

# Hidrolojik Model Kalibrasyonunda Uydu Tabanlı Aylık Buharlaştırma ve LAI Verilerinin Kullanılması

Muhammet Bahattin AVCUOĞLU<sup>1</sup>  
Mehmet Cüneyd DEMİREL<sup>2</sup>

## ÖZ

Hidrolojik model parametreleri geleneksel yaklaşımda havza çıkışındaki akım gözlem istasyonlarından (AGİ) elde edilen günlük akım verileriyle tahmin edilmeye çalışılır. Modern yaklaşımda ise akım verileri yanında açık erişimli uydu tabanlı uzaktan algılama verilerinden de faydalanılır. Uzaktan algılama verilerinin kullanıldığı yöntem ile sadece akım verisiyle elde edilen noktasal iyileştirme sonuçlarının yanında alana yayılı kar örtüsü, gerçek buharlaştırma, yaprak alan indeksi, toprak nemi ve yer altı suyu beslenmesi gibi akı değerlerinin de daha tutarlı ve güvenilir olması sağlanır. Bu çalışmamızın amacı uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilmiş MODIS aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) verileri ile yaprak alan indeksi (LAI) haritalarının hidrolojik model kalibrasyonuna etkilerini araştırmaktır. Benzeşim deneylerimiz için Vienne (Fransa) havzası seçilmiştir. Fizik tabanlı tam yayılı mHM hidrolojik modeli bu havza için çalıştırılmış ve 6 senaryo için kalibrasyonlar yapılmıştır. Modelin akım benzeşim performansı Kling-Gupta (KGE) metriği ile modelin yayılı evapotranspirasyon performansı ise SPAEF metriği ile ortaya konmuştur. Sonuçlara göre, sadece havza çıkışındaki AGİ verilerine göre kalibre edilen model KGE 0.91'ye ulaşırken (maksimum 1), SPAEF buharlaştırma performansı düşüktür. Havzaya yayılmış 4 AGİ'li kalibrasyonda ortalama KGE 0.37 iken SPAEF kısmen iyileşmiştir. Tek AGİ ve MODIS-AET birlikte kalibrasyonda kullanıldığında KGE 0.90 SPAEF ~0.70 olmuştur. Dördüncü senaryomuzda model sadece MODIS-AET ile kalibre edilmiş SPAEF 0.60'e ulaşmıştır. Öte yandan su dengesi tutturulamamıştır (KGE -0.24). Beşinci senaryoda, model sadece 12 adet akım verisi ve MODIS-AET ile kalibre edilmiş ve KGE 0.67 iken SPAEF 0.75 gibi yüksek değerler almıştır. Altıncı son senaryoda sadece bir yıl günlük akım gözlemi yapıldığı varsayımı yapılarak MODIS-AET'nin de dahil edildiği model kalibrasyonu yapıldığında KGE 0.72 ve SPAEF yine 0.75 dolaylarında yüksek değerler almıştır. Bu altı senaryolu model kalibrasyon çalışmamızın sonuçları akım ölçümleri eksik havzalar için ümit vericidir. Öyle ki; uydu verilerinden elde edilen gerçek evapotranspirasyon (AET) ile birlikte

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 3 Şubat 2022 günü ulaşmıştır. 22 Temmuz 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.1067466>

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Atıksu Dairesi Başkanlığı, Ankara mbavcuoglu@dsi.gov.tr - <https://orcid.org/0000-0002-1513-6432>

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul demirelmc@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-4402-906X>

sadece bir yıl günlük veya bir yılın her ayından bir debi ölümü toplamda 12 debi değeri ile dahi yeterli su dengesi sağlanabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** mHM, model kalibrasyonu, gerçek evapotranspirasyon, uzaktan algılama, MODIS, lmsz havzalar.

## **ABSTRACT**

### **On the Utility of Remotely Sensed Actual ET and LAI in Hydrologic Model Calibration**

Hydrological model parameters are usually calibrated based on the performance of the daily river discharge data recorded at the basin outlet. In the unconventional approach, satellite-based remote sensing data, which is open to everyone, is utilized in addition to the discharge data. The latter approach is also called spatial calibration in hydrology. The objective of this study is to assess the utility of remotely sensed actual evapotranspiration (AET) and monthly leaf area index (LAI) maps on the calibration of the hydrological model. For this, six different calibration cases (scenarios) are designed using a physically-based hydrologic model for the Vienne basin in France. It should be noted that LAI is used to estimate interception and correct the PET in the model i.e. both affecting the simulated AET. The daily discharge simulation performance of the model is assessed using KGE and the spatial performance of the model is assessed using SPAEF i.e. between mHM's long-term (2002-2014) monthly average AET raster output maps and reference MODIS-AET maps. According to the results, the KGE for scenario 1 (single AGI) was 0.91, SPAEF was below zero; for scenario 2 (with 4 AGI), the KGE was 0.37 while the SPAEF was positive; for scenario 3 (Single AGI and MODIS-AET), the KGE was 0.90 while the SPAEF were ~0.70; For the 4th scenario (MODIS-AET only), the KGE was -0.24, SPAEF was around 0.60, for scenario 5 (12 flow data and MODIS-AET) the KGE was 0.67, SPAEF was around 0.75; for scenario 6 (one-year daily flow and MODIS-AET) KGE 0.72 and SPAEF was around 0.75. Our results are promising even for poorly gaged basins as we could reach reasonable performance with satellite based AET and only 12 discharge measurements.

**Keywords:** mHM, model calibration, actual evapotranspiration, remote sensing, MODIS, non-measured basins

## **1. GİRİŐ**

Hidrolojik modeller, havzanın hidrolojik davranışını kontrol eden kar erimesi, sızma ve buharlaşma gibi fiziki hidrolojik süreçlerin matematiksel ifadelerinden oluşur. Model yapısı havzaya en uygun model sıfırdan kurulur veya varolan modellerden en uygunu seçilerek model parametreleri (katsayıları) deneme yanılma ile tahmin ederek havzanın hidrolojik davranışının debi dinamikleri özelinde doğru olmasına çalışılır [1]. Yaygın olarak kullanılan fizik tabanlı hidrolojik modeller alansal yapılarına göre toplu, yarı yayılı ve tam yayılı olarak sınıflandırılır. Gelişmiş ülkelerde fizik tabanlı tam yayılı hidrolojik modeller bütünleşik havza yönetiminde uzaktan algılama verileriyle birlikte kullanılmaktadır. Toplu modellerde sadece havza çıkışındaki debi benzeştirilirken tam yayılı grid yapılı modellerde havzanın herhangi bir yerinden sonuç çekilebilir. Bu nedenle yayılı hidrolojik modeller, toplu (lumped) modellere kıyasla, sonlu elemanlı yapıları nedeniyle sadece havza çıkışında değil tüm

havzada uydu verileriyle birlikte değerlendirmeye imkan sağlar [2, 3, 4]. Örneğin alana yayılmış gerçek evapotranspirasyonun (AET) güvenilir tahminleri, geniş ekili alanlarda sulama planlaması, tarımsal kuraklık izleme, sudaki ayak izi (water footprint) hesabı, görülmeyen/sanal su ticareti (virtual water trade) ve su talebi tahmini gibi çeşitli sürdürülebilir su kaynakları yönetimi uygulamaları için oldukça yararlıdır [5]. Özellikle kuraklık ile mücadelede sunacağı katkı sosyo-ekonomik etki alanları değerlendirildiğinde çalışmanın önemini arttırmaktadır [6]. Bu nedenle fizik tabanlı tam yayılı bir modelin uydu verileriyle kalibrasyonunu çalışmamızın odağına koyuyoruz.

Özellikle ölçümü kısıtlı havzalar ile değişim geçiren havzalarda güvenilir hidrolojik tahminler üretmek için hidrolojik modelin öncelikle parametrelerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir [7]. Parametreler belirlendikten sonra doğru bir temsil için hidrolojik modelin gözlenmiş verilerle kalibre edilmesi gerekmektedir. Geleneksel olarak hidrolojik modeller, akım verisini hedefleyen tekli kalibrasyon yaklaşımı ile kalibre edilmektedir [8, 9]. Gözlenmiş akım verisi her ne kadar havzanın antropojenik ve doğal süreçlerinin bütünlük bir sonucu olarak güvenilir bir değişken olsa da [10, 11, 12, 13]; havza içi alt akımların, toprak nemi ve evapotranspirasyonun (ET) zamansal ve mekansal değişkenliğinden bağımsızdır [14, 15, 16]. Bu yüzden kalibrasyon (iyileme) ve validasyon (doğrulama) için hidrolojik çevrimin nehir debisinden ayrı gözlemi yapılan diğer parçaları da kullanılmalıdır [17]. Doğru tahmin edilen bir sürecin tanımındaki bir hata, modelin başka bölümündeki bir hata ile telafi edilebilmektedir. Bu nedenle, doğru bir fiziki temsil için modelin akım dışında diğer dahili değişkenlere karşı da kalibre edilmesi gerekmektedir [14].

Her ne kadar doğru bir temsil için çok sayıda dahili değişkene hâkim olmak gerekse de bu ölçümü kısıtlı olan havzalar için kolay değildir [18]. Fakat son yıllarda, uydu teknolojilerinin gelişmesi ve daha geniş çapta kullanılabilir hale gelmesiyle birlikte daha hassas uzaysal ve zamansal çözünürlüklerde çeşitli hidro-meteorolojik verilere ulaşmak mümkün hale gelmiştir: yağış, toprak nemi, evapotranspirasyon, yaprak alan indeksi (LAI) vb. Bu yüzden mekansal (hücrese) modellerin alandaki yayılı potansiyellerini yansıtmaları açısından uydu tabanlı uzaktan gözlemlerin kullanımı model simülasyon (benzeşim) becerisinin artırılması için ciddi fırsatlar ortaya çıkarmıştır [16, 19, 20, 21]. Uydu tabanlı yayılı hücrese verileri, özellikle buharlaşma verisini hidrolojik model kalibrasyonunda kullanan çalışmalar Tablo 1`de özetlenmiştir.

