



GÜNEY MARMARA HAVZASI'NDA SWAT+ MODELİ İLE HİDROLOJİK MODELLEME

Halil Emre Kışlıoğlu^{1*}, Şehnaz Şule Kaplan Bekaroğlu¹, Filiz Dadaser-Celik²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

Hidroloji,
SWAT+,
Marmara,
Modelleme,
Akım.

Bu çalışmada, SWAT+ hidrolojik modelinin ve SWAT+ Toolbox yazılımının Güney Marmara Havzası'ndaki performansı araştırılmaktadır. Hidrolojik modeller, hidrolojik döngüyü ve ilgili süreçleri analiz etmek için karmaşık havza yapılarını basitleştiren, su havzalarında etkili yönetim için kullanılan önemli araçlardır. Hidrolojik modeller, su yönetiminden hidrolojik araştırmalara kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Hidrolojik modellerin özellikle son yıllarda kuraklık, taşkın, iklim değişikliği ve arazi kullanım değişikliği gibi nehir akımları ve diğer hidrolojik parametreler üzerindeki etkileşimini inceleyen çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada SWAT modelinin gelişmiş versiyonu olan SWAT+ ve SWAT+ Toolbox Türkiye özelinde uygulanmıştır; temel SWAT modeli Türkiye'de yaygın olarak kullanılsa da Swat+ modeli Türkiye'de henüz uygulanmamıştır. Bu araştırmanın temel amacı, SWAT+ ve SWAT+ Toolbox'ın Güney Marmara Havzası'ndaki performansını istatistiksel göstergeler kullanarak değerlendirmektir. Meteoroloji, toprak özellikleri, topoğrafya ve arazi kullanımı gibi havzadaki çeşitli faktörler hakkında ayrıntılı veri gerektiren SWAT+ hidrolojik modeli Güney Marmara havzasında başarıyla uygulanmıştır. SWAT+ modeli, SWAT modeline göre daha gelişmiş ve esnek olacak şekilde tasarlanmış olup, model dosyalarında herhangi bir ek değişiklik yapmadan kalibrasyon işleminin entegre bir şekilde yürütülmesine olanak sağlayan SWAT+ Toolbox'ın, model kurulumunda önemli avantajlar sağladığını görülmüştür. Araştırmada, modelin performansının hem kalibrasyon döneminde (NSE 0,596) hem de doğrulama döneminde (NSE 0,516) kabul edilebilir seviyenin üzerinde olduğunu, PBIAS değerlerine göre ise kalibrasyon döneminde modelin hafif yüksek tahmine (PBIAS %1,74) ve doğrulama döneminde düşük tahmine (PBIAS %-9,64) işaret ettiğini görülmektedir. Bu çalışma, Türkiye'de SWAT+ modelinin ve SWAT+ Toolbox'ın temel SWAT modeline benzer başarısını ortaya koyan ilk çalışmadır. SWAT+ modelinin sağladığı esneklik ve ek işlevler, Türkiye'deki hidrolojik modelleme çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Bulgular, SWAT+ modelinin Türkiye'deki hidrolojik çalışmalarda başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

HYDROLOGICAL MODELLING IN THE SOUTHERN MARMARA BASIN USING SWAT+

Keywords

Hydrology,
SWAT+,
Marmara,
Modelling,
Flow.

Abstract

This study investigates the performance of the SWAT+ hydrological model and the SWAT+ Toolbox in the South Marmara Basin. Hydrological models are crucial tools for effective management in water basins, simplifying complex basin structures to analyze the hydrological cycle and related processes. Hydrological models have application range from water resource planning to hydrological research. Especially in recent years hydrological models are frequently used in studies examining the interaction of drought, flood, and climate change and land use change on flow rates and other hydrological parameters. This research investigates the application of the advanced version of the SWAT model, SWAT+, and the SWAT+ Toolbox in Türkiye, despite the widespread use of the basic SWAT model, Swat+ model has not been utilized in Türkiye. The primary aim of this research is to evaluate the performance of SWAT+ and SWAT+ Toolbox in the South Marmara Basin using performance indicators. SWAT+ hydrological model successfully implemented in the South Marmara basin, which requires detailed data on various factors in the basin such as meteorology, soil properties, topography, and land use. SWAT+ model is designed to be more advanced and flexible than the SWAT model, and we found that SWAT+ Toolbox, which allows the calibration process to be run in an integrated manner without making any additional changes in the model files, provide significant advantages in model setup and operation. Our findings indicate that the performance of the model is above the acceptable level in both the calibration period (NSE 0.596) and the validation period (NSE 0.516), with PBIAS values indicating slight overestimation (PBIAS 1.74%) during calibration and underestimation (PBIAS -9.64%) during validation. This study is the first to demonstrate the similar success of the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox to the basic SWAT model in Türkiye. The flexibility and additional functions provided by the SWAT+ model will contribute to hydrological modeling studies in Türkiye finding indicates that the SWAT+ model can be successfully used in hydrological studies in Türkiye.

* İlgili yazar / Corresponding author: halilemre.kislioglu@tarimorman.gov.tr, +90-246-211-1267

Alıntı / Cite

Kışhoğlu, H.E., Kaplan Bekaroğlu, ŞŞ., Dadaser-Celik, F., (2024). Güney Marmara Havzası'nda SWAT+ Modeli ile Hidrolojik Modelleme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 531-543.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Halil Emre Kışhoğlu, 0000-0002-1852-6970
Şehnaz Şule Kaplan Bekaroğlu, 0000-0003-0917-7219
Filiz Dadaser-Celik, 0000-0003-3623-7723

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.04.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.07.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	10.08.2024
Yayın Tarihi / Published Date	26.09.2024

HYDROLOGICAL MODELLING IN THE SOUTHERN MARMARA BASIN USING SWAT+

Halil Emre KİŞLİOĞLU[†], Şehnaz Şule Kaplan BEKAROĞLU¹, Filiz Dadaser-CELİK²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Highlights

- This study uses SWAT+ and Toolbox in Türkiye, an advanced version of the widely used SWAT model
- The model shows satisfactory performance with a NSE higher than 0.5.
- SWAT+ and Toolbox, found to be successful as SWAT, offer flexibility and functions for hydrological studies in Türkiye.

Purpose and Scope

The main aim of the research is to evaluate the performance of the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox in the Southern Marmara Basin using statistical performance indicators. This research also aims to provide a foundation for future academic studies in Türkiye by evaluating the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox.

Design/methodology/approach

The objectives are achieved by setting up the SWAT+ hydrological model for the Southern Marmara Basin. The calibration process is performed using the SWAT+ Toolbox v0.7.6 by using the Dynamically Dimensioned Search (DDS) algorithm. The theoretical scope of the paper involves hydrological modeling and the practical application of the SWAT+ model and SWAT+ Toolbox.

Findings

Our findings indicate that the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox performed as well as the basic version of the SWAT model. The SWAT+ model provides more flexibility and various functions that will contribute to hydrological modeling studies in Türkiye. The model outputs were evaluated using statistical indicators, and it was found that the model successfully simulated flow.

Research limitations/implications

This research is limited to the Southern Marmara Basin and utilizes available data. Future research could potentially use novel data sources such as global reanalysis data.

Practical implications

Our research shows that the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox can be successfully used in Türkiye, given the data availability and sufficient performance. The flexibility and additional functions provided by the SWAT+ model would enhance modeling in different scenarios. We suggest that the use of the SWAT+ model and SWAT+ Toolbox should be considered in future hydrological modeling studies in Türkiye.

Social Implications (if applicable)

Hydrological modeling tools could support more effective water resource management, which could potentially improve the quality of life for people dependent on these water resources.

Originality

This research utilizes the SWAT+ model coupled with the SWAT+ Toolbox for hydrological modeling in the Southern Marmara Basin. This is the first time that these tools have been used in Türkiye. The paper demonstrates that these tools can provide results comparable to the basic version of the SWAT model, which has been widely used in the country. Our research provides a foundation for future academic studies using the SWAT+ model and the SWAT+ Toolbox.

