Turkish Journal of Civil Engineering, 2025, 67-88, Yazı 810, ***Araştırma Makalesi***

Budyko Eğrisinin Uzun Vadeli Havza Planlama Çalışmalarında Su Bütçesi Hesabı için Kullanılması

Yonca ÇAVUŞ[1]

ÖZ

Budyko eğrisi Hidrolojide su bütçesi hesabında kullanılan bir yöntemdir. Eğri, buharlaşma oranı ile kuruluk indeksi arasındaki doğrusal olmayan bir ilişkiden oluşur ve evapotranspirasyonun su ve enerji kaynaklı sınırlarını tanımlar. Kuruluk indeksinin uzun dönemde buharlaşma oranında bir değişimi tetiklemesi havzanın Budyko eğrisine uyumunda değişim beklenir. Bu çalışmada, aylık yağış-akış ilişkisi kullanılmak suretiyle Budyko eğrisine dayanan bir su bütçesi yaklaşımı önerilmiştir. Gerçek evapotranspirasyon, uzun dönemde havza su depolamasında bir değişim olmayacağı kabulü altında akım ve yağış arasındaki fark olarak alınmış, potansiyel evapotranspirasyon ise Thornthwaite yöntemi ile hesaplanmıştır. Uygulama için Küçük Menderes nehir havzası seçilmiş; havzanın memba ve mansabında bulunan iki meteoroloji ve iki akım gözlem istasyonunun aylık toplam yağış, aylık ortalama sıcaklık ve aylık ortalama debi verileri kullanılmıştır. Türkiye'den bir akarsu havzasının Budyko çerçevesine uyumu ilk kez bu çalışma kapsamında incelenmiş; sonuçlar, Küçük Menderes havzasının genel olarak Budyko eğrisine uyduğunu göstermiştir. Küçük Menderes nehir havzası örneğinden hareketle Budyko eğrisinin su kaynaklarının planlanması ve yönetiminde su bütçesi hesabı için kullanılabilir pratik bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Budyko eğrisi, gerçek evapotranspirasyon, Küçük Menderes havzası, potansiyel evapotranspirasyon, su bütçesi, Thornthwaite yöntemi.

ABSTRACT

Using the Budyko Curve for Water Budget Calculation in Long-term Basin Planning Studies

The Budyko curve is a method used in water budget calculation in hydrology. The curve consists of a nonlinear relationship between the evaporation rate and the aridity index and it defines the water and energy-based limits of evapotranspiration. A change in the evaporation rate of the aridity index is expected to trigger a change in the compliance of the basin to the

Not: Bu yazı
- Yayın Kurulu'na 18 Eylül 2024 günü ulaşmıştır. 24 Şubat 2025 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2025 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• https://doi.org/10.18400/tjce.1552201

1 İstanbul Beykent Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
yoncacavus@beykent.edu.tr - https://orcid.org/0000-0002-0528-284X

Budyko curve in the long term. In this study, a water budget approach based on the Budyko curve is proposed by conisdering the monthly rainfall-runoff relation. Actual evapotranspiration is taken as the difference between streamflow and precipitation under the assumption that there will be no change in the basin water storage in the long term, and potential evapotranspiration is calculated by the Thornthwaite method. The Küçük Menderes river basin was selected for the application. The monthly total precipitation, monthly average temperature and monthly average streamflow data of two meteorology and two streamflow gauging stations located in the upstream and downstream of the basin were used. The compliance of a river basin from Türkiye to the Budyko framework was examined for the first time within the scope of this study. The results show that the Küçük Menderes basin generally complies with the Budyko curve. Based on the Küçük Menderes river basin case study, it has been understood that the Budyko curve is a practical method in calculating water budget for water resources planning and management.

Keywords: Actual evapotranspiration, Budyko curve, Küçük Menderes basin, potential evapotranspiration, water budget, Thornthwaite method.

1. GİRİŞ

İnsanların su kaynaklarına erişebilmesi suyun yeterli miktar ve kalitede olmasını gerektirir. Suya erişimin sürdürülebilirliği, suyun sonsuz bir doğal kaynak olmadığı, tersine tükenir bir kaynak olduğu gerçeğinin anlaşılması ile mümkündür. Bu nedenle, su kaynaklarının planlanması ve yönetimi faaliyetleri birçok paydaşı bulunan bir organizasyonu gerektirmektedir. Suyun beşeri, sosyal, hukuksal ve ekonomik etkileri de göz önüne alındığında bunun kolay bir organizasyon olmadığı görülmektedir. Bu organizasyon ancak uzun erimli su politikaları ve yatırım planları ile sağlanabilir. Bunun için su kaynaklarını planlama ve politika geliştirme çabalarına katkı sağlamak üzere su bütçesi hesabının yapılması önemli ve gereklidir. Su bütçesi, bir bölgedeki su kaynaklarının su ihtiyaçları ile karşılaştırılması ve arz-talep arasındaki şimdiki ve gelecekteki dengenin kurulması esasına dayanır. Bu bütçe havzanın yağış-akış ilişkisine bağlıdır. Yani havzanın, üzerine düşen yağışın ne kadarını ne şekilde (ne kadar kayıp ile) havza çıkışına ulaştırdığına dair bir problemdir. Bu, iklim ve havza karakteristiklerine bağlı doğrusal olmayan ve zaman-mekân bakımından karmaşık bir süreçtir.

Sürecinin karmaşık olması su bütçesi hesabı için zor yöntemlerin kullanılmasını gerektirmez. Tersine yöntemin basit olması özellikle uygulama bakımından gerekli ve önemlidir. Bu amaçla kullanılabilecek nitelikte basit bir yöntem sunan Budyko [1], uzun dönem ortalama havza su bütçesini havza iklimi ile ilişkilendirmiş, uzun dönem gerçek evapotranspirasyonun ve akımın havza üzerine düşen yağış ve potansiyel evapotranspirasyondan elde edilebileceğini göstermiştir. Bunu yaparken havza depolama sisteminde uzun dönemde bir değişim olmayacağını varsaymış, böylece kendi adıyla bilinen Budyko eğrisini geliştirmiştir. Budyko eğrisi, herhangi bir parametre kullanmadan sadece kolayca bulunabilen yağış ve ampirik olarak hesaplanabilen potansiyel evapotranspirasyon verilerini kullanarak dünyadaki herhangi bir nehir havzası için ortalama akımı tahmin edebilir.

Budyko eğrisi, Batı dünyasına tanıtıldığından beri [2] dünya çapında çok sayıda ampirik, teorik ve süreç temelli çalışmaların konusu olmuş; literatürde farklı şekillerde yorumlanmış ve çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Yang vd. [3], Budyko hipotezini gerçek ve potansiyel

evapotranspirasyon arasındaki ilişkiyi içeren Bouchet hipotezine [4] bağlamıştır. Gerrits vd. [5] uydu veri kaynaklarından elde edilen depolama ve yağış verisi ile ilgili ölçülebilir parametreleri birleştirerek terleme ve tutmayı basit bir şekilde modellemiş ve Budyko eğrisini analitik olarak türetmiştir. Budyko eğrisinin kullanımının geniş bir yelpazeye sahip olduğunu göstermesi bakımından termodinamikte kullanılan maksimum entropi üretim ilkesine göre yorumlandığından da burada bahsedilebilir [6]. Budyko eğrisi uzun dönem su bütçesi için makul sonuçlar vermiş [5, 7, 8] ayrıca iklim değişikliğinin etkilerinin belirlenmesi [9] ve taşkın frekans analizi [10] gibi çeşitli pratik uygulamalarda önemli tahmin yeteneği sergilemiştir. Budyko eğrisi öncelikle, havzanın enerji ve su mevcudiyeti arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Su-enerji ilişkisi tabanlı basit kavramsal modellerin Budyko eğrisi ile elde edilen sonuçları ürettiği gösterilmiştir [2]. Böylelikle, Budyko eğrisinin kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

Havza alanı küçüldükçe detaylı mekansal analiz yapma imkanı ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde zaman aralığı küçüldükçe detaylı zamansal analiz yapılabilmektedir. Küçük havza alanları ve kısa zaman aralıklarında çalışıldığında yağış-akış ilişkisini etkileyen faktörler detaylı bir şekilde sürece dahil edilebilmektedir. Havzanın iklimi, toprak ve bitki örtüsü, topografya özellikleri ile ilgili faktörlerin büyük havzalarda ve yıl gibi uzun zaman aralıklarında kullanılması pratik olmaktan çıkmaktadır. Bunun yerine bu faktörlerin etkisini toplu bir şekilde hesaba katan, tercihen boyutsuz olan indeksler kullanılmaktadır. Budyko eğrisindeki kuruluk indeksi (E_p/P) bu türden bir örnektir ve havza iklimini temsil etmektedir [11]. Havzanın, belli dönemlerde (yıllarda) Budyko eğrisinin genel eğiliminden uzağa düşmesi genel olarak iklimdeki değişkenlik ile ilişkilidir. Ancak çevresel ve antropojenik faktörlerin (insan müdahalesinin) de süreci etkilediği bilinen bir gerçektir [12]. Yine de bu durum, iklimi uzun vadeli su bütçesinde birincil kontrol mekanizması olmaktan çıkarmaz. Çünkü, havzadaki arazi kullanımı ve bitki örtüsü iklime bağlı olarak değişmekte, bu değişim doğrudan ya da dolaylı olarak hidrolojik çevrimi etkilemekte, hidrolojik çevrimdeki değişim de havza yağış-akış ilişkisini belirlemektedir. Budyko eğrisi tüm bu değişimleri toplu bir şekilde gösterebilmektedir [13, 14]. Yani, kısa zaman aralıklarında ve küçük mekansal ölçeklerde akış ve buharlaşma süreçlerindeki bu detaylı etkileşim, uzun zaman aralıklarında ve büyük mekansal ölçeklerde Budyko eğrisi ile basit hale getirilmiştir [15].

