

Dinamik Su Bütçesi Modeli

Umut OKKAN^{1,*}

¹Balikesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Çağış Kampüsü, Balıkesir.

Özet

Sunulan çalışmada, aylık yağış-akış ilişkisini tanımlamak amacıyla Budyko yaklaşımına dayanan dinamik su bütçesi modeli kullanılmıştır. Önerilen 5 parametrelili model girdi olarak sadece aylık alansal ortalama yağış ve potansiyel evapotranspirasyon verilerine ihtiyaç duymaktadır. Çalışma sahası Gediz Havzası'ndaki Medar Çayı'nı kapsamaktadır. Modelin performansını sınamak maksadıyla farklı ölçütler değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular, dinamik su bütçesi modelinin aylık akış serilerini modellemede başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Dinamik su bütçesi modeli, Budyko yaklaşımı, Medar Çayı

Dynamic Water Budget Model

Abstract

In the study presented, to define monthly rainfall-runoff relation, dynamic water budget model based on Budyko approach was used. Proposed model having 5- parameter requires only monthly areal precipitation and potential evapotranspiration data as input. The study region covers the Medar River which is located at the Gediz Basin. To validate the model performance, different measures were assessed. The results derived from the study show that dynamic water budget model is successful in modeling of monthly runoff series.

Keywords: Dynamic water budget model, Budyko approach, Medar River

1. Giriş

Bir havzadaki su bütçesi ya da diğer tanımıyla yağış-akış ilişkisi iklim ve havza karakteristiklerine bağlı olup bu ilişkinin tanımlanması lineer yöntemlerle mümkün olmayıp zamansal-konumsal açıdan karmaşıklık taşımaktadır. Karmaşıklığı çözebilme adına söz konusu ilişkinin tanımlanması için fazla sayıda veriye ve parametreye ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu durumda kurulan model kalibrasyon sürecinde iyi sonuç verirken

*Umut OKKAN, umutokkan@balikesir.edu.tr, Tel: (266) 612 11 94 (dahili: 4203)

verifikasyon aşamasında genelleme ve tahmin yeteneğini kaybetmektedir. Bu nedenle girdi ve parametre adedi daha az olan modellerin kullanımı hidrolojik açıdan daha kullanışlı olmaktadır [1-3].

Su bütçesi ve iklim arasındaki ilişkinin araştırıldığı bir çalışmada, Budyko (1958) havzadaki uzun dönem evapotranspirasyonun yağış ve mevcut enerjiden elde edilebileceğini varsaymaktadır [4]. "Budyko eğrisi" olarak da bilinen yaklaşımın uzun dönem su bütçesi analizlerinde makul sonuçlar verdiği görülmüş ve yöntem çeşitli teorik çalışmalara zemin oluşturmuştur [5-9].

Sunulan çalışmada, Zhang ve ark. (2008) tarafından önerilen ve Budyko yaklaşımına dayanan 4 parametrelilik model (dinamik su bütçesi modeli) esas alınmıştır [8]. Modelin yeraltısuyu biriktirme sistemine de bir parametre atanarak aylık zaman ölçeğinde geliştirilen 5 parametrelilik model Gediz Havzası'nda yer alan Medar Çayı verilerine uygulanmıştır. Modelin kalibrasyonu ve verifikasyonu tamamlandıktan sonra istatistiksel kriterler ile performansı sınanmıştır.

2. Budyko yaklaşımı

Budyko (1958), yıllık su bütçesi ifadesinin yağıştan tahmin edilen su içerisine ve evapotranspirasyona bağlı olduğunu holistik bir yaklaşımla savunmuştur [4]. Zhang ve ark. (2001) ve Milly (1994) yağış mevsimselliği ve bitki deseni karakteristikleri gibi olayı kontrol eden faktörleri de dikkate alarak Budyko yaklaşımını geliştirmişlerdir [5, 7]. Benzer bir evapotranspirasyon modelleme yaklaşımı ise Fu (1981) tarafından yıllık zaman ölçeği için geliştirilmiştir [10] (Denklem 1).

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{1-\alpha} \quad (1)$$

Burada E_0 potansiyel evapotranspirasyonu, P yağışı, α tanım aralığı (0,1) olan model parametresini temsil etmektedir. Buradaki E_0/P ifadesi ise kuraklık indeksi olarak bilinmektedir.

Denklem 1'e göre sabit bir E_0/P oranı için α arttıkça evapotranspirasyon etkinliği de artar. Denklem 1 ile temsil edilen ilişki Şekil 1'de gösterilmektedir.

Denklem 1 i.zaman için Denklem 2'deki şekliyle yazılabilir. Bu ifade literatürde Fu eğrisi olarak anılmaktadır.

$$\left(\frac{ET}{P} \right)_i = F \left(\left(\frac{E_0}{P} \right)_i ; \alpha \right) \quad (2)$$

Denklem 1'deki $(1-\alpha)$ 'nın üssü şeklinde köşeli parantez içinde yazılan terim eşitliğin solunda yalnız bırakılıp eşitliğin her iki tarafının $1/(1-\alpha)$ ile üssü alınırsa Denklem 3 elde edilir.