[†] Corresponding author: halilemre.kislioglu@tarimorman.gov.tr, +90-246-211-1267

1. Giriş (Introduction)

Su havzalarında etkili bir yönetim için toprak, su ve atmosfer arasındaki karmaşık etkileşimin anlaşılması gerekmektedir (Fıstıkoğlu, 1999). Hidrolojik modeller, karmaşık havza yapısını basitleştirerek, hidrolojik döngüyü ve ilgili süreçleri analiz etmekte kullanılan önemli araçlardır (Singh ve Woolhiser, 2002). Havzalardaki temel hidrolojik değişkenlerin analiz edilebilmesi için 19. yüzyılda geliştirilen rasyonel metot; (Mulvaney, 1850) zamanla gelişen bilgisayar teknolojisi ile, havzanın matematiksel ifadeler ile temsil edilebildiği Stanford Watershed Model (Crawford ve Linsley, 1966) modeline bir gelişim süreci göstermiştir (Peker ve Cüceloğlu, 2022). Günümüzde ise birçok farklı hidrolojik modeller geliştirilmiş olup, bu modeller genel çerçevede üç ana sınıfta incelenebilir: yağış-akış ilişkisinin ampirik olarak incelendiği metrik modeller, yağış-akış ilişkisinin matematiksel olarak kavramsallaştırıldığı ve her bir hidrolojik model biriminin bu akış ilişkisine göre ayarlandığı kavramsal modeller ve model simülasyonunun fizik yasaları, enerji ve su bilançosu hesaplamalarına göre yapıldığı fiziksel modeller (Duygu, 2021). Son yıllardaki hidrolojik modellerdeki bu gelişmeyi bilim insanları "Hidrolojik Model Bolluğu (Plethora of hydrological models)" olarak tanımlamaktadır (Clark vd., 2011). Bu model çeşitliliği doğal sistemlerdeki heterojenliklerin ölçülmesi ve temsil edilebilmesindeki zorluklara bağlanabilen, havza ölçeğindeki çevresel dinamiklerle ilgili yetersiz bilimsel kavrayışın bir belirtisidir (Clark vd., 2011). Modellerin bu çeşitliliği, kullanım alanlarındaki farklılıklardan ve bu kullanım alanlarındaki özel gereksinimlerden de kaynaklanmaktadır. Hamalainen (2015) buna paralel olarak her ihtiyacı karşılayabilecek tek bir geçerli model olmadığını vurgulamaktadır.

Hidrolojik modeller su kaynaklarının planlanmasından hidrolojik araştırmalara uzanan geniş bir kullanım alanına sahiptir. Son yıllarda havzalardaki değişimlerin, kuraklık, taşkın ve iklim değişikliğinin akış ve diğer hidrolojik parametrelere olan etkileşiminin incelendiği çalışmalarda hidrolojik modeller sıklıkla kullanılmaktadır (Zang vd., 2017). SWAT (Soil and Water Assessment Tool – Toprak ve Su Değerlendirme Aracı) modeli, nehir havzası ölçeğinde kullanılan fiziksel bir hidrolojik modeldir. Havzadaki meteorolojik, toprak özellikleri, topografya, arazi kullanımı gibi çeşitli faktörler hakkında ayrıntılı veriler gerektiren bu model, disiplinler arası havza modellenmesi için uluslararası ve ulusal düzeyde yaygın olarak kullanılan, kabul görmüş bir modeldir (Swalih ve Kayha, 2020; Peker ve Cüceloğlu, 2022). Öte yandan, Peker ve Cüceloğlu'nun 2022 yılındaki çalışmasında SWAT modelinin, açık kaynak yapısı, kapsamlı destek kaynakları ve CBS ortamlarıyla entegrasyonu nedeniyle ülkemizdeki araştırmacılar tarafından yaygın olarak tercih edildiği ortaya konulmuştur. SWAT modeli son yıllarda detaylı bir revizyon süreci geçirmiş ve SWAT+ adında yeni bir versiyon ortaya çıkmıştır (Biergen vd., 2016). SWAT+ su kaynakları yönetimindeki mevcut ve gelecekteki zorlukları ele almayı ve kodlamayı geliştirmeyi, veri analizini ve görselleştirmeyi desteklemeyi ve havzalar içindeki mekânsal temsili geliştirmeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda, SWAT'a kıyasla yönetim programlarını tanımlama, bileşenleri öteleme ve yönetilen akış sistemlerini doğal akış ağına bağlama ve mekânsal temsil konusunda daha fazla esneklik sunmaktadır (Biergen vd., 2016).

SWAT+ modeli, belirsizliklerin azaltılması ve model etkinliğinin sağlanması için gerekli olan parametre kalibrasyonu, hassasiyet ve belirsizlik analizi gibi karmaşık süreçleri içerir. Kalibrasyon süreci, gözlemlenen verileri kullanarak parametreleri ayarlarken, doğrulama süreci bu parametreleri değiştirmeden model sonuçlarını gözlemlerle karşılaştırır. Bu çalışmalar, uzmanlık ve zaman gerektirir ve manuel olarak veya optimum parametre değerlerini bulmak için optimizasyon algoritmaları kullanılarak otomatik olarak yapılabilir. SWAT+ ve SWAT modellerinin kalibre edilmesi ve doğrulanması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Harifidy vd., 2024). Günümüzde SWAT modelini kalibre etmek ve doğrulamak için SWAT-CUP (Abbaspour vd., 2007), IPEAT+ (Yen vd., 2019), R-SWAT (SWAT için R ortamı) (Nguyen vd., 2022), SWAT+ Editor (Bieger vd., 2017) ve SWAT + Toolbox (Chawanda, 2021) gibi yazılımlar ve/veya araçlar geliştirilmiştir.

