

**AKARSU ASKI MADDESİ DEBİSİ TAHMİNİ
İÇİN NONLİNEER BİR SİSTEM MODELİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Veysel GÜLDAL

68864

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Eylül 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Aralık 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. R. Ferruh MÜFTÜOĞLU 6.2.1998 *R. Ferruh*
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmetçik BAYAZIT 9.2.1998 *M. Bayazit*
Prof. Dr. Zekai ŞEN 6/2/1998 *Z. Şen*
Prof. Dr. Mustafa GÖĞÜŞ 5-2-1998 *M. Göğüş*
Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL 6-2-1998 *Y. Yüksel*

ARALIK 1997

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Su Programı çerçevesinde gerçekleştirilen bu çalışmada, akarsu askı maddesi konsantrasyonunun veya askı maddesi debisinin özellikle, gerçek zaman tahminleri için nonlinear bir sistem modelinin geliştirilmesi ve kapsamlı bir uygulamasının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma süresince, yakın alakalarını gördüğüm ve bana yardımlarını esirgemeyen kıymetli-danışman hocam Sayın Prof. Dr. R. Ferruh MÜFTÜOĞLU ' na içten teşekkürlerimi arz eder, şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bugüne kadar devam eden ve özellikle akademik yaşantım boyunca karşılaştığım zorlukları aşmada, bana sabır gösteren eşime ve hem maddi hem de manevi bütün imkanlarını benim için severek harcayan Annem ve Babama en kalbi sevgilerimi sunar,muhabbetle kucaklarım.

Eylül 1997

Veysel GÜLDAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Askı Maddesi Tahminleri	2
1.2 Mevcut Tahmin Yöntemleri	3
1.3 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	8
BÖLÜM 2 ASKI MADDESİ DEBİSİ TAHMİNİ İÇİN KARA-KUTU YAKLAŞIMI İLE HAVZA ANALİZİ	9
2.1 Havza ve Davranışı	9
2.1.1 Akarsu havzalarında erozyon ve katı madde taşınımı	10
2.1.1.1 Askı maddesi taşınımına etki eden faktörler	12
2.1.1.2 Akarsularda askı maddesi konsantrasyonunun zamanla değişimi	12
2.1.2 Havza davranışının nonlineerliği	16
2.1.3 Sistem olarak havza	18
2.2 Havza Modellemesinde Yaklaşımlar	20
2.3 Kara-Kutu Modelleri	22
2.3.1 Lineer modeller	23
2.3.2 Nonlineer modeller	25
2.3.2.1 Nonlineer bir model olarak fonksiyonel dizi	25
2.3.2.2 Williams'ın birim sediment eğrisi modeli	30
BÖLÜM 3 NONLİNEER BİR ASKI MADDESİ MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ	32
3.1 Nonlineer Bir Askı Maddesi Modeli	32
3.1.1 Modelin özellikleri	36

3.1.2 Modelin kesikli süreçler için türetilmesi	36
3.1.3 Kesikli modelin özellikleri	38
3.2 Modellerin Tadili.....	38
3.2.1 Modelin özellikleri	40
3.3 Modellerin Kullanımı	41
3.4 Lineer Bir Akım-Askı Maddesi Modeli	42
 BÖLÜM 4 MODEL KALİBRASYONU	44
4.1 Hafızanın Belirlenmesi.....	47
4.2 Davranış Fonksiyonu Optimum Değerlerinin Hesaplanması.....	49
4.2.1 Normal denklemlerin çıkarılması.....	50
4.3 Kalibrasyon İçin Kullanılacak Datanın Uzunluğu.....	53
4.4 Geçmiş Etkin Yağışların Güncelleştirilmesi	53
4.5 Modellerin Uygunluk Kriterleri	55
4.6 Bilgisayar Programlaması ve Akış Şeması.....	56
 BÖLÜM 5 UYGULAMALAR	58
5.1 Uygulamada Kullanılan Datalar	58
5.2 Hafıza Uzunluğu ve Tahmin Süresinin Belirlenmesi.....	60
5.3 Hatalı Dataların İyileştirilmesi (Filtering).....	64
5.4 Uygulamalarda Esas Alınan Modeller ve Sonuçları.....	64
5.4.1 Davranış fonksiyonlarının belirlenmesi	64
5.4.2 Uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi.....	73
 BÖLÜM 6 SONUÇLAR	97
 KAYNAKLAR	100
 EKLER.....	107
 ÖZGEÇMİŞ.....	120

SEMBOL LİSTESİ

ϕ	: Davranış fonksiyonu
α, β	: Akım Karakteristiği ile ilgili katsayılar
$\{h_{i,j}\}$	: İki boyutlu askı maddesi eğrileri kümesi
a_{m-i}	: Yağışların askı maddesi konsantrasyonuna katkı oranı
B	: Buharlaştırma
$C(t)$	: t Anındaki askı maddesi konsantrasyonu
C	: Askı maddesi konsantrasyonu
$\bar{C}$	: Ortalama askı maddesi konsantrasyonu
c	: Öteleme sayısı
C_c'	: Hesaplanmış askı maddesi konsantrasyonu
C_c	: Gözlenmiş askı maddesi konsantrasyonu
$D(\%)$	: Yüzde hata oranı
D	: Fonksiyonel derecesi
$DSİ$	: Devlet su işleri
E	: Amaç fonksiyonu
$EİEİ$	: Elektrik işleri etüt idaresi
h_o	: Sistemin içindeki bir kaynağın katkısı yada kaçak
H_1	: Lineer fonksiyonel
$h_1, h_2, \dots, h_n$	: Havza davranışını temsil eden, davranış (kernel) fonksiyonları
H_2	: Kuadratik fonksiyonel
h_i	: Birim hidrografın ordinatı
$h_i, h_{i,j}$	: Bir ve iki boyutlu davranış fonksiyonu ordinatları
$h_{m-i, m-j}$	: i'nci birim etkin yağışın katkı oranı
$h_n(t-s_1, \dots, t-s_n)$	: n'inci derece davranış fonksiyonları
k	: Fasıla
K	: Kalibrasyon için kullanılan gözlem sayısı
L	: Gecikme, tahmin süresi
l	: Lineer hafıza

m	: Sistem hafızası
M	: Sistemin nonlineerlik derecesi
N	: Korelogram için kullanılan data uzunluğu
n	: Nonlineer hafıza
Q	: Akım
Q_a, Q_g	: Yüzey-altı akımları
Q_k, Q_p	: Kuyu ve pınar şeklindeki yer altı suyu deşarjları
Q_s	: Katı madde miktarı
Q_{ya}	: Yer altı akımları
$Q_{yüz}$	: Yüzeysel Akış
R^2	: Nash ve Sutcliffe hata kriteri
r_k	: Korelasyon katsayısı
$RMSE$	: Standart hata
$s_1, s_2, \dots, s_n$	: Yağış değerleri
s_i	: Gecikme zamanı
t	: Hafıza uzunluğu
T	: Terleme
u_i	: Birim katı madde eğrisinin ordinatı
$USLE$	: Universal toprak kaybı denklemi
$x(s_i)$	: Katı madde debisine katkıda bulunan yağışlar
$X(t)$	: t Anındaki sistemin girdisi
x_1^*, x_1^{**}	: Güncelleştirilmiş etkin yağışlar
x_i	: Etkin yağışlar
$Y(t)$	: t Anındaki sistemin çıktısı
Y	: Yağış

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	C-Q İlişkilerinde Doğrusal Olmayan Bir Değişim	5
Şekil 2.1	Askı Maddesi Konsantrasyon Değişimi ve Taşkın Hidrografi: (a) Enoree Nehri İçin. (b) Volga Nehri İçin.....	13
Şekil 2.2	Pigeon Roost Akarsu Havzasına Ait Askı Maddesi Konsantrasyonunun Değişimi ve Hidrograf: (a) 3 Ekim 1957 Hafif Şiddetli Sağanağın Ardından. (b) 18 Şubat 1961 Şiddetli Sağanağın Ardından	14
Şekil 2.3	Bixler Run Havzasına Ait 13 Mart 1963 Sağanağı Sonrası Hidrograf ve Katı Madde Eğrisi	15
Şekil 2.4	Sistem Olarak Havza	18
Şekil 2.5	Basitleştirilmiş Bir Havza Modeli	20
Şekil 2.6	Kara-Kutu Yaklaşımı.....	22
Şekil 2.7	Nonlineer Bir Sistemin Fonksiyonel Temsili	27
Şekil 3.1	Havza Davranışında Modelin İşlevi	40
Şekil 5.1	Günlük Yağış, Akım ve Askı Maddesi Konsantrasyon Eğrileri.....	59
Şekil 5.2	Yağış-Askı Maddesi Kros- Korelogramları (0-90, 90-180 ve 0-180 Günlük Periyotlar İçin)	61
Şekil 5.3	Yağış-Askı Maddesi Kros- Korelogramları (0-120, 120-240 ve 0-240 Günlük Periyotlar İçin)	61
Şekil 5.4	Yağış-Akım Kros- Korelogramları (0-90, 90-180 ve 0-180 Günlük Periyotlar İçin)	63
Şekil 5.5	Akım-Askı Maddesi Kros- Korelogramları (0-90, 90-180 ve 0-180 Günlük Periyotlar İçin)	63
Şekil 5.6	Lineer Davranış Fonksiyonlarının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri, (180 Günlük Datalar İçin).....	76

Şekil 5.7	Lineer Davranış Fonksiyonlarının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri, (240 Günlük Datalar İçin).....	76
Şekil 5.8a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0-90, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	77
Şekil 5.8b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 90-180, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	78
Şekil 5.9a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90-180, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	79
Şekil 5.9b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0-90, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	80
Şekil 5.10a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0-120, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	81
Şekil 5.10b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 120-240, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	82
Şekil 5.11a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 120-240, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	83
Şekil 5.11b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0-120, Model Parametreleri: $l=8, n=2$).	84
Şekil 5.12a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0-90, Lineer Model: $m=10$).	86
Şekil 5.12b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 90-180, Lineer Model: $m=10$).	87
Şekil 5.13a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90-180, Lineer Model: $m=10$).	88
Şekil 5.13b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0-90, Lineer Model: $m=10$).	89
Şekil 5.14a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0-90, Model Parametreleri: $m=12$).	90
Şekil 5.14b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 90-180, Model Parametreleri: $m=12$).	90
Şekil 5.15a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90-180, Model Parametreleri: $m=12$).	91

Şekil 5.15b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0-90, Model Parametreleri: $m=12$).....	91
Şekil 5.16a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0-90, Model Parametreleri: $l=14, n=3$).	92
Şekil 5.16b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Test Periyodu: 90-180, Model Parametreleri: $l=14, n=3$).....	93
Şekil 5.17a	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90-180, Model Parametreleri: $l=14, n=3$).	94
Şekil 5.17b	Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Test Periyodu: 0-90, Model Parametreleri: $l=14, n=3$).....	95
Şekil 5.18	Akım Tahminlerinde Davranış Fonksiyonu Ordinatlmasının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri, (Tadil Edilmiş Model: $l=14, n=3$).....	96
Şekil A.1a	Optimizasyon Programına Ait Akış Şeması	114
Şekil A.1b	Tahmin Programına Ait Akış Şeması	117

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 Güncelleştirilmiş Etkin Yağışlar	54
Tablo 5.1 Uygulamalarda Esas Alınan Model Tipleri ve Kullanımı	65
Tablo 5.2 Askı Maddesi Tahminlerinde Kalibrasyon ve Test Periyotlarına Ait Modellerin Uygunluk Kriterleri, (180 Günlük Datalar İçin)	67
Tablo 5.3 Askı Maddesi Tahminlerinde Kalibrasyon ve Test Periyotlarına Ait Modellerin Uygunluk Kriterleri, (240 Günlük Datalar İçin)	68
Tablo 5.4 Kalibrasyon ve Test Periyotlarında Gerçek ve Tahmini Toplam Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri, (180 Günlük Datalar İçin)	69
Tablo 5.5 Kalibrasyon ve Test Periyotlarında Gerçek ve Tahmini Toplam Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri, (240 Günlük Datalar İçin)	70
Tablo 5.6 Akım Miktarları Tahmininde Kalibrasyon ve Test Periyotlarına Ait Modellerin Uygunluk Kriterleri, (180 Günlük Datalar İçin)	71
Tablo 5.7 Kalibrasyon ve Test Periyotlarında Gerçek ve Tahmini Toplam Akım Miktarları (180 Günlük Datalar İçin).....	72
Tablo 5.8 Davranış Fonksiyonu Ordinatlarının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri, (Tadil Edilmiş Model: $l=8$, $n= 2$)	74
Tablo 5.8 Davranış Fonksiyonu Ordinatlarının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri, (Tadil Edilmiş Model: $l=8$, $n= 2$)	75

ÖZET

Akarsu havzalarının yağışlara karşı davranışı sözel ve nitel olarak oldukça iyi anlaşılmış olsa da, bu davranışların kantitatif anlamda yeterince aydınlığa kavuşturulmuş olduğu söylenemez. Bu nedenle akarsu havzaları, kara-kutu yaklaşımıyla analize uygun sistemlere iyi bir örnek oluşturmaktadır. Bu da çeşitli tahmin problemlerinin çözümünde kolaylıklar sağlar. Belli bir periyottaki girdilerin, çıktıları etkilediği yani hafızalı bir nonlinear kara-kutu sisteminin davranışı, matematikte fonksiyonel dizi olarak bilinen integral denklemi ile yaklaşık olarak temsil edilebilmektedir. Bu çalışmada, hafızalı ve nonlinear bir sistem olarak havza ele alındığında, davranışı gözden geçirilmiş, lineer ve nonlinear bazı kara-kutu-sistem modelleri, özellikleri tartışılarak karşılaştırılmış ve akarsuların taşıdığı askı maddesi konsantrasyonunun veya askı maddesi yükünün haldeki ve etkin geçmişteki yağışlardan yararlanılarak tahmin edilebildiği nonlinear kara-kutu modelleri geliştirilmiştir.

