

## BAYES MODEL ORTALAMASI YÖNTEMİYLE KAVRAMSAL YAĞIŞ-AKIŞ MODELİ ÇIKTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Umut OKKAN  
Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 10145, Merkez-BALIKESİR  
umutokkan@balikesir.edu.tr

Umut KIRDEMİR  
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35430, Urla-İZMİR  
umutkirdemir@iyte.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 16.11.2015, Makalenin kabul tarihi: 20.06.2016)

### ÖZ

Hidrolojik modeller yağış-akış ilişkisinin eldesi, akım tahmini, meteorolojik değişkenliğin akışa olan etkilerinin ölçümünde etkili bir rol oynamaktadır. Herhangi bir havzada tek bir hidrolojik model kullanmak diğer modellere kıyasla daha iyi sonuçlar vermeyebilir. Hazırlanan çalışmada Gediz Havzası'nın toplam drenaj alanını büyük ölçüde temsil eden Gediz Nehri üzerindeki Muradiye akım gözlem istasyonunda gözlenen akımlar altı farklı kavramsal yağış-akış modeli ile modellenmiştir. Elde edilen çoklu model çıktıları Bayes Model Ortalaması (Bayesian Model Averaging (BMA)) yöntemi ile değerlendirilmiş ve havzayı temsil edebilme performanslarına göre ağırlıklandırılmışlardır. Ağırlıklandırma işlemi ile her bir modelin katkısı değerlendirilip yeni akış serileri türetilmiştir. BMA yöntemi ile elde edilen çıktılar tekil kavramsal yağış-akış modeli çıktıları ile karşılaştırıldığında, BMA yöntemiyle elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kavramsal yağış-akış modelleri, Bayes model ortalaması, Gediz Havzası

### EVALUATION OF CONCEPTUAL RAINFALL-RUNOFF MODEL OUTPUTS BY MEANS OF BAYESIAN MODEL AVERAGING METHOD

### ABSTRACT

Hydrologic models play an effective role on acquisition of rainfall-runoff relationship, prediction of flow and measuring of the impacts of meteorological variability on runoff. Using single hydrologic model in any basin may not give satisfied results when it is compared to other models. In the study prepared, the flows observed at Muradiye streamflow gauging station located at the Gediz River, which represents the drainage area of Gediz Basin considerably, were modeled by means of six different conceptual rainfall-runoff models. The acquired multi-model outputs were assessed by means of Bayesian model averaging (BMA) method, and then weighted depending on representability performances of basin. By weighting process the contribution of each model was evaluated and the new runoff series were reproduced. When the outputs derived from BMA application was compared to those of single conceptual rainfall-runoff models, it was observed that the results related to BMA method were more reliable.

**Keywords:** Conceptual rainfall-runoff models, Bayesian model averaging, Gediz Basin

## 1 GİRİŞ

Akarsu havzalarındaki yağış-akış ilişkisinin elde edilmesi, akım rasatlarında eksiklik olan bölgelerde akım tahmini, iklim değişikliğinin akarsu akışlarına olası etkilerinin irdelenmesi gibi konular kapsamında su bütçesi esaslı kavramsal türden hidrolojik modellerden yararlanılmaktadır. Hidroloji literatüründe araştırmacılar yaygın olarak belli bir hidrolojik model tercih ederek analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Mevcut çalışmalar içerisinde herhangi bir modelin diğer modellerden her zaman çok daha iyi sonuç verebileceği iddia edilmemiştir (Duan vd., 2007). Çünkü söz konusu sonuçlar havzanın büyüklüğüne, klimatolojik rejimine, diğer fiziki coğrafya özelliklerine, toplanan verilerin kalitesine ve rasat uzunluğu gibi etkenlere bağlı değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca tekil bir hidrolojik model referans alınarak yapılan analizler belirsizlik öğeleri taşıyabilir ve modelden üretilen tahminler yeterli güvenilirlikte olmayabilir. Bu nedenle çoklu model çıktılarının sonuçlarını değerlendiren stratejilerin (multi-model ensemble) ortaya konması hidrolojik tahmin türetme safhasında daha tutarlı bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Söz konusu yaklaşım ile herhangi bir modelin sistematik hatasının tahminlere yansıma ihtimali de en aza indirgenmektedir. Shamseldin vd., (1997) çoklu model kullanımı kapsamında ilk uygulamayı yapan araştırmacılar. Shamseldin and O'Connor (1999) farklı yağış-akış modeli çıktıları yapay sinir ağları kullanarak ağırlıklandırmışlardır. Raftery vd. (2005) ise bu tarz regresyon esaslı yöntemler ile tahmin edilen ağırlıkların yorumlanmasının güç olduğunu savunmuştur. Bu bakımdan model çıktılarının ağırlıklandırılması aşamasında Bayesian Model Ortalaması (Bayesian Model Averaging (BMA)) yönteminin kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Söz konusu yaklaşım modeller arası varyansı hesaba katmakta ve tahmini belirsizliğin tanımlanmasında daha gerçekçi sonuç üretmektedir. Yöntemde ağırlıklar pozitif ve toplamı 1 olacak şekilde kalibre edilmekte ve bu ağırlıklar göreceli model performanslarını yansıtmaktadır. Çeşitli bilimsel çalışmalarda BMA yönteminin diğer çoklu model yöntemlerine göre üstünlüğü vurgulanmıştır (Clyde, 1999; Viallefont vd., 2001; Raftery ve Zheng, 2003; Raftery vd., 2005; Ellison, 2004). Bu çalışmada Gediz Havzası'nda yer alan Muradiye akım gözlem istasyonunda gözlenen akımlar 6 farklı kavramsal özellikte yağış-akış modeli vasıtasıyla modellenmiştir. Bu

modellerin çıktıları BMA yöntemi ile değerlendirilerek sonuçların performansı karşılaştırılmıştır.

## 2 ÇALIŞMADA KULLANILAN KAVRAMSAL YAĞIŞ-AKIŞ MODELLERİ

### 2.1 Modifiye Thornthwaite Su Bütçesi Modeli (TW-WBM)

Bu model, belli varsayımlar altında akarsu havzasını temsil eden biriktirme sistemleri ile bu sistemlerin girdilerine ve çıktılarına hidrolojik süreklilik ilkesinin uygulanması ile geliştirilmiş bir modeldir. Modelin kavramsal akış şeması Şekil 1 de görülmektedir. Excel ve Visual Basic Programlama dili kullanılarak geliştirilen (Fıstıkoğlu ve Harmancıoğlu, 2001; Fıstıkoğlu ve Okkan, 2010; Okkan, 2013) parametrik su bütçesi modelinde  $\theta$  ve  $\Omega$  parametreleri yardımı ile aylık ortalama sıcaklık değerleri (T) kullanılarak aylık potansiyel evapotranspirasyon tanımlanabilmektedir (Denklem 1). Ancak sunulan çalışmada potansiyel evapotranspirasyon Thornthwaite'in ampirik denkleminde türetilmiştir. Böylece modeller parametre bakımından daha ekonomik hale getirilmiştir.

$$E_{pot} = \theta e^{\Omega T} \quad (1)$$

Yüzeğe düşen aylık toplam yağışın (P),  $\alpha$  yüzeysel akış katsayısına bağlı olarak  $\alpha.P$  kadarlık kısmı yüzeysel (dolaysız) akışa yönlendirilmektedir (Denklem 2).

$$Q_{s,t} = \alpha P_t \quad (2)$$

Geriye kalan kısım ise sızma (infiltrasyon) ile yüzey altı depolama sistemine katılmaktadır (Denklem 3).

$$Inf_t = (1 - \alpha)P_t \quad (3)$$

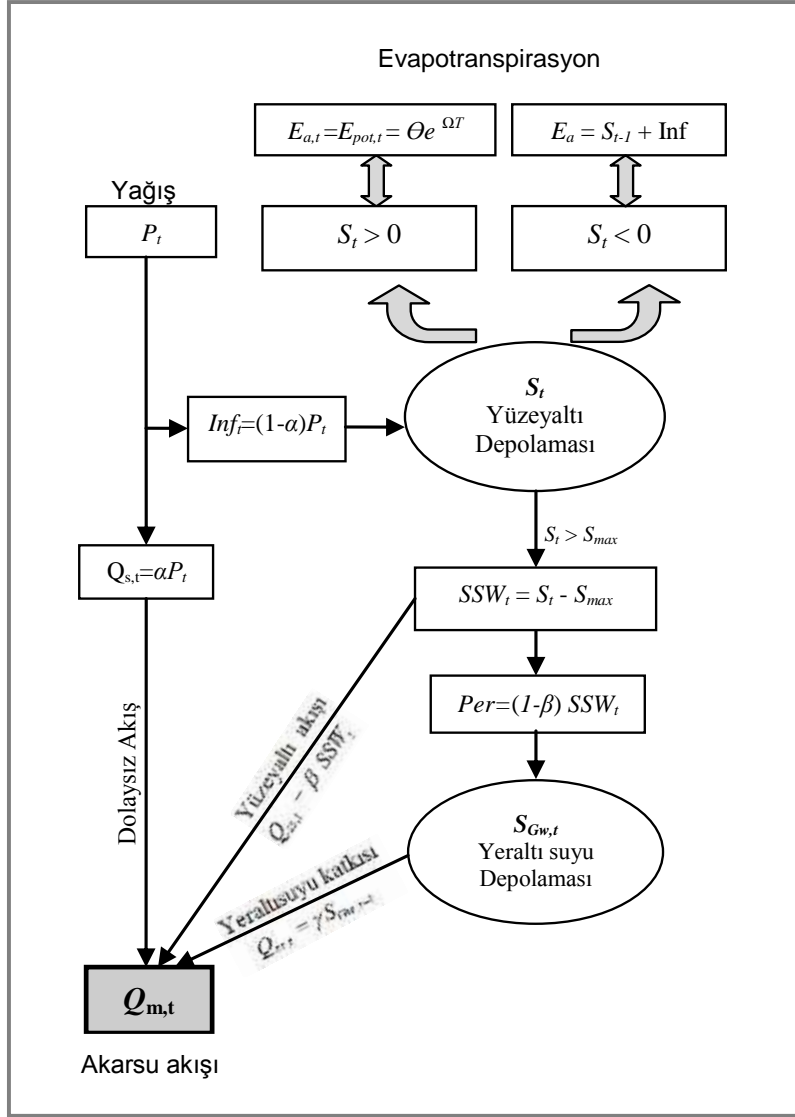
Sızma ( $Inf_t$ ) ve potansiyel evapotranspirasyon ( $E_{pot,t}$ ) hesaplandıktan sonra genel süreklilik ilkesi uyarınca,  $t$  ayında biriktirme sistemindeki depolama durumu aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir (Denklem 4).