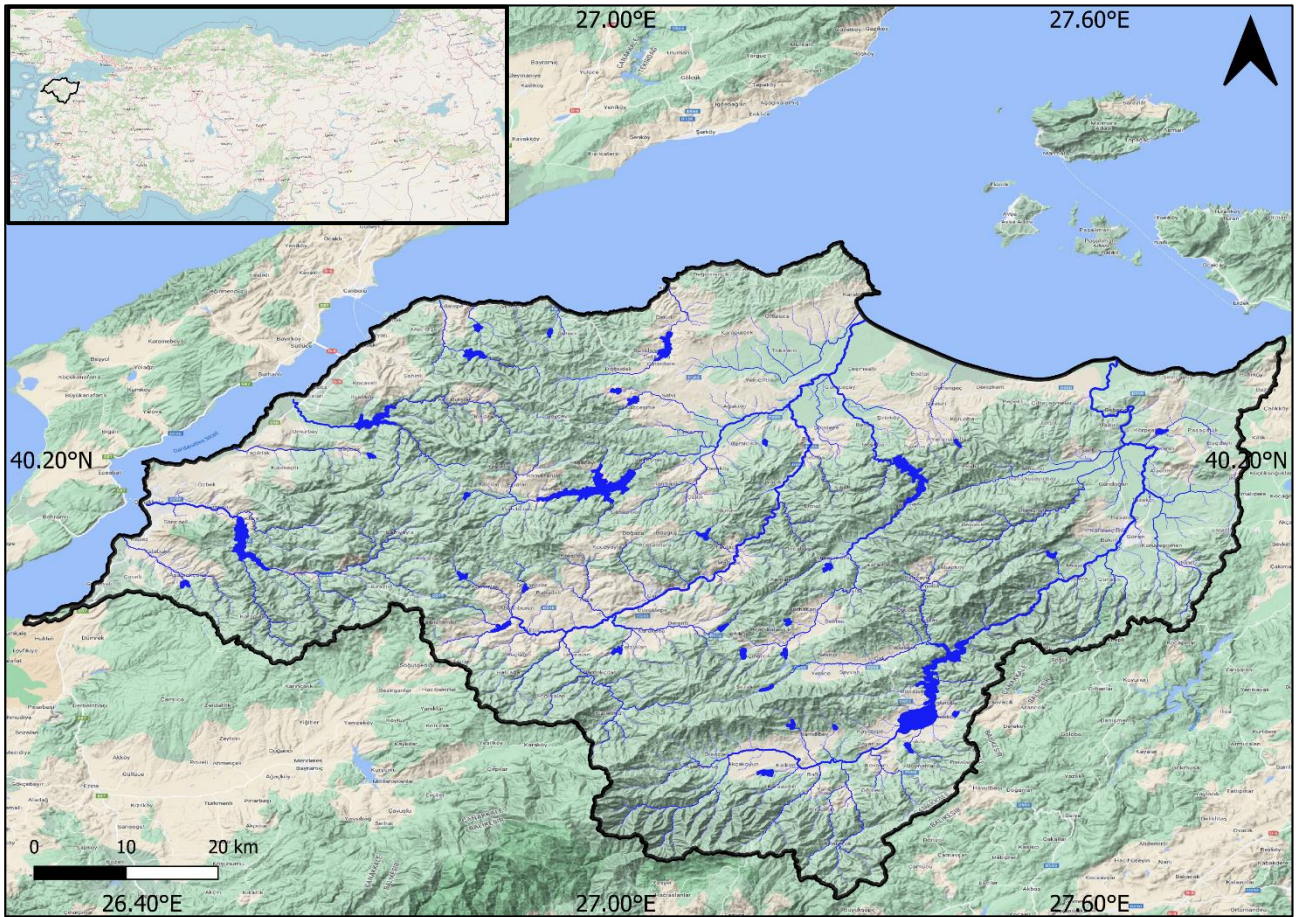
Peker ve Cüceloğlu (2022) çalışmalarında, Türkiye'de SWAT modelinin kullanıldığı çalışmaları incelemiş ve kalibrasyon ve doğrulama sonuçlarının genellikle tatmin edici eşiği aştığını belirtmiş (R^2 ve NSE değerleri 0,5'in üstünde) ve SWAT modelinin Türkiye'de incelenen havzalar için kabul edilebilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Güncel çalışmalar incelendiğinde, Türkiye'de SWAT modeli çeşitli havzalarda başarıyla uygulandığı görülmektedir. Oruç ve diğerleri (2022), Saz-Çayırova havzasında toprak verisi kalitesinin SWAT modeli akış tahmin performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Keleş Özgenç (2024) ise Gala Gölü Havzası'nda arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkilerini SWAT modeli ile değerlendirmiştir. Jauma ve Dadaser-Celik, 2021 yılında yaptıkları çalışmada, Swat modelini yarı kurak iklimde sahip ve akışların üzerinde insan müdahalesi olan kapalı bir havzada kullanarak SWAT modelinin tatmin edici sonuçlar verdiğini değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, SWAT modelinin Türkiye'deki çeşitli hidrolojik ve çevresel süreçleri modellemede etkinliğini ortaya koymaktadır. Ülkemizde SWAT modeli genel olarak başarılı sonuçlar elde edilmiş olsa da SWAT modelinin gelişmiş versiyonu olan SWAT+ modelinin yapılan literatür aramasında henüz ülkemizde uygulanmadığı görülmektedir. Buna ek olarak, SWAT modeli Güney Marmara Havzası'nda daha önce uygulanmamıştır. Literatür incelendiğinde SWAT+ Toolbox yazılımının da ülkemizdeki çalışmalarda henüz kullanılmadığı görülmüştür. Bu kapsamda bu çalışmanın temel amacı; SWAT+ ve SWAT+ Toolbox yazılımının

Güney Marmara Havzası'ndaki performansının literatürdeki performans göstergeleri kullanılarak değerlendirilmesidir. Buna paralel olarak bu çalışmadaki ana araştırma sorusu, "Güney Marmara Havzası'ndaki akarsu akışının simüle edilmesinde SWAT+ modeli ve SWAT+ Toolbox yazılımının performansı hangi düzeydedir?" olarak belirlenmiştir. SWAT+ modelinin SWAT modeline göre daha gelişmiş ve esnek olması ve modelleme çalışmalarının en karmaşık noktalarından biri olan kalibrasyon aşamasının SWAT+ ile tam uyumlu SWAT+ Toolbox ile model dosyalarında ek bir değişiklik yapılmadan bütünleşik bir biçimde çalıştırılabilir olması model kurulumunda ve çalıştırılmasında ciddi avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda, ülkemizde SWAT+ modelinin ve SWAT+ Toolbox yazılımının değerlendirilmesi gelecekteki akademik çalışmalar için bir altlık olacaktır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Güney Marmara Havzası Türkiye'nin kuzeybatısında bulunur (Şekil 1). Havza Çanakkale ve Balıkesir illerinin bir kısmını kapsamaktadır. Güney Marmara havzasındaki başlıca akarsular; Gönen Çayı, Biga Çayı, Umurbey Çayı, Çanakkale Çayı'dır. Havzada aktif olarak kullanılan 40'tan fazla depolama tesisi mevcuttur. Bu depolama tesislerinden en önemlileri, Bakacak Barajı, Taşoluk Barajı, Atikhisar Barajı, Umurbey Barajı, Bayramdere Barajı, Kaynarca Barajı ve Gönen Barajı'dır. Hidrolojik modelleme çalışması 5541 km²'lik bir alanda yürütülmüştür. Havzadaki uzun yıllar ortalama yağış 615 mm ve en yağışlı aylar Kasım, Aralık ve Ocak aylarıdır.



Şekil 1. Çalışma Alanı (Güney Marmara Havzası) (Study Area (South Marmara Basin))

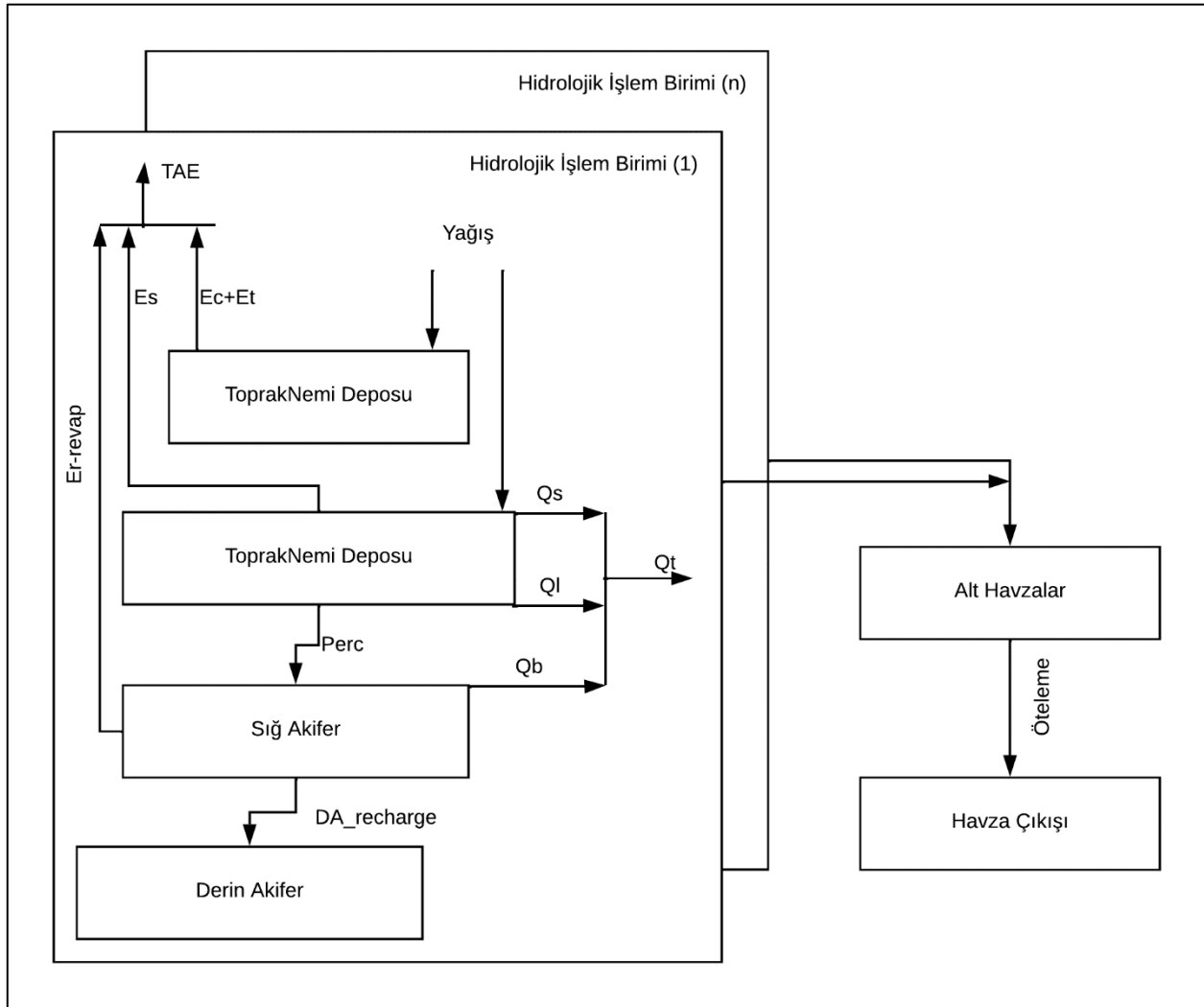
2.2. Modelin Tanımlanması (Model Description)

SWAT+ modeli fiziksel tabanlı, yarı-dağılımlı bir hidrolojik modeldir. SWAT+ modelinin temel hidrolojik bütçe denklemi Denklem 1’de verilmektedir.

$$\text{Depolamadaki Değişim SWAT+} = P - \text{Surq} - \text{Pr} - \text{Latq} - \text{ET} \quad (1)$$

Burada: P yağış; Surq yüzeysel akış; Pr sızma; Latq yatay akış ve ET evapotranspirasyondur.