Ölçümü kısıtlı havzalarda çok değişkenli kalibrasyon stratejileri üzerine yapılan önceki çalışmalarda fizik tabanlı tam yayılı bir model kullanılarak yerinde gözlemler, uzaktan algılama ve yeniden analiz girdileri ile hidrolojik model performansı değişen senaryolarda test edilmiştir [27, 12]. Çalışmalarda nehir akımını baz alan kalibrasyon sonuçları yapılan değerlendirmelerde referans alınmış, uydu bazlı AET ve birlikte kalibrasyon yöntemlerinin referans kalibrasyona göre performans değişimleri gözlemlenmiştir. Çalışmalarda uzun süreli akım verisi kullanılmıştır. Bir başka benzer çalışmada Herman ve diğ. [30] AET verilerini, iki farklı uydu tabanlı uzaktan algılama veri setinden elde etmişlerdir. Bu çalışma için de üç farklı model kalibrasyonu kullanılmış; ilk olarak modelin yalnızca nehir akımı için gözlem verileri ile kalibre etmenin AET öngörülebilirliğinin iyileştirilmesine yardımcı olabileceği; modelin hem nehir akımı hem de AET için kalibre edilmesi durumunda hem nehir akımı hem de AET ile ilgili model tahmin becerilerinin iyileştiği; modelin yalnızca AET için kalibre edilmesi durumunda nehir akımı öngörülebilirliğinin iyileştirilmesine yardımcı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1 - Uydu tabanlı uzaktan algılama AET verilerini hidrolojik model kalibrasyonunda kullanan çalışmalar

Referans	Uydu-Ürün	RS-Değ.	Çözünürlük	Zamansal Aralık	Hidrolojik Model	Çalışma Alanı
[3]	CMRSET (MOD43B4)	AET	0.05°×0.05	Günlük	AWRA-L	Doğu Avust.
[22]	MOD16 ET	AET	1x1km	8 Günde Bir	VIC	Columbia Ha.
[23]	ESA CCI	AET	0.25°	Günlük	SMART	Avustralya
[24]	GLEAM v3.2a	AET	0.25°	Günlük	mHM	Volta N. Ha.
[12]	GLEAM v3.2a	AET	0.25°	Günlük	mHM	Volta N. Ha.
[25]	PML_V2	AET	0.05°×5 km	8 Günde Bir	Xinanjiang	Yalong N. Ha.
[9]	SEBAL (MODIS)	AET	1x1km	Aylık	SWAT	Rechna Doab
[26]	MODIS	AET	5x5km	Günlük	SIMHYD	Avustralya
[20]	MODIS, TSEB	AET	1x1km	Günlük	mHM	Skjern havzası
[27]	MOD 16A2; GLEAM 3.2a	AET	6,5km	Aylık	mHM	Batı Afrika
[28]	TSEB (MODIS )	AET	1x1km	Günlük	mHM	Skjern havzası
[29]	MODIS, TSEB	AET	1x1km	8 Günde Bir	mHM	Skjern havzası
[30]	SSEBop (USGS) ALEXI	AET AET	1x1km 1x1km	Aylık Aylık	SWAT	Honeyoe Creek-Pine ha.
[31]	MODIS (MOD16A2)	AET	1x1km	8 Günde Bir	Modif. SWAT	Pipestem ha.
[32]	GLEAM_v3.0b	AET	0.25°	Günlük	HYMOD (Toplu)	Nyangores ha.

SMART: Soil Moisture and Runoff simulation Toolkit, SSEBop: Surface Energy Balance model, ALEXI: Atmosphere-Land Exchange Inverse model, SWAT: Soil and Water Assessment Tool, SMAP: Soil moisture active passive, TSEB: Two Source Energy Balance model, VIC: Variable Infiltration Capacity model, GLEAM: Global Land Evaporation Amsterdam Model, ESA CCI: European Space Agency Climate Change Initiative, MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

Son çalışmalar, su dengesini alansal olarak iyileştirmek için uzaktan algılanan buharlaşma-terleme (ET) ve akım ölçüm verilerini birlikte kullanan çok amaçlı kalibrasyonun potansiyelini göstermiştir [33]. Hatadan bağımsız desene duyarlı alansal metriklerin çalışmalarda kullanılması ise havza fiziğini iyileştirmeye dönük dikkat çekici bir çabadır. Ayrıca önceki çalışmalar uydu bazlı AET'nin uzun süreli akım verisi ile birlikte kalibrasyonunu test ederken bir yıllık ya da tek bir yıla ait az sayıda veri ile kalibrasyonunu test etmemiştir. Uzun süreli uydu bazlı AET'nin yanında kısıtlı sayıda (bir yıllık ya da daha az) akım verisi ile birlikte kalibrasyonun hem AET benzeşimini hem de akım benzeşimini ne derece iyileştirilebileceği bilinmemektedir. Uydu bazlı AET verisine uzun yıllar aralığında üstelik ücretsiz olarak ulaşılabilirken kısıtlılık ve ölçümsüzlük baskısı daha çok akım verisinde yaşanmaktadır. Çalışmamız bu yüzden akım verisi ile AET'nin çoklu ve çok amaçlı kalibrasyonunda minimum akım verisi koşullarını kıyaslar üzerinden test etmektedir. Üstelik bunu akım benzeşim başarısını bozmadan AET'yi alansal bir metrikle önceliklendirerek yapmaktadır.

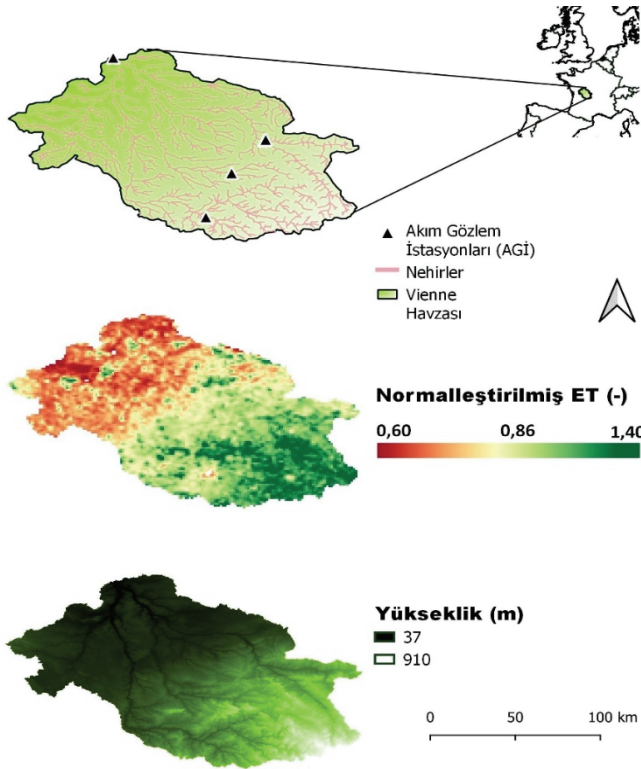
Bu çalışmamızın amacı uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilmiş gerçek evapotranspirasyon (AET) ve aylık yaprak alan indeksi (LAI) haritalarının (1) hidrolojik model kalibrasyonuna etkilerini (2) ölçümü olmayan havzalardaki potansiyelini araştırmaktır. Bu amaca ulaşmak için veri kalitesi yüksek Vienne (Fransa) havzasında fizik

tabanlı tam yayılı mHM hidrolojik model ile farklı amaç fonksiyonlarıyla (sadece debi, sadece AET ve debi ile AET birlikte) kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. Sonuçlarımız sistematik şekilde sunulurken tutarlı bulgularımız ortaya konmuştur.

## 2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

### 2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Fransa'nın 21.157 km<sup>2</sup> yüzey alanına sahip olan Vienne Havzası (Şekil 1) seçilmiştir. Eksiksiz ölçümlere sahip bu havzada yapılan ön testlerimizde model yüksek performans değerlerine (KGE>0.90) ulaştığı için bu metodolojik çalışmamızda bu havza ön plana çıkmıştır. Vienne kaynağını güneyde yer alan çıkış noktasından 372 km mesafede 920 m yükseklikteki Millevaches platosundan alır. Vienne Havzası 17.000 km nehir ağı uzunluğuna sahip olup yıllık birikimler çok değişken bir şekilde yayılmıştır. Havza üst kotlarında yağış 1.500 mm / yıl'a ulaşırken aşağıya doğru ilerledikçe azalır ve 600 mm / yıl'a kadar düşer. Havza genelinde uzun yıllar ortalaması yağış 700 mm / yıl' dır. Kasım-Ocak ayları en yağışlı aylardır (Vienne Havzası Bölgesel Kamu Teşkilatı: <http://www.eptb-vienne.fr>).



Şekil 1 - Vienne Havzası yeri; nehir ağı yayılımı; Akım Gözlem İstasyonları, Haziran-Temmuz-Ağustos Dönemi Buharlaşma Haritası, DEM Haritası.

## 2.2. Uydu Tabanlı (MODIS) Gerçek Evapotranspirasyon (AET) ve Yaprak Alan İndeksi (LAI)

Bu çalışmanın kalibrasyon aşamalarında MODIS ürünlerinden aylık MOD16 AET ve aylık LAI kullanılmıştır ([https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_policies](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_policies), 02.04.2020). NASA'nın dünya gözlem sisteminde yer alan MODIS küresel ET algoritması, MODIS uzaktan algılama verilerini kullanarak hidrolojik ve ekolojik araştırmalar için geliştirilmiştir. MOD16 [34] algoritmasından elde edilen ET verileri 8 günlük, aylık ve yıllık aralıklarla 1 km alansal çözünürlükte mevcuttur. MODIS LAI ürünü uzun dönem aylık ortalama olarak modele sokulmuştur. LAI haritaları düşük çözünürlüklü PET verilerine bitki büyüme dinamiklerini tanıtmak için kullanılır ve AET sonuçlarını doğrudan etkiler.

## 3. YAYILI HİDROLOJİK MODEL

Vienne havzası için kalibrasyon stratejilerini test etmek için kurgulanan tüm senaryolarda fizik tabanlı tam yayılı bir model olan mHM [35, 36] kullanılmıştır. Orta (mezo) ölçekli Hidrolojik Model (mHM) 63 global parametreye sahiptir ve yapısal olarak HBV ve VIC gibi oturmuş yaygın kullanımlı modellerin denklemlerini kullanır [37]. Model kanopi tutma, kar birikimi ve erime, toprak nem dinamikleri, sızma ve yüzey akışı, evapotranspirasyon, yüzey altı depolama ve akım oluşumu, derin süzülme ve temel akış ve akım zayıflatma ve taşkın yönlendirme süreçleri hesaba katar. Model, saatlik veya günlük meteorolojik verilerle çalışır ve gerekli parametrelerin mekansal değişkenliğini çıkarmak için gözlemlenebilir havza fiziksel özelliklerini (toprak dokusu, bitki örtüsü ve jeolojik özellikler) kullanır. mHM'nin temel özelliği, yüksek çözünürlüklü fizyografik arazi yüzey verilerine dayalı transfer fonksiyonlarını kullanarak hedef çözünürlükte parametreleri bölgeselleştirme yapabilesidir (<https://www.ufz.de/mhm>). Ayrıca LAI ve bakı haritaları potansiyel evapotranspirasyon (PET) girdilerinin normalizasyonunda kullanılarak bitki örtüsünün dinamikleri modele tanıtılmış olur. Tablo 2 bu çalışmanın model girdilerini kaynakları ile özetlemektedir.

