

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HİDROLOJİK MODEL YAPISININ VE KALİBRASYON ALGORİTMASININ
DEBİ SİMÜLASYON PERFORMANSINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harun ALP

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HİDROLOJİK MODEL YAPISININ VE KALİBRASYON ALGORİTMASININ
DEBİ SİMÜLASYON PERFORMANSINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harun ALP

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Cüneyd Demirel

Eş Danışman: Doç. Dr. Ömer Levend Aşıkoğlu

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501191507 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Harun ALP, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HİDROLOJİK MODEL YAPISININ VE KALİBRASYON ALGORİTMASININ DEBİ SİMÜLASYON PERFORMANSINA ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mehmet Cüneyd Demirel**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Ömer Levend Aşıkoğlu**
Ege Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Veysel Şadan Özgür Kırca**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ömer Lütfi Şen
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cahit Yerdelen
Ege Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Mayıs 2022
Savunma Tarihi : 22 Haziran 2022





Aileme ve dostlarıma,



ÖNSÖZ

Tezim için çalıştığım dönemde bilgisini ve deneyimini cömertçe benimle paylaşan danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Cüneyd Demirel'e, bu süreçte sabrını, hoşgörüsünü ve bilgi birikimini sonuna kadar hissettiren ve beni destekleyen eş danışmanım, hocam Doç. Dr. Ömer Levend Aşıkoğlu'na, kendilerinden önce beni düşünen ve tez çalışmam boyunca motivasyonum olan aileme teşekkür ederim.

Haziran 2022

Harun ALP
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amaç ve Kapsamı	3
1.2 Literatür Araştırması	4
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
2.1 Çalışma Alanı.....	11
2.2 Veri.....	13
2.2.1 Sayısal Yükseklik Modeli (DEM).....	13
2.2.2 Arazi Kullanımı	14
2.2.3 Toprak Haritası	15
2.2.4 Meteorolojik ve Hidrolojik Veriler.....	16
2.3 Hidrolojik Modelleme	24
2.3.1 Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J).....	24
2.3.2 Soil Water Assessment Tool Plus (SWAT+)	29
2.3.3 mesoscale Hydrological Model (mHM)	32
2.4 Kalibrasyon.....	34
2.4.1 Algoritmalar	34
2.4.2 Performans Değerlendirme Kriteri	36
2.4.3 Hassasiyet Analizi ve Debi Kalibrasyonu	37
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
3.1 Hassasiyet Analizi	39

3.2 Kalibrasyon ve Validasyon.....	41
3.2.1 GR4J	41
3.2.2 SWAT+	45
3.2.3 mHM.....	50
3.3 Debi Performansı Karşılaştırması.....	54
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	67



KISALTMALAR

AGİ	: Akım Gözlem İstasyonu
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CFSR	: Climate Forecast System Reanalysis
CMAES	: Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy
DSİ	: Devlet Su İşleri
ECMWF	: European Center for Medium-Range Weather Forecast
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
FAO	: Birleşmiş Milletler - Gıda ve Tarım Örgütü
GR4J	: Génie Rural à 4 paramètres Journalier
LM	: Levenberg-Marquardt
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
mHM	: mesoscale Hydrological Model
NSE	: Nash-Sutcliffe Efficiency
PEST	: Parameter Estimation Tool
SCE	: Shuffled Complex Evolution
SWAT+	: Soil and Water Assessment Tool Plus
UA	: University of Arizona



SEMBOLLER

μ	: Ortalama
σ	: Standart sapma
H	: Hassasiyet
MSE	: Ortalama kare hata
OF	: Amaç fonksiyonu
PBIAS	: Yüzde Bias
PET	: Potansiyel evapotranspirasyon
Q	: Debi
Q^{obs}	: Gözlenmiş debi değeri
Q^{sim}	: Model çıktısı (debi)
RMSE	: Kök ortalama kare hata
RSR	: Kök ortalama hatanın standart sapmaya oranı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Meteorolojik verilerin elde edildiği istasyonlar.	17
Çizelge 2.2 : MGM ve ERA5'a ait aylık ve yıllık veriler.....	20
Çizelge 2.3 : GR4J modelinin kullandığı parametreler ve açıklamaları.	25
Çizelge 2.4 : GR4J modelinin kalibre edilen parametreleri.	37
Çizelge 2.5 : SWAT+ modelinin kalibre edilen parametreleri.	38
Çizelge 2.6 : mHM modelinin kalibre edilen parametreleri.....	38
Çizelge 3.1 : GR4J parametre değerleri.	41
Çizelge 3.2 : SWAT+ parametre değerleri.....	45
Çizelge 3.3 : mHM parametre değerleri.....	50
Çizelge 3.4 : Kalibrasyon periyoduna ait istatistikler.	54
Çizelge 3.5 : Validasyon periyoduna ait istatistikler.	54
Çizelge 3.6 : Debi performansına ait sınıflandırma aralıkları.....	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Toplu, yarı dağılı ve dağılı hidrolojik model yapıları (Koch, 2016).	6
Şekil 2.1 : Gediz Havzası ve çalışma alanının sınırları.	11
Şekil 2.2 : Gediz alt havza dağılımı (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018).	12
Şekil 2.3 : Acısu Havzası lokasyon haritası.	13
Şekil 2.4 : Acısu Havzası DEM verisi.	14
Şekil 2.5 : Acısu Havzası arazi kullanımı haritası.	15
Şekil 2.6 : Acısu Havzası toprak haritası.	16
Şekil 2.7 : Acısu Havzası için kullanılan MGİ istasyonları.	17
Şekil 2.8 : Havzaya dağıtılan ERA5 yağış verisi.	18
Şekil 2.9 : Havzaya dağıtılan MGM yağış verisi.	18
Şekil 2.10 : Havzaya dağıtılan ERA5 ortalama sıcaklık verisi.	19
Şekil 2.11 : Havzaya dağıtılan MGM ortalama sıcaklık verisi.	19
Şekil 2.12 : Günlük bazda MGM ve ERA5 verileri arasındaki ilişki.	19
Şekil 2.13 : ERA5 kaynaklı PET verisi.	21
Şekil 2.14 : MGM verisi ile hesaplanan PET verisi.	21
Şekil 2.15 : ERA5 ve MGM kaynaklı PET verileri arasındaki ilişki.	22
Şekil 2.16 : Türkiye genelinde aylık alansal yağış değerlerinin değişimi.	23
Şekil 2.17 : 523 no'lu AGİ'ye ait akım değerleri.	23
Şekil 2.18 : Acısu Havzasına ait Pardê katsayısı değerleri.	24
Şekil 2.19 : Çalışmada kullanılan hidrolojik model yapıları.	24
Şekil 2.20 : GR4J model yapısı.	26
Şekil 2.21 : SWAT+ modelinin gelişimi.	30
Şekil 2.22 : Toprak fazına ait temsili görsel.	32
Şekil 2.23 : mHM model katmanları.	33
Şekil 3.1 : SWAT+ hassasiyet analizi sonuçları.	39
Şekil 3.2 : SWAT+ hassasiyet analizi sonuçları.	39
Şekil 3.3 : mHM hassasiyet analizi sonuçları.	40
Şekil 3.4 : GR4J - LM debi çıktısı.	42

Şekil 3.5 : GR4J-LM çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	42
Şekil 3.6 : GR4J - SCE debi çıktısı.	43
Şekil 3.7 : GR4J-SCE çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	43
Şekil 3.8 : GR4J - CMAES debi çıktısı.	44
Şekil 3.9 : GR4J - CMAES çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	44
Şekil 3.10 : SWAT+ - LM debi çıktısı.	46
Şekil 3.11 : SWAT+ - LM çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	46
Şekil 3.12 : SWAT+ - SCE debi çıktısı.	47
Şekil 3.13 : SWAT+ - SCE çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	47
Şekil 3.14 : SWAT+ - CMAES debi çıktısı.	48
Şekil 3.15 : SWAT+ - CMAES çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	49
Şekil 3.16 : mHM - LM debi çıktısı.	50
Şekil 3.17 : mHM – LM çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	51
Şekil 3.18 : mHM - SCE debi çıktısı.	52
Şekil 3.19 : mHM – SCE çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	52
Şekil 3.20 : mHM - CMAES debi çıktısı.	53
Şekil 3.21 : mHM – CMAES çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.	53
Şekil 3.22 : Algoritmaların kalibrasyon performansı değerleri.	56
Şekil 3.23 : Algoritmaların validasyon performansı değerleri.	56

HİDROLOJİK MODEL YAPISININ VE KALİBRASYON ALGORİTMASININ DEBİ SİMÜLASYON PERFORMANSINA ETKİSİ

ÖZET

Dünya genelinde gerek tüketimin artması, gerek küresel ısınma gibi etkenlerden ötürü su kaynaklarının korunması gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu bağlamda yapılacak her müdahale, alınacak her önlem öncesinde bir hazırlık ve planlama süreci gerektirir. Günümüzde su yönetimi stratejilerine yön veren hidrolojik modeller, farklı yöntemlerle kurdukları yağış-akış ilişkisi ile başta debi olmak üzere hidroloji bilimine katkıda bulunan ve doğal döngüye dahil olan bir çok kavrama dair çıktılar sunmaktadır. Bu çalışmada hidrolojik döngünün devam edebilmesinde en önemli etkenlerden olan DSİ ve EİE kontrolündeki 523 no'lu akım gözlem istasyonuna ait debi değerleri referans alınarak, bu süreçleri üç farklı yapıda işleyen Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), Soil Water Assessment Tool Plus (SWAT+) ve mesoscale Hydrological Model (mHM) modellerinin ve bu modellere ait parametrelerin kalibrasyonunda kullanılan Levenberg-Marquardt (LM), Shuffled Complex Evolution (SCE) ve Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algoritmalarının performansı Gediz Havzası'nın doğduğu bölge olan, yarı kurak iklim özellikleri taşıyan ve tarımsal faaliyetlerin yaygın olduğu Acısu Havzası için değerlendirilmiştir.

Hidrolojik modeller kullanım amaçlarına göre farklı parametreler ve farklı mekansal çözünürlükler kullanarak verileri işlemektedir. Temeli bir performans karşılaştırmasına dayanan bu çalışmada modellerin ve algoritmaların birleşiminden çıkacak sonuçların tarafsız bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla, üç hidrolojik modelde de ortak olan girdiler için (yağış, sıcaklık, potansiyel evapotranspirasyon) European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) ERA5 kaynağından elde edilen veri setleri kullanılmıştır. 30 km x 30 km çözünürlüğe sahip olan ERA5 verisi, toplu model olan GR4J için tek bir zaman serisi olarak tüm havza ölçeğine, yarı dağılı model olan SWAT+ için alt havzaları temsil edecek ölçeğe ağırlıklı ortalama yöntemi ile indirgenmiştir. mHM modeline ise noktasal veri olarak varsayılan ölçeği ile tanımlanmıştır. Sonrasında modellerin ihtiyaç duyduğu diğer girdiler tanımlanmış (DEM, Arazi Kullanımı, Toprak Haritası vb.) ve kurulum aşaması tamamlanmıştır.

Çalışmanın devamında, hidrolojik modellerin kalibrasyonu yapılmıştır. Bu aşamada kalibrasyon aracı olarak Parameter Estimation Tool (PEST) kullanılmıştır. Kurulan hidrolojik model dosyalarının PEST ile entegrasyonu gerçekleştirilmiştir ve kalibre edilecek parametrelerin belirlenmesi için otomatik hassasiyet analizi yapılmıştır. GR4J modelinin 4 parametresinden 3'ü, SWAT+ modelinin debi üzerinde etkili olan 20 parametresinden 10'u ve mHM modelinin 66 parametresinden 15'i belirlenen eşik değer üzerinde kalibrasyon aşamasında kullanılmıştır. Kalibrasyon için PEST'in içerdiği 1 lokal (LM), 2 global (SCE ve CMAES) yöntem kullanılırken, kalibrasyon periyodu için 1991-2000 yılları, validasyon periyodu için ise 2002-2005 yılları

arasındaki veriler kullanılmıştır. Bu kapsamda üç farklı mekansal çözünürlüğe sahip hidrolojik model yapısının, bir lokal ve iki farklı global yöntem ile kalibre edilerek karşılaştırıldığı ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır.

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular çerçevesinde hidrolojik model yapılarının ve kalibrasyon algoritmalarının debi çıktısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dokuz farklı model-algoritma kombinasyonuna ait debi çıktıları 7 farklı istatistiksel gösterge ile değerlendirilmiştir (NSE, KSE, R^2 , RSR, MSE, RMSE). Amaç fonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) değeri ile kalibre edilen kombinasyonlara ait çıktıların, gözlenmiş değerler ile aralarındaki ilişki incelendiğinde, dağılım model olan mHM modeli ile global yöntemlerden CMAES algoritmasının en yüksek debi performansı gösteren entegrasyon olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ulaşılan sonuçların çalışma alanı kapsamında geçerli olduğu ve genelleştirilebilmesi için farklı özelliklere sahip havzalarda da benzer çalışmanın uygulanması gerektiği belirtilmiştir.



HYDROLOGICAL MODEL STRUCTURE AND CALIBRATION ALGORITHM EFFECT ON DISCHARGE SIMULATION PERFORMANCE

SUMMARY

The protection of water resources is gaining importance day by day due to factors such as increased consumption and global warming. Every intervention to be made in this context requires a pre-process before every measure to be taken. Today, hydrological models that direct water management strategies offer outputs on many concepts that contribute to hydrology, and are included in the natural cycle, with the rainfall-runoff relationship they establish with different methods. In this study, Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), Soil Water Assessment Tool Plus (SWAT+) and mesoscale Hydrological Model (mHM), which processes the cycle in three different structures, are used taking as reference the flow values, which are the most important factors in the continuation of hydrological cycle. The performance of Levenberg-Marquardt (LM), Shuffled Complex Evolution (SCE) and Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algorithms used in the calibration of the models was evaluated for Acısu Basin which is located at the upstream of Gediz Basin.

Hydrological models process data using different parameters and different spatial resolutions according to their intended use. In this study, which is based on a performance comparison, for the inputs (precipitation, temperature, potential evapotranspiration) common to all three hydrological models, the source of European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) ERA5 data set is used to fairly evaluate the results of the combination of models and algorithms. ERA5 data with a resolution of 30 km x 30 km has been downscaled to the whole basin scale as a single time series for the lumped model GR4J, and to the scale to represent sub-basins for the semi-distributed model SWAT+ by weighted average method. For the mHM model it is defined with its default resolution. Afterwards, other inputs required for the models were defined (DEM, Land Use, Soil Map, etc.) and the installation phase was completed.

In the continuation of the study, the calibration of the hydrological models was made. At this stage, the Parameter Estimation Tool (PEST) was used as the calibration tool. The integration of the built hydrological model files with PEST was carried out and automatic sensitivity analysis was performed to determine the parameters to be calibrated. As a result of the sensitivity analysis, 3 of the 4 parameters of the GR4J model, 10 of the 20 parameters of the SWAT+ model that affect the flow rate, and 15 of the 66 parameters of the mHM model were used during the calibration phase above the specified threshold of sensitivity. While 1 local (LM), 2 global (SCE and CMAES) methods included in PEST were used for the calibration, the data between 1991-2000 for the calibration period and 2002-2005 were used for the validation period. In this context, it is the first study in which the hydrological model structure with three different spatial resolutions is calibrated and compared with one local and two different global methods.

In the first chapter, the motivation and goals of the study are mentioned, starting from the concepts of hydrological model and calibration. Additionally, in the next part of the introduction section, literature review is given, which includes similar studies for similar purposes.

At the beginning of the second part, the Acısu Basin represented by the data used is mentioned. The analysis of the data obtained and used for the Acısu Basin, which is located at the beginning of the Gediz Basin, has been shared. Also the data types used in the study are described individually in this part. Digital elevation model (DEM) of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), land use map of Coordination of Information on the Environment (CORINE), soil map of Food and Agriculture Organisation of the United States (FAO), and representation of stations for General Directorate of Meteorology (MGM) data are given with figures and explanations. Afterwards, information about the development and structure of the models is given, and the details of the algorithms used, sensitivity analysis and calibration phase are given. In this part, parameter descriptions and governing equations are given for GR4J, SWAT+ and mHM. The Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) value was used as the objective function in the study.

In the third chapter, the findings obtained as a result of the analyzes carried out with the methods used in the study are given. The final values of the calibrated parameters are shared in the section where the calibration outputs and result tables for each model are found. The outputs of the model-algorithm integrations were examined and the discharge performances were evaluated according to the seven error metrics, including NSE. The error metrics other than NSE are R^2 , Kling-Gupta Efficiency (KGE), mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), percent bias (PBIAS) and the ratio of RMSE to standard deviation (RSR). The equations of these metrics are also given in this part.

In the last part of the study, the conclusions drawn based on results were compiled in bullets form. The findings of this research provide insights for hydrologic modelling as the selection of model type and calibration algorithm greatly affects the discharge performance. The modelers should avoid using local methods as they cannot tackle the local minima issue during the calibration. In case of a flow forecast problem, the use of comprehensive distributed hydrologic model use can be cumbersome. Instead a parsimonious and light lumped model with less number of free parameters and high skill of prediction should be preferred. However, if the model simulations at ungaged basins are important then the use of grid based distributed models is inevitable. Also it is stated that the conclusions are confined with the study area. To generalise these conclusions, similar studies must be performed for basins which have different characteristics.





1. GİRİŞ

Su, canlı hayatı için elzem ve yeri doldurulamaz derecede önemlidir. İnsanlığın varoluşundan bu yana yerleşimler su kaynaklarının ulaşılabilir olduğu yerlerde gerçekleşmiştir. Su olmadan yaşam olmayacağının başlıca göstergelerinden olan bu durum günümüzde de şehirleşmenin ve sanayileşmenin etkilediği başlıca unsurlardan olan su kaynaklarının, korunmasının önemini göstermektedir.

Şehirleşme ve sanayileşme ile birlikte gelen tüketim toplumu anlayışı ile artan sera gazı etkisi ve azalan yeşil alanların sebep olduğu küresel ısınma, gelecekte su kaynaklarımızın korunmasını güçleştirecektir. Küresel ısınmanın doğurduğu iklim değişikliği olgusu, bizleri kuraklık ve taşkınlar gibi tehlikelere karşı hazır olmaya mecbur kılmaktadır. Hidrolojik çevrimi doğrudan etkileyen bu kavramlar, yağış akış ilişkisi üzerinde kilit rol oynamaktadır. Tüketim toplumunun doğal sonucu olarak gün geçtikçe azalan su kaynaklarının, yönetimi ve planlaması insanlığın sürekliliği için önemli bir konumdur. Dolayısıyla bu durum su kaynaklarının verimli olarak kullanılmasını amaçlayan ve sonuçları ile ulusal ve uluslararası kapsamda yönlendirici olabilen hidrolojik model çalışmalarının da önemini gözler önüne sermektedir.

Hidrolojik modeller, iklim modelleri, su kaynaklarının geliştirilmesi ve yönetimi, taşkın yapıları tasarımı, kuraklık ve taşkın tahminleri gibi geniş yelpazeye yayılan bir kullanım alanına sahiptir (Okkan ve Fistikoglu, 2014). Hidrolojik modellerin kapasiteleri mevcut verileri ve imkân dâhilindeki ölçüm teknikleri ile sınırlı iken, modeller sonuçları kapsamında kısıtlı verilerin yetersiz olduğu durumlarda verilerin zamansal ve mekânsal ekstrapolasyonuna olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda geleceğe yönelik simülasyonlar için arazi kullanımında veya iklimdeki değişikliklerin de hidrolojik döngüye etkileri açısından iyi değerlendirilmesi gerekmektedir (Pechlivanidis ve diğ., 2011).

Farklı açılardan sınıflandırılan hidrolojik model yapıları bu çalışmada toplu, yarı dağılı ve dağılı hidrolojik modeller olarak incelenmiştir. Toplu modeller tüm havzayı, havzayı temsil eden değişkenlerin ortalamalarını kullanarak, havzayı tek bir birim olarak ele alır. Genellikle diferansiyel veya ampirik matematiksel denklemlerden

oluşan toplu modeller, havzaya ait girdilerin, sınır koşullarının ve geometrik özelliklerin mekansal değişkenliğini süreç dahilinde hesaplamalara katmamaktadırlar. Dağılı modeller ise havzalara ait bu durum değişkenlerini ve girdileri, havzaları ızgaralara bölerek, bölünen her bir birim içerisinde hidrolojik süreçleri ayrı olarak işleyecek şekilde hesaba katmaktadırlar. Dolayısıyla dağılı modeller havza karakteristiğini yansıtan jeolojik ve iklimsel açıdan heterojen yapıya sahip büyük havzaları temsil edebilmeleri ile toplu modellerden ayrılmaktadır. Fakat dağılı modeller de çalıştığı ölçekler doğrultusunda kullandığı parametrelerin ve değişkenlerin ızgaralara veya birimlere ait ortalamalarını alarak sürece dâhil edebilir.

Yarı dağılı modeller hidrolojik süreçleri işlerken çözünürlük açısından toplu ve dağılı modellerin avantajlarını ortak bir potada eritmek amacıyla sunulmuştur. Mekânsal değişkenlik kavramını dağılı modeller gibi sürekli olarak tanımlamak yerine, birden fazla toplu modelin birleşimi olarak havzayı oluşturur. Bu sayede dağılı modellere göre daha az hesap yükü, daha küçük boyutta ve daha kolay ulaşılabilir veriler gerektirerek; toplu modellere göre ise havzanın karakteristik özelliklerini daha doğal ve heterojen olarak sunarlar. Hidrolik iletkenlik ve porozite gibi bazı fiziksel parametreler teorik olarak elde edilebilse de, sahada ölçülmesi nispeten zor olacağı için sıklıkla kalibrasyon aşamasına dahil edilirler.

Sınıflandırmaları farketmeksizin oluşturulan her hidrolojik model, yapısal veya fiziksel olarak kullandığı bazı ölçülemeyen parametrelerin gerçekteki havza özelliklerini yansıtacak değerlere göre ayarlanmasına, yani kalibrasyonuna ihtiyaç duyar. Yapısal parametreler havzanın karakteristik özelliklerini (depolama kapasitesi derinliği, öteleme katsayısı vb.), fiziksel parametreler ise genellikle ölçülebilir özelliklerini (yüz ölçümü, yüzey eğimi vb.) içerir (Duan ve diğ., 2003).

Kalibrasyon süreci başlarda uzman görüşüne bağlı olarak el ile yapılırsa da teknolojinin sağladığı avantajlar ile bilgisayar ortamına taşınarak otomatik kalibrasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler el ile yapılan kalibrasyondaki olası öznel müdahaleleri, hesap yükünü ve zaman israfını ortadan kaldırarak gün geçtikçe yaygınlaşmaya devam etmiştir. Otomatik kalibrasyon yöntemleri parametre tayini için kalibrasyon algoritmaları ve amaç fonksiyonlarını kullanır. Otomatik kalibrasyon algoritmaları parametre değerlerini, amaç fonksiyonunu optimize (minimize veya maksimize) edecek şekilde tayin etmek odaklı çalışır. Algoritmaların optimum değerlere yaklaşmak için kullandıkları metotlar lokal ve global metotlar olarak sınıflandırılabilir.

Lokal algoritmalar üç ana kritere bağlı olarak optimum amaç fonksiyonuna ulaşmayı denemektedir. Bu kriterlerin birincisi parametrenin değer aralığındaki hareket yönü, ikincisi adım sayısı, üçüncüsü ise belirli bir süreçte gelişme kaydedilmediği takdirde işlemin sonlandırılmasıdır. Gradyan tabanlı olarak parametre aralığında değerler atayan lokal metotlar, eğimin (gradyanın) sıfır olduğu noktayı optimum değer olarak varsaymaktadır. Bu durum tek bir optimum noktanın olmadığı durumlarda, diğer alternatifleri ve devamında ulaşılabilecek daha iyi bir sonucun göz ardı edilmesine sebep olmaktadır. Global kalibrasyon metotları ise bu dezavantajı, parametre uzayına tüm sınırlardan yaklaşılarak aşmaktadır. Global yöntemler amaç fonksiyonunu iyileştirmek adına parametre değerlerinin kombinasyonunu deterministik ve olasılıksal kurallarla manipüle etmektedir (Mitsos ve diğ., 2008).

Bu çalışmada Acısu Havza için üretilecek debi değerlerini değerlendirmek amacıyla toplu model olarak Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), yarı dağılı model olarak Soil Water Assessment Tool Plus (SWAT+) ve dağılı model olarak mesoscale Hydrological Model (mHM) isimli hidrolojik modeller kullanılmıştır. Aynı zamanda modellerin parametre kalibrasyonları lokal olarak Levenberg-Marquardt (LM), global olarak ise Shuffled Complex Evolution (SCE) ve Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yöntemler arasındaki farklılıkların sonuçlara kayda değer ölçüde etki ettiği gözlemlenmiş, elde edilen debi değerleri, kullanılan model yapısı ve kalibrasyon algoritması kombinasyonlarına göre değerlendirilmiştir.

1.1 Tezin Amaç ve Kapsamı

Akarsu havzalarının bilgisayar ortamına taşınması ile hesap yükünün ciddi ölçüde azalması, hidrolojik model çalışmalarının yaygınlaşmasında elzem rol oynamıştır. Literatürde birçok hidrolojik modele rastlanılmasına rağmen herhangi bir havza için her modelin üzerinde aynı yağış-akış ilişkisini vermeyeceği aşikardır. Bunun başlıca sebebi olan model yapıları ve parametre farklılıkları bu çalışmanın başlangıç noktasıdır. Tezin amacı Acısu Havzası üzerinde kurulan hidrolojik modeller ve bu modellerin kalibrasyonu için kullanılacak olan algoritmalar arasındaki farklı kombinasyonlara ait debi çıktılarını değerlendirmektir. Bu sayede çalışmanın benzer özellik gösteren havzalarda kullanılabilecek model yapıları ve kalibrasyon algoritmaları için örnek teşkil etmesi ve model-algoritma entegrasyonları sonucunda

gözenmiş veriye en yakın debi değerlerinin üretilmesi amaçlanmaktadır. Aynı zamanda üç farklı model yapısını, PEST'e entegre edip 1 lokal, 2 global yöntem ile kalibre ederek 9 farklı kombinasyonun karşılaştırılması açısından bir ilki teşkil ederek literatürdeki bu boşluğun doldurulması hedeflenmiştir.