İki boyutlu birim askı maddesi eğrisi adı verilen modeller, etkin yağışlar kullanmakta ve birim sediment eğrisi modellerinde olduğu gibi sadece şiddetli sağanaklarda değil bütün yağış şiddetlerinde geçerli olup havzanın davranışını bütün olarak temsil etmektedirler.

Orijinal hali ile model esasen bir fonksiyonel dizinin yalnızca ikinci teriminden ibaret olup havza davranışının lineer kabul edilebildiği hafıza bölümünde lineer, geri kalan bölümünde ise ikinci derece bir fonksiyonel kullanılmak suretiyle tadil edilmiştir. Daha yüksek dereceden modellerin güçlükleri dolayısıyla şimdiye kadar zaten, hep ikinci dereceden modeller kullanılmıştır. Fakat ikinci dereceden bir modelin uygun olduğu hakkındaki düşünceler de sadece uygulama sonuçlarına dayanmaktadır. Gerek orijinal gerekse tadil edilmiş modelde sistem davranış fonksiyonları birim etkin yağıştan meydana gelen askı madde debisinin zamansal dağılımını temsil etmektedirler. Bunlar bir ve iki boyutlu birim askı maddesi eğrisi olarak yorumlanan ve fiziksel bakımdan anlamlı olup havza davranışını temsil için gerek ve yeter sayıda fonksiyonlardır.

Yeni modellerin literatürden sağlanan datalar kullanılarak kapsamlı uygulamaları gerçekleştirilmiş, lineer ve ikinci dereceden fonksiyonel dizi modeller ve Williams'ın modelinin sonuçları ile bir karşılaştırması yapılmış ve sonuçta tadil edilerek geliştirilmiş modelin hepsinden daha iyi tahminler verdiği görülmüştür. Bu modelin daha iyi sonuçlar vermesinin sebebi, yeterince uyum kabiliyetine sahip ve daha az, ancak yeter sayıda davranış fonksiyonu ihtiva etmesidir. Dolayısıyla lineer bir model bileşeni ile temsil edilebilecek olan geçmişin, fonksiyonel dizi ve orijinal modelde olduğu gibi nonlinear modelle temsili gereksiz uyum kabiliyetini hasıl etmekte bu da tahminlerde olumsuz rol oynamaktadır.

SUMMARY

A NONLINEAR SYSTEM MODEL FOR PREDICTION OF SUSPENDED LOAD OF RIVERS.

INDRODUCTION

The prediction of river sediment load constitutes an important issue in hydraulic and sanitary engineering. It is a well-known fact that all reservoirs are designed to contain a volume known as "*the dead storage*" to accommodate the sediment income that will accumulate over a specified period. The underestimation of sediment yield results in insufficient reservoir capacities while the overestimation will lead to over-capacity reservoirs. Only the appropriate reservoir design is sufficient to justify every effort to determine sediment yield accurately but in sanitary engineering the prediction of river sediment load has an additional significance, especially if the particles transport pollutants. The real time distribution of the sediment concentration is needed in this case and the sediment concentration forecast is necessary for controlling the pollution level in rivers and reservoirs.

Classical approach of hydromechanics has not yet succeeded in modeling the complete process of sediment transport in rivers for reasons that particle movements in turbulent flow as well as the properties of the particles are all random. The properties of the riverbed are irregular and hence can also be considered as random. Moreover, all the processes affect each other such that the flow causes erosion and transportation of particles; the particles transported in turn affect the flow as well as the rate of erosion.

Inadequacy of the classical approach compelled engineers to search for practical ways for sediment prediction. Sediment rating curve which is assumed to define the relationship between the flow and sediment discharge for a given stream is used for prediction. The rating curves generally enables the designer to estimate roughly the mean monthly and mean annual sediment rates. Therefore, the relationship between the hydrographs and sediment graphs were investigated.

Methods were proposed for computing sediment graphs by Rendon Herrero [21,22] in 1974 and 1978, Renard and Laursen [23] in 1975, and Bruce and his colleagues [24] in 1975. However, all these models have received very limited testing and have same shortcomings. A more satisfactory sediment graph model was developed by Williams [25] in 1978. All these models are capable of determining only storm sediment graphs.

Müftüoğlu [29] developed non-linear discrete rainfall-suspended sediment concentration models in 1978 but was unable to test them due to lack of data and hence the models remained as blue prints since then. The objective of this thesis is to derive the continuous forms of these models and to refine the derivation of their discrete forms and then realize their comparative applications. A linear discharge - suspended load model is also proposed and tested.

CATCHMENT AS A SEDIMENT PRODUCING BLACK-BOX SYSTEM

During and after rainfalls and/or snowmelts, the water partly infiltrates and run downhill over the land, forming what is known as sheet flow. The water accumulating in rills and galleys reaching larger channels form the streams, which also runs temporarily or permanently. Sheet flows wash immense quantities of rock fragments and soil particles downslopes to the streams. Streams transport even larger quantities of sediment, for they scour additional material out of their valleys. The sediment moving in water in suspension, called suspended load, is composed of the particles washed away from catchment and the fine material scoured out of the channel network.

As mentioned in the introduction the irregularities of the properties of the catchment and randomness in its operation make it forbiddingly difficult to apply the classical hydromechanic analysis. Therefore, the black - box analysis is applied, as an investigation of the input-output relationship of the catchment system without reference to its inner properties and the physical laws governing its operation.

Since the sediment load at a certain time is produced by the effects of rainfalls of a finite past period the catchment is a causal system with a finite memory, and consequently its response can be analyzed by means of a functional equation, the input and the output of the system being the effective precipitation and the suspended sediment concentration.

Black-box approach is based on the following simplifications concerning the system, its input and output:

Since all its properties especially its erodibility vary in time, the catchment is a variable system. Nevertheless it is not practically possible to determine the variation laws and introduce them into the same model. Therefore, the system is assumed as a time-invariant system, at least in certain periods during which the variations are negligible.

Although the precipitation as well as the evaporation, and in consequence the effective precipitation is unevenly distributed over the catchment with random patterns the effective precipitation is usually taken as a single, evenly distributed input and hence represented by a single value input to the system. Such input is usually referred to as "*lumped*" input. The sediment concentration is also distributed unevenly over the gauging cross-section. However, it is also taken as a lumped output having the cross - sectional average of the concentration in the section.

The sheet and galley erosion is functions of the overland and galley flows that are functions of the precipitation occurring throughout the memory of the catchment. The erosion caused by the precipitation at any time is affected by the precipitation at any previous time, because the moisture state of the surface soil effects the erosion rate. The moisture state of the surface soil is the function of present and antecedent precipitation and hence catchment is a nonlinear system.

Since the overland flow is a function of the precipitation occurring in the late portion of the memory period the sheet erosion is confined in the late portion of the memory. The river - channel - erosion is however a function of stream flow which is a function of the precipitation occurring throughout the memory.

FUNCTIONAL SERIES AS A GENERAL SYSTEM MODEL

The output of a time-invariant continuous system with a finite memory, producing a single output from a single input series can, in general be related to the input by the following integral equation known as Volterra integral or functional series:

$$y(t) = \int_0^t h_1(t-s)x(s)ds + \int_0^t \int_0^t h_2(t-s_1, t-s_2)x(s_1)x(s_2)ds_1ds_2 + \int_0^t \int_0^t \int_0^t h_3(t-s_1, t-s_2, t-s_3)x(s_1)x(s_2)x(s_3)ds_1ds_2ds_3 + \dots \quad (1)$$

Where $y(t)$ is the output at time t ; $x(s_i)$ is the input value at time s_i and $h_n(t-s_1, \dots, t-s_n)$ is the n 'th order kernel function, the variable of integration s_i being a lag with respect to t .

Kernel functions ($h_1, h_2, h_3 \dots$) are expected to represent the overall behavior of the system under consideration. In other words, they represent the response of the system to the input and hence are usually referred to as the response (or influence) functions in systems engineering. A given set of simultaneous input and output records is used to determine the unknown response functions, without reference to the nature of the system and the physical laws that govern its operation.

If the input and output of system are given as discrete sets of observations taken at equally spaced intervals, the following form of digitized functional series is used:

$$y_m = \sum_{i=1}^m h_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m h_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=j}^m h_{i,j,k} x_i x_j x_k + \dots \quad (2)$$

where m is the number of intervals covered by the system memory.

The foregoing explanation clearly indicates that the functional series can be used as a black-box model to represent the erosive behavior of the catchment. Nevertheless no such application of the model has yet appeared in the literature. The application of the second order functional series as a rainfall - sediment yield model is carried out in this study.

An important weakness of the functional series is that the kernel functions cannot be assigned any physical meaning and remain merely as mathematical concepts. Since the black-box approach is not concerned with the physics of the system, the lack of physical meaning may be overlooked. The kernels can, however, take negative values, and this may cause grossly erroneous results; even negative sediment yield predictions may come out, although the yield can never be negative.

DERIVATION OF A NONLINEAR UNIT SEDIMENT GRAPH MODEL

Denoting the suspended sediment concentration at an instant t by $C(t)$, the intensity of the effective precipitation at an instant s_1 by $x(s_1)$, and the erosive response of the catchment to a unit volume of effective precipitation of an infinitesimally short duration by $h_1(t - s_1)$ the sediment concentration can be related to the effective precipitation occurring over the memory period as follows:

$$C(t) = \int_0^t h_1(t - s_1) x(s_1) ds_1 \quad (3)$$

This equation is the well-known convolution or superposition integral which is generally taken to represent the behavior of time-invariant linear systems. It is widely used in hydrology as the mathematical representation of the unit hydrograph model and $h_1(t - s_1)$ is known as the instantaneous unit hydrograph.

If the catchment were a linear system, eqn. 3 would be sufficient to represent the overall behavior of the catchment and $h_1(t - s_1)$ would be an invariant index of its response. However, the catchment is not a linear system, because the amount of sediment eroded by precipitation at any time does not depend only on the intensity of the rain at that time but also depends on the moisture state of the catchment. The moisture state is affected by interception, depression, detention and soil storage and hence determined by the antecedent precipitation occurring in the memory period of the catchment. The antecedent precipitation affects the process because the soil particles if moist enough can easily be detached from their places and carried by the overland flow towards the channel network, otherwise some early portion of the precipitation will moisten the soil and prepare the particles for detachment. The antecedent precipitation is defined as the precipitation occurring in the interval from time s to the beginning of the catchment memory.

Thus, denoting by $h_1^*(t - s_2)$, the influence function of the antecedent effective precipitation of a time s_2 on h_1 , the variation in $h_1(t - s_1)$ is expressed as:

$$\delta h_1(t-s_1) = h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2) x(s_2) ds_2 \quad (4)$$

Where $x(s_2)$ is the antecedent precipitation at the instant s_2 . The true value of $h_1(t-s_1)$ can now be obtained by integrating eqn. (4):

$$h_1(t-s_1) = \int_0^t h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2) x(s_2) ds_2 \quad (5)$$

Eqn. (3), therefore becomes:

$$C(t) = \int_0^t \int_0^t h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2) x(s_1) x(s_2) ds_1 ds_2 \quad (6)$$

Or, replacing $h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2)$ by $h(t-s_1, t-s_2)$, we obtain:

$$C(t) = \int_0^t \int_0^t h_2(t-s_1, t-s_2) x(s_1) x(s_2) ds_1 ds_2 \quad (7)$$

Properties of the model: (1) Like all black-box models it is not concerned with the physical laws governing the catchment operation, yet is based on the qualitative and overall description of the catchment behavior,

(2) It represents the overall behavior of the whole catchment whereas unit sediment graph models represent only the direct runoff subsystem,

(3) The response function of the model can be interpreted as a family of an infinite number of sediment concentration graphs, each representing the erosive response of the catchment to an instantaneous effective precipitation of unit volume, under the influence of instantaneous antecedent effective precipitation of unit volume. Accordingly it can be called “*two dimensional instantaneous unit sediment graph*”.