$$S_t = S_{t-1} + Inf_t - E_{pot,t} \quad (4)$$

$S_t > 0$  ise,  $t$  ayındaki gerçek evapotranspirasyon ( $E_{a,t}$ ) değeri potansiyel evapotranspirasyona ( $E_{pot,t}$ ) eşit olmaktadır (Denklem 5).  $S_t < 0$  ise,  $t$  ayındaki gerçek evapotranspirasyon ( $E_{a,t}$ ) önceki aydan kalan zemin nemi ve  $t$  ayındaki sızma toplamı ile sınırlı kalmaktadır (Denklem 6).

$$S_t > 0; E_{a,t} = E_{pot,t} \quad (5)$$

$$S_t < 0; E_{a,t} = S_{t-1} + Inf_t \quad (6)$$



**Şekil 1 - TW-WBM Modelinin İşleyişi (Fıstıkoğlu ve Okkan, 2010)**

Yüzey altı depolamasının maksimum değeri olan ve aynı zamanda modelin bir parametresi olarak tanımlanan  $S_{max}$  değerinin aşılması durumunda  $SSW_t = S_t - S_{max}$  kadar depolama fazlalığının  $\beta$  oranındaki kısmı yüzey altı bileşeni olarak ( $Q_{ss}$ ) akarsu yatağına katılmaktadır (Denklem 7). Denklem 7'de  $\beta < 1$  yüzeyaltı akış parametresidir.

$$Q_{ss,t} = \beta SSW_t = \beta (S_t - S_{max}) \quad (7)$$

Depolama fazlalığının geri kalan kısmı perkolasyon yoluyla yeraltı suyu depolama sistemine aktarılmaktadır (Denklem 8).

$$Per_t = (1-\beta)SSW_t = (1-\beta)(S_t - S_{max}) \quad (8)$$

Akarsu akışlarının yeraltı suyundan beslenen kısmı doğrusal hazne varsayımı uyarınca, bir önceki ayın aktif yeraltı suyu depolamasına ( $S_{Gw,t-1}$ ) bağlı olarak elde edilmektedir.

$$Q_{Gw,t} = \gamma S_{Gw,t-1} \quad (9)$$

Bu eşitlikte  $\gamma$  doğrusal yeraltı suyu haznesi parametresidir.

Yeraltı biriktirme sisteminin  $t$  ayındaki aktif kapasitesi  $S_{Gw,t}$  Denklem 10 ile tanımlanmaktadır.

$$S_{Gw,t} = (S_{Gw,t-1} + Per_t) \xi - Q_{Gw,t} \quad (10)$$

Bu denklemde  $\xi$ , yeraltı biriktirme sistemi parametresidir.

Böylece, herhangi bir  $t$  ayında akarsu yatağındaki toplam akış Denklem 11'den;

$$Q_{m,t} = \alpha P_t + \beta SSW_t + \gamma S_{Gw,t-1} \quad (11)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir.

## 2.2 abcd ve abcde Modeli

### 2.2.1 abcd Modeli

Parametrik abcd modeli belli varsayımlar altında ikisi dolaysız akışı, diğer ikisi yeraltı suyu akışını temsil eden dört parametreye sahiptir. Thomas (1981) tarafından önerilen modelin yüzeye düşen aylık toplam yağış ( $X_i$ ) ve aylık potansiyel evapotranspirasyon ( $V_i$ ) olmak üzere iki temel girdisi bulunmaktadır. Şekil 2'de ifade edilen su bütçesi yaklaşımına göre, aylık toplam yağış ( $X_i$ ) girdisinin akış (dolaysız-dolaylı), evapotranspirasyon, zemin nemi- yeraltı suyu depolaması bileşenlerine paylaşılması yağışın niceliğine ( $X_i$ ), potansiyel evapotranspirasyona ( $V_i$ ), önceki aydan kalan zemin nemi ( $S_{i-1}$ ) ve önceki aydan kalan yeraltı suyu depolaması ( $G_{i-1}$ ) bağlı olarak belirlenmektedir. Denklem 12 söz konusu paylaşımı kontrol etmektedir.

$$y_i = \frac{x_i^* + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{x_i^* + b}{2a}\right)^2 - \frac{b x_i^*}{a}} \quad (12)$$

Burada  $y_i$  aylık evapotranspirasyon ( $E_i$ ) ve zemin nemi depolamasının ( $S_i$ ) toplamıdır. ( $y_i = S_i + E_i$ ).  $x_i^*$  ise aylık yağış ve bir önceki aydan kalan zemin neminin toplamıdır ( $x_i^* = X_i + S_{i-1}$ ).  $b$  parametresi yeraltı suyu tablasının üzerindeki doymamış bölgedeki depolamanın üst limitidir.  $x_i^*$  arttığında  $y_i$  değeri  $b$  parametresine yakınsar.  $a$  ise zemin tamamen doygunluğa erişmeden akışın oluşma eğilimini temsil eder ( $0 < a \leq 1$ ).  $b$  parametresine bağlı olup aralarında  $a=2b/y(b)-(b/y(b))^2$  ilişkisi bulunmaktadır. Havzanın topografyası büyük drenaj yoğunluğuna olanak sağlıyorsa  $a$  parametresi de küçük değerler alacaktır.  $x_i^* - y_i$  farkı yüzeysel (dolaysız) akış ve yeraltı biriktirme sistemine katılan suyun toplamını temsil etmektedir. Modelde ( $x_i^* - y_i$ ) miktarındaki suyun  $(1-c)$  kadar kısmı yüzeysel (dolaysız) akışı oluşturmaktadır (Denklem 13.a). Geriye kalan kısmı ise yeraltı biriktirme sistemine ( $G_{recharge}$ ) geçmektedir (Denklem 13.b).

$$Q_{d,i} = (1-c)(x_i^* - y_i^*), \quad (0 < c \leq 1) \quad (13.a)$$

$$G_{recharge,i} = c(x_i^* - y_i^*) \quad (13.b)$$

Modelde zemin neminin zamana karşı azalışının zemin neminin doygunluk derecesini temsil eden "S/b" oranına ve potansiyel evapotranspirasyona ( $V_i$ ) bağlı olduğu varsayılmaktadır (Denklem 14).

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{V_i}{b} \times S \quad (14)$$

Denklem 14, Denklem 15, Denklem 16'deki şekliyle düzenlendikten sonra modeldeki zemin nemi bileşeni Denklem 17 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\int_{y_i}^{S_i} \frac{dS}{S} = -\frac{V_i}{b} \times \int_{i-1}^i dt \quad (15)$$

$$\ln\left(\frac{S_i}{y_i}\right) = -\frac{V_i}{b} \quad (16)$$

$$S_i = y_i \times \exp\left(-\frac{V_i}{b}\right) \quad (17)$$

Modelde, doğrusal hazne kabulü ile yeraltı suyu depolamasının ( $G_i$ )  $d$  kadar kısmı ise yeraltı suyu akışını oluşturmaktadır (Denklem 18).

$$Q_{Gv,i} = d \times G_i, \quad (0 < d \leq 1) \quad (18)$$

Yeraltı suyunda kütle korunumu ilkesine göre Denklem 19.a'da gösterilen eşitlik yazılabilir ve Denklem 19.b'deki şekliyle düzenlenebilir.

$$G_i = G_{i-1} + G_{recharge,i} - Q_{Gv,i} \quad (19.a)$$

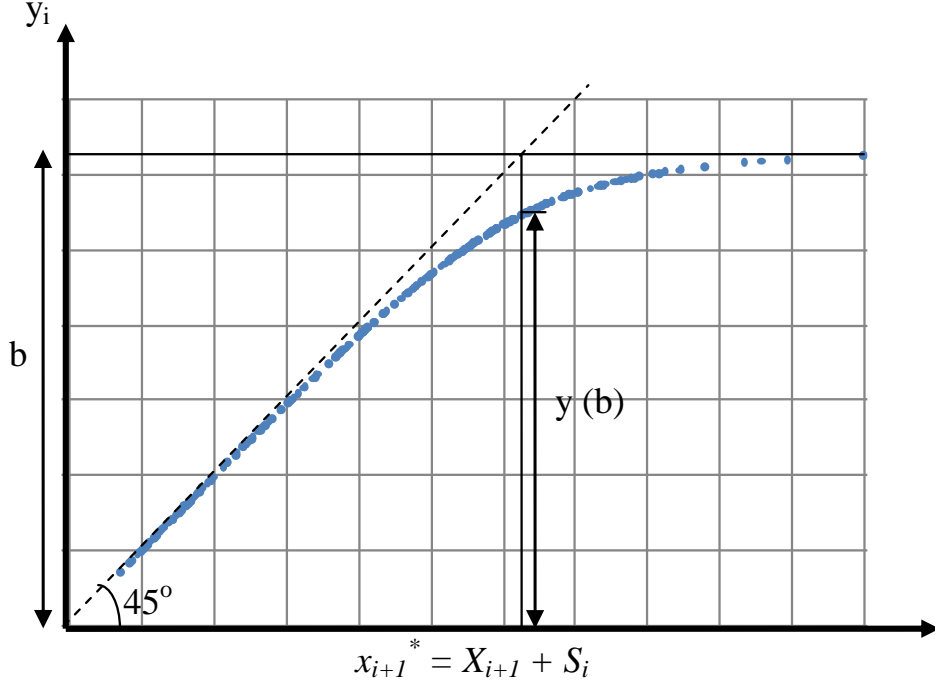
$$G_i + dG_i = G_{i-1} + G_{recharge,i} \quad (19.b)$$