Birinci bölümde hidrolojik model ve kalibrasyon kavramlarından yola çıkılarak çalışmanın motivasyonundan ve hedeflerinden bahsedilmiştir. Devamında benzer amaçlara yönelik yapılan örnek çalışmaların bulunduğu literatür taraması bölümü gelmektedir.

İkinci bölümün başlangıcında kullanılan verilerin temsil ettiği Acısu Havzası'ndan bahsedilmiştir. Gediz Havzası'nın başlangıcında bulunan Acısu Havzası için elde edilen ve kullanılan verilerin analizleri paylaşılmıştır. Devamında kurulan modellerin gelişimlerine, işleyişlerine ve yapılarına dair bilgiler verilir, kullanılan algoritmalar, hassasiyet analizi ve kalibrasyon aşamasına ait detaylara yer verilmiştir. Çalışmada amaç fonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) değeri kullanılmıştır.

Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan yöntemler ile gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Her bir modele ait kalibrasyon çıktılarının ve sonuç tablolarının bulunduğu bölümde, kalibre edilen parametrelerin nihai değerleri paylaşılmıştır. Model-algoritma entegrasyonlarına ait çıktılar incelenmiş ve amaç fonksiyonu dahil olmak üzere yedi farklı istatistiksel kritere göre debi performansları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde, elde edilen bulgular çerçevesinde sonuçlar derlenmiştir. Üç model yapısı ve üç kalibrasyon algoritmasının bir araya gelmesiyle elde edilen debi çıktıları ve model-algoritma performanslarına ilişkin sonuçlar liste halinde sunulmuştur.

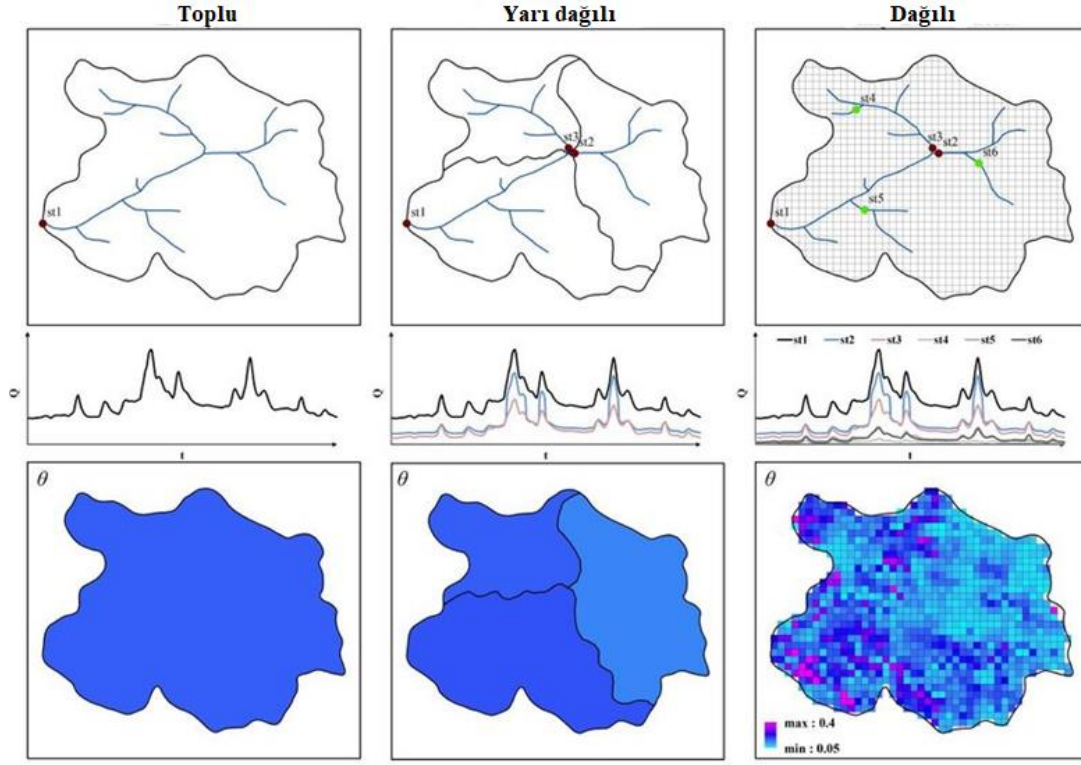
1.2 Literatür Araştırması

Güncel olarak kullanılan hidrolojik modellerin kökeni Mulvaney (1850) tarafından konsantrasyon süresini bularak pik debiye ulaşmak amacıyla geliştirilen, günümüzde de drenaj hatlarının tasarımı için kullanılmaya devam eden Rasyonel Metot kabulüne dayanmaktadır.

1960'lı yıllarda bilgisayarın hidrolojik model evrenine dahil olması ile çağ atlayan modelleme çalışmaları, Crawford ve Linsley (1966)'in Stanford Watershed Modeli ile

bilgisayar ortamına taşınmıştır. 1960 yılından önce hem saha çalışmalarıyla hem de analizlerle var olmuş yüzeysel akış, yeraltı suyu, taban akımı, toprak nemi, buharlaşma ve terleme gibi kavramların akarsu havzalarının fiziksel özellikleriyle ilişkilendirilmesini sağlayan yoğun matematiksel işlemleri bilgisayar yardımıyla gerçekleştirerek geniş kitlelerce kullanılmasına olanak sağlamışlardır (Crawford ve Burges, 2004).

Yağış-akış modelleri genel olarak toplu, yarı-dağılı ve dağılı modeller olarak kategorize edilebilir (Beven, 2012). Toplu modellerde akış ötelemesi ve akış üretimi süreci, tüm havza kapsamında simüle edilen hidrolojik döngüye ait ortalama değerlerin kara kutu modeli ile temsidir. Bir havzaya ait depolama kapasitesi, havzayı temsilen ortalama bir değer ile temsil edilir. Örneğin, depolama kapasitesinin mekansal değişkenliği, toprak özelliklerinin basit fonksiyonları ile de temsil edilebilir (Brirhet ve Benaabidate, 2016). Yarı-dağılı hidrolojik modellerde havza, hidrolojik süreçlere benzer şekilde tepki veren hidrolojik etki birimlerine (HRU) bölünür. HRU'lar kendi içlerinde homojendir. Süreçler, her bir HRU özelinde ayrı ayrı gerçekleşir. Örneğin, havzadaki her HRU kendine ait yeraltı suyunu ve akışı temsil eden bir lineer rezervuara sahip olabilir (Fathy ve diğ., 2015). Son olarak, hidrolojik modellerin en karmaşık ve hesap yükü fazla olan türü dağılı modellerdir. Tam dağılı modellerde parametreler, havza içerisindeki ızgaralardan oluşan ağ üzerinde, mekansal değişkenliği süreçlere dahil edecek şekilde dağılmaktadır (Ocio ve diğ., 2019). Model yapıları görsel olarak Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 : Toplu, yarı dağılı ve dağılı hidrolojik model yapıları (Koch, 2016).

Hidrolojik modellere ait debi performansını değerlendirmeden önce modelin varsayılan parametrelerinin bir kalibrasyon sürecinden geçmesi gerekmektedir. Havzaya ait fiziksel özellikleri temsil eden bu parametreler farklı algoritmalar ile kalibre edilebilir.

Girdileri ve süreçleri farklı çözünürlükte sürece dahil eden bu model türlerinin veya kalibrasyon algoritmalarının çeşitli amaçlarla gerek kendi içlerinde, gerek ise birbirleri ile mukayese edildiği çalışmalara rastlanılmaktadır.

Blasone ve diğ. (2007) lokal ve global optimizasyon algoritmalarını kıyaslamışlardır. Danimarka'nın batısındaki 440 km² havza alanına sahip Karup Nehri, MIKE-SHE dağılı modeli ile simüle edilmiş ve gözlenmiş debi değerleri ile yeraltı su seviyesi baz alınarak günlük zaman ölçeğinde kalibre edilmiştir. Çok amaçlı bir kalibrasyon metodu izlenen modelde kalibrasyon kriterlerine farklı ağırlıklar vermek için birden fazla amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Çalışmada Parameter Estimation Tool (PEST) isimli kalibrasyon aracı ile entegre edilen model lokal olarak Levenberg-Marquardt, global olarak ise Shuffled Complex Evolution (SCE) algoritmaları ile kalibre edilmiştir. Hesaplama süresi, parametre sayısının etkisi, eşik değeri toleransı ve çoklu amaç

fonksiyonları gibi değişkenler üzerinden değerlendirilen algoritmaların etkililiği ve verimliliği incelenmiştir. Algoritmaların farklı açılardan avantajları ve dezavantajları olduğu sonucuna ulaşılmış, alternatif olarak iki algoritmayı birlikte kullanarak optimum debi ve yeraltı su seviyesi değerlerine ulaşılmıştır.

Jiang ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada gelecek iklim senaryolarında farklı modellerin kullanılmasından kaynaklı farklı hidrolojik tepkiler görülmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Çinin güneyindeki Pearl nehrinin bir kolu olan Dongjiang havzasının modellendiği yayında, bölgede iklim değişikliğinin su mevcudiyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gözlenmiş 29 yıllık akım ve meteorolojik veri ve 6 farklı toplu model (Thotntwaite-Mather (TM), Vrije Universitet Brussel (VUB), Xinanjiang (XAJ), Guo (GM), Watbal (WM), Schaake (SM)) ile modellenen havza simülasyonu gerçekleştirilerek modellerin debi performansı analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde altı modelin de benzer debi değerleri ürettiği görülmüş (R^2 değeri olarak TM, VUB, XAJ, GM modelleri için 0.91; WM ve SM modelleri için 0.9), iklim senaryolarına ait projeksiyonlar gerçekleştiğinde ise model sonuçlarında daha büyük farklılıklar gözlenmiştir. Model çalışmalarının su kaynakları yönetimi açısından öneminin ön plana çıkarıldığı çalışmada iklim değişikliği senaryoları ile modellenen gelecek projeksiyonları, havza hidrolojisinde olabilecek kaydadeğer değişimler nedeniyle su temini ve taşkın kontrolüne yönelik müdahalelerin araştırılmasının faydalı olabileceğini öngörmüştür.

Dağılı ve daha fazla parametrelili modellerin artan popüleritesi ile önem kazanan zaman verimliliği üzerine kalibrasyon algoritmalarının verimliliğinin incelendiği çalışmada, Zhang ve diğ. (2009) Amerika Birleşik Devletleri'nden üç, Çin'den ise bir havzayı seçerek Soil Water Assessment Tool (SWAT) ile modellemiştir. Beş farklı global algoritmanın kıyaslandığı yayında Genetik Algoritma (GA), Shuffled Complex Evolution (SCE), Particle Swarm Optimization (PSO), Differential Evolution ve Artificial Immune System algoritmaları ile SWAT modeli kalibre edilmiştir. Her bir algoritma için 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 ve 10000 iterasyon adımı ile model kalibrasyon aşamasından geçmiştir. Debi simülasyonu yapılan modelde kalibrasyon adımları sonucunda 2000 ve üzeri iterasyon adımı ile yapılan kalibrasyonlar için 0,739 ve 0,829 aralığında değişen NSE değerleri ile GA, 2000'den az iterasyon adımı ile gerçekleştirilen kalibrasyonlar için ise 0,662 ve 0,780 aralığında değişen NSE değerleri ile PSO algoritmalarının en iyi performansı gösterdiği bulgular arasında

paylaşılmıştır. Çalışmanın çıkarımları arasında ise kısıtlı zaman ve imkanlar PSO algoritmasının benzer çalışmalar için daha verimli olduğuna yer verilmiştir.

Kalibrasyon algoritmalarını farklı stratejiler ile kullanan Wallner ve diğ. (2012), çalışmalarında üç farklı algoritmanın (Levenberg-Marquardt (LM), Dynamically Dimensioned Search (DDS), Shuffled Complex Evolution (SCE)), 1000 iterasyon adımı sonucunda ulaşılan debi simülasyonu performansını kıyaslamışlardır. Debi değerlerinin üretimi için Almanya sınırları içerisindeki farklı havzalar üzerinde kurdukları yarı dağılı model olan HEC-HMS seçilmiştir. Model parametrelerinin kalibrasyonu için dört farklı yaklaşımda bulunulmuştur. Bu yaklaşımlar, toplu, tek faktörlü, ayrık ve bölgesel olarak parametrelerin gruplandırılması ile ortaya çıkmıştır. Toplu yöntemde tüm parametreler, tek faktörlü yöntemde zemin, arazi kullanımı, topoğrafya gibi herhangi bir mekansal değişkene bağlı parametreler, ayrık yöntemde her bir parametrenin ayrı ayrı, bölgesel yöntemde ise mekansal heterojenliğin gözleterek konumlarına göre gruplandırılan parametre setleri kalibre edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ve hacimsel hata (VoE) değerlerinin ampirik bir kombinasyonu tanımlanmıştır. Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde toplu parametre stratejisi ile çalıştırılan DDS algoritmasının, mekansal olarak ayrı ayrı incelendiğinde bölgesel strateji ile çalıştırılan DDS algoritmasının öne çıktığına dair bulgular paylaşılmıştır. Amaç fonksiyonuna göre arasında kalibrasyon için 0.75-0.90, validasyon için 0,57-0,73 arasında değişen değerler ile en iyi performansı DDS algoritmasının gösterdiği belirtilmiştir.

Tegegne ve diğ. (2017) çalışmalarında GR4J ve IHACRES toplu modelleri ile SWAT yarı-dağılı modelini kullanarak Mavi Nil Nehri'nin membası olan Tuna Gölü Havzasına ait; Ribb, Megech, Gummera ve Gilgelabay isimli dört alt havzayı modellemişlerdir. Modellerin debi çıktıları ve gözlenmiş debi değerlerini aynı zaman periyodu içerisinde inceleyerek, modeller arasında bu dört havza için kıyaslamalar yapılmıştır. Kalibrasyon algoritması olarak toplu modeller için Shuffled Complex Evolution algoritmasını kullanırken, SWAT modeli için bu modele entegra olarak çalışan kalibrasyon aracı olan SWAT-CUP programının Particle Swarm Optimisation algoritmasını kullanmışlardır. Modellerin sonuçlarını değerlendirirken NSE, R^2 ve RMSE kriterlerini göz önüne alan ekip, daha küçük yüzey alanına sahip havzalarda (Ribb, Megech, Gummera) toplu modellerin, en geniş yüzey alanına sahip havzada (Gilgelabay) ise yarı dağılı model olan SWAT'ın daha iyi debi performansı gösterdiği

sonucuna ulaşmışlardır. Debi değerleri niceliklerine göre sınıflandırılarak incelendiğinde, Ribb havzası için SWAT'ın düşük ve orta seviye akımlarda, Gummera ve Megech havzaları için orta ve yüksek akımlarda, Gilgelabay havzası için ise düşük akımlarda daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. GR4J modeli Gilgelabay havzasının yüksek akımlarında, Gummera ve Megech havzasının düşük akımlarında daha iyi debi performansı gösterirken, IHACRES modeli Gilgelabay havzasının orta seviyedeki akımlarında Ribb havzasının ise yüksek akımlarında iyi performans göstermiştir. Çalışmanın devamında yarı-dağılı modelin alt havza sayılarının hassasiyeti incelenerek, alt havza sayısı arttıkça daha geniş ve karmaşık havzalarda yarı dağılı modellerin heterojenliği daha iyi temsil ettiği belirtilmiştir. Sonuç olarak ise bu modellerin karmaşık havzalarda entegre olarak kullanılmasının bölgedeki su kaynakları yönetimi açısından daha verimli olacağı vurgulanmıştır.

Kunnath-Poovakka ve Eldho (2019) yaptıkları çalışmada Hindistan'ın en büyük ikinci akarsu havzası olan Godavari havzasını incelemişlerdir. Godavari havzasının yüksek kesimlerinin modellendiği çalışmada toplamda 3310 km² yüzey alanına sahip beş farklı akım gözlem istasyonunda toplanan beş alt havza ile çalışılmış ve her alt havza için farklı kalibrasyon ve validasyon periyodları kullanılmıştır. Adhala, Bhandardara, Gargaon, Kadwa ve Mula isimli bu beş alt havzadan oluşan çalışma alanının mekansal olarak arazi kullanımı, topoğrafta ve iklimsel özellikler anlamında gösterdiği heterojen yapıdan ötürü, bu bölge ile ilgili yapılan geçmiş çalışmalarda daha çok yarı-dağılı veya dağılı modeller tercih edilmesine rağmen, bu çalışmada farklı bir bakış açısı ile yaklaşılarak üç farklı kavramsal model kullanılmıştır. Yağış, sıcaklık ve potansiyel evapotranspirasyon verileri girdi olarak kullanılarak, GR4J, Australian Water Balance Model (AWBM) ve Sacramento bu çalışma için seçilmiş ve kurulmuştur. GR4J modeli 4, AWBM 8 ve Sacramento modeli ise 22 parametre kullanarak hidrolojik süreçleri tanımlamaktadır. Çalışma kapsamında modellerin tüm parametreleri kalibrasyon aşamasına dahil edilmiştir. Kalibrasyon işlemi günlük bazda Nash-Sutcliffe (NSE) değeri amaç fonksiyonu olarak belirlenerek yapılmıştır. Toplu-kavramsal modellerin işlem yükünün azlığının ve popülerleşmesinin sebeplerinin vurgulandığı çalışmada, nihai debi değerleri incelendiğinde üç modelin de tatmin edici sonuçlar verdiği belirtilmiştir. NSE değeri baz alınarak kıyaslama yapıldığında diğer iki modele üstünlük sağlayan GR4J modelinin Adhala havzası dışında diğer alt havzalarda 0.8 civarında değerlere ulaşmasının yanı sıra pik debilerde ve yüksek akımlarda gözlenmiş

veriye daha yakın çıktılar verdiği sonuçlar arasında sunulmuştur. Ayrıca toplu model performansları göz önüne alındığında, kullanılan basit yapıdaki modellerin daha önceki çalışmalarda aynı bölge için kurulan karmaşık yapılara ve ağır hesap yüklerine sahip yarı-dağılı veya dağılı modellere yakın performans gösterdiği belirtilmiştir.

Mai ve diğ. (2021) yürüttükleri projenin üçüncü safhasında Amerika Birleşik Devletleri sınırları içerisindeki Erie Gölü havzası için kapsamlı bir modelleme çalışması yapmışlardır. Erie havzası yoğun nüfusa sahip bir havza olmasına karşın ötrofikasyon sorunu, aşırı atık yükü, kıyı şeridi erozyonu ve taşkın riski taşıyan bir alandır. Bu sebepten ötürü kritik önem taşıyan çalışma alanı, proje ekibi tarafından içlerinde GR4J, SWAT ve mHM modellerinin de olduğu 17 farklı model ile bilgisayar ortamına taşınmış ve farklı perspektiflerden değerlendirilmiştir. Modellere girdi olarak aynı kaynağa ait atmosferik model verileri tanımlanmıştır. Kalibrasyon aşamasında Dinamically Dimensioned Search (DDS), Shuffled Complex Evolution (SCE), ve SUFI-2 gibi çeşitli algoritmaların kullanıldığı çalışmada amaçfonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe (NSE) değeri kullanılmıştır. Debi simülasyonlarına ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde, DDS algoritması kullanılarak 50 parametreden 14'ünün, 1000 iterasyon aşaması ile kalibre edilen mHM dağılı modelinin kalibrasyon için 0.78, validasyon için ise 0.68 değerleri ile NSE kriterine göre diğer modellere karşı daha başarılı debi simülasyonu gerçekleştirdiği görülmüştür. Çalışmadan elde edilen genel sonuçlar ise, (1) makine öğrenmesi ile entegre olarak çalıştırılan modellerin kalibrasyon aşamasındaki performansını, veri uzunluğundaki yetersizlik sebebiyle validasyon aşamasında sergileyemediği, (2) lokal olarak istasyon bazında kalibre edilen modellerin performansının benzer seviyede iyi olduğu ve (3) dağılı modellerin kentsel alanları simüle etmede efektif olmamasına rağmen nihai debi prformansı olarak diğer model türlerinden daha iyi sonuçlar verdiğiidir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Çalışma Alanı

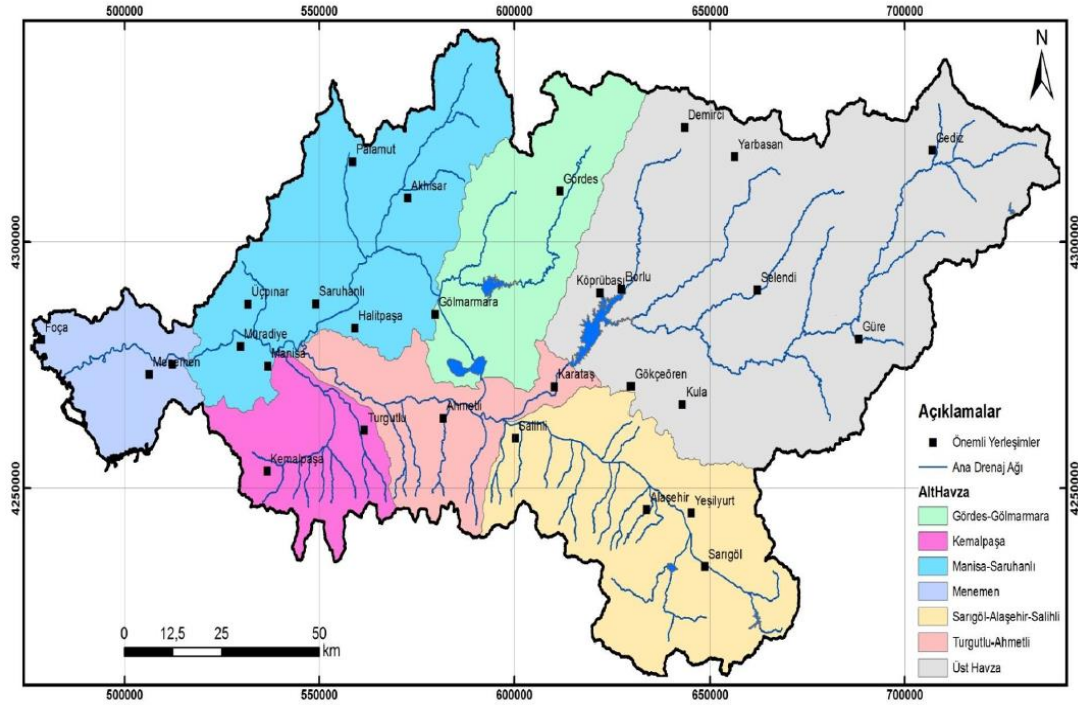
Ülkemizin yedi coğrafi bölgesinden biri olan Ege Bölgesi sınırları içerisinde, 1703586 hektarlık yüz ölçümüne sahip olan Gediz Havzası, 38°04'-39°13' Kuzey enlemleri, 26°42'-29°45' Doğu boylamları arasındadır. Türkiye'de ki en büyük 5 havzadan biri olan Gediz Havzası'nın en uzun nehri, kendi ismini taşıyan 275 km uzunluğundaki Gediz Nehri'dir. Sınırları içerisinde Manisa, İzmir, Aydın, Balıkesir, Uşak, Denizli ve Kütahya illerinin topraklarını bulunduran havza, 19 ilçe ve 870683 kişilik bir nüfus kapasitesine sahiptir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018). Türkiye'nin yüz ölçümünün yaklaşık %2.17'sini kaplayan ve Ege Denizine dökülen Gediz Havzası'nın konumu Şekil 2.1'de görsel olarak paylaşılmıştır. Gediz Havzası tarımsal sulama, taşkın koruma, enerji üretimi gibi amaçları olan 5 baraj, 2 gölet, 1 hidroelektrik santrali sınırları içerisinde bulundurmaktadır.



Şekil 2.1 : Gediz Havzası ve çalışma alanının sınırları.

Yarı kurak iklim koşullarına sahip olan havza, yıllık ortalama 2.270 m³ hacminde, 126 mm yüksekliğinde su potansiyeline sahiptir (Okkan ve diğ., 2021). Bölgedeki su potansiyeli incelendiğinde yağışın %58.63'ünün buharlaşma ve terlemeden dolayı kayba uğradığı, %28.22'sinin zemin suyu ve yeraltı suyunu beslediği, %13.15'inin ise yüzeysel akışa geçtiği belirlenmiştir (Demir, 2020).

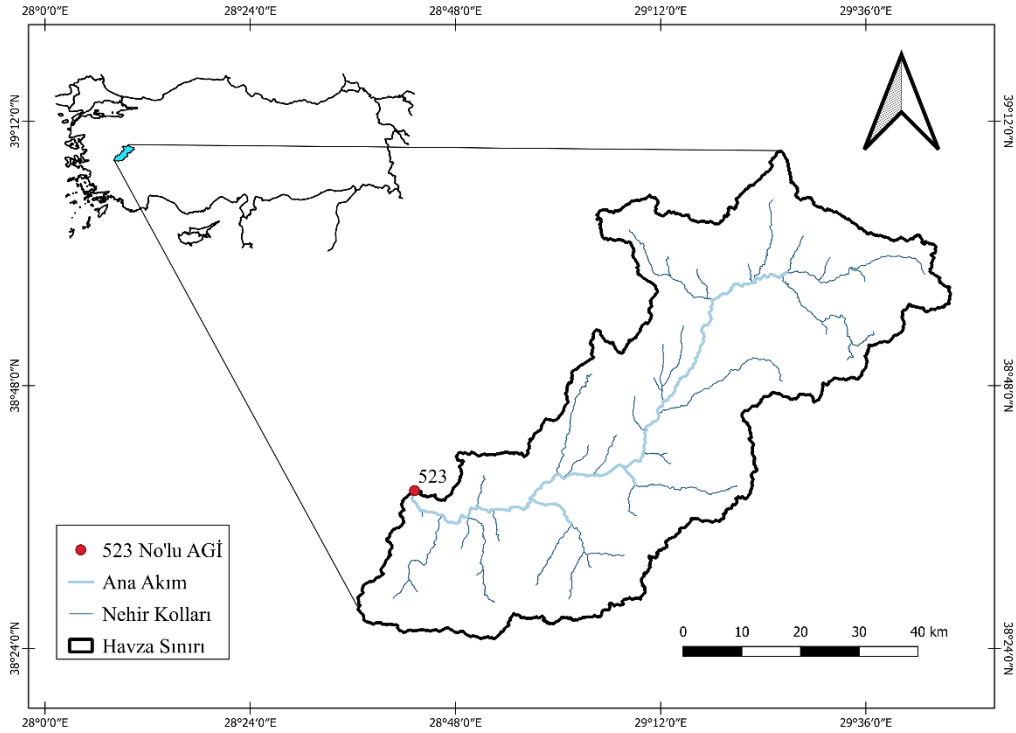
Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı'nın yönetim planına göre yedi alt havzadan oluşan Gediz Havzası'na ait alt havza dağılımı Şekil 2.2'de paylaşılmıştır. Yüz ölçümlerine göre sıralanacak olursa bu havzalar, Üst Havza, Sarıgöl-Alaşehir-Salihli Havzası, Turgutlu-Ahmetli Havzası, Gördes-Gölmarmara Havzası, Manisa-Saruhanlı Havzası, Kemalpaşa Havzası ve Menemen Havzası'dır. Bu çalışmada seçilen alan ise Üst Havza'nın sınırları dahilinde olan Acısu Havzası'dır.