Budyko eğrisini kullanan ve Türkiye'yi uygulama alanı olarak seçen çalışmalar kapsamında Nistor vd. [16], 21. yüzyılda Türkiye'de iklim değişimi altında su mevcudiyetinin değişimini incelemiştir. Unnisa vd. [17] geçmiş yıllarda tüm Akdeniz havzasında iklim değişimi kaynaklı su bütçesini incelemiş ve Avrupanın güneyi ile Türkiye ve Balkanların batısında son yıllarda gerçek evapotranspirasyonu etkileyen ve su sıkıntısını daha da önemli hale getiren değişimlere dikkat çekmiştir. Cevahir [18] ve Cevahir vd. [19] Budyko eğrisi yaklaşımı ile Kızılırmak havzasının su dengesi bakımından hassasiyetini ortaya koymuş, havzada ısınma ve kuruma kaynaklı su kaynaklarını yönetme zorlukları yaşanabileceğini vurgulamıştır. Türkiye ile ilgili olmakla birlikte bu çalışmalar yurtdışında yapılmıştır.

Sayıca az olmakla birlikte Budyko eğrisi ile ilgili Türkiye'de gerçekleştirilen çalışmalar da vardır [20-25]. Budyko eğrisinin doğrudan kullanımının söz konusu olmadığı bu çalışmaların ortak noktası, Budyko hipotezi çerçevesinde su bütçesi denklemini kullanan Dinamik Su Dengesi (*dynwbm*) adlı kavramsal modelin Türkiye havzaları üzerinde kullanılmış olmasıdır. Bunlardan Okkan vd. [20] ve Ersoy [21], bahsedilen hidrolojik modeli yapay sinir ağları ve destek vektör regresyonu makine öğrenmesi teknikleri ile harmanlayarak model

kalibrasyonunu otomatik hale getirmiştir. Yeni hali ile Gediz havzasında yapılan uygulama sonuçlarına göre ortalama ve yüksek akımların belirlenmesinde model önceki versiyonuna göre performans artışı göstermiştir. Diğer bir harmanlama çalışmasında Ersoy vd. [22], bu kez yapay sinir ağının (YSA) Dinamik Su Dengesi modeliyle birleştirilmesiyle elde edilen hibrit yağış-akış modelinde yeraltı suyu depolama parametreleri ortadan kaldırılmış; doğrudan akış ve derine sızma (perkolasyon) çıktıları YSA kısmına girdi olarak sunulmuştur. Bu şekli ile kavramsal modelin yapay sinir ağlarının güçlü yanları kullandığı ve dezavantajlarını göz ardı ettiği, bu sayede tahmin performansını arttırdığı yapılan uygulamalardan görülmüştür. Bu çalışma serisinde ayrıca Dinamik Su Bütçesi yağış-akış modeline doğrusal davranış gösteren yeraltı suyu depolama elemanı yerine destek vektör makinesi eklenerek beş parametreli hibrit bir model oluşturulmuş; hibrit model, kavramsal modele kıyasla kalibrasyon ve validasyon aşamalarında daha düşük hata vermiştir [23]. Yağış-akış modellerinin potansiyel evapotranspirasyon tahmininde kullanılan yöntemlere olan hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla Dinamik Su Bütçesi modelini kullanarak yaptıkları çalışmada Okkan vd. [24], sekiz küresel ölçekli iklim değişim modelini 11 farklı PET modeli ile birlikte kullanarak Gediz Havzasında incelemiştir. Bulgular, PET modeli seçiminin, hafif ve orta meteorolojik kuraklık sıklığına %5'i bulmayan bir belirsizlik kattığını, şiddetli meteorolojik kuraklık sıklığında ortaya çıkardığı belirsizliğin ise ancak %25 kadar olduğunu göstermiştir. Bunların yanı sıra, Dinamik Su Bütçesi yağış-akış modeli, Gediz havzasında yer alan Çağlayan Barajı'nın iklim değişikliği etkileri altında hazne işletme optimizasyonda kullanılmıştır [25]. Budyko çerçevesini esas alan havza modelinin uygulanmasından ibaret olan bu çalışmalarda uygulama yapılan havzanın öncelikle Budyko çerçevesine uyup uymadığı incelenmemiştir. Görüldüğü üzere, Türkiye akarsu havzalarının Budyko çerçevesine uyumu konusunda bir araştırma boşluğu mevcuttur. Bu araştırma boşluğunun Küçük Menderes havzası üzerinde yapılan uygulama ile bu çalışmada giderilmesi amaçlanmıştır.

Türkiye, olası bir kuraklık durumunda özellikle tarımsal alanların doğrudan etkileneceği bir iklim kuşağında bulunmaktadır. Bulunduğu iklim kuşağı nedeniyle yağıştaki yıl içi mevsimsel değişkenlik, şiddetli ve uzun süreli kuraklık ile birleştiğinde su potansiyelinin ve mevcut su biriktirme haznelerinin kapasitelerinin yeterli olmaması riski her daim vardır. Kuraklık nedeniyle ortaya çıkan kapasite eksikliği, izleyen sulama mevsiminde su eksikliği sorununu beraberinde getirmektedir. Bu yüzden, su bütçesi hesabı yapılırken su dengesinin hidrolojik koşullar bakımından tipik (ortalama) bir yıl için sağlanması yeterli değildir. Bu dengenin özellikle kurak yıl veya kuru dönemlerdeki talebi de karşılaması gereklidir. Bu hesap yapılırken, kullanılabilen tüm su kaynaklarının miktarı potansiyel su kaynağı olarak değerlendirilmeli ve her türlü su ihtiyacı göz önünde bulundurulmalıdır. Su bütçesinin ön görülebilmesi kuraklığa karşı alınacak önlemlerin yerindeliğini ve etkinliğini artıracaktır. Bu açıdan bakıldığında uygulanabilir basitlikte ancak etkin yöntemler kullanılarak uzun erimli su planlama ve yönetimi çalışmalarının yapılması ayrı bir önem kazanmaktadır. Buna göre, bu çalışmanın temel amacı basitliği ve uygulanabilirliği hesaba katılarak Budyko eğrisinin su bütçesi hesabında kullanılabilirliğinin araştırılması ve bu kapsamda Küçük Menderes akarsu havzasının Budyko eğrisine uyumunun incelenmesidir. Bu genel amacın altında kalmak üzere aşağıdaki araştırma sorularına cevap verecek şekilde özel incelemeler de yapılacaktır:

1) Küçük Menderes havzası Budyko eğrisine uyuyor mu?
2) Havzanın memba ve mansabının Budyko davranışı benzer mi?
3) Havza Budyko eğrisinden sapma gösteriyor mu? Herhangi bir sapma varsa nedenleri nelerdir?

2. YÖNTEM

2.1. Standart Budyko Eğrisi

Budyko eğrisi, atmosferik su kaynağı (yağış) ve su talebi (potansiyel evapotranspiration) arasındaki orana bağlı olarak yıllık ve daha uzun süreli su bütçesi hesabında yaygın olarak kullanılan bir fonksiyondur (Şekil 1). Herhangi bir parametre içermeyen bu fonksiyonun matematik ifadesi

$$\Psi = \sqrt{\phi \tanh(\frac{1}{\phi})(1 - \exp(-\phi))} \tag{1}$$

şeklindedir. Burada

$$\Psi = \frac{E}{P} \tag{2}$$

$$\phi = \frac{E_P}{P} \tag{3}$$

olup sırasıyla birim yağış başına düşen gerçek evapotranspirasyon (E/P) buharlaşma oranını, birim yağış başına düşen potansiyel evapotranspirasyon (E_p/P) de kuruluk indeksini temsil etmektedir. Budyko eğrisinde, yağış (P) mevcut suyun, potansiyel evapotranspirasyon (E_p) ise mevcut enerjinin bir ölçüsüdür. Havzanın konumuna göre değişen enerjinin miktarına bağlı olarak hesaplanan kuruluk indeksi Budyko eğrisi için temel nicelik büyüklüktür. Fonksiyon uçlarda enerji ve su kısıtına bağlı asimptotlara sahiptir. Budyko eğrisinin öncülü olan Schreiber [26] ve Ol'Dekop [27] fonksiyonları sırasıyla

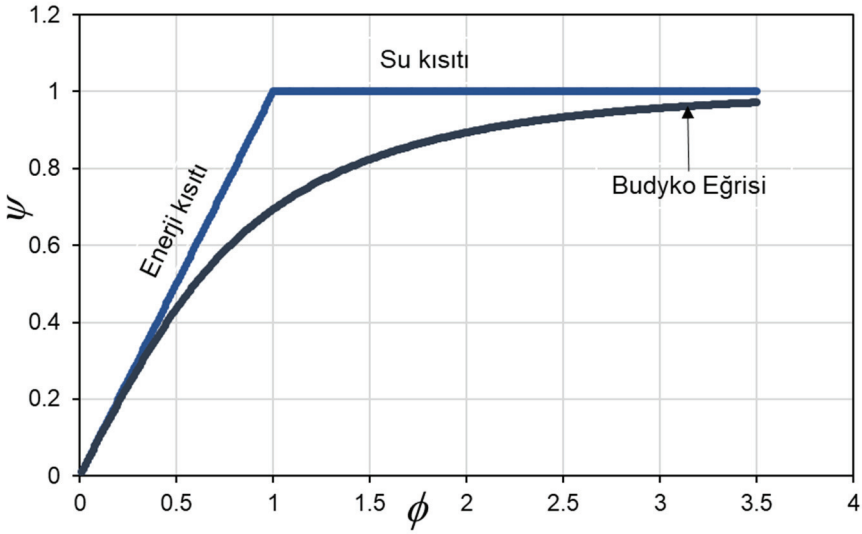
$$\Psi = 1 - \exp(-\phi) \tag{4}$$

$$\Psi = \phi \tanh(1/\phi) \tag{5}$$

şeklindedir. Budyko eğrisi aslında bu iki eğrinin geometrik ortalamasıdır.