Böylece, yeraltı suyu depolaması ( $G_i$ ) yeraltı suyu depolamasına katılan suya ve bir önceki aydan kalan yeraltı suyu depolamasına bağlı olarak elde edilebilmektedir (Denklem 20).

$$G_i = \frac{G_{i-1} + G_{recharge,i}}{(1+d)} \quad (20)$$

Modelde havza çıkışındaki toplam akış ise Denklem 21 ile elde edilmektedir.

$$Q_{m,i} = Q_{d,i} + Q_{Gv,i} \quad (21)$$



Şekil 2 - abcd modelinde su bütçesi elemanlarının tanımlanması

### 2.2.2 abcde Modeli

abcd modelindeki  $0 \leq d \leq 1$  tanım aralığında olan  $d$  parametresi model kalibrasyon sürecinde hatayı düşürmek için 0 değerine oldukça yakınsamakta, yeraltısuyu depolamasındaki suyun akışa geçme mekanizması bir gecikme ile tanımlanmadığından  $d$  parametresinin küçük değerleri için yeraltısuyu depolaması kümülatif olarak artmaktadır. Bu nedenle Denklem 18 için bir modifikasyon önerilmiş (Denklem 22) ve modele bir parametre daha atanarak yeraltısuyu depolaması  $G_i$  Denklem 23'deki haliyle tanımlanmıştır.

$$Q_{Gw,i} = d \times G_{i-1}, \quad (0 < d \leq 1) \quad (22)$$

$$G_i = [G_{i-1} + G_{recharge,i}] \cdot e - Q_{Gw,i} \quad (23)$$

Burada  $e$ , yeraltı biriktirme parametresidir.  $e=1$  değeri için  $G_i$  ifadesi Denklem 19.a eşitliği ile aynıdır. Su bütçesi elemanları söz konusu modifikasyona göre elde edildikten sonra modellenmiş toplam akış yine Denklem 21 yardımıyla hesaplanmaktadır.

### 2.3 ASG-WB Modeli

Abulohom vd. (2001) su bütçesi elemanlarını regresyon esaslı fonksiyonlar halinde tanımlayarak (Vandewiele vd., 1992) ve akışın oluşma rutini yani diğer bir tanımla gecikme (lag) faktörünü de dikkate alarak bir havzadaki yağış-akış ilişkisini modellemeye yarayan pratik bir parametrik model (ASG-WB) önermişlerdir. Model, yazarların baş harfleri dikkate alınarak kısaltılmıştır. Modelde akış,

dolaysız ve taban akışı olmak üzere iki aşama ele alınmıştır. Dolaysız akış ( $R_d$ ) modelde Vandewiele vd. (1992) referans alınarak tanımlanmıştır (Denklem 24).

$$(R_d)_j = a_1 \times (m_{j-1})^{b_1} \times (P_a)_j \quad (24)$$

Burada  $a_1$  ve  $b_1$  dolaysız akış fonksiyonuna ait regresyon parametreleridir.  $m_{j-1}$  j. aydan önceki aya ait zemin nemi depolama miktarıdır.  $(P_a)_j$  ise j. aya ait etkili (efektif) yağış olarak tanımlanmakta ve Denklem 25 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$(P_a)_j = P_j - (E_a)_j \left\{ 1 - \exp \left[ -P_j / (E_a)_j \right] \right\} \quad (25)$$

Burada  $P_j$  ve  $(E_a)_j$  sırasıyla j. ayın yağış ve gerçek evapotranspirasyon değerleridir.

Modelde taban akışı  $(R_g)_j$  ise önceki aydan kalan zemin nemi depolamasının fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır (Denklem 26).

$$(R_g)_j = a_2 \times (m_{j-1})^{b_2} \quad (26)$$

Vandewiele vd. (1992) ( $a_1$ ,  $b_1$ ) ve ( $a_2$ ,  $b_2$ ) parametre çiftlisinin aralarında yüksek korelasyona sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu nedenle bu parametreler  $b_1 = \{ 0, 0.5, 1 \text{ veya } 2 \}$  ve  $b_2 = \{ 0.5, 1 \text{ veya } 2 \}$  değerlerinden birini alacak şekilde sabit değerler alabilecek ve bu bakımdan kalibre edilen parametre sayısı azalacaktır.

Modelde j. ayın sonundaki zemin nemi içeriği ( $m_j$ ) ise Denklem 27 yardımıyla tahmin edilmektedir.

$$m_j = m_{j-1} + P_j - (E_a)_j - (R_c)_j \quad (27)$$

Burada  $(R_c)_j$  havza çıkışındaki toplam akışı temsil etmektedir.

Modelde gerçek evapotranspirasyon, potansiyel evapotranspirasyon  $(E_p)_j$  ve mevcut su içeriği  $w_j$  değerlerine bağlı olarak tahmin edilmektedir (Denklem 28).

$$(E_a)_j = \min \left[ (E_p)_j \left( 1 - a_3^{w_j/(E_p)_j} \right), w_j \right] \quad (28)$$

Vandewiele ve Win (1998) tarafından da kullanılan denkleme göre mevcut depolanan su miktarı  $(w_j = P_j + m_{j-1})$  potansiyel evapotranspirasyona bağlı olarak hesaplanan değerden daha az ise gerçek evapotranspirasyon mevcut su içeriğinden karşılır.  $w_j$  değeri daha büyük ise gerçek evapotranspirasyon  $(E_p)_j(1 - a_3^{w_j/(E_p)_j})$  fonksiyonu ile bulunan değere eşit alınmaktadır.

Havza çıkışındaki akışı belirlemek için Abulohom vd. (2001) akış bileşenlerinin gecikme (lag) faktörü dikkate alınarak hesaplanması gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmada doğrusal hazne yaklaşımı esas alınarak Muskingum metodu ile gecikme etkisi hesaba katılmıştır (Denklem 29).

$$Q_j = c_0 \times I_j + c_1 \times I_{j-1} + c_2 \times Q_{j-1} \quad (29)$$

Burada  $Q_j$  j. ayın sonundaki akışı,  $Q_{j-1}$  bir önceki aya ait akışı,  $I_j$  j. ayın sonundaki tahmini akışı,  $I_{j-1}$  bir önceki aya ait tahmini akışı temsil etmektedir.  $c_0$ ,  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları ise gecikme zamanına ( $k$ ) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 30, Denklem 31 ve Denklem 32).

$$c_0 = \frac{0.5}{k + 0.5} \quad (30)$$

$$c_1 = c_0 \quad (31)$$

$$c_2 = \frac{k - 0.5}{k + 0.5} \quad (32)$$

Modelde yüzeysel akışı ve taban akışı bileşenleri ayrı ayrı Denklem 29' da verilen ifadeye tabi tutularak havza çıkışındaki toplam akış hesaplanmaktadır. Modelin işleyiş mekanizması Abulohom vd. (2001) tarafından özetlenmiştir. Burada  $k_1$  yüzeysel akışı,  $k_2$  taban akışını temsil eden gecikme zamanları olarak modelde kalibre edilir parametreler olarak tanımlanmıştır. Özetle modelde  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $k_1$  ve  $k_2$  olmak üzere 5 adet parametrenin kalibrasyonu gerekmektedir.

## 2.4 PMS ve GR2M Modelleri

PMS (Parent Model Scheme) modeli, Makhlof ve Michel (1994) tarafından geliştirilen aylık modelden ve günlük GR4J (Perrin vd., 2003) isimli modelden türetilmiştir. Zemin nemi fonksiyonu GR4J modeline oldukça benzemekte olup modelin işleyiş mekanizması Şekil 3' de verilmektedir. Modelde  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  ve  $X_5$  ile simgelenen 5 parametre mevcuttur.

Yağışa ve zemin nemi (su tutma) kapasitesine bağlı olan  $S_1$  aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}}; \quad \varphi = \tanh \left( \frac{P}{X_1} \right) \quad (33)$$

Burada  $X_1$  mm cinsinden maksimum depolama kapasitesidir. Böylece artık yağış değeri (dolaysız akış yüksekliği)  $P_1$  hesaplanabilmektedir.

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (34)$$

Potansiyel evapotranspirasyonun ( $E_{pot}$ ) da sistemde hesaba katılması ile  $S_1$  bileşeni  $S_2$  formuna dönüştürülmektedir.

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi \left( 1 - \frac{S_1}{X_1} \right)}; \quad \psi = \tanh \left( \frac{E_{pot}}{X_1} \right) \quad (35)$$

Başlangıç zemin nemi değerinin ilk ay için model ve gözlenmiş akım değerlerinin birbirine yakın olması şartıyla belirlenmesinden sonra, yeni zemin nemi değeri diğer aylar için aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{S_2}{\left[ 1 + \left( \frac{S_2}{X_1} \right)^{X_2} \right]^{1/X_2}} \quad (36)$$

Burada  $X_2$  pozitif bir katsayı olmak üzere bir diğer bileşen olan (zemin nemi biriktirme sistemindeki fazla su)  $P_2$  ise

$$P_2 = S_2 - S \quad (37)$$

denkliği ile hesaplanmaktadır.

Şekil 3 incelendiğinde  $P_1$  ve  $P_2$  değerlerinin toplamının net yağışı ( $P_3$ ) temsil ettiği görülmektedir. Modelde net yağışın  $X_3$  kadar bir kısmı akışın ilk bileşenini oluşturmakta ( $Q_1 = X_3 P_3$ ), geriye kalan kısım ise kapasitesi  $R$  olan ikincil hazneye yönlendirilmektedir. Başlangıç zemin neminde olduğu gibi ikincil haznenin başlangıç depo değeri de ilk ay için

model ve gözlenmiş akım değerlerinin birbirine yakın olması şartıyla belirlenmektedir.

$$R_1 = R + (1 - X_3)P_3 \quad (38)$$

İkinci debi bileşeni Denklem 38 ile hesaplanan  $R_1$  bileşenine ve  $X_4$  parametresine bağlı olarak belirlendikten sonra (Denklem 39), ikinci haznenin yeni depolama değeri ( $R$ ), süreklilik ilkesinden hesaplanabilmektedir (Denklem 40).

$$Q_2 = \frac{R_1^2}{R_1 + X_4} \quad (39)$$

$$R = R_1 - Q_2 \quad (40)$$

$Q_1$  ve  $Q_2$  debi bileşenlerinin  $X_5$  oranındaki kısmı model akışlarını oluşturmakta; geri kalan kısmın havza dışına boşaldığı kabul edilmektedir.

$$Q = X_5(Q_1 + Q_2) \quad (41)$$

Mouelhi vd. (2006) PMS modelinin birçok havzada uygulanmasıyla birlikte model parametrelerinin azaltılabileceğini göstermişlerdir. Bazı istatistiksel performans kriterlerinin karşılaştırılması sonucu  $X_2$ ,  $X_3$  ve  $X_4$  parametreleri modelden atılmıştır. Bazı kabuller ve bileşenlerin birleştirilmesi ile elde edilen basitleştirilmiş GR2M modelinin işleyiş mekanizması Şekil 4' de verilmektedir. Modelin başka bir havza üzerindeki uygulaması Okkan ve Fistikoglu (2014) tarafından da sunulmuştur.