(4) The two-dimensional unit sediment graph, like the unit hydrograph, represents physically realizable responses, i.e. it is expected to take only positive values. This property can be used as a control criterion in response function determination, so as to guarantee physically realizable predictions.

Discrete form of the model: The derivation of discrete form of the model given below is also presented in the thesis.

$$C_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m h_{m-i, m-j} x_i x_j \quad (8)$$

The following alternative form of eqn. (8) is simpler and equally general for nonisolated rainfall records.

$$C_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{i,j} x_i x_j \quad (9)$$

The ordinates of the unit sediment graph and the precipitation data are numbered in the same direction in eqn. (9), while numbering is made in reverse order in eqn. (8).

Remarks on the discrete model: The set of coefficients $h_{m-i, m-j}$ called the “response” or “influence” function, can be interpreted as a family of sediment graphs each resulting from the unit effective precipitation in an interval under the influence of the unit effective precipitation in an antecedent interval. This is referred to as a “two-dimensional unit sediment graph”.

Williams’ model developed in 1978 is the following special form of the present model:

$$C_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^i h_{i,j} x_i x_j \quad (10)$$

such that it only takes a series of x^2 ’s into account. That is

$$y_i = \sum_{j=1}^i x_i^2 u_k \quad k = i+1-j \text{ ve } i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

MODIFICATION OF CONTINUOUS AND DISCRETE MODELS

Not a strong nonlinearity persists throughout the memory period since early rainfalls do not directly contribute to the sediment load of the river. Their effect is confined mostly to the creation of soil moisture. This delayed effect, therefore approaches to linearity as the rainfall - runoff relationship does [38,82].

Thus it will be reasonable to represent the delayed response of the catchment by the linear, and the immediate and moderately delayed responses by the second order functional as:

$$C(t_2) = \int_0^{t_1} h_1(t-s_1)x(s_1)ds_1 + \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} h_2(t-s_1, t-s_2)x(s_1)x(s_2)ds_1ds_2 \quad (12)$$

Where (0 - t_1) is the delayed response period which is the linear and (t_1 - t_2) is the immediate response period which is referred to as the nonlinear memory portions.

The response functions $h_1(t_1 - s_1)$ and $h_2(t - s_1, t - s_2)$ are respectively the instantaneous unit sediment graph and the two-dimensional unit sediment graph.

The discrete form of the modified model can be written, as follows:

$$C_m = \sum_{i=1}^l h_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{i,j} x_{i+l} x_{j+l} \quad (m = l + n) \quad (13)$$

Where l and n are the numbers of intervals in the linear and nonlinear parts of the memory, respectively; and h_i , $h_{i,j}$ are the ordinary finite-period unit sediment graph, and two dimensional finite - period unit sediment graph respectively.

Remarks on the Modified Form: The modified model forms are special second - order functional series. The difference between the two - dimensional unit sediment graph model and second - order functional series is important, though small in appearance. The former has a theoretical basis, and has physically realizable response functions, whereas the latter does not.

Furthermore, it has just sufficient degrees of freedom, and consequently is less open to influence by calibration data errors than the second order functional series which appears to be over - adaptable.

Finally, it is easier to calibrate, for it has fewer responses function ordinates in the nonlinear part because it covers only a small portion of the complete memory.

USE OF THE MODEL

The model in the above given form can only be used for data generation. Nevertheless, if there is a lag (L) between the effect in the final unit interval of the memory and the response, the model can then be applied as a predictor. In such a case, a symbol representing the prediction lead-time (L) must be introduced.

The models are applied repeatedly, for successive predictions or generations of sediment concentration, by shifting the time origin. Another parameter, c , to count for the shifts will be helpful in the applications. Thus, with these new parameters the model can be written as:

$$C_{m+L+c} = \sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} \quad (14)$$

MODEL CALIBRATION

This involves determination of the memory parameters and the response functions. The principles and methodology previously developed by Müftüoğlu [82], for these purposes are briefly presented below.

Determination of the memory parameters: As the suspended sediment load is produced by effective precipitation occurrences during the memory period, the cross - correlation between the sediment concentration and effective precipitation can be used in determining the memory parameters.

The erosion reaches high rates immediately after the precipitation initiation and gradually diminishes towards the end of the memory period. Thus the correlation

coefficient is expected first to increase to a maximum with increase of the lag, and then to decrease, initially rapidly and then slowly. Therefore, the peak of the correlogram and the steeper part of the recession indicate roughly the prediction lead-time and the nonlinear memory section, respectively. The first lag value at which cross - correlation coefficient becomes zero, corresponds to the total memory length approximately.

Determination of the response functions: Herein, the objective is to have a model capable of generating sediment concentration values from given effective precipitation data with minimum error expectancies. The response function ordinates, which fulfill this requirement, can be determined by minimizing the sum of squared errors:

$$E = \sum_{c=0}^{K-m-L} \left[C_{m+L+c} - \left(\sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} \right) \right]^2 \quad (15)$$

Where K is the number of observations used for calibration, c is the shift counter to facilitate the representation of successive operations and C_{m+c} is the (m+c)-th observed value of sediment concentration.

The values of h_i and $h_{i,j}$ minimizing the objective function, E, can be obtained by taking the partial derivatives of E with respect to them and setting equal to zero. Thus the following equations are obtained.

$$\begin{aligned} & \sum_{c=0}^{K-m-L} \left(\sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} x_{\alpha+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} x_{\alpha+c} \right) \\ &= \sum_{c=0}^{K-m-L} C_{m+L+c} x_{\alpha+c} \quad \text{ve } \alpha = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (16.a)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{c=0}^{K-m-L} \left(\sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} x_{\beta+l+c} x_{\phi+l+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} x_{\beta+l+c} x_{\phi+l+c} \right) \\ &= \sum_{c=0}^{K-m-L} C_{m+L+c} x_{\beta+l+c} x_{\phi+l+c} \quad \text{ve } \beta = 1, 2, 3, \dots, n \\ & \quad \phi = \beta + 1, \dots, n \end{aligned} \quad (16.b)$$

These equations are referred to as normal equations. They represent a set of linear equations, called regression equations, in the $1 + n(n+1)/2$ unknown response function ordinates.

The solution of the regression equations yields values of the unknown response function ordinates $h_i, h_{i,j}$.

Data necessary for calibration: The calibration data, should be a representative sample of all possible precipitation combinations with various intensities. Response functions determined over a short calibration period may represent only a transient state of the catchment response. Therefore, as long a calibration period as possible should be taken. Nevertheless, the homogeneity of the data is as important as the representativeness.

APPLICATIONS

About the data: The models and techniques outlined above were applied to the unidentified data directly obtained from the illustrations given by Brown and Choate [90]. It was not possible to obtain the evapotranspiration or other meteorological data, which would enable the computation of the effective precipitation. Thus it was necessary to use the precipitation data in its original raw state.

The data, consisting of 365 days measurements, was divided into two equal parts one of which to be used for model calibration and the other for verification. The preliminary applications urged turning attention to the homogeneity and the consistency of the data and a close examination revealed the fact that the data contained an inconsistent part and hence that part was taken out and the remaining data was used for the applications.

Memory and lead time determination: In order to determine the approximate memory length the cross - correlograms of the rainfall and sediment concentration data were used. The correlograms indicate that the catchment has a total memory of about 10 days for sediment transport.

The correlograms also indicate that the response to the precipitation occurs with one-day delay and hence the response can be predicted one day ahead. The end of steep decrease of the correlogram indicates that the nonlinear part of the memory is about 3 days.

Response function determination: The two - dimensional sediment graph model, its modified form, the classical linear convolution and second order functional series models and Williams' model with memories of 9, 10 and 11 days were applied. The modified two - dimensional sediment graph model was applied with the non- linear memory parts of 2, 3 and 4 days. The model in each case was first calibrated on the first part of the data and then tested on the subsequent period. This procedure was then repeated by reversing the calibration and verification periods.

The modified model was applied with three different combinations of linear and quadratic memory components in each of the 9, 10 and 11 days of total memory cases.

Evaluation of results: The comparison of the efficiency indices reveal that the best results are produced by the modified two-dimensional sediment graph model with $l = 8$ and $n = 2$. The sufficiency of 2 days as nonlinear memory indicates that nonlinear effects do not last significantly longer than 2 days in the catchment. In fact, the sheet

erosion, which is the basic and important cause of the suspended sediment load of the river, occurs mostly during the period of direct runoff. The indirect or delayed runoff which constitutes the base flow of the river can only contribute to the sediment load through scouring the bed and banks of the river channel.

All the efficiency indices indicate that the two dimensional sediment graph models produce the best results compared to the alternative models and this is interpreted as the verification of the theoretical considerations. The modified model proved better than the original two - dimensional model. This is because the modified model has less degrees of freedom which property makes it less adaptable and also less susceptible to be affected by the data errors. The same reasoning applies to the functional series too. The linear model proposed for estimating the suspended load from discharge also proved successful.

CONCLUDING REMARKS

A nonlinear functional model has been developed for predicting the suspended sediment concentration of rivers by using the current and antecedent effective precipitation events. It represents the overall behavior of the catchment and, hence, does not require separation of excess rainfall and direct runoff.

The applications indicate that the linear model is not sufficiently adaptable while the conventional second - order functional series is over - adaptable, and the best results are produced by the modified two - dimensional unit sediment graph model.

The observed rainfall data is used instead of effective rainfall data in the applications. It is expected that the use of effective precipitation, especially processed by the updating procedure, will improve the performance of the model.

The model can also be used for generating monthly sediment data whose utilization may be more practical in reservoir design.

Erosion changes the state of the catchment continuously. For instance, some parts may be eroded too much and the rocky formations are uncovered or a formation of different erosive character is uncovered. In such cases the model must be re-calibrated.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızlı artışı ile beraberinde gelen teknolojik gelişmeler ve yaşam düzeyinin yükselmesi, insanların suya ve besine olan ihtiyaçlarında sürekli ve hızlı bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum su ve toprak kaynaklarının bilinçli ve etkin biçimde kontrol altına alınarak, en verimli şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Bu zorunluluk her geçen gün biraz daha belirginleşmekte ve mevcut kaynakların geliştirilmeleri ile ilgili mühendislik çalışmaları gittikçe daha büyük önem kazanmaktadır.

Su kaynakları sistemlerinin planlanması, projelendirilmesi ve gerekli tesislerin inşa edilmesi ve işletilmesi safhalarında ulaşılabilecek başarı derecesi, imkan ve ihtiyaçlarla ilgili tahminlerin isabet derecesine bağlıdır. Su yapılarının projelenmesinde kullanılan teknikler ne kadar gelişmiş olursa olsun elde edilecek sonuç ancak kullanılacak tahminlerin isabet derecesi ile sınırlı olmaktadır [1, 2, 3].

Su ve toprak kaynakları arasında akarsuların ve akarsu havzalarının önemli yeri vardır. İçme ve kullanma suyunun, sulama ve endüstride kullanılan suyun önemli bir kısmı akarsulardan temin edilmektedir. Elektrik enerjisi üretimi için yine önemli bir enerji kaynağını akarsular oluşturmaktadır. Bunlardan başka, akarsuların üzerinde yapılacak bazı iyileştirmeler ve düzenlemelerle taşımacılık amacı için iç su yolları olarak kullanılmalarına birçok halde sağladıkları ekonomi bakımından büyük önem verilir. Diğer yandan akarsular, taşkınlar ve bunların sebep olduğu katı madde yığılmaları, kirlilik ve can kaybı gibi taşkın zararları dolayısıyla büyük önem arz ederler. Bütün bu haller için söz konusu kullanım alanlarına ait mühendislik problemlerinin çözümünde akarsuların taşıdığı katı maddelerin hayati önemi vardır. Bu sebeple, su mühendisinin su yapılarının ekonomisi, alınan suyun kalitesi ve akarsu düzenlemelerinde elde edilecek başarı bakımından katı madde tahminlerine

yeterince önem vermesi gerekmektedir. Aşağıdaki paragraflarda bu konu genel bir yaklaşım içerisinde ele alınmıştır.

