. Araştırmacılar, mevcut arazi kullanımını temsil eden bir temel senaryo ile çok yıllık enerji bitkilerinin erozyona hassas veya marjinal tarım arazilerine ekilmesi ve mısır saplarının %70 oranında toplanması gibi 13 farklı biyoenerji üretim senaryosunu simüle etmiş ve sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda, çok yıllık enerji bitkilerinin (filotu ve dallı darı) kullanıldığı senaryoların, temel duruma kıyasla erozyon ve nutrient (nitrat ve fosfor) yüklerini azaltarak su kalitesini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Buna karşın, mısır sapı toplama senaryolarının erozyon ve sediment yükünü artırma eğiliminde olduğu görülmüştür. Ayrıca, çok yıllık bitkilerin daha yüksek su kullanımı nedeniyle havza çıkışındaki toplam akışta %0 ila %8 arasında hafif bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, biyoenerji üretimi ile çevresel hedefler arasındaki dengeyi vurgulamış ve çok yıllık enerji bitkilerinin stratejik olarak yerleştirilmesinin hem biyoyakıt

üretimi hem de su kalitesinin iyileştirilmesi gibi çevresel eş-faydalar sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Noori ve Kalin (2016), bir havza modeli (SWAT) ile yapay sinir ağı (ANN) modelini birleştirerek izlenmeyen havzalardaki günlük akış tahminini iyileştirmek için hibrit bir model geliştirilmesini amaçlamıştır. Metodolojik olarak, Amerika'nın güneydoğusundaki Atlanta şehri ve çevresindeki 29 komşu havzadan elde edilen günlük akış verileri, sıcak ve soğuk mevsimler için akış tahmin modelleri oluşturmak amacıyla "leave-one-site-out jackknifing" tekniği ile kullanılmıştır. Günlük akış önce SWAT ile simüle edilmiş, ardından SWAT tarafından üretilen taban akışı ve fırtına akışı ANN modeline girdi olarak verilmiştir. Çalışmanın temel sonucu, ANN modelinin yarı dağılımlı modellerle birleştirilmesinin, ölçüm yapılmayan havzalarda günlük akış tahminlerini iyileştirebildiğini ve bu hibrit yaklaşımın, tek başına çalışan ve bölgeselleştirme ile parametreleri belirlenen SWAT modelinden daha yüksek bir tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermesidir.

Yang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, yağış verilerinin zamansal çözünürlüğünün SWAT modelinin günlük akış simülasyonu üzerindeki etkileri, Çin'deki Yukarı Huai Nehri Havzası'nda karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu araştırmanın temel amacı, günlük ve saatlik yağış girdileriyle çalışan iki farklı SWAT modelinin performansını kıyaslamak ve zamansal çözünürlüğün hidrolojik süreçlerin simülasyonu üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Metodolojik olarak, çalışma alanında günlük ve saatlik yağış verileri kullanılarak iki ayrı SWAT modeli kurulmuş, her iki model de 2005-2008 dönemi için kalibre edilip 2009-2011 dönemi için doğrulanmıştır. Çalışmanın temel bulgusu, saatlik yağış verilerini kullanan alt-günlük (sub-daily) SWAT modelinin, özellikle taşkın dönemlerindeki tepe akışlarını simüle etmede günlük modele göre belirgin şekilde daha iyi bir performans sergilediğidir. İki modelin, havzanın hidrolojik işleyişi hakkında farklı sonuçlar ürettiği de görülmüştür, örneğin alt-günlük model taban akışının toplam akışa katkısını %58 olarak tahmin ederken, günlük model bu oranı %34 olarak hesaplamıştır. Sonuç olarak, yağış girdisinin zamansal çözünürlüğünün, SWAT ile yapılan hidrolojik süreç ve akış simülasyonlarının doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve özellikle tepe akışlarının doğru tahmini için daha yüksek çözünürlüklü verilerin kullanılmasının kritik olduğu vurgulanmıştır.

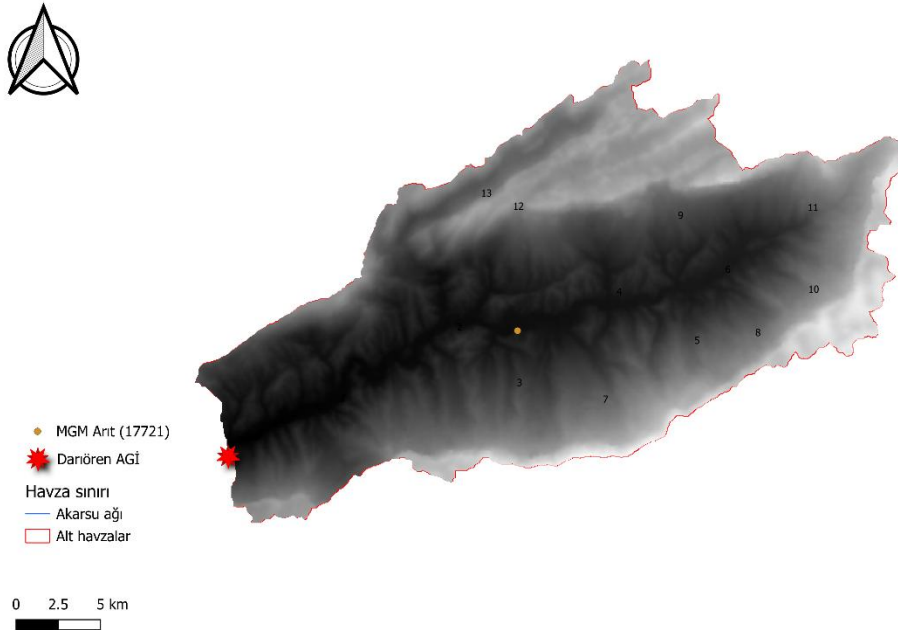
Teshager vd. (2016), SWAT modelinde yaygın olarak kullanılan ve aynı alt havza içindeki farklı konumlardaki tarım arazilerini tek bir hidrolojik tepki biriminde (HRU) birleştiren standart yaklaşıma bir alternatif olarak, her bir tarla parselinin ayrı bir HRU olarak temsil edildiği, mekansal olarak daha belirgin yeni bir ön-işlem prosedürü geliştirmiştir. Bu yaklaşımın amacı, model girdilerinin (örn. ürün rotasyonu, gübreleme) daha kolay atanmasını ve model çıktılarının tarla bazında daha rahat haritalanmasını sağlamaktır. Metodolojik olarak, bu yeni prosedür Iowa'daki Raccoon Nehri Havzası ve Illinois'deki Big Creek Havzası'nda test edilmiş, SWAT modeli her iki havza için de günlük, aylık ve yıllık akış, sediment, nitrat ve mineral fosfor verileri kullanılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, SWAT modelinin çoğu durumda yıllık, aylık ve günlük akış ile birlikte sediment, nitrat ve mineral fosforu da önerilen doğruluk sınırları içinde başarıyla tahmin edebildiği görülmüştür. Bu çalışmada geliştirilen ve tarla parselleri ile HRU'lar arasında birebir eşleşme sağlayan bu yöntemin, arazi kullanım değişikliği ve iklim değişikliği gibi analizlerin mekansal olarak daha belirgin bir şekilde yapılabilmesi için önemli bir ilk adım olduğu vurgulanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde çalışma alanının temel özellikleri ve model kurulumunda izlenen yöntem adımları bir arada sunulmuştur. Öncelikle kullanılan veri setleri ve veri hazırlama süreci özetlenmiştir. Ardından QGIS ortamında QSWAT ile havza sınırlandırma, akarsu ağı çıkarımı ve HRU üretimi açıklanmıştır. Son olarak SWAT2012 Editör ile giriş dosyalarının hazırlanması, modelin çalıştırılması ve aylık akım karşılaştırmaları için SWAT-CUP (SUFI-2) çerçevesinde yapılan kalibrasyon, doğrulama ve belirsizlik analizi verilmiştir.

3.1 Çalışma Alanı

Bu alt bölüm, Bartın Arıt Çayı alt havzasının konum ve topografya, jeolojik ve hidrojeolojik yapı ile iklimsel özelliklerini özetlemektedir. Verilen bilgiler, alt havza ve HRU tanımının doğru kurulması, parametrelerin fiziksel açıdan değerlendirilmesi ve bulguların yorumlanması için temel oluşturur. İzleyen alt başlıklarda sırasıyla konum ve topografya ile jeolojik ve hidrojeolojik yapı ele alınmıştır.



Şekil 3.1: Çalışma alanı konum haritası: Arıt kolu havza sınırı, akarsu ağı ve Darıören akım gözlem istasyonu (AGİ). Projeksiyon: EPSG:32636 (UTM Zone 36N)

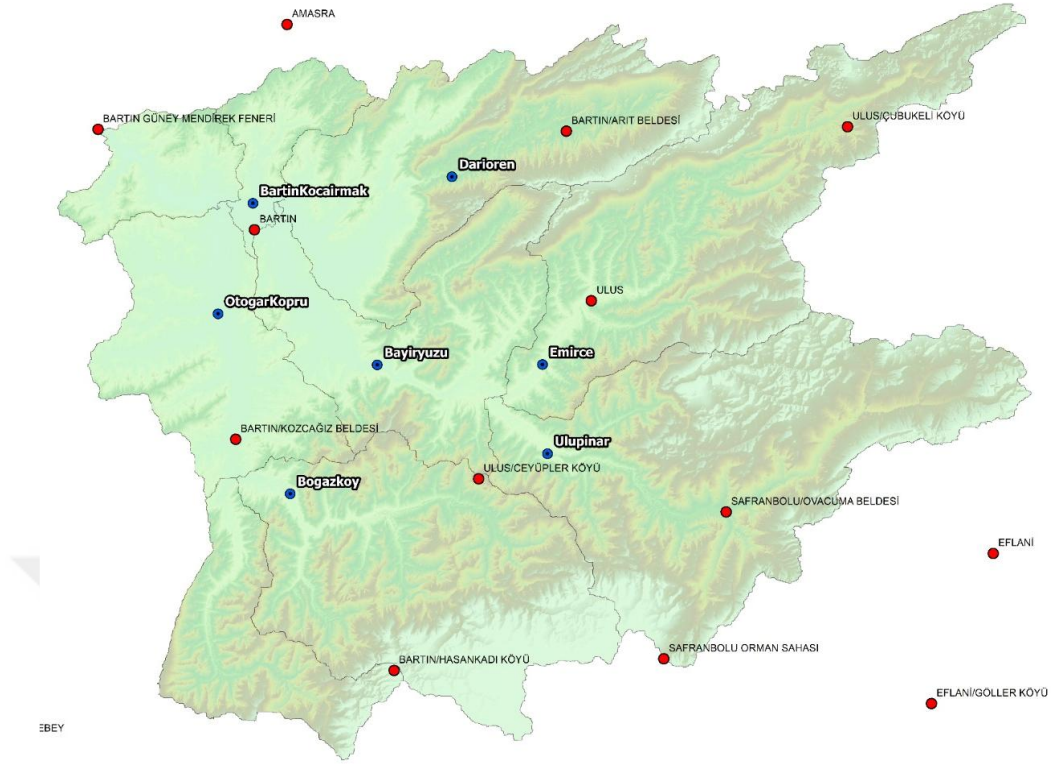
3.1.1 Konum ve Topografya

Bu çalışma, Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Bartın ili sınırları içindeki Bartın Çayı havzasının Arıt Çayı alt havzasında yürütülmüştür. Model çıkış kesiti, akım gözlemlerinin temin edildiği Darıören Akım Gözlem İstasyonu ile uyumlu olacak biçimde belirlenmiş ve havza sınırları ile akarsu ağı bu çıkış noktasına göre değerlendirilmiştir.

Çalışma alanına ait tüm mekansal veri setleri ve analizler WGS 84 datumunda UTM 36N projeksiyon sisteminde (EPSG:32636) hazırlanmıştır. Model kurulumunda kullanılan sayısal yükseklik modelinin uzanımı UTM koordinat sisteminde X doğrultusunda 446158 m ile 490683 m arasında, Y doğrultusunda 4599422 m ile 4635047 m arasında yer almaktadır. Bu uzanım coğrafi koordinat sisteminde yaklaşık 32,35 ile 32,89 derece doğu boylamları ve 41,54 ile 41,87 derece kuzey enlemleri arasındaki bölgeye karşılık gelmektedir.

Sayısal yükseklik modeli istatistiklerine göre yükselti değerleri 25,25 m ile 1383,84 m arasında değişmektedir. Ortalama yükselti 528,29 m olup standart sapma 350,93 m düzeyindedir. Yükseltideki bu geniş aralık, yağışın akışa dönüşümü, yüzey akışının oluşumu ve havza içi akım iletimi üzerinde etkili olan topografik çeşitliliği göstermektedir.

Sayısal yükseklik modelinden türetilen eğim rasterinde eğim değerleri 0 ile 72,99 derece arasında hesaplanmıştır. Model kurulumunda topografyanın hidrolojik yanıt üzerindeki etkisini temsil edebilmek için HRU oluşturma aşamasında eğim sınıfları yüzde 0-5, yüzde 5-10, yüzde 10-20 ve yüzde 20'nin üzeri olacak şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 3.2: Çalışma alanının konumu

3.1.2 Jeolojik ve Hidrojeolojik Yapı

Çalışma alanında yüzeylenen jeolojik birimler, litoloji, çatlaklılık ve ayrışma derecelerine bağlı olarak farklı geçirgenlik özellikleri göstermektedir. Bu durum yeraltı suyu beslenmesini ve baz akım oluşumunu doğrudan etkiler. Vadi tabanlarında biriken alüvyonlar genellikle daha yüksek geçirgenliğe sahiptir ve sık yeraltı suyu akışı ile akarsu arasındaki etkileşimi güçlendirebilir. Buna karşılık daha az geçirgen birimler, yağışın yüzeysel akışa dönüşme eğilimini artırarak hidroğrafın yükselme kolunu ve pik debileri etkileyebilir. Bu nedenle jeolojik ve hidrojeolojik yapı, SWAT model parametrelerinin yorumlanması ile su bütçesi bileşenlerinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken tamamlayıcı bir arka plan sunmaktadır.

Tablo 3.1: Jeolojik/Hidrojeolojik Birimler ve SWAT2012’de Beklenen Parametre Eğilimleri

Birim (özet)	Hidrolik davranış	Beklenen hidrolojik etki	SWAT2012’de ilişkili parametreler (beklenen eğilim)
Kuvaterner alüvyon (vadi tabanı)	Geçirgenlik yüksek, depolama yüksek	Sızma ve gecikmeli akış artar, düşük akımlar daha sürekli	SOL_K yüksek, SOL_AWC yüksek, GW_DELAY orta-yüksek, ALPHA_BF düşük-orta, GWQMN düşük eğilimli, kanal kayıpları olasıysa CH_K2 orta-yüksek
İnce taneli birimler (silttaşı/kiltaşı baskın yamaçlar)	Geçirgenlik düşük-orta, depolama sınırlı	Yüzey akışı eğilimi, pikler daha keskin	SOL_K düşük, SOL_AWC düşük-orta, yüzey akışı gecikmesini kontrol için SURLAG düşük-orta (pik zamanlamasına bağlı), baseflow zayıfsa GWQMN daha yüksek eğilimli
Geçirgen ara seviyeler (kumtaşı bantları vb.)	Geçirgenlik orta, yanal akış potansiyeli	Yanal akış ve ara depolama etkisi artabilir	SOL_K orta, SOL_AWC orta, yanal akış/rezervuar davranışıyla ilişkili olarak ALPHA_BF düşük-orta, GW_DELAY orta
Ayrışmış düşük-K zonları / sıkı litoloji	Geçirgenlik çok düşük, depolama sınırlı	Hızlı yüzey akışı, kısa tepki süresi, kurak dönemde hızlı çekilme	SOL_K çok düşük, SOL_AWC düşük, kurak dönemde akım sürekliliği için ALPHA_BF düşük ve/veya GW_DELAY yüksek gerekebilir (kalibrasyonda test edilir)

3.1.3 İklimsel Özellikler

Ant Deresi havzası, Batı Karadeniz’de Karadeniz’in belirgin denizel etkisi altında yer alır ve yılın büyük bölümünde yağış alan nemli bir iklim kuşağındadır. Denizel etki ile engebeli topografya, havzada bağlı nemin yüksek kalmasına ve hidrolojik süreçlerin yıl boyunca süreklilik göstermesine katkı sağlar.

Yağışlar genel olarak yıl içine dağılmakla birlikte, mevsimsel dağılımda sonbahar ve kış döneminde artış, yaz döneminde ise görece azalma gözlenir. İlkbahar ayları çoğu zaman geçiş karakteri taşır. Havzanın engebeli morfolojisi ve orografik etkiler, kısa mesafelerde yağış miktarının değişmesine neden olabilir. Bu nedenle akım rejimi yalnızca toplam yağış miktarına bağlı değildir. Yağışın zamansal dağılımı, ardışık yağışlı günler ve yağış-sıcaklık etkileşimi de belirleyicidir.

Sıcaklık rejimi denizel etkinin sonucu olarak genel olarak ılımandır. Ancak havza içindeki yükselti farkları nedeniyle yüksek kesimlerde kış ve geçiş mevsimlerinde kar yağışı ve geçici kar birikimi görülebilir. Kar birikimi ve erimesi, özellikle kış-ilkbahar geçişinde akımın mevsimsel davranışını etkileyen önemli bir süreçtir. Veri kaynakları, dönemler ve ön işleme adımları 3.2.4’te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.2 Model Girdi Verileri ve Ön İşleme

Bu bölümde SWAT2012 modelinin QGIS ortamında QSWAT (QSWAT3_12) eklentisi ile kurulumu için gerekli mekansal ve zamansal verilerin temini, ön işlenmesi ve modele uygun hale getirilmesi açıklanmaktadır. DEM, arazi kullanımı ve toprak haritaları aynı projeksiyon ve çözünürlükte hazırlanmış, çalışma alanı sınırına göre kırılmış ve gerekli kalite kontrollerinden geçirilmiştir. Meteorolojik zaman serileri ile akım gözlemleri de tutarlılık açısından kontrol edilmiş, modelin beklediği formatlara dönüştürülerek iklim dosyaları hazırlanmıştır. Bu adımlar sonucunda alt havza ve HRU tanımları için tutarlı bir girdi seti oluşturulmuştur.

3.2.1 Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)

Bu çalışmada topografik girdi olarak USGS EarthExplorer üzerinden temin edilen SRTM tabanlı Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) kullanılmıştır. DEM, QSWAT ile yapılan havza sınırlandırma ve akarsu ağı çıkarımı için temel girdidir. Ayrıca alt havzaların türetilmesi ve HRU üretiminde kullanılan eğim katmanının oluşturulması DEM üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3).

DEM ön işleme adımları QGIS ortamında yürütülmüştür. DEM rasteri birden fazla parça halinde temin edilmişse mozaiklenmiş, ardından çalışma alanı için seçilen proje koordinat sistemine dönüştürülmüştür (WGS 84 / UTM Zone 36N, EPSG:32636). Tüm mekansal girdilerle uyum sağlamak için raster hücre boyutu 25 m olacak şekilde yeniden örneklenmiştir. Hidrolojik tutarlılığı artırmak amacıyla çukurluk doldurma (fill sinks) işlemi uygulanmış ve drenaj sürekliliğini bozabilecek lokal çukurlar giderilmiştir.

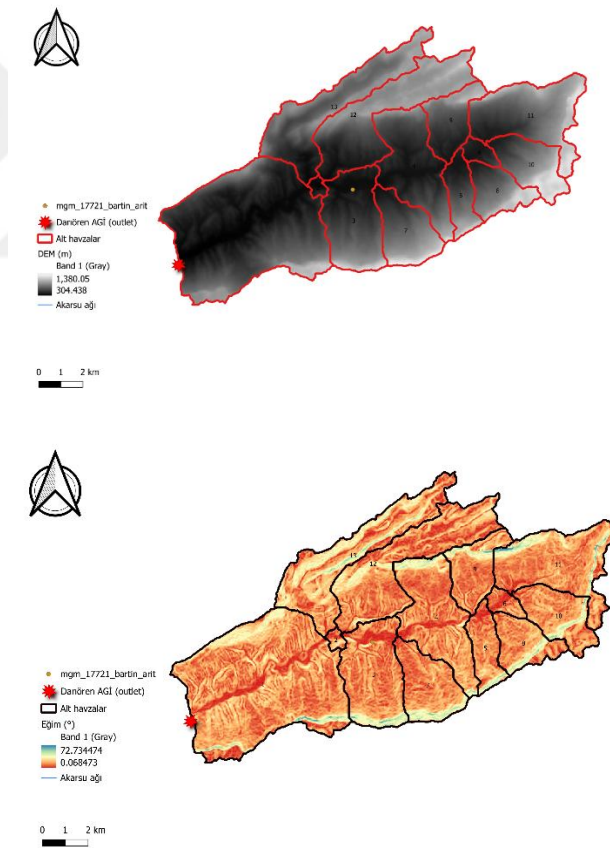
Ön işleme sonrası DEM rasteri 1781x1425 piksel boyutunda olup 25 m çözünürlüğe sahiptir. Veri setinin uzanımı X=446 158,1875-490 683,1875 m ve Y=4 599 422,25-4 635 047,25 m aralığındadır. DEM istatistiklerine göre yükselti minimum 25,25 m, maksimum 1 383,84 m ve ortalama 528,29 m'dir.

Çalışma alanı sınırına göre raster kırpma işlemi QGIS'te Raster > Extraction > Clip raster by mask layer aracı ile yapılmıştır. İlk denemelerde maske poligonunda kendini kesen halka (ring self-intersection) bulunduğu için “cutline polygon is invalid” hatası alınmıştır. Bu sorun maske katmanında Vector > Geometry Tools > Fix geometries işlemi uygulanarak giderilmiş, geçerli geometri (“valid output”) kullanılarak kırpma adımı tekrarlanmıştır.

Raster veri setleri çalıştırılırken DEM, arazi kullanımı ve toprak katmanları için referans ızgara olarak kullanılmış ve tüm rasterlar aynı çözünürlükte ve aynı hücre hizasında (snap) hazırlanmıştır. Projeksiyon birimleri, mozaikleme sonrası olası seviye süreksizlikleri, NoData alanları ve DEM'in çalışma alanını eksiksiz kapsaması kontrol edilmiştir. Ayrıca DEM'den türetilen hillshade haritası ile topografyanın genel karakteri görselleştirilmiş ve veri bütünlüğü doğrulanmıştır.

DEM'den GDAL “Slope” aracı kullanılarak eğim rasteri üretilmiştir. Eğim rasterinde NoData değeri -9999 olarak atanmıştır. Hesaplanan eğim değerleri 0 ile 72,998 derece arasındadır. Üretilen bu katman, havza sınırlandırma ve HRU üretimi adımlarında topografyanın etkisini temsil eden temel girdilerden biri olarak kullanılmıştır (Şekil 3.2).

QSWAT ile yapılan havza sınırlandırması sonucunda modelin temsil ettiği çıkış drenaj alanı yaklaşık 130 km² olarak hesaplanmıştır. DSİ tarafından Darıören Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) için raporlanan drenaj alanı 137 km²'dir. İki değer arasındaki yaklaşık yüzde 5'lik farkın performans karşılaştırmasını sistematik olarak etkilememesi için gözlem debileri alan-oranı yaklaşımıyla ölçeklenmiştir. Bu amaçla 130/137 oranı kullanılmış ve ölçekleme katsayısı yaklaşık 0,95 olarak alınmıştır.



Şekil 3.3: Çalışma alanına ait DEM ve eğim (slope) haritaları.

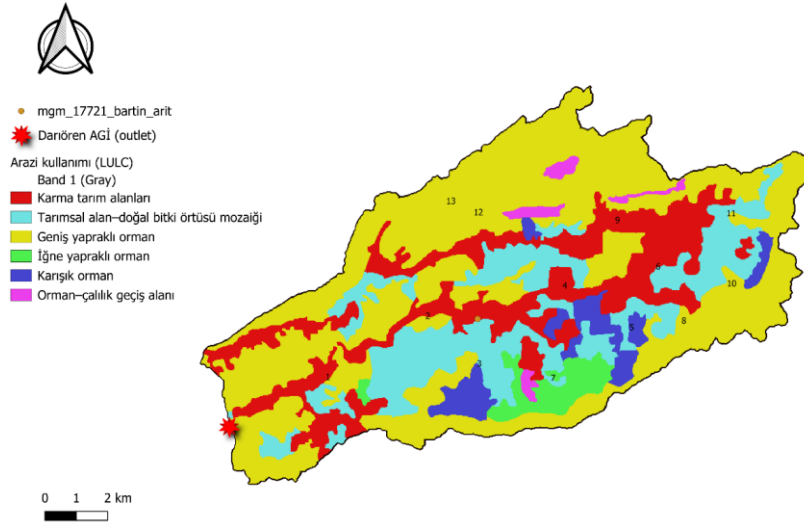
3.2.2 Arazi Kullanımı/Örtüsü (LULC)

Modelde kullanılan arazi kullanımı/örtüsü (LULC) verisi Copernicus CORINE Land Cover 2018 (CLC2018) veri setinden elde edilmiştir. CORINE verisi 100 m temsil çözünürlüğüne sahiptir. HRU üretiminde DEM referans alındığından, CORINE verisi 25 m çözünürlüğe yeniden örneklenerek modele uyarlanmıştır. CORINE sınıfları, SWAT2012'nin bitki gelişimi, yüzey akışı ve evapotranspirasyon gibi süreçlerde kullandığı arazi kullanım kodlarıyla uyumlu olacak şekilde yeniden kodlanmıştır (Tablo 3.2, Şekil 3.4).

Ham CORINE verisi QGIS ortamında çalışma alanına göre kırılmış, geometri/topoloji hataları giderilmiş ve analiz açısından gereksiz küçük poligonlar temizlenmiştir. Daha sonra her poligona LULC_CODE alanı tanımlanmış ve her sınıf, Tablo 3.2'de verilen SWAT arazi kullanım kodlarıyla (ORM, FRST, AGRL, PAST, URBN, WATR vb.) eşleştirilmiştir. SWAT kodlarının doğrulanması için QSWATRef2012.mdb veritabanındaki arazi kullanım tanımları esas alınmıştır. Veride bulunup SWAT'ta doğrudan karşılığı olmayan sınıflar ise hidrolojik davranış açısından en yakın sınıfa dönüştürülmüştür.

