

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TOPRAK VE SU DEĞERLENDİRME ARACI (SWAT) KULLANILARAK
MANAVGAT NEHİR HAVZASININ HİDROLOJİK MODELLENMESİ**

Abdul Hasib HALİMİ

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

MAYIS 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TOPRAK VE SU DEĞERLENDİRME ARACI (SWAT) KULLANILARAK
MANAVGAT NEHİR HAVZASININ HİDROLOJİK MODELLENMESİ**

Abdul Hasib HALİMİ

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

MAYIS 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOPRAK VE SU DEĞERLENDİRME ARACI (SWAT) KULLANILARAK
MANAVGAT NEHİR HAVZASININ HİDROLOJİK MODELLENMESİ

Abdul Hasib HALİMİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

MAYIS 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOPRAK VE SU DEĞERLENDİRME ARACI (SWAT) KULLANILARAK
MANAVGAT NEHİR HAVZASININ HİDROLOJİK MODELLENMESİ

Abdul Hasib HALİMİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 21/05/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Dursun BÜYÜKTAŞ (Danışman)

Prof. Dr. Ulaş ŞENYİĞİT

Prof. Dr. Mahmut ÇETİN

Doç. Dr. Cihan KARACA

Dr. Öğr. Üyesi Gülçin Ece ASLAN

ÖZET

TOPRAK VE SU DEĞERLENDİRME ARACI (SWAT) KULLANILARAK MANAVGAT NEHİR HAVZASININ HİDROLOJİK MODELLENMESİ

Abdul Hasib HALİMİ

Doktora Tezi, Tarımsal Yapılar ve Sulama

Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Dursun BÜYÜKTAŞ

Mayıs 2025; 133 sayfa

Manavgat Nehri Havzası Akdeniz bölgesinde yer almakta olup, iklim değişikliği ve artan su talebinin etkilediği yarı kurak bölgelerin hidrolojik dinamiklerini anlamak için önemli bir vaka çalışması niteliğindedir. Bu çalışmada, havza içindeki hidrolojik süreçlerin modellenmesi ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için güvenilir bilgi sağlanması amacıyla Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) kullanılmıştır. Çalışmada, Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden (MGM) günlük meteorolojik veriler ve Devlet Su İşleri (DSİ) Antalya 13. Bölge Müdürlüğü'nden sağlanan hidrolojik veriler kullanılmıştır. Buna ek olarak, NASA Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) (30 x 30), FAO toprak haritaları ve ESRI arazi kullanım/örtü haritaları (10 x 10) gibi yüksek çözünürlüklü mekansal veriler, ArcSWAT modeline entegre edilmiştir. Modelin otomatik kalibrasyonu ve doğrulaması için RSWAT paketi kullanılmış olup Sinanhoca'da üst havza için güçlü model performansı elde edilmiştir ($R^2 \geq 0.81$, $Pbias = \% 9.02$, $p\text{-Faktör} \geq 0.65$, $r\text{-faktör} \leq 1.4$). Ancak, model, aşağı havzanın ana çıkış noktasında akış miktarını düşük tahmin etmiştir ($R^2 = 0.48$, $Pbias = \% -32$, $p\text{-faktör} = 0.45$, $r\text{-faktör} = 1.12$). Bunun temel nedeni, karmaşık karstik sistemlerin, büyük ölçekli rezervuar etkilerinin ve üst komşu nehir havzalarından gelen baz akımların modellenmesindeki zorluklardan kaynaklanmıştır. Arazi kullanım/örtü (LULC) değişimi analizi, 2017-2022 yılları arasında orman alanında % 32 oranında azalma ve mera alanında % 25 artış olduğunu göstermektedir. Kısa vadeli hidrolojik etkiler sınırlı düzeyde olmakla birlikte, havzanın karmaşık topografik yapısı ve karstik oluşumları hidrolojik döngü ile yüzey ve yer altı suyu etkileşimleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kapsamında yapılan projeksiyonlar, sıcaklık ve yağış rejimlerinde dalgalanmalar öngörmektedir. Yağış miktarının ilkbahar ve kış aylarında (-0.55 mm) azalması, sonbaharda ise (1.79 mm) artması beklenmektedir. Sıcaklığın ise genel olarak artış göstermesi öngörülmekle birlikte, sonbahar aylarında hafif bir düşüş yaşanabileceği tahmin edilmektedir (0.04 °C). Gelecekteki akış tahminleri, her iki senaryoya göre de üst ve alt havzada kış mevsiminde akışın artacağını (sırasıyla 14.394 m³/s ve 21.079 m³/s) göstermektedir; ancak RCP8.5 senaryosu altında ilkbahar ve yaz aylarında akışta belirgin bir düşüş yaşanabileceği öngörülmektedir. Çalışmada ayrıca, havza alanının % 8.86'sını etkileyen son orman yangınlarının hidrolojik süreçler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akış rejiminde belirgin değişiklikler gözlemlenmemekle birlikte, yer altı suyu dinamiklerinde hafif farklılıklar tespit edilmiştir. Manavgat Nehri Havzasına yönelik gerçekleştirilen bu kapsamlı hidrolojik analiz, iklim değişikliği ve antropojenik baskılar altında su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için önemli bilgiler sunmaktadır. Çalışma, karstik Akdeniz havzalarında karmaşık hidrolojik süreçleri simüle etmede SWAT modelinin

yetkinliklerini ve sınırlamalarını ortaya koyarak, Manavgat Nehir Havzası'nda daha etkili su kaynakları planlama ve yönetim stratejilerine katkı sağlamaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Akdeniz iklimi, Arazi örtüsü değışimi, İklim değışikliği, Karstik havza, Nehir Akışı, Orman yangını, SWAT modeli

JÜRİ: Prof. Dr. Dursun BÜYÜKTAŞ

Prof. Dr. Ulaş ŞENYİĞİT

Prof. Dr. Mahmut ÇETİN

Doç. Dr. Cihan KARACA

Dr. Öğr. Üyesi Gülçin Ece ASLAN



ABSTRACT

HYDROLOGICAL MODELING OF THE MANAVGAT RIVER BASIN USING SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT)

Abdul Hasib HALIMI

PhD Thesis in Department of Agricultural Structures and Irrigation

Supervisor: Prof. Dr. Dursun BÜYÜKTAŞ

May 2025; 133 pages

The Manavgat River Basin is located in the Mediterranean region and serves as a significant case study for understanding the hydrological dynamics of semi-arid regions affected by climate change and increasing water demand. In this study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used to model hydrological processes within the basin and provide reliable information for sustainable water resources management. The study used daily meteorological data from the General Directorate of Meteorological Affairs (MGM) and hydrological data provided by the State Hydraulic Works (DSİ) Antalya 13th Regional Directorate. Additionally, high-resolution spatial data such as the NASA Digital Elevation Model (DEM) (30 x 30), FAO soil maps, and ESRI land use/cover maps (10 x 10) were integrated into the ArcSWAT model. The RSWAT package was used for automatic calibration and validation of the model, and strong model performance was achieved for the upper basin in Sinanhoca ($R^2 \geq 0.81$, $Pbias = 9.02\%$, $p\text{-Factor} \geq 0.65$, $r\text{-factor} \leq 1.4$). However, the model underestimated the flow rate at the main outlet of the lower basin ($R^2 = 0.48$, $Pbias = -32\%$, $p\text{-Factor} = 0.45$, $r\text{-factor} = 1.12$), revealing challenges in modeling complex karstic systems, large-scale reservoir effects, and groundwater flow from upper neighboring river basins. Land use/cover (LULC) change analysis shows a 32 % decrease in forest area and a 25 % increase in grassland area between 2017 and 2022. Although short-term hydrological effects are limited, the basin's complex topography and karstic formations play a significant role in the hydrological cycle and surface and groundwater interactions. Projections under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios predict fluctuations in temperature and precipitation regimes. Precipitation is expected to decrease in spring and winter months (-0.55 mm) and increase in autumn (1.79 mm). Temperature is generally expected to increase, although a slight decrease may occur in autumn (0.04°C). Future flow predictions show an increase in flow in the winter season in both the upper and lower basins (14.394 m³/s and 21.079 m³/s, respectively) according to both scenarios; however, a significant decrease in flow may occur in spring and summer months under the RCP8.5 scenario. The study also examined the effects of recent forest fires, which affected 8.86% of the basin area, on hydrological processes. Although no significant changes were observed in the flow regime, slight differences were detected in groundwater dynamics. This comprehensive hydrological analysis of the Manavgat River Basin provides important information for the sustainable management of water resources under climate change and anthropogenic pressures. The study contributes to more effective water resources planning and management strategies in the Manavgat River Basin by revealing the capabilities and limitations of the SWAT model in simulating complex hydrological processes in karstic Mediterranean basins.

KEYWORDS: Climate change, Forest fire, Karstic basin, Land use change, Mediterranean climate, Streamflow, SWAT model

COMMITTEE: Prof. Dr. Dursun BÜYÜKTAŞ

Prof. Dr. Ulaş ŞENYİĞİT

Prof. Dr. Mahmut ÇETİN

Assoc. Prof. Dr. Cihan KARACA

Assist. Prof. Dr. Gülçin Ece ASLAN



ÖNSÖZ

Antalya'nın önemli su kaynaklarından biri olan Manavgat Nehri Havzası, hızlı kentleşme, tarımsal genişleme, ormansızlaşma ve iklim değişikliği dahil olmak üzere karmaşık faktörlerin etkileşimi sonucunda giderek artan çevresel baskılara maruz kalmaktadır. Bu baskılar, su kaynaklarının sürdürülebilirliği, ekosistem sağlığı ve bölgedeki sosyo-ekonomik yapıya doğrudan etki ederek su sisteminin hassas dengesini tehdit etmektedir. Bu çalışma, yarı-karstik bir hidrolojik sisteme sahip olan Manavgat Nehri Havzası'nın dinamiklerini daha iyi anlamak amacıyla, bilimsel olarak kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılan Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) ile kapsamlı bir modelleme çalışması gerçekleştirmektedir. Bu kapsamda çalışma, SWAT modeli kullanılarak Manavgat Nehri Havzası için detaylı bir hidrolojik model kurulmaktadır. Fiziksel tabanlı ve mekansal olarak dağıtılmış yetenekleriyle SWAT, yüzey akışı, yer altı suyu akışı, sediment taşınımı ve besin döngüsü dahil olmak üzere karmaşık hidrolojik süreçleri simüle etmek için güçlü bir platform sağlamaktadır. Modelin, iklim verileri, arazi kullanım haritaları, toprak özellikleri ve topografik bilgileri entegre edebilme kapasitesi, Manavgat Havzası'nın heterojen yapısının analiz edilmesi açısından son derece uygundur.

Bu araştırmanın temel motivasyonu, Manavgat Nehri Havzası'nın uzun vadeli sürdürülebilirliğine yönelik artan endişelerden kaynaklanmaktadır. Önceki çalışmalar havza hidrolojisinin çeşitli yönleri hakkında değerli bilgiler sunmuş olsa da SWAT modelinin gelişmiş yeteneklerinden yararlanarak gerçekleştirilen kapsamlı ve entegre bir modelleme yaklaşımı eksikliği göze çarpmaktadır. Bu çalışma, su kaynakları yönetimi, etki değerlendirmesi ve gelecek senaryoların planlanması sürecine katkı sağlayabilecek detaylı ve kalibre edilmiş bir SWAT modeli kurulumu amaçlayarak bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Model geliştirme süreci, hem teknik hem de bilimsel açıdan önemli zorlukları içermiştir. Havzanın temel hidrolojik süreçlerinin anlaşılması, modelin titizlikle kalibre edilmesi ve doğrulanması, ayrıca kapsamlı veri toplama ve işleme süreçleri büyük bir hassasiyetle yürütülmüştür. Havzanın topografik çeşitliliği, karmaşık arazi kullanım yapısı ve farklı iklim koşulları gibi özelliklerinin doğru bir şekilde temsil edilmesine büyük önem verilmiştir. Ancak, bazı bölgelerde veri eksikliği gibi zorluklarla karşılaşmış olup, özellikle rezervuar ve kaynak verileri gibi bilgilerin sürekli olarak toplanması ve izlenmesi gerekliliği vurgulanmaktadır. Bu çalışma, modelleme süreci, elde edilen bulgular ve bunların potansiyel etkileri hakkında açık ve kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Önsözün ardından gelen bölümler, çalışma alanının temel özellikleri, SWAT modelinin kurulumu, kalibrasyon ve doğrulama yöntemleri, simülasyon sonuçlarının analizi, iklim değişikliğinin hidrolojik süreçlere etkileri, arazi kullanımı/örtüsü değişimlerinin değerlendirilmesi ve orman yangınlarının hidrolojik sisteme olan etkileri gibi konuları ayrıntılı olarak ele almaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, Manavgat Nehri Havzası'nın hidrolojik dinamikleri hakkında önemli bilgiler sağlamanın yanı sıra, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine yönelik bilinçli karar alma süreçleri için bilimsel bir temel sunmaktadır. Bu araştırmanın gerçekleştirilmesine katkıda bulunan birçok kişi ve kuruma şükranlarımı sunarım. Öncelikle, araştırmam boyunca bana yalnızca teknik değil, aynı zamanda akademik ve manevi destek sağlayan danışmanım Prof. Dr. Dursun Büyüktaş'a içten minnettarlığımı ifade etmek isterim. Saygıdeğer jüri üyeleri Prof. Dr. Ulaş ŞENYİĞİT, Prof. Dr. Mahmut ÇETİN, Doç. Dr. Cihan KARACA, Dr. Öğr. Üyesi. Gülçin Ece ASLAN, tüm öğretim

üyelerime ve Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi'nin değerli idari personeline derin saygılarımı sunarım. Eğitimimin finansmanı ve yaşam giderlerimi karşılayan Türkiye Cumhuriyeti Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB) burs programına teşekkür ederim. Araştırmam süresince karşılaştığım zorluklar karşısında bana destek olan aileme ve arkadaşlarıma minnettarım. Ayrıca, çalışmada kullanılan değerli verileri sağlayan Devlet Su İşleri (DSİ) ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) teşekkür ederim. Son olarak, bu çalışmanın Manavgat Nehri Havzası'nın hidrolojik süreçlerine dair bilimsel anlayışa katkıda bulunmasını ve dolayısıyla bu önemli su kaynağının gelecek nesiller için sürdürülebilir yönetimine katkı sağlamasını temenni ediyorum.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Araştırma Probleminin Açıklaması.....	2
1.3. Amaç/Gerekçe	3
2. KAYNAK TARAMASI.....	5
2.1. Hidrolojik Döngüye Genel Bakış	5
2.2. Hidrolojik Su Bütçesi Eşitliği ve Bileşenleri	5
2.2.1. Yağış.....	6
2.2.2. Toprak nemi	7
2.2.3. Evapotranspirasyon	8
2.2.4. Yüzey akış	8
2.2.5. Derine süzülme.....	9
2.3. Havzanın Hidrolojik Modellenmesi	10
2.4. Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT)	12
2.4.1. SWAT geçmişi ve teorileri.....	13
2.5. SWAT Aracı Kullanılarak Havza Sisteminin Modellemesi.....	19
2.5.1. Farklı arazi kullanımı/arazi örtüsü senaryoları altında SWAT modelini kullanan nehir akışı simülasyon çalışmaları.....	20
2.5.2. Farklı iklim değişikliği senaryoları altında akarsu akış hacminin simüle edilmesinde SWAT modelinin uygulanması.....	22
2.5.3. Karstik özelliklerden etkilenen ve rezervuar tarafından işletilen havzalarda akarsu akış hacminin simüle edilmesinde SWAT modelinin uygulanması.	23
3. MATERYAL VE METOT	26
3.1. Çalışma Alanı.....	26
3.1.1. Çalışma alanının jeolojisi	27
3.2. SWAT Giriş Verileri	27

3.2.1. Çalışma alanının jeolojisi	28
3.2.2. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli (DEM) kullanılarak topoğrafyası	28
3.2.3. Çalışma alanının toprak haritası	29
3.2.4. Deşarj ve meteorolojik veriler	30
3.3. Hidrolojik Gelecek Senaryosu Verileri	31
3.3.1. Küresel dolaşım modeli (GCM) ve bölgesel iklim modeli (RCM) verileri	31
3.3.2. İstatistiksel Ölçek Küçültme Modeli (Statistical Downscaling Model, SDSM) aracını kullanarak gelecekteki iklim senaryolarının projeksiyonu	32
3.3.3. Gelecek senaryoların trend analizi	33
3.4. Arazi Kullanımı/Örtüsü Senaryoları	34
3.5. Çalışma alanının orman yangını etki değerlendirmesi	35
3.6. Otomatik Kalite Kontrol Sistemi (SaQC)	36
3.7. SWAT Model Kurulumu, Hassasiyet Analizi ve Kalibrasyonunun Açıklaması	37
3.7.1. SWAT modeli kurulumu	37
3.7.2. Havza sınırlarının belirlenmesi	38
3.7.3. Hidrolojik tepki birimi (HRU) analizi	40
3.7.4. Giriş tablolarını yazma	41
3.7.5. SWAT Simülasyonu	42
3.7.6. SWAT'ın Değerlendirilmesi	44
3.7.7. Duyarlılık Analizi	45
3.7.8. Optimizasyon ve belirsizlik analizi	47
3.7.9. Model Performans kriterleri	47
3.8. Veri Kalite Güvencesi ve Kontrolü	48
3.8.1. Format testleri	49
3.8.2. Eksiksizlik testleri	49
3.8.3. Tutarlılık testleri	49
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1. Çalışma Alanının Topografik Yapısı	51
4.2. Çalışma Alanının Arazi Kullanımı ve Bitki Örtüsü	52
4.3. Çalışma Alanının Toprak Tanımı	53
4.4. Veri Kalite Kontrolü	54

4.5. Çalışma Alanının Meteorolojik Genel Durumu	58
4.6. Parametrelerin Belirlenmesi ve Duyarlılık Analizi	60
4.7. Akarsu Akışı Kalibrasyonu ve Doğrulaması	64
4.8. Arazi Kullanımı/Örtüsü Değişimi (LULC) Etki Değerlendirmesi	71
4.8.1. 2017, 2019 ve 2022 yılları arasındaki arazi kullanımı/örtüsü değişimi	71
4.8.2. Arazi kullanımı/örtüsü değişiminin havza hidrolojik süreci üzerindeki etkisi	72
4.9. Gelecekteki yağış ve sıcaklık senaryolarının projeksiyonu	76
4.9.1. Akseki meteoroloji istasyonunda yağış ve sıcaklık projeksiyonunun değerlendirilmesi	77
4.9.2. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda yağış ve sıcaklık projeksiyonlarının değerlendirilmesi	80
4.9.3. RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında olabilecek iklim değişikliğinin akış üzerine etkileri	84
5. SONUÇLAR	93
6. KAYNAKLAR	96
7. EKLER	112
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) Kullanılarak Manavgat Nehir Havzasının Hidrolojik Modellenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

21/05/2025

Abdul Hasib HALIMI

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ak	: Akseki İklim İstasyonu
AkC	: Akseki Cevizli İklim İstasyonu
API	: Uygulama Programlama Arayüzü
CBC	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CMIP	: Birlikte Modellenmiş Model Karşılaştırma Projesi
DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli
dNBR	: Farklılaştırılmış Normalize Yangın Oranı
DSMW	: Dünya Sayısal Toprak Haritası
GCM	: Küresel Dolaşım Modeli
HRU	: Hidrolojik Tepki Birimi
IPCC	: Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli
LULC	: Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü
MBOS	: Manavgat Beşkonak Orman Sahasında İklim İstasyonu
MOS	: Manavgat Orman Sahasında İklim İstasyonu
MTOS	:Manavgat Taşağıl Orman Sahasında İklim İstasyonu
NBR	: Normalize Yangın Oranı
OMGI	: Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu
PET	: Potansiyel Evapotranspirasyon
RCM	: Bölgesel İklim Modeli
RCP	: Temsili Konsantrasyon Yolu
SaQC	: Otomatik Kalite Kontrol Sistemi
SDSM	: İstatistiksel Ölçek İndirme Modeli
STRM	: Uydu Radarı Topografya Görevi
UA	: Uzaktan Algılama
UTM	: Evrensel Enine Merkator

Tezde ondalık ayıraç olarak nokta (.) kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Hidrolojik döngü (Anonim 1).....	5
Şekil 3.1. Çalışma alanı	26
Şekil 3.2. Çalışma alanının Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)	29
Şekil 3.3. Çalışma alanının toprak haritası	30
Şekil 3.4. SWAT modeli kurulumu, simülasyonu ve çıktı değerlendirmesi için adımlar.....	37
Şekil 3.5. Havza sınırlarının belirlenmesi.....	39
Şekil 3.6. Manavgat nehri havzası'ndaki barajlar	40
Şekil 3.7. Manavgat meteoroloji istasyonunun meteorolojik arama çizelgesi.....	42
Şekil 3.8. Model simülasyonu penceresi	43
Şekil 3.9. R-SWAT paketinin grafik arayüzü.....	44
Şekil 4.1. Çalışma alanının yükselti haritası	51
Şekil 4.2. Çalışma alanının arazi kullanım ve bitki örtüsü haritası	52
Şekil 4.3. Manavgat şelale istasyonunda nehir akışı.....	55
Şekil 4.4. Manavgat istasyonuna ait yağış verilerinin Çift Kütle Eğrisi.....	56
Şekil 4.5. Akseki istasyonuna ait yağış verilerinin Çift Kütle Eğrisi	56
Şekil 4.6. MTOS istasyonuna ait yağış verilerinin Çift Kütle Eğrisi	57
Şekil 4.7. İbradı istasyonuna ait yağış verilerinin Çift Kütle Eğrisi	57
Şekil 4.8. Akseki, İbradı ve Manavgat meteoroloji istasyonlarında gözlenen maksimum sıcaklık karşılaştırması	59
Şekil 4.9. Akseki, İbradı ve Manavgat meteoroloji istasyonlarında gözlenen minimum sıcaklık karşılaştırması	59
Şekil 4.10. Akseki, İbradı ve Manavgat meteoroloji istasyonlarında gözlenen yağış karşılaştırması	60
Şekil 4.11. Sinanhoca ölçüm istasyonunda günlük hidrograf.....	68
Şekil 4.12. Sinanhoca ölçüm istasyonunda aylık hidrograf.....	68
Şekil 4.13. Manavgat şelale ölçüm istasyonunda günlük hidrograf	69
Şekil 4.14. Manavgat şelale ölçüm istasyonunda aylık hidrograf	69
Şekil 4.15. Farklı yıllardaki arazi kullanımı/örtüsü etkisi altında aylık ölçülen akım ile model simüle edilen akım arasındaki korelasyon	73
Şekil 4.16. Çalışma alanında arazi kullanımı/örtüsü değişiklikleri	74
Şekil 4.17. Manavgat nehri havzasında arazi kullanımı/örtüsü değişimi altında uzun dönem ortalama aylık akım, yanal toprak akışı, su verimi ve potansiyel evapotranspirasyonun özeti.....	76

Şekil 4.18. Akseki meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 altında yağış projeksiyonu.....	79
Şekil 4.19. Akseki meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kapsamında maksimum sıcaklık projeksiyonu.....	79
Şekil 4.20. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 kapsamında yağış projeksiyonu	81
Şekil 4.21. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 kapsamında maksimum sıcaklık projeksiyonu.....	83
Şekil 4.22. Sinanhoca ölçüm istasyonunda ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık nehir akışı projeksiyonu	86
Şekil 4.23. Manavgat şelalesi ölçüm istasyonunda ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık nehir akışı projeksiyonu.....	87
Şekil 4.24. Manavgat nehir havzası yanmış alan haritası	89
Şekil 4.25. Manavgat nehri havzasında yangın öncesi ve sonrası uzun dönem ortalama aylık su bilançosu durumu	91
Şekil 4.26. Manavgat şelale istasyonunda yangın öncesi ve sonrası aylık nehir akışı ...	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Meteoroloji ve hidroloji gözlem istasyonların özellikleri	31
Çizelge 3.2. Gözlemlenen veriler ve GCM verilerinin kalibrasyonunda kullanılan Ulusal Çevresel Tahmin Merkezine (NCEP) ait 26 öngörücünün özellikleri.....	33
Çizelge 3.3. USGS'ye göre yanık şiddet seviyesi	36
Çizelge 3.4. Hidrolojik modellemede hassas parametrelerin listesi	46
Çizelge 4.1. Çalışma alanının arazi kullanım ve bitki örtüsü dağılımı.....	53
Çizelge 4.2. Çalışma alanındaki toprak fiziksel özellikleri	54
Çizelge 4.3. Manavgat nehri havzasındaki istasyon başına toplam eksik değer sayısı.....	55
Çizelge 4.4. Kalibrasyon sürecinde belirlenen en duyarlı parametrelerin değişim aralıkları ve en uygun değerleri.....	61
Çizelge 4.5. Modifikasyondan önce model performans kriterleri	65
Çizelge 4.6. Alt havzadaki modifiye edilmiş parametreler.....	66
Çizelge 4.7. Modifikasyondan sonra belirlenen model performans kriterleri	67
Çizelge 4.8. Manavgat nehri havzasında arazi Kullanımı/örtüsü dağılımı.....	71
Çizelge 4.9. Manavgat nehri havzasında arazi Kullanımı/örtüsü değişimi 2017-2022.....	71
Çizelge 4.10. Arazi kullanımı/örtüsü sınıfı değişimi 2017-2022.....	72
Çizelge 4.11. Manavgat nehri havzasında arazi kullanımı/örtüsü değişimine dayalı ortalama yıllık su bilançosu	75
Çizelge 4.12. Akseki meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık yağışların trend analizi	78
Çizelge 4.13. Akseki meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık maksimum sıcaklıkların trend analizi	78
Çizelge 4.14. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık yağışların trend analizi	81
Çizelge 4.15. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık maksimum sıcaklıkların trend analizi	83
Çizelge 4.16. Sinanhoca ölçüm istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık nehir akışının trend analizi	85
Çizelge 4.17. Manavgat şelale ölçüm istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık yüzey akışının trend analizi	87
Çizelge 4.18. USGS tarafından önerilen dNBR hesaplaması ile elde edilen yanma şiddeti seviyeleri.....	90
Çizelge 4.19. Manavgat nehri havzası yanma şiddeti sınıflandırması.....	90

Çizelge 4.20. Manavgat nehri havzasında yangın öncesi ve sonrası uzun dönem ortalama yıllık su bilançosu özeti.....	91
---	----



1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Su, sadece insanlar için değil ekosistemi oluşturan tüm bitki ve hayvanlar için de yeri doldurulamayan, değerli, yaşamın devamlılığını sağlayıcı en önemli öğelerdendir. Yer altı ve yerüstü suları; tarım, ulaşım, madencilik ve endüstriden içme suyuna kadar, ekonomik amaçlar da dahil olmak üzere pek çok amaçla kullanılmaktadır. Ancak su kaynakları üzerinde gerek insan faaliyetleri gerek doğanın yarattığı değişimler nedeniyle çift yönlü bir baskı vardır. Özellikle su sıkıntısı olan bölgelerde aşırı nüfus artışı, kırsal kesimden şehirlere doğru artan göç ve bunun sonucunda oluşan nüfus değişimleri, gıda güvenliği, sosyo-ekonomik refahın artması, tarımsal, evsel ve sanayi kaynaklı kirlilik, küresel iklim değişikliği sonucu yağış rejimlerinin değişmesi gibi etmenler, hidrolojik döngünün tüm elemanlarını etkilemektedir. Bunun sonucunda su kaynakları gün geçtikçe hem miktar hem de kalite açısından değişime uğramaktadır. Mevcut su miktarı ile tüketilen su miktarı arasındaki uçurum her geçen gün büyümektedir. Su kaynaklarının yönetimine ilişkin sorunlar yaşanırken, çevre sorunlarının da su kaynakları üzerindeki etkisi her geçen gün artmaktadır (ORSAM, 2013).

Ülkelerin, mevcut ve gelecekteki gereksinimlerini karşılayıp gıda güvenliğini sağlayabilmesi için, su kaynaklarının yalnızca fiziksel değil aynı zamanda sosyal, ekonomik ve çevresel faktörleri de kapsayacak şekilde entegre bir yönetim yaklaşımı ile ele alınması gerektiği son yıllarda gündeme gelmiş ve birçok ülkede uygulanmaya başlanmıştır. Entegre (bütüncül) yönetimin esası, suyun hem doğal kaynak, hem de miktar ve kalitesine bağlı olarak kullanım amacı değişebilen bir meta olarak kabul edilmesidir (Cakmak vd., 2006).

Su kullanıcı sektörlerde su kayıplarının önlenmesi, suyun etkin kullanılması, su tasarrufu sağlayan yeni teknolojilerin uygulanması ve havza düzeyinde su kaynaklarının geliştirilmesi giderek önem kazanmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda su kaynakları çevre ile uyumlu olarak su ihtiyaçlarını karşılayabilecek şekilde geliştirilip yönetilmeye başlanmıştır (Aküzüm vd. 2010). Bir başka ifade ile çevresel sorunların sosyal ve ekonomik karar verme süreci ile bütünleştirilmesi öngörülmektedir. Su kıtlığı ve sektörel (tarım, sanayi, içme-kullanma) kullanımlar arası rekabet dikkate alındığında artık eskiden olduğu gibi su kaynaklarının planlanması değil, su kaynaklarının yönetimi yaklaşımı daha öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım çerçevesinde, bir akarsu havzasının tüm bileşenleri ile bir sistem olarak tanımlanması ve yönetilmesi zorunlu olmaktadır.

Hidrolojik sistemlerin çoğu son derece karmaşık süreçler içerir ve kolayca anlaşılmaz. Bu bağlamda, hidrolojik modeller bu tür karmaşık süreçlerin daha kolay anlaşılmasında hayati bir rol oynamaktadır. Hidrolojik modeller, gerçek hidrolojik süreçleri karakterize eden basitleştirilmiş sistemlerdir (Tessema, 2011).

Bu durumda bir sistem, karmaşık, bütün bir süreci oluşturan bir dizi etkileşimli veya birbirine bağımlı bileşen olarak tanımlanır. Bu nedenle modeller, kullanıcıların sistem değişkenlerini/parametrelerini kolayca manipüle etmelerini sağlar ve karmaşık sistemleri oluşturan değişkenler arasındaki etkileşimi anlamaya yardımcı olur (Sokolowski ve Banks, 2011). Babel ve Karssenberg (2013) hidrolojik modelleri teori ile pratik ya da gerçek dünya arasındaki araçlar olarak tanımlamıştır. Bu nedenle, hidrolojik

modeller, su havzası, bölgesel ve küresel hidrolojik süreç ölçekleri çalışmasında önemli araçlardır.

Yüksek havza heterojenliği ve ölçüm yöntemlerinde sınırlamalar gibi çeşitli nedenlerle ve yöntemlerin zahmetli, zaman alıcı ve uygulanmasının maliyetli olması nedeniyle havzalar hakkında bilmek istediğimiz her şeyi ölçmek pratikte imkansızdır. Bu tür sınırlamalar ve havzalar hakkında hem mekansal hem de zamansal bilgileri tahmin etme ihtiyacı nedeniyle, hidrolojik modeller birincil öneme sahiptir (Pechlivanidis vd, 2011). Havza hidrolojik modelleri, önemli hidrolojik süreçlerin ve havzadaki değişikliklerin bu süreçleri nasıl etkilediğinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur (Xu, 2002). Havza hidrolojik modelleri ayrıca arazi kullanımı ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki gelecekteki potansiyel etkilerinin tahmin edilmesine yardımcı olan hidrolojik veriler de sağlar (Xu, 2002; Pechlivanidis vd., 2011). Simülasyon modelleri, su tablası yönetimi, sulak alan restorasyonu, sulama suyu yönetimi, akarsu rejiminin iyileştirilmesi, su kalitesinin değerlendirmesi ile taşkın tahmini ve yönetimi gibi havza hidrolojisine ilişkin kritik karar süreçlerinde etkin bir destek aracı olarak da kullanılmaktadır.

1.2. Araştırma Probleminin Açıklaması

Havza modellemelerinin gelişimine ve kullanılabilirliğine etki eden en önemli faktörler veri toplama ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelerdir. Havza modellemesinde doğru ve temsil niteliği yeterli olan verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu ihtiyacın karşılanması; hidrolojik verilerin alansal niteliği, veri miktarının fazlalığı ve veri organizasyonunun karmaşıklığı gibi etkenler nedeniyle oldukça zordur. En önemli sorunlardan biri, modellerde kullanılacak verilerin farklı formatlarda düzenlenip, farklı ortamlarda depolanmış olmasıdır. Bu tür verilerin modelde kullanılabilir hale getirilmeleri zor bir işlemdir. Ayrıca farklı modellerin veri gereksinimleri de birbirinden farklı olduğundan, mevcut verilerin her bir modele göre ayrı ayrı düzenlenmesi gerekir. Ancak bu tür sorunlar Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve gelişmiş uydu teknolojilerini kullanan Uzaktan Algılama (UA) yöntemleri ile çözümlenerek, çeşitli türde alansal veri katmanları üst üste analiz edilip, birden fazla havza özelliği bir arada değerlendirilebilmektedir. Bu veriler CBS ile entegre edilen modellere girdi oluşturduğu gibi, model çıktıları da yine CBS ile görsel olarak sunulabilmektedir (Gül ve Harmancıoğlu, 2003). Bunun yanı sıra hem model girdisi hem de verifikasyon ölçütü olan uzaktan algılama verileri, bu tür bilgilerin kullanımını sağlayan yeni modelleme yaklaşımlarının gelişimine neden olmuş; alansal verilerle ilgili analiz yöntemlerinin gelişimini hızlandırmış ve arazi çeşitliliğinin karakterize edilmesini kolaylaştırmıştır.

Türkiye'de, havza modellemesine ilişkin çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan çalışmalar ise küçük ölçekli havzalarda inşaat, orman ve çevre mühendisleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, veri toplama, veri değerlendirme ve veri sorgulama aşamalarında son derece önemli bir yere sahip olan uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı açısından özgün bir çalışmadır. Son yıllarda gelişmiş ülkelerde giderek yaygınlaşan entegre yüzey ve yer altı suyu modellemesi ülkemizde de uygulanmaktadır. Havza bazında sayısal veri tabanının oluşturulması ve ayrıca alansal bakımdan da bu denli büyük bir havzada çalışılacak olması araştırmayı özgün kılmaktadır. SWAT havza modelinin Manavgat Nehir Havzasında uygulama

olanaklarının ortaya konması ve modifikasyon olanaklarının araştırılması da çalışmaya özgünlük katmaktadır. Karstik yapıya sahip Manavgat Nehir Havzası'na uygulanan model, benzer hidrojeolojik özellikler gösteren alanlarda gerçekleştirilecek ileri düzey çalışmalara yol gösterici niteliktedir. Ayrıca, karstik havzalarda model kalibrasyonu sürecinde hangi parametrelerin model çıktıları üzerinde etkili olduğunun belirlenmesi ileride yapılacak benzer nitelikteki çalışmalara metodolojik katkı sunacaktır.

Bu konuda daha sonra yapılacak çalışmalara, havza yönetiminden sorumlu kurumlara örnek oluşturacak niteliklere sahip olması, çalışmanın olumlu yönleri olarak öne çıkmaktadır. Çalışmanın yürütüldüğü bölgedeki somut taşkın zararı önleme, veri tabanı oluşturma, depolama alternatifi sağlama gibi yararlar olduğu ve nehir havzalarının yönetiminde ortaya çıkabilecek sorunları çözmede model çıktılarının kullanılabileceği bir gerçektir. Su kaynakları projeleri masraflı projeler olduğundan, havzada yapılacak yatırımların ekolojik etkilerinin önceden öngörülebilecek olması yatırımcı kişi ve kuruluşlara karar vermede yardımcı olacaktır. Ayrıca, ülkemizin AB'ne üye olma yolunda Su Çerçeve Direktifi kriterlerinin sağlanması için hangi konulara öncelik verilmesi gerektiği konusunda katkı sağlayacak olması, bu çalışmanın önemli yanlarından birini oluşturmaktadır.

1.3. Amaç/Gerekçe

İçinde bulunduğumuz üçüncü bin yılda hızla artan su ihtiyacı karşısında, küresel ısınma ve yanlış kullanım sonucu kullanılabilir su kaynaklarının hızla azalması gerek ulusal gerekse uluslararası gündemde su konusunu ilk sıralara taşımıştır. Su ile ilgili sorunların giderilmesi için tarım, sanayi ve evsel kullanımlarda su kayıplarının önlenmesi, etkin su kullanımının sağlanması ve belki de en önemlisi su kaynaklarının havza düzeyinde geliştirilmesi ve planlanması zorunludur.

Hidrolojik modelleme, nehir havzalarının planlanmasında ve yönetiminde kullanılan çok temel bir araç olup nehir havzasında oluşan fiziksel, kimyasal ve biyolojik olaylar ve bunların birbirleriyle etkileşimini anlamada önemli bir role sahiptir. Bunun yanında, daha da önemli pratik rolü ise, söz konusu bilginin su kaynaklarının korunması ve kullanımına uygulanabilecek bileşenleri içermesi olarak belirtilebilir.

Havza modellemesinde bazı kısıtlamalar da bulunmaktadır. Günümüze dek bu kısıtlamalar genellikle bilgisayarların kapasitelerinden, zaman ve mekân olarak istenilen ölçekte verinin elde edilememesinden kaynaklanmıştır. Öte yandan, yeni ve geliştirilmiş aletlerin kullanımıyla da veri toplanması zaman ve mekân ölçeğinde daha da sıklaştırılmıştır. Ayrıca, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknolojilerindeki gelişmeler de havza modellemesinde yeni bir çığır açmıştır. CBS ve UA gibi teknolojilerin havza modelleri ile entegre edilmesi yoluyla model tahminindeki belirsizlik ve tutarsızlıklar azaltılmış, model verilerinin ve başlangıç koşullarının bilgisayara girilmesi işlemleri daha kolaylaşmıştır.

Bu tezin temel amacı, Manavgat nehri havzasının hidrolojik bileşenlerini, aşağıdaki spesifik hedefleri içeren Toprak ve Su Değerlendirme Aracını (SWAT) kullanarak araştırmaktır:

- 1) Manavgat Nehri havzasındaki SWAT modelinin kalibrasyonu ve doğrulanması,

Türkiye'nin Akdeniz bölgesinin hidrolojik koşullarına uygunluğunun test edilmesi ve modifikasyon olanaklarının araştırılması.

2) Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak havzaya ait sağlıklı bir veri tabanının oluşturulması.

3) Havzadaki topografik yapıya, bitki örtüsüne, arazi kullanımına ve iklim parametrelerine bağlı olarak yüzey akışı, yer altı suyu ve toprak suyu içeriğinin zamansal değişiminin SWAT modeli aracılığıyla tahmin edilmesi.

4) Küresel ısınma ve aşırı yağış olaylarından kaynaklanan bitki örtüsü, nehir akışları ve yer altı suyu seviyelerindeki değişikliklerin potansiyel etkilerinin tahmini.

5) Sonuç olarak elde edilecek bilgilerle su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımının planlanması amaçlanmaktadır.

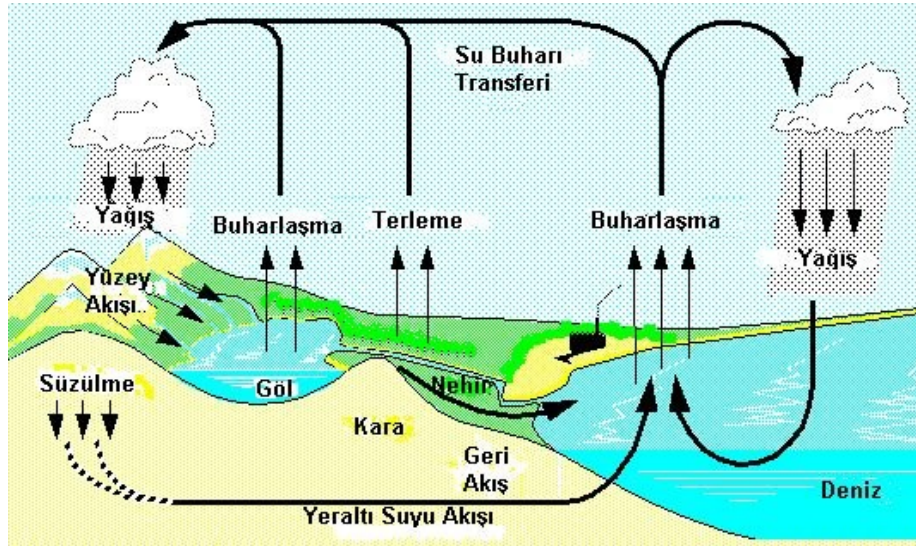
Bu çalışma, havza bazında modellemeyi, ihtiyaç duyulan verilerin arazi koşullarında belirlenmesini ya da diğer kuruluşlardan sağlanmasını ve farklı senaryolar kullanılarak havzanın bunlara karşı tepkisini belirlemeyi kapsamaktadır. Farklı kuruluşlarca toplanmış olan ve farklı formatlarda bulunan veriler modelde kullanılabilir formata getirilmiş, gerektiğinde sayısallaştırılarak CBS temeline dayalı veri tabanı sistemine dönüştürülmüştür. Bu işlemlerle elde edilen bilgilerin yanında ayrıca uydu görüntülerinden de yararlanılmıştır.

Çalışmadan elde edilen çıktılar doğrudan uygulamaya aktarılabilir ve havzadaki su kaynaklarının yönetimi açısından farklı stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Model tahminleri ile olası su baskını, ormansızlaşma ve meteorolojik kuraklık riskleri önceden belirlenerek ilgili kuruluşlar önceden uyarılarak hem yerleşimlerin yerlerinin hem de tarım alanlarının olumsuz etkilenmesi engellenebilecektir. Bu çalışmada elde edilen deneyimler, Türkiye'nin diğer bölgelerindeki havzaların modellenmesi ve benzer sorunların çözümü için potansiyel bir bilgi birikimi oluşturacaktır. Ayrıca bu çalışma ile oluşturulan veri seti, gelecekte diğer modellerin test edilmesi (kalibrasyonunun yapılması) ve en uygun modelin belirlenmesi amacıyla da hizmet edecektir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Hidrolojik Döngüye Genel Bakış

Su döngüsünün karmaşıklığını anlamak, jeolojik, iklimsel, fiziksel ve kimyasal süreçler de dâhil olmak üzere çeşitli diğer karasal süreçleri anlamak bakımından bir gereklilik arz etmektedir. Açlık, beslenme, yoksulluk, doğal sürdürülebilirlik, çatışma ve ekonomik başarı gibi diğer politik ve sosyal sorunların tümü su ile yakından ilişkilendirilmektedir (Gleick vd., 2013). Suyun küresel iklim sisteminin çeşitli bileşenleri arasında süregelen hareketi, hidrolojik döngü aracılığıyla gerçekleşmektedir. Okyanuslar, atmosfer ve yeryüzü, suyun depolanmasını sağlamaktadır. Bu bölgeler arasında farklı fazlarda hareket etmekte olan su, dünya iklimi açısından hayati bir öneme sahiptir. Hem okyanuslar hem de yeryüzü, su buharını atmosfere salmakta ve burada, yeryüzünde su buharı formunda devretmektedir. Daha sonra su buharı atmosferde yoğunlaşmakta ve nihayetinde yağış (karla karışık yağmur, kar, dolu ve yağmur şeklinde) olarak yeryüzüne geri dönmektedir. Bu yağış, açık su kütlelerine düşebilmekte, bitki örtüsü tarafından absorbe edilmekte ve akabinde yüzey akışına veya yer altı suyunun yenilenmesine dönüşebilmektedir. Arazi yüzeyine nüfuz etmekte olan su, derin katmanlara sızmakta ve yer altı suyu rezervuarının kaynağı haline gelerek, nihayetinde akarsu olarak yüzeye çıkabilmekte veya kıyı bölgelerinde deniz suyu ile birleşebilmektedir. Bu son aşamada suyun okyanusa dönmesi ve nihayetinde buharlaşması ile su döngüsü tamamlanmaktadır (Tani, 2020). Yağış, buharlaşma, terleme, yüzey akışı, süzülme, toprak suyu ve yer altı suyu, su dengesine katkıda bulunmakta olan temel faktörlerdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Hidrolojik döngü (Anonim 1)

2.2. Hidrolojik Su Bütçesi Eşitliği ve Bileşenleri

Su kıtlığı, su kullanımı hususunda çeşitli tartışmalara neden olduğundan, bir havzanın hidrolojik su bütçesinin tahmini, havza hidrolojisinde önemli bir aşamayı oluşturmaktadır. Su dengesinin incelenmesinde kütle korunumu kanunu

uygulanmaktadır (Eşitlik 2.1). Neitsch vd (2011)'e göre, hidrolojik sistem aşağıda belirtilen temel işlevleri yerine getirmektedir:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.1)$$

Eşitlikte,

SW_t : Son toprak nem içeriğini (mm)

SW_0 : i. Günde başlangıç toprak su içeriğini (mm)

R_{day} : Günlük yağış miktarını (mm)

Q_{surf} : Günlük yüzey akışı (mm)

E_a : Günlük bitki su tüketimini (mm)

W_{seep} : Gök bölgesinin altındaki günlük derine süzülme (mm)

Q_{gw} : Günlük yer altı akışını (mm) gösterir.

Havzalardaki hidrolojik süreçler üzerine dünyanın muhtelif bölgelerinde sınırlı sayıda araştırma yürütülmüş olmasına rağmen (Peker, 2020; Kabal, 2019; Jovanovic vd., 2013; Bagan vd., 2012), havza ölçeğinde gerçekleştirilmekte olan bu çalışmalarda elde edilen başarıların yanı sıra model sınırlamaları da rapor edilmektedir. Hidrolojik döngünün bir havzadaki bileşenleri ile ilgili teorik bilgiler, sonraki bölümlerde kısaca gözden geçirilmiştir.

2.2.1. Yağış

Yağmur, karla karışık yağmur, kar ve dolu, atmosferde yoğunlaşmakta olan su buharının yeryüzüne farklı biçimlerde düşmesiyle meydana gelen yağış türleridir. Yağış, su döngüsünün kritik bileşenlerinden birini oluşturmaya rağmen, ölçülmesi en güç değişken olma özelliğini sürdürmektedir (Negyen vd. 2018). Bu güçlük, bir ülkenin belirgin iklim değişkenliğinden kaynaklanmakta olup, ölçüm süreci zaman ve mekân içindeki yağış değişimlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Kocsis vd. 2022). Bilhassa kurak ve yarı kurak bölgelerde yürütülmekte olan çok sayıda araştırmaya rağmen, yağışın mekânsal değişkenliği hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır. Çukur (2011)'a göre, farklı coğrafi bölgelerde farklı yağış sıklıkları gözlemlenmektedir. Dağ silsilelerinin eğimi, bakışı ve yönü gibi topografik özellikler ile rüzgâr hızı ve yönünden etkilenmekte olan atmosferik dolaşımın yoğunlaşması, özellikle havza ölçeğinde yağışta meydana gelen bu farklılığa neden olan diğer temel faktörler arasında yer almaktadır (Daly, 2006; Türkeş, 1996).

İklim değişikliğine dair endişelerin artış göstermesiyle birlikte, yağışın mekânsal dağılımına ilişkin kesin verilere olan talep de yükselmektedir. İklim modellerinin daha geniş mekânsal ölçeklerde (bölgeselden küresele) değerlendirilmesi için yağış

gözlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Hulme, 1994a). Literatür incelemesinde, yağışın (daha çok yağmurun) ölçülmesine yönelik bir dizi doğrudan ve dolaylı yöntemlerin olduğu görülmektedir. Uydu gözlem teknikleri, radar sistemleri ve yüzey ölçüm sistemleri, yirmi birinci yüzyılda en bilinen yöntemlerden bazılarını oluşturmaktadır (Sene, 2013; New vd. 2001). Ancak yukarıda sözü edilen değerlendirme tekniklerinin tümü, çeşitli koşullara bağlı olarak kendine özgü olumlu ve olumsuz yönleri sahiptir. Buna karşın, geçmiş çalışmalarda kabul edilebilir düzeyde belirsizlik içeren yağış verileri sunmakta olan çeşitli tahmin yöntemleri de mevcuttur (Li vd. 2015; Li ve Heap, 2008; Yao vd. 2013).

2.2.2. Toprak nemi

Toprağın su dengesi ve hidrolojisi, belirli bir hacim veya toprak kütlelerinde bulunmakta olan su miktarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bitki gelişimi, organik maddenin ayrışması ve atmosfer ile yeryüzü arasındaki sınırda ısı ve suyun hareketi gibi pek çok biyofiziksel süreç de toprak neminden etkilenmektedir (Bittelli, 2011). Mevcut su miktarı, toprak yüzeyindeki bitki gelişimini doğrudan etkilemekte; toprak nemindeki değişimler ise arazi kullanımı ve bitki örtüsünde önemli değişimlere yol açabilmektedir. Yeryüzüne yakın hava sıcaklığı da toprak suyunun fazlalığından etkilenmektedir. Su baskını, erozyon, besin transferi ve arazi ile çevre arasındaki etkileşimler gibi hidrolojik süreçler ile jeolojik süreçler toprak neminden önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca, bu süreçlerin tanınması ve tahmin edilmesi, toprak nemi değişkenliğinin özelliklerinin anlaşılmasını gerektirmektedir. Zira toprak nemi hem mekânsal hem de zamansal olarak oldukça değişkenlik göstermektedir (Western vd. 2004).

Toprak nemi, iklim parametreleri, bitki örtüsü ve hidrolojik süreçler üzerinde kritik etkilere sahiptir. Bu etkileşimi inceleyen pek çok çalışma yürütülmüştür. Örneğin, Williams vd., (2008), yağış ve arazi kullanımını yüzey toprak nemi dağılımının ana faktörleri olarak belirlemiştir. Ancak, toprak kurudukça bu faktörlerin etkisi azalmaktadır, bu da kurak koşullarda farklı dinamiklerin öne çıktığını göstermektedir Benzer şekilde, Mahanama, (2008), Sri Lanka'da ideal meteorolojik koşullarda toprak nemi başlatılmasının, yüzey akış tahmin doğruluğuna %10 ile %60 arasında katkı sağlamakta olduğunu tespit etmiştir. Arjantin'de gerçekleştirilmiş bir araştırmaya göre toprak su seviyesi kış aylarında en yüksek, yaz aylarında ise en düşük seviyededir (Di Bella vd., 2016). Hedef alanın üzerindeki yüzey akışına katkıda bulunmakta olan bölgenin büyüklüğü de arazideki su dağılımını etkilemekte olan bir diğer unsurdur. Genel olarak beslenme alanı büyüdükçe ve yüzey akış çıkışına yaklaşıldıkça su hacminin de artacağına inanılmaktadır (Zhao vd., 2011). Aynı şekilde Western vd. (2004), hafif eğimlerin dik eğimlere kıyasla daha yüksek su içeriğine sahip olmasıyla birlikte topografyanın yüzey, yüzey altı ve hidrolik yük akışını etkilemede önemli bir faktör olduğunu belirtmiştir. Bu durum, toprakların hidrolik iletkenliği ve su tutma özelliğindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Toprak suyu içeriğinin farklı çevresel (özellikle hidrolojik) modelleme yönleri üzerindeki etkilerine ilişkin daha fazla detay, geçmiş araştırmalarda etraflıca açıklanmaktadır (Duan vd. 2017; Di Bella vd. 2016).

Son yıllarda topraktaki su seviyesini belirlemek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler doğrudan veya dolaylı olarak ya da ölçümün mekânsal ölçeğine (yerel, havza, kıtasal veya küresel) göre sınıflandırılabilir. Gravimetrik yöntem gibi doğrudan yöntemler, topraktaki su miktarını doğrudan ölçmekteyken, dolaylı

yöntemler, topraktaki su miktarından büyük ölçüde etkilenmekte olan bir özelliği ölçmektedir. Bu yöntemler ayrıca Romano, (2014) ve Bittelli, (2011) tarafından da tartışılmaktadır. Hem doğrudan hem de dolaylı yöntemlerin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Uzaktan algılama tekniği hariç olmak üzere, dolaylı yöntemlerin çoğu kesin kalibrasyon eğrileri gerektirmekte, nokta verileri sunmakta, zaman alıcı olmakta, yoğun emek gerektirmekte ve havzalardaki toprak su içeriğinin mekânsal değişimini ele alırken bazen pratik olmamaktadır. Bu nedenle havza, bölgesel ve küresel ölçekte toprak suyunun mekânsal ve zamansal değişimini tanımlayan sürekli veri toplamak için daha gelişmiş teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla bu durumda hem uzaktan algılama hem de enterpolasyon teknikleri uygulanabilmektedir.

2.2.3. Evapotranspirasyon

Termal enerji mevcut olduğunda çıplak toprak yüzeyinden veya açık su yüzeyinden oluşan su kaybı süreci olan buharlaşmanın aksine terleme, suyun bitki hücrelerinden buharlaşmak suretiyle atmosfere salınması sürecini ifade etmektedir (Allen vd. 1998). Sonuç itibarıyla literatürde bu iki süreç sıklıkla "evapotranspirasyon" adı altında birleştirilmektedir. Küresel hidrolojik döngünün ikinci en büyük bileşenini oluşturan evapotranspirasyon, su ve enerjiyi birbirine bağlama noktasında kritik bir rol oynamaktadır (Pi vd. 2021). Evapotranspirasyon genellikle Bowen oranı ölçerler, buharlaşma ölçüm kapları ve eddy kovaryans sistemlerinden yararlanan yöntemler kullanılarak belirlenmektedir (Pi vd. 2021). Ancak bu yaklaşımlar, geniş ölçekli araştırmalar için mekânsal evapotranspirasyon verilerini temin edememekte; yalnızca belirli bir cihazdan elde edilen noktasal evapotranspirasyon değerlerini temsil etmektedirler.

Yeryüzü ve atmosfer hakkında çeşitli veriler sunabilen uzaktan algılama (UA) teknolojisinin geliştirilmesi, yerelden küresel değişen ölçeklerde sürekli mekânsal evapotranspirasyon verilerinin elde edilmesi için hala en pratik ve maliyet etkin yöntem olma özelliğini sürdürmektedir (Yu vd. 2022). Ayrıca, dünya çapında gerçekleştirilmekte olan bir araştırma, evapotranspirasyon sebebiyle yılda $7.2 \times 10^{13} \text{ m}^3$ su kaybı yaşanmakta olduğunu ortaya koyarken, diğer bilimsel kaynaklar, söz konusu sürecin karbon döngüsü üzerindeki hidrolojik kontroller ve bir bölgedeki bitki örtüsünün yapısı ve dağılımı hakkında bilgi sunmakta olduğunu ileri sürmektedir (Babkin, 2009; Emanuel vd. 2010). Bu nedenle, su ve enerji dengesi üzerindeki önemli etkisi dolayısıyla evapotranspirasyonu doğru bir biçimde ölçmek veya hesaplamak büyük bir önem arz etmektedir. Son yirmi yıl içerisinde, doğru ölçüm, kesin tahmin ve evapotranspirasyonun dağılım değişkenliğini ve kesin miktarını etkilemekte olan temel faktörler açısından çok sayıda araştırma yürütülmüştür (Western vd. 2004; Hillel, 2004; Wenzhi ve Xibin, 2016; Li vd. 2015; Liou vd. 2014 ve Allen vd. 1998).

2.2.4. Yüzey akış

Vinogradov (2009) tarafından serbest suyun yerçekimi etkisi altında hareket etmesiyle doğal olarak oluşan bir olgu olarak tanımlanmakta olan yüzey akışı, hidrolojik döngünün hayati bir parçasıdır. Tarboton, (2003) yüzey akışını, kanal (akarsu) akışı, toprak yüzeyinden akış, toprak altından akış ve taban akışı olmak üzere dört farklı şekilde tanımlamaktadır. Yüzey akışı, su uygulama veya yağış şiddeti toprağın infiltrasyon hızını aştığında meydana gelmektedir. Kanal akışı, yağmurun doğrudan hareket etmekte olan

bir su yoluna düşmesi durumunda oluşmakta ve hidrografta gözlemlenebilmektedir. Toprak altından oluşmakta olan akış, bir yağış olayından sonra süzülme yoluyla yeniden dolmakta olan bir akiferden kaynaklanan sürekli bir akışı ifade etmektedir. Yer altı akışı, sızmakta olan yağmur suyunun zayıf drenajlı bir yer altı toprak profilini doyurması ve yer altı bölgesinin üzerinde yatay olarak hareket etmesi halinde ortaya çıkmaktadır (Mockus, 2004). Taban akışı haricindeki tüm bu akış türlerine dolaysız akış adı verilmektedir.