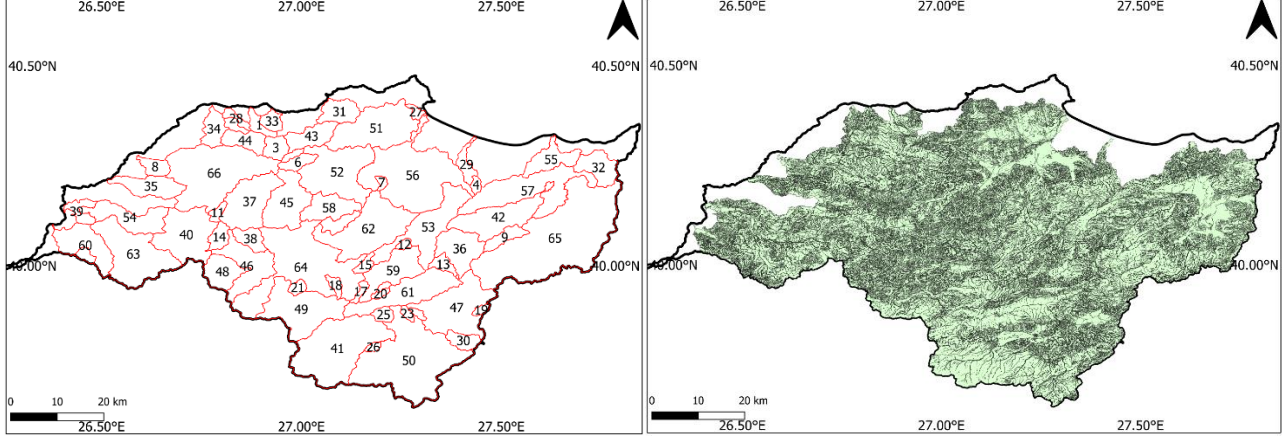
SWAT modelinin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmektedir. Buna göre hidrolojik süreç, yağış ile başlamaktadır. Şematik gösterimdeki kutular depolama birimi olarak kullanılır. Yağış örtü katmanına ve toprak yüzeyinde düşer ve buradan bitkiden terleme (Et) ve örtü yüzeyinden buharlaşma (Ec) ile bir kısmı kayıp olur. Toprak nemi deposundaki (SM) suyun bir kısmı toprak yüzeyinden buharlaşır (Es) diğer kısmı ise sızma ile (Perc) sığ akifer deposuna (SA) boşalırken diğer kısmı yüzeysel ve yanal akış ile toplam akışa katılır (Qs ve Ql). Sığ akiferdeki suyun bir kısmı baz akım (Qb) olarak toplam akışa katılır ve bir kısmı da derin akifere (DA) geçip hidrolojik süreçten çıkar. Sığ akiferdeki suyun bir diğer kısmı da kapiler kuvvet tarafından çekilerek buharlaşmaya eklenir (Er).



Şekil 2. SWAT Modeli Şematik Gösterimi. TAE toplam gerçek evapotranspirasyon; Ec örtü yüzeyinden buharlaşma, Es toprak yüzeyinden buharlaşma; Et bitkilerden terleme, Perc toprak nemi deposundan sığ akifere sızma; Er-Revap sığ akiferden buharlaşma; Qt toplam akış; Qb baz akım; Ql yanal akış ve Qs yüzeysel akış. (Marhaento vd., 2017’den düzenlenmiştir.) (Schematic Representation of SWAT Model TAE total actual evapotranspiration; Ec evaporation from the canopy surface, Es evaporation from the soil surface; Et transpiration from plants; Perc infiltration from soil moisture storage to the shallow aquifer; Er-Revap evaporation from the shallow aquifer; Qt total flow; Qb base flow; Ql lateral flow and Qs surface flow. (modified from Marhaento vd., 2017.)

2.3 Hidrolojik İşlem Birimleri ve Girdi Verileri (Hydrologic Response Units and Input Data)

SWAT+ modeli su döngüsü bileşenlerini tahmin etmek için geliştirilmiş fiziksel tabanlı yarı dağılımlı bir hidrolojik modeldir (Arnold ve Allen, 1996; Zhang vd., 2016; Singh ve Saravanan, 2020). SWAT+ modeli dijital yükseklik modeli ile birlikte akarsu ağlarını kullanarak havzayı oluşturur. Oluşturulan havza daha sonra alt havzalara ve daha küçük birimler olan hidrolojik yanıt birimlerine (HRUs) ayırır (Şekil 3). Bu modelleme çalışmasında 66 alt havzada toplamda 3975 HRU oluşturulmuştur.



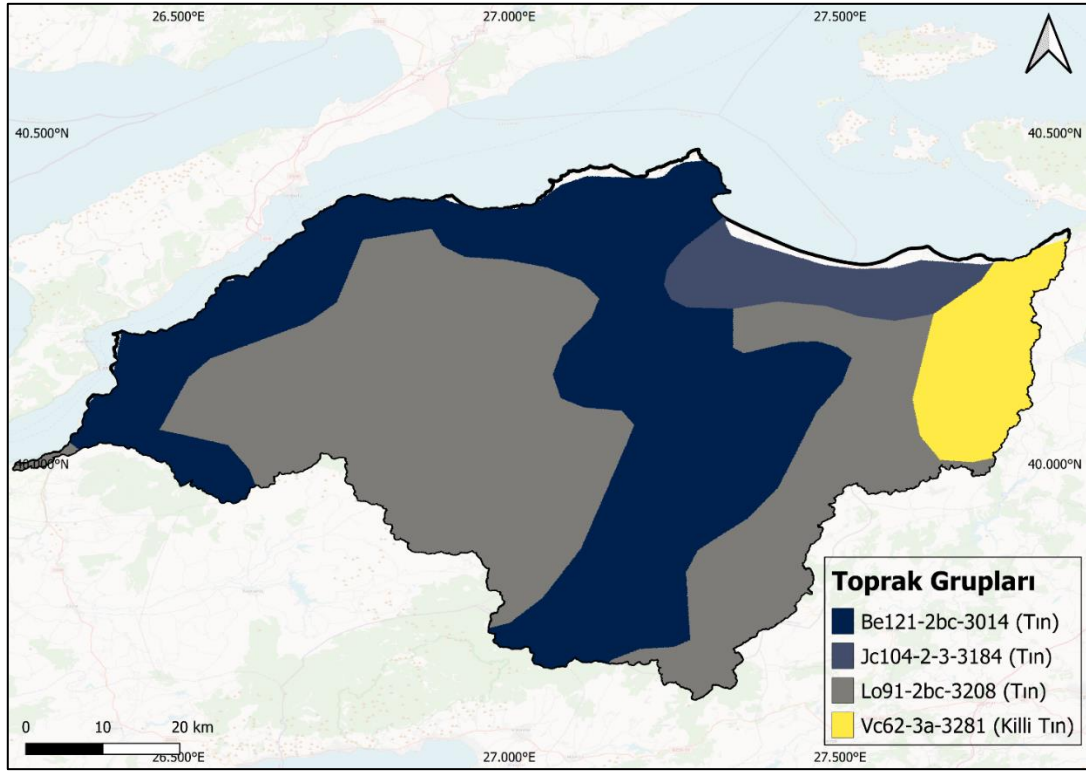
Şekil 3. Alt Havzalar (sol) ve Hidrolojik Yanıt Birimleri (sağ). (Sub Basins (left) and Hydrological Response Units (right))

HRU'lar su bütçesi denkleminde yararlanarak ve birimin toprak kullanımı, toprak tipi ve eğim gibi parametreleri hesaba katarak yüzey akışı, sızma, buharlaşma gibi hidrolojik değişkenleri simüle etmek için kullanılan en küçük birimlerdir. SWAT modelinin çalışma prensibi ile ilgili ayrıntılı teknik bilgilere modelin teknik belgesinden ulaşılabilir (Dile vd., 2022).