LULC katmanı, DEM ile aynı koordinat sisteminde (EPSG:32636) ve aynı hücre yapısında olacak şekilde raster formata dönüştürülmüştür. Raster üretiminde hücre hizalamasını korumak için DEM “snap raster” olarak kullanılmış ve çalışma alanı sınırına göre kırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda çalışma alanı dışındaki piksellere NoData atanmıştır. Üretilen LULC_final.tif katmanı, DEM ve toprak rasteri ile piksel bazında kontrol edilerek girdi katmanlarının birbiriyle uyumu doğrulanmıştır. Böylece HRU üretimi için gerekli girdi seti tutarlı hale getirilmiştir.

Bu çalışmada arazi kullanımının simülasyon dönemi boyunca sabit kaldığı varsayılmıştır. Bu kabul uzun dönemli senaryo uygulamalarında bir belirsizlik kaynağı oluşturabilmektedir. Bununla birlikte havza ölçeğinde yapılan SWAT çalışmalarında yaygın kullanılan bir yaklaşım olduğu için bu çalışma kapsamında da aynı kabul benimsenmiştir.



Şekil 3.4: Arazi kullanım/örtüsü (LULC) sınıf dağılım haritası

Tablo 3.2: LULC sınıfları ile SWAT kodlarının eşlemesi

Yerel/CORINE sınıfı	SWAT Kodu	Açıklama
Orman (genel)	FRST	İğne/yapraklı ayrımı yoksa birleşik sınıf
Tarım alanı	AGRL	Kuru tarım / ekili alan
Mera/Çayır	PAST	Doğal otlak
Yerleşim	URBN	Kentsel alanlar
Su yüzeyi	WATR	Akarsu/göl

3.2.3 Toprak Verisi

Toprak verisi, FAO Digital Soil Map of the World (DSMW) / HWSD benzeri FAO tabanlı bir toprak veri setinden elde edilmiştir (kullanılan ürün ve sürüm tez metninde net belirtilmelidir). Toprak katmanı, SWAT2012/QSWAT iş akışında infiltrasyon, toprak su depolaması, perkolasyon ve taban akımı gibi süreçlerin temsilinde belirleyici girdilerden biridir, bu nedenle SWAT2012'nin veri yapısıyla uyumlu olacak şekilde derlenmiş ve ön işleme tabi tutulmuştur (Şekil 3.5).

Ön-işleme QGIS ortamında yürütülmüş, toprak verisi havza sınırına göre kırılmış, geometri/topoloji hataları giderilmiş ve gerekirse çok küçük/aykırı poligonlar temizlenmiştir. Ardından her bir toprak poligonuna modelde kullanılmak üzere SOIL_CODE benzeri sayısal bir sınıf kodu atanmıştır. Toprak katmanı EPSG:32636 koordinat sistemine dönüştürülmüş ve HRU üretiminde kullanılmak üzere 25 m çözünürlükte raster formata çevrilmiştir. Rasterlaştırma sırasında DEM “snap raster” olarak kullanılarak hücre hizası sağlanmış, çalışma alanı dışındaki alanlar NoData olarak tanımlanmıştır.

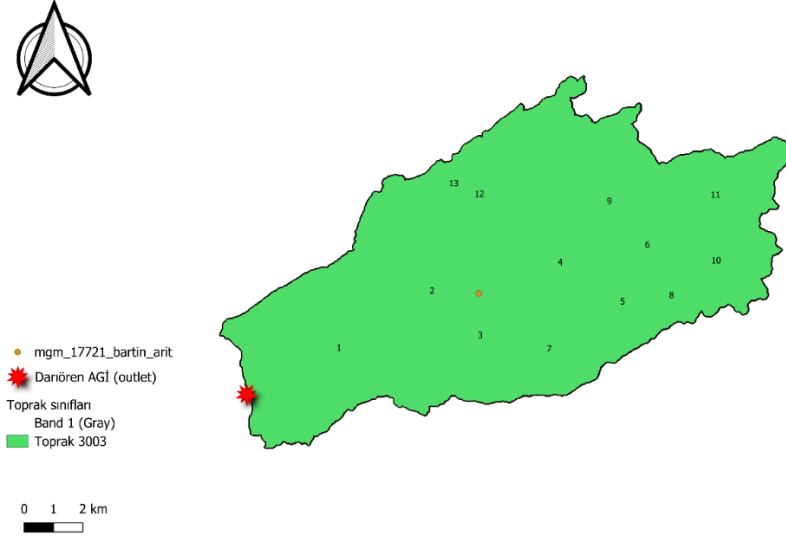
SWAT2012’nin toprak parametre setlerini doğru okuyabilmesi için, SOIL_CODE sınıfları QSWATRef2012.mdb veritabanında bulunan usersoil tablosundaki toprak adları (SNAM) ile eşleştirilmiştir. Bu kapsamda, toprak haritası lejantındaki sınıflar ve SWAT veritabanındaki toprak tanımları karşılaştırılmış, her SOIL_CODE için uygun bir SNAM değeri belirlenerek soil lookup tablosu oluşturulmuştur. Böylece HRU üretimi sırasında “bilinmeyen toprak” türü hataların önüne geçilmiş ve Toprak_final.tif katmanının SWAT2012 tarafından tutarlı biçimde yorumlanması sağlanmıştır.

Havzadaki baskın toprak dokusu/sınıfı (örn. Kil-tınlı, kumlu-tınlı vb.), hidrolik iletkenlik ve kullanılabilir su kapasitesi gibi özellikler üzerinden akım bileşenlerini (yüzey akışı-sızma-baz akım dengesi) etkileyebileceğinden, toprak sınıflarının hidrolojik yorumu sonuç bölümlerinde dikkate alınmalıdır.

Kalite güvencesi kapsamında, (i) havza içi tam kapsama ve boşluk kontrolü, (ii) sınıf sayıları ve alan yüzdelerinin doğrulanması, (iii) raster-vektör tutarlılığı ve (iv) soil lookup tablosunun hem rasterdaki tüm kodları hem de usersoil tablosundaki karşılıklarını kapsadığı kontrol edilmiştir. Bu kontroller sonucunda toprak girdisi, SWAT2012 model kurulumunda kullanılabilecek biçimde standardize edilmiştir.

Tablo 3.3: Toprak sınıfının havza içindeki alan payı

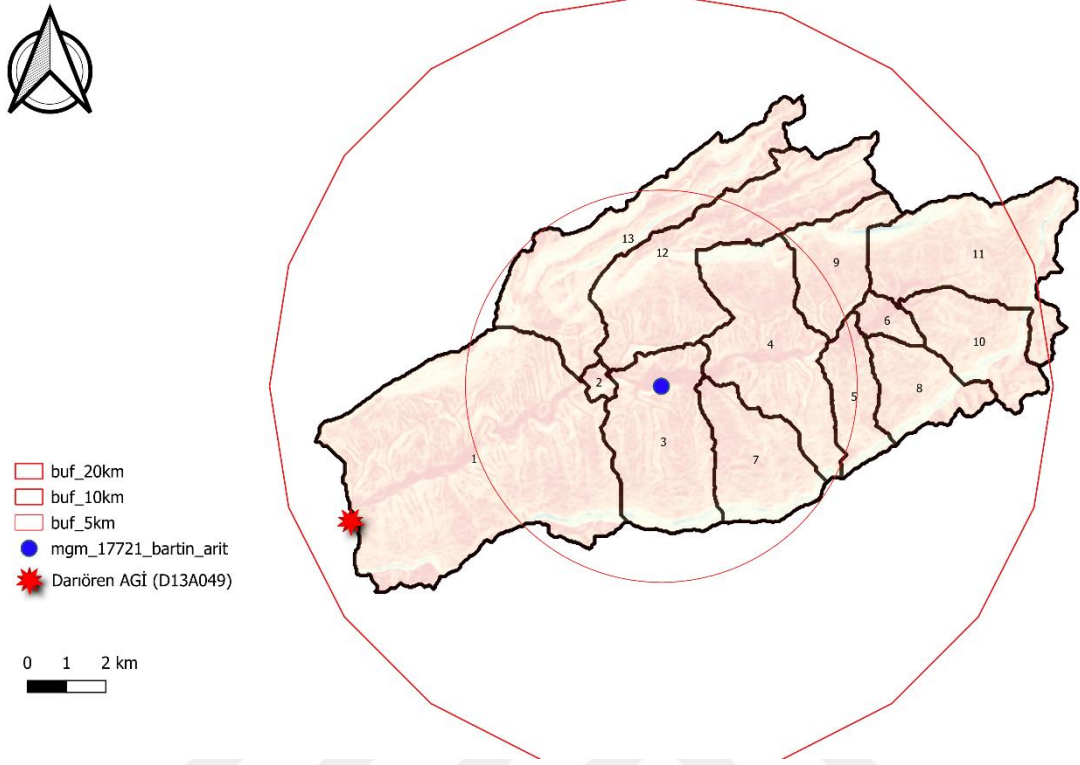
Toprak kodu	Alan (km ²)	Alan (%)
3003	130.10	100.0



Şekil 3.5: Toprak haritası ve sınıf dağılımı

3.2.4 Meteorolojik Veriler

SWAT2012 modeli, su bütçesi ve akım süreçlerini günlük zaman adımında çözdüğü için meteorolojik girdilerin kesintisiz ve birim/format açısından tutarlı biçimde hazırlanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında model girdisi olarak günlük toplam yağış (PCP) ile günlük maksimum–minimum sıcaklık (TMPmax/TMPmin) serileri kullanılmıştır. Kullanılan ana meteoroloji istasyonu MGM ARIT_MGM (17721) olup (41.6872°K, 32.6156°D, rakım ≈354 m), 2010–2023 dönemine ait günlük yağış ve sıcaklık kayıtları temin edilmiştir. Model koşu dönemi 2010–2023 olarak tanımlandığından, 2010–2011 yılları modelin ısınma (warm-up) periyodu olacak şekilde meteorolojik veri seti bu dönemi de içerecek biçimde hazırlanmıştır.



Şekil 3.6: Meteoroloji istasyonları ve veri kapsama haritası

Meteorolojik veri ön-işleme aşamasında her istasyon için (i) tarih sürekliliği ve takvim tutarlılığı (atlanmış/çift tarih kontrolü), (ii) birim kontrolü (yağış: mm, sıcaklık: °C), (iii) fiziksel olarak olası sınırlar ve uç değer taraması, (iv) eksik kayıtların belirlenmesi adımları uygulanmıştır. Eksik günler ve/veya şüpheli kayıtlar işaretlenmiş, gerektiğinde komşu istasyon desteği ve/veya SWAT'ın eksik veri kodlama yaklaşımı kullanılarak modelin kesintisiz günlük iklim zaman dizisiyle çalışması sağlanmıştır.

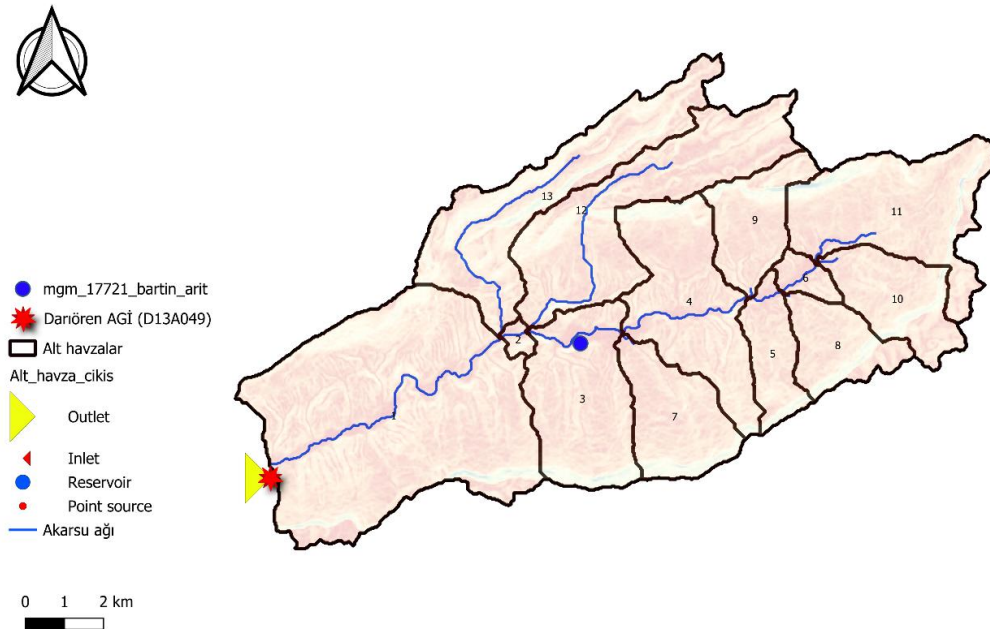
Potansiyel buharlaşma-terleme (PET) hesabı için Penman–Monteith yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem, güneş radyasyonu, bağıl nem ve rüzgar hızı gibi ek meteorolojik değişkenlere ihtiyaç duyduğundan, çalışma alanında bu değişkenlere ait güvenilir günlük gözlemler bulunmaması durumunda SWAT'ın hava durumu jeneratörü (WGEN) devreye alınmıştır. WGEN parametreleri, mevcut istasyon kayıtlarından türetilen uzun dönem aylık istatistikler kullanılarak oluşturulmuş (WGEN_Bartın) ve SWAT Editor (SWAT2012) arayüzünde “Weather Data Definition” adımıyla projeye tanımlanmıştır. Böylece model, ölçülmeyen meteorolojik bileşenleri istatistiksel olarak üretip Penman–Monteith denklemini tutarlı bir

çerçevede uygulayabilmiştir. Bu yaklaşımın, PET ve buna bağlı su bütçesi bileşenleri üzerinde belirsizlik üretebileceği hususu değerlendirmelerde dikkate alınmıştır.

Meteorolojik verilerin mekansal temsili QSWAT arayüzünde gerçekleştirilmiştir. İstasyon kimliği (ID/ad), koordinatları ve rakım bilgileri ile birlikte tanımlanan meteoroloji girdileri, QSWAT tarafından alt havzalara atanmış, böylece her alt havzanın yağış ve sıcaklık girdileri tanımlanarak veri–model eşleştirmesi tamamlanmıştır (Şekil 3.6).

3.2.5 Akım Gözlemleri (Dariören AGİ)

Modelin kalibrasyon ve doğrulama (validasyon) aşamalarında kullanılan gözlemsel akım verileri, DSİ D13A049 Dariören Akım Gözlem İstasyonu'ndan ($41.655833^{\circ}\text{K}$, $32.520556^{\circ}\text{D}$, rakım ≈ 230 m) temin edilen aylık ortalama debi (m^3/s) kayıtlarıdır. Model değerlendirme dönemi 2012–2023 olarak belirlendiğinden, gözlem serisi bu zaman aralığını kapsayacak şekilde hazırlanmış, 2012–2018 dönemi kalibrasyon, 2019–2023 dönemi ise validasyon amacıyla ayrılmıştır.



Şekil 3.7: Akım gözlem istasyonu (Dariören AGİ) konumu ve havza akarsu ağı

Gözlem verileri, SWAT-CUP (SUFI-2) yazılımının gerektirdiği formatta kullanılabilmesi için ön-işlemden geçirilmiştir. Bu kapsamda (i) aylık zaman dizisinin sürekliliği ve Jan–Dec sıralaması, (ii) birim tutarlılığı (m³/s), (iii) eksik ayların ve olası ölçüm/aktarım hatalarının kontrolü, (iv) aykırı değer taraması gerçekleştirilmiştir. Düzenlenen seri, tek değişkenli gözlem dosyası formatında kaydedilerek performans metriklerinin (NSE, KGE, PBIAS, R² vb.) dönem bazında tutarlı biçimde hesaplanması güvence altına alınmıştır.

Model–gözlem karşılaştırmasının fiziksel olarak anlamlı kalması için drenaj alanı uyumu dikkate alınmıştır. QSWAT havza sınırlandırması sonucunda modelin temsil ettiği drenaj alanı yaklaşık 130 km² iken, Dariören istasyonunun resmi drenaj alanı 137 km²'dir. Alan farkının hacimsel karşılaştırmaları etkilemesini önlemek amacıyla gözlem debileri, birim alan yaklaşımıyla model alanına indirgenmiş ve karşılaştırma öncesinde aşağıdaki oranla ölçeklenmiştir:

$$Q_{\text{obs}}(\text{düzeltilmiş}) = Q_{\text{obs}} \times (130/137) \approx Q_{\text{obs}} \times 0.95.$$

Bu düzeltme sonrasında, Dariören'i temsil eden çıkış kesitine ait aylık SWAT çıktıları (output.rch dosyasında ilgili kesit için raporlanan FLOW_OUT değişkeni) ile gözlemler aynı temsil alanında karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.4: Çalışmada kullanılan veri setleri, kaynakları ve ön-işleme

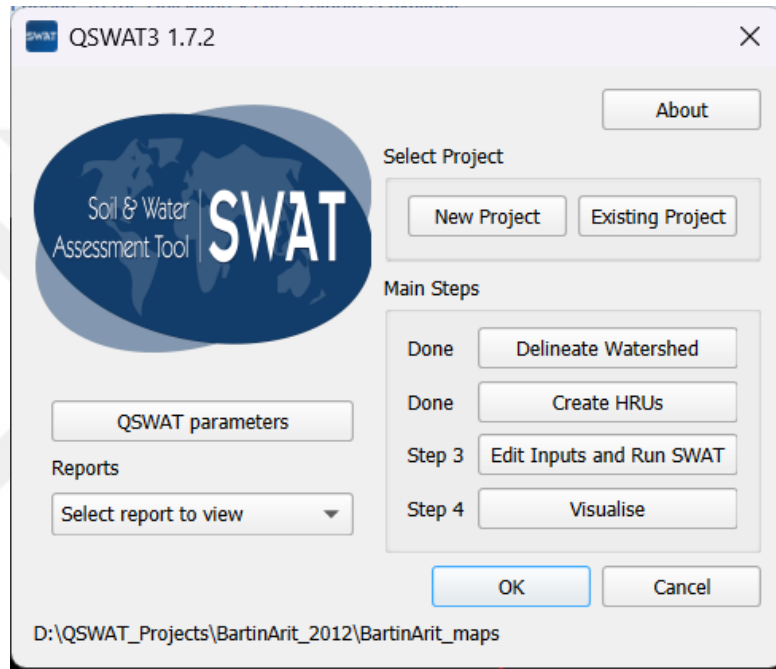
Veri kümesi	Kaynak/Kurum	Çözünürlük / zaman adımı	Ön-işleme (özet)
DEM_final.tif	USGS SRTM (EarthExplorer)	25 m	Mozaik → EPSG:32636 → NoData (−9999) → havzaya kırpma → grid hizalama (DEM referans)
LULC_final.tif	Copernicus CORINE (LULC)	100 m (25 m grid'e uyarlanmış)	CRS dönüşümü → havzaya kırpma → sınıf kodlama/lookup → 25 m raster (DEM'e snap)

Toprak_final.tif	Projede kullanılan toprak haritası (ulusal ve/veya FAO DSMW/HWSD tabanlı)	Vektör → 25 m raster	CRS dönüşümü → havzaya kırpma → SOIL_CODE tanımı → 25 m raster (DEM'e snap) → soil_lookup ve usersoil eşlemesi
İklim (PCP/TMP)	MGM istasyonları (ana istasyon) + komşu istasyon (seçici tamamlama)	Günlük	Takvim/birim kontrolü → eksik/şüpheli yağış dönemlerinin seçici tamamlanması → SWAT formatı → QSWAT istasyon ataması
WGEN_Bartin	İstasyon istatistiklerinden türetilen WGEN tablosu	WGEN parametre tablosu	Şema/alan adları kontrolü → Access'e aktarma → SWAT Editor "Weather Data Definition" ile tanımlama
Gözlem akımı (Q_obs)	DSİ – Darıören AGİ	Aylık ortalama (m ³ /s)	Zaman/birim kontrolü → eksik ay taraması → alan oranı düzeltmesi (×0.95) → SWAT-CUP formatı

3.3 QSWAT Model Kurulumu ve Uygulaması

Bu çalışmada havza ölçekli hidrolojik model kurulumu, QGIS yazılımı üzerinde çalışan QSWAT eklentisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sayısal yükseklik modeli (DEM) üzerinden drenaj ağı, akış yönü ve akış birikimi türetilmiş, havza sınırı ve alt havza ayrımı, gözlem istasyonu (çıkış noktası) referans alınarak tanımlanmıştır. Ardından arazi kullanımı/arazi örtüsü ve toprak verileri modele entegre edilerek hidrojik tepkinin mekansal olarak temsil edilebilmesi amacıyla alt havzalar içinde HRU (Hydrologic Response Unit) birimleri oluşturulmuştur.

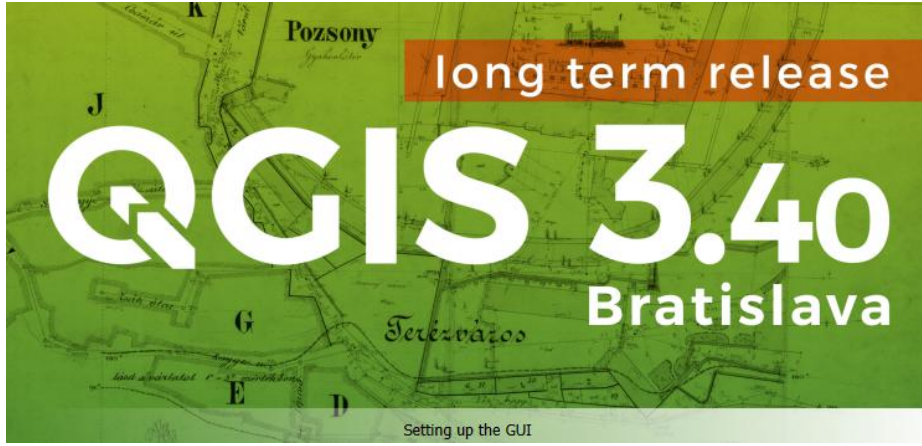
Model girdileri kapsamında meteorolojik veriler (yağış, sıcaklık ve varsa diğer iklim değişkenleri) ilgili istasyonlardan derlenmiş ve simülasyon dönemine uygun biçimde QSWAT üzerinden tanımlanmıştır. Kurulum sonrası model, seçilen başlangıç (ısınma) dönemi ile birlikte çalıştırılmış, çıktılar, akım kalibrasyonu/doğrulaması ve belirsizlik analizi için SWAT-CUP (SUFI-2) ortamına aktarılacak şekilde hazırlanmıştır. Bu bölümdeki amaç, kullanılan yazılım zincirini, veri akışını ve model kurulumunun hangi adımlar üzerinden gerçekleştirildiğini açık, izlenebilir ve tekrarlanabilir biçimde ortaya koymaktır.



Şekil 3.8: QSWAT3 arayüzünün açılış ekranı (sürüm 1.7.2). Proje oluşturma, alt havza çıkarımı (delineation) ve HRU tanımı için ilk adımlar.

3.3.1 Proje Ortamı ve Veri Entegrasyonu

Bu çalışmada veri hazırlama, havza sınırlandırma (delineation) ve HRU üretimi adımları QGIS (3.4) ortamında QSWAT eklentisi kullanılarak yürütülmüştür. Kurulum sürecinin izlenebilir ve yeniden üretilebilir olması için proje klasör yapısı standartlaştırılmış, kullanılan girdi verilerinin kaynak bilgileri ile ön işleme adımları düzenli olarak kayıt altına alınmıştır. QSWAT, SWAT2012 model motorunun kullandığı TxtInOut giriş dizinini otomatik olarak oluşturduğundan, bu aşamadaki veri entegrasyonunun hatasız yapılması model sonuçlarının güvenilirliği için temel bir koşuldur.



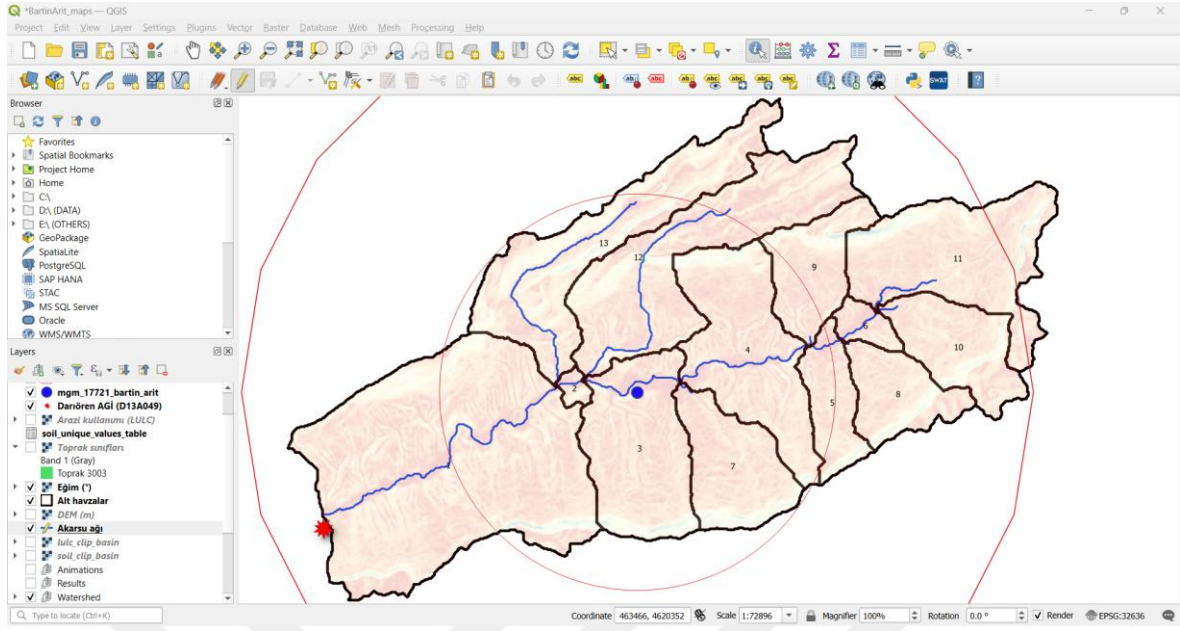
Şekil 3.9: QGIS 3.40 (LTR)

Proje koordinat sistemi EPSG:32636 (WGS84 / UTM Zone 36N) olarak belirlenmiş ve tüm raster veri katmanları bu koordinat sistemine dönüştürülmüştür. QSWAT projesine DEM_final.tif, LandUse_final.tif ve Soil_final.tif katmanları yüklenmiştir. Alt havza sınırlarının ve HRU üretiminin doğru çalışması için raster katmanların aynı projeksiyonda, aynı piksel boyutunda ve aynı grid hizasında olması gerekir (DEM referans alınarak). Bu nedenle veri entegrasyonu sırasında (i) kapsama alanı (havza içi NoData kontrolü), (ii) piksel hizası ve çözünürlük uyumluluğu, (iii) NoData değerleri ile raster özellikleri (birimler, veri tipi) kontrol edilmiştir.