Yüzey akışı, özellikle akarsu akışının, sulamanın ve taşkınların hesaplanmasında hidrolojik çalışmalar için bir gereklilik arz etmektedir. Ayrıca pek çok çalışma, kurak ve yarı kurak bölgelerdeki nehir havzalarının yer altı suyu planlamasının yanı sıra havza gelişimi ve yönetimi için doğru akış tahmininin gerekli olduğunu belirtmektedir (Buyuktaş ve Wallender 2002; Mdee, 2015; Zelelew, 2012). Zaman ve konum da dâhil olmak üzere birden fazla parametre, akış sürecinin işleyişini etkilemektedir. Arazi, arazi kullanımı, arazi örtüsü ve üst toprak katmanının sıkışması gibi arazi yüzeyinin özellikleri ilk faktör grubunu oluşturmaktadır (Mockus, 2004). İkinci grupta toprağın bünyesi, jeolojik yapısı ve hidrolik özellikleri de dâhil olmak üzere toprağın özelliklerini etkilemekte olan parametreler yer almaktadır (Wagener, 2005). Deşarj fonksiyonları için en önemli çevresel unsurlar atmosferiktir ve esas itibarıyla yağışın özelliklerini kapsamaktadır (Ramakrishnan, D., vd. 2009).

Havzadaki ve bölgesel ölçekteki akışı hesaplamak amacıyla literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Mitchell vd. (2001), farklı ölçeklerdeki akışın belirlenmesinde kullanılmakta olan yöntemleri istatistiksel, bölgesel ve transfer yöntemleri ile yağış-akış modelleri olmak üzere dört kategoriye ayırmaktadır. Bahsedilen dört yaklaşım arasında Li ve ark. (2015) ayrıca yağış-akış modeli yaklaşımını toplu kavramsal yağış-akış modelleri, dağıtılmış hidrolojik modeller ve küresel hidrolojik ve arazi yüzeyi modelleri gibi üç sınıfa ayırmaktadır.

2.2.5. Derine süzülme

Vadoz zonunda meydana gelen hidrolojik mekanizmalar yer altı süzülmesine bağlıdır. Kök bölgesinin altına doğru akmakta olan su, geçiş vadoz bölgesi boyunca taşınmakta ve çoğunlukla toprağın ve yer altı suyunun beslenmesine katkı sağlamaktadır. Aynı şekilde Gates vd. (2014), kök bölgelerinin su içeriğinin su tutma kapasitesini aşması durumunda derine süzülmenin meydana gelmekte olduğunu belirtmektedir. Sulama ve yağış vasıtasıyla yer altına sızmakta olan suyun akiferin yenilenmesinde önemli bir tatlı su kaynağı olduğu pek çok çalışmada teyit edilmektedir (Ochao, 2012; Gates vd. 2014). Ayrıca, belirli bir bölge için yer altı suyu kaybı ve beslenmesi arasındaki dengenin tahmini için, derine süzülmenin mekânsal ve zamansal oranlarının belirlenmesi gerekmektedir (Kumar, 2003). Yayınlanmış araştırmalara göre derine süzülmeyi daima etkilemekte olan üç temel değişken bulunmaktadır; bunlar arasında su kaynakları, toprak özellikleri ve arazi yüzeyi özellikleri yer almaktadır. Hidrolik özellikler toprak özelliklerini etkilemekteyken, sulama veya yağışın hacmi ve süresi su kaynaklarının etkisini tayin etmektedir (Walker, 2018, Kumar, 2003; Gates vd., 2014).

Derine süzülmeyi ölçmek için kullanılmakta olan yöntemler çok sayıda akademik çalışmanın konusu olmuştur (Di Vries ve Simmers, 2002; Chung vd. 2016; Walker, 2018). Örneğin, Di Vries ve Simmers, (2002) yer altı suyu beslemesini üç gruba ayırmaktadır: doğrudan besleme, yerel besleme ve dolaylı besleme. Benzer şekilde, Chung vd. (2016) yer altı suyu beslenmesine ilişkin ölçüm yöntemlerini beş sınıfa

ayırmaktadır: a) Yer altı suyu algoritmaları ve yer altı suyu verileri gibi su tablası dalgalanma tekniklerini kullanmakta olan yer altı suyu yaklaşımı, b) havza modellerini, sızma ölçüm cihazlarını veya akış dengesi ölçümlerini kullanmakta olan akış yöntemleri, c) SWAT modeli gibi havzalar için geliştirilmiş hidrolojik modelleri, d) Klorür, sıcaklık ve trityum izleyici faktörlerini kullanarak yer altı suyu beslenmesini belirlemekte olan bir izleyici yaklaşımı, e) Derine süzülme ve içermekte olan toprak su bütçesi yöntemi.

2.3. Havzanın Hidrolojik Modellenmesi

Toplunun muhtelif kesimleri açısından farklı anlamlar içeren havza kavramı, hidrolojide su kaynaklarının sularını toplamakta olan bütünleşik bir bölümünü ifade etmektedir. Yeryüzü ve yer altı sularının uygun bir biçimde kullanımı için havzada meydana gelen olayların doğru bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle, su kaynakları ile ilgili kullanım stratejileri oluşturulurken, farklı girdilere karşı havzanın tepkisini simüle edebilmekte olan modellerin geliştirilmesi, havzada oluşan olayların bir bütün halinde ele alınmasını olanaklı hale getirmiştir. Havza bazında meydana gelen olayları açıklayan bilimsel bilgi birikiminin yanı sıra gözlem ve ölçümlerden elde edilmekte olan bilgiler, hidrolojik olayların fiziksel temele dayalı matematiksel eşitlikler şeklinde ifade edilebilme olanaklarını artırmaktadır. Ayrıca, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler de elde edilmekte olan bu eşitliklerin çözümlerini hızlandırmış ve kapsamlı modellerin havza bazında kullanımını son yıllarda yaygınlaştırmıştır.

Günümüzde; gelişmiş ülkelerde hemen hemen tüm çevre ve su kaynaklarının planlanması, tasarımı, geliştirilmesi, işletilmesi ve kullanılmasında, havza bazında geliştirilmiş nümerik modellerden yaygın bir şekilde yararlanılmaktadır (Singh ve Frevert, 2005). Havza modellerinde yağış, infiltrasyon, yüzey akış, evapotranspirasyon, yer altı suyu akışı ve akarsu debisi gibi hidrolojik bileşenlerin her biri ya fiziksel ya da deneysel bir eşitlik ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

Geçmiş yıllarda hidrolojik süreçlerdeki belirsizliğin açıklanması ve bu süreç mekanizmalarının daha net bir biçimde ortaya konması amacıyla yağış, buharlaşma, sızma, yüzeysel akış gibi olaylara ilişkin birbirinden bağımsız, sadece bu süreçlerden birini açıklamakta olan modeller geliştirilmiştir. Günümüzde ise gerek bilgisayar gerekse bilgi toplama teknolojisindeki (uzaktan algılama, uydu teknolojisi ve coğrafi bilgi sistemleri gibi) hızlı gelişmeler sayesinde, süreç modelleri birbiriyle entegre edilerek gelişmiş havza simülasyon modelleri halini almıştır (Fıstıkoglu, 1999). Halihazırda su kaynaklarının yönetimi amacıyla çok sayıda ve oldukça kapsamlı bilgisayar modelleri bulunmaktadır. Bu modellerin amacı: a) incelenmekte olan olaylara ait temel oluşum mekanizmalarının tanımlanması; böylelikle havzanın su miktarı, su kalitesi, toprak kaynakları, bitki örtüsü gibi tüm bileşenleri ve bunlar arasındaki tüm etkileşimleri içerecek biçimde modellerin geliştirilmesi, b) çeşitli yönetim kararlarının veya senaryoların model uygulamalarıyla irdelenerek en uygun yönetim politikalarının belirlenmesi olmak üzere iki yönlüdür (Özkul vd. 2001).

Modelleme teknolojisi hem bilim insanlarına hem de yönetim birimlerine, hidrolojik süreçlerde yaşanmakta olan belirsizliklerin açıklanmasında ve yönetim kararlarının teknik bir temele oturtulmasında önemli ölçüde yardımcı olmaktadır. Su kaynakları yönetiminde yaşanmakta olan sorunların kapsam ve boyutlarının genişleyip karmaşık hale gelmesi, bu modellerin kullanımı konusunda ilgili kuruluşları zorlayıcı bir

etki yapmaktadır. Stanford Watershed Model (SWM), Crawford ve Linsley tarafından 1966 yılında hidrolojik çevrimin tümünü kapsayacak şekilde geliştirilen ilk modeldir. Yetmiş ve seksenli yıllarda da çeşitli modeller geliştirilmeye devam edilmiş, ampirik bazlı modellerin yerine fiziksel bazlı modeller yaygınlaşmaya başlamıştır (Singh ve Frevert, 2005).

Havza ölçeğinde akarsu debisini, yer altı suyu seviyesini, erozyonu ve su kirliliğini tahmin etmede kullanılmak üzere geliştirilmiş birçok deterministik veya stokastik model bulunmaktadır (Özkul vd. 2001; Beven, 2002). Bunlar arasında A.B.D’de USGS (United States Geological Surveys) tarafından geliştirilmiş olan MODFLOW (McDonald ve Harbaugh, 1988), EPA (Environmental Protection Agency) tarafından geliştirilmiş olan HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran), DHI (Danish Hydraulic Institute) tarafından geliştirilmiş olan MIKE SHE (Système Hydrologique Européen) (Abbot vd. 1986a, 1986b) ve Neitsch vd. (2002) tarafından geliştirilmiş olan SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modelleri hidrolojik modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, Singh ve Woolhiser (2002), Borah ve Bera (2003) ile Daniel vd (2011), AGNSP (Agricultural Non-Point Source Pollution), ANSWERS (Areal Non-Point Source Watershed Environment), KINEROS (Kinematik Runoff and Erosion Model) gibi daha birçok modelin geliştirilmiş olduğunu belirtmiş, bunların ana özelliklerini ve uygulama alanlarını kısaca özetlemişlerdir. Borah ve Bera (2003) ayrıca havza modellerinde kullanılmakta olan ve çoğunda ortak olan matematiksel eşitlikleri de detayları ile açıklamışlardır. Öte yandan, Pechlivanidis vd. (2011), son yıllarda teknoloji ve uygulamalarda yaşanan gelişmeler doğrultusunda, havza ölçeğinde kullanılan hidrolojik modellerin kalibrasyonu ve belirsizlik analizlerinde uygulanan yaklaşımların yanı sıra, bu belirsizliklerin kaynaklarına da odaklanmışlardır.

Beven ve Kirkby (2002) tarafından geliştirilmiş olan TOPMODEL (Topographic Model) ve Abbot vd. (1986a, 1986b) tarafından geliştirilmiş olan MIKE-SHE birçok Avrupa ülkesinde kullanılmakta olan standart model haline gelmiştir. The Hydrological Engineering Centre’s Hydrological Modeling System (HEC-HMS) A.B.D’de özel sektörde drenaj sistemlerinin tasarımı ve arazi kullanımındaki değişikliklerin taşkın üzerine etkilerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktayken United States Geological Survey (USGS) tarafından geliştirilmiş olan MODFLOW su kaynaklarının planlanması ve yönetiminde uygulanmaktadır (Singh ve Frevert, 2005).

Son yirmi yıl içerisinde, SWAT modeline ilişkin uygulamaları, bileşen analizlerini veya diğer araştırmaları rapor eden 7000’den fazla hakemli ve yayımlanmış makale tespit edilmiştir. Bu çalışmalar arasında, Akdeniz havzalarında yürütülmekte olan 260’tan fazla SWAT uygulamasına dair makale de yer almaktadır (Aloui vd., 2023). SWAT modelinin uygulanması ve doğrulanması, Akdeniz havzasında yürütülmüş birçok çalışmada başarıyla rapor edilmiştir (Briak vd. 2016; Mendas vd.2010; Hallouz vd. 2018; Khalid, 2018).

Farklı hidrolojik süreçler, Fas’taki Rdom havzasında SWAT modeli tarafından başarılı bir şekilde yansıtılmıştır (Brouziyne vd, 2018). Benzer şekilde, Koutalakakis vd. (2017), Yunanistan’ın Menoikio sıradağlarındaki havzada SWAT modeli ile doğru bir su bütçesi ve nehir akışı elde edildiğini bildirmiştir. Ayrıca, Tunus Joumine havzasındaki incelemeler, kalibrasyon ve doğrulama dönemlerinde aylık nehir akışlarını simüle etmede SWAT modelinin iyi performansını rapor etmektedir (Aouissi vd. 2014). Ancak, Akdeniz

koşullarında SWAT kalibrasyonu ile ilgili bazı problemler, çoğunlukla iklim değişkenliği nedeniyle rapor edilmektedir. Örneğin orta şiddetli yağış olaylarında; model, toprak nemi, sediment verimi ve akış açısından makul bir aralıkta simüle etmekten, bu özellikler Akdeniz bölgesindeki yüksek şiddetli yağış olayları durumunda iyi tahmin edilememektedir (Ramos, M., vd, 2015a). Türkiye'de SWAT modeli, farklı havzalarda akarsu akışını, sediment verimini ve su kalitesini tahmin etmek için kullanılmıştır. Modelin, sediment verimini ve diğer hidrolojik parametreleri başarıyla simüle etmekte olduğu belirlenmiştir. Bu incelemeler, benzer özelliklere sahip bir havzada su kaynakları planlaması için karar vermede bir araç olarak SWAT modelinin uygulanmasını önermektedir (Ekdal A. vd. 2011; Paker vd. 2021; Paker vd 2022, Duru vd 2017, Karakoyun ve Kayab 2022).

Modelleme konusunda gerek Ülkemizde gerekse uluslararası literatürde karşılaşılan hatalar da yok değildir. Bunlardan birisi model sonuçlarının tamamen doğru kabul edilmesidir. Unutulmamalıdır ki model, gerçek sistemin sadece basitleştirilmiş bir ifadesidir ve hangi model olursa olsun, vereceği sonuçlar en fazla modele girilen veriler kadar doğru olabilir. Model çıktılarının havzayı temsil edebilmeleri için modelin öncelikle kalibre edilmesi, yani havzayı tanımlamakta olan modele özgü parametre değerlerinin tahmin edilmesi zorunludur. Kalibre edilmiş bir modelin kullanılabilirliği ve güvenilirliğinin sınanması için de verifikasyon işleminin yapılmış olması gerekmektedir. Kalibrasyon (uyarlama) ve verifikasyon (doğrulama) işlemleri gerçekleştirilmeden model çıktılarına güvenmek doğru değildir. İkinci önemli konu ise model seçiminin amaca uygun bir şekilde yapılması, bu açıdan da model varsayımlarının iyi anlaşılmasıdır. Seçilen modelin matematiksel eşitliklerinin, çalışmakta olan havzada gerçekleşmekte olan doğal süreçleri açıklamakta yetersiz kalması durumunda, modelden sağlıklı sonuç beklenemez.

Modellerin karşılaştırıldığı bir çalışmaya örnek olarak, Golmohammadi vd (2014) tarafından hazırlanan ve dokuz farklı modelin karşılaştırıldığı bir raporda, MIKE SHE modelinin havza bazında verilere en yakın sonuçları vermekte olduğu ve doğru tahmin edebilmekte olduğu belirtilmiştir. Ancak son zamanlarda, SWAT (serbestçe erişilebilen) modeli, uluslararası SWAT konferansları, çok sayıda bilimsel toplantıda sunulmakta olan SWAT ile ilgili yüzlerce bildiri ve hakemli dergilerde yayınlanmakta olan düzinelerce makale tarafından kanıtlandığı gibi, güçlü bir disiplinler arası havza modelleme aracı olarak uluslararası kabul görmektedir. Bu çalışmada kullanılan SWAT modelinin detayları aşağıda verilmiştir.

2.4. Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT)

Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (Soil and Water Assessment Tool, SWAT), yüzey ve yer altı suyunun kalitesini ve miktarını simüle etmekte ve arazi kullanımının, arazi yönetimi uygulamalarının ve iklim değişikliğinin çevresel etkisini tahmin etmek amacıyla küçük bir havzadan büyük bir nehir havzasına kadar kullanılabilen bir modeldir. SWAT, toprak erozyonunun önlenmesi ve kontrolü, noktasal olmayan kaynak kirliliği kontrolü ve havzalarda bölgesel yönetimin değerlendirilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. SWAT modeli, ABD Tarım Bakanlığı (USDA), Tarımsal Araştırma Servisi tarafından yürütülmekte olan yaklaşık 40 yıllık modelleme çalışmalarının bir devamı niteliğindedir.

Model, 1990'ların başlarında SWRRB (Arnold ve Williams, 1987) ve ROTO (Arnold vd, 1995) birleştirilerek oluşturulmuştur. SWAT modelinin, farklı mekânsal ve zamansal ölçeklerde; çeşitli çevresel koşullar, arazi yönetimi stratejileri, arazi kullanımı değişimleri ve iklim değişikliği senaryoları altında akarsu akışı ve kirleticili taşıyımını simüle etmede etkili ve kapsamlı bir araç olduğunu ortaya koyan çok sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır (Arnold ve Fohrer, 2005; Gassman vd, 2007, 2010, 2014; Tuppard vd, 2011).

SWAT'ın temel güçlü yönleri arasında, bitki büyümesi ve ayrıntılı arazi yönetimi de dâhil olmak üzere arazi süreçlerini akarsu süreçleriyle bütünleştirilmesi, çoklu çevresel süreçlerin ve kirleticilerin entegrasyonu, kamuya açık kodu, güçlü teknik model desteği ve çeşitli arayüz araçlarının kullanılabilirliği bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, verilerin ön ve son işlemlerini, SWAT modellerinin yapılandırılmasını, parametrelendirilmesini ve kalibrasyonunu desteklemekte olan diğer yazılımların (Gassman vd. 2007, 2014) varlığı da modelin diğer güçlü yanları arasında sayılabilmektedir. Dünya çapındaki çeşitli SWAT uygulamaları, modelin su miktarı ve kalite sorunlarını değerlendirmedeki esnekliğini ve etkililiğini göstermekte olup, aynı zamanda modelin ve model geliştirme ihtiyaçlarının bazı zayıf yönlerini ve sınırlamalarını da ortaya çıkarmaktadır. Geçtiğimiz 40 yıl zarfında, modelin yetenekleri halihazırda önemli ölçüde genişletilmiş ve dünyanın her yerinden bilim insanlarının yanı sıra çekirdek SWAT geliştirme grubu tarafından çeşitli konular ele alınarak, bireysel süreçlerin, belirli çevresel koşullar ve bölgesel adaptasyonlar için SWAT'ın diğer modellerle bağlantıları sağlanmıştır (Gassman vd, 2007).

2.4.1. SWAT geçmişi ve teorileri

2.4.1.1. Yağış

SWAT modeli; yağış, sıcaklık, nem, güneş radyasyonu ve rüzgar hızı gibi meteoroloji istasyonu verilerine ihtiyaç duymaktadır. Model, daha sonra noktasal ölçüm değerlerini bir alt havzanın ağırlık merkezine en yakın gösterge değerini almak suretiyle mekânsal raster değerlerine dönüştürmektedir. Orografik etkiyi hesaba katmak için SWAT, ayrıca DEM'den yükseklik bantlarını hesaplamakta ve alt havzanın ağırlık merkezinden yükseklik farkına istinaden yeni değerler hesaplanmaktadır. Nokta yağış verilerinin raster değerlerine dönüştürülmesi Eşitlik 2.2 kullanılarak hesaplanmaktadır (Neitsch vd., 2011):

$$R_{band} = R_{day} + (EL_{band} - EL_{gauge}) \cdot \frac{Plaps}{days_{pcp, yr}}, \text{ when } R_{day} > 0.01 \quad (2.2)$$

Eşitlikte, R_{band} istenilen yükseklik bandındaki yağış (mm), R_{day} yağış ölçerde kaydedilen yağış (mm), EL_{band} yükseklik bandındaki ortalama yüksekliği (m), EL_{gauge} ise kayıt ölçerdeki yüksekliği (m), $Plaps$, yağış bindirme oranı ($mm \cdot km^{-1}$) ve $days_{pcp, yr}$ alt havzadaki bir yıldaki ortalama yağışlı gün sayısını ifade etmektedir.

Her bir bant için yağış değerleri hesaplandıktan sonra, ortalama alt havza yağış miktarı şu şekilde (Eşitlik 2.3) hesaplanmaktadır:

$$R_{day} = \sum_{bnd=1}^b R_{band} \cdot fr_{band} \quad (2.3)$$

Eşitlikte, R_{day} , orografik etkiler için düzeltilmiş günlük ortalama yağış miktarını (mm), R_{band} , her yükseklik bandında düşen yağışı (mm), fr_{band} , yükseklik bandı içindeki alt havza alanının fraksiyonunu ve b , alt havza içindeki yükseklik bantlarının toplam sayısını göstermektedir. Meteoroloji istasyonlarından elde edilemeyen veriler, SWAT bünyesindeki hava durumu üretici aracı vasıtasıyla da tahmin edilebilmektedir. Hava durumu üretici aracı, uzun vadeli (20 yıla kadar) iklim verilerinden hesaplanması gereken parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Uzun vadeli iklim verilerini simüle etmek için gerekli parametrelerin listesi ve SWAT'ın istasyon verilerinden diğer raster hava parametrelerini nasıl hesapladığına dair detaylar, Neitsch vd.(2011)'de sunulmaktadır.

2.4.1.2. Toprak su içeriği

Bir toprak profiline giren suyun yönü, farklı yollardan birini takip edebilmektedir. Toprak bünyesindeki su, bitki alımı veya buharlaşma ile atmosfere geçebilmekte, kök bölgesinin altından süzülme suretiyle bir akiferi yeniden doldurabilmekte veya profilde yanal bir hareket sergileyerek akarsu akışına katkıda bulunabilmektedir. Kök bölgesi su içeriğinin hesabı, toprakların tarla kapasitesine bağlı bulunmaktadır. Bitkiler, toprağın alt sınırını (devamlı solma noktası) temsil etmekte olan maksimum 1500 kPa emiş gücüne kadar toprak suyunu absorbe edebilmektedir. Diğer taraftan, tamamen doygunluğa ulaşmış bir toprak, yerçekimi kuvveti etkisiyle toprak suyunun bir kısmını kaybedecektir. Yerçekimi kuvveti ile suyun derine sızmasından sonra geriye kalan su miktarına drene edilmiş üst sınır (tarla kapasitesi) adı verilmektedir. Topraklar, tarla kapasitesinin üzerinde su depolayamaz. Topraktaki bitki tarafından kullanılabilir su miktarı şu şekilde (Eşitlik 2.4) hesaplanabilmektedir:

$$AWC = FC - WP \quad (2.4)$$

Eşitlikte AWC kullanılabilir su tutma kapasitesini, FC tarla kapasitesini ve WP devamlı solma noktasını ifade etmektedir.

SWAT, her katman için devamlı solma noktasındaki bir toprağın su içeriğini şu şekilde (Eşitlik 2.5) hesaplamaktadır (Neitsch vd. 2011):

$$WP_{ly} = 0.40 \cdot \frac{m_c \cdot \rho_b}{100} \quad (2.5)$$

Eşitlikte WP_{ly} , bir toprak tabakasının solma noktasındaki su içeriğini, m_c kil içeriğinin yüzdesini ve ρ_b , toprağın hacim ağırlığını ($Mg \cdot m^{-3}$) ifade etmektedir. Son olarak, bu katmanın tarla kapasitesindeki su içeriği şu şekilde (Eşitlik 2.6) hesaplanabilmektedir:

$$FC_{ly} = WP_{ly} + AWC_{ly} \quad (2.6)$$

Hidrolik iletkenliği daha yüksek olan ve geçirimsiz veya yarı geçirgen bir alt toprak katmanına sahip topraklar için yanal hareket önemlidir. SWAT, bir tepe yamacının su basan bölgesinden birim alan başına çekilebilecek su miktarını hesaplamak için kinematik bir depolama modeli (Eşitlik 2.7) uygulamaktadır (Neitsch vd. 2011):

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 \cdot H_o \cdot \phi_d \cdot L_{hill}}{2} \quad (2.7)$$

Eşitlikte, $SW_{ly,excess}$, L_{hill} , ϕ_d ve H_o terimleri sırasıyla doymuş bölgede birim yamaç alanındaki drene edilebilir su hacmini (mm), yamaç uzunluğunu (m), toprağın drene edilebilir gözenekliliğini (mm mm^{-1}) ve doymuş bölgenin kalınlığının toplam kalınlığa oranını göstermektedir (mm mm^{-1}). Eşitlik 2.7'deki 1000 rakamı milimetre birimini metre birimine dönüştürme katsayısıdır. H_o 'yu çözmek için formülün aşağıdaki gibi (Eşitlik 2.8) yeniden düzenlenmesi gerekmektedir:

$$H_o = \frac{2 \cdot SW_{ly,excess}}{1000 \cdot \phi_d \cdot L_{hill}} \quad (2.8)$$

Toprak tabakasının etkili gözenekliliği şu şekilde (Eşitlik 2.9) hesaplanmaktadır:

$$\phi_d = \phi_{soil} - \phi_{fc} \quad (2.9)$$

Burada ϕ_{soil} , ϕ_{fc} ve ϕ_d sırasıyla toprağın toplam gözenekliliğini (mm mm^{-1}), tarla kapasitesinde suyla dolu gözenekliliği (mm mm^{-1}) ve drene edilebilir gözenekliliği (mm mm^{-1}) temsil etmektedir. Doymuş bir tabakadan drene edilebilecek su miktarı Eşitlik 2.10 ile hesaplanmaktadır.

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad (2.10)$$

Eşitlikte, FC_{ly} , katmanın tarla kapasitesindeki su içeriğini (mm) ifade ederken, SW_{ly} , katmanın belirli bir gündeki su içeriğini (mm) ifade etmektedir. Belirli bir yamaç için net deşarjı şu şekilde (2.11) belirleyebiliriz:

$$Q_{lat} = 24 \cdot H_o - v_{lat} \quad (2.11)$$

Q_{lat} yamaçtan gelen debiyi (mm) göstermekte olup, v_{lat} yamaç çıkışındaki akış hızını temsil etmektedir (mm s^{-1}).

2.4.1.3. Evapotranspirasyon

Gerçek evapotranspirasyonu tayin etmek için SWAT modeli, potansiyel evapotranspirasyonu hesaplamakta olan Penman Monteith, Priestley-Taylor ve Hargreaves yöntemlerini kullanmaktadır. SWAT modeli, toprak tarafından absorbe edilen yağmur miktarını hesaplamak amacıyla kanopi buharlaşmasını kullanmaktadır. Birinci faktör olarak gün boyunca kanopi tarafından tutulabilecek su miktarı Eşitlik 2.12 ile hesaplanmaktadır.

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (2.12)$$

Eşitlikte can_{mx} , bitkinin tam gelişimi sırasında kanopi tarafından tutulabilecek en yüksek su miktarını (mm); can_{day} , o gün için kanopi tarafından tutulan su miktarını (mm) ifade etmektedir. Bitki örtüsünün en yüksek yaprak alanı indeksi LAI_{mx} ile temsil edilmekte olup, LAI günlük yaprak alanı indeksini göstermektedir.

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} + \dot{R}_{day} \text{ ve } \dot{R}_{day} = 0, \text{ Eğer } \dot{R}_{day} \leq can_{day} - R_{INT(i)} \quad (2.13)$$

$$R_{INT(f)} = can_{day} \text{ ve } R_{day} = \dot{R}_{day} - (can_{day} - R_{INT(i)}), \text{ Eğer } \dot{R}_{day} > can_{day} - R_{INT(i)} \quad (2.14)$$

Burada $R_{INT(i)}$ o gün bitki örtüsünde tutulan başlangıçtaki su miktarı (mm), $R_{INT(f)}$ gün sonunda bitki örtüsünde tutulan su miktarı (mm) (Eşitlik 2.13), $\dot{R}_{day}$ bitki tarafından tutulan yağış miktarı (mm), ve can_{day} , o gün için kanopi tarafından tutulabilecek maksimum su miktarıdır (mm). Son olarak, potansiyel evapotranspirasyon (E_o), bitki yüzeyinden tutulan su miktarından daha azsa:

$$E_a = E_{can} = E_o, \text{ ve } R_{INT(i)} = R_{INT(f)} = E_{can} \quad (2.15)$$

Eğer kanopideki serbest su miktarı potansiyel buharlaşmadan fazlaysa:

$$E_{can} = R_{INT(i)}, \text{ ve } R_{INT(f)} = 0 \quad (2.16)$$

Burada E_{can} , bitki yüzeyinden olan buharlaşma miktarını (mm), E_o , o gün için havzanın potansiyel evapotranspirasyonu (mm) ve E_a , o gün için gerçek evapotranspirasyonu (mm) temsil etmektedir. Daha sonra evapotranspirasyonun bir parçası olarak terlemenin belirlenmesi gerekir. Bu araştırmadaki potansiyel evapotranspirasyon Penman-Monteith eşitliği (Eşitlik 2.17) kullanılarak hesaplanmıştır ve aşağıdaki denklemlerle temsil edilmektedir (Neitsch vd. 2011):

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p [e^o - e^z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (2.17)$$

Eşitlikte, λE gizli ısı akısı yoğunluğu ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), E buharlaşma miktarı (mm d^{-1}), Δ doymuş buhar basıncı-sıcaklık eğrisinin eğimi, ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), H_{net} net radyasyon ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), G topraktan olan ısı akısı yoğunluğu ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), ρ_{air} havanın yoğunluğu (kg m^{-3}), C_p , sabit basınçtaki özgül ısı ($\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$), e^o , z yüksekliğindeki havanın doymuş buhar basıncı (kPa), e^z , z yüksekliğindeki suyun doymuş buhar basıncı (kPa), γ psikrometrik sabit ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), r_c bitki kanopi direnci (s m^{-1}) ve r_s aerodinamik direnci (s m^{-1}) temsil etmektedir.

Yukarıda verilen denklemde yer alan tüm faktörlerin hesaplanma yöntemlerine ilişkin daha ayrıntılı bilgiye Allen vd. (1998)'den ulaşılabilir. Toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşma miktarı terleme, gölgeleme ve bitki yüzeyinden buharlaşmaya

göre düzeltilmiş potansiyel evapotranspirasyon ile tayin edilmektedir. Belirli bir gün için toprak yüzeyinden en yüksek buharlaşma şu şekilde (2.18) belirlenmektedir:

$$E_s = \dot{E}_o cov_{sol} \quad (2.18)$$

$$cov_{sol} = e^{(-5.0 \times 10^{-5} \times cv)} \quad (2.19)$$

Eşitlikte cv ve cov_{sol} sırasıyla günün toprak üstü biyokütlesini (kg ha^{-1}) ve toprak örtüsü indeksini (-) temsil etmektedir. Bitki su tüketimini (E_s) mm gün^{-1} biriminde hesaplamak için, her gün topraktan buharlaşabilecek maksimum su miktarı aşağıdaki gibi (Eşitlik 2.20) düzeltilmektedir:

$$\dot{E}_s = \min \left(\frac{E_s \cdot \dot{E}_o}{E_s + E_t} \right) \quad (2.20)$$

Burada sırasıyla E'_s , E_t , E_s ve E'_o belirli bir günde bitki su kullanımına göre düzeltilen maksimum toprak buharlaşmasını (mm), belirli bir günde gerçekleşen terlemeyi (mm), belirli bir günde maksimum toprak buharlaşmasını (mm) ve bitki yüzeyinden olan buharlaşmayı göstermektedir (mm). SWAT modeli, buharlaşma gereksinimini toprak katmanları arasında dağıtarak belirli bir seviyedeki maksimum buharlaşma miktarını belirlemek için Eşitlik 2.21'i kullanmaktadır:

$$E_{soil,z} = E''_s \left(\frac{z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 \cdot z)} \right) \quad (2.21)$$

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \cdot esco \quad (2.22)$$

Eşitlikte E''_s bir günde buharlaşabilecek maksimum su miktarını (mm), $E_{soil,z}$ z derinliğinde buharlaşma için gerekli su miktarını (mm), z toprak derinliğini ve $E_{soil,ly}$ ise katman için buharlaşma ihtiyacını (mm), $E_{soil,zl}$ toprak katmanının alt sınırındaki buharlaşma ihtiyacını (mm), $E_{soil,zu}$ toprak katmanının üst sınırındaki buharlaşma ihtiyacını (mm) ve $esco$ toprak buharlaşması ile ilgili düzeltme faktörünü göstermektedir. Daha fazla bilgi Neitsch vd. (2011) tarafından verilmektedir.

Son olarak, kök bölgesinde bir evapotranspirasyon ihtiyacı varsa, yer altı suyu yeniden kazanımı hesaplanır. Revap (kapillar yükselme), potansiyel evapotranspirasyonun bir parçası olarak tahmin edilmekte olup, esas olarak su tablasının kök bölgesine kadar olan derinliğinin bir fonksiyonudur. Revaptan buharlaşma miktarı SWAT tarafından aşağıdaki şekilde (Eşitlik 2.23'ten 2.26'ya kadar) hesaplanmaktadır:

$$W_{revap,mx} = \beta_{revap} \cdot E_o \quad (2.23)$$

$$W_{revap} = 0 \text{ if } aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad (2.24)$$

$$W_{revap} = W_{revap,mx} - aq_{shthr,rvp}, \text{ if } aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + W_{revap,mx}) \quad (2.25)$$

$$W_{revap} = W_{revap, mx} \text{ if } aq_{sh} \geq (aq_{shthr, rvp} + W_{revap, mx}) \quad (2.26)$$

β_{revap} , revap katsayısı (-) ve W_{revap} , gün içindeki su eksikliğini telafi etmek için doymamış bölgeye taşınan suyun gerçek miktarını (mm), $W_{revap, mx}$, günlük su eksikliğine tepki olarak doymamış bölgeye taşınan en yüksek su miktarını (mm), $aq_{shthr, rvp}$, sığ akiferde yenilenmenin gerçekleşmesi için gerekli olan en düşük su seviyesini ve aq_{sh} , günün başlangıcında orada tutulan toplam su miktarını (mm) ifade etmektedir (Neitsch vd. 2011).

2.4.1.4. Direk yüzey akış

SWAT'ta direk akışı (taban akışı hariç), hesaplamak için (Eşitlik 2.27) kullanılan USDA-SCS eğri numarası yöntemi de dahil olmak üzere, çeşitli yöntemlerle tahmin edilebilmektedir (USDA-SCS, 1972).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2.27)$$

Burada Q_{surf} toplam akış (mm), R_{day} günlük yağış miktarı (mm), I_a başlangıçtaki tutulmaları (yüzey depolama, bitki yüzeyinden tutulma ve akıştan önce sızma (mm) dahil) ve S tutma parametresini (mm) göstermektedir. S toprağa, arazi kullanımına, yönetimine ve eğime bağlı olarak mekansal olarak farklılık göstermekte olup Eşitlik 2.28 kullanılarak tahmin edilmektedir.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2.28)$$

Yukarıda belirtilen formülde güne ait eğri numarası CN olarak belirtilmektedir. Başlangıçtaki tutulmalar, I_a , genellikle 0.2S olarak tahmin edilmekte olup, denklem 2.27 şu şekilde (Eşitlik 2.29) yeniden yazılmaktadır:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2.29)$$

SCS eğri numarası, toprağın geçirgenliğinin, arazi kullanımının, arazi örtüsünün ve önceki toprak suyunun bir fonksiyonunu oluşturmaktadır. Bu nedenle, toprağın hidrolojik grubuna, toprak su koşullarına bağlıdır ve hatta farklı eğim sınıfları için ayarlama gerektirebilmektedir. SCS eğri numarasının belirlenmesine yönelik ayrıntılı prosedür, USDA-SCS (1972) tarafından detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

2.4.1.5. Derin drenaj akışı

Toprağın doygun olmayan bölgesinden alt katmanlara doğru hareket etmekte veya süzülme olan fazla su, sığ veya derin akiferlerin beslenmesine katkıda bulunmaktadır. Su tablasının derinliği, doygun ve doygun olmayan bölgelerin hidrolik özellikleri, suyun sığ akifere ne kadar hızlı nüfuz etmekte olduğu hususunda önemli bir rol oynamaktadır (Neitsch vd, 2011). Hem sığ hem de derin akiferlerin beslenme miktarını belirlemek için Eşitlik 2.30 kullanılmaktadır:

$$W_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot W_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot W_{rchrg,i-1} \quad (2.30)$$

Burada $W_{rchrg,i}$ i gününde akifere nüfuz etmekte olan su miktarını (mm), δ_{gw} yer üstü jeolojik formasyonların gecikme süresi veya drenaj süresini (gün), W_{seep} i. günde toprak profilinin altından çıkmakta olan toplam su miktarını (mm) ve $W_{rchrg,i-1}$, i-1. günde akifere nüfuz etmekte olan su miktarını (mm) ifade etmektedir. Birinci günde, toprak profilinden çıkmakta olan toplam su miktarını belirlemek için aşağıdaki denklem (Eşitlik 2.31) kullanılmaktadır:

$$W_{seep} = W_{perc,ly=n} + W_{crk,btm} \quad (2.31)$$

Eşitlikte $W_{perc, ly = n}$, n. toprak profilinin alt katmandan süzülmekte olan su miktarını ve $W_{crk, btm}$, çatlaklardan toprak profilinin alt sınırını geçmekte olan su akışı miktarını ifade etmektedir.

2.5. SWAT Aracı Kullanılarak Havza Sisteminin Modellemesi

Akdeniz bölgelerinden elde edilen SWAT makaleleri de dâhil olmak üzere (Aloui vd, 2023) SWAT kullanımlarını, SWAT bileşenlerinin değerlendirmelerini veya son yirmi yıla ait diğer SWAT araştırmalarını içeren 7000'den fazla yayınlanmış makale bulunmaktadır (Anonymous 1, 2024). Akdeniz bölgesinde yürütülmekte olan pek çok çalışmada SWAT modeli başarıyla uygulanmış ve doğrulanmıştır (Briak vd. 2016; Mendas vd, 2010; Hallouz vd. 2018; Khalid, 2018). SWAT modeli, Fas'ın R'dom bölgesindeki çeşitli hidrolojik bileşenleri doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır (Brouziyne vd, 2018). Benzer şekilde Koutalakakis vd. (2017), Yunan Menoikio sıradağları havzasındaki su tahsisinin ve nehir akışının SWAT modeli kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur. Ek olarak, Tunus Joumine havzasında gerçekleştirilen çalışmalar, SWAT modelinin kalibrasyon ve doğrulama zamanları esnasında aylık nehir akışlarını modellerken iyi bir performans sergilemekte olduğunu ortaya koymuştur (Aouissi vd. 2014). Akdeniz koşullarında gözlemlenen SWAT kalibrasyon sorunlarının temel nedeni iklim değişkenliğidir. Örneğin model, Akdeniz bölgesindeki hafif yağış olayları sırasında toprak nemi, sediment verimi ve yüzey akışını belirli bir aralıktaki doğru bir şekilde tahmin etmekteyken, söz konusu parametrelerin yoğun yağış olayları sırasında doğru tahmin edilme oranının azaldığı bildirilmiştir (Ramos, M., vd, 2015a).

SWAT modeli Türkiye'de çeşitli havza akış oranını, sediment biriktirme oranını ve su kalitesini hesaplamak için uygulanmıştır. Örneğin Türkiye'nin güneydoğusundaki Köyceğiz-Dalyan'da Ekdal vd. (2011), WASP yazılımına girdi olarak su kalitesini simüle etmek amacıyla SWAT modelini kullanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, SWAT modelinin yüksek kaliteli çıktı verileri, WASP'ın izleme verilerinin genel modelini doğru bir şekilde tahmin etmekte olduğu belirlenmiştir. Ayrıca SWAT, Ankara havzasındaki akış ve sediment verimini başarıyla tahmin etmiştir (Duru vd., 2017). Benzer şekilde Aşağı Seyhan Ovası'ndaki bir tarım havzasındaki günlük akış ve NO_3 miktarları SWAT modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Çalışma, revize edilmiş akarsu ağlarının Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) çerçevesinde SWAT'a dâhil edilmesinin akış ve nitrat dinamiklerinin modelleme kapasitesini artırmakta olduğunu ortaya koymuştur (Dönmez vd, 2020). Paker

vd. (2021) yakın zamanda Fırat-Dicle havzasında iklim değişikliğinin yüzey akışı ve barajlar üzerindeki etkilerini araştırmak için SWAT modelini kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Dolayısıyla modelin sediment çıktısını, iklim değişikliği etkisini ve diğer hidrolojik değişkenleri doğru bir şekilde tahmin etmekte olduğu ortaya koyulmuştur. Bu değerlendirmeler, benzer özelliklere sahip bir havzadaki su kaynakları için SWAT modelinin bir planlama stratejisi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak Türkiye'nin en sorunlu havzaları olan karstik havzalarda arazi kullanımı/örtü ve iklim değişikliği senaryolarının değerlendirilmesine yönelik SWAT modelinin geçerliliği henüz araştırılmamıştır.

2.5.1. Farklı arazi kullanımı/arazi örtüsü senaryoları altında SWAT modelini kullanan nehir akışı simülasyon çalışmaları

Son yıllarda, dünya çapında çeşitli arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerinin etkisini değerlendirmek amacıyla SWAT modeli pek çok araştırmada kullanılmıştır. Bu araştırmalar temel olarak arazi kullanımı ve arazi örtüsü de dâhil olmak üzere insan müdahalelerinin toprak ve su kaynakları ile etkileşimine odaklanmaktadır. Bu çalışmalar, araştırmacılara hidrolojik sistemin mevcut durumunu etkilemekte olan faktörleri anlamada ve izleme istasyonundan elde edilmekte olan verilerle su kaynaklarının zamansal eğilimlerini belirlemede önemli bir destek sağlamıştır (Gabre vd., 2022; Ruiz 2021; Wang vd., 2022; Remondi vd, 2016 ve Asghari vd, 2023). Diğer taraftan modelleme, hidroloji alanında çalışmakta olan bilim insanları için çeşitli arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişiklikleri altında hidrolojik unsurların gelecekteki durumunu anlamaları için gözlemlenen verilere istinaden gelecek senaryoları oluşturmalarının ve senaryolara göre birden fazla karar vermelerinin önünü açmaktadır. Ayrıca, modelleme bu senaryolara bağlı olarak çeşitli kararlar alınarak havza düzeyinde stratejik su kaynakları yönetiminin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (Ruiz, 2021).

Arazi örtüsü ve arazi kullanımı doğal hidrolojik döngüyü önemli ölçüde etkilemekte olan iki faktördür. Havza hidrolojisi, arazi kullanımındaki değişikliklerden, maksimum akış, toplam yüzey akışı ve su kalitesindeki değişiklikler de dâhil olmak üzere çeşitli şekillerde etkilenebilmektedir. Toprak örtüsü ve arazi kullanımındaki değişiklikler buharlaşmayı, toprakta tutulmakta olan su miktarını, akarsu akışını ve infiltrasyonu önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Sel ve taşkınların neden olmakta olduğu insani ve ekonomik risklerin yanı sıra, havzalardaki yağış, özellikle yağmur, yüzey akışı vasıtasıyla verimli toprak kaybına yol açmaktadır. Bu süreç, erozyon ve sedimentasyon sonucunda toprakların kanallara, akarsulara ve rezervuarlara taşınmasına neden olmaktadır (Asghari vd., 2023). Ayrıca sürdürülebilir şehir planlaması, ağaçlandırma ve baraj veya rezervuar yönetimi gibi sürdürülebilir stratejik gelişmeler, tarımsal verimliliği olumlu yönde değiştirmiş ve doğal afetleri kısmen azaltmıştır. Ancak ormansızlaşma, kentleşme ve çölleşme gibi arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişiklikleri, gelişmekte ve gelişmemiş olan ülkelerde kuraklığı ve taşkınları artırmış ve tarımsal verimliliği azaltmıştır (Wang vd., 2022). Örneğin, Liu vd. (2022), yeniden ağaçlandırmanın ve ormansızlaşmanın yıllık akışı önemli ölçüde azaltabileceğini ve artırabileceğini bildirmiştir. Ancak kentleşme nehirlerde yüksek pik akımlara, toprakta düşük infiltrasyona neden olmuştur. Bu nedenle, arazi kullanımı ve arazi örtüsünün akarsu akışı üzerindeki etkisi genellikle bölgeye özgü olup ve atmosfer, toprak bünyesi, mekânsal ölçek ve insan müdahalesini içeren pek çok değişkene bağlıdır (Wang vd. 2017; Zuo vd. al.2016).

Türkiye'de havzalardaki sediment yükü, su kalitesi ve yüzey akış koşullarını değerlendirmek için SWAT modelini kullanmakta olan bazı araştırmalar yapılmıştır (Karakuoyun, 2022; Güngör, 2018, Duru, 2015; Gölpınar, 2017). Türkiye'de arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişiminin akarsu akışı üzerindeki etki değerlendirmesinde SWAT modelinin uygulanmasını göstermekte olan internet sitelerinde pek çok çalışmaya ulaşılabilmektedir. Örneğin Sadek vd. (2014), Seyhan Nehri Havzası'ndaki akarsu akışı ve sediment verimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için üç farklı arazi kullanımı ve arazi örtüsü veri seti (CORINE, GLCC ve GlobCover) kullanmıştır. Çalışmada, aylık akış verileriyle kalibre edildiğinde, SWAT modelinin çeşitli arazi kullanımı ve arazi örtüsü kaynaklarına daha az duyarlı olduğu, arazi kullanımı ile arazi örtüsü haritalarının farklı zamanlarda hazırlanmış olmasının ve bunlar arasındaki mekânsal çözünürlüğün önemli olduğu belirlenmiştir. Sediment ve yüzey akış simülasyonlarının iyi bir şekilde kalibre edilmesi ve doğrulanması, tüm arazi kullanımı ve arazi örtüsü veri setlerinin Seyhan nehri havzasındaki hidrolojik modelleme için uygun SWAT modeli veri giriş kaynakları olarak kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca, Akdeniz ikliminin etkisi altındaki Aşağı Seyhan Ovası'nda gerçekleştirilen SWAT modeli çalışması, bypass akışları aracılığıyla önemli ölçüde sulama suyu kaybı yaşandığını ortaya koymakta, ancak veri belirsizlikleri nedeniyle günlük azot yüklerinin doğru bir şekilde simüle edilmesinde zorluklar yaşanmaktadır (Karnez E. vd., 2017).

Benzer şekilde, İstanbul'da Büyükçekmece nehir havzasındaki çeşitli arazi kullanımı ve arazi örtüsü senaryolarına akışın tepkisini araştırmak için SWAT modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada 1990 ve 2006 tarihli LCLU haritaları temel alınmıştır. Meteorolojik ve akış verileri, modelin 40 yıllık bir süre boyunca çalıştırılmasını sağlamıştır. Bu çalışmada, havza ve alt havza düzeyinde arazi kullanımı ve arazi örtüsü senaryolarının etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, aynı iklim koşulları altında arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişimlerinin hidrolojik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, buharlaşma ve terlemenin, havzanın diğer hidrolojik bileşenlerine kıyasla arazi kullanımına ve arazi örtüsü değişimine oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir (Sertel vd. 2019).

Ayrıca, Nasirzadehdizaji ve ark. (2022), İstanbul'daki küçük bir havzada SWAT modelini kullanarak arazi kullanımı ve arazi örtüsünün sediment yükü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmada, sıfır ormansızlaşma durumu ile ormansızlaşma sonrası sediment yükü tepkisini karşılaştıran farklı senaryolar değerlendirilmiştir. Ormansızlaşma sonrası senaryoda yüzey akışında belirgin bir artış görülmüş ve sediment yükünde ise %24'lük bir artış rapor edilmiştir. Benzer şekilde, diğer hidrolojik bileşenlerin de ormansızlaşmaya olumsuz tepki verdiği belirlenmiştir. Örneğin, sıfır ormansızlaşma senaryosuna kıyasla buharlaşma ve terleme ve yaprak alan indeksi sırasıyla %5 ve %24 azalmıştır. Özgenç (2024) ise Türkiye'deki Gala Gölü havzasında arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişimlerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu değerlendirmede SWAT modeli kullanılmış ve sonuçlar, tarım arazileri (%4.3) ve mera arazileri (%5.3) gibi pek çok arazi kullanımı ve arazi örtüsü sınıfında önemli azalmalar olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, bu değişikliklerin buharlaşma ve erozyonda artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda, havza genelinde yüzey akışın arttığı ve hidrolik geçirgenliğin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Genel olarak, Türkiye'deki arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisini incelemekte olan literatür değerlendirildiğinde, kentleşme, ormansızlaşma ve tarım arazileri gibi yapay yüzeylerin artışının pik akış ve toplam akış oluşumunu azalttığı sonucuna varılabilmektedir. Ancak, su bütçesindeki en önemli parametrelerden biri olan buharlaşma-terlemenin, arazi kullanımı veya arazi örtüsünde bir değişiklik olmadığı takdirde azalabileceği, dünya çapındaki havza değerlendirmelerine ilişkin ortak bir araştırma bulgusudur.

2.5.2. Farklı iklim değişikliği senaryoları altında akarsu akış hacminin simüle edilmesinde SWAT modelinin uygulanması.

İnsan faaliyetleri ve iklim değişikliği, doğal ortamları dönüştürmekte ve havzadaki akarsu akışı da dâhil olmak üzere önemli meteorolojik ve hidrolojik değişikliklere neden olmakta olan iki temel unsurdur. İklim değişikliği yağışın sıklığını, hızını ve yoğunluğunu değiştirerek nemli veya kurak bölgelerde yüzeysel akışın artmasına veya azalmasına yol açabilmektedir. Diğer taraftan, insan faaliyetleri sera gazı emisyonlarında artışa neden olmuş ve bu durum küresel ısınmaya önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Artan sıcaklıklar dünya genelinde buharlaşma ve nem kaybını artırarak kutup bölgelerindeki buz ve kar örtüsünün erimesini hızlandırmaktadır. Ayrıca, iklim değişikliği antropojenik faaliyetlerin etkisini artırmış ve bu durum, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde kuraklık ve sel gibi pek çok çevresel felaketin meydana gelmesine neden olmuştur (Zhang vd., 2020; Zeng vd., 2020; McCrystall vd., 2021). Su kaynaklarını ölçmek ve yönetmek amacıyla karar vericiler ve planlamacılar iklim değişikliği etki değerlendirmeleri yapmalıdır. Bu amaçla dünya çapında gelecekteki iklim değişikliği senaryolarını değerlendirmek için çeşitli yöntemler kullanılmak suretiyle çok sayıda iklim değişikliği çalışması yürütülmektedir (Doulabian vd., 2021; Ceyhunlu vd., 2024). Ayrıca, önerilen IPCC standartlarına göre iklim parametrelerinin gelecekteki eğilimini ve değişkenliğini tahmin etmek için gözlemlenen iklimsel zamansal veriler kullanılarak çeşitli sayısal denklemler ve algoritmalar uygulanmaktadır (Kömüscü vd., 2024; Setti vd., 2023). Tahmin edilen meteorolojik parametrelerin çıktıları kullanılarak, gelecekte hidrolojik sistem üzerindeki akış dalgalanmalarını anlamak için SWAT dâhil olmak üzere farklı hidrolojik algoritmalar kullanılmaktadır (Babu vd. 2024; Brook vd. 2022; Anil vd. 2024).

Hindistan'da gelecekteki yüzey akışı ve yağış tahmini için SWAT modeli girdisi olarak CMIP6 kapsamında (birleşik model karşılaştırma aşaması 6) üç dönem altındaki çeşitli senaryolar seçildiğinde yağış ve nehir akışında belirgin bir artış gözlenmiştir (Anil vd. 2024). Benzer şekilde, geliştirilmiş SWAT modelinin üstün performansı, bir rezervuardan etkilenmekte olan havzada yürütülmekte olan bir çalışmada rapor edilmiştir. Söz konusu çalışmada, iklim değişikliği senaryoları kapsamındaki rezervuar düzenlemeleri, çıkışta 26 m³/s'lik akış azalmasına yol açmıştır (Sheng vd., 2023). Uzun vadeli zamansal meteorolojik gözlemlerin azlığı nedeniyle, araştırmacılar geçmişte farklı iklim zaman serisi verilerini kullanmışlardır. Uydu gözlemleri, oluşturulan bölgesel iklim modelleri veya RCM koleksiyonu ve yerinde ölçümlerden oluşan IMERG ve NASA POWER'ın, pek çok bilim insanı tarafından incelendiğinde, yer tabanlı iklim gözlemleriyle yüksek korelasyona sahip olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkisini analiz etmek için IMERG verileri Brook vd. (2022) tarafından kullanılmıştır. Bu çalışmanın bulguları, gözlemlenen iklim verilerinin kaydedilmediği bir havza üzerinde iklim değişikliği çalışmalarının etki

değerlendirmesinde yapılan önyargı düzeltmesinden sonra IMERG veri setlerinin iyi performans sergilemekte olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca bu çalışma, RCP8.5 senaryoları kapsamında, maksimum sıcaklıkta 3.48 °C, minimum sıcaklıkta 4.19 °C ve potansiyel evapotranspirasyonda %17.85 artış nedeniyle ortalama yıllık akış ve yağışın, sırasıyla %44.14 ve %15.13 oranında önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.

İklimin karmaşıklığı ve Akdeniz bölgesinin iklim değişikliğine karşı hassasiyeti birçok çalışmada rapor edilmiş olmakla birlikte, iklim değişikliğinin Türkiye'nin Akdeniz bölgesindeki nehir akışı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Volk vd. (2024), İzmir ili yakınlarındaki Gördes Barajı havzasında iklim değişikliğinin simüle edilmiş yüzey akışı, bitkisel verimi ve azot yükleri üzerindeki etkisini incelemek için SWAT modelini uygulamıştır. Çalışma, RCP8.5 ve RCP4.5 senaryolarının yıllık rezervuar deşarjını sırasıyla 4 m³/s ve 0.7 m³/s artırdığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca iklim değişikliğinin mısır, patates ve hıyar bitkilerine zarar vereceği öngörülürken arpa ve kışlık buğday gibi tahılların rekoltesini artıracakları belirlenmiştir. Benzer şekilde Peker vd. (2022), iklim değişikliğinin, karla beslenen ve çok sayıda büyük baraj içeren Fırat-Dicle havzası gibi, sınır aşan nehir havzası üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Bu amaçla, tarihsel ve iklim değişikliği (CMIP5'ten RCP8.5 ve RCP4.5) senaryoları altında nehir akışını simüle etmek için SWAT modelini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, ortalama akış hacminin 2099 yılına kadar %5 oranında azalacağı öngörülmüş, ayrıca, yüzyılın sonuna kadar karla kaplı günlerin yaklaşık 37 ila 43 gün kısılacağı tahmin edilmiştir. Türkiye'nin Bitlis Çayı havzasında taşkın sıklıklarını değerlendirmek için bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, CMIP6 sıcaklık ve yağış senaryoları ile sosyo-ekonomik yollar (SSP) (ssp585 ve ssp245) kullanılarak gelecekteki günlük akışların simülasyonu için SWAT modeli kullanılmıştır. Olasılık fonksiyonları altı farklı taşkın aralığına (5-, 10-, 25-, 50-, 100-, 500-) göre tarihsel ve gelecek dönemler için değerlendirilmiştir. Araştırma bulguları, SSP 585 senaryosu kapsamında 2025 ile 2099 arasında akış hızında %21.1 ile %31.7 arasında değişen önemli bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, yetkilileri su kaynakları altyapısını planlarken iklim değişikliğinin etkilerini göz önünde bulundurmaya teşvik etmektedir (Yalçın, 2024).

2.5.3. Karstik özelliklerden etkilenen ve rezervuar tarafından işletilen havzalarda akarsu akış hacminin simüle edilmesinde SWAT modelinin uygulanması.

Manavgat Nehri Havzası'nda çok sayıda kaynağın ve yer altı su kanalının bulunması, ayrıca literatürde bu bölgeye ilişkin bazı jeolojik haritaların incelenmesi ile, karstik oluşumlardan etkilenen havzaların araştırılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Literatür taraması esnasında, Manavgat Nehri havzasında bazı jeolojik özelliklerini karstik akiferin etkisini açıklamakta olan çok sayıda çalışmaya ulaşılmıştır. Ayrıca, su kütleleri sınıflandırması kapsamında hazırlanan arazi kullanımı uydu haritaları, havzanın farklı yerlerinde üç büyük ölçekli rezervuarın ve az sayıda küçük ölçekli su rezervuarının bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, çalışma alanının SWAT modeliyle modellenmesinde kullanılabilecek önemli bir bilimsel arka plan sunmuştur. Karstik terminolojiyi ve SWAT çalışmalarının karstik havza modellemesindeki performansını daha iyi anlamak için Zeiger vd. (2021), kireçtaşı, dolomit, granit gibi çözünebilir karbonat kayalarının kimyasal olarak çözünmesi veya atmosferden veya toprak bölgesinden karbondioksit (CO₂) ile zenginleştirilmiş suyun neden olduğu buharlaşmalarla oluşturulan bir sistemi tanımlamaktadır. Düdenler ve dolinler, kaybolan akarsular ve kaynaklar ile yer altı ve hidrolojik olarak ilişkili çatlaklar, yarıklar ve

kanallardan oluşan devasa ağların tümü, karstlaşma derecesine bağlı olarak gelişebilmektedir. Karstik akiferlerin önemi, kolayca bulunabilen bir su kaynağı olmasından kaynaklanmakta olup dünya nüfusunun %20-25'ine tatlı su erişimi sağlamakta ve bazı bölgelerde dünyanın toplam içilebilir su arzının %50'si karstik kaynaklardan elde edilmektedir. Karstik akiferler gelişmiş akış dinamiklerine, depolama düzenlerine ve beslenme özelliklerine sahiptir. Ayrıca hem insan hem de çevresel etkilerden kaynaklanan azalma ve kalite bozulmalarının baskısı altındadırlar (Alkhoury vd, 2023).

