

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAĞIŞ-AKIŞ BAĞINTILARI VE
YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE MODELLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Osman ULUKAYA**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

**Programı : Hidrolik ve Su Kaynakları
Mühendisliği**

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAĞIŞ-AKIŞ BAĞINTILARI VE
YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE MODELLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Osman ULUKAYA
(501982042)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mart 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2011

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necati AĞIRALIOĞLU (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Kerem CİĞİZOĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. Kasım KOÇAK (İTÜ)
Prof. Dr. Ercan KAHYA (İTÜ)
Prof. Dr. M. Emin BİRPINAR (YTÜ)**

HAZİRAN 2011

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Ülkemle ve hayatla ilgili çok şeyler öğrendiğim, lisansüstü eğitimime başladığım 1995 yılından bu yana akademik çalışmalarımın kesintiye uğradığı süreler dahil maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. **Necati AĞIRALIOĞLU** başta olmak üzere, bu çalışmamdaki katkılarından dolayı tez izleme jürimde yer alan Prof. Dr. **H. Kerem CİĞİZOĞLU**' na ve Prof. Dr. **Kasım KOÇAK**' a en içten duygularla teşekkürlerimi arz ederim.

Hidroloji ve istatistik konularına özel ilgi duymama vesile olan Prof. Dr. **Mehmetçik BAYAZIT**' a, hidrolojide sistem yaklaşımını ve nonlineer yağış-akış modellerini anlamamı kolaylaştıran merhum Prof. Dr. **Ferruh MÜFTÜOĞLU**' na, yapay zeka tekniklerinden özellikle bulanık mantık ve yapay sinir ağları konularında ülkemizdeki ilk çalışmaları yaparak hepimize rehber olan Prof. Dr. **Zekai ŞEN**' e de şükranlarımı arz ederim.

Kendi yüksek lisans tezini ve çalışma konumuyla ilgili elindeki tüm bilgi ve belgeleri benimle paylaşan Yard. Doç. Dr. **Nizamettin HAMİDİ**' ye ve bu tez çalışmasına en kritik noktada çok önemli bir katkı sağlayan İnş. Müh. **Ali Fatih ŞAKAR**' a ayrıca teşekkür ederim.

İş hayatım ile yürüttüğüm akademik çalışmalarımda karşılaştığım tüm zorluklara katlanma gücümü arttıran sevgili **eşime ve çocuklarıma** sonsuz teşekkürlerimle.

Mart 2011

Osman Ulukaya

İnşaat Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Yağış ve Akış	1
1.2 Akarsu Havzaları ve Özellikleri	1
1.3 Yağış-Akış Modelleri	3
1.4 Tezin Amacı, Kapsamı ve Metodu.....	4
2. PARAMETRİK MODELLER	5
2.1 Basit Parametrik Modeller	5
2.2 Parametrik Sürekli Benzeşim Modelleri	6
2.3 Parametrik Modeller İle İlgili Literatür Özeti.....	7
3. KLASİK KARA KUTU MODELLER.....	15
3.1 Birim Hidrograf Modeli.....	17
3.1.1 Birim hidrografın elde edilmesi	18
3.1.1.1 Klasik yöntem	18
3.1.1.2 Anlık birim hidrograf ve s-hidrografi yöntemi	20
3.1.1.3 Birim hidrografın deneme ile bulunması	23
3.1.2 Birim hidrograf modelinde teori ve gerçek.....	24
3.2 Nonlineer Modeller	25
3.3 Klasik Kara Kutu Modellerle İlgili Literatür Özeti.....	27
4. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ	33
4.1 Yapay Sinir Ağları.....	33
4.2 Uzman Sistemler	36
4.3 Metallerin Tavlanması Benzeşimi.....	37
4.4 Evrimsel Gelişime Dayalı Yapısal Optimizasyonu.....	37
4.5 Genetik Algoritma	37
4.6 Bulanık Mantık.....	37
4.7 Yapay Zeka Teknikleri İle İlgili Literatür Özeti	39
5. NONLİNEER YENİ BİR YAĞIŞ-AKIŞ MODELİ.....	45
5.1 Modelin Teorisi.....	45
5.2 Yeni Modelin Formulasyonu	48
5.3 Yeni Modelin Kalibrasyonu.....	50
5.3.1 Hafızanın belirlenmesi.....	50
5.3.2 Davranış fonksiyonlarının optimizasyonu	51

6. UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	53
6.1 Klasik Kara Kutu Modelleme.....	53
6.1.1 Hafıza uzunluğunun belirlenmesi	55
6.1.2 Kernellerin belirlenmesi	56
6.2 Havza Hafızası Parametrelerinin Belirlenmesinde Yeni Bir Yöntem	57
6.3 Yapay Zeka Teknikleri İle Modelleme	62
6.3.1 Yapay sinir ağları yöntemi ile akım tahminleri	62
6.3.2 Bulanık mantık yöntemi ile akım tahminleri.....	63
7. SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR.....	67
EKLER	71
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

ANN	: Artificial Neural Network
BM	: Bulanık Mantık
BH	: Birim Hidrograf
BİBBH	: Basitleştirilmiş İki Boyutlu Birim Hidrograf
BNN	: Bayesian Neural Network
BP	: Back Propagation (Geriye Yayılım)
DRM	: Daily Routing Model
FSM	: Fonksiyonel Seri Modelleri
GA	: Genetik Algoritmalar
GRSA	: Genelleştirilmiş Regresyon Sinir Ağı
HBV	: Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning Model
HEC	: Hydrologic Engineering Center
HKOK	: Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökü
HSPF	: Hydrological Simulation Program-Fortran
ILLUDAS	: The Illinois Urban Drainage Simulator
İBGYSA	: İleri Beslemeli Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağları
İHACRES	: Identification of Unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data.
KWA	: Kinematic Wave Approach
LSTM-RNN	: Long Short Term Memory-Recurrent Neural Network
MITCAT	: MIT Catchment Model
MLP	: Multi-Layer Perceptron
OKH	: Ortalama Karesel Hata
PRMS	: Precipitation Runoff Modeling System
RBFNN	: Radial Basis Function Neural Network
RMSE	: Root Mean Square Error
SCS	: Soil Conservation Service
SFB	: Surface-Infiltration-Baseflow Model
SSARR	: Streamflow Synthesis and. Reservoir Regulation
STDUH	: Simplified Two Dimensional Unit Hydrograph Model
SWMM	: Storm Water Management Model
SWRRB	: Simulator for Water Resources in Rural Basins
TBP-NN	: Temporal Back Propagation Neural Network
TR-20	: Technical Release No: 20
UM	: Universal Model
YM	: Yeni Model
YSA	: Yapay Sinir Ağları

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : Toplam yağış-toplam akış arası korelasyon katsayıları.....	61
Çizelge 6.2 : İBGYSA yöntemi ile test dönemleri performansları.....	63
Çizelge 6.3 : Uyarlamalı sinirsel bulanık yöntemiyle model performansları.....	64
Çizelge 7.1 : Tüm modellerin akım tahmin performansları.....	65
Çizelge A.1 : Havza hafızasının tayini için ilk yaklaşım modellerinin performansları.....	73
Çizelge A.2 : N=3 gün için en uygun k değerini veren modellerin performansları..	74
Çizelge A.3 : Nonlineer gün sayısı n' nin farklı değerleri (2, 4 ve 5) için modellerin performansları.....	76
Çizelge A.4 : Toplam havza hafızasının (s=27 gün) farklı parametreleri için modellerin performans kıyaslaması.....	78
Çizelge A.5 : N=3 gün için en uygun k değerini veren modellerin performansları (milyon m ³ /gün verilerle).....	79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Mühendislik hidrolojisi açısından hidrolojik çevrim (Bayazıt, 1998).....	2
Şekil 3.1 : Sistem yaklaşımı (kara kutu).....	15
Şekil 3.2 : Bir hidrografın elemanları.....	19
Şekil 3.3 : Birim hidrograf modelinde gözönüne alınan sistem.....	19
Şekil 3.4 : Anlık birim hidrograf ve s-hidrografi.....	20
Şekil 3.5 : Δt_0 süreli birim hidrografın s-hidrografından elde edilişi.....	21
Şekil 3.6 : Anlık birim hidrografla yağıştan akışın bulunması.....	22
Şekil 3.7 : Sistem bileşenlerinin girdi üzerindeki paralel operasyonu.....	27
Şekil 4.1 : YSA' nın genel mimarisi.....	34
Şekil 4.2 : Bulanık sistem.....	38
Şekil 6.1 : Kannagawa havzasının konumu.....	54
Şekil 6.2 : Yağış-akış arası çapraz korelogramlar.....	55
Şekil 6.3 : Toplam yağış-toplam akış arası çapraz korelogramlar (detay).....	59
Şekil 6.4 : Toplam yağış-toplam akış arası çapraz korelogramlar (s' nin tüm değerleri için).....	60
Şekil 6.5 : Modelde kullanılan YSA mimarisi.....	62
Şekil B.1 : N3K24 için modellerin kernelleri (kalibrasyon periyodu).....	81
Şekil B.2 : N3K24 için modellerin kernelleri (test periyodu).....	82
Şekil B.3 : N3K24 için YM (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	83
Şekil B.4 : N3K24 için BİBBH (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	84
Şekil B.5 : N3K24 için YM (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	85
Şekil B.6 : N3K24 için BİBBH (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	86
Şekil B.7 : K27 için BH (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	87
Şekil B.8 : K27 için BH (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	88
Şekil B.9 : N3K24 için modellerin kalibrasyon periyodu kernelleri (milyon m ³ /gün verilerle).....	89
Şekil B.10 : N3K24 için modellerin test periyodu kernelleri (milyon m ³ /gün verilerle).....	90
Şekil B.11 : N3K24 için İBGYSA (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	91
Şekil B.12 : N3K24 için İBGYSA (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	92
Şekil B.13 : N1K3 için BM(1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	93
Şekil B.14 : N1K3 için BM(2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.....	94

SEMBOL LİSTESİ

% D	: Hata Oranı
e	: Tahmin-Gözlem Arası Hata Miktarı
G	: Toplam Gözlem Sayısı
h₀	: Sistem İçi Bir Kaynağın Katkısı veya Kaçak
h_i	: Sistem Davranış Fonksiyonunun Lineer Bileşeni (Kernel)
h_{i,j}	: Sistem Davranış Fonksiyonunun Nonlineer Bileşeni (Kernel)
I	: Artık Yağış Şiddeti
m	: Öteleme Sayısı
M	: Sistemin Nonlineerlik Derecesi
k	: Toplam Havza (Sistem) Hafızasının Lineer Kısmı (Gün Sayısı)
L	: Tahmin Süresi
n	: Toplam Havza (Sistem) Hafızasının Nonlineer Kısmı (Gün Sayısı)
Q	: Debi (Gözlemlenmiş Akış Miktarı)
R²	: Nash ve Sutcliffe Katsayısı
s	: Dikkate Alınan Girdi ve Çıktı Arası Gecikme Süresi
S	: S-Hidrografi
U	: Davranış Fonksiyonu (Kernel, Birim Hidrograf Ordinatu)
X	: Gözlemlenmiş Yağış-Girdi
Y	: Tahmini Akış-Çıktı

YAĞIŞ-AKIŞ BAĞINTILARI VE YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Üzerine düşen yağışı akışa dönüştüren bir sistem olarak tanımlayabileceğimiz havza davranışının modellenmesinde başlıca iki yöntemden bahsedilebilir. Bunlardan biri parametrik modeller olup, bu modeller dönüşüm işlemini sızma, yeraltı akışı, yüzeysel akış gibi bileşenlerine ayırarak, bu bileşenlerin aralarındaki ilişkileri fiziksel açıdan oldukça ayrıntılı bir şekilde ifade ederler. Havza davranışının analizi fiziksel açıdan çok karmaşık olduğundan bu modellerin kurulması oldukça zordur. Bu sebeple genellikle bazı basitleştirmeler (kabuller) yapılır. Her kabul modeli gerçeklerden biraz daha uzaklaştırır. Yağış-akış modelleme yöntemlerinden diğeri havza davranışını (dönüşüm işlemini) kara-kutu bir sistem olarak ele alır ve havzada meydana gelen olaylar fiziksel açıdan ayrıntılı olarak incelenmez. Bu ikinci yöntem kullanıldığında verilen yağış ve akış değerlerinden üzerlerinde etkili olan tabiat kanunları da dikkate alınarak öncelikle sistem davranışı (havza davranışı veya dönüşüm fonksiyonu) belirlenir.

Yağış ve akış arasındaki ilişkinin sistem yaklaşımı ile kara-kutu olarak modellenmesinin en önemli uygulaması birim hidrograf modelidir. Ne var ki nonlineer (lineer olmayan) sistemlerin incelenmesinde yaşanan zorluklar sebebiyle birim hidrograf modelinde sistem lineer olarak kabul edilmiştir. Lineerlik kabulünü zayıflatan en önemli etken ise havza geçiş süresinin sabit olmayışıdır. Geçiş süresi, tabaka ve kanal akım hızlarının bir fonksiyonu olup, su miktarına dolayısıyla da artık yağış şiddetine bağlıdır. Küçük havzalarda geçiş süresini tabaka akımlarının hızları belirlerken büyük havzalarda akarsu yatak ağındaki hızlar önem kazanır. Herhangi bir andaki yağışın bitki örtüsü tarafından tutulacak, çukurlarda biriktirilecek ve toprağa sızacak kısımları; bitki örtüsünün ıslaklık derecesine, çukurlardaki önceden biriken su hacmine ve toprağın doygunluk derecesine, dolayısıyla da önceki yağışlara bağlıdır. Bu sebeple de önceki yağışların etkilerini dikkate alan nonlineer modellere ihtiyaç vardır.

Yapılan ilk nonlineer yağış-akış modellerinde sistem davranış fonksiyonu fonksiyonel serilerle (Volterra integrali) ifade edilmiştir. Bu modellerin en önemli zaafi fiziksel olarak hiçbir anlam taşımamalarıdır. Ayrıca kaçınılmaz dereceden nonlineer olduğu bilinmeyen bir sistem için fonksiyonel diziyi pratik bakımdan uygulanabilir en genel şekliyle kullanmak akla gelse de, böyle bir uygulamada verilerin çok sağlıklı olması gerekir. Hatalı verilerin kullanılması halinde sistem davranış fonksiyonlarının belirlenmesinde önemli ölçüde hatalar meydana gelir. Çünkü böyle bir model, gerek ve yeter olandan daha yüksek bir uyum kabiliyetine sahip olacak ve davranış fonksiyonları sistemin davranışı ile hataları ayıramayacağından hepsine birden uyum gösterecektir. Yüksek dereceli fonksiyonların davranış fonksiyonlarının belirlenmesindeki güçlükler üçüncü ve daha yüksek dereceli modellerin uygulamalarında caydırıcı rol oynamaktadır. Bu sebeple şimdiye kadar yapılmış çalışmalar ancak lineer ve kuadratik (ikinci derece)

modellerle gerçekleştirilmiştir. Kuadratik modellerle elde edilen sonuçların lineer modellerin sonuçlarıyla kıyaslanmasıyla; kuadratik terimlerin hassasiyete önemli ölçüde katkıda bulunduğu ortaya çıkmıştır.

Müftüoğlu (1984b) fonksiyonel serilerin zaafalarını taşımayan basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf (BİBBH) modelini geliştirmiştir. Bu modelde havzanın gecikmiş tepkileri lineer, anlık ve az gecikmiş tepkileri ise ikinci dereceden nonlinear bir fonksiyonelle gösterilmiştir. Modelin uygulamaları göstermiştir ki; BİBBH modeli fonksiyonel serilerden ve ikinci dereceden nonlinear modellerden daha iyi sonuçlar vermektedir.

BİBBH modeli iyi sonuçlar üretmesine rağmen önemli bir zaafı bulunmaktadır. Modelde lineer kısmı oluşturan taban akımı ile nonlinear kısmı oluşturan dolaysız akımın keskin sınırlarla birbirinden ayrılması özellikle maksimum akım tahminlerinde hatalara yol açmaktadır. Çünkü bilindiği üzere içinde bulunduğumuz anda meydana gelen akımı, en çok bu ana yakın geçmişte yağın yağışlar etkiler. Oysa BİBBH modelinde sistem dönüşüm fonksiyonunu oluşturan kernellerden (bu kernelleri daha iyi anlamak için onları YSA' lardaki ağırlık katsayıları olarak düşünmemiz hatalı olmayacaktır) lineer kısım yani uzak geçmişe ait olanları büyük değerler alırken, yakın geçmişe ait nonlinear kısmı oluşturan kerneller küçük değerler almaktadır. Bunun en önemli sebebi; modelde kernellerin girdiler (yağışlar) üzerinde paralel bir operasyonla çıktıyı (akımı) oluşturlarken modelin lineer kısmında yağış değerlerinin teker teker dikkate alınması, nonlinear kısımda ise yağış değerlerinin ikili çarpımlarının hesaba katılmasıdır.

Yapılan bu tez çalışmasında BİBBH modelinin bu zaafını taşımayan yeni ve ikinci dereceden nonlinear bir model geliştirilmiştir. Yeni model BİBBH modelinde olduğu gibi lineer ve nonlinear iki kısma ayrılmıştır. BİBBH modelinden farklı olarak; yeni modelin lineer kısmında taban akışını oluşturan yakın geçmişe ait yağışlar da dikkate alınarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Böylece taban akımını oluşturan yağışlar ile dolaysız akımı oluşturan yağışların model dönüşüm fonksiyonunu etkilemesi açısından geçişli bir yapı oluşturulmuştur. Daha önce kurulan tüm lineer ve nonlinear yağış-akış modelleri Aristo felsefesine (0 ya da 1) dayanırken yeni model bu açıdan bulanık mantık felsefesine (0 ile 1 arası) dayanmaktadır.

Çalışmanın bir sonraki aşaması ise kurulan yeni modelin parametrelerini kullanan ve son dönemlerdeki hidrolojik çalışmalarda oldukça önemli bir yer tutan yapay zeka tekniklerinden yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık mantık (BM) yöntemleri ile model performansının artırılmasıdır. Model performans kıyaslaması için birim hidrograf, basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf gibi literatürdeki önemli lineer ve nonlinear modeller kullanılmıştır. Bütün uygulamalarda modellerin performansı, ASCE Task Committee (1993) tarafından kabul edilmiş "root mean square error (hataların karelerinin ortalamasının karekökü) " RMSE, "Nash ve Sutcliffe katsayısı" R^2 ve "toplam değerlerin sapma yüzdesi veya hata oranı" % D olarak tanımlanan üç performans kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir. Uygulamalar göstermiştir ki geliştirilen yeni model karşılaştırılan diğer modellere kıyasla daha üstün bir performansa sahiptir.

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında ise lineer ve nonlinear tüm modellerde kullanılabilecek ve toplam havza hafızasını (sistem hafızasını) oluşturan parametrelerin belirlenmesine yönelik olarak yeni ve etkin bir yöntem önerilmiştir. Yöntem kullanıldığında; havza karakteristiklerini yeterince yansıtan bir model oluşturulmasında gerekli modelleme sayısını oldukça azalttığı görülmektedir.

THE RAINFALL-RUNOFF CORRELATIONS AND MODELING WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES

SUMMARY

The main two methods can be mentioned that modeling of catchment behavior which is described as a system which transforms precipitation falling on into runoff. The first of these is the parametric models and these models analyze the transforming process separated by components such as infiltration, groundwater flow and surface runoff. Parametric models express relationships between these components in a physically very detailed manner. However, the construction of these models is very difficult because of the fact that the analysis of the catchment behavior is very complex in physical manner. For this reason, usually some simplifications (assumptions) are made. Each assumption casts out the model a little more from realities. In the second method of rainfall-runoff modeling catchment behavior (transforming process) is accepted as a black-box system and the events that occurred in the catchment are not physically examined in detail. When this second method is used primarily the behavior of the system (behavior of the catchment or transforming process) is determined by given rainfall and runoff values while taking into account the effective laws of nature.

The most important application of the black box modeling of relationships between rainfall and runoff with system approach is the unit hydrograph model. However, because of the difficulties in the non-linear systems examination the system was considered to be linear in the unit hydrograph model. The most important factor of undermine the acceptance of linearity is that the lag time is not constant. The lag time that is a function of overland and stream flow velocities depend on the quantity of water, therefore it depends on the intensity of excess rainfall. While overland flow velocities determine the lag time in the small catchment, stream flow velocities become important in the large catchment. The parts of precipitation at the anytime which kept by the vegetation and accumulated in pits and infiltrated to soil depend on the degree of wetness of vegetation, the volume of water previously accumulated in the pits and the degree of soil moisture therefore they depend on the previous precipitation. For this reason, nonlinear models are needed that takes into account the effects of previous rainfall.

The function of system behavior is expressed with the functional series (Volterra integral) in early non-linear rainfall-flow models. The most important weakness of these models is not having any physical meaning. Furthermore, to use the most general practically applicable form of the functional series comes to mind for a system that has an unknown nonlinearity degree, but the data must be very accurate at such an application. When the incorrect data is used significant errors occur in determining the functions of system behavior. Because such a model will have higher adaptability than necessary and sufficient amount and because of the fact that the functions of catchment behavior will not be able to distinguish between the behavior of the system and errors, it will adapt all of them.

The difficulties in determining the behavior functions of high-grade functional are deterrent in the third and higher-grade applications of models. For this reason, until now the studies have been done with only linear and quadratic (second-degree) models. When the results of linear and quadratic models are compared, it is shown that the quadratic terms significantly contribute to sensitization.

Muftuoglu (1984b) developed simplified two dimensional unit hydrograph model (STDUH) that does not have functional series weaknesses. In this model, the delayed response of the catchment by the linear and the immediate and moderately delayed response of the catchment were represented by the second-order non-linear functional. Applications of the model have shown that; STDUH model provides better results than functional series and second order nonlinear models.

Although STDUH model produces good results, it has a significant weakness. In the model, exact boundary separation of base flow which forms linear part and direct runoff which forms non-linear part leads to errors especially in maximum flow predictions (Such as in the model assumption of forming of precipitation direct runoff until three days ago from today and forming of previous precipitation base flow). Because, as it is known mostly recent precipitations affect present flow. However in STDUH model while kernels which form linear part and belongs to long time ago takes great values, the other kernels which form non-linear part and belongs to recent takes small values (to understand better these kernels, they can be considered as weight coefficients in ANNs). The most important reason of this, kernels form output (runoff) from input (precipitation) with a parallel operation.

In this study a new and second order non-linear model that does not have the weakness of STDUH model was developed. The new model is divided into two parts as linear and non-linear like in STDUH model. As different from STDUH model in the linear part of the new model, recent precipitations which form base flow was also considered. Therefore, a cascading structure was created regarding the effect of model transforming function of precipitations that form base flow and direct flow. While the linear and non-linear rainfall-runoff models that were constructed previously are based on Aristotelian philosophy (0 or 1) the new model is based on fuzzy logic philosophy (between 0 and 1).

The next stage of the study is rising the model performance by using the artificial intelligence techniques (artificial neural network and fuzzy logic) that use the parameters of the new model and takes place in recent hydrological studies. Important linear and non-linear models in literature were used for comparison of model performance like unit hydrograph and simplified two dimensional unit hydrograph. In all applications, performances of models were assessed by using three criteria which are accepted by ASCE Task Committee (1993). These are "root mean square error" RMSE, "Nash and Sutcliffe coefficient" R^2 and "relative (percentage) error" % D. The applications have shown that the developed new model has a better performance than the other models.

In the third and last stage of the study a new and effective technique was suggested regarding determination of parameters which are able to be used in all linear and non-linear models and form total catchment memory (system memory). It is seen that when the technique is used, necessary modeling number that shows characteristics of the catchment are quite reduced.

1. GİRİŞ

1.1 Yağış ve Akış

Atmosferden yeryüzüne katı ya da sıvı halde düşen sulara yağış, bu yağışların yerküresinde deniz veya göllere doğru oluşturduğu su hareketine de akış (veya akım) denir. Su kaynakları ile ilgili birçok mühendislik probleminin çözümünde özellikle de taşkın (feyezan) hidrolojisi ile baraj, bağlama ve sedde gibi su yapılarının projelendirilmesi ve işletilmesinde belli yağışların oluşturacağı akışların tahminine ihtiyaç duyulur.

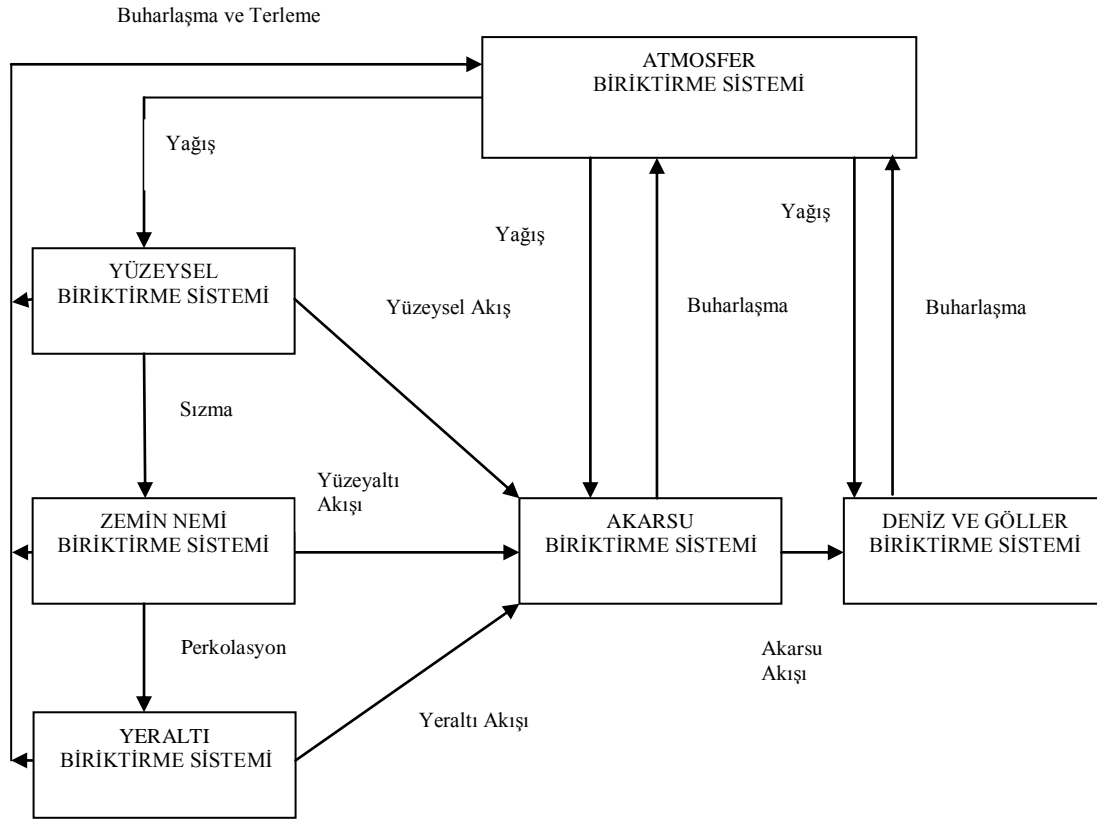
1.2 Akarsu Havzaları ve Özellikleri

Hidrolojide kullanılan coğrafi birim olan akarsu havzası (su toplama havzası, drenaj havzası) ise akışını bir yüzeysel su yolu (akarsu) üzerinde alınan bir çıkış noktasına gönderen yüzey olarak tanımlanır. Bu şekilde tanımlanan akarsu havzasına; üzerine düşen yağışı çıkış noktasında akış haline dönüştüren sistem gözüyle bakılabilir (Bayazıt, 1995).

Suyun katı, sıvı ve gaz hallerinde bir halden diğerine geçerek yeryüzünde ve atmosferde sürekli dönüp dolaşmasına ise hidrolojik çevrim denir.

Atmosferden yeryüzüne ulaşan suyun büyük bir kısmı buharlaşma ve bitkilerden terleme yoluyla denizlere ulaşmadan atmosfere geri dönerken bir kısmı da bitki örtüsü tarafından tutulur. Zemine düşen yağmur damlaları önce toprağı ıslatır, yüzeyde ince bir toprak tabakası doymuş hale gelince bir su filmi (tabakası) oluşur ve bu su tabakasının kalınlığı giderek artar. Yer çekimi kuvvetleri, yüzey gerilim ve viskozite kuvvetlerini yenecek büyüklüğe ulaşınca yüzeyde bir su hareketi başlar. Buna yüzeysel akış denir. Yüzeysel akışa geçen su öncelikle zemindeki çukurları doldurur. Ardından da havzaya yayılmış olan akarsu ağına ulaşır. Bir yandan yüzeysel akış devam ederken üst toprak tabakasındaki su aşağılara doğru sızmaya başlar. Sızan suyun bir kısmı yeraltında şartlar uygun ise akarsu ağına geri dönerek yüzeysel akışa katılır. Bunlara ara akımlar denir. Bir miktar su daha derinlere sızarak

geçirimsiz bir zemin tabakası üzerinde biriken yeraltı suyuna katılır (Hamidi, 1984). Yeraltında biriken suyun bir kısmı zemin içindeki boşluklarda akışa geçerek havza ve zemin özelliklerine bağlı olarak geçecek bir sürenin sonunda yüzeysel akışa katılır ve taban akımı adını alır. Mühendislik hidrolojisi açısından hidrolojik çevrim Şekil 1.1' de verilmiştir (Bayazıt, 1998).



Şekil 1.1 : Mühendislik hidrolojisi açısından hidrolojik çevrim (Bayazıt, 1998).

Akarsu havzalarını birbirleriyle karşılaştırabilmek için bir havzayı belirleyen karakteristikleri bilmek gerekir. Havzanın, üzerine düşen yağışı zaman içinde bir değişime uğratarak çıkış noktasında gözlenen akış haline çevirmesi bu karakteristiklere bağlıdır. Havza karakteristiklerinin en önemlileri; zemin cinsi ve jeolojik yapı, bitki örtüsü, havzanın büyüklüğü, havzanın biçimi, havzanın eğimi, havzanın ortalama kotu ve havza alanının çıkış noktasından olan uzaklığa göre dağılımı olarak sıralanabilir (Bayazıt, 1995).

Bir akarsu havzasının hidrolojik bakımdan en önemli özelliklerinden biri yüzeysel akışın havzanın en uzak noktasından çıkış noktasına varması için geçen zaman olarak

tanımlanan geçiş (konsantrasyon) süresidir. Geçiş süresi şu sürelerin toplamına eşittir:

- Yağış şiddetinin sızma kapasitesini aşması için gereken süre
- Yüzeydeki çukurların dolması için geçen süre
- Tabaka halinde akışın akarsu ağına varması için geçen süre
- Akarsu ağında suyun çıkış noktasına varması için geçen süre

Yukarıdaki açıklamalardan da görüleceği üzere akarsu havzalarının karakteristikleri hem mekana hem de zamana bağlı olarak değişir. Bu da yapılacak yağış-akış modelleme çalışmalarını oldukça güçleştirmektedir.

1.3 Yağış-Akış Modelleri

Akışla yağış arasındaki en basit bağıntı, çeşitli yağışlara ait akış yüksekliklerini yağış yükseklikleriyle bağlayarak kurulabilir. Bir eksene yağış yükseklikleri, diğerine akış yükseklikleri taşındığında elde edilen noktaların çizilecek bir eğri etrafındaki sapmaları genellikle çok yüksek olur. Böyle bir eğri şiddetli yağışlarda akış katsayısının büyüdüğünü de gösterir, bunun nedeni böyle yağışlarda kayıpların yüzdesinin daha az oluşudur. Noktaların eğri etrafındaki sapmalarının fazla oluşu, olayda başka etkenlerin de bulunduğuna işaret eder. Bunlardan en önemlisi yağışın başlangıcındaki zemin nemidir. Zira zemin nemi sızma miktarını etkiler, ancak zeminin geçirimsiz olduğu bölgelerde (yerleşim bölgeleri gibi) bu etki azalır, akışla yağış arasında basit bir bağıntı elde edilebilir. Diğer hallerde zemin nemini bir parametre olarak göz önüne almak gerekir. Ancak yağıştan önceki zemin nemi doğrudan doğruya ölçülemediğinden zemin nemiyle ilgili olan başka değişkenler kullanılır. Bu amaçla en çok kullanılan değişkenler şunlardır:

- Göz önüne alınan yağıştan önceki yağışlar
- Yağışın meydana geldiği haftanın sıra numarası
- Yağışın başlangıcında akarsuda mevcut olan akım miktarı
- Yağışın belli bir şiddetin üzerinde devam ettiği süre

Bu parametrelerin birden fazlası birlikte dikkate alındığında daha güvenilir bir yağış-akış bağıntısı elde edilebilir. Bu gibi bağıntılar ancak elde edildikleri havza için geçerli olur. Uzun süreli (aylık, yıllık) yağış-akış korelasyonlarında geçmişteki

şartların etkisi birbirini götürür. Bu bakımdan süre olarak bir su yılı alınırsa yağışla akış arasında basit bir ilişki kurulabilir (Bayazit, 1995).

1.4 Tezin Amacı, Kapsamı ve Metodu

Akış tahminlerinde başlıca iki yöntemden bahsetmek mümkündür. Hidrodinamik veya parametrik yaklaşım ile sistem veya kara kutu yaklaşımı. Bu yöntemlerden parametrik (hidrodinamik, çok bileşenli, kavramsal) modeller ikinci bölümde, kara kutu modeller ise yine kendi arasında ikiye ayrılarak klasik kara kutu modeller üçüncü bölümde, yapay zeka tekniklerini içeren kara kutu modeller ise dördüncü bölümde detayları ile anlatılacaktır.

Bu çalışmada detayları üçüncü ve dördüncü ve beşinci bölümlerde verilen yağış-akış modellerinden kara kutu modellere dahil edilebilecek fakat fiziksel bir tabanı da bulunan ikinci dereceden nonlinear yapıya sahip yeni bir yağış-akış modeli kurularak, bu yeni modelin parametrelerini kullanan ve son dönemlerdeki hidrolojik çalışmalarda oldukça önemli bir yer tutan yapay zeka tekniklerinden uygun olanları ile modelin performansı arttırılmaya çalışılacaktır. Model performans kıyaslaması için birim hidrograf, basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf gibi literatürdeki önemli modeller kullanılacaktır.

Tezin ikinci bir amacı da literatürdeki kara kutu yağış-akış modellemelerinin hemen hemen hepsinin modellemeye başlarken kullandığı havza hafızasını oluşturan parametrelerin belirlenmesine yönelik yeni ve etkin bir yöntem öne sürmektir.

2. PARAMETRİK MODELLER

Bu modeller dönüşüm işlemi sızma, yeraltı akışı, yüzeysel akış gibi bileşenlerine ayırarak analiz ederken bu bileşenlerin aralarındaki ilişkileri fiziksel açıdan oldukça ayrıntılı bir şekilde ifade ederler. Hidrodinamik yasalarının uygulanması güç olduğundan bu modellerde de genellikle basitleştirmeler yapılır. Modeller bir takım biriktirme elemanlarından kurulur, suyun izlediği yola bağlı olarak bu elemanların arasındaki ilişkiler (giren ve çıkan su miktarları) fiziksel özellikleriyle belirlenir. Bu gibi modellerin çok sayıda parametreleri vardır. Belli bir havza için model parametrelerinin değerleri, havzada gözlenmiş olan hidrograflar yeterli bir yaklaşımla modelden elde edilinceye kadar deneme yapılarak belirlenir. Bu modellerde akarsu havzası biriktirme sistemleri ve bunların arasındaki ilişkilerle temsil edilir. Biriktirme sistemlerine süreklilik denkleminin uygulanması ile model çalıştırılır. Havzaya düşen yağış, kayıplar çıkarıldıktan sonra, yüzeysel biriktirme sistemine girer. Bu sistem yağışı akarsu ağına ulaştıran havzadaki suyollarından ve akarsu ağından oluşur. Yüzey altındaki gecikmesiz biriktirme sistemi de bunlara katılır. Bazı modellerde havzadaki kar örtüsünün erimesiyle oluşan akış da göz önüne alınır (Bayazıt, 1998).

Parametrik modeller özellikle kapalı kutu modellerinin kullanılmadığı, havza özelliklerinin değişmesinin etkilerinin incelenmesi istenilen durumlarda yararlı olur. Modelde havza sistemi ne kadar çok sayıda elemana ayrılırsa o ölçüde ayrıntılı bir model geliştirilmiş olur. Ancak böyle bir modelde kalibrasyon için gerekli veri miktarı artacaktır. Kullanılacak modelin ölçeği eldeki verilere bağlı olarak seçilmelidir. Pratikte çoğu zaman parametrelerin havza üzerinde sabit kaldığı kabul edilen toplu modeller kullanmak gerekir (Bayazıt, 1998). Parametrik yağış-akış modelleri de kendi aralarında iki grupta incelenebilir.

2.1 Basit Parametrik Modeller

Bu modellerde havza birkaç alt havzaya ayrılır. Bir fırtına sırasında her bir alt havzaya düşen yağıştan kayıplar ayrılıp elde edilen artık yağışın hidrografi

belirlenir. Bu hidrograflar akarsu boyunca ötelenip süperpoze edilerek çıkış noktasındaki hidrograf elde edilir. Bu gibi modeller aralarında yağışsız süreler bulunan birden fazla yağış için kullanılamaz. Taşkın hidrografı elde etmenin amaçlandığı bu modellerde evapotranspirasyon kayıpları, zemin nemindeki değişimler ve taban akımının ayrıntıları hesaba katılmaz. Bu modellere örnekler HEC-1 (Hydrologic Engineering Center), TR-20 (Technical Release No: 20), ILLUDAS (The Illinois Urban Drainage Simulator), DRM3 (Daily Routing Model) gibi modellerdir. Özellikle yerleşme bölgelerindeki yağmursuyu şebekelerinin tasarımı için hazırlanmış olan SWMM (Storm Water Management Model) ve STORM gibi modeller de vardır. En çok tanınan modellerden HEC-1 modelinde sızma kayıpları SCS (Soil Conservation Service) modeli (ya da başka bir model) ile ayrılıp artık yağış hiyetografına geçilir (yağış ve sızmanın alt havza üzerinde üniform yayıldığı kabul edilir). Birim hidrograf modeliyle (Snyder ve SCS boyutsuz birim hidrograflarını kullanarak) veya kinematik dalga modeliyle alt havzaların hidrografları elde edilir. Bu hidrograflar Muskingum, kinematik dalga ve haznede öteleme modelleriyle ötelenip süperpoze edilir (Bayazıt, 1998).