Arazi kullanımı ve toprak katmanları için SWAT kod eşleştirmeleri (lookup tabloları) proje veritabanına tanıtılmıştır. Böylece QSWAT, HRU üretimi sırasında arazi kullanımı ve toprak sınıflarını SWAT2012 veri tabanı ile tutarlı biçimde yorumlayabilmiştir. Dariören AGİ'nin konumu nokta katmanı olarak projeye eklenmiş ve çıkış noktasının akarsu ağı üzerinde doğru konumlandırıldığı (snap) kontrol edilmiştir. Bu adımlar tamamlandıktan sonra proje, havza sınırlandırma ve HRU üretimi işlemlerine geçilecek duruma getirilmiştir (Şekil 3.7).

Veri entegrasyonu QGIS ortamında yürütülmüştür. Öncelikle:

- DEM_final.tif,
- LandUse_final.tif,
- Soil_final.tif



Şekil 3.10: QGIS ortamında QSWAT arayüzü: proje oluşturma, havza sınırlandırma (delineation) ve HRU üretimi için temel modüller.

3.3.2 Havza Sınırlarının Belirlenmesi

Çalışma alanının havza sınırları, akarsu ağı ve alt havzaları QGIS ortamında QSWAT3 eklentisinin "Delineate Watershed" modülü kullanılarak sayısal yükseklik modeli (DEM) üzerinden türetilmiştir. Bu aşamada DEM üzerinde çukur doldurma (sink filling) işlemi uygulanmış, ardından akış yönü (flow direction) ve akış birikimi (flow accumulation) rasterları üretilmiştir. Akarsu ağı, harici bir akarsu vektör verisi kullanılmadan, akış birikimi rasterı üzerinde tanımlanan eşik alan yaklaşımı ile otomatik olarak oluşturulmuştur.

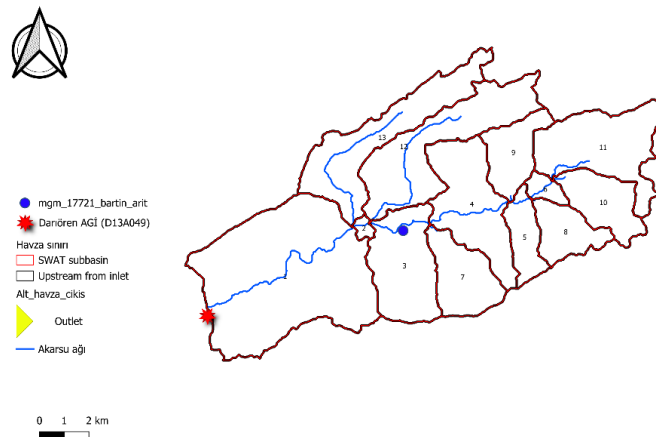
Akarsu tanımlama eşiği (stream definition threshold), havzanın büyüklüğü (yaklaşık 130 km²) ve hedeflenen akarsu ağı yoğunluğu dikkate alınarak denemelerle belirlenmiş ve yaklaşık 20 km² (yaklaşık $2,0 \times 10^7$ m²) olarak seçilmiştir. Bu eşik değeri ile Arıt Çayı alt havzası 13 alt havzaya ayrılmış ve model içinde 13 adet akarsu kesiti (reach) tanımlanmıştır (Şekil 3.8). Eşik değerinin daha düşük seçilmesi akarsu ağının gereksiz biçimde yoğunlaşmasına ve alt havza sayısının artmasına neden olabilmektedir. Daha yüksek seçilmesi ise ana drenajın yeterince temsil edilememesi riskini doğurmaktadır. Bu nedenle seçilen değer, havza ölçeği için uygun bir denge sağlamıştır.

Model çıkış noktası, kalibrasyon ve doğrulamada kullanılan gözlemsel akım verisini temsil eden Dariören Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) konumunda tanımlanmıştır. Çıkış noktası QSWAT tarafından üretilen akarsu ağı üzerine "snap" edilerek geometrik tutarlılık sağlanmış ve Dariören istasyonunu temsil eden kesit modelde Reach 1 olarak belirlenmiştir. Delineation sonrasında (i) üretilen havza sınırı ve akarsu ağının topografya ile görsel uyumu, (ii) model drenaj alanının DSİ tarafından bildirilen istasyon drenaj alanı ile uyumu kontrol edilmiştir. Model drenaj alanı yaklaşık 130 km², istasyon drenaj alanı ise yaklaşık 137 km² olduğundan, gözlem ve model akımlarının karşılaştırılmasında alan uyumunu sağlamak için ölçekleme yaklaşımı uygulanmıştır (Bkz. 3.2.5).

Delineation çıktıları içinde özellikle iki kontrol yapılmıştır:

(i) Üretilen alt havza ve akarsu ağının topografya ile görsel uyumu (ana vadi çizgilerinin takip edilmesi ve akış yönlerinin tutarlılığı).

(ii) Çıkış alanının (model drenaj alanı) büyüklüğünün, Dariören AGİ için bildirilen drenaj alanı ile karşılaştırılabilir olması. Bu çalışmada model çıkış alanı yaklaşık 130 km², istasyon drenaj alanı yaklaşık 137 km² olup aradaki fark ~%5 mertebesinde. Bu farkın model-gözlem karşılaştırmalarını sistematik olarak etkilememesi için gözlem debisinin alan oranı ile ölçeklenmesi yöntemi çalışmanın gözlem-veri hazırlığı kısmında tanımlanmıştır (Bkz. 3.2.5).



Şekil 3.11: QSWAT delineation çıktısı: havza sınırı, alt havzalar ve akarsu ağı, Dariören AGİ'nin temsil edildiği çıkış kesiti.

Tablo 3.5: Havza sınırlandırma ayarları ve temel çıktılar (QSWAT – SWAT2012)

Özellik	Değer / Açıklama
DEM çözünürlüğü	~25 m (SRTM tabanlı)
Projeksiyon	EPSG:32636 (WGS84 / UTM Zone 36N)
Akarsu tanımlama yaklaşımı	DEM tabanlı drenaj ağı (harici akarsu ağı kullanılmadan)
Akarsu tanımlama eşiği	Havza büyüklüğü ve akarsu yoğunluğu dikkate alınarak seçilmiştir (<i>eşik değeri model karmaşıklığını kontrol eder</i>)
Outlet (çıkış noktası)	Darıören AGİ (akarsu ağı üzerinde snap edilerek tanımlanmıştır)
Reach sayısı	13
Model çıkış drenaj alanı	≈130 km ²
İstasyon drenaj alanı (DSİ)	≈137 km ²
Alan uyumu yaklaşımı	Gözlem debisi 130/137 ≈ 0.95 ile ölçeklendirilerek karşılaştırma alanları uyumlaştırılmıştır

3.3.1 HRU Tanımı ve Eşikler (SWAT2012/QSWAT)

Havza sınırlandırma işlemi tamamlandıktan sonra, alt havzalar içindeki hidrolojik tepki birimleri (Hydrologic Response Unit, HRU) QSWAT3 arayüzündeki "Create HRUs" modülü ile oluşturulmuştur. SWAT2012’de hidrolojik süreç hesaplamaları HRU ölçeğinde yürütüldüğü için bu çalışmada temel mekansal hesaplama birimi HRU olarak alınmıştır. HRU’lar, her alt havzada arazi kullanımı ve örtüsü (LULC), toprak ve eğim katmanlarının çakıştırılmasıyla tanımlanmıştır.

Model karmaşıklığını kontrol altında tutmak ve çok küçük alan kaplayan sınıfların HRU sayısını gereksiz biçimde artırmasını önlemek amacıyla eşikleme yapılmıştır. Arazi kullanımı ve toprak için yüzde 5, eğim için yüzde 10 eşik değerleri seçilmiştir (Tablo 3.5). Buna göre, bir alt havza içinde alan payı eşiklerin altında kalan LULC veya toprak sınıfları, baskın sınıflarla birleştirilerek temsil edilmiştir. Eğim sınıfları, DEM’den türetilen eğim

rasteri kullanılarak 0-5%, 5-10%, 10-20% ve 20% üzeri olacak şekilde dört sınıfta tanımlanmıştır (Şekil 3.11). Bu eşikleme ve sınıflandırma sonucunda modelde toplam 68 adet HRU elde edilmiştir.

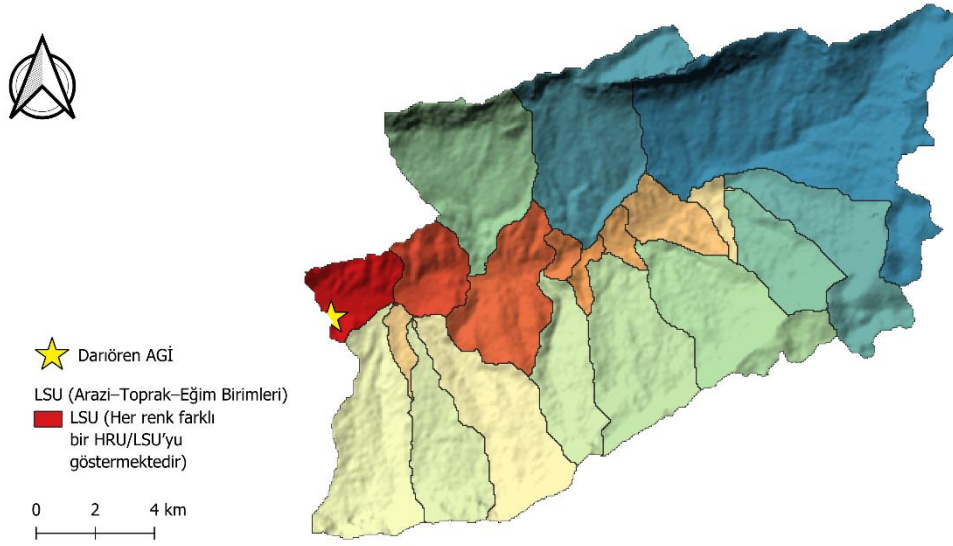
Tablo 3.6: Landuse dağılımı (HRU sonrası)

Landuse	Alan (ha)	%Watershed
FRSD	6771.96	52.05
AGRL	5261.67	40.44
FRST	572.32	4.40
FRSE	365.73	2.81
RNGB	38.08	0.29

Nihai HRU dağılımı Şekil 3.9’da sunulmuştur. Seçilen eşik değerleri, havzanın topografik ve pedolojik heterojenliğini temsil etmeyi sürdürürken, kalibrasyon aşamasında parametre uzayı ve hesaplama yükünün yönetilebilir kalmasına katkı sağlamıştır.

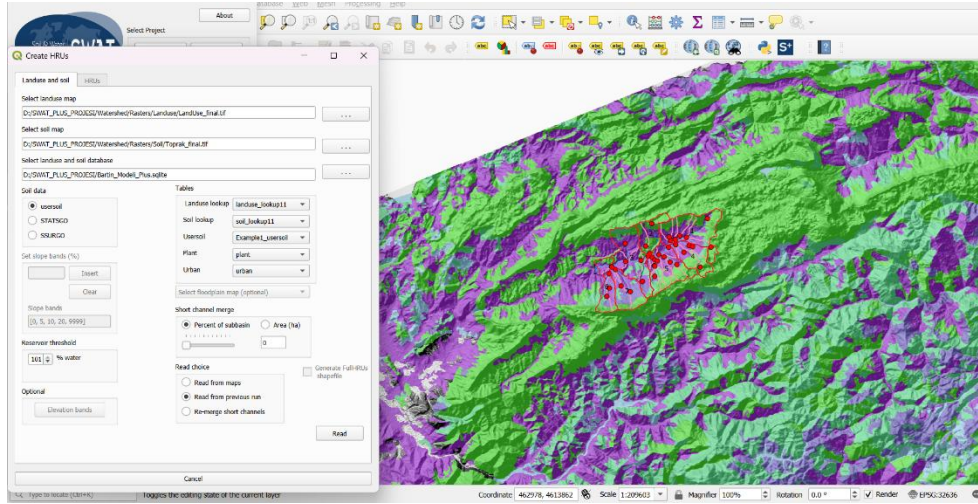
Tablo 3.7: HRU eşik değerleri ve sınıflandırma ayarları

Öge	Değer / Açıklama
Arazi kullanımı (landuse) eşiği	%5
Toprak (soil) eşiği	%5
Eğim (slope) eşiği	%10
Eğim bantları	0–5, 5–10, 10–20, >20 (%)
Oluşan HRU sayısı	68



Arazi kullanımı, toprak ve eğim eşik değerleri (%5 – %5 – %10) kullanılarak oluşturulan nihai HRU/LSU dağılımı. Her renk farklı bir HRU/LSU'yu göstermektedir. Projeksiyon: EPSG:32636 (UTM 36N)

Şekil 3.12: Nihai HRU/LSU dağılımı (%5–%5–%10 eşiklerine göre).

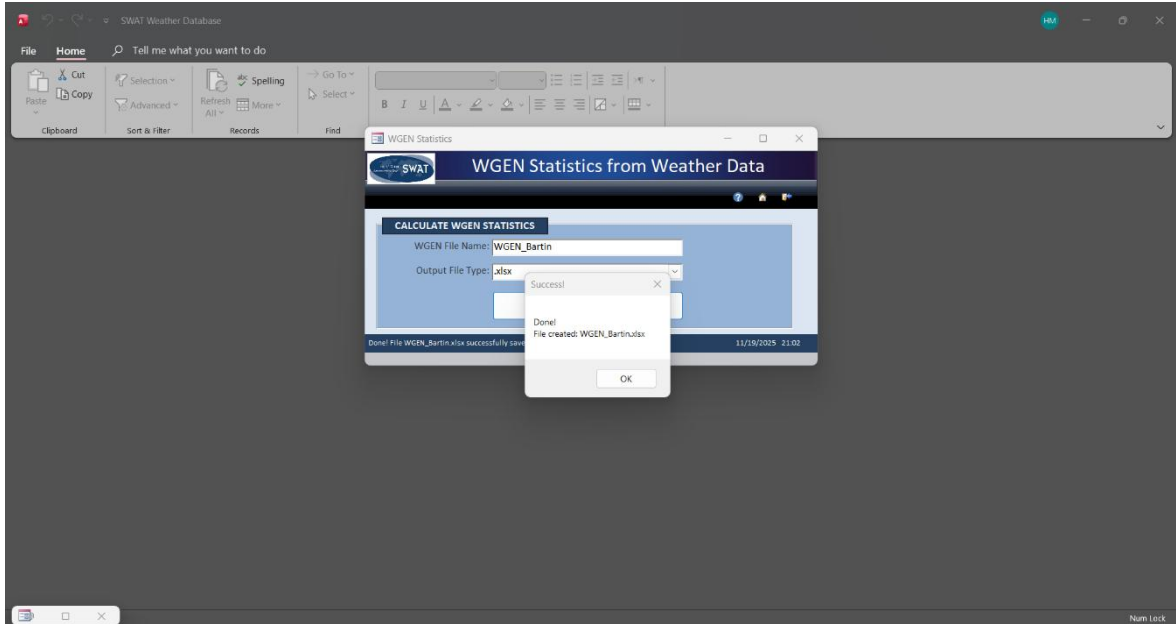


Şekil 3.13: Qswat arayüzünde HRU dağılımı (%5–%5–%10 eşik değerlerine göre)

3.3.2 İklim Dosyalarının Tanıtılması

Meteorolojik girdiler, 3.2.4 kapsamında hazırlanan günlük yağış (PCP) ile günlük maksimum ve minimum sıcaklık (TMPmax ve TMPmin) serilerinden oluşturulmuştur. İklim dosyaları QSWAT3 arayüzündeki "Weather Data / Climate Data" modülü üzerinden projeye tanıtılmıştır. Her meteoroloji istasyonunun koordinatları girilmiş ve alt havzalar ile istasyonlar arasında mekansal eşleme yapılmıştır. QSWAT3, her alt havza için en yakın istasyonu otomatik olarak atayarak yağış ve sıcaklık girdilerini alt havzalara uzamsal olarak dağıtmıştır.

Potansiyel buharlaşma ve terleme (PET) hesabında Penman-Monteith yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, güneşlenme veya ışıınım, bağıl nem ve rüzgar hızı gibi ek meteorolojik değişkenlere ihtiyaç duyar. Çalışma alanında bu değişkenlere ait gözlemsel kayıtlar bulunmadığı için SWAT2012'nin hava durumu üreticisi modülü (WXGEN) kullanılarak eksik değişkenler bölgeye ait uzun dönem iklim istatistiklerine dayalı şekilde üretilmiştir. Bu kapsamda WGEN istatistikleri hazırlanmış ve modelin TxtInOut çalışma klasöründe kullanılan .wgn dosyası oluşturulmuştur.



Şekil 3.14: SWAT Weather Database’de WGEN Statistics aracıyla Bartın iklim verilerinden WGEN_Bartin.xlsx (Weather Generator) istatistik dosyasının oluşturulması.

İklim girdileri tanıtıldıktan sonra QSWAT3, meteorolojik dosyaları SWAT2012 çalışma klasörüne (TxtInOut) aktararak model kontrol dosyalarını güncellemiştir. Simülasyon penceresi 01/2010-12/2023 olarak tanımlanmış, 2010-2011 dönemi model ısınma (warm-up) süresi olarak ayrılmıştır. Kurulumun doğrulanması amacıyla deneme koşusu alınarak meteorolojik girdilerin model tarafından hatasız okunduğu ve aylık çıktılarının üretildiği kontrol edilmiştir.

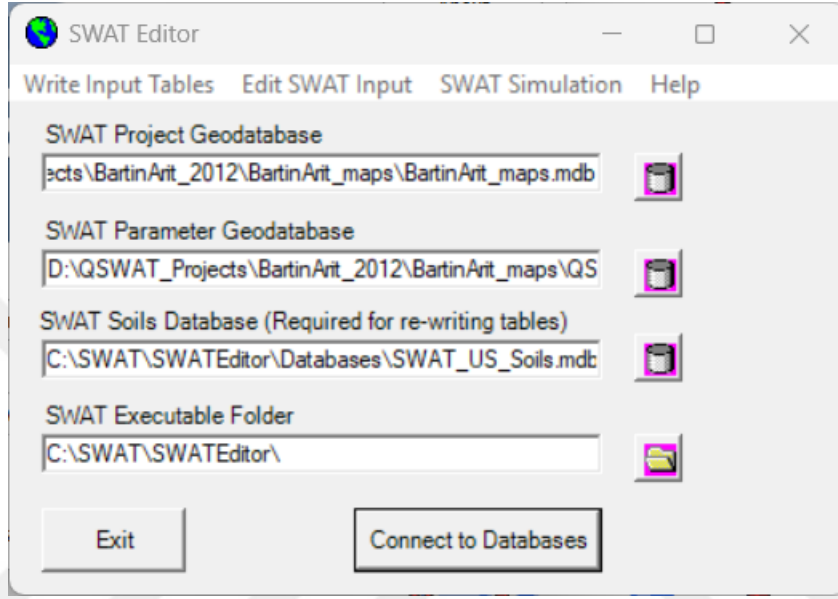
Tablo 3.8: Gözlem istasyonları meta verisi (DSİ ve MGM)

İstasyon Kodu/Adı	Tür	Enlem (°)	Boylam (°)	Rakım (m)	Kayıt Aralığı (modelde kullanılan)	Modelde Kullanımı
DSİ D13A049 – Dariören	Akım (Qobs)	41.6558 33	32.5205 56	≈230 (metadada, DEM ile kontrol edildi)	Aylık (kalibrasyon/validasyon penceresi)	Çıkış kesiti: Reach 1 (SWAT CUP: FLOW_OUT_1), 130/137 ≈ 0.95 ile Qobs ölçeklenerek karşılaştırıldı.
MGM ARIT_MGM (17721)	Yağış (PCP)	41.6872	32.6156	≈354 (metadada, DEM ile kontrol edildi)	Günlük 2010–2023	QSWAT'ta alt havzalara atanan günlük yağış girdisi, R ² istasyonla desteklendi.
MGM ARIT_MGM (17721)	Sıcaklık (TMPmax/TMPmin)	41.6872	32.6156	≈354 (metadada, DEM ile kontrol edildi)	Günlük 2010–2023	QSWAT'ta alt havzalara atanan günlük Tmax–Tmin, kar süreçleri ve PET için temel değişken.

3.3.3 Simülasyon Zaman Ayarları ve Çalıştırma

Hidrolojik simülasyonlar SWAT2012 model motoru ile günlük zaman adımında yürütülmüştür. Simülasyon takvimi 01.01.2010-31.12.2023 dönemini kapsayacak şekilde

tanımlanmıştır. Modelin başlangıç koşullarından kaynaklanan etkileri azaltmak ve toprak suyu ile yeraltı suyu depolarının kararlı bir rejime yaklaşmasını sağlamak amacıyla 2010-2011 dönemi ısınma dönemi (warm-up) olarak ayrılmıştır. Bu nedenle model performansının raporlandığı kalibrasyon ve doğrulama değerlendirmeleri ısınma dönemini izleyen yıllar için, yani 2012 ve sonrasında yürütülmüştür.

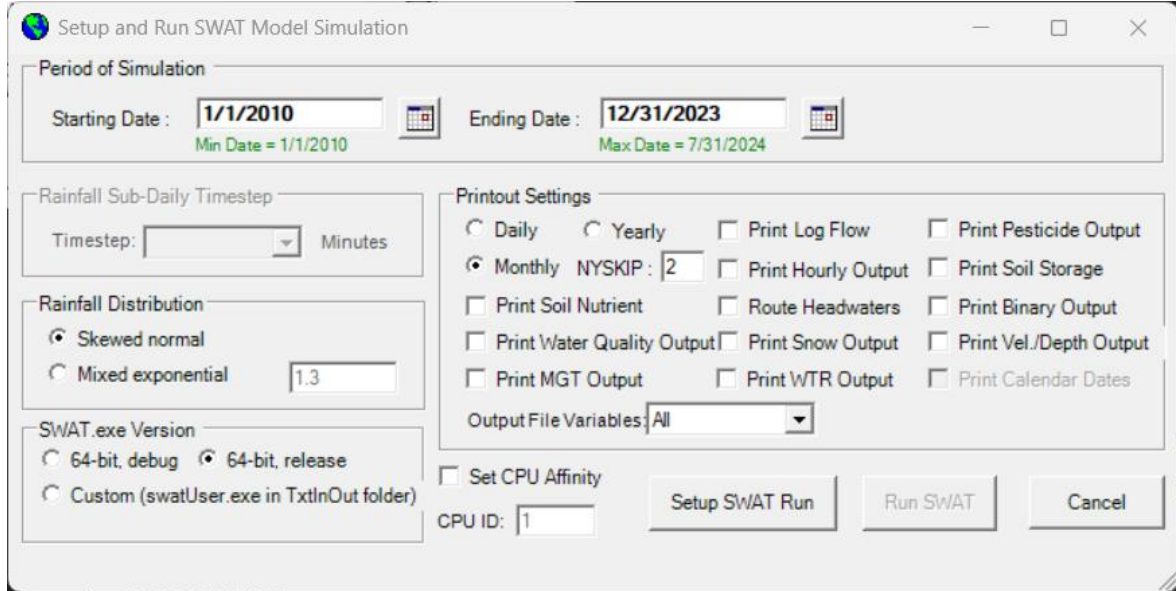


Şekil 3.15: SWAT Editor’de veritabanı bağlantı ayarları

Model günlük zaman adımında çalıştırılmış olsa da, gözlem verileriyle tutarlı karşılaştırma ve kalibrasyon-doğrulama adımlarını sağlıklı yürütmek için çıktıların değerlendirme ölçeği aylık olarak seçilmiştir. Havza çıkışı temsil eden kesitteki akım, output.rch dosyasında yer alan ilgili akım değişkeni (örneğin FLOW_OUTcms) kullanılarak aylık ortalama debi (m^3/s) olarak elde edilmiştir. Alt havza ve HRU düzeyindeki su bütçesi bileşenleri ise output.sub ve output.hru çıktı tablolarından alınmıştır. Böylece günlük süreç temsili korunurken, değerlendirme için doğrudan karşılaştırılabilir aylık bir çıktı seti oluşturulmuştur.

Model çalıştırılmadan önce iklim girdilerinin (PCP ve TMP) tarih sürekliliği, birim tutarlılığı ve dosya biçimi kontrol edilmiştir. SWAT’ın gerektirdiği ek meteorolojik değişkenlerin istasyon bazında eksik olduğu durumlarda, bu bileşenlerin WXGEN üzerinden üretilmesi için gerekli tanımlar SWAT Editor içinde etkinleştirilmiştir. Çalışma sürecinde TxtInOut klasöründe giriş dosyalarının eksiksiz üretildiği, simülasyonun hatasız

tamamlandığı ve standart çıktı dosyalarının, özellikle output.rch dosyasının, beklenen tarih aralığında oluştuğu kontrol edilmiştir.



Şekil 3.16: SWAT model simülasyon ayarları: 01/01/2010–31/12/2023 dönemi, Monthly çıktı seçimi ve warm-up için NYSKIP=2 (SWAT Run Setup penceresi)

Model koşusu tamamlandıktan sonra, gözlem istasyonunu temsil eden çıkış kesitinin doğru tanımlandığını teyit etmek için reach kimliği ile çıkış noktası eşleşmesi kontrol edilmiştir. Ardından aylık debi serisi hızlı bir tutarlılık taramasından geçirilmiş, sürekli sıfır akım ya da fiziksel olarak gerçekçi olmayan ani sıçramalar gibi durumların bulunup bulunmadığı incelenmiştir. Bu temel kontroller, SWAT-CUP (SUFI-2) ile yürütülecek kalibrasyon ve validasyon analizleri için simülasyon çıktılarının aynı zaman ölçeğinde ve aynı temsil noktasında güvenilir biçimde hazırlandığını göstermektedir.