Hidrolojik simülasyon modelleri, birleşik hidrodinamik değerlendirme, karst hidrolojisi modellemesi ve iklim değişikliği ve arazi kullanımı/örtü değişikliği altında karst suyu mevcudiyetinin tahmini de dâhil olmak üzere pek çok uygulamada karst akiferi süreçlerini değerlendirmek için etkili işlevler haline gelmiştir (Mudarra vd, 2019). Toplu (lumped), kara kutu (black box), dağıtılmış (distributed) ve yarı dağıtılmış (semi-distributed) modeller havza modellemesindeki dört ana model sınıfını oluşturmaktadır. Kara kutu modellerinde yağış olaylarını kaynak suyu salınımları ile ilişkilendirmek için matematiksel transfer denklemleri kullanılmaktadır. Bu modeller, havzanın coğrafi verilerinin veya fiziksel süreç temsiline mevcut olmadığı durumlarda tercih edilmektedir. Modellemeciler veri eksikliği sorunlarıyla karşılaştıklarında toplu (lumped) modelleri kullanırlar. Doğrusal ve doğrusal olmayan rezervuar modellerinin bir kombinasyonu, karstik akifer katmanlarının depolama ve akış özelliklerini tahmin etmek amacıyla yer altı suyu izleme çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu yöntem, karstik sistemin çoğunlukla temsil ettiği parametrelerin bölgesel ortalama özelliklerine dayanmaktadır. Toplu modeller, genel hidrolojik sistemin mekânsal ölçeğindeki fiziksel süreçleri temsil etmeyi amaçlar. Buna karşın, yarı dağıtılmış ve dağıtılmış modeller özellikle havza alanının coğrafi çeşitliliğini, yer altı özelliklerini, sınır koşullarını, girdileri ve hidrolojik süreçleri dikkate almaktadır (Gill vd, 2021). Yarı dağıtılmış modeller, havzayı hidrolojik tepki birimlerine (HRU'lar) ayırabilmekte ve her bir HRU'daki farklı hidrolojik süreçleri temsil edebilmektedir. Bunun yanı sıra, düşük mekânsal çözünürlükle alansal beslenme süreçlerini modellemek için kavramsal rezervuarlar kullanabilir veya karst akiferinin iç yapısına karşılık boru sistemlerini kanal alanları olarak ele alabilmektedir.

Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT), iklim değişikliği projeksiyonları ve arazi kullanım değişikliği senaryoları altında gelecekteki karstik su kaynaklarını öngörme gerekliliğinin artmasıyla birlikte, karst hidrolojisi araştırmalarında giderek daha popüler hale gelmiştir. SWAT, yarı dağıtılmış ve süreç odaklı bir model olup, havzanın hidrolojik döngüsünün zamansal ve mekânsal dönüşümünü modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Model, erozyon yoluyla toprak kaybını, su kalitesini, arazi kullanım değişikliğinin ve iklim değişkenliğinin havza süreçleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla havzayı alt havzalara ve ardından arazi kullanımı, toprak tipi ve eğim gibi kriterlere göre hidrolojik tepki birimlerine (HRU) ayırmaktadır (Alkhoury vd, 2023). Pek çok çalışma, standart SWAT modelini doğrudan karstik havzalarda kullanmış, bazıları ise SWAT kodunu çeşitli karst akış rejimlerini ve özelliklerini dikkate alarak karst hidrolojisini daha iyi yansıtabilecek şekilde değiştirmiştir (Ricci vd, 2023; Zhou vd, 2022; Geng vd, 2021; Kim vd, 2012). SWAT, Güney Karolina'daki bir karstik havza için aylık akarsu akış dinamiklerini tahmin etme yeteneğini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Çalışma sonuçları, karstik özelliklerin su dengesi üzerindeki önemli

etkisini ortaya koymuştur. Özellikle, yüzeyaltı yollarla aşağı havzadaki mağara kaynağına iletilmekte olan eksik akışların, boru ve yaygın akışlardan kaynaklandığı ve bu durumun koy çıkışında daha doğru bir simülasyon sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, bulgular, aşağı havza göl seviyelerinin ve karstik boşluklar/boru sistemlerinin havzanın hidrolik dengesi üzerindeki etkisini vurgulamıştır. Hidrolojik simülasyon performansının, karstik özelliklerin tespiti ve buna bağlı SWAT parametre ayarları için LiDAR gibi yüksek çözünürlüklü hassas Sayısal Yükseklik Modelleri (DEM) ile geliştirilebileceği belirtilmiştir (Amatya vd, 2011). Benzer şekilde, karstik Panjiang Nehri havzasında yutakları (dolin, düden) simüle etmek amacıyla SWAT'ın gölet modülünü uyarlamak için bir araştırma yapılmıştır. SWAT kodunun güncellenmesi, bir çıkışa yakın belirli bir ölçüm istasyonundaki hidrograf pik değerini düşürürken, iyileştirilmiş alt havzanın taban akışını artırmıştır. Bu çalışma, modifiye edilmiş SWAT modelinin karstik yutakların (dolinlerin) hızla yeniden dolumunu doğru bir şekilde simüle edebileceğini ve hidrolik bileşenleri başarıyla ayarlayabileceğini göstermiştir (Zhou vd, 2022). Geng vd. (2021) tarafından, izleme yöntemi ve arazi çalışmasına dayalı olarak karstik yer altı nehirlerinin yüzey nehirlerine basitleştirilmesi için DEM modifikasyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin temel amacı, karstik alanlardaki topografik ve normal havza sınırlarının tutarlılığını sağlamaktır. SWAT modeli, tek rezervuarlı bir modelden üç rezervuarlı bir modele dönüştürülmüştür. Çalışma sonuçları, modifiye edilmiş SWAT modelinin Nash–Sutcliffe etkinlik katsayısının, orijinal SWAT modeline kıyasla 0.09 daha fazla olduğunu ve benzer parametre aralıklarıyla daha düşük belirsizlik sergilediğini göstermiştir.

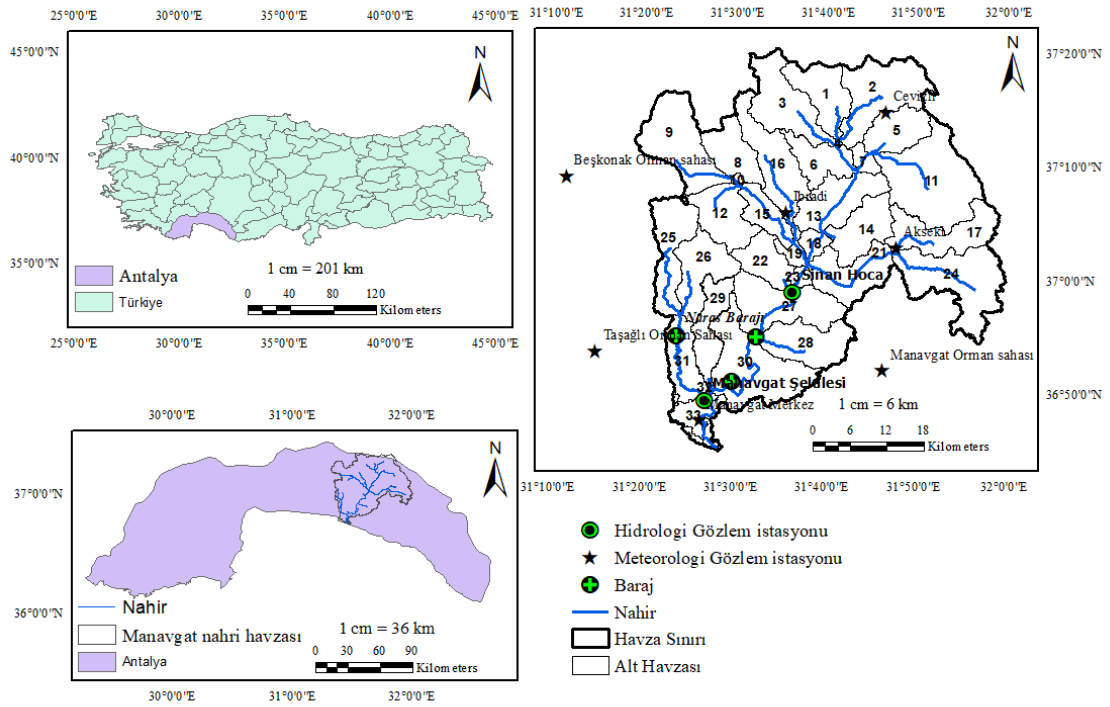
Kim vd. (2012) tarafından ABD'de yaklaşık 4500 km²'lik bir alanı kapsayan Grenada Gölü Rezervuar havzasında su dengesi modellemesinde rezervuar etkisini belirlemek için bir çalışma yürütülmüştür. Etki değerlendirmesi için üç ölçüm istasyonunun uzun yıllık akarsu akış verileri ile bir rezervuar çıkış akış verisi kullanılmıştır. Rezervuara boşalan memba tarafındaki havzaların kalibrasyon ve doğrulama sonuçları, mansap tarafındaki akarsulara göre daha iyi bir korelasyon göstermiştir. Analizlere göre, aylık akarsu verileriyle kalibre edildiğinde, dört rezervuar çıkış seçeneğinin tamamı anlamlı bir korelasyon göstermiştir. Ancak, günlük akarsu değerleri için SWAT modelinin hedef salım işlevi tatmin edici bulunmamıştır. Bu bulgular, SWAT modelinin hedef salım yönteminin, özel veya genel fark etmeksizin, sınırlı rezervuar verisiyle bile aylık nehir akışını yeterli bir şekilde temsil edebileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, hidroelektrik barajlar, sulama suyu depolamaları veya taşkın kontrol rezervuarları bulunan nehir havzalarında SWAT modelinin uygulanabilirliği açısından değerlidir.

Son dönemde Ricci vd. (2023), SWAT modelinin farklı havza sınır hatlarının belirlenmesi ve parametrelemeleri ile uygulanabilirliğini araştırmıştır. Bunlar (i), karstik alanları içeren, (ii) karstik alanları içermeyen ve (iii) karstik alt havzadan akışı baypas ederek yapılan parametrisasyon yapılandırmaları şeklinde test edilmiştir. Çalışma sonuçları, karstik alt havzanın baypas edilerek parametrisasyonun yapıldığı yapılandırmada (iii) modelin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Bu seçenekte, İtalya'nın Akdeniz bölgesi (Puglia) için kurak dönem (Mayıs-Temmuz) aylık akarsu akışı daha yüksek bir değer göstermiş, ancak simüle edilen toplam su üretimi (i) ve (ii) yapılandırmalarına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Çalışma, karstik alt havzalarda baypas akışının karst etkisi altındaki havzalarda simülasyonu iyileştirmek için doğrulanabileceği sonucuna varmıştır.

3. MATERİYAL VE METOT

3.1. Çalışma Alanı

Manavgat Nehri Havzası, Antalya ilinin doğusunda, 31 °20' - 32° 00' doğu boylamları ve 36° 45' - 37° 20' kuzey enlemleri arasında yer almakta olup (Şekil 3.1), kuzeyde Toros sıradağları güneyde ise Akdeniz ile sınırlandırılmıştır. Havza batıdan Köprüçay, kuzeyden Beyşehir ve Suğla kapalı havzaları, doğudan ise Karpuz ve Alara Çayı havzaları ile çevrilidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çalışma alanı

Güneyde Akdeniz kıyılarından kuzeyde Konya il sınırına kadar uzanmakta olan 2325 km²'lik bir alanı kaplamakta olan havza, Manavgat, Akseki ve İbradı ilçelerinin büyük bir bölümünü kapsamaktadır. Yerleşim yerleri, tarım arazileri ve turizm işletmeleri kıyıdaki dar, alüvyal arazilerde yoğunlaşmaktayken, kuzeye doğru uzanmakta olan geniş dağlık alanlar daha az yerleşimi barındırmakta ve çoğunlukla ormanlık ve kayalık bir örtüye sahiptir (Yıldırım, 2013).

Manavgat Nehri, 155.5 m³s⁻¹ debisiyle Türkiye'nin ve Akdeniz Bölgesi'nin en düzenli akan akarsularından biridir. Batı Toros Dağları'nın doğu yamaçlarından kaynaklanan derelerin birleşmesiyle oluşmaktadır. Dağlık ve ormanlık alanlardan geçerek kanyon şeklindeki dar bir vadiye akmakta ve ardından Manavgat ovasını geçerek Akdeniz'e dökülmektedir. Manavgat nehrinin 4.9 milyar m³ olan yıllık ortalama akış hacmi Türkiye'nin su potansiyelinin %2.5'ine tekabül etmektedir (Yıldırım, 2013).

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere Manavgat Nehri ve onunla birleşmekte olan akarsular havzada baskın bir rol oynamaktadır. Manavgat ilçe merkezinin hemen kuzeyinde nehre dâhil olan Kargıçayı, Manavgat nehrinin en önemli kolunu oluşturmaktadır. Ayrıca Akçay ve Değirmen Deresi, havzanın kuzeyinde Manavgat Nehri'nin sırasıyla ikinci ve üçüncü önemli yan dere akarsularıdır. Manavgat Nehri'ni beslemekte olan diğer alt ağlar ise genellikle yaz aylarında kurumakta, kış ve ilkbahar aylarında yağış olaylarına bağlı olarak yeniden akmaya başlamakta olan kanyonlar şeklinde görülmektedir. Manavgat Nehri'nin debisi kış aylarında 313 m³/s'ye ulaşmaktadır. Bunun sonucunda Manavgat ilçe merkezine 20 kilometre mesafede iki baraj inşa edilmiştir. Nehir suyu hidroelektrik üretiminin yanı sıra yaz aylarında tarımsal sulamada da kullanılmaktadır. İlk çalışmalarda planlanan toplam 5 hidroelektrik santralden üçü Manavgat Nehri üzerinde, diğer ikisi ise Değirmen Deresi ve Kargıçayı üzerinde kurulmuştur. Ayrıca, Sarılar Beli'nin kuzey kısmındaki Naras barajının inşaatı 2014 yılında tamamlanmıştır. Bununla birlikte, bölgeye enerji ve tarımsal su temini sağlamak amacıyla inşa edilen diğer barajlar arasında, 1620 GWh enerji üretim kapasitesine, 236 hm³ su depolama hacmine ve 4 km² göl yüzey alanına sahip olan Oymapınar Hidroelektrik Barajı (1977–1984) ile 220 GWh enerji üretim kapasitesine, 89 hm³ su depolama hacmine ve 8.6 km² göl yüzey alanına sahip Manavgat Hidroelektrik Barajı (1986–1987) bulunmaktadır. Ayrıca, tarımsal kullanım amacıyla inşa edilmiş Cevizli Gölü ve Titreyengöl gibi çeşitli ilave barajlar da bölgeye katkı sağlamaktadır (Yıldırım, 2013).

3.1.1. Çalışma alanının jeolojisi

Manavgat Nehri havzası, iç ve dış kesimleri yüksek derecede gelişmiş karstik akiferlerle karakterize edilen bir bölgede bulunmaktadır. Manavgat Nehri havzasındaki ilk jeolojik haritalama çalışması Blumenthal (1951) tarafından yapılmıştır. Daha sonra 1998 yılında Flecker doktora araştırmasını Köprüçay, Manavgat ve Aksu'nun jeolojisi üzerine yoğunlaştırmıştır. Manavgat havzası ile ilgili en güncel ve detaylı jeolojik araştırma Karabiykoğlu (2000) tarafından gerçekleştirilmiştir. Manavgat Havzası, Toros Karst Kuşağı'nın Batı Toros Dağları kesiminde, iç ve yüzey karstının yoğun olarak geliştiği bir alanda yer almaktadır. Toros kireçtaşı platformu, Jura-Kretase yaşlı kireçtaşlarından oluşmakta olup derinliği 1000-1500 m'ye kadar ulaşmaktadır. Güneyde ise Antalya Miyosen çökelleri bulunmaktadır. Bu akiferlerden beslenen karstik kaynaklar vasıtasıyla yüzey suyu toplama alanına yağıştan daha fazla su girmektedir. Nehir, yıllık toplam akışının üçte birini havzaya düşen yağışlardan ve üçte ikisini ise karstik kaynaklardan karşılamaktadır (Doğan, 2002; Ağca ve Doğan 2002).

3.2. SWAT Giriş Verileri

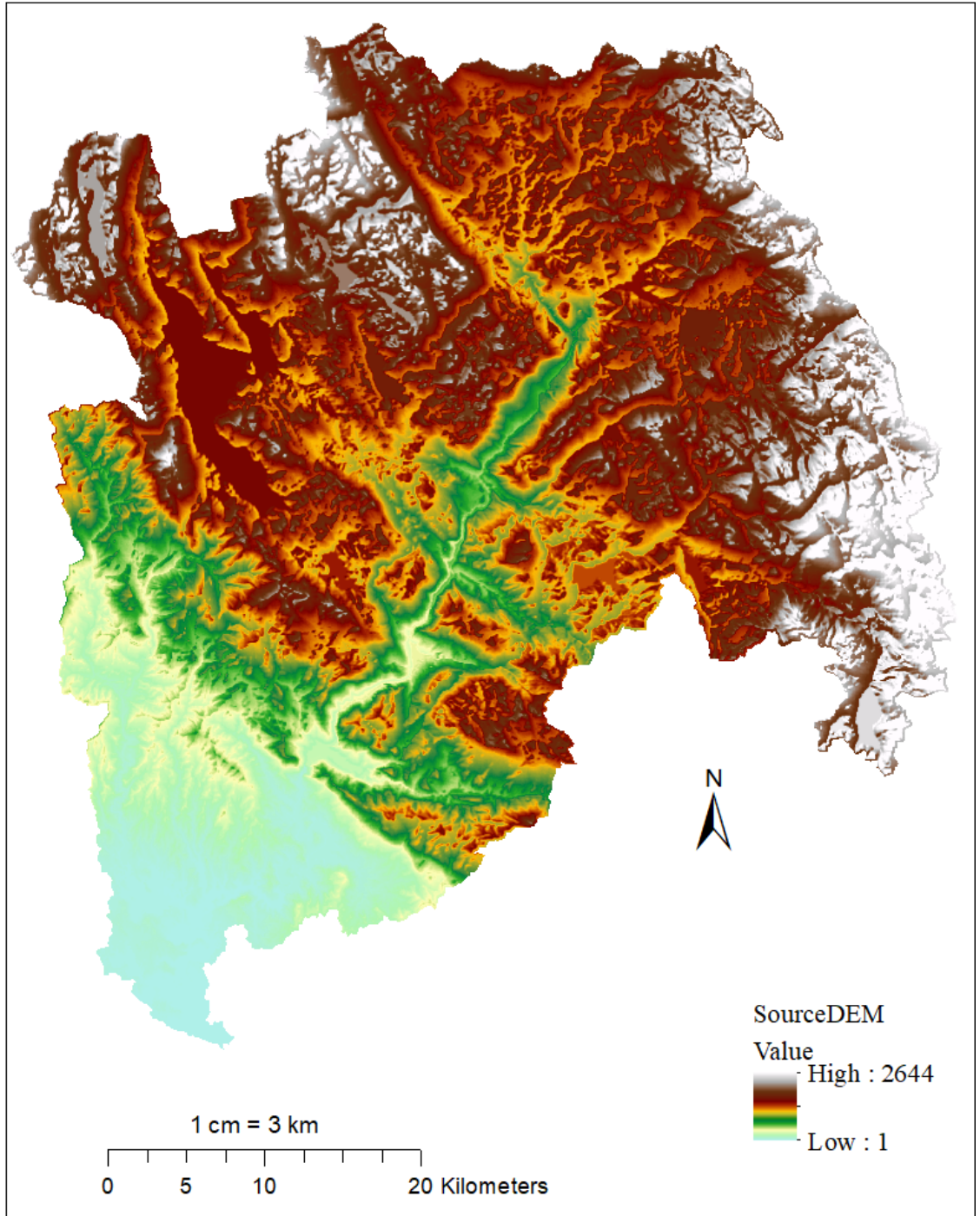
SWAT yazılımı su, sediment ve kirleticilerin havza yönetimindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde belirlemektedir. Bu etkiler bir hidroloji ve su kalitesi modeli kullanılarak simüle edilebilmektedir. SWAT, doğru bir şekilde işleyebilmesi için çeşitli girdi değişkenlerine ihtiyaç duyması sebebiyle oldukça kapsamlı bir modeldir. Modele girilmesi gereken çok sayıda özgün değişken sayesinde, su kütlesi özelliklerini tahmin etmeksizin önceden yorumlamak da mümkündür. SWAT yazılımı ayrıca meteorolojik, topografik, toprak tipi ve arazi kullanımı/arazi örtüsü verilerine de ihtiyaç duymaktadır. Bu durum ölçümlerin gerçekleştirilemediği bölgelerde dahi modelleme yapılmasını mümkün kılmaktadır.

3.2.1. Çalışma alanının jeolojisi

Mevcut çalışmanın hedeflerine ulaşmak amacıyla, çalışma alanının 2019 yılına ait 10 m çözünürlüklü arazi kullanım/örtü haritası Esri Arazi Örtüsü'nden (Esri Land Cover arcgis.com) indirilmiştir. Türkiye'nin arazi kullanımı/örtüsü haritası ve Manavgat nehri havzasının şekil dosyası ArcGIS 10.4'e yüklenmiş ve çalışma alanının arazi örtüsü veri tabanını Türkiye arazi kullanımı/örtüsü haritasından türetmek için maske ile çıkarma (extract by mask) aracı kullanılmıştır. Ayrıca, çalışma alanının elde edilen arazi kullanımı/örtüsü haritası WGS-1984/UTM bölgesi 36 N referans projeksiyon sistemine göre yeniden projelendirilmiştir. Daha sonra, harita, ArGIS 10.4 kullanılarak altı sınıfa (tarım arazisi, orman arazisi, su kütleleri, yerleşim yeri ve çıplak arazi) ayrılacak şekilde yeniden sınıflandırılmış ve bir Esri şekil dosyası olarak kaydedilmiştir. Arazi kullanımı/örtü haritasını SWAT modeli veri tabanına entegre etmek için, dört harf (AGRL, FRST, WATR, URBN ve RNGE) içeren arazi kullanımı/örtü kodları kullanılarak bir arama tablosu (look up table) oluşturulmuştur. Son olarak, her bir arazi kullanımı/örtü haritası, hidrolojik süreçlerin ayrı SWAT model simülasyonları için kullanılmıştır.

3.2.2. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli (DEM) kullanılarak topoğrafyası

Simülasyonlarda kullanılacak DEM, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) programı ile EarthExplorer (usgs.gov) platformundan 30x30 m çözünürlükte indirilmiştir. Manavgat Nehri havzasının topoğrafyası, her noktanın yüksekliğini tanımlayan DEM kullanılarak belirlenmiş ve model projeksiyon gereksinimlerine uygun olarak WGS-1984/UTM 36N sistemine göre yeniden düzenlenmiştir. İndirilen DEM'ler birleştirilmiş ve ArcGIS 10.4'ün mozaik ve boşluk doldurma (fill sinks) araçları kullanılarak eksiklikler giderilmiştir. Projeksiyonu yapılmış DEM, SWAT modeline entegre edilerek havza sınırlarını, drenaj alanlarını, akış yönlerini, akış birikimini, havza ve alt havza özellikleri ile birlikte akarsu ağlarını belirlemek için kullanılmıştır. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) ile temsil edilen Manavgat Nehri havzasının coğrafyası, deniz seviyesinden 2645 metre yüksekliğe kadar uzanmaktadır (Şekil 3.2).

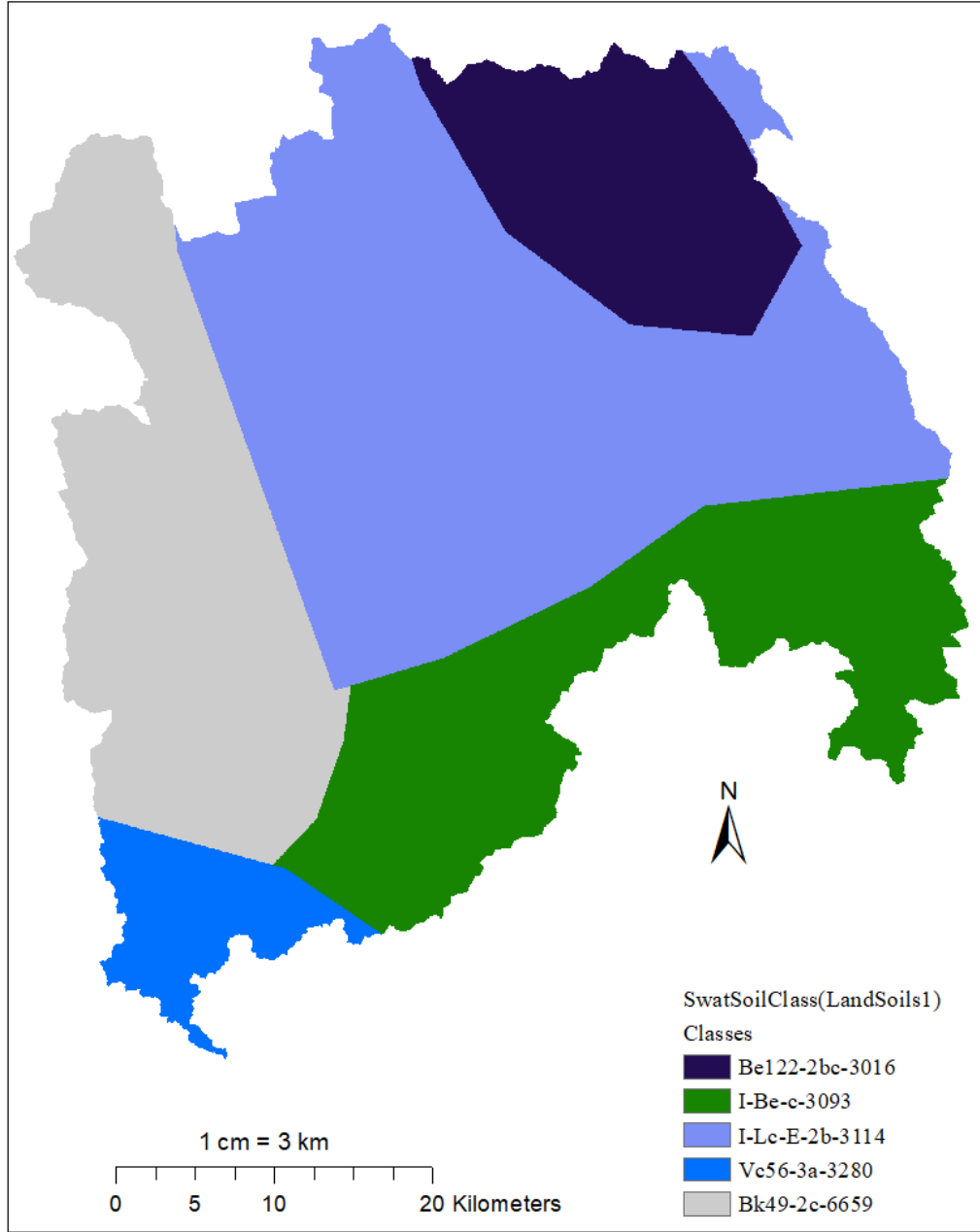


Şekil 3.2. Çalışma alanının Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)

3.2.3. Çalışma alanının toprak haritası

SWAT modeli, çalışma alanının toprak tipini ve başat kimyasal ve fiziksel toprak özelliklerini içeren bir toprak türleri veri tabanına ihtiyaç duymaktadır. Türkiye toprak haritası Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO DSMW) dünya veri tabanındaki dijital toprak haritasından alınmıştır. Daha sonra, ArcGIS 10.4'ün coğrafi işlem araçları kullanılarak Manavgat sınırının şekil dosyası (shapefile), toprak haritasının

kesilmesi için kullanılmıştır. Kesilen harita, havzadaki dört ana toprak grubunu göstermiştir; bunlar litosoller, kalsik kambisoller, ötrik kambisoller ve ötrik vertisollerdir. Çalışma alanındaki başat toprak grupları belirlendikten sonra toprak verilerini SWAT toprak veri tabanına entegre etmek için bir arama tablosu (look up table) hazırlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Çalışma alanının toprak haritası

3.2.4. Deşarj ve meteorolojik veriler

SWAT modeline, hidrolojik modelleme süreçleri için günlük meteorolojik verilerin girdi olarak girilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve yağışa ilişkin meteorolojik veriler

Meteoroloji IV. Bölge Müdürlüğü'nün (Antalya) Manavgat nehir havzasında bulunan Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonlarından (OMGI) 11 yıllık (2012-2022) süre için alınmıştır. Ancak gözlemlenen günlük güneş radyasyonu verilerinin eksikliğinden dolayı bu parametre halihazırda Akdeniz bölgesinde geçerli olan NASA POWER veri tabanından elde edilmiştir (Aboelkhair, 2019; Braga, 2021). Tüm meteorolojik veriler, bağlantılı arama tablolarıyla birlikte SWAT formatına göre hazırlanmıştır. Meteorolojik veri özellikleri ve gözlemlenen istasyonlara ilişkin daha fazla bilgili Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Günlük nehir akış verileri olarak 9-12 (Sinanhoca) 2012-2020 ve 9-18 (Manavgat Şelalesi) 2012-2022 yılları arasında hidrolojik ölçüm istasyonlarından kaydedilen değerler DSİ 13. Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Meteoroloji ve hidroloji gözlem istasyonların özellikleri

İstasyonun uzun adı	Kısa adı	No	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)
Akseki	Ak	18013	37.0468	31.7971	1063
Akseki/Cevizli Tekebeli	AkC	18610	37.2478	31.7747	1420
Mevki					
İbradı	İbradı	17927	37.0962	31.5953	1036
Manavgat/Beşkonak					
Orman Sahası	MBOS	18011	37.1441	31.1909	142
Manavgat Merkez	Manavgat	17954	36.7895	31.4410	38
Manavgat Orman Sahası	MOS	18839	36.8614	31.6756	998
Manavgat/Taşagıl Orman					
Sahası	MTOS	17917	36.8886	31.2494	38
Sinanhoca Hidroloji					
İstasyonu	27	9-12	36.9781	31.6083	255
Manavgat Şelale Hidroloji					
İstasyonu	33	9-18	36.8177	31.4502	4

3.3. Hidrolojik Gelecek Senaryosu Verileri

3.3.1. Küresel dolaşım modeli (GCM) ve bölgesel iklim modeli (RCM) verileri

Çalışma alanındaki meteorolojik verilerin 2012-2022 yılları arasındaki değişimi dikkate alınarak, geleceğe yönelik senaryolar için gerekli veri setlerinin hazırlanması amacıyla Kanada İklim Değişikliği Modeli'nin (CanESM2) bir parçası olan ikinci nesil Küresel Dolaşım Modeli'nden (GCM) indirilen tahmin verilerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Bu süreçte, modelin doğruluğunu artırmak ve yerel ölçekli detayları yakalamak için Bölgesel İklim Modeli (RCM) verileri veya uydu tabanlı gözlem verilerine ihtiyaç duyulmuştur. CanESM2 iklim senaryoları, geçmiş dönem için 1962–2005 ve gelecek dönem için 2006–2100 yıllarını kapsamaktadır. Bu nedenle, çalışma alanına ait gelecekteki GCM senaryolarını küçültmek amacıyla, öncelikle Manavgat Nehri havzasında bulunan ilgili iklim istasyonuna RCM veya uydu tabanlı günlük meteorolojik verileri temin etmek gerekmektedir. Bugüne kadar, ücretsiz meteorolojik veri sağlamakta olan ve Akdeniz bölgesi de dâhil olmak üzere farklı bölgelerde kullanılan çeşitli atmosferik model veri setleri dünya genelinde yaygın olarak bulunmaktadır. Bunlar arasında CFSR, ERA, JRA-55, MERRA, NCEP/NCAR, NASA IMERG gibi modeller

yer almaktadır (Aboelkhair vd, 2019; Rodrigues vd., 2021; Monteiro vd, 2018; Negm vd, 2017). Ancak bu çalışmaların pek çoğunda mevsimsel yanlılığın yanı sıra topografik ve iklimsel anormalliklerin düzeltildiği doğrulanmıştır. Bununla birlikte, söz konusu veri setlerinin format karmaşıklığı ve uzun vadeli zamansal kullanılabilirliklerinin sınırlı olması nedeniyle, 1982–2022 dönemleri için yalnızca MERRA-2 RCM verilerine, 2000–2019 döneminde ise NASA IMERG uydu gözlemlerine (günlük yağış, minimum ve maksimum sıcaklık) erişim sağlanabilmektedir. Daha sonra MERRA2 veri setinin veya NASA IMERG verilerinin yerel meteorolojik gözlemlerle uyumlu olup olmadığını değerlendirmek için korelasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, belirleme katsayısı (R^2) ve Nash-Sutcliffe (NSE) katsayısı gibi farklı istatistiksel göstergeler kullanılmıştır.

3.3.2. İstatistiksel Ölçek Küçültme Modeli (Statistical Downscaling Model, SDSM) aracını kullanarak gelecekteki iklim senaryolarının projeksiyonu

İklim değişikliği senaryolarına göre nehir akışlarını değerlendirebilmek amacıyla küresel dolaşım modellerinden (GCM) birine ait iklim değişikliği projeksiyonlarını elde etmek gerekmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından onaylanmış ve farklı iklim değişikliği senaryoları altında (Anonymous 4., 2024) iklim parametrelerinin gelecekteki eğilimlerini öngörmek amacıyla yaygın olarak kullanılmakta olan pek çok GCM bulunmaktadır. Bu modeller arasında CCCMA CGCM3, CNRM CM3, CSIR MK3, GISS MODEL ER ve CanESM2 gibi önde gelen modeller yer almaktadır. Ancak, bu modellerden elde edilen veriler mekânsal olarak düşük çözünürlüğe sahip olduğundan, doğrudan iklim etkisi modellemesinde kullanılamamaktadır. Bu nedenle, söz konusu verilerin modelleme öncesinde yerel ölçeğe uyarlanabilmesi için boyutlarının küçültülmesi gereklidir. Büyük ölçekli ve düşük zamansal çözünürlüğe sahip GCM verilerinin, yerel ölçek ve yüksek zamansal çözünürlüğe dönüştürülmesi temel bir ihtiyaçtır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, kaba mekânsal çözünürlükteki verilerin yerel düzeye uyarlanması amacıyla iki temel teknik kullanılmaktadır: İstatistiksel ölçek küçültme ve dinamik ölçek küçültme. Her iki yaklaşım da sera gazı konsantrasyonlarının artışı ile ilişkilendirilen potansiyel iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bilim insanları, GCM verilerini yüksek çözünürlüklü yerel ölçeğe dönüştürmek amacıyla bugüne kadar çeşitli istatistiksel ölçek küçültme araçları geliştirmiş ve kullanmıştır. Bu araçlar arasında WGEN, LARS-WG, MSDH ve SDSM gibi yöntemler yer almaktadır (Zhang vd. 2020). Bu yöntemler, iklim değişikliğinin bölgesel düzeydeki etkilerini daha iyi anlamak ve karar alma süreçlerinde kullanılabilecek veri setleri oluşturmak için önemli bir kaynak sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, hibrit bir istatistiksel ölçek küçültme modeli olan SDSM yazılımı tercih edilmiştir (Wilby vd. 2014). SDSM, GCM verilerinin yerel ölçeğe uyarlanması amacıyla bir hava durumu üreticini (WG), çoklu doğrusal regresyon (MLR) teknikleri ile entegre bir şekilde kullanmaktadır. SDSM, farklı hidro-klimatolojik araştırmalarda geniş kapsamlı iklim değişikliği etki değerlendirmelerinde başarıyla uygulanmış ve tatmin edici çıktı performansı sağlamıştır. Bu modelin etkinliği, Maqsood vd. (2024), Abdulla vd. (2020), Rahman vd. (2019) ile Abaspour vd. (2009) gibi çalışmalarda ortaya konmuştur. SDSM'nin bu uygulama alanlarındaki başarısı, modelin iklim değişikliği senaryoları altında yerel düzeyde güvenilir projeksiyonlar üretebilme yeteneğini vurgulamaktadır. İstatistiksel ölçek küçültme modeli (SDSM), tahmin edilecek değişkenler (gözlenen meteorolojik değişkenler) ile giriş verilerinden regresyon

parametreleri üreten NCEP öngörülleri (NCEP/NCAR yeniden analiz veri setleri) arasında bir ilişki oluşturmaktadır. GCM verilerinin ölçeğinin küçültülmesi için izlenmesi gereken adımları şunlardır: a. kalite kontrolü, b. veri dönüştürme, c. değişken taraması, d. model kalibrasyonu, e. hava durumu veri üretimi, f. istatistiklerin özetlenmesi, g. frekans analizi, h. senaryo oluşturma ve i. sonuçların karşılaştırılması (Babel ve Karssenber, 2013). Bu çalışmada, CanESM2 modeline ait GCM verileri ve Ulusal Çevre Tahmin Merkezi/Ulusal Atmosfer Araştırma Merkezi'nden (NCEP/NCAR) alınan yeniden analiz verileri, 2006-2009 yılları arasında tarihsel ölçüm verileri ile istatistiksel bir ilişki kurmak amacıyla kullanılmıştır. Sonuçta, GCM çıktıları orta düzey senaryo (RCP 4.5) ve yüksek emisyon senaryosu (8.5'lik RSP'ler) için elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. Gözlemlenen veriler ve GCM verilerinin kalibrasyonunda kullanılan Ulusal Çevresel Tahmin Merkezine (NCEP) ait 26 öngörücünün özellikleri

No	Öngörüler	Kod	No	Öngörüler	Kod
1	Ortalama deniz seviyesi basıncı	Mslpgl	14	850 hPa Hava akış gücü	P5zhgl
2	Yüzey akış gücü	P_fgl	15	850 hPa bölgesel hız	P8_fgl
3	Yüzey bölgesel hızı	P_ugl	16	850 hPa meridyen hızı	P8_ugl
4	Yüzey meridyen hızı	P_vgl	17	850 hPa girdap	P8_vgl
5	Yüzey girdabı	P_zgl	18	850 hPa rüzgâr yönü	P8_zgl
6	Yüzey rüzgâr yönü	P_thgl	19	850 hPa sapma	P850gl
7	Yüzey sapması	P_zhgl	20	500 hPa jeopotansiyel yüksekliği	P8thgl
8	500hPa Hava akış gücü	P5_fgl	21	850 hPa jeopotansiyel yüksekliği	P8zhgl
9	500 hPa bölgesel hız	P5_ugl	22	Yüzeye yakın bağıl nem	R500gl
10	500 hPa meridyen hızı	P5_vgl	23	Yüzeye yakın özgül nem	R850gl
11	500hPa girdap	P5_zgl	24	500 hPa özgül/bağıl nem	Rhumgl
12	500 hPa rüzgâr yönü	P500gl	25	850 hPa özgül/bağıl nem	Shumgl
13	500 hPa sapma	P5thgl	26	2 m'de ortalama sıcaklık	Tempgl

3.3.3. Gelecek senaryoların trend analizi

SDSM aracı ile günlük yağış, günlük minimum ve maksimum sıcaklık senaryoları gibi iklim verileri projekte edildikten sonra, sonraki adım bu projeksiyonların eğilim tespiti açısından analiz edilmesidir. Yıllık, mevsimlik ve aylık yağış ile minimum ve maksimum sıcaklık eğilimlerini tespit etmek için Mann-Kendall eğilim testi (Mann, 1945; Kendall, 1975), RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına istinaden kullanılmıştır. Mann-Kendall testi (Eşitlik 3.1- 3.4) ve Sens eğim testi Eşitlik 3.5 hesaplanmıştır:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (3.1)$$

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 = \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 = \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 = \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)2n(n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3.3)$$

$$Z_s = \begin{cases} S - \frac{1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ S + \frac{1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\beta = Median\left(\frac{x_i - x_j}{t_i - t_j}\right) \quad (3.5)$$

Burada n, veri noktalarının sayısını, x_i ve x_j , i ve j zaman serilerindeki veri değerlerini ($j > i$), sign fonksiyonu Var(S) veri değerlerinin varyansını, m bağlı grupların sayısını, t_i bağların kapsamını, β , trend büyüklüğünü gösteren Theil-Sen tahmincisini ve Z_s , Standart normal testi göstermektedir. Bağlı bir grup, aynı değeri içeren bir dizi örnek veri değeridir. Mann-Kendall testinin Z_s değerinin +/- işaretinden sırasıyla trendlerde artış ve azalma gösteren pozitif/negatif bir trend elde edilmektedir. Elde edilen trendler önem derecelerine göre ölçülür. Test trendleri belirli bir α anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilir. $|Z_s| > Z_{1-\alpha/2}$ olduğunda sıfır hipotezi reddedilir, bu durumda zaman serisinde anlamlı bir eğilim var demektir. Bu çalışmada kullanılan anlamlılık düzeyi 0,05'tir. $|Z| > 1.96$ olduğunda sıfır hipotezi reddedilir ve trend %5 düzeyinde anlamlıdır.

3.4. Arazi Kullanımı/Örtüsü Senaryoları

ESRI-LULC küresel haritaları, 2017, 2019 ve 2022 yıllarına ait arazi kullanımı ve arazi örtüsü haritasını elde etmek için kullanılmış ve bu haritalardan araştırma bölgesi maskelenerek çıkarılmıştır. Bu katman, 10 m çözünürlükte ESA Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen küresel arazi kullanımı/arazi örtüsü (LULC) haritasını temsil etmektedir. Harita, ESRI'nin temel derin öğrenme modeli ile üretilmiş olup, Sentinel-2 L2A yüzey yansıma verilerinden elde edilen altı bantlı veriyi (mavi, yeşil, kırmızı, yakın kızılötesi ve iki kısa dalga kızılötesi bandı) kullanmaktadır. Nihai haritayı oluşturmak için model, yıl boyunca birden fazla görüntüleme tarihi üzerinde çalıştırılmış ve elde edilen çıktılar her yıl için nihai temsili bir harita halinde birleştirilmiştir. Ana harita, dokuz farklı arazi kullanımı ve arazi örtüsü türünü göstermektedir. Ancak, SWAT modeli, veri tabanı formatına dayalı LULC haritaları gerektirdiğinden, bu harita SWAT modeli ile uyumlu hale getirilmiş ve altı ana kategoriye göre yeniden sınıflandırılmıştır. Bu kategoriler: su kütleleri (nehirler, barajlar ve göletler), ormanlar (ağaçlık ve çalılık alanlar), tarım arazileri (pirinç ekili alanlar dahil yağışa dayalı ve sulanan bitkiler), çorak alanlar (bitki örtüsü bulunmayan yüzeyler), konut alanları (yerleşim ve yapılaşma bölgeleri) ve mera arazileridir.

İndirilen haritaların doğruluğu, görüntü birimlerinde yer alan bireysel pikseller kullanılarak test edilmiştir. Doğruluk değerlendirmesi, kullanıcı doğruluğu, üretici

doğruluğu, genel performans ve Kappa katsayısı analizlerini içermektedir. Kullanıcı doğruluğu, sınıflandırıcının ilgilenilen sınıfa ait olarak tanımladığı ancak aslında diğer sınıflara ait olan piksellerle ilişkili hataları ölçmektedir. Üretici doğruluğu ise, sınıflandırıcının atladığı ve ilgilenilen sınıfa ait piksellerle bağlantılı olan eksiklik hatalarını yansıtmaktadır. Genel doğruluk, doğru bir şekilde tanımlanan örneklerin toplam içindeki yüzdesini ifade etmektedir (Story ve Congalton, 1986). Kappa Katsayısı, bir sınıflandırma yönteminin hata oranını azaltmadaki orantısal başarısını ölçmektedir (Fahsi ve ark., 2000). Kappa Katsayısı Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Kappa Katsayısı (T)} = \frac{(TS \times TCS) - \sum (CT \times RT)}{TS^2 - \sum (CT - RT)} \times 100 \quad (3.6)$$

Burada TS Toplam Örnek sayısını, TCS Toplam Sütun Örneği sayısını, CT Sütun Toplamını ve RT Satır Toplamını ifade etmektedir.

3.5. Çalışma alanının orman yangını etki değerlendirmesi

AFAD'ın (Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) raporuna göre, 28 Temmuz 2021 tarihinde Antalya'nın Manavgat ilçesinde orman yangını meydana gelmiştir. Bu yangın Yeniköy, Sarılar, Oymapınar civarı, Gebece, Hocalar, Çardak ve Hocalı mahalleleri de dâhil olmak üzere toplam 35 farklı bölgeyi etkilemiştir. Çalışma alanımızda orman yangınının aktif olması nedeniyle, Manavgat Nehri havzasında yangının şiddet derecesini ve nehir akışına etkisini değerlendirmek amacıyla uydu verilerini kullanarak bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, yangından önceki durumu temsil etmek için 21 Temmuz 2021 tarihine, yangından sonraki durumu temsil etmek için ise 26 Ağustos 2021 tarihine ait 30x30 çözünürlüğünde iki Landsat 8 uydu görüntüsü indirilmiştir. Daha sonra görüntüler spektral indeksler kullanılarak işlenmiştir. Yangının şiddeti, nesne tabanlı sınıflandırma teknikleri kullanılarak haritalanmış ve ölçülmüştür. Bu süreçte, Normalleştirilmiş Yanık Oranı (NBR) kullanılarak yanmış alanlar vurgulanmış ve yanık şiddeti değerlendirilmiştir. NBR yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bantlarını kullanarak hesaplanmaktadır (Escuin ve ark. 2008). NBR formülü aşağıdaki gibi (Eşitlik 3.7) ifade edilmektedir:

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

veya Landsat 8 uydu durumunda

$$\begin{aligned} \text{NBR} &= (\text{Bant 5} - \text{Bant 7}) / (\text{Bant 5} + \text{Bant 7}) \\ &= (0.845 \text{ ile } 0.885 \text{ } \mu\text{m} \text{ arasında} - 2.10 \text{ ile } 2.30 \text{ } \mu\text{m} \text{ arasında}) \\ &\quad / (0.845 \text{ ile } 0.885 \text{ } \mu\text{m} \text{ arasında} + 2.10 \text{ ile } 2.30 \text{ } \mu\text{m} \text{ arasında}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Eşitlikte, NIR, elektromanyetik spektrumda yakın kızılötesini ve SWIR kısa dalga kızılötesini temsil etmektedir.

Ardışık iki tarihe ait NBR arasındaki fark, dNBR olarak ifade edilmekte olup, yangın öncesi NBR ile yangın sonrası NBR'nin çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır (Mallinis vd. 2017). dNBR indeksinde pozitif gri değerine sahip bölgeler yangından etkilenmiş alanları ifade ederken, negatif değerler yangından etkilenmemiş bölgeleri temsil etmektedir. dNBR hesaplama formülü Eşitlik 3.8 ile tanımlanmaktadır:

$$dNBR = (\text{Yangın önce_NBR}) - (\text{Yangın sonra_NBR}) \quad (3.8)$$

Yanık şiddeti, dNBR sınıflandırmasına göre oluşturulmaktadır. dNBR değerlerinin anlamı analiz edilen sahaya göre farklılık gösterebilmekte olup, yorumlama belirli durumlarda her zaman saha değerlendirmelerine dayanmalıdır. Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurumu (USGS), yanık alanların şiddetini yorumlamak için bir sınıflandırma tablosu önermiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. USGS'ye göre yanık şiddet seviyesi

Önem düzeyi	dNBR aralığı
Geliştirilmiş yeniden büyüme, Yüksek	−0.500 ile 0.251
Geliştirilmiş yeniden büyüme, Düşük	−0.250 ile −0.101
Yanmamış	−0.100 ile +0.099
Düşük önem derecesi	+0.100 ile +0.269
Orta derecede düşük şiddet	+0.270 ile +0.439
Orta derecede yüksek şiddet	+0.440 ile +0.659
Yüksek şiddet	+0.660 ile +1.30

Sonuç itibarıyla, orman yangınının akarsu akışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla diğer girdi verileri sabit tutulurken, sırasıyla 2019 ve 2022 yıllarına ait arazi kullanımı/örtü haritası kullanılarak iki SWAT modeli (yangın öncesi ve yangın sonrası) oluşturulmuştur.

3.6. Otomatik Kalite Kontrol Sistemi (SaQC)

SaQC, zaman serisi verilerinin kalite kontrolü için geliştirilmiş bir uygulamadır. Bu uygulama zaman serisi verilerinin analizini, açıklama eklenmesini ve işlenmesini kolaylaştırmak maksadıyla giderek genişlemekte olan bir algoritma ve yöntem koleksiyonu sunmaktadır. Aynı zamanda, meta veri zenginleştirme süreçlerini uçtan uca desteklemekte ve kullanıcıların farklı gereksinimlerine yönelik arayüzler sağlamaktadır. Bu arayüzler, 1) Python Uygulama Programlama Arayüzü (API), 2) metin tabanlı bir yapılandırma sistemi ve 3) web tabanlı bir grafik kullanıcı arayüzü ile komut satırı arayüzü olabilmektedir. SaQC, özellikle sensör donanımına yönelik çalışmakta olan mühendisler, alan uzmanları ve veri bilimcileri gibi aktif veri profesyonellerinin gereksinimleri göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu profesyoneller veri ürünlerinin kalite standartlarını geliştirmek için SaQC'nin sunmakta olduğu işlevlerden yararlanabilmektedir. Bu sistem Schmidt L. vd. (2023) tarafından geliştirilmiş olup çevrimiçi erişime (SaQC Configurator) sunulmuştur.

Bu çalışmada, veri tarama süreci boyunca, eksik veri tespiti ve doldurma işlemleri için SaQC'nin `flagMissing` (`field`, `flag=255.0`, `dfilter=-inf`) ve `interpolate` (`method='polynomial'`, `order=5`) fonksiyonları kullanılmıştır. Aykırı değerlerin kontrolü,

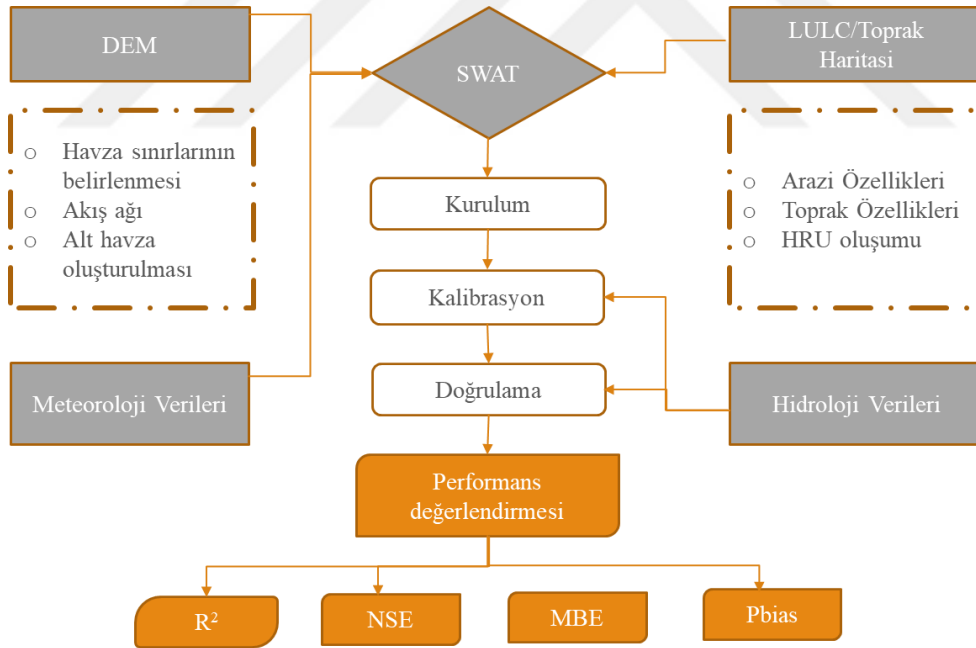
veri dalgalanmaları ve düzensiz aykırı değerleri belirlemek için aşağıdaki SaQC fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

flagUniLOF(field, n=20, thresh=1.5, algorithm='ball_tree', p=1, density='auto', fill_na=True, slope_correct=True, min_offset=None, flag=255.0).

Son olarak, tutarlılık kontrolü (Çift Kütle Eğrisi), meteorolojik verilerin doğruluğunu temin etmek amacıyla, tek bir şüpheli istasyonun verilerinin bölgedeki diğer istasyonlardan elde edilen verilerle karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bir değişkenin kümülatif verilerinin, ilgili bir başka değişkenin kümülatif verilerine karşı grafiği, değişkenler arasındaki ilişki sabit bir oran olduğu sürece düz bir çizgidir (James vd., 1960).

3.7. SWAT Model Kurulumu, Hassasiyet Analizi ve Kalibrasyonunun Açıklaması

Modelin simülasyonları daha doğru bir şekilde gerçekleştirebilmesi için girdi verilerinin titizlikle hazırlanması büyük önem taşımaktadır. Verilerin model tarafından okunabilmesi amacıyla, SWAT veri tabanı formatına uygun olarak düzenlenmesi gerekmektedir. SWAT Modeli için girdi verileri hazırlama metodolojisi daha önce bölüm 3.2'de ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu nedenle, söz konusu veri setleri artık Manavgat Nehri havzasının hidrolojik süreçlerini simüle edecek modelde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Model iş akışı Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. SWAT modeli kurulumu, simülasyonu ve çıktı değerlendirme için adımlar

3.7.1. SWAT modeli kurulumu

Kullanıcı, SWAT modelini kurup çalıştırmadan önce bazı model gereksinimlerinin farkında olmalıdır. İlk önemli nokta, en az 2 GHz hızında işlem görmekte olan modern bir CPU'ya, en az 500 MB kapasiteli bir sabit diske ve en az 2 GB RAM kapasitesine sahip olunmasıdır; ancak 4 GB RAM veya daha fazlası tavsiye

edilmektedir. İkinci önemli nokta ise Microsoft Net Framework 3.5 ve ArcGIS Spatial Analyst gibi bazı yazılım ve uzantıların yüklenmesidir. ArcGIS 10 veya üzeri sürümler ve en güncel Windows sürümü kullanılmalıdır. Bu gereksinimlerin altını çizmek amacıyla, SWAT modelinin düzgün bir şekilde çalıştırılması için ArcGIS sürümlerini temel almakta olan ArcSWAT sürümünün indirilmesi gerekmektedir. SWAT2012 modelinin veya herhangi bir sürümünün kurulum prosedürü tamamlanır tamamlanmaz, kullanıcı SWAT programının kurulu olduğu klasörde bulunmakta olan ArcSWAT destek materyallerini, SWAT veri tabanını ve ArcMap katman dosyalarını dikkatlice incelemelidir. Modelin çeşitli arazi örtüsü sınıflarını, toprak sınıflarını, kentsel sınıfları vb. içeren test veri kaynağı SWAT veri tabanına dâhil edilmiştir. SWAT2012 veri tabanı, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Servisi'nden (USGS) alınmakta olan veriler kullanılarak oluşturulmuştur; bu nedenle, kullanıcının verileri USGS'ninkinden farklıysa, SWAT2012.mdb veri seti dosyasını düzenlemeleri veya belirli bir bölgeye ilişkin verileri içe aktarmaları gerekmektedir. Örneğin, MapWindow veri tabanından SWAT veri tabanına aktarılmakta olan toprak veri tabanı gibi. Bu çalışmada hidrolojik süreçleri simüle etmek için halihazırda en yaygın olarak kullanılmakta olan sürüm olan ArcSWAT2012 kullanılmıştır. Diğer model kurulum prosedürleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

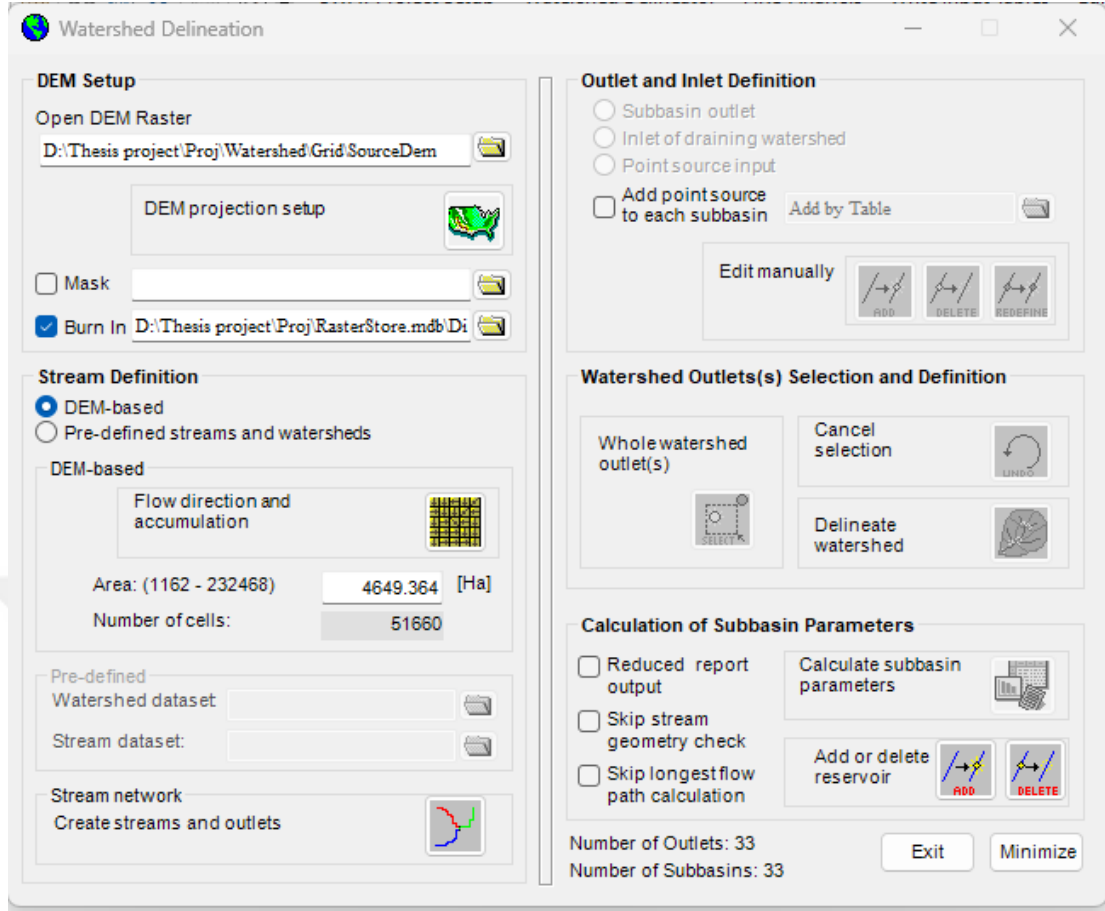
3.7.2. Havza sınırlarının belirlenmesi

Önceki bölümde açıklandığı üzere toprak haritası, arazi kullanımı/örtü haritası ve DEM'in tamamı gerekli SWAT formatlarına göre hazırlanmış olup sonraki işlemler için hazır hale getirilmiştir. İkinci adım, SWAT projesini ArcGIS'in GUI arayüzünde açmak veya projeyi manuel olarak oraya kaydetmektir. SWAT menü çubuğu ArcGIS'in araç çubukları menüsünde bulunmaktadır. Projenin SWAT modelinin bulunduğu klasöre kaydedilmesi sıklıkla tavsiye edilmektedir.