2.2 Parametrik Sürekli Benzeşim Modelleri

Havzaya düşen yağışın çıkış noktasına kadar hareketinin sürekli olarak izlendiği bu modellerde yağış düşmeyen sürelerde zemin nemindeki değişim, evapotranspirasyon, doymamış ve doymuş bölgelerde yeraltı akışı olayları izlenir. Hidrolojik çevrimin çeşitli bileşenlerinin ayrıntılı bir şekilde benzeştirildiği gelişmiş modellerde havza çok sayıda bölgeye ayrıldığı gibi zemin de düşey yönde tabakalara ayrılabilirdiğinden parametre sayısı çok olur. Bu modeller arasında geçmiş yağış indisi modeli ve her biri zeminin belli bir seviyesine karşı gelen biriktirme haznelerinden oluşan Tanh Modeli gibi daha basit modeller yanında SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), PRMS (Precipitation Runoff Modeling System), SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation), Standford Havza, HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran), MITCAT (MIT catchment model) modelleri gibi gelişmiş modeller de vardır (Bayazıt, 1998).

2.3 Parametrik Modeller İle İlgili Literatür Özeti

Croley (1983) tarafından A.B.D. ile Kanada sınırları içinde bulunan Ontario Gölü Havza'sında, fiziksel tabanlı kavramlara dayanan lineer rezervuar haznelerini ve kütleinin korunumunu içeren yapıya sahip olan bir model uygulaması yapılmıştır. Günlük sıcaklık, yağış ve akış verileriyle modelin dokuz parametresi kalibre edilmiştir. Bu modelle haftalık ve aylık akış miktarları hesaplanmıştır. Modelin büyük havzalarda, fazla veri içermeyen basit kalibrasyon işlemleriyle iyi sonuçlar verebileceği görülmüştür. Kalibre edilen parametrelerin fiziksel anlamlılığı olup, kalibrasyon işlemleri sonucunda uygun değerler elde edilmiştir.

Brater ve Wallace (1984) tarafından A.B.D.'nin Michigan Bölgesi'nde geçmiş zaman periyotlarındaki aylık akışların hesaplanması için bir çalışma yapılmıştır. Modelin uygulanması için yağış ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. Modelin prosedürü; akışı yağışın, su kayıplarının ve havzada depolanan su miktarındaki değişimin fonksiyonu olarak kabul eden su dengesi denkleminde dayanmaktadır. İçinde bulunulan yıla ve daha önceki yıllara ait yağış ve sıcaklık verileri bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Bu metotla, aylık akış kayıtlarındaki eksik veriler de tamamlanabilmektedir. Modeldeki akış kayıtlarıyla kalibre edilmiş olup, yapılan çalışma sonucunda elde edilen denklemlerle, geçmiş yıllara ait ölçülmemiş aylık akışların tahmini amaçlamıştır.

Wilcox ve diğ. (1990) A.B.D.'de Texas, Oklahoma, Arizona, Nebraska ve Idaho'daki altı havzada, Soil Conservation Service'in eğri numarası metodu ile Green ve Ampt denkleminde dayanan fiziksel prosesler içeren bir modelin uygulamasını yapmışlardır. Bu iki modelin performansları, uygulanan havzalarda elde edilen günlük, aylık ve yıllık akış değerlerinin karşılaştırılmasıyla test edilmiş olup, Green ve Ampt Modeli'nin akış tahminlerinin beklenenden çok daha iyi olduğu görülmüştür. Bu modelin tüm parametreleri havza karakteristiklerine dayanan fiziksel parametreler olup, kalibrasyon işlemi uygulanmamıştır. Elde edilen sonuçlardan kompleks fiziksel modellerin; günlük, aylık ve yıllık akış tahminlerinde iyi sonuçlar verebileceği görülmüştür.

Parrett ve Cartier (1990) A.B.D.'nin Batı Montana Bölgesi'nde üç ayrı metotla aylık akış tahminleri gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli havza ve iklim değişkenlerinden oluşan çoklu regresyon denklemlerine dayanan ilk metotla yapılan uygulamada, standart

hatalar yüzde 43 ile 107 arasında değişmektedir. Bu metodun, jeolojik yapıdan dolayı su kaybının olduğu bölgelerde ve mansap kısmında biriktirme haznelarının bulunduğu nehirlerde uygulanmasında sakıncalar olduğu vurgulanmıştır. İkinci metot, aylık akış değerleri ile kanal en kesitleri arasındaki regresyon denklemlerine dayanmaktadır. Bu metotta da tahminlerdeki standart hatalar yüzde 41 ile 111 arasında değişmektedir. Bu metodun kayalık ve taşlık nehir yataklarında kullanılması uygun görülmemiştir. Üçüncü metodun uygulanabilmesi için akım ölçümleri hesaplanmaya çalışılan havzanın 12 aylık akım değerlerine ihtiyaç vardır. Bu metotta, aylık akımları tahmin edilmeye çalışılan, 12 aylık akış verisinin ölçüldüğü havzaya çok yakın bir havzadan eş zamanlı akım verileri alınır ve eğrileri ayarlama tekniği uygulanır. Bunun sonucunda aradaki ilişkiye göre istenen periyotlardaki aylık akış değerleri hesaplanır. Yapılan çalışmalar sonucunda standart hata değerleri yüzde 19 ile 92 arasında değişmektedir. Bu metodun diğer iki metoda göre daha güvenilir olduğu tespit edilmiş olmakla birlikte, ilişki kurulan havzalarda hidrolojik olarak benzerliğin söz konusu olmadığı durumlarda, düşük performans gösterdiği görülmüştür.

Akım ölçümleri bulunan havzalarda, iklimsel ve ölçülebilen, havza ile ilgili değişkenlerin kullanılmasıyla oluşturulan çoklu regresyon denklemlerinin yardımıyla; akım ölçümleri olmayan havzalardaki akış karakteristiklerinin hesaplanmasında kullanılan metoda havza karakteristikleri metodu denilmektedir. Batı Montana'da bu metot kullanılarak yapılan çalışmalarda, ortalama aylık akım değerlerini verebilecek denklemler elde edilmiştir. Ancak elde edilen sonuçlar yetersiz görülmüştür. Bu metot, sınırlandırılmış bölgelerdeki jeolojik parametrelerin ölçümünün kolay olmamasından dolayı, bu özellikten oldukça etkilenen düşük akımların tahmininde geçerli sonuçlar vermemektedir.

Kachroo ve diğ. (1992) alanları 19 km² ile 131500 km² arasında değişen, dünyanın çeşitli bölgelerindeki 14 havzaya SLM (Simple Linear Model) ve LPM (Linear Perturbation Model)'nin uygulamasını yapmışlardır. Uygulamanın yapıldığı 14 havzanın üçü Tayland'da olup diğerleri sırasıyla Kamerun, ABD, Japonya, Avustralya, Pakistan, Hindistan, Malezya, İrlanda, İngiltere, Burma ve Kolombiya' da bulunmaktadır. Çok farklı iklim ve havza özelliklerine sahip bu bölgelerde, LPM' nin uygulandığı mevsimsel değişimler gösteren büyük havzalarda, aylık akış tahminlerinde tatminkar sonuçlar alınmıştır.

Kothyari ve diğ. (1993) tarafından LPM (Linear Pertubation Model)'nin uygulanmasıyla; ABD, Japonya, Kamerun, İngiltere ve Tayland'da bulunan beş havzada aylık akış değerlerinin hesaplanmasıyla ilgili bir çalışma yapılmıştır. LPM ile elde edilen tepki fonksiyonlarının fiziksel açıdan havza karakteristiklerini yansıttığı görülmüştür. Modelin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, daha önce bu havzalardan birinde nonlinear bir modelle elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar tatminkar bulunmuştur..

Chiew ve diğ. (1993) Avustralya'da bulunan altı havzada basit polinom, basit proses denklemi (Tanh denklemi), basit zaman serileri (Tyskin denklemi), kompleks zaman serileri (ihacres), SBF ve Modhydrolog modellerini kullanarak günlük, aylık ve yıllık akış değerlerinin elde edilmesiyle ve kullanılan modellerin karşılaştırılmasıyla ilgili çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalar sonucunda Modhydrolog modelinin, günlük akış değerlerinin tahmininde özellikle yağışların yoğun olduğu havzalarda çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Aynı modelin aylık ve yıllık periyotlardaki tahminlerinde de başarılı olduğu saptanmıştır. Fakat çalışma sonucunda elde edilen en önemli sonuçlardan biri, uygulaması çok daha basit olan SFB ve zaman serileri modellerinin aylık ve yıllık periyotlarda, yağışların yoğun olduğu havzalarda çok daha iyi sonuçlar vermesidir. Araştırmacılar, bu modellerin uzun zaman aralıklarında kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

SFB modeli, ilk olarak 1984 yılında Boughton tarafından ileri sürülmüştür. SFB modelinin diğer kavramsal modellere göre avantajlı olmasını sağlayan özellikleri; uygulamasının daha basit olması, uydurulacak parametre sayısının ve gerekli verilerin daha az olması olarak sayılabilir. Ayrıca daha önce yapılan bazı çalışmalarda SFB'nin kurak ve yarı kurak bölgelerde diğer kompleks modellere göre iyi bir performans gösterdiği saptanmıştır. SFB modelinin ana girdileri günlük yağış (mm), günlük potansiyel buharlaşma (mm) ve günlük ölçülmüş akış (mm)' dir. Modelin çıktıları ise hesaplanan aylık akış (mm), aylık taban akımı (mm), aylık gerçek buharlaşma (mm) ve aylık zemin nemi (mm)'dir. Modelin yedi adet parametresi mevcuttur. Stokastik optimizasyon tekniği olarak bilinen simulated annealing (benzeştirilmiş güçlendirme) yöntemi ile kalibre edilmiş parametrelerin uygunluğuna karar verilir. Hesaplanan ve ölçülen aylık akış değerlerinin karelerinin farklarının toplamı amaç fonksiyonu olarak kullanılır. SFB modelinin üç farklı versiyonu mevcuttur. Bunlar sırasıyla orijinal üç parametrelili versiyon (SFB-3), beş parametrelili değiştirilmiş versiyon (SFB-5) ve altı

parametrelili değiştirilmiş versiyon (SFB-6)'dir. Genişletilmiş SFB modeli (GSFB) Boughton'un SFB modelinin gelişmiş bir versiyonudur. SFB modeline ilave edilerek GSFB Modeli'ni oluşturan ilave bileşen, yzeyeysel depolama bileşeninin maruz kaldığı evapotranspirasyon etkisinin, derin perkolasyonla depolanan su miktarını da etkilediğini varsayan bir mekanizmadır. GSFB Modeli, aylık akışların tahmininde eş zamanlı gnlk yaağış ve potansiyel buharlaşma verilerini kullanmaktadır. Modelin sekiz adet parametresi mevcuttur.

Basit Polinom Modeli'nde gnlk, aylık ve yıllık yaağış değerlerinden, gnlk, aylık ve yıllık akış miktarları elde edilmektedir. Burada akışın hafızaya sahip olmayan bir proses olduğu kabul edilerek, daha nncaki aylara ait girdiler hesaba katılmamaktadır.

Kompleks Zaman Serileri Modeli (İhacres), İngiltere'deki Hidroloji Enstitüsü ve Avustralya Devlet (Australian National) Üniversitesi'ndeki Doğal Kaynaklar ve Çevre Bilimleri Merkezi'nin ortak çalışmalarıyla geliştirilmiştir. Modelin felsefesi herhangi bir zamandaki depolama miktarını yine aynı zaman dilimindeki yaağış ve akış ile kendinden bir nncaki zaman dilimine ait sıcaklık ve nemlilik değerlerinden oluştuğu üzerine kuruludur.

Basit Proses Denklemi (Tanh Denklemi) ile havzanın fiziksel prosesi hakkında basit bir tanım ortaya konulmaktadır. Parametreleri, akış oluşturmayan maksimum yaağış değerlerini (akış oluşmadan nnc yaağışın belli bir miktarı bitki örtüsü tarafından tutulur ve yine belli bir miktarı zemini doymun hale getirir) ihtiva etmektedir.

Modellerden ikisi gnlk zaman aralığına sahip olup, birisi değişken zaman aralığına (dakika - gün) ve diğeri de aylık zaman aralığına sahiptir. Elde edilen tahminlerden dört modelinde benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Tahminlerdeki farklılıkların, modellerin yapılarının kompleksliliğiyle ilgili olduğu sonucuna varılmıştır.

İbrahim ve Cordery (1995) Avustralya'da uygulayıp geliştirmiş oldukları aylık yaağış-akış modelinde havzanın hidrolojik proseslerini gerçekçi yaklaşımlarla açıklamaktadırlar. Modelin girdileri aylık yaağış, aylık meteorolojik veriler ve çeşitli zemin karakteristikleridir. Modelin iki adet depolama bileşeni vardır. Bunlar, doymamış bölgeyi temsil eden zemin depolama bileşeni ve doymuş bölgeyi temsil eden yeraltı depolama bileşenidir. Zemin depolama bileşeni, akışı ve gerçek buharlaşma miktarını belirlemede nncemli bir rol oynar. Yeraltı depolama bileşeni taban akımının belirlenmesinde kullanılır. Zemin depolama bileşeni zemin su

depolama kapasitesini doldurmuş ise müteakip yağışların sonunda, yağış olarak düşen miktarın bir kısmı yeraltı depolama bileşenine giderken, kalan kısım direkt olarak akışı oluşturur. Zemin su muhtevasının zemin su depolama kapasitesinden az olması durumunda, artık yağış direkt olarak akışa dönüşür.

Model uygulandığı Doğu Avustralya Bölgesi'ndeki nehirlerdeki aylık akış tahminlerinde çok başarılı bir performans sergilemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda modelin, kalibrasyon verileri kullanılmadan gerçekleştirilen bağımsız testlerde de başarılı olması, model yapısının havzanın hidrolojik proseslerini fiziksel olarak doğru bir şekilde yansıttığını göstermiştir.

Kothyari (1995) tarafından, Hindistan'da kar yağışı görülmeyen ve alanları 1515 km² den az olan 31 havzanın verileri kullanılarak, muson ayları olan haziran ve ekim arasındaki periyotta aylık akış miktarlarının tahmini için basit bir aylık yağış-akış modeli geliştirilmiştir. Modelin iki parametresinden biri olan havzadaki ormanlık alan yüzdesi, havza alanına göre değişim göstermektedir. Diğer parametre aylık ortalama sıcaklık olup, bu parametrenin hidrolojik olarak benzer bölgelerde herhangi bir ayda fazla bir değişim göstermediği görülmüştür. Yapılan çalışmada, veri problemi olan havzaların muson ayları süresince aylık akış tahminlerinin bu modelle hesaplanabileceği ortaya konulmuştur.

Ye ve diğ. (1997) tarafından düşük akımların görüldüğü ve yılın belli periyotlarında kuruyan nehirlerle ilgili Batı Avustralya'nın üç havzasında; GSFB (sekiz parametrelili), IHACRES (altı parametrelili) ve LASCAM (22 parametrelili) yağış-akış modelleri kullanılarak günlük ve aylık akış hesaplamaları yapılmıştır. Uygulanan modellerin aylık periyotta iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Çalışma sonucunda GSFB'den daha kompleks bir yapıya sahip olan IHACRES ve LASCAM modellerinin özellikle kuru havzalarda günlük akış tahminlerinde daha iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Xu (1999) tarafından İsveç'teki 26 adet kar yağışı etkisi altında bulunan havzada, altı parametrelili aylık su dengesi modelinin uygulaması yapılmıştır. Su dengesi modeliyle aylık akış değerleri de hesaplanabilmektedir. Modelin yapısında havzanın fiziksel karakteristiklerine göre ayarlanmış parametrelerde mevcuttur. Çalışmanın yapıldığı bölgede model tatminkar sonuçlar vermiştir. Modelin fiziki yapısının test edilebilmesi için su dengesi modelinin kar bileşeni çıkarılıp, üç parametrelili

yeni model versiyonu Kuzey Belçika'da bulunan 24 havzaya uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar memnuluk verici olarak karşılanmıştır.

Abdulla ve Al-Badranih (2000) Kuzey Irak'taki üç havzaya SFB Modeli'ni uygulayarak aylık akış tahminlerinde bulunmuşlardır. Yapılan çalışmada üç parametrelili orijinal SFB Modeli, beş parametrelili gelişmiş versiyon SFB-5 ve altı parametrelili gelişmiş versiyon SFB-6 uygulanmış olup, uygulama bölgesinde SFB-5'in orijinal SFB Modeli'ne göre çok daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Çalışmaların neticesinde, modelin taban akım parametresi olan B'nin, S ve F parametrelerine göre kuru havzalarda çok daha hassas olduğu sonucuna varılmıştır.

Türker (2003) tarafından yapılan çalışmada yağışları akışa dönüştüren kavramsal bir yağış-akış modeli geliştirilmiştir. Modelde yağış ve buhar tavanı verileri yardımı ile eksik ya da ölçülmemiş akım verilerinin türetilmesi sağlanmıştır.

Kavramsal model toprak haznesine göre yazılmış su bütçesine dayalıdır. Modelde gerçek buharlaşmanın hesaplanması bir toprak kovası alt modeline bağlıdır. Model Gelendost-Afşar Deresi Havzası' na uygulanmıştır.

Modelin uygulama sonuçları, çeşitli uygunluk kriterleri ile değerlendirilmiş ve başarılı bulunmuştur. Yalnız modele bir kar yağış alt modeli eklenmesinin yararlı olacağı anlaşılmıştır.

Lee ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada anlık su baskını oluşumu için gereken etkili yağış miktarını veren bir anlık taşkın rehberi (FFG) hazırlanmıştır. Eşik akış ve yağış-akış modelinden çıkarılarak yağış-akış ilişkisi eğrisinden hesaplanan FFG, seçilen yağış-akış modeli ve parametrelerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Akarsuyun bir kesitinden geçen akım için eşik (kritik) kaynak alanı (CSA) ve minimum kaynak kanal boyu (MSCL) parametreleri kullanılarak dört adet yağış-akış modeli geliştirilmiştir. Kullanılan yağış analizi şöyledir: İlk önce Hulf metodu kullanılarak bir, üç, altı saatlik yağış olasılıkları dağıtılmıştır. Daha sonra bu dört modelin her biri için ağırlık faktörü verilmiş ve bu modellerin birleşiminden oluşan bir yağış-akış eğrisi önerilmiştir. CSA / MSCL'nin değerlerinin ve akarsu kesitindeki verilerin değişimi için FFG incelendiğinde; akarsu geçiş kesitlerinde veri girişi olduğunda FFG' nin daha büyük değerler aldığı görülmüştür. Ayrıca FFG değeri anlık CSA'dan MSCL'ye göre daha çok etkilenmiştir. Sonuç olarak yağış-akış ilişkisi eğrileri için elde edilen güven aralıkları farklı şekil ve boyutlarda olmuştur ve

FFG ile anlık taşkın tahminlerinde; uygun model ve parametrelerinin seçimi oldukça önem arz etmektedir.

Mcintyre ve Al-Qurashi (2008) tarafından yapılan çalışmada metrik-kavramsal IHACRES modeli, yağış girdilerinin yarı dağıtılmış durumu kullanılarak Umman'da 734 km²'lik bir havzanın saatlik verilerine uygulanmıştır. Modelin dokuz parametrelilik versiyonundan daha basit versiyonlarına indirgeme için hassaslık analizi yapılmıştır. Havza çıkışındaki pik debiler ve tahmin edilen akım hacimleri alternatif versiyonların performansını görme amacıyla kendi aralarında kıyaslanmıştır. Performanslar bir de IHACRES' in toplu versiyonu ile fiziksel tabanlı bir model ve iki parametrelilik regresyon modeli ile de karşılaştırılmıştır. Pik debiler için eldeki modeller arasında en iyi performansı doğrusal yönlendirilen iki parametresine yarı dağıtma modu uygulanan iki parametrelilik ve kayıpları doğrusal olmayan model vermiştir. Akış hacimleri için yönlendirme bileşeni gerekli olmamasına rağmen yine aynı model tercih edilmiştir. Bu modelin başarısının temel nedeni uyum kabiliyeti, mekansal yağışı iyi temsil etmesi ve yağış-akış gözlemlerindeki sistematik hataları telafi etme yeteneği olduğu düşünülmektedir. Performanslar düşük akış hacmi için % 36 pik debi için ise % 53 ortalama mutlak bağıl hataya sahip olmasına karşın bu tip diğer uygulamalarla karşılaştırıldığında bu bir hayal kırıklığı olmamıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; etkili parametre değerlerinin değişkenliği nedeniyle beklenmeyen belirsizlik çoktur ve bu belirsizlik analizi ile açıkça ortaya konulmalıdır.

Tan ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada sınırlı birkaç fırtınadan yağış-akış modellerinin kalibrasyonunun yapılabilirliği araştırılmıştır. Doğru parametre tahmini güvenilir yağış-akış modellemesi için çok önemli olup, geçmiş çalışmalarda da vurgulandığı gibi model kalibrasyonunda başlangıç şartlarının etkisinin üstesinden gelmek için yeterince uzun ve sürekli yağış kayıtlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma göstermiştir ki; başlangıç toprak ıslaklık şartları dengelenmiş bir alt havza için yağış-akış modellerinin kalibrasyonu geniş bir aralıktaki pik akımı, toplam akım hacmini ve başlangıç toprak ıslaklık şartlarını temsil eden birkaç durumla sağlanabilir. Bu yaklaşım akış büyüklükleri geniş bir yelpazede değişen fakat sınırlı bir veri uzunluğuna sahip küçük havzalar içinde alternatif kalibrasyon stratejisi sağlar. Sürekli durum kalibrasyonu ile etkinlik tabanlı kalibrasyon kıyaslandığında hidrografın genel şekli, pik debinin şiddeti ve görülme zamanı açısından daha iyi bir simülasyon sağlar ve akış hacminin bulunmasında da güvenilir bulunmuştur.

3. KLASİK KARA KUTU MODELLER

Yağış ve akışa etki eden çok sayıda akarsu havza karakteristiğinin olması, bunların zaman ve mekanla sürekli değişmeleri sebebiyle hidrodinamik havza modellerinin kurulması ve parametrelerinin belirlenmesi güçtür. Pratikte çoğu zaman kara (kapalı) kutu modellerinin kullanılması da bu sebeptir.

Bu tür modellerde havzada yer alan olaylar ayrıntılı olarak incelenmeyip havzaya yağışı akışa çeviren kapalı bir kutu gözüyle bakılır. Sistem davranışının (dönüşüm fonksiyonunun) o havzada gözlenmiş olan yağış ve akış kayıtlarına dayanarak belirlenmesine çalışılır. Bu tip modeller gerçek durumu tam olarak yansıtmazlar da çok daha basittirler (Bayazit, 1998).

Kara kutu modellerin anlaşılabilmesi için sistem kavramının tanımına ihtiyaç vardır. Sistem, bir veya birden çok girdiden bir veya birden çok çıktıyı meydana getiren, birbirleri ile ilişkili elemanların tümünün oluşturduğu yapıya denir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Sistem yaklaşımı (kara kutu).

Sistem; girdiler, sistem davranışı ve çıktılardan oluşur. Sistem yaklaşımındaki amaç bu üç faktörden bilinen ikisini kullanarak bilinmeyen üçüncüye ulaşmaktır. Sistem yaklaşımında önemli olan husus, sistemin detaylı bir şekilde tanımlanması değil belirli girdilere verdiği tepkilerin bulunmasıdır. Diğer bir deyişle sistemin davranışı ile girdiyi çıktıya nasıl dönüştürdüğünü anlamaktır. Sistem yaklaşımında kullanılan terminoloji aşağıda özetlenmiştir:

Sistem durumu: Bir sistemin çalışma şartları onun durumunu teşkil eder. Sistemin durumunu temsil eden değişkenlere *durum değişkenleri* denir.

Sistem nedenselliği: Herhangi bir olayın sebepsiz oluşamayacağı ilkesine *nedensellik* bu ilkeye uyan sistemlere de *nedensel sistem* denir. Nedensel bir sistemde çıktı bağlı

olduğu girdiden daha önce meydana gelmez. Nedensellik ilişkileri daima açık ve tam olarak bilinmese de dünyadaki sistemlerin hep nedensel sistemler olduğu sanılmaktadır. Bilgisizlik karmaşıklıktan ve belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Ancak elektronikteki gibi bazı sistemlerde bu ilkenin terk edildiği bilinmektedir.

Sistemin zamanla değişmezliği: Bir sistemin özellikleri zamanla değişmiyorsa bu sistem *zamanla değişmeyen sistem* olarak nitelenir. İstisnasız bütün tabii sistemler zamanla değişir. Bu değişimin kurulan modellere katılması oldukça zor olduğu için zamanla değişmezlik kabulünün yapılması zorunludur. Ancak bu kabul, sapmanın asgari seviyede kalacağı zaman aralıklarında kullanılmalıdır.

Sistem hafızası: Bir sistemin şimdiki durumunu ve çıktısını belirleyen girdilerin geçmişine *sistem hafızası* denir. Eğer bir sistemin mevcut durumunu ve çıktıyı geçmişteki girdilerin tümü etkiliyorsa sistem sonsuz hafızalı, belirli bir geçmiş etkiliyorsa sonlu hafızalı, yalnızca şimdiki girdi etkiliyorsa hafızasızdır. Tabiatla sistemler çoğunlukla sonlu hafızaya sahiptir. Çünkü girdilerin etkileri zamanla sönümlenir.

Lineer ve nonlineer sistemler: Eğer bir sistemin çıktısı, girdisi veya girdileri ile orantılı ve aynı zamanda da girdilerin toplamının oluşturduğu çıktı, girdilerin ayrı ayrı oluşturdukları çıktıların toplamına eşitse (süperpozisyon) sistem lineer, değilse nonlineerdir.

Deterministik ve probabilistik sistemler: Aynı girdiden daima aynı çıktıyı oluşturan sistemler deterministik, diğerlerine probabilistik sistemler denir.

Açık ve kapalı sistemler: Açık sistemlerde sürekli bir madde ve enerji giriş çıkışı olur ve sistem kendini bu değişikliklere göre ayarlar. Kısmen kapalı sistemlerde yalnızca enerji alışverişi olurken kapalı sistemlerde madde ve enerji alışverişi olmaz.

Yayıllı ve üniform girdi: Bir sistemin girdisi mekanda rastgele dağılmışsa *yayıllı girdi*, değilse *üniform girdi* denir.

Sürekli ve kesikli girdi: Girdi veya çıktı sürekli bir fonksiyon olabileceği gibi kesikli (ayrık) bir fonksiyon da olabilir. Sürekli girdi ve çıktılar çoğu zaman işleme ve kullanım güçlükleri dolayısıyla kesikli veya kuantize hale dönüştürülerek kullanılırlar (Müftüoğlu, 1984a).

Yağış-akış modellerinde sistem yaklaşımı kullanıldığında; verilen yağış ve akış değerlerinden etkili tabiat kanunları da dikkate alınarak öncelikle sistem davranışı belirlenir. Böylece ele alınan sistemin modeli oluşturulmuş olur. Artık bundan sonrası modele yeni girdiler katarak çıktılarını hesaplamaktan ibarettir. Tüm bu aşamalar sırasında bazen modellemeyi kolaylaştırmak için bazen de mecbur kaldığı için kabuller yapılır. Her bir kabul modeli gerçekten biraz daha uzaklaştırır. Ama pratik için yeterli bir hassasiyet sağlandığı takdirde yaklaşım ve sonuç yeterli bulunur (Müftüoğlu, 1984a).

Havza sisteminin girdisi havzaya düşen yağış, çıktısı akarsudaki akış olarak alınırsa sızma ve diğer kayıpların etkisiyle sistem davranışı lineer (doğrusal) bir fonksiyon olmaz. Bu durumda sistemin davranışı doğrusal bir diferansiyel denklemle ifade edilemez. Lineer olmayan sistemleri incelemek güç olduğundan akarsu havzalarını incelerken lineer sistem kabulü yapabilmek için sistemin girdisi artık yağış (yağıştan buharlaşma, terleme, yüzey birikintileri ve sızma çıkarılarak elde edilen değer), çıktısı dolaysız akış (toplam akıştan taban akışı çıkarılarak elde edilen değer) olarak alınmaktadır. Artık yağışı dolaysız akışa çeviren sistemin lineer olduğunun kabul edilmesi analizi kolaylaştırır. Gerçekte bu kabul tam olarak doğru değilse de (debinin artışıyla akarsudaki hız da artacağından şiddetli yağışlardan sonra hidrografın pik noktası daha erken görülür, pik debi de doğrusal modelin verdiği sonuçtan daha büyük olur) pratikte yeterli bir yaklaşım sağlamaktadır (Bayazit, 1995).

3.1 Birim Hidrograf Modeli

1932 yılında Sherman tarafından geliştirilen birim hidrograf modeli, yağış ve akış için uygulanan ve lineer sistem kabulüne dayanan ilk kara kutu model olarak bugün bile hala literatürdeki yerini korumaktadır. Bir havzanın özelliklerinin değişmez kabul edilebileceği, bu sebeple de benzer karakterli yağışların oluşturacağı akımların hidrograflarının da benzer olmaları gerektiği kabulünden yola çıkan Sherman havza davranışını karakterize eden bir hidrografın (sistem davranışının) bulunabileceğini düşünmüştür. Birim hidrograf adını verdiği bu hidrograf, havzaya üniform olarak yayılmış ve belli bir süre boyunca sabit şiddetle yağın bir inch (günümüzde çoğunlukla bir cm olarak alınmaktadır) artık yağış meydana getiren yağmurun oluşturduğu akımın hidrografı olarak tarif edilmiştir. Birim hidrograf modelinin dayandığı kabuller şunlardır (Müftüoğlu, 1984a):

- Süreleri eşit, şiddetleri zamanda ve mekanda benzer şekilde dağılmış olan artık yağışların oluşturdukları dolaysız akımların süreleri (hidrograflarının taban genişlikleri) artık yağışların şiddetlerinden bağımsız ve birbirlerine eşittirler.
- Süreleri eşit fakat şiddetleri farklı artık yağışlara ait dolaysız akım hidrograflarının her birinin ordinatları o hidrografın ait olduğu artık yağışın şiddeti ile orantılıdır.
- Bir yağışa ait dolaysız akımın zamanda dağılımı önceki yağışlardan bağımsızdır.
- Artık yağışın şiddeti sabittir.
- Artık yağış havzanın tümüne üniform olarak dağılmıştır.
- Havzanın özellikleri zamanla değişmez ve süresi belli, şiddeti sabit ve havzada üniform dağılmış bir yağışın hidrografı havza özelliklerinin tamamını yansıtır.

3.1.1 Birim hidrografın elde edilmesi

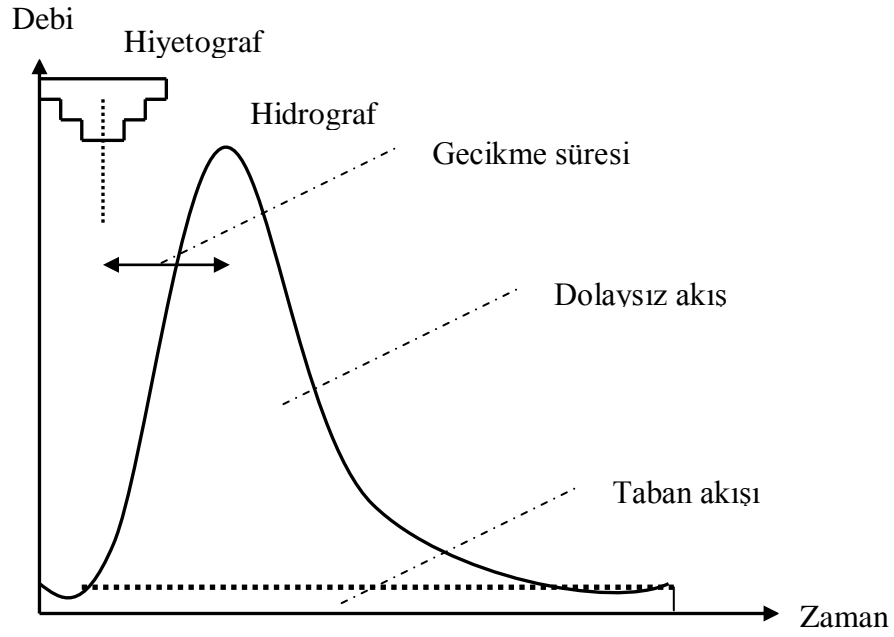
3.1.1.1 Klasik yöntem

Birim hidrografı elde etmek için bütün havzaya üniform olarak yayılmış, şiddeti fazla değişmeyen, kısa süreli ve diğer yağışlardan yeter derecede ayrılmış bir fırtına yağışının hidrografından faydalanılır. Birim hidrografın hesabı şu adımlarla yapılır:

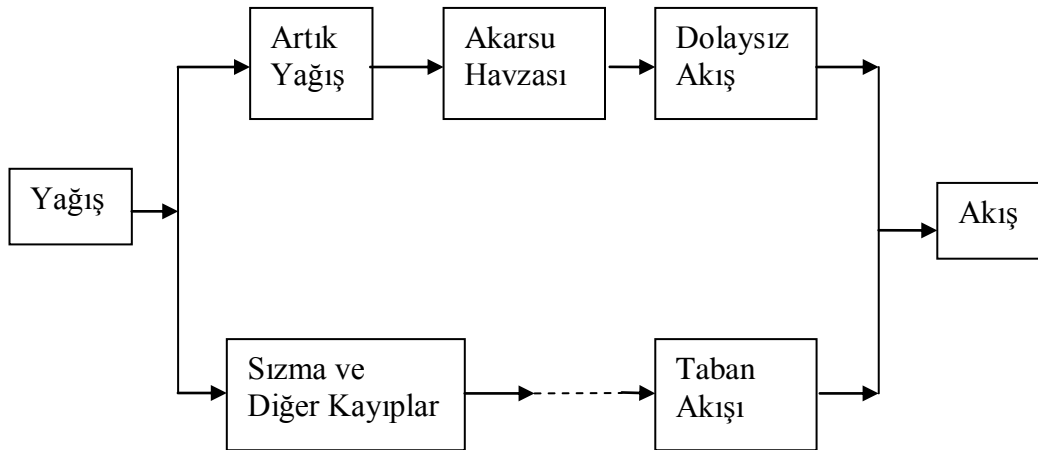
- 1- Havzadaki yağış ölçeklerinin okumalarından faydalanarak karakteristik bir havzasal ortalama toplam yağış eğrisi elde edilir ve buradan hiyetografa geçilir.
- 2- Gözlenen hidrograftan taban akışı ayrılır. Hidrografın ordinatlarından taban akışları çıkarılarak dolaysız akışın hidrografı elde edilir.
- 3- Dolaysız akış hidrografının altındaki alan ölçülerek toplam dolaysız akış hacmi bulunur. Bu değer havzanın alanına bölünerek dolaysız akış yüksekliği elde edilir.
- 4- Artık yağışın tümü dolaysız akış haline çevrildiği için artık yağış yüksekliği süreklilik prensibine göre dolaysız akış yüksekliğine eşit olacağından dolaysız akış hidrografının ordinatlarını dolaysız akış yüksekliğine bölünerek birim hidrografın U ordinatları bulunur.
- 5- Birim hidrografın süresini belirlemek için hiyetografta öyle bir yatay çizgi çizilir ki üstünde kalan alan artık yağış yüksekliğine eşdeğer olsun. Bu çizginin hiyetografla kesişme noktaları arasındaki zaman aralığı artık yağış süresine eşittir.

Böylece belli bir artık yağış süresine ait birim hidrograf elde edilmiş olur. Elde aynı süreli birden fazla yağışın hidrografları varsa bu metotla her biri için birim hidrografı elde edip bunların grafik olarak ortalamasını almak uygun olur. Mümkünse en az beş yağışa ait hidrografların hesaba katılması önerilmektedir. Belirli bir sürede I birimlik artık yağış meydana getiren yağışa ait hidrograf, aynı süreye ait birim hidrograf ordinatlarınının I katı alınarak bulunur.

Bir hidrografın elemanları Şekil 3.2’ de, birim hidrograf modelinde göz önüne alınan sistem Şekil 3.3’ te verilmiştir.



Şekil 3.2 : Bir hidrografın elemanları (Bayazıt, 1995).



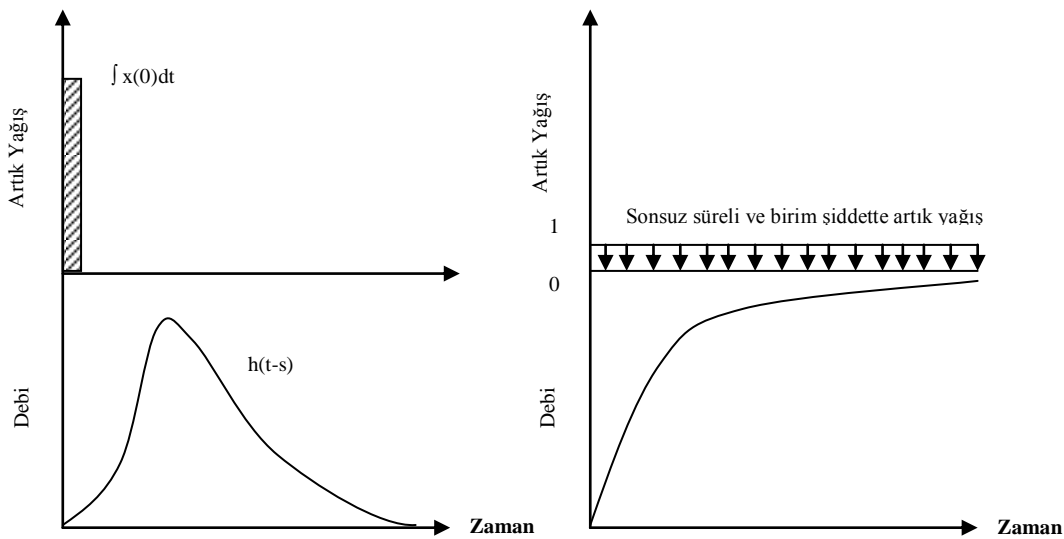
Şekil 3.3 : Birim hidrograf modelinde göz önüne alınan sistem.