## 2.5 Budyko Yaklaşımına Dayanan Dinamik Su Bütçesi Modeli (Dyn-WBM)

Budyko (1958), yağıştan tahmin edilen su içeriğine ve evapotranspirasyona bağlı yıllık zaman ölçekli bir su bütçesi eşitliği önermiştir (Denklem 42).

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[ 1 + \left( \frac{E_0}{P} \right)^{1-\alpha} \right]^{1-\alpha} \quad (42)$$

Burada  $E_0$  potansiyel evapotranspirasyonu (=EPOT),  $P$  yağışı,  $\alpha$  tanım aralığı (0,1) olan model parametresini temsil etmektedir. Buradaki  $E_0/P$  ifadesi ise kuraklık indeksi (aridite) olarak bilinmektedir. Denklem 42'ye göre sabit bir  $E_0/P$  oranı için  $\alpha$  arttıkça evapotranspirasyon etkinliği de artar. Denklem 42  $i$ .zaman için Denklem 43'teki şekliyle yazılarak  $F_u$  eğrisi olarak tanımlanmaktadır (Fu, 1981).

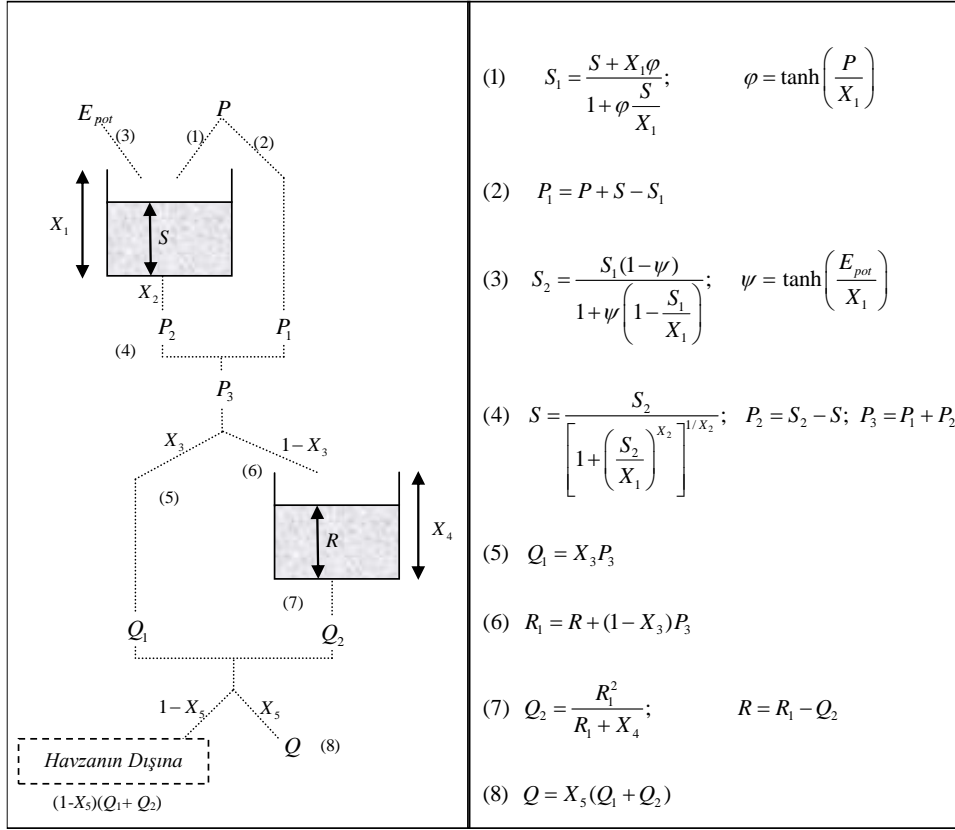
$$\left( \frac{ET}{P} \right)_i = F \left( \left( \frac{E_0}{P} \right)_i; \alpha \right) \quad (43)$$

Denklem 42 düzenlenerek Denklem 44'teki ifade yazılabilir. Kararlı hal kabulüne göre havzadaki yıllık akım için  $Q=P-ET$  kabul edilirse, Denklem 44'deki ifadede her iki tarafın  $(1-\alpha)$  ile üssü alınıp  $(P-ET)$  fark ifadesi yerine  $Q$  yazıldığında yıllık akım ( $Q$ ) eşitliği elde edilmektedir (Denklem 45).

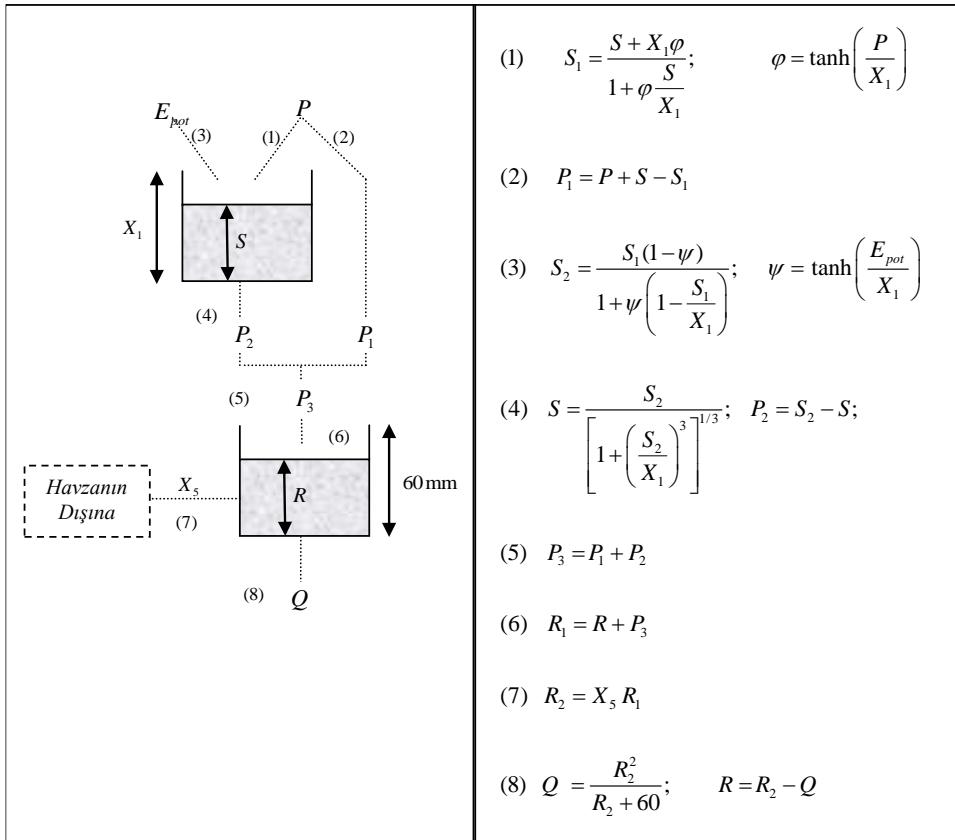
$$P^{1-\alpha} + E_0^{1-\alpha} = (P + E_0 - ET)^{1-\alpha} \quad (44)$$

$$Q_i = \left[ P_i^{1-\alpha} + E_{0,i}^{1-\alpha} \right]^{1-\alpha} - E_{0,i} \quad (45)$$

Yıllık zaman ölçeğinden aylık zaman ölçeğine geçildiğinde yağıştaki, potansiyel evapotranspirasyondaki ve depolamadaki değişkenliklerin dikkate alınması gerekmektedir. Zhang vd. (2008) bu durumu kanıtlamak için Denklem 45'de verilen yıllık su bütçesi eşitliğini aylık verilere uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, aylık verilere uygulanan yıllık su bütçesi modelinin aylık akımları temsil etmedeki başarısı zayıf kalmıştır. Tahmini akımların yağışlara oldukça duyarlı olduğu tespit edilmiş; model tahminleri gözlenen akımlara kıyasla oldukça büyük çıkmıştır. Bu sonuçlar, ilave süreçlerin de model işleyişine yansıtılmasını gerekli kılmıştır. Bu maksatla, Zhang vd. (2008) Budyko eğrisini esas alarak dinamik su bütçesi modeli olarak adlandırdıkları modeli ortaya koymuşlardır. Bu yöntem Okkan ve Kırdemir (2016) tarafından da kullanılmıştır.