3.4 Kalibrasyon ve Validasyon

Bu çalışmada modelin kalibrasyonu ve doğrulanması, SWAT2012 çıktılarının gözlemsel akım verileriyle uyumunu artırmak ve parametre belirsizliğini nicel olarak değerlendirmek amacıyla SWAT-CUP yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Otomatik kalibrasyon için SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) yöntemi tercih edilmiştir. SUFI-2, seçilen parametreler için başlangıç aralıklarını tanımlar, bu aralıklar içinde çoklu simülasyonlar üretir ve her yinelemede parametre aralıklarını gözlemlerle uyumu iyileştirecek şekilde günceller.

Böylece model uyumu, 95PPU belirsizlik bandı ile birlikte değerlendirilerek sonuçların belirsizlik yapısı da raporlanabilir hale gelir.

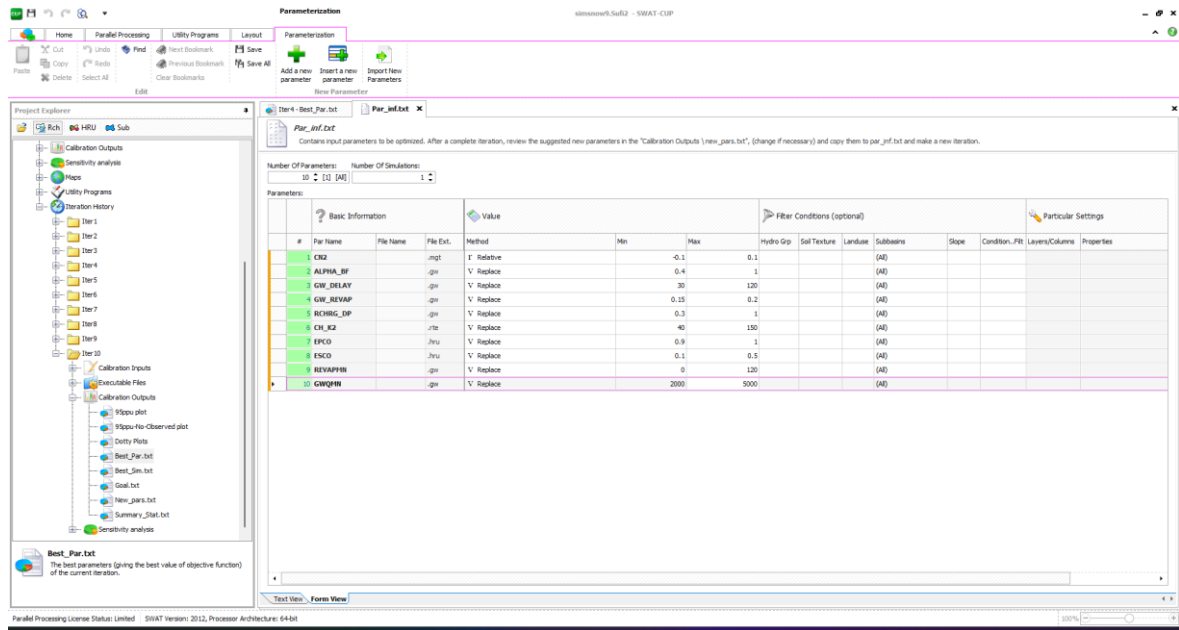
Kalibrasyon ve validasyon analizlerinin temelini oluşturan SWAT2012 model koşusu, 01.01.2010-31.12.2023 dönemini kapsayacak şekilde günlük zaman adımıyla çalıştırılmıştır. Başlangıç koşullarından kaynaklanabilecek etkileri azaltmak ve toprak suyu ile yeraltı suyu depolarının daha kararlı bir düzeye oturmasını sağlamak için 2010-2011 dönemi (24 ay) ısınma (warm-up) dönemi olarak ayrılmıştır. Model çıktılarının gözlemlerle doğrudan karşılaştırılabilmesi için SWAT-CUP ortamında aylık zaman ölçeği kullanılmıştır.

Havza çıkışındaki aylık ortalama debi, SWAT-CUP içinde havza çıkışındaki akımı temsil eden FLOW_OUT_1 değişkeni ile temsil edilmiştir. Çıkış kesiti, QSWAT havza sınırlandırması sonrası oluşan akış ağı üzerinde Darıören AGİ'yi temsil edecek şekilde Reach 1 olarak doğrulanmış, output.rch dosyasında bu çıkış kesiti için raporlanan seri FLOW_OUTcms ve FLOW_OUT değişkenlerinden türetilmiştir.

Gözlemsel akım verileri, DSİ Darıören Akım Gözlem İstasyonu'na ait aylık ortalama debiler (m^3/s) olarak derlenmiş ve standart bir formata getirilmiştir. Zaman penceresi, model çıktısı ile gözlemsel verinin ortak kapsama alanına göre iki ayrı değerlendirme bloğu halinde tanımlanmıştır. Bu kapsamda kalibrasyon dönemi 2012-2018, validasyon dönemi ise 2019-2023 olarak belirlenmiştir. SWAT-CUP uygulaması için her dönem ayrı bir blok olacak şekilde, aylık zaman damgası ile debi değerini birlikte içeren tek değişkenli bir giriş dosyası (tarih + Qobs) hazırlanmış ve performans ölçütlerinin dönem bazında tutarlı şekilde hesaplanması sağlanmıştır.

Model ve gözlem karşılaştırmasının fiziksel olarak anlamlı kalması için, çıkış kesitinin temsil ettiği drenaj alanı ile DSİ tarafından raporlanan istasyon drenaj alanı arasındaki küçük farkın sonuçları sistematik biçimde saptırmaması amaçlanmıştır. Bu nedenle gözlemsel debiler alan oranı yaklaşımıyla tek bir katsayı kullanılarak ölçeklenmiştir. Düzeltme, $Q_{obs}(düzeltmiş) = Q_{obs} * A(model) / A(DSİ)$ şeklinde uygulanmıştır. Böylece performans ölçütlerinin yalnızca drenaj alanı tanım farkından etkilenmesi azaltılmış, parametre ayarlarının hidrograf üzerindeki gerçek etkisinin daha sağlıklı yorumlanması mümkün hale gelmiştir.

Kalibrasyon ve validasyon performansı aylık ölçekte raporlanmıştır. Değerlendirmede NSE, KGE, PBIAS, R^2 ve hata büyüklüğünü temsil eden ölçütler birlikte kullanılmıştır. Ayrıca SUFI-2 belirsizlik değerlendirmesinde p-factor (gözlemlerin 95PPU bandı içinde yakalanma oranı) ve r-factor (band genişliği) göstergeleri izlenmiştir. Bu sayede yalnızca uyum düzeyi değil, aynı zamanda model belirsizliğinin büyüklüğü de birlikte değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, hidrograf uyumu ile parametre belirsizliğini aynı çerçevede ele alan ve tekrarlanabilir bir kalibrasyon-validasyon süreci sağlamıştır.



Şekil 3.17: SWAT-CUP (SUFI-2) arayüzünde aylık akım (FLOW_OUT_1) için kalibrasyon ve validasyon kurulumunun genel görünümü (warm-up: 2010–2011, kalibrasyon: 2012–2018, validasyon: 2019–2023).

3.4.1 Kalibrasyon Stratejisi ve Parametreler

Modelin gözlenen akım serisini daha iyi temsil edebilmesi ve parametre belirsizliğinin nicel olarak değerlendirilebilmesi için otomatik kalibrasyon SWAT-CUP yazılımında SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting ver.2) algoritması ile yürütülmüştür. Kalibrasyon, Darıören Akım Gözlem İstasyonu çıkışı temsil eden aylık akım serisi (FLOW_OUT) üzerinden yapılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe Etkinlik katsayısı (NSE) esas alınmış, performans değerlendirmesinde NSE'ye ek olarak R^2 , KGE, RSR ve PBIAS ölçütleri de birlikte dikkate alınmıştır.

SWAT2012 modeli 2010-2023 dönemi için günlük zaman adımında çalıştırılmıştır. Başlangıç koşullarından kaynaklanan etkileri azaltmak amacıyla 2010-2011 yılları ısınma dönemi olarak ayrılmış ve değerlendirme dışında bırakılmıştır. Kalibrasyon ve doğrulama dönemleri, veri sürekliliği ve hidrolojik temsiliyet göz önüne alınarak 2012-2018 (kalibrasyon) ve 2019-2023 (validasyon) olarak belirlenmiştir.

Kalibrasyon ve validasyon karşılaştırmaları, DSİ tarafından sağlanan Dariören istasyonuna ait aylık ortalama debiler (m^3/s) kullanılarak yapılmıştır. Modelin DEM tabanlı drenaj alanı yaklaşık 130 km^2 olup istasyonun resmi drenaj alanı 137 km^2 'dir. Bu yaklaşık yüzde 5'lik farkın karşılaştırmaları sistematik olarak saptırmaması için gözlem debileri alan oranı yaklaşımıyla $130/137 (= 0.95)$ katsayısı ile ölçeklendirilmiş ve model çıkışlarıyla karşılaştırılmıştır.

SWAT-CUP projesi, SWAT2012 modelinin TxtInOut çalışma klasörü esas alınarak kurulmuştur. Kalibrasyon değişkeni olarak output.rch dosyasında ilgili çıkış kesitini (reach) temsil eden FLOW_OUT serisi seçilmiştir. Bu kurulum ile SWAT-CUP her iterasyonda ürettiği parametre setiyle SWAT2012'yi çalıştırmış, hesaplanan akım serisini gözlemlerle karşılaştırarak performans istatistiklerini üretmiştir.

Kalibrasyona alınan parametreler, havzanın hidrolojik davranışını kontrol eden süreçleri temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Yüzey akışını etkileyen CN2, yeraltı suyu ve baz akım dinamiklerini temsil eden ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN ve RCHRG_DP, toprak buharlaşması ve bitki su alımını düzenleyen ESCO ve EPCO ile kanal-akarsu etkileşiminde iletim kayıplarını ve sızmayı temsil eden CH_K2 bu kapsamda değerlendirilmiştir.

SWAT-CUP içinde parametre güncellemeleri iki şekilde tanımlanır. r ön eki, parametrenin başlangıç değerine göre oransal (görelî) olarak değiştirilmesini ifade eder. v ön eki ise parametrenin mutlak bir değere ayarlanmasını ifade eder. Parametre aralıkları literatürde önerilen fiziksel sınırlar ve ön denemeler dikkate alınarak başlangıçta geniş tutulmuş, SUFI-2 iterasyonları ilerledikçe kontrollü biçimde daraltılmıştır.

SUFI-2 yaklaşımında her iterasyon sonunda %95 tahmin belirsizliği bandı (95PPU) hesaplanır. Bu çalışmada parametre aralıkları güncellenirken amaç fonksiyonu (özellikle NSE) ile birlikte belirsizlik ölçütleri (p-factor ve r-factor) birlikte değerlendirilmiştir. p-factor, gözlemsel verilerin 95PPU bandı içinde kalan oranını; r-factor ise 95PPU bandının ortalama genişliğinin gözlem serisinin standart sapmasına göre normalize edilmiş değerini temsil eder. Performans artışının marjinal hale geldiği ve parametre aralıklarının iterasyonlar arasında anlamlı değişim göstermediği aşamada kalibrasyon sonlandırılmış; elde edilen en iyi parametre seti değiştirilmeden validasyon döneminde ek ayarlama yapılmadan test edilmiştir.

Kalibrasyon sürecinde parametre seçimi, havza akım rejimini belirleyen baskın süreçlere odaklanacak şekilde yapılmıştır. Bu kapsamda yüzey akışı-sızma paylaşımı, yeraltı suyu depolaması ve taban akımı dinamiği, kanal iletimi/sızma kayıpları ile buharlaşma-terleme ve bitki su alımı süreçlerini temsil eden parametreler önceliklendirilmiştir. İlk aşamada CN2 ile birlikte SOL_AWC ve SURLAG gibi parametreler de değerlendirmeye alınmış; ancak duyarlılık değerlendirmelerinde etkisi sınırlı kalan parametrelerin aralıkları sonraki iterasyonlarda daraltılmış veya sabitlenmiştir.

SWAT-CUP'ta parametre tanımlarında kullanılan ön ekler, parametrenin modele nasıl uygulanacağını belirtir. r__ ön eki, parametrenin başlangıç değerine göre oransal (nispi) olarak değiştirilmesini; v__ ön eki ise parametrenin belirli bir mutlak değere (replace) ayarlanmasını ifade eder. Örneğin r__CN2.mgt = -0.05475 ifadesi, mevcut CN2 değerlerine yaklaşık %5,5 oranında azaltım uygulanması anlamına gelir. Parametrelerin beklenen şekilde uygulanıp uygulanmadığı kısa test koşulları ile kontrol edilmiştir.

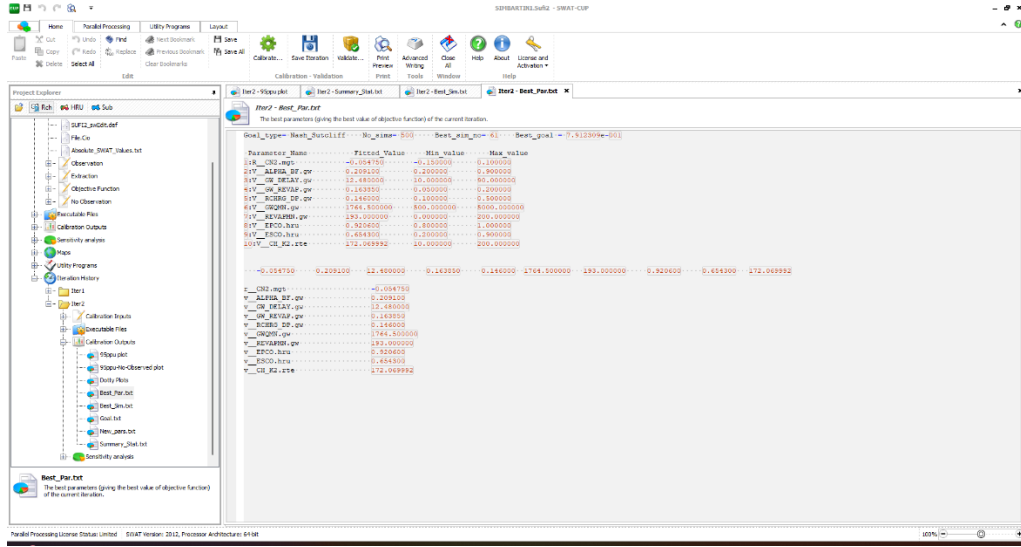
Tablo 3.9: SWAT-CUP (SUFI-2) kalibrasyonunda kullanılan parametrelerin tanımı ve akıma beklenen etkisi

Parametre (SWAT-CUP kodu)	Değişim tipi	Birim	Temsil ettiği süreç	Beklenen yönlü etki (akım tepkisi)
r__CN2.mgt	r__ (nispi)	—	Yüzey akışı üretimi (SCS-CN)	CN2 ↑ → Q_surf ↑ (pikler keskinleşir), CN2 ↓ → sızma ↑ (pikler yumuşar)
v__ALPHA_BF.gw	v__ (replace)	1/gün	Taban akımı resesyonu (yeraltı suyu tepkisi)	↑ → resesyon hızlanır, ↓ → taban akımı daha kalıcı

v__GW_DELAY.gw	v__ (replace)	gün	Yeraltı suyu gecikme süresi	↑ → taban akımı daha geç, ↓ → daha erken katkı
v__GW_REVAP.gw	v__ (replace)	—	Sığ akifer revap katsayısı (akifer → kök bölgesi)	↑ → revap ↑, taban akımı azalabilir, ↓ → taban akımı artabilir
v__RCHRG_DP.gw	v__ (replace)	—	Derin akifere sızma oranı (şarj paylaşımı)	↑ → derin akifere kaçış ↑, sığ akifer taban akımı azalabilir
v__GWQMN.gw	v__ (replace)	mm	Taban akımı için eşik su seviyesi	↑ → taban akımı geç/az, ↓ → taban akımı daha kolay başlar
v__REVAPMN.gw	v__ (replace)	mm	Revap için eşik su seviyesi	↑ → revap zorlaşır, taban akımı artabilir, ↓ → revap kolaylaşır
v__EPCO.hru	v__ (replace)	—	Bitki su alımı telafi faktörü	↑ (1'e yaklaşır) → alt katmanlardan su alımı ↑, ET artabilir
v__ESCO.hru	v__ (replace)	—	Toprak buharlaşma telafi faktörü	↑ → buharlaşma üst katmanla sınırlı, ↓ → derinden telafi ↑
v__CH_K2.rte	v__ (replace)	mm/saat	Kanal yatağı iletkenliği/kayıpları	↑ → kanal sızması ↑ (pikler zayıflayabilir), akifer beslenebilir

Not: Başlangıç aralıkları literatür, fiziksel gerçekçilik ve havzanın hidrojeolojik karakteri dikkate alınarak tanımlanmış, SUFI-2 iterasyonları boyunca performans iyileştikçe aralıklar kontrollü biçimde daraltılmıştır.

SOL_AWC ve SURLAG gibi bazı parametrelerin etkisi nispeten düşük bulunduğundan, sonraki iterasyonlarda kalibrasyon ağırlığı taban akımı ve kanal süreçlerini temsil eden parametrelere kaydırılmıştır.



Şekil 3.18: SWAT-CUP (SUFI-2) iterasyonu sonrası kalibrasyon parametrelerinin güncellenmiş en iyi değerleri (Best_Par) ve kullanılan aralıkların özeti.

Parametre türü (r veya v), enable durumları ve dosya-parametre eşleşmesi doğrulanmadan elde edilen kalibrasyon sonuçları güvenilir kabul edilmemelidir.

Tablo 3.10: SWAT-CUP (SUFI-2) kalibrasyon aralıkları ve en iyi parametre değerleri (Best_Par)

Parametre (SWAT-CUP kodu)	Uygulama tipi	Birim	Kalibrasyon aralığı	En iyi değer (Best_Par)
r_CN2.mgt	r__ (nispi)	—	−0.20 ... +0.20	−0.05475
v_ALPHA_BF.gw	v__ (replace)	1/gün	0.00 ... 1.00	0.22680
v_GW_DELAY.gw	v__ (replace)	gün	0 ... 100	30.90
v_GW_REVAP.gw	v__ (replace)	—	0.02 ... 0.20	0.13720
v_RCHRG_DP.gw	v__ (replace)	—	0.00 ... 1.00	0.15690
v_GWQMN.gw	v__ (replace)	mm	0 ... 5000	1764.50
v_REVAPMN.gw	v__ (replace)	mm	0 ... 500	159.80
v_EPCO.hru	v__ (replace)	—	0.50 ... 1.00	0.92060
v_ESCO.hru	v__ (replace)	—	0.50 ... 1.00	0.65430
v_CH_K2.rte	v__ (replace)	mm/saat	0 ... 200	172.07

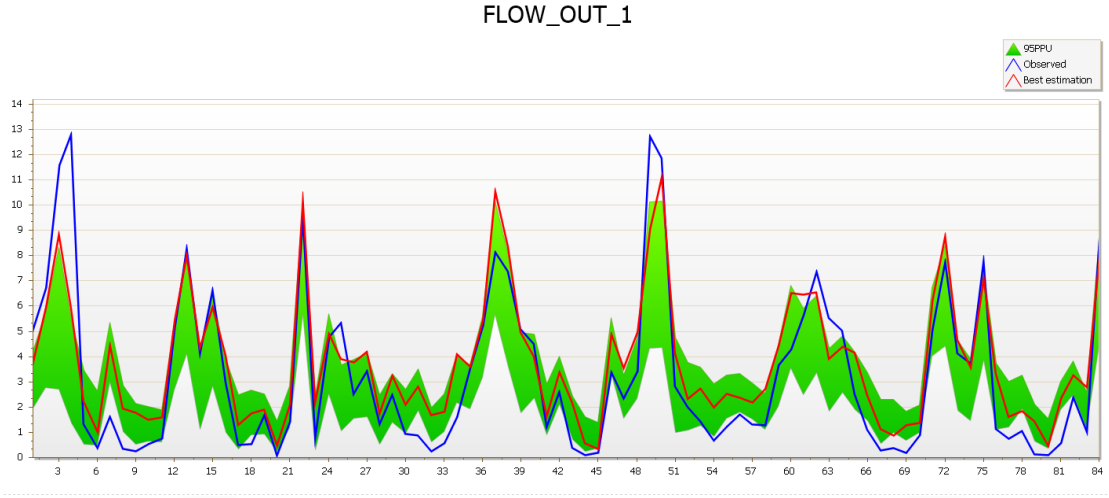
3.4.2 SWAT-CUP (SUFI-2) Uygulaması ve İterasyonlar

Bu çalışmada SWAT2012 hidrolojik modelinin otomatik kalibrasyonu SWAT-CUP yazılımı üzerinde SUFI-2 algoritması kullanılarak yürütülmüştür. SWAT-CUP, modelin TxtInOut çalışma dizinine bağlanarak her iterasyonda tanımlanan parametre aralıklarından çok sayıda model koşusu üretmiştir. Her koşu sonunda havza çıkışını temsil eden akım serisi çıkış dosyalarından alınmış ve gözlem verileriyle karşılaştırılarak amaç fonksiyonu hesaplanmıştır. Bu tezde amaç fonksiyonu olarak aylık akımlar için NSE seçilmiştir.

Kalibrasyon değerlendirmesi, model günlük zaman adımında çalıştırılrsa da aylık ölçekte yapılmıştır. Bunun nedeni, gözlem verilerinin güvenilirliğinin ve taşkın piki gibi kısa süreli uç değerlerin aylık ölçekte daha dengeli temsil edilebilmesidir. Bu kapsamda gözlemsel akım serisi aylık ortalamalara dönüştürülmüş ve SWAT-CUP içinde aylık olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca drenaj alanı farkı nedeniyle gözlenen akımlar alan oranına göre ölçeklendirilmiştir.

SUFI-2 kalibrasyonunda her iterasyon dört temel adımdan oluşur. İlk olarak başlangıç parametre aralıkları Latin hiperküp örnekleme ile taranır. İkinci adımda seçilen parametre setleriyle çoklu model koşuları çalıştırılır. Üçüncü adımda performans ölçütleri ve belirsizlik göstergeleri birlikte değerlendirilir. Son adımda parametre aralıkları bir sonraki iterasyon için güncellenir ve gerekirse daraltılır. Bu çalışmada kalibrasyon çıktılarının incelenmesinde SWAT-CUP'un Chart Tools modülü kullanılmıştır. 95PPU belirsizlik bandı, gözlem serisi ve en iyi benzetim aynı grafikte birlikte izlenmiştir. Bu noktada kullanılan grafiklerin SWAT-CUP'un kendi raporlama araçlarına ait olduğu özellikle vurgulanmalıdır.

Tez kapsamında raporlanan kalibrasyon koşusu (Iter2) 500 model çalıştırmasıyla yürütülmüş ve en iyi amaç fonksiyonu değeri $NSE=0.791$ olarak elde edilmiştir. Aynı iterasyonda $R^2=0.84$, $KGE=0.71$, $RSR=0.46$ ve $PBIAS=-16,9\%$ hesaplanmıştır. Belirsizlik değerlendirmesi açısından Iter2 için $p\text{-factor}=0.58$ ve $r\text{-factor}=0,75$ bulunmuştur. Bu sonuçlar, modelin aylık akım dinamiğini genel olarak iyi temsil ettiğini; ancak 95PPU bandının gözlemleri kapsama oranının sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu nedenle belirsizlik çıktıları performans göstergeleri ile birlikte değerlendirilmiş ve validasyon döneminde parametre seti sabit tutularak ek ayarlama yapılmadan test edilmiştir.



Şekil 3.19: SWAT-CUP (SUFI-2) kalibrasyonunda FLOW_OUT_1 için 95PPU belirsizlik bandı çıktısı: gözlenen akım (Observed), en iyi benzetim (Best estimation) ve 95PPU bandının (uncertainty envelope) gösterimi.

Kalibrasyon sonunda SWAT-CUP'un Best_Par çıktısından en iyi parametre seti seçilmiş ve bu set doğrulama aşamasında değiştirilmeden kullanılmıştır. Doğrulama, SWAT-CUP'un doğrulama işleviyle tek bir model koşusu şeklinde yürütüldüğünden, doğrulama çıktılarında p-faktör ve r-faktör kalibrasyondaki iteratif yorum mantığıyla aynı şekilde üretilmez. Bu çalışmada doğrulama dönemi (Iter5) için $NSE=0,78$, $R^2=0,83$, $KGE=0,70$, $RSR=0,47$ ve $PBIAS=-20,9\%$ bulunmuş, böylece kalibrasyonda elde edilen parametre setinin bağımsız dönemde de benzer performans ürettiği gösterilmiştir.

SUFI-2 parametre tanımları yapılırken SWAT-CUP söz dizimine uygun şekilde her parametre için bulunduğu dosya grubu (mgt, gw, hru, rte gibi), değişim tipi (r veya v) ve fiziksel gerçekçilikle uyumlu alt-üst sınırlar tanımlanmıştır. Değişim tipinin hatalı seçilmesi, model tepkisini belirgin biçimde değiştirebildiği için ilk denemelerde parametrelerin gerçekten uygulanıp uygulanmadığı kontrol edilmiş, ardından iterasyonlar düzenli biçimde sürdürülmüştür.