**Tablo 2 - mHM için girdi olarak kullanılan morfolojik ve meteorolojik verilere genel bakış.**

Veri	Tanım	Uzamsal Çözünürlük	Kaynak
Q (günlük)	Debi	Havza çıkışı	GRDC
P (günlük)	Yağış	10 km	EOBS [38]
ETref (günlük)	Referans evapotranspirasyon	20 km	EOBS
Tavg (günlük)	Ortalama hava sıcaklığı	20 km	EOBS
LAI	8 günde bir ölçülen Yaprak Alanı İndeksi (LAI) değişimini baz alan tam yayılı 12 aylık değerler	1 km	MODIS [34]

**Tablo 3 - mHM için girdi olarak kullanılan morfolojik ve meteorolojik verilere genel bakış. (devam)**

Veri	Tanım	Uzamsal Çözünürlük	Kaynak
<b>Arazi Örtüsü</b>	Orman, geçirgen alan ve kentsel alan	250 m	MODIS
<b>DEM ile ilgili veriler</b>	Eğim, bakı, akış birikimi ve yönü	250 m	SRTM
<b>Jeolojik sınıflar</b>	16 jeolojik formasyon	250 m	UFZ-Leipzig [39]
<b>Toprak verisi</b>	Tam yayılı 2 metre derinlikte 6 katmanlı toprak verisi (kum oranı, kil oranı, hacimsel yoğunluğu)	250 m	HWSD ve (ESD)

GRDC: [https://www.bafg.de/GRDC/EN/01\\_GRDC/12\\_plcy/policy\\_guidelines.pdf;jsessionid=AA96F6F200B3880575879F15334B6669.live2052?\\_\\_blob=publicationFile, 02.04.2014](https://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/12_plcy/policy_guidelines.pdf;jsessionid=AA96F6F200B3880575879F15334B6669.live2052?__blob=publicationFile, 02.04.2014)

EOBS: <http://www.ecad.eu/download/ensembles/ensembles.php, 02.04.2014>

MODIS: [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_policies, 02.04.2014](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_policies, 02.04.2014)

SRTM: <https://lta.cr.usgs.gov/citation, 02.04.2013>

HWSD: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/, 02.04.2014>

ESD (European Soil Database): [http://ec.europa.eu/geninfo/legal\\_notices\\_en.htm, 02.04.2013](http://ec.europa.eu/geninfo/legal_notices_en.htm, 02.04.2013)

### 3.1. Meteorolojik ve Morfolojik Veriler

Ücretsiz olarak bu çalışma kapsamında Vienne havzası için Modelin meteorolojik girdilerinde E-OBS kullanılmıştır. Avrupa çapında E-OBS verileri sıcaklık (günlük minimum, ortalama ve maksimum değerler) ve yağış veri setinin yeni bir versiyonudur. Veri seti 1950'ye kadar olan dönemi kapsar ve orijinal E-OBS veri seti ile düzenli enlemlerde 0.25°×0.25° aralıklarla mekansal yayılım sergiler [40]. Ortalama sıcaklık 1950 yılı başından 2018 yılı sonuna kadar günlük ortalama; Yağış için 1950 yılı başından 2018 yılı sonuna kadar günlük ortalama; Potansiyel Evapotranspirasyon için 1950 yılı başından 2018 yılı sonuna kadar günlük ortalama kullanılmıştır. PET Hargreaves-Samani denkleminde türetilmiştir [41]. Havzanın hidrolojik modelinde, 44x28 grid ve her biri 0.0625 derece hücre boyutunda çalışılmıştır. mHM'nin morfolojik girdi veri kümeleri ascii formatında raster haritalar olarak sağlanmıştır. Tüm hücresel girdiler, yani morfolojik ve meteorolojik veriler aynı mekansal alanı kapsayacak şekilde temin edilmiştir. Ücretsiz arazi örtüsü verileri Avrupa için 250m çözünürlüklerle temin edilmiştir [34]. Beş istasyona (#6123400, #6123430, #6123450, #6123460 ve #6123820) ait 1960-2016 günlük debi verileri Almanya Koblenz'deki Global Runoff Data Center'dan (GRDC) beş AGİ için temin edilmiştir.

## 4. YÖNTEM

Çalışmamız altı farklı senaryoda AGİ ve MOD16 ürünlerinin farklı kombinasyonlarının model kalibrasyonuna etkilerini inceler. Modelin yapısı ve girdileri ile birlikte amaç fonksiyonları, parametre duyarlılık analizi, amaç fonksiyonları, kalibrasyon araçları, kalibrasyonun adımları ve seçilen yöntemler hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

#### 4.1. Amaç Fonksiyonları ve Metrikler

Modelin kalibrasyonu sürecinde amaç fonksiyonları tayin edilirken üç ayrı metrik (MAE(1), KGE(2) ve SPAEF(3)) kullanılmış, doğrulamalar için iki ayrı metrik (KGE ve SPAEF) kullanılmıştır. KGE ve MAE metrikleri ile hataya duyarlı, SPAEF metriği ile hataya duyarlı desene duyarlı amaç fonksiyonları oluşturulmuştur. Aşağıda sırası ile kullanılan metrikler ve türetilen amaç fonksiyonları verilmiştir:

Ortalama Mutlak Hata [42]

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}.$$
$$Amaç Fonk. = (MAE)_{MNM} + (MAE)_{HTA} + (MAE)_{EEK} \quad (1)$$

Burada n gözlem ve simülasyon sayısı iken  $y_i$  simülasyon,  $x_i$  gerçek değerdir. Ortalama mutlak hata (MAE), aynı fenomeni ifade eden eşleştirilmiş gözlemler arasındaki hataların bir ölçüsüdür [42]. MAE; buharlaştırma verisinin tek başına kullanıldığı kalibrasyonda farklı ölçeklerde yer alan mekansal verilerin hatadan bağımsız paterne duyarlı SPAEF metriği ile amaçlanırken hata yönünde oluşan amaçlanma boşluğunu doldurmak için kullanılmıştır. Ayrıca beşinci senaryoda (S5) 12 adet debi (Q) ile yapılan çoklu kalibrasyonda hatanın hedeflendiği amaç fonksiyonlarında kullanılmıştır (Tablo 4; Şekil 2). MNM Mart-Nisan-Mayıs, HTA haziran-Temmuz-Ağustos ve EEK Eylül-Ekim-Kasım aylarını ifade etmektedir.

Kling-Gupta Metriği [43]

$$KGE = 1 - \sqrt{((1-r)^2 + (1-\alpha)^2 + (1-\beta)^2)}$$
$$Amaç Fonk. = 1.0 - KGE \quad (2)$$

Burada  $r$  = Pearson korelasyon katsayısı  $\alpha$  = benzeşen ortalamasının gözlemlenen ortalamaya oranı,  $\beta$  = benzeşen standart sapmasının gözlemlenen standart sapmaya oranıdır. (1-KGE) her zaman minimizasyon yöntemlerinin uygulandığı hedefdir. Minimum (1-KGE) değeri 0'dır.

Alansal desen uyumu [20, 28, 29]

$$SPAEF = 1 - \sqrt{(\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$
$$\alpha = \rho(A, B) \text{ and } \beta = \frac{\left(\frac{\sigma_A}{\mu_A}\right)}{\left(\frac{\sigma_B}{\mu_B}\right)} \text{ and } \gamma = \frac{\sum_{j=1}^n \min(K_j, L_j)}{\sum_{j=1}^n L_j} \quad (3)$$

$$Amaç Fonk. = (1.0 - SPAEF_{MNM})^2 + (1.0 - SPAEF_{HTA})^2 + (1.0 - SPAEF_{EEK})^2$$

Alansal verilerin uyumluluğunu denetleyen metrikte;  $\alpha$ , gözlemlenen ve simüle edilmiş (benzeşen) desen arasındaki Pearson korelasyon katsayısıdır,  $\beta$  mekansal değişkenliği temsil



eden varyasyon katsayısının fraksiyonudur ve  $\gamma$ , gözlenen model ve histogramın verilen histogram K için histogram kesişimidir. Simüle edilmiş desenin L'si, her biri n bölme içerir. İki değişkenin farklı birimlerle karşılaştırılmasını sağlamak için  $\gamma$  hesabında z skoru kullanılır, [20, 28, 29]. Bu yeni metrik paterne (desene) odaklıdır ve modelin günlük çıktılarında uzun dönem (2002-2014) aylık ortalama AET haritaları ile referans MODIS-AET raster haritaları arasında hesaplanır. Ayrıca yüksek çözünürlüklü aylık LAI haritaları bitki büyüme dinamiklerini modele aktarırken ve büyük gridli PET haritalarının ölçeklenmesinde kullanılmıştır.

#### **4.2. Duyarlılık Analizi**

Tüm morfolojik (statik) ve meteorolojik (dinamik) veriler istenilen çözünürlük ve zamansal kalıplarda temin edilmiş; modelin ilk çalıştırılması parametre hassasiyeti analizi için yapılmıştır. Böylelikle en yüksek değişkenliğe sahip parametreler seçilerek gereksiz işlem yükü önlenmiştir. Tüm kalibrasyon süreçleri 63 parametre içinden belirlenen en hassas 20 parametre üzerinden yürütülmüştür. Hassasiyet analizi debi ve AET yi baz alarak KGE ve SPAEF metrikleri öncelilendirerek PEST (Parametre Tahmin Aracı) [44] ile yapılmıştır.