Herhangi bir artık yağışa ait hidrografın bulunması için bu artık yağışın hiyetografı, her birinin uzunluğu elde mevcut birim hidrograf süresine eşit M adet dilime ayrılır. Her bir dilimdeki artık yağış hacmi ile buna karşılık gelen hidrograf bulunur. Bulunan M adet hidrografın süperpoze edilmesi ile aranan hidrograf elde edilmiş olur. Artık yağışın debi, hacim, uzunluk boyutunda alınması mümkündür. Yağış ve akışın boyutları farklı olduğu takdirde birim hidrografın ordinatları boyut homojenliği gereği uygun boyutu alacaktır.

3.1.1.2 Anlık birim hidrograf ve S-hidrografi yöntemi

Elektronik sistemlerin analizinde bir sisteme sonsuz küçük bir zaman aralığında uygulanan birim uyarıya sistemin verdiği karşılığa o sistemin indisyel davranışı denir. Ani birim uyarı yerine bazen birim basamak uyarısı uygulanarak sistemin buna verdiği karşılık belirlenir. Böylece sistemin davranışını karakterize eden, fiziksel bakımdan da anlamlı fonksiyonlar elde edilmiş olur. Buradan alınan ilhamla hidrolojide anlık birim hidrograf ve S-hidrografi kavramları düşünülmüştür.

Anlık birim hidrograf havzanın ani birim artık yağıştan oluşturacağı farz edilen akımın hidrografi, S-hidrografi ise birim şiddetli ve sonsuz süreli bir artık yağıştan oluşan akımın hidrografıdır. Tabiatta ne sonsuz küçük süreli ve birim şiddetli ne de süresi sonsuz, şiddeti ise bu sonsuz süre boyunca birim kalan yağışlarla karşılaşılır. Bunlar lineer ve nonlinear yağış-akış kara kutu modellerinin teorisinin anlaşılması açısından pratik faydaları olan kavramlardır.



Şekil 3.4 : Anlık birim hidrograf ve S-hidrografi.

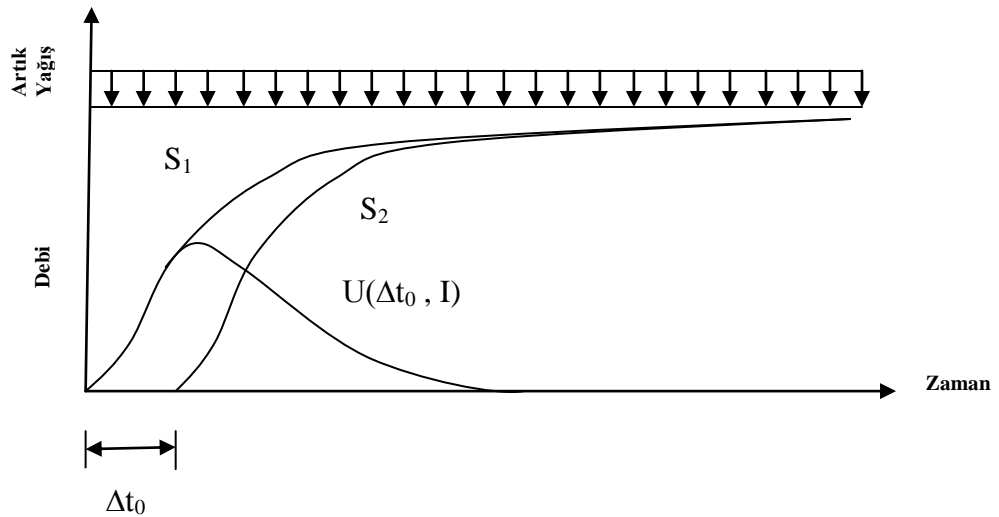
Bir havzanın bu iki kavramsal davranışı arasındaki ilişki bulunabilir. Bir havzaya ait ve aralarında Δt_0 kadar süre bulunan iki adet S-hidrografi S_1 ve S_2 olsun. Lineer sistemlerin süper pozisyon prensibi gereğince iki S-eğrisi ordinatlarının farkları, süresi Δt_0 , şiddeti birim olan artık yağışa ait hidrografın ordinatlarını verecektir. Bu hidrograf Δt_0 cm'lik bir artık yağışa ait olup Δt_0 süreli birim hidrograf bunun ordinatları Δt_0 'a bölünmek sureti ile bulunur.

$$U(\Delta t_0, t) = \frac{I}{\Delta t_0} (S_t - S_{t-\Delta t_0}) \quad (3.1)$$

(3.1) bağıntısı kullanılarak süresi verilen bir hidrograf, S-hidrografından yararlanılarak bulunabilir. Δt_0 sıfıra yaklaştırılacak olursa $U(\Delta t_0, t)$ anlık birim hidrografa ve (3.1) denkleminin sağ tarafı da t anında S eğrisinin zamana göre türevine yaklaşır.

$$U(0, t) = \frac{d}{dt} S_t \quad (3.2)$$

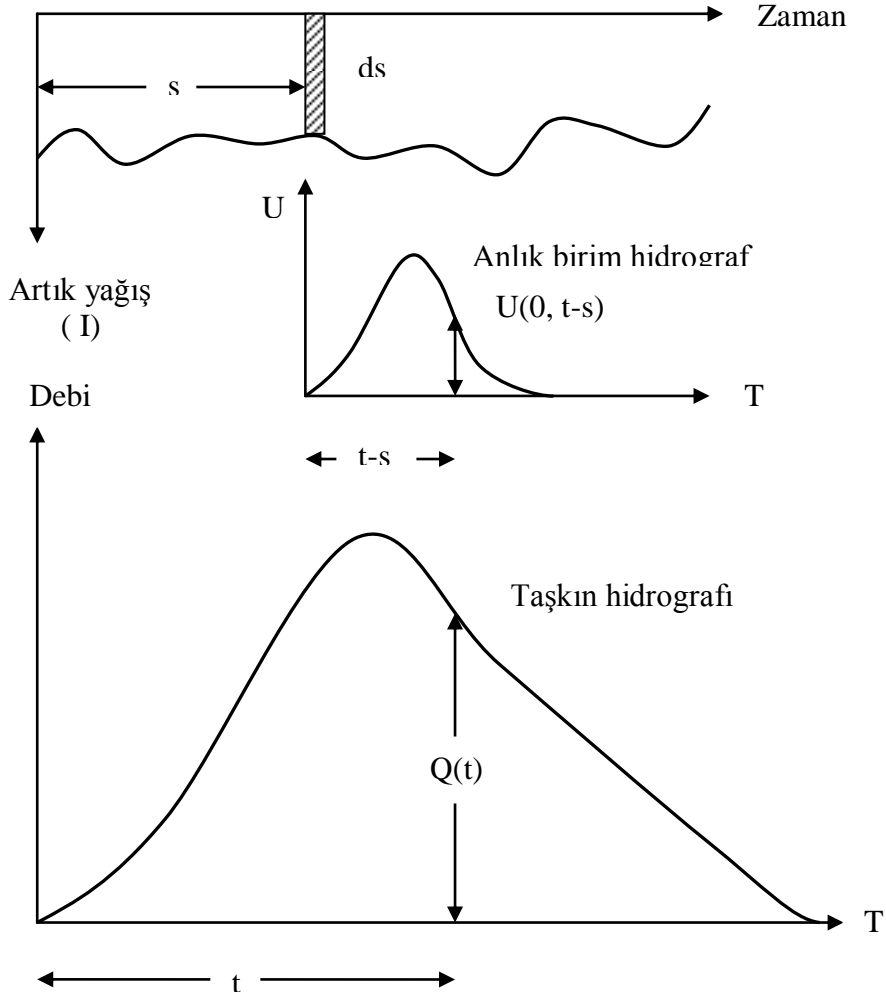
Böylece havzanın iki indisysel davranışı arasındaki bağıntı bulunmuş olur. Bu bağıntının geometrik yorumu açıktır: Anlık birim hidrografın t anındaki ordinatı S eğrisinin o andaki eğimine eşittir (Müftüoğlu, 1984a).



Şekil 3.5 : Δt_0 süreli birim hidrografın S-hidrografından elde edilişi.

Yukarıda anlatılan matematik operasyonun tersinirliği de vardır. Yani S-hidrografi başlangıç noktaları birbirlerine göre Δt_0 kadar ötelenmiş, Δt_0 süreli birim hidrografın süperpozisyonu ile elde edilebilir. Birim hidrografın sayısı taban

uzunluklarının Δt_0 süresine bölünmesi ile bulunur. Anlık birim hidrografi bilinen bir havzanın, verilen bir artık yağıştan meydana getireceği akımın hidrografi yine orantı ve süperpozisyon ilkeleri uygulanarak bulunabilir. Bu işlem Şekil 3.6 yardımıyla açıklanabilir.



Şekil 3.6 : Anlık birim hidrografi ile yağıştan akışın bulunması.

Başlangıcından s kadar sonraki sonsuz küçük bir ds süresinde düşen artık yağışın t anında meydana getirdiği akışın denklemi;

$$dQ(t) = U(0, t-s) I(s) ds \quad (3.3)$$

Her iki tarafın integrali alınarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$Q(t) = \int_0^t U(0, t-s) I(s) ds \quad (3.4)$$

Burada Q artık yağış başlangıcından t süre sonraki debi, $U(0, t-s)$ anlık birim hidrografın $(t-s)$ ' deki ordinatı ve $I(s)$ yine başlangıçtan s süre sonraki bir anda artık yağış şiddetidir. Duhamel veya konvolüsyon integrali olarak adlandırılan bu denklem bir havza modeli olarak ilk defa Cuenod tarafından 1956 yılında teklif edilmiş, birim hidrograf modelinin matematiksel ifadesi olarak benimsenmiş, nonlinear yağış-akış modelleri dahil pek çok araştırmanın temelini teşkil etmiştir.

3.1.1.3 Birim hidrografın deneme ile bulunması

Birim hidrografın bulunmasında matematik açıdan en kolay yöntemdir. Bir denek birim hidrograf kararlaştırılır. Bu rastgele bir hidroraftır ve bununla bilinen bir yağıştan meydana gelen akımın hidrografi hesaplanır. Daha sonra gözlenmiş akımın hidrografi ile karşılaştırılır. Hesaplanan hidrograf gözlenene yeterince yakın değilse seçilen birim hidrograf uygun şekilde düzeltilerek işlemler tekrarlanır. Bunun için kullanılan yöntemlerden biri de en küçük kareler yöntemidir. Birim hidrograf ile tahmin edilen akım y_i , gözlenmiş akım da Q_i ise hata değerimiz;

$$e_i = Q_i - y_i = Q_i - \sum_{j=1}^{j=i} h_j x_{i-j+1} \quad (3.5)$$

$$E = \sum_{i=1}^k (Q_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^k Q_i^2 - 2Q_i y_i + y_i^2 \quad (3.6)$$

Burada k hidrografın toplam ordinat sayısıdır. E 'yi minimum yapan h değerlerinin bulunması için E 'nin h 'ye göre türevinin sıfıra eşitlenmesi gerekir.

$$\frac{\partial E}{\partial h_\alpha} = \sum_{i=1}^k (-2Q_i \frac{\partial y_i}{\partial h_\alpha} + 2y_i \frac{\partial y_i}{\partial h_\alpha}) = 0 \quad (3.7)$$

olduğuna göre;

$$\frac{\partial y_i}{\partial h_\alpha} = x_\alpha \quad ve \quad \alpha = 1,2,3,\dots,M \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^k x_\alpha \sum_{j=1}^{j=i} h_j x_{i-j+1} = \sum_{i=1}^k Q_i x_\alpha \quad \alpha = 1,2,3,\dots,M \quad (3.9)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin sol tarafı otokorelasyon, sağ tarafı ise kros korelasyon fonksiyonlarını ihtiva eder. x_i ' nin otokorelasyon fonksiyonu;

$$\Phi_{xx}(l) = \sum_{i=1}^k x_i x_{i+l} \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (3.10)$$

ve x_i ile Q_i ' nin kros-korelasyon fonksiyonu;

$$\Psi_{xQ}(l) = \sum_{i=1}^k x_i Q_{i+l} \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (3.11)$$

(3.9) denklemini korelasyon fonksiyonları cinsinden;

$$\Psi_l = \sum_{j=1}^{j=i} h_j \phi_{l-j+1} \quad l = i - \alpha = 0, 1, 2, \dots \text{ ve } \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3.12)$$

şeklinde yazılabilir. Wiener-Hopf denklemini olarak bilinen bu denklem M adet lineer denklemden oluşan bir takımını temsil eder ve bu denklem takımının çözümü birim hidrografın ordinatlarını verir.

3.1.2 Birim hidrograf modelinde teori ve gerçek

Birim hidrograf teorisi esas itibarı ile havza yüzey alt sisteminin bağımsız bir lineer sistem olduğu kabulüne dayanır. Lineerlik kabulünü zayıflatan en önemli etken ise havza geçiş süresinin sabit olmayışıdır. Geçiş süresi, tabaka ve kanal akım hızlarının bir fonksiyonu olup, su miktarının dolayısıyla da artık yağış miktarının etkisi altındadır. Küçük havzalarda geçiş süresini daha çok tabaka akımlarının hızları belirlerken büyük havzalarda akarsu yatak ağındaki hızlar önem kazanır.

Birim hidrograf teorisinin dayandığı ikinci kabul havzanın zamanla değişmezliği olup, bu da gerçeğe uymaz. Çünkü gerek insan faaliyetleri gerekse tabii değişimler sonucu havzalar sürekli değişim gösterirler. Teorinin dayandığı ve gerçeği yansıtmayan diğer bir önemli kabul de artık yağışın havzada dağılımının yağıştan yağışa değişmez veya üniform olduğudur.

Yapılan deneysel çalışmalar, birim hidrograf teorisinde yapılan lineerlik kabulünün yanlışlığını ve yağışın havza üzerinde üniform olmayan bir dağılıma sahip olduğunda hidrograf ve pik debilerin büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir.

3.2 Nonlinear Modeller

Artık yağış-dolaysız akış ilişkisi gerçekte nonlinear bir ilişki olmasına rağmen, lineerlik kabulünün sebebi hem hesaplamaları oldukça kolaylaştırmak hem de akım tahminlerinde birim hidrograf modeli ile sağlanan yaklaşıklığın yeterli görülmesidir.

Etkin yağış-toplam akış arasındaki ilişki modellenmek istendiğinde; havzanın yüzey alt sisteminin nonlinear iletim ve biriktirme etkilerini de (bitkilerce tutma, yüzeysel biriktirme ve sızma) göz önüne almak gerekir. Herhangi bir andaki etkin yağışın bitki örtüsü tarafından tutulacak, çukurlarda birikecek ve toprağa sızacak kısmı; bitki örtüsünün ıslaklık derecesine, çukurlardaki önceden biriken su hacmine ve toprağın doygunluk derecesine, dolayısıyla da önceki yağışlara bağlıdır (Müftüoğlu, 1984a). Bu sebeple de önceki yağışların etkilerini dikkate alan nonlinear modellere ihtiyaç vardır. Zamanla değişmeyen, sonlu hafızaya sahip, M . dereceden nonlinear nedensel bir kara kutu modelde;

$$y(t) = h_0 + \sum_{n=1}^M \int_{(n)t-N}^t h_n(t-s_1, \dots, t-s_n) \prod_{i=1}^n x(s_i) ds_1, \dots, ds_n \quad (3.12)$$

veya bunun eşdeğeri olan;

$$y(t) = h_0 + \sum_{n=1}^M \int_{(n)0}^N h_n(s_1, \dots, s_n) \prod_{i=1}^n x(t-s_i) ds_1, \dots, ds_n \quad (3.13)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Matematikte Volterra integrali veya fonksiyonel dizi diye adlandırılan bu integralin nonlinear elektronik sistemlerin analizi için kullanılabileceği fikri ilk defa Wiener tarafından 1942 yılında ileri sürülmüştür.

Denklem (3.13)' de;

- M : Sistemin nonlinearlik derecesi,
- N : Sistemin hafıza uzunluğu,
- $x(t)$ ve $y(t)$: Girdi ve çıktı,
- $h_n(\cdot)$: Sistem davranış fonksiyonları (lineer, kuadratik, kübik, ...)
- s : Dikkate alınan girdi ve çıktı arası gecikme süresini,
- h_0 : Sistem içi bir kaynağın katkısını veya kaçağı ifade eder.

Kaçıncı dereceden nonlinear olduğu bilinmeyen bir sistem için fonksiyonel diziyi (denklem 3.13) pratik bakımdan uygulanabilir en genel şekliyle kullanmak akla gelse de böyle bir uygulamada verilerin çok sağlıklı olması gerekir. Hatalı verilerin kullanılması halinde n . dereceden bir sistemin yüksek dereceden modelle temsili, davranış fonksiyonlarının belirlenmesinde önemli ölçüde hatalara yol açar. Çünkü böyle bir model, gerek ve yeter olandan daha yüksek bir uyum kabiliyetine sahip olacak ve davranış fonksiyonları sistemin davranışı ile hataları ayıramayacağından hepsine birden uyum gösterecektir (Müftüoğlu, 1984a).

Yüksek dereceli fonksiyonların davranış fonksiyonlarının belirlenmesindeki güçlükler üçüncü ve daha yüksek dereceli modellerin uygulamalarında caydırıcı rol oynamaktadır. Bu sebeple şimdiye kadar yapılmış çalışmalar ancak lineer ve kuadratik (ikinci dereceden) modellerle gerçekleştirilmiştir. Kuadratik modellerle elde edilen sonuçların lineer modellerin sonuçlarıyla kıyaslanmasıyla; kuadratik terimlerin hassasiyete önemli ölçüde katkıda bulunduğu ortaya çıkmıştır (Müftüoğlu, 1984a). Amorocho (1961) fonksiyonel diziyi (Volterra integralini) yağış-akışa uygulamış ve ikinci dereceden nonlinear bir sistem için;

$$y(t) = h_0 + \int_0^N h_1(s)x(t-s)ds + \int_{s_1=0}^N \int_{s_2=0}^N h_2(s_1, s_2)x(t-s_1)x(t-s_2)ds_1ds_2 \quad (3.14)$$

denklemini vermiştir. Burada;

$x(t-s)$: t anında akıma katkıda bulunan yağışları,

h_1 ve h_2 : Lineer ve ikinci derece davranış fonksiyonlarını,

$y(t)$: Havza çıkış noktasındaki akımı,

s : Dikkate alınan yağış ile akım arası gecikme süresini,

N : Havza hafıza uzunluğunu,

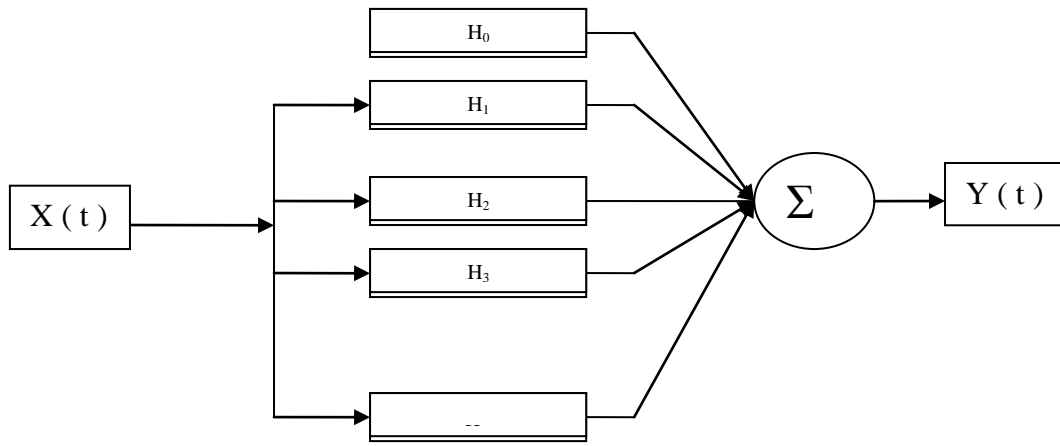
h_0 : Komşu havzalardan beslenen bir kaynağı veya çıkış ölçme kesitine gelmeden meydana gelebilecek bir kaçağı göstermektedir.

(3.14) denklemin kesikli hali aşağıdaki gibidir;

$$y(t) = h_0 + \sum_{s_1=1}^N h_1(s_1)x(t-s) + \sum_{s_1=1}^N \sum_{s_2=1}^N h_2(s_1, s_2)x(t-s_1)x(t-s_2) \quad (3.15)$$

Bu denklemde havza davranışını temsil eden kerneller (h' lar) sadece s gecikme sürelerinin fonksiyonudur.

(3.15) denkleminin ilk terimi konvolüsyon integrali yani birim hidrograf modelidir. İkinci terimi ise iki boyutlu olup, yağış değerlerini ikişer ikişer hesaba katmaktadır. Bu modelin havza davranışını temsil edebileceği düşünülürken havza işlevinin Şekil 3.7' de şematik olarak gösterilen lineer, kuadratik ve varsa daha yüksek dereceli bileşenlerden oluştuğu ve bu bileşenlerin girdi üzerinde paralel bir operasyonla çıktıyı oluşturdukları kabul edilmiş olmaktadır (Müftüoğlu, 1984a).



Şekil 3.7 : Sistem bileşenlerinin girdi üzerindeki paralel operasyonu

3.3 Klasik Kara Kutu Modellerle İlgili Literatür Özeti

Nash (1957) anlık birim hidrografi kavramsal bir model yardımı ile belirlemeye çalışmıştır. Bu çalışmada havza birbirinin aynı n adet lineer hazneden oluşan bir sistem olarak düşünülmüş, ilk hazneye giren birim hacimde suyun ani olarak girdiği, oradan çıkan suyun zincirleme olarak n hazneyi kat ettiği yaklaşımı ile n . hazneden çıkan akımın anlık birim hidrografi vereceği ileri sürülmüştür.

Amorocho (1963) havza davranışı konusundaki deneysel bir çalışma sonunda hidrografların kabarma kanatları, pik bölgeleri ve alçalma kanatlarının baş kısımlarında şiddetli nonlinearliğin bulunduğunu tespit etmiştir.

Chow (1964) anlık birim hidrografi (3.1) denkleminde verilen bağıntıyı kullanarak S hidrografından türetmek için yaklaşık bir grafik yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde anlık birim hidrograf standart S -hidrografının yeterince sıklıkla alınan noktalarındaki teğetlerin eğimleri bulunarak belirlenebilmektedir.

Bayazit (1966) anlık birim hidrografın spektral analiz yöntemi ile belirlenmesini gerçekleştirmiş ve gözlenmiş yağış ve akım verilerine uygulamasını vermiştir.

Gilles ve Miguel (1983) nonlinear bir yağış-akış modeli geliştirmiş ve Montreal' de bir kent havzasına uygulamışlardır. Çıkan sonuçlar ILLUDAS modelinin verdiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar hidrografların özelliklerini daha iyi tanımlamak amacıyla beş dakikalık zaman aralıkları ile yapılmıştır. Modelin kurulmasında özellikle en uygun parametrelerinin tanımlanması (havza hafızası U ve birinci ve ikinci derece davranış fonksiyonları M_1 ve M_2) büyük önem arz etmektedir. Çalışmada yalnızca kalibrasyon sonuçlarına dayalı parametre tanımlamasının öngörülme tahmin hatalarına yol açabileceği görülmüştür. Kalibrasyon dönemi performansları M_1 ve M_2 ' nin artması ile artarken tahmin dönemi sonuçları için aynı şey geçerli değildir. Sonuç olarak en iyi model parametrelerini ayarlamak için çift yönlü bir kalibrasyon ve test dönemi analizi önerilmiştir. Model performansının olumlu olmasının yanı sıra önerilen modelin kolay uygulanırlığı (yalnızca üç parametre gerektirmektedir) ve sayısal verimliliği gerçek zamanlı akımların tahmininde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Mimikou ve Rao (1983) tarafından Yunanistan'ın Arachthos Nehri Havza'sında bölgesel bir aylık yağış-akış modeli geliştirmişlerdir. Bu model gerek lineer gerekse nonlinear yağış-akış davranışına sahip olan havzalara uygulanabilmektedir. Modelin iki parametresinden biri olan k, modelin derecesini belirlemekte olup, havzanın bir karakteristiğidir. Diğer parametre n ise uygulamada kullanılan aylara ait bir karakteristik olup, modelin hafızasını tayin etmektedir. Modelin katsayıları uygulama bölgelerine uyarlanabilmekte olup, böylece modelin akım ölçümleri olmayan diğer havzalarda da kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Modelin uygulandığı bölgede elde edilen sonuçlar tatminkar bulunmuştur.

Müftüoğlu (1984b) beşinci bölümde detaylı bir şekilde anlatılacak olan ve fonksiyonel dizinin zaafalarını taşımayan Basitleştirilmiş İki Boyutlu Birim Hidrograf Modeli (BİBBH) ile birlikte ikinci ve üçüncü dereceden nonlinear yağış-akış modelleri geliştirmiş ve bunları fonksiyonel dizi ile karşılaştırmıştır. En iyi sonuçların BİBBH modeli ile elde edildiği görülmüştür.

Hamidi (1984) Müftüoğlu tarafından geliştirilen nonlinear yapıya sahip basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrografın belirlenmesinde lineer programlama

uygulamasını yapmıştır. Lineer programlamanın (simpleks metodunun) kullanılması basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrografın negatif değerler alması önlenmiş, böylece daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmıştır.

Tsykin (1985) tarafından Avustralya'da aylık akış miktarlarını hesaplayabilmek için Basit Zaman Serileri Modeli geliştirilmiştir. Modelde, içinde bulunulan zamandaki akış miktarının, o andaki yağış miktarı ile daha önceki zaman periyotlarındaki yağışların gecikmiş etkilerinin kombinasyonundan meydana geldiği kabul edilmektedir. Yapılan uygulamalarda, kalibrasyon işlemlerinin R^2 katsayısı 0,90 - 0,96 civarında hesaplanmış olup, kalibrasyon aralığından 3-4 kat daha uzun aralıklarda yapılan tahminlerde ise R^2 değerleri 0,85 ve üzerinde elde edilmiştir.

Müftüoğlu (1991) tarafından aylık akış tahminlerinde kullanılan, nonlineer bir yağış-akış modeli geliştirilmiştir. Model fiziksel açıdan havza karakteristiklerini yansıtabilen bir yapıya sahiptir. Yapılan çalışmada, lineer fonksiyonel ve ikinci dereceden fonksiyonel serilerle elde edilen sonuçlar, bu modelin sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup, bu modelin diğer iki modelden çok daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Hjelmfelt (1994) tarafından yapılan çalışmada; Nash dizisine dayanan anlık birim hidrograf için stokastik bir ifade geliştirilmiştir. Bu kavramsal model rastgele bir değişken olarak rezervuar katsayısının iyileştirilmesi sırasında rezervuar sayısını sabit tutar. 12.2 km² alana sahip kuzey Missouri havzasının 24 adet fırtına kaydı ile çalışılmış ve çıkan sonuçlar stokastik modelin hidrograf tahmininde kullanılabileceğini göstermiştir.

Spaveda (1997) tarafından yapılan çalışmada; Puerto Rico 'da çeşitli havzalarda yağıştan dolaysız akış tahmini için iki ayrı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde artık yağıştan dolaysız akış tahmini için jeomorfoloji tabanlı birim hidrograf kullanılmıştır. İkinci yöntemde ise kinematik dalga yaklaşımı ile yönlendirilmiş hidrolik akım denkleminin nasıl çıkarıldığı gösterilmiştir. Burada toplam artık yağış yüksekliği Green-Ampt denklemlerinden elde edilirken dolaysız akış hidrograftan hesaplanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; iki yöntemde gözlemsel verilere uygun tahminler üretmesine rağmen ikinci yöntem pik debinin şiddetini ve zamanını daha doğru tahmin etmiştir.

Güldal ve Müftüoğlu (1998) nonlinear bir yağış-akım modeli geliştirmişler ve bu modeli günlük yağış ve akım verilerine uygulamışlardır. Çıkan sonuçlar fonksiyonel dizi, lineer model (birim hidrograf) ve iki boyutlu birim hidrograf modellerinin verdiği sonuçlarla kıyaslanmış ve model performansının iyi olduğu görülmüştür.

Bhunya ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmada; literatürde bulunan sentetik birim hidrograf modellerinde veri sayısının azlığından kaynaklanan hidrograf taraflılığının ve kılavuz (yardımcı işlem ve benzeşim ve kabuller) gerektirmelerinden kaynaklanan zorluklar ile çoğunlukla birim akış hacmi için düzenlenmemiş olarak kalan birim hidrograf türetmenin zorlukları aşılmaya gayret edilmiştir. Bunun için Gray, SCS ve Synder yöntemlerinden daha uygun ve daha kesin sonuçlar veren sentetik bir hidrograf türetmek için mevcut iki parametrelili gamma dağılımının basitleştirilmiş bir versiyonu ortaya konmuştur. Revize edilmiş yöntem Nash parametresi n (rezervuar sayısı) 'den β ve λ ' nin (boyutsuz birim hidrografın şeklini belirleyen faktörler) tahminleri için türetilen ampirik ilişkileri yaklaşık fakat doğru olarak birleştirmiştir. Yöntemin uygulanabilirliği hem deneme hem de saha verileriyle test edilmiştir.

Bhunya ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada; son yıllarda dikkat çekici bir biçimde artan sentetik birim hidrografların geliştirilmesinde kullanılan olasılık dağılım fonksiyonları özellikle de üç parametrelili beta dağılımının potansiyelleri araştırılmıştır. Bilinmeyen parametrelerin seçimi için üç parametrelili beta dağılımının şekli ile sentetik birim hidrografın şekli arasında benzeşim kullanan yaklaşımlar geliştirilmiştir. Birim hidrografın türetilmesi için kullanılabilecek beta dağılımının parametrelerinin tahmini basit ve doğru bir şekilde ortaya konulmuştur. Gözlenmiş hidrograflara uygun olarak önerilen yöntemle elde edilen birim hidrograflar yaygın olarak kullanılan iki parametrelili gamma dağılımından daha iyidir. Hindistan içinden ve dışından farklı havzaların sanal verileri kullanılarak model yaklaşımının doğruluğu ve potansiyeli gösterilmiştir.

Bhunya ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada; sentetik bir birim hidrograf türetilmesi için fiziksel bir tabanı da olan ve Nash tekli doğrusal rezervuarının eşit olmayan depolama katsayısına sahip iki adet seri bağlı rezervuara bölünmesiyle bir hibrit model ortaya konulmuştur. Bu iki depolama katsayısının tahmini için bilinen bir pik debi ve pik debinin görüldüğü zamana dayanan ampirik ilişkiler verilmiştir. Seri olarak bağlı iki üniteli hibrit modelin Hindistan'dan dört Türkiye'den bir

havzadan elde edilen ve sentetik olarak türetilen verilerle yapılan testinde çok yaygın olarak kullanılan Snyder, SCS ve iki parametrelili gama dağılımından daha iyi sonuçlar vermesi anlamlı bulunmuştur. Önerilen model yaklaşımının işlerliği hiç veri olmaması veya kısmi veri olması durumları için ayrıca test edilmiştir.

Ding (2005) çok farklı büyüklükteki iki havzada, havza nonlineerlik ölçüsünü belirlemek için anlık birim hidrografi bir değişken olarak kullanmıştır.

Saghafian (2006) birim hidrograf modelinin iki zaafı olan lineer sistem ve zamanla değişmezlik kabulleri için nonlineer bir dönüşüm yöntemi önermiştir. Dönüşüm yöntemi kinematik dalga yaklaşımını ve havza geometrisini kullanan haritalama tekniğini içermektedir.

Guo (2006) tarafından yapılan çalışmada; kinematik dalga modeli (KWAH) kullanılarak teorik olarak boyutsuz bir birim hidrograf türetilmesi gösterilmiştir. Kıyaslama için SCSUH (Toprak Koruma Servisi Boyutsuz Birim Hidrografi) kullanılmış ve bu iki yöntemin uyumlu sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yöntemin uygulanabilirliğini doğrulamak için büyüklükleri 20 ile 200 dönüm arasında değişen beş adet teorik dikdörtgensel havza kurgulanmış ve türetilen 100 yıllık pik debiler SCSUH ve CUHP (Colorado Birim Hidrograf Prosedürü) modellerinin ürettiği değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki 60 ile 120 dönüm arasındaki havzalarda KWAH, CUHP ile uyum sağlar ve 120 dönüme kadar olan kent havzalarında uygulanabilir.

Cleveland ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada; Teksas'ta 91 istasyonda gözlemlenen 1600 'den fazla fırtına verisinden elde edilen yağış-akış modelleri için anlık birim hidrograf analizi yapılmıştır. Model iki farklı değerlendirme fonksiyonu kullanarak gözlenmiş verileri uygun hale getirir. Bunlar hataların karesinin toplamı fonksiyonu ve pik deşarj zamanı mutlak hata fonksiyonudur. Model çeşitli kriterler kullanılarak Doğal Kaynakları Koruma Servisi Boyutsuz Birim Hidrografi (NRCS) ve yaygın adıyla Teksas Hidrografi ile karşılaştırılmış ve yeterli bir performansı olduğu görülmüştür.

Jain ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada; birim hidrograf türetilmesi için kullanılan optimizasyon tekniklerinden bir çoğunda hidrografın alçalma kanadının dalgalı şekli dolayısıyla fiziksel olarak gerçekçi olmaması sebebiyle bahse konu alçalma kanadının monoton olarak düşüşüne imkan veren ve ilave kısıtlamalar içeren

bir yöntem ileri sürülmüştür. Amaç fonksiyonundaki marjinal bozulmaya rağmen geliştirilen birim hidrograf fiziksel olarak gerçekçidir ve gözlenen ile hesap edilen dolaysız akış hidrografları birbirine çok yakındır.

Cleveland ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada; yeterince ölçüm yapılmamış olan havzalarda havza fiziksel özelliklerinden yararlanılarak birim hidrograf elde edilmiştir. Havza topoğrafik bilgilerinden yararlanılarak birim hidrograf parametrelerinin tayini için parçacık izleyici yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışma Teksas'ta alanı 0,65 ile 388 km² arasında değişen, ana kanal uzunluğu 1,1 ile 80 km arasında değişen ve boyutsuz ana kanal eğimi 0,0002 ile 0,02 arasında değişen 126 adet havzaya uygulanmıştır. Birim hidrograflar tamamen türetilmiş topoğrafik veriler ile gözlenmiş yağışlardan dolaysız akım hidrografi simülasyonuna dayanmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki model havzanın birkaç özelliğini kullanarak birim hidrograf parametrelerinin tahmininde doğru yaklaşım sağlamaktadır.

4. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ

Yapay zeka, insanın düşünme yapısını anlamak ve bunun benzerini ortaya çıkaracak bilgisayar işlemlerini geliştirmeye çalışmak olarak tanımlanır. Yani programlanmış bir bilgisayarın düşünme girişimidir. Daha geniş bir tanıma göre ise, yapay zeka, bilgi edinme, algılama, görme, düşünme ve karar verme gibi insan zekasına özgü kapasitelerle donatılmış bilgisayarlardır.

Bir fonksiyonu minimize ya da maksimize etmek amacı ile gerçek ya da tamsayı değerlerini tanımlı bir aralıkta seçip fonksiyona yerleştirerek sistematik olarak bir problemi incelemek ya da çözmek işlemlerine optimizasyon denir.

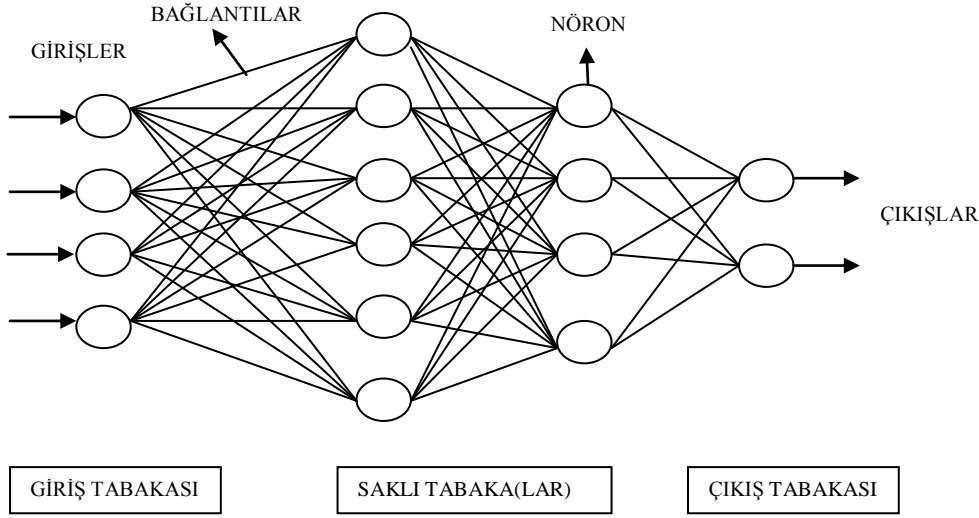
Optimizasyon işlemlerinde uygun bir çözüm alanını elde etmek için çok çeşitli arama teknikleri kullanılmaktadır. Bunların çoğu üç temel sınıfta gruplandırılabilir. Bunlardan birincisi hesaplama tabanlı tekniktir. İkincisi, çözüm uzayında her noktayı ele aldığımız ve bunları değerlendirdiğimiz tekniktir. Hesaplama yoğunluğu nedeniyle bu türden bir yaklaşım, özellikle basit problemler haricinde sınırlı fayda sağlamaktadır. Üçüncüsü ise yönlendirme yaparak rastgele arama yapabileceğimiz bir tekniktir.