Eski Sovyetler Birliği ve Avrupa'dan binin üzerindeki akarsu havzası için yapılan çalışmalar, akarsu havzalarının %90'ından fazlasının Budyko eğrisine uyduğunu göstermiş [28], bu performansı Budyko eğrisine önem kazandırmıştır. Budyko eğrisi basit bir arz-talep dengesi çerçevesinde kuruluk indeksinin bir fonksiyonu olarak gerçek evapotranspirasyonu hesaplamak için kullanılır. Dünyanın bazı bölgelerinde, gerçek evapotranspirasyon toplam yağışa yaklaşabilir. Bu, ancak toplam yağışı buharlaşma ve terleme ile kaybetmeye yetecek miktarda enerjinin mevcut olması halinde mümkündür. Su ve enerjinin mevcudiyeti her birindeki kısıtlara bağlı olarak Budyko eğrisini şekillendirir. Yeterli miktarda enerjinin

mevcut olmaması halinde gerçek evapotranspirasyon, Budyko eğrisinin enerji-kısıtlı kolunun altında kalır. Bu bölgeler genellikle nemli bölgelerdir. Buna göre, ikliminin kuruluğuna bağlı olarak bölgenin mevcut su ve mevcut enerjisi Budyko eğrisinde birer sınırlayıcı faktör olarak etkisini gösterir.



Şekil 1 - Budyko eğrisi ve kısıtları

Atmosferdeki su bütçesi çok sayıda bileşenden oluşur ve bu nedenle karmaşık bir yapıya sahiptir. Ancak bu karmaşıklık büyük mekansal ve uzun zamansal ölçeklerde önemli ölçüde basitleşir. Su bütçesi, en basit haliyle

$$\triangle S \ / \triangle t = P - E - Q \tag{6}$$

şeklinde yazılabilir. Daha önce tanımlanan değişkenlerin dışında burada, Q havza çıkışından komşu havzaya ya da su alıcı ortama (deniz, göl) yüzeysel akış şeklinde ulaşan akımdır. Denklemdeki $\triangle S/\triangle t$ ise havza su depolama sisteminde zaman içinde meydana gelen artma veya azalmadır. Müdahaleli olmayan veya ihmal edilebilir müdahale durumunda havza su depolamasında meydana gelecek artma ve azalma, yılları bulan uzun dönemlerde birbirini dengeler. Bundan hareketle, Denklem (6), $\triangle S = 0$ alındığında

$$P = E + Q \tag{7}$$

şeklini almaktadır. Bu basitleştirme ile Budyko eğrisi kullanım alanı bulmuştur.

Budyko eğrisi için gerekli olan potansiyel evapotranspirasyon hesabında kullanılan çok sayıda ampirik denklem vardır. Bu denklemler sıcaklık ya da radyasyon temelli formülasyonlara sahiptir. Sıcaklık temelli olanlardan yaygın şekilde kullanılanlarının en önemlileri Thornthwaite [29], Blaney ve Criddle [30] ve Hargreaves ve Samani [31]'dir.

Bunlardan Thornthwaite [29] tarafından önerilen ve kendi adıyla anılan yöntem, girdi olarak uygulama alanını temsil eden meteoroloji istasyonunun sadece aylık ortalama sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır. Bu verinin kolaylıkla temin edilebilmesinden dolayı Thornthwaite yöntemi özellikle yaygın kullanım alanı bulmuş, bu çalışmada da bu yöntemin kullanılması bu nedenle uygun görülmüştür. Thorntwaite yönteminin işlem adımları basit ve yaygın bir şekilde bilindiğinden burada ayrıca verilmemiştir.

Veri imkanlarına bağlı olarak Blaney ve Criddle [30] veya Hargreaves ve Samani [31] gibi aylık yöntemlerin de evapotranspirasyon hesabında kullanım potansiyelleri vardır. Ancak bu çalışmada Penman-Monteith yöntemi [32] gibi günlük zaman aralığında çalışan ve çok sayıda girdi verisi gerektiren radyasyon temelli yöntemlerin kullanılması, Budyko eğrisinin uzun döneme uygulanabilir olması nedeniyle gerekli görülmemiştir.

2.2. Parametrik Budyko Eğrisi (Fu Eğrisi)

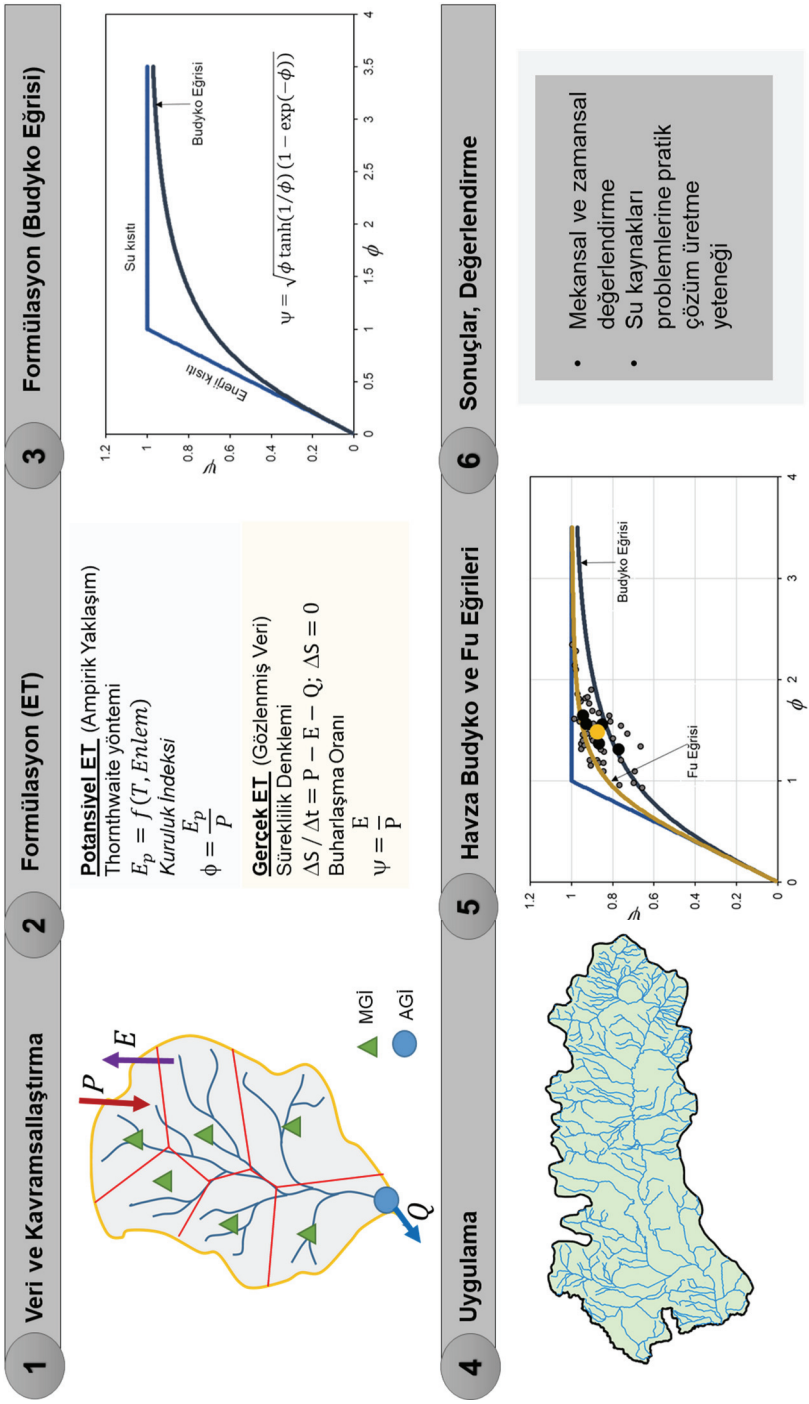
Budyko eğrisinin en önemli özelliği parametrik olmayan yapısıdır. Budyko eğrisi havzadan havzaya kalibrasyona ihtiyaç duymayan, formülasyonunda (Denklem 1) herhangi bir parametre içermeyen bir yapıya sahiptir. Bu nedenle genel geçerliliği vardır ve veri olarak sadece yağışı kullanması nedeniyle kolaylıkla uygulanabilir bir yöntemdir. Bu haliyle Budyko eğrisini bu çalışmada "Standart Budyko Eğrisi" olarak adlandırılmıştır. Budyko eğrisine alternatif oluşturmak üzere Fu [33] bir denklem geliştirmiştir. Fu eğrisi olarak bilinen bu denklem kalibre edilmesi gereken bir parametreye sahiptir. Bu aslında standart Budyko eğrisinin parametrik bir şeklidir. Fu eğrisi

$$\Psi = \frac{E}{P} = 1 + \phi - (1 + \phi^{\omega})^{1/\omega} \tag{8}$$

ile verilmiştir ve standart Budyko eğrisine en iyi ω = 2.6 alındığında yaklaşır [34]. Denklem, standart Budyko eğrisinden farklı olarak herhangi bir fiziksel anlamı olmayan boyutsuz ω serbest parametresini içermektedir. Her ne kadar doğrudan bir fiziksel anlam yüklenemese de denklem parametresinin havza karakteristikleri ile ilişkili olduğu söylenebilir.