Havza Sınırlarını Belirleme (Watershed Delineation) alt menüsü, SWAT menü çubuğunda solda bulunan seçenektir (Şekil 3.5).

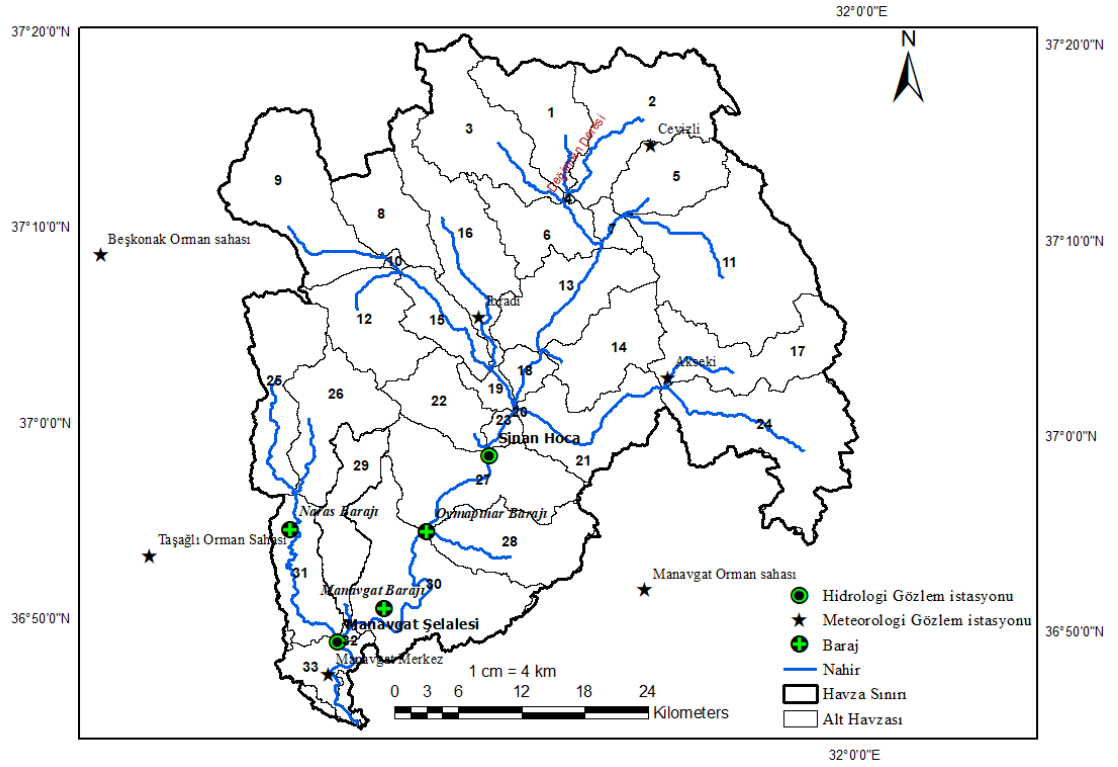
Havzayı, çok sayıda, hidrolojik olarak birbirine bağlı daha küçük havzalara ayırmak için, Havza Belirleme butonu karmaşık mekânsal işlevler yürütmektedir. İncelenen alan (Manavgat nehri havzası) için ESRI raster formatında hazırlanmış olan DEM dosyası bu aşamada yüklenir. "Maske (mask)" ve "yanma (burn in)" girdileri isteğe bağlıdır. Maske seçeneği yalnızca büyük bir DEM dosyası mevcut ise kullanılabilirken yanma seçeneği, modelin DEM'deki akış konumlarını tanımlamasına olanak tanır. Bahsedilen seçenekleri çalıştırmak için sırasıyla bir sınır şekil dosyası ve bir sürekli çizgi şekil dosyası yüklenebilir.

DEM tanımına göre, DEM, çukurları doldurmak ve akış yönü ile akış birikim ızgaralarının hesaplanmasıyla işlemlere devam eder. Kullanıcı, güvenilir akış verileri mevcut olduğunda, önceden tanımlanmış havza seçeneğinden bir akış veri seti seçerek verileri yükleyebilir. Akış verisi bulunmadığı durumda kullanıcı, içe aktarılmış olan DEM dosyasından bir akarsu ağı oluşturma seçeneğini seçerek akarsu ağını üretebilir. Bu araştırmada DEM dosyasından akışlar oluşturmak için "akışlar ve çıkışlar oluştur" seçeneği kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Havza sınırlarının belirlenmesi

Bir havzanın etkili bir şekilde tanımlanabilmesi için havza içindeki çıkış ve giriş noktalarının kesin olarak belirtilmesi gerekmektedir. SWAT modeli, giriş ve çıkış noktalarına göre havzayı alt havzalara ayırmakta olup her çıkış noktası, ilgili alt havzanın özelliklerini belirtmektedir. Havza tanımlamasının ana bileşeni olan çıkış noktaları, nehir akışının havza veya alt havza bölgesinden ayrıldığı noktaları temsil etmektedir. Kullanıcı, önceden tasarlanmış bir tabloyu yükleyerek veya bu noktaları akarsu ağı haritasından manuel olarak seçerek nehir sistemine giriş ve çıkış noktalarını ekleyebilir. Modelle tahmin edilmekte olan akış değerlerini gerçek akış verileri ile karşılaştırmak için, akarsu ağındaki ilgili gözlem istasyonlarına en yakın çıkış noktalarının konumlarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bir havzanın tanımlanması sırasında uygun bir çıkış noktası seçimi çok önemlidir. Bu çalışmada havzanın ana akarsu yatağında toplam 33 adet çıkış noktası belirlenmiştir. Havza, uygun bir çıkış noktası seçilerek (33) alt havzaya ayrılmış ve alt havzaların ve akış yollarının jeomorfik özellikleri "Alt Havza Özelliklerini Hesapla" seçeneği tıklanarak hesaplanmıştır. "Rezervuarı Ekle veya Sil" butonu kullanılarak, Oymapınar, Manavgat ve Naras barajlarının havza içerisindeki tam konumu sırasıyla 27, 30 ve 31 numaralı akış yolu üzerinde seçilerek eklenmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Manavgat nehri havzası'ndaki barajlar

Havza sınırları belirleme menüsünde, göller ve barajlar modeldeki su hacmini yansıtabilecek şekilde basitçe eklenebilir veya çıkarılabilir. Tüm değerler doğru bir şekilde hesaplandıktan sonra, Havza Raporları altında “Topografik Rapor” başlıklı ek bir rapor hazırlanmış olmaktadır. Bu rapor, tüm havza ve alt havzalardaki her yüzey seviyesi yüksekliğinin istatistiksel bir dökümünü ve dağılımını sunmaktadır.

3.7.3. Hidrolojik tepki birimi (HRU) analizi

ArcSWAT, farklı eğim, toprak ve arazi kullanımı/örtü bilgileri gerektiren bir modeldir. Model, her bir alt havzadaki her arazi-toprak türü için alanı ve hidrolojik parametreleri belirler. SWAT modelinin eğim, toprak ve arazi kullanım katmanlarını içeren ikinci önemli alt menüsü, ArcSWAT araç çubuklarındaki HRU analiz menüsü olarak tanımlanmaktadır. HRU analiz araçları, araştırmacıların önceden hazırlanmış bir toprak haritasını ve arazi kullanımı/arazi örtüsü haritasını modele eklemesine, eğim özelliklerini analiz etmesine ve söz konusu katmanların sırasıyla tüm havza ve her bir alt havza için dağılım özelliklerini tahmin etmesine olanak tanır.

Arazi kullanımı/arazi örtüsü haritası ve toprak haritası, dijital yükseklik haritasıyla aynı projeksiyon sistemine sahip ESRI ızgara formatında olması gerekmektedir. Ancak, şekil dosyası formatındaki toprak ve arazi kullanım haritaları da kullanılabilir. Daha sonra, SWAT modeli, toprak ve arazi kullanım bilgilerini içeren ESRI ızgarasını veya şekil dosyası formatını kaplama prosedürü için taranmış bir görüntüye dönüştürür. HRU Analizi alt menüsünde eğim, toprak ve arazi kullanımı açıklaması ilk seçenek olarak sunulmaktadır. “Arazi Kullanımı/Toprak/Eğim Tanımı” düğmesine tıklandığında bir iletişim kutusu açılır. Bu bölümün sonunda kullanıcı, bir arazi kullanımı/örtü ve toprak veri setini içe aktararak tanımladıktan sonra, arazi kullanımı

sınıflarını ve toprak tipi kategorilerini doğrudan SWAT kullanıcısının veri tabanlarından belirleyebilir veya arazi kullanımı sütununa çift tıklayarak manuel olarak içe aktarabilir.

Daha önce de belirtildiği gibi, kullanıcının verileri A.B.D dışında bir ülkeden geliyorsa SWAT toprak veya arazi kullanım veri tabanı doğrudan kullanılamaz. Kullanıcının hem toprak hem de arazi kullanım sınıflarını içeren bir arama tablosu oluşturması ve her arazi kullanımı ve toprak kategorisini ayrı ayrı belirtmesi gerekir. Bu çalışmada, havzanın arazi kullanımı ve toprak sınıflandırmalarını takiben, ASCII metin formatında arama tabloları oluşturulmuştur. Oluşturulan arama tabloları, arama tablosu alternatifi kullanılarak içe aktarılabilir.

Modelin HRU analiz seçeneği, havzayı eğim, arazi kullanımı ve toprak sınıflarına göre bölümlere ayırmaktadır. Havza tanımlaması sırasında kullanılan DEM dosyasının SWAT'ta eğim kategorizasyonu oluşturmak için uygulanması gerekmektedir. Kullanıcı, havzayı veya alt havzayı belirlenen yükseklik bölgelerine bölmek için çok sayıda eğim veya tüm havza üzerinde tek bir eğim kullanma seçeneğine sahiptir.

HRU analiz menüsündeki tüm önceki adımlar tamamlandıktan sonra yer paylaşımı kutusu etkinleştirilir. Bu çalışmada HRU analizi için örtüşme yüzdesi %100'dür. Üst üste bindirme prosedürünün ardından HRU analiz raporu seçeneği etkinleştirilir. Nihai HRU dağıtım raporlarına ve toprak-arazi kullanımı-eğim raporuna bu komut kullanılarak ulaşılabilir. Arazi kullanımı, toprak ve eğim gruplarının havza genelinde ve tüm alt havzalarda dağılımı arazi kullanımı-toprak-eğim dağılım raporunda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Havzanın tamamındaki toplam HRU sayısı nihai HRU dağıtım raporunda belirtilmektedir. Mevcut araştırma için tüm havzadaki toplam HRU sayısı 309 olarak hesaplanmıştır (Ek 1).

3.7.4. Giriş tablolarını yazma

Bir sonraki adım, HRU dağılımı doğru bir şekilde oluşturulduktan sonra, SWAT araç çubuğundaki “Giriş Tablolarını Yaz” seçeneğinden “Meteoroloji İstasyonu” komutunu uygulamak suretiyle iklim gözlem merkezlerinden verilerin içe aktarılmasıdır. Pek çok WGEN içeren hava durumu menüsünde, WGEN kullanıcısı hava durumu veri tabanı, bu araştırmanın model kurulumu için sonradan seçilen seçeneklerden biridir. SWAT modeli için WGEN veri tabanı çeşitli yöntemler kullanılarak oluşturulmuştur. Meteoroloji istasyonlarının verileri ve konumları, metin dosyasında hazırlanmalı ve SWAT kullanım kılavuzunda tanımlanmakta olan formatta ve aynı adlandırma kuralına uygun olmalıdır. Hem istasyon konumu metin dosyası hem de her istasyonun veri metin dosyası aynı klasörde bulunmalıdır; böylece, istasyonun konumu yüklendikten sonra, model her istasyonu klasördeki verilerine bağlar ve bu veriler model tarafından sonraki işlemler için yüklenir.

Bu çalışmada yağış miktarı, maksimum ve minimum sıcaklıklar, güneş ışınımı, bağıl nem ve rüzgâr hızı gibi günlük meteorolojik veriler kullanılmıştır. Bu meteorolojik veriler, Şekil 3.7’de gösterildiği gibi bir metin dosyasında düzenlenmiştir.

ID	NAME	LAT	LONG	ELEVATION
1	Aksakipcp	37.0468	31.7971	1063.00
2	AkCpcp	37.2478	31.7747	1420.00
3	Ibradipcp	37.096218	31.595251	1036.00
4	MBOSpcp	37.1441	31.1909	142.00
5	Manavgatpcp	36.7895	31.441	38.00
6	MOSpcp	36.8614	31.6756	998.00
7	MTOSpcp	36.8886	31.2494	38.00

Datei	Bearbeiten
20120101	86.4
14.8	17.7,7.5
0	17.3,8
0.2	17.4,6.4
0	14.6,8.1
7.2	14.3,9.5
39	16.3,9.2
56.6	13.1,6
	7.9,7.5

Şekil 3.7. Manavgat meteoroloji istasyonunun meteorolojik arama çizelgesi

Her istasyonun konumunu ilgili hava durumu verileriyle ilişkilendirmek amacıyla tüm hava durumu verilerine aynı istasyonlar uygulanıyorsa, kullanıcı istasyonların konumlarını yeniden adlandırmalıdır. Örneğin, bu çalışmadaki manavgatpcp ve manavgattmp sırasıyla Manavgat istasyonunun yağış ve sıcaklığını temsil etmektedir. Hata olasılığını azaltmak için istasyon adının, metin dosyasındaki verilerle aynı olması gerekmektedir. Bir sonraki aşamada, meteoroloji istasyonu uygun şekilde içe aktarıldığında SWAT için varsayılan bir kayıt oluşturmak üzere gereken verileri içeren bir veri tabanı dosyası oluşturulmalıdır. Giriş Tablosunu Yaz menüsündeki “Tümünü Yaz” komutu kullanılarak, belirtilen klasördeki tüm giriş dosyaları okunur ve SWAT modelini oluşturmak için gerekli tüm ek veri dosyaları oluşturulur.

Yukarıda belirtilen adımları tamamladıktan sonra SWAT Girişini Düzenle (Edit SWAT Input) menüsü etkinleştirilir. Bu menü, kullanıcıya modeli çalıştırmadan önce ve daha sonra kalibrasyon aşamasından sonra giriş değişkenlerini değiştirme olanağı sağlar. Nokta kaynak deşarjı, SWAT veri tabanı, rezervuarlar, giriş deşarjı gibi tüm bileşenler SWAT girişini düzenle menüsünde bulunmaktadır. Kullanıcı, bu menüyü istediği zaman kullanabilir; ancak bir parametre her değiştirildiğinde modelin tekrar çalıştırılması gerekmektedir. Bu durum, toprak veya arazi kullanım verilerinin değişmesi halinde, kullanıcının havza tanımlama menüsüne geri dönerek tüm işlemleri yeniden yapması gerektiği anlamına gelmektedir.

3.7.5. SWAT Simülasyonu

Meteoroloji istasyonları ilgili alt havza çıkışlarına bağlanmıştır, böylece her çıkışta akım ölçümleri yapılabilmekte ve havzanın belirlenmesinin ardından bu ölçümler karşılaştırılabilmektedir. Yukarıda belirtilen prosedürlerin tamamlanmasının ardından, model, SWAT simülasyon menüsü kullanılarak çalıştırılmıştır. Kullanıcı, SWAT modelinin giriş ayarlarını tamamladıktan sonra Simülasyon menüsünü kullanarak modeli çalıştırabilir. Genel olarak, SWAT simülasyon menüsü, model tarafından simüle edildiği süreye odaklanmakta ve ayrıca SWAT çıktı özetleri hakkında ayrıntılar vermektedir. "SWAT'ı Çalıştır (Run SWAT)", SWAT simülasyon menüsündeki ilk seçenektir. Bu buton tıklandığında Şekil 3.8'de gösterilen model simülasyonu kutusu görüntülenir. Kullanıcının bu noktada çıktı veri dosyalarıyla ilgilenmesi ve açılır pencerede görüntülenen tüm işlevleri anlaması gerekir. Simülasyonun başlangıç ve bitiş tarihlerini ayarlamak simülasyon iletişim penceresindeki ilk adımdır.

Şekil 3.8. Model simülasyonu penceresi

Normalde modelleme periyodunun başlangıç ve bitiş tarihleri, sağlanan verilere göre algoritma tarafından otomatik olarak seçilmektedir. Ancak kullanıcı, simülasyon periyodunu istediği başlangıç ve bitiş saatlerine göre değiştirebilir. Bu çalışmada içe aktarılan veriler 1/1/2012 ve 31/12/2022 başlangıç ve bitiş tarihleri kullanılarak oluşturulmuştur. Sonraki bölümde yağış dağıtım mekanizması açıklanmaktadır. Model, yağış simülasyonu için çarpık normal ve karışık üstel denklemler kullanmaktadır. Yağışın bir günden daha az zaman adımı yalnızca yüklenen verilerin bir günden daha az ölçekte olması durumunda etkin olabilir; aksi takdirde mevcut çalışmada olduğu gibi kapalı olacaktır. Çarpık normal dağılım, yağış verilerinin çarpıklığını yakalaması ve hesaplama açısından verimli olması nedeniyle SWAT'ta günlük yağış için sıkça kullanılır. Bu çalışmanın modellemesi için çarpık normal denklem seçilmiştir. Denklem açıklamasına ilişkin daha fazla ayrıntı Neitsch vd. (2011) tarafından verilmektedir.

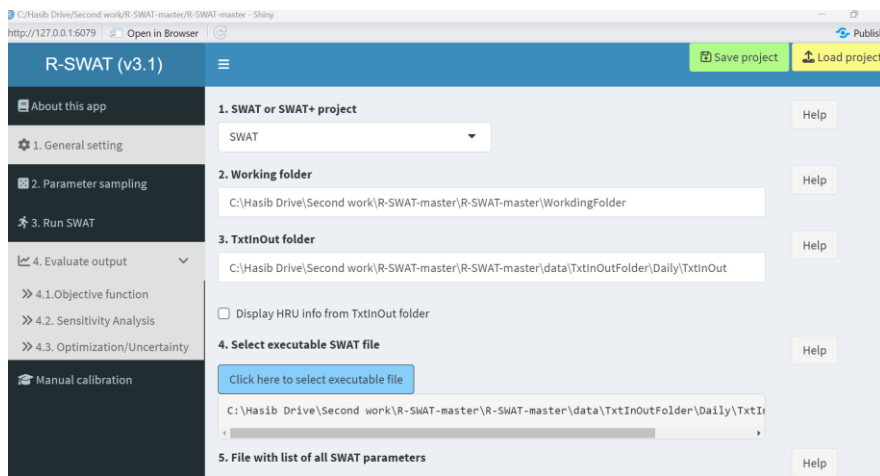
Manavgat Nehri Havzası, engebeli bir topografyaya sahip olup karmaşık bir jeolojik yapı ve yer altı suyu sürecine sahip bir bölgede yer almaktadır. Ayrıca, su kütlesi sınıflandırmasına dayalı olarak hazırlanan arazi kullanım uydu haritalarında, Manavgat nehir havzasının farklı bölgelerinde üç büyük ölçekli rezervuar ve birkaç küçük ölçekli su depolama yapısının olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, modeli oluştururken modelin girdilerinin düzenlendiği bölüme bazı temel rezervuar verileri eklenmiş ve yılın yağışlı ve kurak dönemlerinde rezervuar çıkışındaki akışı simüle etmek için modelin Hedef Salınımı Simüle Et (Simulate target release) seçeneği seçilmiştir. Bir sonraki adımda, model simüle edilmiş rezervuar verilerinin etkisini kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca, Manavgat havzasında vertisol toprak sınıfının bulunmasından dolayı, model tarafından, havza ayarlarında SWAT'ın (crack) seçeneğinin etkinleştirilmesi önerilmiş ve diğer parametre değerleri sabit tutularak model çalıştırılmıştır.

“SWATcan”, çıktı yapılandırma alanı üzerinden günlük, aylık veya yıllık bazda çeşitli çıktı dosyaları oluşturma imkânı sunmaktadır. Simülasyon sürecinin ısınma süresi (warm-up duration) NYSKIP seçeneği kullanılarak ayarlanabilir. Ancak, model ısınma dönemi için bir çıktı dosyası oluşturmamaktadır. Isınma süresinin uzunluğu veri frekansına ve havzanın özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin,

otuz yıllık bir veri seti için kullanıcıların genellikle en az beş yıllık bir ısınma süresi belirlemesi önerilmektedir. SWAT.exe sürümünün (32 bit ve 64 bit) seçilmesi, SWAT simülasyonu penceresindeki son seçenektir. Mevcut araştırmada elde az veriye göre (11 yıllık) ısınma süresi bir yıl olarak belirlenmiş olup, çıktı dosyalarının aylık ve günlük olarak yazdırılması için "Çıktı Ayarı" bölümünde "Tümü" kutusu seçilmiştir. Simülasyon sürecindeki bir sonraki adım, gerekli tüm parametreler belirlendikten sonra havza ana kontrol dosyasının (file.cio) oluşturulmasıdır. "SWAT çalıştırmasını kur (Setup SWAT run) düğmesi seçildiğinde, yazılımın yürütme aşamasında kullanacağı başka bir girdi dosyası seti otomatik olarak oluşturulacaktır. Havza ana kontrol dosyası (file.cio) iklim bileşenleri, dosya sistemleri ve çıktı niteliklerine ilişkin kapsamlı veriler içermektedir.

3.7.6. SWAT'ın Değerlendirilmesi

Değişkenlerin gerçek ve simüle edilmiş değerleri arasındaki tutarsızlıkları en aza indirmek için model parametrelerinin kalibre edilmesi gerekmektedir. Literatürde modellerin kalibrasyonu için genellikle deterministik ve stokastik olmak üzere iki yaklaşım bulunmaktadır: Deterministik yöntem, modellenen ve gözlemlenen değerler arasında uygun bir uyum elde edilene kadar model parametrelerinin manuel olarak deneme yanılma yoluyla değiştirilmesini içermektedir. Bu yöntem Abbaspour (2015) tarafından eski bir strateji olarak nitelendirilmiştir. Stokastik yöntem ise, modellerin simüle edilmiş çıktılarını otomatik olarak kalibre etmek için SWAT-CUP veya R-SWAT gibi araçları kullanmaktadır. SWAT-CUP, SWAT modelinin hassasiyet analizi, kalibrasyonu ve doğrulanması amacıyla Dr. Karim C. Abbaspour tarafından geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır ve dünya genelinde birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, SWAT-CUP yazılımı ücretsiz olarak temin edilemediğinden, Almanya'nın Leipzig Üniversitesi'nden Dr. Tam Nguyen tarafından geliştirilen R-SWAT programı kullanılmıştır. SWAT CUP'un SUFI2 algoritmasına ait R kodları, Windows uyumlu bir arayüzle yazılmış olup SWAT'ın resmi web sitesinde ücretsiz olarak sunulmuştur. R-SWAT'ın uygulanabilmesi için R programının en güncel sürümünün ve RStudio programının kurulması gerekmektedir. R-SWAT uygulaması SWAT'ın resmi web sitesinden Shiny paketiyle birlikte indirilmiş ve RStudio'da platformunda açılmıştır. R-SWAT'ın grafiksel arayüzünde, gerekli tüm dosya ayarları eksiksiz bir şekilde gerçekleştirilmiş ve süreç adımları Şekil 3.9'da detaylandırılmıştır.



Şekil 3.9. R-SWAT paketinin grafik arayüzü

Simüle edilmiş çıktı verilerinin üretilmesi için yapılandırma tamamlandıktan sonra SWAT modelinin çalıştırılması gerekmektedir. Daha sonra, model çıktısının gözlem verileriyle karşılaştırılarak hassasiyet testi yapılmasını sağlamak amacıyla R-SWAT aracı kullanılmıştır. Bu araç, SWAT modelinin çıktıları analiz etmek için Sıralı Belirsizlik Uydurma Versiyon 2 (SUFI-2), Genelleştirilmiş Olabilirlik Belirsizlik Tahmini (GLUE), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Parametre Çözümü (ParaSol) gibi çeşitli amaç fonksiyonları altında uygulanabilecek farklı teknikleri içermektedir. R-SWAT, SWAT giriş ve çıkışlarını birbirine bağlamaya odaklanmaktadır. Bu süreçte, seçilen yöntem ve performans metrikleri, belirtilen değerler ve aralıkların göstergesi olarak kullanılmaktadır. Eğer model çıktıları ile gözlem verileri arasında uygun bir uyum sağlanamazsa, yeni bir dizi parametre belirlenir ve bu parametreler doğrultusunda yeni çıktılar oluşturulur. Süreç, en yüksek performans değerleri elde edilene kadar tekrarlanır (Nguyen vd. 2022). Parametrelerde yapılacak değişiklik türlerinin tanımlanması için R-SWAT aracında üç farklı teknik bulunmaktadır: "değiştir", "mutlak" ve "göreceli". "Değiştir" yöntemi, mevcut parametre değerinin tanımlanan bir değerle değiştirilmesini ifade eder. "Mutlak" yöntem, tanımlanan değer mevcut parametre değerine eklenmesini öngörürken, "göreceli" yöntem, mevcut parametre değerinin $(1 + \text{tanımlanan değer})$ ile çarpılmasını ifade etmektedir.

3.7.7. Duyarlılık Analizi

Kalibrasyon ve doğrulama prosedürlerinde, ortam koşullarındaki değişiklikleri etkilemekte olan çok sayıda hidrolojik ve meteorolojik değişkenin dikkate alınması gerekmektedir. Duyarlılık analizi, bir değişkendeki değişimin model çıktısı üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik önemli bir tekniktir ve model kalibrasyonu ile doğrulama süreçlerinin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Bu süreçte, duyarlılık analizi vasıtasıyla belirlenen anlamlılık aralığına sahip en güvenilir değişkenler kullanılarak kalibrasyon ve doğrulama işlemleri gerçekleştirilir. Kalibrasyon işlemlerinin etkinliğini artırmak için, model üzerinde önemli bir etkisi olmayan değişkenler analiz haricinde bırakılmaktadır (Abbaspour vd. 2007; Nguyen vd. 2022). Duyarlılık analizi için sıklıkla kullanılmakta olan yöntemlerden biri Latin Hiperküp Örnekleme-Tek Sefer Yöntemi'dir. Bu yöntem, diğer değişkenlerin sabit bir değer aldığı durumlarda, bir değişkenin parametre değişikliklerine olan duyarlılığını değerlendirir. Ayrıca, bu yöntem, uygulanabilir hassas parametrelerin aralıklarını belirlemek ve bu parametreleri ileri analizler için kabul edilebilir sınırlara atamak amacıyla kullanılabilir. Bu çalışmada, Çizelge 3.4'de listelenen 17 hassas parametrenin değerlendirilmesi için Latin Hiperküp Örnekleme-Tek Sefer Yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, modelin duyarlılığını ve parametrelerin kalibrasyona olan etkisini anlamada önemli bir araç olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Hidrolojik modellemede hassas parametrelerin listesi

No.	Parametre	Tanımlama	Yönt.	min	max	Alt Havza	Arazi Kullan	Toprak	Eğimi
1	ESCO .hru	Toprak buharlaşma telafi faktörü.	Değişt.	0.5	0.99	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
2	CH_K2 .rte	Ana kanalda etkili hidrolik durum.	Değişt.	0	0.5	Tüm			
3	GW_DELAY .gw	Yer altı suyu gecikmesi	Değişt.	0	500	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
4	CN2 .mgt	Nem durumu için SCS akış eğrisi numarası	Değişt.	35	98	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
5	SOL_K .sol	Doymuş hidrolik iletkenlik	Değişt.	0	2000	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
6	ALPHA_BF .gw	Temel akış alfa faktörü	Değişt.	0	0.4	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
7	SURLAG .bsn	Yüzey akışı gecikme süresi	Değişt.	3	24				
8	GWQMN .gw	Geri akışın oluşması için sığ akiferdeki suyun eşik derinliği	Değişt.	0	5000	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
9	RCHRG_DP .gw	Derin akifer süzülme fraksiyonu	Değişt.	0	1	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
10	REVAPMN .gw	Sığ akiferde "yenileme"nin gerçekleşmesi için gereken eşik su derinliği	Değişt.	0	500	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
11	OV_N .hru	Manning'in karayolu akışı için "n" değeri	Değişt.	0	30	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
12	HRU_SLP .hru	Ortalama eğim dikliği	Değişt.	0	1	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
13	SLSUBBSN .hru	Ortalama eğim uzunluğu	Değişt.	10	150	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
14	GW_REVAP .gw	Yer altı suyu "yenileme" katsayısı	Değişt.	0	0.2	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
15	SOL_AWC .sol	Toprak katmanının mevcut su kapasitesi	Değişt.	-1	1	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
16	EPCO .hru	Bitki alımı telafi faktörü	Değişt.	0	1	Tüm	Tüm	Tüm	Tüm
17	CH_N1 .sub	Manning'in bağımlı kanallar için "n" değeri.	Değişt.	0	3	Tüm			

3.7.8. Optimizasyon ve belirsizlik analizi

Kalibrasyon ve model belirsizliği, birbirleriyle yakından ilişkili iki önemli süreçtir. Bu süreçlerin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken iki temel değişken bulunmaktadır. Gözlemlenen değişkenler ile simüle edilen değişkenler arasındaki tutarsızlık, R-SWAT'taki Sensi_Cali (Uniform Latin Hypercube Sampling-One) veya SWAT-CUP yönteminin SUFI-2 algoritmasıyla belirtilen parametrelerin belirsizliği olarak tanımlanır ve bu durum, bir parametre aralığı şeklinde ifade edilir (Abbaspour, 2015).

SUFI-2 yöntemi, %95 tahmin aralığı (95PPU) ile modellenmiş sonuçlar ve gözlemlenen değerler arasındaki ilişkiyi tanımlar. Hesaplanan bu değerler, Latin hiperküp örnekleme yöntemiyle elde edilen kümülatif frekans dağılımı sonuçlarının %2.5 ile %97.5 aralığında yer almaktadır. Modelin performansını değerlendirmek için iki önemli kriter kullanılmaktadır: p-faktörü ve r-faktörü.

P-faktörü, 0 ile 1 arasında değişen bir değer olup, gözlemlenen verilerin %95PPU tahmin aralığında kalma oranını ifade eder. P-faktörünün değeri 1'e yaklaştıkça modelin performansı daha iyi olarak kabul edilir (Abbaspour vd. 2007). Bu faktör, aynı zamanda modeldeki hataların oranını da yansıtır. R-faktörü, 95PPU tahmin aralığının genişliğini ifade eden bir ölçüttür ve 0 ile sonsuz arasında bir değer alır. R-faktörünün düşük olması, modelin parametre belirsizliğinin dar bir aralıkta olduğunu ve kalibrasyon sürecinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini gösterir.

3.7.9. Model Performans Kriterleri

Simüle edilen çıktının gerçek değerlerle karşılaştırılması, modelin performansını etkin bir şekilde değerlendirmek için temel bir gerekliliktir. SUFI-2 algoritması, modelin başarı standartlarını tanımlayan çeşitli değişkenler içermektedir. Bu çalışmada SUFI-2 algoritmasının kalibrasyon işlemlerinde başarı kriteri olarak Nash-Sutcliffe Etkinliği (NSE) seçilmiştir. Bununla birlikte, modelin performansını değerlendirmek için başarı faktörleri olarak, NSE'nin yanı sıra belirleme katsayısı (R^2) ve yanlılık yüzdesi (MBE) formülleri de kullanılmıştır. Aşağıda NSE, R^2 ve MBE performans kriterlerini hesaplamak için kullanılan formüllerin açıklaması bulunmaktadır.

Gerçek ve simüle edilmiş veriler arasındaki farkın değerlendirilmesine Nash-Sutcliffe Etkinliği (NSE) adı verilir. NSE, gerçek ve model verilerinin grafik üzerindeki 1:1 çizgisine ne kadar yakın olduğunu ölçer ve bu değer 0 ile 1 arasında değişir. (Eşitlik 3.9). NSE değerinin 1'e yaklaşması modelin verimliliğinin yüksek olduğunu ifade etmektedir (Nash ve Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.9)$$

Gerçek ve simüle edilmiş değerler arasındaki doğrusal ilişki belirleme katsayısı (R^2) ile değerlendirilir ve modelin uyumluluğunu belirlemek için kullanılır (Eşitlik 3.10). R^2 değerleri 0 ile 1 arasında değişmekte olup değerlerin 1'e yaklaşması model performansının yüksek olduğunu göstermektedir.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)(Y_i - \bar{Y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (3.10)$$

Gerçek ve simüle edilmiş veriler arasındaki yanlışlık yüzdesi (MBE), tahminlerin yüzdesini ifade eden bir ölçüttür. Eşitlik 3.11, MBE değeri "0" en iyi model verimliliğine sahip olduğunu gösterir. MBE'nin negatif bir değer alması, modelin tahmin ettiği değer ölçülen değerden düşük olduğunu ifade ederken; pozitif bir değer alması durumunda ise modelin tahmin ettiği değer ölçülen değerden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu ölçüt, model performansını değerlendirmek ve simülasyon sonuçlarının gerçek değerlere göre ne derece yanlışlık içerdiğini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır (Willmott C.J., Matsuura K. 2006).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (3.11)$$

Eşitliklerde, X_i ve Y_i , sırasıyla, gözlenen ve tahmin edilen değerleri temsil etmektedir. Ölçülen değerlerin ortalaması $\bar{X}_i$ ve tahmin edilen değerlerin ortalaması, $\bar{Y}_i$ olarak ifade edilmiştir. Ayrıca, eşitliklerde kullanılan örnek sayısı n ve her bir örnek ise i ile gösterilmiştir.

3.8. Veri Kalite Güvencesi ve Kontrolü

Veri kalite güvencesi ve kontrolü (QA/QC), özellikle zaman serileri (hidrolojik ve meteorolojik veriler) de dâhil olmak üzere tüm veri türlerinin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamada kritik bir süreçtir. Bu süreç veri toplama, iletim, işleme ve depolama esnasında ortaya çıkabilecek hataların tanımlanması, düzeltilmesi ve önlenmesine yönelik bir dizi prosedürü içermektedir. Birleşmiş Milletler Dünya Meteoroloji Örgütü'nün Jarraud M., (2008) ve WMO, (2023) kılavuzlarına göre, veri kalitesi kontrolünün ilk aşaması gözlem merkezlerinde gerçekleştirilmekte olan yerinde kalite kontrolü faaliyetlerini içermektedir. Bu aşamada yapılan kontroller, meteorolojik veya hidrolojik istasyonda manuel veya otomatik ölçüm cihazlarının performans değerlendirmesi, veri kayıt prosedürlerinin gözden geçirilmesi, kaydedilen verilerin belgelendirilmesi (meta veri) ve diğer ilgili standartların uygulanmasını kapsamaktadır. Ancak, mevcut çalışmada kullanılmakta olan hidrolojik veriler, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü'nden arşiv verileri olarak temin edildiğinden, bu tür bir yerinde kalite kontrol gerçekleştirilememiştir. Buna karşın, meteorolojik veriler Antalya Meteoroloji IV. Bölge Müdürlüğü'nden (MGM) sağlanmış olup, bu verilere iyi dokümanite edilmiş meta veriler eşlik etmiştir.

Veri kalite kontrolünün ikinci aşaması, ilgili devlet kurumlarından alınmakta olan arşivlenmiş günlük meteorolojik ve hidrolojik veriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, format testi (boşluklar, geçersiz tanımlama kodları, tutarsız tarihler ve yinelenen değerler), eksiksizlik testleri (eksik değerler) ve tutarlılık testleri (zamansal uyum ve özetleme kontrolü) gibi çeşitli kalite kontrol prosedürleri uygulanmıştır. Tüm bu kalite kontrol faaliyetleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.8.1. Format testleri

Format testleri, gözlemler arasında gömülü veya eksik alanlar, geçersiz tanımlama kodları, tutarsız tarihler gibi hataların yanı sıra tekrarlanan gözlemler ve geçersiz format kodlarını tespit etmeye yönelik kontrolleri kapsamaktadır. Format hatalarının temel nedenleri genellikle yanlış kodlama, iletim sırasında mesajın bozulması veya operatör hatasından kaynaklanmaktadır. Bu tür hataların tamamen ortadan kaldırılması veya en azından en aza indirgenmesi için belirli prosedürlerin uygulanması gereklidir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılmakta olan iki yöntem, veri giriş hatalarını azaltan çift giriş (aynı verilerin iki operatör tarafından bağımsız olarak girilmesi) ve hata tespit algoritmalarıdır. Hangi yöntemin daha etkili olduğu, veri giriş personelinin becerilerine, gözlem süreçlerinin karmaşıklığına ve mevcut kaynakların yeterliliğine bağlıdır. Ayrıca, dijital hata tespit ve düzeltme teknikleri, iletim sırasında meydana gelebilecek hataların tespit edilmesi ve mümkün olduğunda giderilmesi için önemli bir araçtır. Veri giriş sistemlerinin dikkatli bir şekilde tasarlanması, operatör hatalarını en aza indirmeye potansiyeline sahiptir. Ancak, en kullanıcı dostu sistemlerde dahi veri giriş personelinin uygun şekilde eğitilmesi ve performans değerlendirmelerine tabi tutulması gereklidir.

3.8.2. Eksiksizlik testleri

Eksik verilerin etkisi, ilgili verinin önem derecesine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, aylık ekstrem değerler veya belirli bir eşik değerin üzerindeki yağışlı günlerin sayısı gibi olay verilerindeki eksiklikler, kaydedilen verilerin güvenilirliğini ciddi şekilde sorgulanabilir hale getirebilir. Benzer şekilde, toplam aylık yağış miktarları da özellikle eksik dönemde bir yağış olayı meydana geldiğinde, birkaç günlük eksik veri nedeniyle önemli ölçüde etkilenebilir. Buna karşın, aylık ortalama sıcaklık değerleri, eksik verilere daha az duyarlılık gösterebilir. Bazı uygulamalar için veri eksiksizliği kritik bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Veriler, istasyona göre belirlenmiş kronolojik bir sıraya göre ve gözlem türüne göre düzenlenmelidir. Bu süreçte, bir envanter oluşturularak bu envanter, ana istasyon tanımlayıcı dosyasıyla karşılaştırılmalıdır. Beklenen gözlemler ile gerçek gözlemler arasında karşılaştırma yapılmalı ve herhangi bir eksik gözlem tespit edilmesi durumunda bu eksiklikler daha ileri analiz ve inceleme için işaretlenmelidir.

3.8.3. Tutarlılık testleri

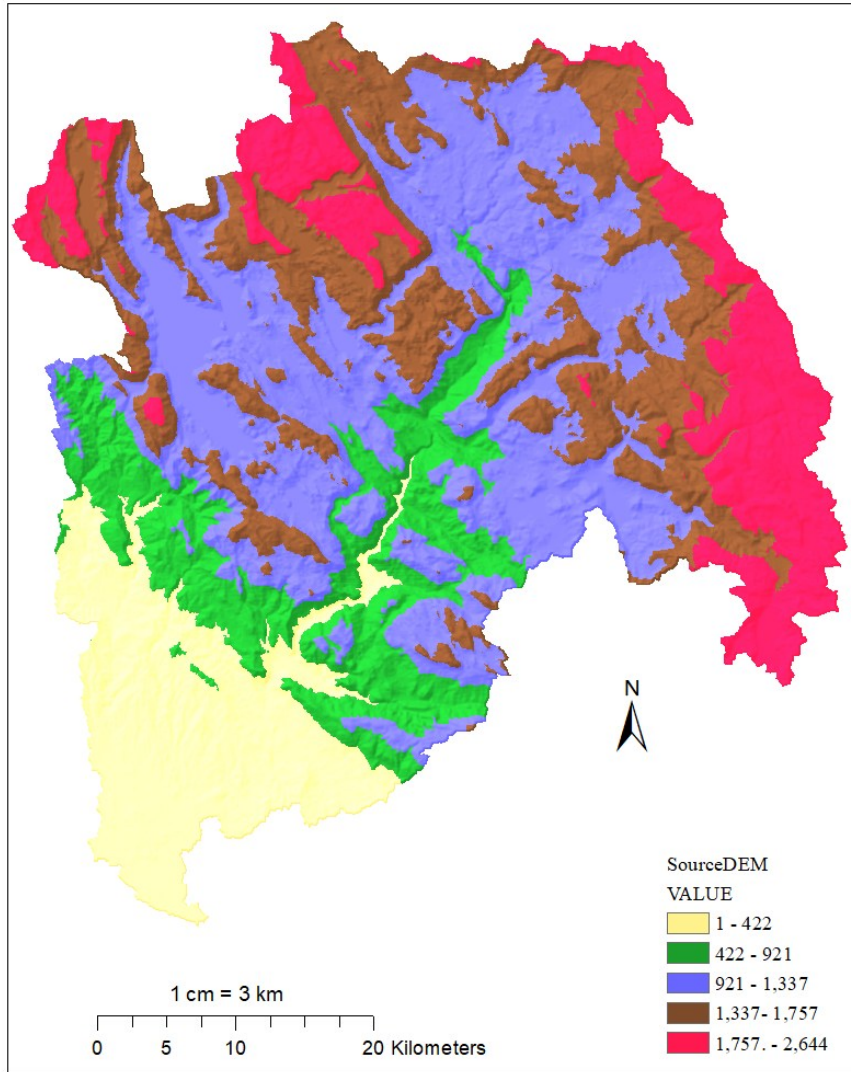
Veriler hem zaman hem de mekânda birbirleriyle ilişkili olduğundan, bu ilişkileri değerlendirmek için entegre bir prosedür geliştirilmelidir. İç tutarlılık, iklimsel elemanlar arasındaki fiziksel ilişkilere dayanır. Tüm elemanlar, her gözlem içindeki ilişkili diğer elemanla birlikte kapsamlı bir şekilde doğrulanmalıdır. Örneğin, görünürlük ile mevcut hava durumu arasındaki ilişki, standart gözlem uygulamalarına uygunluğu açısından kontrol edilmelidir. Benzer şekilde, maksimum değerlerin, minimum değerlerden eşit veya daha yüksek olması gibi fiziksel kurallara gözetilmelidir. Diğer iç tutarlılık kuralları arasında, güneşlenme süresinin gün uzunluğuyla sınırlı olması, küresel radyasyonun atmosferin üst kısmındaki ışıma değerini aşmaması, rüzgâr yönünün 0° ile 360° arasında olması ve yağış değerlerinin negatif olmaması yer alır. Zamansal tutarlılık, bir verinin zaman içerisindeki değişimlerini incelemeyi amaçlar. Birçok iklim veri seti, belirgin bir serisel korelasyon gösterir. Bu nedenle, bir gözlem değeri, önceki ve sonraki gözlemlerle karşılaştırılarak analiz edilmelidir. Deneyimlerin yanı sıra analitik veya istatistiksel

yöntemler kullanılarak, veri gözden geçiren uzmanlar, belirli bir zaman aralığında bir veride beklenebilecek değişiklik miktarını belirleyebilir. Bu değişiklik genellikle veri türüne, mevsime, konuma ve iki ardışık gözlem arasındaki zaman aralığına bağlıdır. Örneğin, bir saat içinde 10°C'lik bir sıcaklık düşüşü şüpheli görünebilir, ancak bu durum soğuk bir cephenin geçişi veya deniz melteminin başlamasıyla ilişkilendirildiğinde oldukça gerçekçi olabilir. Şüpheli değerler, mevcut hava durumu koşulları ve diğer gözlem türleri (rüzgar yönü, uydu verileri, radar gözlemleri veya yıldırım tespiti gibi) ile karşılaştırılarak değerlendirilir ve ardından doğrulama veya düzeltme yapılmasına karar verilir. Özetleme testleri, gerçekleştirilmesi en kolay kalite kontrol yöntemlerinden biridir. Farklı dönemlere ait veri özetlerinin karşılaştırılmasıyla, bireysel değerlerdeki veya her özetteki hatalar tespit edilebilir. Örneğin, günlük değerlerin toplamaları ve ortalamaları, hafta, ay veya yıl gibi çeşitli dönemler için hesaplanabilir. On iki aylık toplam yağış miktarının, bir yıl boyunca bireysel günlük yağış değerlerinin toplamına eşit olup olmadığını kontrol etmek, yağış gibi bir birikim elemanının çapraz kontrolünü hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirebilir. Üst hava istasyonlarından elde edilen verilerdeki sistematik hatalar, aylık ortalamaların, aynı konum ve yükseklik için sayısal bir analiz sistemi tarafından türetilen ortalamalarla karşılaştırılmasıyla tespit edilebilir. Tespit edilen herhangi bir tutarsızlığın nedeni gözden geçirilmeli ve düzeltilmelidir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çalışma Alanının Topografik Yapısı

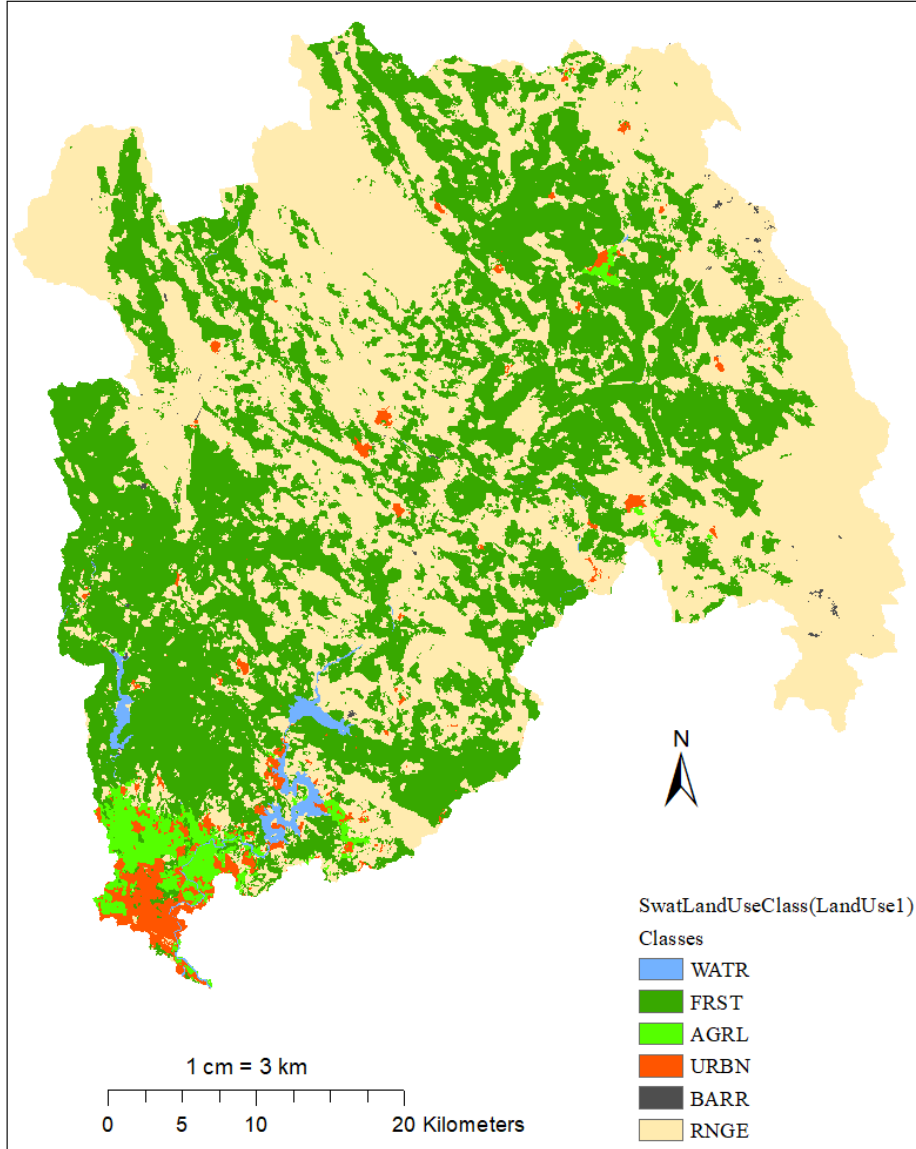
Çalışma alanının topografik özellikleri, güneyde Side ile kuzeyde Bademli arasında uzanan düz bir alandan dağlık bir yapıya doğru kademeli olarak değişmektedir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, Manavgat Havzası'nın yükseltisi deniz seviyesinden 0 ile 2645 metre arasında değişmekte olup bu durum havzaya farklı eğim sınıfları kazandırmaktadır. Çalışma alanının güney kısmında, özellikle Manavgat ilçe merkezine yakın olan bölgede eğim düz veya oldukça düşük düzeydedir. Ancak, bölgenin engebeli arazi yapısı nedeniyle kuzeye doğru yükselti belirgin bir şekilde artmaktadır. Bununla birlikte, Cevizli, Süleymaniye, Bademli köyleri ile üst Eynif platosu ve Akseki ilçesindeki dağlık alanların varlığına rağmen, düşük eğimli araziler de bu alanlarda yaygın olarak görülmektedir.



Şekil 4.1. Çalışma alanının yükselti haritası

4.2. Çalışma Alanının Arazi Kullanımı ve Bitki Örtüsü

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, Manavgat Nehri havzasının büyük bir bölümü ormanlık alanlardan oluşmaktadır. Ormanlar, özellikle Toros Dağları’nın eteklerinde yoğunlaşmakta olup, Akdeniz bölgesinde 1000 metre yüksekliğe kadar yayılım göstermektedir. Manavgat nehir havzasının 103727.16 hektarlık (%44.62) bir kısmı ormanlarla kaplıdır (Çizelge 4.1). Buna karşın, havzanın %50.78’i (118052.46 hektar) bitki örtüsünden yoksun olup bu alanlar mera veya kurak toprak ve kayalık alanlardan oluşmaktadır.



Şekil 4.2. Çalışma alanının arazi kullanım ve bitki örtüsü haritası

Çalışma alanının %1.87’sini oluşturan 4338.54 hektarlık yerleşim alanı, Akseki, Cevizli ve İbradı’ya yakın bölgelerde, Manavgat merkezinde ve Akdeniz kıyısı boyunca yer almaktadır. Ayrıca, havzanın sadece 4294.89 hektarı (%1.85) tarım arazisi olarak

kullanılmakta olup bu araziler büyük ölçüde Manavgat ilçe merkezi, Oymapınar ve Manavgat barajları çevresinde yoğunlaşmıştır.

Çizelge 4.1. Çalışma alanının arazi kullanım ve bitki örtüsü dağılımı

No	Grid Değeri	LULC Tipi	Alan, ha	Yüzde, %
1	1	Su yüzeyi	2055.24	0.88
2	2	Orman	103727.16	44.62
3	5	Tarım	4294.89	1.85
4	7	Yerleşim yeri	4338.54	1.87
5	8	Çıplak arazi	275.13	0.12
6	11	Mera	117777.33	50.66

4.3. Çalışma Alanının Toprak Tanımı

Havza hidrolojisi modellenmesinde toprak özellikleri kritik bir öneme sahiptir. Farklı bölgelerde, toprağın oluşumuna etki eden fiziksel ve kimyasal süreçleri incelemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda, ABD toprak taksonomisi ve FAO'nun Dünya Referans Tabanı (WRB) toprak tiplerini sınıflandırma sistemi en yaygın kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Dünyanın çeşitli bölgelerinden birçok uluslararası toprak birliği, WRB yöntemini kullanarak dünya tabanlı bir toprak haritası oluşturmak için iş birliği yapmış ve bu süreç sonunda FAO küresel toprak haritası oluşturulmuştur. Çalışma alanımızın toprak tipini belirlemek için, Manavgat nehir havzasının sınırları tanımlanarak, FAO'nun küresel toprak haritasından Manavgat havzasına özgü toprak haritası çıkarılmıştır.

Çizelge 4.2'ye göre, FAO küresel toprak haritası, havzada dört ana toprak grubunu tanımlamaktadır: Litosoller, kalsik kambisoller, ötrik kambisoller ve ötrik vertisoller. Litosol toprak kategorisi, yaklaşık 144049.62 hektar (%61.24) ile araştırma alanındaki en büyük toprak grubunu oluşturmaktadır. Litosoller, genellikle yüzey toprak derinliklerinin sığlığı ve taşlı yapısı ile tanımlanır. Bu tür toprakların doğal verimlilikleri sınırlı olduğu için genellikle meyve bahçesi gibi bitki örtüsü ile karakterize edilir. Bu toprak tipi çoğunlukla Akseki'nin merkez ve kuzeydoğu kesimleri ile İbradı bölgesinin kuzeybatısındaki ormanlık alanlarda yer almaktadır.

Çalışma alanındaki ikinci en büyük toprak grubunu kombisoller oluşturmaktadır. Kambisoller, mineral toprak yüzeyinden ≤ 50 cm başlayan ve kumlu tın veya daha ince bir doku sınıfına sahip bir kombik horizonlu topraklardır. Bu toprak, yüksek miktarda kalsiyum karbonat içerdiğinden WRB düzenlemesine göre, toprak tipinden önce Kalsik niteleyici eklenir ve Kalsik Kombisoller olarak adlandırılır. Bu toprak türü, çalışma alanının %21.8'ini kapsayarak 5139.54 hektarlık bir alana yayılmıştır ve ağırlıklı olarak Manavgat'ın kuzeybatısı ve batısında, Side bölgesinin yoğun bitki örtüsüyle kaplı kesimlerinde bulunmaktadır.

Ötrik kambisoller, çalışma alanındaki üçüncü toprak grubunu oluşturmaktadır. Yüzeyden itibaren 20 ila 100 cm arasında mineral maddelerden oluşan bir veya daha fazla katmana sahip ve bu katmanların büyük kısmında değişebilir ($\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}+\text{Na}$) $\geq$

değişebilir Al olan topraklar genellikle ötrik niteliği ile tanımlanmaktadır. Bu toprak tipi, ağırlıklı olarak Manavgat nehri havzasının kuzeyinde 27612.5 hektarlık (%11.74) bir alanı kaplamaktadır.

Çizelge 4.2. Çalışma alanındaki toprak fiziksel özellikleri

Toprak sınıfı	Toprak Kodu	Hidrograf	Bünye	Kil%	Silt%	Kum%
Litosoller	I-Lc-E-2b-3114	D	Tın	23	35	42
Kalsik kambisoller	Bk49-2c-6659	D	Tın	22	36	42
Ötrik kambisoller	Be122-2bc-3016	C	Tın	22	36	42
Litosoller	I-Be-c-3093	D	Tın	23	37	40
Ötrik vertisoller	Vc56-3a-3280	D	Killi Tın	36	37	27

Çalışma alanının dördüncü ve son toprak tipi, Ötrik Vertisollerdir. Bu topraklar havzanın %5.17'sini kaplayarak toplamda 12159.02 hektarlık bir alana yayılmakta ve Manavgat ilçesinin merkezinde Akdeniz kıyısına yakın konumda bulunmaktadır. FAO'nun 30 toprak sınıflandırma türünden biri olan Vertisoller, üst yarım metrelik toprak profilinin tüm horizonlarında (katmanlarında) kütle olarak en az yüzde otuz kil parçacıklarının varlığı ile ayırt edilir. Vertisollerin belirlenmesi, toprak yüzeyinden aşağıya doğru uzanan en az 1 cm genişliğinde çatlakların varlığı ile de anlaşılabilir. Bu topraklar, belirgin ıslak ve kuru mevsimlere sahip iklim bölgelerinde, genellikle düz veya hafif eğimli arazilerde bulunur. Vertisoller, bitki besin maddelerince zengindir ancak yalnızca sınırlı miktarda humus içerir.