Her iterasyon sonunda üretilen çıktılar birlikte değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme iki amaca hizmet etmiştir. Birincisi, amaç fonksiyonuna göre (bu çalışmada aylık NSE) daha uygun parametre kombinasyonlarını ayırt etmektir. İkincisi, 95PPU kapsamı ve bant

genişliği göstergeleriyle birlikte parametre aralıklarını gözden geçirerek gereksiz genişliği azaltmak ve iteratif yakınsamayı sağlamaktır. Doğrulama aşamasında ise kalibrasyonda belirlenen en iyi parametre seti sabit tutularak model bağımsız dönem için yeniden çalıştırılmış ve aylık performans ltleri üzerinden, çözümün yalnızca kalibrasyon dnemeine aşırı uyumlu olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Tablo 3.11: Model simülasyon penceresi ve değerlendirme dönemleri (warm-up, kalibrasyon, validasyon)

Bileşen	Dönem
Simülasyon penceresi	2010 01 – 2023 12
Warm-up	2010–2011 (2 yıl)
Kalibrasyon dönemi	2012–2018
Validasyon dönemi	2019–2023
Zaman adımı / değerlendirme	Günlük alışma, aylık değerlendirme/ıktı

Tablo 3.12: SWAT-CUP (SUFI-2) proje kurulumu ve koşu ayarları

Ayar / Bileşen	Değer / Açıklama
Kalibrasyon aracı	SWAT-CUP
Algoritma	SUFI-2
Model motoru	SWAT2012 (TxtInOut üzerinden çoklu alıştırma)
Hedef ıktı	output.rch içinden aylık FLOW_OUTcms / FLOW_OUT
ıkış kesiti	Darıören AĞİ’yi temsil eden kesit (Reach 1)
Gözlem verisi	Aylık ortalama debi (m ³ /s), tek değişkenli
Alan uyumu düzeltmesi	$Q_{obs} \times (130/137) \approx 0.95$
Amaç fonksiyonu	Aylık NSE (birincil)
Raporlanan ek metrikler	KGE, PBIAS, R ² , RSR/RMSE

Tablo 3.13: SUFI-2’de kalibrasyona alınan parametreler ve tanımlama biçimi

Parametre (SWAT-CUP kodu)	Değişim tipi	Temsil ettiği süreç / kontrol ettiği bileşen
r_CN2.mgt	Görelî (r)	Yüzey akışı potansiyeli (SCS-CN)
v__ALPHA_BF.gw	Mutlak (v)	Taban akımı resesyonu / yeraltı suyu tepkisi
v__GW_DELAY.gw	Mutlak (v)	Sığ akifer gecikmesi
v__GWQMN.gw	Mutlak (v)	Taban akımının başlaması için eşik (sığ akifer)
v__RCHRG_DP.gw	Mutlak (v)	Derin akifere sızma oranı / yeniden şarj bölüşümü
v__GW_REVAP.gw	Mutlak (v)	Sığ akifere kök bölgesine geri buharlaşma (revap)
v__REVAPMN.gw	Mutlak (v)	Revap için eşik su seviyesi
v__ESCO.hru	Mutlak (v)	Toprak buharlaşması telafi faktörü (ET bileşeni)
v__EPCO.hru	Mutlak (v)	Bitki su alımı telafi faktörü (ET bileşeni)
v__CH_K2.rte	Mutlak (v)	Ana kanal iletkenliği / kanal-akifer etkileşimi

3.4.3 Validasyon ve Performans Ölçütleri

Validasyon (doğrulama) aşaması, kalibrasyon döneminde belirlenen en iyi parametre setinin bağımsız bir zaman aralığında herhangi bir ek ayarlama yapılmadan uygulanması ve modelin genellenebilirliğinin test edilmesidir. Bu tezde kalibrasyon dönemi 2012-2018, validasyon dönemi ise 2019-2023 olarak tanımlanmış, 2010-2011 yılları ısınma (warm-up) periyodu olarak değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Validasyon değerlendirmesinde kullanılan gözlem verileri, modelin temsil ettiği drene alan ile istasyonun resmi drene alanı arasındaki fark nedeniyle birim alan yaklaşımıyla ölçeklenmiştir. Bu kapsamda düzeltilmiş gözlem akımı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$Q_{obs}(\text{düzeltilmiş}) = Q_{obs} \times (A_{\text{model}} / A_{\text{DSI}}) = Q_{obs} \times (130/137) = Q_{obs} \times 0,95$$

Bu düzeltme ile model-gözlem karşılaştırması aynı drene alan ölçeğinde yapılmış ve performans metriklerinin fiziksel yorumu korunmuştur. Validasyon, SWAT2012

simülasyonu sonucunda elde edilen aylık FLOW_OUT serisinin Dariören çıkış kesitinde (reach) çıkarılması ve gözlemle aynı zaman adımıyla (aylık) karşılaştırılmasıyla yürütülmüştür.

Model performansı birden fazla ölçüt ile değerlendirilmiştir. Bu tezde kullanılan temel ölçütler ve yorum mantığı aşağıda özetlenmiştir.

NSE (Nash-Sutcliffe): 1'e yaklaştıkça uyum artar. 0 değeri modelin gözlem ortalaması kadar başarılı olduğunu gösterir. Negatif değerler daha zayıf performansa işaret eder.

KGE (Kling-Gupta): Korelasyon, yanlışlık (bias) ve değişkenlik bileşenlerini birlikte dikkate alarak daha dengeli bir uyum değerlendirmesi sağlar.

PBIAS (%): Hacim yanlışlığını gösterir. Negatif değerler modelin akımı yüksek, pozitif değerler ise düşük benzetme eğilimine işaret eder.

R²: Gözlenen ve simüle edilen seriler arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü özetler.

RMSE ve RSR: Hatanın büyüklüğünü ve hatanın gözlem değişkenliğine göre normalize edilmiş düzeyini verir. RSR küçüldükçe performans iyileşir.

Validasyon döneminde (2019-2023) elde edilen performans göstergeleri NSE=0,78, R²=0,83, KGE=0,70, RSR=0,47 ve PBIAS=-20,9% olup (FLOW_OUT_1), kalibrasyon dönemindeki metriklerle (NSE=0.79, R²=0.84, KGE=0.71, RSR=0,46, PBIAS=-16,9%) benzer düzeydedir. Bu sonuç, modelin kalibrasyon verisine uyarlanmış bir çözüm üretmek yerine bağımsız dönemde de mevsimsel akım desenini genel olarak yakalayabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte her iki dönemde de negatif PBIAS değerleri, toplam akım hacminin sistematik olarak yüksek simüle edildiğine işaret etmektedir. Bu yanlışlığın olası nedenleri ve su bütçesine etkileri Bulgular ve Tartışma bölümünde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

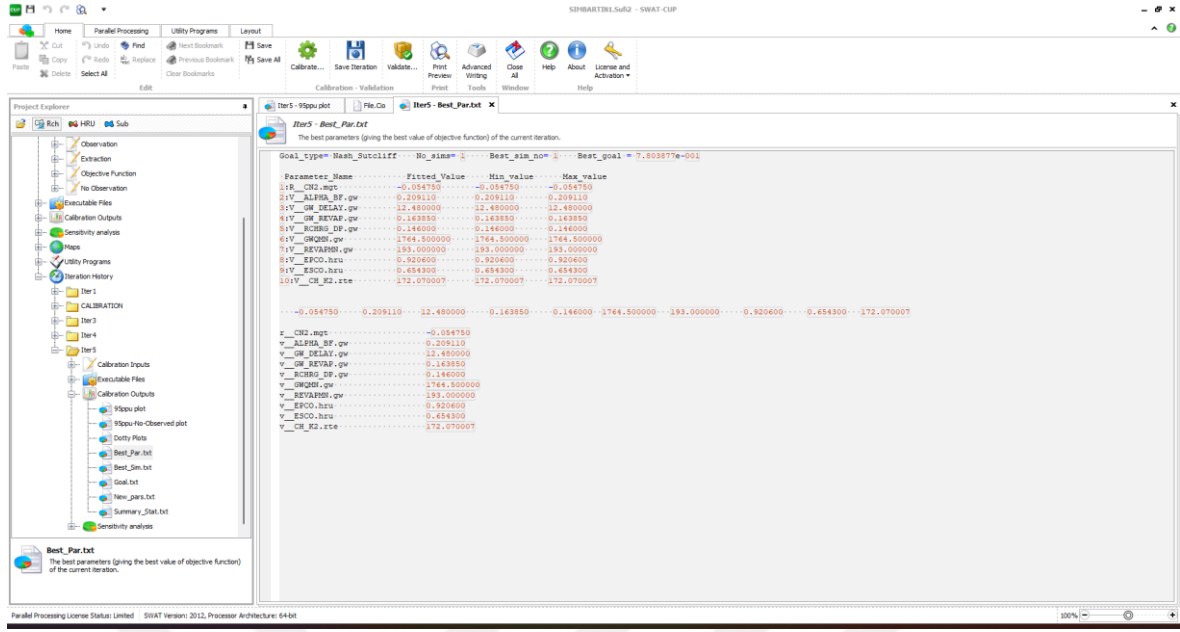


Şekil 3.20: Validasyon dönemi gözlenen–simüle edilen akım hidroğrafi

Tablo 3.14: Kalibrasyon ve validasyon dönemlerinde elde edilen performans ölçütlerinin özeti.

Dönem	Yıl aralığı	NSE	R ²	KGE	PBIAS (%)	RSR
Kalibrasyon	2012–2018	0,79	0,84	0,71	–16,9	0,46
Validasyon	2019–2023	0,78	0,83	0,70	–20,9	0,47

Bu alt bölümdeki validasyon kurgusunda amaç, kalibrasyonda iyileştirilen parametre setinin bağımsız dönemde de korunmasını sınamaktır. Bu nedenle parametreler yeniden ayarlanarak metrikleri yükseltmeye yönelik ek bir optimizasyon yapılmamış, kalibrasyon çıktısının bağımsız dönemdeki güvenilirliği test edilmiştir.



Şekil 3.21: SWAT-CUP (SUFI-2) iterasyonu sonunda elde edilen güncellenmiş en iyi parametre değerleri (Best_Par.txt): her parametre için fitted (best) değer ile tanımlanan min-max aralığı ve ilgili objective function sonucu (NSE).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, SWAT modeli ile elde edilen simülasyon çıktıları gözlenen akım verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmekte, model performansı ve su bütçesi bileşenleri üzerinden bulgular yorumlanmakta ve ilgili literatür ile tartışılmaktadır.

4.1 Kalibrasyon ve Validasyon Sonuçları

Bu alt bölümde, SWAT-CUP ile gerçekleştirilen kalibrasyon ve validasyon süreçlerinin sonuçları sunulmakta, gözlenen ve simüle edilen akımlar arasındaki uyum performans ölçütleri üzerinden değerlendirilerek yorumlanmaktadır.

4.1.1 Performans Ölçütleri ve Genel Özet

Bu alt bölümde Bartın-Arıt havzası için kurulan SWAT2012 tabanlı hidrolojik modelin aylık akım (FLOW_OUT_1) performansı kalibrasyon ve validasyon dönemleri için özetlenmiştir. Kalibrasyon işlemi SWAT-CUP yazılımında SUFI-2 algoritması kullanılarak yürütülmüştür. Validasyon ise kalibrasyonda elde edilen en iyi parametre seti değiştirilmeden bağımsız dönem üzerinde test edilmiştir. Performans değerlendirmesi SWAT-CUP tarafından raporlanan NSE, R^2 , KGE, RSR ve PBIAS ölçütlerine dayanmaktadır. Ayrıca SUFI-2 belirsizlik analizi kapsamında 95PPU bandının gözlemleri kapsama oranını ifade eden p-factor ve band genişliğini ifade eden r-factor göstergeleri kalibrasyon dönemi için raporlanmıştır.

Kalibrasyon dönemi (2012-2018) için aylık akım performansı $NSE=0.79$ ve $R^2=0.84$ olarak elde edilmiştir. $KGE=0.71$ ve $RSR=0.46$ değerleri modelin akım rejimini genel olarak iyi temsil ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte $PBIAS=-16,9\%$ değeri, modelin toplam akım hacmini ortalama olarak yüksek benzetme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Validasyon döneminde (2019-2023) $NSE=0,78$ ve $R^2=0,83$ ile benzer bir başarımın korunması, modelin bağımsız veri döneminde de genellenebilir bir performans sergilediğini göstermektedir. Validasyon döneminde $PBIAS=-20,9\%$ değerinin daha negatif olması, yüksek benzetim eğiliminin bu dönemde de sürdüğünü göstermekte olup olası nedenleri Bölüm 4.4 ve 4.5 kapsamında tartışılacaktır.

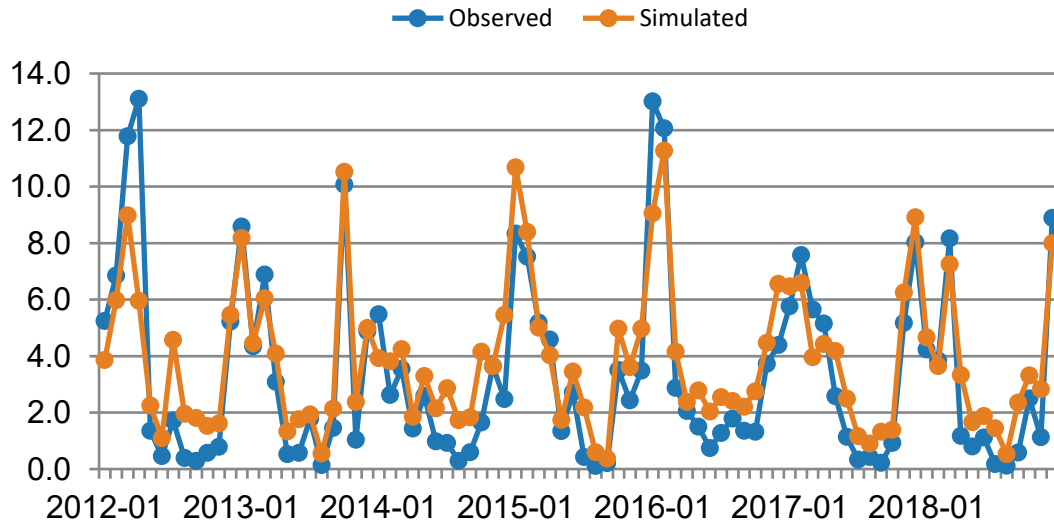
Tablo 4.1: Kalibrasyon ve validasyon dönemlerinde aylık akım için performans ölçütleri (FLOW_OUT_1).

Dönem	NSE	R ²	KGE	RSR	PBIAS (%)	p-factor	r-factor
Kalibrasyon	0,79	0,84	0,71	0,46	-16,9	0,58	0,75
Validasyon	0,78	0,83	0,70	0,47	-20,9	—	—

Not: p-factor ve r-factor göstergeleri, SUFI-2 belirsizlik analizi kapsamında 95PPU bandına ait ölçütlerdir. Validasyon döneminde en iyi parametre seti sabit tutularak tekil simülasyon yürütüldüğü için 95PPU bandı üretilmemiştir. Bu nedenle p-factor ve r-factor göstergeleri validasyon için değerlendirmeye alınmamıştır.

4.1.2 Kalibrasyon Dönemi Sonuçları (2012–2018)

Kalibrasyon dönemi için gözlenen ve simüle edilen aylık akımların karşılaştırması Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilde en iyi simülasyon eğrisi ile birlikte SUFI-2 algoritmasının ürettiği 95PPU belirsizlik bandı da gösterilmiştir. Bu sunum, model uyumunu ve belirsizlik düzeyini aynı anda görsel olarak değerlendirmeye imkan vermektedir.



Şekil 4.1: Aylık gözlenen (Qobs) ve simüle edilen (Qsim) akımın zaman serisi karşılaştırması (Darıören AGİ/Reach 1) modelin pik akım ve düşük akım dönemlerindeki uyumunun görsel değerlendirmesi.

Şekil 4.1 genel olarak modelin mevsimsel akım desenini yakaladığını göstermektedir. Yağışlı dönemde artan akım ve yaz-sonbahar döneminde azalan akım davranışı başarıyla temsil edilmiştir. Buna rağmen özellikle yüksek akım dönemlerinde gözlem ile simülasyon arasında belirgin sapmalar görülebilmektedir. Bu durum, PBIAS değerinin negatif olmasına paralel olarak bazı aylarda akımın yüksek tahmin edildiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte $NSE=0,79$ ve $R^2=0,84$ değerleri, modelin aylık ölçekte akım değişkenliğinin önemli bir bölümünü açıklayabildiğini göstermektedir.

Belirsizlik değerlendirmesi açısından kalibrasyon döneminde $p\text{-factor}=0,58$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, gözlemlerin yaklaşık yüzde 58'inin 95PPU bandı içinde kaldığını ifade eder. $r\text{-factor}=0,75$ değeri ise belirsizlik bandının görece orta genişlikte olduğunu göstermektedir. $p\text{-factor}$ değerinin yükseltilebilmesi için parametre aralıklarının yeniden gözden geçirilmesi ve mümkünse girdi verilerindeki belirsizliklerin azaltılması gerekir. Bu tezde hem performans hem de belirsizlik ölçütleri birlikte yorumlandığından, belirsizlik göstergelerinin ayrıntılı değerlendirmesi Bölüm 4.5'te ele alınacaktır.

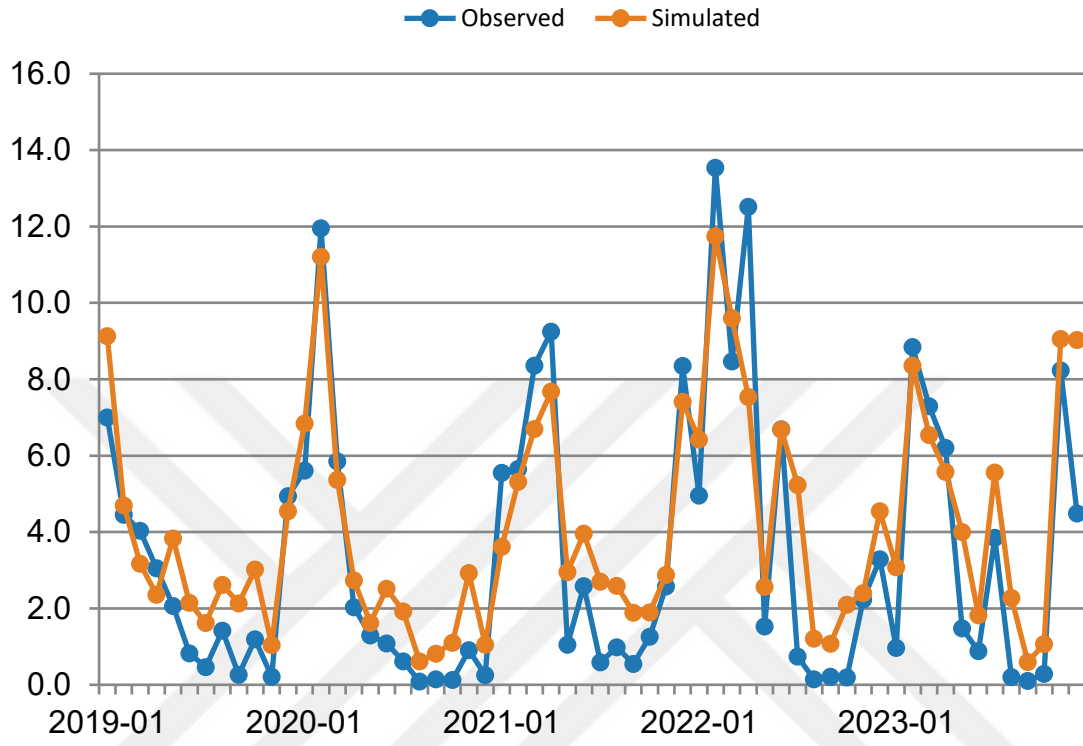
Bu alt bölümdeki bulgular, kalibrasyon döneminde istatistiksel olarak tutarlı bir performans elde edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte negatif PBIAS ve belirsizlik bandının kapsama oranı, sonraki alt bölümlerde özellikle 4.4 ve 4.5'te tartışılması gereken noktalar olarak not edilmelidir.

4.1.3 Validasyon dönemi sonuçları (2019–2023)

Validasyon aşamasında, kalibrasyon döneminde belirlenen en iyi parametre seti herhangi bir yeniden ayar yapılmadan 2019-2023 dönemi için uygulanmıştır. Bu yaklaşımın amacı, kalibrasyon sırasında elde edilen parametrelerin bağımsız bir dönemde de benzer performans üretilip üretilmediğini görmek ve modelin genellenebilirliğini sınamaktır.

Validasyon performansı aylık ölçekte değerlendirilmiş olup $NSE=0,78$, $R^2=0,83$, $KGE=0,70$, $RSR=0,47$ ve $PBIAS=-20,9\%$ olarak hesaplanmıştır. NSE ve R^2 değerlerinin kalibrasyon dönemine yakın kalması, modelin dış dönemde de mevsimsel akım desenini genel olarak temsil edebildiğini göstermektedir. Buna karşın negatif PBIAS, validasyon döneminde de toplam hacmin gözleme göre daha yüksek simüle edilme eğiliminin sürdüğünü işaret

etmektedir. Bu önyargının su bütçesi bileşenleri ve girdi veri belirsizlikleri ile ilişkisi Bölüm 4.2 ve 4.5’te tartışılacaktır.



Şekil 4.2: Validasyon dönemi (2019–2023) gözlenen ve simüle edilen aylık akım hidrografi

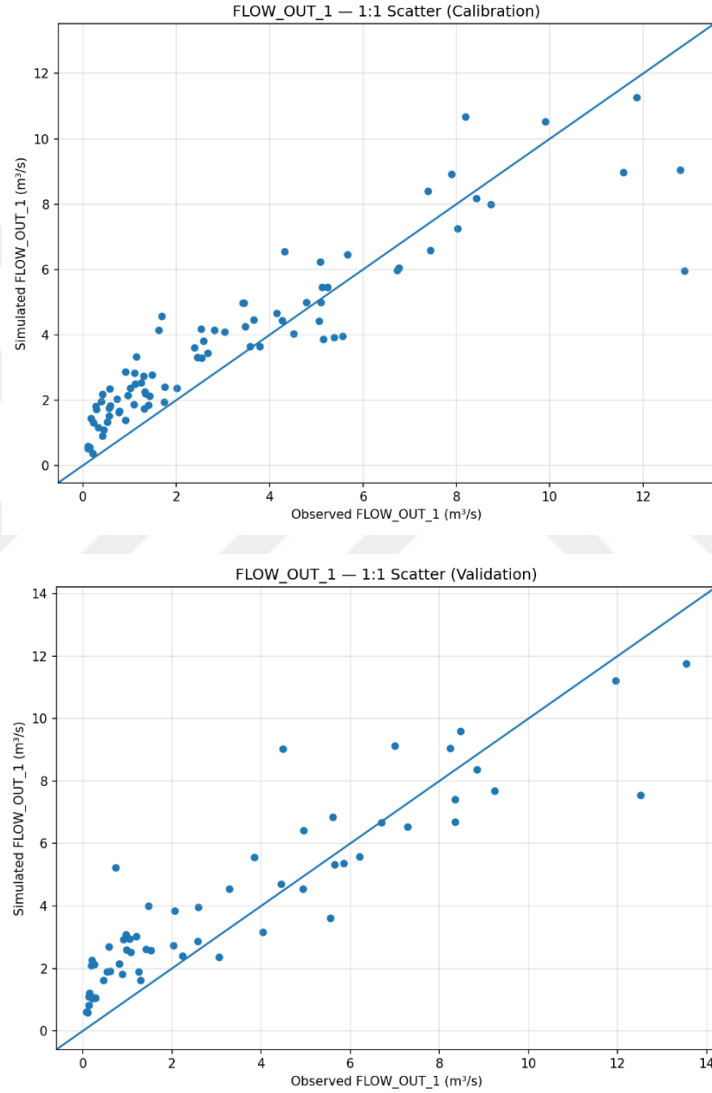
4.1.4 Grafıksel doğrulama araçları

Sayısal performans ölçütlerini desteklemek amacıyla model-gözlem uyumu iki ek grafıksel araçla değerlendirilmiştir. Bunlar 1:1 saçılım diyagramı ve akım süreklilik eğrisidir (Flow Duration Curve, FDC). Bu görseller, modelin düşük, orta ve yüksek akım aralıklarındaki davranışını daha açık biçimde ortaya koyar. Böylece yorumlar yalnızca tek bir metrik üzerinden yapılmaz.

1:1 diyagramı (gözlem-simülasyon saçılımı)

1:1 diyagramında her bir ay için gözlenen debi (Q_{obs}) ile simüle edilen debi (Q_{sim}) karşılaştırılır. Noktaların 1:1 doğrusu etrafında toplanması, modelin hem düşük hem de yüksek akımları dengeli biçimde temsil ettiğini gösterir. Noktaların doğrunun üstünde

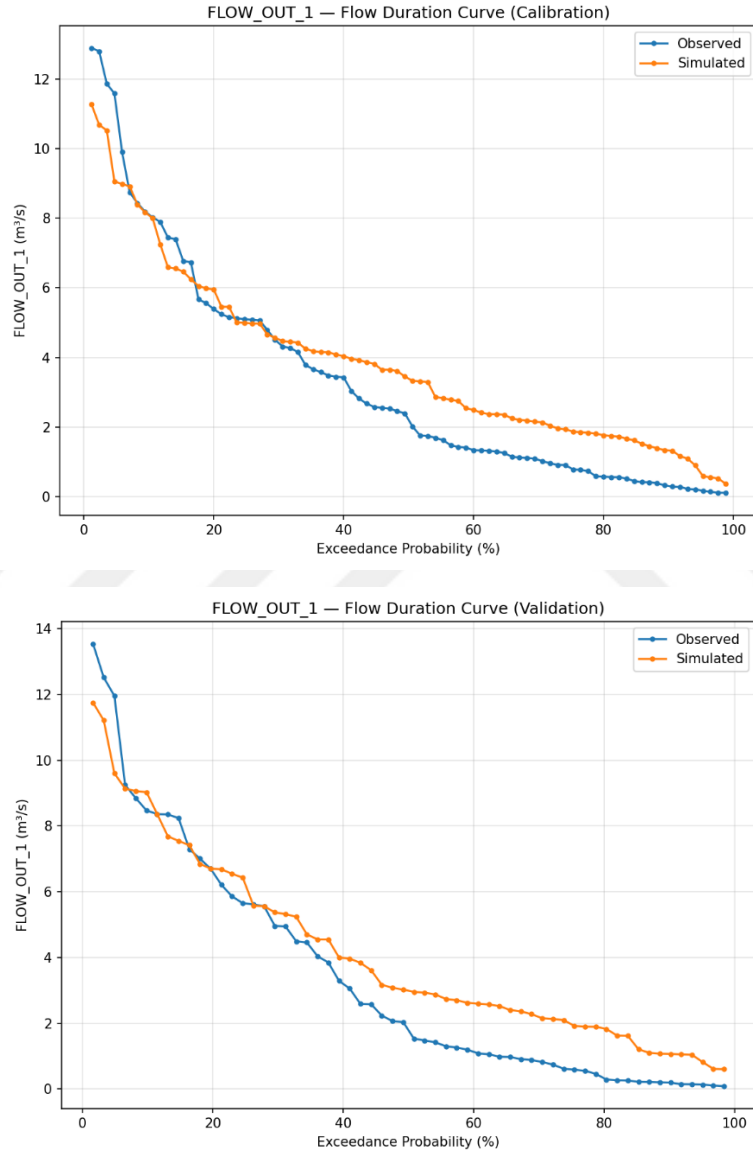
kalması aşırı tahmin eğilimine, altında kalması ise eksik tahmin eğilimine işaret eder. Bu çalışmada PBIAS'ın negatif olması, toplam akım hacminin genel olarak aşırı benzetildiğini göstermektedir. Bu nedenle 1:1 saçılımında noktaların 1:1 doğrusunun üstünde ($Q_{sim} > Q_{obs}$) toplanma eğilimi beklenir. Aşırı/eksik tahminin hangi akım aralıklarında yoğunlaştığı ise Şekil 4.3 ve FDC analizi ile birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 4.3: Gözlenen ve simüle edilen aylık akımların 1:1 saçılım diyagramı

Akım süreklilik eğrisi, akımların aşılma olasılıklarına göre sıralanmasıyla elde edilir ve modelin farklı akım rejimlerini (yüksek akım, orta akım, düşük akım) ne ölçüde yakaladığını gösterir. Eğrinin yüksek akım bölümündeki (küçük aşılma olasılıkları) davranış daha çok taşkın karakterini yansıtır. Düşük akım bölümünde (büyük aşılma olasılıkları) ise taban

akımı ve kurak dönem davranışı öne çıkar. Model eğrisinin gözlem eğrisinin üzerinde kalması yüksek tahmine, altında kalması ise düşük tahmine işaret eder. Bu tezde akım süreklilik eğrisi, özellikle düşük akımlar bölgesinde belirgin bir sapma olup olmadığını görmek ve taban akımı parametrelerinin fiziksel tutarlılığını kontrol etmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.4: Gözlenen ve simüle edilen akımlar için akım süreklilik eğrisi (FDC).