1.1 Askı Maddesi Tahminleri

Akarsuların taşıdıkları katı maddeler, kısmen havzadan kısmen de akarsu yatağındaki aşınmalardan kaynaklanır. İklim şartları sebebi ile zemin tanelerinin bulundukları yerlerle bağları zayıflar. Yağmur damlaları, yüzeysel akışa geçen su ve rüzgarın enerjisi taneleri yerlerinden ayırır. Çözülmüş halde bulunan taneler yüzeysel akış halindeki su tarafından akarsu yatağına taşınır. Katı maddelerin akarsulara ulaşmasına kadar meydana gelen sürece havza veya tabaka erozyonu denilmektedir. Akarsu yatağındaki oyulmalar ise yatak erozyonu olarak adlandırılır. Havza ve yatak erozyonu sonunda suyla birlikte hareket eden katı maddeler, akımın sürüklenme gücünün azaldığı yatak bölgelerinde ve baraj haznelerinde tabana çökerek birikirler. Akarsu boyunca, yataklarda meydana gelen oyulma ve yığılmalar yatak şeklinin sürekli olarak değişmesine ve bunun istenmeyen birçok sonuçlarına yol açar. Kısaca, akarsuyun morfolojik yapısı değişir, akarsu üzerindeki yapılar fonksiyon ve emniyet bakımından, hatta estetik açıdan önemli zararlar görür ve akarsuyun su kalitesi etkilenir. Bu problemlerin çözümü için de katı madde tahminlerine ihtiyaç duyulur.

Özellikle baraj hazneleri gibi su depolama tesislerinde biriken katı maddeler hazne kapasitesini azaltır ve zamanla su alma ağzının tıkanmasına sebep olur. Hazne kapasitesinin azalması tesislerin ekonomik ömrünü kısaltır. Su alma yapısının tıkanması ise haznenin fonksiyon göremez duruma gelmesi demektir. Bu zararları önlemek daha doğrusu geciktirmek için baraj haznesinde ölü hacim denilen pasif bir hacim bırakılır ve su alma yapısı bu hacim üstünde kalacak şekilde yapılır. Bir barajın hizmet süresi yani faydalı ömrü bu hacmin büyüklüğüne bağlıdır. Ölü hacim gerekli olandan küçük ya da büyük olarak tayin edilirse baraj ekonomisi çok önemli şekilde etkilenir. Ayrıca, hazneye gelen katı maddeler sadece ölü hacimde değil, haznenin başka kısımlarında da birikeceği için barajın aktif depolama kapasitesinin gittikçe azalmasına ve belirli bir süreden sonra verimin, beklenen seviyesinin çok altına düşmesine neden olur. Bu sebeplerle, barajların ekonomik olarak projelendirilmesinde katı madde tür ve miktarının doğru olarak tahmin edilmesi

zorunludur. Buna ilaveten, su alma yapılarının tip ve yerlerinin seçiminde, su kuvveti tesislerinde ve taşımacılık ve taşkın kontrolü için akarsu düzenlemelerinde ortaya çıkabilecek aşınma ve yığılmaların belirlenmesi katı madde tahminlerini zorunlu kılmaktadır.

Her yıl tonlarca toprağın erozyon sonucu kaybolması bir başka deyişle akarsu depolama tesislerinde birikmesi veya denizlere taşınması, arazinin düzleşmesine, tarımsal alanların çoraklaşmasına ve toprağın veriminin azalmasına yol açar ki, bunlar da canlı hayatını tehdit eden hayati problemlerdir. Bu nedenle, bir havzadan veya belirli tarımsal alanlardan oluşması muhtemel toprak kayıplarının bilinmesi o havza veya bölgelerde alınacak önlemler için zorunludur. Havza ile ilgili erozyon kontrolü çalışmalarının planlanma ve işletilmesinde ise katı madde miktarlarının zamana göre dağılımını bilmek gerekir. Bu yönüyle de katı maddelerin tahmini, akarsu morfolojisinin değişimi ve su yapılarının ekonomisi kadar önemli sayılabilecek niteliktedir.

Katı madde problemi aynı zamanda su kalitesini etkileyici özelliğiyle sağlık açısından da büyük önem taşımaktadır. Çünkü, katı maddelerin kirlilik taşıyıcı bir yanı vardır. Kirilenmiş suların ekolojik dengeyi bozucu bir çok problemi beraberinde getirdiği bilinen bir gerçektir. Bu bakımdan, bir nehrin ya da rezervuardaki suyun kirlilik seviyesinin tahmininde yine askı maddesi dağılımının başka bir ifade ile askı maddesi konsantrasyonunun gerçek zamandaki değişimine ihtiyaç vardır. Son yıllarda su kalitesi modellerinin geliştirilmeye çalışılması ile bu ihtiyacın önemi daha da artmıştır. Akarsuların taşıdığı katı madde miktarının gerçek zamandaki tahmini yolunda yapılacak gelişmeler bu problemlerin çözümüne katkı sağlayacaktır.

1.2 Mevcut Tahmin Yöntemleri

Akarsularda üniform ve permenan olmayan, değişken bir akım vardır. Katı madde problemlerinde akım belirsizliklerine ilaveten katı madde özellik ve miktarları ile ilgili belirsizliklerle de karşılaşmaktadır. Bu ek belirsizlikler katı madde tahminlerine, akım tahmin problemlerinden daha karmaşık bir nitelik vermektedir. Birbiriyle ilişkili bu belirsizliklerin hepsinin bir arada düşünülmesi gereği ve sınır

şartlarının karmaşıklığı katı madde probleminin modellenmesini son derece zorlaştırmaktadır.

Akım ortamı içinde türbülanslı akımla ilgili hareket prensiplerinin hakim oluşu ve hareket halindeki katı maddelerin de akım özelliklerini etkileyici bir faktör oluşu düşünülürse katı madde hareketlerinin ne kadar karmaşık süreçler içerdiği anlaşılır. Bu hidrodinamik olaylar ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış [4 - 11]; fakat tabanı hareketli taneli malzemelerden oluşan bir kanaldaki üniform ve permenan akımların iki boyutlu incelenmesi bile kesin sonuçlar veren metotlara kavuşturulamamıştır. Oysa, katı madde miktarı yalnızca akım şartlarına bağlı olarak değişmemektedir. Havza özellikleri ve yatak morfolojisinin değişimi de hareket halindeki katı madde miktarını etkileyen hatta belirleyen faktörlerdir. Bu sebeplerden dolayı, katı madde hareketleri ile ilgili hesap metotları çok kaba sonuçlar vermektedir.

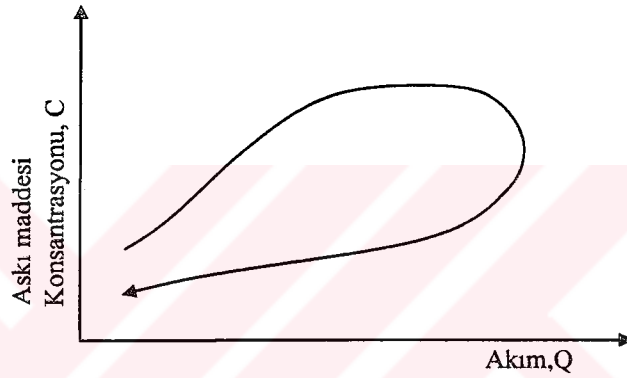
Katı maddelerle ilgili en doğru bilgiler ölçmelerle elde edilmektedir. Fakat, ölçmelerin hem zaman alıcı hem de zor ve masraflı oluşu sebebiyle katı maddeler çok az ölçülebilmektedir. Ayrıca ölçmelerle elde edilen kısa süreli dataların uzatılması için bir hesap metodunun kullanılması zorunlu olmaktadır. Bu durum, ölçme hataları da göz önüne alınırsa, ölçümlere dayanılarak tayin edilecek katı madde miktarlarına da fazla güvenmemek gerektiğini ortaya çıkarmaktadır.

Mekanik prensiplerini esas olarak geliştirilen teorilerin yetersizliği, katı madde tahminlerinde araştırmacıları ve mühendisleri pratik yollar da aramaya yöneltmiş ve tahminlerde söz konusu faktörlerin etkilerinin toptan yansıtıldığı bir değişken ile katı madde debisi arasında bir ilişkinin var olup olmadığının belirlenmesine çalışılmıştır. Böyle bir değişken olarak da akımın dikkate alınabileceği düşünülmüş, akarsuyun herhangi bir kontrol kesitindeki debisi ile katı madde değişimi arasındaki ilişkinin bir grafikte gösterilmesi genel bir uygulama halini almıştır "*Katı madde anahtar eğrisi*" adı verilen bu grafikler genellikle,

$$C = \alpha Q^{\beta} \quad (1.1)$$

şeklindeki bir fonksiyonel ilişkiyi ifade ederler. Burada Q, akımı, C askı maddesi konsantrasyonunu göstermektedir. α ve β ise akım karakteristiği ile ilgili

katsayılarıdır. Katı madde tahminlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan bu eğriler ile sadece, ortalama aylık ya da yıllık katı madde miktarlarının tahmini yapılabilmektedir. Ancak, bu tahminlerin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmalarında, %50 - %100'e varan hatta daha büyük oranlarda hatalar içerdikleri görülmüştür [12-16]. Bununla birlikte anahtar eğrilerinden faydalanılarak yapılan tahminler rezervuar planlamasında kullanılageldiğinden, başarı derecelerini değerlendirmek için henüz yeterli bir zamanın geçmemiş olması sebebiyle de başarısızlıklarının açık olarak ortaya çıkmadığı söylenebilir.



Şekil 1.1 C-Q İlişkilerinde Doğrusal Olmayan Bir Değişim (Örnek Durum).

C-Q ilişkisini inceleyen geniş bir çalışmada [17], burada tek tip bir ilişkinin olmadığı açık olarak anlatılmıştır. Bazı akarsularda C-Q ilişkisinin, örneğin, iki kollu bir değişim izlediği yani askı madde değişiminin bir histerezis eğri oluşturduğu görülmüştür, ki bu durumda, akımın yükselen seviyesindeki askı maddesi miktarı, aynı akım için düşme seviyesindeki askı maddesi miktarından oldukça fazla olabilmektedir (Şekil 1.1). Bu hallerde ise anahtar eğrileri yetersiz kalmaktadır. Çünkü katı maddelerin büyük bir kısmını akarsuyun havzasından taşıdığı yıkanmış maddeler oluşturduğu için askı maddesi debisi ile akım arasında her zaman doğrusal bir ilişkiden veya bire-bir bir ilişkiden söz etmek mümkün olmamaktadır. Akarsuyun herhangi bir zamanda taşıdığı katı madde debisi sadece o andaki şartların değil, etkili hidrolojik değişkenlerin (buharlaşma, akım gibi) gecikmiş etkilerini de taşır. Bu gecikmiş etkiler ise anahtar eğrilerinde tahminlere yansımamaktadır. Halbuki

gerçekçi bir tahmin için bunların mutlaka dikkate alınması gereklidir. Söz gelişi; debiye bağlı olarak askı madde debisi tahmin edilecekse en azından geçmiş debilerin de dikkate alınması bir çözüm olarak düşünülebilir.

Askı maddesi tahminlerinde, yıkanmış malzeme miktarının hesabı için geliştirilmiş “*toprak kaybı denklemleri*” olarak bilinen denklemler de kullanılmaktadır. Birim alandan oluşabilecek toprak kaybının tahmin edilmesinde kullanılan bu denklemler esas itibari ile havzanın erozyonla ilgili özelliklerini temsil eden “*faktörler*” içeren parametrik modellerdir. Bunlar içerisinde en genel kullanılan Universal Toprak Kaybı, USLE, denklemdir. 1930’larda başlayan bir çalışma ile geliştirilmiş olan bu denklemin MUSLE adı altında tadil edilmiş şekilleri de vardır. Aslında bu denklem,

$$E = R.K.L.S.C.P \quad (1.2)$$

biçiminde basit bir ifade olup yağmur erozyon indeksi (R), toprağın erozyona müsaitlik faktörü (K), eğim uzunluğu faktörü (L), eğim faktörü (S), arazi kullanım faktörü (C) ve erozyon tedbirleri ya da toprak muhafaza faktörü (P) olmak üzere altı faktörün çarpımından ibaret bir modeldir [18, 19]. Fakat, parametrelerin tayini için gerekli dataların belirlenmesindeki güçlükler bu denklemlerin uygulamasını kısıtlamaktadır.