4.4. Veri Kalite Kontrolü

SaQC algoritması, zaman serisi kalite güvencesi ve kontrolü için ilgili tüm işlevselliğiyle birlikte, Bölüm 3.8'de açıklanmıştır. SaQC algoritması, bu çalışmada kullanılan arşivlenmiş günlük meteorolojik ve hidrolojik verilerin kalite parametrelerini kontrol etmek için uygulandı. Bu kalite kontrolü, boş veya eksik değerler, aykırı değerler, imkânsız tarihler, yinelenen değerler ve zamansal tutarlılık gibi parametreleri içeriyordu.

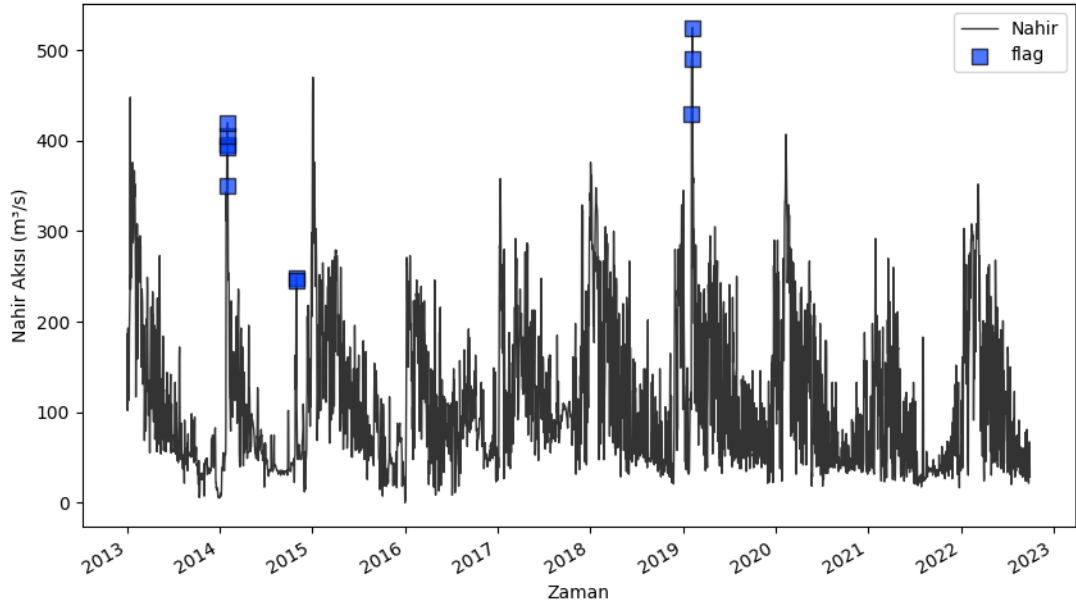
Yedi meteoroloji istasyonunun tamamındaki tüm meteorolojik parametreler (maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, yağış, rüzgâr hızı ve bağıl nem) için eksik veriler değerlendirildi (Ek 2). Çizelge 4.3'e göre, Akseki Cevizli ve Manavgat Orman Sahası istasyonlarında, Akseki Cevizli'deki tamamen eksik rüzgar parametresi de dâhil olmak üzere yüksek sayıda eksik veri noktası bulundu. Önceki bölümde açıklandığı gibi, 3 güne kadar ardışık eksik verisi olan parametreler doğrusal interpolasyon kullanılarak enterpole edilirken, 3 günden uzun süren eksik veriler komşu istasyonlardan alınan verilerle değiştirilmektedir. Ek olarak, eksik meteorolojik verilerin çoğu, verilerin ilk yılı olan ve ısınma dönemi olarak kullanılan 2012 yılında belirlendi (Ek 2).

Benzer şekilde, hidrolojik verilerdeki eksik veri değerlendirmesinin sonucu, Sinanhoca ve Manavgat Şelalesi akım ölçüm istasyonlarında sırasıyla toplam 21 ve 16 eksik gün olduğunu gösterdi. Ayrıca, hem Sinanhoca hem de Manavgat Şelalesi

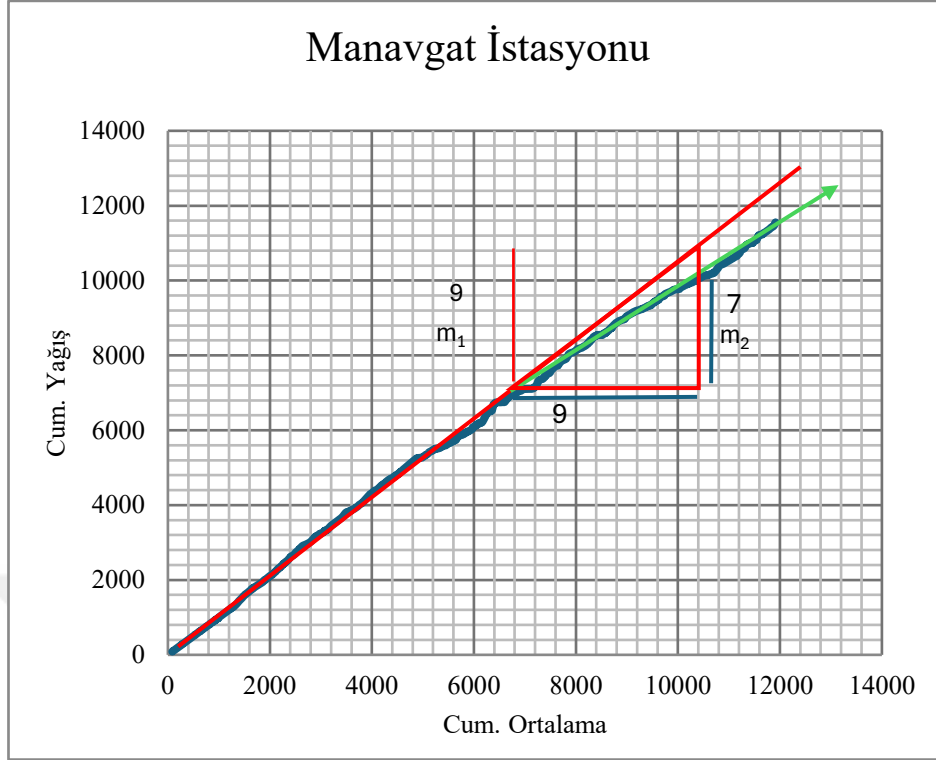
istasyonları için günlük akım verilerinde sınırlı sayıda aykırı değer tespit edildi (Bkz. Şekil 4.3). Belirlenen aykırı değerler kaldırıldı ve ardından SaQC algoritmasının ileri ve geri interpolasyon fonksiyonu kullanılarak dolduruldu. Yağış, yüzey akışı modellemesinde önemli bir rol oynadığından, farklı meteoroloji istasyonları arasındaki yağış tutarlılığı da değerlendirildi. Şekil 4.4'ten 4.7'ye kadar olan grafikler, farklı meteoroloji istasyonlarındaki yağış verileri arasında kabul edilebilir bir tutarlılık olduğunu göstermektedir. Ancak, Manavgat Merkez'deki yağış verileri, en yakın komşu istasyonu olan ve daha yüksek rakım farkı ve denize yakınlığı olan MOS istasyonu ile Çift Kütle Eğrisi karşılaştırması yapıldığında hafif bir tutarsızlık gösterdi (Şekil 4.4).

Çizelge 4.3. Manavgat nehri havzasındaki istasyon başına toplam eksik değer sayısı

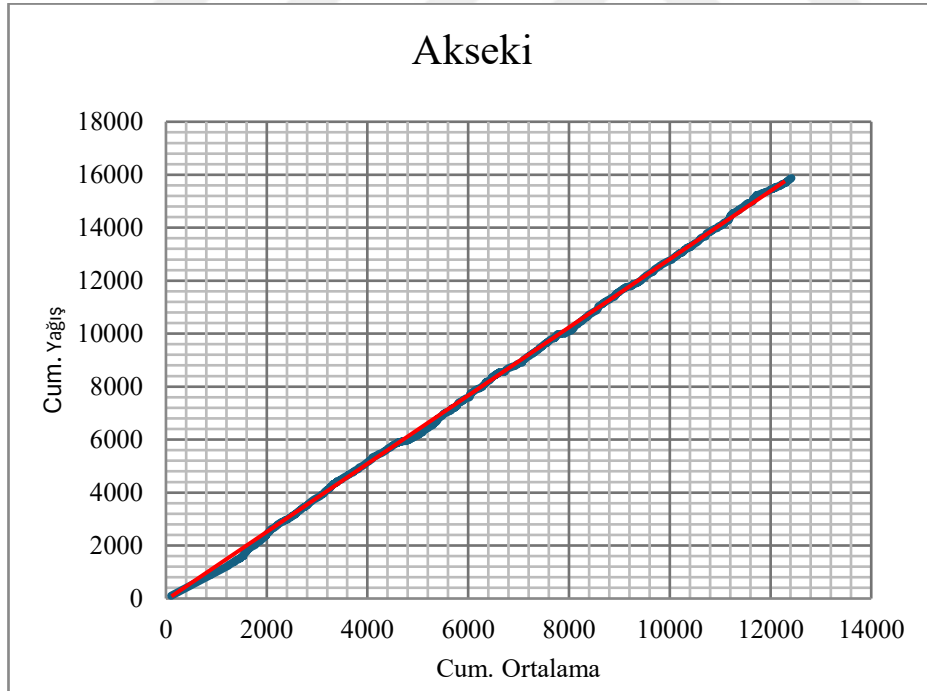
Parametre	Akseki	AkC	Ibradı	MBOS	Manavgat	MOS	MTOS
Bağıl nem	218	1236	78	436	161	1767	237
Yağış	168	1216	39	197	13	1766	225
Tmak	215	1234	44	204	39	1770	266
Tmin	215	1234	44	203	44	1770	266
Rüzgar hızı	215	4018	49	203	20	1766	235



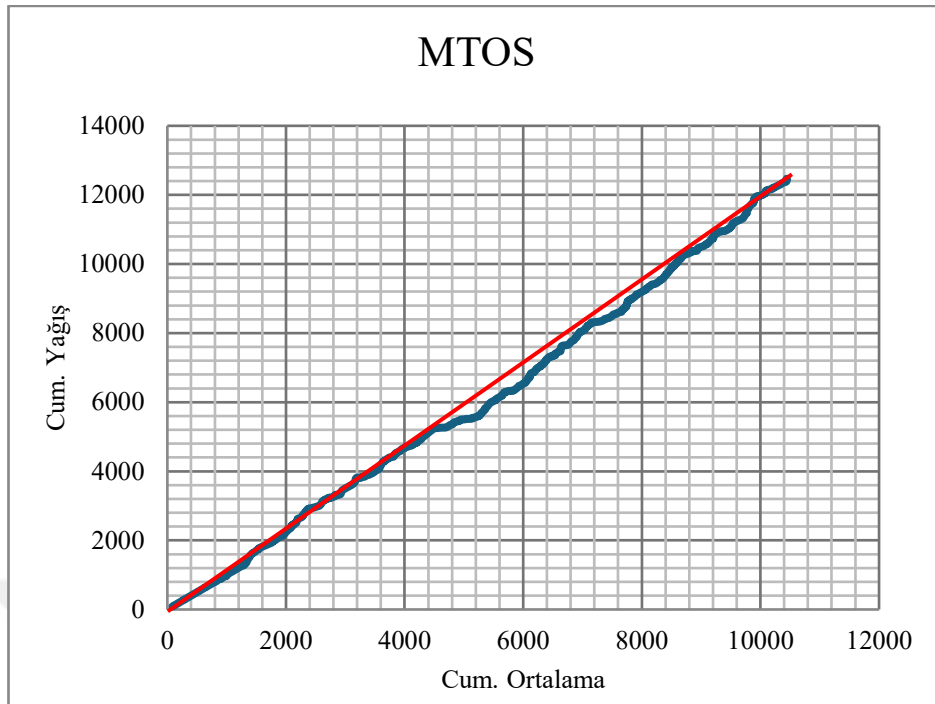
Şekil 4.3. Manavgat şelale istasyonunda nehir akışı



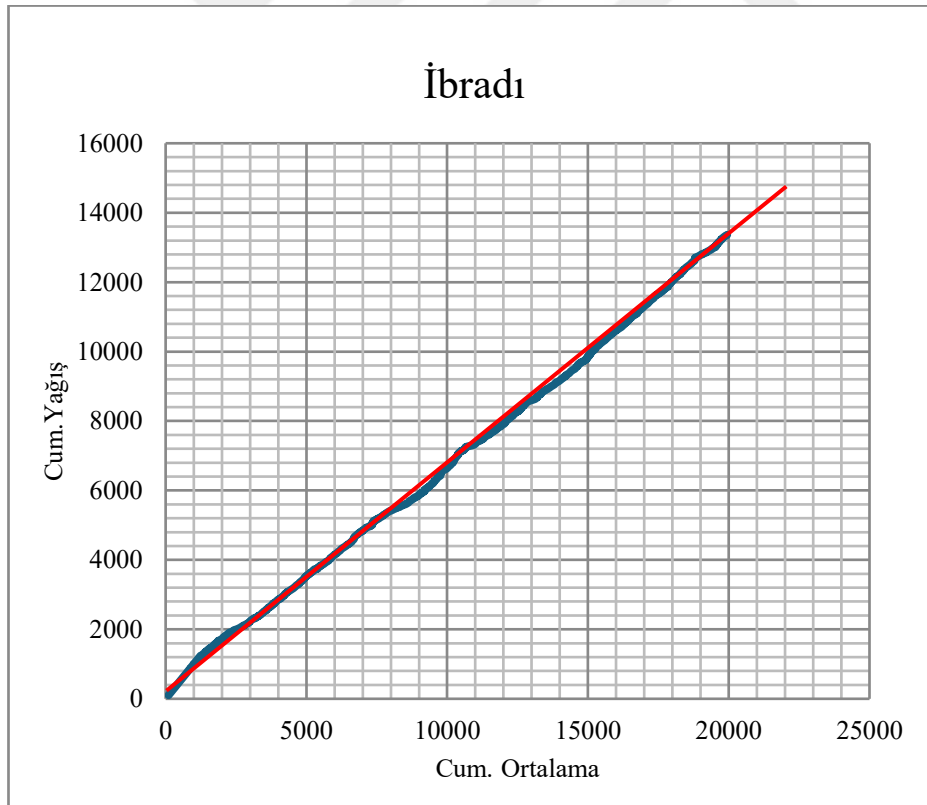
Şekil 4.4. Manavgat istasyonuna ait yağış verilerinin Çift Kütle Eğrisi



Şekil 4.5. Akseki istasyonuna ait yağış verilerinin Çift Kütle Eğrisi



şekil 4.6. MTOS istasyonuna ait yağış verilerinin ift Kütle Eğrisi

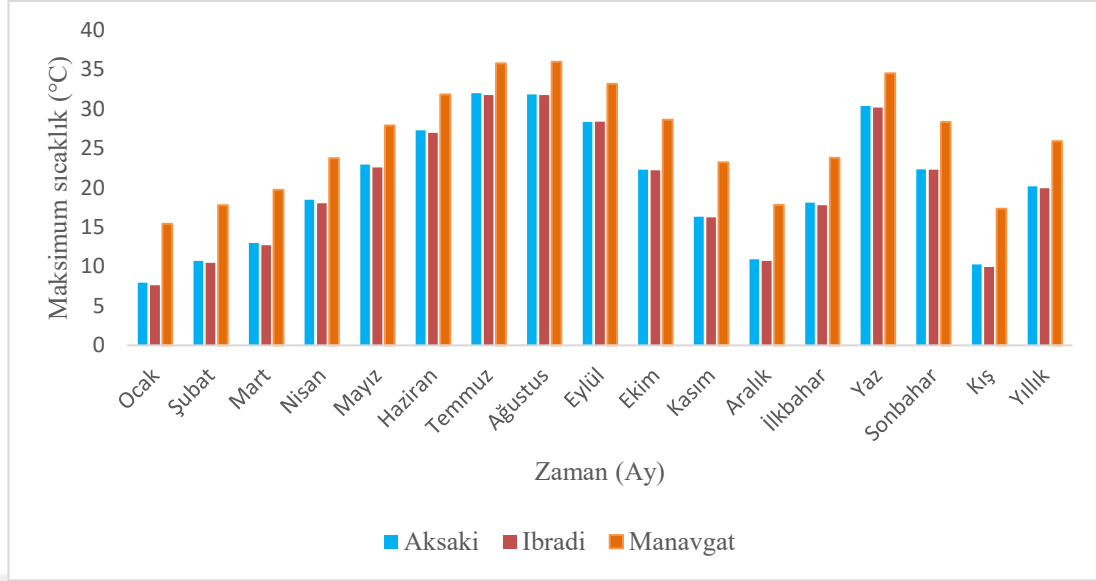


şekil 4.7. İbradı istasyonuna ait yağış verilerinin ift Kütle Eğrisi

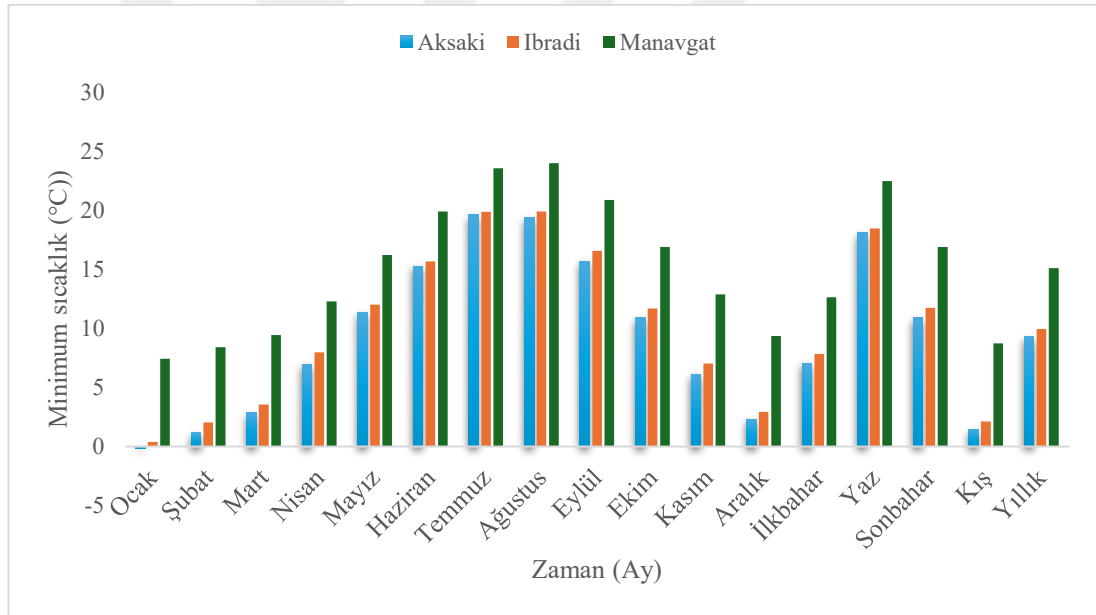
4.5. Çalışma Alanının Meteorolojik Genel Durumu

Manavgat havzasında sıcaklık rejimi yıl boyunca değişkenlik göstermektedir. Ayrıca, havzada yüksek rakımlı bölgelerle alçak rakımlı bölgeler arasında belirgin sıcaklık farklılıkları müşahade edilmektedir. Şekil 4.8, havzanın üç farklı bölgesinde ölçülen uzun yıllık ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık maksimum sıcaklık değerlerini göstermektedir. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda sıcaklıklar, Ağustos-Ocak ayları arasında düşüş gösterirken, Şubat-Temmuz döneminde artış kaydetmektedir. Manavgat merkez istasyonunda en yüksek ve en düşük aylık sıcaklıklar sırasıyla Temmuz ayında 35.7 °C ve Ocak ayında 7.5 °C olarak kaydedilmiştir. Akseki ve İbradı istasyonlarında ise sıcaklık dalgalanmaları sırasıyla en yüksek 32 °C ve en düşük -0.1 °C olarak belirlenmiştir (Şekil 4.9). Akseki ve İbradı'daki mevsimsel sıcaklık değişimleri, Manavgat merkez istasyonu ile benzer bir eğilim izlemektedir.

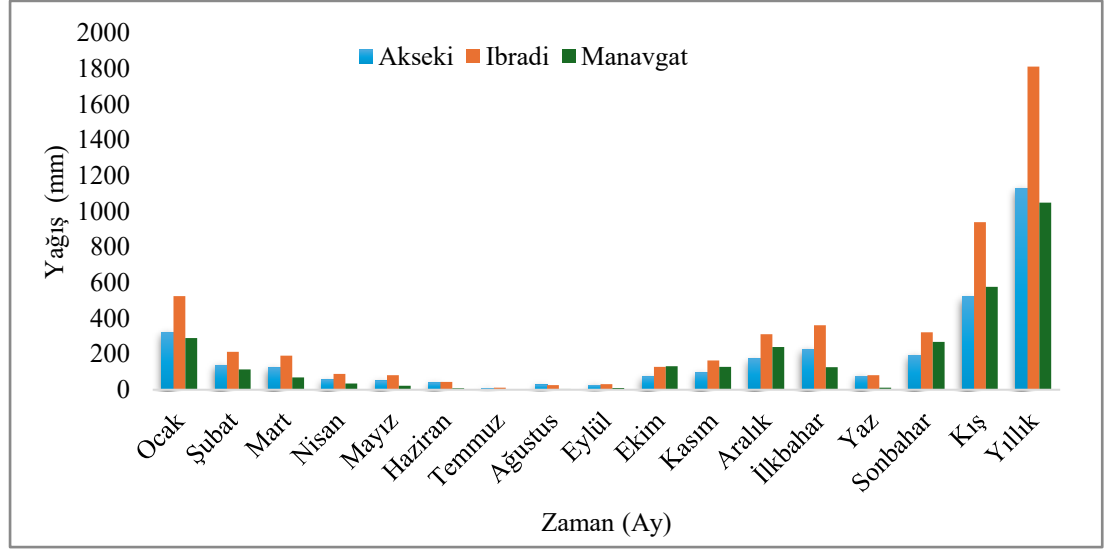
Şekil 4.10 incelendiğinde, yağışın mevsimlere eşit dağılmadığı görülmektedir. Manavgat Nehri havzasında en fazla yağış Ocak ve Şubat aylarında kaydedilmiştir. Manavgat merkez, Akseki ve İbradı meteoroloji istasyonlarında ortalama yağış miktarları sırasıyla 87 mm, 94 mm ve 151 mm olup, bu durum yağış miktarının Akdeniz kıyısındaki alçak rakımlardan Akseki'nin yüksek rakımlı bölgelerine doğru arttığını göstermektedir. Mevsimsel yağış analizine göre, en yüksek yağış kış mevsiminde görülmekte olup, uzun dönemli ortalamalar Manavgat merkezde 576.42 mm, Akseki'de 521.89 mm ve İbradı'da 940.09 mm olarak belirlenmiştir. Buna karşın, en düşük yağış yaz mevsiminde kaydedilmiş ve bu değerler sırasıyla Manavgat merkezde 12.27 mm, Akseki'de 76.86 mm ve İbradı'da 81.21 mm olmuştur. Bu yağış dağılımındaki farklılıklar, Manavgat Nehri havzasındaki değişken iklim koşullarını açıklamakta olup, hidrolojik modelleme açısından önemli bir rol oynamaktadır. Manavgat'ın güneyi ile kuzeyi arasındaki rakım farkı ve deniz ile karanın yan yana bulunması, aralarında farklı basınç merkezleri ve hava iletim yollarının oluşmasına neden olmaktadır. Yaz aylarında denizler üzerindeki basınç değerleri kış aylarına göre daha yüksek olup güney kesimindeki deniz nedeniyle rüzgarlar gün içinde yön değiştirmektedir. Güney rüzgarları, nemli hava kütlelerini iç kesimlere ve kuzeydeki yüksek kesimlere taşımaktadır. Bu durum, sıcaklık düştükçe yağışın artmasına neden olmakta ve en fazla yağış kuzeydeki yüksek kesimlerde görülmektedir (Yıldırım, 2013). Manavgat'ta yıllık ortalama rüzgar hızı 1.8 m/s olup, genellikle yaz aylarında daha düşük şiddette, kış ve ilkbahar aylarında ise en yüksek seviyelerde gözlenmektedir. Havzadaki basınç ve rüzgar dolaşım koşullarının anlaşılması, hidrologlar ve modelleyiciler için doğru modelleme verilerinin belirlenmesi ve kullanılması açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.8. Akseki, İbradı ve Manavgat meteoroloji istasyonlarında gözlenen maksimum sıcaklık karşılaştırması



Şekil 4.9. Akseki, İbradı ve Manavgat meteoroloji istasyonlarında gözlenen minimum sıcaklık karşılaştırması



Şekil 4.10. Akseki, İbradı ve Manavgat meteoroloji istasyonlarında gözlenen yağış karşılaştırması

4.6. Parametrelerin Belirlenmesi ve Duyarlılık Analizi

Kalibrasyon, doğrulama ve ısınma dönemleri için duyarlılık analizi RSWAT aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, varsayılan üst ve alt sınırlar kullanılarak bir grup duyarlı parametre üzerinde analiz yapılır. Kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında daha az sayıda ancak daha önemli parametrelerin kullanılması gerekmektedir. Bu önemli parametreler, modelin kapasitesini değerlendirme ve simüle edilmek istenen sistemin işleyişini açıklama açısından kritik öneme sahiptir. Mevcut çalışmanın duyarlılık analizinin amacı, belirli bir parametre setinin model tarafından tahmin edilen akış üzerindeki etkisini incelemektir. Bu analiz kapsamında tüm parametrelerin duyarlılığı, Tek Seferde Tekdüzen-Latin Hiperküp Örnekleme (One-at-a-Time Uniform Latin Hypercube Sampling) yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Duyarlılık analizi prosedürünün girdisi, çeşitli hidrolojik ölçüm istasyonlarından ölçülen günlük akım gözlemleridir. Her bir duyarlı parametrenin üst ve alt sınırları önceden tanımlanmış ve model, 2013-2022 gözlem verilerini temel alarak iki ölçüm istasyonunda günlük akım verilerini simüle etmek için kullanılmıştır. Ölçülen akış verilerine uyum sağlamak için, model parametreleri yüksek ve düşük değerler arasında duyarlılık analizi sırasında otomatik olarak birçok kez değiştirilmiş ve bu süreç sonunda en duyarlı 13 parametre belirlenerek Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Kalibrasyon sürecinde belirlenen en duyarlı parametrelerin değişim aralıkları ve en uygun değerleri

Sıralama	Parametre		t_stat	p_değeri	Alt-Üst sınır	İyi Uyum Değeri
1	SOL_K.sol(Doygun iletkenlik, mm/saat)	hidrolik	-26.9537	0.0000	0-2000	568.4788
2	HRU_SLP.hru (HRU'daki eğim dikliği, m m ⁻¹)	eğim	-17.8395	0.0000	0.01-1	0.0288
3	SURLAG.bsn (Yüzey akış gecikme katsayısı)		-2.1737	0.0300	3 - 24	18.4853
4	GW_DELAY.gw (Yer altı suyu gecikme süresi, gün)		-2.1023	0.0358	0-500	19.4943
5	GWQMN.gw (Sığ Akifer Akış Eşiği, mm)		-1.2750	0.2026	0-5000	958.1284
6	ALPHA_BF.gw (Taban akışı faktörü, gün ⁻¹)	alfa	-0.1481	0.8823	0.01-0.4	0.1599
7	REVAPMN.gw (sığ akiferdeki ve doymamış bölge arasındaki eşik derinliği, mm)		0.2016	0.8403	0-500	495.8735
8	RCHRG_DP.gw (Yer altı suyu derin akifere sızma yüzdesi, mm)		0.6773	0.4984	0-1	0.9735
9	CN2.mgt (Başlangıç eğri numarası)		0.8852	0.3762	35-98	40.9365
10	SOL_AWC.sol (kullanılabilir su kapasitesi, mm su /mm toprak)	su	8.0384	0.3244	0.7 -1	0.7984
11	OV_N.hru (Manning'in n değeri)		13.7366	0.2550	0.01-30	28.3504

Nash-Sutcliffe (NS) amaç fonksiyonu, duyarlı parametrelerin sıralamasını belirlemek için kullanılmaktadır; bir parametre ne kadar duyarlıysa, t-stat değeri o kadar büyük ve P-değeri o kadar küçük olmaktadır. Seçilen parametrelerden, araştırma bölgesindeki yer altı suyu ve havzanın alt havza karakteristiklerinin akarsu akışını etkilediği açıkça görülmektedir. Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi, Manavgat havzasındaki parametrelerin duyarlılığı karmaşık bir yapı sergilemiştir. Duyarlılık analizinde, havzada en yüksek duyarlılık değerini gösteren toprak ve eğim parametreleri ile yer altı suyu ile ilgili parametreler en duyarlı parametreler olarak belirlenmiştir.

Doymuş hidrolik iletkenlik (SOL_K.sol), duyarlılık analizi sırasında en hassas parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametrenin aralığı 0 ile 2000 mm/saat arasında değişmektedir. Mevcut çalışma için en uygun değer, çalışma bölgesinin yukarı havza

alanında yüksek bir doymuş hidrolik iletkenlik (568 mm/saat) değeri olduğunu göstermektedir. SOL_K'nın bir hidrolojik havza üzerinde suyun toprakta ne kadar kolay hareket ettiğine bağlı olarak çeşitli etkileri bulunmaktadır. Daha yüksek bir SOL_K değeri, suyun daha kolay infiltre olmasına izin veren bir toprak olduğunu göstermektedir. Bu durum, yağışın daha fazla kısmının toprağa sızabileceği, dolayısıyla yer altı suyu rezervlerini yenileyebileceği ve yüzey akışı azaltılabileceği anlamına gelmektedir. Daha yüksek SOL_K değerine bağlı olarak artan infiltrasyon sayesinde yer altı suyu daha verimli bir şekilde yenilenmektedir (Neitsch vd. 2011).

SOL_K'nın ardından, HRU'daki eğim dikliği (HRU_SLP.hru) çalışma alanında ikinci en duyarlı parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametrenin SWAT model kurulumunda aralığı 0.01 ile 1 m m⁻¹ arasında değişmektedir. Önerilen HRU_SLP.hru değeri ise yaklaşık 0.03 olup, bu da oldukça düşük bir değerdir. Düşük HRU değeri, HRU'daki suyun yavaş hareket etmesine neden olmaktadır (Neitsch vd. 2011). Bu durum, suyun toprağa infiltrasyon süresini arttırmakta ve yüzey akışı azaltmaktadır. Yavaş akış nedeniyle, suyun toprağa sızarak yer altı suyu beslenmesini iyileştirmesi için yeterli zamanı olmaktadır.

Havza seviyesindeki yüzey akış gecikme katsayısı (SURLAG.bsn), yağmur ile yüzey akış arasındaki gecikmeyi temsil eden ve en duyarlı üçüncü parametre olarak belirlenmiştir (Neitsch vd. 2011). Bu parametrenin değişim aralığı 3 ile 24 bulunmuştur. Bu parametrenin en uygun değeri yaklaşık 18 olarak belirlenmiş olup, bu da yüksek bir yüzey akış gecikme süresini göstermektedir. Bu gecikme, genel akarsu akış hidrografını etkilemektedir. SURLAG.bsn, bir yağış olayından hemen sonra yüzey akışın bir kısmını geciktirerek, tüm akışın ana kanala ulaşmasını önlemektedir (Mosbahi vd. 2015). Bu durum, daha düşük pik akışa sahip ve daha yavaş bir çekilme eğimli (hidrografın düşen kısmı) daha düzgün bir hidrograf oluşturmaktadır.

Benzer şekilde, yer altı suyu ile ilgili parametreler olan GW_DELAY.gw, GWQMN.gw, Alpha_BF, REVAPMN.gw ve GW_REVAP.gw, Manavgat nehri havzasında önemli bulunan dört duyarlı parametre seti olarak belirlenmiştir. Taban akışı sürecine ilişkin parametrelerden, yer altı suyu gecikme süresi (GW_DELAY.gw), Manavgat nehri havzasındaki en önemli duyarlı parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametrenin kabul edilebilir değer aralığı 0 ile 500 gün arasında değişmekte olup, en uygun değer ise 19.49 gün olarak belirlenmiştir. GW_DELAY, suyun toprağa sızdıktan sonra yer altından hareket ederek akarsuya ulaşması için gereken ortalama süreyi temsil etmektedir (Mosbahi vd. 2015).

GWQMN.gw (Sığ Akifer Akış Eşiği) parametresinin çalışma alanındaki etkisini göz önünde bulundurarak, White vd. (2005) ve Cibir vd. (2010) bu parametrenin akarsu akışına yer altı suyu katkısını düzenleyen bir denetleyici işlevi gördüğünü belirtmişlerdir. GWQMN sığ akifer katkısını kontrol ettiğinden, dolaylı olarak taban akışını da etkilemektedir. Kurak dönemlerde, sığ akiferdeki su seviyesi GWQMN eşiğinin altına düşerse, yer altı suyunun akarsu akışına katkısı ya tamamen durmakta ya da minimum seviyeye inmektedir. Bu durum, taban akışında bir azalmaya yol açabilmektedir. Ayrıca, bazı havzalarda, özellikle uzun süren kurak dönemlerde, su tablası önemli ölçüde düşebilir ve sığ akiferin akarsu yatağından ayrılmasına neden olabilmektedir. GWQMN değerinin yüksek olması, akışın gerçekleşmesi için daha derin bir su seviyesi gerektirdiğinden, bu kopukluğu daha da artırabilmektedir. Varsayılan olarak, bu

parametre 0-5000 mm aralığında değişmekte olup, üst akım gözlem istasyonu (Sinanhoca) için en uygun değer 958.12 mm olarak belirlenmiştir.

Çalışma alanındaki altıncı duyarlı parametre olan ALPHA_BF, taban akışı alfa faktörünü temsil etmektedir. Başlangıç değeri 0.01 ile 0.4 gün⁻¹ arasında olup bu çalışmada en uygun taban akışı alfa faktörü 0.149 gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. ALPHA_BF, taban akışının üstel azalmasını, hidrograf şeklini ve akifer özelliklerini yansıtmaktadır. Taban akışı, akarsularda sürekli olarak bulunan, düşük seviyeli akıştır ve esas olarak yer altı suyundan beslenir. ALPHA_BF, taban akışının yağış olayından sonra veya kurak dönemlerde ne kadar hızlı çekildiğini belirleyen üstel oranı tanımlamaktadır. ALPHA_BF değerinin yüksek olması, taban akışının daha hızlı çekilme hızına işaret etmektedir. Bu durum, akış hidrografının çekilme kısmının eğiminin daha dik olması anlamına gelmektedir. ALPHA_BF dolaylı olarak akarsuyu besleyen akiferin karakteristikleri ile ilişkilendirilebilir. ALPHA_BF değerinin yüksek olması, daha az depolama kapasitesine veya daha hızlı drenaja sahip bir akiferi temsil edebilir ve böylece taban akışının daha hızlı çekilmesine yol açabilmektedir. Buna karşın, ALPHA_BF değerinin düşük olması, daha yüksek depolama kapasitesine veya daha yavaş drenaja sahip bir akiferi işaret ederek taban akışının daha yavaş çekilmesine sebep olabilmektedir. Taban akışının hızla azalması durumunda, özellikle kurak dönemlerde, akarsuların debisinde hızlı bir düşüş gözlemlenebilmektedir (Cibin vd. 2010; Mosbahi vd. 2015).

Yer altı suyu parametrelerinden REVAPMN.gw, duyarlılık analizi sırasında belirlenen diğer hassas parametre olmuştur. Neitsch vd. (2011) tarafından tanımlandığı üzere, bir hidrolojik havzada REVAPMN.gw'nin temel işlevi, sığ akiferdeki suyun doymamış bölgeye yukarı doğru hareket edebilmesi için gerekli olan eşik derinliği belirlemektir. REVAPMN.gw, sığ akifer ile doymamış bölge arasındaki su hareketinin simülasyonunu hassaslaştırarak bu sürecin daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Bu parametre, yalnızca yeterli su basıncı mevcut olduğunda buharlaşmalı yukarı hareketin (revap) gerçekleşmesine izin vermektedir. Böylece toprak nem içeriğini etkileyerek suyun yukarı yönlü taşınmasını optimize eder ve potansiyel olarak toplam yer altı suyu kaybını azaltmaktadır. Yer altı suyu parametreleri arasındaki son duyarlı parametre ise derin akifere sızma yüzdesidir (RCHRG_DP.gw). Başlangıç değeri 0-1 mm aralığında değişmekte olup, en uygun değer oldukça yüksek olan 0.97 mm olarak belirlenmiştir. RCHRG_DP.gw, sızan suyun sığ akiferin ötesine ve daha derin bir akifer içine doğru aşağıya süzülen oranını ifade etmektedir. Bu parametre, esasen sızan suyun sığ ve derin akifer sistemleri arasında nasıl bölündüğünü belirlemektedir. RCHRG_DP.gw değerinin yüksek olması, sızan suyun daha büyük bir kısmının derin akiferi beslemek için hareket ettiğini göstermektedir. Bu durum, daha derin jeolojik oluşumlarda yer altı suyu depolanmasını artırarak uzun vadede su kaynaklarının sürdürülebilirliğine katkı sağlayabilmektedir (Neitsch vd. 2011).

Yönetim parametrelerinden biri olan başlangıç eğri numarası (CN2) da hidrolojik model kalibrasyonunda duyarlı parametrelerden biridir. CN2, yağış olaylarından kaynaklanan yüzey akışını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan Toprak Koruma Servisi Eğri Numarası (SCS-CN) yönteminin temel bir parametresidir. Bu parametre, yağışın ne kadarının yüzey akışına dönüştüğünü ifade eden bir kayıp oranını temsil etmektedir (Me W. vd. 2015). SWAT model kalibrasyonundaki başlangıç eğri değeri 35 ile 98 arasında değişmekte olup, bu çalışmada belirlenen optimal değer yaklaşık 40 olarak tespit edilmiştir. Daha düşük bir CN2 değeri, yüzey akışa dönüşen yağış miktarının daha

az olduğunu ve toprak içine sızan su miktarının daha fazla olduğunu göstermektedir (Mosbahi vd. 2015). Orman ve çayır-mera alanları, genellikle daha yüksek infiltrasyon kapasitesine sahip olduğundan daha düşük CN2 değerlerine, kentsel alanlar ise yüzey geçirimsizliği nedeniyle daha yüksek CN2 değerlerine sahiptir. Bir hidrolojik havzadaki kullanılabilir su kapasitesi (SOL_AWC), toprak içindeki suyun depolanmasını ve hareketini etkilemektedir. SOL_AWC, toprağın doygunluk noktası ile solma noktası arasında tutabileceği su miktarını temsil etmektedir (Sloan ve Moore, 1984). Duyarlılık analizi sonuçlarına göre bu parametrenin de hassas olduğu belirlenmiş olup, başlangıç değeri 0.7 ile 1 arasında değişirken, optimal değer 0.79 olarak tespit edilmiştir. Daha yüksek bir SOL_AWC değeri, toprağın daha fazla su depolama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, yağışın daha fazla kısmının toprağa sızmasına izin vererek yüzey akışa dönüşen miktarı azaltmaktadır (Neitsch vd. 2011). SOL_AWC değeri yüksek olan topraklar, özellikle yağışlı dönemlerde bir tampon görevi görerek suyu depolamakta ve daha sonra yavaşça serbest bırakarak şiddetli yağış sırasında pik akışın azalmasına katkıda bulunabilmektedir.

Manning'in n değeri (OV_N.hru), çalışma alanında duyarlılığı belirlenen son parametre olup, taşkın akışının hidrolik hesaplamalarında kullanılan bir pürüzlülük katsayısını ifade etmektedir. Bu katsayı, hidrolik denklemler içerisinde akış hızının hesaplanmasında önemli bir rol oynamaktadır. OV_N.hru parametresinin başlangıç değeri 0.1 ile 30 arasında değişirken, bu çalışmada belirlenen optimal değer 28 olarak tespit edilmiştir; bu oldukça yüksek bir değerdir. Daha yüksek bir OV_N.hru değeri, daha pürüzlü bir taşkın akış yüzeyini ifade etmektedir (Me. Vd. 2015). OV_N.hru'daki değişimler, taşkın akışının akarsulara ulaşma süresini doğrudan etkileyebilmektedir. Daha yüksek bir OV_N.hru değeri, akış yüzeyinin daha pürüzlü olması nedeniyle akış hızının düşmesine ve suyun akarsu ağına ulaşma süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu durum, hidrografta akımın zamanlamasını ve şeklini etkileyebilmektedir. Ayrıca, OV_N.hru taşkın akış hızını etkileyerek akarsu sistemlerindeki pik akışı dolaylı olarak değiştirebilmektedir. Daha yavaş bir taşkın akışı, ani debi artışlarını azaltarak hidrolojik süreçler üzerinde önemli bir dengeleyici rol oynayabilmektedir.

4.7. Akarsu Akışı Kalibrasyonu ve Doğrulaması

Duyarlılık analizinden sonra belirlenen 11 hassas parametrenin en uygun değerleri kullanılarak kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Havzadaki iki farklı akım gözlem istasyonundaki (27 nolu alt havzada bulunan Sinanhoca ve 33 nolu alt havzada bulunan Manavgat Şelale istasyonu) akış verilerinin yarısı (2013-2017) kalibrasyon aşamasında kullanılırken, kalan veriler (2018-2022) doğrulama için kullanılmıştır. R-SWAT, ölçülen yüzey akış verilerini kalibrasyon ve doğrulama aşamasında girdi olarak kabul etmektedir. Buna dayanarak, 11 parametre en iyi değer aralıklarına ayarlanmış ve ardından R-SWAT programının optimizasyon ve belirsizlik seçeneği, birden fazla istasyon için günlük ve aylık zaman ölçeğinde çalıştırılmıştır. Program, modellenen ve gözlemlenen değerleri optimize etmek için 15 saatten fazla bir süre boyunca ve bin (1000) kez çalıştırılmıştır. Son olarak, en iyi simülasyon R-SWAT tarafından hem kalibrasyon hem de doğrulama dönemleri için istatistiksel p-faktörü ve r-faktörü ile elde edilmiştir. En iyi simüle edilen akış değeri, belirleme katsayıları (R^2), Nash-Sutcliffe Verimliliği (NSE) ve yüzde sapma (Pbias) kullanılarak ölçülen yüzey değeri ile karşılaştırılmış ve bu değerler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Modifikasyondan önce model performans kriterleri

Ölçüm İstasyonu	p-faktör		r-faktör	
	Kalibrasyon	Doğrulama	Kalibrasyon	Doğrulama
Manavgat Şelalesi	0.32	0.31	1.15	1.04
Sinanhoca	0.59	0.58	1.73	1.67

İstatistiksel Ölçüt	Sinanhoca istasyonu		Manavgat şelalesi istasyonu	
	Günlük	Aylık	Günlük	Aylık
R ²	0.67	0.87	0.47	0.72
NSE	0.66	0.50	0.19	0.23
Pbias	1.03	-4.86	-41.64	-41.08

Çizelge 4.5, havza içinde model modifikasyonundan önceki istatistiksel ölçütleri sunmakta olup, kalibrasyon ve doğrulama sonrası elde edilen model performansını özetlemektedir. Sonuçlar, simüle edilen ve gözlemlenen değerler arasında yukarı havzada (Sinanhoca) orta derecede tatmin edici bir uyum olduğunu ortaya koymuştur. Sinanhoca istasyonunda elde edilen 0.59'luk bir p-faktörü, simüle edilen verilerin %59'unun %95 güven aralığı içinde kaldığını göstermektedir. Ancak, model, Manavgat Şelalesi ölçüm istasyonundaki alt havza için önemli ölçüde düşük bir tahmin yapmış (0.32) ve simüle edilen verilerin yaklaşık %70'inin %95 güven aralığından sapma gösterdiğini ortaya koymuştur. Mapes vd, (2020) 'a göre, kabul edilebilir bir p-faktörü aralığı genellikle 0.65-0.70'den büyük olarak kabul edilmekte olup bu değer 1.5'ten küçük bir r-faktörü ile birlikte olması beklenmektedir. Bununla birlikte, p-faktörü değerlendirmeleri, verinin kalitesi ile havzanın meteorolojik ve hidrolojik özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Benzer şekilde, model performansı değerlendirmesi sırasında, yukarı havza (Sinanhoca) günlük simülasyonlarında R² ve NSE değerleri sırasıyla 0.67 ve 0.66 olarak elde edilmiştir. Günlük Pbias değeri %1.02 ve aylık ise %-4.86 belirlenmiştir. Bu istatistikler, Sinanhoca ölçüm istasyonunda simüle edilen ve gözlemlenen akış değerleri arasında kabul edilebilir bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ancak, SWAT modeli, Manavgat Şelalesi ölçüm istasyonunda akışları önemli ölçüde düşük tahmin etmiş olup Pbias değeri %-41 olarak hesaplanmıştır. Bu düşük tahmin, gözlemlenen ortalama günlük akışın (110 m³/s) simüle edilen ortalama günlük akıştan (73.74 m³/s) belirgin şekilde yüksek olmasıyla açıkça görülmektedir. Ayrıca, sırasıyla 0.47 ve 0.19'dan daha düşük R² ve NSE değerleri, alt havza ölçüm istasyonunda günlük simüle edilen ve gözlemlenen yüzey akış verileri arasında bir uyumsuzluk olduğunu göstermektedir.

Modelin alt havzada bulunan ölçüm istasyonundaki düşük tahmin etme eğilimini gidermek için, bölgenin jeolojik, arazi kullanım/örtüsü, toprak özellikleri ve diğer ilgili hidrolojik özelliklerine ilişkin mevcut bilgilere dayanarak birkaç duyarlı parametre üzerinde değişiklik yapılmıştır. İlk kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında, yukarı havzadaki (alt havzalar 1-26) tüm duyarlı parametreler sabit tutulmuştur. Model performansını artıran parametrelere odaklanarak, iteratif olarak manuel kalibrasyon yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Son tur manuel parametrisasyon, Manavgat Şelalesi ölçüm istasyonunun bulunduğu alt havza 33'e drene olan alt havzalar 27, 28, 29, 30, 31 ve 32'ye uygulanmıştır.

Çizelge 4.6. Alt havzadaki modifiye edilmiş parametreler

Parametre	Değiştirilmiş Değer	Değiştirilmiş Alt Havza	Parametre	Değiştirilmiş Değer	Değiştirilmiş Alt Havza
ESCO.hru	0.78	27-33	REVAPMN.gw	363.18	27-33
CH_K2.rte	0.45	27-33	OV_N.hru	15.54	27-33
GW_DELA					
Y.gw	124.21	27-33	HRU_SLP.hru	0.22	27-33
CN2.mgt	58.79	27-33	SLSÜBBSN.hru	97.92	27-33
			GW_REVAP.g		
SOL_K.sol	10.00	27-33	w	0.07	27-33
ALPHA_BF.					
gw	0.06	27-33	SOL_AWC.sol	0.01	27-33
SURLAG.bs					
n	7.72	27-33	EPCO.hru	0.44	27-33
GWQMN.gw	99.00	27-33	CH_N1.sub	0.87	27-33
RCHRG_DP.					
gw	0.71	27-33			

SWAT model çıktısı, parametre modifikasyonunun ardından, kalibrasyon ve belirsizlik analizini gerçekleştirmek için RSWAT programına entegre edilmiştir. Model performansı, p-faktörü, r-faktörü, R^2 , NSE ve Pbias istatistiksel göstergeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Parametre ayarlamalarından sonra modelin, alt havzada önemli iyileşme gösterdiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.7'de gösterildiği gibi, Sinanhoca'daki p-faktörü 0.59'dan 0.65'e yükselmiş, bu da simüle edilen verilerin %65'inin gözlemlenen verilerin %95 güven aralığı içinde kaldığını göstermiştir. Bu süreçte, r-faktörü ise 1.4'ün altında kalmıştır. Sonuç olarak, günlük veriler için R^2 ve NSE değerleri sırasıyla 0.67 ve 0.66'dan 0.81 ve 0.75'e yükselirken, aylık veriler için ise sırasıyla 0.87 ve 0.50'den 0.97 ve 0.96'ya çıkmıştır. Ancak, Pbias değerinde hafif bir dalgalanma gözlenmiş olup günlük ve aylık veriler için bu değerler sırasıyla %1.02 ve %-4.86'dan %9.02 ve %-2.91'edeğişmiştir. Ancak bu değerler, kabul edilebilir ± 25 aralığında kalmıştır. Ayrıca, ilgili ölçüm istasyonunda gözlenen ve modellenen ortalama günlük akışlar sırasıyla $52 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ve $56 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ olarak belirlenmiş ve bu durum ve Sinanhoca ölçüm istasyonunda simüle edilen ve gözlemlenen veriler arasında güçlü bir uyum olduğunu doğrulamıştır. Bu ölçüm istasyonu, havzanın ortasında yer almakta olup herhangi bir yapay bozulmaya maruz kalmamış bölgeleri kapsadığından, özellikle ana çıkış noktasındaki havzanın tüm özelliklerini tam olarak temsil etmemektedir.

Manavgat Şelale ölçüm istasyonunda, günlük veriler için R^2 ve NSE değerleri küçük iyileşmeler göstermiş olup, sırasıyla 0.47 ve 0.19'dan 0.48 ve 0.24'e yükselmiştir. Aylık veriler için bu iyileşmeler nispeten daha belirgin olmuş, R^2 ve NSE değerleri sırasıyla 0.72 ve 0.23'ten 0.74 ve 0.32'ye çıkmıştır. Bununla birlikte, hem günlük hem de aylık veriler için Pbias, %-41'den %-32.68'e hafif bir değişim gösterse de, bu değerler kabul edilebilir ± 25 aralığının oldukça dışında kalmıştır. Ayrıca, günlük veriler için p-faktörünün 0.32 ile 0.45 arasında dalgalanması, simüle edilen ve gözlemlenen yüzey akışı arasındaki korelasyonun istenilen düzeyde olmadığını göstermektedir.

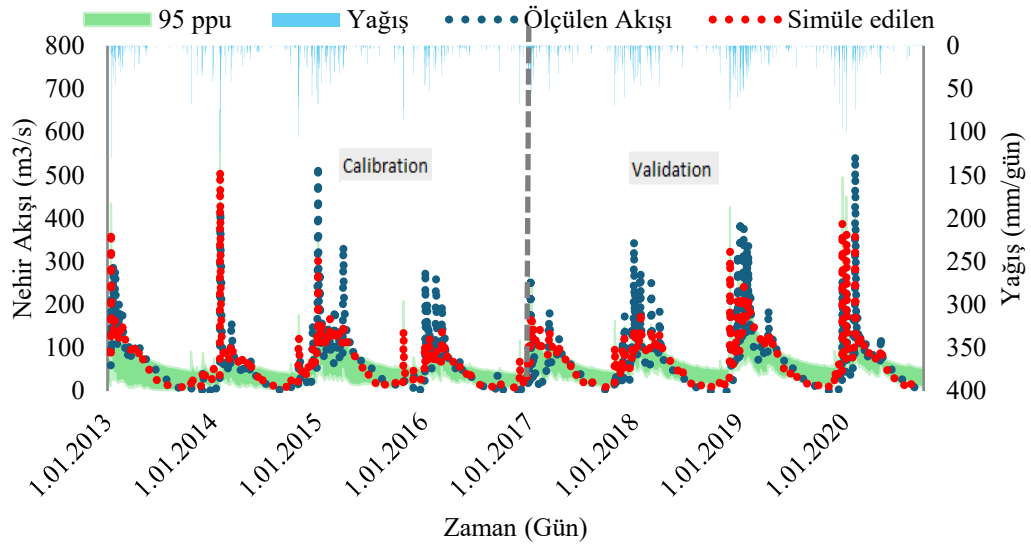
Çizelge 4.7. Modifikasyondan sonra belirlenen model performans kriterleri

Ölçüm İstasyonu	p-factor		r-factor	
	Kalibrasyon	Doğrulama	Kalibrasyon	Doğrulama
Manavgat Şelalesi	0.45	0.41	1.12	1.04
Sinanhoca	0.65	0.63	1.4	1.37

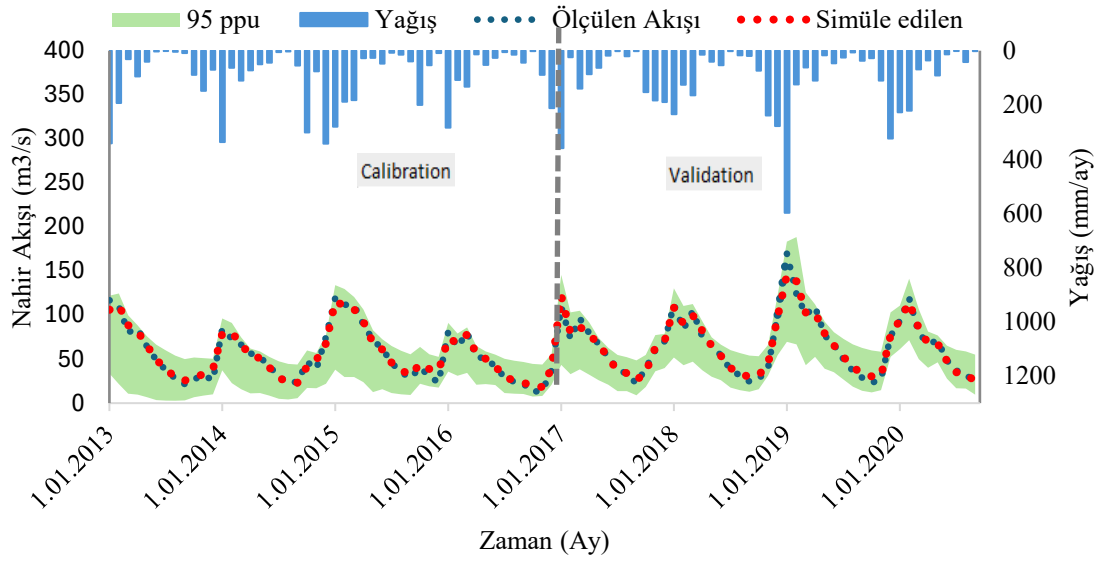
İstatistiksel Ölçüt	Sinanhoca istasyonu		Manavgat Şelalesi istasyonu	
	Günlük	Aylık	Günlük	Aylık
R ²	0.81	0.97	0.48	0.74
NSE	0.75	0.96	0.24	0.32
Pbias	9.02	-2.91	-32.68	-32.46

Sinanhoca ölçüm istasyonunda, Manavgat Nehri Havzası'nın toplam 2325 km²'lik alanının 1580.77 km²'sini (%67.9) kapsayan çıkış noktasında elde edilen sonuçlar, SWAT modelinin bu yukarı havzada güvenilir akış simülasyonları üretebileceğini göstermektedir. Şekil 4.11, kalibrasyon ve doğrulama dönemleri için gözlemlenen ve simüle edilen akış hidrografını ve bunlara karşılık gelen akım süreklilik eğrilerini, en uygun kalibre edilmiş parametreler kullanılarak sunmaktadır. SWAT modeli, Sinanhoca ölçüm istasyonundaki günlük kalibrasyon sürecinde gözlenen akışı etkili bir şekilde yeniden üretmiş ve %95 Tahmin Belirsizliği (PPU) bandı, gözlenen verilerin çoğunu kapsamıştır (p-faktörü = 0.65). Benzer şekilde, aylık hidrografi (Şekil 4.12), Sinanhoca ölçüm istasyonuna drene olan yukarı alt havzalardaki modellenmiş ve gözlenen akışlar arasında yüksek bir uyum (NSE=0.96) göstermekte olup, %95 PPU bandı gözlemlenen verilerin neredeyse tamamını kapsamaktadır. Ayrıca, grafik, yağış ile yüzey akışı arasındaki güçlü korelasyonu açıkça ortaya koymaktadır. Yüksek yağış dönemleri genellikle yüksek akış dönemleri ile örtüşürken, düşük yağış dönemleri ise düşük akım dönemlerine karşılık gelmektedir. Bu ilişki, özellikle pik akış olaylarında belirgin olup gözlemlenen akışın simüle edilen akışı yakından takip etmesi, modelin yağışın akış üzerindeki etkisini doğru bir şekilde yansıttığını göstermektedir.