2.3. Yöntemin Uygulanması

Şekil 2'de şematize edildiği üzere bu çalışma havza girdi (P) ve çıktılarının (E ve Q) dengesine dayanan Budyko eğrisi kavramını kullanmaktadır. Öncelikle havza çıkışındaki AGİ'nin havzayı temsil eden MGİ'lerin verilerinden yararlanarak potansiyel ve gerçek evapotranspirasyon değerleri aylık olarak hesaplanmaktadır. Aylık değerlerin yıllık toplam değerlere taşınması ile AGİ'nin temsil ettiği havzanın Budyko eğrisi elde edilmektedir. Bu yöntem Küçük Menderes nehir havzası üzerinde uygulanmış ve havza Budyko ve Fu eğrileri elde edilmiştir. Budyko eğrisinden sapma olması durumunda yıllık değerlere en iyi uyan Fu eğrisi belirlenmiş, eğrinin ω parametresi yıllık değerler ile eğri arasındaki hata minimum olacak şekilde elde edilmiştir. Kullanılan hata kriteri, ortalama karesel hatanın karekökü ($KOKH$) olup



Şekil 2 - Çalışma yönteminin adımları ve genel iş akış şeması

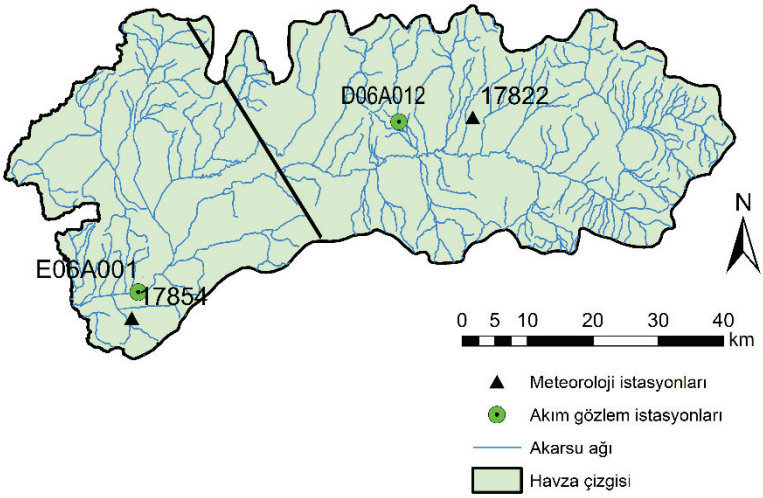
$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\widehat{\Psi}_i - \Psi_i)^2} \quad (9)$$

ile verilmektedir. Burada, $\widehat{\Psi}$ her bir yılın kuruluk indeksine (ϕ) karşı Denklem 8'den hesaplanan Fu eğrisi üzerindeki buharlaşma oranıdır. Ψ süreklilik denkleminden (Denklem 7) hesaplanan gözlenmiş buharlaşma oranıdır. n de gözlem periyodundaki yıl sayısını göstermektedir. Uygulamadan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek çalışmanın akışı tamamlanmıştır.

3. UYGULAMA ALANI VE VERİ

3.1. Küçük Menderes Nehir Havzası

Küçük Menderes Nehir Havzası, Türkiye'nin batısında Ege bölgesinde yer almaktadır (Şekil 3). Havzaya adını veren Küçük Menderes 140 km uzunluğundadır. Havza drenaj alanı 3255.2 km^2'dir. Nehir havzası tipik Akdeniz iklim karakteristiklerini sergilemektedir. Havzanın uzun dönem ortalama yıllık yağışı 622 mm, havzanın çıkışında 1960-2011 yılları arasında ölçülen yıllık ortalama akım ise 9.2 m^3/s (89.13 mm)'dir. Havzanın %41'i tarımsal alanlarla kaplıdır ve bu alanın %52'si sulanabilmektedir. Havzanın geri kalan kısmı sulak alanlar ve rezervlerle birlikte kentsel bölgelerden oluşmaktadır.



Şekil 3 - Küçük Menderes nehir havzası sınırları ve kullanılan meteoroloji ve akım gözlem istasyonlarının havzadaki konumları. Havza haritası üzerindeki siyah çizgi, meteoroloji istasyonlarının etki alanlarını belirleyen Thiessen çokgeni çizgisidir.

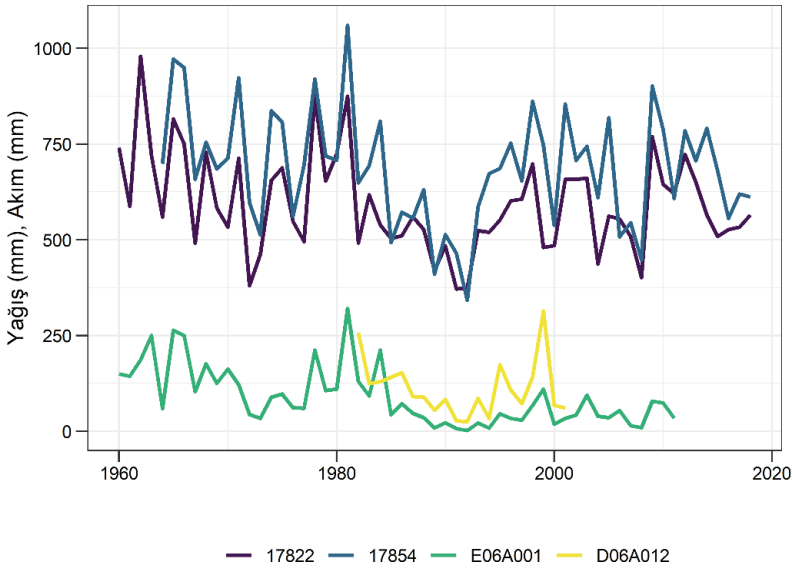
3.2. Kullanılan Veri

Memba ve mansabını temsil edecek ve yeterli veri uzunluğuna sahip iki MGİ ve iki AGİ seçilmiştir (Tablo 1). Memba için D06A012 kodlu Bülbüller AGİ ve 17822 kodlu Ödemiş

MGİ seçilmiştir. Havzanın mansabındaki akım, E06A001 kodlu Selçuk AGİ ile temsil edilmiş; yağış için 17854 kodlu Selçuk MGİ yanında Ödemiş MGİ de alınmış; her bir MGİ'nin etki alanı Thiessen çokgeni ile belirlenmiştir. MGİ'ler nispeten uzun kayıtlara sahiptir (59 ve 55 yıl). Yağışsız ayların oranı Ödemiş ve Selçuk meteoroloji istasyonlarında sırasıyla %12.2 ve %17.7'dir. MGİ'lerin ortalama sıcaklıkları arasında belirgin bir fark yoktur. Yağış, mansap istasyonunda memba istasyonuna göre daha yüksektir. Membayı temsil etmek üzere seçilen Bülbüller AGİ'sinin nispeten kısa olan veri uzunluğunun yanında mansaptaki Selçuk AGİ'si yeterli gözlem uzunluğuna sahiptir. Seçilen AGİ'lerin neredeyse doğal akım koşullarına sahip olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Bu nedenle membada yapılan su yapıları hesaba katılarak her iki istasyonun da son yıllarına ait veri kullanılmamıştır [35].

Tablo 1 - Çalışmada kullanılan meteoroloji ve akım gözlem istasyonlarının istatistik özellikleri

Veri türü	İstasyon adı ve kodu	Drenaj Alanı (km^2)	Gözlem periyodu ve uzunluğu (yıl)	Yıllık toplam yağış (mm)	Yıllık ortalama sıcaklık (°C)	Yıllık ortalama akış (mm)	Yağışsız ay oranı (%)	Akarsu kuruma oranı (%)
Yağış	Ödemiş 17822		1960-2018 (59)	592.7	16.61		12.2	
	Selçuk 17854		1964-2018 (55)	685.1	16.69		17.7	
Akım	Bülbüller D06A012	73.4	1981-2002 (21)			111.6		21.0
	Selçuk E06A001	3255.2	1960-2012 (52)			89.2		10.7



Şekil 4 - Küçük Menderes havzasında 17822 ve 17854 kodlu MGİ'lerin yıllık toplam yağış ve E06A001 ve D06A012 kodlu AGİ'lerin yıllık ortalama akımlarının gidişi

MGİ ve AGİ'lerin gözlem süresi boyunca yağış ve akım gidişleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Buna göre, her iki MGİ'de de 1960, 1980 ve 2010'lu yıllarda yağışta azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu azalma, 1990'ların ilk yıllarında her iki MGİ'de de yıllık toplam yağış 400 mm'nin altına inecek kadar belirgin bir düşme şeklinde olmuştur. Havzanın akış katsayısı %20 civarındadır, yani yağışın %20 kadarı akışa geçmektedir. Akım verisine bakıldığında, Selçuk AGİ genel olarak Selçuk MGİ yağış zaman serisindeki yükselme ve düşme yıllarını takip etmektedir. Benzer şekilde Bülbüller AGİ, Ödemiş MGİ yağışının seyrini izlemekte; 1982 ve 1999 yıllarında yağışta düşme gözlenmesine rağmen akışta bir yükselme görülmektedir. Bu AGİ'de akım 1999 yılında pik değerine ulaşmıştır.

3.3. Havza ile İlgili Çalışmalar

Küçük Menderes havzasında tarımsal ve endüstriyel su ihtiyaçlarının çoğu yeraltı su kaynaklarından sağlanmaktadır. Ayrıca, nehir havzası, önemli tarımsal faaliyetler ve sulama tesislerine ev sahipliği yapmaktadır [36]. Bu durum mevcut kısıtlı su imkanları altında su talebini günden güne artırmaktadır. Öneminden dolayı havza ile ilgili projeler geliştirilmiş ve sonuçları raporlar halinde yayınlanmıştır. Son yıllarda yapılanlardan örnek vermek gerekirse öncelikle Küçük Menderes Havzası koruma eylem planından bahsedilebilir [37]. Daha sonra yapılan çalışmalarda Küçük Menderes havzasında sektörler bazında su tahsis planları hazırlanmış [38] ve havza su kaynaklarının olası iklim değişikliği etkisi altındaki durumları incelenmiştir [39]. Ayrıca havza kuraklık ve taşkın yönetim planları da yapılmıştır [40, 41].