Model için kullanılan veriler Tablo 1'de verilmiştir. SWAT+ modelinin önemli bir girdisi olan toprak verisi için Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verileri (Fischer vd., 2008) kullanılmıştır. FAO veri tabanından indirilen vektör biçimindeki veriler raster (geoTiff) formatına dönüştürülmüştür. Raster formatındaki yeni veri öznitelikleri toprak gruplarına göre tekrar kodlanmış ve SWAT+ modeline uygun hale getirilmiştir. Toprak gruplarının SWAT+ modeli tarafından okunabilmesi için, model veri tabanında ilgili toprak gruplarına ait bilgilerin bulunması gerekmektedir. Projedeki toprak gruplarının öncelikle SWAT+ veri tabanındaki varlığı tespit edilmiş, ardından eksik olan toprak gruplarının öznitelik bilgileri SWAT+ veri tabanına eklenmiştir. Şekil 4'de gösterildiği üzere çalışma alanında 4 farklı büyük toprak grubu bulunmaktadır. Havzadaki baskın toprak grupları Lo91-2bc-3208 ve Be121-2bc-3014 olarak tespit edilmiştir.

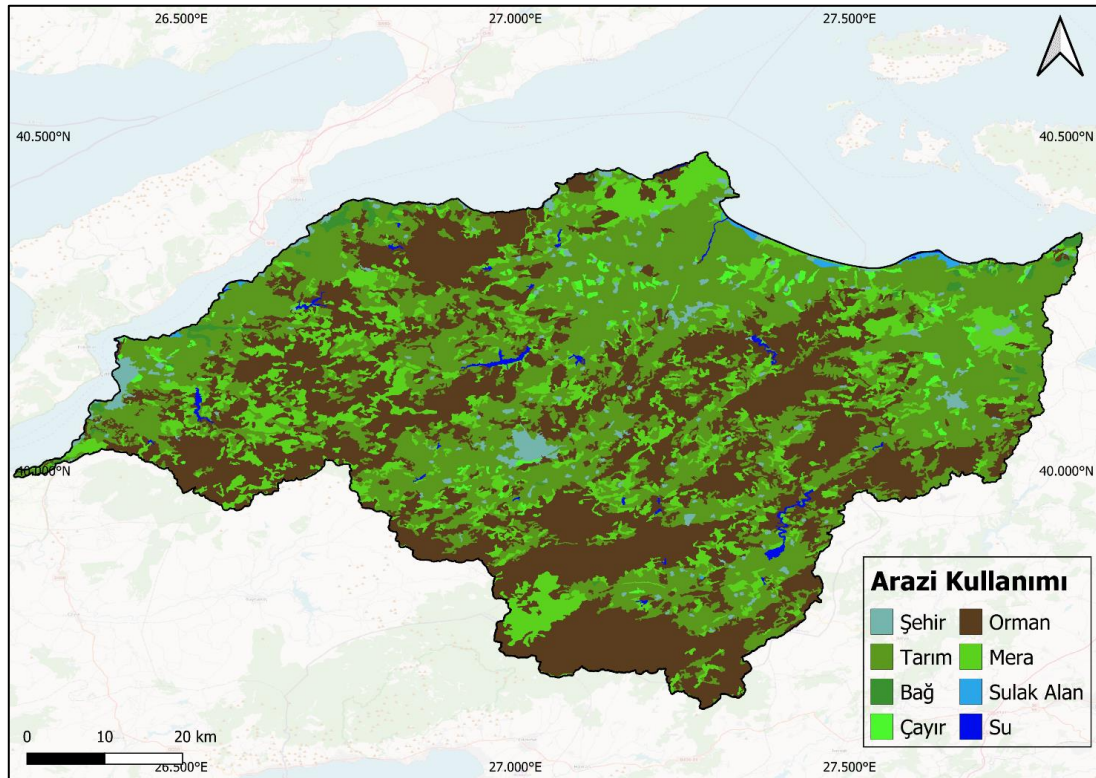
Tablo 1. Veriler (Data)

VERİ	TANIM	YIL/DÖNEM	KAPSAM / ÇÖZÜNÜRLÜK	KAYNAK
Dijital Yükseklik Modeli	EU-DEM	2011	25m x 25m	https://land.copernicus.eu/en
Büyük Toprak Grupları	HWSD v2.0 (Harmonized World Soil Database) FAO-UNESCO	2023	Havza ölçeği	FAO- https://www.fao.org/soils-portal
Arazi Kullanımı	CORINE (Coordination of Information on the Environment)	2018	Havza ölçeği	https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/
Meteoroloji Verileri	Meteorolojik İstasyon Verileri	1980 -2021	Günlük veri	MGM- https://www.mgm.gov.tr/
Akım Verileri	Doğallaştırılmış Akım Verileri	1980 -2021	Aylık Veri	DSİ- https://www.dsi.gov.tr/



Şekil 4. Güney Marmara Havzası Toprak Grupları (FAO, Harmonized world soil database, 2022) (South Marmara Basin Soil Groups (FAO, Harmonized world soil database, 2022))

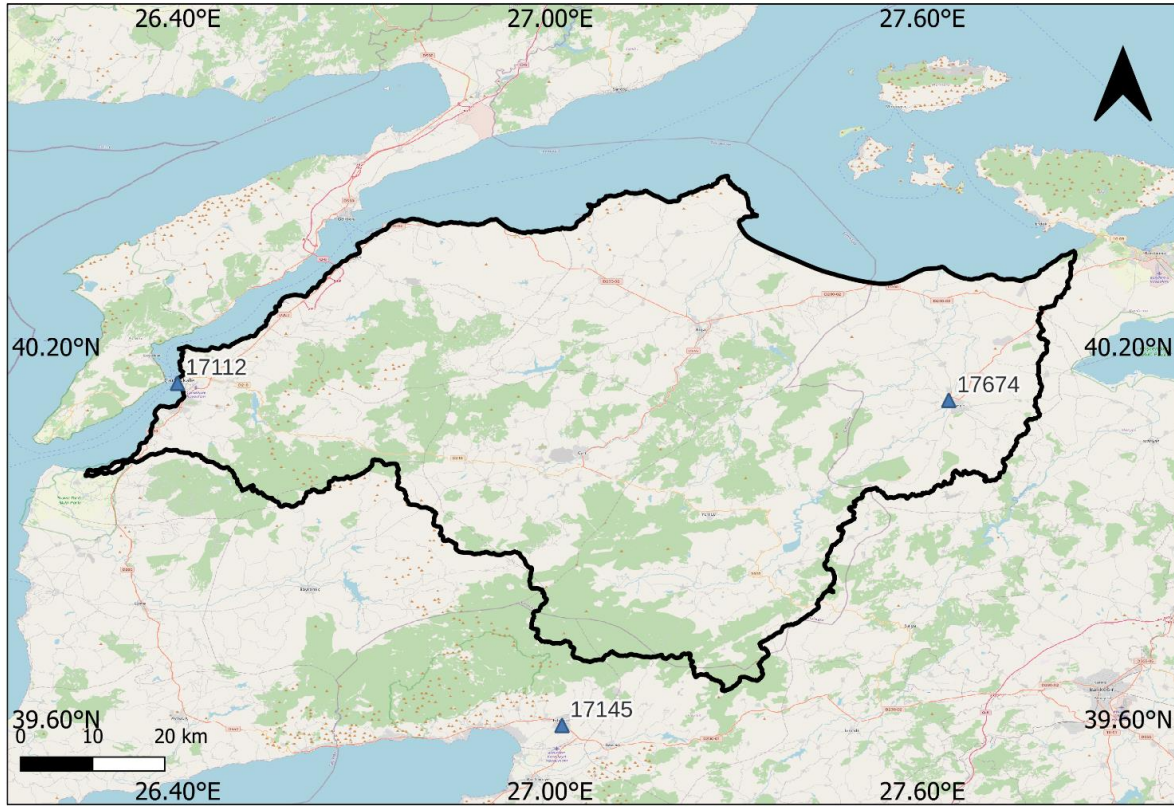
Arazi kullanımı için CORINE 2018 verileri Avrupa Çevre Ajansı'ndan (EEA) temin edilmiştir. CORINE verilerinin SWAT+ modeli tarafından kullanılması için arazilerin yeniden sınıflandırılması gerekmektedir, bu işlem QGIS uygulaması üzerinden kodlama yapılarak gerçekleştirilmiş ve araziler 8 farklı sınıf olacak şekilde tekrar sınıflandırılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Güney Marmara Havzası Arazi Kullanımı (South Marmara Basin Land use)

Meteorolojik veriler ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Modelleme kapsamında veri varlığı ve kalitesi gözlemlenerek N17112, N17674, N17145 kodlu meteoroloji gözlem istasyonları kullanılmıştır (Şekil 6).