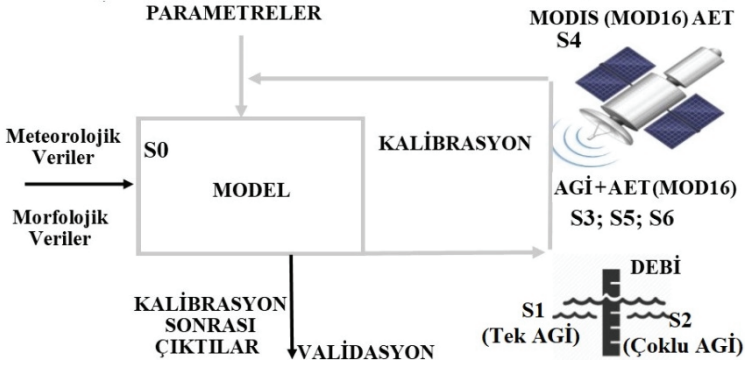
#### **4.3. Kalibrasyon Yöntemi (PA-DDS)**

Seçilen amaç işlevi için en iyi parametre konfigürasyonunu bulmak için farklı optimizasyon yöntemleri mevcuttur. Gözlemlenen veriler global ve birden fazla amaç fonksiyonu kullanılacağından hedefi kalibre etmek için Pareto Dinamik Boyutlandırılmış Arama (PA-DDS) yöntemi seçilmiştir. Herhangi bir ek yazılım yazmaya gerek kalmadan model kalibrasyonu ve tasarım optimizasyonu süreçlerini otomatikleştiren modelden bağımsız bir program olan OSTRICH [45] PA-DDS optimizasyon yönteminin uygulama aracı olarak kurulmuş ve kalibrasyon için kullanılmıştır. L. Shawn Matott tarafından geliştirilen OSTRICH, çok sayıda modelden bağımsız optimizasyon ve kalibrasyon (parametre tahmini) algoritması uygulayan, modelden bağımsız çok algoritmali, paralel uyumlu bir optimizasyon ve parametre tahmin aracıdır: çoklu ve çok amaçlı kalibrasyon stratejilerinin test edildiği senaryolarda ideal bir optimizasyon ve parametre tahmin aracı olarak görülmüş [46], çalışmamızda optimizasyon aracı olarak kullanılmıştır.

#### **4.4. Model Kalibrasyonu ve Doğrulaması**

Hidrolojik Modelin kurulum aşaması tamamlandıktan sonra altı farklı senaryo için (Şekil 2) kalibrasyon ve doğrulama süreçleri tamamlamıştır. Altı farklı senaryo için yürüyen adımlardan ilkinin (S0) kalibrasyon öncesi hassas parametrelerin belirlenmesi oluşturmaktadır.

Senaryolara ait tanımlar, kalibrasyon için kullanılan metrikler, kalibrasyon stratejileri ve yöntemleri aşağıda Tablo 4 de verilmiştir.



Şekil 2 - Çalışma çerçevesi: model kurulumu, hassas parametrelerin belirlenmesi (S0), debi ile tek AGİ li kalibrasyon (Geleneksel) (S1), debi ile çok AGİ li çoklu kalibrasyon (S2), debi ve uydu verileri ile çok amaçlı çoklu kalibrasyon (S3), uydu verileri ile çok amaçlı kalibrasyon (S4), yıl içi 12 adet debi ölçümü ve uydu verileri ile çok amaçlı çoklu kalibrasyon (S5), bir yıllık günlük debi ve uydu verileri ile çok amaçlı çoklu kalibrasyon (S6), Validasyon.

Tablo 4 - Vienne havzasında kurulan Hidrolojik model için senaryolar.

Senaryo	Akım Gözlem İstasyonu (AGİ)	Akım verisi	Uydu verisi
S1	1 AGİ havza çıkışında	Eksik yok	Yok
S2	1 AGİ havza çıkışında, 3 AGİ dere kollarında	Eksik yok	Yok
S3	1 AGİ havza çıkışında	Eksik yok	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar
S4	Yok	Hiç ölçüm yok	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar
S5	1 AGİ havza çıkışında	2004 yılında her ayın 15. gününe ait günlük akım verisi (sadece 12 adet)	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar
S6	1 AGİ havza çıkışında	2004 yılına ait günlük akım verisi (365 adet)	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar

Son adımda simülasyonların gözlenmiş debi değerleri ve uydu tabanlı referans AET (MOD16) verileri ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Çıktıların oluşturulması ve formatlanmasında, grafiklerin ve görsellerin oluşturulmasında matlab ve pyhton dilleri aktif olarak kullanılmıştır. 1998-2001 arası 4 yıl ön koşurma (spin-up) dönemi olduğundan performans hesaplarına dahil edilmemiştir. Model parametreleri Ostrich yazılımı içerisinde bulunan 750 iterasyonlu paralel pareto-DDS (PARA-PADDS) yöntemi kullanılarak kalibre edilmiştir. Çalışma kapsamında kurulan model günlük adımda 2002-2014 tarihleri arasında

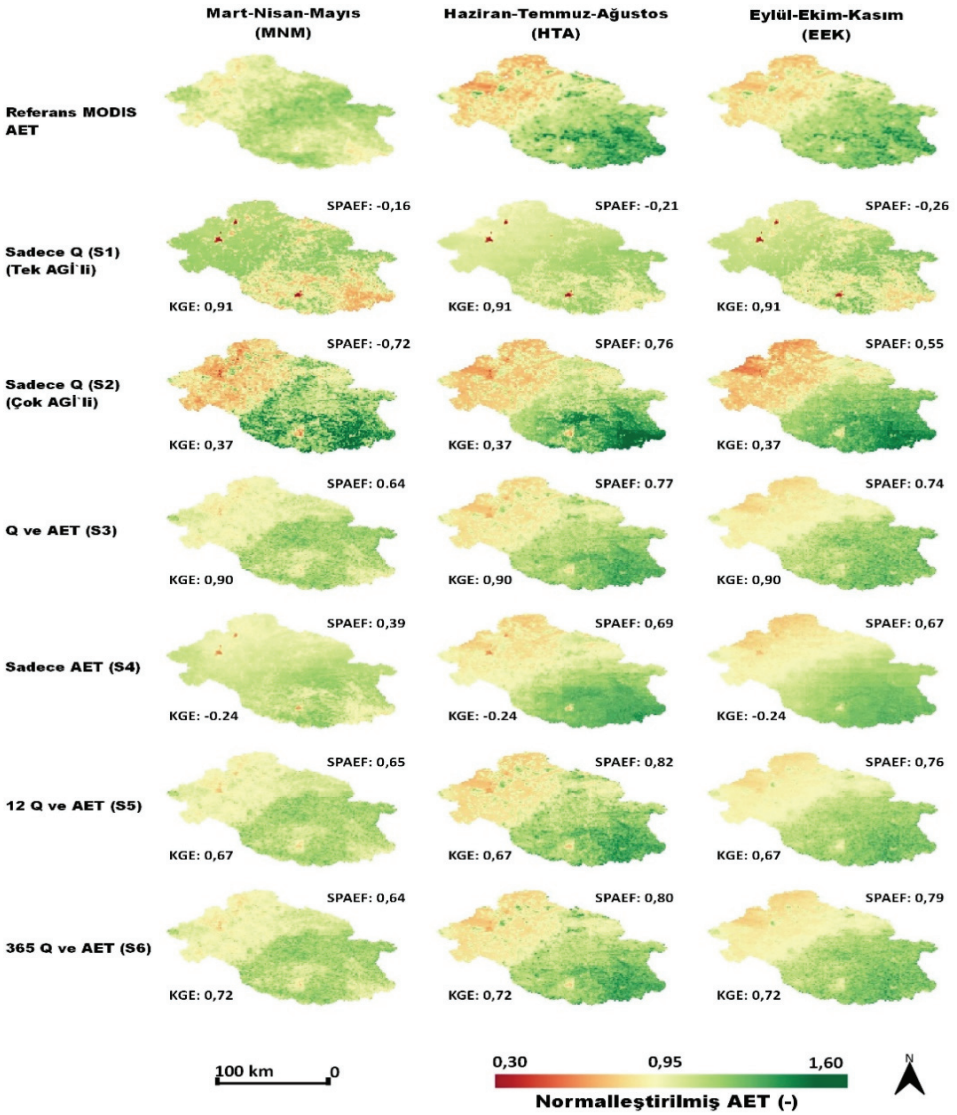
kalibre edilmiştir. 1998-2001 arası 4 yıllık süreç model ısınmasında kullanılmıştır. Uydu tabanlı AET (MOD16) değerleri yine 2002-2014 yılları arasında uzun dönem aylık haritalardır. Değerlendirmeler üçer aylık ayrı dönemlerde yapılmıştır. Buna göre; Mart-Nisan-Mayıs (MNM) ayları birinci dönem olup 13 yıllık verinin bu dönemine ait ortalamasından oluşmaktadır. Aynı şekilde Haziran-Temmuz-Ağustos (HTA) ikinci dönemi, Eylül-Ekim-Kasım (EEK) ayları ortalaması üçüncü dönemi oluşturmaktadır.

## **5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME**

Çalışma kapsamında veri kalitesi yüksek Fransa'nın Vienne havzasında fizik tabanlı tam yayılı mHM modeli kurulmuş ve 6 senaryolu kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. 2002-2014 kalibrasyon dönemindeki modelin akım benzeşim performansı modelin günlük akım çıktıları ile gözlenen akım değerleri arasında hesaplanan KGE, modelin alana yayılı fiziksel performansı ise mHM'in uzun dönem (2002-2014) aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) raster çıktı haritaları ile referans MODIS-AET raster haritaları arasında üçer aylık üç dönemde (1. dönem: Mart, Nisan, Mayıs, 2. dönem: Haziran, Temmuz, Ağustos 3. dönem: Eylül, Ekim, Kasım için) hesaplanan SPAEF değerleri ile ortaya konmuştur (Şekil 3: S1-S6). 1998-2001 arası 4 yıl ön koşturma (spin-up) dönemi olduğundan performans hesaplarına dahil edilmemiştir. Sonuçlara göre, sadece havza çıkışında konumlandırılan bir tek akım gözlem istasyonundan elde edilen akım verilerinin kullanıldığı kalibrasyonda (senaryo 1) modelin akım performansı beklendiği gibi çok yüksek (KGE 0.91, maksimum değeri 1); modelin AET performansı ise üç dönemde de çok düşüktür (SPAEF -0.16, -0.21, -0.26). Havza çıkışındaki AGİ ve nehrin farklı alt kollarında konuşlu 3 AGİ'den alınan akım verileriyle 4 AGİ'li kalibrasyonda (senaryo 2) ortalama KGE 0.91'den 0.37'ye düşerken ve üç dönemin SPAEF değerleri -0.72, 0.76, 0.55 olmuştur. Tek AGİ ve uydu verili kalibrasyonda (senaryo 3) akım performansında 0.91'den düşme çok sınırlı olmuş (KGE 0.90), bunun yanında AET performansı üç dönemde de önemli oranda iyileşmiştir (SPAEF 0.64, 0.77, 0.74). Akım ölçümü hiç olmayan sadece uydu verili kalibrasyonda (4. senaryo) su dengesi sağlanamamış (KGE -0.24), üç dönemde SPAEF 0.39, 0.69, 0.67 değerlerini almıştır. MODIS-AET ve mHM-AET verileri normalleştirme yapılarak SPAEF metriği ile karşılaştırılmıştır. Haritalar üzerinde görünen kırmızı noktalar yerleşim yerleridir (Şekil 3).