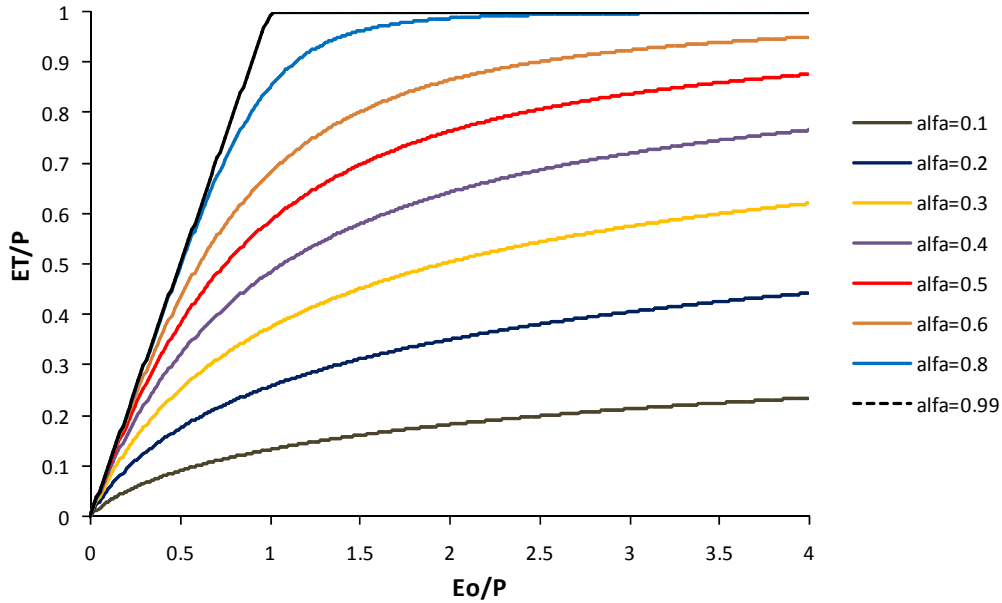
$$1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} = \left(1 + \frac{E_0}{P} - \frac{ET}{P}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3)$$

Denklem 3'te eşitliğin her iki tarafı $P^{1/(1-\alpha)}$ ile çarpılırsa Denklem 4'teki ifade elde edilir.

$$P^{\frac{1}{1-\alpha}} + E_0^{\frac{1}{1-\alpha}} = (P + E_0 - ET)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (4)$$

Kararlı hal kabulüne göre havzadaki yıllık akım için $Q=P-ET$ eşitliği yazılabilmektedir. Denklem 4'teki ifadede her iki tarafın $(1-\alpha)$ ile üssü alınıp $(P-ET)$ fark ifadesi yerine Q yazıldığında yıllık akım (Q) bağıntısı formülize edilmektedir (Denklem 5).

$$Q_i = \left[P_i^{\frac{1}{1-\alpha}} + E_{0,i}^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{1-\alpha} - E_{0,i} \quad (5)$$

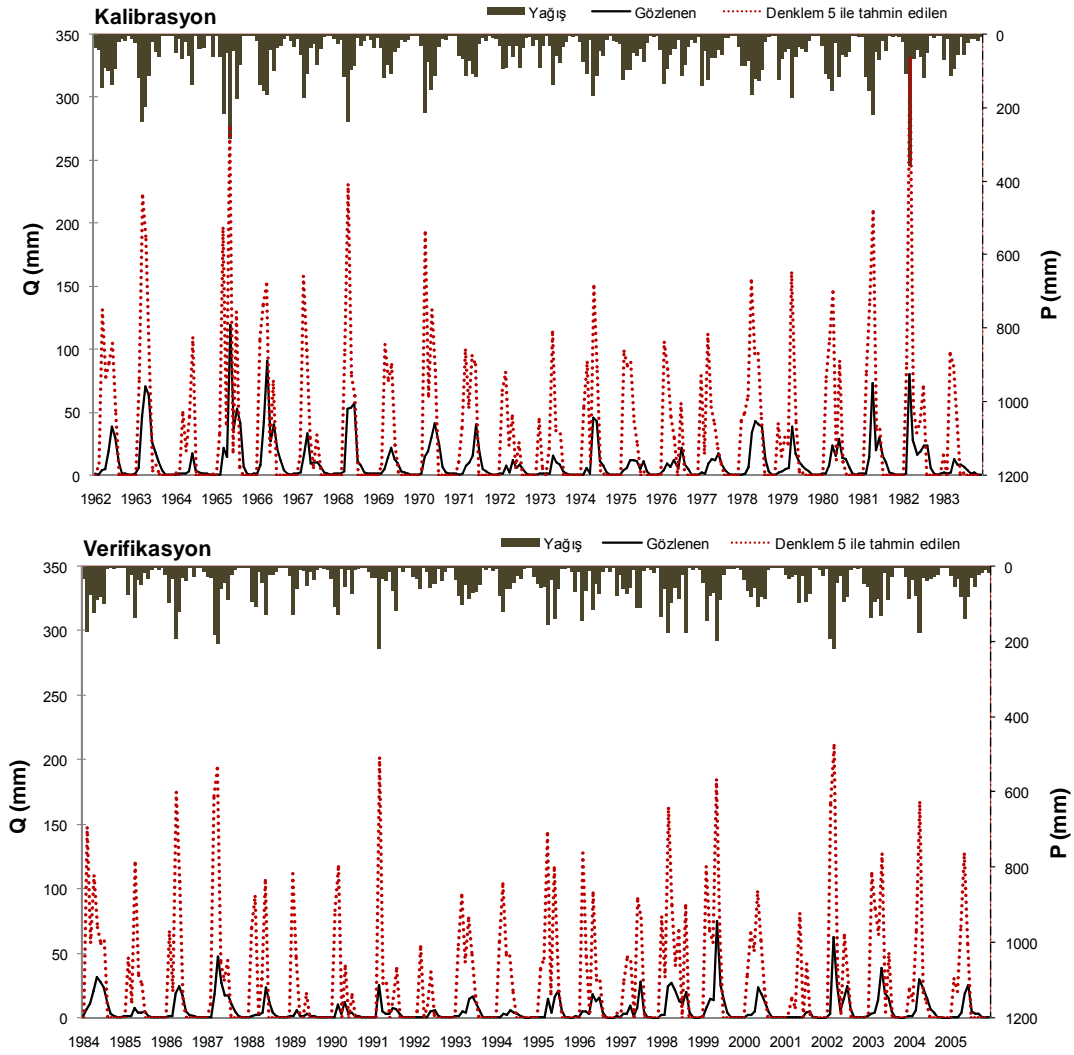


Şekil 1. E_0/P (aridite) ve ET/P (evapotranspirasyon etkinliği) arasındaki ilişki