Şekil 2.2 : Gediz alt havza dağılımı (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018).

Acısu Havzası, mansabı 523 numaralı akım gözlem istasyonunun bulunduğu konum olan, Manisa, Uşak ve Kütahya illerinin sınırları dahilinde bulunan bir alt havzadır. Aynı zamanda bu çalışma alanı Gediz Havzası'nın giriş bölgesidir. Şekil 2.3'te lokasyon haritası verilen havza, 3256 km² yüzey alanına ve 890 m ortalama yükseltiye sahiptir. Tarımın ve sanayinin ön planda olduğu bu bölgede gerek sulama ihtiyacı gerek ise içme suyu kullanımı açısından su kaynaklarının verimli tüketimi ve

planlanması önemlidir. Bu sayede özellikle yarı kurak iklime sahip bu bölgede gelecek senaryolara karşı öngörülü ve hazırlıklı olunması sağlanabilir.



Şekil 2.3 : Acısu Havzası lokasyon haritası.

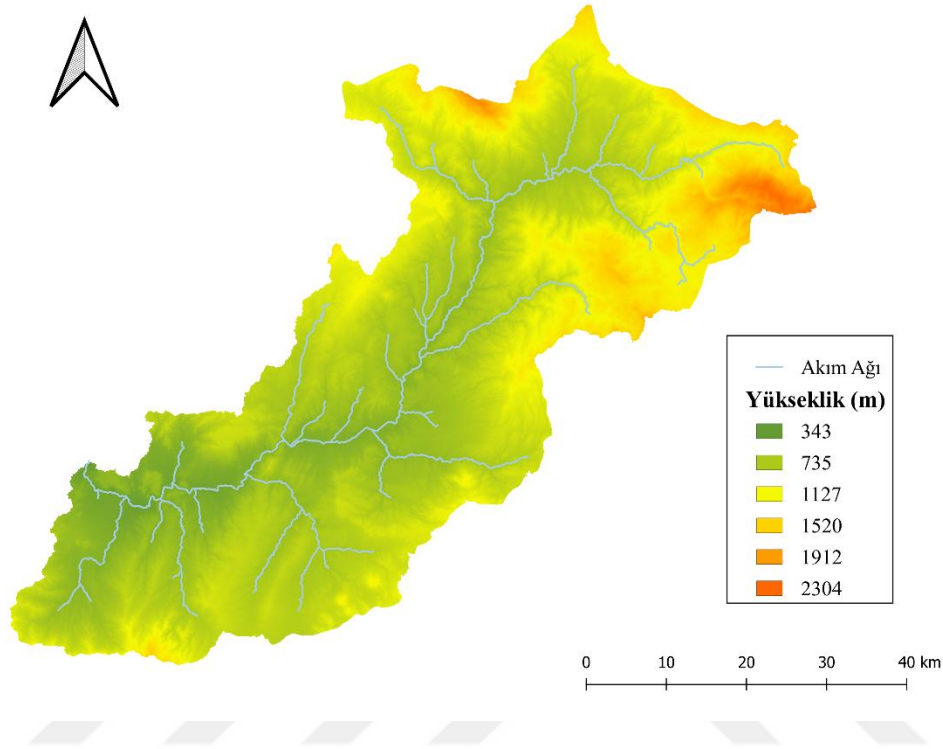
2.2 Veri

Bu çalışmada kullanılan farklı model-algoritma kombinasyonlarına ait debi çıktıları değerlendirilirken, tarafsız bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla üç modelde de ortak olan veriler aynı kaynaktan elde edilerek kullanılmıştır. Elde edilen bu verileri sonrasında modellere girdi olarak tanımlanabilecek formatta düzenlenmiştir. Bu bölümde kullanılan veriler ve bu verilerin kaynakları ile ilgili detaylara yer verilmiştir.

2.2.1 Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)

Sayısal yükseklik modeli (DEM) dünyanın topografik yüzeyinin (ağaçlar, binalar, beşeri yapılar vb. haricindeki doğal yüzey) su seviyesinden yüksekliğini temsil eden veridir. Çeşitli kaynaklar tarafından farklı çözünürlüklerde elde edilebilirler. Bu çalışmada ise 18 Aralık 1999 yılında gönderilen Terra uydusunun sensör sistemlerinden biri olan “Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer” (ASTER) aracılığıyla elde edilen 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip olan

DEM verisi kullanılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu'nun (USGS) açık kaynak olarak paylaşılan DEM verisi, çalışma kapsamındaki modellerden SWAT+ ve mHM modelleri için kullanılmıştır.



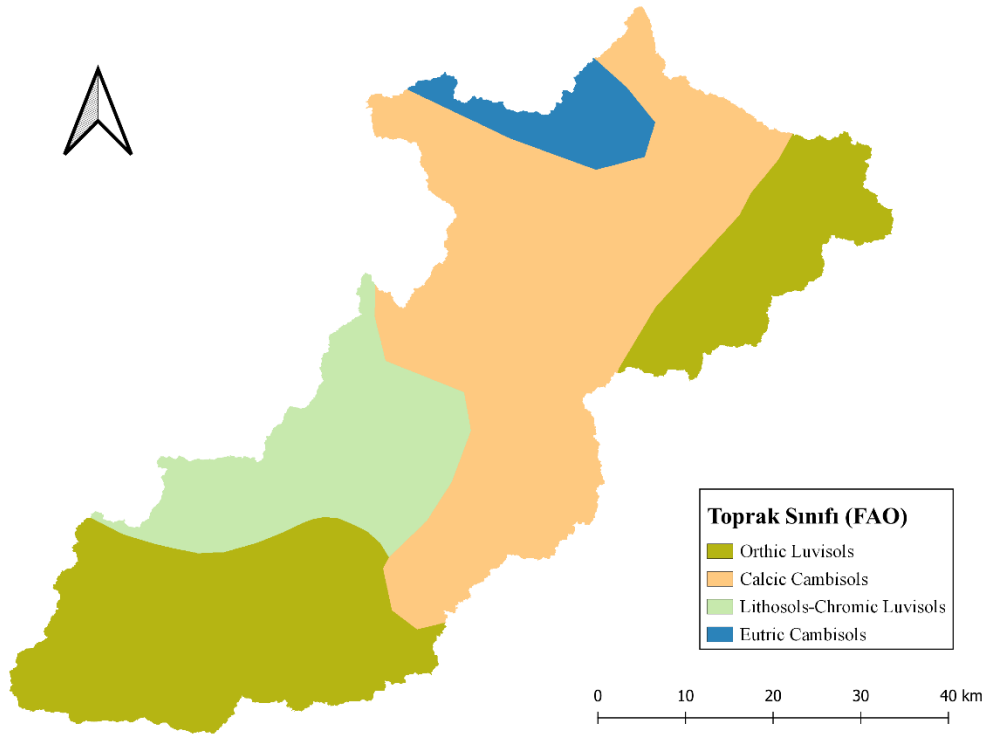
Şekil 2.4 : Acısu Havzası DEM verisi.

Şekil 2.4'te verilen sayısal yükseklik modeli verisi incelendiğinde Acısu Havzası içerisindeki en yüksek noktanın 2304 m, en düşük noktanın ise 343 m olduğu görülmektedir. Yükselti farkının fazla olduğu havzada bu farklılığın daha iyi anlaşılabilmesi için yükseklik değerleri 6 farklı renk aralığında sınıflandırılmıştır, renk geçişlerine ait sınır değerler lejantta verilmiştir.

2.2.2 Arazi Kullanımı

Modelleme aşamasında havza kapsamındaki arazinin ne amaçla kullanıldığına dair verilerin modele tanımlanması, havza karakteristiğini etkileyen unsurlardandır. Bu çalışma kapsamında hem çalışma alanının arazi kullanımı ile ilgili bilgi edinmek hem de girdi olarak tanımlamak amacıyla CORINE (Coordination of Information on the Environment) verisi kullanılmıştır. CORINE arazi kullanımı verisi, Avrupa Çevre Ajansı tarafından belirlenen sınıflandırmaya göre, uydu görüntüleri vasıtasıyla uzaktan algılama yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Acısu Havzası sınırlarına göre kesilen ve havza sınırları içerisinde kalan arazi kullanımı haritası Şekil 2.5'te paylaşılmıştır.

farklı ana toprak sınıfına ait zemin olduğu görülmektedir. Havzanın bir bölümünde ise litosol ve luvisol karışımı bir zemin yapısı görülmektedir.



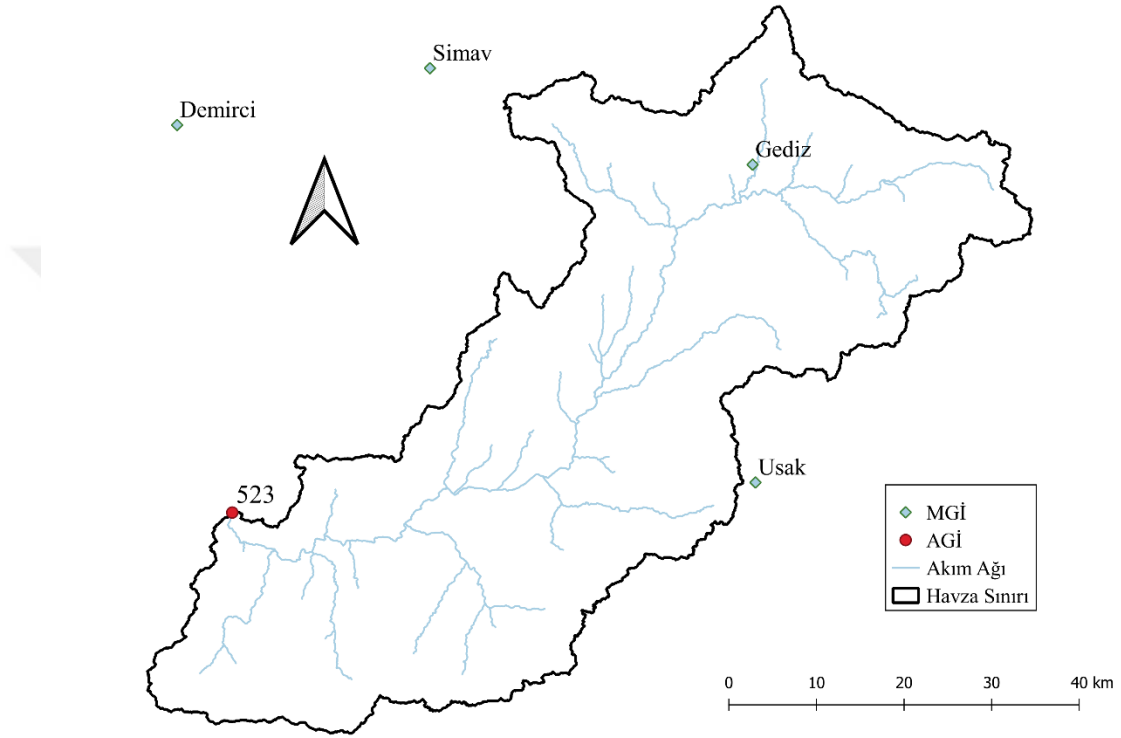
Şekil 2.6 : Acısu Havzası toprak haritası.

2.2.4 Meteorolojik ve Hidrolojik Veriler

Temeli su dengesi denkleminde dayanan hidrolojik modeller için veri en önemli unsurdur. Bu tez kapsamında kurulan modellerin ortak ihtiyaç duydukları asgari girdiler günlük bazda yağış, sıcaklık ve potansiyel evapotranspirasyon verileridir. Tarafsız bir kıyaslama için üç modele de uygun formata dönüştürülebilen ve literatürde de sıklıkla kullanılan ERA5 yeniden analiz verisi kullanılmıştır. ERA5 verisi ECMWF (European Center Medium-Range Weather Forecast) tarafından açık kaynak olarak sunulmakta olup, 30 km x 30 km çözünürlüktedir. Yeniden analiz verisi olan ERA5 verileri uzaktan algılama, CBS ve istatistiki yöntemler kullanılarak elde edilir.

Modeller arasında ortak olarak kullanılan veriler dışında SWAT+ modelinin opsiyonel girdileri arasında bulunan rüzgar hızı, bağıl nem ve güneş ışıması verileri, farklı bir kaynak olan ve NCEP (National Centers for Environmental Prediction) tarafından sağlanan CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) verisi indirilerek modele dahil edilmiştir. 1979-2014 yıl aralığını kapsayan 36 yıllık veri 38 km mekânsal çözünürlüğe sahiptir.

Modellerin çıktılarını daha iyi yorumlayabilmek adına, elde edilen uzaktan algılama verisi olan ERA5'a ait yağış ve sıcaklık verilerinin gözlenmiş veriler ile arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla çalışma alanı yakınlarında ve havzayı temsil edebilecek olan istasyonlara ait gözlenmiş veriler kullanılmıştır. MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) tarafından sağlanan MGİ (Meteorolojik Gözlem İstasyonu) verilerinin kullanıldığı istasyonlar Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 : Acısu Havzası için kullanılan MGİ istasyonları.

Şekilde görülen Gediz, Uşak, Demirci ve Simav istasyonları MGM'ye ait gözlem istasyonlarıdır. Çizelge 2.1'de numaraları, enlemleri, boylamları ve yükseklikleri paylaşılan istasyonlara ait 1980-2005 yılları aralığındaki yağış ve ortalama sıcaklık verileri kullanılarak aynı periyottaki ERA5 verileri ile aralarındaki ilişki incelenmiştir.

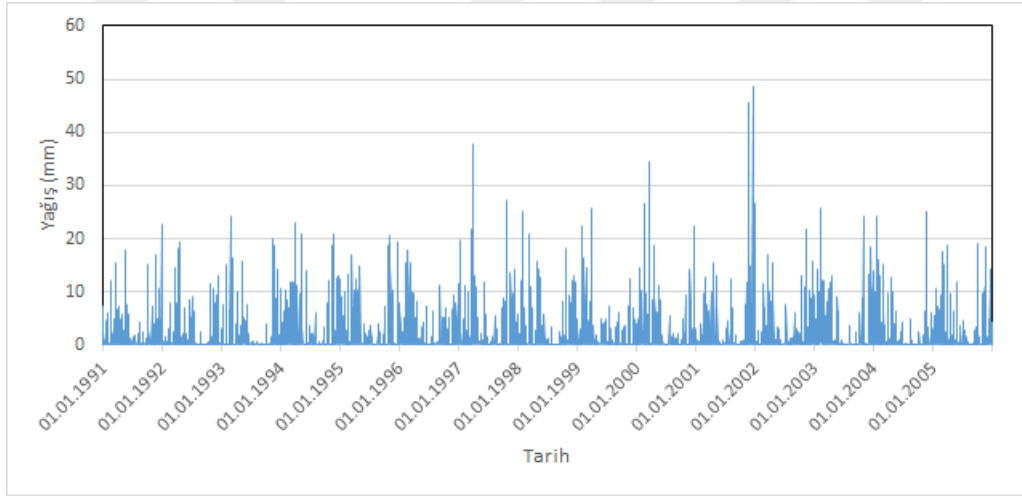
Çizelge 2.1 : Meteorolojik verilerin elde edildiği istasyonlar.

İstasyon No	İstasyon Adı	Yükseklik (m)	Enlem	Boylam
17750	Gediz	825	38°59'40.9"K	29°24'01.1"D
17188	Uşak	919	38°40'16.4"K	29°24'14.5"D
17748	Simav	809	39°05'33.0"K	28°58'43.0"D
17746	Demirci	851	39°02'05.6"K	28°38'53.5"D

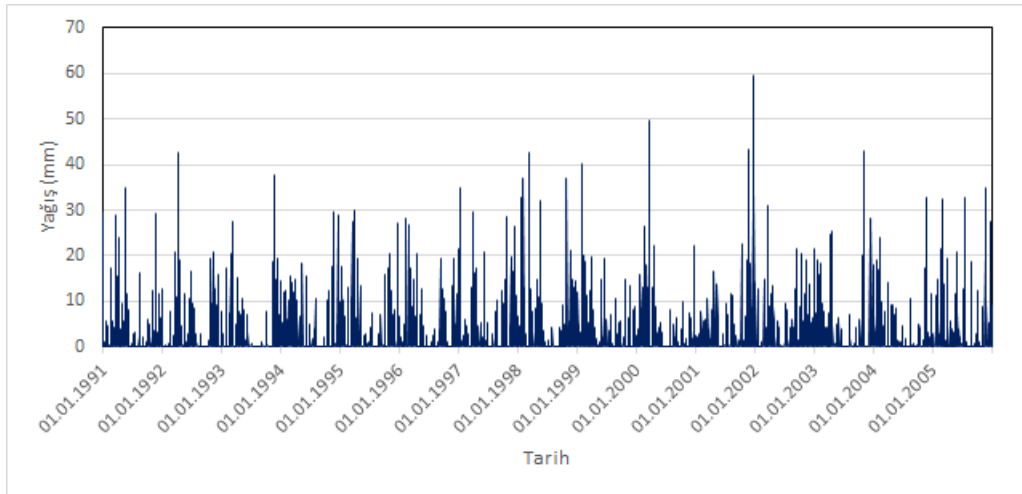
Kullanılan MGM verilerinin istasyon verisi olması ve ERA5 verisinin ise tüm havzaya ait noktasal veri formatında olması sebebiyle, MGM verileri Thiessen poligonu yöntemi ile, ERA5 verileri ise ağırlıklı ortalama yöntemi ile havzaya dağıtılmıştır.

Thiessen poligonu ve alansal ağırlıklı ortalama yöntemi uygulanırken açık kaynak kodlu coğrafi bilgi sistemleri yazılımı olan QGIS programından faydalanılmıştır (QGIS Development Team, 2022).

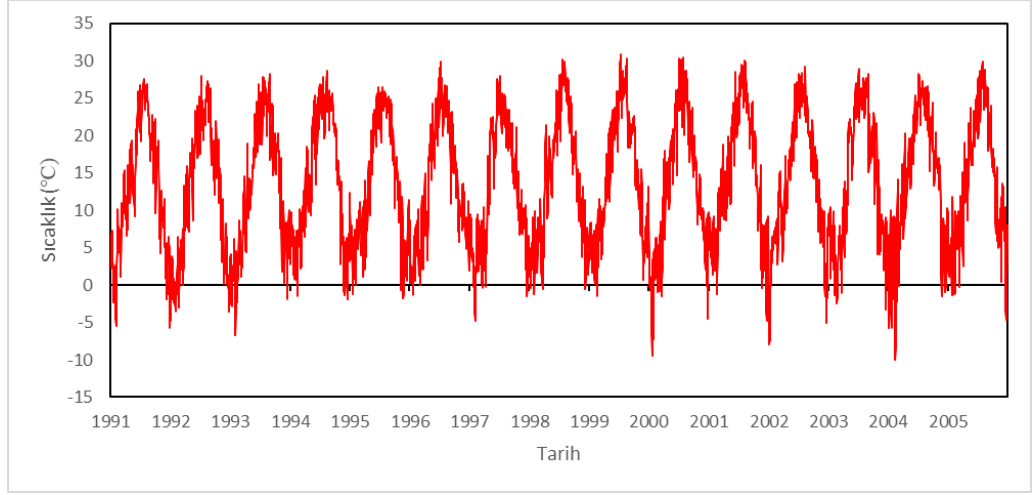
Çalışmada kalibrasyon ve validasyon periyodunu kapsayan 1991-2005 yılları arasındaki ERA5 ve MGM’ye ait yağış ve ortalama sıcaklık verileri Şekil 2.8, Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de paylaşılmıştır. Havzayı bir bütün olarak temsil eden MGM ve ERA5 verilerine ait 1980-2005 yılları arasındaki günlük yağış ve ortalama sıcaklık değerleri arasındaki ilişki Şekil 2.12’de verilmiştir.



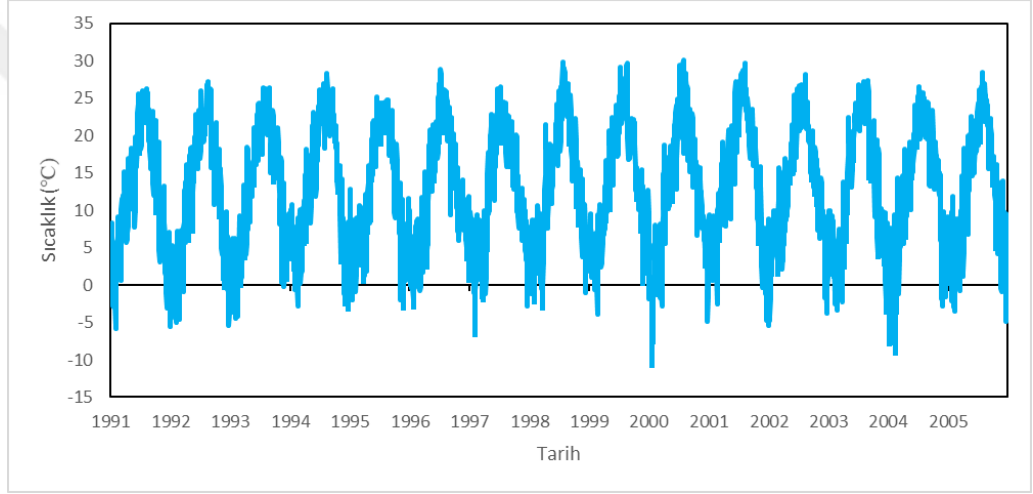
Şekil 2.8 : Havzaya dağıtılan ERA5 yağış verisi.



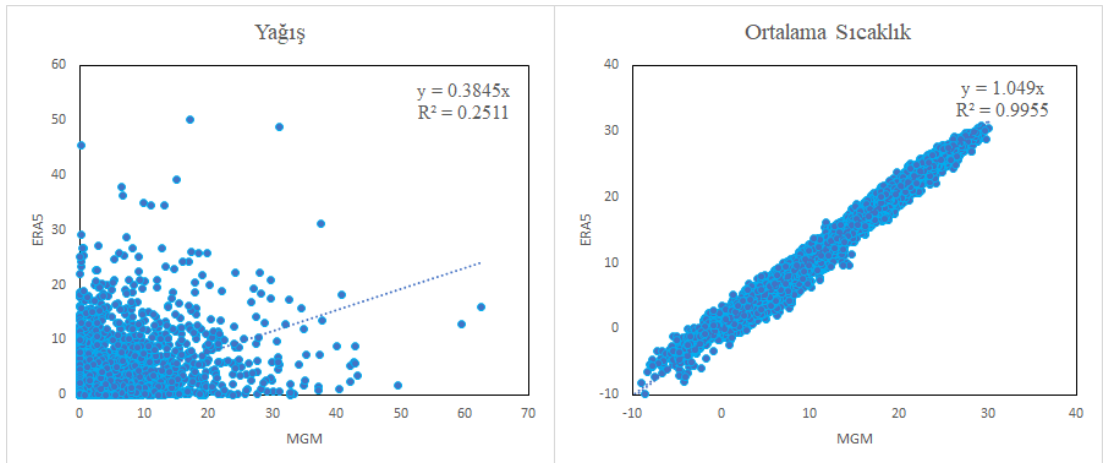
Şekil 2.9 : Havzaya dağıtılan MGM yağış verisi.



Şekil 2.10 : Havzaya dağıtılan ERA5 ortalama sıcaklık verisi.



Şekil 2.11 : Havzaya dağıtılan MGM ortalama sıcaklık verisi.



Şekil 2.12 : Günlük bazda MGM ve ERA5 verileri arasındaki ilişki.

Verilere ait korelasyon değerleri incelendiğinde MGM ve ERA5 kaynaklarından elde edilen yağış değerleri arasında R^2 değerinin 0.2511 olduğu ve ERA5 verilerinin

gözlenmiş yağış verisinin genel olarak aşağısında değerler içerdiği görülmektedir. Diğer bir yandan ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde ise R^2 değeri olarak 0.9955 değeri ile ERA5 verisinin gözlenmiş değerler ile arasında korelasyonunun yüksek olduğu ve yakın değerler ile trend çizgisini takip ettiği görülmektedir.