Veri eksikliği yaşanan havzalar için iki senaryo (5 ve 6) kurgulanmıştır. Bir yılda ve sadece her ayın ortasında tek ölçüm, toplamda 12 adet akım verisi ve MODIS-AET uydu verisiyle kalibrasyonda (senaryo 5) su dengesi ve AET performansının iyileştiği gözlemlenmiştir (KGE 0.67 ve üç dönemde SPAEF 0.65, 0.82, 0.76). MODIS-AET yanında sadece bir yıllık günlük akım verileri kullanılan 6. senaryoda (Şekil 3: S6) KGE 0.72 ve üç dönemde SPAEF 0.64, 0.80, 0.79 değerlerini almıştır. Sonuçlarımız akım ölçümleri eksik ve yetersiz havzalar için ümit vericidir. Sonuçlar, fizik tabanlı yayılı modellerin uydu verileri ve uygun amaç fonksiyonları ile kalibre edildiklerinde havzanın fiziğiyle uyumlu, su dengesini de bozmayan optimum parametre setine ulaşılabilirliğini göstermiştir.

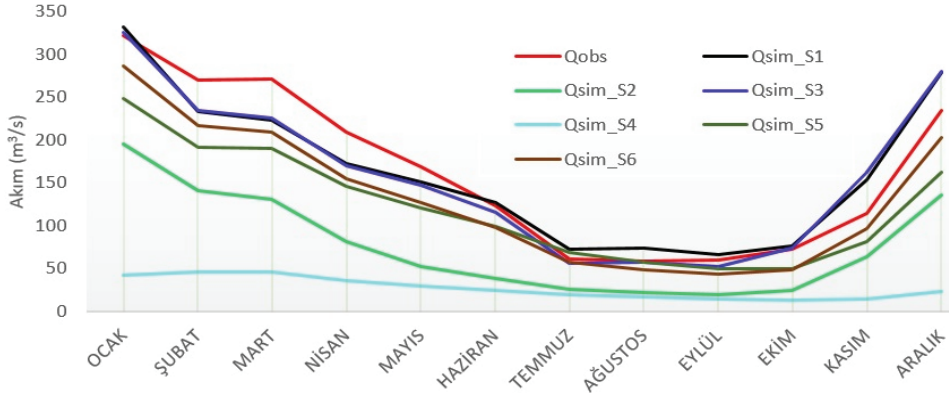
Aşağıda yer alan şekillerde akım simülasyonlarının aylıklarda gözlemlenmiş veriye göre debi (Q) değişim eğrileri (zaman serileri) (Şekil 4), simülasyonların CDF (kümülatif yayılım fonksiyonu) analizleri (Şekil 5) ve gözlemlenmiş debi ile korelasyonlarını (Şekil 6) gösteren yayılım grafikleri verilmiştir.



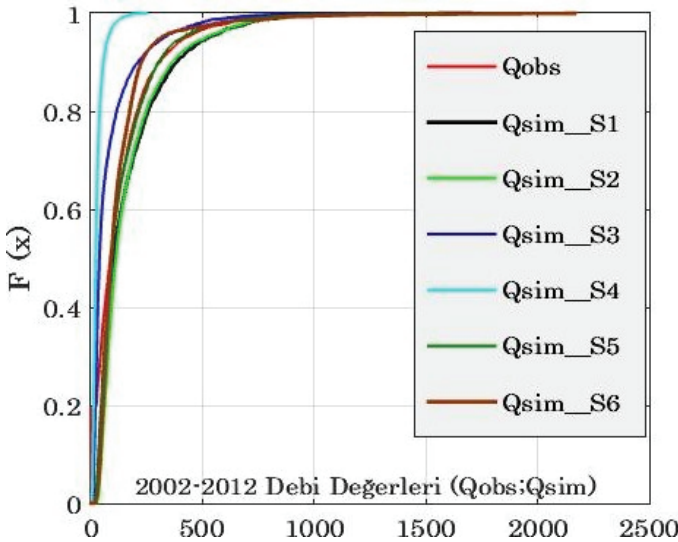
şekil 3 - mHM'in uzun dönem (2002-2014) aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) raster çıktı haritaları ile referans MODIS-AET raster haritaları.

Grafikte yer alan simülasyonların gözlemlenmiş Qobs ile olan değişimleri değerlendirildiğinde yalnızca AET'yi baz alan kalibrasyona ait Qsim\_S4 dışında tüm simülasyonların değişim oranlarının çok yakın olduğu, özellikle Temmuz-Ağustos-Eylül-Ekim aylarında simülasyon değerlerinin gözlemlenmiş değerlere ve birbirlerine çok benzer

olduğu anlaşılmaktadır. En yakın değişimin Qsim\_S1 ve Qsim\_3 simülasyonların da olduğu en düşük sonucun ise Qsim\_S4 için olduğu görülmüştür. Dikkat çeken benzerlik ise Qsim\_S5 ve Qsim\_S6 simülasyonların da izlenmekte olup bir yıllık yıl içi her aydan birer tane olmak üzere 12 adet veri ile dahi akım tahmini sağlanabilmektedir. Özellikle yaz ayları çok daha yakın benzerlikte sonuç vermiştir.



Şekil 4 - 2002-2012 yılları için havza çıkış noktasındaki senaryolara ait ortalama aylık akım simülasyonları ve gözlem akımı. Qobs: Gözlemlenmiş debi; Qsim\_S: "S" Senaryosuna ait debi simülasyonu

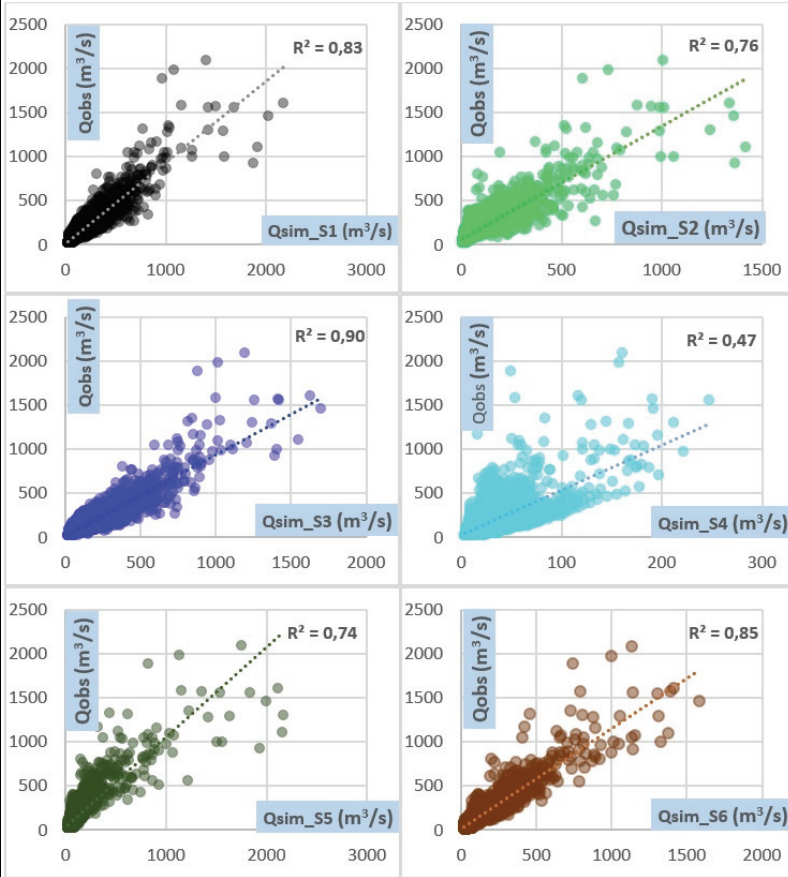


Şekil 5 - Akım simülasyonlarının eCDF (ampirik Kümülatif Yayılım Fonksiyonu) analizleri. Qobs: gözlemlenmiş debi değerleri; Qsim: simülasyon debisi; Qsim\_S: senaryoya ait simülasyon debisi.

Kalibrasyonların kümülatif yayılımlardaki tutarlılıklarını görmek için CDF (kümülatif yayılım fonksiyonu) analizi yapılmıştır. Grafiklere ait sonuçlar aşağıda Şekil 5` da verilmiştir.

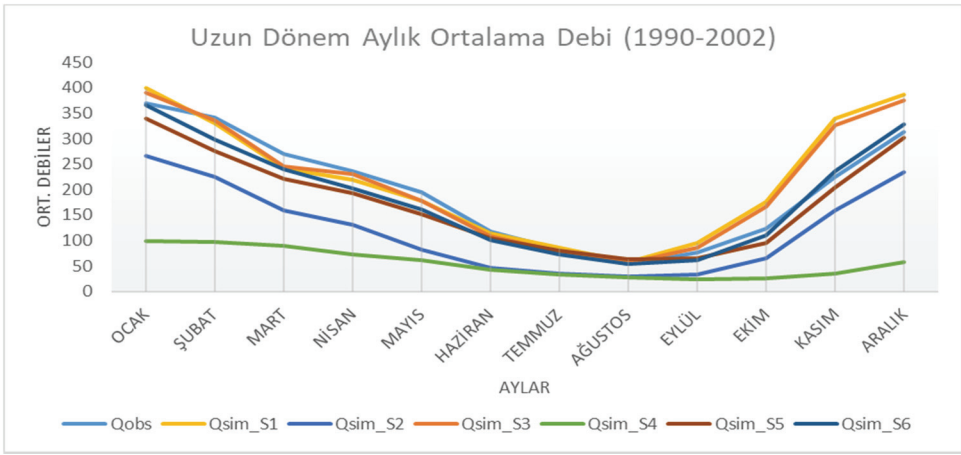
CDF analizleri incelendiğinde Qobs için en yakın eğrinin Qsim\_S5 olduğu anlaşılmaktadır. Yıl içi her aydan birer tane olmak üzere 12 adet veri ile kümülatif yayılım yönünden simülasyon başarısının sağlandığı görölmüştür.