3. Dinamik su bütçesi modeli

Yıllık zaman ölçeğinden aylık zaman ölçeğine geçildiğinde havzanın su depolamasının su bütçesine etkisi daha önemli olacaktır. Bu nedenle, yağıştaki, potansiyel evapotranspirasyondaki ve su depolamasındaki değişkenliklerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu durumu kanıtlamak için Denklem 5'te verilen yıllık su bütçesi eşitliği aylık verilere uygulanmıştır. Burada kullanılan verilere ait detaylar 4. Bölüm'de ayrıca verilmektedir. Veriler kalibrasyon ve verifikasyon olmak üzere 2 periyoda ayrılmıştır. Kalibrasyon dönemindeki hata kareler ortalaması (HKO) istatistiğini minimum yapan α parametresi 0.849 olarak belirlenmiş ve bu aşamada $R^2=0.51$ ve $HKO=2492.33 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Kalibre edilen model verifikasyon dönemi verileri ile test edilmiş ve burada $R^2=0.45$ ve $HKO=2038.93 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere,

aylık verilere uygulanan yıllık su bütçesi modelinin aylık akımlara simule etmedeki başarısı zayıftır. Şekil 2'de gösterilen hidrograflar bunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil 2. Denklem 5 ile tahmin edilen akıslara ait hidrograflar

Tahmini akımların yağışlara oldukça duyarlı olduğu çizilen hidrograflardan (Şekil 2) görülebilmektedir. Netice olarak, model tahminleri gözlenen akımlara kıyasla oldukça büyük çıkmıştır. Bu sonuçlar, ilave süreçlerin de model işleyişine yansıtılmasını ve modelin serbestlik derecesinin artırılmasını gerekli kılmaktadır. Zhang ve ark. (2008) bu kapsamda Budyko yaklaşımını da kullanarak dinamik bir su bütçesi modeli geliştirmişlerdir [8]. Modele ait detaylara aşağıda değinilmektedir:

Modelde havza, zemin nemi ve yeraltısu depolaması olmak üzere iki aşamada kavramsallaştırılmıştır. t. zamanda havzaya düşen yağış ($P(t)$), dolaysız akışa $Q_d(t)$ ve havza tarafından diğer su bütçesi elemanları için tutulan su miktarına ($X(t)$) paylaştırılmaktadır (Denklem 6).

$$P(t) = Q_d(t) + X(t) \quad (6)$$

Burada, gerçek evapotranspirasyon $ET(t)$, zemin nemindeki değişim $S(t)-S(t-1)$ ve yeraltısuyu biriktirme sistemine boşalan su $R(t)$ bileşenlerinin toplamı $X(t)$ 'yi temsil etmektedir. Zemin nemi depolaması $S(t)$ maksimum doygunluğa eriştiğinde ($S(t)=S_{max}$) $X(t)$ için beklenen üst limit $X_0(t)$ aşağıdaki şekliyle tanımlanmaktadır (Denklem 7).

$$X_0(t) = S_{max} - S(t-1) + E_0(t) \quad (7)$$

Burada bahsi geçen S_{max} aynı zamanda bir model parametresi olarak tanımlanmaktadır.

Budyko (1958)'de savunulan görüşe benzer olarak $X_0(t)/P(t) \rightarrow \infty$ için (aşırı kurak) $X(t)/P(t) \rightarrow 1$ çıkarımını yapmak mümkündür. $X_0(t)/P(t)$ Şekil 1'de verilen Budyko kuraklık indeksinin bir analogudur. $X_0(t)/P(t) \rightarrow 0$ için (aşırı sulak) ise $X(t) \rightarrow X_0(t)$ limit değerine yakınsar. Denklem 1 ve Denklem 2'de verilen F_u eğrisi fonksiyonu $X_0(t)/P(t)$ oranına uyarlanarak $X(t)$ hesaplanabilmektedir (Denklem 8).

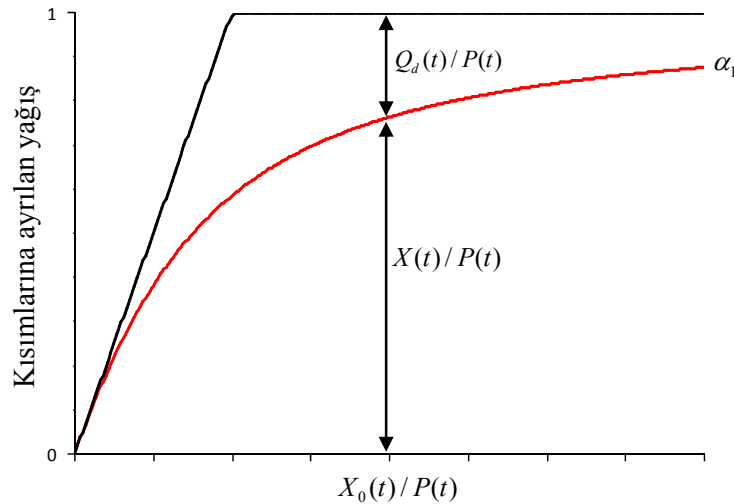
$$X(t) = P(t) \cdot F\left(\frac{X_0(t)}{P(t)}; \alpha_1\right) \quad (8)$$

Burada α_1 dolaysız akış haricindeki su bütçesi elemanları için tutulan su miktarını kontrol eden model parametresidir.

$X(t)$ hesaplandıktan sonra akımın dolaysız akım bileşeni Denklem 9'dan elde edilmektedir.

$$Q_d(t) = P(t) - X(t) \quad (9)$$

Denklem 6'dan Denklem 9'a kadar verilen ifadeler Şekil 3'te şematize edilmiştir.