Genel olarak optimizasyon problemlerinde kullanılan yapay zeka teknikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

4.1 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları kavramı beynin çalışma ilkelerinin sayısal bilgisayarlar üzerinde taklit edilmesi fikri ile ortaya çıkmış ve ilk çalışmalar beyni oluşturan biyolojik hücrelerin, ya da literatürdeki ismiyle nöronların matematiksel olarak modellenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların ortaya çıkardığı bulgular, her bir nöronun komşu nöronlardan bazı bilgiler aldığı ve bu bilgilerin biyolojik nöron dinamiğinin öngördüğü biçimde bir çıktıya dönüştürüldüğü şeklinde idi. Bugün yapay sinir ağları olarak isimlendirilen alan, birçok nöronun belirli biçimlerde bir araya getirilip bir işlevin gerçekleşmesi üzerindeki yapısal olduğu kadar matematiksel ve felsefi

sorunlara yanıt arayan bir bilim dalı olmuştur. YSA' nın genel mimarisi Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1 : YSA' nın genel mimarisi.

Yapay sinir ağları, karar hızı açısından insan beyni ile yarışabilecek aşamaya henüz gelememiş olmasına rağmen, karmaşık eşleştirmelerin hassas bir biçimde gerçekleştirilebilmesi ve yapısal gürbüzlüğe sahip olmaları nedeniyle gün geçtikçe uygulama alanları genişlemektedir. Sinir ağları kavramını çekici kılan aşağıda sıralanmış temel özelliklerin algılanışında bu noktanın gözden kaçırılmamasında yarar vardır.

Birinci özellik sistemin paralelliği ve toplamsal işlevin yapısal olarak dağılımlılığıdır. Diğer bir deyişle birçok nöron eşzamanlı olarak çalışır ve karmaşık bir işlev çok sayıda küçük nöron aktivitesinin bir araya gelmesinden oluşur. Bu da, zaman içerisinde herhangi bir nöronun işlev dışı kalması durumunda bile ağ başarımının dikkate değer ölçüde etkilenmeyeceği anlamına gelir.

İkinci özellik ise genelleme yeteneği, diğer bir deyişle ağ yapısının, eğitim esnasında kullanılan nümerik bilgilerden eşleştirmeyi betimleyen kaba özellikleri çıkarsaması ve böylelikle eğitim sırasında kullanılmayan girdiler için de anlamlı yanıtlar üretebilmesidir.

Üçüncü özellik ise ağ fonksiyonunun nonlineer oluşudur. Yapı üzerinde dağılmış belli tipteki nonlineer alt birimler özellikle istenen eşleştirmenin denetim ya da tanılama işlemlerinde olduğu gibi nonlineer olması durumunda işlevin doğru biçimde yerine getirilebilmesini matematiksel olarak olası kılarlar. Burada, işlevin doğru

biçimde gerçekleştirilmesi için yapısal bir esneklik gerekliliği vurgulanmalıdır. Yani ağ parametreleri, başarıyı arttıracak (ya da maliyeti azaltacak) şekilde değiştirilebilmelidir.

Belirtilebilecek son özellik, sayısal ortamda tasarlanan sinir ağı yaklaşımlarının tüm devre gerçekleştirilebilirliklerinin olmasıdır. Bu da yakın gelecekte bu sistemlerin, özellikle robotik uygulamaları ile birlikte düşünüldüğünde, günlük hayatta yaşam kalitesinin artırılmasında ne denli önemli bir rol oynayabileceklerine işaret eder. Günümüzde birçok alanda yapay sinir ağlarının uygulamalarına rastlamak olasıdır. Özellikle örüntü tanıma, işaret işleme, sistem tanıma ve nonlineer denetim alanlarında yapay sinir ağlarının değişik modelleri ve değişik öğrenme stratejileri başarı ile kullanılmıştır. Burada her bir problemin çözümü için yapay sinir ağı yaklaşımı ile önerilebilecek çözümler, tasarımcıya bazı seçenekler sunar. Bunlardan bazıları kimi zaman problemin doğası gereği seçenek olmaktan çok zorunluluk haline gelebilir. Bu nedenle, tasarımcıların bu seçenekleri doğru değerlendirmeleri gibi bir zorunluluk her yaklaşımda olduğu gibi yapay sinir ağı alanında da söz konusudur.

Ele alınan bir problemin yapay sinir ağı yaklaşımı ile çözümünde tasarımcının önüne çeşitli seçenekler çıkar. İlk seçenek öğrenme mekanizması üzerindedir. Literatürde iki tip öğrenme stratejisinden bahsedilmektedir. Bunlar öğreticili öğrenme ve öğreticisiz öğrenme olarak isimlendirilmektedir. Yaklaşımlar arasındaki temel farklılık istenen çıkış değerlerinin mevcut olup olmamasıdır. Eğer bir eğitici, sistem çıkışlarının istenen değerlerini temin ediyorsa bu tip öğrenme birinci grupta yer alır. Tasarım koşulları istenen değerlerin temin edilmesine müsaade etmiyorsa bu tip öğrenme ikinci grupta yer alacaktır. Öğreticisiz öğrenme algoritmaları daha çok, sistemin geçmişte karşı karşıya kaldığı veri kümesinin içerdiği istatistiksel bilgilerin çıkarsamasını amaçlar. Böylelikle çok elemanlı veri kümeleri içerisinde deneyim yoluyla bilgi genelleştirme yapılabilir.

Tasarımda ikinci seçenek mimari üzerindedir ve iki alt başlıkta değerlendirilebilir. Bunlardan ilki verinin akış yönüdür. Eğer ağ üzerinde bilgi akışı sürekli ileri doğru ise bu yapıya sahip ağ modelleri ileri beslemeli olarak adlandırılır, ağ yapısında geri besleme bağlantıları varsa bu tipteki sistemlere geri beslemeli denir.

Ağ yapılarının sahip olabileceği yapısal farklılıklar ikinci alt başlıkta incelenebilir. Tasarımın sunduğu üçüncü önemli seçenek öğrenme algoritmasıdır. Literatürde birçok öğrenme algoritmasından bahsedilmektedir ve bunlar öğrenme denemeleri olguyu matematiğin kuralları ile ölçülebilir büyüklüklere dönüştürerek bir başarı ölçütünün oluşturulmasına ve bu ölçütün zaman içerisinde arttırılmasını (ya da bir maliyet ölçütünün oluşturulmasına ve bu ölçütün zaman içerisinde azaltılmasını) sağlayacak parametre değişikliklerinin hesaplanmasına dayanırlar. Burada parametre güncelleme işlemi için türetilen bilginin hangi yöntemlerle oluşturulduğu, tasarım esnekliğinin ana temasıdır.

Bir başka seçenek ise parametre güncelleme işleminin zamanlamasıdır. Burada problemin dayattığı fiziksel gerçekliğin, zamanlamanın seçimi üzerinde bir koşul oluşturabileceği vurgulanmalıdır. Öğreticili öğrenme yaklaşımında parametre güncelleme işlemi, normal çalışma esnasında, anlık gözlemlerden elde edilen bilgi ile yapılıyorsa buna eşzamanlı öğrenme denir. Eğer sinir ağı daha önceden belirlenen bir giriş/çıkış eşleştirmesini gerçeklemeye çalışıyorsa buna da zamandan bağımsız öğrenme denir.

Son olarak parametre güncelleme işlemi için iki seçeneğin varlığından bahsedilebilir. Eğer ağ parametreleri, eğitim çiftlerinin tamamının ağ üzerinden geçirilip her bir geçişte hesaplanan değişim miktarlarının toplamı ile güncelleniyorsa toplumsal, her bir eğitim çifti için hesaplanan değişim miktarı o anda uygulanıyorsa bireysel güncellemeden bahsedilir.

4.2 Uzman Sistemler

1970'lerde yapay zeka alanındaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve ticari olarak 1980'lerde uygulanmaya başlanmıştır. Belirli bir uzmanlık alanında, gerçek kişilerden derlenen bilgileri temel alarak, zamanla kendisini geliştirebilme yeteneği de olan yazılımlardır. Uzman davranışını taklit etmek üzere çok farklı metotlar kullanılmaktadır. Her uzman sistemde öğrenme davranışı olmayabilir fakat her uzman sistem geliştirildikten sonra gerçek problemler karşısında insan uzmanla aynı sonuca varmalıdır. Bu programlar, belirli bir problem hakkındaki bilgiyi çözümleyen, problemlere çözümler sağlayan, tasarımıma bağlı olarak, düzeltmeleri yapmak için bir iş dizisi öneren programlardır.

4.3 Metallerin Tavlanması Benzeşimi

Optimizasyon problemleri için iyi çözümler veren olasılıklı bir arama tekniğidir. Kirkpatrick ve arkadaşları tarafından 1983 yılında önerilmiştir. Katıların ısıtılması ve sonra kristalleşmeye kadar yavaş yavaş soğutulması esasına dayanır. Sıcaklık değeri elde edilen en iyi çözümden daha kötü bir çözümün kabul edilme olasılığını belirlemek için kullanılır. Tavlama benzetimi yüksek bir sıcaklık değeriyle başlar. Her bir hesaplama adımında mevcut çözümün komşuları arasından çok sayıda çözüm üretilir. Yeni çözümler belirlenen kriterlere göre kabul edilir veya reddedilir. Her bir hesaplama adımından sonra sıcaklık belirlenen bir fonksiyona göre azaltılır. Algoritma istenen iterasyona ulaşıldığında ya da sıcaklık minimum değerine ulaşıldığında veya istenen çözüme ulaşıldığında sonlandırılır.

4.4 Gelişime Dayalı Algoritmalar

Gelişime dayalı (GD) algoritmalar optimizasyon yöntemleri açısından üçüncü gruba dahil edilen algoritma türleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tekniği kullanırken, arama işlemlerinde daha iyiye gitmek için sezgisellikten faydalanılmaktadır. Genetik algoritmalar (GA) çok popüler bir GD algoritmasıdır. Birçok genetik algoritma türünün geliştirilmesine rağmen çaprazlama, seleksiyon ve mutasyon işlemleri ayrı ayrı gerçekleştirildiği için uzun zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

4.4.1 Genetik algoritma

Genetik algoritmalar (GA), doğal seçme ve genetik kurallarına dayanmaktadırlar. Bu kurallar, en fazla uyum sağlayan canlının hayatına devam etmesi ve uyum sağlayamayan canlının da elenmesi olarak algılanabilir. GA' lar bu iki kuralı bir arada kullanarak en iyiyi aramayı amaç edinen bir yöntemdir.

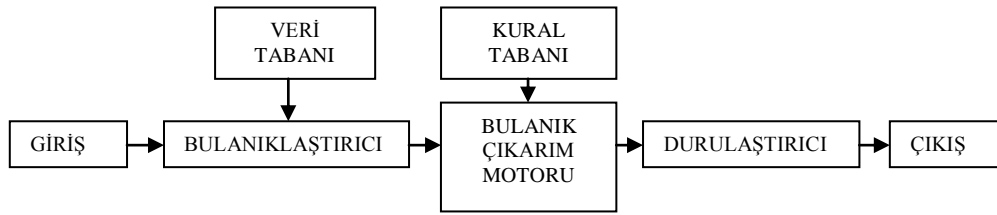
GA' lar basit hesaplamalar gerektirir ve bu basitliğinden dolayı etkinliği azalmaz. Diğer pek çok optimizasyon yöntemlerindeki süreklilik ve türevler gibi kabulleri içermez. Uygulamalarında ağır matematik bilgiler kullanılmaz.

4.5 Bulanık Mantık

Bulanık kümeler Zadeh tarafından ortaya konmasından bu yana dünyada gittikçe artan birçok uygulama alanı buldu. Bulanık mantığın temeli bulanık küme ve alt

kümelere dayanır. Klasik yaklaşımda bir varlık, ya kümenin elemanıdır ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde varlık küme ile olan üyelik ilişkisi bakımından kümenin elemanı olduğunda "1", kümenin elemanı olmadığı zaman "0" değerini alır. Bulanık mantık klasik küme gösteriminin genişletilmesidir. Bulanık varlık kümesinde her bir varlığın üyelik derecesi vardır. Varlıkların üyelik derecesi, (0, 1) aralığında herhangi bir değer olabilir.

Bulanık sistemlerde, temelde Mamdani-Zadeh ve Takagi-Sugeno-Yasukawa yaklaşımı olmak üzere iki tür modelleme tekniği mevcuttur. Şekil 4.2' de verilen bulanık bir sistemde;



Şekil 4.2 : Bulanık sistem.

Giriş/Veri Tabanı: İncelenecek olan olayın maruz kaldığı girdi değişkenlerini ve bunlar hakkındaki tüm bilgileri içerir. Buna veri tabanı veya kısaca giriş adı da verilir. Genel veri tabanı denilmesinin nedeni, buradaki bilgilerin sayısal ve/veya sözel olabilmesidir.

Bulanıklaştırıcı: Sistemden alınan denetim giriş bilgilerini dilsel niteleyiciler olan sembolik değerlere dönüştürme işleminin yapıldığı bölümdür.

Bulanık Kural Tabanı: Veri tabanındaki girişleri çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal, "eğer-ise" türünde yazılabilen bütün kuralların tümünü içerir. Bu kuralların yazılmasında sadece girdi verileri ile çıktılar arasında olabilecek tüm aralık bağlantıları düşünülür. Böylece, her bir kural girdi uzayının bir parçasını çıktı uzayına mantıksal olarak bağlar. İşte bu bağlamların tümü kural tabanını oluşturur.

Bulanık Çıkarım Motoru: Bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan parça ilişkilerin hepsini bir arada toplayarak sistemin çıkışı olarak davranmasını temin eden işlemler topluluğunu içeren bir mekanizmadır. Bu motor her bir kuralın çıkarımlarını bir araya toplayarak tüm sistemin girdileri altında nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesine yarar.

Durulaştırıcı: Bulanık ıkarım motorunun bulanık küme ıkışları üzerinde ölçek değişikliği yapılarak gerçek sayılara dönüştürdüğü birimdir.

ıkış: Bilgi ve bulanık kural tabanlarının bulanık çıkarım vasıtasıyla etkileşimi sonucunda elde edilen çıktı değerlerinin topluluğunu belirtir.

Yukarıda bahsi geçen yapay zeka teknikleri klasik optimizasyon problemlerine farklı bir bakış açısı getirmiş ve özellikle son yıllarda bilgisayarların da gelişimiyle araştırmacıların dikkatini çekerek 1990' lı yıllardan sonra bu konu üzerinde yapılan çalışmalar fazlalaşmıştır. Özellikle hidroloji ve su kaynakları çalışmalarında yukarıda anlatılan yapay zeka tekniklerinden yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleri çok daha ön plana çıkmış ve tezimizin konusunu oluşturan yağış-akış modellemelerinde de başarılı neticeler elde edilmiştir. Ancak tüm bu yöntemlerin birer optimizasyon tekniği olduğunun farkına varılmadan, gerek fiziksel tabanı bulunmayan gerekse herhangi bir mantık süzgecinden geçirilmeyen pek çok çalışma da maalesef literatürde bilgi kirliliğine sebebiyet vermektedir.

Yapay zeka teknikleri içeren modellemelerin uygulamaları genellikle karmaşık olmaları ve uzun vakit almaları sebebi ile paket programlar yardımı ile yapılmaktadır. Ayrıca büyük bir hızla karma sistemler yaklaşımına doğru bir gidişten bahsedilebilir. Bunlar, sinirsel genetik, sinirsel bulanık, sinir-genetik-bulanık sistemler yaklaşımı olarak özetlenebilirler.

Bu çalışmada da; yeni geliştirilen nonlinear yağış-akış modelinin optimizasyonu klasik yöntemlerin yanı sıra altıncı bölümde ayrıntılarıyla anlatılacak olan iki adet yapay zeka tekniği kullanılarak yapılmıştır. Bu teknikler yapay sinir ağları ve sinirsel bulanık olarak adlandırılan karma yaklaşımdır.

4.6 Yapay Zeka Teknikleri İle İlgili Literatür zeti

Sajikumar ve Thandaveswara (1999) İngiltere ve Hindistan'daki iki havzaya, yapay sinir ağları modellerinden biri olan TBP-NN (Temporal Back Propagation Neural Network) modelinin uygulanmasıyla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu modelin en önemli özelliği, kalibrasyon için fazla veri aralığına ihtiyaç duymamasıdır. TBP-NN modeli ile elde edilen aylık akış değerleri, FSM' nin (Volterra tipi fonksiyonel seri modelleri) sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup, çalışmanın sonucunda TBP-NN modelinin performansı st düzeyde bulunmuştur.

Anmala ve diğ. (2000) tarafından, A.B.D.'nin Kansas Bölgesi'ndeki üç havzanın verilerinin kullanılmasıyla, iki adet yapay sinir ağları ve üç adet ampirik yağış-akış modeli ile aylık akış değerleri hesaplanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Aylık yağış ve sıcaklık değerleri girdi olarak kullanılmış olup, aylık ortalama akış değerleri çıktıyı oluşturmuştur. Çalışmanın sonucunda, yapay sinir ağları modellerinin performanslarının, diğer ampirik yaklaşımlara göre çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Jun (2003) yaptığı yağış-akış modelleme çalışmasının ilk aşamasında YSA' nı iki adet kentsel havzaya uygulamıştır. Akım yönündeki yerler ile havza çıkış noktasında 15 dakika ile iki saat aralığındaki tahmin periyodunda akım değerlerinin doğru tahmin edilebildiği, ayrıca akım yönünde daha aşağıdaki istasyon ölçümlerine dayanılarak yukarıdaki bir istasyonun eksik ölçüm verilerinin tamamlanabildiği görülmüştür. Çalışmanın ikinci aşaması yağış tahmininde; radyal tabanlı YSA ve deneysel yaklaşımın karşılaştırılmasını içerir. Sonuçlar ortalamaya oldukça yakın yağış değerlerini göstermekle beraber düşük şiddetli fırtınaların yağış miktarını azaltma, yüksek şiddetli fırtınaların yağış miktarını artırma eğilimindedir. Ayrıca iki adet YSA yağış radarı modeli geliştirilmiştir ve hava radarı hem zaman hem de mekân içinde yağış desenleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlamıştır (YSA desen işleme). Doğru eğitim ve test ile YSA modelleri radar verilerinden yağış tahmin kabiliyetlerini göstermişlerdir. Ampirik modellerle karşılaştırıldıklarında da hem düşük hem de yüksek şiddetli fırtınalar için daha doğru tahminler yapmışlardır. Araştırmanın üçüncü aşaması bir radar tabanlı yağış-akış modeli (3R) ile bir radar tabanlı akış modelinin (2R) geliştirilmesini içerir. 3R modelinde sırasıyla önce yağış tahminlerini sağlamak için görev alan radar verileri aynı zamanda akım tahminleri modelinin de girdisidir. 2R modeli bir saat gecikmeli doğrudan akım tahminlerini üretmek için bir YSA modelidir ve girdiler olarak radar ve akım kayıtlarını kullanır. Maliyet, doğruluk ve verimlilik açısından YSA tabanlı 2R modeli daha iyi performans göstermiştir.

Alp ve Cıgızoğlu (2004) yaptıkları çalışmada ileri beslemeli geriye yayılımı metodu (IBGY) ile son zamanlarda uygulanmaya başlanan genelleştirilmiş regresyon sinir ağı (GRSA) yöntemini yağış-akış modellenmesinde uygulamışlar ve sonuçları seçilen performans kriterleri cinsinden karşılaştırmışlardır.

Çalışmada iki farklı YSA metodu ile akımdan akım kestirimi ve yağış-akış modellemesi yapılmıştır. Bu modellerden ileri beslemeli geriye yayılım metodu (IBGY), genelleştirilmiş regresyon sinir ağı (GRSA) yöntemine oranla daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak belli bir YSA mimarisi ile en iyi IBGY sonuçlarını elde etmek için çok sayıda simülasyon yapmak gerekmektedir. Her IBGY simülasyonundan önce başlangıç ağırlık değerleri olarak farklı rastgele dağılmış değerler atanmakta ve yerel minimumlara takılma sorunu yaşanmaktadır. GRSA yönteminde ise uygun düzeltme parametresi seçildikten sonra, bir simülasyon değişmeyen tek bir sonuç vermektedir. IBGY sonuçları klasik regresyon ve AR modeli sonuçlarına oranla daha başarılı bulunmuştur. Çalışmadan elde edilen diğer önemli sonuç da YSA uygulaması öncesi yapılan oto korelasyon ve çapraz korelasyon analizinin YSA mimarisindeki girdi sayısı hakkında önemli bir ipucu verdiğidir. YSA uygulaması öncesi yapılacak bir istatistik analiz farklı YSA mimarileri denenmesi için gerekli süreyi azaltacaktır. Çalışma sonuçları GRSA algoritmasının da gerek akımdan akım gerekse yağıştan akış tahmini çalışmalarında rahatça kullanılabilceğini göstermiştir.

Meng (2004) evrensel çoklu fraktal model (UM) kullanarak akışı, yüzey sızmasında doymuş hidrolik iletkenliği (k_s) ve yağış etkilerini analiz eder. Genel olarak UM modele uyum için radyal güç spektrumu esaslı fiziksel alanın ölçeklendirmesi için ilk olarak kriterler kümesi tanımlanmış ve daha sonra koruyucu olmayan çoklu fraktal alanlarının UM model parametreleri tahmini için bir teknik geliştirilmiştir. Ayrıca yüzeysel sızma ve akış çalışması için DIMBRR olarak isimlendirilen ve fiziksel tabanı olan yayılı bir yağış-akış modeli geliştirilmiş ve bu modelde yönlendirme için kinematik dalga modeli ve sızma için Green Ampt modeli kullanılmıştır. DIMBRR modeli USDA-ARS Walnut Gulch deneysel havzasından toplanan verilerle kalibre edilmiştir. Yüzeysel sızma ve akışta yağmur ve k_s etkilerinin analizi için çoklu fraktal alanları ve ölçeksiz rastgele alanları kapsayan fiziksel değerlendirmeye dayalı karakteristikler belirlenmiştir. Yağışsız dönem sızması ve akış süreçleri üretmek için bu yağmur ve k_s verileri DIMBRR modelinin içine yerleştirilmiştir. Bu havzada cereyan eden süreçlerinin ölçekleme özellikleri, giriş ve çıkış alanlarının UM model parametreleri arasındaki bağlantıları başta olmak üzere yağmur ve k_s alanlarının etkisini bulmak için analiz edilmiştir. Bu araştırmanın önemli bulgularından bazıları şunlardır:

- 1) Sızma alanı sonuçları eğer bir ayarlama periyodu sonra ölçekleniyorsa yağmur yerine k_s belirleyicidir.
- 2) Yalnızca yağmur parametreleri akış üzerinde önemli bir etkiye sahipken hem yağmur hem de k_s alanlarından bazı model parametreleri sızma üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir.
- 3) Akış alanları genellikle homojen iken sızma alanları genellikle homojen değildir.

Tayfur ve diğ. (2006) durum (olay) tabanlı yağış-akış tahminleri için YSA ve BM modellerini kullanmışlardır. Bu modeller kinematik dalga yaklaşımı (KWA) ile test edilmiştir. Üç tabakalı ve ileri beslemeli bir YSA modeli sigmoid fonksiyonu ve hataların geriye yayılması algoritması kullanılarak geliştirilmiştir. BM modelinde ise giriş ve çıkış değişkenleri için üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bulanık kurallar ise ölçülmüş verilerden çıkarılmıştır. Laboratuvar ortamındaki su kanallarından ve deneysel arazilerden ölçülen durum tabanlı yağış-akış pik debiler YSA, BM, KWA modelleriyle tahmin edildi. 8.44 km^2 'den küçük havzalarda YSA ve BM modelleri ölçülen değerlere tatminkar olarak benzeşim sağlamış ve böylelikle KWA modelleriyle rekabet edebildikleri gösterilmiştir.

Sajjad (2007) tarafından bayesian sinir ağı; belirsizlik tahminleri ile su kaynakları üzerinde iklim değişikliğinin etkilerini verimli bir şekilde ifade eden bir modelleme aracı olarak sunulmuştur. Pek çok iklim, ölçek küçültme ve yağış akış modeli kullanılarak belirsizlik aralığı yakalanmış ve elenmiştir. Araştırma üç aşamada tamamlanmıştır. İlk aşamada üç adet yaygın kullanılan istatistiksel ölçek küçültme modelinin belirsizlik analizi aracılığı ile uygun bir istatistiksel ölçek küçültme modeli seçilmiştir. İkinci aşamada yaygın kullanılan bir YSA modeli ve bir kavramsal model (HBV) ile incelenen BNN (Bayesian Sinir Ağı) kullanılan model kıyaslanarak etkili bir yağış-akış modeli olduğu kanıtlanmıştır. Üçüncü aşamada BNN iklim değişikliği etki çalışmasında kullanılmıştır. Bu aşamada Kanada küresel iklim modeli gaz emisyon senaryosunun BNN ile hazırlanmış bir versiyonu kullanılmıştır. Burada yağış ve sıcaklığın ölçekli olarak küçültülmüş veri gurupları girdi olarak kullanılmıştır. Çıktılar ise BNN modelinin ürettiği % 95 güven aralığındaki su kaynakları tahminleridir. Sonraki aşamalarda başka bir gaz emisyon senaryosu ile birlikte diğer bir Kanada küresel iklim modelinde yağış ve sıcaklığın ölçekli olarak

küçültülmüş farklı ve özgün veri gurupları kullanılarak su kaynakları tahminleri türetilmiştir. İklim değışiklik etkilerini göz önüne alan diğer bir kavramsal yağış-akış modeli (HBV) kullanılarak daha fazla tahminler üretilmiştir.

Buyurgan (2007) tarımsal bir havzada yer alan çoklu ölçüm istasyonlarından yağış-akış tahminleri için çok katmanlı algılayıcı (MLP), fonksiyon tabanlı radyal sinir ağı (RBFNN) ve uzun kısa süreli bellek tekrarlı sinir ağı (LSTM-RNN) gibi çeşitli yapay sinir ağı modelleri geliştirmiştir. Eucha havzasında 2002–2004 arası dört ölçüm istasyonunda günlük akımların tahmini için; arazi kullanım dağılımı (tarım, orman, kent, geçiş yüzdesi gibi), her alt havzadaki su, günlük yağış ve eğri numaraları (CN) girdi olarak kullanılmış ve sonuçlar göstermiştir ki bu havzada yağış-akış ilişkisini en iyi LSTM-RNN modeli benzeştirmiştir. LSTM-RNN modelleri akım zaman serilerini diğer iki modelden (RBFNN ve MLP) daha iyi ele almıştır. YSA ve SWAT modellerinin mukayeseli çalışması da göstermiştir ki; bu iki modelde tarımsal havzaların davranışlarının modellenmesi için uygun birer araçtır.

Partal ve diğ. (2008) yağış verilerinin YSA ile tahminini yapmış ve yöntemin tahmindeki başarısını arttırmak için dalgacık dönüşümü bu çalışmada kullanılmıştır. Bu amaçla, önce meteorolojik veriler ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak periyodik bileşenlerine ayrılmıştır. Her bir bileşen ayrı bir zaman serisidir. Bileşenlerden AD8 yaklaşık yıllık bileşendir ve orijinal verinin yaklaşık bir yıllık periyodik değışimini gösterir. Yağış verilerinin AD1 ve AD2 bileşenleri orijinal veri ile en yakın uyumu gösteren bileşenlerdir. Çalışmada hedeflenen en iyi doğrulukla yağış tahmini yapmak olduğundan, AD bileşenleri ile tahmin edilmesi amaçlanan orijinal yağış verilerinin arasındaki korelasyon katsayılarına bakarak hangi bileşenlerin seçileceğine karar verilmiştir. Çalışmada Türkiye deki üç istasyonun günlük meteorolojik verileri kullanılmıştır. YSA yönteminin literatürde en çok kullanılan algoritmalarından, ileri beslemeli geriye yayımlı yapay sinir ağıları (IBGYSA) ve radyal tabanlı yapay sinir ağıları (RTYSA) yöntemleri yağış tahmini amacıyla kullanılmıştır. Farklı girdi kombinasyonları denenerek her istasyon için en uygun model bulunmaya çalışılmıştır. Sonuçlarda ileri beslemeli geriye yayımlı yapay sinir ağıları algoritmasının kullanıldığı yöntem en iyi performansı göstermiştir. Dalgacık dönüşümü-YSA yönteminin tahmin sonuçları çoklu lineer regresyon yönteminin sonuçları ile kıyaslanmış ve performans kriterlerine göre daha iyi olduğu bulunmuştur.

Liu (2008) çoklu objektif genetik algoritmaların bir uygulaması olarak yağış-akış kalibrasyonu için yeni bir baskın olmayan parçacık sürü sıralama (NSPSO) yaklaşımı önermiştir. Bu yaklaşım baskın olmayan hızlı sıralama, sürü mesafe sıralaması ve ebeveyn popülasyon ile sonraki kuşağın birlikte elitist stratejik kombinesinden oluşan MOGA-NSGA-II olarak bilinen operasyonların ve tekli parçacık sürü optimizasyonu ile (PSO) diğer gelişmiş işlemlerin (seçim ve mutasyon işlemleri) birleşiminden oluşmaktadır. Algoritmanın etkinliği bir yağış-akış modelinin kalibrasyonunda gösterilmiş ve sonuçlar NSGA-II ile kıyaslanmış ve uygun olduğu görülmüştür.

Sedki ve diğ. (2009) Fas' ta yarı kurak bir havzada yağış-akış tahmini ve uygulaması için evrimsel sinir ağı genetik algoritmasının etkinliğini araştırmıştır. Herhangi bir zamanda akışı tahmin etmek için bundan bir önceki zamandaki gözlenen yağış ve akış değerleri girdi olarak alınmıştır. Yöntem olarak geri yayılım algoritması ile hibrit ve gerçek kodlu genetik algoritma stratejisi benimsenmiştir. Genetik operatörler sinir ağının optimizasyonu için erken yakınsama ve permutasyon problemlerinden kaçınılarak dizayn edilmiştir. Sinir ağı tabanlı genetik algoritmanın performansını değerlendirmek ve kıyaslamak için geri yayılmalı (BP) sinir ağı kullanılmıştır. Sonuçlar modelin üstün tahminler verdiğini göstermiştir.

5. NONLİNEER YENİ BİR YAĞIŞ-AKIŞ MODELİ

5.1 Modelin Teorisi

Üçüncü bölümde teorisi izah edilen fonksiyonel dizinin havza modeli olarak en önemli zaafı kernellerinin (davranış fonksiyonlarının) fiziksel bir anlam taşımayışıdır. Kara kutu yaklaşımı içerisinde bu zaaf göz ardı edilebilir. Çünkü bu yaklaşımda amaç fiziksel bakımdan anlamlı bir model kurmaktan çok, yağış-akış ilişkisini temsil edecek bir modelin bulunması olup, fonksiyonel dizinin kullanılması bu açıdan tutarsız değildir. Ne var ki davranış fonksiyonları negatif değerler alabilmekte, bu da akım tahminlerinde önemli hatalara hatta negatif değerlere yol açmaktadır. Müftüoğlu (1984b) fonksiyonel dizinin zaaflarını taşımayan nonlinear bir model geliştirmiş ve fonksiyonel dizilere olan üstünlüğünü ortaya koymuştur. Aşağıda, öncelikle Müftüoğlu (1984b) tarafından öne sürülen ikinci dereceden nonlinear yağış-akış modeli detaylarıyla açıklanmış ardından ilave parametrelerle geliştirilen yeni modelin izahı yapılmıştır.

Herhangi bir andaki akım önceki bir zaman aralığındaki yağıştan lineer bir operasyonla türetilmiş olsaydı;

$$y(t) = \int_0^t h_1(t-s_1)x(s_1)ds_1 \quad (5.1)$$

konvolüsyon integrali yağış-akım ilişkisini temsil için yeterli olurdu. Hatırlanacağı üzere bu denklem artık yağış-dolaysız akım ilişkisini çok zaman yeterli sayılabilecek bir yaklaşıklıkla temsil eden birim hidrograf modelidir. Herhangi bir s_1 anındaki birim artık yağışın t anındaki dolaysız akıma katkısını temsil için yeterli olabilen $h_1(t-s_1)$ (anlık birim hidrograf) birim etkin yağışın toplam akıma katkısını temsilde yeterli olmaz. Çünkü $h_1(t-s_1)$ havzanın ıslaklık derecesini yansıtmaz. Halbuki herhangi bir s_1 anındaki yağışın akıma katkı miktarını kendi şiddeti kadar s_1 'den önceki (havza hafıza başlangıcından s_1 'e kadar geçen süredeki) yağışların meydana getirdiği ıslaklığın derecesi belirler. Dolayısıyla $h_1(t-s_1)$ ' in önceki yağışların etkilerini de yansıtan bir fonksiyon

olması gerekir. Geçmiş s_2 anındaki etkin yağışın $h_1(t-s_1)$ üzerindeki etkisi $h_1'(t-s_2)$ tesir fonksiyonu ile gösterilirse $h_1(t-s_1)$ 'in değişimi;

$$\delta h_1(t-s_1) = h_1(t-s_1)h_1'(t-s_2)x(s_2)ds_2 \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $x(s_2)$; s_2 anındaki geçmiş etkin yağışı göstermektedir. $h_1(t-s_1)$ ' in gerçek değeri (5.2) denkleminin integralinin alınması ile bulunur.

$$h_1(t-s_1) = \int_0^t h_1(t-s_1)h_1'(t-s_2)x(s_2)ds_2 \quad (5.3)$$

Davranış fonksiyonunun bu yeni değeri (5.1) denkleminde yerine konularak;

$$y(t) = \int_0^t \int_0^t h_1(t-s_1)h_1'(t-s_2)x(s_1)x(s_2)ds_1ds_2 \quad (5.4)$$

denklemini elde edilir. Burada $h_1(t-s_1)h_1'(t-s_2)$ yerine $h_2(t-s_1, t-s_2)$ konularak aranan etkin yağış-toplam akım ilişkisi bulunmuş olur.

$$y(t) = \int_0^t \int_0^t h_2(t-s_1, t-s_2)x(s_1)x(s_2)ds_1ds_2 \quad (5.5)$$

Havza yüzeyinde ve yatak ağında her kesitte akım hızı o kesitteki akım miktarının nonlineer bir fonksiyonu olduğuna göre her bir s anındaki yağışın akıma katkısı o andaki etkin yağış şiddetinin nonlineer bir fonksiyonudur. Dolayısıyla (5.5) denkleminde s_2 nin sadece s_1 den küçük değerleri değil s_1 ' e eşit değerleri de alınmış ve $s_2 \leq s_1$ yazılmıştır. Böylece etkin yağış değer çiftleri arasına kareleri de katılmış olmaktadır.

Kolayca görüleceği üzere bu model ikinci derece fonksiyonel olup nonlineer biriktirme ve iletim etkilerini de içeren bir süperpozisyon integralidir. Modelin özellikleri şunlardır:

1- Modelin davranış fonksiyonu; her biri birim hacimde eski bir ani etkin yağışın tesiri altındaki havzada, herhangi bir birim etkin yağışın meydana getireceği akımı temsil eden bir anlık birim hidrograflar ailesi olarak yorumlanabilir. Bu sebeple model davranış fonksiyonu iki boyutlu anlık birim hidrograf olarak adlandırılabilir.

2- İki boyutlu birim hidrograf, birim hidrograf gibi, fiziksel bakımdan mümkün bir davranışı temsil etmektedir. Yani iki boyutlu birim hidrografın sadece pozitif değerler alması gerekir. Fonksiyonel dizinin taşımadığı bu özellik davranış fonksiyonlarının belirlenmesinde bir kontrol kriteri olarak kullanılabilir.

3- Model fonksiyonel diziden daha güvenlidir. Hafıza uzunluğu aynı olan ikinci derece bir fonksiyonel dizi daha çok serbestlik derecesine sahip olacağı için daha çok uyum kabiliyetine sahip olacaktır. Fakat gereğinden yüksek uyum kabiliyeti modelin kalibrasyonda kullanılan verilerin taşıdığı hatalardan daha çok etkilenmesine sebep olur. Yeterince uyum kabiliyetine sahip olan bu model daha stabildir.

4- Nonlinear birim hidrograf modeli kalibrasyon için fonksiyonel diziye göre daha kısa bir veri dizisi ve daha az matematiksel işlem gerektirir. (5.5) denkleminin kesikli şekli aşağıda verilmiştir:

$$y(t) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i}^t h(t-i, t-j)x(i)x(j) \quad (5.6)$$

Bu denklem daha kullanışlı bir notasyonla aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$y_M = \sum_{i=1}^M \sum_{j=i}^M h_{i,j}x(i)x(j) \quad (5.7)$$

Burada davranış fonksiyonu $h_{i,j}$, $M.(M+1)/2$ adet ordinatı olan belirli bir süreye ait iki boyutlu bir birim hidrograftır.

Amorocho (1963) havza davranışı konusundaki deneysel bir çalışma sonunda hidrografların kabarma kanatları, pik bölgeleri ve alçalma kanatlarının baş kısımlarında şiddetli bir nonlineerliğin bulunduğunu tespit etmiştir. Birçok havzada gözlenmiş hidrografların alçalma kanatlarının genel bir alçalma eğrisine teğet oluşu da alçalma kanatlarının son taraflarının yağış dağılımına en az bağımlı hidrograf unsuru olduğunu göstermektedir.