İstasyonlara ve ERA5'e ait verilerin aylık ve yıllık zaman ölçeğinde incelenmesi amacıyla toplam yağış, ortalama sıcaklık, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık değerleri

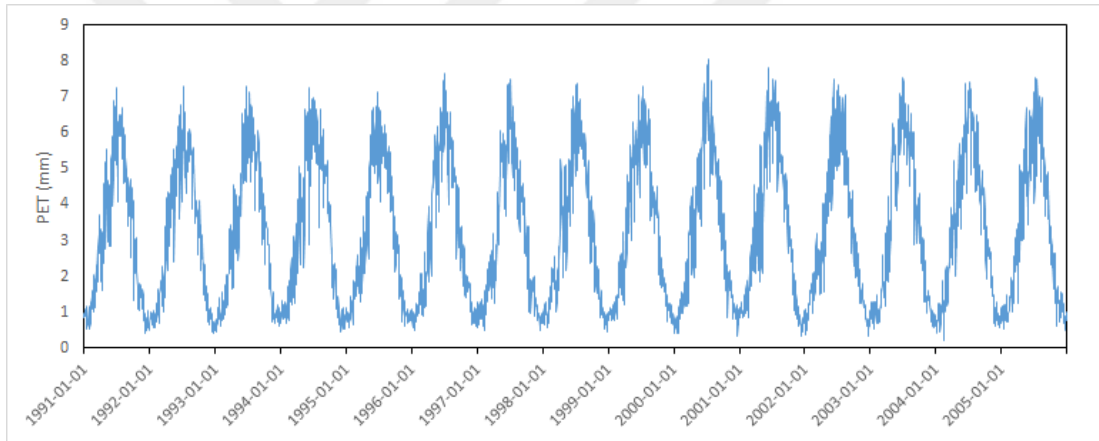
Çizelge 2.2'de paylaşılmıştır. Aylık ve yıllık toplam yağış değerleri incelendiğinde 1980-2005 yılları arasında tüm aylar için ERA5 versinin MGM verisinden daha düşük değerler verdiği, aralarında toplam yağış bazında yaklaşık %20'lik bir fark olduğu görülmüştür. Aynı incelemeler sıcaklık değerleri için yapıldığında ortalama sıcaklıkların aylık değerlerinde Aralık ayı haricindeki aylarda ERA5 verisinin daha yüksek değerler gösterdiği; maksimum sıcaklık değerlerinde Ocak, Şubat, Mart, Kasım, Aralık aylarında MGM verisinin ERA5 verisinden daha yüksek değerlere ulaştığı; minimum sıcaklık değerlerinde ise Şubat, Haziran ve Aralık ayları dışında MGM verisinin daha düşük dereceleri gösterdiği belirlenmiştir. Yıllık sıcaklık değerleri incelendiğinde ortalama, maksimum ve minimum sıcaklık değerleri için ERA5 verisinin MGM verisinden daha yüksek dereceler gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 2.2 : MGM ve ERA5'a ait aylık ve yıllık veriler.

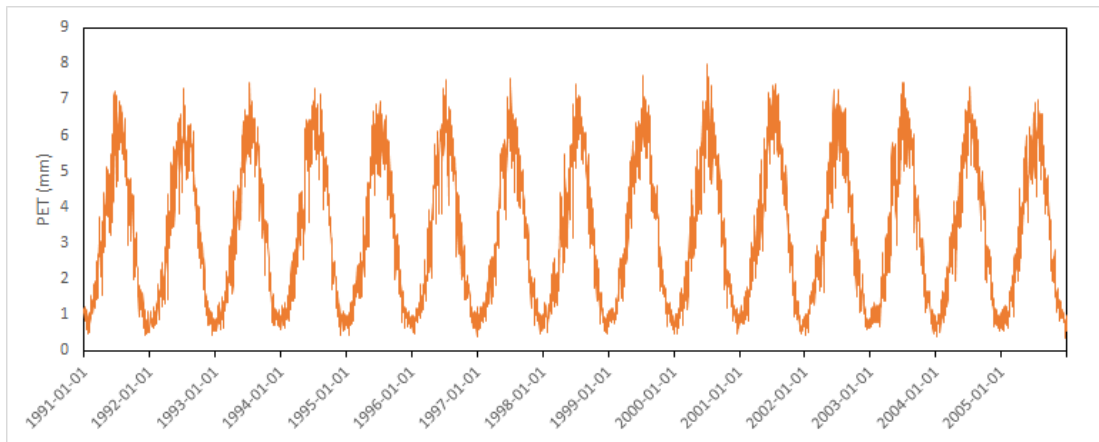
	Toplam Yağış		Ortalama Sıcaklık		Maksimum Sıcaklık		Minimum Sıcaklık	
	MGM	ERA5	MGM	ERA5	MGM	ERA5	MGM	ERA5
Ocak	69.2	59.7	3.2	3.2	12.8	12.3	-10.6	-9.4
Şubat	62.2	56.1	3.4	3.9	14.4	14.2	-8.9	-9.9
Mart	60.0	58.6	6.5	7.2	19.2	18.8	-6.5	-5.2
Nisan	63.5	56.6	11.0	11.9	21.5	21.6	-1.2	-0.1
Mayıs	43.7	40.2	15.6	16.8	23.3	24.9	4.2	5.2
Haziran	19.8	17.9	19.8	21.4	27.3	28.6	9.9	9.6
Temmuz	17.4	10.2	23.3	24.6	30.2	30.8	12.8	15.5
Ağustos	12.4	7.6	23.3	24.3	29.7	30.4	15.9	17.3
Eylül	14.7	10.1	19.2	20.0	26.9	28.3	9.4	11.1
Ekim	37.5	27.2	14.2	14.6	22.8	23.0	3.1	4.1
Kasım	74.0	58.4	8.4	8.3	18.3	17.2	-2.9	-1.8
Aralık	88.3	69.3	4.7	4.6	13.9	13.2	-5.4	-5.6
Yıllık	562.8	472.0	12.8	13.5	30.2	30.8	-10.6	-9.9

Su dengesi denklemi göz önüne alındığında ana girdilerden biri olan buharlaşma verisi, bu çalışmadaki modellere ERA5'tan sağlanan potansiyel evapotranspirasyon (PET) değerleri ile sağlanmıştır (Şekil 2.13). Aynı zamanda MGM istasyonlarına ait ölçülmüş veriler kullanılarak Hargreaves-Samani yöntemiyle hesaplanan PET değerleri de elde edilmiş (Şekil 2.14) ve ERA5 verisi ile aralarındaki ilişki (Şekil 2.15) incelenmiştir (Hargreaves ve Samani, 1985). ERA5 ve MGM kaynaklı zaman serileri incelendiğinde aralarındaki R^2 değerinin 0.9679 olduğu ve birbirine yakın PET değerleri verdikleri görülmüştür. Hargreaves-Samani yöntemine ait eşitlik denklem 2.1'de verilmiştir. Denklemdeki PET_{HS} , potansiyel evapotranspirasyon değerini; T_{ave} , T_{max} , T_{min} sırasıyla ortalama, maksimum, minimum sıcaklık değerlerini; Ra radyasyon değerini temsil etmektedir.

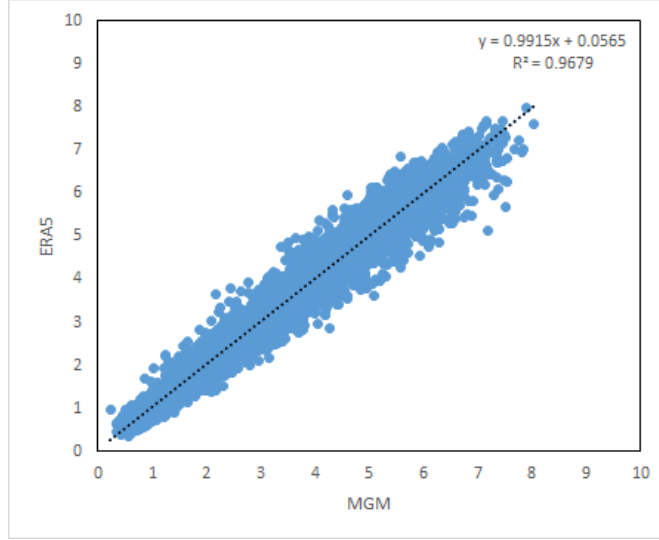
$$PET_{HS} = 0.0023 * (T_{ave} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^2 * Ra * 0.408 \quad (2.1)$$



Şekil 2.13 : ERA5 kaynaklı PET verisi.

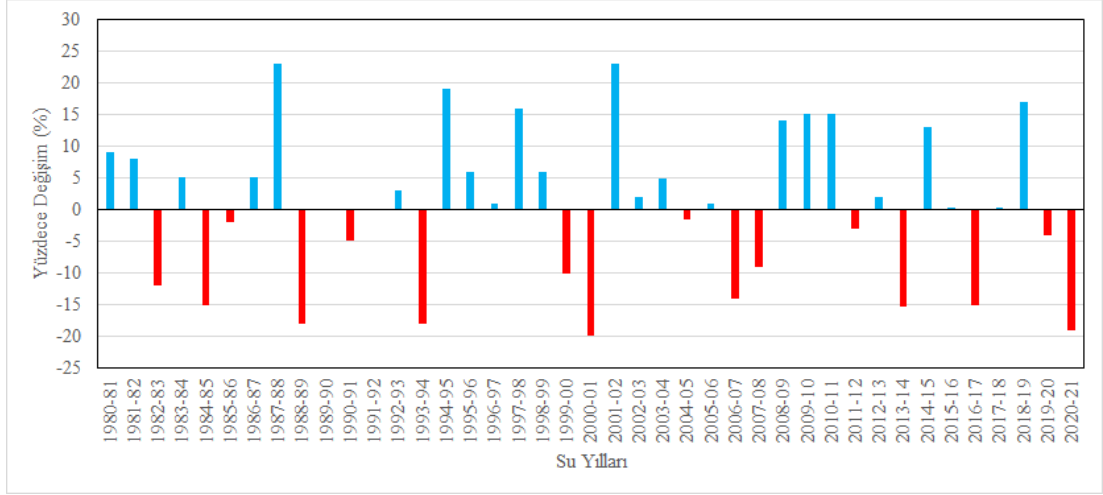


Şekil 2.14 : MGM verisi ile hesaplanan PET verisi.

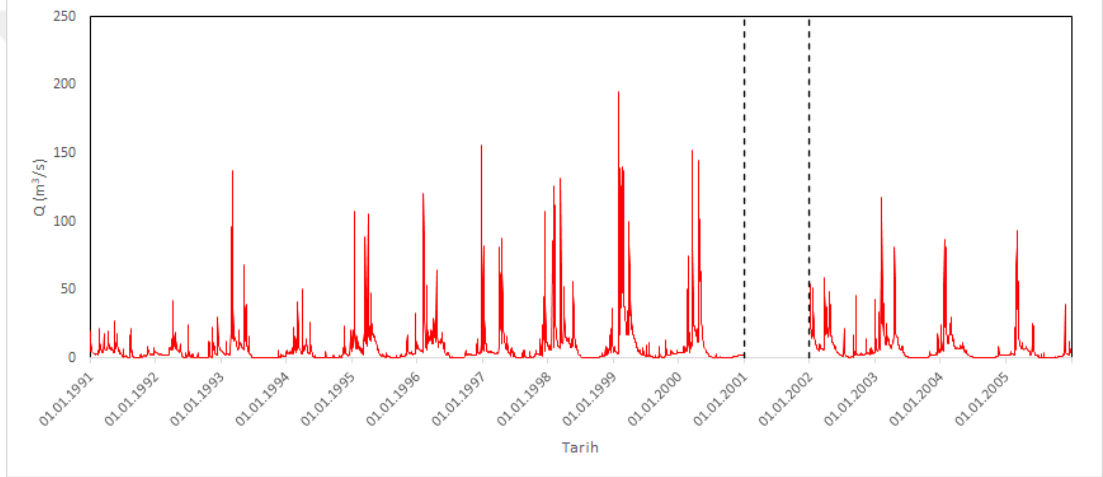


Şekil 2.15 : ERA5 ve MGM kaynaklı PET verileri arasındaki ilişki.

Çalışmanın ana odağı olan debi performansını değerlendirmek amacıyla gözlenmiş veri olarak Devlet Su İşleri (DSİ) veri tabanında bulunan 523 numaralı Acısu akım gözlem istasyonu (AGİ) kullanılmıştır. Modeller ve algoritmaların entegre edilmesi sonucu ortaya çıkan çıktıların ölçüm değerleri ile karşılaştırılması ve kıyaslanması için kullanılan gözlem verilerine ait ölçüm noktasının konumu Şekil 2.7’de belirtilmiştir. Acısu istasyonuna ait debi değerleri Şekil 2.17’de verilmiştir. Verilen değerler kalibrasyon ve validasyon aralığında olup, 2001-2002 aralığı sonuçları negatif yönde etkileyecek kuru bir aralık olması ve meteorolojik veriler ile birlikte değerlendirildiğinde de uyumsuzluk görülmesinden ötürü sürece dahil edilmemiştir. Aynı zamanda Şekil 2.16’da verilen değerlere ve MGM tarafından yayınlanan Türkiye geneli alansal yağışların değerlendirilmesine ilişkin rapora göre, 2000-2001 su yılına ait yağış değerlerinin, bu zaman aralığında ortalamanın %20’si civarında azaldığını göstermektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021). Bu durum, ERA5 yağış verilerinin MGM verilerinden ortalama %62 daha düşük olmasıyla (Şekil 2.12) bir arada değerlendirildiğinde, 2000-2001 periyodunun kalibrasyon sürecine dahil edilmemesini destekler niteliktedir.

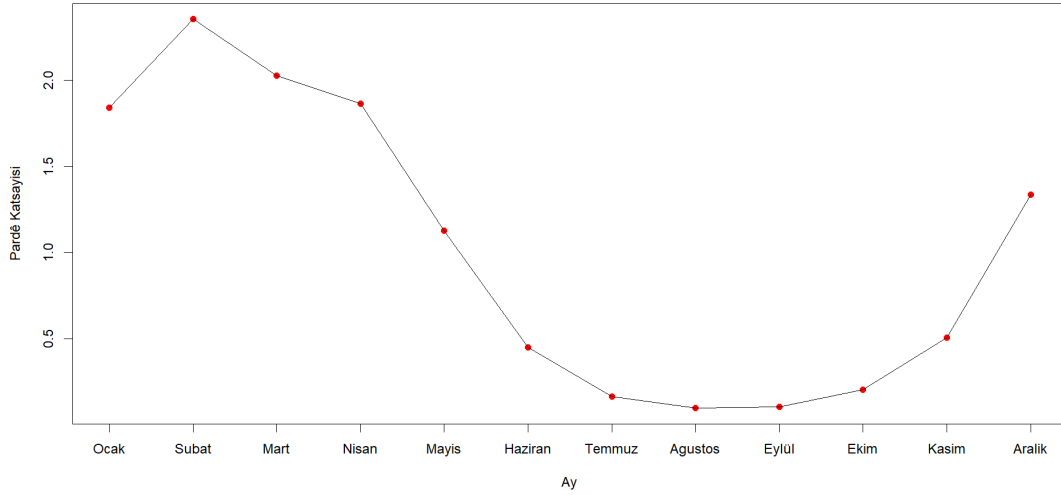


Şekil 2.16 : Türkiye genelinde aylık alansal yağış değerlerinin değişimi.



Şekil 2.17 : 523 no'lu AGİ'ye ait akım değerleri.

Günlük akım değerlerinin yıllar içerisindeki salınımı ve aldığı değer aralıklarını uzun zaman aralığında incelemek akım rejimini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Pardê (1933) çalışmasında aylık ortalama akımların, yıllık ortalama akım değerine oranını kullanarak tanımladığı “Pardê Katsayısı” aracılığı ile havza rejimini belirlememizde yardımcı olabilecek bir katsayı sunmuştur. Aylık ortalama akım değerlerinin boyutsuzlaştırılmasıyla elde edilen bu katsayı 523 no'lu AGİ'ye ait 1980-2011 yılları arasındaki akım verisi için hesaplanmış ve Şekil 2.18'de verilmiştir. Verilen görsel incelendiğinde havzanın plüvyal rejime sahip olduğu görülmektedir. Plüvyal rejimde kış aylarında akım değerleri yüksek, yaz aylarında ise düşüktür (Aksamit ve Whitfield, 2019).



Şekil 2.18 : Acısu Havzasına ait Pardé katsayısı değerleri.

2.3 Hidrolojik Modelleme

Bu bölümde çalışmada kullanılan ve farklı yapıya sahip olan hidrolojik modeller tanıtılacaktır. Hidrolojik döngüyü ve havza yapısını farklı ölçeklerde değerlendiren bu üç model yapısı arasındaki temel fark, havzayı sürece dahil ettikleri mekansal çözünürlüktür. Bu farkı ifade edebilmek adına Şekil 2.19’da Acısu Havzası’nın, çalışmada kullanılan hidrolojik modeller tarafından işleme alındıkları çözünürlüklere ait görsel paylaşılmıştır.



Şekil 2.19 : Çalışmada kullanılan hidrolojik model yapıları.

2.3.1 Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)

GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier), Perrin ve diğ. (2003) tarafından geliştirilen, günlük zaman ölçeği ile çalışan dört parametrelili bir toplu yağış-akış modelidir (Zeng ve diğ., 2019). Toplu model olmasından ötürü Şekil 2.19’da belirtildiği üzere havza yapısını tek bir parça olarak ele alır. Havzaya ait verileri zaman

serileri veya tekil parametreler olarak sürece dahil eder. Modelin bu süreçte kullandığı parametreler Çizelge 2.3'te açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 2.3 : GR4J modelinin kullandığı parametreler ve açıklamaları.

Parametre	Açıklama
X_1	Biriktirme elemana ait depolama kapasitesi (mm)
X_2	Yeraltı suyu seviyesindeki değişim (mm)
X_3	Öteleme elemanına ait depolama kapasitesi (mm)
X_4	Öteleme elemanına ait birim hidrografın taban genişliği (gün)

GR4J modelinin oluşum sürecinde mekansal çözünürlüğün toplu olarak belirlenmesinin sebepleri olarak üç farklı etkenden bahsedilmiştir. Bunlardan ilki, zemin üstü süreçlerin önceki çalışmalarda iyi anlaşılmasına rağmen zeminin altındaki yapının yağış olayına vereceği havza ölçeğindeki tepkinin belirsizliği; ikincisi, yarı dağlı ve dağlı hidrolojik modellerin yapı taşlarını toplu modellerin oluşturması ve bu toplu modellerin bir araya gelmesi ile gelişmiş çözümlere ulaşılabilmesi; üçüncüsü ise toplu modellerin yarı dağlı ve dağlı modellere göre uygulamadaki kolaylığıdır (Kumanlioglu ve Fistikoglu, 2019; Perrin ve diğ., 2003).

GR4J modeline tüm girdileri “mm” biriminde tanımlanır ve debi çıktısı aynı şekilde “mm” olarak alınır. Girdi olarak ortalama alansal yağış (P, mm/gün) ve potansiyel evapotranspirasyon (PET, mm/gün) verilerini kullanırken, modelin çıktı olarak verdiği debi değerleri havza alanı ve zaman aralığı kullanılarak “m³/s” cinsinden elde edilebilir. Model yağış-akış ilişkisini iki katmanda incelemektedir. Bu katmanlardan ilki akışın yüzeye ulaştığı katmandaki biriktirme elemanıdır. Biriktirme elemanında yüzey üstünde kalan net yağışın sızma sürecinden geçen büyük oranda miktarı birim hidrograf yardımıyla ötelenir ve ikinci tabaka olan öteleme elemanına ulaşır. Net yağıştan kalan kısım ise taban genişliği birinci adımdakine göre 2 kat büyük olan birim hidrograf ile ötelenir. Nihai olarak öteleme elemanından gelen akım ile net yağışın kalan kısmından ötelenen miktar birleşir ve model çıktısı olan toplam akımı oluşturur. Bu işleyiş dair detaylar Şekil 2.20'deki görselde verilmiştir.

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \left(\frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)} \quad (2.4)$$

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)} \quad (2.5)$$

Verilen denklemlerdeki modele ait X_1 parametresi biriktirme elemanının depolayabileceği zemin nemi kapasitesini (S 'in alabileceği maksimum değeri) temsil etmektedir. Aktarılan yağış miktarı (P_s) ve kaybedilen evapotranspirasyon (E_s) miktarı kadar su yüksekliğinin biriktirme elemanında sebep olduğu değişim (ΔS) denklem 2.6'te verilmiştir.

$$\Delta S = P_s - E_s \quad (2.6)$$

Zemin içerisindeki sıvının düşey doğrultudaki hareketi olarak tanımlanan perkolasyon ise GR4J modelinde denklem 2.7 ile sürece dahil edilmektedir.

$$Per = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (2.7)$$

Biriktirme elemanında perkolasyon yoluyla ayrılacak olan su miktarı kadar azalma gerçekleşir. Buradan perkolasyon ile gelen miktar ile net yağışın biriktirme elemanına aktarılan kısmından kalan miktarın ($P_n - P_s$) toplamı kadar kadar olan su öteleme elemanına aktarılır. Denklem 2.8'deki P_r , öteleme elemanına aktarılabilecek olan su miktarını temsil etmektedir.

$$P_r = Per + (P_n - P_s) \quad (2.8)$$

Daha sonraki aşamada Şekil 2.20'de de görüldüğü gibi, denklem 2.8'den elde edilen su miktarı öteleme elemanına geçmeden önce, taban genişliği (gün) X_4 olan birim hidrograf ile P_r 'nin %90'ı kullanılarak Q_{90} , $2X_4$ taban genişliğine sahip birim hidrograf ile de P_r 'in %10'u kullanılarak Q_{10} akım değerleri elde edilmektedir. Birim hidrograflar elde edilirken S-Hidrograf (SH) yöntemi kullanılır. Sırasıyla UH1 ve UH2 birim hidrograflarını elde etmek için kullanılan SH1 ve SH2 S-Hidrograflarına ait

eşitlikler aşağıda verilmiştir. S-hidrograf için tanımlanan zaman aralığını t değeri temsil etmektedir.

$$t \leq 0 \quad SH1(t) = 0 \quad (2.9)$$

$$0 < t \leq X_4 \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2} \quad (2.10)$$

$$t \geq X_4 \quad SH1(t) = 1 \quad (2.11)$$

$$t \leq 0 \quad SH2(t) = 0 \quad (2.12)$$

$$0 < t \leq X_4 \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2} \quad (2.13)$$

$$X_4 < t \leq 2X_4 \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{5/2} \quad (2.14)$$

$$t \geq 2X_4 \quad SH2(t) = 1 \quad (2.15)$$

UH1 ve UH2 birim hidrografları denklem 2.16 ve denklem 2.17 kullanılarak elde edilmiştir. Denklemlerdeki x herhangi bir tam sayısı temsil etmektedir.

$$UH1(x) = SH1(x) - SH1(x - 1) \quad (2.16)$$

$$UH2(x) = SH2(x) - SH2(x - 1) \quad (2.17)$$

Öteleme elemanındaki işlemler sonrasında yeraltı suyu yüksekliğindeki değişim (F) denklem 2.18 ile bulunabilmektedir. Denklemdaki X_2 parametresi yeraltı suyu yüksekliğindeki değişim katsayısını, X_3 öteleme elemanının depolama kapasitesini ve R öteleme elemanının mevcut su yüksekliğini temsil etmektedir.

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3}\right)^{7/2} \quad (2.18)$$

Öteleme elemanından çıkan akım değeri olan Q_r ile UH2 ile elde edilen Q_d 'ye ait eşitlikler denklem 2.19 ve denklem 2.20'da verilmiş olup bu değerlerin toplamı model çıktısı olan debi değerini (Q) verir (Denklem 2.21).

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_e} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (2.19)$$

$$Q_d = \max (0 ; Q_1 + F) \quad (2.20)$$

$$Q = Q_r + Q_d \quad (2.21)$$

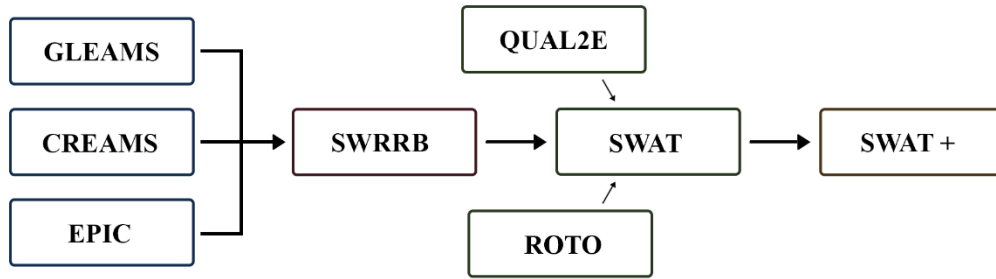
Bu çalışma kapsamında girdi olarak Acısu Havzasına ait ERA5 kaynaklı P, PET ve T değerlerinin alansal ortalamalarından elde edilen zaman serilerinin tanımlandığı GR4J modeli “R Studio” editörü ve “airGR” kütüphanesi kullanılarak “R” tabanlı olarak çalıştırılmıştır.

2.3.2 Soil Water Assessment Tool Plus (SWAT+)

Ortaya çıkış amacı arazi kullanımının ve planlamasının, kendi içinde heterojen yapıya sahip havzalar içerisinde su, sediment ve tarımsal-kimyasal atıklar üzerindeki etkisini uzun zaman periyotları boyunca öngörebilmek olan SWAT (Soil Water Assessment) modeli Dr. Jeff Arnold’ın USDA-ARS (Amerika Birleşik Devletleri – Tarımsal Araştırmalar Servisi) için yaptığı çalışması ile literatürde yer bulmuştur. Fiziksel tabanlı olmasının yanında, günlük bazda çalışan, sürekli ve yarı dağılı bir model olan SWAT, küçük veya büyük ölçekteki havzalarda uzun zaman periyotları için yapılan yağış-akış ilişkisi, iklim değişikliği, çevresel etki çalışmalarında ülkemizde ve dünya genelinde geniş bir yelpazede kullanım alanı sunmaktadır (Anjum ve diğ., 2019; Gebrechorkos ve diğ., 2020; Peker ve Sorman, 2021; Özcan, 2016).

ARS tarafından geliştirilen modellerin önemli özelliklerinin bir araya gelmesi ve geliştirilmesiyle oluşan SWAT+ modelinin temelini GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems), CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) ve EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) modelleri oluşturmaktadır. GLEAMS modelinden gelen pestisit, SCS yöntemi, sediment birikimi; CREAMS modelinden yola çıkarak geliştirilen birden çok alt havzada aynı anda simülasyon yapma, göllerin ve rezervuarların etkisini hesaplamak adına eklenen depolama bileşeni, yeraltı suyu ve tersine akış bileşenleri; EPIC modelinden ise basit öteleme, sediment taşınımı ve su kaybı bileşenleri kullanılarak oluşturulan SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) modeli SWAT modelinin başlangıç noktasıdır. SWRRB modelinin alt havza sınırı

büyük havzaları modelleme imkanı sunamadığından ötürü 1995 yılında ROTO (Routing Outputs to Outlet) yazılımı ile akış yatağı ve depolama birimleri boyunca öteleme özelliği olan model entegrasyonu ile birden çok SWRRB modeli birbirine bağlanarak bu sorun ortadan kaldırılmıştır. Ek olarak akım içerisindeki maddelerin ötelenmesi ve su kalitesini akım boyunca inceleyebilmek için QUAL2E modeline ait denklemlerden faydalanılmıştır. Bu yeni model SWAT (Soil Water Assessment Tool) olarak adlandırılmıştır (Neitsch ve diğ., 2011). Model arayüzünde yapılan kullanıcı dostu modifikasyonlar ve alt havzalar içinde detaylandırılan dağlık alan-taşkın yatağı ayrımı ile SWAT+ modeli ortaya çıkmıştır (Chawanda ve diğ., 2020). SWAT+ modelinin oluşumu Şekil 2.21’de görsel olarak paylaşılmıştır.