Şekil 3. Yağışın bileşenlerine ayrılması

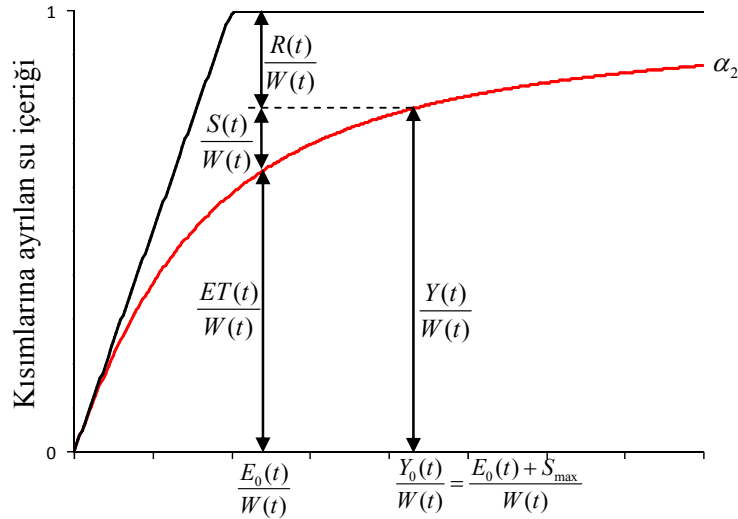
Bir önceki aydan kalan zemin nemi ile $X(t)$ toplamı t ayda havzada mevcut bulunan su miktarını ($W(t)$) temsil etmektedir (Denklem 10).

$$W(t) = S(t-1) + X(t) \quad (10)$$

Bu mevcut suyun bir kısmı evapotranspirasyona ayrılacak, bir kısmı zemin nemi depolamasında kalacak, geri kalan kısmı ise yeraltı suyu depolama sistemini besleyecektir (Denklem 11).

$$W(t) = ET(t) + S(t) + R(t) \quad (11)$$

Mevcut suyun kısımlara ayrılışı Şekil 4'te şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Mevcut suyun kısımlarına ayrılması

t.ayda gerçekleşen evapotranspirasyon ve depolanan zemin nemi toplamı $Y(t)$ ile gösterilirse ($Y(t) = ET(t) + S(t)$), $Y(t)$ için beklenen üst limit $Y_0(t)$ ise $S(t) = S_{\max}$ ve $ET(t) = E_0(t)$ için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$Y_0(t) = S_{\max} + E_0(t) \quad (12)$$

Budyko (1958)'e benzer biçimde, $Y_0(t)/W(t) \rightarrow \infty$ için (aşırı kurak) $Y(t)/W(t) \rightarrow 1$, aksi durum (aşırı sulak) için $Y_0(t)/W(t) \rightarrow 0$ için $Y(t) \rightarrow Y_0(t)$ çıkarımı yapılmaktadır.

Budyko (1958)'e benzer şekilde, $Y(t)$ Fu eğrisi ile α_2 evapotranspirasyon etkinlik parametresine bağlı olarak tahmin edilebilmektedir (Denklem 13).

$$Y(t) = W(t) \cdot F(Y_0(t); \alpha_2) \quad (13)$$

$Y(t)$ hesaplandığında yeraltı suyu depolamasına boşalan su Denklem 14 ile hesaplanmaktadır.

$$R(t) = W(t) - Y(t) \quad (14)$$

$ET(t)$ bileşenin beklenen limit değeri ise potansiyel evapotranspirasyon $E_0(t)$ 'dir. $ET(t)$ potansiyel evapotranspirasyondan karşılanmadığında $W(t)$ 'den karşılanmaktadır. Denklem 13'e benzer şekilde, $ET(t)$ Fu eğrisinden α_2 parametresine bağlı hesaplanabilmektedir (Şekil 4, Denklem 15).

$$ET(t) = W(t) \cdot F\left(\frac{E_0(t)}{W(t)}, \alpha_2\right) \quad (15)$$

Denklem 13 ve Denklem 15 aynı α_2 parametresini kullanmaktadır. α_2 arttıkça ET(t) ve Y(t) artmakta ve buna bağlı olarak R(t) azalmaktadır.

Y(t) ve ET(t) hesaplandıktan sonra t . aya ait zemin nemi depolaması elde edilebilmektedir ($0 \leq S(t) \leq S_{\max}$).

$$S(t) = Y(t) - ET(t) \quad (16)$$

Son aşamada, yeraltısuyu depolaması lineer hazne kabulü ile ele alınmakta ve taban akışı bir önceki aydan kalan yeraltısuyu depolama miktarına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 17).

$$Q_b(t) = d \cdot G(t-1) \quad (17)$$

Burada $Q_b(t)$ taban akışını, d doğrusal yeraltısuyu haznesi parametresini, $G(t-1)$ bir önceki ayın aktif yeraltısuyu depolamasını sembolize etmektedir.

Yeraltı biriktirme sisteminin t ayındaki aktif kapasitesi $G(t)$ ise Denklem 18 ile tanımlanmaktadır.

$$G(t) = G(t-1) + R(t) - Q_b(t) \quad (18)$$

Modelin d parametresi $0 \leq d \leq 1$ tanım aralığında olduğundan model kalibrasyon sürecinde HKO değerini düşürmek için d parametresini 1 değeri olarak atayabilmekte ve taban akışından kaynaklı sistematik sapmalar olabilmektedir. Bu nedenle Denklem 18'te bir modifikasyon önerilmiş ve modele bir parametre daha atanarak $G(t)$ ifadesi Denklem 19'daki haliyle tanımlanmıştır.

$$G(t) = [G(t-1) + R(t)] \cdot \xi - Q_b(t) \quad (19)$$

Burada ξ , yeraltı biriktirme parametresidir. Su bütçesi elemanları tanımlandıktan sonra modellenen toplam akış Denklem 20'den hesaplanmaktadır.

$$Q_m(t) = Q_d(t) + Q_b(t) \quad (20)$$

Modelin S_{\max} , α_1 , α_2 , d ve ξ parametreleri, kalibrasyon döneminde gözlenmiş akımlarla model sonuçları arasındaki farkların kareleri ortalamasını (HKO) minimum yapacak şekilde belirlenmiştir. Belirlenen parametreler verifikasyon döneminde sınanarak parametrelerin tutarlılığı test edilmiştir.