Yukarıda özetlenen bilgilerin ışığında yağışlardan hemen sonra meydana gelen akımlar ile az gecikmiş akımları bir nonlinear modelle, gecikmiş akımları ise linear bir modelle hesaplamının mümkün olduğu düşünülerek (5.5) denklemini aşağıdaki şekilde değiştirilebilir:

$$y(t_2) = \int_0^{t_1} h_1(t_1 - s_1)x(s_1)ds_1 + \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} h_2(t_2 - s_1, t_2 - s_2)x(s_1)x(s_2)ds_1ds_2 \quad (5.8)$$

(5.8) denklemi alışılmıştan farklı bir fonksiyonel dizidir. Alışılmış fonksiyonel dizide bütün fonksiyoneller aynı hafızayı kapsar. Fakat bu basitleştirilmiş modelde lineer fonksiyonel hafızanın eski geçmişe ait ilk bölümünü, ikinci derece fonksiyonel ise sadece yakın geçmişe ait son bölümünü kapsamaktadır. Lineer ve ikinci derece fonksiyonel sıra ile taban akımını ve dolaysız akımı temsil eden model bileşenleri olarak görülebilir (Müftüoğlu, 1984a).

Modelin davranış fonksiyonları $h_1(t_1-s_1)$ ve $h_2(t_2-s_1, t_2-s_2)$ sıra ile anlık birim hidrograf ve iki boyutlu anlık birim hidrograf olup alışılmış anlık birim hidrograf ve iki boyutlu anlık birim hidrografın özelliklerini taşımaktadırlar. Basitleştirilmiş modelin kesikli şekli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y(t_2) = \sum_{i=1}^{t_1} h_1(t_1 - i)x(i) + \sum_{i=t_1+1}^{t_2} \sum_{j=i}^{t_2} h_2(t_2 - i, t_2 - j)x(i)x(j) \quad (5.9)$$

Burada $h_1(t_1-i)$ belirli bir süreye ait birim hidrograf ve $h_2(t_2-i, t_2-j)$ yine belli bir süreye ait iki boyutlu birim hidroraftır. (5.9) denklemi daha kullanışlı bir notasyonla şu şekilde de yazılabilir:

$$y_{k+n} = \sum_{i=1}^k h_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i+k, j+k} X_{i+k} X_{j+k} \quad (5.10)$$

Bu genel denklemin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla örnek olarak; ilk üç günü taban akımının ($k=3$) son iki günü de dolaysız akımın ($n=2$) etkisindeki toplam beş günlük hafızası olan bir sistem için dönüştüğü özel durum aşağıdaki gibidir;

$$y_{3+2} = \sum_{i=1}^3 h_i X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i}^2 h_{i+3, j+3} X_{i+3} X_{j+3} \quad (5.11)$$

$$y_5 = h_1 X_1 + h_2 X_2 + h_3 X_3 + h_{4,4} X_4 X_4 + h_{4,5} X_4 X_5 + h_{5,5} X_5 X_5 \quad (5.12)$$

5.2 Yeni Modelin Formülasyonu

(5.10) denklemi ile verilen model basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf (BİBBH) olarak adlandırılmıştır (Müftüoğlu, 1984a). Ancak uygulamalardan

görülmüştür ki; davranış fonksiyonları (h' 'lar) beklenenin aksine taban akımının etkisindeki günler için (yani uzak geçmişe ait yağışların etkisindeki modelin lineer kısmı için) büyük değerler alırken, dolaysız akımın etkisindeki günler için (yani yakın geçmişe ait yağışların etkisindeki nonlinear kısmı için) ise küçük değerler almaktadır. Bunun en önemli sebebi; modelde kernellerin girdiler (yağışlar) üzerinde paralel bir operasyonla çıktıyı (akımı) oluştururlarken modelin lineer kısmında yağış değerlerinin teker teker dikkate alınması, nonlinear kısımda ise yağış değerlerinin ikili çarpımlarının hesaba katılmasıdır. Bu aksaklığın giderilmesi için yeni modelimiz; lineer kısmında taban akışını oluşturan yakın geçmişe ait yağışlar da dikkate alınarak aşağıdaki gibi geçişli yapıda kurulmuştur:

$$y_{k+n} = \sum_{i=1}^{k+n} h_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i+k, j+k} x_{i+k} x_{j+k} \quad (5.13)$$

Hafıza uzunluğu havza özelliklerine bağlı olarak bir kaç günden bir kaç aya hatta yıla kadar değişir. İstisnai durumlar dışında hafızanın uzun bölümü taban akım sürecini içerir. Bu bölümün lineer bir fonksiyonelle temsili işlemleri bir hayli kısaltır. Sayısal bir örnek modelimizin avantajını açıklığa kavuşturacaktır. 20 günü taban akımının 5 günü de dolaysız akımın hakim olduğu 25 günlük hafızası olan bir havza için; nonlinear iki boyutlu birim hidrograf (5.7) denklemi kullanılırsa 325 davranış fonksiyonu ordinatı, basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf (5.10) denklemi kullanıldığı takdirde 35, yeni model kullanılırsa 40 adet davranış fonksiyonu ordinatının belirlenmesi gerekmektedir. Aynı havza için ikinci derece fonksiyonel dizi Amorocho (3.15) denklemi kullanılırsa davranış fonksiyonu ordinat sayısı 350 olacaktır.

Bu model gerçek zaman tahmin operatörü olarak da kullanılabilir. Bu kullanım yağışla pik debi arasında yeterli sürenin bulunmasını gerektirir. Tahmin süresi L ile gösterilip modele ilave edilebilir. Ayrıca model ile art arda akım değerleri üretmek mümkün olup bu, model başlangıcı ötelenmek sureti ile gerçekleştirilir. Öteleme sayısını (m) gösteren bir sayacın ilavesi de uygulamada kolaylık sağlayacaktır. L ve m dahil edilince model ;

$$y_{s+m+L} = \sum_{i=1}^{k+n} h_i x_{i+m} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i+k, j+k} x_{i+k+m} x_{j+k+m} \quad (5.14)$$

Burada s toplam havza hafızasını göstermekte ve taban akımının etkisi altındaki gün sayısı k ile dolaysız akımın etkisi altındaki gün sayısı n 'nin toplamından oluşmaktadır.

5.3 Yeni Modelin Kalibrasyonu

Model hafızasının ve davranış fonksiyonlarının en uygun değerlerinin bulunması için geliştirilen teknikler burada yeni model esas alınarak anlatılacak olup, çok küçük değişikliklerle diğer üç tipteki nonlineer modellere de uygulanabilir.

5.3.1 Hafızanın belirlenmesi

Hafızasının k ve n uzunluğundaki bölümlerinin önceden belirlenmesi için bir metodun kullanılması model kalibrasyonunda önemli ekonomi sağlar. Çünkü bu parametreler önceden bilinmezse bunlara değişik değerler verilerek her farklı değer kombinasyonu için optimizasyon yapmak ve uygun modeli böylece bulmak gerekir. Bu parametrelerin belirlenmesi için, literatürde ilk akla gelen yöntem yağış ile akım arasındaki korelasyondan yararlanmaktır.

Amacımız herhangi bir zamandaki akımın kaç tane geçmiş zaman aralığındaki yağışa bağımlı bulunduğunu tespit etmek olduğuna göre, yağış-akım korelogramı kullanılabilir. Korelogram ordinatları yağış ile akım arasındaki gecikmenin fonksiyonudur. Bu gecikmenin artması ile korelogram ordinatlarında bir azalma olur. Çünkü bir yağışın akıma katkısı zamanla tedricen azalır ve nihayet sıfır olur. Korelogramın maksimum ordinatı yağışların maksimum etkilerinin ne kadar bir gecikme ile meydana geldiğini belirler. Maksimumdan sonra korelogramın önce ani daha sonra azar azar bir düşüş göstermesi beklenir. Ani azalmanın sonu yaklaşık olarak en uygun dolaysız akım süresini, en küçük ordinat ise tüm hafıza uzunluğunu belirleyecektir. Korelogram rastlantı etkiler de taşıdığından k ve n 'nin korelogramdan bulunan değerleri yaklaşık olup bunlara yakın bir iki değer arasında uygun olanın aranması iyi olur.

Bu çalışmada olduğu gibi, günlük yağış ve akım verileri ile çalışıldığında yağış ve akış arası korelasyon özellikle birinci adımda (günde) maksimum % 30 mertebesinde kaldığından, korelogram kullanımı bazen sağlıklı neticeler vermemektedir. Uygulamalar sırasında karşılaşılan bu güçlük, literatürde daha önce kullanılmamış daha etkin bir yöntemle havza hafızası parametrelerinin belirlenmesi gerektirmiştir.

Bu yöntemin izahı daha iyi anlaşılabilmesi açısından uygulamalar esnasında (altıncı bölümde) yapılacaktır.

5.3.2 Davranış fonksiyonlarının optimizasyonu

Gerçek akımlara en yakın tahminleri veren bir davranış fonksiyonları takımını elde edebilmek için tahmin hatalarının minimum yapılması gerekir. Bu maksatla en küçük kareler amaç fonksiyonu kullanılabilir. Açık olarak ifade edilecek olursa amaç h_i ve $h_{i,j}$ davranış fonksiyonu ordinatlarının;

$$E = \sum_{m=0}^{G-s-L} \left[Q_{s+m+L} - \left(\sum_{i=1}^{k+n} h_i x_{i+m} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i+k,j+k} x_{i+k+m} x_{j+k+m} \right) \right]^2 \quad (5.15)$$

fonksiyonunu minimum yapan değerlerinin bulunmasıdır. (5.15) denkleminde;

G : Toplam gözlem sayısını,

m : Öteleme parametresini,

L : Yağış ve akım arası geçen tahmin gecikme süresini,

Q : Gözlenmiş akımları,

X : Gözlenmiş yağışları,

H : Davranış fonksiyonu ordinatlarını göstermektedir.

Yapılacak minimizasyon (5.15) denkleminin h_i ve $h_{i,j}$ ' ye göre türevleri alınıp sıfıra eşitlenmesi ile gerçekleştirilir ve aşağıdaki normal denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{G-s-L} \left[\left(\sum_{i=1}^{k+n} h_i x_{i+m} x_{\alpha+m} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i+k,j+k} x_{i+k+m} x_{j+k+m} x_{\alpha+m} \right) \right] \\ & = \sum_{m=0}^{G-s-L} Q_{s+m+L} x_{\alpha+m} \quad \alpha = 1,2,3,\dots,k \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{G-s-L} \left[\left(\sum_{i=1}^{k+n} h_i x_{i+m} x_{\beta+k+m} x_{\varepsilon+k+m} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i+k,j+k} x_{i+k+m} x_{j+k+m} x_{\beta+k+m} x_{\varepsilon+k+m} \right) \right] \\ & = \sum_{m=0}^{G-s-L} Q_{s+m+L} x_{\beta+k+m} x_{\varepsilon+k+m} \quad \beta=1,2,\dots,n \quad \varepsilon=\beta,\beta+1,\dots,n \end{aligned} \quad (5.17)$$

Bu iki denklem model davranış fonksiyonlarının sayısına eşit sayıda lineer denklemden oluşan bir denklem takımını temsil etmektedir. Bu denklem takımının çözümü en uygun davranış fonksiyonlarını verir.

Normal denklemlerin fonksiyonel dizi için uygulanması halinde; her iki denklemde (5.16 ve 5.17) ilk toplam işaretinin üst sınırında k yerine n yazılacak ve bütün indislerdeki k ' lar kaldırılacaktır. İki boyutlu birim hidrograf modelinin orijinal halini uygulamak için ise normal denklem, iki denklemden (5.16 ve 5.17) lineer birim hidrografi ihtiva eden ilk terimin ve bütün indislerdeki k ' ların atılması ile elde edilir.

Uygulamalar sırasında klasik optimizasyon yöntemi olarak yukarıda izah edildiği gibi tahmin hatalarının minimum yapılması amacı ile hataların karesinin en küçük yapılması amaç fonksiyonu (en küçük kareler yöntemi) kullanılmıştır. Bu amaca uygun olarak davranış fonksiyonlarının tespiti MS Excell ve yapay zeka paket programları kullanılarak yapılmıştır.

Gerek geliştirilen yeni modelde gerekse diğer nonlineer yağış-akış modellerinin yukarıda anlatıldığı gibi klasik yöntemlerle optimizasyonunda; denklem takımlarının çözümü sonucunda negatif h' lar (davranış fonksiyonları) elde edilebilmektedir. Bu ise fiziksel olarak imkansız ve anlamsız bir sonuçtur. Çünkü daha önceki bir zaman diliminde meydana gelen yağış kendinden sonraki bir dönemde oluşan akımı azaltıcı yönde etkileyemez. Bu yanlışlığın düzeltilebilmesi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlardan birisi de lineer programlama uygulamasıdır. Lineer programlama uygulaması ile iki boyutlu birim hidrografın fiziksel olarak gerçekleştirilebilir bir hidrograf olmasının garanti edilebileceği Hamidi (1984) tarafından ispatlanmıştır.

Uygulamalar sırasında (altıncı bölümde) klasik optimizasyon tekniğine ilave olarak yapay zeka tekniklerinden yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleri kullanılarak yeni model için oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiş ve yeni modelin tahmin performansı arttırılmıştır.

6. UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

6.1 Klasik Kara Kutu Modelleme

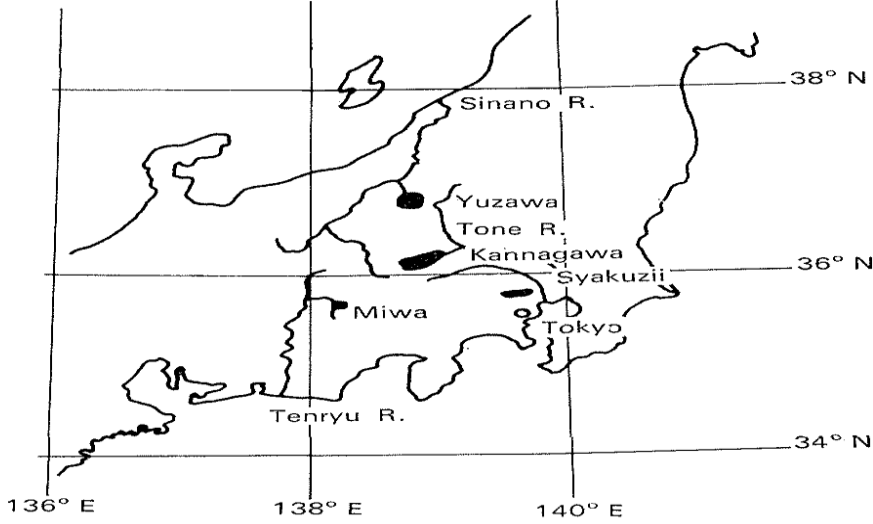
Uygulamalar Japonya'daki Kannagawa Havzasına ait veriler üzerinde yapılmıştır. Kannagawa havzası Japonya'nın orta kısımlarında (Tokyo' nun kuzeybatısındaki Chubu Bölgesinde) yer alan kapatılmış deneysel bir havza olup, komşu havzalarla arasındaki yeraltı akımları önemsiz sayılabilecek mertebededir. 139° Doğu boylamı ile 36° Kuzey enlemi üzerinde bulunan ve denizden yüksekliği 130–2000 metre arasında değişen havzanın alanı 373 km² dir ve aldığı yağışı Kanna nehri vasıtasıyla Tone Nehrine ulaştırır. (Şekil 6.1) Bu bölge ılıman bir iklime sahiptir ancak kışları neredeyse her sabah sıcaklık 0 ° C' ye düşer.

Uygulama için bu havzanın seçilmiş olmasının amacı 1984 yılında bir yüksek lisans tezi olarak Prof. Dr. Ferruh MÜFTÜOĞLU ve öğrencisi Nizamettin HAMİDİ tarafından bu havza üzerinde BİBBH (Basitleştirilmiş İki Boyutlu Birim Hidroğraf) Modelinin kurulmuş olmasıdır. Bunun en büyük faydası kurulan yeni model ile kıyas yapma imkanı sağlamasıdır.

Tezin sahibinden sağlanan verilerden iki yıllık yağış verisinin tamamı yağmurlara ait olup, 31 istasyonda ölçülen günlük değerlerden Thiessen metodu ile hesaplanmıştır. Akım verisi ise havza çıkışında yapılan ölçümlere dayanan günlük ortalama debi değerlerinden oluşmaktadır.

Havzanın buharlaşma ve sıcaklık verilerinin hem temin edilememiş olması hem de bahse konu BİBBH Modeli ile uyum sağlanması açısından etkin yağış yerine doğrudan yağış değerleri kullanılmıştır.

Her iki modelde de akım tahminlerinde ağırlığı maksimum akımlar (taşkınlar) oluşturduğundan modellerin kalibrasyonları ve testleri için şiddetli yağış ve akım değerlerini içeren 1958 yılının Eylül-Aralık dönemi (toplam 120 gün) ile 1959 yılının Ağustos-Kasım dönemi (yine toplam 120 gün) seçilmiştir.



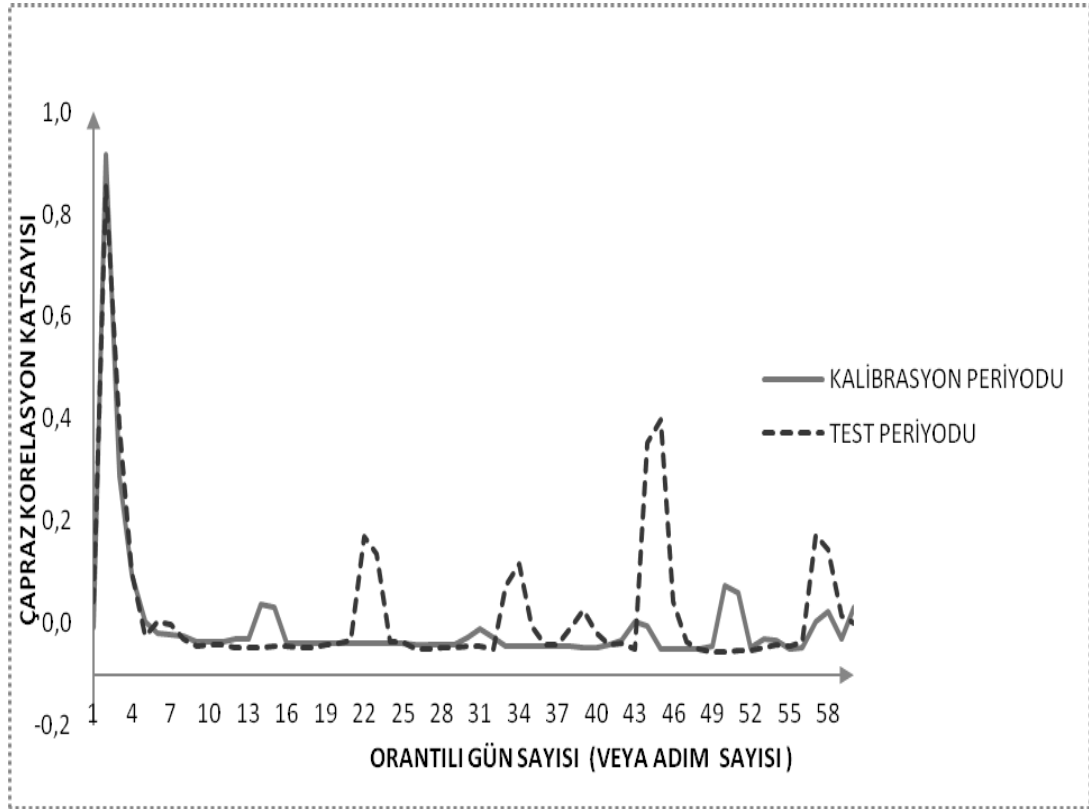
Şekil 6.1 : Kannagawa havzasının konumu.

Uygulamalar BH (birim hidrograf) modeli, BİBBH (basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf) modeli ve yeni model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir uygulama periyodu için modeller önce birinci bölüm (1958 yılı) verileri üzerinde kalibre edilmiş (1-1) ve ikinci bölüm (1959 yılı) verileri üzerinde de test edilmiştir (1-2). Daha sonra kalibrasyon ve test periyotları yer değiştirilerek modeller ikinci bölüm (1959 yılı) verileri üzerinde kalibre edilerek (2-2) birinci bölüm (1958 yılı) verileri üzerinde denenmiştir (2-1).

Bütün uygulamalarda modellerin performansı, ASCE Task Committee (1993) tarafından kabul edilmiş "root mean square error (hataların karelerinin ortalamasının karekökü) " RMSE, "Nash ve Sutcliffe katsayısı" R^2 ve "toplam değerlerin sapma yüzdesi veya hata oranı" % D olarak tanımlanan üç uygunluk kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir. RMSE, modelin ürettiği tahmini akış değerleri ile gözlenmiş akış değerleri arası farkların karelerinin ortalamasının karekökü olup standart sapma veya ortalama ile karşılaştırmalı mukayesesi yapılabilir. Hata oranı olan % D ise; tahmini akış değerlerinin gözlenmiş akım değerlerinden ortalama yüzde oranı olarak sapma miktarlarını göstermektedir. R^2 ise tahmini akışların standart sapmasının gözlenmiş akışların standart sapmasına oranını gösteren ve bu iki değer arasındaki regresyonu içeren bir katsayıdır. R^2 değeri bire yaklaştıkça model tahmin performansı artar.

6.1.1 Hafıza uzunluğunun belirlenmesi

Literatürde ve konuyla ilgili lineer ve nonlineer birim hidrograf modellerinin uygulamalarının tümünde hafıza uzunluğunun belirlenmesi amacı ile yapılan ilk iş yağış ve akım arasındaki korelasyonun incelenmesi olmuştur. Bu amaçla hazırlanan kalibrasyon ve test periyotlarına ait çapraz korelogramlar Şekil 6.2’ de verilmiştir.



Şekil 6.2 : Yağış-akış arası çapraz korelogramlar.

Yine bugüne kadar yapılan çalışmalarda çapraz korelogramlar yorumlanırken korelasyon katsayısının en büyük değerine karşı gelen gün sayısının; yağışların meydana getirdikleri akışlarla arasındaki gecikme süresini gösterdiği, bu en büyük ordinattan sonra meydana gelen ani azalmanın sonunun ise havza hafızasının nonlineer kısmını gösterdiği, korelogramın bundan sonraki kısmen stabil olan ve sıfır civarındaki değerlerinin ise toplam hafıza uzunluğunu gösterdiği düşünülmüş, tali pikler ile negatif değerlerin rastlantı sonucu meydana geldiği kabul edilmiştir.

Yukarıdaki yorumlamalara bağlı olarak korelogram (Şekil 6.2) incelendiğinde yağışlar ile akışlar arası gecikme süresinin iki gün olduğu, havza hafızasının nonlineer kısmının beş gün ($n=5$) olduğu, toplam havza hafızasının 9-21 gün aralığında ($9 \leq s \leq 21$) olduğu yani şu andaki akımı en yüksek seviyede beş gün

öncesine kadar olan yağışların etkilediği daha sonra bu etkinin giderek azalarak 22. günde sıfırlandığı tespiti yapılabilir. (Korelogramın bu şekilde kullanılmasının çok uygun olmadığı uygulamalar sırasında anlaşıldığından hafıza periyotlarının belirlenmesi için kullanılacak ve literatürdekinden farklı yeni bir korelogram ve yorumlama yöntemi önerilmiştir.)

6.1.2 Kernellerin belirlenmesi

Uygulamalara yukarıda anlatılan literatürdeki hafıza periyotlarının seçim yöntemine uygun olarak korelogramın gösterdiği hafıza periyotları olan nonlinear kısım $n=5$ gün, linear kısım ise $k=9-5=4$ gün alınarak başlanmıştır. Yani yapılan ilk modellemede havza hafızası $s=k+n=5+4=9$ gün olarak belirlenerek bugün meydana gelen akımı bugünden dokuz gün öncesine kadar olan yağışların belirlediği kabul edilmiştir. Daha sonra s ' nin (havza hafızasının) farklı değerleri için modellemelere (toplam 14 modelleme) devam edilmiş ve en iyi sonuçları veren hafıza periyotları belirlenmiştir.

Modellemeye $n=5$ gün ve $k=4$ gün olarak başladığında kalibrasyon dönemlerinde (1-1 ve 2-2) üç uygunluk kriteri açısından da YM' in daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak test dönemlerinde (1-2 ve 2-1) her iki model de (YM ve BİBBH) yeterince iyi sonuçlar üretmemiştir. Bunun üzerine havza hafızası ilk yaklaşım olarak korelogramın gösterdiği değişik değerlerin üzerinden araştırılmış ve $n=5$ gün $k=18$ gün alınarak daha sonrada nonlinear gün sayısı gittikçe azaltılarak $n=4$ $k=18$, $n=3$ $k=18$ ve $n=2$ $k=18$ gün için modellemeye devam edilmiş ve sonuçlar Ekler Bölümü Çizelge A.1' de verilmiştir.

Çizelge A.1' den görüleceği üzere havza hafızası yani modeldeki parametre sayısı (davranış fonksiyonu sayısı) arttıkça konunun teorisinde öngörüldüğü üzere kalibrasyon periyotlarındaki (1-1 ve 2-2) uyum her iki modelde de artmış dolayısıyla standart hata (RMSE) değerleri azalırken R^2 değerleri artmıştır ve en iyi RMSE ve R^2 değerlerini YM vermiştir. Ancak modeller hakkındaki en değerli bilgileri test periyotlarında yer alan (1-2 ve 2-1) uygunluk kriterleri vermiştir. Çünkü uygunluk kriterleri açısından test periyotlarındaki en iyi sonuçlar $n=2$ $k=18$ ve $n=3$ $k=18$ değerleri için elde edilmiştir. Dolayısıyla havza hafızasının nonlinear kısmının iki veya üç gün alınabileceği tespit edilmiştir. Nonlinear orantılı gün sayısı üç gün olarak sabit tutularak, linear orantılı gün sayısı sırasıyla 12, 15, 18, 21, 24, 30 ve 50

gün olarak alındığında modellemelerde en iyi sonuçları test dönemleri için Çizelge A.2’de görüleceği üzere $n=3$ gün $k=24$ gün olan model vermiştir. Buradaki modellemelerde de yine teoriye uygun olarak havza hafızası (yani lineer ve/veya nonlineer orantılı gün sayısı) arttıkça kalibrasyon dönemlerindeki gözlenmiş değerlerle tahminler arası uyum artmış ve model uygunluk kriterleri daha iyi değerler almıştır.

Çizelge A.3’ te nonlineer orantı gün sayısı $n=2$ gün, $n=4$ gün ve $n=5$ gün ile lineer orantı gün sayısı $k=4$ gün, $k=9$ gün, $k=12$ gün, $k=18$ gün, $k=22$ gün, $k=23$ gün, $k=24$ gün değerleri için modellemeler yapılmış ve test dönemleri için $n=3$ gün $k=24$ gün olan modelden daha iyi sonuçlar elde edilmediği ve bir sonraki kısımda öne sürülen "Havza hafızası parametrelerinin (n ve k) belirlenmesinde modelleme başlangıç ve sınır değerleri tespiti için yeni yöntem" ile de teyit edildiği için havza hafızası toplam $s=k+n=24+3=27$ gün olarak tespit edilmiştir. Toplam havza hafızasının (27 günün) farklı parametrelerine ait modellemelerine ait sonuçlar kıyaslama yapmak amacıyla Çizelge A.4’ te gösterilmiştir. Ayrıca en iyi tahminleri yapan model N3K24’ ün BİBBH ve YM kernelleri Şekil B.1 ve Şekil B.2’ de ve test dönemleri için gözlenmiş akım değerleri ile YM’ in ürettiği tahmini akım değerleri Şekil B.3 ve Şekil B.5’ te, BİBBH’ ın ürettiği tahmini akım değerleri Şekil B.4 ve Şekil B.6’ da BH’ ın ürettiği tahmini akım değerleri de Şekil B.7 ve Şekil B.8’ de verilmiştir.

Uygulamalara özellikle kernellerdeki değişiklikleri görmek için yağış ve akış değerlerinin birimleri değiştirilerek devam edilmiştir. Daha önce mm olarak alınan günlük yağış değerleri havza alanı ile çarpılarak $m^3/gün$ ’e, daha önce m^3/sn olarak alınan günlük akış değerleri de $60*60*24$ ile çarpılarak $m^3/gün$ ’e çevrilerek $n=3$ gün için olan tüm modellemeler yeniden yapılmıştır. Modelleme sonuçları Çizelge A.5’ te yeni kerneller ise Şekil B.9 ve Şekil B.10’ da verilmiştir.

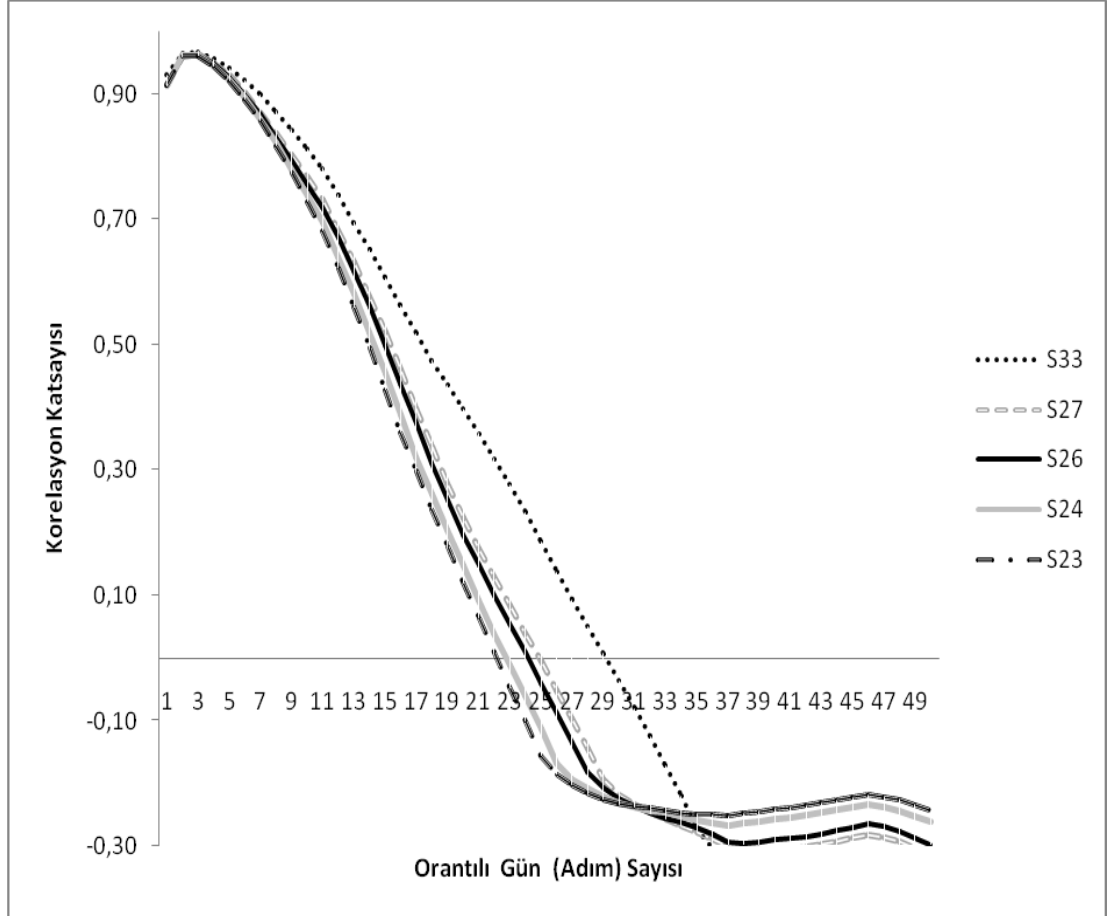
6.2 Havza Hafızası Parametrelerinin Belirlenmesinde Yeni Bir Yöntem

Model uygulamalarında havza hafızasının klasik yağış-akış korelogramının verdiği değer olan 9-22 gün aralığından farklı çıkması, korelogramın bu hali ile kullanımının mümkün olmadığını göstermiş ve havza hafızasının tayininde ilk yaklaşım olarak farklı bir metotla işe başlanması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu sebeple 2, 3, 4,....., n günlük yağışların toplamı ile yine bunlara karşılık gelen 2, 3, 4,....., n günlük akışların toplamının arasındaki korelogram incelenmiştir.

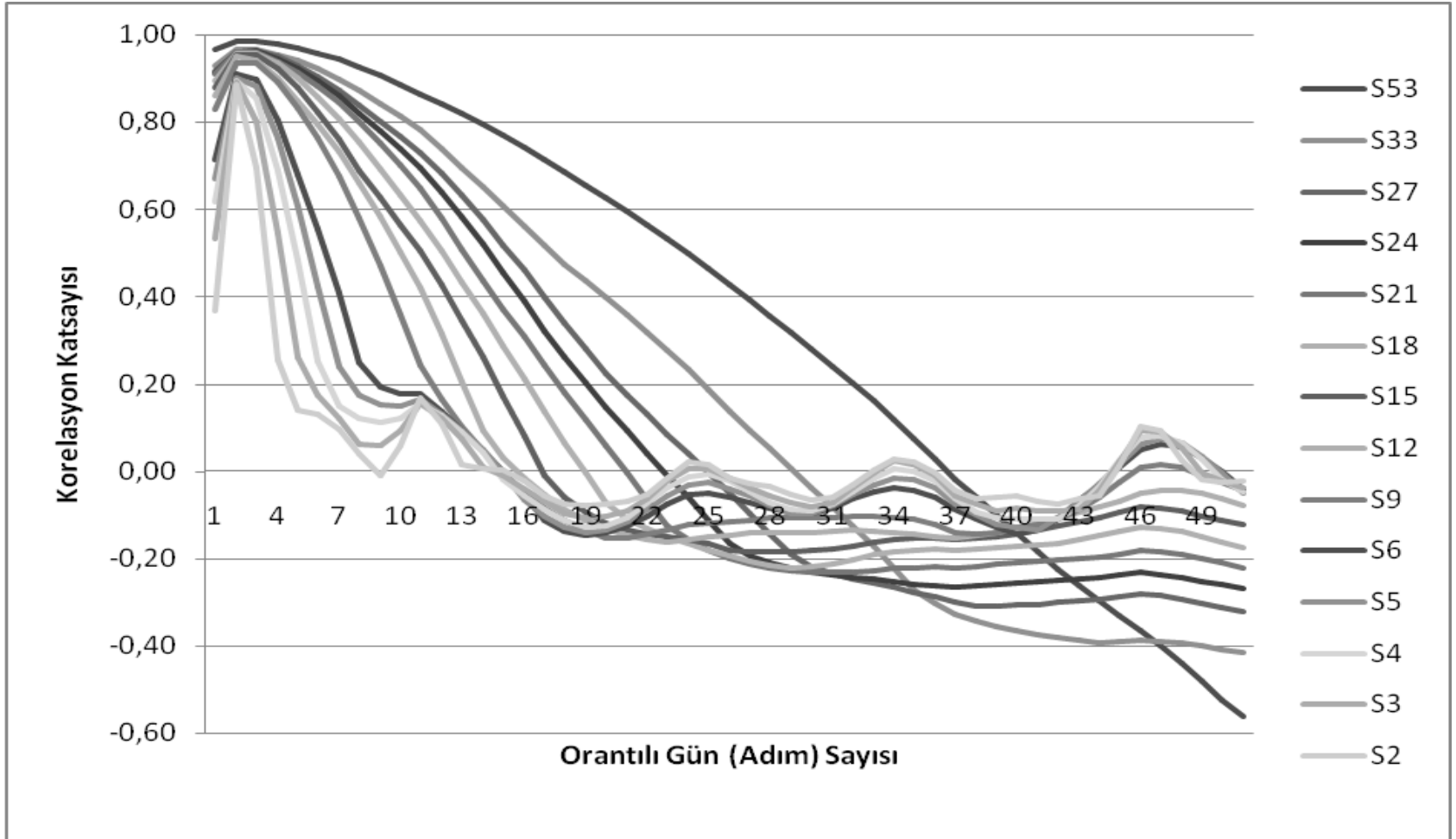
$$Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i \quad ve \quad X_n = \sum_{i=1}^n X_i \quad (6.1)$$

Görüleceği üzere Çizelge 6.1; X_n ve Q_n değerleri arasındaki korelasyon katsayılarından (korelogram) oluşmakta ve her bir sütundaki yağış-akış arası toplam gün sayısı (s_1, s_2, \dots, s_{53}) arttıkça korelasyon katsayıları da artmaktadır. Bu hali ile s değerleri toplam havza hafızasını göstermektedir. Her bir satır ise s' nin aynı değeri için 1, 2, ..., n günlük adım (gün) farkıyla toplam yağış ve toplam akış arasındaki korelasyon katsayılarından (korelogram) oluşmakta ve belirli bir maksimuma kadar arttıktan sonra düşüşe geçmektedir. Bu hali ile n değerleri havza hafızasının nonlinear kısmını (yağışın akışı maksimum seviyede etkilediği gün sayısını) göstermektedir. Daha da önemlisi problemin çözüm uzayı hakkında ipuçları vermektedir. Şöyle ki; Çizelge 6.1' de korelasyon katsayıları matrisi olarak ifade edebileceğimiz korelogramın maksimum değerleri incelendiği zaman (bunlar Çizelge 6.1' de koyu rakamlarla verilmiştir) görülür ki; modellemeleri yapılan havza için tüm maksimum değerler n' nin yani havza hafızasının nonlinear kısmının iki veya üç gün olduğu satırlarda bulunmaktadır. Yine uygulamalar sırasında yapılan modellemeler (n' nin ve k' nin değişik değerleri için toplam 14 modelleme) bu çizelgeye işaretlendiği zaman (Çizelge 6.1' de çerçeve içine alınmış değerler) görülen diğer bir husus model uygunluk kriterlerimizin çizelge ile birebir örtüşmesidir. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken husus; çizelgenin n ve k' nin tespitinde ($s = n + k$ olduğu unutulmamalıdır.) sadece ilk yaklaşımı sağlaması ve yapılacak modelleme sayısını azaltmasıdır. Çünkü toplam havza hafızası olan s' nin artan değerlerine karşılık modelin gözlenmiş verilere olan uyumu da artacağından (yapılan 14 modellemede ve konunun teorisinde açıklandığı üzere) kalibrasyon dönemi uyumu daha iyi olacak ancak test dönemlerinde başarısız sonuçlar elde edilebilecektir. Bunun için mutlaka s' nin farklı değerleri için farklı modellemeler yapılmalı ve bu modellerin test dönemleri performansları kıyaslanmalıdır. Bu çalışmada havza hafızasının nonlinear kısmını temsil eden n değerinin korelasyon katsayılarının maksimumlarının bulunduğu satır olarak seçilmesi ve toplam havza hafızası s' nin de Şekil 6.3 ve Şekil 6.4' te görülen farklı s değerleri için çizilmiş korelogramlar grafiklerinde; tali pikler yapmayan eğrilerin x eksenini kestiği noktaların değerleri ile eğrilerin kendi değerleri arası oranı bire yakın ve birden

küçük olan değerlerin arasında aranması tavsiye edilmiştir. Bu kurala uyulduğu takdirde n değerinin Çizelge 6.1’ den üç gün olarak belirlenmesi ve s değerlerinin Şekil 6.3’ ten 23 gün ile 33 gün arasında aranması gerekir. Bunun da havza hafızasının belirlenmesi için gerekli modelleme sayısını oldukça azalttığı görülmektedir. Şekil 6.4’ te toplam havza hafızası s’ nin tüm değerlerinin grafiği (korelogram) verilmiştir.