4.2 Su Bütçesi Bileşenleri

Bu bölümde, SWAT2012 modelinin 2012-2023 simülasyon dönemi için havza ölçeğinde ürettiği su bütçesi bileşenleri (yağış, kar erimesi, potansiyel ve gerçek buharlaşma-terleme ile akım bileşenleri) özetlenmektedir. Bileşenler, havza ortalamasını temsil edecek şekilde mm cinsinden raporlanmıştır. Ayrıca yıllık ve aylık ölçekteki değişkenlik dikkate alınarak akım bileşenlerinin katkısı değerlendirilmiştir.

4.2.1 Yıllık Su Bütçesi Özeti (2012–2023)

- Yağış (P): 1028,5 mm/yıl
- Akım derinliği (Q): 964,0 mm/yıl ($\approx 3,974 \text{ m}^3/\text{s}$, $A \approx 130 \text{ km}^2$)
- Potansiyel buharlaşma-terleme (PET): 61,9 mm/yıl
- Gerçek buharlaşma-terleme (ET): 59,8 mm/yıl
- Kar erimesi (SNOMELT): 176,5 mm/yıl
- Yüzey akışı (SURQ): 280,2 mm/yıl
- Yeraltı suyu katkısı (GW_Q): 509,8 mm/yıl
- Toplam su verimi (WYLD): 960,3 mm/yıl
- Bütçe artık terimi (P–ET–Q): 4,6 mm/yıl
- Akış katsayısı (Q/P): 0,94

Tablo 4.2: Yıllık su bütçesi özeti (2012–2023).

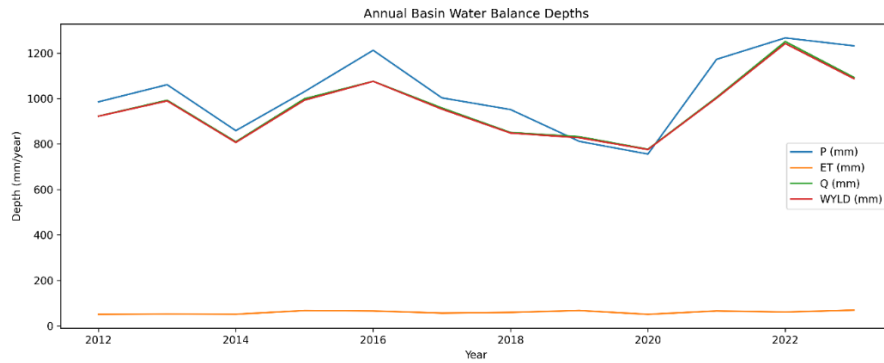
Yıl	P (mm)	SNOMEL T (mm)	PET (mm)	ET (mm)	Q (mm)	Q (m ³ /s)	SUR Q (mm)	GW_ Q (mm)	WYL D (mm)	P–ET– Q (mm)	Q/P
2012	985,5	321,8	53,3	50,7	922,6	3,803	278,5	491,4	922,2	12,1	0,936
2013	1061,0	195,0	54,0	52,3	992,7	4,092	343,3	487,3	989,6	15,9	0,936
2014	858,9	8,7	52,7	51,3	809,9	3,339	268,1	405,6	806,9	-2,3	0,943
2015	1030,5	118,9	71,5	67,4	999,2	4,119	388,5	452,8	992,9	-36,1	0,970
2016	1212,3	204,5	66,7	65,7	1076,0	4,436	326,2	560,3	1075,7	70,6	0,888
2017	1003,1	171,7	57,8	56,4	958,6	3,952	271,4	510,0	953,5	-11,9	0,956
2018	951,6	105,3	60,8	59,4	850,7	3,507	214,5	471,6	848,2	41,5	0,894
2019	811,8	121,9	70,3	67,6	832,2	3,431	171,7	498,8	827,7	-88,1	1,025

2020	755,8	184,2	53,6	50,9	777,0	3,203	157,3	470,3	775,7	-72,1	1,028
2021	1172,6	229,0	67,8	65,8	1005,5	4,145	258,3	542,2	1002,0	101,3	0,857
2022	1266,8	291,1	63,4	61,0	1250,7	5,156	399,1	643,6	1242,0	-45,0	0,987
2023	1231,9	166,1	71,1	69,2	1093,1	4,506	286,0	583,5	1087,3	69,7	0,887

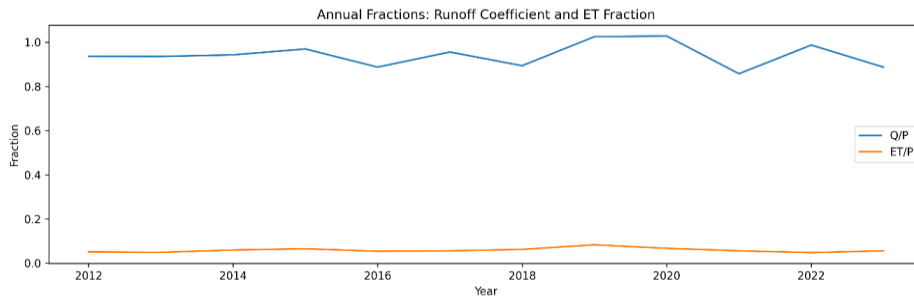
Not: Q (mm), çıkış kesitinde simüle edilen ortalama debinin havza alanına dönüştürülmesiyle elde edilen akım derinliğidir.

4.2.2 Yıllar arası değişkenlik (yıllık P–Q ilişkisi)

- P aralığı: 755,8–1266,8 mm/yıl.
- Q aralığı: 777,0–1250,7 mm/yıl.
- ET aralığı: 50,7–69,2 mm/yıl.
- Q/P aralığı: 0,857–1,028.
- En yağışlı yıl: 2022 (P=1266,8 mm).
- En kurak yıl: 2020 (P=755,8 mm).



Şekil 4.5: Yıllık P–ET–Q bileşenleri



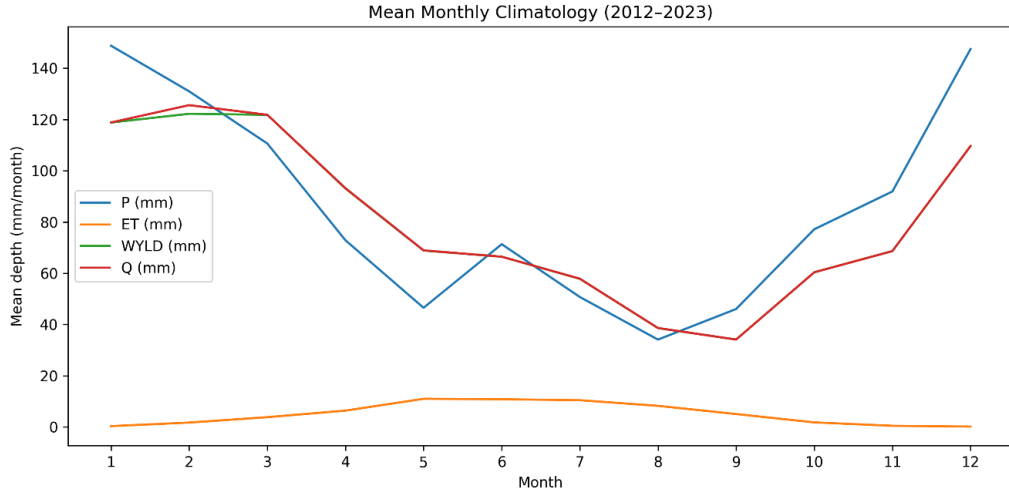
Şekil 4.6: Yıllık yağış (P) ile akım derinliği (Q) ilişkisi

4.2.3 Aylık/Mevsimsel Dağılım

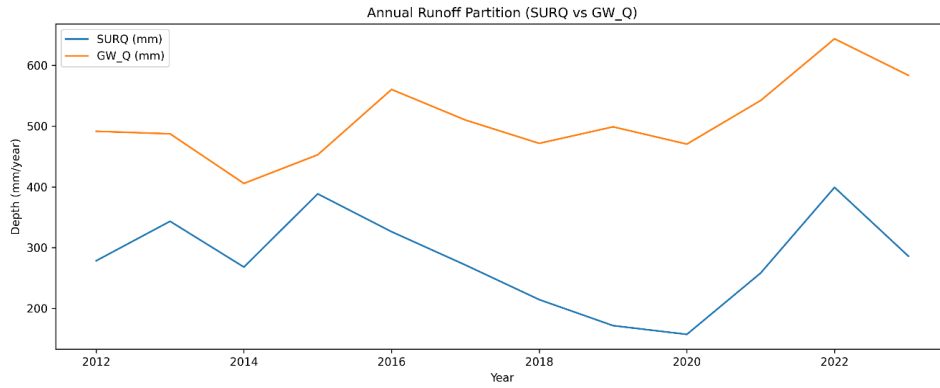
Aylık klimatoloji değerleri, yağış ve akımın belirgin bir mevsimsellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ortalama yağış ve akım kış aylarında (Ocak-Mart) yüksek, yaz sonu ve erken sonbaharda (Ağustos-Eylül) ise daha düşüktür. Kar erimesi bileşeni özellikle kış-ilkbahar geçişinde akımı destekleyerek bu dönemdeki yükselişe katkı sağlar.

Tablo 4.3: Aylık ortalama su bütçesi ve akım bileşenleri (2012–2023 klimatolojisi).

Ay	PRECIP mm	SNOME LTmm	PETmm	ETmm	Q_mm	SURQm m	GW_Q mm	WYLD mm
Ocak	148.81	62.37	0.30	0.29	118.85	41.74	55.81	118.82
Şubat	130.99	42.45	1.76	1.68	125.61	39.23	62.25	122.24
Mart	110.63	31.26	3.92	3.79	121.85	29.16	71.81	121.84
Nisan	72.86	3.05	6.75	6.35	93.20	13.42	63.81	93.06
Mayıs	46.50	0.00	11.34	10.97	68.92	6.74	51.79	68.84
Haziran	71.33	0.00	11.08	10.79	66.44	19.75	35.75	66.43
Temmuz	50.71	0.00	10.74	10.42	57.86	16.07	31.83	57.80
Ağustos	34.08	0.00	8.57	8.22	38.61	8.64	23.80	38.56
Eylül	46.02	0.00	5.14	5.01	34.09	8.25	18.16	34.10
Ekim	77.15	0.00	1.76	1.76	60.34	26.11	22.59	60.37
Kasım	91.91	4.95	0.43	0.43	68.62	27.03	28.38	68.65
Aralık	147.50	32.44	0.12	0.12	109.64	44.10	43.80	109.60



Şekil 4.7: Aylık ortalama su bütçesi bileşenleri (P, ET ve Q).



Şekil 4.8: Yıllık ortalama akım bileşenleri (SURQ, GW_Q ve WYLD).

4.2.4 Su bütçesi tutarlılığı ve PBIAS ile ilişki

- Uzun dönem ortalaması için $P-ET-Q$ artışı: 4,6 mm/yıl (≈ 0 'a yakın).
- Uzun dönem $Q/(P+SNOMELT)$ oranı: 0,80.
- Uzun dönem $ET/(P+SNOMELT)$ oranı: 0,05.

Güvenilirlik notu: PET ve ET büyüklükleri, kullanılan meteorolojik girdilere ve seçilen PET hesaplama yöntemine hassastır. Bu nedenle, bağımsız verilerle doğrulanmadan bu iki bileşenin mutlak değerleri üzerinden kesin hidrometeorolojik yorum yapmak uygun değildir. Savunmada su bütçesi bileşenleri tartışılırken, öncelikle bütçe kapanışı ve akım bileşenlerinin göreceli katkıları esas alınmalıdır.

4.2.5 Su Bütçesi Tutarlılık Kontrolü

Çıkış akımı (Q) ile toplam su verimi (WYLD) arasındaki farkın uzun dönem ortalaması 3.72 mm/yıl düzeyindedir (min=0.33 mm/yıl, maks=8.76 mm/yıl). Bu fark, akımın yönlendirilmesi sırasında oluşan kanal buharlaşması ve iletim kayıpları gibi süreçlerle ilişkilidir. Yıllık su bütçesi artışı (P-ET-Q) ortalama 4.6 mm/yıl olup, çok yıllık ölçekte bütçenin genel olarak kapandığını göstermektedir. Bununla birlikte tekil yıllarda artışın -88.1 ile 100.9 mm/yıl aralığına kadar çıkabilmesi, depolama bileşenlerinin (toprak suyu ve yeraltı suyu) yıllar arasındaki değişimin su bütçesinde belirleyici olabildiğini göstermektedir.

Not (güvenilirlik): Bu veri setinde PET ve ET büyüklüklerinin yağışa göre oldukça düşük bir payda kalması dikkat çekmektedir. Bu nedenle su bütçesi yorumları yapılırken PET/ET hesaplama yöntemi ve meteorolojik girdilerin, özellikle enerji bileşenleri açısından, temsili ayrıca kontrol edilmelidir. Bu çalışma kapsamında ana hedef akım simülasyonu olduğundan, su bütçesi tartışmasında en güvenilir çıkarım akım bileşenlerinin (SURQ, GW_Q ve WYLD) göreceli katkılarıdır. PET ve ET büyüklüklerinin bağımsız bir veri kaynağı ile (örneğin uzaktan algılama tabanlı ET ürünleri) çapraz kontrol edilmesi ve alternatif PET yaklaşımlarının (örneğin Hargreaves) denenmesi, su bütçesi değerlendirmesinin güvenilirliğini güçlendirecektir.

4.3 Literatürle Karşılaştırma ve Tartışma

Bu bölümde Bartın-Art Havzası için kurulan SWAT modelinin kalibrasyon ve validasyon aşamalarında elde edilen performans göstergeleri ile su bütçesi bileşenleri, literatürde raporlanan benzer SWAT uygulamalarıyla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Karşılaştırma, aylık akım simülasyonlarında yaygın kullanılan performans ölçütleri (NSE, R^2 , KGE, RSR ve PBIAS) üzerinden yürütülmüş, ayrıca havza ölçeğinde yağış, akış ve evapotranspirasyon ilişkisinin fiziksel tutarlılığı dikkate alınmıştır. Böylece model çıktıları hem istatistiksel kabul edilebilirlik hem de hidrolojik tutarlılık açısından birlikte değerlendirilmiştir.

4.3.1 Kalibrasyon/validasyon performansının literatürle kıyaslanması

Aylık akım verileriyle gerçekleştirilen kalibrasyon ve validasyon sonuçları Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Kalibrasyon döneminde $NSE=0,79$, $R^2=0,84$, $KGE=0,71$ ve $RSR=0,46$ değerlerinin elde edilmesi, modelin aylık akımın genel değişkenliğini ve mevsimsel davranışını başarılı biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Validasyon döneminde de benzer düzeyde performansın korunması ($NSE=0,78$, $R^2=0,83$, $KGE=0,70$, $RSR=0,47$), modelin yalnızca kalibrasyon dönemine uyarlanmış bir yapı sergilemediğini ve farklı bir dönemde de tutarlı sonuçlar üretebildiğini desteklemektedir. Bununla birlikte her iki dönemde de PBIAS değerlerinin negatif olması (kalibrasyon: -16,9, validasyon: -20,9), akımın sistematik olarak bir miktar yüksek tahmin edildiğine işaret etmektedir. Bu yanlılık, özellikle yüksek akım dönemlerinde gözlenen ve simüle edilen akımlar arasındaki farkların büyüdüğü koşullarda daha belirgin hale gelebilmektedir.

Moriasi vd. (2007, 2015) tarafından önerilen performans değerlendirme aralıkları dikkate alındığında, özellikle aylık akım için NSE ve RSR eşikleri açısından bu çalışmada elde edilen NSE ve RSR değerlerinin “iyi” performans düzeyine karşılık geldiği söylenebilir. PBIAS açısından -16,9 ile -20,9 aralığında bir sapma bulunması, birçok havza ölçekli modelleme çalışmasında kabul edilebilir sınırlar içinde değerlendirilebilmekle birlikte, modelin yüksek akım ve su verimi üretme eğiliminin izlenmesini ve yorumların buna göre sınırlandırılmasını gerektirir.

Elde edilen başarı düzeyi, Türkiye’de ve benzer iklim koşullarındaki SWAT uygulamalarıyla genel olarak uyumludur. Örneğin Duru vd. (2017) Artvin Arhavi Çayı Havzası için aylık akım benzetiminde $NSE=0,79$ ve $R^2=0,81$ raporlamış ve bu çalışmadaki kalibrasyon sonuçlarıyla aynı düzeyde performans elde etmiştir. Briak vd. (2016) farklı bir havzada $NSE=0,76$ ve $R^2=0,77$ değerlerine ulaşmış olup, bu tezdeki sonuçlar söz konusu başarıya yakın bir düzeydedir. Benzer biçimde Kumar vd. (2017) tarafından raporlanan aylık akım performansı da karşılaştırılabilir düzeydedir (kalibrasyon: $NSE=0,73$ ve $R^2=0,76$, validasyon: $NSE=0,69$ ve $R^2=0,75$). Bu karşılaştırmalar, Bartın-Art Havzası için geliştirilen modelin hem kalibrasyon hem de validasyon aşamasında istatistiksel olarak kabul edilebilir bir uyum sağladığını göstermektedir.

Türkiye’deki SWAT uygulamalarını derleyen Peker ve Cüceoğlu (2022), çalışmaların büyük bir kısmında NSE değerlerinin 0,50-0,80 aralığında yoğunlaştığını belirtmektedir. Bu çerçevede, bu tezde elde edilen NSE yaklaşık 0,79 düzeyi, raporlanan uygulamaların üst bandına yakın olup modelin havza ölçeğinde karar destek amacıyla kullanılabilmesi açısından güçlü bir dayanak sunmaktadır.

Belirsizlik analizi açısından Tablo 4.1’de verilen p-factor=0,58 ve r-factor=0,75 değerleri, 95PPU bandının gözlenen verilerin yaklaşık %58’ini kapsadığını ve band genişliğinin orta düzeyde olduğunu göstermektedir. Literatürde SUFI-2 yaklaşımında p-factor değerinin yükseltilmesi, özellikle uç akım değerlerinin daha iyi kapsanması için parametre aralıklarının gözden geçirilmesi önerilmektedir. Buna ek olarak meteorolojik girdilerin alan temsiliyetinin artırılması ve gözlem verilerindeki olası ölçüm hatalarının değerlendirilmesi, belirsizlik bandının iyileştirilmesine katkı sağlayabilir (Abbaspour, 2015).

Bu nedenle modelin genel performansı kabul edilebilir olmakla birlikte, belirsizlik bandının özellikle taşkın ve zirve akımları temsil etme kapasitesinin iyileştirilebileceği bir alan olarak değerlendirilmiştir.

4.3.2 Su bütçesi bileşenlerinin benzer havzalarla kıyaslanması

SWAT model çıktılarından hesaplanan su bütçesi bileşenleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Bartın-Art Havzası için yıllık ortalama yağış 1027.9 mm, su verimi (WYLD) 960,7 mm ve yüzey akışı (SURQ) 158,1 mm olarak hesaplanmıştır. Aynı tabloda karşılaştırma amacıyla verilen diğer havzada yağış 1105,3 mm, su verimi 939,0 mm ve yüzey akışı 166,7 mm’dir. WYLD/yagış oranının havza için 0,93 ve alt havza için 0,85 düzeyinde olması, modelin toplam akış bileşenlerini yüksek bir su verimi olarak dere ağına aktardığını göstermektedir. Öte yandan perkolasyon bileşeninin (havza: 404,4 mm, alt havza: 426,8 mm) görece yüksek olması, akımın önemli bir bölümünün yeraltı suyu ve veya yanal akış katkısıyla taşınabileceğine işaret etmektedir.

Ancak Tablo 4.2’de “ET” sütununda verilen değerlerin (59,5-64,1 mm) nemli ve ormanlık havzalarda beklenen yıllık evapotranspirasyon büyüklükleriyle karşılaştırıldığında oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, ilgili sütundaki değerin yağış ile

WYLD arasındaki farktan türetilmiş olmasıdır. WYLD, alt havza ölçeğinde dere ağına aktarılan su verimini temsil eder ve su bütçesinin tek başına kapanmasını sağlamaz. Toprak nemi depolanması, yeraltı suyu beslenimi, derin akifer kayıpları ve diğer akış bileşenleri dikkate alınmadan yalnızca “yağış - WYLD” farkını doğrudan gerçek evapotranspirasyon (AET) olarak yorumlamak fiziksel açıdan yanıltıcı olabilir. Bu nedenle savunulabilir bir su bütçesi tartışması için SWAT çıktılarındaki gerçek ET veya AET değişkeninin doğrudan raporlanması ve su bütçesinin tüm ana bileşenlerle yeniden kapatılması önerilmektedir.

Literatürde benzer ölçekteki havzalarda yağışın akışa ve evapotranspirasyona dönüşüm oranlarının daha dengeli dağıldığı görülmektedir. Örneğin Briak vd. (2016) çalışmaları havzada yağışın yaklaşık %60'ının akışa ve %35'inin evapotranspirasyona dönüştüğünü raporlamıştır. Kumar vd. (2017) ise bir başka havzada yağışın %38'inin akışa, %44,6'sının evapotranspirasyona gittiğini belirtmektedir. Bu tez kapsamında Tablo 4.2'den türetilen WYLD/yağış oranının %85-%93 bandında kalması, söz konusu çalışmalara kıyasla belirgin ölçüde yüksektir. Bu bulgu, havzanın hidrolojik özellikleri ile model kurulumunda kullanılan veri ve yöntemlerin su bütçesi bileşenlerine etkisinin birlikte ve eleştirel biçimde değerlendirilmesini gerektirir.

Bu çerçevede iklim değişikliği altında yönetim açısından iki kritik başlık öne çıkmaktadır. Bunlar kısa süreli taşkın potansiyeli (pik akımlar) ile yaz sonu ve sonbahar dönemindeki düşük akımlardır. Model çıktıları, hangi dönemlerde depolama ve taşkın azaltma önlemlerinin, hangi dönemlerde ise su tahsisi ve ekosistem su ihtiyacı yönetiminin daha hassas olabileceğine işaret etmektedir. Sonuçlar, bölgesel hidrolojik çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde havzanın iklim kaynaklı değişkenliğe öncelikle yağış rejimi ve ET talebi üzerinden tepki vermesinin beklendiğini göstermektedir.

4.3.3 İklim değişikliği bağlamında bulguların literatürle kıyaslanması

Çalışmanın bulguları literatürdeki benzer havza uygulamalarıyla genel olarak uyumludur. Buna karşın performans göstergeleri, su bütçesi oranları ve pik akımların temsili gibi başlıklarda farklılıklar görülebilir. Bu farklılıkların olası nedenleri aşağıdaki gruplarda toplanabilir:

Bölgesel nedenler: Havzanın topografyası, jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri, orman örtüsü ve toprak geçirgenliği yüzey akışı ile taban akımı dengesini ve akımın mevsimselliğini belirleyen temel unsurlardır. Bu nedenle aynı model yapısı kullanılsa bile farklı havzalarda benzer yağış koşullarına farklı akım tepkileri görülebilir.

Veri kaynaklı nedenler: Meteoroloji istasyonlarının konumu ve yoğunluğu, yağışın uzaysal değişkenliğini temsil etme gücü, eksik verilerin tamamlanma yöntemi ve akım gözlemlerindeki ölçüm ile ölçekleme hataları sonuçları doğrudan etkiler. Özellikle kısa süreli şiddetli yağışlarda pik akımların yakalanması veri kalitesine ve zaman çözünürlüğüne duyarlıdır.

Yöntemsel nedenler: HRU eşikleri, toprak ve bitki parametrelerinin seçimi, kanal özelliklerinin tanımlanması ve kalibrasyonda hangi istatistiklerin hedeflendiği literatürdeki farklılıkların önemli bir kısmını açıklar. SUFI-2 gibi yöntemlerde parametre aralıklarının genişliği ve hassas parametrelerin seçimi belirsizlik bandını ve performansın görünümünü değiştirebilir.

Süreç temsili: Kar süreçleri, toprak suyu ve ET etkileşimi ile pik akım üreten hızlı akış yolları (yüzey ve yanal akış) bazı havzalarda daha baskın olabilir. Bu süreçlerin modeldeki temsil düzeyi özellikle taşkın tepe değerleri ve yaz düşük akımları gibi uç koşullardaki performansı belirler.

4.4 Model Sınırlılıkları ve Belirsizlikler

Bu bölümde sunulan sınırlılıklar ve belirsizlik kaynakları, modelin kalibrasyon ve doğrulama sonuçları ile su bütçesi bulguları yorumlanırken dikkate alınmalıdır. Belirsizlikler temel olarak girdi verilerinin kalitesi ve alanı temsil gücü, parametrelerin tanımlanabilirliği, modelin yapısal varsayımları ve çalışmanın kapsamına ilişkin kabullerden kaynaklanmaktadır.