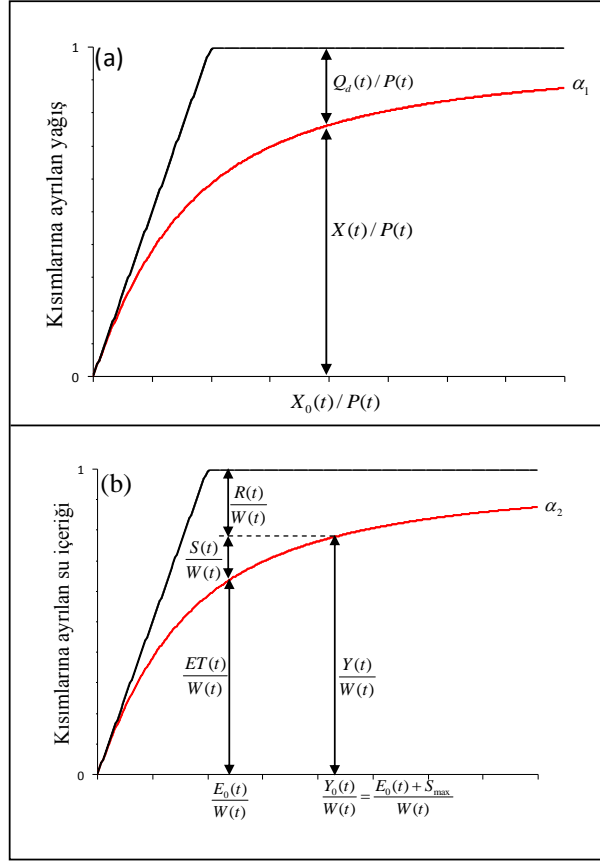


Şekil 3 - PMS modelinin işleyiş mekanizması (Mouelhi vd., 2006)



Şekil 4 - GR2M modelinin işleyiş mekanizması (Mouelhi vd., 2006)





Şekil 5 - Yağışın bileşenlerine ayrılması (a), mevcut suyun kısımlarına ayrılması (b)

Bu modelde havza, zemin nemi ve yeraltı suyu 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 46, Şekil 5a).

$$P(t) = Q_d(t) + X(t) \quad (46)$$

Burada, gerçek evapotranspirasyon  $ET(t)$ , zemin nemindeki değişim  $S(t)-S(t-1)$  ve yeraltı suyu 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 47).

$$X_0(t) = S_{max} - S(t-1) + E_0(t) \quad (47)$$

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.

$X_0(t)/P(t) \rightarrow 0$  için (aşırı sulak) ise  $X(t) \rightarrow X_0(t)$  limit değerine yakınsar.  $F_u$  fonksiyonu

$X_0(t)/P(t)$  oranına uyarlanarak  $X(t)$  hesaplanabilmektedir (Denklem 48, Şekil 5a).

$$X(t) = P(t) \cdot F\left(\frac{X_0(t)}{P(t)}; \alpha_1\right) \quad (48)$$

Burada  $\alpha_1$  dolaysız akış haricindeki su bütçesi elemanları için tutulan su miktarını kontrol eden model parametresidir.  $X(t)$  hesaplandıktan sonra akımın dolaysız bileşeni Denklem 46'dan elde edilmektedir.

Bir önceki aydan kalan zemin nemi ile  $X(t)$  toplamı  $t$ . ayda havzada mevcut bulunan su miktarını ( $W(t)$ ) temsil etmektedir (Denklem 49).

$$W(t) = S(t-1) + X(t) \quad (49)$$

Bu mevcut suyun bir kısmı evapotranspirasyona ayrılacak, bir kısmı zemin nemi depolamasında kalacak, geri kalan kısmı ise yeraltı suyu depolama sistemini besleyecektir (Denklem 50, Şekil 5b).

$$W(t) = ET(t) + S(t) + R(t) \quad (50)$$

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

$$Y_0(t) = S_{\max} + E_0(t) \quad (51)$$

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.

$Y(t)$   $F_u$  eğrisi ile  $\alpha_2$  evapotranspirasyon etkinlik parametresine bağlı olarak tahmin edilmektedir (Denklem 52).

$$Y(t) = W(t) \cdot F(Y_0(t); \alpha_2) \quad (52)$$

$Y(t)$  hesaplandığında yeraltısuyu depolamasına boşalan su Denklem 53 ile hesaplanmaktadır.

$$R(t) = W(t) - Y(t) \quad (53)$$

$ET(t)$  bileşenin beklenen limit değeri ise potansiyel evapotranspirasyon  $E_0(t)$ 'dir. Benzer şekilde,  $ET(t)$   $F_u$  eğrisinden  $\alpha_2$  parametresine bağlı hesaplanabilmektedir (Şekil 5b, Denklem 54).

$$ET(t) = W(t) \cdot F\left(\frac{E_0(t)}{W(t)}, \alpha_2\right) \quad (54)$$

Denklem 52 ve Denklem 54 aynı  $\alpha_2$  parametresini kullanmaktadır.  $\alpha_2$  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 ( $0 \leq S(t) \leq S_{\max}$ ).

$$S(t) = Y(t) - ET(t) \quad (55)$$

Son aşamada, yeraltısuyu depolaması lineer hazne kabulü ile ele alınmakta ve taban akışı bir önceki aydan kalan yeraltısuyu depolama miktarına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 56).

$$Q_b(t) = \beta \cdot G(t-1) \quad (56)$$

Burada  $Q_b(t)$  taban akışını,  $\beta$  doğrusal yeraltısuyu haznesi parametresidir.  $G(t-1)$  bir önceki ayın aktif yeraltısuyu depolamasıdır. Yeraltı biriktirme sisteminin  $t$  ayındaki aktif

kapasitesi  $G(t)$  ise Denklem 57 ile hesaplanmaktadır.

$$G(t) = [G(t-1) + R(t)] \cdot \xi - Q_b(t) \quad (57)$$

Burada  $\xi$ , yeraltı biriktirme sistemi parametresidir. Bu parametre modelin 4 parametrelili versiyonunda bulunmamaktadır. Su bütçesi elemanları tanımlandıktan sonra modellenen toplam akış Denklem 58'den hesaplanmaktadır.

$$Q_m(t) = Q_d(t) + Q_b(t) \quad (58)$$

### 3 BMA YÖNTEMİ

$T$  adet veriye sahip gözlemlere  $D=[y_{göz1}, y_{göz2}, \dots, y_{gözT}]$  ve  $K$  tane model tahmini  $f_k$ 'ya bağlı olarak  $y$ 'nin posteriori dağılımı  $p_k(y | f_k, D)$  koşullu olasılığı ile gösterilmektedir. Toplam olasılık kuralına göre, BMA'nın probabilistik tahmini Denklem 59'daki olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilir (Raftery vd,2005; Duan vd 2007).

$$p(y|D) = \sum_{k=1}^K p(f_k|D) \cdot p_k(y|f_k, D) \quad (59)$$

Bu terim model tahminlerinin gözlemleri ne kadar yansıtılabildiğinin bir ölçütüdür.  $p_k(y | f_k, D)$  için pratikte normal dağılım tercih edilir ve  $g(y | f_k, \sigma_k^2)$  olarak gösterilir.  $W_k = p(f_k | D)$  şeklinde tanımlanırsa söz konusu model ağırlıklarının toplamı 1'e eşit olacaktır.

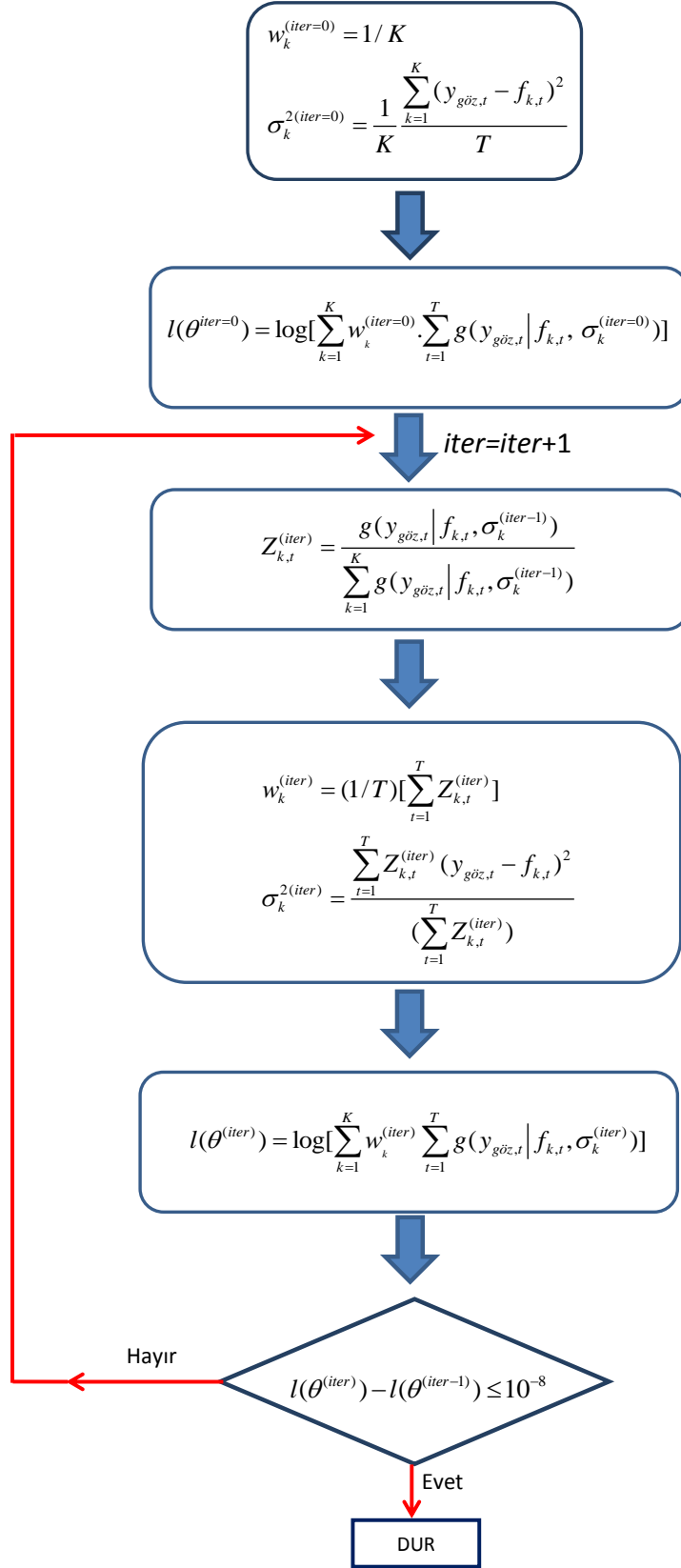
BMA tahmininin beklenen değeri Denklem 60'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} E[y|D] &= \sum_{k=1}^K p(f_k|D) \cdot E[p_k(y|f_k, D)] \\ &= \sum_{k=1}^K w_k \cdot f_k \end{aligned} \quad (60)$$