Şekil 6.3 : Toplam yağış-toplam akış arası çapraz korelogramlar (detay).



Şekil 6.4 : Toplam yağış-toplam akış arası çapraz korelogramlar (s 'nin tüm değerleri için).

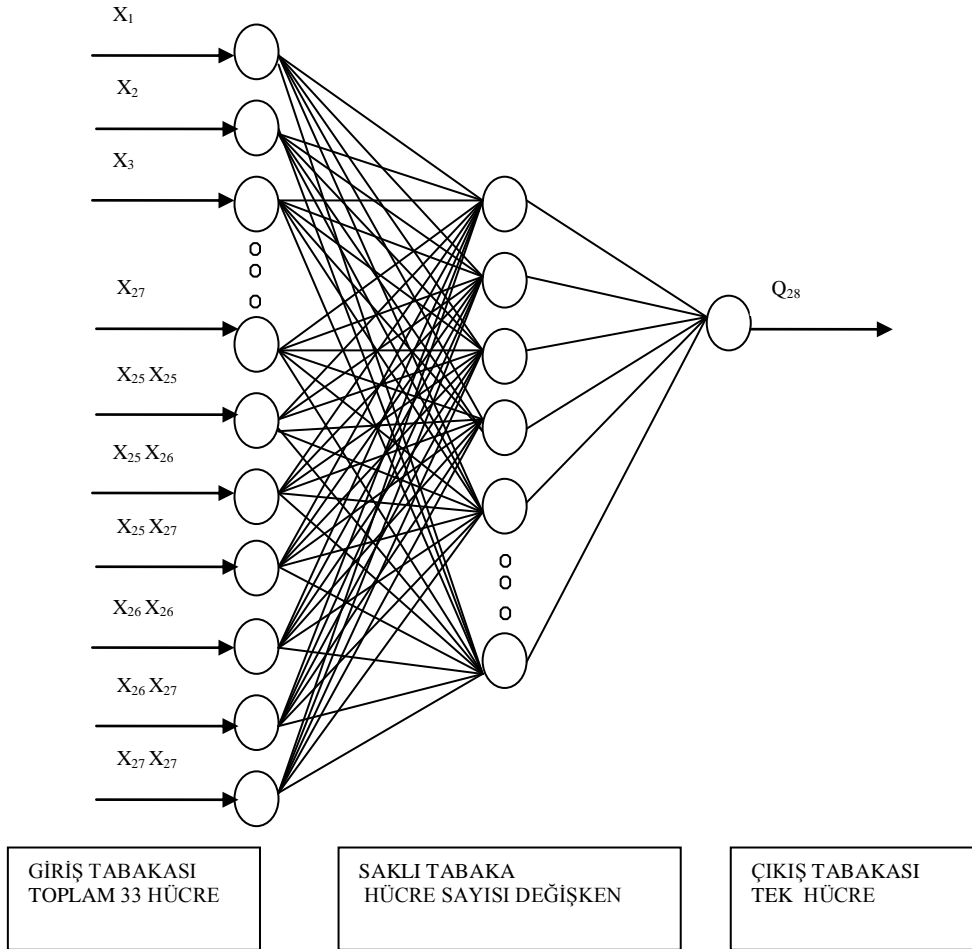
Çizelge 6.1 : Toplam yağış-toplam akış arası korelasyon katsayıları.

	S53	S33	S27	S26	S24	S23	S22	S21	S20	S18	S15	S12	S9	S6	S5	S4	S3	S2
N1	0.966	0.930	0.916	0.915	0.913	0.913	0.913	0.909	0.906	0.896	0.878	0.860	0.827	0.715	0.669	0.616	0.531	0.367
N2	0.984	0.965	0.960	0.960	0.960	0.960	0.960	0.960	0.959	0.957	0.952	0.949	0.934	0.909	0.900	0.894	0.890	0.886
N3	0.985	0.967	0.963	0.963	0.962	0.961	0.961	0.959	0.958	0.958	0.953	0.943	0.936	0.898	0.881	0.853	0.800	0.693
N4	0.978	0.955	0.949	0.948	0.944	0.944	0.943	0.939	0.936	0.934	0.921	0.901	0.893	0.803	0.763	0.689	0.546	0.255
N5	0.969	0.940	0.929	0.926	0.922	0.920	0.918	0.913	0.909	0.899	0.878	0.847	0.833	0.679	0.608	0.484	0.260	0.141
N6	0.957	0.922	0.903	0.899	0.894	0.891	0.888	0.883	0.876	0.858	0.824	0.794	0.762	0.555	0.422	0.252	0.173	0.132
N7	0.943	0.899	0.871	0.866	0.859	0.857	0.853	0.845	0.835	0.808	0.760	0.732	0.677	0.408	0.240	0.148	0.122	0.097
N8	0.926	0.872	0.837	0.830	0.821	0.817	0.812	0.801	0.787	0.753	0.690	0.659	0.579	0.250	0.175	0.122	0.061	0.039
N9	0.906	0.843	0.802	0.793	0.780	0.774	0.766	0.752	0.736	0.693	0.625	0.581	0.471	0.191	0.153	0.111	0.058	-0.009
N10	0.885	0.812	0.766	0.756	0.737	0.728	0.717	0.700	0.681	0.633	0.564	0.502	0.357	0.177	0.148	0.120	0.092	0.058
N11	0.864	0.781	0.730	0.719	0.695	0.681	0.666	0.647	0.625	0.573	0.503	0.420	0.244	0.178	0.164	0.154	0.156	0.166
N12	0.842	0.739	0.683	0.670	0.640	0.622	0.602	0.579	0.554	0.504	0.426	0.314	0.165	0.136	0.131	0.128	0.122	0.110
N13	0.819	0.694	0.631	0.617	0.581	0.560	0.536	0.508	0.480	0.434	0.345	0.204	0.103	0.092	0.093	0.091	0.073	0.016
N14	0.795	0.650	0.577	0.560	0.519	0.495	0.467	0.437	0.411	0.360	0.260	0.093	0.045	0.047	0.049	0.042	0.010	0.005
N15	0.769	0.606	0.519	0.500	0.454	0.428	0.399	0.371	0.344	0.285	0.172	0.029	-0.008	-0.001	-0.003	-0.020	-0.010	0.002
N16	0.742	0.562	0.459	0.437	0.388	0.360	0.335	0.308	0.278	0.211	0.082	-0.016	-0.051	-0.055	-0.067	-0.056	-0.040	-0.023
N17	0.714	0.518	0.399	0.374	0.321	0.298	0.273	0.244	0.212	0.138	-0.009	-0.055	-0.085	-0.113	-0.102	-0.088	-0.071	-0.055
N18	0.685	0.474	0.338	0.312	0.260	0.237	0.211	0.181	0.148	0.065	-0.060	-0.088	-0.114	-0.139	-0.128	-0.113	-0.096	-0.074
N19	0.655	0.435	0.279	0.251	0.203	0.177	0.150	0.119	0.083	-0.005	-0.094	-0.113	-0.136	-0.146	-0.140	-0.127	-0.105	-0.079
N20	0.625	0.397	0.223	0.196	0.147	0.120	0.090	0.057	0.019	-0.073	-0.118	-0.132	-0.155	-0.140	-0.135	-0.126	-0.105	-0.076

6.3 Yapay Zeka Teknikleri İle Modelleme

6.3.1 Yapay sinir ağları (ysa) yöntemi ile akım tahminleri

Bu çalışmada en sık kullanılan YSA yöntemlerinden olan ileri beslemeli geriye yayımlı yapay sinir ağları (İBGYSA) metodu kullanılmıştır. YSA modellemesinin amacı bu tezin ana konusunu teşkil eden yeni modelin (YM) performansını arttırmaktır. Bu nedenle yeni modeldeki en iyi sonuçlar n=3 gün k=24 gün olmak üzere toplam havza hafızasının 27 gün olduğu durum için 33 kernel ile elde edildiğinden, İBGYSA için de girdi tabakasındaki hücre sayısı 33 olarak seçilmiştir ve yağış değerlerinden oluşmaktadır. Çıktı tabakamız ise tek hücreli olup tahmin edilecek olan akım değerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla YSA mimarimiz 33 hücreli giriş tabakası, deneme yoluyla bulunacak hücre sayısını ihtiva eden saklı tabaka ve tek hücreli çıktı tabakasından oluşmaktadır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 : Modelde kullanılan YSA mimarisi.

Eğitim ve test için yeni modelde olduğu gibi yağış ve akım verilerimiz 120' şer günlük iki guruba ayrılmış önce birinci gurupla kalibre edilen modelimiz ikinci gurupla test edilmiş (1-2), daha sonra kalibrasyon ve test veri guruplarımız yer değiştirilerek ikinci gurupla kalibre edilen modelimiz birinci gurupla test edilmiştir (2-1). Performans kriteri olarak, yeni modeldeki gibi hataların karesinin ortalamasının karekökü (RMSE veya HKOK) kriteri kullanılmıştır. Çizelge 6.2' de saklı tabakadaki farklı hücre sayıları için test dönemlerine ait sonuçlar özetlenmiştir. Test dönemlerindeki gözlenmiş ve tahmini akım değerlerini içeren grafikler Şekil B.11 ve Şekil B.12' de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : İBGYSA yöntemi ile test dönemleri performansları.

SAKLI TABAKA HÜCRE SAYISI	TEST (1-2) DÖNEMİ RMSE	TEST (2-1) DÖNEMİ RMSE
1	11.14	7.49
2	13.49	15.17
3	14.35	13.49
4	15.23	13.08
5	14.42	12.69
11	10.74	18.84
20	19.90	34.01
22	20.83	26.72
33	16.97	22.29
66	37.03	51.83

6.3.2 Bulanık mantık yöntemi ile akım tahminleri

Çalışmada uyarlamalı sinirsel bulanık mantık yaklaşımının yeni model için uygulaması araştırılmıştır. Bunun için önce klasik yöntem ve İBGYSA modelinde olduğu gibi 33 girdili ve tek çıktılı bir yapı oluşturulmuş, eğitim ve test için yine 120 şer günlük veriler kullanılmıştır. Girdiler için üçgen üyelik fonksiyonları oluşturulmuş ve sugeno tipi çıkarım sistemi ile soncul kısımdaki çıktı değerkeni için sabit üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Optimizasyon tekniği olarak hibrid yöntemi kullanılmış ve 3000 iterasyon yapılmıştır. Ancak modelin eğitimi sırasında çok büyük işlemci hızlarına ve fiziksel belleğe ihtiyaç duyulduğundan eğitim tamamlanamamıştır. alışmalar sırasında dört GB fiziksel (Ram) bellek kapasiteli bir bilgisayarda maksimum sekiz girdi ve tek çıktılı bir sistemin çözülebileceği anlaşıldığından, sekiz girdiye kadar oluşturulan modellerin performansları izelge 6.3' de verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Uyarlamalı sinirsel bulanık yöntemiyle model performansları.

GİRDİ SAYISI	N	K	RMSE 1-1	RMSE 1-2	RMSE 2-2	RMSE 2-1
2	1	1	23.11	100.45	24.48	47.52
3	1	2	12.32	156.93	13.14	62.62
4	1	3	8.74	70.59	9.30	32.12
5	1	4	6.60	113.60	6.95	49.84
6	1	5	5.14	119.38	5.33	63.75
7	1	6	3.76	87.59	3.90	63.75
8	1	7	2.87	76.84	3.22	78.02
5	2	2	11.90	110.60	13.25	83.43
6	2	3	8.14	78.49	8.71	77.61
7	2	4	5.90	76.70	6.28	98.60
8	2	5	4.59	80.22	4.58	92.02

Çizelge 6.3' ten görüleceği üzere sistemin lineerlik ve nonlineerlik derecesi (gün sayısı) arttıkça kalibrasyon dönemlerindeki uyum da artmış ve standart hata değeri sıfıra yaklaşmıştır. Ancak konunun teorisinde izah edildiği gibi gereğinden fazla kalibrasyon dönemi uyumları modelin tahmin performansını azaltmaktadır. En iyi tahmin sonuçları n=1 gün, k=3 gün olan toplam dört girdili modelden elde edilmiştir. Test dönemlerindeki gözlenmiş ve tahmini akım değerlerini içeren grafikler Şekil B.13 ve Şekil B.14' de verilmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada yağış-akış ilişkisini nonlinear olarak modelleyen ve fiziksel bir tabanı bulunan yeni bir model öne sürülmüştür. Ayrıca yeni modelin parametreleri kullanılarak yapay zeka teknikleri (yapay sinir ağları ve bulanık mantık) ile yapılan farklı ve etkin modellemeler ile yeni modelin performansı arttırılmıştır. Model performans kıyaslaması için birim hidrograf ve basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf gibi literatürdeki önemli lineer ve nonlinear modeller kullanılmıştır. Tüm modellerin test dönemlerindeki akım tahminlerine ait özet bilgiler ile performansları Çizelge 7.1’ de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Tüm modellerin akım tahmin performansları.

		N3 K24				N1 K3	
		GÖZLEM	BH	BİBBH	YM	YSA	BM
TEST DÖNEMİ (1-2)	ORTALAMA	37.60	37.29	33.67	34.58	31.76	40.36
	STD SAPMA	96.60	86.41	85.71	86.58	96.72	115.88
	ÇARPIKLIK	7.38	4.14	7.05	7.02	7.46	6.62
	MAKSİMUM	866.35	596.97	751.39	758.29	864.87	942.77
	MİNİMUM	4.34	-55.06	-4.85	1.52	-7.11	11.21
	RMSE		45.38	18.42	16.39	10.74	70.59
	%D		137.14	55.46	41.90	37.88	48.25
	R²		0.779	0.964	0.971	0.988	0.466
TEST DÖNEMİ (2-1)	ORTALAMA	32.86	35.33	31.51	31.05	34.71	35.09
	STD SAPMA	87.35	90.84	85.13	79.49	86.15	85.54
	ÇARPIKLIK	6.02	5.08	5.81	5.70	5.92	6.95
	MAKSİMUM	600.63	591.83	629.81	607.23	591.41	738.94
	MİNİMUM	4.30	-30.64	-0.36	-0.31	7.48	12.03
	RMSE		26.23	14.41	21.20	7.49	32.12
	%D		102.29	38.66	42.76	36.19	89.41
	R²		0.910	0.973	0.941	0.993	0.865

Çizelge 7.1’ den görüleceği üzere en iyi akım tahminlerini yeni model girdilerini kullanan YSA modeli üretmiştir. Ancak YSA’ lı modelde en iyi sonucu elde etmek için çok sayıda simülasyon yapılması gerekmektedir. Bunun nedeni ise problemin çözüm uzayında bulunan yerin bilinmemesi ve kalibrasyon (eğitim) için başlangıç ağırlık değerlerinin her seferinde farklı atanması suretiyle yerel minimumlara takılıp genel minimuma ulaşamaması riskinin azaltılmasıdır.

Çalışmanın ana konusunu teşkil eden nonlinear yapıya sahip yeni modelin en önemli üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

1- Öncelikle akış tahmininde sadece yağışlar değil havzanın ıslaklık derecesi de hesaplara dâhil edilmektedir. Bu açıdan yeni modelin teorik ve fiziksel bir tabanı mevcut olup, bu nedenle fiziksel olarak daha gerçekçi tepki fonksiyonlarına dolayısıyla da belirli bir çözüm uzayına ve kararlı bir yapıya sahiptir. Ayrıca yeni modelin serbestlik derecesi yeterli olup, kalibrasyondaki veri hatalarından daha az etkilenmektedir.

2- Yeni model bir kara kutu model olmasına rağmen ele alınan havzanın karakteristikleri hakkında önemli ipuçları vermektedir. Özellikle yeni model ile birim hidrograf (BH) ve basitleştirilmiş iki boyutlu birim hidrograf (BİBBH) modellerinin karşılaştırılmasından görülmüş ki;

- Modelin nonlinear etkiyi temsil eden kernelleri maksimum akım tahminlerini büyük oranda belirlemektedir.
- Modelin lineer kısmında taban akımını oluşturan yağışların hesaplara katılması maksimum akım tahminlerinde önemli bir iyileşmeye yol açmaktadır. Çizelge 7.1' den görüleceği üzere 866.35 m³/s olarak ölçülmüş test dönemi 1-2' nin maksimum akımını yeni model parametrelerini kullanan YSA' lı modelleme 864.87 m³/s olarak tahmin etmiş ve R² katsayısında da 0.988 gibi oldukça yüksek bir değere ulaşarak BH ve BİBBH modellerine göre çok daha başarılı olmuştur.

Çalışmalar sırasında ortaya çıkarılan diğer bir önemli husus; havza hafızasını oluşturan parametrelerin belirlenmesine yönelik olarak yeni ve etkin bir yöntem kullanılmasıdır. Yöntem kullanıldığında havza karakteristiklerini yeterince yansıtan bir model oluşturulmasında gerekli modelleme sayısını oldukça azalttığı görülmektedir.

Çalışmanın önemli iki zaafiyeti ise; elde buharlaşma ve terleme verilerinin bulunmamasından dolayı etkin yağış yerine toplam yağışla çalışılmak zorunda oluşu ve akım tahminlerinde çok küçükte olsa negatif değerler türetilmesidir.

KAYNAKLAR

- Abdulla, F. and Al-Badranih, L.**, 2000. Application of a rainfall - runoff model to three catchments in Iraq, *Hydrological Sciences Journal*, **45 (1)**, 13-25.
- ASCE Task Committee.**, 1993, Criteria for evaluation of watershed models, *Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. **119**, No. 3
- Alp, M. ve Cıgızoğlu, H.K.**, 2004. Farklı yapay sinir ağı metotları ile yağış-akış ilişkisinin modellenmesi, *İtü Dergisi* **3 (1)**, 80-88.
- Amorocho, J. and Orlob, G.T.**, 1961. Nonlinear analysis of hydrologic systems, *Contribution No: 40*, 147 pp. Water Resource Center, University of California (Berkeley) ,USA.
- Amorocho, J.** 1963. Measures of the linearity of hydrologic systems. *Journal of Geophysical Research*, **68 (8)**, 2237-2249.
- Anmala, J., Zhang, B. and Govindaraju, R.S.**, 2000. Comparison of ANNs and empirical approaches for predicting watershed runoff, *Journal of Water Resources Planning and Mangment.*, ASCE, **126 (3)**, 156 - 166.
- Bayazıt, M.** 1966. Instantaneous unit hydrograph derivation by spectral analysis and its numerical application, *Cento Symposium on Hydrology and Water Resource Development: Ankara*.
- Bayazıt, M.**,1995. *Hidroloji*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Bayazıt, M.**,1998. *Hidrolojik Modeller*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Bhunya, P. K., Mishra, S. K. and Berndtsson, R.**, 2003. Simplified two-parameter gamma distribution for derivation of synthetic unit hydrograph, *Journal of Hydrologic Engineering*, **8(4)**, 226-230.
- Bhunya, P. K., Mishra, S. K., C. S. P. Ojha and Berndtsson, R.**, 2004. Parameter estimation of beta distribution for unit hydrograph derivation, *Journal of Hydrologic Engineering*, **9(4)**, 325-332.
- Bhunya, P. K., Ghosh N. C., Mishra, S. K., C. S. P. Ojha and Berndtsson, R.**, 2005. Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph, *Journal of Hydrologic Engineering*, **10(6)**, 458-467.
- Brater, E. F. and Wallace, R.**, 1984. Hindcasting monthly runoff, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, **110 (2)**, 126 - 141.
- Buyurgan, E. Ö. M.**, 2007. Development of artificial neural network models for hydrologic prediction in an agricultural watershed, *Dissertation*, University of Arkansas, USA.
- Chiew, F. H. S., Stewardson, M. J. and McMahon, T. A.**, 1993. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches, *Journal of Hydrology*. Vol. **147**, 1 - 36.

- Chow, V. T.**, 1964. *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York
- Cleveland, T. G., He, X., Asquith, W. H., Fang, X. and Thompson, D. B.**, 2006. Instantaneous unit hydrograph evaluation for rainfall-runoff modeling of small watersheds in North and South Central Texas, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **132(5)**, 479-485.
- Cleveland, T. G., He, X., Fang, X. and Thompson, D. B.**, 2008. Synthesis of unit hydrographs from a digital elevation model, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **134(2)**, 212-221
- Croley, T.E.**, 1983. Lake Ontario Basin (U.S.A -Canada) runoff modelling, *Journal of Hydrology*, **66**, 101-121.
- Ding, J. Y.**, 2005. A measure of watershed nonlinearity: Interpreting a variable instantaneous unit hydrograph model on two vastly different sized watersheds, *Hydrology and Earth System Sciences*, **2**, 2111-2151
- Gilles G.P, Miguel A.M.**, 1983. Nonlinear runoff modeling: parameter identification, *Journal of Hydrologic Engineering*, **109(6)**, 865-880.
- Guo, J.C.Y.**, 2006. Storm-water predictions by dimensionless unit hydrograph, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **132(4)**, 410-417
- Güldal, V. ve Müftüoğlu, F.**, 1998. Nonlinear bir yağış-akım modeli, *Bildiri, II. Ulusal Hidrometeoroloji Sempozyumu*, 214-232, Ankara.
- Hamidi, N.**, 1984. İki boyutlu birim hidrograf belirlenmesinde lineer programlama, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, İstanbul.
- Hjelmfelt, A.**, 1994. general stochastic unit hydrograph, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **120 (1)**, 138-148.
- İbrahim, A. B. and Cordery, I.**, 1995. Estimation of recharge and runoff volumes from ungaged catchments in eastern Australia, *Hydrological Sciences Journal*, **40 (4)**, 499 - 515.
- Jain, S. K., Singh, V. P. and Bhunya, P. K.**, 2006. Development of optimal and physically realizable unit hydrograph, *Journal of Hydrologic Engineering*, **11(6)**, 612-616.
- Jun, H.**, 2003. Application of artificial neural networks for flood warning systems, *Dissertation*, North Carolina State University (USA).
- Kachroo, R. K., Sea, C. H., Warsi, M. S., Jemenez, H. and Saxena, R. P.**, 1992. River flow forecasting. Part 3. Applications of linear techniques in modelling rainfall-runoff transformations, *Journal of Hydrology*, Vol. **133**, 41 - 97.
- Kothyari, U. C., Aravamuthan, V. and Singh, V.P.**, 1993. Monthly runoff generation using the linear perturbation model. *Journal of Hydrology*, Vol. **144**, 371 - 379.
- Kothyari, U. C.**, 1995. Estimation of monthly runoff from small catchments in India, *Hydrological Sciences Journal*, **40(4)**, 533 - 541.

- Lee, K. H., Kim, B. S., Kim, H. S., Jeong, D. I. and Kim, W.,** 2008. Estimation of flash flood guidance considering uncertainties of rainfall-runoff models, *Conference Proceeding Paper*, World Environmental And Water Resources Congress 2008, Hawaii.
- Liu, Y.,** 2008. Automatic calibration of a rainfall-runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm, *Expert Systems With Applications*, **35(5)**, 9533-9538.
- Mcintyre, N. ve Al-Qurashi, A.,** 2008. Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman, *Environmental Modelling & Software*, **24 (2009)**, 726-738.
- Meng, H.,** 2004. Multifractal analysis of the effects of rainfall and Ks on surface infiltration and runoff, *Dissertation*, Colorado State University, USA.
- Mimikou, M. and Rao, A. R.,** 1983. Regional monthly rainfall-runoff model, *Journal of Water Resources Planning and Mangment*, ASCE, **109 (1)**, 75 - 93.
- Müftüoğlu, R.F.,** 1984a. Hidrolojik sistemlerin analizi, *Yayımlanmamış ders notları*, İTÜ, İstanbul.
- Müftüoğlu, R.F.,** 1984b. New models for nonlinear catchment analysis, *Journal of Hydrology*, Vol. **73**, 335-357.
- Müftüoğlu, R.F.,** 1991. Monthly runoff generation by non-linear models, *Journal of Hydrology*, Vol. **125**, 277-291.
- Nash, J.E.,** 1957. The form of the instantaneous unit hydrograph, *Proceeding*, IASH Assemble Toronto, Vol. **3**, 114-121.
- Parret, C. and Carrier, K.D.,** 1990. Methods for estimating monthly streamflow characteristics at ungaged sites in Western Montana, U.S., *Geological Survey Water Supply Paper*, **2365**, 19 p.
- Partal, T., Kahya, E. ve Cıgızoğlu, K.,** 2008. Yağış verilerinin yapay sinir ağları ve dalgacık dönüşümü yöntemleri ile tahmini, *İTÜ Dergisi* **7(3)**, 73-85.
- Sajikumar, N. and Thandavesvvara, B. S.,** 1999. A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network, *Journal of Hydrology*, **216**, 32-55.
- Sajjad, K.M.,** 2007. Climate change impact study on water resources with uncertainty estimates using bayesian neural network, *Dissertation*, McMaster University, Canada.
- Sedki, A., Ouazar, D., El Mazoudi, E.,** 2009. Evolving neural network using real coded genetic algorithm for daily rainfall-runoff forecasting, *Expert Systems with Applications*, **36(3)**, 4523-4527.
- Spurveda, N.,** 1997. Application of two direct runoff prediction methods in Puerto Rico, *Journal of Hydrologic Engineering*, **2(1)**, 10-16.
- Tan, S. B. K., Chua, L. H. C., Shuy, E. B., Lo, E. Y.,** 2008. Performances of rainfall-runoff models calibrated over single and continuous storm flow events, *Journal of Hydrologic Engineering*, **13(7)**, 597-607.

- Tayfur, G., Singh, V. P.**, 2006. ANN and fuzzy logic models for simulating event based rainfall-runoff, *Journal of Hydrologic Engineering*, **132(12)**, 1321-1330.
- Tsykin, E. N.**, 1985. Multiple nonlinear statistical models for runoff simulation and prediction, *Journal of Hydrology*, **77**, 209 - 226.
- Türker, C.**, 2003. Kavramsal bir yağış-akış modeli geliştirilmesi ve Eğirdir Gölü Havzasında uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, SDÜ, Isparta.
- Wilcox, B. P., Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. and Wight, J. R.**, 1990. Predicting runoff from rangeland catchments : A comparison of two models, *Water Resources Research*, **26(10)**, 2401-2410.
- Xu, C. Y.**, 1999. Estimation of parameters of a conceptual water balance model for ungaged catchments, *Water Resources Management*, **13**, 353 - 368.
- Ye, W., Bates, B. C., Viney. N. R., Sivapalan, M. and Jakeman, A. J.**, 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments, *Water Resources Research*, **33 (1)**, 153 - 166.

EKLER

EK A : Uygulama modellerine ait performans çizelgeleri

EK B : Uygulama modellerine ait performansları yansıtan şekiller

EK A

Çizelge A.1 : Havza hafızasının tayini için ilk yaklaşım modellerinin performansları.

	N2 K18			N3 K18			N4 K18			N5 K18			N5 K4			
	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	31.36	28.21	29.22	31.53	28.24	29.65	31.72	28.73	30.16	31.92	29.37	30.60	29.49	23.62	27.70
	STD SAPMA	84.39	85.25	84.99	84.80	85.68	85.34	85.21	86.02	85.67	85.63	86.34	86.02	80.27	81.66	80.76
	ÇARPIKLIK	6.25	6.17	6.18	6.21	6.14	6.16	6.18	6.11	6.13	6.15	6.08	6.11	6.59	6.49	6.53
	MAKSİMUM	600.63	600.29	599.72	600.63	600.96	600.08	600.63	601.01	600.54	600.63	600.67	600.60	600.63	602.77	600.76
	MİNİMUM	4.30	0.40	0.10	4.30	0.35	-0.17	4.30	0.31	-0.07	4.30	0.35	-0.23	4.30	0.00	0.00
	RMSE		6.51	5.30		6.93	4.94		6.69	4.51		6.07	4.05		9.43	5.01
	%D R ²		39.04 0.9941	37.47 0.9961		39.61 0.9933	37.77 0.9966		38.45 0.9938	36.32 0.9972		37.46 0.9950	33.63 0.9978		57.69 0.9862	42.88 0.9961
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	36.31	30.89	32.41	36.38	30.84	33.11	36.53	29.48	30.48	36.70	29.52	28.06	34.83	28.12	30.31
	STD SAPMA	93.25	84.06	83.86	93.72	83.18	85.10	94.19	67.07	65.02	94.66	127.30	88.36	88.62	85.05	72.17
	ÇARPIKLIK	7.65	7.42	7.10	7.62	7.11	6.97	7.58	6.70	6.17	7.54	7.85	7.49	8.06	7.12	7.09
	MAKSİMUM	866.35	764.36	750.52	866.35	740.29	754.78	866.35	586.94	552.97	866.35	1.179.22	802.64	866.35	779.65	669.76
	MİNİMUM	4.34	1.83	0.08	4.34	1.58	-1.41	4.34	1.35	-4.81	4.34	-256.13	-49.36	4.34	0.10	0.42
	RMSE		15.81	16.67		18.01	16.92		34.57	34.46		61.39	29.82		20.30	21.53
	%D R ²		34.65 0.9712	38.45 0.9680		38.04 0.9631	43.41 0.9674		44.39 0.8653	40.79 0.8662		57.56 0.5794	56.48 0.9008		62.38 0.9475	40.64 0.9410
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	31.36	29.35	29.10	31.53	29.41	29.26	31.72	29.93	29.57	31.92	31.88	25.33	29.49	26.35	21.75
	STD SAPMA	84.39	79.29	77.11	84.80	81.08	75.28	85.21	87.25	82.04	85.63	91.04	71.26	80.27	90.80	64.71
	ÇARPIKLIK	6.25	5.87	5.89	6.21	5.85	5.80	6.18	6.62	6.35	6.15	5.66	5.47	6.59	6.09	5.54
	MAKSİMUM	600.63	621.93	614.79	600.63	620.68	596.37	600.63	746.10	684.81	600.63	708.25	534.08	600.63	741.55	503.13
	MİNİMUM	4.30	0.21	0.21	4.30	0.26	0.23	4.30	0.31	0.18	4.30	0.39	-145.18	4.30	0.00	-178.10
	RMSE		19.30	22.11		16.73	23.58		28.16	25.75		36.30	37.13		38.10	37.65
	%D R ²		38.97 0.9477	39.08 0.9314		41.51 0.9611	41.38 0.9227		42.62 0.8908	39.06 0.9087		44.54 0.8203	50.40 0.8120		61.34 0.7747	51.98 0.7800
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	36.31	34.70	34.89	36.38	34.24	35.24	36.53	34.59	35.46	36.70	34.87	35.75	34.83	28.23	32.40
	STD SAPMA	93.25	93.25	93.19	93.72	93.91	93.67	94.19	94.43	94.21	94.66	94.93	94.77	88.62	90.06	89.14
	ÇARPIKLIK	7.65	7.48	7.44	7.62	7.52	7.47	7.58	7.42	7.43	7.54	7.55	7.53	8.06	7.94	7.98
	MAKSİMUM	866.35	853.43	851.34	866.35	858.10	855.55	866.35	856.73	856.36	866.35	867.14	866.78	866.35	868.55	866.61
	MİNİMUM	4.34	1.66	1.61	4.34	1.73	1.93	4.34	1.36	1.61	4.34	0.27	-4.23	4.34	0.12	0.52
	RMSE		10.65	10.59		10.74	9.51		9.69	8.50		9.04	6.96		12.69	8.49
	%D R ²		31.49 0.9870	30.73 0.9871		31.75 0.9869	30.23 0.9897		31.08 0.9894	29.20 0.9919		31.70 0.9909	29.56 0.9946		53.34 0.9795	38.43 0.9908

Çizelge A.2 : N=3 gün için en uygun k değerini veren modellerin performansları.

	N3 K12			N3 K15			N3 K18			N3 K21			
	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	30.63	26.71	28.28	31.13	27.50	29.19	31.53	28.24	29.65	32.14	29.67	30.37
	STD SAPMA	82.41	83.45	83.07	83.56	84.75	84.11	84.80	85.68	85.34	86.06	86.74	86.57
	ÇARPIKLIK	6.40	6.31	6.33	6.31	6.23	6.25	6.21	6.14	6.16	6.12	6.05	6.06
	MAKSİMUM	600.63	600.68	599.80	600.63	602.42	600.36	600.63	600.96	600.08	600.63	600.95	600.11
	MİNİMUM	4.30	0.01	0.01	4.30	0.46	0.19	4.30	0.35	-0.17	4.30	-0.02	0.15
	RMSE		7.31	5.49		7.12	5.04		6.93	4.94		5.97	4.72
	%D		44.72	40.78		41.92	37.39		39.61	37.77		35.89	36.32
	R²		0.9921	0.9956		0.9927	0.9964		0.9933	0.9966		0.9952	0.9970
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	35.85	29.08	31.47	36.35	30.08	32.73	36.38	30.84	33.11	36.88	32.39	33.71
	STD SAPMA	91.03	79.56	81.37	92.32	80.10	82.14	93.72	83.18	85.10	95.15	85.30	86.22
	ÇARPIKLIK	7.84	7.42	7.38	7.73	7.21	7.09	7.62	7.11	6.97	7.50	7.05	6.96
	MAKSİMUM	866.35	732.81	751.59	866.35	723.17	740.48	866.35	740.29	754.78	866.35	752.39	758.31
	MİNİMUM	4.34	1.47	1.47	4.34	1.14	-0.26	4.34	1.58	-1.41	4.34	0.70	0.13
	RMSE		18.42	15.96		19.51	17.20		18.01	16.92		17.94	16.70
	%D		40.97	38.05		40.20	38.73		38.04	43.41		42.13	41.67
	R²		0.9591	0.9693		0.9553	0.9653		0.9631	0.9674		0.9645	0.9692
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	30.63	27.45	27.75	31.13	28.25	28.29	31.53	29.41	29.26	32.14	30.17	30.02
	STD SAPMA	82.41	78.53	73.03	83.56	79.53	73.92	84.80	81.08	75.28	86.06	82.88	77.68
	ÇARPIKLIK	6.40	6.09	6.05	6.31	6.03	6.00	6.21	5.85	5.80	6.12	5.90	5.79
	MAKSİMUM	600.63	623.16	598.14	600.63	623.08	598.33	600.63	620.68	596.37	600.63	626.04	604.46
	MİNİMUM	4.30	0.01	0.01	4.30	0.36	0.28	4.30	0.26	0.23	4.30	0.12	-0.11
	RMSE		16.78	22.56		16.60	22.51		0.00	16.73	23.58	15.40	21.50
	%D		46.14	43.77		44.57	41.66		0.00	41.51	41.38	42.20	43.60
	R²		0.9586	0.9250		0.9605	0.9274		0.9611	0.9227		0.9680	0.9376
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	35.85	32.52	33.95	36.35	33.51	34.85	36.38	34.24	35.24	36.88	35.15	35.98
	STD SAPMA	91.03	91.59	91.24	92.32	92.74	92.40	93.72	93.91	93.67	95.15	95.23	95.04
	ÇARPIKLIK	7.84	7.69	7.64	7.73	7.60	7.55	7.62	7.52	7.47	7.50	7.41	7.36
	MAKSİMUM	866.35	858.12	855.28	866.35	857.92	855.08	866.35	858.10	855.55	866.35	857.74	855.31
	MİNİMUM	4.34	1.45	1.42	4.34	1.76	1.65	4.34	1.73	1.93	4.34	-3.68	-5.11
	RMSE		11.10	9.63		11.04	9.59		10.74	9.51		10.44	9.22
	%D		38.01	34.14		34.45	31.38		31.75	30.23		33.89	32.83
	R²		0.9851	0.9888		0.9857	0.9892		0.9869	0.9897		0.9880	0.9906

Çizelge A.2 (devam) : N=3 gün için en uygun k değerini veren modellerin performansları.