Benzer şekilde, yağış ve akıştaki mevsimsel eğilimler grafiklerde açıkça görülmektedir. Örneğin, Şekil 4.11 ve 4.12'de en yüksek akışlar kış ve ilkbahar aylarında gerçekleşmekte olup, bu dönemler en yoğun yağış periyodu ile örtüşmektedir. Genel olarak, Sinanhoca ölçüm istasyonundaki günlük ve aylık hidrograf, yağış ile yüzey akışı arasındaki ilişkiye ve SWAT modelinin bu ilişkiyi Manavgat'ın yukarı havzalarında doğru bir şekilde simüle etme yeteneğine dair önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bulguya benzer şekilde, çeşitli araştırmalar SWAT modelinin karstik yapıya sahip nehir havzalarında akışı tahmin etme yeteneğini ortaya koymuş ve doğrulamıştır (Ricci vd. 2023; Zhou vd. 2022; Geng vd. 2021; Kim vd. 2012; Amatya vd. 2011). Manavgat nehir havzasında SWAT modeli kullanılarak yapılan önceki çalışmaların bulunmaması nedeniyle, bu çalışma önemli bir değer sunmakta ve Manavgat'ın yukarı havzalarında SWAT kullanacak araştırmacılar için bir rehber niteliği taşımaktadır.

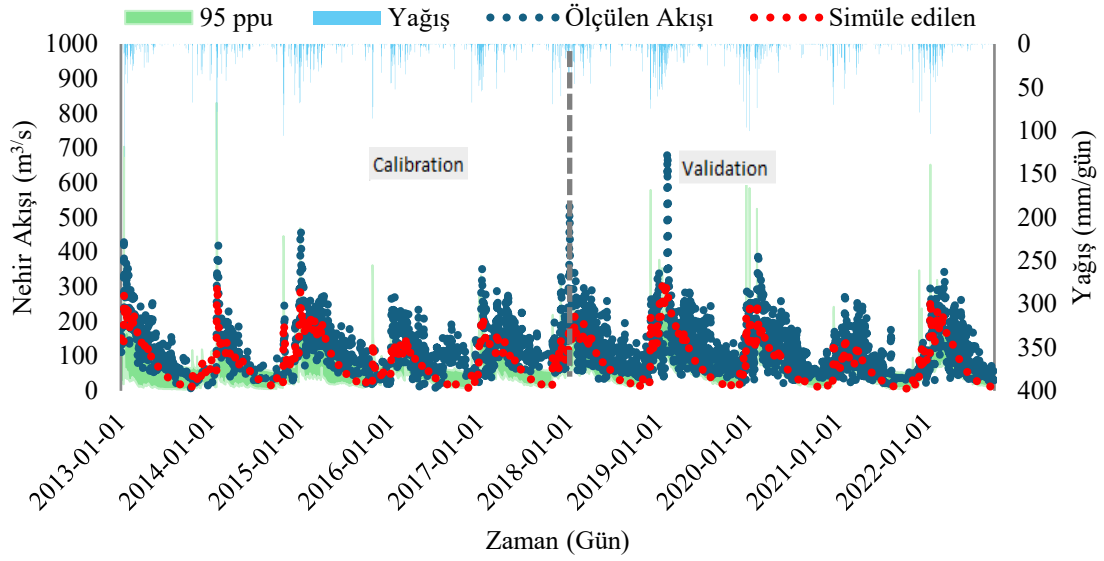


Şekil 4.11. Sinanhoca ölçüm istasyonunda günlük hidrograf

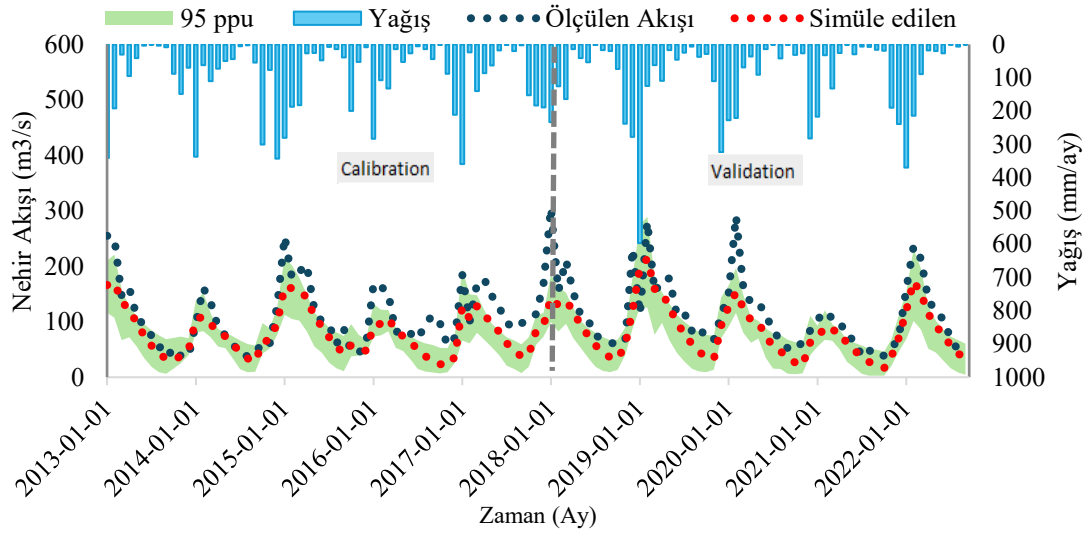


Şekil 4.12. Sinahoca ölçüm istasyonunda aylık hidrograf

SWAT modelinin, Manavgat yukarı havzasında yer alan Sinanhoca ölçüm istasyonundaki akışı simüle etmedeki başarılı performansına rağmen, model, havzanın aşağısında yer alan Manavgat Şelale ölçüm istasyonundaki gözlenen günlük akış verileriyle önemli farklılıklar göstermiş ve akışı sürekli düşük tahmin etmiştir. Şekil 4.13'te gösterildiği gibi, ilgili alt havzalarda taban akışı, toprak ve eğim parametrelerin de değişiklik yapılmasına rağmen, günlük gözlenen akış, simüle edilen akışa göre çok yüksektir. Diğer yandan, Şekil 4.14, modifikasyondan sonra kabul edilebilir görünen aylık akım kalibrasyonunu ($R^2=74$) göstermektedir. Ancak, hata farkları ($Pbias=32$) kabul edilebilir aralıkta değildir ($Pbias= \pm 25$). Bu hatalar, 2016 ve 2018 yılları arasındaki gözlenen aylık akış verileri içinde yer almaktadır.



Şekil 4.13. Manavgat şelale ölçüm istasyonunda günlük hidrograf



Şekil 4.14. Manavgat şelale ölçüm istasyonunda aylık hidrograf

Bu hatanın arkasındaki nedenleri açıklamak özellikle zordur, zira bölgenin karmaşık iklim durumu (sıcaklık ve yağış dağılımı), jeolojik yapıları (obruklar, yer altı kanalları, yukarı havzada bulunan akış yutma çukurları) ve engebeli topografik yapısı akış rejimini önemli ölçüde etkilemektedir. Buna ek olarak, kentleşme, sulama sistemlerinin hızla gelişimi, rezervuarların (Naras, Oymapınar) ve hidroelektrik santrallerin (Manavgat barajı) işletilmesi, bilinmeyen kaynaklardan gelen doğal mağara oluşumları (Dumanlı kaynağı) ve Manavgat nehri boyunca yer alan çeşitli kaynaklar havzanın hidrodinamik yapısını daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu faktörlerle bağlantılı olarak birçok araştırma yürütülmüştür. Örneğin, Sanlı vd. (2021), havzalar arası su transferi kapsamında Gembos Derivasyon Kanalı'nın etkisini dikkate alarak Beyşehir Gölü ve Manavgat Nehri'ndeki hidrolojik değişimleri inceleyen geniş kapsamlı bir

araştırma yapmışlardır. Bu çalışmanın bulguları, Manavgat Nehri'nin aşağı havzasının Beyşehir Gölü'nden kaynaklanan taban akışı ile desteklendiğini doğrulamıştır. Ancak, Gembos Derivasyon Kanalı'nın faaliyete geçmesinin ardından Manavgat taban akışı ile Beyşehir Gölü su seviyesi arasındaki korelasyonun azaldığı belirlenmiştir.

Öte yandan, son on yılda Manavgat nehir havzasında çeşitli jeolojik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, araştırmacılar, Manavgat nehir havzasında yüksek düzeyde karstikleşme etkisinin bulunduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, Güney vd. (1978), Karanjac vd., (1980), Güney G. (1981) ve Arıkan vd. (1988), boya testleri kullanarak Eynif polyesinden Manavgat nehri boyunca birçok kaynak aracılığıyla yer altı suyu alındığını bildirmişlerdir. Benzer bir araştırma, Manavgat nehri havzasının üst havzalarında, altta yatan jeolojik oluşumlar nedeniyle yüksek bir karstikleşme duyarlılığı bulunduğunu belirlemiştir (Doğan, 2002, Doğan vd., 2017). Buna ek olarak, Ekmekçi (1990), Manavgat nehri havzasının alt kesiminde bulunan ek su kaynağına odaklanmıştır. Çalışmasında, Manavgat Nehri havzasının ağırlıklı olarak kuzeydoğudan, çevresinde birçok obruk bulunan Suğla Gölü'nden beslendiği sonucuna varmıştır. Suğla Gölü, doğal bir yüzey kanalıyla, çevresinde birkaç obruk bulunan Beyşehir Gölü'nden, beslenmektedir. Daha sonra, Değirmenci vd. (1992) ve Eris vd. (2015), Suğla Gölü'nden Dumanlı kaynağına uzanan bir fay hattı boyunca çok fazla karstik özelliklerin (obruklar, kaynaklar ve mağaralar) yer aldığını doğrulamıştır. Dumanlı Kaynağı, Türkiye'deki en önemli karstik kaynaklardan biri olup Manavgat nehri havzasının aşağı kesiminde, Oymapınar barajı yakınında bulunmaktadır.

Önceki araştırmaların sonuçlarına dayanarak, Manavgat nehrinin aşağı havzasına boşalan suyun sadece yüzey havzasından değil, aynı zamanda kapalı yüzey havzalarından ve Manavgat Nehri'nin dış kaynaklarından (kuzeybatıda Beyşehir Gölü ve doğudan Suğla Gölü) da geldiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, Manavgat nehri havzasının aşağısında yer alan üç büyük ölçekli rezervuarın (Naras, Oymapınar, Manavgat) varlığı ve su depolama ve salım operasyonları, aşağı havza çıkış noktasına ulaşan pik akışların zamanlamasını ve büyüklüğünü önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Ayrıca, çıkış noktasına yakın çok sayıda kaynağın varlığı, modelleme sürecini daha da karmaşıklştırmaktadır.

Bu tutarsızlıklar, Manavgat Şelale ölçüm istasyonundaki (aşağı havza) akış dinamiklerini etkileyen faktörlerin daha ayrıntılı araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Modelin performansını Manavgat Nehri Havzası'nın aşağı kesiminde iyileştirebilmek için, rezervuar operasyonlarına ilişkin güncel verilerin, ana kaynakların (doğuda Dumanlı Kaynağı, kuzeybatıda Eynif polyesi kaynaklı bazı kaynaklar), kapalı üst havzalardaki düdenlerin ve diğer su yollarının noktasal kaynak verilerinin yanı sıra sulama amaçlı çekilen su miktarının modele entegre edilmesi faydalı olabilir. Model kalibrasyon çabalarına ek olarak, ölçüm istasyonlarında kullanılan veri kayıt sistemlerinde ve aletlerinde zaman içinde meydana gelebilecek olası değişikliklerin araştırılması da yararlı olacaktır. Kayıt cihazları ve ölçüm protokollerindeki değişiklikler, zaman içinde verilerin doğruluğunu etkileyebileceğinden, bu durumun daha ayrıntılı bir şekilde doğrulanması gerekmektedir. Son olarak, verileri SWAT modeline uygulamadan önce, mevcut çalışmanın veri işleme metodolojisine (Bölüm 3.8) dayalı bir veri kalite güvencesi değerlendirmesi yapılmalıdır.

4.8. Arazi Kullanımı/Örtüsü Değişimi (LULC) Etki Değerlendirmesi

4.8.1. 2017, 2019 ve 2022 yılları arasındaki arazi kullanımı/örtüsü değişimi

Çalışma alanında 2017-2022 dönemi için, sulak alan, orman, tarım arazisi, kentsel alan, çıplak arazi ve mera olmak üzere toplam altı farklı arazi kullanımı/örtüsü sınıfını kapsayan arazi kullanımı/örtüsü değişikliği değerlendirilmiştir. Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi, tüm arazi kullanımı/örtüsü sınıfları, Manavgat nehri havzasında 2017 ve 2022 yılları arasında dağılım ve alan kapsama yüzdesi açısından bir farklılık göstermektedir.

Çizelge 4.8. Manavgat nehri havzasında arazi kullanımı/örtüsü dağılımı

No	LULC Tipi	2017		2019		2022	
		Alan_(Ha)	Alan_(%)	Alan_(Ha)	Alan_(%)	Alan_(Ha)	Alan_(%)
1	Su yüzeyi	2034.50	0.86	2055.24	0.88	2065.21	0.88
2	Orman	100853.15	42.88	103727.16	44.62	68841.85	29.27
3	Tarım	4212.79	1.79	4294.89	1.85	4598.78	1.96
4	Yerleşim alanı	4948.98	2.10	4338.54	1.87	5711.97	2.43
5	Boş arazi	610.37	0.26	275.13	0.12	201.49	0.09
6	Mera	122559.14	52.10	117777.33	50.66	153800.85	65.39
Total		235218.94	100	232468.29	100	235220.16	100

Çizelge 4.9. Manavgat nehri havzasında arazi kullanımı/örtüsü değişimi 2017-2022

LULC Tipi	2017-2019		2019-2022		2017-2022	
	ha	%	ha	%	ha	%
Su yüzeyi	20.74	1%	9.97	0%	30.71	2%
Orman	2874.01	3%	-34885.31	-34%	-32011.30	-32%
Tarım	82.10	2%	303.89	7%	385.98	9%
Yerleşik alan	-610.44	-12%	1373.43	32%	762.99	15%
Boş arazi	-335.24	-55%	-73.64	-27%	-408.88	-67%
Mera	-4781.81	-4%	36023.52	31%	31241.71	25%

Bu sınıflar arasında, ormanlık alan ve mera sınıfları, 2017 ve 2022 yılları arasında en büyük değişimleri sergilemiştir. 2017 yılında toplam arazinin yaklaşık 100853.15 ha'nı (%42.88) kaplayan ormanlık alan, 2022'de önemli bir kayıp yaşayarak 68841.85 ha'a (%29) düşmüştür. Benzer şekilde, 2017 yılında 122559.14 ha (%52) araziye kapladığı belirlenen mera arazisi 2022 yılında 153800.85 ha (%65) alana çıkmıştır. Diğer arazi kullanımı/örtüsü sınıfları arasında, yerleşim alanı, çalışma alanında orman ve mera sınıflarından sonra ikinci en fazla değişime uğrayan sınıf olarak belirlenmiştir. 2017'de 4.948,98 ha (%2.10) alana sahip olan bu sınıf, 2022'de yaklaşık 5.711,97 ha (%2.43) büyüklüğüne ulaşmıştır. Ayrıca, tüm bu sınıfların 2019 yılında belirli dalgalanmalar gösterdiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.9). Benzer şekilde, bu değişimler Çizelge 4.10'da açıkça görülmektedir. Bu matris, 2017-2019 ve 2019-2022 yılları arasında sırasıyla

%3'ten %-34'e düşen ormanlık alanı ve %-4'ten %31'e yükselen mera sınıfını ortaya koymaktadır. Ancak, tüm dönem (2017-2022) değerlendirildiğinde, bu değişimler orman ve mera sınıfları için sırasıyla %-32 ve %25 oranında bir varyasyon göstermektedir. Diğer sınıflar arasında üçüncü sırada yer alan yerleşik alan, 2017-2019 ve 2019-2022 yılları arasında sırasıyla %-12'den %32'ye kadar nispeten küçük değişimler sergilemiştir. 2017-2022 dönemi boyunca arazi kullanımı/örtüsü sınıfları arasındaki toplam kazanç ve kayıplar Çizelge 4.9'da özetlenmiş olup, bu tablo havza genelinde en büyük kazancı sağlayan mera alanlarını ve en büyük kaybı yaşayan orman alanlarını göstermektedir.

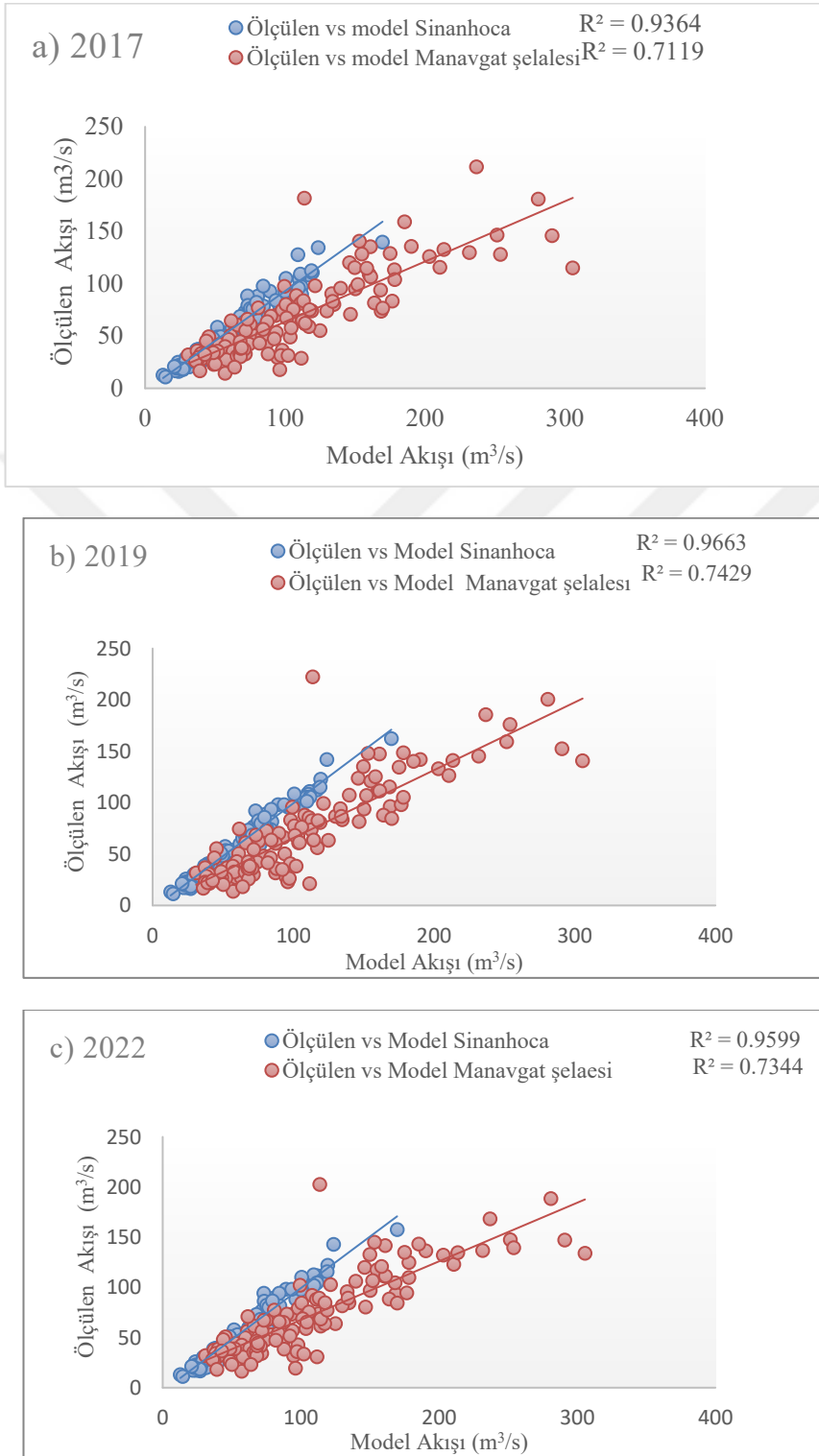
Çizelge 4.10. Arazi kullanımı/örtüsü sınıfı değişimi 2017-2022

Değişim Sınıfı	Değişim Alanı	Değişim Sınıfı	Değişim Alanı
AGRL - AGRL	3472.31	RANG - BARR	12.09
AGRL - BARR	1.84	RANG - FRST	3936.98
AGRL - FRST	34.42	RANG - RANG	117171.90
AGRL - RANG	228.89	RANG - URBN	621.48
AGRL - URBN	469.23	RANG - WATR	70.97
BARR - AGRL	18.50	URBN - AGRL	131.93
BARR - BARR	176.09	URBN - BARR	5.02
BARR - FRST	0.48	URBN - FRST	28.71
BARR - RANG	384.37	URBN - RANG	366.44
BARR - URBN	21.77	URBN - URBN	4409.43
FRST - AGRL	228.01	WATR - AGRL	3.60
FRST - BARR	4.19	WATR - BARR	2.17
FRST - FRST	64836.04	WATR - FRST	4.55
FRST - RANG	35563.31	WATR - RANG	82.53
FRST - URBN	178.09	WATR - URBN	11.45
RANG - AGRL	743.93		

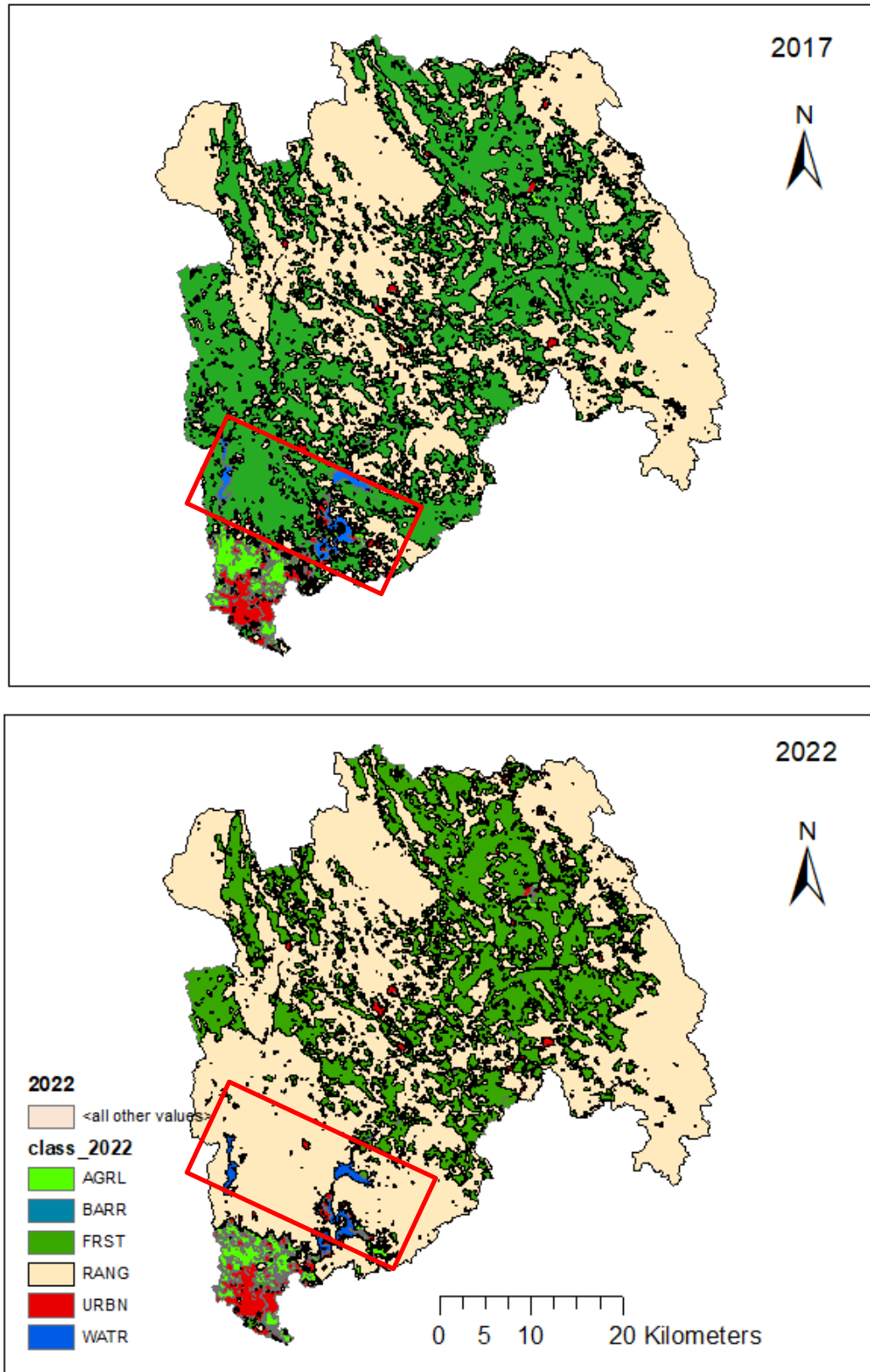
4.8.2. Arazi kullanımı/örtüsü değişiminin havza hidrolojik süreci üzerindeki etkisi

SWAT modelinin kalibrasyonundan sonra, hidrolojik süreçler üzerindeki arazi kullanımı/kara örtüsü değişikliklerinin etkisini belirlemek amacıyla üç aylık simülasyonlar (Sinanhoca, $R^2 > 0.93$ ve Manavgat Şelale, $R^2 < 0.74$) gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.15a-c). SWAT modelleme yaklaşımı, hidrolojik tepkiler üzerindeki LULC değişikliklerinin etkisini değerlendirmek için 2017, 2019 ve 2022 yıllarına yönelik bağımsız olarak uygulanmıştır. Şekil 4.16 ve Çizelge 4.11, Manavgat nehri havzasında 2017 ile 2022 yılları arasında meydana gelen önemli LULC değişikliklerini göstermektedir. Çalışma bulguları, 2017 ile 2022 yılları arasında meydana gelen LULC değişikliklerinin Manavgat Nehri havzasındaki hidrolojik süreçleri orta derecede etkilediğini göstermektedir. Arazi kullanımı/örtüsü değişiklikleri nedeniyle bu dönemde ortalama yıllık yüzey akış, yer altı suyu akışı, su verimi, topraktan süzülen su miktarı, yanal toprak akışı, potansiyel evapotranspirasyon, sığ akifer ve derin akiferde düşük ila orta düzeyde değişimler gözlemlenmiştir. Ortalama yıllık akım, 2017-2022 yılları arasında sınırlı bir dalgalanma sergilemiştir. Bununla birlikte, potansiyel evapotranspirasyon, yanal toprak akışı ve topraktan süzülme, geçmiş yıllara göre artan bir eğilim göstermiştir. Aynı şekilde, toplam su verimi (48.99 mm), sığ akifer (1.88 mm)

ve derin akifer (38.6 mm) değerlerinde yukarı yönlü değişimler tespit edilmiştir (Çizelge 4.11).



Şekil 4.15. Farklı yıllardaki arazi kullanımı/örtüsü etkisi altında aylık ölçülen akım ile model simüle edilen akım arasındaki korelasyon



Şekil 4.16. Çalışma alanında arazi kullanımı/örtüsü değişiklikleri

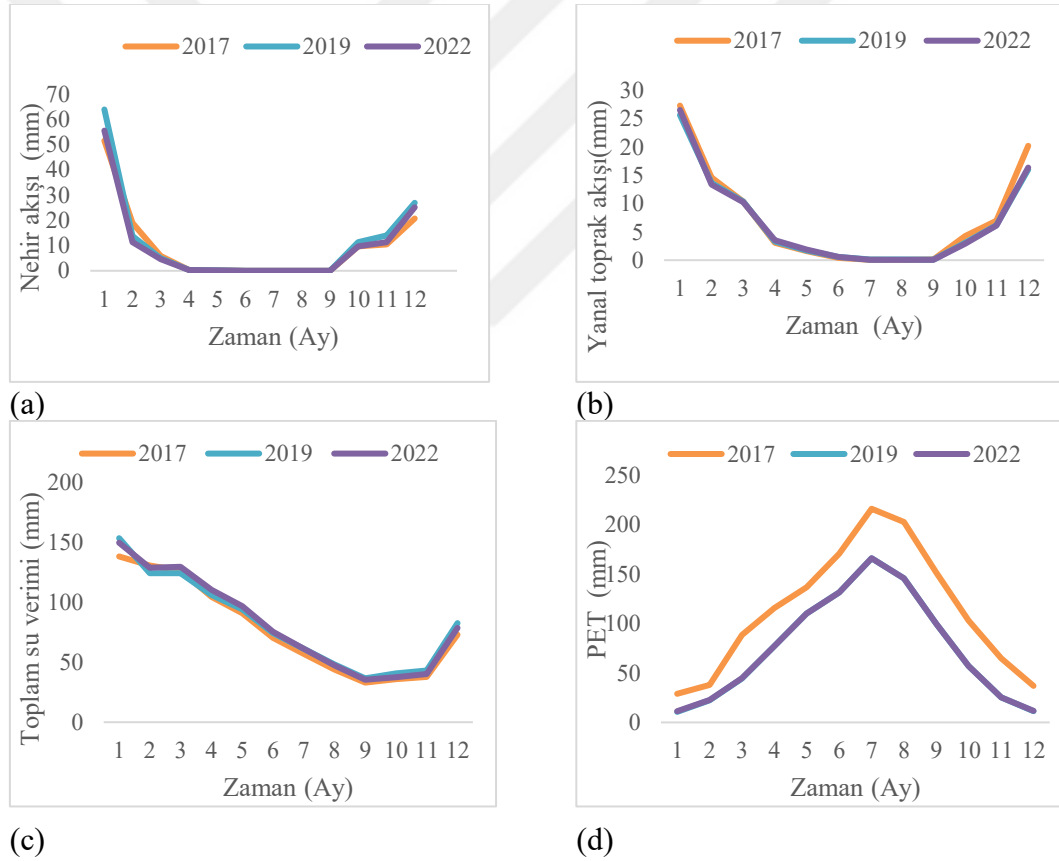
Çizelge 4.11. Manavgat nehri havzasında arazi kullanımı/örtüsü değişimine dayalı ortalama yıllık su bilançosu

Hidrolojik süreç	2017	2019	2022	Birim
PET	1354.3	915	903	mm
Yüzey akışı	117.65	133.55	118.08	mm
Yanal toprak akışı	73.73	80.40	81.73	mm
Topraktan sızma	744.26	768.68	787.35	mm
Toplam su verimi	943.78	999.46	992.77	mm
Sığ akifer akışı	46.73	66.34	48.61	mm
Derin akifer akışı	704.03	717.43	742.63	mm

2017 ile 2022 yılları arasında Manavgat Havzası hidrolojik süreçleri üzerindeki arazi kullanım/örtü değişikliklerinin etkisi, Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu araştırma, hidrolojik modelleme ve arazi kullanımı değişikliği analizine yönelik güncel eğilimlerle uyumlu bir çerçeve sunmaktadır. Şekil 4.15, SWAT modelinin aylık gözlemlenen akış verilerine karşı performansını göstermekte olup R^2 değerleri havzanın yukarı kısmında 0.93'ün üzerinde, aşağı kısmında ise 0.74'ün altındadır (günlük gözlemlenen veriler uygulandığında bazı tutarsızlıklar ve hatalar tespit edilmiştir). Bu durum, yukarı havzada gözlemlenen ve simüle edilen veriler arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. SWAT modelinin bu performans seviyesi, benzer bağlamlarda gerçekleştirilen son uygulamalarıyla tutarlıdır. Örneğin, Rabe vd. (2021), tarafından Madagaskar'daki büyük nehir havzalarında gerçekleştirilen çalışmada, SWAT modelinin R^2 değerlerinin 0.63 ila 0.87 arasında değiştiği bildirilmiştir.

Manavgat Havzası'nda yıllık ortalama hidrolojik faktörlerin arazi kullanım/örtü değişimine yanıtını göstermektedir. Çalışma bulguları, 2017-2022 yılları arasında gerçekleşen arazi kullanım/örtü değişikliklerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkilerinin düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, arazi kullanım değişikliklerine düşük duyarlılık gösteren veya belirgin etkisi bulunmayan önceki araştırmalarla uyumludur (Sertel vd., 2019; Sadek vd., 2014; Özgenç, 2024). Şekil 4.17'de gösterildiği gibi, yüzey akışı arazi kullanım/örtü değişikliklerine düşük tepki vermesine rağmen, potansiyel evapotranspirasyon, yanal toprak akışı ve topraktan sızma miktarında hafif bir artış gözlenmiştir. Bu durum, havzanın nemli bölümündeki arazi bitki örtüsündeki değişikliklerden ve yaz mevsimindeki kurak dönemlerin etkisinden kaynaklanıyor olabilir. Nitekim, Petrik (2022) çalışmasında, arazi kullanımının özellikle kurak dönemlerde daha yüksek evapotranspirasyon oranlarına neden olabileceğini, bunun da seyrek bitki örtüsünün toprağın yüzeyinden daha fazla doğrudan buharlaşmaya izin vermesiyle ilişkili olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, çalışma süresi boyunca toplam su veriminde hafif bir artış dikkat çekicidir. Bu değişim, Wu vd. (2020) tarafından yapılan ve arazi kullanım/örtü değişikliklerinin havzalardaki su verimi üzerindeki etkisini vurgulayan gözlemlerle uyumludur. Ayrıca, yıllık bazda sığ (1.88 mm) ve derin (38.6 mm) akifer dolumunda kaydedilen artışlar Manavgat Havzası için önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Bu sonuçlar, LULC değişikliklerinin Afrika havzalarındaki yer altı suyu kaynakları üzerindeki etkisini ortaya koyan Chawanda vd. (2024)'nin çalışmasını desteklemektedir.

Mevcut çalışmanın bulguları, Manavgat havzasında karstik yapı ve rezervuar etkisi altındaki LULC değişiklikleri ile hidrolojik süreçler arasındaki ilişkiyi vurgulamaktadır. Nispeten kısa bir zaman dilimi (2017-2022) içinde gözlemlenen düşük ila orta düzeydeki etkiler, kısa vadeli LULC değişikliklerinin, su kaynakları üzerinde ölçülebilir etkiler yaratabileceğini ancak bu etkilerin belirgin olmayabileceğini göstermektedir. Farklı hidrolojik bileşenler üzerindeki değişken etkiler (örneğin, yüzey akışı ile yer altı suyu dolumu arasındaki fark), kapsamlı bir havza yönetimi stratejisinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Mevcut çalışma alanında LULC değişikliklerine karşı hidrolojik yanıtın düşük olması, havzanın karstik jeolojisinden kaynaklanmaktadır ve bu durum dünya genelinde gerçekleştirilen çeşitli araştırmalarla da desteklenmektedir. Bununla birlikte, arazi kullanımı ve örtüsü değişikliklerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisini daha doğru bir şekilde değerlendirebilmek için, modele daha ayrıntılı LULC kategorileri ile sulama ve rezervuar yönetimi gibi arazi yönetimi uygulamalarının entegre edilmesi önemle önerilmektedir. Ayrıca, uzun vadeli LULC değişiklikleri ve potansiyel eşik değerlerin belirlenmesi, hidrolojik süreçlerin arazi kullanım/örtüsü değişimlerine nasıl yanıt verdiğini anlamada kritik bir rol oynayabilir.



Şekil 4.17. Manavgat nehri havzasında arazi kullanımı/örtüsü değişimi altında uzun dönem ortalama aylık akım, yanal toprak akışı, su verimi ve potansiyel evapotranspirasyonun özeti

4.9. Gelecekteki yağış ve sıcaklık senaryolarının projeksiyonu

Küresel Dolaşım Modelleri (GCM'ler), artan sera gazı seviyelerinin neden olduğu gelecekteki iklim değişikliği senaryolarını tahmin etmek için yaygın olarak

kullanılmaktadırlar. Ancak, GCM çıktıları hidrolojik değerlendirmeler için yeterince yüksek bir mekansal çözünürlüğe sahip değildir. Bu nedenle, GCM çıktılarının uzamsal çözünürlüğünü iyileştiren ve belirli bölgeler için ayrıntılı istasyon verilerinin oluşturulmasını sağlayan bir teknik olan ölçek küçültme (downscaling) yöntemi uygulanmaktadır. Bu süreç, GCM iklim değişkenlerinin ölçek küçültme modellerine girdi olarak kullanılmasını içermektedir (Maqsood vd., 2024; Abdulla vd., 2020; Rahman vd., 2019, Abbaspour vd., 2009). Çalışma alanında gözlemlenen meteorolojik verilerin eksikliği nedeniyle, İbradı ve Akseki istasyonları için NASA'nın IMERG veri setinden günlük yağış ve hava sıcaklığı zaman serisi verileri kullanılmıştır. Bu istasyonlar, GCM tahmin edici verileriyle yüksek bir korelasyon göstermiştir. Daha sonra bu veriler, SDSM (Statistical Downscaling Model) aracı kullanılarak GCM tahmin edicileriyle kalibre edilmiştir. Elde edilen kalibre edilmiş veriler, Manavgat merkezi, Akseki ve İbradı istasyonları için RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında gelecekteki günlük yağış, minimum ve maksimum sıcaklık zaman serisi verilerini oluşturmak için kullanılmıştır. Gelecekteki yağış ve sıcaklık değişimlerini değerlendirmek için Mann-Kendall testi kullanılmıştır. Bu analizlerin sonuçları, iki istasyon için aylık, mevsimlik ve yıllık ortalamalar ve büyüklükler dahil olmak üzere Çizelge 4.12-15 ve Şekil 4.18-21'de sunulmuştur.

4.9.1. Akseki meteoroloji istasyonunda yağış ve sıcaklık projeksiyonunun değerlendirilmesi

Çizelge 4.12'de, 2006-2079 dönemi için tahmin edilen gelecekteki aylık yağış miktarı sunulmuştur. RCP senaryolarından elde edilen veriler, Ocak-Temmuz ayları arasında RCP 4.5 altında ortalama -0.18 mm'lik bir azalma ile yağış miktarında düşüş eğilimi olduğunu göstermektedir. Bu senaryoda, Ağustos-Aralık ayları için genel olarak belirgin bir eğilim gözlenmezken, yalnızca Ekim ayında 1.55 mm'lik hafif bir artış eğilimi tespit edilmiştir. Benzer şekilde, yüksek sera gazı emisyonu senaryosu olan RCP 8.5 altında, tahmin edilen yağış miktarının Ocak-Mayıs ayları arasında düşüş eğilimi gösterdiği belirlenmiştir (ortalama -0.50 mm). Bu senaryo kapsamında Haziran-Ağustos ayları için belirgin bir eğilim görülmezken, Eylül ve Ekim aylarında hafif bir artış eğilimi gözlenmiştir (ortalama 0.7 mm). Kasım ve Aralık aylarında ise herhangi bir eğilim tespit edilmemiştir. Her iki RCP senaryosu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) için yapılan mevsimsel eğilim analizi, ilkbahar ve kış için düşüş eğilimi, yaz aylarında belirgin bir eğilim olmaması ve sonbahar aylarında pozitif bir eğilim olduğunu ortaya koymuştur. Ancak yıllık bazda yapılan projeksiyonlarda belirgin eğilim gözlenmemektedir.

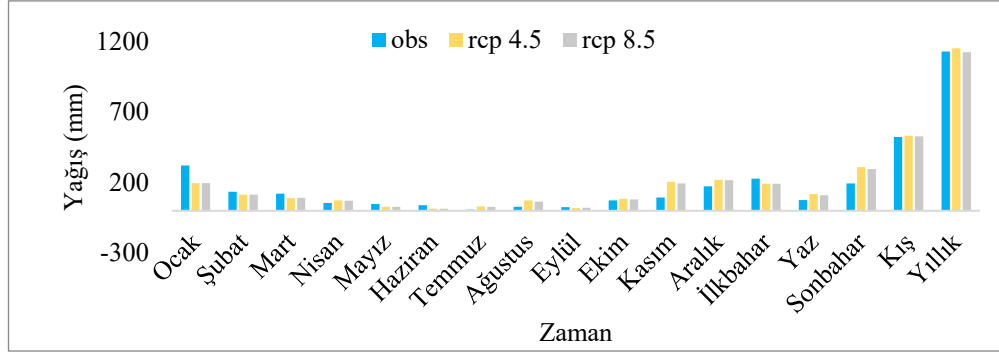
Akseki meteoroloji istasyonunda yağışın zaman içinde dağılımı (aylık, mevsimlik ve yıllık) Şekil 4.18'de verilmektedir. Uzun dönemli ortalama yağış verilerinin RCP 4.5 ve RCP 8.5 altında tahmin edilen yağışlarla karşılaştırılması, Manavgat Havzası üzerinde önemli değişimlerin meydana gelebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, mevsimsel ve yıllık düzeyde yağış miktarının, uzun dönemli ortalama gözlemlenen yağışa kıyasla her iki senaryo altında da artış göstereceğini ortaya koymuştur. Bu sonuç, önceki iklim araştırmalarının bulguları ile tutarlılık göstermektedir (Daly, 2006; Türkeş, 1996; Ebers vd., 2024).

Çizelge 4.12. Akseki meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık yağışların trend analizi

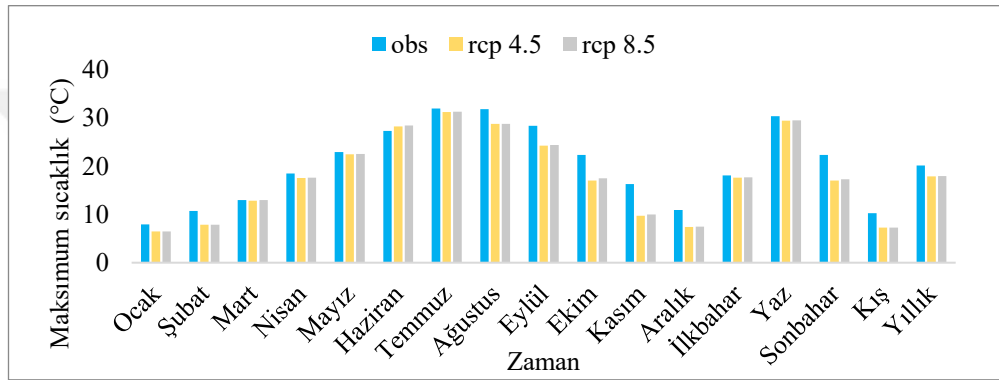
Zaman	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Eğilim	P-değeri	eğim	Eğilim	P-değeri	eğim
Ocak	-	0.022	-0.502	-	0.000	-0.692
Şubat	-	0.000	-0.444	-	0.000	-0.571
Mart	+	0.024	0.188	eğilim yok	0.081	0.134
Nisan	-	0.000	-0.517	-	0.000	-0.552
Mayıs	-	0.000	-0.213	-	0.000	-0.165
Haziran	-	0.017	-0.103	eğilim yok	0.136	-0.081
Temmuz	-	0.025	0.296	eğilim yok	0.436	0.057
Ağustos	eğilim yok	0.235	-0.278	eğilim yok	0.592	-0.111
Eylül	eğilim yok	0.957	0.004	+	0.023	0.131
Ekim	artan	0.000	1.556	+	0.000	1.252
Kasım	eğilim yok	0.383	0.190	eğilim yok	0.321	-0.173
Aralık	eğilim yok	0.066	0.335	eğilim yok	0.113	0.321
İlkbahar	-	0.000	-0.554	-	0.000	-0.560
Yaz	eğilim yok	0.979	-0.018	eğilim yok	0.520	-0.149
Sonbahar	+	0.000	1.792	+	0.000	1.246
Kış	-	0.005	-0.792	-	0.000	-1.131
Yıllık	eğilim yok	0.931	-0.070	eğilim yok	0.677	-0.293

Çizelge 4.13. Akseki meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık maksimum sıcaklıkların trend analizi

Zaman	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Eğilim	P-değeri	eğim	Eğilim	P-değeri	eğim
Ocak	-	0.003	-0.006	-	0.000	-0.010
Şubat	+	0.000	0.049	+	0.000	0.048
Mart	+	0.000	0.039	+	0.000	0.044
Nisan	+	0.000	0.046	+	0.000	0.054
Mayıs	+	0.000	0.051	+	0.000	0.057
Haziran	+	0.000	0.050	+	0.000	0.055
Temmuz	Eğilim yok	0.106	-0.002	Eğilim yok	0.702	0.000
Ağustos	-	0.000	-0.037	-	0.000	-0.040
Eylül	-	0.000	-0.038	-	0.000	-0.030
Ekim	-	0.000	-0.069	-	0.000	-0.054
Kasım	-	0.000	-0.020	-	0.000	-0.019
Aralık	Eğilim yok	0.856	-0.001	Eğilim yok	0.465	0.003
İlkbahar	+	0.000	0.045	+	0.000	0.051
Yaz	+	0.000	0.003	+	0.000	0.005
Sonbahar	-	0.000	-0.044	-	0.000	-0.034
Kış	+	0.000	0.015	+	0.000	0.013
Yıllık	+	0.000	0.004	+	0.000	0.009



Şekil 4.18. Akseki meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 altında yağış projeksiyonu



Şekil 4.19. Akseki meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kapsamında maksimum sıcaklık projeksiyonu

Sonbaharın son ayları (Ekim-Kasım) ve kışın ilk aylarında (Aralık) gözlenen artan yağış miktarı, yağış şiddeti ve fırtına olaylarının artmasına bağlı olarak sel riskini yükseltecektir. Buna karşın, Haziran-Ocak ayları arasında görülen kurak yaz koşulları ve azalan yağış eğilimi, bölgedeki tarım sektörü, su kaynakları yönetimi ve genel ekosistemler üzerinde önemli etkiler yaratacaktır (Fenta vd., 2024; Murphy vd., 2019). Ayrıca, aylık ve mevsimlik yağış modellerindeki değişiklikler, Manavgat Havzası içindeki akış, yer altı suyu dolumu, evapotranspirasyon ve su kalitesi gibi çeşitli hidrolojik süreçler üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Özellikle, havzanın karstik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda; yer altı suyu dolumu ve evapotranspirasyonun anlaşılması ve tahmin edilmesi, ilgili karar vericiler için büyük önem arz etmektedir. Özellikle uygun sızma dönemlerinde artan yağış, daha yüksek yer altı suyu dolum oranlarına yol açabileceği gibi, yer altı suyu dolum hızındaki herhangi bir değişiklik, yer altı suyu seviyelerini ve kullanılabilirliğini etkileyerek dolumun zamanlaması ve miktarında farklılıklar oluşturabilir (Ngo vd., 2024). Benzer şekilde, genellikle kurak geçen yaz sezonu, artan sıcaklık ve düşük yağış miktarları nedeniyle evapotranspirasyon oranlarında artışa yol açarak havzadaki su dengesi bileşenleri üzerinde güçlü etkiler yaratabilir.

Akseki meteoroloji istasyonunda iki iklim değişikliği senaryosu kapsamında maksimum sıcaklık projeksiyonlarının özeti Çizelge 4.13'te sunulmaktadır.

RCP 4.5 senaryosu kapsamında, Şubat-Haziran ayları arasında ortalama $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ artış eğilimi gözlemlenirken, ilkbahar ve erken yaz aylarındaki bu ısınma eğilimi, iklim değişikliği nedeniyle sıcaklık artışına yönelik beklentilerle uyumludur (Lee vd., 2021; Anonymous 4, 2024). Bununla birlikte, Temmuz ayında belirgin bir eğilim gözlenememekte olup yaz mevsiminin zirve döneminde göreceli olarak istikrarlı kalmaktadır. Ağustos ile Kasım aylarında ise hafif bir negatif ($-0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$) eğilim tespit edilmiştir. Bu sonbahar soğuma eğilimi, küresel iklim projeksiyonlarının tüm mevsimlerde ısınma öngörüsüne ters düşmekte olup, atmosferik dolaşım modellerindeki değişiklikler veya arazi kullanımındaki farklılıklar gibi yerel faktörlerle açıklanabilir. RCP 8.5 senaryosu altında ise, Şubat-Haziran döneminde projekte edilen aylık maksimum sıcaklık ortalama $0,045\text{ }^{\circ}\text{C}$ artış göstermiştir. RCP 4.5 senaryosuna benzer şekilde, RCP 8.5 senaryosu için de Temmuz ayında belirgin bir eğilim saptanmazken, Ağustos-Kasım aylarında $-0,031\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir düşüş eğilimi görülmektedir. Her iki senaryo için gerçekleştirilen mevsimsel eğilim analizinde, ilkbahar, yaz ve kış mevsimleri için ortalama $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ artış, sonbahar mevsimi için ise ortalama $-0,034\text{ }^{\circ}\text{C}$ düşüş eğilimi tespit edilmiştir. Yıllık bazda yapılan projeksiyon analizlerinde ise, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarında sırasıyla $0,004$ ila $0,009\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında hafif bir artış öngörülmektedir.

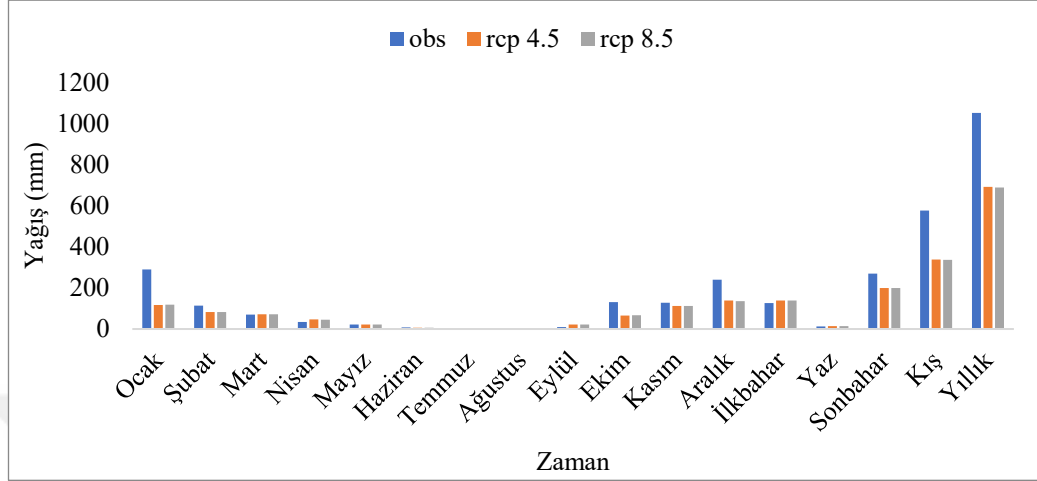
Gözlemlenen maksimum sıcaklık verilerinin, iki farklı iklim değişikliği senaryosu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) kapsamında, aylık, mevsimlik ve yıllık zaman ölçeklerinde karşılaştırılması Şekil 4.19'te verilmektedir. Mart ve Haziran aylarında RCP 4.5 senaryosu altında maksimum sıcaklıkta hafif bir artış gözlenirken, RCP 8.5 senaryosu kapsamında, Manavgat Nehri havzasının yukarı bölgesinde uzun dönem ortalamasına kıyasla daha belirgin bir artış projekte edilmektedir. Bu bulgular, Lee vd. (2021) çalışmasıyla uyumlu olup hem ılımlı hem de yüksek emisyon senaryoları altında iklim değişikliğinin bir bölgedeki maksimum sıcaklık modellerinde değişikliğe yol açabileceğini göstermektedir. Öte yandan, diğer aylarda gözlemlenen ortalama maksimum sıcaklık değerlerine kıyasla anlamlı bir değişiklik beklenmemektedir. Mevsimsel analizde, sonbahar ve kış aylarında maksimum sıcaklıkta hafif bir düşüş projekte edilirken, ilkbahar ve yaz aylarındaki değişiklikler daha sınırlı düzeydedir.

Yaz aylarında maksimum sıcaklıktaki artışı, artan evapotranspirasyon, hızlanan kar erimesi, erken ilkbahar akışı ile enerji üretimi veya sulama için su kullanılabilirliğinde potansiyel kısıtlamalar gibi çeşitli faktörleri etkileyebileceğinden iklim değişikliğinin çok boyutlu etkilerinden yalnızca bir yönünü temsil etmektedir. Bu bağlamda, yağış modellerindeki değişiklikler ve aşırı hava olayları gibi diğer faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir.

4.9.2. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda yağış ve sıcaklık projeksiyonlarının değerlendirilmesi

Geleceğe yönelik aylık yağış miktarı tahminleri, çalışma döneminde farklı sera gazı salım senaryoları çerçevesinde değerlendirilmiştir. RCP 4.5 senaryosu altında, Ocak-Temmuz ayları arasında yağış miktarında ortalama $-0,15\text{ mm}$ 'lik bir düşüş eğilimi gözlemlenirken, Ağustos-Kasım ayları arasında bu miktarın $0,29\text{ mm}$ artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. RCP 8.5 senaryosu kapsamında ise, Ocak-Haziran ayları arasında ortalama $-0,23\text{ mm}$ 'lik bir azalma söz konusu olup, Temmuz-Ağustos ayları için ise anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Eylül-Kasım aylarında ise hafif bir artış ($0,41\text{ mm}$) gözlenmiştir. Her iki senaryo için gerçekleştirilen mevsimsel eğilim analizinde, ilkbahar,

yaz ve kış mevsimlerinde düşüş, sonbahar mevsiminde ise pozitif eğilim saptanmıştır. Ancak, yıllık projeksiyonlarda anlamlı bir eğilim gözlenmemiştir (Çizelge 4.14). Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda kaydedilen uzun dönem ortalama aylık yağış verileri Şekil 4.20’te sunulmuştur.



Şekil 4.20. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 kapsamında yağış projeksiyonu

Çizelge 4.14. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık yağışların trend analizi

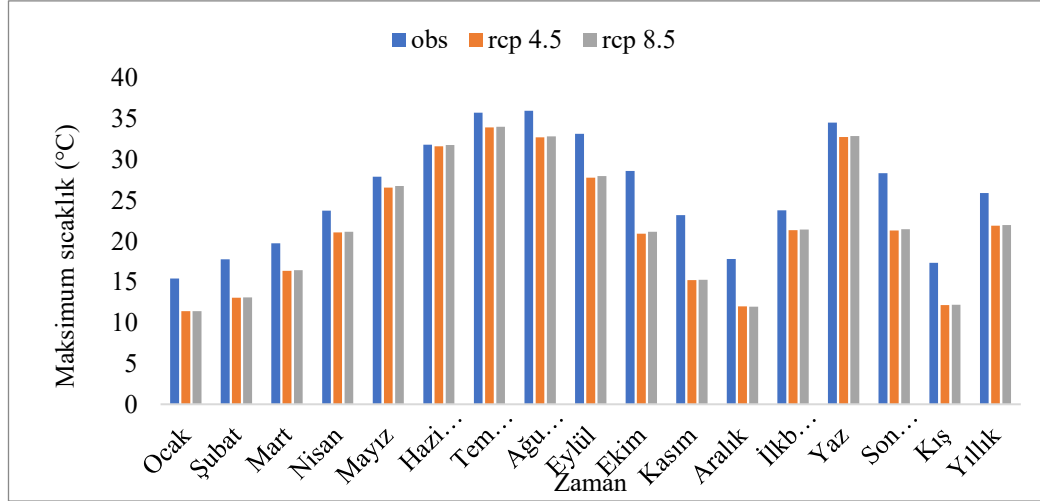
Zaman	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Eğilim	P-değeri	eğim	Eğilim	P-değeri	eğim
Ocak	-	0.027	-0.252	-	0.004	-0.313
Şubat	Eğilim yok	0.417	-0.065	-	0.000	-0.333
Mart	-	0.002	-0.223	-	0.005	-0.245
Nisan	-	0.000	-0.224	-	0.000	-0.188
Mayıs	-	0.000	-0.189	-	0.000	-0.253
Haziran	-	0.002	-0.038	-	0.000	-0.052
Temmuz	-	0.002	-0.032	Eğilim yok	0.171	-0.011
Ağustos	+	0.015	0.026	Eğilim yok	0.663	-0.005
Eylül	+	0.000	0.293	+	0.000	0.305
Ekim	+	0.000	0.565	+	0.000	0.529
Kasım	+	0.004	0.268	+	0.000	0.401
Aralık	Eğilim yok	0.113	-0.143	-	0.041	-0.227
İlkbahar	-	0.000	-0.655	-	0.000	-0.670
Yaz	-	0.013	-0.039	-	0.001	-0.062
Sonbahar	+	0.000	1.097	+	0.000	1.266
Kış	-	0.015	-0.462	-	0.000	-0.886
Yıllık	Eğilim yok	0.747	0.090	Eğilim yok	0.094	-0.369

Bu veriler, Ocak-Nisan ve Ekim-Aralık aylarında yoğun yağış görülmesi nedeniyle belirgin bir mevsimsel deseni ortaya koyarken, Mayıs-Eylül dönemi bölgedeki

kurak mevsimi temsil etmektedir. Uzun dönem ortalama yağışın, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında elde edilen projeksiyonlarla karşılaştırılması, Manavgat Havzasında gelecekte önemli iklimsel değişikliklerin yaşanabileceğini göstermektedir. Özellikle, her iki senaryo kapsamında da Mart, Nisan, Mayıs ve daha sınırlı ölçüde Eylül aylarında yağış miktarında artış gözlemlenmektedir. Bu bulgular, Daly (2006) ile Ebers vd. (2024) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumluluk arz etmektedir.