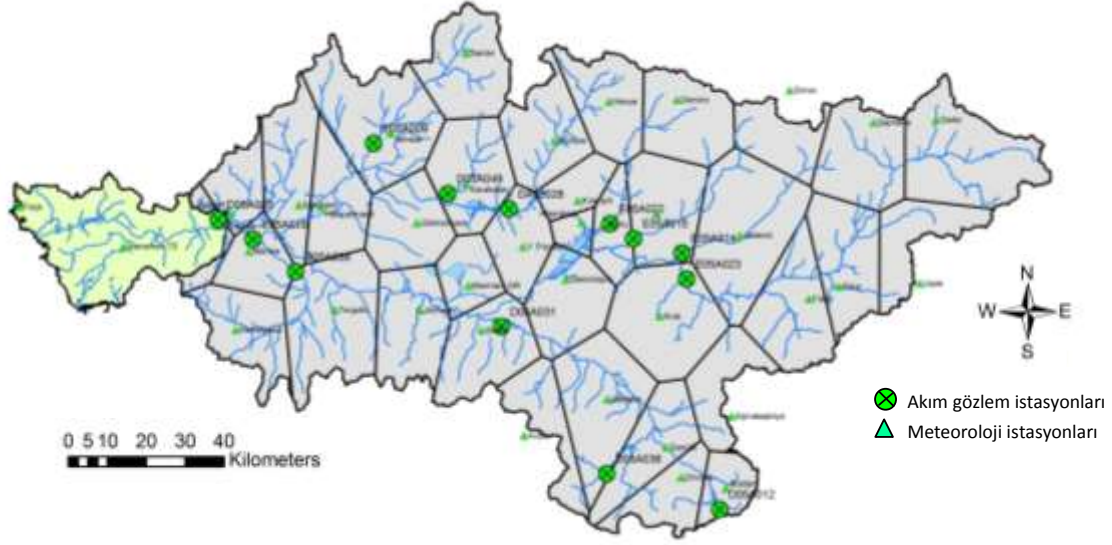
BMA yöntemini uygulamak için ağırlıklar ( $w_k$ ) ve model tahmininin varyansı ( $\sigma_k^2$ ) tahmin edilmelidir. Raftery vd.(2005) tarafından önerilen logaritmik-olabilirlik (log-likelihood) fonksiyonunun maksimizasyonu bu aşamada kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} l(\theta) &= l(w_1, \dots, w_k; \sigma_1, \dots, \sigma_k) \\ &= \log\left[\sum_{k=1}^K w_k \cdot g(y|f_k, \sigma_k)\right] \end{aligned} \quad (61)$$

Fonksiyonun maksimizasyonun basit analitik yöntemler ile gerçekleştirilmesi güç olup Şekil 6'da verilen iteratif prosedür uygulanmaktadır (Duan vd.,2007).



**Şekil 6** - BMA İşleyişi (Burada  $g(\cdot)$  merkezi  $a_k + b_k \cdot f_{k,t}$ , standart sapması  $\sigma_k$  olan normal dağılımı temsil etmektedir ( $a_k$  ve  $b_k$  regresyon katsayılarıdır)).



**Şekil 7 -** Muradiye alt havzasına ait Thiessen poligonları ve havzadaki hidro-meteoroloji istasyonları

#### 4 VERİLER

Sunulan çalışmada, su bütçesi modeli Gediz Havzası'nda yer alan yaklaşık 15849 km<sup>2</sup> yağış alanına sahip Muradiye Akım Gözlem İstasyonuna uygulanmıştır (Şekil 7). DSI tarafından işletilen D05A025 numaralı akım gözlem istasyonunda gözlenen akışların 01.10.1976-01.09.2010 dönemine (1976-2010 su yılları) ait verileri kullanılmıştır. Uygulama havzasını temsil eden yağış ve sıcaklık verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen 37 istasyonda ölçülmektedir. Çalışmada bölge için Thiessen poligonu oluşturularak alansal ortalama yağışlar kullanılmıştır. Elde edilen poligonlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Tahmini potansiyel evapotranspirasyon (EPOT) değerleri ise Thornthwaite ampirik denkleminde hesaplanmıştır. 01.10.1975-01.09.2010 ortak dönemine ait yıllık ortalamalar ise yağış, potansiyel evapotranspirasyon ve akış için sırasıyla 533 mm/yıl, 825 mm/yıl ve 96.5 mm/yıl olarak hesaplanmıştır.

#### 5 UYGULAMA

Detayları yukarıda verilen su bütçesi modelleri, MS Excel ve Visual Basic programlama dili kullanarak geliştirilmiştir. Söz konusu modeller kurulurken havzada modellenen tüm süreçlerin homojen olarak yayıldığı, bütün yüzeyin geçirimli olduğu kabul edilmiştir. Modellerde fiziksel olarak direkt ölçülmeyen ve bu bağlamda kavramsal olarak nitelendirilen parametreler yer almaktadır (Maksimum zemin doygunluğu, evapotranspirasyon etkinlik katsayısı vb.). Modellerde tanımlı ve kalibre

edilen parametrelerin fiziksel şartları benzeştirebilirliği bu çalışma kapsamında irdelenmemiştir. Zemin nemi, yeraltı suyu gibi değişkenlerin gözlenmesi ve özellikle coğrafi bilgi sistemi kullanılarak gerekli incelemelerin yapılması (arazi eğimi, yükselti, toprak haritaları vb dikkate alarak) durumunda söz konusu kıyaslamalar yapılabilir.

Yukarıda bahsi geçen kabuller ile hazırlanan modeller, zemin nemi ve yeraltısuyu başlangıç depolama değerleri gibi başlangıç değerlerini okuyarak işleme başlamakta ve her bir ay için su bütçesi bileşenlerini hesaplamaktadır. Başlangıç koşulları, model sonuçları ilk aylarda ölçülmüş akımlara yakın olacak şekilde seçilmiştir. Çalışmada, uygulama havzasının 35 yıllık gözleminin ilk 18 yılı (1976-1993) kalibrasyon aşamasında, diğer 17 yıllık kısmı (1994-2010) verifikasyon aşamasında kullanılmıştır. Kalibrasyon için Newton'un teğetler algoritması tercih edilmiştir. Çalışmada hata kareler ortalaması (HKO) amaç fonksiyonu olarak seçilmiş ve HKO değerinin minimizasyonu esas alınmıştır. Kalibre edilen model parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Modellerin performansları ise bazı istatistiksel kriterler ile irdelenmiştir (Tablo 2). Bunlar hata kareler ortalamasının karekökü olan RMSE, determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), düzeltilmiş determinasyon katsayısı (Adj.  $R^2$ ) ve Nash-Sutcliffe ölçütü (NS) gibi istatistiklerdir.

Modellerin kalibrasyonundan ve model çıktılarının derlenmesinden sonra BMA ile modellerin ağırlıklandırılması işleme

geçilmiştir. Bu işlem modellerin kalibrasyon dönemi çıktıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlıklandırma işlemi sulak (Ekim-Mart ayları) ve kurak (Nisan-Eylül) dönemler için ayrı ayrı yapılmıştır (Şekil 8). Modellerin kurak ve sulak dönemlerdeki etkinliklerinin değişkenliği Şekil 8'de görülebilmektedir.

Kavramsal yağış-akış modellerinin havzadaki farklı zamansal periyotları farklı performanslarda modelleyebileceği düşünüldüğünden, BMA analizinin kurak ve sulak dönemler için ayrı ayrı uygulanmasının tutarlı bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir (Raftery vd., 2005).

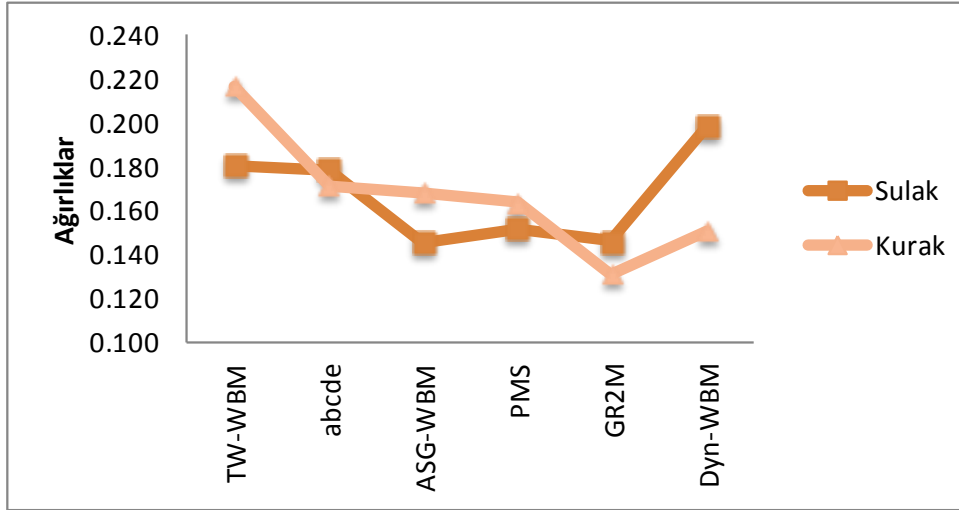
**Tablo 1 - Modellerin kalibrasyondan sonra elde edilen parametreleri**