	N3 K24			N3 K30			N3 K50			
	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	32.86	30.92	31.31	34.60	33.42	33.55	15.52	15.53	15.53
	STD SAPMA	87.35	87.91	87.82	90.08	90.45	90.42	10.03	9.98	9.99
	ÇARPIKLIK	6.02	5.96	5.97	5.82	5.78	5.79	0.98	0.94	0.97
	MAKSİMUM	600.63	600.41	599.90	600.63	600.91	600.67	42.77	41.92	42.49
	MİNİMUM	4.30	-0.26	0.12	4.30	0.87	1.00	4.30	3.71	3.74
	RMSE		5.18	4.32		3.82	3.48		0.71	0.56
	%D		30.96	31.28		24.46	23.15		6.37	5.02
	R ²		0.9965	0.9976		0.9982	0.9985		0.9950	0.9931
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	37.60	33.67	34.58	39.52	35.91	36.39	25.78	24.57	32.18
	STD SAPMA	96.60	85.71	86.58	99.62	86.64	87.43	42.37	41.28	80.16
	ÇARPIKLIK	7.38	7.05	7.02	7.15	6.84	6.86	6.06	4.95	6.03
	MAKSİMUM	866.35	751.39	758.29	866.35	737.04	744.81	333.41	264.36	596.62
	MİNİMUM	4.34	-4.85	1.52	4.34	-3.04	1.08	4.34	0.88	-14.13
	RMSE		18.42	16.39		19.51	18.06		24.52	44.91
	%D		55.46	41.90		52.81	43.57		61.90	65.93
	R ²		0.9637	0.9712		0.9617	0.9672		0.6650	-0.1238
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	32.86	31.51	31.05	34.60	33.28	32.29	15.52	14.80	15.04
	STD SAPMA	87.35	85.13	79.49	90.08	83.50	75.05	10.03	32.45	27.23
	ÇARPIKLIK	6.02	5.81	5.70	5.82	5.55	5.43	0.98	1.13	1.92
	MAKSİMUM	600.63	629.81	607.23	600.63	606.46	570.44	42.77	119.60	116.22
	MİNİMUM	4.30	-0.36	-0.31	4.30	0.42	-15.99	4.30	-56.81	-29.42
	RMSE		14.41	21.20		18.15	29.94		29.93	23.25
	%D		38.66	42.76		38.30	49.50		140.64	105.94
	R ²		0.9728	0.9411		0.9594	0.8895		-7.8995	-4.3701
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	37.60	36.33	37.02	39.52	38.69	39.46	25.78	25.67	25.73
	STD SAPMA	96.60	96.53	96.39	99.62	99.43	99.28	42.37	42.29	42.36
	ÇARPIKLIK	7.38	7.31	7.26	7.15	7.17	7.11	6.06	6.06	6.06
	MAKSİMUM	866.35	857.55	855.31	866.35	861.69	859.38	333.41	332.56	333.36
	MİNİMUM	4.34	-3.55	-4.90	4.34	1.16	-0.13	4.34	1.51	2.70
	RMSE		10.31	9.14		10.07	8.48		3.44	1.74
	%D		35.77	33.91		36.42	37.18		14.89	10.61
	R ²		0.9886	0.9911		0.9898	0.9927		0.9934	0.9983

Cizelge A.3 : Nonlinear gün sayısı n' nin farklı değerleri (2, 4 ve 5) için modellerin performansları.

		N2 K18			N2 K24			N4 K18			N4 K23		
		GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	31.36	28.21	29.22	32.61	30.68	30.89	31.72	28.73	30.16	32.86	30.83	31.45
	STD SAPMA	84.39	85.25	84.99	86.91	87.47	87.42	85.21	86.02	85.67	87.35	87.93	87.78
	ÇARPIKLIK	6.25	6.17	6.18	6.05	5.99	6.00	6.18	6.11	6.13	6.02	5.96	5.97
	MAKSİMUM	600.63	600.29	599.72	600.63	599.77	599.48	600.63	601.01	600.54	600.63	600.26	600.32
	MİNİMUM	4.30	0.40	0.10	4.30	-0.32	-0.02	4.30	0.31	-0.07	4.30	-0.30	0.06
	RMSE		6.51	5.30		5.11	4.62		6.69	4.51		5.35	4.13
	%D		39.04	37.47		31.74	33.11		38.45	36.32		31.49	31.60
	R ²		0.9941	0.9961		0.9965	0.9972		0.9938	0.9972		0.9963	0.9978
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	36.31	30.89	32.41	37.33	33.42	33.88	36.53	29.48	30.48	37.60	32.75	31.61
	STD SAPMA	93.25	84.06	83.86	96.11	85.93	85.47	94.19	67.07	65.02	96.60	81.24	67.90
	ÇARPIKLIK	7.65	7.42	7.10	7.42	7.21	7.06	7.58	6.70	6.17	7.38	7.00	6.31
	MAKSİMUM	866.35	764.36	750.52	866.35	761.62	751.63	866.35	586.94	552.97	866.35	711.25	574.24
	MİNİMUM	4.34	1.83	0.08	4.34	-1.15	2.43	4.34	1.35	-4.81	4.34	-7.53	-0.02
	RMSE		15.81	16.67		17.01	16.94		34.57	34.46		21.94	33.27
	%D		34.65	38.45		44.32	39.03		44.39	40.79		57.94	43.94
	R ²		0.9712	0.9680		0.9687	0.9689		0.8653	0.8662		0.9484	0.8814
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	31.36	29.35	29.10	32.61	31.33	31.02	31.72	29.93	29.57	32.86	31.44	30.79
	STD SAPMA	84.39	79.29	77.11	86.91	82.91	80.88	85.21	87.25	82.04	87.35	89.86	86.07
	ÇARPIKLIK	6.25	5.87	5.89	6.05	5.72	5.72	6.18	6.62	6.35	6.02	6.56	6.29
	MAKSİMUM	600.63	621.93	614.79	600.63	626.89	620.57	600.63	746.10	684.81	600.63	750.00	701.57
	MİNİMUM	4.30	0.21	0.21	4.30	0.15	0.13	4.30	0.31	0.18	4.30	-0.05	0.20
	RMSE		19.30	22.11		17.70	20.38		28.16	25.75		26.51	24.88
	%D		38.97	39.08		38.42	39.29		42.62	39.06		38.98	38.25
	R ²		0.9477	0.9314		0.9585	0.9450		0.8908	0.9087		0.9079	0.9189
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	36.31	34.70	34.89	37.33	36.52	36.56	36.53	34.59	35.46	37.60	36.42	36.93
	STD SAPMA	93.25	93.25	93.19	96.11	95.86	95.85	94.19	94.43	94.21	96.60	96.60	96.50
	ÇARPIKLIK	7.65	7.48	7.44	7.42	7.27	7.25	7.58	7.42	7.43	7.38	7.26	7.25
	MAKSİMUM	866.35	853.43	851.34	866.35	852.69	851.77	866.35	856.73	856.36	866.35	856.36	856.04
	MİNİMUM	4.34	1.66	1.61	4.34	-3.73	-3.59	4.34	1.36	1.61	4.34	1.42	1.20
	RMSE		10.65	10.59		10.35	10.31		9.69	8.50		9.30	8.27
	%D		31.49	30.73		33.54	33.59		31.08	29.20		33.80	30.75
	R ²		0.9870	0.9871		0.9884	0.9885		0.9894	0.9919		0.9907	0.9927

Çizelge A.3 (devam) : Nonlinear gün sayısı n' nin farklı değerleri (2, 4 ve 5) için modellerin performansları.

		N5 K22			N5 K18			N5 K4		
		GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	32.86	30.84	31.59	31.92	29.37	30.60	29.49	23.62	27.70
	STD SAPMA	87.35	87.93	87.74	85.63	86.34	86.02	80.27	81.66	80.76
	ÇARPIKLIK	6.02	5.96	5.98	6.15	6.08	6.11	6.59	6.49	6.53
	MAKSİMUM	600.63	600.24	600.39	600.63	600.67	600.60	600.63	602.77	600.76
	MİNİMUM	4.30	-0.24	0.15	4.30	0.35	-0.23	4.30	0.00	0.00
	RMSE		5.26	3.83		6.07	4.05		9.43	5.01
	%D		32.99	30.27		37.46	33.63		57.69	42.88
	R ²		0.9964	0.9981		0.9950	0.9978		0.9862	0.9961
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	37.60	29.84	25.61	36.70	29.52	28.06	34.83	28.12	30.31
	STD SAPMA	96.60	102.61	64.10	94.66	127.30	88.36	88.62	85.05	72.17
	ÇARPIKLIK	7.38	7.89	5.66	7.54	7.85	7.49	8.06	7.12	7.09
	MAKSİMUM	866.35	935.20	508.41	866.35	1179.22	802.64	866.35	779.65	669.76
	MİNİMUM	4.34	-60.39	-63.14	4.34	-256.13	-49.36	4.34	0.10	0.42
	RMSE		35.01	45.70		61.39	29.82		20.30	21.53
	%D		65.05	60.75		57.56	56.48		62.38	40.64
	R ²		0.8687	0.7762		0.5794	0.9008		0.9475	0.9410
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	32.86	32.67	26.61	31.92	31.88	25.33	29.49	26.35	21.75
	STD SAPMA	87.35	90.98	73.34	85.63	91.04	71.26	80.27	90.80	64.71
	ÇARPIKLIK	6.02	5.72	5.80	6.15	5.66	5.47	6.59	6.09	5.54
	MAKSİMUM	600.63	704.08	555.36	600.63	708.25	534.08	600.63	741.55	503.13
	MİNİMUM	4.30	-0.32	-103.17	4.30	0.39	-145.18	4.30	0.00	-178.10
	RMSE		31.88	33.78		36.30	37.13		38.10	37.65
	%D		41.28	47.95		44.54	50.40		61.34	51.98
	R ²		0.8668	0.8504		0.8203	0.8120		0.7747	0.7800
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	37.60	36.56	36.96	36.70	34.87	35.75	34.83	28.23	32.40
	STD SAPMA	96.60	96.62	96.61	94.66	94.93	94.77	88.62	90.06	89.14
	ÇARPIKLIK	7.38	7.42	7.39	7.54	7.55	7.53	8.06	7.94	7.98
	MAKSİMUM	866.35	867.00	866.71	866.35	867.14	866.78	866.35	868.55	866.61
	MİNİMUM	4.34	0.51	-3.54	4.34	0.27	-4.23	4.34	0.12	0.52
	RMSE		8.48	6.80		9.04	6.96		12.69	8.49
	%D		34.51	30.22		31.70	29.56		53.34	38.43
	R ²		0.9923	0.9950		0.9909	0.9946		0.9795	0.9908

Çizelge A.4 : Toplam havza hafızasının (s=27 gün) farklı parametreleri için modellerin performans kıyaslaması.

		N2 K25			N3 K24				N4 K23			N5 K22		
		GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BH	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	32.86	30.68	30.89	32.86	32.33	30.92	31.31	32.86	30.83	31.45	32.86	30.84	31.59
	STD SAPMA	87.35	87.47	87.42	87.35	85.91	87.91	87.82	87.35	87.93	87.78	87.35	87.93	87.74
	ÇARPIKLIK	6.02	5.99	6.00	6.02	5.52	5.96	5.97	6.02	5.96	5.97	6.02	5.96	5.98
	MAKSİMUM	600.63	599.77	599.48	600.63	574.58	600.41	599.90	600.63	600.26	600.32	600.63	600.24	600.39
	MİNİMUM	4.30	-0.32	-0.02	4.30	-37.43	-0.26	0.12	4.30	-0.30	0.06	4.30	-0.24	0.15
	RMSE		5.11	4.62		16.79	5.18	4.32		5.35	4.13		5.26	3.83
	%D		31.74	33.11		84.53	30.96	31.28		31.49	31.60		32.99	30.27
R ²		0.9965	0.9972		0.9630	0.9965	0.9976		0.9963	0.9978		0.9964	0.9981	
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	37.60	33.42	33.88	37.60	37.29	33.67	34.58	37.60	32.75	31.61	37.60	29.84	25.61
	STD SAPMA	96.60	85.93	85.47	96.60	86.41	85.71	86.58	96.60	81.24	67.90	96.60	102.61	64.10
	ÇARPIKLIK	7.38	7.21	7.06	7.38	4.14	7.05	7.02	7.38	7.00	6.31	7.38	7.89	5.66
	MAKSİMUM	866.35	761.62	751.63	866.35	596.97	751.39	758.29	866.35	711.25	574.24	866.35	935.20	508.41
	MİNİMUM	4.34	-1.15	2.43	4.34	-55.06	-4.85	1.52	4.34	-7.53	-0.02	4.34	-60.39	-63.14
	RMSE		17.01	16.94		45.38	18.42	16.39		21.94	33.27		35.01	45.70
	%D		44.32	39.03		137.14	55.46	41.90		57.94	43.94		65.05	60.75
R ²		0.9687	0.9689		0.7793	0.9637	0.9712		0.9484	0.8814		0.8687	0.7762	
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	32.86	31.33	31.02	32.86	35.33	31.51	31.05	32.86	31.44	30.79	32.86	32.67	26.61
	STD SAPMA	87.35	82.91	80.88	87.35	90.84	85.13	79.49	87.35	89.86	86.07	87.35	90.98	73.34
	ÇARPIKLIK	6.02	5.72	5.72	6.02	5.08	5.81	5.70	6.02	6.56	6.29	6.02	5.72	5.80
	MAKSİMUM	600.63	626.89	620.57	600.63	591.83	629.81	607.23	600.63	750.00	701.57	600.63	704.08	555.36
	MİNİMUM	4.30	0.15	0.13	4.30	-30.64	-0.36	-0.31	4.30	-0.05	0.20	4.30	-0.32	-103.17
	RMSE		17.70	20.38		26.23	14.41	21.20		26.51	24.88		31.88	33.78
	%D		38.42	39.29		102.29	38.66	42.76		38.98	38.25		41.28	47.95
R ²		0.9585	0.9450		0.9098	0.9728	0.9411		0.9079	0.9189		0.8668	0.8504	
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	37.60	36.52	36.56	37.60	40.96	36.33	37.02	37.60	36.42	36.93	37.60	36.56	36.96
	STD SAPMA	96.60	95.86	95.85	96.60	86.76	96.53	96.39	96.60	96.60	96.50	96.60	96.62	96.61
	ÇARPIKLIK	7.38	7.27	7.25	7.38	4.67	7.31	7.26	7.38	7.26	7.25	7.38	7.42	7.39
	MAKSİMUM	866.35	852.69	851.77	866.35	633.15	857.55	855.31	866.35	856.36	856.04	866.35	867.00	866.71
	MİNİMUM	4.34	-3.73	-3.59	4.34	-34.34	-3.55	-4.90	4.34	1.42	1.20	4.34	0.51	-3.54
	RMSE		10.35	10.31		38.98	10.31	9.14		9.30	8.27		8.48	6.80
	%D		33.54	33.59		84.83	35.77	33.91		33.80	30.75		34.51	30.22
R ²		0.9884	0.9885		0.8372	0.9886	0.9911		0.9907	0.9927		0.9923	0.9950	

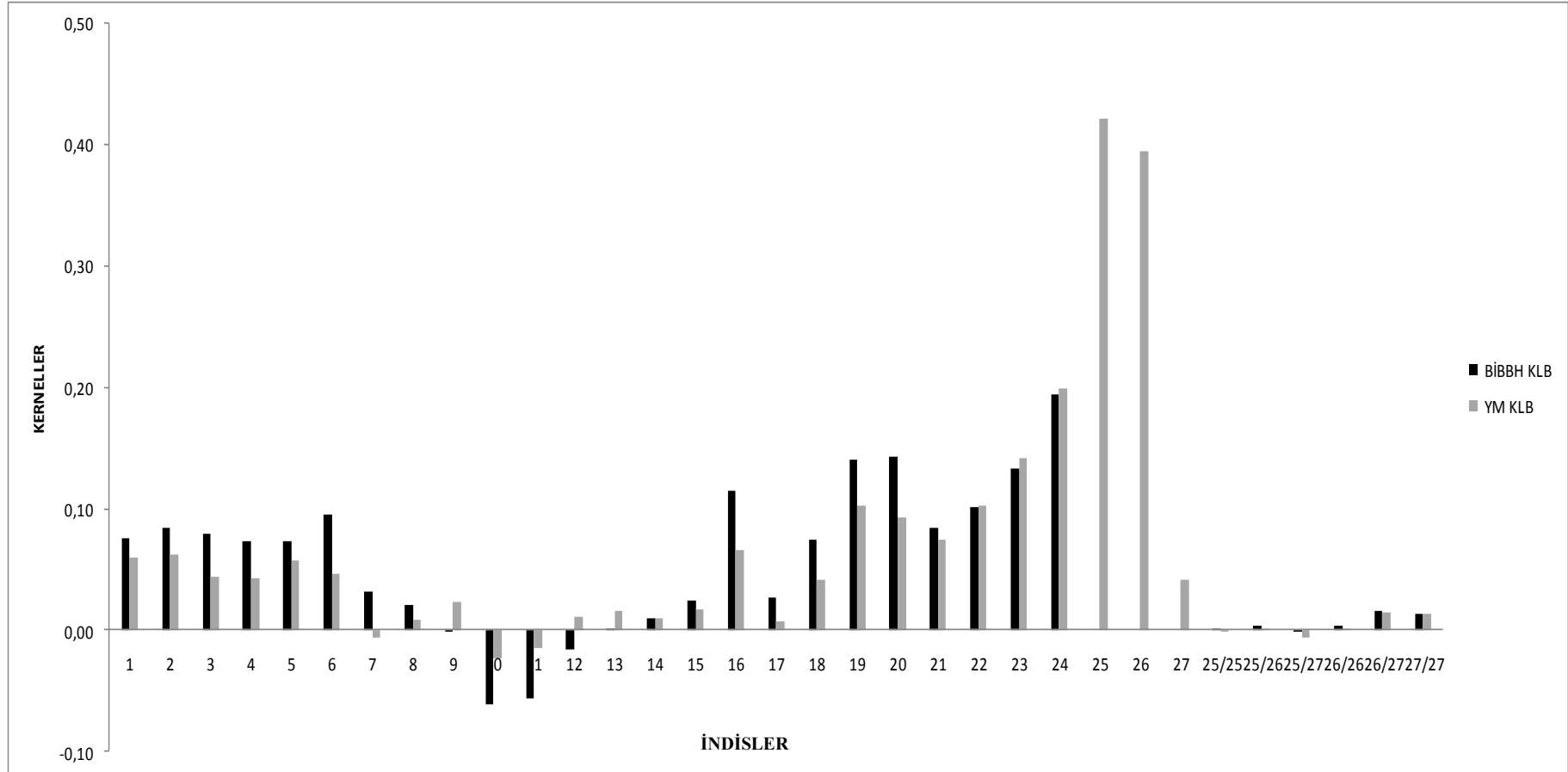
Çizelge A.5 : N=3 gün için en uygun k değerini veren modellerin performansları (milyon m³/gün verilerle).

		N3 K12			N3 K15			N3 K18			N3 K21		
		GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	2.65	2.31	2.44	2.69	2.37	2.52	2.72	2.44	2.56	2.78	2.56	2.62
	STD SAPMA	7.12	7.21	7.18	7.22	7.30	7.27	7.33	7.40	7.37	7.44	7.49	7.48
	ÇARPIKLIK	6.40	6.31	6.33	6.31	6.23	6.25	6.21	6.14	6.16	6.12	6.05	6.06
	MAKSİMUM	51.89	51.90	51.82	51.89	51.94	51.87	51.89	51.92	51.85	51.89	51.92	51.85
	MİNİMUM	0.37	0.00	0.00	0.37	0.04	0.02	0.37	0.03	-0.01	0.37	0.00	0.01
	RMSE		0.63	0.47		0.61	0.44		0.60	0.43		0.52	0.41
	%D		44.72	40.77		41.90	37.39		39.61	37.77		35.89	36.29
	R ²		0.9921	0.9956		0.9927	0.9964		0.9933	0.9966		0.9952	0.9970
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	3.10	2.51	2.72	3.14	2.60	2.83	3.14	2.66	2.86	3.19	2.80	2.91
	STD SAPMA	7.86	6.87	7.03	7.98	6.90	7.10	8.10	7.18	7.35	8.22	7.37	7.44
	ÇARPIKLIK	7.84	7.42	7.38	7.73	7.21	7.09	7.62	7.11	6.97	7.50	7.05	6.96
	MAKSİMUM	74.85	63.31	64.92	74.85	62.34	63.96	74.85	63.93	65.19	74.85	64.97	65.47
	MİNİMUM	0.37	0.13	0.13	0.37	0.10	-0.03	0.37	0.14	-0.11	0.37	0.06	0.02
	RMSE		1.59	1.38		1.70	1.49		1.56	1.46		1.55	1.45
	%D		40.98	38.02		40.18	38.74		37.96	43.34		42.09	41.56
	R ²		0.9590	0.9692		0.9548	0.9652		0.9630	0.9674		0.9643	0.9691
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	2.65	2.37	2.40	2.69	2.44	2.44	2.72	2.54	2.53	2.78	2.61	2.59
	STD SAPMA	7.12	6.79	6.31	7.22	6.87	6.39	7.33	7.01	6.50	7.44	7.16	6.72
	ÇARPIKLIK	6.40	6.09	6.05	6.31	6.03	6.00	6.21	5.85	5.80	6.12	5.90	5.79
	MAKSİMUM	51.89	53.84	51.68	51.89	53.84	51.71	51.89	53.63	51.52	51.89	54.09	52.24
	MİNİMUM	0.37	0.00	0.00	0.37	0.03	0.02	0.37	0.02	0.02	0.37	0.01	-0.01
	RMSE		1.45	1.95		1.43	1.94		1.45	2.04		1.33	1.85
	%D		46.14	43.77		44.57	41.61		41.51	41.41		42.22	43.59
	R ²		0.9586	0.9250		0.9606	0.9278		0.9611	0.9225		0.9680	0.9379
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	3.10	2.81	2.93	3.14	2.90	3.01	3.14	2.96	3.05	3.19	3.04	3.11
	STD SAPMA	7.86	7.91	7.88	7.98	8.01	7.98	8.10	8.11	8.09	8.22	8.23	8.21
	ÇARPIKLIK	7.84	7.69	7.64	7.73	7.60	7.55	7.62	7.52	7.47	7.50	7.41	7.36
	MAKSİMUM	74.85	74.14	73.90	74.85	74.13	73.88	74.85	74.14	73.92	74.85	74.11	73.90
	MİNİMUM	0.37	0.13	0.12	0.37	0.15	0.14	0.37	0.15	0.17	0.37	-0.32	-0.44
	RMSE		0.96	0.83		0.95	0.83		0.93	0.82		0.90	0.80
	%D		38.01	34.12		34.46	31.37		31.75	30.22		33.90	32.81
	R ²		0.9851	0.9888		0.9857	0.9892		0.9869	0.9897		0.9880	0.9906

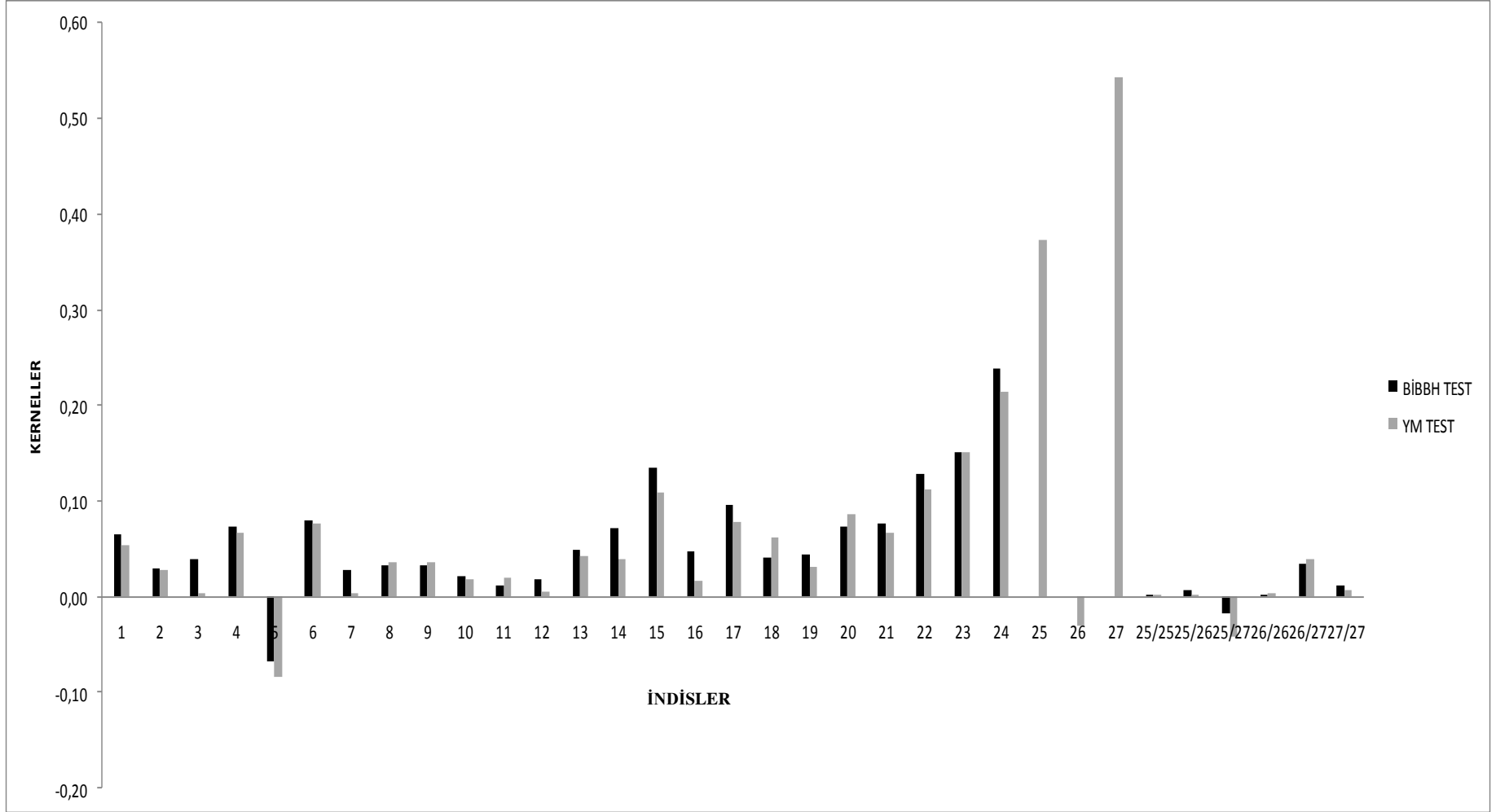
Çizelge A.5 (devam) : N=3 gün için en uygun k değerini veren modellerin performansları (milyon m³/gün verilerle).

		N3 K24			N3 K30			N3 K50		
		GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM	GÖZLEM	BİBBH	YM
1-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	2.84	2.67	2.71	2.99	2.89	2.90	1.34	1.34	1.34
	STD SAPMA	7.55	7.60	7.59	7.78	7.82	7.81	0.87	0.86	0.87
	ÇARPIKLIK	6.02	5.96	5.97	5.82	5.78	5.79	0.98	0.93	0.95
	MAKSİMUM	51.89	51.88	51.83	51.89	51.92	51.90	3.70	3.63	3.65
	MİNİMUM	0.37	-0.02	0.01	0.37	0.07	0.09	0.37	0.30	0.25
	RMSE		0.45	0.37		0.33	0.30		0.06	0.06
	%D		30.96	31.42		24.45	23.16		6.79	7.04
	R ²		0.9965	0.9976		0.9982	0.9985		0.9946	0.9945
1-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	3.25	2.91	2.99	3.41	3.10	3.14	2.23	2.21	2.81
	STD SAPMA	8.35	7.41	7.48	8.61	7.49	7.56	3.66	4.02	7.33
	ÇARPIKLIK	7.38	7.05	7.02	7.15	6.84	6.86	6.06	5.08	7.00
	MAKSİMUM	74.85	64.93	65.56	74.85	63.68	64.37	28.81	26.36	58.72
	MİNİMUM	0.37	-0.42	0.12	0.37	-0.26	0.10	0.37	-0.06	-0.43
	RMSE		1.59	1.41		1.68	1.56		2.86	6.76
	%D		55.15	42.02		52.65	43.38		65.99	71.22
	R ²		0.9637	0.9713		0.9617	0.9672		0.3887	-2.4103
2-1 DÖNEMİ	ORTALAMA	2.84	2.72	2.68	2.99	2.88	2.79	1.34	1.28	1.29
	STD SAPMA	7.55	7.36	6.87	7.78	7.21	6.49	0.87	2.85	2.45
	ÇARPIKLIK	6.02	5.81	5.69	5.82	5.55	5.43	0.98	1.14	1.85
	MAKSİMUM	51.89	54.41	52.46	51.89	52.40	49.30	3.70	10.62	10.60
	MİNİMUM	0.37	-0.03	-0.03	0.37	0.04	-1.38	0.37	-4.96	-2.79
	RMSE		1.24	1.83		1.57	2.58		2.64	2.12
	%D		38.43	42.34		38.27	49.43		143.64	114.12
	R ²		0.9728	0.9411		0.9594	0.8898		-8.2597	-4.9569
2-2 DÖNEMİ	ORTALAMA	3.25	3.14	3.20	3.41	3.34	3.41	2.23	2.22	2.22
	STD SAPMA	8.35	8.34	8.33	8.61	8.59	8.58	3.66	3.65	3.66
	ÇARPIKLIK	7.38	7.31	7.26	7.15	7.17	7.11	6.06	6.05	6.06
	MAKSİMUM	74.85	74.09	73.90	74.85	74.45	74.25	28.81	28.73	28.81
	MİNİMUM	0.37	-0.30	-0.42	0.37	0.10	-0.01	0.37	0.14	0.23
	RMSE		0.89	0.79		0.87	0.73		0.30	0.15
	%D		35.78	33.96		36.41	37.15		14.98	10.58
	R ²		0.9886	0.9911		0.9898	0.9927		0.9934	0.9983

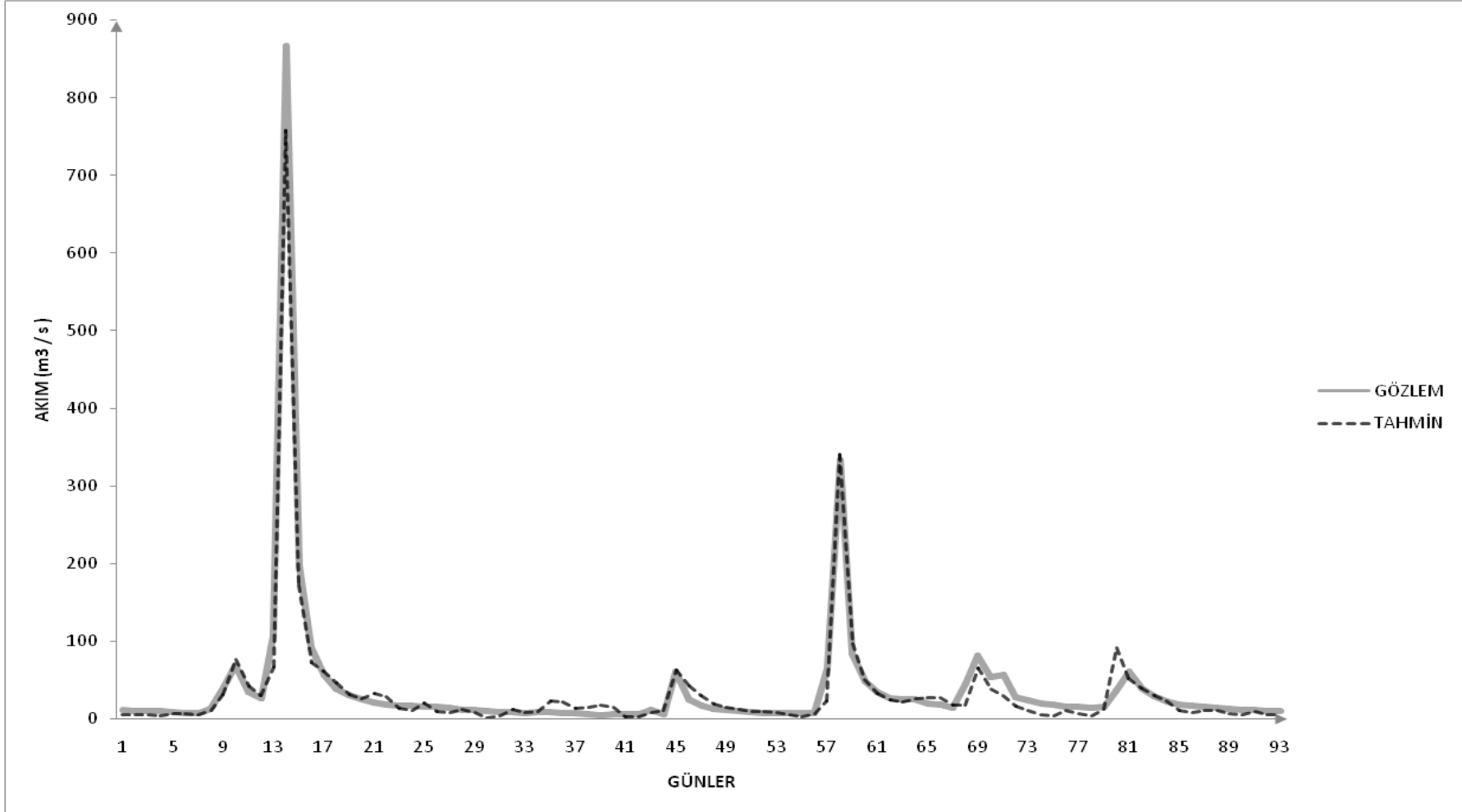
EK B



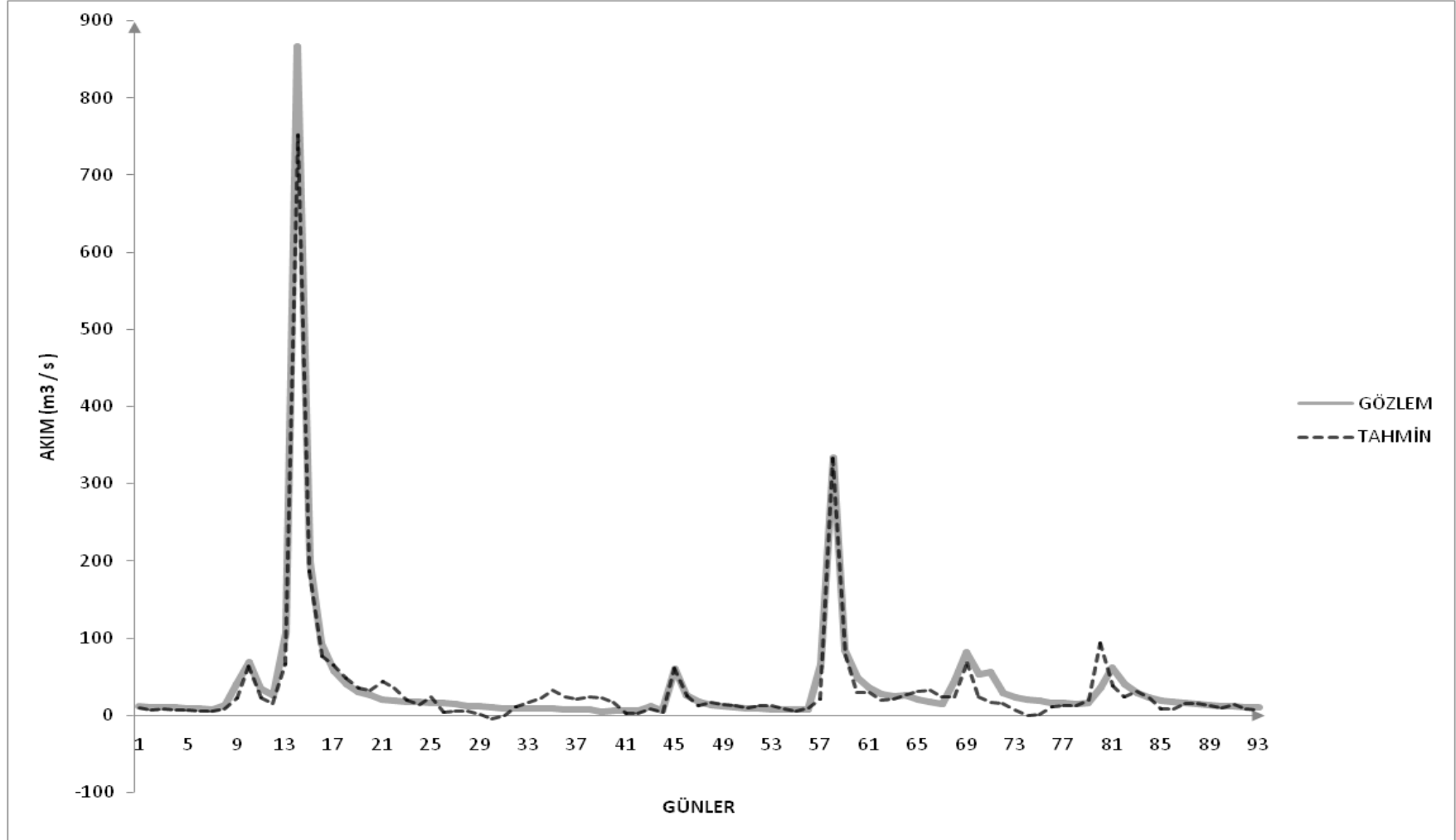
Şekil B.1 : N3K24 için modellerin kernelleri (kalibrasyon periyodu).