Küçük Menderes nehir havzası, sulama, enerji ve taşkın kontrolünün yanı sıra su kaynakları yönetimi ve planlaması açısından taşıdığı önem nedeniyle uygulamanın yanında çok sayıda araştırmaya da konu oluşmuştur. Bu kapsamda özellikle, iklim değişikliği ve kuraklık etkisi altında Küçük Menderes havzası su kaynaklarının sürdürülebilirliği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; Yagbasan [42], 1964-2011 gözlem süresindeki veriye dayanarak iklim değişiminin Küçük Menderes havzası yeraltı su kaynaklarına etkisini incelemiş; havza üzerine düşen yağışta azalma, sıcaklık ve buharlaşmada artış belirlemiş ve su bütçesi hesabı ile yeraltı beslenmesinde %15'lik azalma olduğunu ortaya koymuştur. Yeraltı suyunun beslenmesinde meydana gelen azalmanın sadece yağıştaki azalma ile ilişkilendirilemeyeceği, bu azalmada havzadaki barajların da etkisinin olduğu ortaya konmuştur [43]. Yeraltı suyunun önemi ve akifer beslenme kaybı dikkate alınarak yeraltı suyunun yapay olarak beslenmesi, bunun için yağışlı dönemlerdeki fazla suyun beslenme havuzlarında toplanarak yer altına sızdırılması, böylece yağışlı dönemlerde yeraltı suyu depolamasının arttırılması ve kurak mevsimlerde kullanılması düşünülmüştür [44]. Eris vd. [45], yaptıkları uygulama ile Küçük Menderes nehri havzasının şiddetli uzun kuraklıklara maruz kaldığını, kuraklık şiddetinin kuraklık periyodu arttıkça büyüdüğünü, kuraklığın havza iç kesimlerinde nispeten daha şiddetli olmakla birlikte tüm havzaya yayıldığını göstermiştir. Yıldırım ve Aksoy [46], havzada akışta azalma eğilimi görüldüğünü ve yeraltı suyunun hızla azaldığını veri tabanlı analiz sonuçları ile göstermiştir. Bunun nedeni, büyük ölçüde artan su talebini karşılamak için yeraltı suyunun beslenimden fazla kullanılmasıdır. Yeraltı suyunun aşırı kullanımı ile yeraltı su seviyesi alçalır, akarsu akışı azalır ve akarsular kurumaya (aralıklı olarak akmaya) başlar. Akıştaki bu aralıklığın havza kuraklığının bir ölçüsü olduğu ve yeraltı su seviyesindeki düşüşün akarsu akışındaki kuraklığı tetikleyebileceği sonucuna varılmıştır. Aksoy vd. [47], frekans analizi ile Küçük Menderes nehri havzası düşük akımlarının en

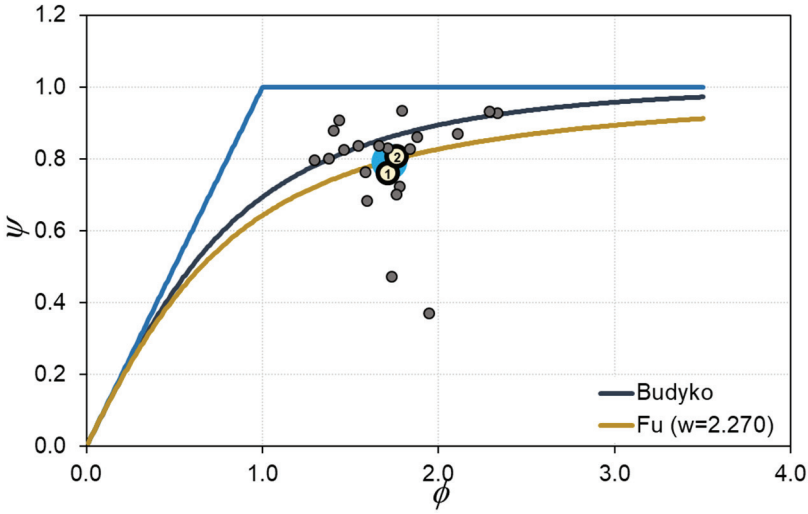
uygun olasılık dağılım fonksiyonlarını bulmuş, olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak elde edilen düşük akım frekans eğrilerinden havzanın gelecekte kuruma ile karşı karşıya kalabileceği tespitinde bulunmuştur.

4. BULGULAR

Çalışmanın uygulama aşamasında Budyko eğrisi, Küçük Menderes havzasının memba ve mansabı için ayrı ayrı belirlenmiştir. Budyko eğrisi hesap adımları izlenerek her iki MGİ için aylık potansiyel evapotranspirasyon, Thorntwaite yöntemi ile hesaplanmış ve MGİ'lerin Thiessen çokgenindeki alanlarına göre ağırlıklandırılarak kullanılmıştır. Aylık yağış, sıcaklık ve debi değerleri ile aylık su bütçesi hesabı yapılmış, aylık değerler toplanarak yıllık değerler belirlenmiştir. Gözlem süresi boyunca bu şekilde her yıl için yapılan hesaplar sonrasında elde edilen (ϕ, Ψ) noktaları memba ve mansap için ayrı ayrı olmak üzere Budyko eğrisi üzerinde işaretlenmiştir.

4.1. Memba Bulguları

Havzanın membasından alınan MGİ ve AGİ için Budyko eğrisi çizilmiş, istasyonların 21 yıllık ortak gözlem süresi (1982-2002) boyunca her yıl için hesaplanan (ϕ, Ψ) noktaları eğri üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 5). Yıllık noktaların yanı sıra 1980 ve 1990'lı yılları temsil eden on yıllık iki ve gözlem süresini temsil eden bir (ϕ, Ψ) çifti de hesaplanmıştır. Az sayıda yıllık değer (3 adet) Budyko eğrisinin üstünde kalmış, çoğunluğu (13 adet) eğrinin altında kalmış, geri kalan üçte birden fazla değer (8 adet) eğri üzerine düşmüştür. Eğrinin üstünde kalan her üç nokta ile eğrinin altında kalan noktaların önemli bir kısmı Budyko eğrisine



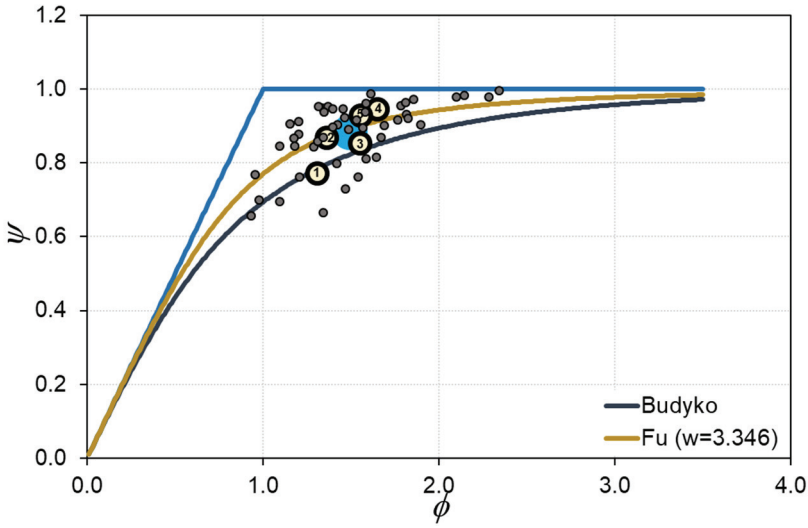
Şekil 5 - Küçük Menderes Havzası memba Budyko ve Fu eğrisi. Küçük noktalar yıllık değerleri, numaralı noktalar 10 yıllık değerleri ve büyük (mavi) nokta gözlem süresini temsil eden değeri göstermektedir. 10 yıllık değerlerden 1 numaralı nokta 1982-1990, 2 numaralı nokta 1991-2000 yıllarının ortalamasını temsil etmektedir.

yakındır. Eğrinin altında kalmak suretiyle eğriden belirgin sapma gösteren iki nokta ortaya çıkmıştır. Bu noktalar, 1982 ve 1999 yıllarına aittir. Budyko eğrisi üstünde kalan noktaların ait olduğu yıllarda havzaya düşen yağış içindeki gerçek evapotranspirasyon oranı yüksek, havza çıkışındaki akım oranı düşük olmuştur. Budyko eğrisi altındaki noktalar da debinin bu yıllarda beklenenin üstünde kaldığının göstergesidir. Yıllık noktalardan hesaplanan 10 yıllık değerler ve gözlem süresini temsil eden değer Budyko eğrisinin altında ancak eğriye yakın bulunmuştur.

Yıllık değerlere göre elde edilen Fu eğrisi, Budyko eğrisinin altında kalmıştır. Bunun temel nedeni, Budyko eğrisinden sapma gösteren 1982 ve 1999 yıllarına ait iki noktadır. Zaman serisinin 10 yıllık değerler ile gözlem periyodunu temsil eden değer ise Fu eğrisi üzerine isabet etmiştir. 1980'li yılları temsil eden 10 yıllık nokta 1990'lı yılları temsil eden noktaya göre Fu eğrisinin altında kalmıştır. Bu da havzanın membasında, 1980'li yıllara göre 1990'lı yıllarda az da olsa gerçek evapotranpirasyonda bir artma ve bu nedenle debide bir azalma olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Budyko eğrisinin yatay eksenindeki kuruluk indeksi (ϕ) değerleri 1.25 ile 2.50 arasında değişmektedir. Yani havzanın membası yıldan yıla kuru yarı sulak ile yarı kurak iklim sınıfları [28] arasında kalmaktadır.

4.2. Mansap Bulguları

Havzanın mansabını temsil eden AGİ ve MGİ'lerin ortak gözlem süresi (1964-2012) boyunca her yıl için hesaplanan (ϕ, Ψ) noktalarının büyük çoğunluğu Budyko eğrisinin üstünde kalmıştır (Şekil 6). Noktaların çoğunlukla Budyko eğrisinin üstünde kalması akarsu



Şekil 6 - Küçük Menderes Havzası mansap Budyko ve Fu eğrileri. Küçük noktalar yıllık değerleri, numaralı noktalar 10 yıllık değerleri ve büyük (mavi) nokta gözlem süresini temsil eden değeri göstermektedir. 10 yıllık değerlerden 1 numaralı nokta 1964-1970, 2 numaralı nokta 1971-1980, 3 numaralı nokta 1981-1990, 4 numaralı nokta 1991-2000 5 numaralı nokta 2001-2010 yıllarının ortalamasını temsil etmektedir.

havzasında bu yıllarda gerçek evapotranspirasyonun uzun dönemde beklenenden yüksek ve bu nedenle akarsudaki debinin beklenen uzun dönem ortalamasının altında olduğunu göstermektedir. Az sayıda da olsa bazı noktalar Budyko eğrisinin altında kalmıştır. Bu durum, debinin bu yıllarda beklenenin üstünde kaldığının göstergesidir. Havza mansabı için toplam 5 adet 10 yıllık değer hesaplanmış, bu değerlerden üçü eğrinin üstünde bulunmuş, diğer ikisi eğri üzerine düşmüştür. Gözlem süresinin ortalamasını temsil eden değer ise Budyko eğrisinin üstünde ancak eğriye yakın bulunmuştur. Bu da Küçük Menderes nehir havzası mansabının membasına göre Budyko çerçevesine daha fazla uyum gösterdiğini ortaya koymuştur.