Şekil 2.21 : SWAT+ modelinin gelişimi.

SWAT+ modeli hidrolojik döngüyü denklem 2.22’de verilen su dengesine bağlı olarak bilgisayar ortamına taşımaktadır.

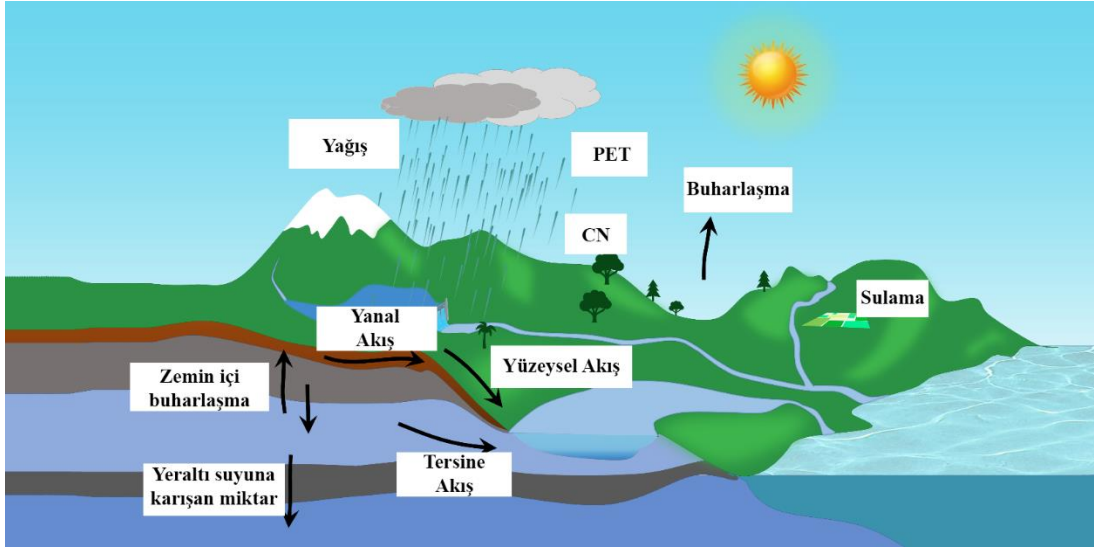
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.22)$$

Denklemde SW_t süreç sonunda zemindeki su miktarını (mm), SW_0 başlangıçta zemindeki bulunan su miktarını (mm), R_{day} yağış yüksekliğini (mm), Q_{surf} yüzeysel akış miktarını (mm), E_a evapotranspirasyonu (mm), w_{seep} sızma yoluyla vadoz zona iletilen su miktarını (mm) ve Q_{gw} yeraltı suyunu (mm) temsil etmektedir.

SWAT+ modeli havzanın iklimsel ve jeolojik yapısını etkileyen farklı türdeki girdileri bir arada kullanır. Zaman serisi olarak tanımlanan iklimsel veriler yağış, maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, potansiyel evapotranspirasyon, bağıl nem, güneş ışıması ve rüzgar hızıdır. Raster veri formatındaki girdiler ise sayısal yükseklik modeli, arazi kullanımı haritası ve toprak haritasıdır. Potansiyel evapotranspirasyon (PET)

değerlerini verilen diğer girdiler doğrultusunda Penman-Monteith, Priestley-Taylor ve Hargreaves-Samani yöntemleri ile hesaplayabilen SWAT+ modeline bu çalışma kapsamında diğer modeller ile aynı kaynaktan veri kullanmak adına ERA5'tan elde edilen PET verisi tanımlanmıştır. Yağış-akış ilişkisi ve su miktarı odaklı çalışmalar için kullanılan girdiler yeterli olmakla birlikte su kalitesini incelemeyi amaçlayan çalışmalar için akımın içerdiği materyaller hakkında girdiler de önem kazanmaktadır.

SWAT+ modeli alt havzaların ötesinde HRU (Hidrolojik Etki Bitimi) adı verilen alt birimlere ve bu HRU'lar LSU'lara (Arazi Birimi) ayrılır. HRU'lar kendi içlerinde homojen paramtrelere sahip bölgelerin gruplanmasıyla oluşurken LSU'lar ise taşkın yatakları ve yüksek bölgeler olarak ayrılan model yapıtaşlarıdır. Yüzeysel akış üretimi için model iki farklı faza sahiptir. Bunlardan birincisi toprak fazı, ikincisi ise öteleme fazıdır. Toprak fazı buharlaşma, sulama, yüzeysel akış gibi yüzeyde gerçekleşen süreçlerin yanı sıra, yağışın bitki örtüsü veya ormanlar tarafından tutulan kısmı dışındaki miktarının zemin içerisindeki sızma sürecini, düşey doğrultuda hareketi içeren kısımdır. Bu fazı temsil eden görsel Şekil 2.22'de verilmiştir. Suyun düşey doğrultudaki hareket süreci sızma veya perkolasyon şeklinde aşağı yönlü olup, derin akifere veya yeraltı suyuna karışabilecekken, yukarı yönde tersine akış ile yüzeysel akışa da karışabilir. Bu fazda yüzeysel akış değerlerinin üretilmesi için model tarafından iki farklı yöntem sunulmaktadır (Neitsch ve diğ., 2002). Bunlardan birincisi Green-Amprt modeli, ikincisi ise SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number) yöntemidir (Kale ve Sahoo, 2011; Mishra ve diğ., 2007). Bu çalışmada gerekli olan günlük girdi tanımlanarak SCS-CN yöntemi kullanılmıştır. İkinci faz olan öteleme fazında ise SWAT+ modeli tarafından sunulan iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler Muskingum yöntemi ve değişken depolama katsayısı yöntemidir. Bu çalışmada öteleme metodu olarak Muskingum yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2.22 : Toprak fazına ait temsili görsel.

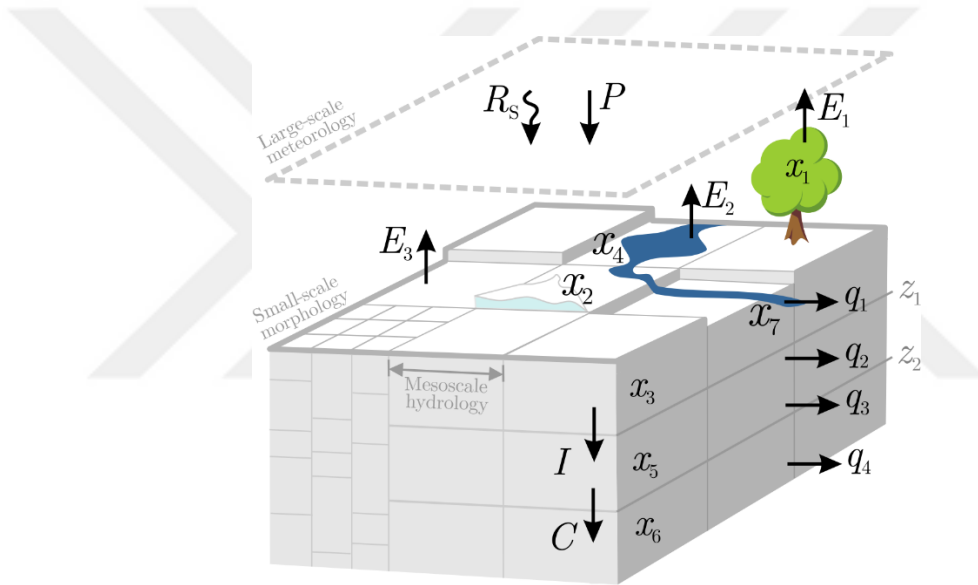
SWAT+ modeli alt birimlere ayırdığı havzayı, bu alt birimler arasında kurduğu hidrolojik bağlantılar ve öteleme işlemleri ile bilgisayar ortamında simüle etmektedir. Havzanın ilk aşamada bölündüğü alt birimler, alt havzalarlardır. İkinci aşamada ise girdi olarak tanımlanan raster veriler (DEM, toprak haritası ve arazi kullanımı) kullanılarak bu veriler kapsamındaki ortak özelliklerine göre HRU'lara (Hidrolojik Etki Birimi) ayrılırlar. Son olarak ise HRU'lar kendi içlerinde taşkın yatağı (floodplain) ve yüksek bölgeler (upland) olarak ikiye ayrılırlar. Havzanın heterojen yapısını homojen birimlere ayırarak çözümlemesi modelin tahmin aşamasındaki doğruluğunu arttırmaktadır. Hidrolojik döngü bileşenlerine ait tüm işlemler her bir HRU özelinde ayrı ayrı gerçekleşir. Bu durum gerek toprak çeşidi gerek ise arazi kullanımı açısından havza yapısındaki çeşitliliğin tahmin değerlerine daha iyi yansımaya yardımcı olur. HRU'lar özelinde gerçekleşen bu işlemler sonucunda hidrolojik olarak bağlantısı bulunan her birim arasında gerçekleşen öteleme işlemi sonucunda modelin debi tahminlerine ulaşılır (Arnold ve diğ., 2012).

Model arayüzü olarak QGIS, ArcGIS ve R programlarının eklentileri olarak alternatifler bulunmaktadır. Bu çalışmada QGIS programı, QSWAT+ eklentisi kullanılarak kurulum tamamlanmıştır.

2.3.3 mesoscale Hydrological Model (mHM)

Bu çalışmada kullanılan mHM (mesoscale Hydrological Model) modeli, UFZ (Helmholtz Centre for Environmental Research) çatısı altında toplanan bir ekip tarafından geliştirilen tam dağılı, fiziksel tabanlı ve sürekli bir modeldir (Kumar ve

diğ., 2013; Samaniego ve diğ., y.y.; Thober ve diğ., 2019). mHM modelinin temelinde hidrolojik süreçlere ait HBV (Bergström, 1992) ve VIC (Liang ve diğ., 1996) gibi farklı modellerde test edilmiş ve onaylanmış olan sayısal yaklaşımlar bulunmaktadır. mHM'i diğer yağış akış modellerinden ayıran özelliği ise hücreler (ızgaralar) ile dağılı olarak tanımladığı çalışma alanı içinde, her hücre için kullandığı parametre ve girdi çeşitliliğidir. Bu özelliği ile kullanılan verinin ve çalıştırılan modelin mekansal çözünürlüğü arttıkça, bilgisayar ortamında havzaya ait özelliklerin değişkenliği daha iyi temsil edilebilmektedir. Girdilerin ve durum değişkenlerinin mekansal çözünürlüğünü üç farklı katmanda, farklı ölçeklerde inceler: Katman 0, Katman 1, Katman 2 (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 : mHM model katmanları.

Katman 0, bu katmanlar içinde en detaylı ölçeğe sahip olanıdır. Bu seviyede zemin karakteristiği, morfolojik değişkenler, arazi ve bitki örtüsündeki değişimler işlenir. Katman 0'da yaklaşık 100 m civarına kadar mekansal çözünürlükte işlem yapılmaktadır. Katman 1, hidrolojik süreçlerin işlendiği katmandır. Katman 1'de, 1 km – 16 km arasında mekansal çözünürlüklerde işlem yapılmaktadır. Son olarak Katman 2'de, ise meteorolojik girdiler ve değişkenler işlenir. Katman 2'de gerçekleşen işlemler 1 km- 25 km arası mekansal çözünürlüktedir.

Havzaların hücre bazında incelenmesi, arazinin heterojen yapısını yansıtabilmesinden ötürü, süreklilik açısından oldukça zorlayıcıdır. mHM modelinde bu zorluğu aşmak

amacıyla adi diferansiyel denklemler (ODE) kullanılmıştır. ODE'ler ile her bir hücre için kanopi tutması, kar erimesi ve birikmesi, toprak nemi dinamikleri, sızma, evapotranspirasyon, perkolasyon ve yüzeysel akış süreçleri tanımlanmıştır (Demirel ve diğ., 2018). Bu süreçler için çözümlenen ODE'lerin sonucunda her bir hücreye ait hidrograf elde edilmektedir. Elde edilen hidrograflar Katman 1'deki hücreler arasında drenaj ağı boyunca Muskingum yöntemi ile ötelenir. Havza çıkışında sonlanan öteleme işlemi ile debi değerleri elde edilir.

Açık kaynak olan paylaşılan mHM modelinin kodu Fortran tabanlı olarak sunulmuştur (Samaniego ve diğ., 2019). Bu çalışma kapsamında mHM modeline ait kod, Windows işletim sistemi üzerinde Cygwin programı aracılığıyla derlenerek çalıştırılmıştır.

2.4 Kalibrasyon

2.4.1 Algoritmalar

Çalışmada kullanılan modellerin kalibrasyonları otomatik kalibrasyon aracı olan Parameter Estimation Tool (PEST) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Algoritma olarak her bir model ile entegrasyonu sağlanan PEST'in içerdiği, Levenberg-Marquardt, Shuffled Complex Evolution ve Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy algoritmaları kullanılmıştır.

2.4.1.1 Levenberg-Marquardt (LM)

Lokal kalibrasyon algoritması olan Levenberg-Marquardt algoritması, Gradient Descent ve Gauss-Newton yöntemlerinin birleşiminden oluşmaktadır. LM, kullanıcı tarafından parametreler için önceden belirlenmiş başlangıç değerlerini kullanarak modeli çağırır. Girdi parametreleri ve model çıktıları arasındaki ilişkiyi doğrusallaştırır. İlk iterasyonda, ayarlanabilir parametre sayısına göre, model birkaç kez çalıştırılır ve her model çıktısının kısmi türevlerini içeren Jacobian matrisini doldurulur (Jacobian matrisini doldurmak, ayarlanabilir parametre sayısı kadar çalıştırma gerektirir). Daha sonra, bir sönümleme faktörü tanımlamak amacıyla ağırlık vektörü hesaplanır ve parametreler tanımlı sınır koşullar içinde değiştirilir. Bu prosedür, amaç fonksiyonu minimuma ulaşana kadar bir öncekinden güncellenen değerler kullanılarak her iterasyon için tekrarlanır. Algoritmanın iterasyon adımlarında kullanılan eşitlik denklem 2.23'te verilmiştir (Gavin, 2019).

$$\Delta W = (J^T J + \mu I) J^T e \quad (2.23)$$

Eşitlikte ΔW ağırlık vektörünü, J Jacobian matrisini, μ kombinasyon katsayısını, I birim matrisi ve e hata matrisini temsil etmektedir.

2.4.1.2 Shuffled Complex Evolution (SCE)

Shuffled Complex Evolution (SCE) algoritması başlangıçta, global optimizasyon algoritması kullanan kavramsal yağış-akış modellerinin kalibrasyonu için geliştirilmiştir. Algoritma, rekabetçi evrim, simpleks yönteminin yerel doğrudan araması, kontrollü rastgele arama ve kompleks karıştırma yöntemlerine dayanmaktadır. SCE, sınırları belirlenen parametre uzayı üzerinde rastgele dağıtılmış noktalardan oluşan bir popülasyonu örnekleyerek ve noktaları birkaç gruba (komplekslere) bölerek başlar. Her kompleks $2n + 1$ puan içerir (n , optimize edilecek parametre sayısıdır) ve bağımsız olarak, simpleks yöntemini kullanarak örneklem uzayını farklı yönlerde keşfetmek için modeli çağırır. Periyodik olarak popülasyon karıştırılır ve iterasyon evreleri sırasında önceki adımlarda elde edilen değerler yeni komplekslere yeniden atanır. Keşif ve karıştırma süreci, optimum kritere ulaşılan kadar aşamalı olarak tekrarlanır (tüm popülasyon global minimum noktaya yakınsamak için hareket eder) (Shoarinezhad ve diğ., 2020).

2.4.1.3 Covariance Matrix Adoption - Evolution Strategy (CMAES)

CMAES, stokastik yaklaşımları bulunan ve doğrusal olmayan fonksiyonlar içeren bir global optimizasyon yöntemidir. Her iterasyon, çok değişkenli normal arama dağılımından yeni bir parametre setiyle başlatılır. Parametre setlerinin amaç fonksiyonuna göre değerlendirilmesi ve parametrelerinin güncellenmesi ile devam eder. Daha sonra düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaşana kadar sürdürür. Kullanıcı tanımlı bir sonlandırma kriteri karşılanana kadar iterasyonlara devam edilir. CMAES, normal dağılımdaki değişkenler arasındaki ikili bağımlılıkları temsil eden kovaryans matrisini kullanır. Algoritma, parametre değerini değiştirirken iki yöntemi kullanır: (1) normal dağılımın ortalamasını, önceden başarılı optimum sonuca yakın aday değerlerin olasılığını maksimize edecek şekilde güncellemek için maksimum olasılık yöntemi; (2) kovaryans matrisi oluşturulması ve normal dağılımın standart sapması olarak tanımlanan parametre değerindeki değişimi ayarlamak (Hansen ve Auger, 2011).

2.4.2 Performans Değerlendirme Kriteri

Bu çalışmada kalibrasyon süreci için belirlenen amaç fonksiyonu literatürde hidrolojik model çalışmaları için yaygın olarak kullanılan Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) katsayısıdır (Bhatta ve diğ., 2020; Tan ve diğ., 2020; Verdhen ve diğ., 2014). Nash ve Sutcliffe (1970) tarafından sunulan katsayıya ait eşitlik denklem 2.24'te verilmiştir.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{mean}^{obs})^2} \right] \quad (2.24)$$

Denklemde n veri sayısını, Q_i^{obs} gözlenen akım değerini, Q_i^{sim} model çıktısını ve Q_{mean}^{obs} ifadesi ise gözlenmiş akım değerlerinin ortalamasını ifade eder. NSE değeri 1 ile $-\infty$ arasında değerler alabilmektedir ve optimum değer 1'dir.

Model sonuçlarını değerlendirmek amacıyla kullanılan R^2 , Kling-Gupta Efficiency (KGE), ortalama kare hata (MSE), kök ortalama kare hata (RMSE), yüzde bias (PBIAS) ve RMSE'nin standart sapmaya oranına (RSR) ait eşitlikler denklem 2.25, 2.26, 2.27, 2.28, 2.29 ve 2.30'da verilmiştir.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_{obs})^2} \right] \quad (2.25)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\mu_{obs}}{\mu_{sim}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{sim}} - 1 \right)^2} \quad (2.26)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{mean})^2}{n} \quad (2.27)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.28)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (y_i)} \quad (2.29)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{\sigma_{obs}} \quad (2.30)$$

Denklemlerde n gözlem sayısını, y_i gözlenen değeri, y_i' çıktı değerini, μ değerlerin ortalamasını, r korelasyon katsayısını, σ değerlerin standart sapmasını temsil etmektedir.

2.4.3 Hassasiyet Analizi ve Debi Kalibrasyonu

Kalibrasyon süreçlerinde modellere ait parametrelerin hepsi, model çıktısı üzerinde aynı mertebede etkiye sahip değil. Bir parametrenin istenen çıktı üzerinde hiçbir etkisi olmayabilir. Bu durumlarda etkisi olmayan bu parametreleri kalibre etmek hem zaman kaybı hem de gereksiz hesap yüküne sebep olmaktadır (Dakhlalla ve Parajuli, 2019; Li ve diğ., 2021). Bu olumsuzluğun önüne geçebilmek için kalibrasyon aşamalarından önce model parametrelerine hassasiyet analizi uygulanmıştır. Uygulanan hassasiyet analizi için PEST aracının otomatik hassasiyet analizi özelliğinden faydalanılmıştır. Temel olarak hassasiyet analizi için kullanılan eşitlik denklem 2.31'de verilmiştir.

$$H = \frac{\Delta OF (\%)}{\Delta Par (\%)} \quad (2.31)$$

Eşitlikte H ifadesi hassasiyet değerini, ΔOF yüzdece amaç fonksiyonundaki değişimi ve ΔPar parametre değerinin sınır koşulları içerisindeki değişimini temsil etmektedir.

Hidrolojik modellere ait debi çıktısı üzerinde etkili olan parametreler hassasiyet analizi sonrasında kalibrasyon sürecinden geçmiştir. Üç algoritma içinde aynı parametre setleri tanımlanmıştır.

Bu amaçla GR4J modelinin 3 parametresi (Çizelge 2.4), SWAT+ modeline ait 10 parametre (Çizelge 2.5) ve mHM modelinin ise 15 parametresi (Çizelge 2.6), öznal olarak belirlenebilen eşik hassasiyet değerinin üzerinde kalan parametreler olarak, kalibrasyon sürecine dahil edilmiştir (Feyereisen ve diğ., 2007).

Çizelge 2.4 : GR4J modelinin kalibre edilen parametreleri.

Parametre	Açıklama	Birim
X_1	Biriktirme elemana ait depolama kapasitesi	mm
X_2	Yeraltı suyu seviyesindeki değişim	mm
X_4	Öteleme elemanına ait birim hidrografın taban genişliği	gün

Çizelge 2.5 : SWAT+ modelinin kalibre edilen parametreleri.

Parametre	Açıklama	Birim
awc	Zeminde bulunan su kapasitesi	mm
canmx	Azami kanopi tutması	mm
cn2	SCS eğri numarası	-
epco	Bitkilerin tükettiği su miktarı için düzeltme faktörü	-
esco	Toprakta gerçekleşen buharlaşma için düzeltme faktörü	-
evrch	Kanal kollarında gerçekleşen buharlaşma için düzeltme faktörü	-
flomin	Tersine akışın gerçekleşmesi için akiferde depolanacak minimum su miktarı	m
k	Doygun zeminin hidrolik iletkenliği	mm/sa
perco	Perkolasyon katsayısı	-
revap	Sığ akiferden kök bölgesine gerçekleşen buharlaşma katsayısı	-

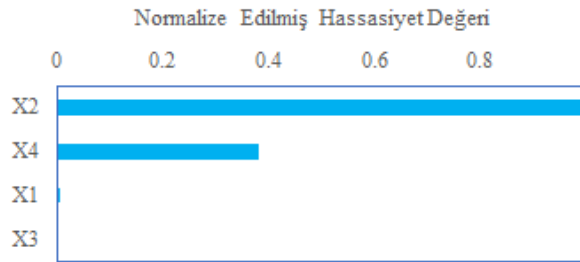
Çizelge 2.6 : mHM modelinin kalibre edilen parametreleri.

Parametre	Açıklama
PTF_lower66_5_clay	%66.5'ten az kil içeren zemin için pedotransfer fonksiyonu-zemin nemi sabiti
PTF_Ks_sand	Doygun kum zemin için pedotransfer fonksiyonu-hidrolik iletkenlik sabiti
PTF_Ks_clay	Doygun kil zemin için pedotransfer fonksiyonu-hidrolik iletkenlik sabiti
rootFractionCoefficient_pervious	Geçirimli alan için bitki kökü derinliği katsayısı
PTF_lower66_5_Db	%66.5'ten az kum içeren zemin için pedotransfer fonksiyonu-yoğunluk sabiti
PTF_lower66_5_constant	%66.5'ten az kum içeren zemin için pedotransfer fonksiyonu-zemin nemi sabiti
PTF_Ks_constant	Doygun zemin için pedotransfer fonksiyonu hidrolik iletkenlik sabiti
rootFractionCoefficient_forest	Orman alanı için bitki kökü derinliği katsayısı
infiltrationShapeFactor	Efektif yağışı sızma ve akışa ayıran şekil faktörü
PET_a_forest	Orman alanı- PET düzeltme faktörü
PET_a_pervious	Geçirimli alan- PET düzeltme faktörü
PET_b	Tarımsal alan- PET düzeltme faktörü
PET_c	Tarımsal alan- PET düzeltme faktörü (2)
canopyInterceptionFactor	Kanopi tutması katsayısı
exponentSlowInterflow	Yavaş ara akış çarpanı

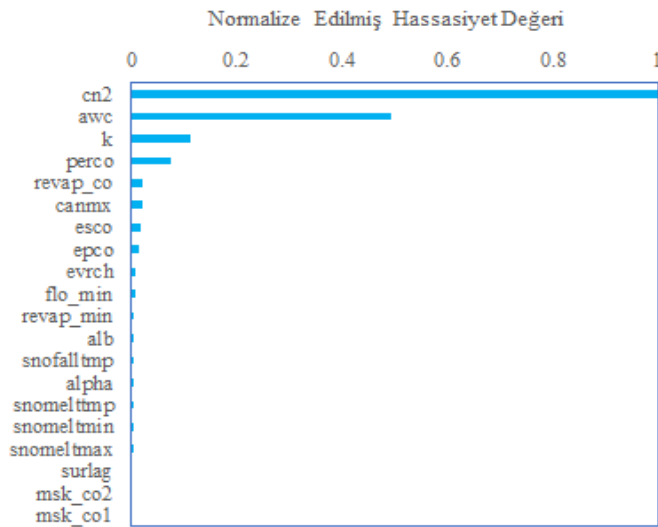
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Hassasiyet Analizi

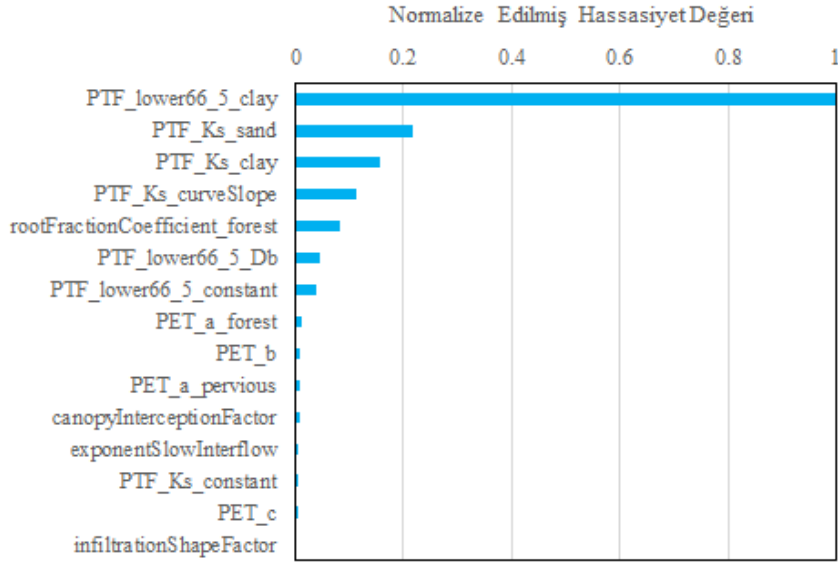
Kurulum aşaması tamamlanan modellerin parametreleri arasında, debi performansı üzerinde etkili olacak olanları belirlemek amacıyla her model için hassasiyet analizi uygulanmıştır. GR4J modelini 4 parametresi, SWAT+ modelinin debi üzerinde etkili olan 20 parametresi (Arnold ve diğ., 2012) ve mHM modelinin 66 parametresi için PEST aracının otomatik hassasiyet analizi ile süreç tamamlanmıştır. Kalibrasyon öncesinde yapılan bu hassasiyet analizinin normalize edilmiş değerlerine ait sonuçlar GR4J, SWAT+ ve mHM modelleri için sırasıyla Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1 : SWAT+ hassasiyet analizi sonuçları.