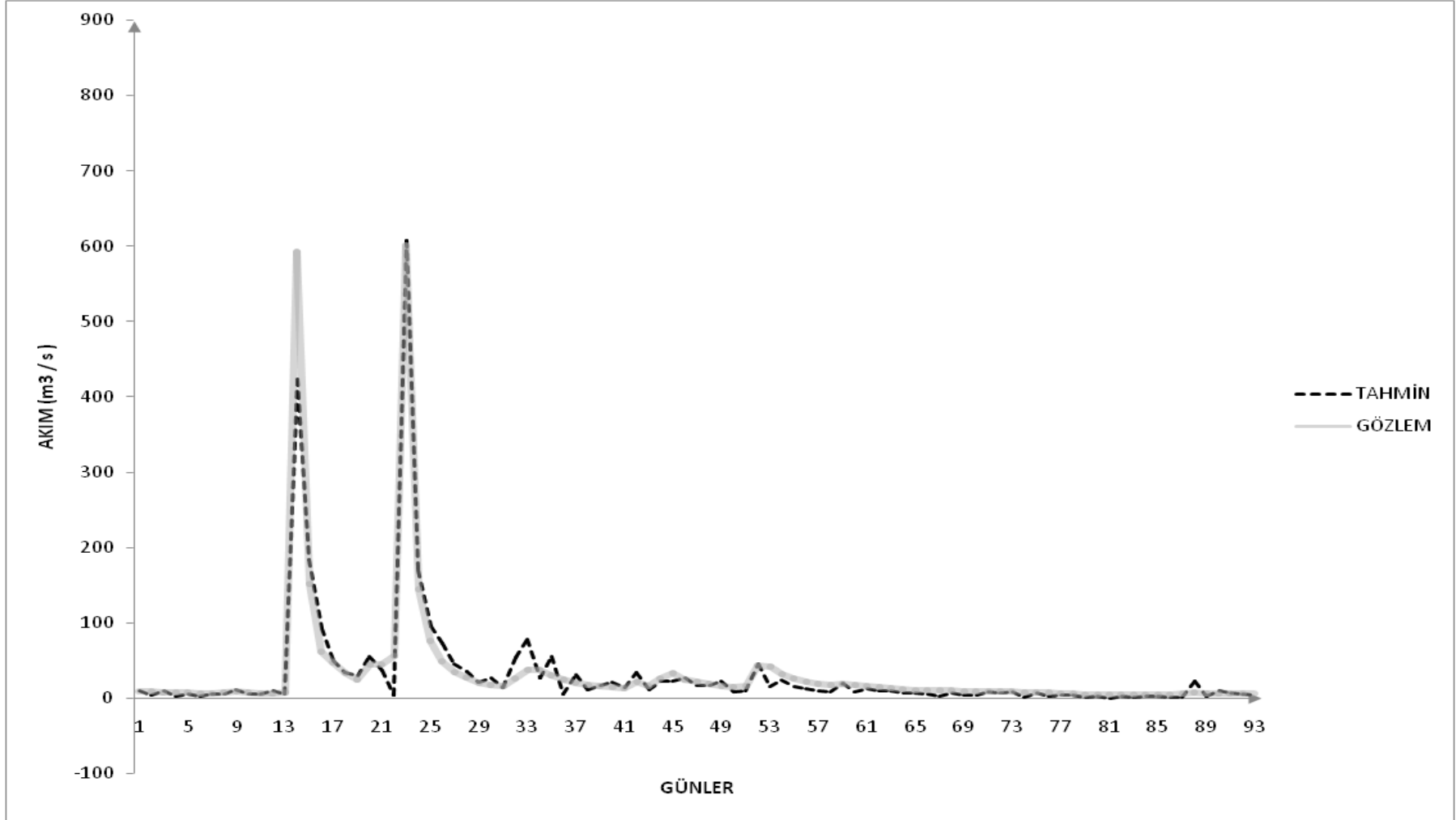
Şekil B.2 : N3K24 için modellerin kernelleri (test periyodu).



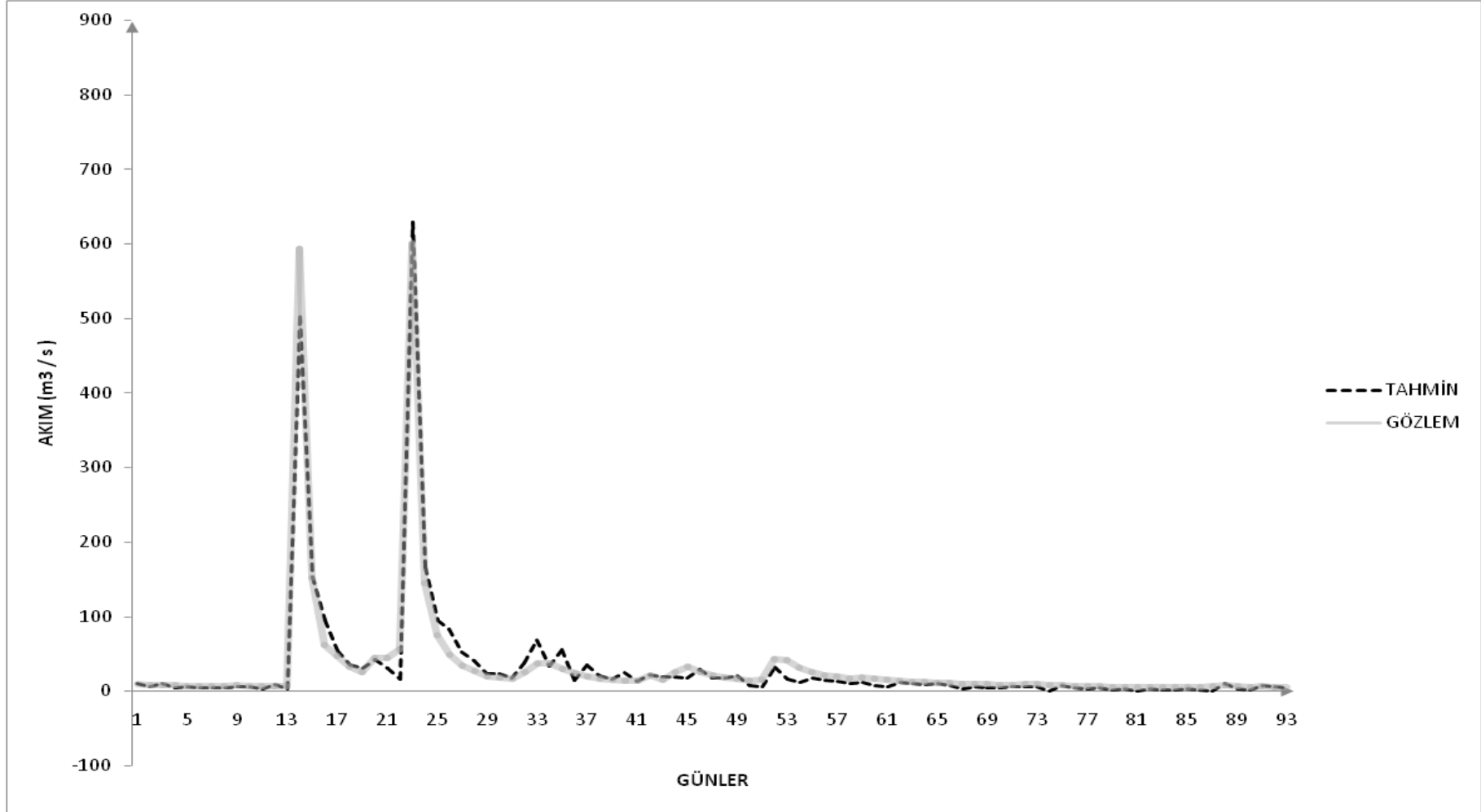
Şekil B.3 : N3K24 için YM (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



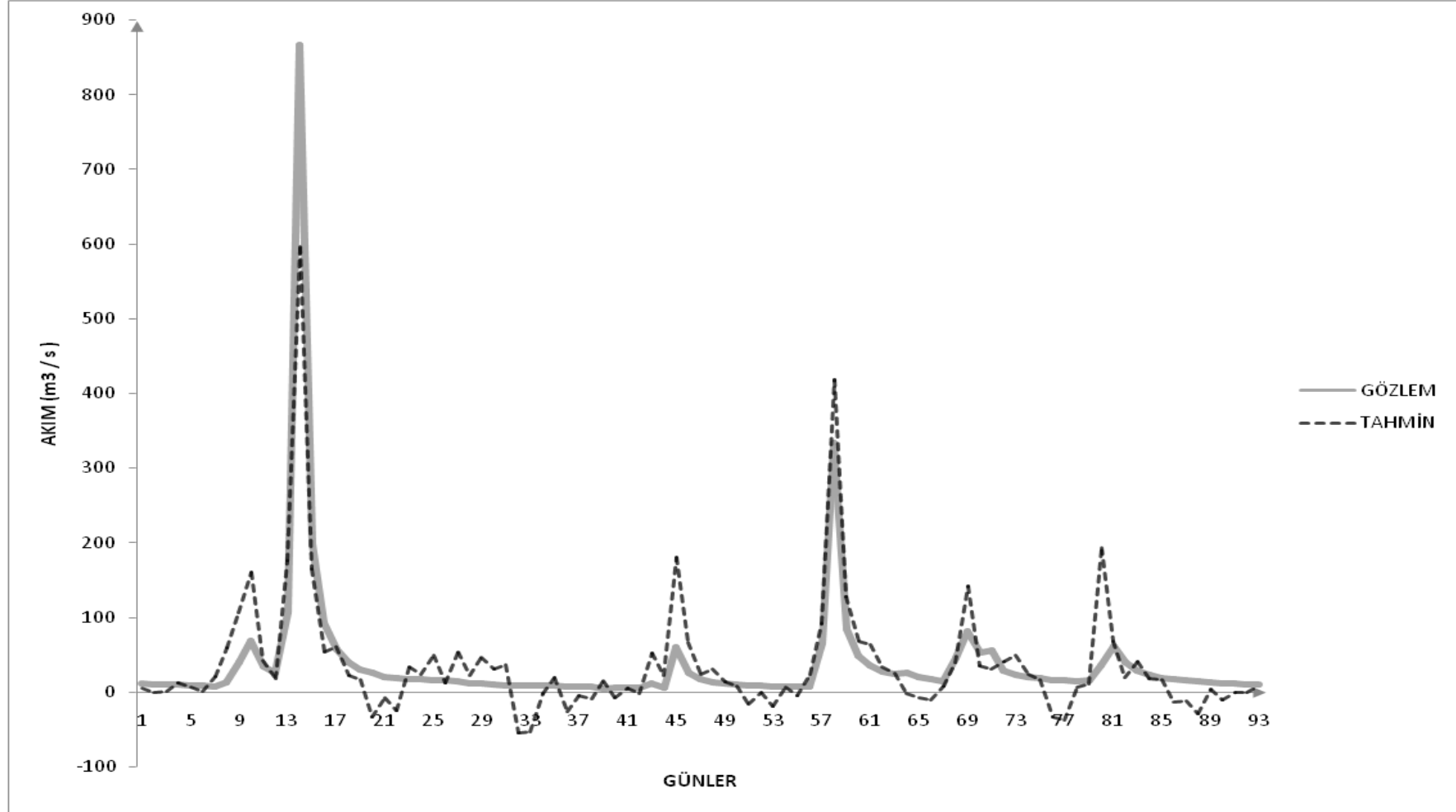
Şekil B.4 : N3K24 için BİBBH (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



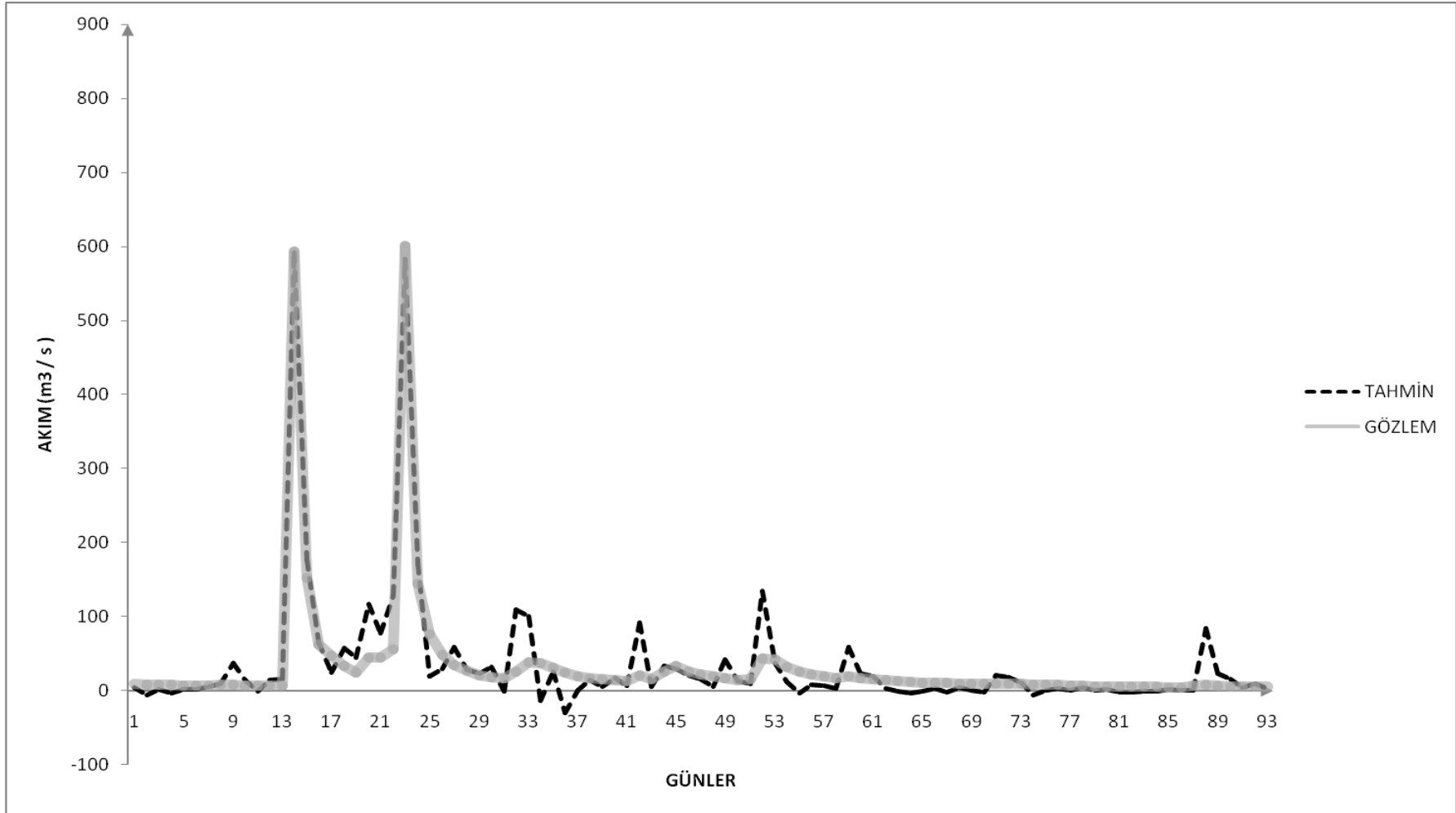
Şekil B.5 : N3K24 için YM (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



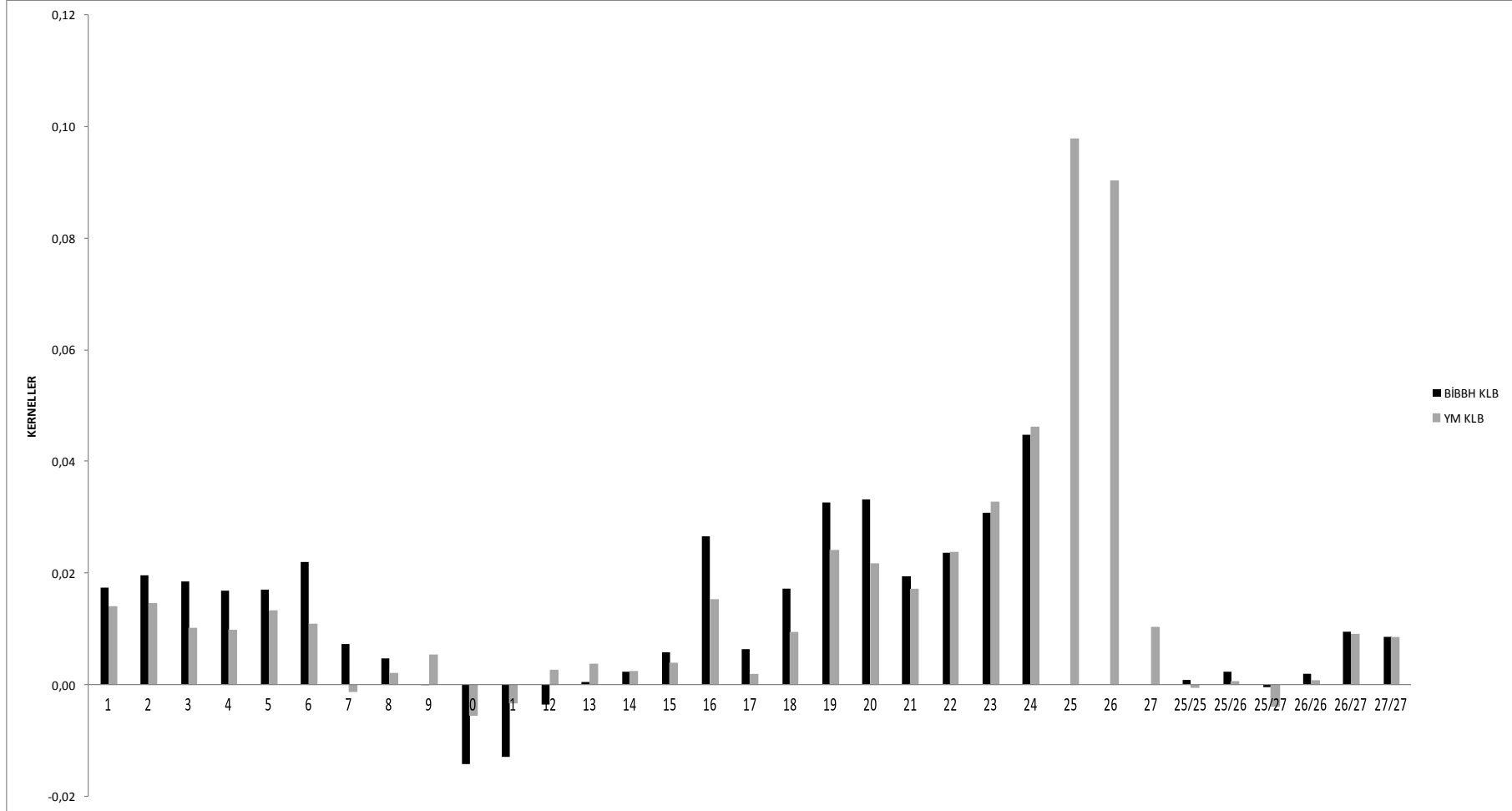
Şekil B.6 : N3K24 için BİBBH (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



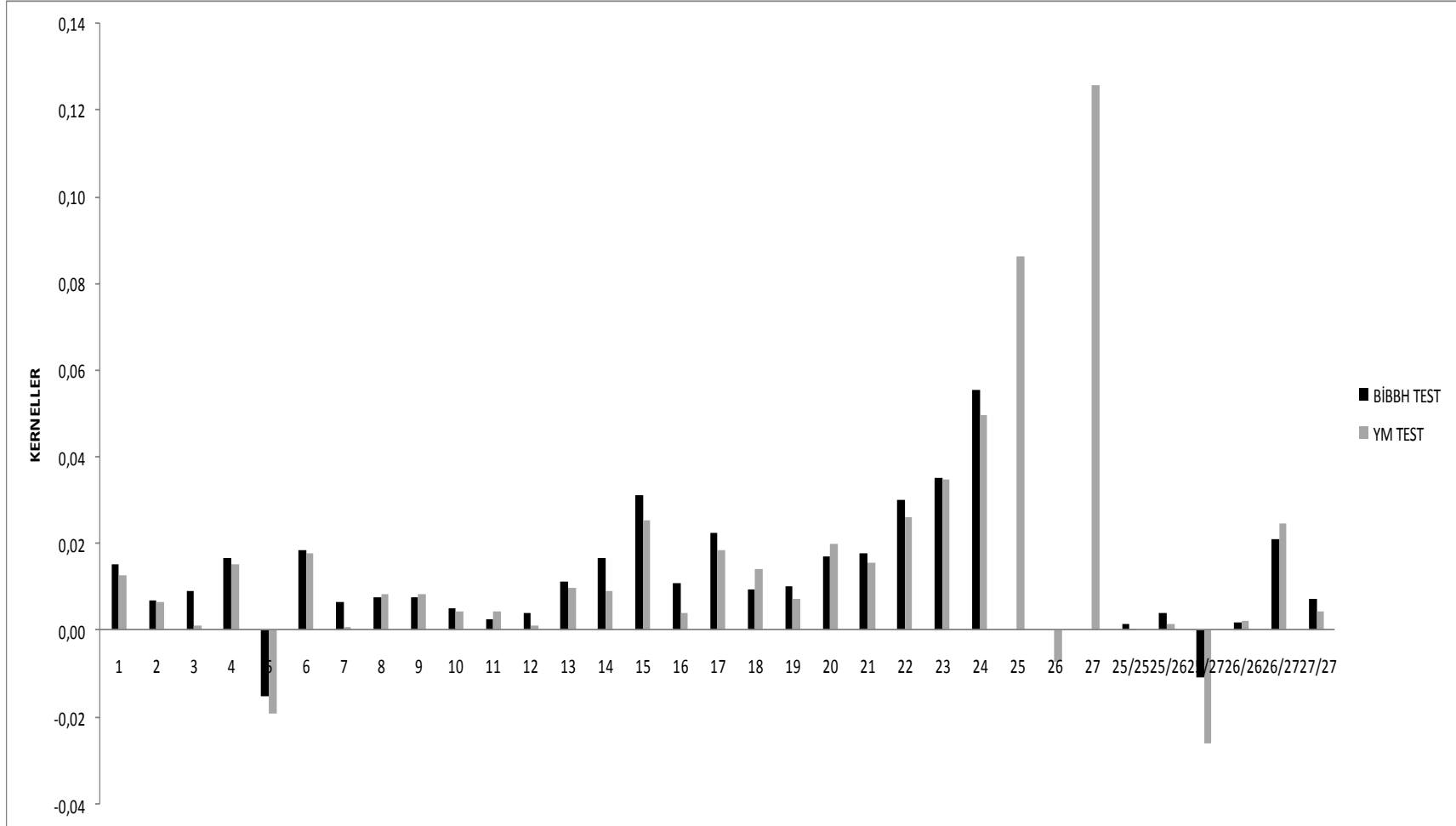
Şekil B.7 : K27 için BH (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



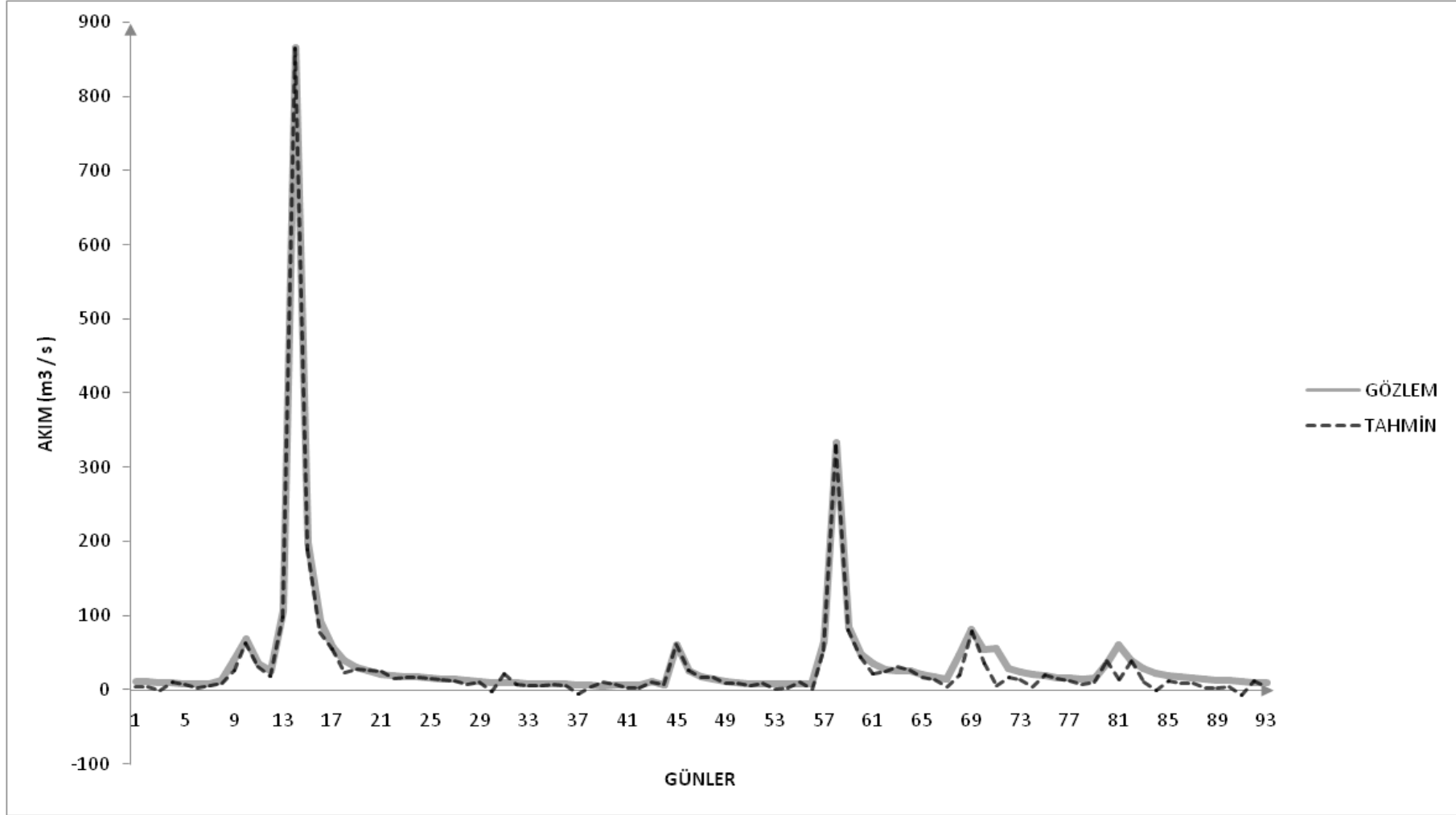
Şekil B.8 : K27 için BH (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



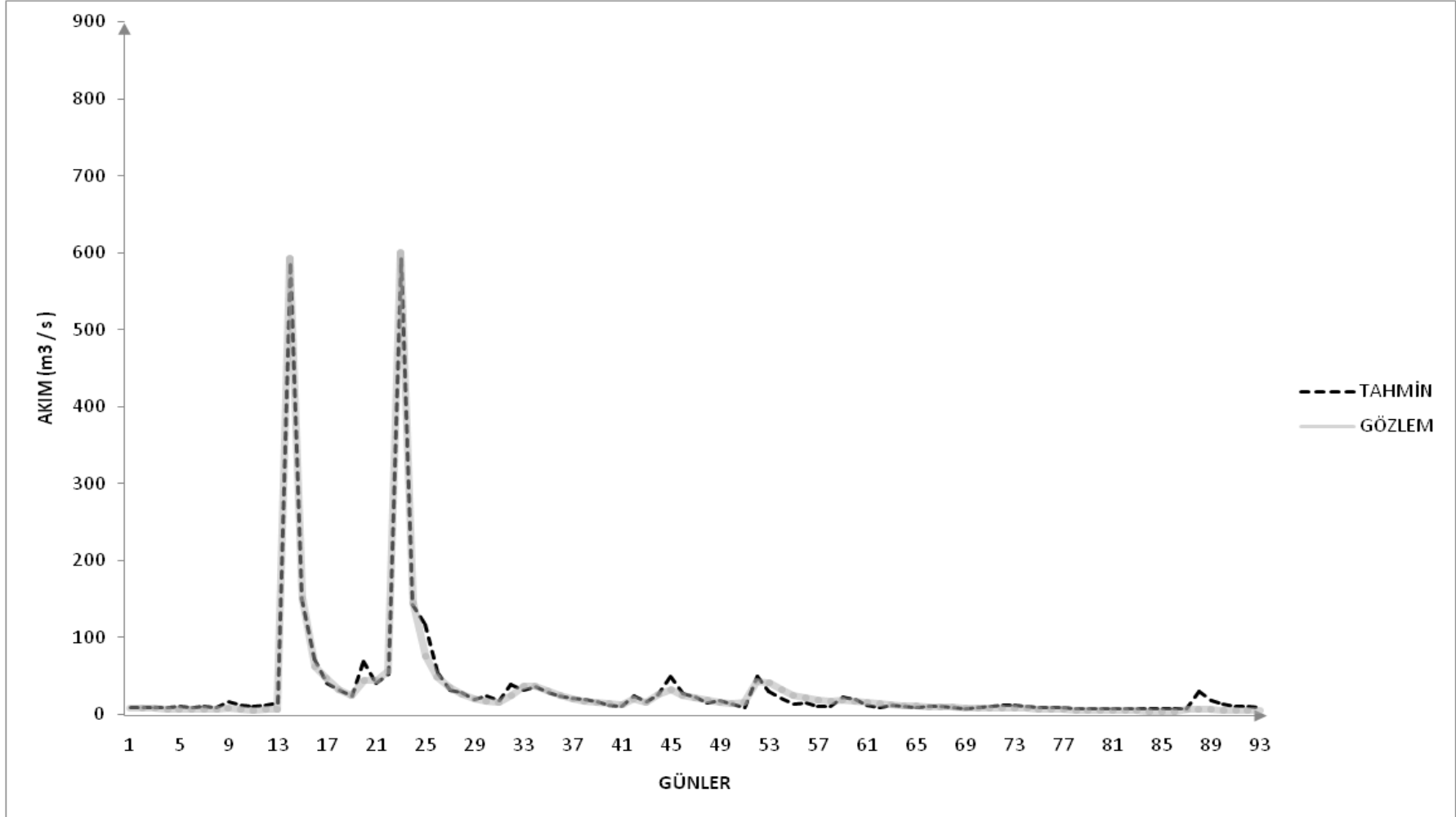
Şekil B.9 : N3K24 için modellerin kalibrasyon periyodu kernelleri (milyon m³/gün verilerle).



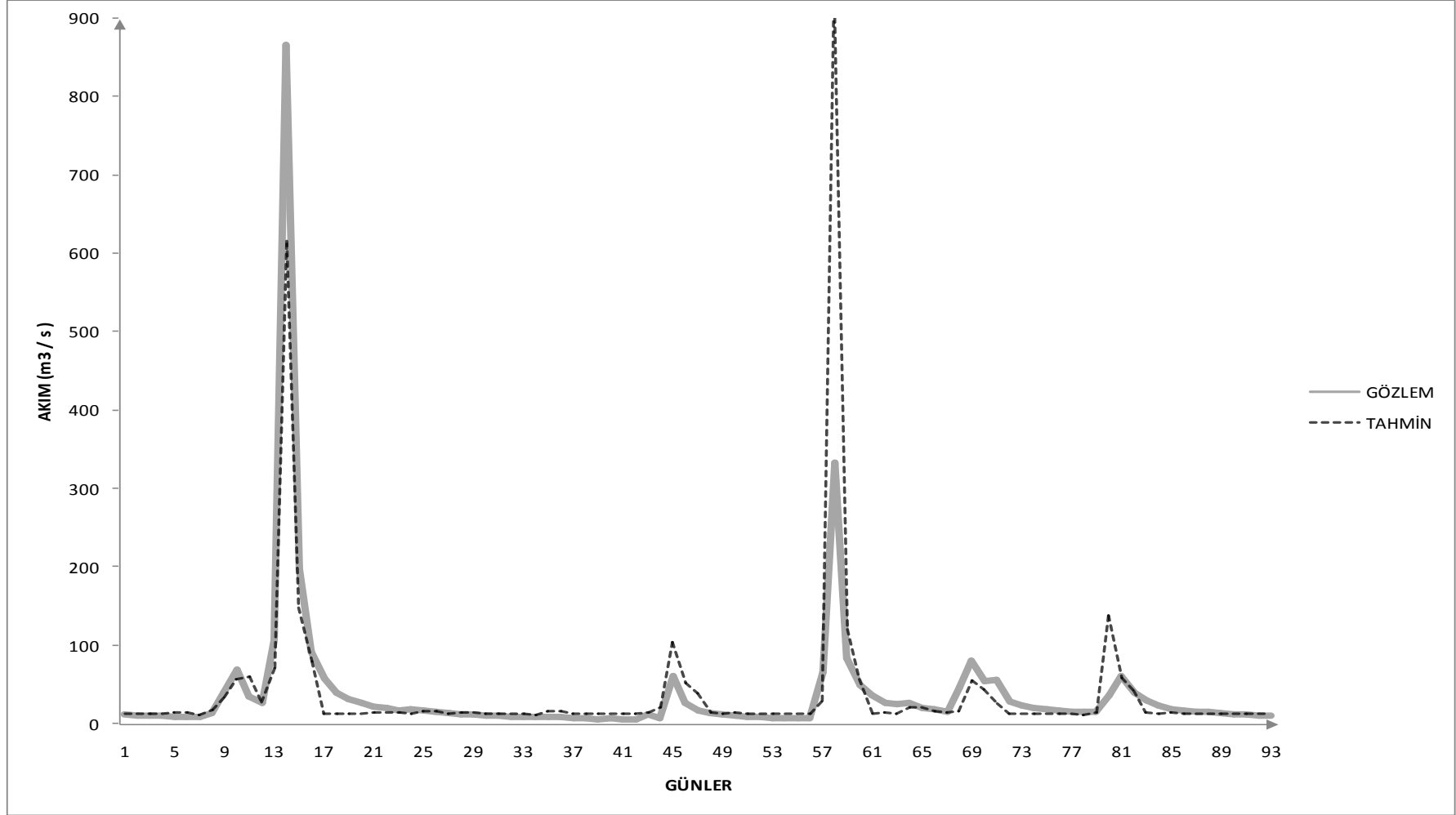
Şekil B.10 : N3K24 için modellerin test periyodu kernelleri (milyon m³/gün verilerle).



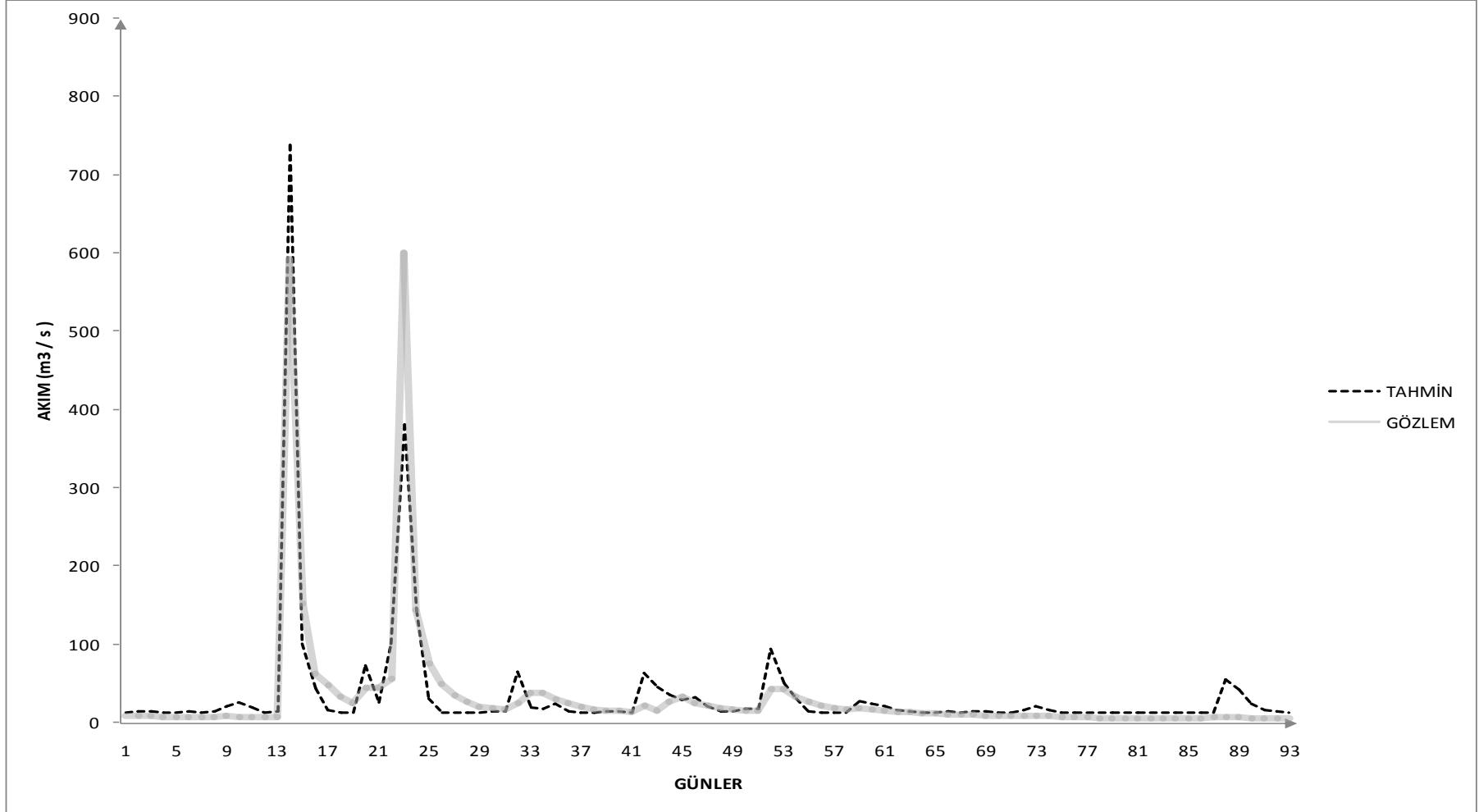
Şekil B.11 : N3K24 için İBGYS (1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



Şekil B.12 : N3K24 için İBGYSA (2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



Şekil B.13 : N1K3 için BM(1-2) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.



Şekil B.14 : N1K3 için BM(2-1) ile akım tahminleri ve gözlenmiş akımlar.

ÖZGEÇMİŞ

- Ad Soyad** : Osman ULUKAYA
- Doğum Yeri ve Tarihi** : AFYONKARAHİSAR / 25.09.1973
- Lisans Üniversite** : Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü(1991-1995)
- Yüksek Lisans Üniversite** : İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Su Mühendisliği Programı (1995-1998)