Şekil 6, 1960'lı yıllardan 2000'li yıllara göre gerçek evapotranspirasyondaki artma ve debideki azalmayı açıkça göstermektedir. Bu değişim, 2001-2010 yılları arasında, bir önceki on yıla göre önemsenmeyecek düzeyde tersine dönmüştür (Şekil 6'daki 4 ve 5 no.lu 10 yıllık ortalama değerler). Bu durum havza mansabının uzun dönemde akımın azalması yönünde bir eğilim içine girebileceği gerçeğini göstermektedir. Akarsu mansabında kuruluk indeksinin yıllık değerleri 0.80 ile 2.50 arasında değişmektedir. Buna göre, havzanın mansabının yıldan yıla sulak ile yarı kurak arasında değişen iklim sınıfları [28] arasında kaldığını göstermektedir.

5. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Küçük Menderes nehir havzası üzerinde yapılan uygulamadan elde edilen bulgular, çalışmanın araştırma sorularına yanıt oluşturacak şekilde aşağıdaki gibi değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Bu değerlendirmede havzanın Budyko çerçevesine uyumu, memba ve mansabı arasındaki benzerlik veya farklılıklar ele alınarak incelenmiş ve Budyko eğrisinden olan sapmaların nedenleri ortaya konmuştur.

5.1. Havzanın Budyko Çerçevesine Uyumu, Memba-Mansap Benzerliği

Memba ve mansabı için ayrı ayrı yapılan uygulama ile Küçük Menderes havzasının Budyko çerçevesine uyumu belirlenmiştir. Yıllık olarak hesaplanan kuruluk indeksi-buharlaşma oranı (ϕ, Ψ) değer çiftleri Budyko eğrisi etrafında saçılma göstermiş, bu saçılma mansapta membaya göre daha dar bir aralıkta kalmıştır. On yıllık (ϕ, Ψ) değer çiftlerinin ise Budyko eğrisi ile olan uyumu yıllık değerlere göre daha iyidir. Bu uyum, yıllık zaman aralığındaki değişkenliğin on yıllık ortalama değerlere geçildiğinde azalması ile açıklanabilir. Burada, Budyko eğrisinin uzun dönem havza akım karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilen parametrik olmayan bir yöntem olduğu vurgulanmalıdır. Dolayısıyla, havzanın Budyko çerçevesine uyumuna yıllık değerlerden çok on yıllık değerlerle ve hatta her bir havzanın gözlem süresi için hesaplanan tek bir değer ile karar vermek daha uygun olacaktır. Yıllık (ϕ, Ψ) çiftlerinden memba ve mansap için gözlem süresine ait hesaplanan ortalama değerler Budyko eğrisine yakın bulunmuştur. Memba Fu eğrisi Budyko eğrisinin altında, mansap Fu eğrisi ise üstünde kalmıştır. Memba eğrisi ile ilgili bu bulgu, 1982 ve 1999 yıllarında uzun dönem ortalamasının üstünde yağış düşmesi ile ilgilidir.

Kullanılan verinin nicelik ve niteliği de elde edilen bulgular üzerinde önemli derecede etkilidir. Yağışın alansal dağılımının daha fazla sayıda MGİ ile temsil edilmesi beklenir. Bu çalışmada memba yağışı sadece bir MGİ ile temsil edilmiş, mansap yağışı için buna ek olarak ikinci bir MGİ'ye ait veri kullanılmıştır. Membadaki AGİ ve MGİ'nin ortak gözlem süresi,

bulguları çıkarım haline getirecek yeterli uzunlukta değildir. Buna rağmen, bulgular havzanın Budyko eğrisine uyumunu ortaya koymaktadır. Verinin nicelik ve niteliğinde gelecekte sağlanacak gelişmeler, bulguların havzanın Budyko eğrisi ile olan uyumunu ayrıca pekiştirmesi beklenebilir.

5.2. Budyko Eğrisinden Sapma

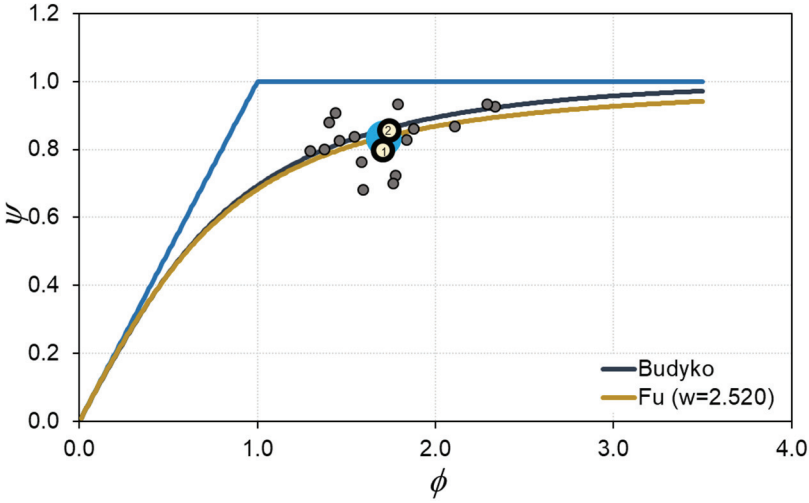
Bulgular, gözlem süresinin 10 yıllık dönemleri için hesaplanan ortalama (ϕ, Ψ) değer çiftlerinin genel olarak hem membada hem de mansapta Budyko eğrisinin yatay ve düşey ekseni üzerinde zamanla ilerlediğini göstermektedir (Şekil 5 ve 6). Yatay eksendeki sağa doğru ilerleme, kuruluk indeksinin artması demektir. Kuruluk indeksinin tanımı gereği (Denklem 3), bu aynı zamanda potansiyel evapotranspirasyonun artması ya da yağışın azalması ile aynı anlamı taşımaktadır. Thorntwaite yöntemi ile hesaplanan potansiyel evapotranspirasyon sıcaklık ile doğru orantılıdır. O halde eğrinin yatay eksenindeki sağa doğru ilerleme, havza iklim koşullarının daha çorak olacağını göstermektedir. Düşey eksende yukarı doğru ilerleme ise gerçek evapotranspirasyonun artması ya da yağışın azalması anlamına gelmektedir. Bu her iki durumda, süreklilik denklemi (Denklem 7) gereği havza çıkışındaki debi azalmaktadır. Bu da havzanın kuruma eğilimine girdiğini göstermektedir.

Havzanın mansabında on yıllık ortalama değerler eğrinin üzerinde veya üstünde iken havzanın memba kısmında on yıllık ortalama değerler Budyko eğrisinin altında kalmaktadır (Şekil 5 ve 6). Bu durum, havzanın mansabının membaya kıyasla daha çok kurumaya eğilimli olduğunu göstermektedir. Bazı yıllarda mansabında sulak karakter bile gösterebilen Küçük Menderes havzası genel karakter olarak kuru yarı sulak ve yarı kurak iklim sınıfları arasında kalan bir iklim karakteristiği sergilemiştir. On yıllık incelemede belirgin bir şekilde kendini gösteren bu genel iklim karakteri havzanın bilinen Akdeniz iklimi ile uyumludur [35]. Uzun yıllar ortalamasına göre, havza membası kuru yarı sulak iklim sınıfındadır, mansapta ise havza kuru yarı sulak çoraklığı en alt sınırdan yaşamaktadır [28].

Gözlem süresince havza, genel anlamda Budyko çerçevesine uymakta ve eğriyi takip etmektedir ancak belli dönemlerde eğriden sapmalar gözlenmiştir. Budyko eğrisinden en belirgin şekilde meydana gelen sapma, havzanın membasında 1982 ve 1999 yıllarında gerçekleşmiştir (Şekil 5). Budyko eğrisinden olan sapmalarının diğer yıllardan fazla olmasından dolayı 1982 ve 1999 yıllarına ait iki nokta aşağıda detaylı olarak değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Öncelikle bu yıllarda ψ değerlerinin neden bu kadar düşük olduğu sorgulanmalıdır. Denklem 2'ye göre, ψ değerinin düşük olması, belli bir yıllık yağış için gerçek evapotranspirasyonun düşük olması demektir. O halde süreklilik denklemine (Denklem 7) göre, bu yıllarda debi büyüktür. Bu kez, havza çıkışında debinin büyük olmasının nedeninin ortaya konması gerekir.