Meteorolojik veriler 1980-2021 yılları aralığı için günlük; yağış, maksimum ve minimum sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı verilerini kapsamaktadır.



Şekil 6. Meteoroloji İstasyonları (Meteorological Stations)

2.4 Model Performans Değerlendirilmesi (Model Performance Analysis)

Model performansının değerlendirilmesi için literatürde birçok değişik istatistiksel gösterge bulunmaktadır. Bu çalışmada, literatürde hidrolojik model performansının belirlenmesinde en çok kullanılan göstergelerden olan Nash Sutcliffe etkinlik katsayısı (NSE) amaç göstergesi olarak, Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve Yüzde Sapma (PBIAS) ise yardımcı göstergeler olarak kullanılmıştır.

NSE hidrolojik modellerdeki tahminlerin hatalarını hesaplamak için oluşturulmuş istatistiksel bir göstergedir (Nash ve Sutcliffe, 1970). NSE değeri $-\infty$ ile 1 arasında değişir. NSE katsayısı 1 olduğunda model tahminin mükemmel bir uyum sağladığı ve 1'e yaklaştıkça modelin tahmininin iyileştiği anlamına gelmektedir. Çalışma kapsamında NSE denklem 2 ile hesaplanmıştır.

$$NSE_x = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Xsim(t) - Xobs(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Xobs(t) - Xobsmean)^2} \quad (2)$$

Denklem (2)'de Xobs: Gözlenen akımı, Xsim: Modellenen akımı (simüle akım), Xobsmean: Gözlenen akım ortalaması, Xobs(t): Akımın t anındaki gözlenen değeri, Xsim(t): Modellenen akımın t anındaki değerini göstermektedir.

Bu çalışmada NSE temel performans göstergesi olarak kullanılmıştır. Genel olarak 0 ile 1 arasındaki değerler kabul edilebilir değerlerdir. Sıfırın altındaki değerler modelin performansının kabul edilemeyecek düzeyde olduğunu gösterir. Öte yandan, NSE'nin tavsiye edilen değerleri incelendiğinde 0.50 değeri ve altının yetersiz, 0.50 ile 0.65 aralığının yeterli, 0.65 ile 0.75 aralığının iyi, 0.75 ile 1 aralığının mükemmel olduğu belirtilmektedir (Moriasi vd., 2007).

RMSE, modellenen değişkenin ortalama hatasını gösterir (Armstrong ve Collopy, 1992). Mükemmel bir tahmin $RMSE=0$ sonucunu verirken, bu değer sıfıra yaklaştıkça modelin tahmininin iyileştiği anlamına gelir. Çalışma kapsamında RMSE Denklem 3 ile hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

Denklem (3)'de x ve y karşılaştırılan verileri, n verilerin sayısını göstermektedir.

PBIAS, simüle akımların gözlemlerden sapma miktarının bir göstergesidir. Mükemmel bir tahminde PBIAS=0 olur. Ayrıca PBIAS değeri 0'a yaklaşması modelin tahmininin iyileştiği anlamına gelir. Çalışma kapsamında PBIAS Denklem 4 ile hesaplanmıştır.

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^t Xobs(t) - \sum_{t=1}^t Xsim(t)}{\sum_{t=1}^t Xsim(t)} \cdot 100 \quad (4)$$

Denklem (4)'de, Xobs(t): Akımın t anındaki gözlenen değeri, Xsim(t): Modellenen akımın t anındaki değerini göstermektedir.

2.5. Kalibrasyon ve Doğrulama (Model Calibration and Validation)

SWAT+ modelinde birçok parametre bulunmaktadır; dolayısı ile bu parametrelerin el ile kalibrasyonu çok karmaşık ve zaman alan bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmada SWAT+ Toolbox v0.7.6 (Chawanda, 2021) kullanılarak Dynamically Dimensioned Search (DDS) algoritması yardımıyla kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır. DDS algoritması kalibre edilmek istenen parametreler için öncelikle daha geniş aralıklarda değerler belirler. Ardından dinamik ve olasılıksal azaltma tekniklerini kullanarak değerleri bulunan en iyi değer yakınlarında iterasyon sayısı kadar değiştirerek amaç fonksiyonunu en iyi değere çıkartmaya çalışır (Tolson ve Shoemaker, 2007).

SWAT+ modelinin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için tüm girdilerin modelin formatına uygun ve eksiksiz olarak girilmesi gerekmektedir. Modelin kurulumu yapıldıktan sonra modelin çalıştırılması ve değerlendirilmesi için, ısınma, kalibrasyon ve doğrulama dönemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ısınma dönemi 3 yıl (1980-1982), kalibrasyon dönemi 18 yıl (1983-2000) ve doğrulama dönemi 20 yıl (2001-2021) olarak seçilmiştir. Kalibrasyon için seçilen parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Kalibrasyon sürecinde amaç fonksiyonu için NSE göstergesinin yükseltilmesi (1'e yaklaşması) hedeflenmiştir.

Tablo 2. Kalibrasyon Parametreleri ve Değerleri (Calibration Parameters and Values)

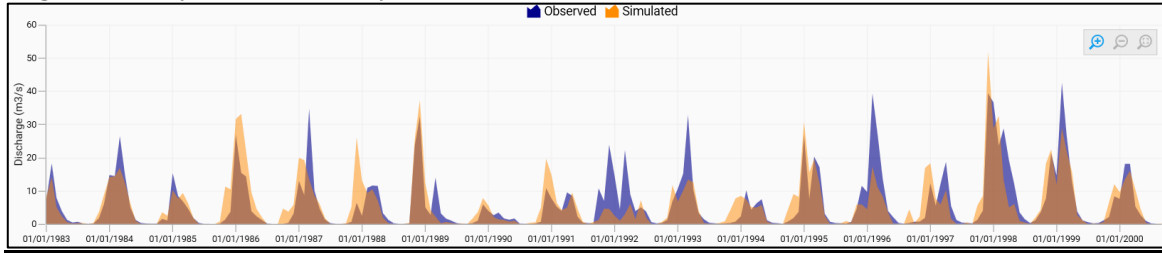
PARAMETRE	PARAMETRE GRUBU	BİRİM	KALİBRASYON DEĞERİ
alpha	Aqu	days	-5.389
awc	sol	mm_H20/mm	7.673
bd	sol	mg/m**3	-16.769
bd	rte	mg/m**3	2.148
canmx	hru	mm/H20	-18.961
chd	rte	m	28.588
chl	rte	km	-21.116
chw	rte	m	6.723
cn2	hru	no unit	-18.512
cn3_swf	hru	no unit	0.901
elev	hru	m	-5.062
epco	hru	no unit	0.014
esco	hru	no unit	0.535
flo_min	aqu	mm	-18.301
lat_len	hru	m	7.352
lat_ttime	hru	days	6.302
perco	hru	fraction	0.825
petco	hru	fraction	27.062
revap_co	aqu	no unit	0.179
slope	hru	m/m	-17.881
snofall_tmp	hru	degrees	0.965
snomelt_lag	hru	no unit	0.337
snomelt_max	hru	mm/deg/c/day	2.103
snomelt_min	hru	mm/deg/c/day	4.727
snomelt_tmp	hru	degrees	2.179
usle_p	hru	no unit	-8.395
z	sol	mm	-4.288