Şekil 3.2 : SWAT+ hassasiyet analizi sonuçları.



Şekil 3.3 : mHM hassasiyet analizi sonuçları.

Hassasiyet analizi sonucunda seçilecek olan parametreler için eşik değeri 0.0025 olarak belirlenmiştir. Bu eşik değeri üzerinde kalan parametreler kalibre edilmiştir. Şekil 3.1’de GR4J modelinin “X2” (Biriktirme elemana ait depolama kapasitesi), “X4” (Öteleme elemanına ait birim hidrografın taban genişliği) ve “X1” (Öteleme elemanına ait birim hidrografın taban genişliği) parametreleri; Şekil 3.2’de SWAT+ modelinin “cn2” (SCS eğri numarası), “awc” (zeminde bulunan su kapasitesi), “k” (doygun zeminin hidrolik iletkenliği), “perco” (perkolasyon katsayısı), “revap” (sıg akiferden kök bölgesine gerçekleşen buharlaşma katsayısı), “canmx” (azami kanopi tutması), “esco” (toprakta gerçekleşen buharlaşma için düzeltme faktörü), “epco” (bitkilerin tükettiği su miktarı için düzeltme faktörü), “evrch” (kanal kollarında gerçekleşen buharlaşma için düzeltme faktörü) ve “flomin” (tersine akışın gerçekleşmesi için akiferde depolanacak minimum su miktarı) parametreleri; Şekil 3.3’te mHM modelinin “PTF_lower66_5_clay” (%66.5’ten az kil içeren zemin için pedotransfer fonksiyonu-zemin nemi sabiti), “PTF_Ks_sand” (Doygun kum zemin için pedotransfer fonksiyonu-hidrolik iletkenlik sabiti), “PTF_Ks_clay” (Doygun kil zemin için pedotransfer fonksiyonu-hidrolik iletkenlik sabiti), “rootFractionCoefficient_pervious” (Geçirimli alan için bitki kökü derinliği katsayısı), “PTF_lower66_5_Db” (%66.5’ten az kum içeren zemin için pedotransfer fonksiyonu-yoğunluk sabiti), “PTF_lower66_5_constant” (%66.5’ten az kum içeren zemin için pedotransfer fonksiyonu-zemin nemi sabiti), “PTF_Ks_constant” (Doygun zemin için pedotransfer fonksiyonu hidrolik iletkenlik sabiti), “rootFractionCoefficient_forest”

(Orman alanı için bitki kökü derinliği katsayısı), “infiltrationShapeFactor” (Etketif yağış sızma ve akışa ayıran şekil faktörü), “PET_a_forest” (Orman alanı - PET düzeltme faktörü), “PET_a_pervious” (Geçirimli alan - PET düzeltme faktörü), “PET_b” Tarımsal alan - (PET düzeltme faktörü), PET_c Tarımsal alan - (PET düzeltme faktörü (2)), “canopyInterceptionFactor” (Kanopi tutması katsayısı), “exponentSlowInterflow” (Yavaş ara akış çarpanı) parametreleri eşik değeri üzerinde kalmış ve hassas parametreler olarak belirlenmiştir. Üç modelin en hassas parametreleri incelendiğinde ortak olarak, geçirgenlik ve zemin nemi ile ilgili parametrelerin öne çıktığı görülmektedir.

3.2 Kalibrasyon ve Validasyon

Kalibre edilecek parametrelerin belirlenmesinden sonra Acısu Havzası için kurulan üç model de Parameter Estimation Tool (PEST) içinde bulunan, Levenberg Marquardt (LM), Shuffled Complex Evolution (SCE) ve Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algoritmaları kullanılarak kalibre edilmiştir. Üç algoritma için de durdurma kriteri olarak 15 iterasyon boyunca amaç fonksiyonunda 10^{-6} kadar eşik değeri tanımlanmıştır. Her algoritma ile 1000 iterasyon adımı gerçekleştirilmiş olup, bu bölümde sonuçlarına yer verilmiştir. Modellerin kalibrasyonu 1991-2000, validasyonu ise 2002-2005 yıl aralıkları için Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) amaç fonksiyonu belirlenerek gerçekleştirilmiştir.

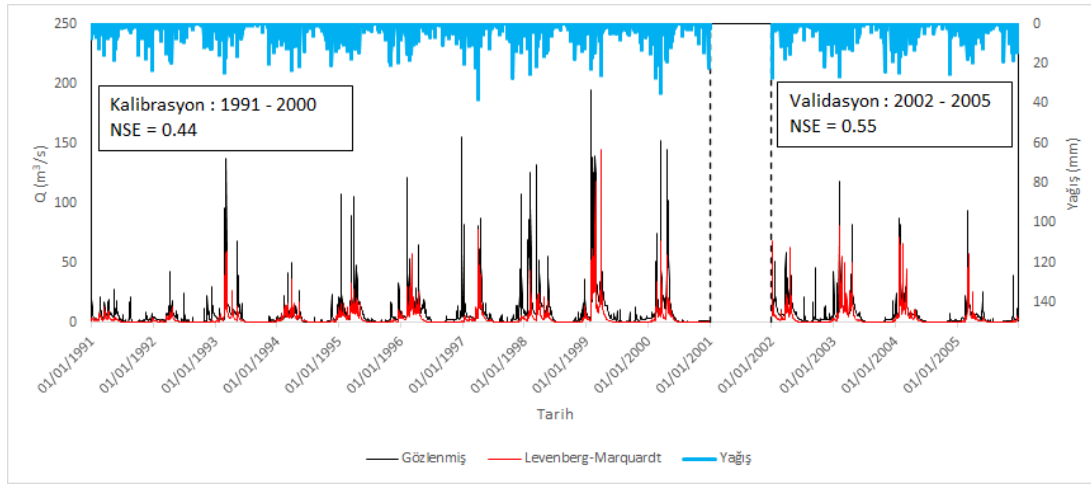
3.2.1 GR4J

GR4J modeli, parametrelere ait sınır koşulları tanımlanarak kalibre edilmiştir. Kalibre edilen parametrelerin sınır koşulları ve her bir algoritmaya ait değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

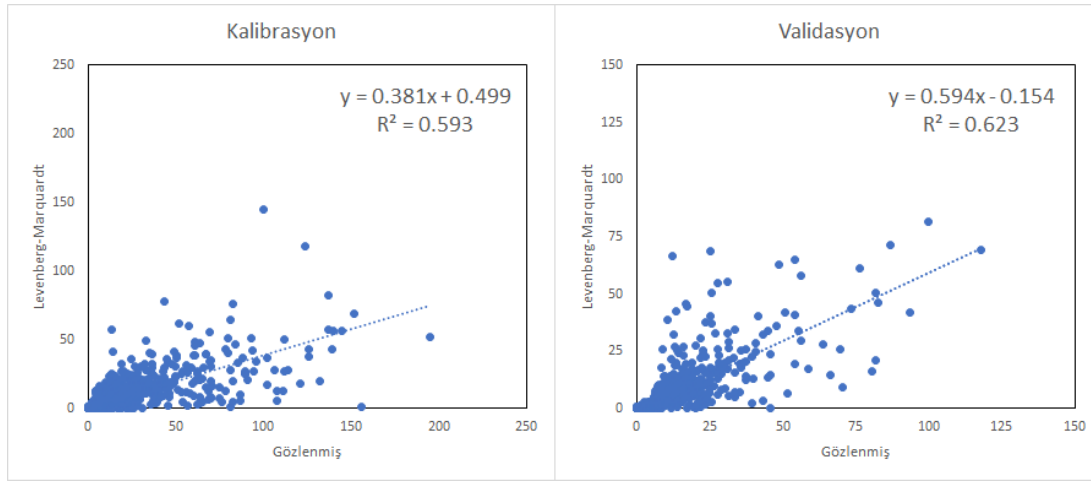
Çizelge 3.1 : GR4J parametre değerleri.

Parametre	Parametre Değeri			Değer Aralığı	
	LM	SCE-UA	CMAES	Min	Maks
X1	399.99	346.37	347.02	10	2000
X2	0.00	0.46	0.47	-8	6
X4	1.77	1.32	1.33	1	4

Nihai parametreler ile sonuçları kullanılarak çalıştırılan GR4J modeline ait debi çıktıları elde edilmiştir. Gözlenmiş veriler ile karşılaştırılan çıktılar LM algoritması için Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te verilmiştir.



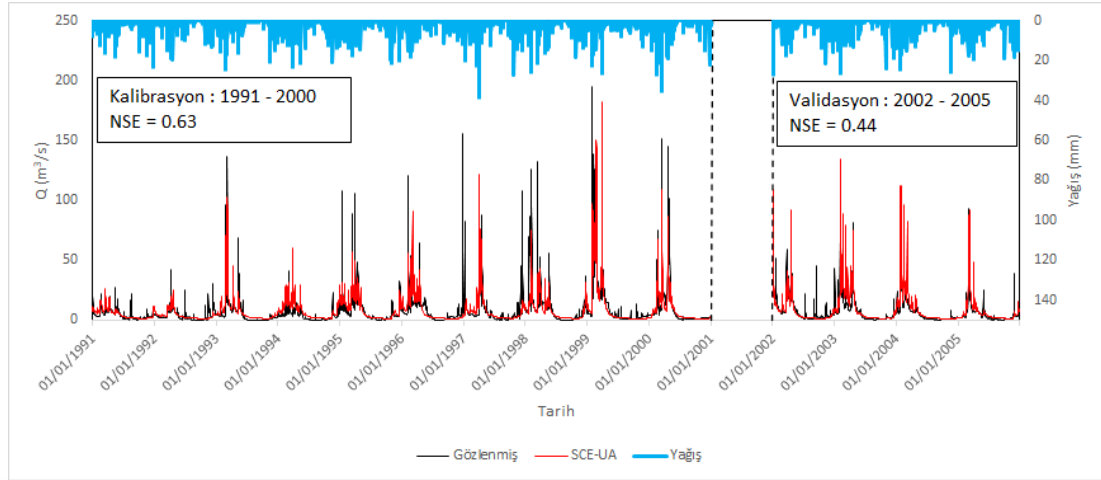
Şekil 3.4 : GR4J - LM debi çıktısı.



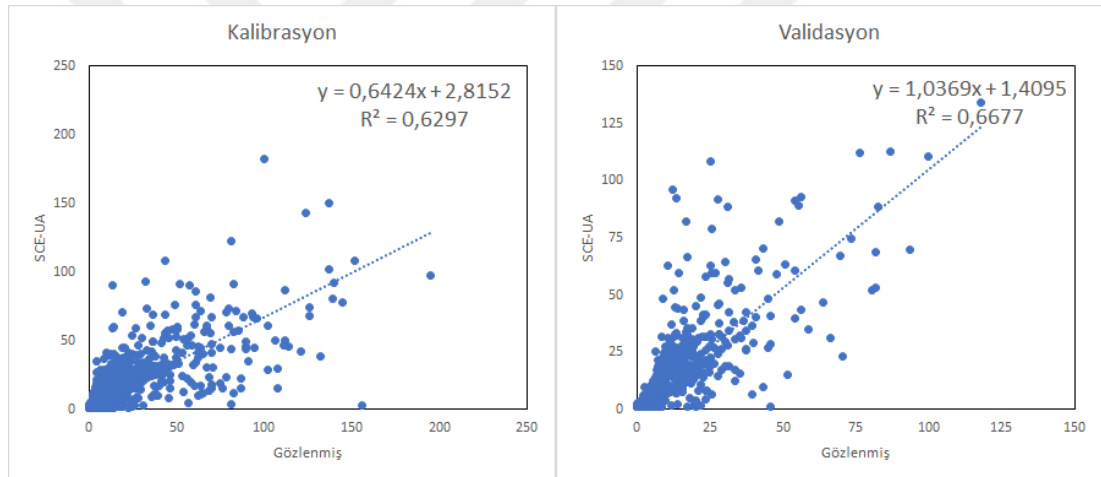
Şekil 3.5 : GR4J-LM çıktıların gözlenmiş veri ile ilişkisi.

Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde GR4J-LM entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.44 NSE değerine ulaştığı görülmüştür. Bu aralıkta pik debileri yakalayamadığı ve bu istikrarsızlığı validasyon periyodunda, NSE değeri 0.55'e kadar çıkmış olsada, devam ettirdiği görülmüştür. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için $0.59 R^2$, 0.221 KGE, 0.75 RSR, -55.5 PBIAS, 131.05 MSE, 11.9 RMSE; validasyon periyodu için ise $0.62 R^2$, 0.436 KGE, 0.67 RSR, -42.7 PBIAS, 59.24 MSE, 7.7 RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile birlikte Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 incelendiğinde ise GR4J-LM entegrasyonunun gözlenmiş veriye nazaran daha düşük debi değerleri ürettiği tespit edilmiştir.

Gözlenmiş veriler ile karşılaştırılan çıktılar SCE algoritması için Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6 : GR4J - SCE debi çıktısı.

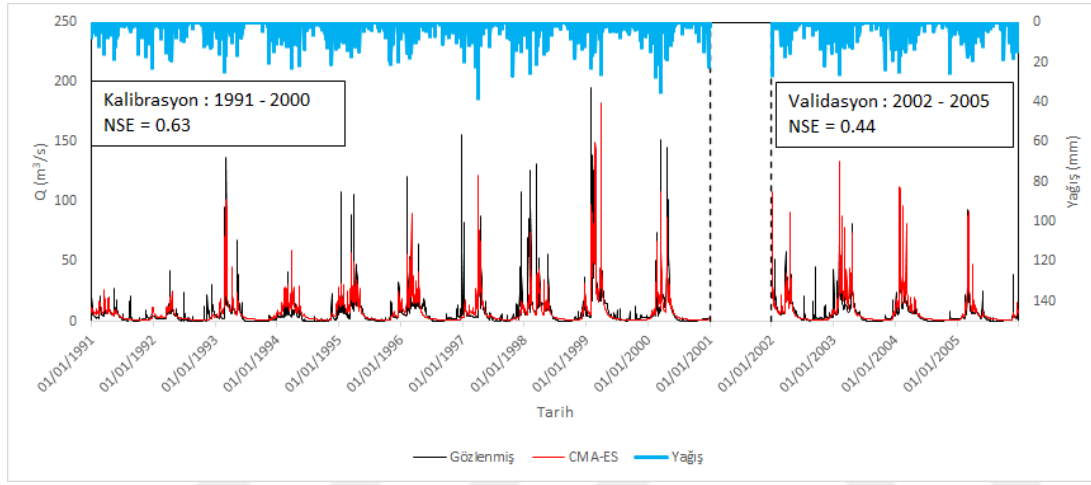


Şekil 3.7 : GR4J-SCE çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.

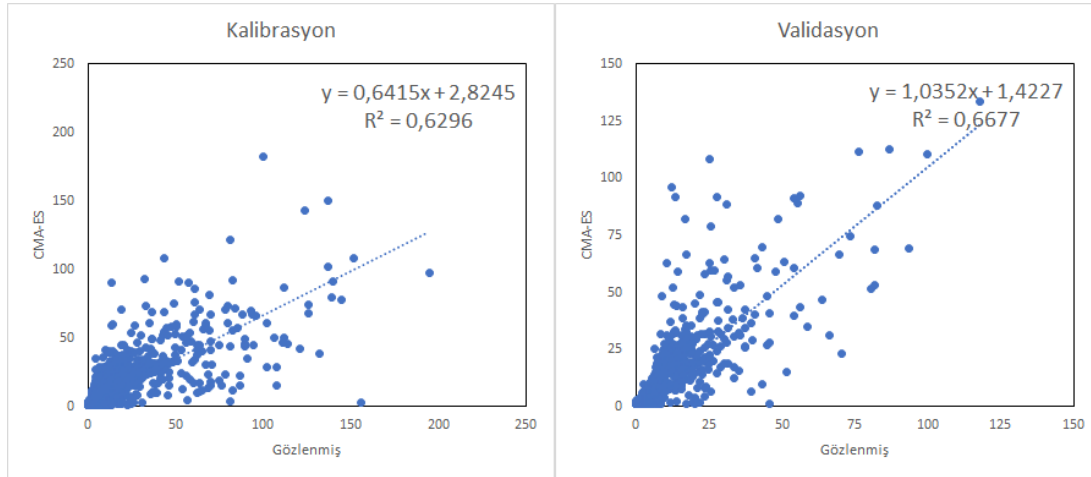
Shuffled Complex Evolution (SCE) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde GR4J-SCE entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.63 NSE değerine ulaştığı görülmüştür. Bu süreçte kalibrasyon periyodunda zamanlama olarak çıktıların, gözlenmiş veriyi yakalamak konusunda geç kaldığı ve pik debilerde istikrarsız bir seyir izlediği görülmüştür. Özellikle 1991 ve 1999 yılları içerisinde model çıktılarının pik yaptığı dönemlerin gözlenmiş veriyle arasındaki uyumsuzluğun göze çarpmaktadır. Validasyon periyodunda 0.44 NSE değerine sahip olan simülasyonda 2002 yılına ait değerlerin ara yükselişleri yakalayamadığı Şekil 3.6’da net olarak görülmektedir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak

NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.63 R^2 , 0.719 KGE, 0.61 RSR, 0.4 PBIAS, 86.29 MSE, 9.29 RMSE; validasyon periyodu için ise 0.67 R^2 , 0.599 KGE, 0.75 RSR, 23.5 PBIAS, 73.77 MSE, 8.59 RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile birlikte Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 incelendiğinde ise GR4J-SCE entegrasyonunun ürettiği pik debilerin tutarsız olduğu tespit edilmiştir.

Gözlenmiş veriler ile karşılaştırılan çıktılar CMAES algoritması için Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.8 : GR4J - CMAES debi çıktısı.



Şekil 3.9 : GR4J - CMAES çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.

Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde GR4J - CMAES entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.63 NSE değerine ulaştığı görülmüştür. Bu süreçte kalibrasyon periyodunda zamanlama

olarak çıktılarını, gözlenmiş veriyi yakalamak konusunda geç kaldığı ve pik debilerde istikrarsız bir seyir izlediği görülmüştür. GR4J-SCE entegrasyonuna benzer şekilde 1991 ve 1999 yılları içerisinde model çıktılarının pik yaptığı dönemlerin gözlenmiş veriyle arasındaki uyumsuzluğun göze çarpmaktadır. Validasyon periyodunda 0.44 NSE değerine sahip olan simülasyonda 2002 yılına ait değerlerin ara yükselişleri yakalayamadığı Şekil 3.8’de görülmektedir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.63 R^2 , 0.718 KGE, 0.61 RSR, 0.4 PBIAS, 86.29 MSE, 9.29 RMSE; validasyon periyodu için ise 0.67 R^2 , 0.6 KGE, 0.75 RSR, 23.5 PBIAS, 73.50 MSE, 8.57 RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile birlikte Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 incelendiğinde ise CMAES algoritmasına ait sonuçların tıpkı SCE gibi global optimizasyon yöntemi olduklarından ötürü benzerlikler göstermesinin yanı sıra, ürettiği pik debilerin tutarsız olduğu tespit edilmiştir. Validasyon periyodunda gözlenmiş debi değerlerinin genel seyrine göre düşük kalsada, düşük akımların gözlemlendiği tarihlerde algoritmanın ürettiği değerlerin gözlenen verinin üzerinde kaldığı görülmüştür (Şekil 3.9).

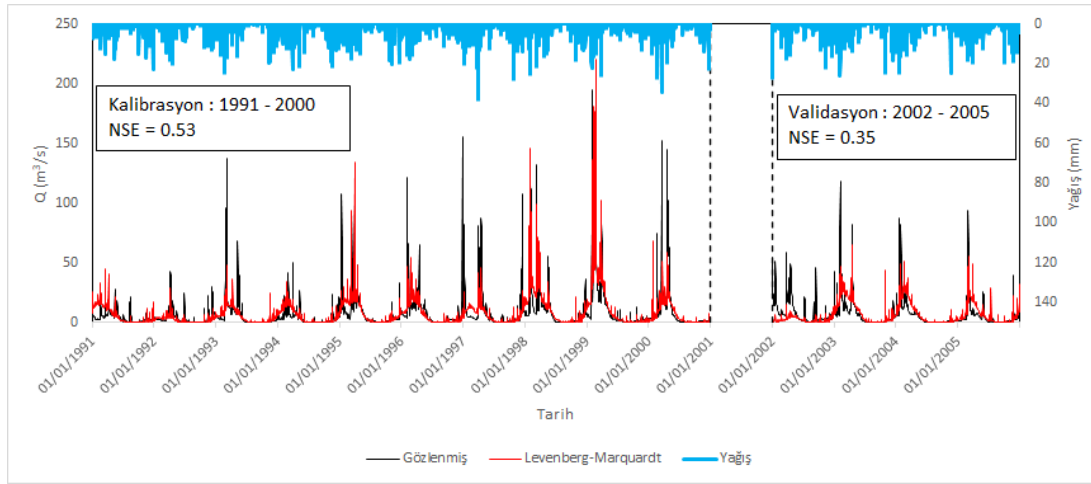
3.2.2 SWAT+

SWAT+ modeli, parametrelere ait sınır koşulları tanımlanarak kalibre edilmiştir. Kalibre edilen parametrelerin sınır koşulları ve her bir algoritmaya ait değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

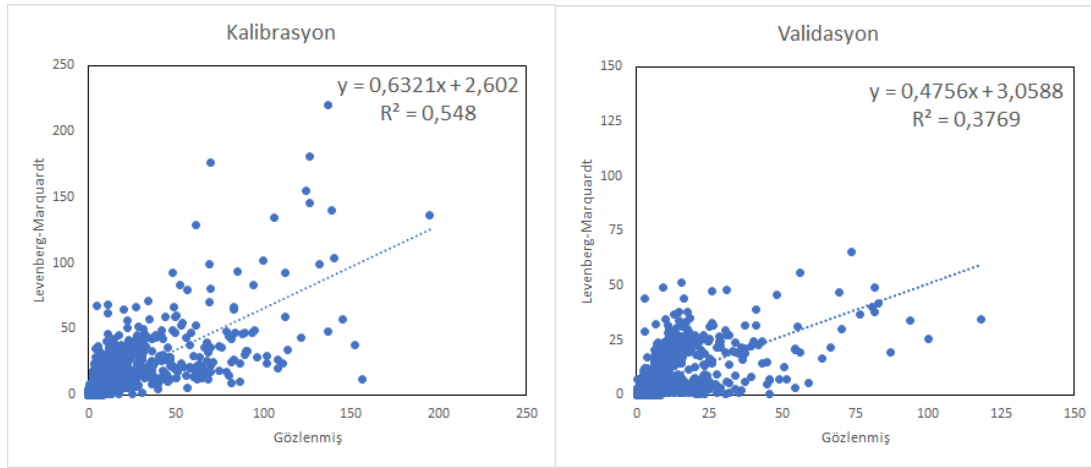
Çizelge 3.2 : SWAT+ parametre değerleri.

Parametre	Parametre Değeri			Değer Aralığı	
	LM	SCE-UA	CMAES	Min	Maks
cn2	0.77	0.67	0.68	0.65	0.95
awc	0.02	0.01	0.01	0.01	0.51
k	200.40	189.18	193.07	0.00	2000.00
perco	0.28	0.16	0.20	0.00	1.00
revap	0.20	0.05	0.16	0.02	0.20
canmx	19.99	23.55	22.33	0.00	100.00
esco	0.67	0.37	0.39	0.00	1.00
epco	0.04	0.17	0.17	0.00	1.00
evrch	0.67	0.75	0.56	0.50	1.00
flomin	500.00	355.52	1059.35	0.00	1250.00

Kalibrasyon süreci sonrası elde edilen parametreler ile üretilen debi çıktılarına ulaşılmıştır. SWAT+ - LM entegrasyonuna ait çıktıların gözlenmiş veriler ile karşılaştırıldığı görseller Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.10 : SWAT+ - LM debi çıktısı.

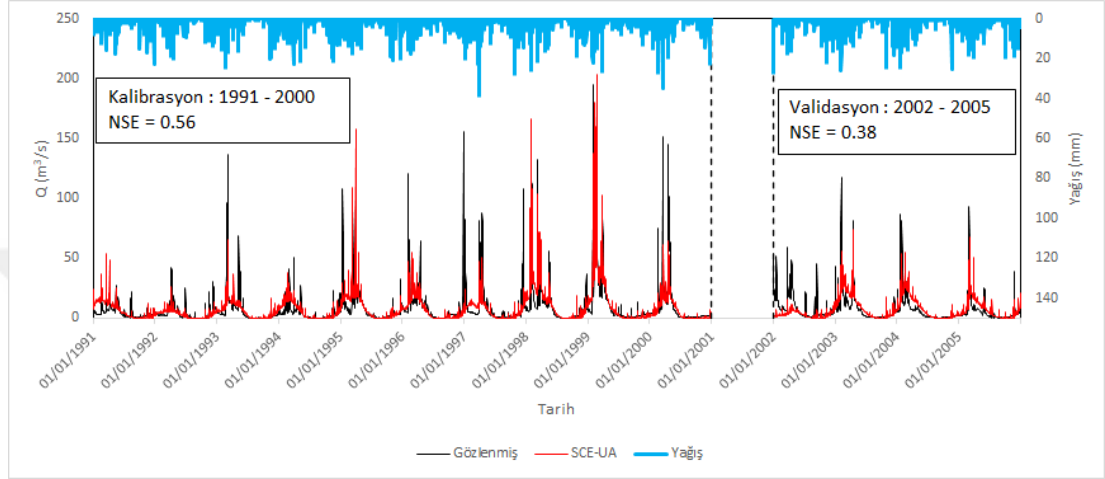


Şekil 3.11 : SWAT+ - LM çıktıların gözlenmiş veri ile ilişkisi.