4.4.1 Girdi verisi belirsizlikleri (meteoroloji, akım gözlemi, alan farkı/ölçekleme)

Model çıktılarının güvenilirliği, meteorolojik ve hidrolojik girdilerin havzayı ne ölçüde temsil ettiğine doğrudan bağlıdır. Bartın–Art alt havzasında yağış ve sıcaklık gözlemleri sınırlı sayıdaki istasyondan derlenmiş; nispi nem, rüzgâr hızı ve güneşlenme gibi değişkenler ise SWAT’ın hava üreticisi (WGEN) yaklaşımıyla tamamlanmıştır. WGEN veri eksikliklerini pratik biçimde giderebilse de, özellikle kısa süreli şiddetli yağışların ve yükseltiye bağlı mikro-iklim farklılıklarının temsilinde sınırlılıklar gösterebilir. Bu durum, hem pik akımların hem de evapotranspirasyon bileşenlerinin belirsizliğini artırabilir.

Akım verileri açısından bakıldığında, gözlemsel debiler ölçüm hatası, rating eğrisi belirsizliği ve veri kesintileri nedeniyle hata içerebilir. Ayrıca istasyonun resmî drenaj alanı ile modelin temsil ettiği alan arasındaki uyumsuzluk da önemli bir belirsizlik kaynağıdır. Bu çalışmada Darören Akım Gözlem İstasyonu’nun drenaj alanı (130 km²) ile SWAT modelinde temsil edilen alan (137 km²) arasındaki fark nedeniyle gözlem akımı $130/137 \approx 0,95$ katsayısı ile ölçeklenmiştir. Buna karşın PBIAS değerinin negatif kalması, yalnızca alan farkının değil; yağışın mekânsal temsili, süreç parametreleri veya gözlem belirsizliği gibi ek hata kaynaklarının da devrede olabileceğine işaret etmektedir.

Mekânsal girdiler (DEM, arazi kullanımı ve toprak haritaları) de belirsizlik taşır. DEM çözünürlüğü akarsu ağı üretimini, eğim sınıflarını ve alt havza sınırlarını etkileyerek yüzey akışı üretimini ve akımın yönlendirilmesini değiştirebilir. Arazi kullanım sınıflarının doğruluğu ve yönetim uygulamalarının temsili, CN2 başta olmak üzere yüzey akışı parametreleri üzerinde belirleyicidir. Toprak haritasındaki sınıflandırma hataları veya toprak derinliği ile hidrolik iletkenlik gibi varsayımlar ise infiltrasyon–perkolasyon ayrımını etkileyerek yeraltı suyu katkısını belirsizleştirebilir.

Bu tür girdi belirsizlikleri kalibrasyonda parametre ayarlamalarıyla kısmen “maskelenebilir”; ancak bu durum modelin fiziksel doğruluğunun garanti edildiği anlamına gelmez. Bu nedenle meteorolojik girdilerin alan temsiliyeti (mümkünse alternatif istasyon/ızgara verileri ile), akım gözlemlerinin kalite kontrolü ve veri boşluklarının raporlanması ile alan uyumsuzluğuna uygulanan ölçekleme yaklaşımı, sonuçlara etkisiyle birlikte açık biçimde sunulmalıdır.

4.4.2 Parametre belirsizliği (SUFI-2: 95PPU, p-factor, r-factor)

SWAT-CUP'ta SUFI-2 yaklaşımı, parametre belirsizliğini çıktı belirsizliğine dönüştürerek model sonuçlarını tek bir simülasyon eğrisi yerine 95PPU (95% Prediction Uncertainty) belirsizlik bandı ile sunar. 95PPU bandının başarımı iki gösterge ile izlenir: p-factor, gözlemlerin 95PPU bandı içinde kalan oranını; r-factor ise band genişliğinin gözlemlerin standart sapmasına göre normalize edilmiş lşn ifade eder. Genel olarak p-factor'ın yüksek, r-factor'ın düşük olması hedeflenir.

Bu çalışmada kalibrasyon döneminde p-factor=0,58 ve r-factor=0,75 elde edilmiştir. Bu sonuç, belirsizlik bandının orta genişlikte olmasına karşın gözlemlerin yalnızca %58'inin band içinde kaldığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle bandın dar tutulması keskinlik (sharpness) açısından avantaj sağlarken, kapsama oranını (coverage) sınırlamıştır. Kapsama oranını artırmak çoğu durumda bandın genişlemesine ve r-factor değerinin yükselmesine yol açacağından, SUFI-2 uygulamalarında kapsama–keskinlik dengesi kritik bir tasarım tercihidir.

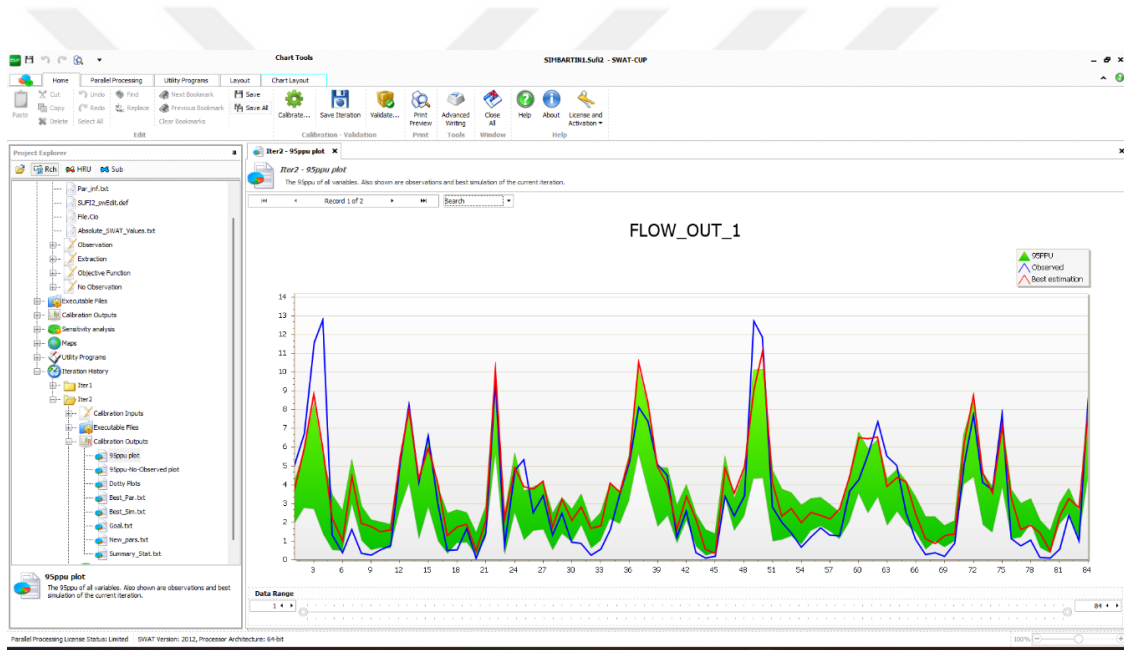
Validasyon döneminde p-factor ve r-factor hesaplanmamıştır; çünkü validasyon, kalibrasyonda belirlenen en iyi parametre seti sabit tutularak tekil simülasyon koşusu şeklinde yrtlmştir. Bu nedenle validasyon performansı yorumlanırken NSE, R² ve KGE gibi metriklerin yanında, kalibrasyonda elde edilen 95PPU kapsamasının temsil ettiği belirsizlik düzeyi de göz önünde bulundurulmalıdır.

Parametre belirsizliğinin temel nedenlerinden biri eşdeğerlilik (equifinality). Farklı parametre kombinasyonları benzer hidroğraflar üretebilir; örneğin yüzey akışını etkileyen CN2 ile taban akımı tepkisini temsil eden ALPHA_BF gibi parametreler belirli koşullarda birbirini kısmen dengeleyebilir. Bu nedenle kalibrasyonda seçilen “en iyi” parametre seti tek ve mutlak doğru çözüm olarak sunulmamalı; gözlemlere uyum sağlayan olası çözümler kümesinden biri olarak değerlendirilmelidir.

Belirsizliği azaltmaya yönelik olarak:

- 1) Hassasiyet analizine dayanarak parametre aralıklarının fiziksel gerekçelerle daraltılması

- 2) Mümkinse çok amaçlı kalibrasyon uygulanarak akımla birlikte ET ve kar örtüsü gibi ek değişkenlerin de dikkate alınması
- 3) Pik akımları daha doğru değerlendirmek için günlük zaman adımında ek performans testlerinin yapılması
- 4) SUFI-2 iterasyon sayısının artırılması ve parametre aralıklarının kontrollü biçimde güncellenmesi
- 5) Performansın yalnızca tüm dönem için değil, mevsimsel olarak da raporlanması önerilir.



Şekil 4.9: 95PPU belirsizlik bandı ile gözlenen ve simüle akımın karşılaştırılması

4.4.3 Model yapısal sınırlılıkları (özellikle pik akımlar/kar süreçleri vb.)

Parametre belirsizliği azaltıldığında bile SWAT modelinin süreç temsiline ilişkin yapısal sınırlılıklar sonuçların doğruluğunu sınırlayabilir. Özellikle eğimli ve tepki süresi kısa havzalarda kısa süreli ve şiddetli yağışların oluşturduğu taşkınlar yüzey akışının hızla gelişmesine neden olur. Bu davranış günlük ve alt günlük ölçeklerde daha belirgindir. Aylık ölçekte kalibre edilen bir model toplam hacmi kabul edilebilir düzeyde yakalasa bile pik

akımları sistematik olarak zayıf temsil edebilir. Bu durum modelin kurgu ve zaman ölçeğiyle uyumlu bir beklenti olarak ele alınmalıdır.

Kar süreçleri de yapısal hassasiyetin yüksek olduğu alanlardan biridir. SWATta kar birikimi ve erimesi genellikle derece gün yaklaşımı ile temsil edilir. SFTMP ve SMTMP gibi eşik parametreler akımın zamanlamasını doğrudan etkiler. Bu çalışmada da gözlenen ve simüle edilen akımlar arasındaki farkların özellikle kış ve ilkbahar başında daha belirgin olabildiği görülmüştür. Bazı yıllarda örnek olarak 2013 ve 2017 yıllarında kar erimesi sürecinin temsili simüle edilen hidrografi belirgin biçimde etkileyebilmiştir. Kar süreçlerinin yeterince doğru temsil edilememesi ileride yapılacak iklim değerlendirmelerinde akım rejiminde kayma gibi yorumların belirsizliğini artırır.

Modelin yapısal sınırlılıkları su bütçesi bileşenlerinin fiziksel tutarlılığı açısından da kritik olabilir. Örneğin evapotranspirasyonun beklenenden düşük hesaplanması meteorolojik girdiler PET hesaplama yöntemi ya da raporlanan çıktı değişkeninin hatalı seçilmesi gibi nedenlerle ortaya çıkabilir. Bu tür durumlarda yalnızca akım uyumuna bakarak modelin doğru çalıştığı sonucuna varmak savunulabilir değildir. Su bütçesi kapanımı ve temel bileşenlerin fiziksel aralıklara uygunluğu mutlaka kontrol edilmelidir.

Bu nedenle bu sınırlılıklar model hatası gibi sunulmamalı bulguların hangi koşullarda ve hangi amaçla yorumlanabileceğini belirleyen sınırlar olarak açıkça yazılmalıdır. Pik akımlar kar süreçleri ve evapotranspirasyon bileşenindeki belirsizlikler bu tezde elde edilen sonuçların kullanılabilirlik alanını doğrudan tanımlar.

4.4.4 Kapsam, varsayımlar ve dışsal belirsizlikler (LULC sabit kabulü vb.)

Bu çalışma belirli kabuller altında yürütülmüştür. Arazi kullanım/örtüsü (LULC) ve yönetim uygulamalarının analiz dönemi boyunca sabit kabul edilmesi, su çekimleri/rezervuar işletmesi gibi insan etkilerinin modele dahil edilmemesi ve toprak-bitki parametrelerinin mevcut veri setleriyle temsil edilmesi bu kabullerin başlıcalarıdır. Bu çerçevede, model çıktılarının “mutlak doğruluk” iddiasıyla değil; hangi koşullarda geçerli olduğunun açıklandığı bir belirsizlik bağlamında yorumlanmasını gerektirir.

Belirsizlikler üç ana grupta öne çıkmaktadır. (i) Meteorolojik girdiler: İstasyonların havzayı temsil gücü, ölçüm hataları ve eksik verilerin tamamlanma biçimi; özellikle şiddetli yağışlar ve yükseltiye bağlı yağış değişimi gibi süreçlerde sonuçları belirgin biçimde etkileyebilir. WGEN ile türetilen değişkenler veri sürekliliği sağlasa da, mikroiklim farklılıklarını ve ekstrem olayları tam temsil edememe riski taşır. (ii) Hidrolojik gözlemler: Debi ölçüm hataları, rating eğrisi belirsizliği ve veri kesintileri; ayrıca istasyon drenaj alanı ile model drenaj alanı arasındaki uyumsuzluk sonuçların yorumunu doğrudan etkileyen başlıklardır.

Bu çalışmada alan uyumsuzluğunu azaltmak için ölçekleme yapılmış olsa da, kalan yanlışlık yalnızca alan farkıyla açıklanamayabilir. (iii) Uzamsal veriler: DEM çözünürlüğü, akarsu ağı üretimi, LULC sınıflandırma doğruluğu ve toprak haritasındaki belirsizlikler HRU oluşumunu ve özellikle yüzey akışı parametrelerini (ör. CN2) etkileyerek çıktılarda ek belirsizlik üretebilir.

4.4.5 Belirsizliği azaltmaya yönelik kısa öneri köprüsü

Yukarıda özetlenen belirsizlik kaynakları modelin değerini düşürmek için değil; bulguların hangi koşullarda güçlü, hangi koşullarda temkinli okunması gerektiğini netleştirmek için verilmiştir. Bu tez kapsamında uygulanabilir kısa iyileştirme adımları şunlardır:

Meteorolojik temsilin güçlendirilmesi: Havza içi/yüksek kesim temsili için ek istasyon ya da yüksek çözünürlüklü ızgara veriyle karşılaştırma yapılmalı; WGEN ile türetilen değişkenlerin (nem, rüzgâr, güneşlenme) çıktılara etkisi kısa bir duyarlılık testiyle gösterilmelidir.

Akım verisinin kalite kontrolünün şeffaf raporlanması: Eksik günler, sıra dışı değerler ve rating eğrisi güncellemeleri açıkça özetlenmeli; alan ölçekleme katsayısının PBIAS üzerindeki etkisi ölçekleme öncesi/sonrası karşılaştırmayla netleştirilmelidir.

Su bütçesi tutarlılığı kontrolü: ET ve WYLD gibi ana bileşenler fiziksel aralıklarla karşılaştırılmalı; mümkünse SWAT çıktısından ET/AET değişkeni doğrudan raporlanarak bağımsız ET ürünleriyle çapraz kontrol yapılmalıdır.

Kalibrasyon stratejisinin genişletilmesi: Aylık kalibrasyona ek olarak seçilmiş taşkın dönemlerinde günlük ölçekte kontrol yapılmalı; kar süreçlerine duyarlı parametreler mevsimsel performansa göre ayrıca sınanmalıdır.

Belirsizlik raporlamasının standardize edilmesi: 95PPU bandı ile birlikte p-factor ve r-factor değerleri tutarlı formatta sunulmalı; senaryo çalışmasına geçilecekse parametre ve iklim belirsizlikleri birlikte ele alınmalıdır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde Bartın-Arıt alt havzası için kurulan SWAT2012 tabanlı hidrolojik modelin kalibrasyon ve doğrulama performansı ile su bütçesi çıktıları birlikte özetlenmiştir. Bulguların iklim değişikliği açısından ne anlama gelebileceği değerlendirilmiş, ayrıca modelin ileride senaryo analizlerinde kullanılabilmesi için gerekli hazırlık adımlarına ve çalışmanın temel katkılarına yer verilmiştir.

5.1 Genel Sonuçlar

Bu bölümde çalışma kapsamında elde edilen temel bulgular kısaca özetlenmekte; kurulan SWAT modelinin güvenilirliği, akım rejimi ve su bütçesi bileşenlerine ilişkin çıkarımlar ile iklim değişikliğine duyarlılık açısından genel sonuçlar sunulmaktadır.

5.1.1 Model performansı ve doğrulama özeti

Bu tez kapsamında Bartın-Arıt alt havzası için QSWAT arayüzü ile SWAT2012 modeli kurulmuş, gözlemsel akım verileri kullanılarak SWAT-CUP ortamında SUFI-2 algoritması ile parametre kalibrasyonu yapılmıştır. Model 2010-2023 dönemini kapsayacak şekilde günlük zaman adımında çalıştırılmış, 2010-2011 yılları ısınma periyodu olarak değerlendirme dışında tutulmuştur. Aylık akım verileri üzerinden 2012-2018 dönemi kalibrasyon, 2019-2023 dönemi doğrulama olarak ele alınmıştır.

Gözlem istasyonunun drenaj alanı ile modelin temsil ettiği havza alanı arasındaki farkın sonuçlara sistematik etki yapmaması için alan ölçeklemesi uygulanmıştır. Bu kapsamda Darıören AGİ drenaj alanı 130 km², model drenaj alanı 137,2 km² olduğundan gözlenen akım verilerine alan oranına dayalı 0,95 ölçekleme katsayısı uygulanmıştır.

Tablo 4.1’de verilen performans ölçütleri, modelin aylık akım değişkenliğini genel olarak yakalayabildiğini göstermektedir. Kalibrasyon döneminde NSE=0,79 ve R²=0,84 elde edilirken doğrulama döneminde NSE=0,78 ve R²=0,83 hesaplanmıştır. KGE değerleri kalibrasyonda 0,71, doğrulamada 0,70 olup RSR değerleri sırasıyla 0,46 ve 0,47’dir. Buna karşılık PBIAS değerlerinin kalibrasyonda -16,9 ve doğrulamada -20,9 olması, modelin

akım hacmini sistematik biçimde yüksek tahmin etme eğilimine işaret etmektedir. Bu nedenle, özellikle yıllık su bütçesi bileşenlerinin mutlak değerleri yorumlanırken bu yanlılığın etkisi dikkate alınmalıdır.

SUFI-2 belirsizlik analizinde kalibrasyon dönemi için $p\text{-factor}=0,58$ ve $r\text{-factor}=0,75$ bulunmuştur. Bu sonuç, gözlemlerin yaklaşık yüzde 58'inin 95PPU belirsizlik bandı içinde kaldığını ve band genişliğinin orta düzeyde olduğunu göstermektedir. Tezde doğrulama dönemi için $p\text{-factor}$ ve $r\text{-factor}$ göstergeleri ayrıca raporlanmamıştır. Savunulabilirlik açısından, doğrulama dönemi için de bu göstergelerin üretilmesi ve Tablo 4.9 ile aynı formatta sunulması faydalı olacaktır.

Genel olarak model, aylık akım dinamiklerini temsil etmek için kullanılabilir bir temel sağlamaktadır. Ancak negatif PBIAS ve sınırlı $p\text{-factor}$ değeri, girdi verileri, süreç temsili ve parametre setinin özellikle akım hacmi ve uç değerler açısından geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. İleride yapılacak çalışmalarda çok amaçlı kalibrasyonun (hacim, pik ve düşük akım bileşenleri birlikte), farklı istasyon ve veri kaynaklarının çapraz kontrolünün ve meteorolojik girdilerdeki belirsizliğin azaltılmasının önceliklendirilmesi önerilir.

5.1.2 Su bütçesi bulgularının özeti

2012-2023 simülasyon dönemi için havza ölçeğinde yıllık ortalama yağış 1.028,5 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Aynı dönemde çıkış akımı 964.0 mm/yıl olup model çıktısına göre gerçek buharlaşma-terleme 59.8 mm/yıl düzeyindedir. Akım bileşenleri ayrımında yüzey akışı (SURQ) ortalama 280.2 mm/yıl, yeraltı suyu akışı (GW_Q) 509.8 mm/yıl ve toplam su verimi (WYLD) 960.3 mm/yıl olarak elde edilmiştir. Q/P oranı 0.942 ve BFI (GW_Q/WYLD) 0.533 olup, akımın önemli bir kısmının yeraltı suyu katkısıyla beslendiğine işaret etmektedir.

Bununla birlikte, havzada akım bileşenlerinin göreceli dağılımı anlamlı bir çerçeve sunsa da PET ve ET büyüklükleri meteorolojik enerji girdilerine ve kullanılan hesaplama yaklaşımına duyarlıdır. Bu nedenle ET'nin mutlak büyüklüğü bağımsız verilerle doğrulanmadıkça su bütçesi yorumları daha çok bileşenlerin göreceli katkıları üzerinden yapılmalıdır.

5.1.3 İklim değışikliğı bağlamında çıkarımlar ve senaryolaştırmaya hazırlık

Bu çalışma kapsamında kurulan ve doğrulanan SWAT modeli, Bartın-Arit alt havzasının güncel iklim koşullarındaki hidrolojik işleyişini sayısal olarak ortaya koymuştur. Kalibrasyon ve doğrulama sonuçları ile su bütçesi bileşenleri birlikte değerlendirildiğinde, havzada akım oluşumunu belirleyen başlıca süreçler; yağışın mevsimselliği ve şiddeti, toprak nemi dinamikleri, yeraltı suyu katkısı (taban akımı) ve evapotranspirasyondur. Bu çalışma iklim değışikliğı senaryosu koşulları içermemekle birlikte, modelde baskın süreçlerin doğası ve literatürde raporlanan eğilimler dikkate alındığında iki tür etkilenim öne çıkmaktadır: (i) yağışın mevsimsel dağılımı ve şiddetindeki olası değışimler, özellikle kış/ilkbahar dönemlerinde yüzey akışı bileşeni üzerinden taşkın duyarlılığını artırabilir; (ii) sıcaklık artışıyla artan evapotranspirasyon talebi, yaz aylarında toprak neminin azalmasına ve düşük akım koşullarının uzamasına neden olabilir. Bu nedenle model çıktılarının aylık ölçekte dahi mevsimsel ayrıştırma ile değerlendirilmesi, taşkın azaltma önlemleri için kış–ilkbahar dönemine; su tahsisi ve ekosistem su gereksinimi için ise yaz sonu–sonbahar düşük akım dönemine odaklanması önerilir. Senaryo çalışmalarına geçilmeden önce meteorolojik girdi temsiline güçlendirilmesi, ET ve toprak suyu süreçlerinin gözlemsel/uzaktan algılama verileriyle çapraz kontrolü ve belirsizliğin düzenli raporlanması kritik önkoşullardır.

5.1.4 Çalışmanın ana katkısı

Bu çalışmanın temel katkısı, Bartın–Arit alt havzası için SWAT2012 tabanlı bütünleşik bir modelleme iş akışının kurulması, kalibrasyon–doğrulama–belirsizlik adımlarının aynı çerçevede yürütülmesi ve sürecin denetlenebilir şekilde raporlanmasıdır. Havza sınırlandırma ve alt havza/HRU üretimi, meteorolojik ve hidrolojik veri setlerinin entegrasyonu, Darıören Akım Gözlem İstasyonu verileriyle aylık akım kalibrasyon–doğrulama kurgusu ve SUFI-2 tabanlı parametre optimizasyonu birlikte ele alınmıştır. Model performansı NSE, R², KGE, RSR ve PBIAS gibi birden fazla ölçüt ile değerlendirilmiş; belirsizlik yaklaşımı kapsamında p-factor ve r-factor göstergeleri raporlanarak sonuçlar tek bir “en iyi” çözüme indirgenmeden sunulmuştur. Ayrıca su bütçesi bileşenleri ayrıştırılarak havzanın hidrolojik davranışı sayısal olarak özetlenmiş ve özellikle ET’nin düşük tahmini ile akım hacmindeki yanlılık gibi süreç/denge tutarsızlıkları açık biçimde ortaya konmuştur. Bu bulgular, modelin senaryo analizleri veya yönetim amaçlı mutlak karar destek

uygulamalarında kullanılmadan önce su bütçesi tutarlılığı ve girdi verisi temsilinin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

5.2 Yönetmel/Pratik Öneriler

Bartın ili Arıt alt havzası için kurulan SWAT2012 modeli, Darıören Akım Gözlem İstasyonu çıkışındaki aylık akım verileri kullanılarak 2012–2018 döneminde kalibre edilmiş ve 2019–2023 döneminde doğrulanmıştır. Kalibrasyon için $NSE=0,79$ ve $R^2=0,84$; doğrulama için $NSE=0,78$ ve $R^2=0,83$ elde edilmiştir. Buna karşın PBIAS'ın kalibrasyonda -16,9 ve doğrulamada -20,9 olması, akım hacminde sistematik yüksek tahmin eğilimine işaret etmektedir. SUFI-2 belirsizlik analizi kapsamında p-factor=0,58 ve r-factor=0,75 bulunmuş; 95PPU bandı gözlemlerin yaklaşık %58'ini kapsamıştır. Bu nedenle model çıktıları havza planlaması ve mevsimsel risk taraması için koşullu bir karar desteği sağlayabilir; ancak mutlak tahsis/tasarım kararlarında belirsizlik bandı, emniyet katsayısı ve/veya bias düzeltimi birlikte kullanılmalıdır.

Bu bölümde sunulan yönetmel ve pratik öneriler, yukarıdaki performans ve belirsizlik çerçevesi esas alınarak oluşturulmuştur. Model çıktıları özellikle aylık ve mevsimsel ölçekte havza planlaması ve risk taraması için uygundur. Günlük taşkın piklerinin gerçek zamana yakın tahmini gibi operasyonel uygulamalar için ise daha yüksek zaman çözünürlüğünde meteorolojik ve akım verisi ile ek modelleme çalışmaları gereklidir.

5.2.1 Havza su yönetimi ve planlama açısından öneriler

SWAT2012 modeli aylık ölçekte su tahsisi, çevresel akım gereksinimi ve su kaynakları planlaması için karar destek çıktıları üretebilir. Ancak modelin akımı yüksek tahmin etme eğilimi nedeniyle planlama kararları tek bir deterministik sonuca dayandırılmamalı, belirsizlik bandı ve güvenlik payı yaklaşımı benimsenmelidir.