Projekte edilen iklim değişikliği senaryoları, bölgedeki yağış modellerinde anlamlı bir değişim olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarının tamamen kurak olacağı, kış yağışlı mevsiminde ise yağış miktarında azalma öngörülmektedir. Buna karşılık, ilkbahar mevsiminde yağış artışı görülməsi tahmin edilmektedir. Yağış modellerindeki bu değişimler, deniz basıncındaki değişiklikler, denize yakınlık ve artan sıcaklık gibi çeşitli faktörlere bağlanabilmektedir. Yaz mevsiminde kuraklık, sonbahar, kış ve ilkbahar mevsimlerinde ise yağış miktarının azalması, su kaynakları yönetimi ve ekosistem sağlığı açısından önemli zorluklar oluşturmaktadır.

Çizelge 4.15'te, iklim değişikliğinin orta ve yüksek emisyon konsantrasyon senaryoları (RCP 4.5 ve RCP 8.5) altında geleceğe yönelik aylık maksimum sıcaklık projeksiyonları sunulmuştur. RCP 4.5 senaryosu kapsamında, Ocak-Temmuz ayları arasında aylık maksimum sıcaklıklarda ortalama 0.03 °C'lik artış eğilimi gözlemlenirken, Ağustos-Aralık aylarında -0.03 °C'lik bir azalış eğilimi saptanmıştır. Benzer şekilde, RCP 8.5 senaryosu altında, Ocak-Temmuz döneminde aylık maksimum sıcaklıklarda ortalama 0.04 °C artış, Ağustos-Aralık aylarında ise -0.03 °C azalış eğilimi görülmektedir. Her iki senaryo için gerçekleştirilen mevsimsel eğilim analizinde; ilkbahar, yaz ve kış mevsimleri boyunca ortalama 0.04 °C artış, sonbahar mevsimi için ise -0.03 °C azalış eğilimi belirlenmiştir. Yıllık bazda yapılan projeksiyonlarda ise, sırasıyla RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında hafif artış değerleri (0.005 ila 0.01 °C) gözlemlenmiştir. İki iklim değişikliği senaryosu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) kapsamında gözlemlenen uzun dönem ortalama maksimum sıcaklık verilerinin aylık, mevsimlik ve yıllık dönemlerdeki karşılaştırması Şekil 4.21'de verilmektedir. Manavgat merkez istasyonunda elde edilen sıcaklık tahminleri, Haziran ayı hariç tüm aylarda hafif bir düşüş eğilimi göstermektedir. Buna karşın, havzanın diğer bölgelerinde, özellikle kurak yaz döneminde, hafif bir sıcaklık artışı tespit edilmiştir. Bu durum, Akdeniz'e çok yakın olan Manavgat merkez istasyonunun sıcaklık ölçümlerinin, bölgedeki genel iklim dinamiklerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 4.21. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 kapsamında maksimum sıcaklık projeksiyonu

Çizelge 4.15. Manavgat merkez meteoroloji istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık maksimum sıcaklıkların trend analizi

Time	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Eğilim	P-değeri	eğim	Eğilim	P-değeri	eğim
Ocak	+	0.000	0.010	+	0.000	0.008
Şubat	+	0.000	0.029	+	0.000	0.030
Mart	+	0.000	0.038	+	0.000	0.043
Nisan	+	0.000	0.049	+	0.000	0.061
Mayıs	+	0.000	0.057	+	0.000	0.079
Haziran	+	0.000	0.040	+	0.000	0.040
Temmuz	+	0.000	0.007	+	0.000	0.009
Ağustos	-	0.000	-0.027	-	0.000	-0.025
Eylül	-	0.000	-0.048	-	0.000	-0.038
Ekim	-	0.000	-0.051	-	0.000	-0.043
Kasım	-	0.000	-0.036	-	0.000	-0.035
Aralık	-	0.000	-0.010	-	0.000	-0.009
İlkbahar	+	0.000	0.048	+	0.000	0.061
Yaz	+	0.000	0.007	+	0.000	0.009
Sonbahar	-	0.000	-0.045	-	0.000	-0.039
Kış	+	0.000	0.009	+	0.000	0.009

Bu bulgular, Fan vd. (2021) çalışmasıyla paralellik göstermektedir. Araştırmacılar Nishapur eyaletinde önümüzdeki yirmi yıl boyunca minimum ve maksimum sıcaklık ile evapotranspirasyon değerlerinin sabit ya da hafif artış veya azalış eğilimi sergileyeceğini öngörmüşlerdir. Ayrıca, denize yakın alt havzadaki maksimum sıcaklık düşüşü, havzanın meteorolojisi üzerinde çeşitli etkiler yaratabilir. Manavgat Nehri havzasının arazi kullanım/örtü haritasına göre, denize yakın bölgeler ağırlıklı olarak yerleşim ve tarım alanlarından oluşmaktadır. Ancak, bu bölgelerde gözlemlenen hafif sıcaklık düşüşünün, yıl boyunca hidrolojik süreçler üzerinde belirgin bir etkisi olacağı düşünülmemektedir.

Bu değişikliklerin potansiyel etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için daha ayrıntılı araştırmalar yapılması gerekmektedir. Etkilerin şiddeti ve kapsamı, havzanın büyüklüğü, topografyası, toprak yapısı, arazi kullanımı ve iklim gibi özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterecektir. Manavgat Nehri havzası, yukarı kesimlerde engebeli bir topografyaya sahip karstik bir jeolojik yapısıyla öne çıkarken, aşağı kesimde, büyük ölçekli rezervuarlar, hidroelektrik barajlar ve Akdeniz ikliminin belirgin etkileriyle şekillenmiş yarı düz tarım arazileri bulunmaktadır. Bu bağlamda, bölgesel düzeyde gerçekleştirilecek daha ayrıntılı analizler, söz konusu değişikliklerin potansiyel sonuçlarını anlamak açısından elzemdir.

4.9.3. RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında olabilecek iklim değişikliğinin akış üzerine etkileri

İklim değişikliği, hidrolojik döngüyü değiştirerek su kaynakları üzerinde önemli etkilere yol açabilmektedir. Geçmiş dönem verileri ile geleceğe yönelik senaryoların dikkate alınması ve iklim değişkenlerinin doğru şekilde değerlendirilmesi, su kaynakları planlaması ve geliştirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Minimum sıcaklık ile yağış senaryoları (RCP 4.5, RCP 8.5) detaylı olarak ele alınmıştır. Bu projeksiyonlara dayalı hava durumu verileri, gelecekteki akış tahminlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan SWAT modeline entegre edilmiştir. RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında projekte edilen maksimum, minimum sıcaklık ve yağış verilerinin modele dahil edilmesiyle elde edilen SWAT çıktıları, sonraki bölümlerde kapsamlı bir şekilde değerlendirilecektir.

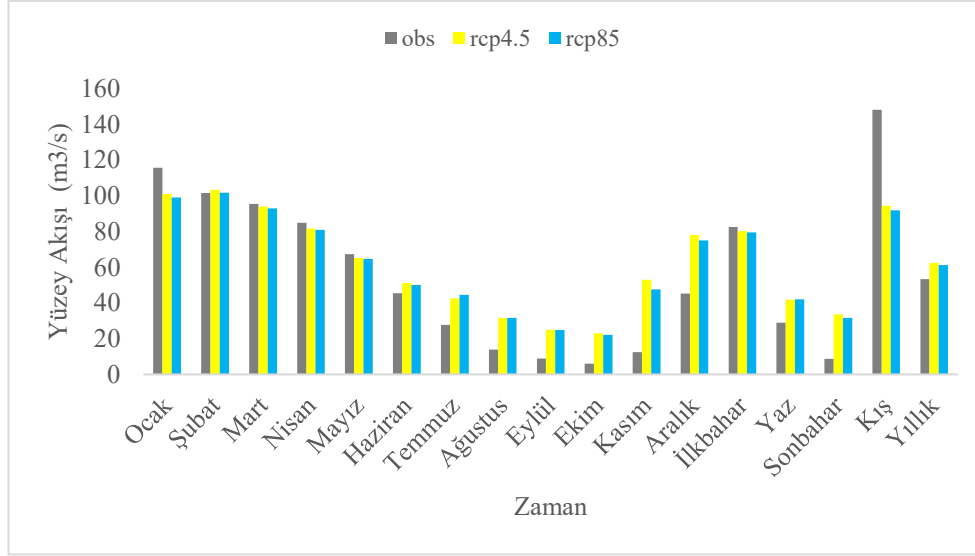
4.9.3.1. Sinanhoca ölçüm istasyonunda tahmin edilen akışın değerlendirilmesi

Geleceğe ilişkin aylık akış değerleri, iki farklı hidrolojik istasyonda SWAT modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. 2006–2079 dönemine ait RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında elde edilen aylık akış tahminleri incelendiğinde, her iki senaryo kapsamında Şubat–Ekim ayları arasında belirgin bir eğilim gözlemlenmemiştir (Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16. Sinanhoca ölçüm istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık nehir akışının trend analizi

Zaman	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Eğilim	P-değeri	eğim	Eğilim	P-değeri	eğim
Ocak	+	0.001	6.275	+	0.001	6.275
Şubat	Eğilim yok	0.120	2.421	Eğilim yok	0.102	2.502
Mart	Eğilim yok	0.948	-0.267	Eğilim yok	1.000	0.018
Nisan	Eğilim yok	0.556	-0.974	Eğilim yok	0.556	-0.974
Mayıs	Eğilim yok	0.102	-1.813	Eğilim yok	0.102	-1.813
Haziran	Eğilim yok	0.139	-1.484	Eğilim yok	0.139	-1.484
Temmuz	Eğilim yok	0.182	-1.719	Eğilim yok	0.182	-1.719
Ağustos	Eğilim yok	0.102	-2.198	Eğilim yok	0.102	-2.198
Eylül	Eğilim yok	0.092	-1.932	Eğilim yok	0.092	-1.932
Ekim	Eğilim yok	0.433	-0.640	Eğilim yok	0.433	-0.640
Kasım	+	0.002	5.031	+	0.002	5.031
Aralık	+	0.000	6.265	+	0.000	6.265
İlkbahar	Eğilim yok	0.543	-2.927	Eğilim yok	0.543	-2.917
Yaz	Eğilim yok	0.170	-5.924	Eğilim yok	0.170	-5.924
Sonbahar	Eğilim yok	0.472	2.737	Eğilim yok	0.472	2.737
Kış	+	0.004	14.394	+	0.004	14.394
Yıllık	Eğilim yok	0.505	11.065	Eğilim yok	0.505	11.065

Bununla birlikte, Kasım–Aralık aylarında (ortalama 6.275 m³/s) ve Ocak ayında (ortalama 5.031 m³/s) pozitif eğilimler saptanmıştır. Her iki senaryo için gerçekleştirilen mevsimsel eğilim analizinde, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri açısından anlamlı bir eğilim tespit edilirken, kış mevsiminde 14.394 m³/s değerinde yükseliş eğilimi belirlenmiştir. Ek olarak, Sinanhoca ölçüm istasyonunda yapılan yıllık akış trend analizinde, her iki senaryo altında da yıllık projekte edilen akışta belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bu durum, yıllık projeksiyonların aylık projeksiyonlar kadar duyarlı olmadığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, çalışma alanında gelecekteki iklim değişikliği araştırmalarında aylık projeksiyonların dikkate alınması büyük önem arz etmektedir. Şekil 4.22'de, iklim değişikliğine bağlı gelecekteki akış senaryoları (RCP 4.5 ve RCP 8.5) ile yukarı Sinanhoca hidrolojik ölçüm istasyonunda kaydedilen aylık, mevsimlik ve yıllık uzun dönemli ortalama akış verileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.22. Sinanhoca ölçüm istasyonunda ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık nehir akışı projeksiyonu

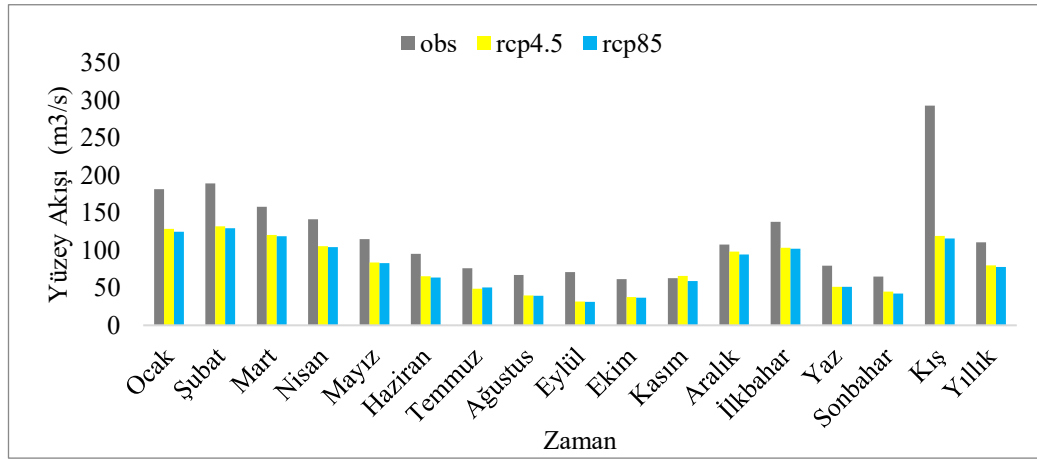
Her iki senaryo kapsamında, Ocak–Mayıs aylarında akışta hafif bir düşüş gözlemlenirken, Haziran–Aralık döneminde belirgin bir akış artışı tespit edilmiştir. Bu sonuç, Ozturk vd (2015)’nin Akdeniz havzaları üzerindeki iklim değişikliğinin etkilerine ilişkin bulgularıyla paralellik göstermektedir. Sinanhoca hidrolojik istasyonunda saptanan akış artışı, dik eğim, yüksek deniz seviyesi ve yukarı bölgenin dağlık konumundan kaynaklanan, yağış olaylarının şiddeti ve süresindeki artışa bağlı olarak değerlendirilebilir. Yaz mevsiminde gözlenen akış artışının, mevcut büyük ölçekli barajların dolumunu destekleyerek sulama ve hayvancılık sektörleri üzerinde olumlu etkiler yaratabileceği öngörülmüşken, sonbahar mevsimi boyunca süren bu artışın ise sel baskınları, sulama altyapılarının bozulması ve tarım arazilerinde zarar gibi çeşitli sorunlara yol açabileceği düşünülmektedir.

4.9.3.2. Manavgat Şelale ölçüm istasyonunda tahmin edilen akışın değerlendirilmesi

Gelecekteki aylık akış tahminleri, iki farklı hidrolojik istasyonda SWAT modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. 2006-2079 dönemi için RCP4.5 senaryoları kapsamında gerçekleştirilen analizler, Şubat-Ekim aylarında belirgin bir eğilim göstermemekle birlikte, Kasım, Aralık ve Ocak aylarında ortalama $7.38 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik bir artış eğilimi ortaya koymuştur (Çizelge 4.17). RCP 8.5 senaryosu altında ise Mart–Temmuz aylarında ortalama $-4.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik bir düşüş eğilimi belirlenirken, Kasım ve Aralık aylarında ortalama $5.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik pozitif bir eğilim görülmüştür. Mevsimsel eğilim analizine göre, RCP 4.5 senaryosu kapsamında ilkbahar, yaz ve sonbahar aylarında anlamlı bir eğilim saptanmazken, kış mevsiminde $21.079 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik bir artış eğilimi ortaya çıkmıştır. Mevsimsel eğilim analizine göre, RCP 4.5 senaryosu kapsamında ilkbahar, yaz ve sonbahar aylarında anlamlı bir eğilim saptanmazken, kış mevsiminde $21.079 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik bir artış eğilimi ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.17. Manavgat şelale ölçüm istasyonunda gelecekteki ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık yüzey akışının trend analizi

Zaman	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Eğilim	P-değeri	eğim	Eğilim	P-değeri	eğim
Ocak	+	0.001	7.156	Eğilim yok	0.171	3.361
Şubat	Eğilim yok	0.227	2.324	Eğilim yok	0.814	-0.573
Mart	Eğilim yok	0.712	-0.590	-	0.014	-4.388
Nisan	Eğilim yok	0.872	-0.224	-	0.004	-4.205
Mayıs	Eğilim yok	0.376	-1.369	-	0.000	-5.305
Haziran	Eğilim yok	0.564	-0.827	-	0.002	-4.002
Temmuz	Eğilim yok	0.582	-1.215	-	0.020	-3.786
Ağustos	Eğilim yok	0.555	-1.202	Eğilim yok	0.079	-2.688
Eylül	Eğilim yok	0.747	-0.545	Eğilim yok	0.202	-1.521
Ekim	Eğilim yok	0.520	0.980	Eğilim yok	0.979	0.044
Kasım	+	0.003	6.120	+	0.017	4.197
Aralık	+	0.000	8.874	+	0.002	7.299
İlkbahar	Eğilim yok	0.904	-0.562	-	0.006	-12.877
Yaz	Eğilim yok	0.620	-3.280	-	0.018	-10.429
Sonbahar	Eğilim yok	0.151	7.574	Eğilim yok	0.668	2.032
Kış	+	0.001	21.079	+	0.049	11.973
Yıllık	Eğilim yok	0.249	23.855	Eğilim yok	0.444	-12.346

**Şekil 4.23.** Manavgat şelalesi ölçüm istasyonunda ortalama aylık, mevsimlik ve yıllık nehir akışı projeksiyonu

Bu bulgular, daha şiddetli iklim değişikliği senaryolarının hidrolojik döngü üzerinde daha büyük etkilere yol açabileceği beklentisiyle tutarlıdır. Şekil 4.23'te kış mevsimi ile diğer mevsimler arasındaki çelişkili eğilimler, su mevcudiyetinin zamanlamasında potansiyel bir kaymayı düşündürmektedir. Kış aylarındaki akıştaki artış, yağmur şeklinde düşen yağış miktarındaki artışla ilişkilendirilebilir. Mevsimsel değişimlere rağmen, Manavgat Şelale ölçüm istasyonunda yıllık tahmin edilen akış, her

iki senaryo altında da önemli bir artış veya azalış göstermemektedir. Bu durum, yıl boyunca suyun mekânsal ve zamansal dağılımında değişiklikler olsa da, toplam yıllık su hacminin nispeten sabit kaldığını göstermektedir. Bu projeksiyonlar, Değirmenci vd. (1992) ve Eris vd. (2015) tarafından yapılan çalışmaların bulguları ile uyumludur. Söz konusu çalışmalar, Manavgat havzasında havza dışından gelen sabit bir yer altı suyu akışını göstermektedir. Elde edilen bulgular, su kaynakları yönetimi açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır; çünkü yıllık toplam su bütçesini doğrudan etkilemeden mevsimsel su mevcudiyetinde potansiyel değişikliklerin yaşanabileceğini göstermektedirler. Öte yandan, uzun dönemli ortalama aylık akış gözlemleri ile ortalama aylık projeksiyonlar karşılaştırıldığında, her iki senaryo altında da Manavgat şelale ölçüm istasyonunda yılın tüm ayları ve mevsimleri boyunca kışta bir azalma eğilimi olduğu belirlenmiştir.

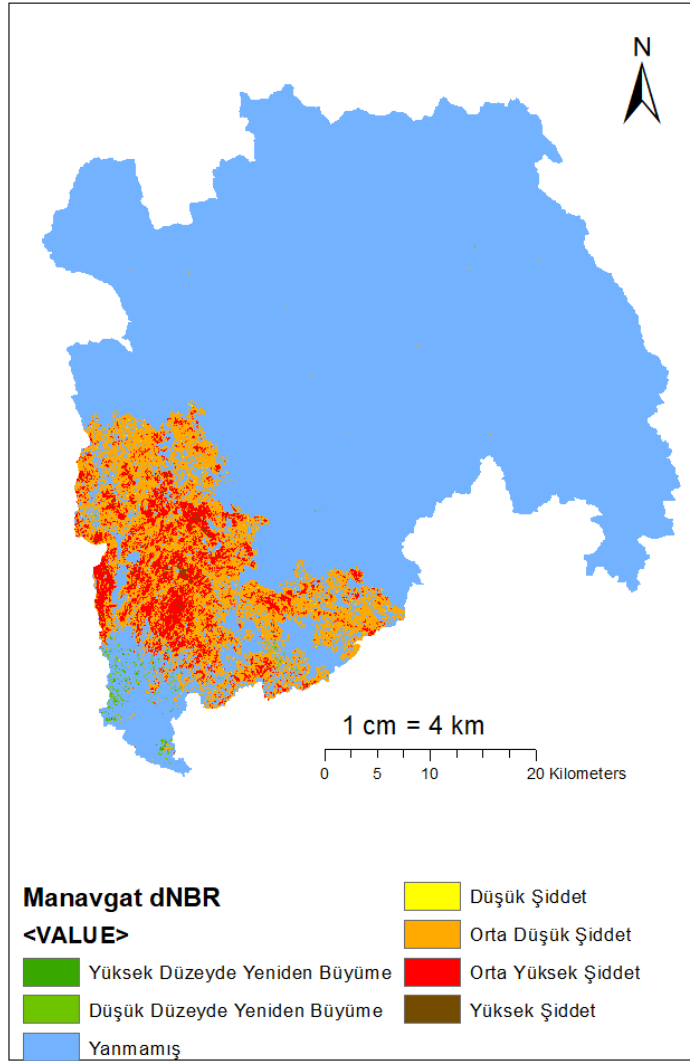
Havzanın yer altı suyu akışının etkisi ve havza çıkışındaki yüksek akış göz önüne alındığında, iklim değişikliği senaryolarının günlük akışı tam olarak yansıtamadığı görülmektedir. Bununla birlikte, bu senaryoların gelecekteki aylık akış bağlamında Manavgat Nehri havzası için kabul edilebilir olduğu söylenebilir. Gözlemlenen veriler ile gelecekteki projeksiyonlar arasındaki tutarsızlık, SWAT modelinin Manavgat Nehri havzasının aşağı kesimindeki akışı olduğundan daha düşük tahmin etmesiyle ilişkili olabilir.

4.9.3.3. Manavgat nehri havzasında orman yangınının yüzey akışına etkisi

Orman yangınları, geniş alanlara yayılabilen ve ekosistemler üzerinde ciddi etkiler yaratabilen doğal afetlerdir. Yıldırım düşmesi ve iklim değişikliği gibi doğal etkenlerin yanı sıra, insan faaliyetleri de bu yangınların çıkışında önemli bir rol oynar. Özellikle kurak dönemlerde kuru bitki örtüsü, yüksek sıcaklık ve kuvvetli rüzgarlar, yangının hızla büyümesine ve kontrol altına alınmasını zorlaştırmasına neden olabilir (Anonymous 3., 2024). Bu tür yangınlar, orman ekosistemlerine zarar vererek biyoçeşitliliği olumsuz etkileyebilir, hava kalitesini düşürebilir ve karbon salınımını artırarak küresel ısınmayı tetikleyebilir. Aynı zamanda yerleşim alanlarına ulaştığında can ve mal kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle, orman yangınlarının önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için erken uyarı sistemleri, sürdürülebilir arazi yönetimi ve toplumsal farkındalığın artırılması gibi stratejilerin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Orman yangınlarının çok sayıda ciddi ve çok yönlü sonuçları bulunmaktadır. Bitki örtüsündeki değişiklikler, toprak özelliklerinde bozulmalar, havzaların hidrolojik özelliklerindeki değişiklikler ve muhtemel can ve mal kayıpları, orman yangınlarının en önemli etkileri arasında yer almaktadır. Özellikle bitki örtüsünün kaybı, infiltrasyonun azalması ve evapotranspirasyonun düşmesi sonucunda yüzey akışının artması, bir havzanın hidrolojik tepkisinde doğrudan değişimlere yol açmaktadır. Özellikle Akdeniz bölgesinde doğal nehir havzalarının hidrolojisini orman yangınlarının nasıl etkilediğini belirlemek için çeşitli çalışmalar yürütülmüştür (Zennir vd., 2023; Soulis vd., 2021; Novo vd., 2024; Romano vd., 2020). Orman yangınlarının oluşumunda iklim değişikliği, aşırı sıcaklık ve kuraklık gibi doğal faktörlerin yanı sıra insan faaliyetleri de önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar, iklim değişikliğinin etkisiyle gelecekte Akdeniz bölgesinde daha şiddetli ve yaygın yangınların meydana gelme olasılığının arttığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Akdeniz bölgesinde yangın riski yüksek bölgeler arasında yer alan Türkiye'nin, gelecekte daha fazla orman yangınına maruz kalması beklenmektedir (Anonymous 4., 2024). Özellikle Antalya ili Manavgat

ilçesinde Temmuz-Ağustos 2021'de meydana gelen büyük çaplı orman yangını, bilimsel araştırmalarda önemli bir inceleme konusu haline gelmiştir. Bu yangın, araştırmacıları yangının nedenleri, şiddeti, dağılımını etkileyen faktörler, doğal ve kentsel alanlarda yol açtığı tahribatın boyutu ve yangının uzun vadeli etkileri gibi çeşitli konular üzerine yoğunlaşmaya teşvik etmiştir. Ancak, bölgedeki orman yangınının hidrolojik dinamikler üzerine etkileri henüz araştırılmamıştır. Bu doğrultuda, bu çalışmanın ana hedeflerinden biri de, bu orman yangının Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde yer alan ve karstik etkilere maruz kalan Manavgat havzanın hidrolojisi üzerindeki etkisini analiz etmektir.

Yukarıda belirtilen hedefe ulaşmak amacıyla, çalışma alanında orman yangının etkilerini görselleştirmek için uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemi (Bölüm 3.5'te açıklanmıştır) tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu amaçla, Manavgat bölgesinde yangın şiddetini ve etkilenen alanları belirlemek amacıyla Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılmış ve ArcGIS'in yazılımının raster hesaplayıcı araçlarında farklı indekslerin kombinasyonu uygulanmıştır (Şekil 4.24). Elde edilen yangın şiddeti haritası doğrultusunda, Manavgat Havzasında dört tür yangın şiddeti kategorisi belirlenmiştir.



Şekil 4.24. Manavgat nehir havzası yanmış alan haritası

Çizelge 4.18'de gösterildiği gibi, gelişmiş yeniden büyüme sınıfını temsil eden -0.500 ile -0.251 aralığındaki değerler, çalışma alanındaki dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio) değerlerinin -0.100 ile +0.60 arasında değişmesi nedeniyle yangın sonrası haritalamada yer almamaktadır. Yangın sonrası yüksek şiddet sınıflarını temsil eden 0.440 ile 0.601 arasındaki değerler ise oldukça düşük seviyede olup çalışma alanının genel dNBR indeksine kıyasla belirgin bir görünürlük sergilememektedir. dNBR indeksinin sınıflandırılması, orman yangınlarından etkilenen alanların tahmin edilmesini mümkün kılmıştır. Gelişmiş yeniden büyüme sınıfına giren düşük alanlar, çalışma alanının %10.09'unu kaplamakta olup, ağırlıklı olarak Manavgat Nehri Havzası'ndaki tarım arazilerinde yoğunlaşmaktadır (Çizelge 4.19). Benzer şekilde, yanmamış alan, çalışma alanının %81.06'sını oluşturarak yaklaşık 1906.61 km² yüzeyi kaplamaktadır. Düşük şiddetli alanlar %5.27'lik bir paya sahipken, orta düşük şiddetli ve orta yüksek şiddetli alanlar ise Manavgat Nehri Havzasındaki toplam çalışma alanının yalnızca %3.59'unu kaplamaktadır.

Çizelge 4.18. USGS tarafından önerilen dNBR hesaplaması ile elde edilen yanma şiddeti seviyeleri

Şiddetin düzeyi	dNBR aralığı
Yüksek Düzeyde Yeniden Büyüme	-0.500 ile -0.251
Düşük Düzeyde Yeniden Büyüme	-0.250 ile -0.101
Yanmamış	-0.100 ile +0.099
Düşük Şiddet	+0.100 ile +0.269
Orta Düşük Şiddet	+0.270 ile +0.439
Orta Yüksek Şiddet	+0.440 ile +0.659
Yüksek Şiddet	+0.660 ile +1.30

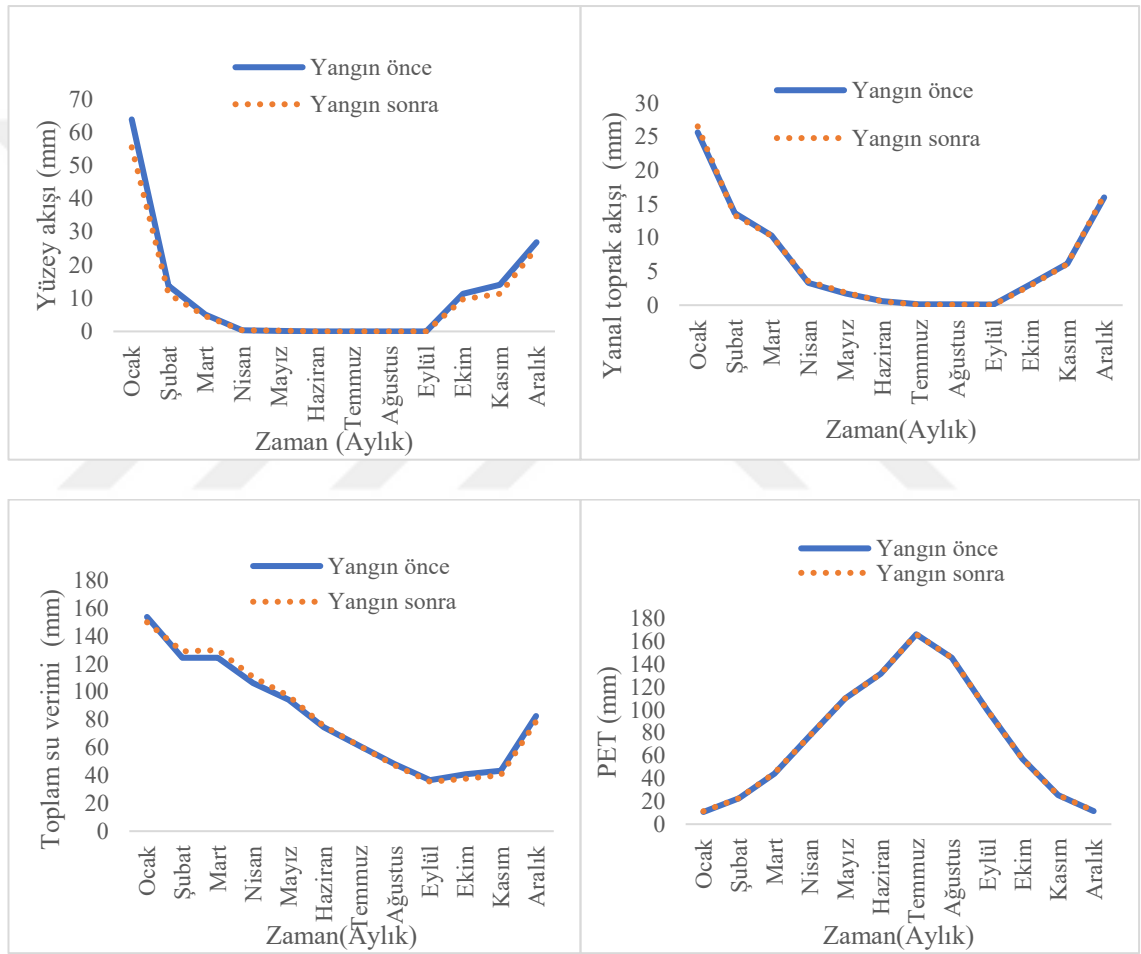
Çizelge 4.19. Manavgat nehri havzası yanma şiddeti sınıflandırması

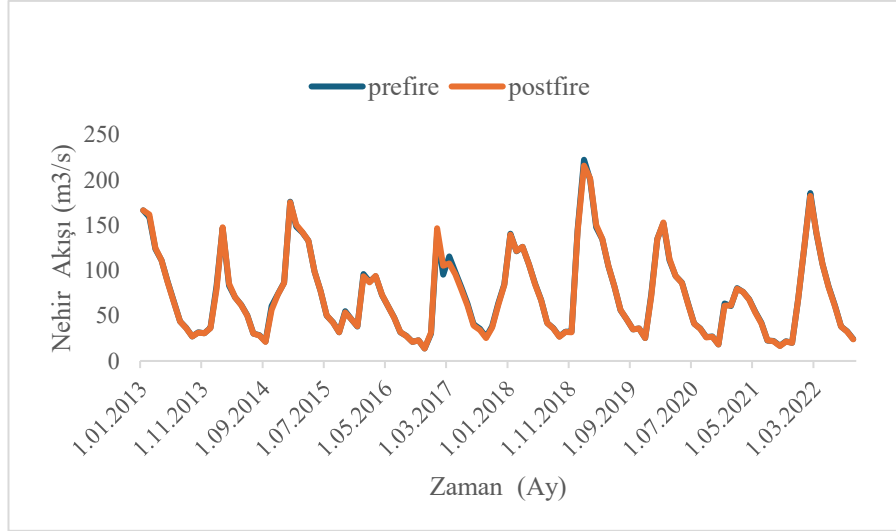
ID	Sınıfı	Sayı (Pixel)	Alan (Km ²)	Şiddet %
1	Düşük Düzeyde Yeniden Büyüme	263595	237.24	10.09
2	Yanmamış	2118454	1906.61	81.06
3	Düşük Şiddet	137740	123.97	5.27
4	Orta Şiddet	93799	84.42	3.59
	Toplam alanı		2352.23	100.0

Daha önce Bölüm 3.5'te belirtildiği üzere, yangın öncesi, yangın sonrası iki SWAT modelinin çıktıları, diğer tüm model giriş parametreleri sabit tutularak elde edilmiştir. Bu modellerin çıktıları havzada hidrolojik süreçlerdeki değişiklikleri değerlendirmek için yangın öncesi ve sonrası karşılaştırılmıştır. Şekil 4.24'e göre, hidrolojik faktörlerde yangın sonrası modelde, yangın öncesi modele kıyasla anlamlı bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Çizelge 4.20. Manavgat nehri havzasında yangın öncesi ve sonrası uzun dönem ortalama yıllık su bilançosu özeti

Hidrolojik Süreç	Yangın önce	Yangın sonra	Birim
PET	915.00	903.00	mm
Yüzey akışı	133.55	118.08	mm
Yanal toprak akışı	80.40	81.73	mm
Topraktan sızma	768.68	787.35	mm
Sığ akifer akışı	66.34	48.61	mm
Derin akifer akışı	717.43	742.63	mm
Toplam su verimi	999.46	992.77	mm

**Şekil 4.25.** Manavgat nehri havzasında yangın öncesi ve sonrası uzun dönem ortalama aylık su bilançosu durumu



Şekil 4.2626. Manavgat şelale istasyonunda yangın öncesi ve sonrası aylık nehir akışı

Ancak, yer altı suyu faaliyetlerinde (sığ ve derin akiferler) hafif bir değişim görülebilmektedir. Bu durum, Çizelge 4.20’de sunulmuştur. Bu bulgu, Galler’deki karstik havzalarda orman yangını etkilerini inceleyen Bian vd.’nin (2019) tarafından yapılan çalışmayla benzerlik göstermektedir. Bian vd.’nin (2019), orman yangınının tercih edilen akışı artırdığını ve karstik alandaki difüz akışları azalttığını bulmuş, dolayısıyla orman yangını toprak hidrolojisi ve yer altı suyu üzerinde güçlü bir etki yarattığını belirtmiştir.

Ayrıca, orman yangının bozulma derecesi (yangın şiddeti), yanmış orman bitki örtüsünün alanı ve iklim değişkenliğinin, bir havza üzerindeki orman yangınının etkisini değerlendirmede önemli faktörler olduğu da unutulmamalıdır (Escuin vd., 2008). Bu görüş, Manavgat karstik havzasında gerçekleştirilen SWAT hidrolojik modellemesi sırasında toprak hidrolojisi ve jeolojik yapı faktörlerinin ana rol oynadığı ve mevcut çalışmanın bulguları ile desteklenmektedir.

5. SONUÇLAR

Suyun yanlış kullanım ve iklim değişikliği nedeniyle hızla azalması, özellikle yarı kurak bölgelerde önemli bir ulusal sorundur. Akdeniz bölgesinde hızla artan su talebi, su kıtlığı sorununu bölgesel düzeye taşımıştır. Havza düzeyinde su kaynaklarını korumak için, havzada gerçekleşen fiziksel, kimyasal ve biyolojik olaylar hakkında doğru bilgi edinmek çok önemlidir. Nehir havzalarının planlanması ve yönetimi teknolojinin gelişmesinden önce her zaman karmaşık olmuştur. Ancak, günümüzde uzaktan algılama ve bilgisayar teknolojileri, nehir havzasındaki karmaşık süreçlere önemli ölçüde yardımcı olabilmektedir. Manavgat Nehri Havzası, özellikle tarım ve elektrik üretimi açısından merkezi bir rol oynayan Türkiye'deki en önemli havzalardan birisidir. Bu nedenle, bu çalışmanın ana amacı, Manavgat Nehri Havzasının hidrolojik bileşenlerini Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) kullanarak araştırmaktır. SWAT modeli, dünya genelinde binlerce uygulama ile tüm hidrolojik süreçleri temsil etme yeteneğini kanıtlamıştır. Ana hedefimize ulaşmak için, Manavgat Nehri Havzasında kapsamlı bir hidrolojik araştırma yapılmış olup sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Manavgat Nehri Havzası karmaşık topografyası ve çeşitli arazi kullanımıyla, hidrolojik modelleme için ilgi çekici bir örnek çalışma oluşturmaktadır. Çalışmada, hidrolojik süreçleri simüle etmek, kalibre etmek, doğrulamak ve havzadaki su kaynakları üzerindeki çeşitli faktörlerin (iklim değişikliği, arazi kullanım/örtü değişimi ve orman yangını) etkilerini değerlendirmek için Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) kullanılmıştır. Havzanın topografyası, önemli yükseklik değişiklikleri ile karakterize edilmekte ve hidrolojik desenlerin şekillenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Kuzeydeki dağlık arazi ile güneydeki kıyı ovası, yüzey ve yer altı akışı, infiltrasyon ve perkolasyon oranlarını etkilemektedir. Bu topografik özellikleri doğru bir şekilde temsil etmek için yüksek çözünürlüklü Dijital Yükseklik Modelleri (DEM'ler), önem taşımaktadır. Altyapı jeolojisi, özellikle karstik yapılar, hidrolojik sistemi daha da karmaşık hale getirmekte olup, bu durum, havzalar arası su akışı ve yer altı suyu yenilenmesi üzerindeki etkilerle kanıtlanmaktadır. SWAT modeli, havza ölçeğinde hidrolojik süreçleri simüle etme kapasitesine sahip olmasına rağmen, Manavgat Nehri Havzasında yüzey suyu ile yer altı suyu arasındaki karmaşık etkileşimleri doğru bir şekilde yakalamada sınırlamalar göstermiştir.

Kalibrasyon ve doğrulama bulguları, üst havzadaki (Sinanhoca ölçüm istasyonu) bazı parametrelerde yapılan bazı kimi modifikasyonlarından sonra simüle edilen ve gözlemlenen değerler arasında iyi bir uyum göstermiştir ($R^2 \geq 0.81$, Pbias =%9.02, p-Faktör ≥ 0.65 ve r-faktör ≤ 1.4). Ancak, model, Manavgat Şelale çıkışında günlük akışı düşük tahmin etmiş, bu durum hassas parametre modifikasyonlarına rağmen devam etmiştir ($R^2=0.48$, Pbias =-32, p-Faktör=0.45 ve r-faktör=1.12). Bazı tutarsızlıklara rağmen, ana çıkışta (Manavgat Şelale) gözlemlenen aylık akış, orta derecede bir uyum göstermiş olup ($R^2=0.74$) hafif bir hatayla (Pbias =-32.46 %) sonuçlanmıştır. Üst havzada, modelin performansı, yer altı suyu girişi ve rezervuar faaliyetlerinin daha belirgin olduğu aşağı havzalara kıyasla daha iyi olmuştur.

Benzer şekilde, çalışmada, arazi kullanım/örtü (LULC) değişikliklerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Gözlemlenen değişikliklerin nispeten kısa bir dönem (2017-2022) içinde orta düzeyde bir etkisi olmasına rağmen, daha önemli LULC değişikliklerinin, ormansızlaşma ve kentleşme gibi etkilerin uzun vadeli

potansiyel etkileri, daha fazla araştırmayı gerektirmektedir. Altı ana arazi kullanım/örtü sınıfından orman ve mera sınıfları, toplam %44.62 ve %50.66'dan sırasıyla %32 azalma ve %25 artış göstermiştir. Havzanın karstik yapısı, LULC değişikliklerinin etkilerini bir dereceye kadar dengeleyebilse de, üst havzada daha fazla yüzey akışı ve azalan yer altı suyu yenilenmesi olasılığı hala bulunmaktadır.

Çalışma, Akseki ve Manavgat merkez meteoroloji istasyonlarındaki gelecekteki sıcaklık ve yağış değişimlerini analiz ederek, iklim değişikliğinin çalışma alanındaki yüzey akışları üzerindeki etkilerini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Sonuçlar, aylar ve mevsimler boyunca dalgalanan sıcaklık ve yağış desenlerini ortaya koymuştur. Yağışın ilkbahar ve kış mevsimlerinde -0.55 mm azalması, ancak sonbaharda 1.79 mm artması beklenmektedir. Çalışmada ayrıca, Manavgat Nehri Havzasında sıcaklık eğilimlerinin ilkbahar, yaz ve kış mevsimlerinde (0.04 °C) yükselme ve sonbaharda (-0.03 °C) azalma olabileceğini ortaya koymuştur.

Her iki RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında yapılan gelecekteki akış tahminleri, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde herhangi bir değişiklik göstermemişken, kış mevsiminde yukarı havzada (14.394 m³/s) artan bir akış eğilimi gözlemlenmiştir. Manavgat Şelale (aşağı havza) altında RCP 4.5 senaryosunda yapılan eğilim analizi, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde yukarı havza ile benzer kalırken, kış mevsiminde daha yüksek bir akış (21.079 m³/s) projekte edilmiştir. Aksine, RCP 8.5 senaryosu altında, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde aşağı yönlü bir eğilim (ortalama -11.65 m³/s), sonbaharda değişiklik olmamakla birlikte, kış mevsiminde pozitif bir eğilim (11.973 m³/s) öngörülmüştür. Havzada her iki senaryo altında da akış tahminlerinde birçok dalgalanma olsa da, yıllık havza akışında herhangi bir değişiklik beklenmemektedir. Manavgat Nehri Havzası'ndaki orman yangını etkisi değerlendirmesi, havzada toplamda %8.86'lık bir yanmış alan olduğunu göstermektedir (düşük şiddetli %5.27, orta düşük ve orta yüksek şiddetli %3.59). Mevcut orman yangını etki analizi, yangın sonrası modelde, yangın öncesi modele kıyasla belirgin bir akış değişikliği tespit etmemiştir. Ancak, yer altı suyu faaliyetlerinde (sığ ve derin akiferlerde) hafif bir değişim gözlemlenebilir.

ÖNERİLER

1. Meteorolojik, hidrolojik, arazi kullanım/örtü, topografik, jeolojik, nokta kaynak ve toprak verileri hakkında yüksek kaliteli veri toplamak için kapsamlı bir izleme ağı kurulmalıdır. Bahsedilen gözlemlenen verilerin mevcut olması, model çıktılarının yoğun bir şekilde kalibre edilmesi ve doğrulanması için fırsat sağlar. Veri kümesinin tüm türleri üzerinde veri kalite kontrolü yapılması şiddetle tavsiye edilmektedir. Ayrıca, kayıt cihazlarının standartlarına göre kontrol edilmesi, zaman serisi verilerinin hata paylarını azaltmaya yardımcı olacaktır. Türkiye dahil olmak üzere Akdeniz ülkelerinin çoğunda havzada yeterli miktarda yer gözlem verisi eksikliği bulunmaktadır. Kapsamlı bir kalibrasyon ve doğrulamadan sonra uydu verilerini veya model yeniden analiz veri setlerini uygulamak ve ardından bu ek veri kaynaklarını modele dahil etmek, SWAT model çıktısını önemli ölçüde iyileştirebilecektir.
2. Havzada, özellikle yer altı suyu akışı ve Manavgat Nehri Havzasındaki aşağı havza akış dinamikleri olmak üzere karmaşık hidrolojik süreçleri daha iyi temsil

etmek için, SWAT modelinin hassas parametrelerinin iyileştirilmesi çok önemli olacaktır.

3. Her hücrede yükseklik verilerini içeren daha yüksek çözünürlüklü DEM, çalışma alanının topografyasını ve eğimini temsil etmede modelleme sonucunu büyük ölçüde iyileştirmektedir. Ayrıca, görüntü ön işleme adımlarında farklı algoritmalar ve araçların uygulanması hayati önem taşımaktadır.
4. Havzada toprak parametrelerinin (toprak hidrolik iletkenliği ve eğim) en hassas parametreler olarak belirlenmiş olduğu göz önüne alındığında, Manavgat Nehri Havzası'nda toprak profili testi yapılması ve FAO küresel toprak haritasının doğrulanması açısından önemli bir gereklilik arz etmektedir. Manavgat Nehri Havzasının aşağı havzasında ortaya çıkan tutarsızlıklar göz önüne alındığında, akış dinamiklerini etkileyen faktörler hakkında daha fazla araştırma önemle tavsiye edilmektedir. Modele, rezervuar işlemleri, önemli kaynakların (doğudaki Dumanlı yaylası) nokta kaynak verileri, Eynif polyesinden ve üst kapalı havzaların diğer kanallarından ve çöküntülerinden kaynaklanan bazı kaynaklar ve gerçek sulama çekilmelerinin dahil edilmesi, Manavgat Nehri Havzasının aşağı kesiminde model performansını iyileştirebilecektir.
5. Manavgat Nehri Havzasındaki akış, arazi kullanım/örtü değişimi nedeniyle yeterince etkilenmemiştir. Bu nedenle, modele daha ayrıntılı arazi kullanım/örtü kategorileri ve arazi yönetimi uygulamaları (sulama ve rezervuar) entegre edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, uzun vadeli arazi kullanım/örtü değişiklikleri ve potansiyel eşik değerler, hidrolojik süreçlerin arazi kullanım ve arazi örtüsü değişimine yanıt vermesinde önemli olabileceği düşünülmektedir.
6. İklim değişikliği senaryolarının gelecekteki tahminlerinin doğruluğundan emin olmak için, farklı iklim değişikliği modellerinden ve ülkelerdeki iklim değişikliği verilerinin uygulanması önerilmektedir. Ayrıca, farklı düşey ölçekleme araçlarının karşılaştırmalı uygulaması, projekte edilen senaryoların kalitesini önemli ölçüde artırabilmektedir. Karstik veya yarı karstik havzalarda, yüzeydeki bitki örtüsünün tahrip olması, yüzey akışını kontrol etme kapasitesini belirgin bir şekilde azaltmaktadır. Bu durum, özellikle havza içi su hareketlerinin, büyük su kütlelerinin (gölet veya rezervuar gibi) varlığının ve güçlü yeraltı suyu çıkışlarının baskın olduğu ortamlarda daha da belirgin bir etkiyle gözlenmektedir. Bu durum, mevcut çalışma olan Manavgat Nehri Havzası'nda gözlemlenen bir durumdur.

6. KAYNAKLAR

- Abbaspour, K. C., Faramarzi M., Ghasemi S1 and Yang H. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water resources research*, vol. 45, w10434, doi:10.1029/2008WR007615.
- Abbaspour, K.C. 2015. SWAT-CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs: a user manual. Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology). Zurich, Switzerland.
- Abbott, M.B., Bathurst J.C., Cunge J. A., Connell P.E. 1986a. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. Vol-87, 1–2. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
- Abbott, M.B. and Bathurst J.C.1986b. Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique Europeen. . *Journal of Hydrology*. Vol-87, 1–2. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90116-2).
- Abdulla, F. and Al-Shurafat, A.W. 2020. Assessment of the Impact of Potential Climate Change on the Surface Water of a Trans-boundary Basin: Case Study Yarmouk River. *Procedia Manufacturing*, 44, 172-179
- Aboelkhair, H., Mostafa, M., El Afandi, G. 2019. Assessment of agro-climatology NASA POWER reanalysis datasets for temperature types and relative humidity at 2m against ground observations over Egypt. *Advances in Space Research*, 64: 129–142
- Ağca N. ve Doğan K. 2020. Asi Nehrinin su kalite parametre düzeylerinin belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi* Vol. 25. 1-9. <https://doi.org/10.37908/mkutbd.585057>.
- Aküzüm, T. Çakmak B, Gökalp Z. 2010. Türkiye’de Su Kaynakları Yönetiminin Değerlendirilmesi *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1): 67-74.
- Al Khoury, I.; Boithias, L.; Labat, D. 2023. A Review of the Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in Karst Watersheds. *Water*, 15, 954. <https://doi.org/10.3390/w15050954>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome, Italy.
- Aloui, S. Mazzoni A. Elomri, A. Aouissi, J. Boufekane, A. Zghibi, A. 2023. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management* 326-116799

- Amatya, D. M., T. M. Williams, A. E. Edwards, Hitchcock. 2011. SWAT-based streamflow and embayment modeling of karst-affected chapel branch watershed, South Carolina. Soil & Water Division of ASABE, vol. 54(4): 1311-1323.
- Anil S., Raj P and Vema K. 2024. Catchment response to climate change under CMIP6 scenarios: a case study of the Krishna River Basin. Journal of water and climate change, Vol 15 No 2, 476.
- Anonim 1: <https://www.msxlabs.org>. [Son erişim tarihi: 19.04.2025].
- Anonymous 2: <https://swat.tamu.edu/> [Son erişim tarihi: 26.08.2024].
- Anonymous 3: [https://icdo.org/about-icdo/disasters/forest-fire-\(wildfire\).html](https://icdo.org/about-icdo/disasters/forest-fire-(wildfire).html) [Son erişim tarihi: 24.08.2024].
- Anonymous 4: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> [Son erişim tarihi: 24.08.2024].
- Aouissi, J., Benabdallah, S., Chabaane, Z.L., Cudennec, C. 2014. Modelling water quality to improve agricultural practices and land management in a Tunisian catchment using SWAT. J. Environ. Qual. 43, 18–25. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0375>.
- Arikan, A. 1988. “MODALP: A deterministic rainfall-runoff model for large karstic areas.” *Hydrological Sciences Journal* 33 (4): 401–14. doi:10.1080/02626668809491262.
- Arnold, J. G. & Fohrer, N. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. Hydrol. Processes 19(3), 563–572. Sixth readying (Application of SWAT in WATER resources)
- Arnold, J.G. ve J.R. Williams. 1987. Validation of SWRRB-simulator for water resources in rural basins. ASCE Water Res. Plann. & Manage. 113(2):243-256.
- Arnold, J.G., J.R. Williams, and Maidment D.R. 1995. Continuous-Time Water and Sediment Routing Model for Large Basins Journal of Hydrologic Engineering (ASCE) 121(2):171-183, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995) 121:2(171).
- Asghari, S., Saeedi S., A. 2023. Investigating the effect of land use changes on the runoff of the Qara Chai river basin using the SWAT model. Geography and Environmental Planning, 34 (3).
- Babel L. and Karssenberg, D. 2013. Hydrological models are mediating models. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 10(8), pp. 10535-10563.
- Babel, L. V. and Karssenberg, D. 2013. Hydrological models are mediating models, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 10, 10535–10563, <https://doi.org/10.5194/hessd-10-10535-2013>.
- Babkin, V., 2009. Evaporation from the surface of the globe. In: Hydrological Cycle Volume II. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), p. 48 Paris, France.

- Babu, K. V., Achuthan A., Ahmad Sh., 2024. Hydrological assessment of the Gundlakamma sub-basin through SWAT modeling: integration of land use land cover (LULC) and climate changes. *Journal of Water and Climate Change* Vol 15 No 2, 849.
- Beven, K. 2002. Towards a coherent philosophy for modelling the environment. The royal society. ISSN:1364-5021. <https://doi.org/10.1098/rspa.2002.0986>.
- Bian, F., Coleborn, K., Flemons, I., Baker, A., Treble, P. C., Hughes, C. E., Baker, A., Andersen, M. S., Tozer, M. G., Duan, W., Fogwill, C. J., & Fairchild, I. J. 2019. Hydrological and geochemical responses of fire in a shallow cave system. *The Science of the total environment*, 662, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.102>
- Bittelli, M. 2011. Measuring soil water content: a review. *HortTechnology*, 21(3), pp. 293-300.
- Blumenthal, M.M. 1951. Recherces géologiques dans le Taurus occidental dans l'arrière-pays d'Alanya. Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) Publications, Series D5. Ankara, Turkey: MTA (in French).
- Borah, D.K. and Bera, M. 2003. Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Mathematical Bases. *Transactions of the ASAE*, 46, 1553-1566. <https://doi.org/10.13031/2013.15644>.
- Briak, H., Moussadek R., Aboumaria K., Mrabet, R. 2016. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 4, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.002>.
- Brook, A and Habtamu D.2022. Effect of climate change on streamflow in the Gelana watershed, Rift valley basin. *Journal of water and climate change*, Vol 13 No 5, 2205.
- Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Bouabid, R., Benaabidate, L. 2018. SWAT streamflow modeling for hydrological components' understanding. *J. Mater. Environ. Sci.* 9, 128–138. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.16>.
- Bugan, R., Jovanovic, N. and De Clercq, W. 2012. The water balance of a seasonal stream in the semi-arid Western Cape (South Africa). *Water SA*, 38(2), pp. 201-212.
- Buyuktas, D. and Wallender W. 2002. Numerical Simulation of Water Flow and Solute Transport to Tile Drains. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol 128-1.
- Cakmak, B. ve Akuzum, T. 2006. Türkiye’de Tarımda Su Yönetimi, Sorunlar ve Çözüm Önerileri”. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Su Politikaları Kongresi. Cilt:2, s.349-360, Ankara.

- Ceyhunlu A. and Ceribasi G. 2024. Changes in precipitation and air temperature over Turkey using innovative trend pivot analysis method. *Journal of water and climate change*. oi: 10.2166/wcc.2024.041
- Chung, I., Sophocleous, M., Mitiku, D. and Kim, N. 2016. Estimating groundwater recharge in the humid and semi-arid African regions: review. *Geosciences Journal*, 20(5), pp. 731-744.
- Cibin R, Sudheer KP, Chaubey I., 2010. Sensitivity and identifiability of streamflow generation parameters of the SWAT model. *Hydrol Process* 24:1133–1148.
- Crawfor N.H. and Linsley R.K 1966. *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, p. 210.
- Cukur H. 2011. Daily precipitation variations of selected meteorological stations in Turkey. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Volume 19, pp. 617-626.
- Daly C.2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International journal of climatology*, 26(6), pp. 707-721.
- Daniel, E. B., Camp, J. V., Beouf, E. J., Penrod, J. R., Dobbins, J. P., & Abkowitz, M. D. 2011. Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review. *The Open Hydrology Journal*, 5(1). DOI: 10.2174/1874378101105010026.
- Değirmenci, M., Günay, G.1992. Analysis of hydrologic relations between Eğirdir-Beyşehir-Suğla lakes system and adjacent basins by means of remote sensing techniques (southern Turkey). *Environ. Geol. Water Sci* **19**, 41–45. <https://doi.org/10.1007/BF01740576>
- Di Bella, C.E., Striker, G.G., Loreti, J., Cosentino, D.J. and Grimoldi, A.A. 2016. Soil water regime of grassland communities along subtle topographic gradient in the Flooding Pampa (Argentina). *Soil & Water Research*, 11(2), pp. 90-96.
- Di Vries J., Simmers I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges, *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp. 5-17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>.
- Doğan, U. 2002. Manavgat Nehri Havzasının Jeomorfolojik Evrimi. G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi Cilt 22, Sayı 2, 51-65.
- Doğan, U., Kocyigit, A., Gökkaya, E., 2017. Development of the Kembos and Eynif structural poljes: Morphotectonic evolution of the Upper Manavgat River basin, central Taurides, Turkey. *GEOMORPHOLOGY* , vol.278, 105-120.
- Donmez, C., Sari O., Berberoglu S., Ahmet Cilek A., Satir O., Volk M. 2020. Improving the applicability of the swat model to simulate flow and nitrate dynamics in a flat data-scarce agricultural region in the Mediterranean. *Journal of Water*, Vol 12-12, 3479; <https://doi.org/10.3390/w12123479>.