DSİ günlük akım verilerine göre, gözlem süresi boyunca AGİ'de kaydedilen ortalama akış hacmi 8.64 milyon m^3'tür. Buna karşın, 1982 yılında toplam 18.91 milyon m^3'lük akış hacmi kaydedilmiş ve bunun 5.06 milyon m^3'ü (yıllık toplam akış hacminin %26.8'i) Mart ayında gerçekleşmiştir. 1999 yılında ise toplam 22.15 milyon m^3 akış hacmi ortaya çıkmış ve bunun 12.20 milyon m^3'ü (%55.1'i) Şubat ayında meydana gelmiştir. Bu iki ayda akışın ortalamanın çok üstünde olmasının öncelikli nedeninin ay içinde düşen yağış olabileceği düşünülmüştür. Aylık yağış verilerine göre 1982 Mart ayında 81.4 mm yağış düşmüştür. 1982 yılının toplam yağışı 492 mm'dir. Bu ayın yıl içindeki payı %16.5'tir. 1999 Şubat ayında ise 206.1 mm yağış düşmüştür. 1999 yılının toplam yağışı 479.9 mm'dir. Bu ayın da yıl içindeki payı

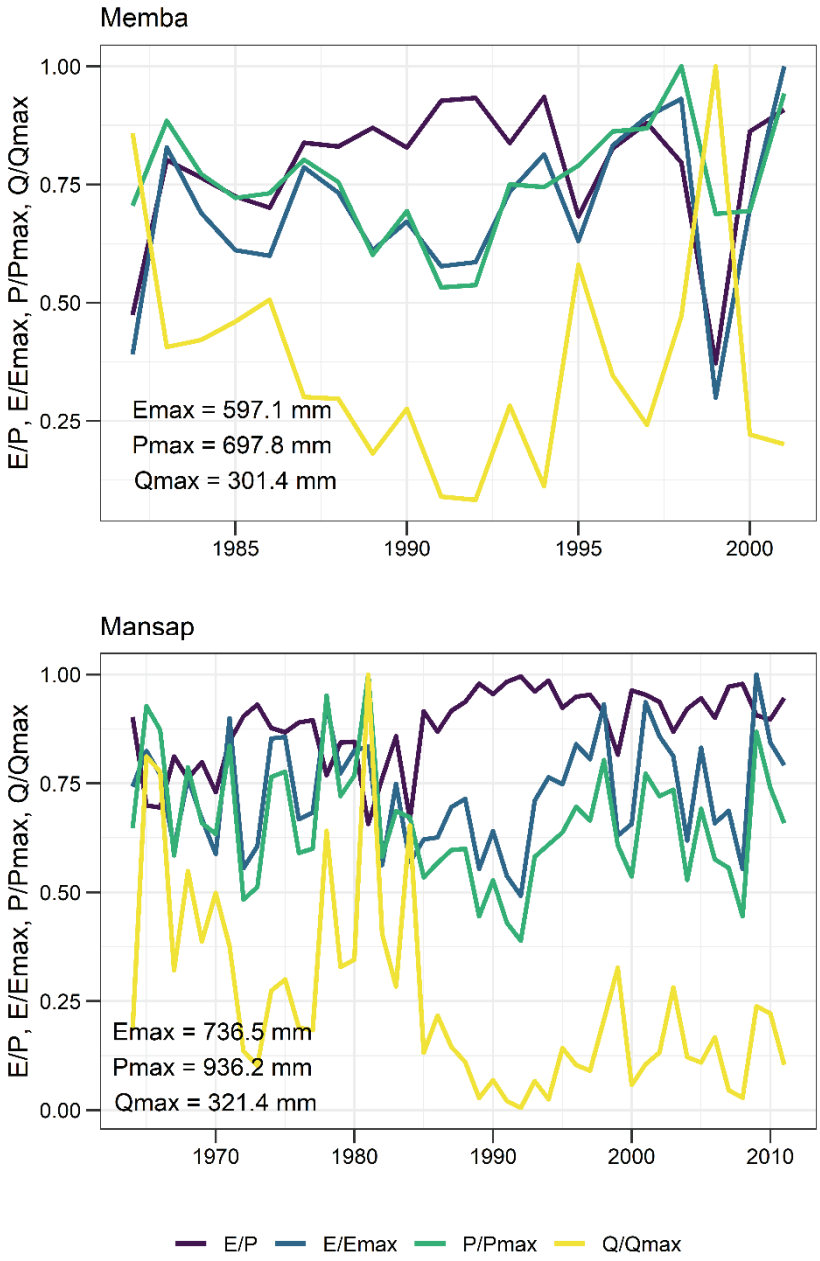
%42.9'dur. MGİ'de 1982 ve 1999 yıllarında birer ayda yoğunlaşmış yağış fırtınaları söz konusudur. Bu yağış fırtınalarının ay boyunca gerçekleşmediği, ay içinde birkaç günlük kısa dönemlerde meydana geldiği günlük yağış verilerine bakıldığında ayrıca görülmüştür. Yağışlar, 1982 yılı için 12-17 Mart arası altı günde meydana gelmiş; 1999 yılı için ise 1-10 Şubat arası 10 günde yoğunlaşmış, 12-19 Şubat ve 22-25 Şubat arası yine şiddetli yağışlar gözlenmiştir. Bu yağış fırtınaları, yüksek akış hacimlerine neden olmuş; bu aylarda gerçek evapotranspirasyonun yağış içindeki payı (buharlaşma oranı) azalmıştır. Bu azalma yıllık buharlaşma oranına da yansımış, E/P küçülmüştür. Bu iki yıldaki noktaların ψ değerlerinin düşük olmasının nedeni budur. Bu şekilde açıklandığı üzere ekstrem olmalarından dolayı bu iki yıla ait noktalar hariç tutularak Fu eğrisi tekrar oluşturulmuş ve Şekil 7'te verilmiştir. Ekstrem değer taşıyan bu iki noktanın baskın etkisinin ortadan kalkmasıyla Fu eğrisi Budyko eğrisine yaklaşmıştır.



Şekil 7 - Küçük Menderes Havzası memba Budyko eğrisi ve 1982 ve 1999 yılları hariç tutularak belirlenen Fu eğrisi. Küçük noktalar yıllık değerleri, numaralı noktalar 1982 ve 1999 yılları hariç tutularak hesaplanan 10 yıllık değerleri ve ve büyük (mavi) nokta yine bu iki yıl hariç gözlem süresini temsil eden değeri göstermektedir. 10 yıllık değerlerden 1 numaralı nokta 1982-1990, 2 numaralı nokta 1991-2000 yıllarının ortalamasını temsil etmektedir.

5.3. Tartışma

Budyko eğrisi, parametrik olmayan yapısı ve aylık zaman ölçeğindeki sınırlı veri talebi ile pratik amaçla kullanılabilir. Budyko eğrisi, havzanın yer aldığı bölgenin iklim karakterinin havza hidrolojisine olan etkisini göstermektedir. Gözlemlerin Budyko eğrisi ile olan uyumunun yeterli olmaması halinde parametrik eğrilere başvurulabilir. Bu amaçla kullanılmak üzere akla gelen ilk örnek Fu eğrisidir. Bu eğri bir parametrelidir. Denklemin parametresi her ne kadar fiziksel bir anlam taşımasa da havza yağış-akış ilişkisinde etkin iklim, morfoloji, arazi kullanımı, bitki örtüsü, topografya gibi tüm özelliklerin etkisini toplu halde barındırmaktadır.



Şekil 8 - Küçük Menderes havzasının memba ve mansabında E/P, E/Emax, P/Pmax, Q/Qmax'ın gözlem süresi boyunca gidişi

Çalışmada, sürekli ve mümkün olduğunca müdahalesiz verisi olan AGİ ile AGİ'yi temsil eden ve AGİ ile olabildiğince uzun ortak gözleme sahip MGİ'ye ihtiyaç vardır. Küçük Menderes havzasında azımsanmayacak sayıda AGİ ve MGİ olmakla birlikte bu kısıt altında nehir havzasının memba ve mansabını temsil edecek şekilde 2 AGİ ve 2 MGİ belirlenmiş; çalışma bu veri seti ile gerçekleştirilmiştir. Bu veri seti ile elde edilen bulgular Budyko eğrisinin Küçük Menderes havzası özelinde kullanılabilirliğini ortaya koyacak yeterli bilgi sunmuştur. Budyko eğrisinin veri varlığı bakımından zengin başka havzalara uygulanmak suretiyle kullanımının geliştirilmesi mümkündür. Akarsu havzasının memba ve mansabı genel olarak Budyko çerçevesi ile uyumlu bulunmuş ancak Budyko eğrisi kullanılarak yapılan hesaplara göre, havzanın membası için beklenenin üstünde, mansabı için beklenenin altında akım elde edilmiştir. Havzanın Budyko eğrisi ile uyumunun yeterli olmaması halinde bir parametreli Fu eğrisi parametresi kalibre edilmek suretiyle alternatif olarak kullanılabilir. Memba ve mansap sonuçlarındaki bu farkın kullanılan veri kümesinin nicelik ve niteliği ile ilişkilendirilebilecek sınırlamadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna rağmen, hem memba hem de mansapta akımın giderek azaldığı yönündeki kayıtlı zaman serisindeki gözlem, Budyko eğrisi tarafından da teyit edilmiştir. Küçük Menderes havzası için çıkarım niteliğinde bulgulara ulaşmak için daha fazla sayı gözlem istasyonunun daha uzun ve nitelikli verisi ile benzer bir çalışma yapılması önerilmektedir. Çalışmanın ülkemizin diğer havzalarına da uygulanması ayrıca gereklidir. Çünkü mevcut literatür incelendiğinde ülkemiz akarsu havzaları için Budyko eğrisine dayanan su bütçesi ile ilgili bir araştırma çalışmaya rastlanmamıştır.

Yıl ya da yıldan uzun zaman aralıklarında kullanılabilen Budyko eğrisi, uzun dönem havza hidrolojik karakteristiklerini belirlemede yararlıdır. Havzanın Budyko eğrisine uyumunun tespit edilmesi ile önemli bir pratik sonuç elde edilir. Budyko eğrisine uyumu ortaya konan bir havzada aylık ortalama sıcaklık ve aylık toplam yağışın bilinmesi halinde aylık ortalama debi hesap edilebilir. Bu yanıyla, Budyko eğrisi akım ölçümü olmayan havzaların su kaynaklarını planlamada su bütçesi hesabı için uygulamacılara önemli bir avantaj sağlar. Öte yandan, iklim değişim modelleri çıktılarını kullanan havza hidrolojik modelleri ile gelecekteki akım hesabı yapılmaktadır. Bunun için genellikle çok sayıda olan model parametrelerinin kalibre edilmesi gerekir ve bunun için detaylı veriye ihtiyaç vardır. Yağış-akış ilişkisini ortaya koyan hidrolojik modeller gün veya saat gibi kısa zaman aralıklarında kullanılmaktadır. Budyko eğrisi ise aylık verilerden yola çıkarak yıl ve yıldan uzun dönemler için su bütçesi hesabı yapmaktadır. Bu şekilde değerlendirildiğinde Budyko eğrisinin hidrolojik modellere alternatif olabileceği düşünülemez. Ancak su bütçesi hesabı ya da havza planlama çalışmalarında, detaylı havza hidrolojik modelleri ile kısa zaman aralıklarında üretilen akımlardan elde edilen yıllık akımları kullanmak yerine parametre kalibrasyon kolaylığı ve hesap pratikliği bakımından Budyko eğrisi tercih edilebilir. Budyko eğrisine uyumu ortaya konan bir havza için farklı senaryolara dayanan iklim değişim modellerinden elde edilen aylık ortalama sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak akım hesaplanabilir. Bu araştırma konusu, çalışmanın gelecekte yapılmak üzere sunduğu bir artı değerdir.