(a)	$S_{o,t}$	$S_{o,Gwt}$	$\alpha$	$S_{max}$	$\beta$	$\gamma$	$\xi$	
	0.0	16.0	0.067	159.485	0.282	0.091	0.907	
(b)	$S_0$	$G_0$	a	b	c	d	e	
	100	100	0.985	253.587	0.654	0.014	0.969	
(c)	$m_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$k_1$	$k_2$
	10	0.001	0.017	0.631	1.00	1.00	0	4
(d)	$S_o$	$R_o$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	
	109	50	265.632	4.120	0.616	1036.7	0.524	
(e)	$S_o$	$R_o$	$X_1$	$X_2$				
	100	19	267.153	0.620				
(f)	$S_0$	$G_0$	$S_{max}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	d	$\xi$	
	5.0	5.0	297.406	0.637	0.649	0.607	0.563	

a: TW-WBM; b: abcde; c:ASG-WBM; d: PMS; e:GR2M; f: DYN-WBM

**Tablo 2 - Kavramsal yağış-akış modellerinin ve ENSEMBLE modelin performansları**

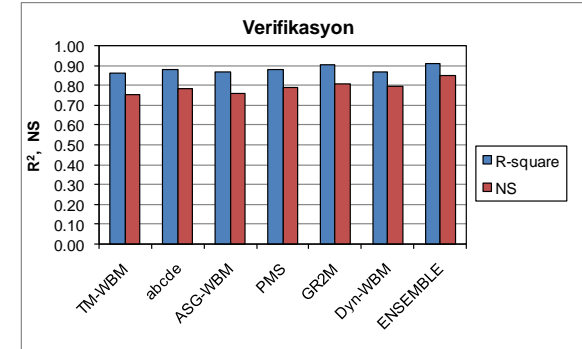
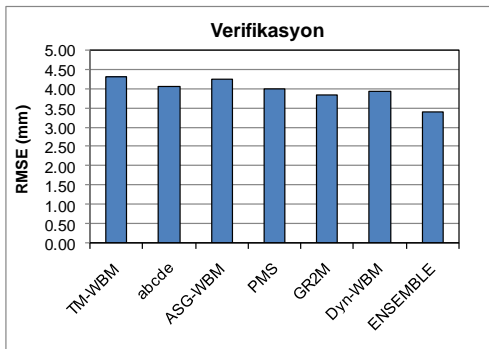
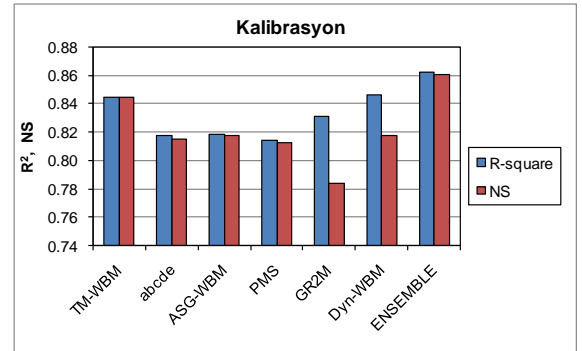
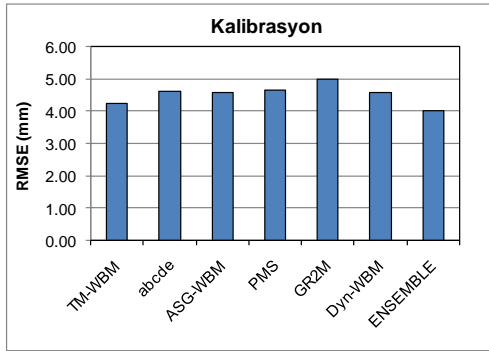
(a)				
Kalibrasyon				
Model	RMSE (mm)	R <sup>2</sup> (-)	Adj. R <sup>2</sup> (-)	NS (-)
TW-WBM	4.22	0.8450	0.8435	0.8449
abcde	4.60	0.8178	0.8161	0.8154
ASG-WBM	4.57	0.8188	0.8171	0.8180
PMS	4.64	0.8142	0.8125	0.8127
GR2M	4.98	0.8310	0.8294	0.7838
Dyn-WBM	4.58	0.8459	0.8444	0.8174
ENSEMBLE	4.00	0.8622	0.8609	0.8609
(b)				
Verifikasyon				
Model	RMSE (mm)	R <sup>2</sup> (-)	Adj. R <sup>2</sup> (-)	NS (-)
TW-WBM	4.30	0.8603	0.8589	0.7546
abcde	4.06	0.8809	0.8797	0.7805
ASG-WBM	4.25	0.8659	0.8645	0.7597
PMS	4.00	0.8769	0.8757	0.7874
GR2M	3.83	0.9036	0.9026	0.8046
Dyn-WBM	3.94	0.8688	0.8675	0.7936
ENSEMBLE	3.40	0.9110	0.9101	0.8467



**Şekil 8** - BMA ile hesaplanan ağırlıklar

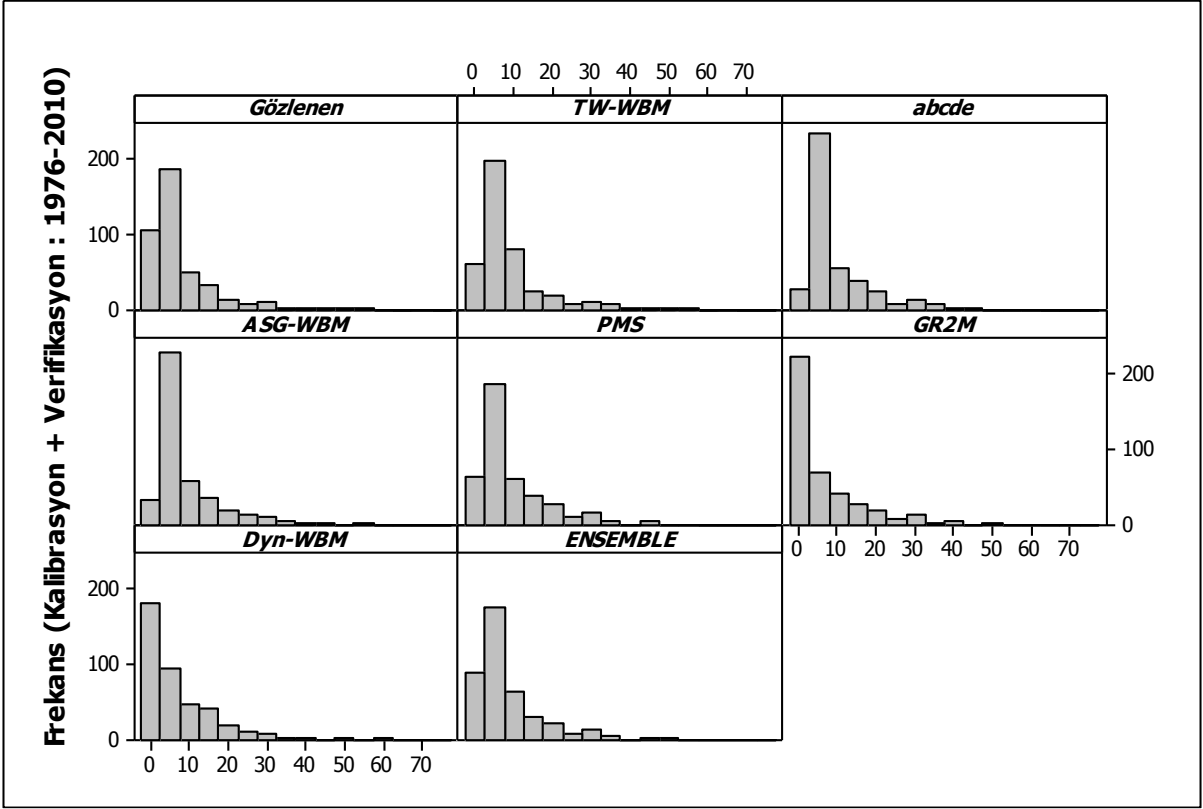
Ağırlıklar hesaplandıktan sonra model çıktıları ile çarpılıp toplanarak ENSEMBLE tahminler elde edilmiştir. ENSEMBLE tahminlerinin istatistiksel performansı da Tablo 2'de verilmiştir. Bulgular incelendiğinde hem kalibrasyon hem de verifikasyon dönemlerinde BMA işlemi ile elde edilmiş ENSEMBLE tahminlerin performansları daha başarılı bulunmuştur. Bu işlem sayesinde hata mertebesi azalmış (Şekil 9),  $R^2$  ve NS etkinlikleri ise artmıştır (Şekil 10).

Kalibrasyon ve verifikasyon sonuçları birleştirilerek elde edilen frekans histogramlarında da ENSEMBLE tahminlerin gözlenmiş veri setini daha iyi yansıttığı görülebilmektedir (Şekil 11). Ayrıca ENSEMBLE modelden elde edilen akımlara ait debi-gidiş grafiği Şekil 12'de sunulmuştur.

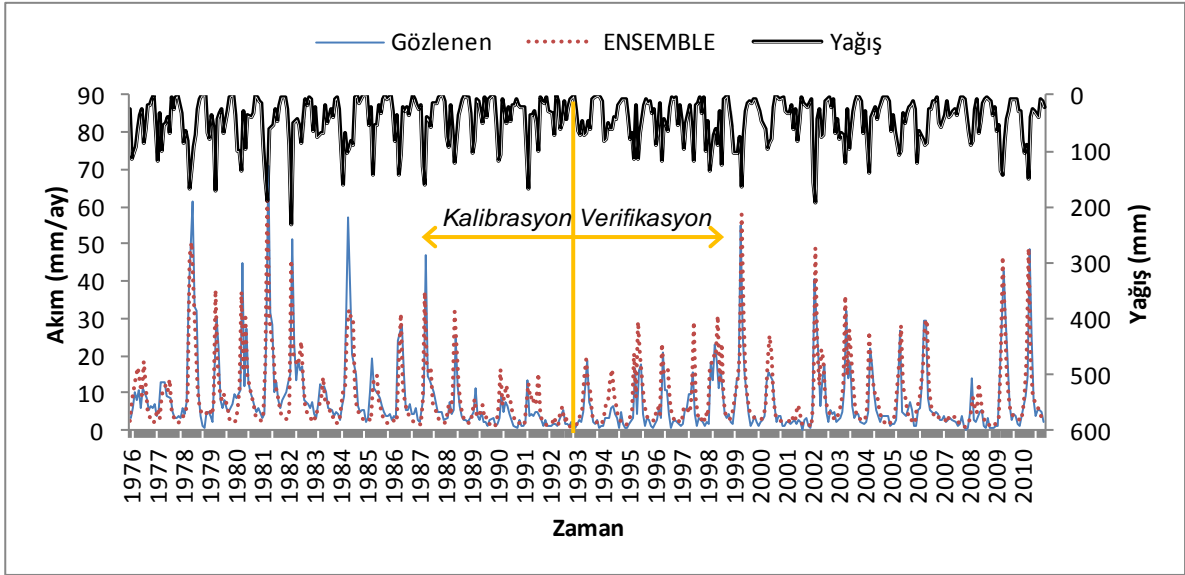


**Şekil 9** - Kavramsal yağış akış modellerinin çıktıları ve ENSEMBLE tahminleri kullanılarak hesaplanan RMSE istatistikleri