Aşağıda (Şekil 6) yer alan yayılım grafikleri akım simülasyonları ile gözlemlenen akım arasındaki korelasyonu göstermiştir. Buna göre en yüksek korelasyonun ( $R^2=0.90$ ) Qsim\_S3 için sağlandığı görölmüştür. En düşük korelasyonun da sadece AET (MOD16) ile yapılan kalibrasyon sonucu üretilen Qsim\_S4 için sağlandığı anlaşılmıştır ( $R^2=0.47$ ). Qsim\_S3`e en yakın korelasyonların Qsim\_S1 ve Qsim\_S6 olduğu, AĞİ ve ET(MOD16)`nın kombinasyonu ile yapılan kalibrasyonların gözlemlenen akım verisi ile olan korelasyonlarının daha yüksek çıktığı grafiklerde görölmektedir.



Şekil 6 - Akım simülasyonlarının (Qsim) gözlemlenen akımla (Qobs) yayılım grağığı: simülasyonların gözlemlenmiş zaman serileri ile olan korelasyonlarını göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında; çalışma çerçevesindeki (Şekil 2) son adım olarak kalibrasyon yapılan dönem dışında bir aralık seçilerek 2002-2014 yılları arası kalibrasyonu yapılmış modelin 1990-2002 yılları için akım (Qsim-Qobs) doğrulaması (validasyon) yapılmıştır. Kalibrasyon için kullanılan aralığın bitiş tarihi AG'nin kapatıldığı tarih olduğu için 1990-2002 yılları arası doğrulamada kullanılmıştır. Doğrulama sonuçlarına göre, Senaryolar için sırası ile KGE; S1 için 0.85; S2: 0.56; S3: 0.87; S4: -0.038; S5: 0.83; S6: 0.90 olarak hesaplanmıştır. Beklendiği gibi S4 su dengesini sağlayamazken diğer senaryolarda KGE yüksek değerler almıştır. Aşağıda tüm senaryolara ait 1990-2002 yılları arası simülasyonlara ait uzun dönem aylık debi ortalamalarının gözlenen debi ile olan değişimi yer almaktadır (Şekil 7).



Şekil 7 - 1990-2002 yılları için havza çıkış noktasındaki uzun dönem aylık ortalama debiler.

## 6. TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında veri envanteri tam olan bir havzada mekansal olarak yayılı bir model kurulmuş ve farklı kalibrasyon denemeleri yapılmıştır. Uzaktan algılama verisi olarak gerçek evapotranspirasyon (AET) seçilmiştir. Literatürde birçok çalışmada kullanılmış olması (Tablo 1) modelin mekansal kalibrasyon stratejisi olarak seçilmesinde etkili olmuştur. MODIS gerçek buharlaşma ürünleri [47] 1 km çözünürlükte uzun dönem aylık ortalamalar şeklinde hazırlanmış ve mHM model çıktıları ile kıyaslanmıştır. Desen (patchy pattern) uyumu gözetilerek MODIS (MOD16) ürünü AET'nin model kalibrasyonunda kullanılmasına karar verilmiştir. "mHM" modelinin seçilmesindeki temel neden ise literatüre bakıldığında daha önce birçok çalışmada fizik tabanlı tam yayılı bir model olarak test edilmiş olması ve kullanılan çalışmalarda hedeflenen çıktıların alınmasıdır [12, 20, 24, 48].

Çalışma kapsamında toplu bir model yerine tam yayılı bir model seçerek işlem yükü artmıştır. Üstelik toplu modellerin tüm havzayı tek bir noktaya indirgeyerek genel ihtiyaçları karşılıyor olması üstelik bunu hesap yükünü azaltarak yapması yeterliliği üzerinde haklı bir görüş oluşturmaktadır. Fakat bu gerçekçi bir temsilden uzak bir yaklaşımdır. Toplu modeller yerine



fizik tabanlı tam yayılı bir model seçilmesinin temel sebebi akım ölçümü hiç olmayan ya da yetersiz olan havzalarda da kullanılabilmesidir. Ayrıca toplu (lumped) modellerin sağlayamadığı bir diğer avantajı, hücresel sonlu elemanlı yapıları nedeniyle havza çıkışı dışında da doğrulamaya izin vermesidir [2, 3, 4]. Özellikle güvenli gıda arzının her geçen gün daha da önemli olduğu günümüzde tarım faaliyetleri önemini dahada arttırmaktadır. Tarımsal faaliyetlerin planlama noktasında havzaya ait her noktada idealize edilebilmesi için var olan heterojenliğin maksimum seviyede temsil edilmesi gerekmektedir. Gelişen teknolojinde katkısı ile havzaya dair bilinmeyenlerin matematiksel olarak daha iyi izah edilmesi fizik tabanlı yayılı modellerin kullanım potansiyelini daha da güçlendirmektedir.

Model seçimine karar verdikten sonra bir başka temel yol ayrımı modelin kalibrasyon stratejisinin belirlenmesi aşamasıdır. Su kaynakları planlama ve yönetimi çalışmalarında hidrolojik modellemenin önemi artarken [49, 50, 51, 52, 53, 54] birçok araştırmacı havza içindeki ve havza çıkış noktasındaki hidrolojik süreçleri simüle eden hidrolojik modelleri eniyilemek için çalışmalar yapmış hidrolojik modellerin kalibrasyonu üzerine önemli bir literatür oluşumuna katkı sağlamıştır. Önceki çalışmalarda geleneksel yaklaşım devam etmektedir ve kapsamlı modeller dahi sadece akım gözlem istasyonlarından (AGİ) elde edilmiş nehir akım (debi) verileri yani havza çıkış noktasındaki akım hidrografları ile kalibre edilmektedir. Kurulan modellerin büyük çoğunluğunda simülasyon verileri debi gözlem verileri ile kıyaslanmış, kalibrasyon da bu değerlere göre yapılarak havza içi hidrolojik dinamikler inceleme dışında tutulmuştur [20]. Sadece akım verileri kullanılarak kalibre edilen hidrolojik bir model, su havzası çıkışında kabul edilebilir akım simülasyonu üretebilir, ancak su dengesinin gerçekçi olmayan temsillerini sağlayabilir. Zira havza çıkışında üretilen bir akım simülasyonu kalibrasyon sırasında tek bir noktanın toplulaştırılmış hatasını önceliklendirdiği için havzanın yayılı fiziksel gerçekliğinden bağımsızdır. Hataların toplamda birbirini tolere etmesinden kaynaklı havza fiziğini yansıtmayan bir simülasyon sadece akım gerçekliğini sağlayabilir. Bu nedenle geleneksel yönteminde referans kalibrasyon olarak test edildiği fakat dışında bir kalibrasyon yöntemi çalışılmıştır.

Önceki çalışmalar değerlendirildiğinde uydu tabanlı evapotranspirasyon verisinin akım verisine en ideal nasıl dahil edileceğine dair net bir kıyasın yapılamadığı, belirsizliklerin devam ettiği ve bilimsel araştırmaların farklı stratejiler ve senaryolarla devam ettirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [31]. Ayrıca uydu tabanlı yayılı AET verisinin simülasyon başarısına dair çok güçlü doğrulamaların henüz alınmadığı, çok seyrek veya günlük ama yıl bazında kısa süreli akım gözlemleri ile uydu tabanlı AET verilerinin çoklu ve çok amaçlı birlikte kalibrasyonunun test edilmediği anlaşılmaktadır. Ölçümü kısıtlı bir havzada özellikle sınırlı sayıda akım gözleminin uzun süreli uydu bazlı AET ile birlikte kalibrasyonu bu yüzden önemli bir araştırma konusu olarak görülmüştür. Bu yüzden çalışmamızda kalibrasyon stratejileri kurgulanan altı farklı senaryoda test edilmiştir. AET nin kalibrasyon süreçlerinde kullanım potansiyelinin gösterildiği çalışmada SPAEF [20, 28, 29] gibi sadece harita desenine duyarlı diğer maddi hataya, yanlığa (bias) duyarlı bir metrik kullanılarak mekansal benzeşim sağlanmış ve havzanın fiziki gerçekliği önceliklendirilmiştir. Böylelikle ölçüm yapılmamış ya da yetersiz kayıtlara sahip havzalarda üstelik havzanın tamamında uydu tabanlı alansal yayılı veriler kullanmak sureti ile hidrolojik benzeşim başarısının sağlanması hedeflenmiştir. Bu çalışma karasal verilerin yetersizliği durumunda uydu tabanlı yayılı AET verilerinin hidrolojik model kalibrasyonuna en ideal nasıl dahil edilebileceğini göstermiştir. Ücretsiz MODIS (MOD16) ürünü buharlaşma verilerinin çok kısıtlı imkanlarla sınırlı sayıda akım verisi ile dahi desteklendiği takdirde akım ve buharlaşma simülasyon



başarısının ne denli yükselebileceği bu çalışmanın dikkat çekici yanıdır. Buna rağmen, gerçek evapotranspirasyon (AET)dışında hidrolojik çevrimin nehir debisinden ayrı gözlemi yapılabilen diğer parçaları (yer altı suyu, toprak nemi vb.) kalibrasyon deneylerinin dışında kalmıştır. Aynı şekilde simülasyonların gözlem verileri ile değerlendirilmesinde dahil edilmemiştir. Bu yönü ile çalışma ileriki çalışmalarla ve yeni kalibrasyon deneyleri ile desteklenmeye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca ölçüm kısıtını örneklendiren daha fazla sayıda senaryo ile yeni kalibrasyon deneylerinin yapılması, özellikle kısıtlı sayıda akım verisi ile kalibrasyon potansiyelinin daha güçlü izah edilmesi gerekmektedir. Araştırmacılar için uydu tabanlı verilerin karasal verilere dahilini konu alan kalibrasyon deneyleri hala yüksek bir potansiyel barındırmaktadır.

## **7. SONUÇ**

Bu çalışmada hidrolojik model kalibrasyonuna MODIS gerçek evapotranspirasyon (AET) ve yaprak alanı endeksi (LAI) ürünlerinin etkileri araştırılmıştır. Bu amaca yönelik veri kalitesi yüksek bir havzada 6 farklı sentetik senaryo kurulmuştur. Özellikle ölçümü olmayan havzalar ve verilerin yetersizliği durumlarına yönelik çıkarımlarda bulunulmaya çalışılmıştır. Uydu tabanlı AET ve LAI haritalarının model kalibrasyonuna en ideal nasıl entegre edilebileceğini ve içerdiği potansiyeller kıyaslamalarla gösterilmiştir. Ayrıca validasyon yapılarak simülasyonların güvenilirliği sağlanmıştır.