Bu yöntemlerin yetersizlikleri karşısında yeni çözüm arayışları devam etmiştir. Biriktirme ve su alma yapılarının daha iyi tasarımılandırılmaları ve işletilmelerinin daha başarılı yapılması için daha isabetli tahminler gerekirken hazne ve akarsularda kirlilik kontrolü için sağlıklı gerçek zaman tahminlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Akım sırasındaki dinamik kirlenme seviyesinin belirlenmesinde mevcut yaklaşımlarla elde edilen tahminler yetersiz kalmaktadırlar. Çünkü bunlar sadece ortalama değerlerin belirlenmesi ile çözülecek problemler değildir. Bu problemlerin çözümü için mutlaka askı maddesinin zamansal dağılımının bilinmesine ihtiyaç vardır. Ancak, bu ihtiyacı karşılamak amacıyla yapılan araştırmaların sayı ve nitelik bakımından tatminkar olduğu söylenemez. Bu çalışmalar aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

İlk olarak, 1940'lı yılların başında Johnson [20] tarafından, belli havzalar için hidrograf ile katı madde eğrisi arasında bir ilişkinin mevcut olduğu ileri sürülmüştür. Johnson'un çalışmasına ve askı maddesi konsantrasyonu için teklif ettiği birim grafik metodunun pratik uygulamasına bağlı olarak Einstein (aynı çalışma içinde), "*bu metodun, küçük ve uniform özellikli havzalara sahip akarsular için uygulamasının iyi sonuçlar vermiş*" olduğunu ifade etmiştir.

Daha sonraları, Rendon-Herrero [21, 22], Renard ve Laursen [23] ve Buruce ve arkadaşları [24] tarafından, askı madde eğrilerinin tahmini için önemli sayılabilecek nitelikte metotlar teklif edilmiştir. Ancak bu yöntemler çok az test edilmiştirler ve bazı eksikliklere sahiptirler. Bunlardan daha kapsamlı ve başarılı sayılabilecek bir askı maddesi eğrisi modelini 1978'de Williams [25] geliştirmiştir. Williams'ın "*birim katı madde eğrisi*" modelinde, esas itibarı ile askı maddesi konsantrasyonunun artık yağışın karesinin lineer bir fonksiyonu olduğu kabulü yapılmıştır. Bu model, birim hidrografa dayanmakta dolayısıyla da taban akımının ayrılmasını gerektirdiğinden sadece taşkınlar sırasındaki katı madde eğrilerinin tahmininde kullanılabilmektedir.

Sing ve arkadaşları [26], Williams'ın modelini Mississippi de yaklaşık 4 km²'lik küçük bir alana sahip Pigeon Roost havzasına uygulamışlar ve "*boyutsuz birim askı madde eğrileri*" ve birim hidrograflar geliştirerek bunların bir karşılaştırmasını yapmışlardır.

Bu alanda Kumar ve Rastogi [27] ve Das [28]' in çalışmaları önem arz etmektedir. Esas itibarı ile kavramsal nitelikli olan Kumar ve Das'ın modellerinde katı madde debisi lineer bir bağıntı şeklinde ifade edilmiş ve süreklilik ve biriktirme denklemleri kullanılmıştır. Ancak diğer yaklaşımlara göre zaman ve uzay içerisinde fiziksel çevrenin dinamik olarak dikkate alınmadığı bu modeller de taşkın sürelerinde kullanılmaya elverişlidir.

Bunların yanında önem arz eden bir çalışma da Müftüoğlu [29] tarafından, 1978'de yapılmış ve yağış ile askı maddesi konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi temsil eden nonlineer bir model geliştirilmiştir. Fakat bu model, data yokluğu sebebiyle test edilememiştir.

1.3 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Yukarıda öneminin ortaya konulmaya çalışıldığı askı maddesi tahminlerinde tatmin edici sonuçların elde edilmesi için farklı yaklaşımlarla bir takım çözümler aranmış olmasına rağmen, özellikle yakın geleceğe ait gerçek zaman tahminleri konusunun yeterli şekilde incelenmemiş olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, askı maddesi tahminleri için Müftüoğlu tarafından 1978 senesinde ileri sürülmüş olduğu halde uygulaması gerçekleştirilemeyen kesikli, nonlineer kara-kutu modelinin integral formu geliştirilmiş, kapsamlı bir uygulaması gerçekleştirilmiş ve sonuçları alışılmış bir fonksiyonel dizi ve Williams'ın modeli ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, akarsuların taşıdığı katı maddeler hakkındaki genel bilgiler, alışılmış tahmin yöntemleri ve askı maddesi eğrisi modelleri özetlenmiş ve bunların genel anlamda bir değerlendirmesi yapılmıştır.

Üçüncü bölümde, iki boyutlu bir birim askı maddesi modelinin sürekli ve kesikli formlarının geliştirilmesi sunulmuş ve özellikleri tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde, model kalibrasyonu için geliştirilen denklemler verilmiştir.

Beşinci bölümde, modellerin uygulamaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar mukayeseli olarak değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde, sonuçlar özetlenmiştir.

BÖLÜM 2

ASKI MADDESİ DEBİSİ TAHMİNİ İÇİN KARA - KUTU YAKLAŞIMI İLE HAVZA ANALİZİ

2.1 Havza ve Davranışı

Bir akarsuyun sularının toplandığı yüzey o akarsuyun havzası olarak tanımlanır ve havzanın, arazinin en yüksek noktalarını birleştiren bir su ayırım çizgisi ile sınırlı olduğu kabul edilir. Bu kabul yüzeysel akış bakımından doğru ise de, yeraltı akışı için her zaman doğru olmayabilir. Havzanın suları yeraltı su akımları yoluyla bir başka akarsuyu besleyebilir veya akarsu kısmen komşu havzaların yeraltı suları ile beslenebilir. Başka bir deyişle, havzanın bazı kısımlarında yeraltı suyu ile beslenme bölgesi, yüzeysel akış ile beslenme bölgesinden farklı olabilir [30, 31]. Ancak bir havzada yeraltına sızan suların katı madde debisi yönünden etkileri çoğunlukla ihmal edilebilecek değerlerde olduğundan bu farklılık da çok önemli değildir.

Havzanın, yağışı akıma dönüştürmesi ve yağış ve akım etkileri ile katı maddeler üretmesi olaylarını; havzanın topoğrafik ve jeolojik yapısı (büyüklük, biçim, eğim, akarsu ağının şekli, yüzeysel ve yüzey-altı zeminin özellikleri gibi), coğrafi yapısı (yerleşim durumu, arazi kullanımı, bitki örtüsü gibi), toprak nem durumu ve iklim faktörleri (sıcaklık, rüzgar, atmosfer basıncı, radyasyon gibi) belirler. Ayrıca havza davranışında, yağışların şiddet ve süreleri ile doğurdukları akımların miktar, şekil, süre ve zamana bağlı yerel dağılımları gibi yağış ve akış karakteristiklerinin önemli etkileri vardır [32].

Yukarıda sıralanan değişkenlerin çoğu birbirleriyle bağımlıdırlar. Bunların kantitatif bir değerlendirilmesini yapmak oldukça zordur. Oysa, USLE ve MUSLE gibi yöntemlerle nümerik tahminler yapmak için bu karakteristikleri temsil eden sayısal büyüklükler kullanmak gerekir. Gerçi kara-kutu yaklaşımında havzanın

fiziksel karakteristiklerini ve erozyona etkilerini temsile ihtiyaç yoktur. Ama yine de, modellemede hangi faktörlerin nasıl hesaba katıldığını bilmek ve modeli başarıyla kullanabilmek için erozyon ve askı maddesi taşınımı ile, havzanın davranışını kısaca incelemekte fayda vardır.

2.1.1 Akarsu Havzalarında Erozyon ve Katı Madde Taşınımı

Katı tanelerin yerkabuğundan sökülmesi olayı olarak tanımlanan erozyon [6], fiziksel anlamda bir “aşınma” ve “aşındırma” sürecinin fonksiyonudur. Erozyonu, yüzey (tabaka) erozyonu ve kanal (yatak) erozyonu olmak üzere iki kısma ayırmak mümkündür. Aşağıdaki paragraflarda anlaşılabileceği üzere yüzey erozyonu, çoğunluğu havzadan gelen “yıkılmış malzemenin” kanal erozyonu ise “yatak malzemesinin” kaynağını oluşturur.

Yüzey erozyonu yağmur damlalarının yere düşmesiyle başlar. Damlalar, sahip oldukları enerjinin doğurduğu çarpma sonucu toprak taneciklerini yerlerinden koparır veya küçük toprak parçacıklarını zerrelelere ayırır. Zeminin gevşemesine ve tanelerin yerlerinden sökülmesine sebep olan bir diğer etken de yüzeysel akışa geçen suyun enerjisidir. Damla çarpması ve yüzeysel akış etkisiyle harekete hazır hale gelen (çözülmüş) taneler, yüzeysel akış halindeki su ile birlikte taşınır ve kanalcıklarda akan su arttıkça daha büyük kanalları oluşturarak katı maddeleri taşımaya devam eder. Ayrıca yüzey akışı alanlarından gelen ve kanallarda akan su eğime, derinliğe ve hıza bağlı olarak tedricen artan bir aşındırıcı güce de sahip olacaktır. Bu katılım süreçleri sonucu ana akarsu yataklarında veya bir kolunda toplanan sular, havzadan gelen katı maddelerin taşınması için gerekli güçten daha fazlasına sahip oldukları zaman yatak erozyonu başlar. Hareketli bir tabanı oluşturan malzemelerin bulunduğu yataklardaki akım hem tabanda hem de kıyılarda önemli aşınmalara ve bu aşınmalar da o bölgede bir takım oyulmaların oluşmasına sebep olur. Akarsu yatağından sökülerek taşınan malzemeler havzadan gelenlerle birleşince akarsu katı madde yükü önemli miktarlarda artar ve akarsudaki akımın sürüklenme gücünün azaldığı bölgelerde kısmen geçici veya kalıcı olarak yığılır, akarsu üzerindeki mevcut su yapılarının arkasında birikir ve kısmen de olsa akarsu boyunca denizlere kadar devam eder.

Akarsuların taşıdığı katı maddeler, malzemenin kaynağına (ya da iriliğine) ve akarsudaki taşınma şekline göre iki şekilde sınıflandırılabilir.

1) Malzemenin kaynağına göre sınıflandırma:

- a) Yatak malzemesi,
- b) Yıkanmış malzeme.

Yıkanmış malzeme, çoğunluğu havza erozyonundan gelen ve yatak malzemesinden daha ince olan malzemedir. Yatak malzemesi ise yatak erozyonu sonucu harekete geçen maddelerdir. Bu sınıflandırma kavramsal bir sınıflandırma olup havzadan veya yataktan gelen maddeleri ayıran sınırın tam olarak belirlenmesi imkansızdır. Genellikle, akarsularda taşınan katı maddelerin % 90 - 95' ini yıkanmış malzemeler oluşturur. Literatürlerde [21, 22], yıkanmış malzeme yerine “washload” yatak malzemesi yerine de “bedload” terimleri kullanılmaktadır.

2) Akarsulardaki taşınma şekline göre sınıflandırma:

- a) Askı maddesi,
- b) Sürüntü maddesi.

Askı maddesi suyun içinde askı halinde (tabana değmeden) hareket eden maddelerdir. Sürüntü maddesi ise akarsu yatağında yuvarlanarak, kayarak veya sıçrayarak hareket eden maddelerdir.

Askı maddesi daha ince taneli malzeme olmakla birlikte bunu sürüntü maddesinden ayıran kesin ve genel bir sınır yoktur. Çünkü katı madde hareketi sadece tane büyüklüğüne değil akım şartlarına da bağlıdır. Sürüntü hareketi yapan bir tane şartlar değişince askı haline geçebilir, duruma göre bunun tersi de mümkündür. Gerek askı gerekse sürüntü hareketleri hidrolik açıdan etraflıca incelenmiş [5 - 9] ve bu ayırım için bir takım bağıntılar geliştirilmiştir.

Katı madde hareketinin incelenmesinde taşınma şekillerine göre yapılan sınıflandırma daha çok kullanılır. Diğerinde olduğu gibi bu sınıflandırmada da, sınıflandırmaya giren maddelerin toplamına, “toplam katı madde” denir. Yapılan tanımlardan da anlaşılacağı gibi, askı maddesi, havza ve yatak erozyonu sonucu meydana gelen yıkanmış malzeme ve yatak malzemesinden oluşur.

2.1.1.1 Askı Maddesi Taşınımına Etki Eden Faktörler

Bir akarsuyun taşıdığı askı maddelerinin havza ve yatak erozyonundan kaynaklandığı belirtilmişti. Rüzgar da bir erozyon sebebi olmakla birlikte burada, havza erozyonu deyimi ile sadece yağış erozyonu kastedilecektir. Yağış erozyonunu belirleyen faktörler de yağış ve yağış anında erozyona müsaitlik, yağışın şiddeti, damla büyüklüğü, damlaların havzadaki dağılımı ve yerle yaptıkları açıdır.