Hidrolojik modellerinin başarılarının sayısal olarak değerlendirilmesi, o modelin performansını ölçme açısından önemlidir. Bu kapsamda, R^2 (determinasyon katsayısı), Adj. R^2 (düzeltilmiş determinasyon katsayısı) ve hata kareler ortalaması gibi klasik kriterlerin yanı sıra, Moriassi ve ark. (2007), Nash-Sutcliffe (NS) katsayısı, hata kareler

ortalamasının karekökünün (RMSE) ölçülmüş verinin standart sapmasına (STD_{obs}) oranı şeklinde hesaplanan boyutsuz RSR değeri ve yanlışlık oranı (PBIAS) gibi başarı ölçütlerinin kullanımını tavsiye etmiştir [11]. Çalışma kapsamında söz konusu ölçütler dinamik su bütçesi modelinin performansını değerlendirmede kullanılmıştır.

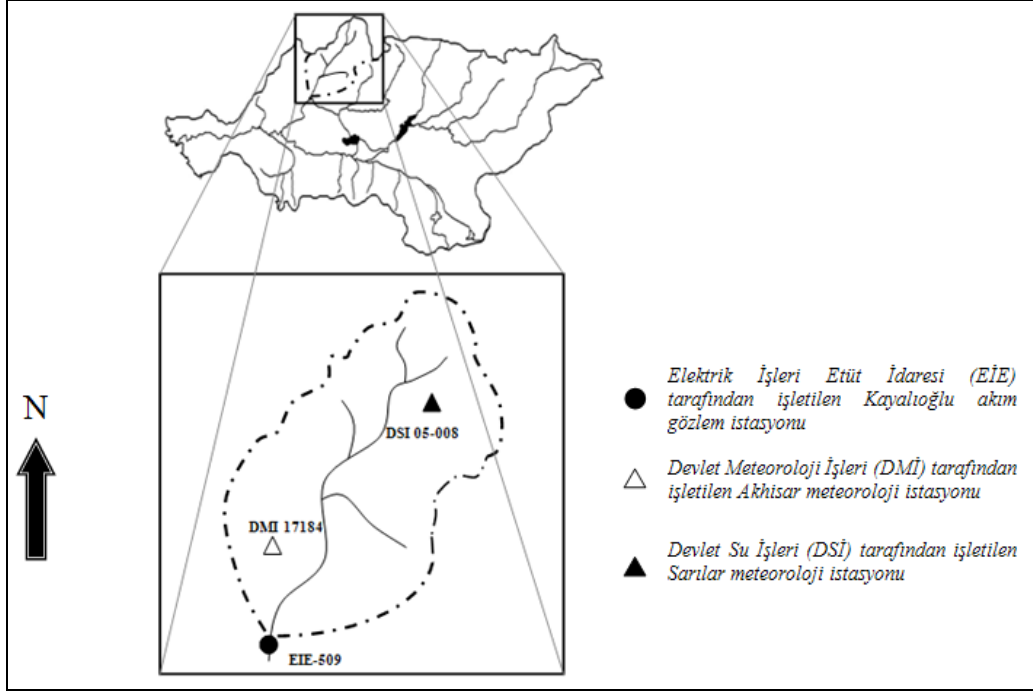
Bu performans ölçütlerinin genel performans değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Burada gösterildiği üzere, eğer bir modelin performans değerleri, $NS > 0.65$, $RSR \leq 0.60$, ve $PBIAS < \pm 15\%$ kriterlerini sağlıyorsa modelin başarısının iyi derecede olduğu yorumu yapılabilir. Bu durumda hazırlanan modelin akım türetmede kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tablo 1. NS, RSR ve PBIAS performans ölçütlerinin genel performans değerlendirmesi [11].

Performans Değerlendirmesi	NS	RSR	PBIAS (%)
Çok iyi	$0.75 < NS \leq 1$	$0 \leq RSR \leq 0.50$	$PBIAS < \pm 10$
İyi	$0.65 < NS \leq 0.75$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Yeterli	$0.50 < NS \leq 0.65$	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Yeterli değil	$NS \leq 0.50$	$RSR > 0.70$	$PBIAS \geq \pm 25$

4. Uygulama bölgesi ve veriler

Hazırlanan çalışmada, dinamik su bütçesi modeli Gediz Havzası’nda yer alan yaklaşık 900 km² yağış alanına sahip Medar Çayı’na ait aylık akışlara uygulanmıştır. Medar Çayı’nı temsil eden akışlar, DSİ tarafından işletilen 509 numaralı Kayalıoğlu akım gözlem istasyonunda gözlenen akışlar olup, çalışmada istasyonun 01.10.1961-01.09.2005 dönemine (1962-2005 su yılları) ait verileri kullanılmıştır. Uygulama havzasını temsil edeceği düşünülen yağış istasyonları incelendiğinde, havzanın içinde DMİ Akhisar (17184) ve DSİ Sarılar (05-008) istasyonları tespit edilmiştir. İstasyona ait yağış verilerinin aritmetik ortalaması alansal ortalama yağış serileri elde edilmiştir. Aylık ortalama sıcaklık değerleri olarak ise uzun dönem ve eksiksiz gözlemi bulunan DMİ Akhisar (17184) istasyonu verilerinden faydalanılmıştır. Potansiyel evapotranspirasyon değerleri ise aylık ortalama sıcaklığa ve istasyonun enlem derecesine ihtiyaç duyan Thornthwaite ampirik denkleminde hesaplanmıştır [12]. Şekil 5’de Medar Çayı’nın Gediz Havzası üzerindeki konumu ve uygulamada kullanılan akım ve meteoroloji istasyonları gösterilmektedir.