Tam yayılı fizik tabanlı hidrolojik modelin (mHM) debiye dayalı geleneksel yaklaşım dışında da kalibre edilebileceği gösterilmiştir. Hidrolojik modelci fizik tabanlı model seçtiyse amacı sadece su dengesi değildir. Böylesi basit bir amaç için yayılı modele gerek yoktur. Böylesi kapsamlı modellerin başka yetenekleri de uygun amaç fonksiyonları ile sorgulanmalıdır. Su dengesinin yanında modelin diğer akı çıktılarının da fiziğe uygun performans sergilemeleri beklenir. Sonuçlarımız AGİ, MOD16-AET ve LAI'nin birlikte kullanıldığı çoklu kalibrasyon stratejisiyle hem su dengesinin hem de model fiziğinin havzanın her noktasında iyileştiğini göstermiştir. Üstelik bunun sınırlı sayıda gözlemlerle dahi mümkün olduğu anlaşılmıştır.

Gözlemi olmayan havzalarda sadece AET verisi ile ancak havzanın AET simülasyonları iyileşirken akım benzeşimleri kabul edilebilir seviyelerin altında kalmaktadır. Sadece 12 akım değeri su dengesi için yeterlidir. Böylelikle kullanıcılar ellerinde uydu tabanlı buharlaşma ve LAI verileri ile kısıtlı imkanlarla yönetilen bir havzada kısa süreli de olsa bir AGİ kurdukları takdirde akım ve AET performansına ulaşabileceklerdir. Bu bulgu, gelişen ülkeler için ve ölçümü kısa havzalar için ümit verici bir potansiyeldir.

Sonraki çalışmamızda NASA'nın GLDAS (Global Land Data Assimilation System) ve Avrupa'dan ERA5 yeniden analiz ürünü [55] yüzeysel akış verileri model kalibrasyon çalışmalarımıza dahil edilecektir. Akış haritalarının ötelemeden sonraki hali nehir debisidir ve elimizde gözlenen debiler mevcutken böylesi verilerin kalibrasyona nasıl yön vereceği önemli bir araştırma sorusudur.

## **Veri Kullanılabilirlik Bildirimi**

Tüm veri kaynakları Tablo 2'de listelenmiştir. Vienne havza modeli kurulum verileri, Leipzig, Almanya'daki UFZ'den Dr. Oldrich Rakovec tarafından sağlanmıştır [39]. MODIS

aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) haritaları Danimarka Jeolojik Araştırma Kurumu'ndan (GEUS) SPACE projesi kapsamında Dr Julian Koch tarafından hazırlanmıştır. Veri lisansı kısıtlamaları nedeniyle, gözlemlenen coğrafî, hidrolojik ve meteorolojik veriler yazarlardan yeniden dağıtılamaz, ancak ilgili kuruluşlar ve/veya talep üzerine Almanya'nın Leipzig kentindeki UFZ' den model kalibrasyon sonuçlarının iletileceği tahhatü üzerine ilgili yazardan alınabilir. mHM'nin kaynak kodu, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4575390> adresinde herkese açıktır.

## **Teşekkür**

Yazarlar Türkiye Ulusal Yüksek Performanslı Hesaplama Merkezine (UHeM) 1007292019 ve 4008242020 numaralı destekler için teşekkür eder. Yine yazarlar, Danimarka Villum Fonu'nun (<http://villumfonden.dk/>) SPACE projesine Genç Araştırmacı Programının sağladığı VKR023443 numaralı destek için teşekkür eder. İkinci yazar (MCD) TÜBİTAK 121Y585 ve 118C020 numaralı projeleriyle desteklenmiştir. Tüm MODIS verileri, "NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, Güney Dakota, [https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access/data\\_pool.](https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool.)" izniyle çevrimiçi veri havuzundan alınmıştır. Yaprak alan indeksi ile PET düzeltmesi yapabilen dinamik ölçekleme fonksiyonu mHM sürüm 5.8 ve sonrasındaki yeni versiyonlarda mevcuttur ([www.ufz.de/mhm/](http://www.ufz.de/mhm/)). Spatial Efficiency (SPAEF) için R, Python ve Matlab betikleri örnekleriyle birlikte SPACE projesi web sitesinde (<http://www.space.geus.dk/>) ve Researchgate sunucularında [28] mevcuttur.

## **Semboller**

AET	: Gerçek Evapotranspirasyon
AGİ	: Akım Gözlem İstasyonu
aLH	: Ortalama Gizli Isı (Average Latent Heat )
DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model)
ET	: Evapotranspirasyon
ETref	: Referans Evapotranspirasyon
LAI	: Yaprak Alan İndeksi (Leaf Area Index )
LST	: Kara Yüzey Sıcaklığı (Land Surface Temperature)
P	: Yağış
Q	: Debi
r	: Pearson Korelasyon Katsayısı
Tavg	: Ortalama Hava Sıcaklığı
$\alpha$	: Simülasyon Ortalamasının Gözlemlenen Ortalamaya Oranı
$\beta$	: Simülasyon Standart Sapmasının Gözlemlenen Standart Sapmaya Oranı

### Kaynaklar

- [1] K. K. Yilmaz, J. A. Vrugt, H. V. Gupta, ve S. Sorooshian, “MODEL CALIBRATION IN WATERSHED HYDROLOGY”, içinde *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*, WORLD SCIENTIFIC, 2010, ss. 53–105.
- [2] S. Wi, Y. C. E. Yang, S. Steinschneider, A. Khalil, ve C. M. Brown, “Calibration approaches for distributed hydrologic models in poorly gaged basins: Implication for streamflow projections under climate change”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 19, sayı 2, ss. 857–876, Şub. 2015, doi: 10.5194/hess-19-857-2015.
- [3] A. Kunnath-Poovakka, D. Ryu, T. I. Eldho, ve B. George, “Parameter Uncertainty of a Hydrologic Model Calibrated with Remotely Sensed Evapotranspiration and Soil Moisture”, *J. Hydrol. Eng.*, c. 26, sayı 3, s. 04020070, Mar. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002055.
- [4] C. Corbari ve M. Mancini, “Calibration and Validation of a Distributed Energy–Water Balance Model Using Satellite Data of Land Surface Temperature and Ground Discharge Measurements”, *J. Hydrometeorol.*, c. 15, sayı 1, ss. 376–392, Şub. 2014, doi: 10.1175/JHM-D-12-0173.1.
- [5] L. Zhang, Y. Zhao, Q. Ma, P. Wang, Y. Ge, ve W. Yu, “A parallel computing-based and spatially stepwise strategy for constraining a semi-distributed hydrological model with streamflow observations and satellite-based evapotranspiration”, *J. Hydrol.*, c. 599, s. 126359, Ağu. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126359.
- [6] B. BULUT ve M. T. YILMAZ, “Türkiye’deki 2007 ve 2013 Yılı Kuraklıklarının NOAA Hidrolojik Modeli ile İncelenmesi”, *İMO Tek. Dergi*, c. 27, sayı 4, ss. 7619–7634, 2016, Erişim: May. 21, 2022. [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/28142/299116>.
- [7] K. K. Yilmaz, H. V. Gupta, ve T. Wagener, “A multi-criteria penalty function approach for evaluating a priori model parameter estimates”, *J. Hydrol.*, c. 525, ss. 165–177, Haz. 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.012.
- [8] F. Yassin, S. Razavi, H. Wheeler, G. Sapriza-Azuri, B. Davison, ve A. Pietroniro, “Enhanced identification of a hydrologic model using streamflow and satellite water storage data: A multicriteria sensitivity analysis and optimization approach”, *Hydrol. Process.*, c. 31, sayı 19, ss. 3320–3333, Eyl. 2017, doi: 10.1002/hyp.11267.
- [9] R. Becker, A. Koppa, S. Schulz, M. Usman, T. aus der Beek, ve C. Schüth, “Spatially distributed model calibration of a highly managed hydrological system using remote sensing-derived ET data”, *J. Hydrol.*, c. 577, sayı 10, s. 123944, Eki. 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.123944.
- [10] T. H. M. Rientjes, L. P. Muthuwatta, M. G. Bos, M. J. Booij, ve H. A. Bhatti, “Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration”, *J. Hydrol.*, c. 505, ss. 276–290, Kas. 2013, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.006.

- [11] J. Koch, K. H. Jensen, ve S. Stisen, “Toward a true spatial model evaluation in distributed hydrological modeling: Kappa statistics, Fuzzy theory, and EOF-analysis benchmarked by the human perception and evaluated against a modeling case study”, *Water Resour. Res.*, c. 51, sayı 2, ss. 1225–1246, şub. 2015, doi: 10.1002/2014WR016607.
- [12] M. Dembélé, M. Hrachowitz, H. H. G. Savenije, G. Mariéthoz, ve B. Schaeffli, “Improving the Predictive Skill of a Distributed Hydrological Model by Calibration on Spatial Patterns With Multiple Satellite Data Sets”, *Water Resour. Res.*, c. 56, sayı 1, Oca. 2020, doi: 10.1029/2019WR026085.
- [13] F. DİKBAş, “Büyük Menderes Akımlarının Frekans Tabanlı Tahmini”, *İMO Tek. Dergi*, c. 27, sayı 1, ss. 7325–7343, 2016, Erişim: May. 21, 2022. [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/28137/298971>.
- [14] A. A. şorman, A. şensoy, A. E. Tekeli, A. Ü. şorman, ve Z. Akyürek, “Modelling and forecasting snowmelt runoff process using the HBV model in the eastern part of Turkey”, *Hydrol. Process.*, c. 23, sayı 7, ss. 1031–1040, Mar. 2009, doi: 10.1002/hyp.7204.
- [15] S. Stisen, M. F. McCabe, J. C. Refsgaard, S. Lerer, ve M. B. Butts, “Model parameter analysis using remotely sensed pattern information in a multi-constraint framework”, *J. Hydrol.*, c. 409, sayı 1–2, ss. 337–349, Eki. 2011, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.030.
- [16] M. Soltani, E. Bjerre, J. Koch, ve S. Stisen, “Integrating remote sensing data in optimization of a national water resources model to improve the spatial pattern performance of evapotranspiration”, *J. Hydrol.*, c. 603, s. 127026, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127026.
- [17] B. Bulut vd., “Evaluation of Remotely-Sensed and Model-Based Soil Moisture Products According to Different Soil Type, Vegetation Cover and Climate Regime Using Station-Based Observations over Turkey”, *Remote Sens.*, c. 11, sayı 16, s. 1875, Ağu. 2019, doi: 10.3390/rs11161875.
- [18] M. E. KESKİN ve E. D. TAYLAN, “Orta Akdeniz Havzasındaki Akımların Stokastik Modellemesi”, *İMO Tek. Dergi*, c. 18, sayı 89, ss. 4271–4291, 2007, Erişim: May. 21, 2022. [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/12769/155280>.
- [19] J. Koch, G. Mendiguren, G. Mariéthoz, ve S. Stisen, “Spatial Sensitivity Analysis of Simulated Land Surface Patterns in a Catchment Model Using a Set of Innovative Spatial Performance Metrics”, *J. Hydrometeorol.*, c. 18, sayı 4, ss. 1121–1142, Nis. 2017, doi: 10.1175/JHM-D-16-0148.1.
- [20] M. C. Demirel, J. Mai, G. Mendiguren, J. Koch, L. Samaniego, ve S. Stisen, “Combining satellite data and appropriate objective functions for improved spatial pattern performance of a distributed hydrologic model”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 22, sayı 2, ss. 1299–1315, şub. 2018, doi: 10.5194/hess-22-1299-2018.
- [21] R. S. S. Gaur, B. Singh, A. Bandyopadhyay, S. Stisen, “Spatial pattern-based performance evaluation and uncertainty analysis of a distributed hydrological model”, *Hydrol. Process.*, c. 0, sayı e14586, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.14586>.