Aşınabilirlik veya erosivite olarak da ifade edebileceğimiz erozyona müsaitlik, arazinin topoğrafik özellikleri ile toprak niteliklerine ve bitki örtüsüne bağlıdır. Toprağın nemlilik durumu, sıcaklık, donma ve çözülme gibi şartlar tanelerin yağış öncesi ve yağış anındaki erozyona müsaitlik derecesini belirleyen faktörlerdir. Bu faktörlerin birçoğu, yatakta toplanacak akım miktarını da tayin ettiğine göre yatak erozyonunu da etkilemektedir. Yatak erozyonunun, yatak morfolojisi ve yatak malzemesinin özellikleri ile doğrudan ilişkin olduğu da açıktır.

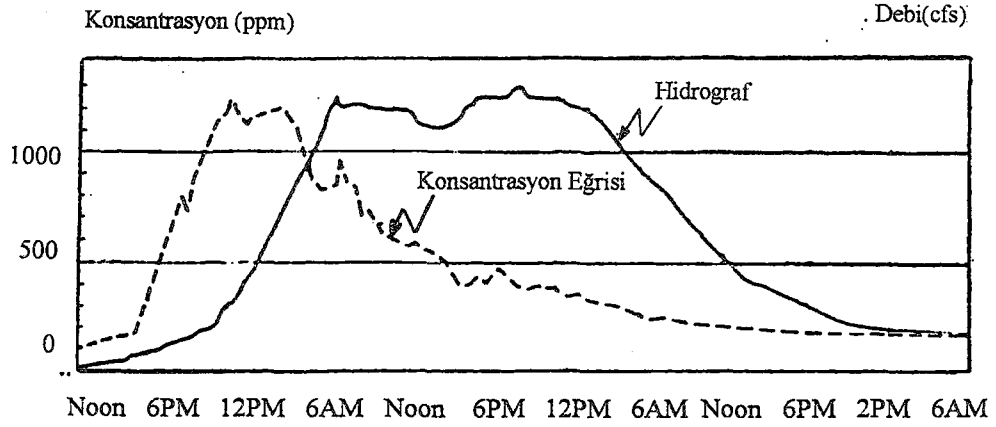
Erozyonda etkili olan bu faktörlerin ölçümleri ve ölçümlerin değerlendirilmesi fevkalade zor olup bazı faktörler akademik çalışmalar [33 - 36] için ölçülmekte ise de genelde ölçülen değer sadece yağış şiddetidir.

2.1.1.2 Akarsularda Askı Maddesi Konsantrasyonunun Zamanla Değişimi

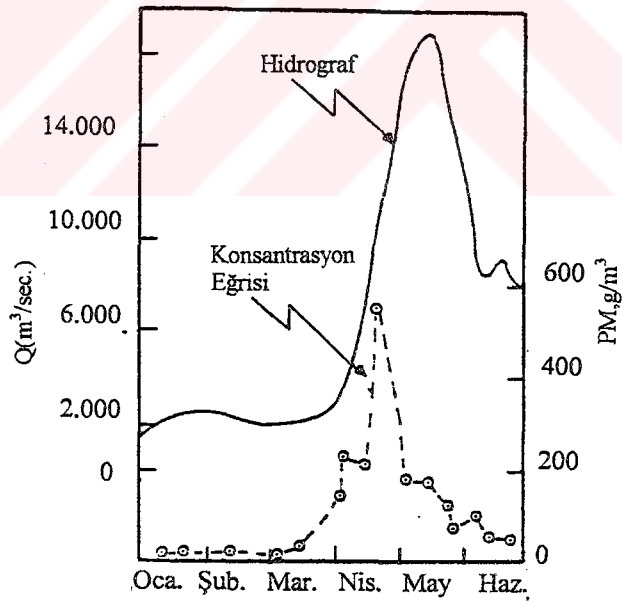
Askı maddesi konsantrasyonu, su içindeki askı maddesi miktarının su ve askı maddesi toplamına oranı olarak bilinir. Bir akarsudaki debi ile askı maddesi miktarının genellikle hem-zaman olarak artıp azalmadığı bir çok araştırmacının gözlemlerinden anlaşılmış bir husustur. Özetle bu olay, havzanın davranışına ve akım ile erozyonda etkili olan şartlara bağlı olarak değişmektedir. Bu konuda bazı örnekler vererek açıklama yapmak aydınlatıcı olacaktır.

Şekil 2.1a ve b' de sırasıyla Enoree akarsuyu için iki gün, Volga Nehrinde ise altı ay süre ile gözlenmiş bulunan eğriler verilmiştir [8]. Bu Şekiller incelendiğinde, askı maddesi konsantrasyon eğrisinin akım hidrografları ile iyi bir benzerlik arz ettiği, ancak pik değerlerinin taşkın piklerinden daha önce meydana geldiği görülmektedir. Bunun yanında konsantrasyon eğrisinin alçalma kanadının, hidrografa göre daha düşük eğimli olduğu izlenmektedir. Şekil 2.2a ve b olarak

verilen, Amerika'da Pigeon Roost akarsuyunun iki ayrı sağıanaktan meydana gelmiş olan hidrografları ile askı maddesi konsantrasyon eğrileri de konuya iyi bir örnek teşkil etmektedir, [29]. Bu eğriler de debi ile askı maddesi konsantrasyon değişimi arasında yukarıdaki izlenimleri destekler görünümündedir.



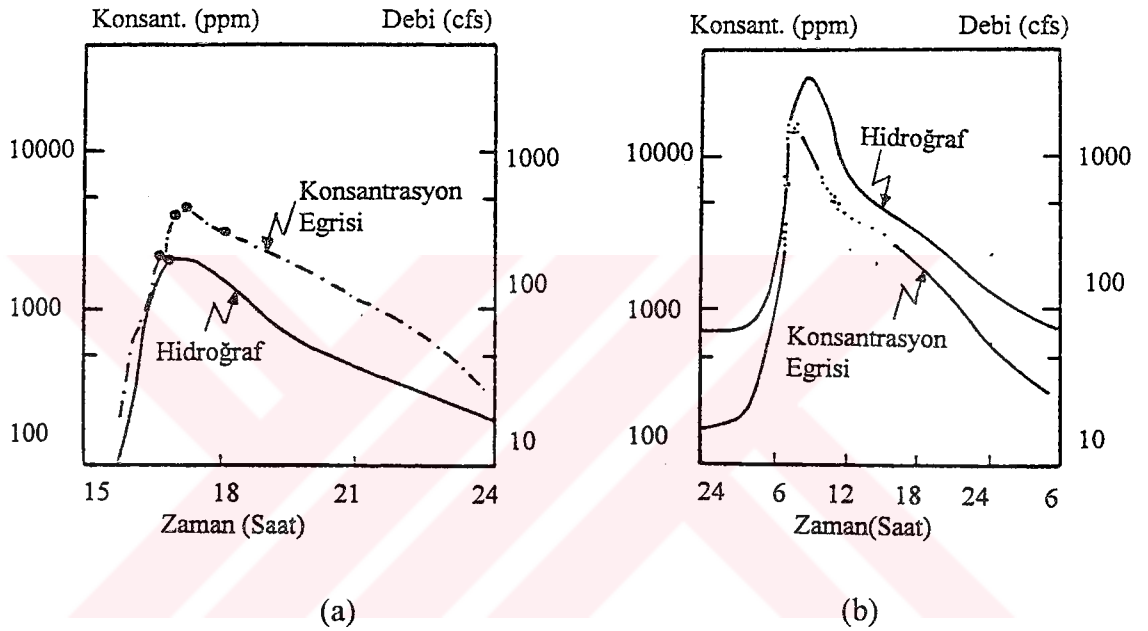
(a)



(b)

Şekil 2.1 Askı Maddesi Konsantrasyon Değişimi ve Taşkın Hidrografı:
(a) Enoree Nehri için. (b) Volga Nehri için [8].

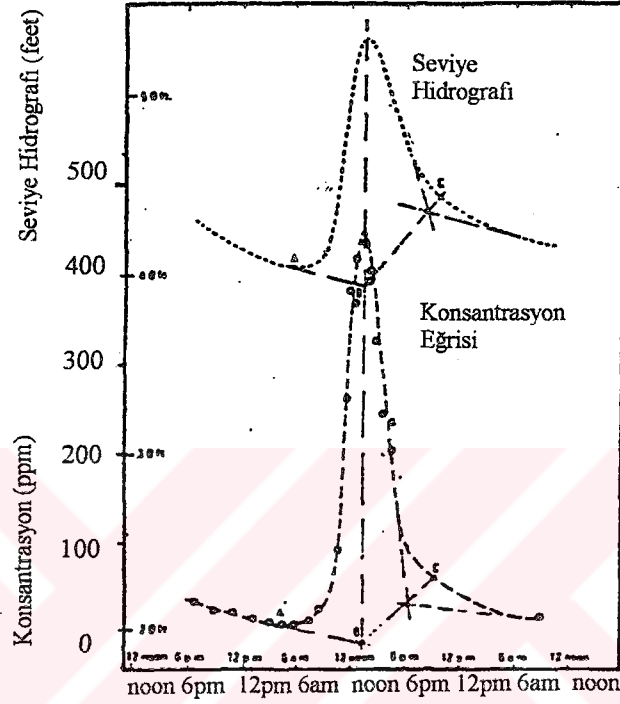
Söz konusu eğrilerin karşılaştırılması sonunda, askı maddesi konsantrasyon eğrisi ile hafif bir sağanağın hidrografi arasında oldukça iyi bir paralelliğin gözlemlendiği buna karşılık şiddetli bir sağanağa ait hidrograf ile konsantrasyon eğrisinde bu paralelliğin az da olsa bozulduğu söylenebilir. Ayrıca Şekil 2.2a da pik değerleri aynı zamana rastlamış iken 2.2b de bu pik değerler arasında yaklaşık iki saatlik bir gecikmenin olduğu görülmektedir. Şekil 2.1 dikkate alınır, yağış şiddetinin eğriler arasında faz farkı doğuran bir faktör olduğu düşünülebilir.



Şekil 2.2 Pigeon Roost Akarsu Havzasına Ait Askı Maddesi Konsantrasyonunun Değişimi ve Hidrograf: (a) 3 Ekim 1957 Hafif Şiddetli Sağanağın Ardından. (b) 18 Şubat 1961 Şiddetli Sağanağın Ardından [29].

Şekil 2.3 de gösterilen Bixler Run havzasına ait eğriler ise tam bir paralellik sergilemektedir [21]. Bu havza için yapılmış çalışmada başka eğri takımları da analiz edilmiş ve pikler arasında önemli sayılabilecek nitelikte paralelliklerin bulunduğu belirtilmiştir. Benzer değişimleri küçük ve homojen karakterli bir çok havzada görmek mümkündür. Söz gelişi, Kolor ve arkadaşının verdikleri Blina havzası ile ilgili eğriler ve bunlar arasındaki benzerlik de dikkat çekicidir. Bu

havzaya ait yaklaşık 40-50 gün boyunca gözlenmiş, bir ya da iki gün ara ile yağan yağmurlar ve kar erimesi sürecinde ölçülmüş değerler, ardarda gelen yağışların taşıdığı malzemelerin yavaşça azaldığını göstermektedir [37].



Şekil 2.3 Bixler Run Havzasına Ait 13 Mart 1963 Sağanaklı Sonrası Hidrograf ve Katı Madde Eğrisi [21].

Zemin yüzeyinin sürekli olarak sıcaklık değişimlerine uğraması, yağışlarla ıslanması ve tekrar kuruması, taneler arası kohezyonu azaltır, rüzgarlarda bazı tanelerin yerlerinden oynamasına, bazılarının da kopmasına sebep olur. Zeminin gevşemesinde ve bir kısım tanelerin erozyona hazır hale gelmesinde, toprağın buz tutmasının ve buzun çözülmesinin de önemli etkisi vardır. Uzun süre bu çeşit iklim etkilerinin geliştiği bir havzada, sonuçta yağacak bir yağmurun ilk zamanlarda meydana getireceği yüzeysel akış, taşınmaya hazır konumdaki malzemeyi alıp götürecek ve daha sonraları gelen suların, taşınmaya hazır bulacağı malzemede giderek azalacaktır. Bu bakımdan Şekil 2.1 ve 2.2b. de görülen eğrilerde askı maddesi pik değerlerinin hidrograf piklerinden önce gelmesine söz konusu olayların

sebebi olduğu söylenebilir. Nitekim ilgili çalışmalarda da [29, 37], pik değerler arasında görülen bu gecikmelerin sebebi yine bu türden olaylara bağlanmaktadır.