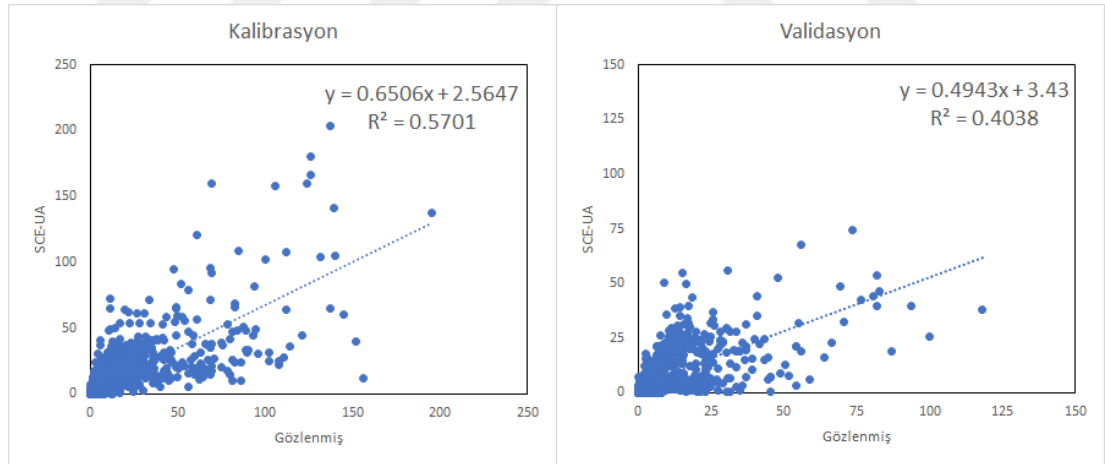
Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde SWAT+ - LM entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.53 NSE değerine, 2002-2005 yılları arası validasyon periyodunda ise 0.35 NSE değerine sahiptir. Şekil 3.10'da değerlerin yıllar içerisindeki değişimi takip edildiğinde kalibrasyon için 1991, validasyon için 2002 yılları dışında yıl içi yükseliş ve düşüş dönemlerinde simülasyon çıktıların gözlenmiş değerleri takip ettiği görülmektedir. Fakat bu ilişkiye rağmen kalibrasyon ve validasyon periyotlarında pik debiler zamanlama ve değer olarak yakalanamamıştır. NSE değerleri açısından kalibrasyon ve validasyon periyotlarının ilk yıllarındaki uyumsuzluğun oldukça negatif yönde etkileyici olduğu görülmektedir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.55 R^2 , 0.703 KGE, 0.68 RSR, -3.4 PBIAS, 108.32 MSE,

10.41 RMSE; validasyon periyodu için ise 0.40 R^2 , 0.503 KGE, 0.81 RSR, -9.4 PBIAS, 86.29 MSE, 9.29 RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile birlikte Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 incelendiğinde ise SWAT+ - LM entegrasyonunun gözlenmiş veriye nazaran genel anlamda daha düşük debi değerleri ürettiği tespit edilmiştir.

Gözlenmiş veriler ile karşılaştırılan çıktılar SCE algoritması için Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : SWAT+ - SCE debi çıktısı.

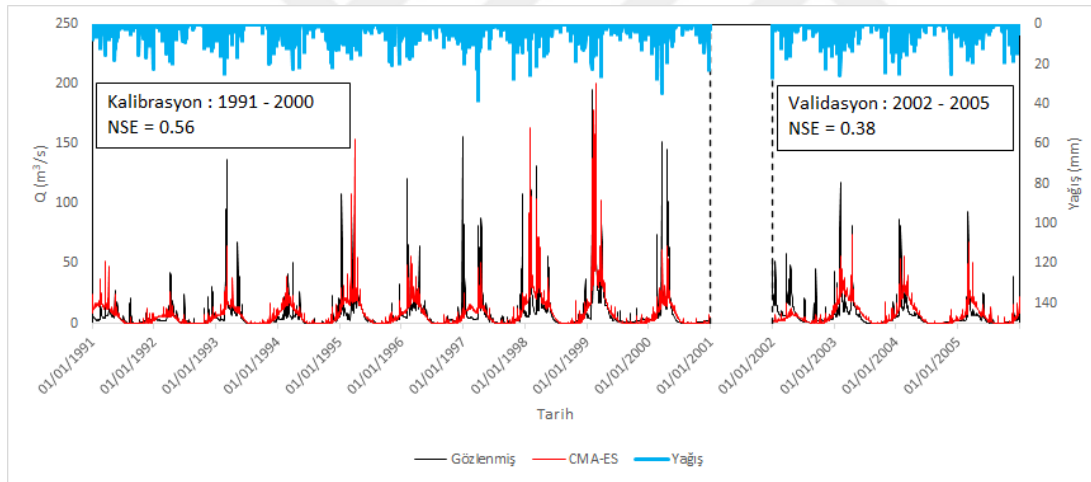


Şekil 3.13 : SWAT+ - SCE çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.

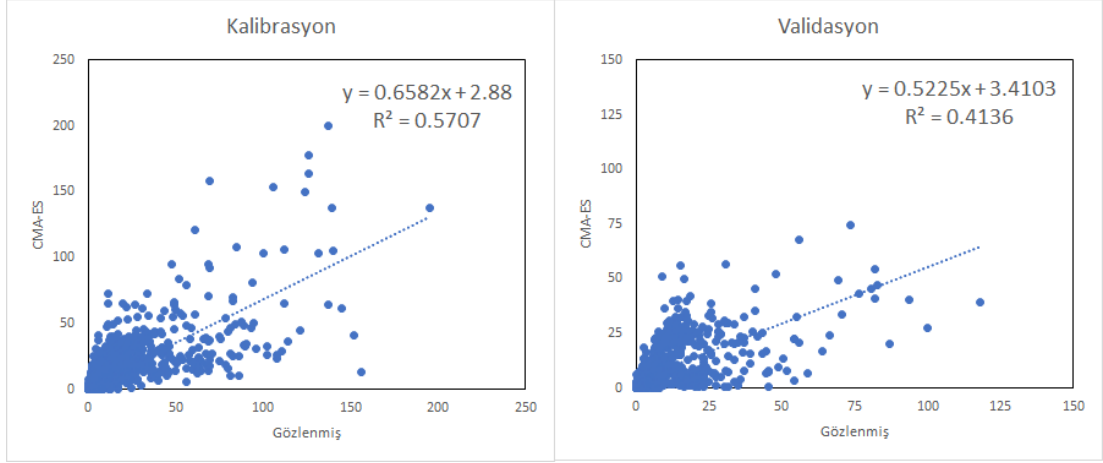
Shuffled Complex Evolution (SCE) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde SWAT+ - SCE entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.56 NSE değerine, 2002-2005 yılları arası validasyon periyodunda ise 0.38 NSE değerine sahiptir. Şekil 3.12’de değerlerin yıllar içerisindeki değişimi takip edildiğinde kalibrasyon için 1991, validasyon için 2002 yılları dışında yıl içi yükseliş ve düşüş

dönemlerinde simülasyon çıktılarının gözlenmiş değerleri takip ettiği görülmektedir. Fakat bu ilişkiye rağmen kalibrasyon ve validasyon periyotlarında pik debiler zamanlama ve değer olarak yakalanamamıştır. NSE değerleri açısından kalibrasyon ve validasyon periyotlarının ilk yıllarındaki uyumsuzluğun oldukça negatif yönde etkileyici olduğu görülmektedir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.57 R^2 , 0.717 KGE, 0.66 RSR, -2.0 PBIAS, 102.76 MSE, 10.14 RMSE; validasyon periyodu için ise 0.41 R^2 , 0.572 KGE, 0.79 RSR, -2.4 PBIAS, 81.58 MSE, 9.03 RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile birlikte Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 incelendiğinde ise SWAT+ - SCE entegrasyonunun gözlenmiş veriye nazaran genel anlamda daha düşük debi değerleri ürettiği tespit edilmiştir.

Gözlenmiş veriler ile karşılaştırılan çıktılar CMAES algoritması için Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.14 : SWAT+ - CMAES debi çıktısı.



Şekil 3.15 : SWAT+ - CMAES çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.

Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde SWAT+ - CMAES entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.56 NSE değerine, 2002-2005 yılları arası validasyon periyodunda ise 0.38 NSE değerine sahiptir. 1992 ve 1993 yılları incelendiğinde gözlenmiş değerler ile model çıktılarının aynı dönemlerde pik yaptığı görülmektedir. Şekil 3.14'te değerlerin yıllar içerisindeki değişimi takip edildiğinde kalibrasyon periyodu için 1991, validasyon periyodu için 2002 yılları dışında yıl içi yükseliş ve düşüş dönemlerinde simülasyon çıktılarının gözlenmiş değerler ile aynı yönde hareket ettiği görülmektedir. Fakat bu ilişkiye rağmen kalibrasyon ve validasyon periyotlarında pik debiler zamanlama ve değer olarak yakalanamamıştır. NSE değerleri açısından kalibrasyon ve validasyon periyotlarının ilk yıllarındaki uyumsuzluğun oldukça negatif yönde etkileyici olduğu görülmektedir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.57 R^2 , 0.722 KGE, 0.67 RSR, 2.8 PBIAS, 103.13 MSE, 13.16 RMSE; validasyon periyodu için ise 0.41 R^2 , 0.597 KGE, 0.78 RSR, 0.2 PBIAS, 81.06 MSE, 9.02 RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ile birlikte Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 incelendiğinde ise SWAT+ - CMAES entegrasyonunun gözlenmiş veriye nazaran genel anlamda daha düşük debi değerleri ürettiği tespit edilmiştir.

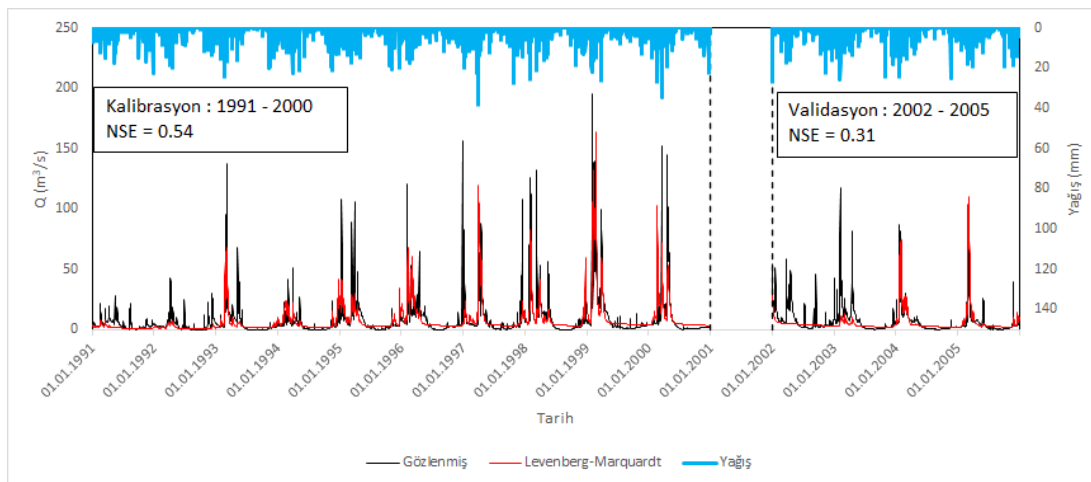
3.2.3 mHM

mHM modeli, parametrelere ait sınır koşulları tanımlanarak kalibre edilmiştir. Kalibre edilen parametrelerin sınır koşulları ve her bir algoritmaya ait değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

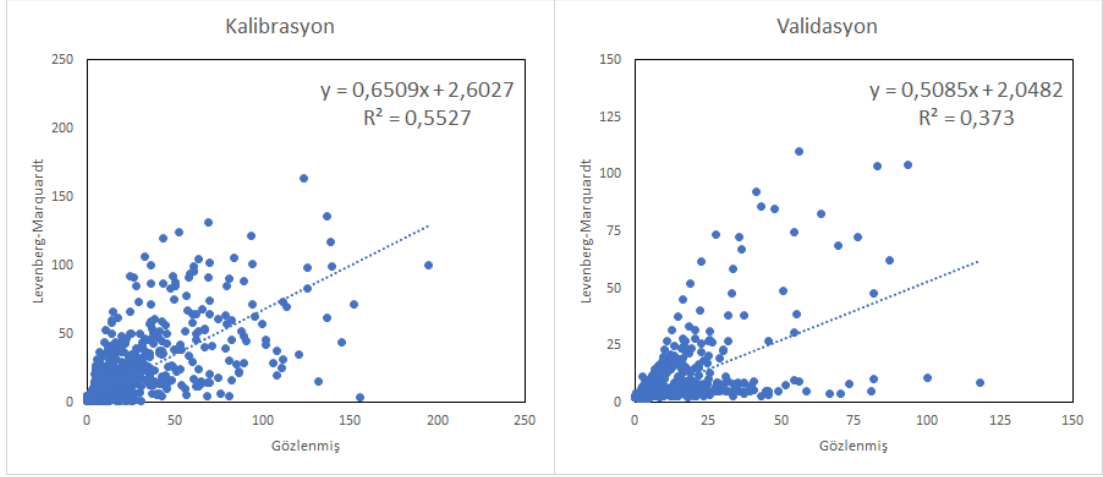
Çizelge 3.3 : mHM parametre değerleri.

Parametre	Parametre Değeri			Değer Aralığı	
	LM	SCE-UA	CMAES	Min	Maks
PTF_lower66_5_clay	0.0017	0.0012	0.0019	0.0001	0.0029
PTF_Ks_sand	0.0083	0.0221	0.0158	0.0060	0.0260
PTF_Ks_clay	0.0079	0.0130	0.0124	0.0030	0.0130
rootFractionCoefficient_pervious	0.0608	0.0095	0.0460	0.0010	0.0900
PTF_lower66_5_Db	-0.3463	-0.2141	-0.2315	-0.5513	-0.0913
PTF_lower66_5_constant	0.6877	0.6724	0.6750	0.5358	1.1232
PTF_Ks_constant	-0.7105	-1.1978	-1.0251	-1.2000	-0.2850
rootFractionCoefficient_forest	0.9401	0.9623	0.9872	0.9000	0.9990
infiltrationShapeFactor	1.9602	1.1113	1.0000	1.0000	4.0000
PET_a_forest	0.7221	1.2466	1.2885	0.3000	1.3000
PET_a_pervious	0.7414	0.3604	0.3176	0.3000	1.3000
PET_b	0.6823	0.7020	0.5982	0.0000	1.5000
PET_c	-0.9670	-0.0001	-0.0427	-2.0000	0.0000
canopyInterceptionFactor	0.1520	0.1501	0.2135	0.1500	0.4000
exponentSlowInterflow	0.1948	0.2324	0.2054	0.0500	0.3000

Kalibre edilen parametre değerleri kullanılarak çalıştırılan modellere ait debi çıktılarına ulaşılmıştır. mHM – LM entegrasyonuna ait debi çıktılarının gözlenmiş veriler ile karşılaştırıldığı görseller Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilmiştir.



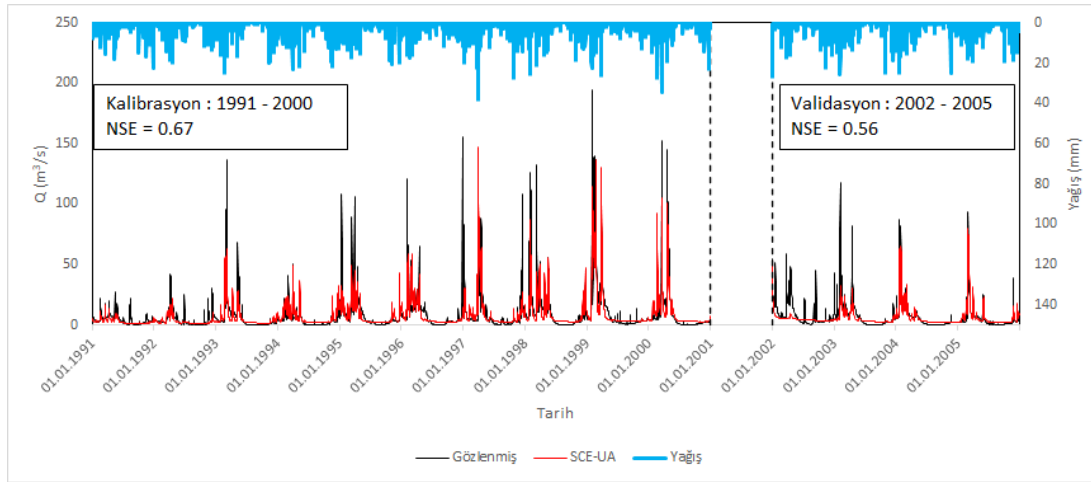
Şekil 3.16 : mHM - LM debi çıktısı.



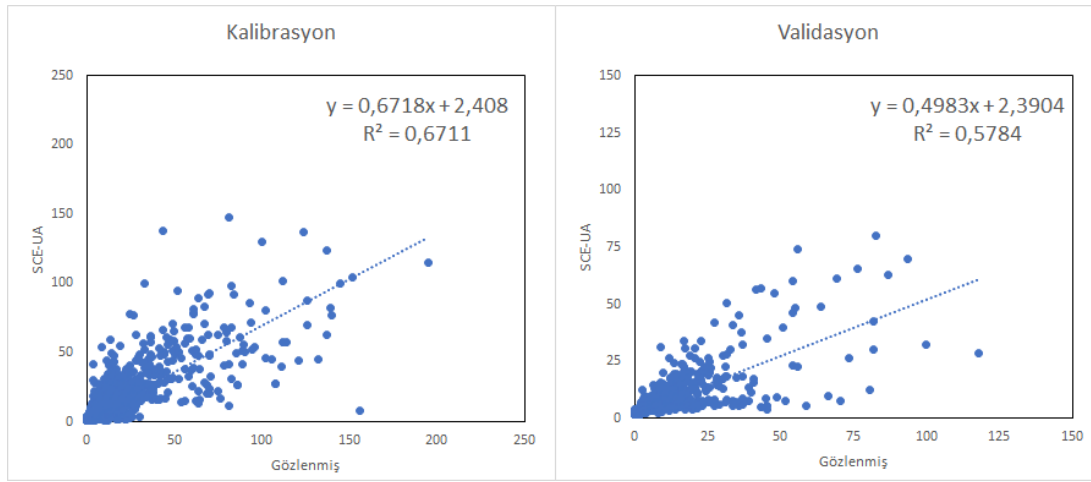
Şekil 3.17 : mHM – LM çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.

Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde mHM – LM entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.54 NSE değerine, 2002-2005 yılları arası validasyon periyodunda ise 0.31 NSE değerine sahiptir. Şekil 3.16’da görüldüğü üzere özellikle kalibrasyon periyodu için 1991 yılları, validasyon periyodu için ise 2002 ve 2003 yıllarında model çıktıları gözlenmiş debiyi takip edememektedir. 1993, 2004 ve 2005 yıllarında pik debiye ulaşılan dönemlerin örtüşmesine rağmen diğer zaman periyotlarındaki uyumsuzluk NSE değerini olumsuz etkilemiştir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.55 R^2 , 0.714 KGE, 0.68 RSR, -1.5 PBIAS, 108.23 MSE, 10.40 RMSE; validasyon periyodu için ise 0.37 R^2 , 0.529 KGE, 0.83 RSR, -20.4 PBIAS, 91.59 MSE, 9.57 RMSE değerleri hesaplanmıştır.

Gözlenmiş veriler ile karşılaştırılan çıktılar SCE algoritması için Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.18 : mHM - SCE debi çıktısı.

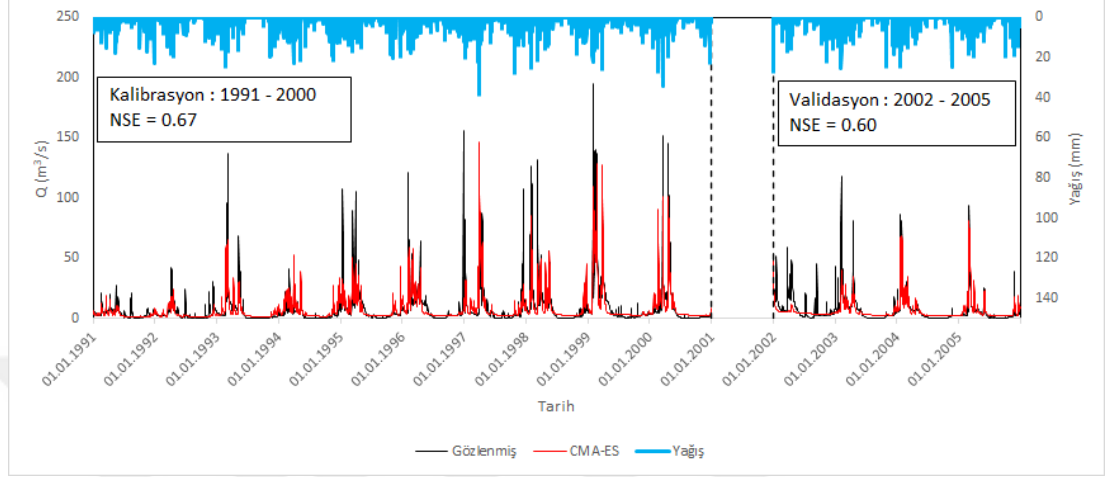


Şekil 3.19 : mHM – SCE çıktıların gözlenmiş veri ile ilişkisi.

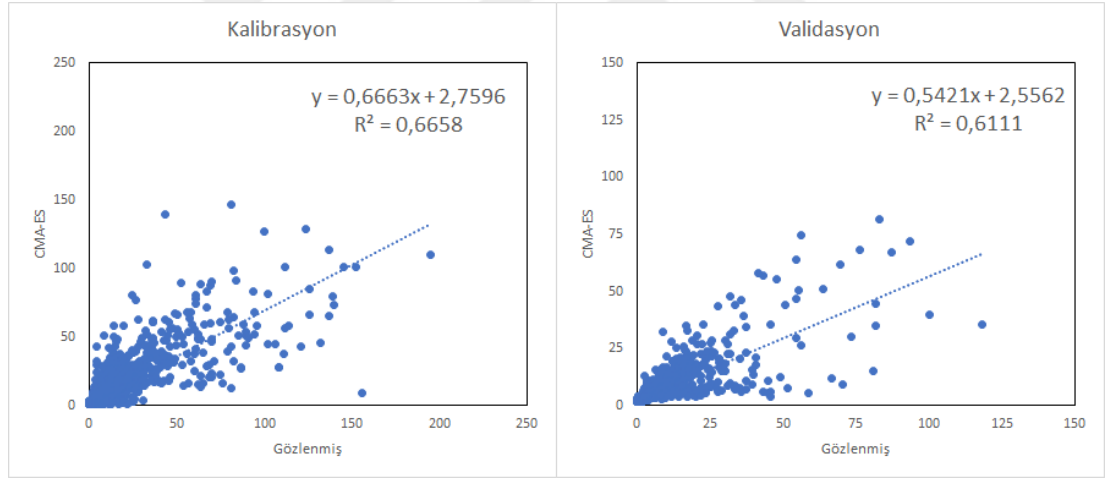
Shuffled Complex Evolution (SCE) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde mHM – SCE entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.67 NSE değerine, 2002-2005 yılları arası validasyon periyodunda ise 0.56 NSE değerine sahiptir. Şekil 3.18 incelendiğinde model çıktıların yıllar içerisindeki yükseliş-düşüş dönemlerini genel anlamda takip ettiği görülse de kalibrasyon periyodu için 1997 ve 1999 yıllarında pik debileri büyük farklar ile yakalayamadığı görülmektedir. Validasyon periyodu için 2001 yılının tamamı ve 2003 yılının başlarında çıktılar gözlenen verilerdeki yükselişleri yakalayamazken, 2004 ve 2005 yıllarında gözlenmiş veriyi takip ettiği ve pik değerlere yakınsadığı görülmektedir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.67 R^2 , 0.744 KGE, 0.57 RSR, -1.9 PBIAS, 76.59 MSE, 8.75 RMSE; validasyon periyodu için ise

0.58 R^2 , 0.549 KGE, 0.67 RSR, -16.6 PBIAS, 58.63 MSE, 7.66 RMSE değerleri hesaplanmıştır.

Gözlenmiş veriler ile karşılaştırılan çıktılar CMAES algoritması için Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20 : mHM - CMAES debi çıktısı.



Şekil 3.21 : mHM – CMAES çıktılarının gözlenmiş veri ile ilişkisi.

Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algoritmasının kalibrasyon periyodu için ulaştığı parametre değerlerine ait debi çıktıları incelendiğinde mHM – SCE entegrasyonunun 1991-2000 yıl aralığında gözlenmiş veri ile arasında 0.67 NSE değerine, 2002-2005 yılları arası validasyon periyodunda ise 0.60 NSE değerine sahiptir. Şekil 3.20 incelendiğinde kalibrasyon periyodunda mHM – CMAES entegrasyonunun pik debilerin gözlemlendiği dönemlerde daha düşük değerler ürettiği görülsede, bu periyot boyunca yükseliş ve düşüş dönemlerini takip ettiği görülmektedir. Validasyon periyodunun ilk yılında model çıktısı ile gözlenmiş debi

örtüşmemekte, fakat 2004 ve 2005 yıllarında simüle edilen debi değerlerinin gözlenmiş değerlere yakın olduğu görülmektedir. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkiden yola çıkarak NSE dışında R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE, RMSE gibi değerlendirme kriterleri de incelenmiştir. Kalibrasyon periyodu için 0.66 R^2 , 0.739 KGE, 0.58 RSR, 2.0 PBIAS, 77.84 MSE, 8.82 RMSE; validasyon periyodu için ise 0.61 R^2 , 0.611 KGE, 0.63 RSR, -9.9 PBIAS, 52.96 MSE, 7.28 RMSE değerleri hesaplanmıştır.