- [22] L. Jiang, H. Wu, J. Tao, J. S. Kimball, L. Alfieri, ve X. Chen, “Satellite-Based Evapotranspiration in Hydrological Model Calibration”, *Remote Sens.*, c. 12, sayı 3, s. 428, Oca. 2020, doi: 10.3390/rs12030428.
- [23] S. Kim, H. Ajami, ve A. Sharma, “Using Remotely Sensed Information to Improve Vegetation Parameterization in a Semi-Distributed Hydrological Model (SMART) for Upland Catchments in Australia”, *Remote Sens.*, c. 12, sayı 18, s. 3051, Eyl. 2020, doi: 10.3390/rs12183051.
- [24] M. Dembélé, B. Schaeffli, N. van de Giesen, ve G. Mariéthoz, “Suitability of 17 rainfall and temperature gridded datasets for largescale hydrological modelling in West Africa”, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, sayı April, ss. 1–39, 2020, doi: 10.5194/hess-2020-68.
- [25] Q. Huang vd., “Using Remote Sensing Data-Based Hydrological Model Calibrations for Predicting Runoff in Ungauged or Poorly Gauged Catchments”, *Water Resour. Res.*, c. 56, sayı 8, Ağu. 2020, doi: 10.1029/2020WR028205.
- [26] Y. Zhang, F. H. S. Chiew, L. Zhang, ve H. Li, “Use of Remotely Sensed Actual Evapotranspiration to Improve Rainfall–Runoff Modeling in Southeast Australia”, *J. Hydrometeorol.*, c. 10, sayı 4, ss. 969–980, Ağu. 2009, doi: 10.1175/2009JHM1061.1.
- [27] T. Poméon, B. Diekkrüger, A. Springer, J. Kusche, ve A. Eicker, “Multi-Objective Validation of SWAT for Sparsely-Gauged West African River Basins—A Remote Sensing Approach”, *Water*, c. 10, sayı 4, s. 451, Nis. 2018, doi: 10.3390/w10040451.
- [28] J. Koch, M. C. Demirel, ve S. Stisen, “The SPATial EFFiciency metric (SPAEF): multiple-component evaluation of spatial patterns for optimization of hydrological models”, *Geosci. Model Dev.*, c. 11, sayı 5, ss. 1873–1886, May. 2018, doi: 10.5194/gmd-11-1873-2018.
- [29] M. Demirel, J. Koch, G. Mendiguren, ve S. Stisen, “Spatial Pattern Oriented Multicriteria Sensitivity Analysis of a Distributed Hydrologic Model”, *Water*, c. 10, sayı 9, s. 1188, Eyl. 2018, doi: 10.3390/w10091188.
- [30] M. R. Herman vd., “Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability”, *J. Hydrol.*, c. 556, sayı 1, ss. 39–49, Oca. 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.009.
- [31] A. Rajib, G. R. Evenson, H. E. Golden, ve C. R. Lane, “Hydrologic model predictability improves with spatially explicit calibration using remotely sensed evapotranspiration and biophysical parameters”, *J. Hydrol.*, c. 567, sayı 12, ss. 668–683, Ara. 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.024.
- [32] T. Roy, H. V. Gupta, A. Serrat-Capdevila, ve J. B. Valdes, “Using satellite-based evapotranspiration estimates to improve the structure of a simple conceptual rainfall–runoff model”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 21, sayı 2, ss. 879–896, Şub. 2017, doi: 10.5194/hess-21-879-2017.
- [33] A. E. Odusanya vd., “Multi-site calibration and validation of SWAT with satellite-based evapotranspiration in a data-sparse catchment in southwestern Nigeria”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 23, sayı 2, ss. 1113–1144, 2019, doi: 10.5194/hess-23-1113-2019.

- [34] Q. Mu, M. Zhao, ve S. W. Running, “Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm”, *Remote Sens. Environ.*, c. 115, sayı 8, ss. 1781–1800, Ağu. 2011, doi: 10.1016/j.rse.2011.02.019.
- [35] R. Kumar, L. Samaniego, ve S. Attinger, “Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations”, *Water Resour. Res.*, c. 49, sayı 1, ss. 360–379, Oca. 2013, doi: 10.1029/2012WR012195.
- [36] Samaniego vd., “mesoscale Hydrologic Model - mHM v5.11.1”. Leipzig, Şub. 2021, doi: 10.5281/ZENODO.4462822.
- [37] T. Poméon, B. Dieckrüger, ve R. Kumar, “Computationally Efficient Multivariate Calibration and Validation of a Grid-Based Hydrologic Model in Sparsely Gauged West African River Basins”, *Water*, c. 10, sayı 10, s. 1418, Eki. 2018, doi: 10.3390/w10101418.
- [38] M. R. Haylock, N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, ve M. New, “A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006”, *J. Geophys. Res.*, c. 113, sayı D20, s. D20119, Eki. 2008, doi: 10.1029/2008JD010201.
- [39] O. Rakovec, R. Kumar, S. Attinger, ve L. Samaniego, “Improving the realism of hydrologic model functioning through multivariate parameter estimation”, *Water Resour. Res.*, c. 52, sayı 10, ss. 7779–7792, 2016, doi: 10.1002/2016WR019430.
- [40] R. C. Cornes, G. van der Schrier, E. J. M. van den Besselaar, ve P. D. Jones, “An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, c. 123, sayı 17, ss. 9391–9409, Eyl. 2018, doi: 10.1029/2017JD028200.
- [41] George H. Hargreaves ve Zohrab A. Samani, “Reference Crop Evapotranspiration from Temperature”, *Appl. Eng. Agric.*, c. 1, sayı 2, ss. 96–99, 1985, doi: 10.13031/2013.26773.
- [42] C. Willmott ve K. Matsuura, “Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance”, *Clim. Res.*, c. 30, ss. 79–82, 2005, doi: 10.3354/cr030079.
- [43] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, ve G. F. Martinez, “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling”, *J. Hydrol.*, c. 377, sayı 1–2, ss. 80–91, Eki. 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- [44] J. Doherty, *Model-Independent Parameter Estimation(Part I)*, 6. baskı. Watermark Numerical Computing, 2016.
- [45] L. S. Matott, “OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User’s Guide”. Ara. 17, 2004, Erişim: Ara. 28, 2020. [Çevrimiçi]. Available at: <https://github.com/usbr/ostrich>.
- [46] L. Shawn Matott, “OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User’s Guide, Version 17.12.19.” University at Buffalo Center for Computational Research, Buffalo, s. 79, 2017, [Çevrimiçi]. Available at: <http://www.civil.uwaterloo.ca/envmodelling/Ostrich.html>.

- [47] M. T. Yılmaz *vd.*, “Comparison of prognostic and diagnostic surface flux modeling approaches over the Nile River basin”, *Water Resour. Res.*, c. 50, sayı 1, ss. 386–408, Oca. 2014, doi: 10.1002/2013WR014194.
- [48] M. Dembélé, N. Ceperley, S. J. Zwart, E. Salvatore, G. Mariethoz, ve B. Schaeffli, “Potential of satellite and reanalysis evaporation datasets for hydrological modelling under various model calibration strategies”, *Adv. Water Resour.*, c. 143, s. 103667, Eyl. 2020, doi: 10.1016/j.advwatres.2020.103667.
- [49] A. A. Sorman, E. Tas, ve Y. O. Dogan, “Comparison of hydrological models in upper Aras Basin”, *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, c. 26, sayı 6, ss. 1015–1022, 2020, doi: 10.5505/pajes.2019.98852.
- [50] G. Uysal, A. Şensoy, ve A. A. Şorman, “Improving daily streamflow forecasts in mountainous Upper Euphrates basin by multi-layer perceptron model with satellite snow products”, *J. Hydrol.*, c. 543, sayı October, ss. 630–650, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.037.
- [51] A. E. Tekeli, Z. Akyürek, A. Arda Şorman, A. Şensoy, ve A. Ünal Şorman, “Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey”, *Remote Sens. Environ.*, c. 97, sayı 2, ss. 216–230, Tem. 2005, doi: 10.1016/j.rse.2005.03.013.
- [52] A. Şensoy, A. A. Şorman, A. E. Tekeli, A. Ü. Şorman, ve D. C. Garen, “Point-scale energy and mass balance snowpack simulations in the upper Karasu basin, Turkey”, *Hydrol. Process.*, c. 20, sayı 4, ss. 899–922, Mar. 2006, doi: 10.1002/hyp.6120.
- [53] A. Şensoy ve G. Uysal, “The Value of Snow Depletion Forecasting Methods Towards Operational Snowmelt Runoff Estimation Using MODIS and Numerical Weather Prediction Data”, *Water Resour. Manag.*, c. 26, sayı 12, ss. 3415–3440, Eyl. 2012, doi: 10.1007/s11269-012-0079-0.
- [54] I. Yucel, A. Onen, K. K. Yilmaz, ve D. J. Gochis, “Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall”, *J. Hydrol.*, c. 523, ss. 49–66, Nis. 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.042.
- [55] M. Tarek, F. P. Brissette, ve R. Arsenault, “Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 24, sayı 5, ss. 2527–2544, May. 2020, doi: 10.5194/hess-24-2527-2020.