Şekil 5. Medar Çayı'nın ve kullanılan akım - meteoroloji gözlem istasyonlarının Gediz Havzası üzerindeki konumu

5. Bulgular

3. Bölümde detayları verilen dinamik su bütçesi modeli, MATLAB ortamında kodlanarak geliştirilmiştir. Bu aşamada hem Zhang ve ark. (2008) tarafından önerilen orijinal 4 parametrelili versiyon hem de yeraltı biriktirme sistemindeki modifikasyonu içeren 5 parametrelili versiyon değerlendirilmiştir. Kurulan modeller, zemin nemi ve yeraltısuyu başlangıç depolama değerleri olan $S(t=0)$ ve $G(t=0)$ değerlerini okuyarak simülasyonlara başlamakta ve her bir ay için su bütçesi bileşenlerini hesaplamaktadır. Başlangıç koşulları, model sonuçları ilk aylarda gerçek değerlere yakın olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada, Medar Çayı havzasını temsil eden 44 yıllık gözlemin ilk 22 yılı (1962-1983) kalibrasyon aşamasında, diğer 22 yıllık kısmı (1984-2005) verifikasyon aşamasında kullanılmıştır.

Modellerde parametreler HKO değerini minimum yapacak şekilde Newton-teğetler algoritması esas alınarak iteratif olarak belirlenmiş ve bulunan değerler Tablo 1'de verilen performans ölçütlerince kontrol edilmiştir. Kalibre edilen modellere ait parametreler Tablo 2'de, modellerin kalibrasyon ve verifikasyon dönemlerine ait performansları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 2. Kalibre edilen model parametreleri

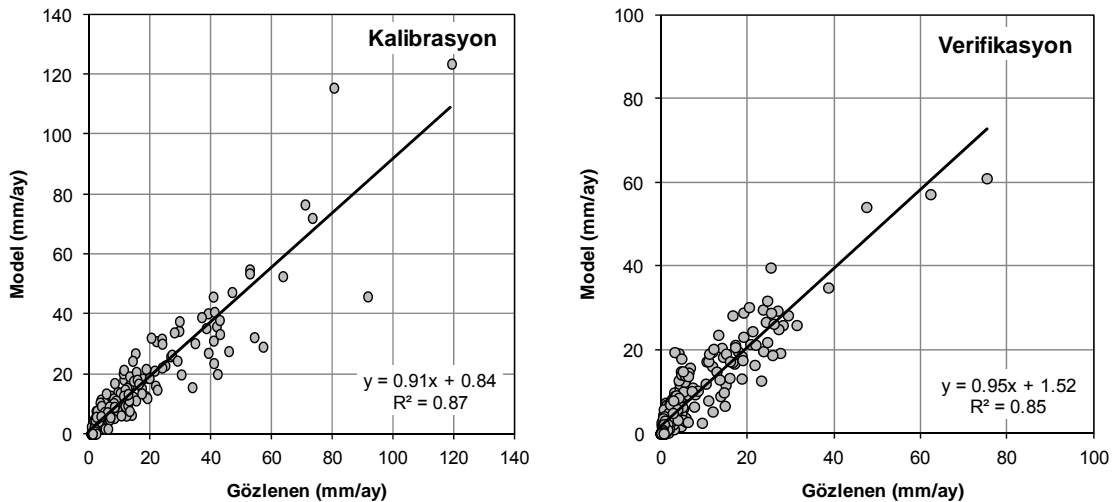
Model	S_{max}	α_1	α_2	d	ξ
4 parametrelili model	450.054	0.554	0.839	1.000	-
5 parametrelili model	398.673	0.616	0.643	0.860	0.537

Tablo 3. Modellerin (a) kalibrasyon ve (b) verifikasyon dönemlerine ait performanslar