- Doulabian, S., Golian S., Troosi S., Murphy C. 2021. Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change*.12 (1): 166–184.
- Duan, X., Li R., Feng D., Zhang G. 2017. soil moisture variation in a farmed dry-hot valley catchment evaluated by a redundancy analysis approach. *Journal of water, MDPI*, 9-92.
- Duru, D., Arabi M., Ellen E. Wohl 2017. Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey, *Physical Geography* <http://dx.doi.org/10.1080/02723646.2017.1342199>.
- Duru, U. 2015. modeling sediment yield and deposition using the swat model: a case study of cubuk i and cubuk ii reservoirs, turkey. Doctoral dissertation. University of Colorado State.
- Ebers, N., Schröter, K., and Müller-Thomy, H. 2024. Estimation of future rainfall extreme values by temperature-dependent disaggregation of climate model data, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 24, 2025–2043, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2025-2024>.
- Ekdal, A., Gürel, M., Guzel, C., Erturk, A., Tanik, A. and Gonenc, I. E.2011. Application of WASP and SWAT models for a Mediterranean Coastal Lagoon with limited seawater exchange. *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 1023 – 1027. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.
- Ekmekci, M. 1990.A conceptual model for the Beysehir Lake karst system. Hydrogeological processes in karst terranes. International symposium & field seminar, Antalya, Turkey.
- Emanuel, R.E., Epstein, H.E., McGlynn, B.L., Welsch, D.L., Muth, D.J. and D'Odorico, P., 2010. Spatial and temporal controls on catchment ecohydrology in the northern Rocky Mountains. *Water Resources Research*, 46(11), pp. 1-14.
- Eris, E., Hartmut W. 2015 Estimation of baseflow and water transfer in karst catchments in Mediterranean Turkey by nonlinear recession analysis.*Journal of Hydrology*.<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.017>
- Escuin S., Rafael M, Navarro C. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalised Burn ratio) and NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing* 29(4):1053-1073. DOI: 10.1080/01431160701281072.
- Fan, G. Sarabandi, A. Yaghoobzadeh, M. 2021. Evaluating the climate change effects on temperature, precipitation and evapotranspiration in eastern Iran using CIMP5. *Water Supply* 21 (8): 4316–4327. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2021.179>

- Fan, M., Xu, J., Chen, Y., & Li, W. 2021. Modeling streamflow driven by climate change in data-scarce mountainous basins. *Science of The Total Environment*, 790(148256). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148256>
- Fenta, A.A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N. 2024. An integrated modeling approach for estimating monthly global rainfall erosivity. *Sci Rep* **14**, 8167. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59019-1>
- Fistikoglu, O., Oglun, H., Aslan, A., Ozkul, S., & Sanere. (1999). Application of simulation models in integrated river basin management. In *Proceedings of the 5th International Conference on the Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies (ENVIROSOFT/94)* (pp. 99–106). San Francisco, CA, USA.
- Flecker, R., Ellam, R.M., Müller C., Poisson, A., Robertson, A., Turner J. 1998. Application of Sr isotope stratigraphy and sedimentary analysis to the origin and evolution of the Neogene basins in the Isparta Angle, southern Turkey. *Tectonophysics* 298: 83- 101.
- Gassman, P., Arnold, J., Srinivasan, R. and Reyes, M. 2010. The worldwide use of the SWAT model: technological drivers, networking impacts, and simulation trends. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, pp. 21-24.
- Gassman, P.W., Reyes M.R., Green C.H., and Arnold J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE* 50(4):1211-1250, DOI: 10.13031/2013.23637.
- Gassman, P.W., Sadeghi A.M., and Srinivasan R. 2014. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality* 43:1-8, DOI: 10.2134/jeq2013.11.0466.
- Gates, J., Steele G., Nasta P. and Szilagyi, J. 2014. Lithologic influences on groundwater recharge through incised glacial till from profile to regional scales: evidence from glaciated Eastern Nebraska. *Water Resources Research*, 50(1), pp. 466-481.
- Gebre, S., Dessalegn F., Fekadu D., Obsu & N., Abebe A., E. 2022. Hydrological responses of land use land cover change on the Hangar catchment, Blue Nile Basin. *Journal of Applied Science and Technology*.
- Geng, X., Zhang, C., Zhang, F., Chen, Z., Nie, Z., Liu, M. 2021. Hydrological Modeling of Karst Watershed Containing Subterranean River Using a Modified SWAT Model: A Case Study of the Daotian River Basin, Southwest China. Vol 13- 3552. <https://doi.org/10.3390/w13243552>
- Gill, L.W.; Schuler, P.; Duran, L.; Morrissey, P.; Johnston, P.M. 2021. An evaluation of semi-distributed-pipe-network and distributed finite-difference models to simulate karst systems. *Hydrogeol. J.* 29, 259–279.

- Gleick, P.H. vd. 2013. Improving Understanding of the Global Hydrologic Cycle. In: Asrar, G., Hurrell, J. (eds) Climate Science for Serving Society. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_6.
- Golmohammadi, G., Prasher S. Madani A. Rudra R. 2014. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. Journal of hydrology. ISSN: 2306-5338. <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>.
- Golpinar, M.S. 2017. Yüzey akışların SWAT modeli ile belirlenmesi: Akarsu sulama birliği sahası örneği. Master thesis. University of Cukurova.
- Gül, A., Harmancıoğlu H.N. 2003. Su kaynakları yönetiminde bilgisayar modellerinin kullanımı ulusal su mühendisliği sempozyumu, İzmir, Türkiye, 22 -26, ss.0-5.
- Günay, G., 1981, Investigations of karst hydrology of the Manavgat basin and its close vicinity (in Turkish). Affiliation thesis, Hacettepe University, Ankara.
- Günay, G., Ataman, Y. & Dogan, L., 1978, Oymapinar project lower Eynif polje dye test: Final Report. Tech. Report, no. 17 of UNDP/DSI Project, Ankara.
- Güngör, Ö. 2018. SWAT modeli kullanılarak Filyos Çayı Havzası'nın hidrolojik analizi (Doktora tezi). Bülent Ecevit Üniversitesi.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mah'e, G., Alirahmani, S., Keddar, A. 2018. Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). Water Sci 32, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.004>.
- Hillel, D., 2004. Introduction to environmental soil physics. Academic Press, 1st edn. New York, USA.
- Hulme, M. 1994. Validation of large-scale precipitation fields in general circulation models. In: Desbois, M., Désalmand, F. (eds) Global Precipitations and Climate Change. NATO ASI Series, vol 26. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79268-7_25
- James. K. and Hardison C. H., 1960. Double Mass Curves. Manual of hydrology: Part 1. General Surface Water Techniques,” US Geological Survey, Water-Supply Paper 1541-B. report.pdf (usgs.gov)
- Jarraud, M. 2008. Guide to meteorological instruments and methods of observation. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. Seventh edition. World Meteorological Organization.
- Jovanovic N. and Israel, S. 2013. Critical review of methods for the estimation of actual evapotranspiration in hydrological models. In: Irmak, D.A., ed. Evapotranspiration – remote sensing and modeling. InTechOpen, pp. 329-350.

- Kabal C. 2019. Evaluation of the alternatives to improve water quality in gürdük watershed using swat model. master thesis. Middle East Technical University, pp 27-28.
- Karabıyıkoglu M., Çiner A, Monod O, Deynoux M, Tuzcu S, Örçen S.2000. Tectono-sedimentary evolution of the Miocene Manavgat Basin, Western Taurids, Turkey. Geol Soc Sp 173: 271-294.
- Karakoyun E. and Kayab N. 2022. Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: a case study of Murat River Basin, Turkey. Journal of Hydroinformatics. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.056>.
- Karanjac, J., Günay G. 1980. Development of karst water resources in Turkey with emphasis on ground water. Natural Resources Forum, 4, 61-73.
- Karnez, E., Sağır H., Glavan, M., Gölpinar, M.S., Çetin, M., Akgul, M.A., Ibrikçi, H., Pınar, M., 2017. Modelling agricultural land management to improve understanding of nitrogen leaching in irrigated Mediterranean area in southern Turkey. In Tutu, H., Grover, B.P.C, (Eds), Water Quality, Chapter 7, InTech, Rijeka, ISBN 978-953-51-4871-5, pp. 135-158.
- Kendall, M. G. 1975. Rank Correlation Methods. New York, NY: Oxford University Press.
- Khalid, C., 2018. Hydrological modeling of the Mikk'es watershed (Morocco) using ARCSWAT model. Sustain. Water Resour. Manag. 4, 105–115. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0145>.
- Kim, H., Parajuli P.B. 2012. Impacts of reservoir operation in the SWAT model calibration, ASABe-Dallas, Texas. 12-1337324.
- Kocsis, I., Irimus I.A., Patriche, C. Bilas, C. S., Maier, N. Ros, ca, S. Petrea, D. Bartók, B. 2022. A GIS-Based Methodology to Combine Rain Gauge and Radar Rainfall Estimates of Precipitation Using the Conditional Merging Technique for High-Resolution Quantitative Precipitation Forecasts in T, ibles, and Rodnei Mountains. Atmosphere,13, 1106. <https://doi.org/10.3390/atmos13071106>
- Kömüscü, A., Aksoy M. 2024. Characterizing variability of spatial patterns of annual and seasonal precipitation of Turkey and identifying the probable driving factors including teleconnection patterns. Journal of water and climate change, vol15 No 3, 1392.
- Koutalakis, P., Vlachopoulou, A., Emmanouloudis, D., Zaimis, G.N. 2017. Simulation of torrent discharge using SWAT and evaluation by field survey in Thasos Island. J. Eng. Sci. Technol. 10, 7–10. <https://doi.org/10.25103/jestr.103.02>.
- Kumar, C. 2003. Estimation of groundwater recharge using soil moisture balance approach. Journal of Soil and Water Conservation, 2(1-2), pp. 53-58.

- Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near Term Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, doi:10.1017/9781009157896.006
- Li, H., Zhang, Y. and Zhou, X. 2015. Predicting surface runoff from catchment to large region. *Advances in Meteorology*, 2015 p. 13.
- Li, J. and Heap, A. 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. Geoscience Australia, Canberra, Australia.
- Liou, Y. and Kar, S. 2014. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-a review. *Energies*, 7(5), pp. 2821-2849.
- Liu, Y., Wu, Fan X., Gan G., Wang W. 2022. Hydrological impacts of land use/cover changes in the Lake Victoria basin. *Journal of Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109580>
- Mahanama, S., Koster, R., Reichle, R. and Zubair, L. 2008. The role of soil moisture initialization in subseasonal and seasonal streamflow prediction-a case study in Sri Lanka. *Advances in Water Resources*, 31(10), pp. 1333-1343.
- Mallinis, G., Mitsopoulos, I. Chrysafi, I. 2017. Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience & Remote Sensing*, 55(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>
- Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245–259. doi: 10.2307/1907187
- Mapes, K. L., and Narcisa G. 2020. "Evaluating SWAT Model Performance for Runoff, Percolation, and Sediment Loss Estimation in Low-Gradient Watersheds of the Atlantic Coastal Plain" *Hydrology* 7, no. 2: 21. <https://doi.org/10.3390/hydrology7020021>
- Maqsood, J. Wang X., Nawaz R. A. 2024. Future projections of temperature-related indices in Prince Edward Island using ensemble average of three CMIP6 models, *Scientific report* 14(1). Doi 10.1038/s41598-024-63450-9.
- McCrystall, M.R.; Stroeve, J.; Serreze, M.; Forbes, B.C.; Screen, J.A. 2021 New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected. *Journal of Nature Communication*. 12, 6765.

- McDonald, G. and Harbaugh W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. G.P.O. report. <https://doi.org/10.3133/twri06A1>.
- Mdee, O. J. 2015. Spatial distribution of runoff in ungauged catchments in Tanzania. *Water Utility Journal*, 9, pp. 61-70.
- Me, W., Abell, J. M., and Hamilton, D. P. 2015. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4127–4147, <https://doi.org/10.5194/hess-19-4127-2015>.
- Mendas, A., Errih, M., Bouchenak, F. 2010. Hydrologic model combined with a GIS for estimating hydrologic balance at watershed scale: application to the Macta Watershed (north-western Algeria). *J. Water Supply Res. T.* 57, 361–368. <https://doi.org/10.2166/aqua.2008.039>.
- Mitchell, J.K., Banasik, K., Hirschi, M.C., Cooke, R.A.C. and Kalita, P. 2001, January. There is not always surface runoff and sediment transport. In *Soil Erosion Research for the 21st Century. Proc. Int. Symp.* Eds JC Ascough, DC Flanagan. St. Joseph, MI, USA, ASAE (pp. 676-678).
- Mockus, V., 2004. Estimation of direct runoff from storm rainfall (Chapter 10). In: *National Engineering Handbook, Part 630-Hydrology*. USDA Soil Conservation Service, pp. 10.1-10.22 Washington, DC, USA.
- Monteiro, A.L., Sentelhas, P.C., Pedra, G.U. 2018. Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugar cane yield simulation. *International Journal of Climatology*, 38: 1571–1581.
- Mosbahi, M., Benabdallah, S. & Boussema, M.R., 2015. Sensitivity analysis of a GIS-based model: A case study of a large semi-arid catchment. *Earth Sci Inform* 8, 569–581. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0176-0>
- Mudarra, M.; Hartmann, A.; Andreo, B. 2019. Combining experimental methods and modeling to quantify the complex recharge behavior of karst aquifers. *Water Resour. Res.* 55, 1384–1404
- Murphy, TR, Hanley ME, Ellis JS, Lunt PH. 2019. Deviation between projected and observed precipitation trends greater with altitude. *Clim Res* 79:77-89. <https://doi.org/10.3354/cr01583>
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol 10-3, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Nasirzadehdizaji, R. and Akyuz, D.E. 2022. Application of SWAT hydrological model to assess the impacts of land use change on sediment loads. *Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 6 (1), 108-120.

- Negm, A., Jabro, J., Provenzano, G. 2017. Assessing the suitability of American National Aeronautics and Space Administration (NASA) agro-climatology archive to predict daily meteorological variables and reference evapotranspiration in Sicily, Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244–245: 111–121.
- Neitsch, S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R. 2002. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) User's Manual, Version 2000, Grassland Soil and Water Research Laboratory. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. 2011. Soil and water assessment tool: theoretical documentation, Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Texas A&M University, Texas, USA.
- New, M., Todd, M., Hulme, M. and Jones, P. 2001. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21(15), pp. 1889-1922.
- Ngo, T. Wang J. Chen, P. 2024. Assessment of future climate change impacts on groundwater recharge using hydrological modeling in the choushui river alluvial Fan, Taiwan. *Water* 16, no. 3: 419. <https://doi.org/10.3390/w16030419>
- Nguyen, T. V., Dietrich, J., Dang, D. T., Tran, D. A., Doan, B. V., Sarrazin, F. J., Abbaspour, K., Srinivasan, R. 2022. An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, 156, 105497. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105497>.
- Nguyen, Thu Ha, Ilyas Masih, Yasir A. Mohamed, and Pieter Van der Zaag. 2018. "Validating Rainfall-Runoff Modelling Using Satellite-Based and Reanalysis Precipitation Products in the Sre Pok Catchment, the Mekong River Basin" *Geosciences* 8, no. 5: 164. <https://doi.org/10.3390/geosciences8050164>.
- Novo, A., Duta, H. & Eskandari, S. 2024. Fire susceptibility modeling and mapping in Mediterranean forests of Turkey: a comprehensive study based on fuel, climatic, topographic, and anthropogenic factors. *Euro-Mediterr J Environ Integr* 9, 655–679. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00475-6>
- Ochoa, C.G., Fernald, A.G., Guldan, S.J., Tidwell, V.C. and Shukla, M.K. 2012. Shallow aquifer recharge from irrigation in a semiarid agricultural valley in New Mexico. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(10), pp. 1219-1230.
- ORSAM .2013. Political and economic analysis, the black sea international center for research and dialogue, Report No:146
- Özgenç E.K. 2024. Evaluation using the SWAT model of the effects of land use land cover changes on hydrological processes in the Gala Lake Basin, Turkey. *Wiley-Journal of Environmental Quality Management*.

- Özkul, M.M., Alçiçek, M.C., Heybeli, H., B., Erten, H. 2001. Denizli Sıcak Su Travertenlerinin Depolanma özellikleri ve Mermencilik Açısından Değerlendirilmesi. Türkiye 3 Mermer Sempozyumu –Mersem 2001 Bildiriler Kitabı 3– 5 Mayıs 2001 Afyon.
- Ozturk, T. Ceber, Z.P. Türkes, M. Kurnaz, M. L. 2015. Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs. *International Journal of Climatology* 35 (14): 4276–92. <https://doi.org/10.1002/joc.4285>.
- Paker I., Sorman A., 2021. Application of SWAT Using Snow Data and Detecting Climate Change Impacts in the Mountainous Eastern Regions of Turkey. *Journal of MDPI-Water* 13 (14), 1982; <https://doi.org/10.3390/w13141982>.
- Pechlivanidis I., Jackson, B., McIntyre, N. and Wheeler, H. 2011. Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, 13(3), pp. 193-214.
- Peker, İ., Cüceloğlu, G. 2022. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeline genel bir bakış ve modelin türkiye’deki uygulamaları, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik Dergisi*, 1(1) 9–26.
- Peker, I.B.; Sorman, A.A. 2020. Application of SWAT Using Snow Data and Detecting Climate Change Impacts in the Mountainous Eastern Regions of Turkey. *MDPI-Journal of water* 13, 1982. <https://doi.org/10.3390/w13141982>
- Petrík, Peter, Ina Zavadilová, Ladislav Šigut, Natalia Kowalska, Anja Petek-Petrík, Justyna Szatniewska, Georg Jocher, and Marian Pavelka. 2022. Impact of environmental conditions and seasonality on ecosystem transpiration and evapotranspiration partitioning (t/et ratio) of pure European beech forest. *Water* 14, no. 19: 3015. <https://doi.org/10.3390/w14193015>.
- Ramakrishnan, D., Bandyopadhyay, A. and Kusuma, K. 2009. SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Catchment, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science*, 118(4), pp. 355-368.
- Ramos, M., Martínez-Casasnovas, J. 2015a. Soil water content, runoff and soil loss prediction in a small ungauged agricultural basin in the Mediterranean region using the Soil and Water Assessment Tool. *J. Agric. Sci.* 153, 481–496. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000422>.
- Remondi, F., Burlando, P., Vollmer, D. 2016. Exploring the hydrological impact of increasing urbanisation on a tropical river catchment of the metropolitan Jakarta. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.10.001>.
- Ricci, G.F., Centanni M., Girolamo A. M. Gentile F. 2023. Modelling daily streamflow in a temporary karst river system: comparing three approaches using the SWAT

- model, *Hydrological Sciences Journal*, 68:3, 462-473, DOI: 10.1080/02626667.2023.2174027
- Rodrigues, G.C., Braga, R.P. 2021. Evaluation of NASA POWER Reanalysis Products to Estimate Daily Weather Variables in a Hot Summer Mediterranean Climate. *Agronomy*, 11 (6): 1-17.
- Romano, N., and Ursino N. 2020. Forest Fire Regime in a Mediterranean Ecosystem: Unraveling the Mutual Interrelations between Rainfall Seasonality, Soil Moisture, Drought Persistence, and Biomass Dynamics. *Fire* 3, no. 3: 49. <https://doi.org/10.3390/fire3030049>
- Ruiz, O.J. 2021. Calibration and Validation of a SWAT model for the quantification of water provision. University of Alberta, MSc thesis.
- Sadek, A. and Irvem A. 2014. Evaluating the impact of land use uncertainty on the simulated streamflow and sediment yield of the Seyhan River basin using the SWAT model. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. Vol-38, No-4.
- Sanlı, A.S., Agaccioglu, H. 2021. Statistical assessment of interbasin water transfer for karst areas (Turkey). *Arab J Geosci* 14, 2342 <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08693-w>
- Schmidt, L., David Schäfer, Juliane Geller, Peter Lünenschloss, Bert Palm, Karsten Rinke, Corinna Rebmann, Michael Rode, Jan Bumberger, 2023. System for automated Quality Control (SaQC) to enable traceable and reproducible data streams in environmental science, *Environmental Modelling & Software*, 105809, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105809>.
- Sene, K. 2013. Flash floods: forecasting and warning. Springer Science & Business Media, 1 st edn. Dordrecht, The Netherlands.
- Sertel, E. Imamoglu M., Cuceloglu G. and Erturk A. 2019. Impacts of Land Cover/Use Changes on Hydrological Processes in a Rapidly Urbanizing Mid-Latitude Water Supply Catchment. MDPI, *Journal of water*. <https://doi.org/10.3390/w11051075>
- Setti, S., Yumnamc K., Rathinasamyd M., Agarwalc A. 2023. Assessment of satellite precipitation products at different time scales over a cyclone prone coastal river basin in India. *Journal of water and climate change*, Vol 14 No 1, 38.
- Sheng, Sh., Qihui C. Li J., Hua C. 2023. the improved reservoir module of SWAT model with a dispatch function and its application on assessing the impact of climate change and human activities on runoff change. MDPI-*Journal of water*. <https://doi.org/10.3390/w15142620>
- Singh, V.P. and Frevert, D.K. 2005. Watershed models. *Journal of Watershed Models*, vol-1, 1-653.

- Singh, V.P. and Woolhiser, D.A. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7, 270-292. DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270).
- Sloan, P. G. and Moore, I. D. 1984. Modelling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds, *Water Resour. Res.*, 20, 1815–1822, doi:10.1029/WR020i012p01815.
- Sokolowski J. and Banks, C., 2011. Principles of modeling and simulation: a multidisciplinary approach. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Soulis, K.X.; Generali, K.A.; Papadaki, C.; Theodoropoulos, C.; Psomiadis, E. 2021. Hydrological Response of Natural Mediterranean Watersheds to Forest Fires. *MDPI, Hydrology*. 8, 15. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010015>
- Story M. Russell G. 1986. Accuracy Assessment: A User's Perspective. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 52, No.3, pp. 397-399.
- Tan, H. 2020. Modelling Rainfall-Runoff Processes in Kabul River Basin Using Arcswat Model. İzmir Institute of Technology.
- Tarboton D. 2003. Rainfall-runoff processes. Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Tessema S. 2011. Hydrological modeling as a tool for sustainable water resources management: a case study of the Awash River Basin (Doctoral dissertation), KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Tuppad P., Douglá M.R., Lee T., Srinivasan R., and Arnold J.G. 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption. *Trans. ASABE* 54(5):1677–1684. doi:10.13031/2013.39856
- Türkeş M. 1996. Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey. *International Journal of Climatology*, 16(9), pp. 1057-1076.
- Vinogradov Y. 2009. Surface water runoff. In: *Hydrological cycle. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, p. 35.
- Volk M., Özdemir A., Strauch M., Witing F. 2024. The Effects of Climate Change on Streamflow, Nitrogen Loads, and Crop Yields in the Gordes Dam Basin, Turkey. *Journal of Water*, Vol 16-10, 1371.
- Wagener, T., Wheeler, H. and Gupta, H., 2004. Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. 1 st edn. Imperial College Press, London, UK.
- Walker D., Parkin G., Schmitter P., Gowing J. 2018. Insights From a Multi-Method Recharge Estimation Comparison Study. *Journal of NGWA*, Vol 52-2.
- Wang Q., Xu Y., Gao B., Wang Y., Xu Y., Wu L. 2017. Runoff spatial responses to land use change in Xitiaoxi River Basin. In *Chinese J. Nat. Resour.* 32, 632–641. <https://doi.org/10.11849/zrzyxb.20160455>.

- Wang Z., Tian J, Feng K. 2022. Response of runoff towards land use changes in the Yellow River Basin in Ningxia, China. PLoS ONE 17(4): e0265931. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265931>
- Wenzhi Z. and Xibin J. 2016. Spatio-temporal variation in transpiration responses of maize plants to vapour pressure deficit under an arid climatic condition. Journal of Arid Land, 8(3), pp.409-421.
- Western A.W., Zhou S.L., Grayson, R.B., McMahon T.A., Blöschl G. and Wilson D.J. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. Journal of Hydrology, 286(1), pp. 113-134.
- White KL, Chaubey I (2005) Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. J Am Water Resour As 41(5):1077–1089
- Wilby R.L., Dawson, C.W., Murphy, C., Connor, P.O. and Hawkins, E. 2014. The statistical downscaling model-decision centric (SDSM-DC): conceptual basis and applications. Climate Research, 61, 259-276.
- Williams J.R., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, P.W. Gassman, and Green C.H. 2008. History of Model Development at Temple, Texas. Hydrological Sciences Journal 53(5):948-960, DOI: 10.1623/hysj.53.5.948.
- Williams, P. W. and Ford, D. C. (2007). Karst hydrogeology and cave hydrodynamics. Wiley-Blackwell.
- Willmott C.J., Matsuura K. 2006. On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. International Journal of Geographical Information Science <https://doi.org/10.1080/13658810500286976>.
- WMO. 2023. Guide to climatological practices (WMO-No. 100). World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/idurl/4/60113>
- Xu, C.Y., 2002. Hydrologic models. Uppsala University, Department of Earth Science. Uppsala, Sweden.
- Yalcim, E. 2024. Quantifying climate change impacts on hydropower production under CMIP6 multi-model ensemble projections using SWAT model. Journal of hydrological Science, Vol 68-13.
- Yao, X., Fu B., Lü Y., Sun, F., Wang, S. and Liu, M., 2013. Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment. PloS one, 8(1), p. e54660.
- Yıldırım E. 2013. Manavgat nehri havzasındaki peyzaj değişiminin peyzajların korunması, planlanması ve yönetimine yönelik değerlendirilmesi. Doktora tezi. Akdeniz Üniversitesi.

- Zeiger, S.J.; Owen, M.R.; Pavlowsky, R.T. 2021. Simulating nonpoint source pollutant loading in a karst basin: A SWAT modeling application. *Sci. Total Environ.* 785, 147295.
- Zeilelew, M., 2012. Improving runoff estimation at ungauged catchments (Doctoral Dissertation), Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway.
- Zeng, F.; Ma, M.-G.; Di, D.-R.; Shi, W.-Y. 2020. Separating the Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff: A Review of Method and Application. *MDPI-Journal of water*. <https://doi.org/10.3390/w12082201>
- Zennir, R., Khallel B. 2023. Forest fire area detection using Sentinel-2 data: Case of the Beni Salah national forest – Algeria. *J. For. Sci*
- Zhang, Y., Wang, M.; Chen, J.; Zhong, P.-A.; Wu, X.; Wu, S. 2020. Multiscale attribution analysis for assessing effects of changing environment on runoff: Case study of the Upstream Yangtze River in China. *J. Water Clim.*
- Zhao, C., Peng, S. and Feng, Z. 2011. Spatial modelling of the variability of the soil moisture regime at the landscape scale in the Southern Qilian Mountains, China. *Journal of Ecosystem and Ecography*, 1(1), pp. 102-110.
- Zhou, Y., Zhao L., Cao J., Wang Y. 2022. using an improved SWAT model to simulate karst sinkholes: A Case Study in Southwest China. *Front. Environ. Sci.* 10:950098. doi: 10.3389/fenvs.2022.950098
- Zuo, D., Xu, Z., Yao, W., Jin, S., Xiao, P., Ran, D. 2016. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Sci. Total Environ.* 544, 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.060>

7. EKLER

Ek-1. SWAT modeli Arazi Kullanımı/Toprak/Eğim Dağılım Raporu (Kullanıcı, modellenen alt havza özelliklerini; örneğin toprak tipi, eğim sınıfları, arazi kullanımı/örtüsü tipi ve her bir alt havzadaki su alanı yüzdesi gibi bilgilerle tam olarak tanıyabilir).

Watershed		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.A rea	
Number of Subbasins: 33		232468. 29	574440.7 68		
LANDUSE:					
	Water --> WATR	2054.88	5077.711 2	0.88	
	Forest-Mixed --> FRST	103655. 07	256136.8 607	44.59	
	Agricultural Land-Generic -- > AGRL	4298.04	10620.67 17	1.85	
	Residential --> URBN	4346.82	10741.20 96	1.87	
	Barren --> BARR	275.85	681.6391	0.12	
	Range-Grasses --> RNGE	117837. 63	291182.6 756	50.69	
SOILS:					
	Be122-2bc-3016	27513.8 1	67988.00 02	11.84	
	Bk49-2c-6659	51081.3	126224.4 464	21.97	
	I-Be-c-3093	46223.1 9	114219.8 136	19.88	
	I-Lc-E-2b-3114	96706.8 9	238967.5 605	41.6	
	Vc56-3a-3280	10943.1	27040.94 73	4.71	
SLOPE:					
	0-15	63882.0 9	157855.8 385	27.48	
	15-36	82295.6 4	203356.6 412	35.4	
	36-58	57467.3 4	142004.6 705	24.72	
	58-95	25887.8 7	63970.22 12	11.14	
	95-9999	2935.35	7253.396 6	1.26	

Ek-1'nin Devam

		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBASIN	1	7509.69	18556.8195	3.23	
LANDUSE:					
	Forest-Mixed --> FRST	4775.13	11799.585	2.05	63.59
	Range-Grasses --> RNGE	2734.56	6757.2345	1.18	36.41
SOILS:					
	Be122-2bc-3016	6546.69	16177.1983	2.82	87.18
	I-Lc-E-2b-3114	963	2379.6212	0.41	12.82
SLOPE:					
	0-15	3279.6	8104.0556	1.41	43.67
	15-36	2772.99	6852.1969	1.19	36.93
	36-58	1179.45	2914.4799	0.51	15.71
	58-95	265.77	656.731	0.11	3.54
	95-9999	11.88	29.3561	0.01	0.16
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBASIN	2	12389.49	30615.0493	5.33	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	1.08	2.6687	0	0.01
	Forest-Mixed --> FRST	4460.31	11021.649	1.92	36
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	9.27	22.9066	0	0.07
	Residential --> URBN	82.98	205.0477	0.04	0.67
	Barren --> BARR	1.35	3.3359	0	0.01
	Range-Grasses --> RNGE	7834.5	19359.4412	3.37	63.24
SOILS:					
	Be122-2bc-3016	10605.96	26207.8575	4.56	85.6

Ek-1'nin Devamı

	I-Lc-E-2b-3114	1783.53	4407.1918	0.77	14.4
SLOPE:					
	0-15	4071.69	10061.349 6	1.75	32.86
	15-36	5520.15	13640.566 7	2.37	44.56
	36-58	2275.83	5623.6897	0.98	18.37
	58-95	506.61	1251.8586	0.22	4.09
	95-9999	15.21	37.5847	0.01	0.12
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a
SUBBASIN	3	10467.3 6	25865.369 9	4.5	
LANDUSE:					
	Forest-Mixed --> FRST	2917.89	7210.2521	1.26	27.88
	Residential --> URBN	34.65	85.6219	0.01	0.33
	Barren --> BARR	3.33	8.2286	0	0.03
	Range-Grasses --> RNGE	7511.49	18561.267 4	3.23	71.76
SOILS:					
	Be122-2bc-3016	115.11	284.4426	0.05	1.1
	I-Lc-E-2b-3114	10352.2 5	25580.927 4	4.45	98.9
SLOPE:					
	0-15	2011.5	4970.5171	0.87	19.22
	15-36	2998.44	7409.2952	1.29	28.65
	36-58	3400.92	8403.8434	1.46	32.49
	58-95	1946.88	4810.8378	0.84	18.6
	95-9999	109.62	270.8765	0.05	1.05
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a

Ek-1'nin Devam

SUBBAS IN	4	83.97	207.4941	0.04	
LANDU SE:					
	Forest-Mixed --> FRST	82.8	204.6029	0.04	98.61
	Residential --> URBN	0.72	1.7792	0	0.86
	Range-Grasses --> RNGE	0.45	1.112	0	0.54
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	83.97	207.4941	0.04	100
SLOPE:					
	0-15	4.32	10.6749	0	5.14
	15-36	19.98	49.3716	0.01	23.79
	36-58	36.99	91.4041	0.02	44.05
	58-95	20.34	50.2612	0.01	24.22
	95-9999	2.34	5.7823	0	2.79
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
SUBBAS IN	5	6293.79	15552.2698	2.71	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	9.45	23.3514	0	0.15
	Forest-Mixed --> FRST	3321.63	8207.9138	1.43	52.78
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	110.52	273.1004	0.05	1.76
	Residential --> URBN	113.49	280.4395	0.05	1.8
	Barren --> BARR	19.98	49.3716	0.01	0.32
	Range-Grasses --> RNGE	2718.72	6718.0931	1.17	43.2
SOILS:					
	Be122-2bc-3016	6293.7	15552.0474	2.71	100
	I-Lc-E-2b-3114	0.09	0.2224	0	0
SLOPE:					
	0-15	1360.17	3361.0481	0.59	21.61
	15-36	3071.07	7588.7675	1.32	48.8
	36-58	1428.39	3529.6231	0.61	22.7
	58-95	421.11	1040.5839	0.18	6.69

Ek-1'nin Devamı

	95-9999	13.05	32.2472	0.01	0.21
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	6	5848.1 1	14450.97 22	2.52	
LANDU SE:					
	Forest-Mixed --> FRST	2399.9 4	5930.371 7	1.03	41.04
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	0.63	1.5568	0	0.01
	Residential --> URBN	28.98	71.611	0.01	0.5
	Range-Grasses --> RNGE	3418.5 6	8447.432 7	1.47	58.46
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	5848.1 1	14450.97 22	2.52	100
SLOPE:					
	0-15	1325.2 5	3274.759	0.57	22.66
	15-36	1696.2 3	4191.469 1	0.73	29
	36-58	1593.7 2	3938.161 8	0.69	27.25
	58-95	1091.9 7	2698.312 5	0.47	18.67
	95-9999	140.94	348.2698	0.06	2.41
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	7	1508.1 3	3726.664 6	0.65	
LANDU SE:					
	Forest-Mixed --> FRST	964.98	2384.513 8	0.42	63.99
	Residential --> URBN	17.91	44.2565	0.01	1.19
	Range-Grasses --> RNGE	525.24	1297.894 3	0.23	34.83
SOILS:					
	Be122-2bc-3016	577.71	1427.550 3	0.25	38.31

Ek-1'nin Devam

	I-Lc-E-2b-3114	930.42	2299.114 3	0.4	61.69
SLOPE:					
	0-15	212.49	525.0734	0.09	14.09
	15-36	781.83	1931.941	0.34	51.84
	36-58	405.45	1001.887 2	0.17	26.88
	58-95	102.15	252.4178	0.04	6.77
	95-9999	6.21	15.3452	0	0.41
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	8	6372.3 6	15746.42 02	2.74	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	4.77	11.7869	0	0.07
	Forest-Mixed --> FRST	2988.8 1	7385.499	1.29	46.9
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	0.9	2.2239	0	0.01
	Residential --> URBN	4.05	10.0078	0	0.06
	Range-Grasses --> RNGE	3373.8 3	8336.902 6	1.45	52.94
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	2.43	6.0047	0	0.04
	I-Lc-E-2b-3114	6369.9 3	15740.41 55	2.74	99.96
SLOPE:					
	0-15	1512.6 3	3737.784 4	0.65	23.74
	15-36	1825.7 4	4511.494 8	0.79	28.65
	36-58	1915.7 4	4733.889 3	0.82	30.06
	58-95	1029.7 8	2544.637 9	0.44	16.16
	95-9999	88.47	218.6138	0.04	1.39
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	9	12421. 62	30694.44 41	5.34	

Ek-1'nin Devamı

LANDU SE:					
	Water --> WATR	0.72	1.7792	0	0.01
	Forest-Mixed --> FRST	4119.7 5	10180.10 82	1.77	33.17
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	0.54	1.3344	0	0
	Residential --> URBN	29.34	72.5006	0.01	0.24
	Barren --> BARR	9.45	23.3514	0	0.08
	Range-Grasses --> RNGE	8261.8 2	20415.37 03	3.55	66.51
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	11533. 32	28499.41 04	4.96	92.85
	I-Lc-E-2b-3114	888.3	2195.033 7	0.38	7.15
SLOPE:					
	0-15	3863.1 6	9546.061 5	1.66	31.1
	15-36	2872.3 5	7097.720 5	1.24	23.12
	36-58	3513.7 8	8682.726 1	1.51	28.29
	58-95	2025.4 5	5004.988 2	0.87	16.31
	95-9999	146.88	362.9478	0.06	1.18
		Area [ha]	Area[acr es]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	10	290.7	718.3342	0.13	
LANDU SE:					
	Forest-Mixed --> FRST	208.44	515.0657	0.09	71.7
	Range-Grasses --> RNGE	82.26	203.2686	0.04	28.3
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	290.7	718.3342	0.13	100
SLOPE:					
	0-15	196.65	485.932	0.08	67.65
	15-36	21.33	52.7075	0.01	7.34
	36-58	39.51	97.6312	0.02	13.59
	58-95	31.86	78.7277	0.01	10.96
	95-9999	1.35	3.3359	0	0.46

Ek-1'nin Devam

		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	11	18420. 21	45517.25 99	7.92	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	3.06	7.5614	0	0.02
	Forest-Mixed --> FRST	8604.1 8	21261.35 9	3.7	46.71
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	103.14	254.8641	0.04	0.56
	Residential --> URBN	48.06	118.7587	0.02	0.26
	Barren --> BARR	54.54	134.7711	0.02	0.3
	Range-Grasses --> RNGE	9607.2 3	23739.94 57	4.13	52.16
SOILS:					
	Be122-2bc-3016	3374.6 4	8338.904 2	1.45	18.32
	I-Be-c-3093	56.88	140.5533	0.02	0.31
	I-Lc-E-2b-3114	14988. 69	37037.80 24	6.45	81.37
SLOPE:					
	0-15	5900.2 2	14579.73 86	2.54	32.03
	15-36	7213.5 9	17825.14 16	3.1	39.16
	36-58	4177.1 7	10321.99 59	1.8	22.68
	58-95	1113.8 4	2752.354 3	0.48	6.05
	95-9999	15.39	38.0295	0.01	0.08
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	12	7809.5 7	19297.83 79	3.36	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	0.9	2.2239	0	0.01
	Forest-Mixed --> FRST	2971.4 4	7342.576 8	1.28	38.05
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	2.43	6.0047	0	0.03

Ek-1'nin Devam

	Residential --> URBN	28.53	70.4991	0.01	0.37
	Barren --> BARR	19.53	48.2596	0.01	0.25
	Range-Grasses --> RNGE	4786.74	11828.2739	2.06	61.29
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	4311.99	10655.1429	1.85	55.21
	I-Lc-E-2b-3114	3497.58	8642.6951	1.5	44.79
SLOPE:					
	0-15	3445.2	8513.2615	1.48	44.12
	15-36	1494.81	3693.7503	0.64	19.14
	36-58	1747.53	4318.234	0.75	22.38
	58-95	1049.04	2592.2303	0.45	13.43
	95-9999	72.99	180.3619	0.03	0.93
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a
SUBBASIN	13	8816.13	21785.098	3.79	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	2.34	5.7823	0	0.03
	Forest-Mixed --> FRST	5216.31	12889.7628	2.24	59.17
	Residential --> URBN	18.45	45.5909	0.01	0.21
	Barren --> BARR	0.99	2.4463	0	0.01
	Range-Grasses --> RNGE	3578.04	8841.5157	1.54	40.59
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	8816.13	21785.098	3.79	100
SLOPE:					
	0-15	1271.34	3141.5447	0.55	14.42
	15-36	2887.11	7134.1932	1.24	32.75
	36-58	2653.92	6557.969	1.14	30.1
	58-95	1566.81	3871.6659	0.67	17.77
	95-9999	436.95	1079.7253	0.19	4.96

Ek-1'nin Devam

		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a
SUBBASIN	14	7428.06	18355.1077	3.2	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	5.13	12.6765	0	0.07
	Forest-Mixed --> FRST	4495.14	11107.7157	1.93	60.52
	Residential --> URBN	0.72	1.7792	0	0.01
	Barren --> BARR	0.45	1.112	0	0.01
	Range-Grasses --> RNGE	2926.62	7231.8244	1.26	39.4
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	7428.06	18355.1077	3.2	100
SLOPE:					
	0-15	1803.78	4457.2306	0.78	24.28
	15-36	2449.98	6054.0231	1.05	32.98
	36-58	2095.29	5177.5664	0.9	28.21
	58-95	1026.81	2537.2989	0.44	13.82
	95-9999	52.2	128.9888	0.02	0.7
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a
SUBBASIN	15	4488.57	11091.4809	1.93	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	0.54	1.3344	0	0.01
	Forest-Mixed --> FRST	1877.4	4639.1493	0.81	41.83
	Residential --> URBN	86.76	214.3883	0.04	1.93
	Barren --> BARR	0.9	2.2239	0	0.02
	Range-Grasses --> RNGE	2522.97	6234.385	1.09	56.21
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	4488.57	11091.4809	1.93	100
SLOPE:					

Ek-1'nin Devam

	0-15	1381.23	3413.088 4	0.59	30.77
	15-36	1577.07	3897.018 8	0.68	35.14
	36-58	1000.62	2472.582 1	0.43	22.29
	58-95	448.38	1107.969 4	0.19	9.99
	95-9999	81.27	200.8222	0.03	1.81
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Ar ea	%Sub.Ar ea
SUBBASIN	16	10608.3 9	26213.86 21	4.56	
LANDUSE:					
	Forest-Mixed --> FRST	1439.55	3557.2	0.62	13.57
	Residential --> URBN	94.23	232.847	0.04	0.89
	Barren --> BARR	1.17	2.8911	0	0.01
	Range-Grasses --> RNGE	9073.44	22420.92 39	3.9	85.53
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	10608.3 9	26213.86 21	4.56	100
SLOPE:					
	0-15	2997.54	7407.071 2	1.29	28.26
	15-36	3294.99	8142.085	1.42	31.06
	36-58	2897.91	7160.880 5	1.25	27.32
	58-95	1361.52	3364.384	0.59	12.83
	95-9999	56.43	139.4414	0.02	0.53
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Ar ea	%Sub.Ar ea
SUBBASIN	17	9389.7	23202.41 82	4.04	
LANDUSE:					
	Forest-Mixed --> FRST	2787.75	6888.669 6	1.2	29.69
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	25.11	62.0481	0.01	0.27

Ek-1'nin Devam

	Residential --> URBN	89.64	221.5049	0.04	0.95
	Barren --> BARR	0.18	0.4448	0	0
	Range-Grasses --> RNGE	6487.02	16029.7508	2.79	69.09
SOILS:					
	I-Be-c-3093	5062.41	12509.4682	2.18	53.91
	I-Lc-E-2b-3114	4327.29	10692.95	1.86	46.09
SLOPE:					
	0-15	1864.62	4607.5693	0.8	19.86
	15-36	3329.91	8228.3741	1.43	35.46
	36-58	3176.01	7848.0795	1.37	33.82
	58-95	1003.77	2480.3659	0.43	10.69
	95-9999	15.39	38.0295	0.01	0.16
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a
SUBBASIN	18	1792.89	4430.3208	0.77	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	1.71	4.2255	0	0.1
	Forest-Mixed --> FRST	1084.5	2679.8537	0.47	60.49
	Residential --> URBN	0.27	0.6672	0	0.02
	Barren --> BARR	5.49	13.5661	0	0.31
	Range-Grasses --> RNGE	700.92	1732.0084	0.3	39.09
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	1792.89	4430.3208	0.77	100
SLOPE:					
	0-15	345.24	853.1053	0.15	19.26
	15-36	708.21	1750.0223	0.3	39.5
	36-58	389.7	962.9682	0.17	21.74
	58-95	201.33	497.4965	0.09	11.23
	95-9999	148.41	366.7285	0.06	8.28
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a

Ek-1'nin Devam

SUBBASIN	19	1355.4	3349.2612	0.58	
LANDUSE:					
	Forest-Mixed --> FRST	473.94	1171.1294	0.2	34.97
	Residential --> URBN	49.77	122.9842	0.02	3.67
	Range-Grasses --> RNGE	831.69	2055.1476	0.36	61.36
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	1355.4	3349.2612	0.58	100
SLOPE:					
	0-15	264.51	653.6174	0.11	19.52
	15-36	476.01	1176.2445	0.2	35.12
	36-58	330.39	816.4102	0.14	24.38
	58-95	231.39	571.7763	0.1	17.07
	95-9999	53.1	131.2128	0.02	3.92
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
SUBBASIN	20	1.35	3.3359	0	
LANDUSE:					
	Range-Grasses --> RNGE	1.35	3.3359	0	100
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	1.35	3.3359	0	100
SLOPE:					
	0-15	0.09	0.2224	0	6.67
	36-58	0.09	0.2224	0	6.67
	58-95	0.27	0.6672	0	20
	95-9999	0.9	2.2239	0	66.67
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
SUBBASIN	21	8601.39	21254.4648	3.7	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	16.29	40.2534	0.01	0.19

Ek-1'nin Devam

	Forest-Mixed --> FRST	4568.8 5	11289.85 68	1.97	53.12
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	2.88	7.1166	0	0.03
	Residential --> URBN	93.78	231.7351	0.04	1.09
	Barren --> BARR	3.69	9.1182	0	0.04
	Range-Grasses --> RNGE	3915.9	9676.384 7	1.68	45.53
SOILS:					
	I-Be-c-3093	5122.9 8	12659.13 97	2.2	59.56
	I-Lc-E-2b-3114	3478.4 1	8595.325	1.5	40.44
SLOPE:					
	0-15	2467.5 3	6097.39	1.06	28.69
	15-36	3336.2 1	8243.941 7	1.44	38.79
	36-58	2051.6 4	5069.705	0.88	23.85
	58-95	701.1	1732.453 2	0.3	8.15
	95-9999	44.91	110.9749	0.02	0.52
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	22	5377.3 2	13287.62 66	2.31	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	0.09	0.2224	0	0
	Forest-Mixed --> FRST	2688.1 2	6642.478 9	1.16	49.99
	Range-Grasses --> RNGE	2689.1 1	6644.925 3	1.16	50.01
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	367.47	908.0367	0.16	6.83
	I-Lc-E-2b-3114	5009.8 5	12379.58 98	2.16	93.17
SLOPE:					
	0-15	1352.7	3342.589 3	0.58	25.16
	15-36	1649.7	4076.491 2	0.71	30.68

Ek-1'nin Devam

	36-58	1457.28	3601.0117	0.63	27.1
	58-95	845.28	2088.7291	0.36	15.72
	95-9999	72.36	178.8052	0.03	1.35
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
SUBBASIN	23	1062.9	2626.479	0.46	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	0.99	2.4463	0	0.09
	Forest-Mixed --> FRST	190.44	470.5868	0.08	17.92
	Barren --> BARR	5.76	14.2332	0	0.54
	Range-Grasses --> RNGE	865.71	2139.2127	0.37	81.45
SOILS:					
	I-Lc-E-2b-3114	1062.9	2626.479	0.46	100
SLOPE:					
	0-15	59.13	146.1132	0.03	5.56
	15-36	154.71	382.2961	0.07	14.56
	36-58	287.55	710.5504	0.12	27.05
	58-95	364.68	901.1425	0.16	34.31
	95-9999	196.83	486.3768	0.08	18.52
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
SUBBASIN	24	14899.32	36816.9647	6.41	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	1.62	4.0031	0	0.01
	Forest-Mixed --> FRST	1418.58	3505.3821	0.61	9.52
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	64.17	158.5673	0.03	0.43
	Residential --> URBN	21.69	53.5971	0.01	0.15
	Barren --> BARR	64.17	158.5673	0.03	0.43
	Range-Grasses --> RNGE	13329.09	32936.8478	5.73	89.46
SOILS:					

Ek-1'nin Devam

	I-Be-c-3093	14899.32	36816.9647	6.41	100
SLOPE:					
	0-15	4231.89	10457.2118	1.82	28.4
	15-36	5179.95	12799.9154	2.23	34.77
	36-58	3804.93	9402.1723	1.64	25.54
	58-95	1575.99	3894.3501	0.68	10.58
	95-9999	106.56	263.3151	0.05	0.72
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
SUBBASIN	25	8983.62	22198.9742	3.86	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	40.05	98.9656	0.02	0.45
	Forest-Mixed --> FRST	6902.28	17055.879	2.97	76.83
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	30.6	75.6141	0.01	0.34
	Residential --> URBN	16.92	41.8102	0.01	0.19
	Barren --> BARR	21.78	53.8195	0.01	0.24
	Range-Grasses --> RNGE	1971.99	4872.8859	0.85	21.95
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	8983.62	22198.9742	3.86	100
SLOPE:					
	0-15	1167.75	2885.5686	0.5	13
	15-36	3537.54	8741.4382	1.52	39.38
	36-58	2962.44	7320.3374	1.27	32.98
	58-95	1243.17	3071.9352	0.53	13.84
	95-9999	72.72	179.6948	0.03	0.81

Ek-1'nin Devam

		Area [ha]	Area[acr es]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	26	8338.8 6	20605.74	3.59	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	20.79	51.3731	0.01	0.25
	Forest-Mixed --> FRST	6742.6 2	16661.35 12	2.9	80.86
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	11.7	28.9113	0.01	0.14
	Residential --> URBN	8.19	20.2379	0	0.1
	Barren --> BARR	25.56	63.16	0.01	0.31
	Range-Grasses --> RNGE	1530	3780.706 5	0.66	18.35
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	8338.8 6	20605.74	3.59	100
SLOPE:					
	0-15	1115.2 8	2755.912 6	0.48	13.37
	15-36	3310.3 8	8180.114 5	1.42	39.7
	36-58	2372.5 8	5862.763 8	1.02	28.45
	58-95	1339.5 6	3310.119 7	0.58	16.06
	95-9999	201.06	496.8293	0.09	2.41
		Area [ha]	Area[acr es]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	27	11566. 8	28582.14 11	4.98	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	218.43	539.7515	0.09	1.89
	Forest-Mixed --> FRST	5027.3 1	12422.73 44	2.16	43.46
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	0.09	0.2224	0	0
	Residential --> URBN	12.15	30.0233	0.01	0.11
	Barren --> BARR	4.14	10.2301	0	0.04
	Range-Grasses --> RNGE	6304.6 8	15579.17 95	2.71	54.51

Ek-1'nin Devam

SOILS:					
	Bk49-2c-6659	3433.5	8484.3502	1.48	29.68
	I-Be-c-3093	5792.22	14312.865 2	2.49	50.08
	I-Lc-E-2b-3114	2341.08	5784.9257	1.01	20.24
SLOPE:					
	0-15	1492.56	3688.1904	0.64	12.9
	15-36	3869.91	9562.7411	1.66	33.46
	36-58	3686.49	9109.5011	1.59	31.87
	58-95	2067.93	5109.9584	0.89	17.88
	95-9999	449.91	1111.7501	0.19	3.89
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Are a	%Sub.Are a
SUBBASIN	28	8691.03	21475.969 7	3.74	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	243.81	602.4667	0.1	2.81
	Forest-Mixed --> FRST	5012.37	12385.816 9	2.16	57.67
	Residential --> URBN	36.9	91.1817	0.02	0.42
	Barren --> BARR	17.82	44.0341	0.01	0.21
	Range-Grasses --> RNGE	3380.13	8352.4702	1.45	38.89
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	63	155.6762	0.03	0.72
	I-Be-c-3093	8628.03	21320.293 5	3.71	99.28
SLOPE:					
	0-15	1187.64	2934.7178	0.51	13.67
	15-36	3517.2	8691.1771	1.51	40.47
	36-58	2553.48	6309.7768	1.1	29.38
	58-95	1206.63	2981.6431	0.52	13.88
	95-9999	226.08	558.655	0.1	2.6

Ek-1'nin Devam

		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	29	6268.6 8	15490.22 17	2.7	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	2.88	7.1166	0	0.05
	Forest-Mixed --> FRST	5167.0 8	12768.11 3	2.22	82.43
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	161.19	398.3085	0.07	2.57
	Residential --> URBN	66.69	164.7943	0.03	1.06
	Barren --> BARR	0.9	2.2239	0	0.01
	Range-Grasses --> RNGE	869.94	2149.665 2	0.37	13.88
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	5729.0 4	14156.74 43	2.46	91.39
	Vc56-3a-3280	539.64	1333.477 4	0.23	8.61
SLOPE:					
	0-15	1335.3 3	3299.667 2	0.57	21.3
	15-36	3363.0 3	8310.215 3	1.45	53.65
	36-58	1263.3 3	3121.751 6	0.54	20.15
	58-95	286.65	708.3265	0.12	4.57
	95-9999	20.34	50.2612	0.01	0.32
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	30	15558. 66	38446.22 68	6.69	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	1002.5 1	2477.252 3	0.43	6.44
	Forest-Mixed --> FRST	7463.9 7	18443.84 31	3.21	47.97
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	870.39	2150.777 2	0.37	5.59
	Residential --> URBN	899.91	2223.722 6	0.39	5.78

Ek-1'nin Devam

	Barren --> BARR	7.29	18.014	0	0.05
	Range-Grasses --> RNGE	5314.5 9	13132.61 76	2.29	34.16
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	5339.0 7	13193.10 89	2.3	34.32
	I-Be-c-3093	6661.3 5	16460.52 89	2.87	42.81
	Vc56-3a-3280	3558.2 4	8792.589	1.53	22.87
SLOPE:					
	0-15	5706.0 9	14100.03 37	2.45	36.67
	15-36	6893.4 6	17034.08 43	2.97	44.31
	36-58	2153.9 7	5322.567 6	0.93	13.84
	58-95	729.54	1802.729 8	0.31	4.69
	95-9999	75.6	186.8114	0.03	0.49
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	31	6199.7 4	15319.86 75	2.67	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	356.04	879.7926	0.15	5.74
	Forest-Mixed --> FRST	3032.1 9	7492.693 1	1.3	48.91
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	1753.0 2	4331.800 1	0.75	28.28
	Residential --> URBN	437.94	1082.171 6	0.19	7.06
	Barren --> BARR	6.57	16.2348	0	0.11
	Range-Grasses --> RNGE	613.98	1517.175 3	0.26	9.9
SOILS:					
	Bk49-2c-6659	2979	7361.258	1.28	48.05
	Vc56-3a-3280	3220.7 4	7958.609 6	1.39	51.95
SLOPE:					
	0-15	3255.7 5	8045.121	1.4	52.51

Ek-1'nin Devam

	15-36	2259.9	5584.32 59	0.97	36.45
	36-58	601.83	1487.15 2	0.26	9.71
	58-95	82.26	203.268 6	0.04	1.33
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	32	234.9	580.449 6	0.1	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	9.54	23.5738	0	4.06
	Forest-Mixed --> FRST	17.46	43.1445	0.01	7.43
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	194.4	480.372 1	0.08	82.76
	Residential --> URBN	13.5	33.3592	0.01	5.75
SOILS:					
	Vc56-3a-3280	234.9	580.449 6	0.1	100
SLOPE:					
	0-15	213.84	528.409 3	0.09	91.03
	15-36	20.61	50.9283	0.01	8.77
	36-58	0.45	1.112	0	0.19
		Area [ha]	Area[ac res]	%Wat.A rea	%Sub.A rea
SUBBAS IN	33	3389.5 8	8375.82 17	1.46	
LANDU SE:					
	Water --> WATR	112.14	277.103 5	0.05	3.31
	Forest-Mixed --> FRST	233.91	578.003 3	0.1	6.9
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	957.06	2364.94 31	0.41	28.24
	Residential --> URBN	2010.6	4968.29 31	0.86	59.32
	Barren --> BARR	0.81	2.0016	0	0.02
	Range-Grasses --> RNGE	75.06	185.477	0.03	2.21

Ek-1'nin Devamı

SOİLS:					
	Vc56-3a-3280	3389.58	8375.8217	1.46	100
SLOPE:					
	0-15	3185.37	7871.2085	1.37	93.98
	15-36	191.25	472.5883	0.08	5.64
	36-58	12.96	32.0248	0.01	0.38

ÖZGEÇMİŞ

Abdul Hasib HALIMI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2020-2025	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Antalya, TÜRKİYE
Yüksek Lisans 2012-2014	Hungarian University of Agriculture and Life Sciences Faculty of Environmental Science, Department of Soil Science and Plant Nutrition, HUNGARY
Lisans 2007-2010	Baghlan University Faculty of Agriculture, Department of Plant Science, Baghlan, AFGHANISTAN

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Halimi, A.H., Karaca, C., Büyüktaş, D., 2023. Evaluation of NASA POWER Climatic Data Against Ground-Based Observation in the Mediterranean and Continental Regions of Turkey. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Derg. 20, 104–114. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1073903>

Tefera, A.H., **Halimi, A.H.**, 2020. Model Based Irrigation Water Application of Maize (Zeamays L.) to Improve Water Productivity in Irrigated Agriculture. Int. J. Dev. Res. 10, 37918–37925. <https://doi.org/10.37118/ijdr.19173.07.2020>

- Halimi, A.H.,** Tefera, A.H., 2019. Application of Cropwat Model for Estimation of Irrigation Scheduling of Tomato in Changing Climate of Eastern Europe: the Case Study of Godollo, Hungary. *Int. J. Agric. Environ. Sci.* 6, 1–11. <https://doi.org/10.14445/23942568/IJAES-V6I1P101>
- Habibi, A., Fazily, T., **Halimi, A.H.,** 2019. Varietal Response of Wheat to Water Stress Condition of Baghlan Province, Afghanistan. *Int. J. Agric. Environ. Sci.* 6, 43–46. <https://doi.org/10.14445/23942568/IJAES-V6I3P108>
- Mohammadi, A.A., **Halimi, A.H.,** Atefi, R., 2019. Correlation and Evaluation of Applicability of Soil Classification Data According to World References Base for Soil Resources (WRB): The Comparative Study of Farah Province, Afghanistan. *Int. J. Agric. Environ. Sci.* 6, 76–81. <https://doi.org/10.14445/23942568/IJAES-V6I3P114>
- Halimi, A.H.,** 2020. Yield Response of Soybean to Different Rate of Nitrogen Under Poza- Ishan Climatic Condition, Afghanistan. Kabul University. (not published research report), Kabul.