SWAT+ Toolbox, gelişmiş görselleştirme için QGIS ile entegrasyonuna sahiptir ve ayrıca hassasiyet analizi ve kalibrasyon için kapsamlı işlevler sunar. Kullanıcı dostu bir arayüz, çoklu nokta kalibrasyon desteği, çeşitli hassasiyet analizi yöntemleri ve potansiyel sorunları belirlemek için modelleme kontrol özellikleri sunar (Chawanda, 2021). QGIS entegrasyonu, verilerin daha iyi yorumlanmasını kolaylaştırarak gelişmiş görselleştirme ve kolay erişilebilirlik sağlar (Harifidy ve diğerleri, 2024; Pulighe ve diğerleri, 2021). SWAT+ Toolbox, tek bir platform üzerinde hassasiyet analizi, manuel ve otomatik kalibrasyon yapma yeteneğine sahiptir (Harifidy vd., 2024, Chawanda, 2021). DDS algoritması, karmaşık kalibrasyon işleminin verimli bir şekilde yapılmasına olanak tanır (Tolson ve Shoemaker, 2007). Ancak Harifidy ve ark. (2024), SWAT+ Toolbox'ın, R-SWAT gibi alternatiflere kıyasla daha fazla işlem süresi gerektirebileceğini ve bunun zamana duyarlı çalışmalar için bir sınırlama olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca SWAT+ Toolbox şu anda sadece Microsoft Windows işletim sistemleriyle uyumludur (Chawanda, 2021).

SWAT+ Toolbox, kullanıcı dostu arayüzü ve karmaşık havzalardaki akışı simüle etmedeki iyi performansı nedeniyle çalışmamız için seçilmiştir. Ayrıca SWAT+ Toolbox Türkiye'de hiç kullanılmadığı ve araştırma sorusu ile uyumlu olduğu için bu çalışmada kullanılmıştır.

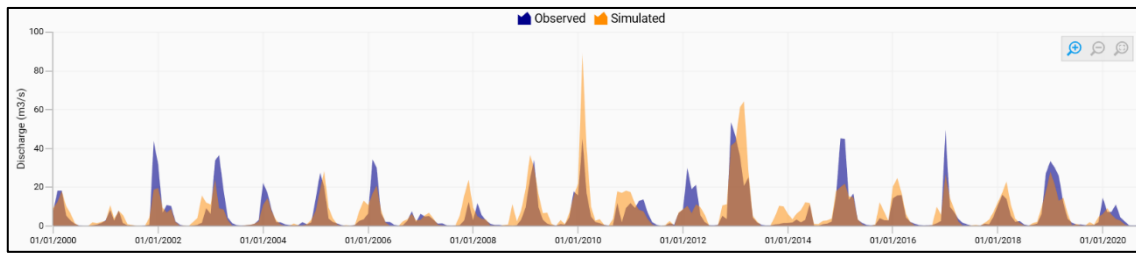
4. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Kalibrasyon dönemi için simüle akış – gözlenen akış grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Kalibrasyon döneminde model performans parametrelerine bakıldığında (Tablo 3) model performansının (NSE 0.596) tatmin edici düzeyin üzerinde olduğu görülmektedir. Öte yandan, PBIAS göstergesi modelin bu dönemde %1.742 düzeyinde fazla akım ürettiğini göstermektedir. PBIAS değerinin %10'dan düşük olması durumu modelin iyi bir performans gösterdiğini belirtir (Moriasi vd., 2007).



Şekil 7 / Figure 7. Kalibrasyon Dönemi: Gözlenen (Mavi) ve Modellenen (Turuncu) Akım İlişkisi (Calibration Period: Relationship Between Observed (Blue) and Simulated (Orange) Flow)

Doğrulama dönemi için simüle akış – gözlenen akış grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Bu dönemde de model performans parametrelerine bakıldığında (Tablo 3) model performansının (NSE 0.516) tatmin edici düzey üzerinde olduğu görülmektedir. Kalibrasyon dönemin aksine, doğrulama döneminde PBIAS göstergesi modelin %9.64 düzeyinde daha az akım ürettiği görülmektedir. %10'dan düşük olan PBIAS değerleri modelin hem kalibrasyon hem de doğrulama dönemlerinde iyi bir performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 8 / Figure 8. Doğrulama Dönemi: Gözlenen (Mavi) ve Modellenen (Turuncu) Akım İlişkisi (Validation Period: Relationship Between Observed (Blue) and Simulated (Orange) Flow)

Kalibrasyon ve doğrulama dönemlerinde hesaplanan performans göstergeleri sonuçları (Tablo 3) modelin kabul edilebilir düzeyin üzerinde olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Model Performansı (Model Performance)

	NSE	MSE	RMSE	PBIAS
Kalibrasyon Dönemi (1983-2000)	0.596	31.324	5.597	1.742
Doğrulama Dönemi (2001-2021)	0.516	54.143	7.358	-9.640

Hidrolojik veriler, hidrolojik süreçleri anlamak, modeller geliştirmek, su kaynakları ve afet tahminleri yapmak ve su miktarı ile kalitesini izlemek için temel girdilerdir. Ancak doğru ve kesin hidrolojik verilerin elde edilmesi, uzun süredir tartışılan bir zorluktur. (McMillan vd, 2018). Bölgedeki istasyon mevcudiyetinden dolayı bu çalışmada

sadece 3 meteoroloji istasyonu kullanılmıştır. Büyük ölçekli havzaların hidrolojik modellemesi söz konusu olduğunda, meteoroloji istasyonları genellikle yetersiz kalmaktadır (Probst ve Mauser, 2022). Öte yandan, gelişen teknoloji ile modern sistemler (uydu, radar vb) hidroloji bilimine veri sağlayabilmektedir (Aksu ve Korkmaz, 2019). Özellikle hidrolojik modelleme gibi kapsamlı çalışmalarda, küresel re-analysis gibi yüksek çözünürlüklü, meteorolojik veri setlerine ihtiyaç giderek artmaktadır (Probst ve Mauser, 2022). Bu çalışmada tatmin edici sonuçlar alınmış olsa da, havzanın boyutu ele alındığında daha fazla istasyona ihtiyaç duyulduğu söylenebilir.

Öte yandan, model performansı arazi kullanımı ve toprak verisi gibi girdi verilerinin kalitesinden de önemli ölçüde etkilenebilir. Avrupa'da yapılan çalışmalar, CORINE (arazi kullanımı) verilerinin genel olarak yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu göstermektedir (Aune-Lundberg ve Strand, 2021). Ancak, CORINE verilerinin Güney Marmara Havzası'ndaki doğruluğu henüz değerlendirilmemiştir. Ateşoğlu, CORINE 2006 verilerinin doğruluğunu Türkiye'deki bazı bölgelerde araştırmış ve doğruluklarının düşük olduğunu tespit etmiştir (Ateşoğlu, 2016). Bu çalışmada her ne kadar CORINE 2018 verilerini kullanılmış olsa da veri kalitesi konusunda bazı belirsizlikler bulunmaktadır.

Gelecekteki araştırmaların, SWAT+ modelinin girdi verileri kapsamında veri kalitesinin ve beraberindeki belirsizliklerin araştırılmasına odaklanması faydalı olabilir. Son yıllarda modelleme çalışmaları, küresel re-analysis gibi yüksek çözünürlüklü, meteorolojik veri kümelerini daha sık kullanmaya başlamıştır (Probst ve Mauser, 2022). Türkiye'de gelecekteki araştırmalar için, hidrolojik modellemede yüksek çözünürlüklü bu veri setlerinin kullanılması ve bu çalışma sonuçlarının değerlendirmesi önerilmektedir. Son olarak, SWAT+ modeli ile diğer hidrolojik modeller arasında karşılaştırmalı çalışmalar yürütmek, bu çalışmaların görece güçlü ve zayıf yönlerine dair değerli bilgiler sağlayabilir.

5. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, SWAT+ modeli ve SWAT+ Toolbox yazılımı ile birlikte Güney Marmara Havzası'na uygulanmıştır. Çalışmada, model performansının hem kalibrasyon döneminde (NSE 0,596) hem de doğrulama döneminde (NSE 0,516) tatmin edici olduğunu bulunmuştur. Sonuçlar SWAT modelinin Türkiye için kabul edilebilir sonuçlar sağladığı yönündeki literatürü desteklemektedir. Buna ek olarak bu çalışmada ülkemizde ilk defa kullanılan SWAT+ modeli ve SWAT+ Toolbox yazılımı, SWAT modelinin temel versiyonuna benzer bir başarı gösterdiği ilk defa ortaya konulmuştur. SWAT+ modelinin sağladığı esneklik ve ek fonksiyonlar ülkemizdeki hidrolojik modelleme çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Bu çalışma ile, havzada gelecekte yapılacak çalışmalarda SWAT+ modelinin başarılı bir şekilde kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Sonuçlar, SWAT+ modelinin gelişmiş ve esnek özelliklerinin model kurulumu ve çalıştırılması açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, SWAT+ modelinin Güney Marmara Havzası'ndaki uygulama ve değerlendirmesine öncülük ederek bu konuda literatüre katkı sağlamaktadır. SWAT+ Toolbox yazılımı kullanılarak kalibrasyon ve doğrulama yaptığımız SWAT+ modeli, bu karmaşık Akdeniz havzasında nehir akışını etkili ve doğru bir şekilde simüle etmiştir. Bu bağlamda çalışma, Türkiye'de SWAT modeli kullanılarak yapılan diğer çalışmalarla tutarlı sonuçlar göstermiştir.

SWAT+ Toolbox yazılımı gelişmiş özellikler sunmasına rağmen R-SWAT gibi alternatiflere kıyasla daha fazla işlem süresi gerektirmektedir (Harifidy ve diğerleri, 2024). Bu nedenle araştırmacılar, kendi özel araştırma amaç ve hedeflerine göre uygun SWAT yan araçlarını belirlemelidir.

Öte yandan, gelecekteki çalışmaların, SWAT+ ve SWAT+ Toolbox yazılımlarının farklı havza ve iklim koşullarında ne kadar etkili olduğunu araştırması önem taşımaktadır. Özellikle büyük ölçekli veya zaman açısından kritik projeler için SWAT+ Toolbox yazılımının hesaplama verimliliğinin artırılması gerekmektedir. Ayrıca, Türkiye'de yüksek çözünürlüklü ve modern yöntemlerle elde edilen meteorolojik veri setlerinin SWAT+ ile nasıl entegre edilip kullanılabileceği konusu önemlidir. Bu tür çalışmalar, SWAT+ ve diğer hidrolojik modeller arasındaki performans farklılıklarını Türkiye bağlamında anlamamıza yardımcı olacak ve böylece su kaynakları yönetimi stratejilerini optimize etmemizde değerli bilgiler sunacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Halil Emre Kışlıoğlu'nun doktora çalışmasının bir parçasıdır. Değerli danışman hocalarıma ve eşime katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., ... & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333(2-4), 413-430.
- Aksu, H., Korkmaz, M. S., (2019). Türkiye’de Hidrolojik Veri Yönetimi ve Üniversitelerin Katılımı ABD Örneği, *Mühendislik Bilimler ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 699-704.
- Armstrong, J. S., & Collopy, F. (1992). Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons. *International journal of forecasting*, 8(1), 69-80.
- Arnold, J. G., & Allen, P. M. (1996). Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of hydrology*, 176(1-4), 57-77.
- Ateşoğlu, A. (2016). Havza çalışmalarında kullanılan CORINE 2006 arazi sınıflandırma verilerinin doğruluğunun araştırılması. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 66(1), 173-183.
- Aune-Lundberg, L., & Strand, G. H. (2021). The content and accuracy of the CORINE Land Cover dataset for Norway. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102266.
- Bai, J., Shen, Z., & Yan, T. (2017). A comparison of single- and multi-site calibration and validation: a case study of SWAT in the Miyun Reservoir watershed, China. *Frontiers of Earth Science*, 11, 592-600.
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., ... Srinivasan, R. (2016). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115–130. doi:10.1111/1752-1688.12482
- Chawanda, C.J. (2021). SWAT+ Toolbox: User Manual; SWAT+, Soil & Water Assessment Tool. Available online: <https://www.openwater.network/assets/downloads/SWATplusToolboxUserManual.pdf>.
- Clark, M. P., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2011). Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 47(9).
- Crawford, N. H., & Linsley, R. K. (1966). *Digital Simulation in Hydrology* Stanford Watershed Model 4.
- Dile, Y., Srinivasan, R., & George, C. (2016). QGIS Interface for SWAT (QSWAT). Version, 1, 25.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson Jr, E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water resources research*, 16(2), 297-302.
- Duygu, M. B. (2021). Opportunities and challenges in using soil moisture from cosmic ray neutron sensing for rainfall-runoff modelling.
- FAO. (2022). Harmonized world soil database v1.2. FAO SOILS PORTAL. Available at: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- Fıstıkoğlu, O. (1999) Hidrolojik Modeller. Türkiye İnşaat Mühendisliği 15. Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 799-809, Ankara.
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., van Velthuisen, H. T., Verelst, L., & Wiberg, D. (2008). Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA; FAO.
- Hämäläinen, R. P. (2015). Behavioural issues in environmental modelling–The missing perspective. *Environmental Modelling & Software*, 73, 244-253.
- Harifidy, R. Z., Hiroshi, I., Kazuyoshi, S., Jun, M., Harivelo, R. Z. M., & Fernández-Palomino, C. A. (2024). Multi-gauge calibration comparison for simulating streamflow across the Major River Basins in Madagascar: SWAT+ Toolbox, R-SWAT, and SWAT+ Editor Hard calibration. *Hydrology Research*, nh2024188.
- Jouma, N., & Dadaser-Celik, F. (2021). Assessing hydrologic alterations due to reservoirs and intensified irrigation in a semi-arid agricultural river basin using SWAT. *Irrigation and Drainage*, 71(2), 452–471.
- Keleş Özgenç, E. (2024). Evaluation using the SWAT model of the effects of land use land cover changes on hydrological processes in the Gala Lake Basin, Turkey. *Environmental Quality Management*, 00, 1–15.
- Marhaento, H., Booij, M. J., Rientjes, T. H. M., & Hoekstra, A. Y. (2017). Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. *Hydrological Processes*, 31(11), 2029–2040. doi:10.1002/hyp.11167
- McMillan, H. K., Westerberg, I. K., & Krueger, T. (2018). Hydrological data uncertainty and its implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), e1319.
- Mekonnen, D. F., Duan, Z., Rientjes, T., & Disse, M. (2018). Analysis of combined and isolated effects of land-use and land-cover changes and climate change on the upper Blue Nile River basin’s streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6187-6207.
- Moriyas, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mulvaney, T.J. (1850) On the use of self-registering rain and flood gauges. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 4(2), 1-8.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Nguyen, T. V., Dietrich, J., Dang, T. D., Tran, D. A., Van Doan, B., Sarrazin, F. J., ... & 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.
- Oruç, H. N., Çelen, M., Gülgen, F., Öncel, M. S., Vural, S., & Kılıç, B. (2022). Assessing hydrologic alterations due to reservoirs and intensified irrigation in a semi-arid agricultural river basin using SWAT. *Urban Water Journal*, 20(10), 1592–1607.
- Peker, İ. B., & Cüceloğlu, G. (2022). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye’deki Uygulamaları. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23(1), 9-26.

- Probst, E., & Mauser, W. (2022). Evaluation of ERA5 and WFDE5 forcing data for hydrological modelling and the impact of bias correction with regional climatologies: A case study in the Danube River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101023.
- Pulighe, G., Lupia, F., Chen, H., & Yin, H. (2021). Modeling climate change impacts on water balance of a Mediterranean watershed using SWAT+. *Hydrology*, 8(4), 157. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040157>
- Singh, L., & Saravanan, S. (2020). Simulation of monthly streamflow using the SWAT model of the Ib River watershed, India. *HydroResearch*, 3, 95-105.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270-292.
- Swalih, S. A., & Kahya, E. (2021). Hydrological model optimization using multi-gauge calibration (MGC) in a mountainous region. *Journal of Hydroinformatics*, 23(2), 340-351.
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1).
- Turkes, M. (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 1-32.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359-392.