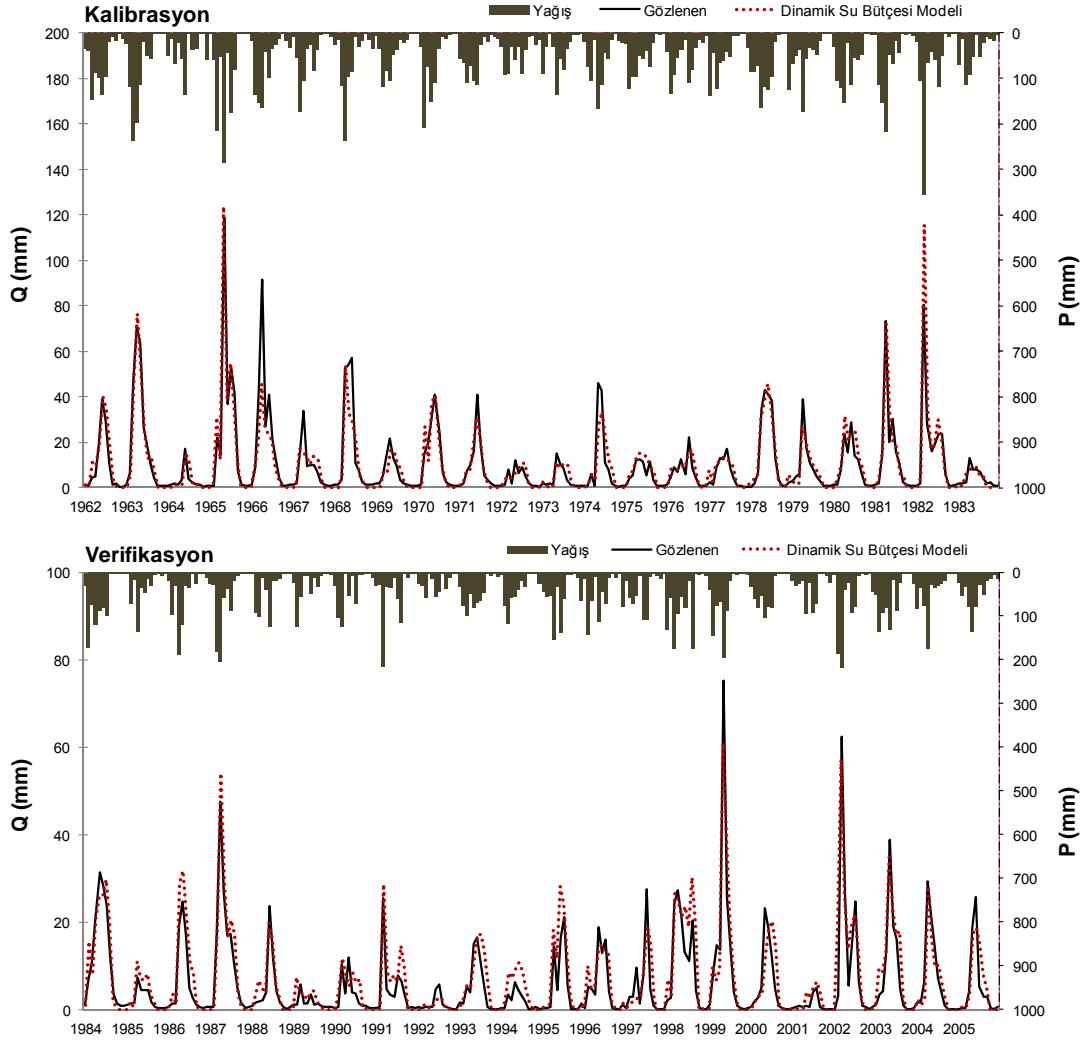
(a)						
Kalibrasyon						
Model	RMSE (mm)	R ² (-)	Adj. R ² (-)	NS (-)	RSR (-)	PBIAS (%)
Gözlenen	-	-	-	-	-	-
4 parametrelî	7.9699	0.7869	0.7853	0.7677	0.4820	3.94
5 parametrelî	5.8987	0.8741	0.8732	0.8728	0.3567	1.33

(b)						
Verifikasyon						
Model	RMSE (mm)	R ² (-)	Adj. R ² (-)	NS (-)	RSR (-)	PBIAS (%)
Gözlenen	-	-	-	-	-	-
4 parametrelî	5.9351	0.6878	0.6854	0.6349	0.6042	-5.87
5 parametrelî	4.0536	0.8543	0.8532	0.8297	0.4127	-19.44

Tablo 1’de verilen kriterlere göre, kalibrasyon döneminde 4 ve 5 parametrelî modeller “çok iyi” kategorisinde sonuçlar üretmişlerdir. Ancak orijinal modele ζ yeraltı biriktirme parametresinin eklenmesi ile model performansının önemli ölçüde artış gösterdiği görülebilmektedir. Bu durum verifikasyon döneminde de geçerliliğini korumuştur. 4 parametrelî model verifikasyon döneminde “yeterli” kategorisinde sonuç üretirken, 5 parametrelî model PBIAS hariç “çok iyi” kategorisine girmektedir. 5 parametrelî modelde 4 parametrelî modele göre RMSE ve RSR değerleri %32 oranında düşmüş; R² ve Adj. R² değerlerinde %17, NS katsayısında ise %19 artış elde edilmiştir. 5 parametrelî modelden edilen tahminlere ait saçılım diyagramları ve hidrograflar sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de sunulmaktadır. Şekil 6’ya bakıldığında model tahminlerinin $y=ax+b$ doğrusu etrafındaki dağılımı uygun görülmüştür. Burada a katsayılarının 1’e, b katsayılarının 0’a yakın olduğu görülebilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde ise birkaç pik ve düşük akışın dışında mevcut zaman serilerinde yeterli uyumun sağlandığı düşünülmektedir.



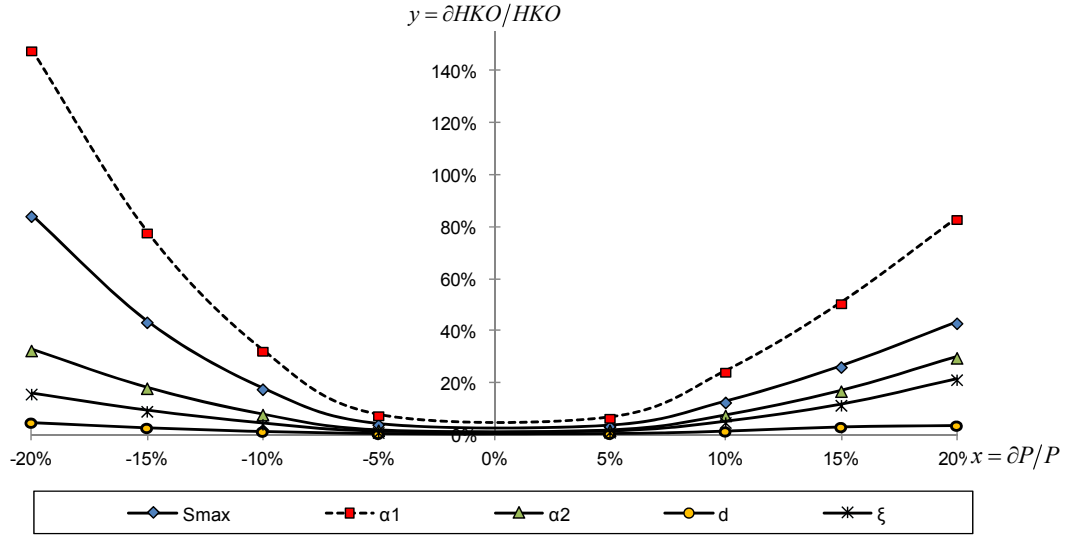
Şekil 6. Dinamik su bütçesi modelinden tahmin edilen akışlara ait saçılım diyagramları