Su tahsisi ve çevresel akım hedefleri: Aylık ve mevsimsel su tahsisi planlarında model çıktıları kullanılabilir. Ancak nihai tahsis ve tasarım kararlarında emniyet katsayısı veya yanlılık düzeltimi (bias düzeltimi) uygulanmalıdır.

Su bütçesi temelli planlama: Yüzey akışı, taban akımı ve yeraltı suyu katkısı birlikte yorumlanarak hangi dönemlerde su arzının kritikleştiği ve hangi süreçlerin baskın olduğu belirlenebilir. Bu çerçevede kurak dönem yönetimi ve ekosistem gereksinimleri için yol gösterir.

Arazi örtüsü ve arazi kullanımı planlaması: Orman kesimi, kentleşme veya tarım uygulamalarındaki değişimlerin akım rejimine olası etkileri senaryo analizleriyle test edilerek havza koruma planlarına girdi sağlanabilir. Böylece üst havza müdahalelerinin taşkın ve düşük akım üzerindeki etkileri erken aşamada görülebilir.

Altyapı ve yatırım ön değerlendirmesi: Küçük ölçekli depolama, iletim hattı iyileştirmeleri ve doğal su tutma önlemlerinin aylık su dengesi üzerindeki olası etkileri ön fizibilite düzeyinde karşılaştırılabilir.

Uyarlanabilir planlama yaklaşımı: Model güncellenebilir bir sistem olarak ele alınmalıdır. Yeni meteoroloji ve akım verileri ile arazi kullanımındaki değişimler modele işlendiğinde çıktılar güncellenmelidir. Uygulamada 3-5 yılda bir yeniden kalibrasyon, havza planlarının güncel kalmasına katkı sağlar.

5.2.2 Taşkın/kuraklık risk yönetimi açısından öneriler

Kalibrasyon aylık ölçekte yapıldığı için modelin günlük taşkın piklerinin zamanlamasını ve büyüklüğünü operasyonel doğrulukta temsil etmesi beklenmemelidir. Bu nedenle modelin taşkın yönetimindeki temel kullanım alanı, gerçek zamanlı erken uyarıdan ziyade mevsimsel risk taraması ve risk azaltıcı önlemlerin karşılaştırılmasıdır.

Taşkın riski için planlama: Hızlı yüzey akışını azaltan ve infiltrasyonu artıran uygulamalar (orman rehabilitasyonu, riparyan tampon şeritler, erozyon kontrolü, küçük tutucu tersiyer yapılar) taşkın riskini azaltmada önceliklendirilebilir. Model bu önlemlerin uzun dönemli akım rejimi üzerindeki olası etkilerini kıyaslamak için kullanılabilir.

Taşkın yataklarının yönetimi: Dere koridorlarında yapılaşmayı sınırlayan arazi kullanım kararları, yapısal önlemler kadar etkilidir. Hidrograf ve su bütçesi çıktıları taşkın

dönemlerinin mevsimsel zamanlamasını ve kritik alt havza katkılarını belirlemeye yardımcı olabilir.

Kuraklık ve düşük akım yönetimi: Düşük akım dönemlerinde su arzını güvence altına almak için küçük ölçekli depolama seçenekleri, kayıp-kaçak azaltımı, verimli sulama uygulamaları ve talep yönetimi birlikte ele alınmalıdır. Taban akımını destekleyen üst havza uygulamaları kuraklık kırılganlığını azaltır.

Çoklu risk bakışı: Aynı önlem hem taşkın hem kuraklık riskini azaltabilir. Bu nedenle yüzey akışını azaltma ile taban akımını güçlendirme dengesine göre birlikte tasarım yapılmalıdır. Model bu dengeyi aylık ölçekte test etmek için uygun bir başlangıç platformudur.

Yüksek kotlu kesimler ve kar süreçleri: Havzanın yüksek kotlu alanlarında kar birikimi ve erimesi akım rejimini etkileyebileceğinden, özellikle ilkbahar taşkın riski ve düşük akım izleme çalışmalarında kar-sıcaklık süreçlerinin daha iyi temsil edilmesi hedeflenmelidir.

5.2.3 İzleme ağı ve veri yönetimi önerileri

Model belirsizliklerinin önemli bir bölümü meteorolojik girdi ve akım gözlemi gibi temel veri katmanlarının kapsamı ve kalitesiyle ilişkilidir. Bu nedenle izleme ağı ve veri yönetimi altyapısının güçlendirilmesi, hem modelin güncellenmesi hem de havza yönetim kararlarının isabeti için kritiktir.

Meteoroloji istasyon ağının güçlendirilmesi: Yağışın mekansal değişkenliğinin yüksek olabileceği havza koşullarında, özellikle topografyanın yağışı farklılaştırdığı kesimlere ek istasyonlar kurulmalıdır. Güneşlenme, nem ve rüzgar gibi değişkenlerin ölçümü, Penman-Monteith yaklaşımında WXGEN ile üretilen ikincil değişken belirsizliğini azaltır ve ET ile su bütçesi yorumlarını güçlendirir.

Akım gözlem ağının iyileştirilmesi: Dariören Akım Gözlem İstasyonu başta olmak üzere istasyonlarda düzenli bakım, ölçüm kalibrasyonu ve güncel debi-seviye eğrisi yönetimi sağlanmalıdır. Verilerdeki eksik veya aykırı değerler için standart kalite kontrol prosedürleri işletilmelidir.

Alan ve ölçek uyumunun netleştirilmesi: Model drenaj alanı ile istasyon drenaj alanı arasındaki küçük farklar bile hacim yanlışlığına yol açabileceğinden, havza sınırı ve istasyon alanı bilgileri güncel haritalar ve resmi metadata ile doğrulanmalıdır.

Veri standardizasyonu ve otomasyon: Meteoroloji ve akım verilerinin tek format, birim ve zaman damgası standardında tutulması model güncellemelerinde veri hazırlama hatalarını azaltır. Kurumlar arası veri paylaşımında metadata, koordinat sistemi ve kalite bayrakları içeren bir arşiv yapısı önerilir.

Tekrarlanabilirlik ve sürüm kontrolü: SWAT proje dosyaları, kalibrasyon senaryoları ve girdi veri setleri için sürüm kontrol yaklaşımı benimsenmeli, farklı yıllarda yapılan güncellemeler karşılaştırılabilir ve geriye dönük denetlenebilir hale getirilmelidir.

5.3 Bilimsel/Teknik Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

Aylık ölçekte elde edilen performans göstergeleri ($NSE \approx 0,78-0,79$; $R^2 \approx 0,83-0,84$; $KGE \approx 0,70-0,71$) akımın istatistiksel temsilinin genel olarak yeterli olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte su bütçesi çıktılarında yıllık ET'nin 50,5–68,8 mm aralığında kalması ve Q/P oranının 0,85–1,02 gibi yüksek değerlere ulaşması, su dengesi ve değişken tanımları açısından kritik bir tutarlılık kontrolü gerektirmektedir (Tablo 4.2). Bu nedenle izleyen çalışmalarda meteorolojik girdilerin ve ET hesaplamasının doğrulanması, alan/ölçek uyumunun netleştirilmesi ve kalibrasyonda su bütçesi kısıtlarının kullanılması önceliklidir.

5.3.1 Veri geliştirme önerileri (iklim girdileri, ET, kar süreçleri vb.)

Model sonuçlarının savunulabilirliği büyük ölçüde girdi verilerinin doğruluğuna ve temsiline bağlıdır. Bu çalışmada meteorolojik veri kısıtları ve bazı değişkenlerin (rüzgar, nem, güneşlenme) doğrudan gözlenememesi nedeniyle SWAT'ın iç üreticilerinin (WXGEN) devreye girmesi olasıdır. Su bütçesinde ET'nin çok düşük kalması, özellikle iklim girdileri ve ET hesaplaması için aşağıdaki iyileştirmelerin önemli olduğunu göstermektedir:

Meteorolojik gözlem ağıının güçlendirilmesi: Havza içi ve çevresi istasyon sayısı artırılmalı, özellikle yağışın yükseltiye bağlı değişimini temsil edecek şekilde farklı kotlarda istasyonlar dahil edilmelidir. İstasyon verileri için kalite kontrol (uç değer, tutarsızlık, süreksizlik) ve eksik doldurma adımları yöntemsel olarak raporlanmalıdır.

Mekansal temsili iyileştirme: Yağış ve sıcaklık için kullanılan mekansal atama veya enterpolasyon seçeneğinin (en yakın istasyon, IDW gibi) duyarlılığı test edilmeli, mümkünse ızgara meteorolojik veri setleri veya yeniden analiz ürünleriyle karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmalıdır.

Tam meteorolojik değişken seti ile PET/ET hesaplamasının doğrulanması: Penman-Monteith gibi fiziksel temelli yöntemlerin güvenilir çalışması için güneş radyasyonu, rüzgar hızı ve nem gibi girdiler gözlemsel veya güvenilir türetilmiş kaynaklardan sağlanmalıdır. Mevcut koşullarda bu değişkenler üretiliyorsa, üretim yöntemi ve belirsizliği açıkça belirtilmelidir.

ET çıktısının doğru değişkenle raporlanması: SWAT çıktı dosyalarında raporlanan ET'nin (gerçek ET/AET mi, potansiyel ET/PET mi) değişken tanımı üzerinden netleştirilmesi gerekir. Ayrıca su bütçesinde ET'nin fiziksel olarak makul olup olmadığı bölgesel iklim ve bitki örtüsü uyumuyla kontrol edilmelidir.

Bitki örtüsü ve yönetim verilerinin güncellenmesi: Arazi kullanımı sınıfları güncellenmeli, orman, mera ve tarım alanlarının yönetim takvimi (ekim-hasat, gübreleme, toprak işleme) ve bitki parametreleri (LAI gelişimi, kök derinliği gibi) yerel koşulları temsil edecek biçimde iyileştirilmelidir. ET'nin hassas olduğu bitki büyüme parametreleri mümkünse yerel bilgi veya raporlarla desteklenmelidir.

Toprak fiziksel özelliklerinin yerel veriyle desteklenmesi: SOL_AWC ve SOL_K gibi su tutma ve iletkenliği kontrol eden parametreler için yerel toprak analizleri mümkünse kullanılmalı ya da daha yüksek çözünürlüklü toprak haritalarıyla sınıf bazlı genellemeler azaltılmalıdır.

Kar süreçleri ve yükselti etkisinin temsili: Havzada kış döneminde kar birikimi ve erimesi önemliyse, yükselti bantları ve sıcaklık eşiklerinin (kar-yağmur ayrımı, erime başlangıcı) daha ayrıntılı ele alınması ve kar süreçlerine duyarlı parametrelerin mevsimsel performansa göre yeniden değerlendirilmesi önerilir.

Kar süreçlerine ilişkin varsayımlar (erime başlangıcı vb.), kar örtüsü ve sıcaklık profilleri gibi gözlemsel verilerle desteklenmeli ve kar parametreleri ayrıca kalibre edilmelidir.

Akım gözlemi meta verisinin güçlendirilmesi: Debi verisinin ölçüm yöntemleri, seviye-debi bağıntısının (rating curve) geçerliliği, veri boşlukları ve olası düzeltme/çekim etkileri varsa açık biçimde belgelenmelidir. Bu bilgiler, model-gözlem farklarının kaynağını ayırt etmek için gereklidir.

5.3.2 Model/kalibrasyon geliştirmeleri ve belirsizlik analizi

Mevcut çalışma, aylık akımın istatistiksel uyumunu (NSE, R^2 , KGE vb.) güçlendirmiştir. Buna karşın negatif PBIAS değerleri ve su bütçesinde ET anomali (Tablo 4.2), bazı süreçlerin temsiline dair belirsizliğin devam ettiğini göstermektedir. Bu nedenle, izleyen aşamada model kalibrasyon stratejisi ile belirsizlik analizi birlikte ele alınmalı ve su bütçesi tutarlılığı daha görünür şekilde kontrol edilmelidir. Bu amaçla aşağıdaki geliştirmeler önerilir:

- Çok amaçlı (multi-objective) kalibrasyon: Tek bir uygunluk metriğine odaklanmak yerine, yüksek akımlar, düşük akımlar ve mevsimselliği birlikte temsil eden bir hedef yaklaşımı kullanılmalıdır. Örneğin NSE ve logNSE birlikte, KGE bileşenleri ve PBIAS ile desteklenerek sadece “ortalama akım uyumu” değil, akım rejimi daha dengeli biçimde kalibre edilebilir.

- Su bütçesi kısıtı ile kalibrasyon: Kalibrasyon sürecine, su bütçesi bileşenlerinin fiziksel tutarlılığını (ET/P ve Q/P oranlarının bölgesel beklentilerle uyumu gibi) denetleyen ek kısıtlar dahil edilmelidir. Aylık akım uyumu yüksek olsa bile su bütçesi gerçekçi değilse, sonuçların savunulabilirliği zayıflar.

- Parametre aralıklarının fiziksel gerekçeyle daraltılması veya genişletilmesi: Bu çalışmada kalibre edilen CN2, ALPHA_BF, GWQMN, GW_DELAY, SOL_K, CH_N2, CH_K2, ESCO, CANMX, SLSUBBSN gibi parametrelerin (Tablo 3.7) aralıkları, literatürle birlikte havza koşulları (toprak, arazi kullanımı, jeoloji) dikkate alınarak yeniden gözden geçirilmelidir. Çok geniş aralıklar eşdeğer (equifinal) çözümleri artırabilir, aşırı dar aralıklar ise gerçekçi çözümü dışarıda bırakabilir.
- Kalibrasyon iterasyonu ve örneklem büyüklüğünün artırılması: SUFI-2’de yeterli sayıda iterasyon ve örneklem büyüklüğü, belirsizlik bandının (95PPU) daha kararlı hale gelmesi için kritiktir. Yakınsama davranışı (p-factor ve r-factor) iterasyon bazında raporlanarak sürecin şeffaflığı artırılmalıdır.
- Zaman ölçeği duyarlılığı: Model aylık ölçekte iyi performans verebilir. Ancak taşkın pikleri ve kısa süreli kurak dönemler için günlük ölçekte performans ayrıca test edilmelidir. Günlük veriler uygunsa, günlük kalibrasyon/validasyon ek bir savunma katmanı sağlar.
- Pik akım ve taban akım ayrıştırması: Hidrografi oluşturan yüzey akışı ve yeraltı suyu katkısı ayrı değerlendirilmelidir. Gerekirse baseflow ayrıştırma (ör. dijital filtre) ile gözlemsel taban akım bileşeni çıkarılarak ALPHA_BF ve GW parametreleri daha anlamlı biçimde kalibre edilebilir.
- Yapısal sınırlılıkların azaltılması: Havzada hidrolik yapılar (regülatör, baraj, su çekimi) söz konusuysa ve modelde temsil edilmiyorsa, bu durum akım sapmalarını artırabilir. Bu nedenle, varsa işletme verileriyle birlikte model kurulumu güncellenmelidir.
- Belirsizlik kaynaklarının ayrıştırılması: Parametre belirsizliğine ek olarak meteorolojik girdi belirsizliği ve model yapısal belirsizliği mümkün olduğunca tartışılmalı, belirsizlik bandını hangi bileşenlerin daha çok etkilediği (yağış hatası mı, ET mi, yeraltı suyu yapısı mı) açıkça ortaya konmalıdır.

5.3.3 Gelecek alışmalar

Bu tezde odak, güncel iklim koşullarında aylık akım simlasyonu ve su bütçesi bileşenlerinin değerlendirilmesi olmuştur. Modelin karar destek aracı olarak kullanımını genişletmek ve belirsizlikleri daha iyi yönetmek için aşağıdaki çalışmalar gelecekte önceliklendirilebilir:

- İklim değişikliği senaryoları ile hidrolojik rejim analizi: GCM/RCM tabanlı senaryo setleri (oklu model yaklaşımı), bias düzeltme ve olası aşağı ölçekleme adımlarıyla havzaya uyarlanmalı, akım ortalama düzeyi, mevsimsel dağılım ve uç değerlerin (taşkın/kuraklık) nasıl değişebileceği değerlendirilmelidir. Bu analizlerde senaryo belirsizliği ayrıca raporlanmalıdır.
- Arazi kullanımı/örtüsü değişimi ve yönetim senaryoları: Ormansızlaşma, yeniden ormanlaştırma, tarımsal desen değişimi veya kentsel genişleme gibi LULC senaryolarının su bütçesi ve akım rejimine etkisi incelenmelidir. Mümkünse dinamik (zamana bağlı) LULC yaklaşımı değerlendirilmelidir.
- Ekstrem olay odaklı değerlendirme: Aylık ölçekte iyi uyum, kısa süreli piklerin doğru temsil edildiği anlamına gelmez. Günlük (hatta saatlik veri varsa) taşkın hidrografları, düşük akım sürekli liği ve kuraklık indisleri üzerinden ekstrem odaklı analizler yapılmalıdır.
- Sediment ve su kalitesi bileşenlerinin modellenmesi: lm verileri temin edildiğinde, askıda katı madde, besin maddeleri (N-P) veya kirlilik yükleri için SWAT'ın ilgili modülleri modele dahil edilebilir. Böylece havza yönetimi açısından daha kapsamlı öneriler üretilir.
- Yeraltı suyu–yüzey suyu etkileşiminin ayrıntılandırılması: Havzanın jeolojik/hidrojeolojik özellikleri uygunsa, yeraltı suyu sistemini daha ayrıntılı temsil eden entegre yaklaşımlar veya ilave gözlemlerle (piezometre, kaynak debileri) taban akım süreçleri güçlendirilebilir.
- Uzaktan algılama ve arazi gözlemleri ile çapraz doğrulama: Kar rts, bitki örtüsü dinamikleri ve ET gibi süreçler uydu ürünleri veya arazi ölçümleriyle doğrulanarak modelin sadece akım uyumu değil, süreç tutarlılığı da test edilebilir.

- Tekrarlanabilirlik ve açık iş akışı: Model girdileri, kalibrasyon ayarları ve analiz adımlarının (QGIS proje dosyaları, SWAT-CUP ayarları, kullanılan istasyon listeleri) sistematik biçimde arşivlenmesi, çalışmanın denetlenebilirliğini ve yeniden üretilebilirliğini artıracaktır.



KAYNAKLAR

- Abghari, H., ve Erfanian, M. (2023). Quantifying the effects of climate change on Simineh River discharge in Lake Urmia basin. *International Journal of New Findings in Engineering, Science and Technology*, 1(1): 15-25.
- Ahmad, S., Shazil, M. S., Mahmood, S. A., Abdullah-Al-Wadud, M., ve Tariq, A. (2025). Quantifying Climate Change Impacts on Hydrological Dynamics and Sedimentation Using GIS and SWAT+ Modelling. *Hydrological Processes*, 39(2): e70082.
- Addis, H. K., Strohmeier, S., Ziadat, F., Melaku, N. D., ve Klik, A. (2016). Modeling streamflow and sediment using SWAT in the Ethiopian Highlands. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(5): 51-66.
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., ve Kato, T. (2021). A Review of SWAT model application in Africa. *Water*, 13(9): 1313.
- Brighenti, T. M., Bonumá, N. B., Grison, F., Mota, A. D. A., Kobiyama, M., ve Chaffe, P. L. B. (2019). Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. *Ecological Engineering*, 127: 103-113.
- Briak, H., Moussadek, R., Aboumaria, K., ve Mrabet, R. (2016). Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3): 177-185.
- Buakhao, W., ve Kangrang, A. (2016). DEM resolution impact on the estimation of the physical characteristics of watersheds by using SWAT. *Advances in Civil Engineering*, 2016: 8180158.
- Cibin, R., Trybula, E., Chaubey, I., Brouder, S. M., ve Volenec, J. J. (2016). Watershed-scale impacts of bioenergy crops on hydrology and water quality using improved SWAT model. *GCB Bioenergy*, 8(4): 837-848.
- Çolak, M. A. (2022). Evaluating the Use of Satellite Optical Data for Mapping and Monitoring Lakes and Their Salinity in Konya and Burdur Closed Basins Subjected to *Increasing Water Abstraction and Climate Change* (Master's thesis, Middle East Technical University (Turkey)).
- Demir, M. S., ve Muratoglu, A. (2025). Improving water footprint assessment in agriculture: A high-resolution SWAT model study of the Ceyhan Basin, Türkiye. *Ecohydrology ve Hydrobiology*: 100664.
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., ve Arnold, J. (2016). Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling ve Software*, 85: 129-138.
- Dolgorsuren, S. E., Ishgaldan, B., Myagmartseren, P., Kumar, P., Meraj, G., Singh, S. K., ... ve Almazroui, M. (2024). Hydrological responses to climate change and land-use

- dynamics in central Asia's semi-arid regions: An SWAT model analysis of the Tuul River Basin. *Earth Systems and Environment*, 8(2): 297-323.
- Duru, U., Arabi, M., ve Wohl, E. E. (2017). Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: A case study of Ankara River basin, Turkey. *Physical Geography*, 38(6): 555-579.
- Garcia, X., Estrada, L., Llorente, O., ve Acuña, V. (2024). Assessing small hydropower viability in water-scarce regions: environmental flow and climate change impacts using a SWAT+ based tool. *Environmental Sciences Europe*, 36(1): 126.
- Gull, S., Ahangar, M. A., ve Dar, A. M. (2017). Prediction of stream flow and sediment yield of Lolab watershed using SWAT model. *Hydrology: Current Research*, 8(1): 1-9.
- Hoang, B. H., Hien, H. N., Dinh, N. T. N., Thao, N. A., Ha, P. T. T., Kandasamy, J., ve Nguyen, T. V. (2019). Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrology ve Hydrobiology*, 19(2): 210-223.
- Khorashadi Zadeh, F., Nossent, J., Sarrazin, F., Pianosi, F., Van Griensven, A., Wagener, T., ve Bauwens, W. (2017). Comparison of variance-based and moment-independent global sensitivity analysis approaches by application to the SWAT model. *Environmental Modelling ve Software*, 91: 210-222.
- Kışlıoğlu, H. E., Bekaroğlu, Ş. Ş., ve Dadaser-Celik, F. (2024). GÜNEY MARMARA HAVZASI'NDA SWAT+ MODELİ İLE HİDROLOJİK MODELLEME. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 12(3): 531-543.
- Kumar, N., Singh, S. K., Srivastava, P. K., ve Narsimlu, B. (2017). SWAT Model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction of the Tons River Basin, India, using Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) algorithm. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(1): 30.
- Kumar, S., et al. (2017). Application of SWAT in an Indian river basin for modeling runoff, sediment and water balance. *Environmental Earth Sciences*, 76(1): 3.
- Malagó, A., Bouraoui, F., Vigiak, O., Grizzetti, B., ve Pastori, M. (2017). Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Science of the Total Environment*, 603-604: 196-218.
- Melaku, N. D., Renschler, C. S., Holzmann, H., Strohmeier, S., Bayu, W., Zucca, C., Ziadat, F., ve Klik, A. (2018). Prediction of soil and water conservation structure impacts on runoff and erosion processes using SWAT model in the northern Ethiopian highlands. *Journal of Soils and Sediments*, 18: 1743–1755.
- Mengistu, A. G., van Rensburg, L. D., ve Woyessa, Y. E. (2019). Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25: 100621.

- Nazari-Sharabian, M., Taheriyoun, M., ve Karakouzian, M. (2019). Sensitivity analysis of the DEM resolution and effective parameters of runoff yield in the SWAT model: a case study. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 68(8): 651-665.
- Noori, N., ve Kalin, L. (2016). Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 533: 141-151.
- Oo, H. T., Zin, W. W., ve Kyi, C. C. T. (2020). Analysis of streamflow response to changing climate conditions using SWAT model. *Civil Engineering Journal*, 6(2): 194-209.
- Özdemir, A., Volk, M., Strauch, M., ve Witing, F. (2024). The Effects of Climate Change on Streamflow, Nitrogen Loads, and Crop Yields in the Gordes Dam Basin, Turkey. *Water*, 16(10): 1371.
- Park, Y., Bailey, R. T., Lee, J., Premm, M., ve T. (2018). QSWATMOD: A QGIS-based graphical user interface for integrated SWAT and MODFLOW modeling. *Environmental Modelling ve Software*, 108: 91-102.
- Peker, İ. B., ve 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.
- Pignotti, G., Rathjens, H., Cibir, R., Chaubey, I., ve Crawford, M. (2017). Comparative analysis of HRU and grid-based SWAT models. *Water*, 9(4): 272.
- Poudel, D. D., ve Srinivasan, R. (2024, September). Opportunities and Challenges of SWAT for Modelling Coastal Environmental Processes. *International Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Conference and Workshop*, Lima, Peru.
- Shivhare, N., Dikshit, P. K. S., ve Dwivedi, S. B. (2018). A comparison of SWAT model calibration techniques for hydrological modeling in the *Ganga River watershed*. *Engineering*, 4(5): 643–652.
- Sinnathamby, S., Douglas-Mankin, K. R., ve Craige, C. (2017). Field-scale calibration of crop-yield parameters in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Agricultural Water Management*, 180: 61-69.
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Srinivasan, R., Arnold, J. G., ve Yang, X. (2019). A review of SWAT studies in Southeast Asia: Applications, challenges and future directions. *Water*, 11(5): 914.
- Tanksali, A., ve Soraganvi, V. S. (2021). Assessment of impacts of land use/land cover changes upstream of a dam in a semi-arid watershed using QSWAT. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4): 2391-2406.
- Teshager, A. D., Gassman, P. W., Secchi, S., Schoof, J. T., ve Misgna, G. (2016). Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (SWAT): A

- comparison of a field-explicit with a HRU-based representation. *Environmental Modelling ve Software*, 82: 264-277.
- Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., ve Chiogna, G. (2016). Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). *Science of the Total Environment*, 573: 66-82.
- Wijaya, H., Wulandari, D. A., ve Suripin, S. Evaluation of Soil Water Assessment Tool (SWAT) Model Accuracy in *Estimating Erosion and Sedimentation Rates in the Sutami Reservoir Watershed*. *TEKNIK*, 46(2): 114-122.
- Yang, X., Liu, Q., He, Y., Luo, X., ve Zhang, X. (2016). Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30: 959-972.
- Yılmaz, M., Alp, H., Tosunoğlu, F., Aşıkoğlu, Ö. L., ve Eriş, E. (2022). Impact of climate change on meteorological and hydrological droughts for Upper Coruh Basin, Turkey. *Natural Hazards*, 112(2): 1039-1063.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Hamed MARDANSHAHI

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : İnşaat Mühendisliği
Yüksek Lisans Öğrenimi : İnşaat Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce, farsça, Türkçe
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar :
Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar :