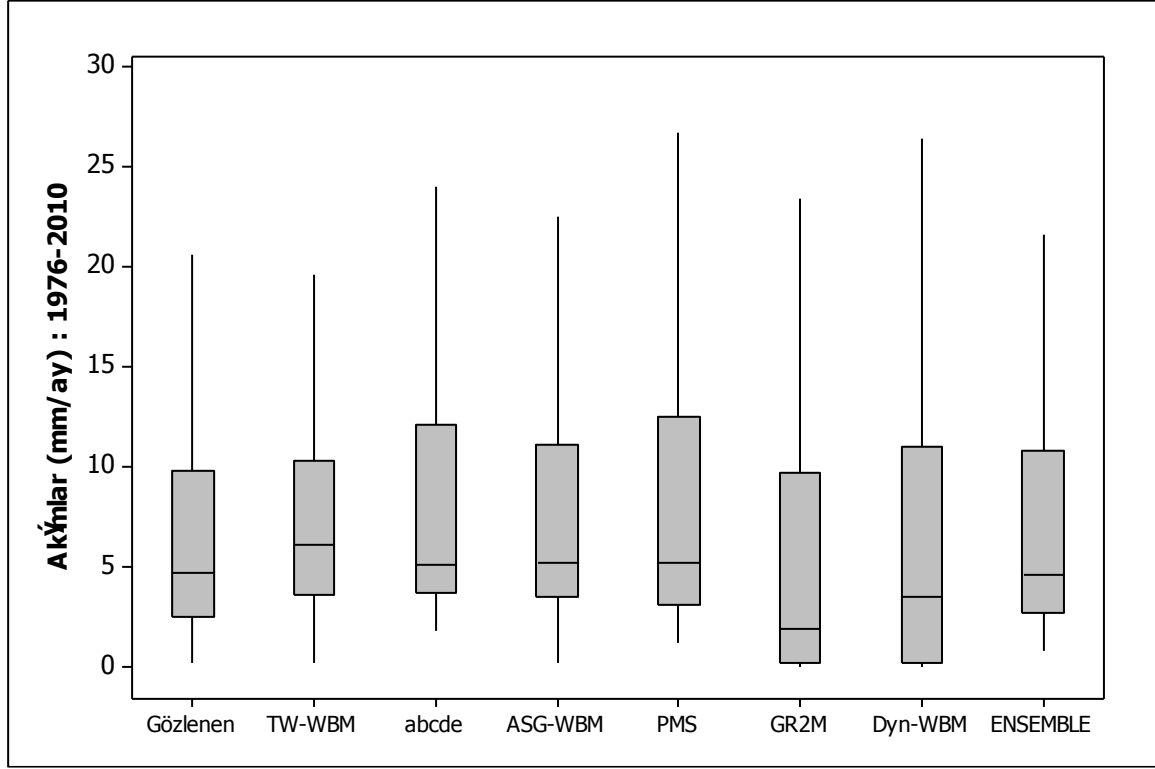
**Şekil 10** - Kavramsal yağış-akış modellerinin çıktıları ve ENSEMBLE tahminleri kullanılarak hesaplanan  $R^2$  ve NS değerleri



Şekil 11 - Farklı modellere ait frekans histogramları



Şekil 12 - ENSEMBLE çıktıklarına ait debi-gidiş grafiği



**Şekil 13-** Farklı modellerden elde edilen serilerin box-plot ile gösterimi

Tablo 2'de farklı model uygunluk kriterleri göz önüne alındığında, verifikasyon döneminde kalibrasyon dönemine göre daha yüksek uygunlukları gösteren ölçütlerin varlığına rastlanmıştır. Bu durum uygulama havzalarına göre değişkenlik taşıyabilir. Yağış-akış modellerinin kalibrasyonu mevcut periyodun genellikle yarısı alınarak gerçekleştirilir. Kalibrasyon ve verifikasyon dönemlerindeki yağış evapotranspirasyon ve akımların temel istatistikleri ve frekansları benzerlik taşıyabilir. Zaten kalibre edilen bir modelde verifikasyon dönemindeki farklı koşulları simüle edebilme yetisi aranmaktadır. Kalibrasyon ve verifikasyon dönemlerinde yağış 45 mm/ay mertebelerinde iken verifikasyon döneminde potansiyel evapotranspirasyon 71 mm/ay ile kalibrasyon dönemine göre daha büyük bir ortalama seyretmiştir. Verifikasyon döneminde, yağış ve evapotranspirasyon değişimlerinden etkilenen akım kalibrasyon dönemine kıyasla %24 azalma göstermiştir. Kalibre edilen modelin saçılımı esas alındığında düşük tahmin (under-estimation) verdiği gözlenmiş ve daha düşük akım ortalamalı verifikasyon döneminde performans ölçütlerince biraz daha makul sonuç vermesi kaçınılmaz olmuştur.

Akım gibi çarpık dağılımlı serilerin medyan, kartil gibi dağılım ve sıra istatistiklerini yansıtan

parametreler ile tahkiki de önem taşımaktadır. Bu maksatla çizilen box-plot (kutu diyagram) vasıtasıyla da BMA uygulamasından elde edilen ENSEMBLE sonuçlarının gerek medyan gerekse kartiller arası mesafe bakımından daha uygun olduğu gösterilmiştir (Şekil 13).

## 6 SONUÇLAR

Çalışmada Gediz Havzası'nda bulunan Muradiye akım gözlem istasyonu verileri 6 farklı kavramsal hidrolojik model ile modellenip elde edilen çoklu model çıktıları daha güvenilir akım serilerinin elde edilmesi amacıyla BMA yöntemiyle değerlendirilmiştir. Hidrolojik model çıktıları BMA yöntemiyle kurak ve sulak dönemde ağırlıklandırılarak model performansları ayrı periyotlarda değerlendirilmiştir. Buna göre uygulama havzasında kurak dönemde en iyi performansı modifiye Thornthwaite su bütçesi modeli gösterirken sulak dönemde ise Budyko yaklaşımına dayanan su bütçesi göstermiştir. Daha sonra ENSEMBLE çıktıları kullanılan hidrolojik model çıktıları ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel performans kriterlerinden faydalanarak BMA yöntemiyle elde edilen ENSEMBLE çıktılarının uygulama havzasında, hem kalibrasyon hem verifikasyon döneminde daha başarılı performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu sayede tekil hidrolojik model kullanımından kaynaklanan belirsizlikler



giderilerek havzayı daha iyi performansla temsil edebilen akımlar türetilmiş ve BMA yönteminin güvenilir sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

## 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 hazırlanmıştır. Yazarlar çalışmayı değerlendiren hakeme önerilerinden dolayı özellikle teşekkür etmektedir.

## 7 KAYNAKLAR

- [1] Abulohom, M.S., Shah, S.M.S. ve Ghumman, A.R. (2001). "Development of a rainfall-runoff model, its calibration and validation." *Water Resources Management*, 15(3), 149-163.
- [2] Budyko, M.I. (1958). "The Heat Balance of the Earth's Surface." US Department of Commerce, Washington, DC.
- [3] Clyde, MA. (1999). "Bayesian model averaging and model search strategies." Oxford University Press, 157-85.
- [4] Duan, Q, Ajami, N.K, Gao, X. ve Sorooshian, S. (2007). "Mult-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging." *Advances in Water Resources*, 30(5), 1371-1386.
- [5] Ellison, A.M. (2004). "Bayesian inference in ecology." *Ecology Letters*, 7(4), 509-520.
- [6] Fıstıkoğlu, O. ve Harmancıoğlu, N. (2001). "Yukarı Gediz havzasında aylık su bütçesi modeli uygulaması." III. Ulusal Hidroloji Kongresi, İzmir.
- [7] Fıstıkoğlu, O. ve Okkan, U. (2010). "Tahtalı havzası için aylık su bütçesi." VI. Ulusal Hidroloji Kongresi Bildiriler Kitabı (546-554). Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- [8] Fu, B.P. (1981). "On the calculation of the evaporation from land surface." *Sci. Atmos. Sin.*, 23-31. (Çince).
- [9] Makhlof, M. ve Michel. C. (1991). "A two-parameter monthly water balance model for French watershed." *Journal of Hydrology*, 162(3-4), 299-318.
- [10] Mouelhi, S. ve Michel. C. ve Perrin, C. (2006). "Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model." *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 200-214.
- [11] Okkan, U. (2013). "İklim değişikliğinin akarsu akışları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi." *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. (Tez danışmanı: Doç. Dr. Okan Fıstıkoğlu)*
- [12] Okkan, U., and Fıstıkoğlu, O. (2014). "Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M." *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 343-361.
- [13] Okkan, U. ve Kırdemir, U. (2016). "Budyko yaklaşımına dayanan bir su bütçesi modeli ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile kalibrasyonu." *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2(1), 1-10.
- [14] Perrin, C., Michel, C., ve Andreassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- [15] Raftery AE, Zheng Y. (2003). "Discussion: performance of Bayesian model averaging." *Journal of American Statistical Association*, 98(464), 931-938.
- [16] Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F. ve Polakowski, M. (2005). "Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensemble." *Monthly Weather Review*, 133(5), 1155-1174.
- [17] Shamseldin, A.Y., O'Connor, K.M. ve Liang, G.C. (1997). "Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models." *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 203-229.
- [18] Shamseldin, A.Y. ve O'Connor, K.M. (1999). "A real time combination method for the outputs of different rainfall-runoff models." *Hydrological Sciences Journal*, 44(6), 895-912.
- [19] Thomas, H. A. (1981). "Improved Methods for National Water Assessment. Report, Contract: WR15249270." Washington, D.C.: US Water Resource Council.
- [20] Vandewiele, G. L., Xu, C-Y. ve Win, N-L. (1992). "Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma." *Journal of Hydrology*, 135(1-4), 315-347.
- [21] Viallefont V, Raftery AE, Richardson S. (2001) "Variable selection and Bayesian model averaging in epidemiological case-control studies." *Technical Report No:343*, 3215-3230.
- [22] Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang ve Y.Q., Shao, Q.X. (2008). "Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework – model development and testing." *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 117-131.