6. SONUÇLAR

Standart Budyko eğrisi veya eşdeğeri olan parametrik eğriler, su kaynaklarını planlama çalışmalarında uygulamacı kurumlara havza su bütçesi hesabında önemli bir kolaylık sağlayacaktır. Budyko eğrisi özellikle akım ölçümü olmayan havzalarda uzun dönem debi

hesabında yarar sağlayacaktır. Küçük Mendres havzası üzerinde sınırlı veri ile yapılan uygulama Budyko eğrisinin bu amaçla kullanılabilmesi yönünde teşvik edici bulgular ortaya koymuştur. Budyko eğrisi sayesinde akım ölçümü olmayan akarsu havzalarında su kaynaklarının etkin bir şekilde planlanması ve yönetilmesi de mümkün olacaktır.

Semboller

E : Gerçek evapotranspirasyon

E_P : Potansiyel evapotranspirasyon

$KOKH$: Ortalama karesel hatanın karekökü

n : Gözlem periyodundaki yıl sayısı

P : Yağış

Q : Akım

$\triangle S$: Havza su depolama sistemindeki değişim

$\triangle t$: Zaman aralığı

ϕ : Kuruluk indeksi

Ψ : Buharlaşma oranı

ω : Fu parametresi

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 3501 programı çerçevesinde önerilen 224M652 no.lu "Budyko eğrisinin uzun dönem su bütçesi hesabında kullanılması ve akım ölçümü olmayan havzalara uygulanması" başlıklı projenin ön çalışmalarına dayanmaktadır. Bu çalışma sırasındaki desteğinden dolayı Prof. Dr. Hafzullah Aksoy'a çok teşekkür ederim.

Kaynaklar

[1] Budyko, M. I. Climate and Life, (p. 508). New York: Academic Press, 1974.

[2] Milly, P. C. D., Climate, soil water storage, and the average annual water balance. Water Resour. Res., 30(7), 2143–2156, 1994.

[3] Yang, D., Sun, F., Liu, Z., Cong, Z., Lei, Z., Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses. Geophys. Res. Lett., 33, L18402, 2006.

[4] Bouchet, R., Evapotranspiration reelle et potentielle, signification climatique. IAHS Publication, 62, 134–142, 1963.

[5] Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., Veling, E.J.M., Pfister, L., Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model, Water Res. Res., 45, W04403, 2009.

[6] Zhao, J., Wang, D., Yang, H., Sivapalan, M., Unifying catchment water balance models for different time scales through the maximum entropy production principle, Water Res. Res., 52, 7503–7512, 2016.

[7] McMahon, T. A., Laaha, G., Parajka, J., Peel, M. C., Savenije, H. H. G., Sivapalan, M., Szolgay, J., et al., Prediction of annual runoff in ungauged basins. In G. Bloschl, M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione & H. H. G. Savenije (Eds.), Runoff predictions in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales (p. 465). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[8] Nistor, M.M., Man, T.C., Water availability variation under climate change in Turkey during 21st century, Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 14(1), 2019.

[9] Dooge, J. C. I., Sensitivity of runoff to climate change: A Hortonian approach. Bulletin of the American Meteorological Society, 73(12), 2013–2024, 1992.

[10] Guo, J., Li, H., Leung, L., Guo, S., Liu, P., Sivapalan, M., Links between flood frequency and annual water balance behaviors: A basis for similarity and regionalization, Water Res. Res., 50, 937–953, 2014.

[11] Chen, X., Sivapalan, M., Hydrological basis of the Budyko curve: Data-guided exploration of the mediating role of soil moisture, Water Res. Res., 56, e2020WR028221, 2020.

[12] Kampf, S. K., Burges, S. J., Hammond, J. C., Bhaskar, A., Covino, T. P., Eurich, A., et al., The case for an open water balance: Re-envisioning network design and data analysis for a complex, uncertain world, Water Res. Res., 56, e2019WR026699, 2020.

[13] Eagleson, P. S., Climate, soil, and vegetation, 4. Expected value of annual evapotranspiration", Water Res. Res., 14(5), 731–739, 1978.

[14] Eagleson, P. S., Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems, 1. Theory and hypothesis, Water Res. Res., 18(2), 325–340, 1982.

[15] Sivapalan, M., Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: Is there a connection?, Hydrol Process, 17(5), 1037–1041, 2003.

[16] Nistor, M. M., Man, T. C., Water availability variation under climate change in Turkey during the 21st century, Carpathian J. Earth and Environ. Sci., 14(1), 2019.

[17] Unnisa, Z., Govind, A., Lasserre, B., Marchetti, M. Water Balance Trends along Climatic Variations in the Mediterranean Basin over the Past Decades. Water, 15, 1889, 2023.

[18] Cevahir F.Y.E., Hydrologic sensitivity of a critical turkish watershed to inform water resource management in an altered climate. Yüksek Lsans tezi, Washington State Universites, 2019.

[19] Cevahir, F.Y.E. Adam, J.C. Liu, M. Sheffield, J., Hydrologic Sensitivity of a Critical Turkish Watershed to Inform Water Resource Management in an Altered Climate. Hydrology, 11, 64, 2024.

[20] Okkan, U., Ersoy, Z.B., Kumanlıoğlu, A.A., Fıstıkoğlu, O. Embedding machine learning techniques into a conceptual model to improve monthly runoff simulation: A nested hybrid rainfall-runoff modeling, J Hydro, 598, 126433, 2021.

[21] Ersoy, Z. B. Dinamik su bütçesi modeline makine öğrenmesi entegrasyonu ile aylık akış tahminlerinin iyileştirilmesi. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.

[22] Ersoy, Z. B, Okkan, U, Fıstıkoğlu, O. Hybridizing a Conceptual Hydrological Model with Neural Networks to Enhance Runoff Prediction , MJAIAS, 3(1), 2022.

[23] Ersoy, Z. B., Okkan, U., & Fıstıkoğlu, O., Dinamik su bütçesi modeline destek vektör regresyonu entegrasyonu. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(1), 237-250, 2022.

[24] Okkan, U., Fıstıkoğlu, O., Ersoy, Z.B., Noori, A.T., Analyzing the uncertainty of potential evapotranspiration models in drought projections derived for a semi-arid watershed, Theor. Appl. Climatol, 155, 2329-2346, 2024.

[25] Noori, A.T., Hazne işletme optimizasyonu için parametrik bir simülasyon modelinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, 2023.

[26] Schreiber, P., Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa, Z. Meteorol., 21(10), 441– 452, 1904.

[27] Ol'dekop, E. M., On evaporation from the surface of river basins, Trans. Meteorol. Obs., 4, 200, 1911.

[28] Berghuijs, P., ve Greve W.R., A review of the Budyko water balance framework, EGU2015-15654, 2015.

[29] Thornthwaite, C.W., An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review. 38:55–94, 1948.

[30] Blaney, H. F., and Criddle, W. D., Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data, U.S. Dept. Agriculture Soil Conservation Service, SCS-TP 96, 1950.

[31] Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Div., 108 (3), 225e230, 1982.

[32] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[33] Fu, B. P., On the calculation of the evaporation from land surface. Scientia Atmospherica Sinica, 5, 23–31, 1981.

[34] Greve, P., Gumundsson, L., Orlowsky, B., Seneviratne, S.I., A two-parameter Budyko function to represent conditions under which evapotranspiration exceeds precipitation. Hydrol Earth Syst Sci, 20, 2195–2205, 2016.

[35] Sarigil, G., Cavus, Y., Aksoy, H., Frequency curves of high and low flows in intermittent river basins for hydrological analysis and hydraulic design. Stoch Environ Res Risk Assess 38, 3079–3092, 2024.

[36] Aksoy, H., Surface Water. In: Harmancioglu, N., Altinbilek, D. (eds) Water Resources of Turkey. World Water Resources, 2. Springer, Cham., 2020.

[37] TUBITAK Marmara Research Center (MAM), Havza Koruma Eylem Planları – Kucuk Menderes Havzası, TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Ankara, 2010.

[38] SYGM, Küçük Menderes ve Gediz Havzası Su Tahsis Planlarının Hazırlanması, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, 2017.

[39] SYGM, İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarina Etkisi, Proje Nihai Raporu, Ek 8 – Küçük Menderes Havzası, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, 2016.

[40] SYGM, Küçük Menderes Havzası Kuraklık Yönetim Planı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Taşkın ve Kuraklık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2018.

[41] SYGM, Küçük Menderes Havzası Taşkın Yönetim Planı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Taşkın ve Kuraklık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2019.

[42] Yagbasan, O., Impacts of climate change on groundwater recharge in Kucuk Menderes River Basin in Western Turkey. Geodin Acta.28(3):209–222, 2016.

[43] Yilmaz, D., Kocabaş İ., Küçük Menderes havzası su kaynakları üzerinde barajların etkisi. 5th International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management (ISHAD2021) 5-7 November 2021, pp. 59-81, 2021.

[44] Peksezer, A., Artificial recharge of groundwater in the Küçük Menderes river basin, Turkey. Thesis submıtted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Geological Engineering, Ankara, 2010.

[45] Eris, E., Cavus, Y., Aksoy, H., Burgan, H.I., Aksu, H., Boyacioglu, H. Spatiotemporal analysis of meteorological drought over Kucuk Menderes River Basin in the Aegean Region of Turkey. Theoretical and Applied Climatology 142, 1515–1530, 2020.

[46] Yildirim, I., Aksoy, H. Intermittency as an indicator of drought in streamflow and groundwater. Hydrological Processes, 36(6), e14615, 2022.

[47] Aksoy H, Cavus Y, Sarigil G, Aksu H, Eris E, Boyacioglu H. Low flow characteristics of Kucuk Menderes River Basin, Turkey. Proceedings of the 18th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS 2021), August 1–6, 2021, Virtual, pp. 91–93, 2022.