Şekil 7. Dinamik su bütçesi modelinden tahmin edilen akışlara ait hidrograflar

5 parametrelili dinamik su bütçesi modeli performansının irdelenmesini takiben model parametrelerinin model çıktıları üzerindeki etkilerini açıklamak amacıyla, modele ait parametrelerin duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi, bir modelin çıktılarındaki değişimin niteliksel veya niceliksel olarak değişebilirlik faktörlerine göre nasıl dağıldığını incelemek ve model parametrelerini model tahminlerindeki hata paylarına göre sıralamak amacıyla yapılan çalışmalardır. Çalışmada klasik (lokal) nispi duyarlılık analizi yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, parametrelerden biri oransal olarak değiştirilirken, diğerleri ortalamasal değerlere eşit (sabit) tutulmaktadır [13, 14]. Çalışmada gerçekleştirilen duyarlılık analizlerinde, kalibre edilmiş modellerin P gibi bir parametresindeki oransal değişime ($\partial P/P$) karşılık, hata kareler ortalamalarındaki oransal değişimler ($S_{HKO} = \frac{\partial HKO}{HKO} / \frac{\partial P}{P}$) hesaplanarak, akışlar üzerinde en etkili model parametreleri nümerik olarak belirlenmiştir.

Bu maksatla, modellere ait parametreler -20% ile $+20\%$ değişim aralığında; $\Delta P/P=5\%$ 'lik nispi artımlarla değiştirilerek hata kareler ortalamalarındaki nispi değişimler incelenmiştir. Dinamik su bütçesi modelinin $\partial HKO/HKO$ değerlerine bağlı olarak oluşturulan lokal nispi duyarlılık eğrileri Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Dinamik su bütçesi modelinin hata kareler ortalaması için lokal nispi duyarlılık eğrileri

Şekil 8’de görüldüğü gibi, dinamik su bütçesi modelinin en hassas parametreleri α_1 ve S_{max} , en hassas olmayan parametresi ise d parametresidir. Optimizasyon süreci boyunca bu parametreler için farklı başlangıç değerleri seçilerek algoritmanın lokal minimum noktalara takılması ihtimali en aza indirilmiştir.

6. Sonuçlar

Çalışmaya ait bulgular değerlendirilerek elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- ✓ Çalışmada geliştirilen dinamik su bütçesi modeli, girdi olarak sadece aylık alansal ortalama yağış ve aylık potansiyel evapotranspirasyon değerlerine ihtiyaç duyduğundan pratik bir modelleme olanağı sunmaktadır.
- ✓ Yeraltısu biriktirme sisteminin modifikasyonu model performansına önemli bir katkı sağlamıştır.
- ✓ 5 parametre taşıyan modelin Medar Çayı’ndaki performansları göz önüne alındığında, uygulama bölgesinin aylık akımlarını başarıyla modelleyebildiği görülmüş ve 4 parametrelili türdeşine göre üstünlüğü vurgulanmıştır.
- ✓ Model akım gözlemi olmayan veya eksik gözlemi olan havzalarda akışların tamamlanması, yeraltı suyu akımının modellenmesi, iklim değişikliğinin akışlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gibi amaçlar için kullanılabilir.
- ✓ Hassas parametreler içerdiğinden kalibrasyonu iyi yapılmalıdır.

- ✓ Modelin ülkemizin farklı klimatolojik özelliklere sahip alanlarında da uygulanarak farklı parametrik yağış-akış modelleriyle kıyaslanması yararlı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) - Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Destek Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenen 114Y716 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne ve Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne sağladıkları verilerden dolayı bilhassa teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1]. Okkan, U., İklim değişikliğinin akarsu akışları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye. (2013).
- [2]. Okkan, U. ve Fıstıkoğlu, O., PMS ve GR2M Aylık Yağış-Akış Modelleri, VII. **Ulusal Hidroloji Kongresi**, 26-27 Eylül 2013, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 167-176, (2013).
- [3]. Okkan, U. ve Fıstıkoğlu, O., Evaluating Climate Change Effects on Runoff by Statistical Downscaling and Hydrological Model GR2M. **Theoretical and Applied Climatology**, 117(1-2), 343-361, (2014).
- [4]. Budyko, M.I., The Heat Balance of the Earth's Surface. **US Department of Commerce**, Washington, DC. (1958).
- [5]. Milly, P.C.D., Climate, soil water storage, and the average annual water balance. **Water Resour. Res.** 30, 2143–2156, (1994).
- [6]. Koster, R.D., Suarez, M.J., A simple framework for examining the interannual variability of land surface moisture fluxes. **J. Clim.** 12, 1911–1917, (1999).
- [7]. Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resour. Res.** 37, 701–708, (2001).
- [8]. Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y.Q., Shao, Q.X., Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework – model development and testing. **J. Hydrol.** 360 (1–4), 117–131, (2008).
- [9]. Atkinson, S.E., Woods, R.A., Sivapalan, M., Climate and landscape controls on water balance model complexity over changing timescales. **Water Resour. Res.** 38 (12), 1314. doi:10.1029/2002WR00148, (2002).
- [10]. Fu, B.P., On the calculation of the evaporation from land surface. **Sci. Atmos. Sin.**, 23–31, (1981) (in Chinese).
- [11]. Moriassi DN, Arnold JG, Van LiewMW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL., Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE**, 50, 885–900, (2007).
- [12]. Thornthwaite, C. W., An Approach toward a Rational Classification of Climate, **Geographical Review**, 38, 55-94, (1948).
- [13]. Haan, C.T., Statistical Methods in Hydrology (2nd. ed.). John Wiley & Sons, UK. (2002).
- [14]. McCuen, R. The role of sensitivity analysis in hydrologic modelling. **Journal of Hydrology**, 18, 37-53, (1973).