Yukarıda anlatılanlar, aynı zamanda askı maddesi anahtar eğrilerinin neden sıhhatli sonuçlar vermediğini de açıklayıcı niteliktedir. Giriş bölümünde bahsedildiği gibi anahtar eğrisinde bir debi değerine karşılık bir askı maddesi konsantrasyon değeri belirlenebilmekte iken örneğin, Şekil 2.1b. incelendiğinde bir debi değerine karşı birbirinden farklı iki konsantrasyon değerinin olduğu görülmektedir. Halbuki anahtar eğrisinde bu gecikmeler tahminlere yansımamaktadır. Söz konusu gecikmiş etkileri veya önceki değişimlerini dikkate alacak bir tahmin yönteminin daha güvenilir sonuçlar vereceği umulmaktadır ki, bu konuda akla gelen bir tahmin yöntemi ve uygulama sonuçları çalışmanın ilerleyen bölümlerinde sunulmuştur.

2.1.2 Havza Davranışının Nonlineerliği

Havzanın yağışlara karşı nonlineer bir davranış gösterdiğinde şüphe yoktur. Gözlemlerin değerlendirilmesi ve laboratuvar çalışmalarından anlaşıldığı üzere bu nonlineerliğin bazen oldukça önemli olabildiği, fakat bazen de lineerliğe yaklaştığı ortaya çıkmıştır. Havza davranışındaki bu nonlineerliğe, herhangi bir andaki yağışa karşı havza davranışının, önceki yağışların bir başka ifade ile yağış öncesi havza şartlarının etkisi altında olması sebebiyet vermektedir.

Amorocho tarafından havza lineerliğinin bir gösterge ile ölçülmesi düşünülmüş ve bu amaçla oluşturulan bir laboratuvar havzasında deneyler yapılmıştır [38, 39]. Bu deney havzasında, sabit şiddetli ve uzun süreli suni yağmurlar sonucunda lineerlilik göstergesinin yağış süresinin başlangıç ve son kısımlarında 1'e yaklaştığı bir başka deyişle lineer bir davranışın gözlemlendiği fakat orta kısımlarında nonlineer etkilerin hakim olduğu görülmüştür. Bunun yanında, sabit şiddetli fakat değişik süreli yağışların meydana getirdikleri hidrograflar arasındaki ilişkiler de araştırılmış ve genellikle bütün yağmurların sona ermesinden kısa bir süre sonra (20. sn gibi) kullanılan matematik modeldeki nonlineer bileşenlerin hızla sıfıra doğru yaklaştığı tespit edilmiştir. Lineer yaklaşımla yapılan tahminlere göre hidrografların tepe kısmı ve bu kısım yakınlarında önemli hatalar görülmüş ve yağış şiddetinin artmasıyla birlikte bu hataların da yükseldiği belirtilmiştir. Gerçi bu model havza,

doğal bir havzayı temsil etmemektedir. Ancak, sızma, zeminin doygun hale gelmesi ve yüzeysel akış süreçleri bu model havzada da tabii havzalardakine benzer şekilde cereyan etmektedir. Bu sebeple elde edilen sonuçlara göre bir genel değerlendirme yapılacak olursa, bütün havzalarda taşkın hidrograflarının yükselme eğrisi, tepe ve alçalma eğrisinin başlangıç bölgesinde nonlinear davranışların hakim olduğu geri kalan kısmında ise davranışın lineerliğe yaklaştığı söylenebilir.

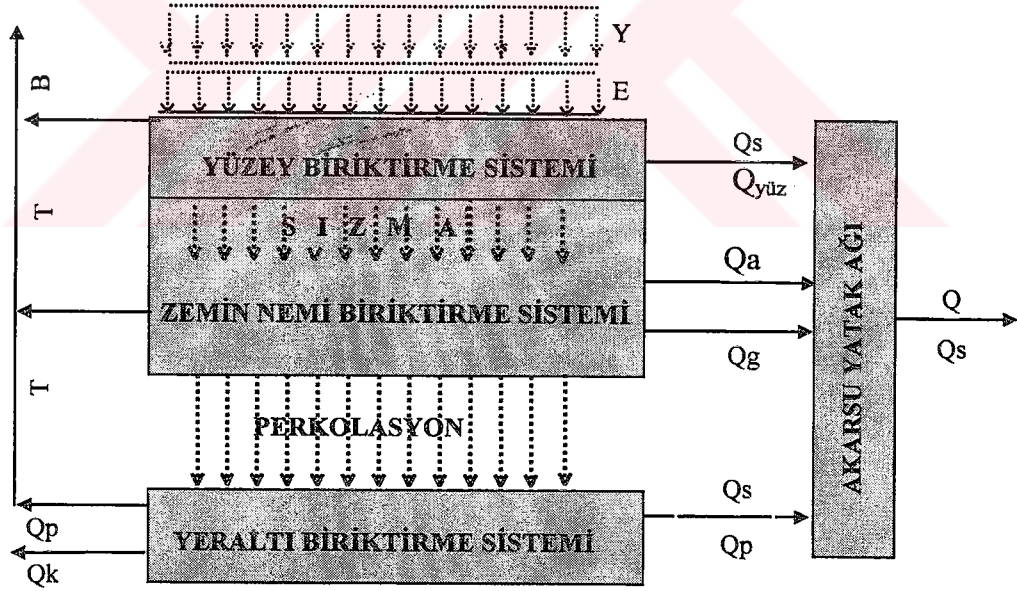
Havza davranışının nonlinearliğinde etkili olan bir başka olay da geçiş süresi yani yüzeysel akışın havzanın en uzak noktasından çıkış ağzına gelinceye kadar geçen süresi ile ilgilidir [40]. Geçiş süresi yüzeysel akış hızlarının bir fonksiyonudur. Yüzeysel akışta derinlik, hızı etkileyen önemli bir değişkendir. Havza alanı büyüdükçe akış derinliği artacağından, yüzeysel akış süresi sebebi ile geçiş süresi azalır. Bu sebeple büyük havzalarda yatak akımlarının hızı geçiş süresini etkilerken küçük havzalarda yüzeysel akış hızı önem kazanmaktadır. Pilgrim'in 1961 yılındaki araştırmasına dayanarak Müftüoğlu geçiş süresinin, yağış şiddetinin nonlinear bir fonksiyonu olduğu sonucunu çıkarmıştır. Bununla birlikte, taşkın olarak nitelendirilebilecek akımlarda geçiş süresinin pratik olarak sabit kaldığı da gözlenmiştir. Bu duruma taşkın sırasındaki ortalama akım hızı ile debi arasındaki bağıntının sebep olduğu söylenebilir. Çünkü, düşük seviyeli akımlarda ortalama akım hızı, debi ile önemli ölçüde değişebilmekte ise de yüksek seviyeli akımlarda akım, yatak içerisinde kalmak koşulu ile debinin değişimi ortalama hızı çok fazla etkilememektedir. Dolayısıyla feyezan sayılabilecek akımlarda ortalama akım hızı yaklaşık olarak sabit kalır ve geçiş süresinin nonlinearlığı lineerliğe yaklaşır [29].

Havzanın bütün olarak davranışı ele alındığında nonlinear iletim etkilerine ilaveten nonlinear biriktirme etkileri de önem kazanmaktadır. Burada sözü edilen tutma, yüzeysel biriktirme ve sızmanın nonlinear etkileridir. Bu yüzden bir havzada sızma ve artık yağış oranlarını, havza özellikleri ile toprak şartları bir başka deyişle, nemlilik derecesi ve yüzeysel akışa geçecek su miktarı belirler. Sızma sonucu zemin derinliklerine inerek yeraltı akımlarına karışan sular ise erozyonda etkili değildir. Ayrıca, havza özelliklerinde zamanla meydana gelen değişimlerin erozyonda doğuracağı etkiler ihmal edilebilirse de nemlilik derecesi ve yüzeysel akışa geçen su miktarı için aynı şeylerin söylenmesi mümkün değildir. Çünkü bu faktörler mevcut şartların ve önceki yağışların bir fonksiyonu olup zamanla değişmektedir.

2.1.3 Sistem Olarak Havza

Akarsu havzaları, yağış çıkış noktasında akıma dönüştüren ve yağışların etkisi ile katı maddeler üreten sistemler olarak düşünülebilir. Havzanın akımı ve erozyonu meydana getiren süreçlere göre basitleştirilmiş bir sistem olarak tasviri Şekil 2.4 de verilmiştir.

Sistemin girdileri yağış (Y) ve enerji (E), çıktıları buharlaşma (B) ve terleme (T), kuyu ve pınar şeklindeki yeraltı suyu deşarjları (Q_k , Q_p) ve akarsu akımı (Q) ve beraberinde taşıdığı katı madde miktarı (Q_s) dır. Akarsu akımı ve katı maddelerin taşınımını meydana getiren süreçler havzada, dereciklerde başlayan ve katı maddelerin akarsuya kadar ve akarsu tarafından taşınmasında etkili olan yüzeysel akış ($Q_{yüz}$) akarsuya az veya çok gecikmeyle katılan yüzeyaltı akımları (Q_a , Q_g) ve yeraltı akımları (Q_{ya})'dır.



Şekil 2.4 Sistem Olarak Havza

Bilindiği gibi, güneşten havzaya gelen enerji bir yandan zemindeki suyun buharlaşmasına bir yandan da bitkilerin terlemesine sebep olur. Kurulacak bir matematik modelin sade olması için yağış, enerji, buharlaşma ve terleme modele

ayrı-ayrı katılacak yerde, buharlaşma ve terleme kayıpları hesaplanarak yağıştan çıkarılmak suretiyle bulunacak yağış değeri kullanılabilir. Bu değer akım ve erozyonu doğrudan etkilediği için “*etkin yağış*” olarak ifade edilecektir.

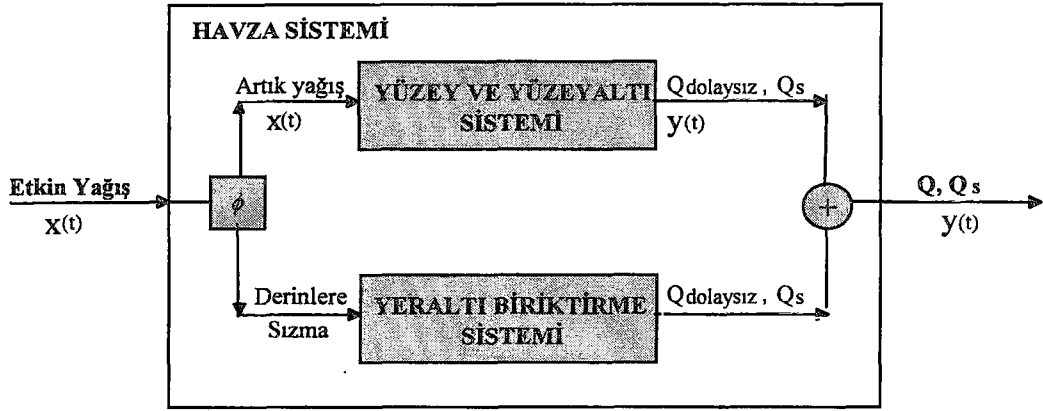
Komşu havzalara dağılan yeraltı suları ile kuyular ya da pınarlar yolu ile yüzeye çıkan sular ve bunların getireceği malzeme miktarları da çoğunlukla ihmal edilebilecek değerlerdir. Böyle durumlarda Q_k ve Q_p ile beraberindeki Q_s ’ de ihmal edilerek havza sisteminin çıktısı sadece akarsu akımına ya da akarsu katı madde yüküne indirgenebilir.

Şekil 2.4’ de gösterilen yüzeysel, yüzeyaltı ve yeraltı akışlarını birbirinden ayırmak oldukça güç hatta imkansızdır. Bu nedenle yüzeysel akım ve çok gecikmeden akarsuya katılan yüzeyaltı akımları toplamı “*dolaysız akım*”, yeraltı akımı ile akarsuya uzun bir gecikme ile katılan yüzey altı akımları da “*taban akımı*” olarak adlandırılarak yapılacak bir ayırım pratik açısından daha anlamlıdır. Bu ayırım erozyon ve katı maddelerin taşınımı ile ilgili sınıflandırmalar açısından da yeterli olacaktır.

Hatırlanacağı üzere sızmadan geriye kalan ve doğrudan doğruya yüzeyden akarak akarsuya karışan sularla, kısa bir süre zemin içinde aktıktan sonra akarsuya katılan sular “*artık yağış*” diye adlandırılmaktadır. Bundan dolayı etkin yağış ile artık yağış arasındaki fark, zemin derinliklerine süzülerek taban akımını oluşturan sudur.

Buraya kadar anlatılan bilgi ve düşüncelerin ışığında Şekil 2.4 ile tasvir edilen havza modeli basitleştirilerek Şekil 2.5’deki model elde edilir. Yalnızca bir girdi bir çıktı üreten iki alt sistemli bu model, pratik bakımdan daha anlamlıdır. Modelde, yüzey ve yeraltı biriktirme alt sistemleri birbirinden bağımsız analize tabi tutulabileceği gibi istenildiğinde sistemin bütünü de analiz edilebilir.