3.3 Debi Performansı Karşılaştırması

Kalibrasyon bölümünde birbirinden bağımsız olarak paylaşılan model-algoritma entegrasyonu çıktıları, bu bölümde istatistiksel parametrelere yardımıyla karşılaştırılacaktır. Model çıktıları ile gözlenmiş veri arasındaki ilişkinin istatistiklerine ait değerler kalibrasyon periyodu için Çizelge 3.4'te, validasyon periyodu için Çizelge 3.5'te paylaşılmıştır.

Çizelge 3.4 : Kalibrasyon periyoduna ait istatistikler.

KALİBRASYON 1991-2000	NSE	R^2	KGE	RSR	PBIAS	MSE	RMSE
GR4J-LM	0.44	0.59	0.221	0.75	-55.5	131.05	11.45
GR4J-SCE	0.63	0.63	0.719	0.61	0.4	86.29	9.29
GR4J-CMAES	0.63	0.63	0.718	0.61	0.4	86.29	9.29
SWAT+-LM	0.53	0.55	0.703	0.68	-3.4	108.32	10.41
SWAT+-SCE	0.56	0.57	0.717	0.66	-2.0	102.76	10.14
SWAT+-CMAES	0.56	0.57	0.722	0.67	2.8	103.13	10.16
mHM-LM	0.54	0.55	0.714	0.68	-1.5	108.23	10.40
mHM-SCE	0.67	0.67	0.744	0.57	-1.9	76.59	8.75
mHM-CMAES	0.67	0.66	0.739	0.58	2.0	77.84	8.82

Çizelge 3.5 : Validasyon periyoduna ait istatistikler.

VALİDASYON 2002-2005	NSE	R^2	KGE	RSR	PBIAS	MSE	RMSE
GR4J-LM	0.55	0.62	0.436	0.67	-42.7	59.24	7.70
GR4J-SCE	0.44	0.67	0.599	0.75	23.5	73.77	8.59
GR4J-CMAES	0.44	0.67	0.6	0.75	23.5	73.50	8.57
SWAT+-LM	0.35	0.40	0.543	0.81	-9.4	86.29	9.29
SWAT+-SCE	0.38	0.41	0.572	0.79	-2.4	81.58	9.03
SWAT+-CMAES	0.38	0.41	0.597	0.78	0.2	81.36	9.02
mHM-LM	0.31	0.37	0.529	0.83	-20.4	91.59	9.57
mHM-SCE	0.56	0.58	0.549	0.67	-16.6	58.63	7.66
mHM-CMAES	0.60	0.61	0.611	0.63	-9.9	52.96	7.28

Performans istatistikleri değerlendirilirken amaç fonksiyonu olan NSE'nin yanı sıra, R^2 , KGE, RSR, PBIAS, MSE ve RMSE istatistikleri incelenmiştir. Bu değerlerden NSE, RSR ve PBIAS'a yönelik hidrolojik modelleri değerlendirmeye yönelik sınıflandırma Moriasi ve diğ. (2007) tarafından yapılmıştır (Çizelge 3.6).

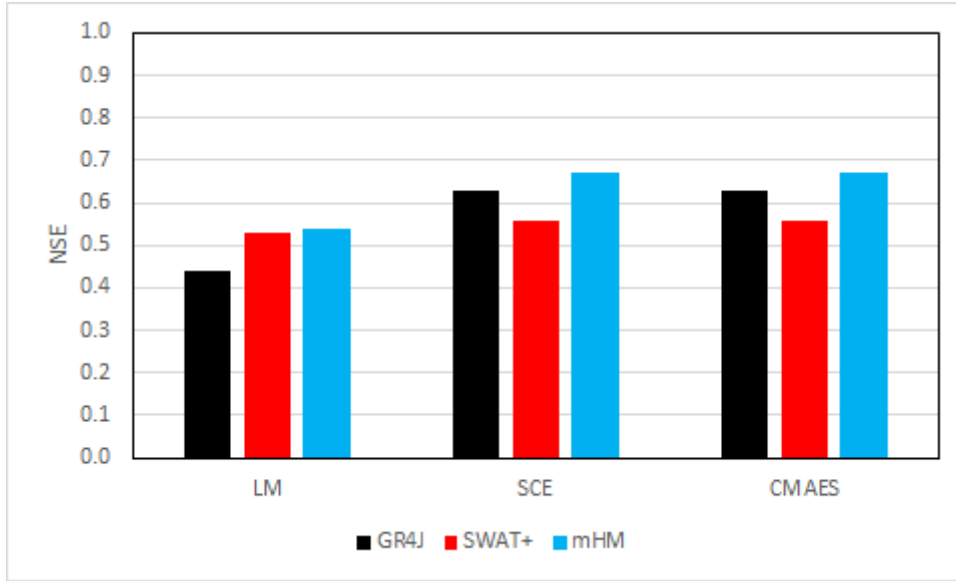
Çizelge 3.6 : Debi performansına ait sınıflandırma aralıkları.

Performans	RSR	NSE	PBIAS
Çok iyi	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.70 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
İyi	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Yeterli	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Yetersiz	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.5$	$PBIAS \geq \pm 25$

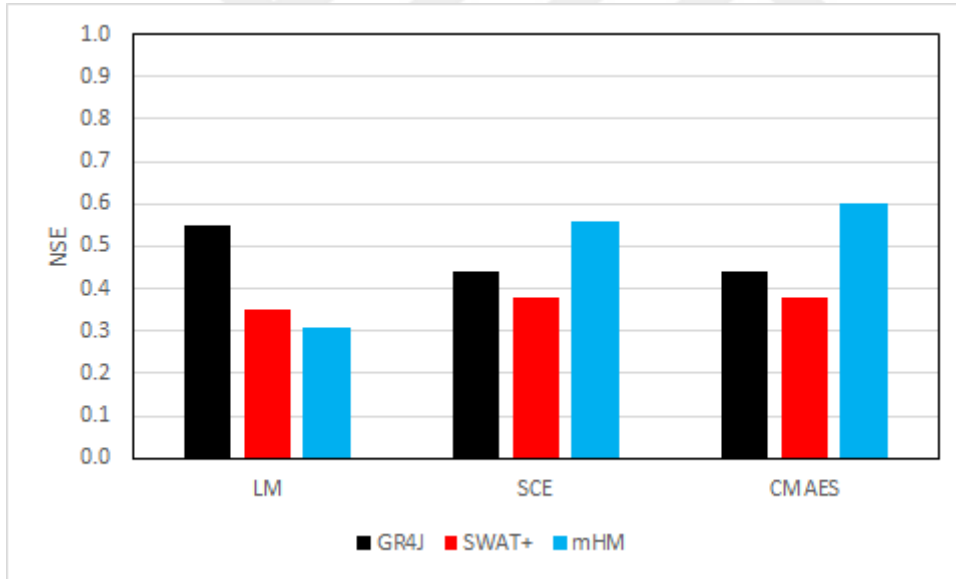
Çizelgedeki aralıklar göz önüne alınarak kalibrasyon verileri incelendiğinde NSE değerine göre GR4J – LM entegrasyonuna ait çıktıların yetersiz; GR4J-SCE, GR4J-CMAES, SWAT+-LM, SWAT+-SCE, SWAT+-CMAES, mHM-LM entegrasyonlarının yeterli; mHM-SCE ve mHM-CMAES entegrasyonlarının yeterli olarak sınırlandırılabilceği görülmektedir. Validasyon periyoduna ait değerler incelendiğinde ise GR4J-LM, mHM-SCE ve mHM-CMAES modelleri yeterli performans gösterirken, diğer modellerin performansının NSE değerine göre yetersiz olduğu görülmektedir.

Kalibrasyon algoritmalarının üçü için de maksimum iterasyon sayısı olarak 1000, terminasyon kriteri olarak ise 20 iterasyon boyunca 10^{-6} 'dan daha az değişimler tanımlanmıştır. Levenberg-Marquardt (LM) için verilen tanımlamalar yeterli ve tüm modeller için aynı iken diğer iki algorditmada farklı girdilere ihtiyaç duyulmaktadır. Shuffled Complex Evolution (SCE) için tüm modellerde kompleks sayısı 2 olarak tanımlanırken; her bir kompleks içindeki parametre seti sayısı GR4J modelinde 7, SWAT+ modelinde 21 ve mHM modelinde 33 olarak tanımlanmıştır. Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) için lambda değeri GR4J modeli için 8, SWAT+ modeli için 12 ve mHM modeli için 13; donör parametre seti sayısı GR4J için 4, SWAT+ ve mHM için ise 6 olarak tanımlanmıştır. Bu girdi değerleri kalibre edilen parametre sayısına göre algoritma tarafından önerilmektedir (Demirel ve diğ., 2019). Modellerin kalibrasyonunda ise algoritmaların performansını tarafsızca değerlendirmek adına tüm algoritmalar başlangıçta aynı parametre setleri ile iterasyonlara başlatılmıştır. Bu girdiler sonucunda algoritmalar her bir entegrasyon

için maksimum iterasyon sayısına (1000) ulaşmıştır. Algoritma performanslarının bulunduğu grafik Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.22 : Algoritmaların kalibrasyon performansı değerleri.



Şekil 3.23 : Algoritmaların validasyon performansı değerleri.

Algoritmaların NSE değerine göre ortalama performansı incelendiğinde kalibrasyonda LM 0.50, SCE 0.62 ve CMAES 0.62; validasyonda LM 0.40, SCE 0.46 ve CMAES 0.47 değerlerine ulaşmışlardır. Modellerin NSE değerine göre ortalama performanslara bakılacak olursa kalibrasyonda GR4J 0.57, SWAT+ 0.55 ve mHM 0.63; validasyonda GR4J 0.48, SWAT+ 0.37 ve mHM 0.49 seviyesinde değerler görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 523 numaralı akım gözlem istasyonunun membasi ve Gediz Havzası'nın başladığı bölge olan Acısu Havzası için toplu (GR4J), yarı dağılı (SWAT+) ve dağılı (mHM) hidrolojik modeller kurulmuştur. Farklı yapıya sahip modellerin her birine ait parametreler Levenberg-Marquardt (LM), Shuffled Complex Evolution (SCE) ve Covariance Matrix Adoption Evolution Strategy (CMAES) algoritmaları ile kalibre edilmiştir. Model-algoritma birleşimleri açısından bu çalışma, kullanılan 9 kombinasyona ait debi performansının karşılaştırıldığı ilk örnek olma özelliğini taşımaktadır. Modeller ve algoritmalara ait debi çıktılarının performansına ilişkin yapılan analizlerle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Toplu modellerde havzaya ait değerlerin ortalaması kullanılmasından dolayı dağılı modellere kıyasla hata değerlerinin bu ortalama içerisinde azaldığı literatürde karşılaşılan genel sonuçlardandır. Bu çalışmadaki analizler sonucunda, bahsedilen durumun aksine, dağılı model olan mHM'in, amaç fonksiyonu olan NSE'ye göre daha iyi debi performansı gösterdiği görülmektedir. Elde edilen veriler ve sonuçlar incelendiğinde bu sonucun havzadaki heterojen yapıdan kaynaklandığı ve mHM'in model yapısının, heterojenliği işlediği ölçek bakımından havza yapısını daha başarılı tanımladığı sonucuna ulaşılmıştır.
2. NSE değerlerinin ortalamalarına göre modellerin debi performansları yüksekten düşüğe doğru sıralandığında; mHM, GR4J, SWAT+ şeklinde olduğu tespit edilmiştir.
3. Ortalama NSE değerlerine göre algoritmaların kalibrasyon ve performansları yüksekten düşüğe doğru sıralandığında; CMAES, SCE, LM şeklinde olduğu tespit edilmiştir.
4. GR4J ve SWAT+ modelleri arasındaki farklar incelendiğinde SWAT+ modeli, havzanın değişken yapısını başarılı bir biçimde temsil edebilecek bir yarı dağılı model olmasına rağmen, kalibrasyon ve validasyon periyotlarında GR4J modelinden daha düşük bir debi performansı göstermiştir. Bu durumun,

kalibrasyon aşamasındaki maksimum iterasyon sayısı tamamlandığında modelin optimum değerine ulaşamamış olmasından kaynaklandığı değerlendirilebilir.

5. Algoritmalar arasındaki performans karşılaştırmasında ise CMAES algoritması, 1000 iterasyon sonucunda diğer seçeneklere kıyasla optimuma daha yakın NSE değerine ve parametre değerlerine ulaşmış, daha yüksek debi performansı göstermiştir.
6. Genel sonuçlar kapsamında SCE ve CMAES algoritmaları global optimizasyon yöntemleri olduklarından, lokal optimizasyon algoritması olan LM'ye göre daha yüksek performans göstermişlerdir.
7. Elde edilen debi değerleri dikkate alındığında, tüm entegrasyonlarda model çıktıları gözlenmiş debiye göre düşük kalmaktadır. Model girdileri incelendiğinde ERA5 yağış verileri ile MGM ölçümleri arasındaki farkın bu duruma sebebiyet verdiği sonucuna ulaşılmıştır. ERA5 yağış verilerinin MGM yağış verilerinden ortalama %60 daha az olması, modeller tarafından üretilen debi miktarını doğrudan etkilemektedir.
8. Zaman verimliliği açısından her model farklı çalışma süresine sahiptir. Çalışmada kullanılan bilgisayar özellikleri kapsamında GR4J modeli için bir döngü yaklaşık 4 sn, SWAT+ modeli için 2 dk, mHM modeli için ise 30 sn sürmüştür. Bu durum zaman açısından GR4J modelinin daha avantajlı olduğunu gösterse de modellerin kullanım amacı açısından çıktıların önemi zaman faktörünün önüne geçebilmektedir.
9. Havza sınırları kapsamında yapılacak herhangi bir uygulama amacıyla ölçümü olmayan başka alt havzalara ait çıktıları ihtiyaç duyulması halinde, GR4J modelinin yapısı gereği yetersiz kalacağı, SWAT+ ve mHM modellerinin ise daha kullanışlı olacağı göze çarpmaktadır.
10. mHM modeli ölçümü olmayan üst havzalara ait çıktılar sunması ve performans değerlendirme analizlerindeki üstünlüğü ile bu çalışmada kullanılan modeller arasında öne çıkmaktadır.
11. Genel anlamda çalışma sonuçları incelendiğinde mHM modeli ile CMAES algoritmasının entegrasyonu diğer kombinasyonlara kıyasla daha başarılı debi performansı göstermiştir. Bununla birlikte, yağışlar için ERA5 verisi yerine MGM verileri kullanılması durumunda daha başarılı model çıktılarına ulaşılacağı öngörülmektedir.

Uygulanan modeller ve algoritmalarla elde edilen sonuçlar dikkate alınan havza ile sınırlıdır. Sonuçların genelleştirilebilmesi için farklı coğrafi, meteorolojik ve jeolojik özelliklere sahip havzaların benzer model ve algoritmalarla incelenmesi önerilmektedir.





KAYNAKLAR

- Aksamit, N. O., & Whitfield, P. H. (2019). Examining the pluvial to nival river regime spectrum using nonlinear methods: Minimum delay embedding dimension. *Journal of Hydrology*, 572, 851–868.
- Anjum, M. N., Ding, Y., & Shangguan, D. (2019). Simulation of the projected climate change impacts on the river flow regimes under CMIP5 RCP scenarios in the westerlies dominated belt, northern Pakistan. *Atmospheric Research*, 227(4), 233–248.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). *SWAT: Model Use, Calibration, And Validation*. 55(4), 1491–1508.
- Bergström, S. (1992). The HBV model - its structure and applications. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, 4(4), 1–33.
- Beven, K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer: Second Edition* (C. 15).
- Bhatta, B., Shrestha, S., Shrestha, P. K., & Talchabhadel, R. (2020). Modelling the impact of past and future climate scenarios on streamflow in a highly mountainous watershed: A case study in the West Seti River Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*, 740, 140156.
- Blasone, R. S., Madsen, H., & Rosbjerg, D. (2007). Parameter estimation in distributed hydrological modelling: Comparison of global and local optimisation techniques. *Nordic Hydrology*, 38(4–5), 451–476.
- Brirhet, H., & Benaabidate, L. (2016). Comparison Of Two Hydrological Models (Lumped And Distributed) Over A Pilot Area Of The Issen Watershed In The Souss Basin, Morocco. *European Scientific Journal*, 12(18), 347.
- Chawanda, C. J., George, C., Thiery, W., van Griensven, A., Tech, J., Arnold, J., & Srinivasan, R. (2020). User-friendly workflows for catchment modelling: Towards reproducible SWAT+ model studies. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104812.
- Crawford, N. H., & Burges, S. J. (2004). History of the Stanford watershed model. *Water Resources Impact*, 6(2), 3–6.
- Crawford, N. H., & Linsley, R. K. (1966). *Digital Simulation in Hydrology' Stanford Watershed Model 4*.
- Dakhlalla, A. O., & Parajuli, P. B. (2019). Assessing model parameters sensitivity and uncertainty of streamflow, sediment, and nutrient transport using SWAT. *Information Processing in Agriculture*, 6(1), 61–72.

- Demir, H. K.** (2020). *Yeraltı Su Kalitesinin Tahmin Modelleri Kullanılarak Değerlendirilmesi; Gediz Havzası Örneği*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Demirel, M. C., Mai, J., Mendiguren, G., Koch, J., Samaniego, L., & Stisen, S.** (2018). Combining satellite data and appropriate objective functions for improved spatial pattern performance of a distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1299–1315.
- Demirel, M. C., Özen, A., Orta, S., Toker, E., Demir, H. K., Ekmekcioğlu, Ö., Tayşi, H., Eruçar, S., Sağ, A. B., Sarı, Ö., Tuncer, E., Hancı, H., Özcan, T. İ., Erdem, H., Koşucu, M. M., Başakın, E. E., Ahmed, K., Anwar, A., Avcuoğlu, M. B., ... Booij, M. J.** (2019). Additional Value of Using Satellite-Based Soil Moisture and Two Sources of Groundwater Data for Hydrological Model Calibration. *Water*, 11(10), 2083.
- Duan, Q., Gupta, H. V, Sorooshian, S., Rousseau, A. N., & Turcotte, R.** (2003). *Calibration of Watershed Models*. John Wiley & Sons.
- Fathy, I., Negm, A. M., El-fiky, M., Nassar, M., & Al-, E.** (2015). *Ruboff Hydrograph Modeling for Arid Regions (Case Study : Wadi Sudr – Sinai) Lumped Hydrologic Models Semi-Distributed Hydrologic Models Distributed Hydrologic Models*. 5(1), 58–68.
- Feyereisen, G. W., Strickland, T. C., Bosch, D. D., & Sullivan, D. G.** (2007). Evaluation of SWAT Manual Calibration and Input Parameter Sensitivity in the Little River Watershed. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 843–855.
- Gavin, H.** (2019). The Levenberg-Marquardt Algorithm For Nonlinear Least Squares Curve-Fitting Problems. *Duke University*, 1–19. <http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf>
- Gebrechorkos, S. H., Bernhofer, C., & Hülsmann, S.** (2020). Climate change impact assessment on the hydrology of a large river basin in Ethiopia using a local-scale climate modelling approach. *Science of the Total Environment*, 742.
- Hansen, N., & Auger, A.** (2011). *CMA-ES: evolution strategies and covariance matrix adaptation*. 991–1010.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A.** (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96–99.
- Jiang, T., Chen, Y. D., Xu, C. yu, Chen, X., Chen, X., & Singh, V. P.** (2007). Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. *Journal of Hydrology*, 336(3–4), 316–333.
- Kale, R. V., & Sahoo, B.** (2011). Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit. *Water Resources Management*, 25(14), 3505–3536.
- Koch, J.** (2016). *Evaluating spatial patterns in hydrological modelling*. December, 1–63.
- Kumanlioglu, A. A., & Fistikoglu, O.** (2019). Performance enhancement of a

- conceptual hydrological model by integrating artificial intelligence. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(11).
- Kumar, R., Samaniego, L., & Attinger, S.** (2013). Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. *Water Resources Research*, 49(1), 360–379.
- Kunnath-Poovakka, A., & Eldho, T. I.** (2019). A comparative study of conceptual rainfall-runoff models GR4J, AWBM and Sacramento at catchments in the upper Godavari river basin, India. *Journal of Earth System Science*, 128(2), 1–15.
- Li, M., Di, Z., & Duan, Q.** (2021). Effect of sensitivity analysis on parameter optimization: Case study based on streamflow simulations using the SWAT model in China. *Journal of Hydrology*, 603(PB), 126896.
- Liang, X., Wood, E. F., & Lettenmaier, D. P.** (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change*, 13(1), 195–206.
- Mai, J., Tolson, B. A., Shen, H., Gaborit, É., Fortin, V., Gasset, N., Awoye, H., Stadnyk, T. A., Fry, L. M., Bradley, E. A., Seglenieks, F., Temgoua, A. G. T., Princz, D. G., Gharari, S., Haghnegahdar, A., Elshamy, M. E., Razavi, S., Gauch, M., Lin, J., ... Pietroniro, A.** (2021). Great Lakes Runoff Intercomparison Project Phase 3: Lake Erie (GRIP-E). *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(9), 05021020.
- Mishra, S. K., Suresh Babu, P., & Singh, V. P.** (2007). SCS-CN method revisited. *Advances in Hydraulics and Hydrology*, January, 36.
- Mitsos, A., Chachuat, B., & Barton, P. I.** (2008). Global optimization of algorithms. *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L.** (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Mulvaney, T. J.** (1850). On the use of self registering rain and flood gauges in making observations of the relation of rainfall and flood discharges in given catchment. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 4, 18–33. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10025316839/en/>
- 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., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J.** (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 1–647.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., & Williams, J. R.** (2002). Soil and Water Assessment Tool—User’s Manual 2002. *TWRI Report TR-192*, 412. <http://swat.tamu.edu/media/1294/swatuserman.pdf>
- Ocio, D., Beskeen, T., & Smart, K.** (2019). Fully distributed hydrological modelling for catchmentwide hydrological data verification. *Hydrology Research*, 50(6), 1520–1534.

- Okkan, U., Ersoy, Z. B., Ali Kumanlioglu, A., & Fistikoglu, O.** (2021). Embedding machine learning techniques into a conceptual model to improve monthly runoff simulation: A nested hybrid rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 598(1), 126433.
- Okkan, U., & Fistikoglu, O.** (2014). Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1–2), 343–361.
- Özcan, Z.** (2016). *Evaluation of the Best Management Practices To Control Agricultural Diffuse Pollution in Lake Mogan Watershed with SWAT Model* (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Pardé, M.** (1933). Fleuves et rivières / par Maurice Pardé. *Fleuves et rivières*. Librairie Armand Colin.
- Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., & Wheeler, H. S.** (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), 193–214.
- Peker, I. B., & Sorman, A. A.** (2021). Application of SWAT using snow data and detecting climate change impacts in the mountainous eastern regions of Turkey. *Water*, 13(14).
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V.** (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289.
- QGIS Development Team.** (2022). *QGIS Geographic Information System*. <https://www.qgis.org>
- Samaniego, L., Kaluza, M., Kumar, R., Rakovec, O., Schüler, L., Schweppe, R., Shrestha, P. K., Thober, S., & Attinger, S.** (2019). *mesoscale Hydrologic Model* (v5.10). Zenodo.
- Samaniego, L., Kumar, R., & Attinger, S.** (2010). Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5).
- Shoarinezhad, V., Wieprecht, S., & Haun, S.** (2020). Comparison of local and global optimization methods for calibration of a 3D morphodynamic model of a curved channel. *Water (Switzerland)*, 12(5), 1–17.
- Tan, M. L., Juneng, L., Tangang, F. T., Samat, N., Chan, N. W., Yusop, Z., & Ngai, S. T.** (2020). SouthEast Asia HydrO-meteorological droughtT (SEA-HOT) framework: A case study in the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 246(5).
- Tarım ve Orman Bakanlığı.** (2018). *Gediz Nehir Havzası Yönetim Planı*.
- Tarım ve Orman Bakanlığı.** (2021). *Alansal yağış değerlendirmesi*.
- Tegegne, G., Park, D. K., & Kim, Y. O.** (2017). Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14(10),

- Thober, S., Cuntz, M., Kelbling, M., Kumar, R., Mai, J., & Samaniego, L.** (2019). The multiscale routing model mRM v1.0: Simple river routing at resolutions from 1 to 50 km. *Geoscientific Model Development*, 12(6), 2501–2521.
- Verdhen, A., Chahar, B. R., & Sharma, O. P.** (2014). Snowmelt modelling approaches in watershed models: Computation and comparison of efficiencies under varying climatic conditions. *Water Resources Management*, 28(11), 3439–3453.
- Wallner, M., Haberlandt, U., & Dietrich, J.** (2012). Evaluation of different calibration strategies for large scale continuous hydrological modelling. *Advances in Geosciences*, 31(1), 67–74.
- Zeng, L., Xiong, L., Liu, D., Chen, J., & Kim, J. S.** (2019). Improving parameter transferability of GR4J model under changing environments considering nonstationarity. *Water*, 11(10).
- Zhang, X., Srinivasan, R., Zhao, K., & Liew, M. Van.** (2009). Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *Hydrological Processes*, 23(3), 430–441.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Harun ALP

--

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020 yılının Mart ayında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Alp, H., Demirel M. C., Aşıkoğlu Ö. L. 2022. Hydrological Model Structure and Calibration Algorithm Effect on Discharge Simulation Performance. *International Graduate Research Symposium IGRS'22*, Haziran 1-3, 2022 İstanbul, Türkiye. (KABUL EDİLDİ)

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Yılmaz, M., **Alp, H.**, Tosunoğlu, F., Aşıkoğlu, Ö. L., Eriş, E. (2022). Impact of climate change on meteorological and hydrological droughts for Upper Coruh Basin, Turkey. *Natural Hazards*, 112(2), 1039–1063. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05217-x>

Alp, H., Koşucu, M. M., Kıran, S., Demirel, M. C. 2021. Su Dağıtım Şebekesi Hidrolik Modelinde Türbin ile Enerji Üretimi, *IV. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi (UMUH BILMES 2021)*, 23-26 Aralık, Türkiye, pp.116-121.