Havzanın topografik, jeolojik ve coğrafi özelliklerinin ve hidrolojik şartların yere ve zamana bağlı farklılıklar gösterdiği bir gerçektir. Bu özellikler kısa süreli periyotlarda değişmez kabul edilebilirlerse de mevsimden mevsime veya yıldan yıla dikkate değer değişimlere maruz kalırlar. Örneğin bitki örtüsünün değişimi ekili arazilerde ve otlaklarda mevsimden mevsime, ormanlık alanlarda ise yıldan yıla fark



Şekil 2.5 Basitleştirilmiş Bir Havza Modeli

edilir biçimde görünür. Erozyon sonucunda yeni yağmur kanalları ve mini dere yatakları oluşur. Öte yandan oyulmalar ve katımadde yığılmaları sonucu yatak yapısı da değişir. Akarsu kanal ağının değişimi de nispeten daha kısa sürelerde önemli seviyelere ulaşabilir. Bu değişimlerin çoğu bütün akarsu havzalarında görülebilecek tabii ve normal değişimlerdir. Bunların yanında, depremler etkisiyle yer kabuğunda meydana gelen büyük çatlak ve çukurlar, yangınlar sonucu ormanların yok olması gibi durumlar, ziraat ve yapılaşma çalışmalarında öne çıkan pek çok faaliyetler ve insan müdahaleleri havza şartlarında ve dolayısıyla da bir havzanın davranışında ani ve önemli değişmelere sebep olur. Havzada meydana gelen bu değişimlerin kurallarını tespit ederek modellere dahil etmek mümkün olmadığı için havzayı zamanla değişmeyen bir sistem olarak kabul etmek zorunludur. Fakat modellerin kalibre edildiği ve uygulandığı periyotlarda büyük farklılıkların bulunmamasına dikkat etmek gerekmektedir.

2.2 Havza Modellemesinde Yaklaşımlar

Bir havzada yağış, buharlaşma ve terleme biliniyorsa katı madde debisini (veya akımı) bulmak için esasta farklı iki yol izlemek mümkündür. Bunlardan biri, akım ve beraberinde taşınan katı maddenin hareketlerini temsil eden genel denklemlerin (kütlenin korunumu ve momentum prensibi) ele alınan havza için çözülmesini amaçlayan hidrodinamik yaklaşımdır. Hidrolik havza modelleri olarak

da adlandırılan bu yaklaşım, biçim, eğim ve zaman özellikleri açısından idealize edilmiş laboratuvar havzaları ile küçük arazi tavaları için iyi sayılabilecek sonuçlar vermekte ise de gerçek havzalar için henüz tatminkar sonuç vermekten uzaktır.

Diğer yaklaşımda ise havzada meydana gelen olayların fiziksel kanunları ile ilgilenilmeyip havza basitleştirilmiş bir sistem olarak ele alınmak suretiyle alt-sistemlerin davranışlarını temsil eden modeller kurulur [41, 42, 43]. Bu modeller, hidrolojik havza modelleri olarak bilinirler ve “*parametrik modeller*” ve “*kara-kutu modelleri*” olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Parametrik modeller, Şekil 2.4 ve 2.5’de gösterilen havza alt sistemlerinin kavramsal birer elemanla temsil edilmeleri esasına dayanır. Havzanın özellikleri ile durumu parametrelerle temsil edildiği için bu modellere parametrik modeller adı verilmektedir. Bu modellerde havza alt sistemleri, suyu biriktiren ve kapasite fazlasını kendinden sonraki elemana aktaran birer hazne gibi düşünülmektedir. Bu tip kavramsal elemanlardan oluşturuldukları için “*kavramsal modeller*” olarak da bilinen bu modellerin parametreleri, doğrudan havzaya ait yağış ve buharlaşma gibi datalar ile akım veya katı madde kayıtları kullanılarak optimize edilirler. Bu parametreler kullanılarak bulunan sonuçlar eldeki verilerle uyuşmazsa yeniden belirlenirler. Söz gelişi, Nash’ın lineer hazne modeli [44], USLE ve MUSLE [19], gerçekte birer parametrik modellerdir.

Parametrik modellerin en genel ve kapsamlısı, ilk defa 1960’da ileri sürülmüş ve sonra defalarca tadil edilerek genişletilmiş olan Stanford Havza Modeli’dir [42, 43]. Daha sonra, Negev (1967)’in modeli, Foster ve Meyer (1972)’in Agricultural Research Service, ARS, modeli, Fleming (1975)’in modeli Simons ve arkadaşlarının (1975) modeli gibi çok sayıda parametrik model geliştirilmiştir [45]. Bütün bu modeller bir bilgisayar programıyla bir havzada meydana gelecek akımların, yağışlara bağlı olarak tahmininde kullanılabilmektedir.

Son yıllarda geliştirilen havza özellikleri ve hidrolojik faktörlerin yerel dağılımını yaklaşık da olsa hesaba katan modeller de kayda değer niteliktedir. Bu modeller hakkında etraflı bilgi [19] nolu kaynaktan elde edilebilir.

Kara-kutu modelleri ise havzanın bir alt-sistemi veya bütünü için davranışının havza özellikleri ile havza işleyişine hemen hemen hiç bakılmaksızın

matematiksel olarak bir davranış fonksiyonları takımı ile temsili esasına dayanır. Davranış fonksiyonları havzanın girdi ve çıktı dataları üzerinde belirlenir.

2.3 Kara - Kutu Modelleri

“Kara-kutu-sistem” deyimi ile yapısal özellikleri ve çalışma tarzları ayrıntılı şekilde ve tam olarak ölçülüp değerlendirilemeyen ve dolayısıyla modellendirilmeleri oldukça güç veya imkansız olabilen sistemler kastedilir. Kara-kutu sistemlerin modellenmesi sistem davranışı kavramına dayanmaktadır (Şekil 2.6). Bu nedenle kara-kutu modelleri genel olarak

$$y(t) = \phi [x(t)] \quad (2.1)$$

şeklinde bir ifade ile gösterilirler. Burada, $x(t)$ sistemin girdisini, $y(t)$ sistemin çıktısını ve ϕ sistemin davranışını temsil eder. ϕ fonksiyonuna sistemin davranışını temsil ettiği için “davranış fonksiyonu”, sistemin girdi üzerindeki etkisini temsil ettiği için de “tesir fonksiyonu” denir. Burada davranış fonksiyonu deyimi tercih edilecektir.



Şekil 2.6 Kara-Kutu Yaklaşımı

Davranış fonksiyonu sistemin bilinen bir girdi - çıktı takımından belirlenir. Davranış fonksiyonu bir kere belirlenmiş olan bir sistemin herhangi bir girdi periyodunda ürettiği çıktıların belirlenmesi kolay bir iş haline gelir. Kara-kutu yaklaşımında, sistem girdisinin yerel dağılımı genellikle dikkate alınmaz yani girdinin üniform dağılmış ve tek noktada gözlenebilen bir değişken olduğu kabul edilir.

Kara-kutu-sistem modelleri genel olarak lineer ve nonlinear olmak üzere ikiye ayrılırlar. Nonlinearlığı çok belirgin olmayan sistemlerin lineer modellerle temsili yeterli sayılabilecek yaklaşıklıkta sonuçlar verdiği için pratik olarak kabul görmüş bir uygulamadır. Havza yüzey alt-sistemi de böyle bir sistem olup davranışı, lineer bir model olan birim hidrograf ile temsil edilmektedir. Bütün olarak ele alındığında ise hatırlanacağı gibi havza davranışının nonlinearlığı göz ardı edilemez ve nonlinear modellerin kullanılması gerekir.

2.3.1 Lineer Modeller

Bir sistemde, herhangi bir andaki girdinin herhangi bir andaki çıktıya katkısı doğrudan doğruya o girdi değeri ile orantılı ve çıktının tamamı etkin girdilerin katkıları toplamına eşit ise böyle bir sistem lineer sistem olarak adlandırılır. Bu tanımlamaya göre “*orantı ve süperpozisyon*” lineer bir sistemin önemli iki davranış özelliğidir.

Herhangi bir sistemin $x(t)$ girdisi üzerinde operasyonu sonunda $y(t)$ çıktısının oluşması,

$$y(t) = \phi [x(t)]$$

biçiminde (2.1 denk.) ifade ediliyordu.

Lineer bir sistemin orantı özelliği,

$$A y(t) = \phi [A x(t)] = A \phi [x(t)] \quad (2.2)$$

şeklinde, süperpozisyon özelliği ise $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ iki girdisi, $y_1(t)$ ve $y_2(t)$ mütekabil çıktıları ve A ve B iki sabiti göstermek üzere

$$y_3(t) = \phi [A x_1(t) + B x_2(t)] = A \phi [x_1(t)] + B \phi [x_2(t)] \quad (2.3)$$

$$y_3(t) = A y_1(t) + B y_2(t) \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu özellikler sayesinde zamanla değişmeyen lineer bir sistemin belli girdilerden türeteceği çıktıları kolaylıkla hesaplamak mümkündür. Bu nedenle, nonlinear sistemlerle ilgili birçok problemde lineer modellerin sağladığı yaklaşık çözümler ile yetinmek genel bir eğilim halindedir. Lineer modeller hidrolojide de yaygın olarak kullanılmaktadır. Artık yağış ile yüzeysel akış arasındaki ilişkiyi temsil için kullanılan birim hidrograf¹ da lineer bir kara-kutu modelidir.

Birim hidrograf modeli esas itibari ile havza yüzey-alt sisteminin artık yağışı dolaysız akışa dönüştüren bağımsız bir lineer sistem olarak ele alınabileceği kabulüne dayanmaktadır. Ayrıca, artık yağışın havzada dağılımının uniform olduğu ve şiddetinin zamanla değişmediği kabulleri yapılmaktadır. Bu kabuller gerçeğe uymasa da pratikte yeterli bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu açıdan da teorisi ve dayandığı kabuller dikkate alındığında birim hidrograf modelinin, yağış ile askı maddesi konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi temsil için geliştirilecek bir birim askı maddesi eğrisi modeli için ilham kaynağı oluşturduğu söylenebilir. Bu noktada, havza sisteminin karmaşık bir sistem olduğu, bazı hallerde lineer sayılabilirse de bütününde yağışlara karşı nonlinear bir davranış sergilediği ve dolayısıyla da bu nonlinearliğin mutlaka dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır.

Hidrolojide birim hidrograf modelinin matematiksel ifadesi konvolüsyon integrali olarak bilinir. Konvolüsyon integrali bir havza modeli olarak ilk defa 1956' da Cuenod tarafından ileri sürülmüş [41], sonraları birim hidrograf modelinin matematiksel ifadesi olarak kabul görmüş ve pek çok araştırmaya konu olmuştur. Bunlar arasında, anlık birim hidrografın türetilmesini ve nümerik uygulamasını konu alan Eagleson [46], Bayazit [47], Hino [48], Papazafiriou [49], Bruen ve Dooge [50], Singh [51, 52, 53], Georgakakos [54] ve Jakeman [55] 'in çalışmaları zikre değer olanlardır. Birim hidrograf ve çeşitli havza modelleri olarak daha yüzlerce çalışmayı [56 - 61] nolu referanslardan bulmak mümkündür. Bu çalışmalarda genel olarak, birim hidrografın matematiksel ifadesine yenilikler getirilmiş, elde edilmesi

¹ İlk defa 1932 yılında Sherman tarafından ileri sürülen birim hidrograf kavramı bir havzanın özelliklerinin değişmez kabul edilebileceği ve dolayısıyla da benzer karakterli yağışların meydana getirecekleri akımların hidrograflarının benzer olmaları gerektiği fikrinden doğmuştur.

için değişik metotlar ileri sürülmüş fakat hiçbir çalışmada teorinin esasına ilişkin bir değişiklik ortaya konulmamıştır.

Lineer bir kara-kutu modeli olan ve yağış ile askı maddesi konsantrasyonu arasındaki ilişkiye dayanan bir tahmin yöntemi de 1974' de Rendon-Herrero tarafından geliştirilmiş ve A. B. D. de küçük bir alana sahip (39km^2) Bixler Run havzası için oldukça iyi sayılabilecek bir başarı ile uygulanmıştır [21, 22]. Bu metot esas itibari ile birim hidrograf modeline benzemekte ve artık yağışa bağlı olarak yıkanmış malzeme miktarını tahmine imkan vermektedir. Yıkanmış malzeme ve zamanla değişimlerinin belirlenmesinde başka bir deyişle askı maddesi eğrilerinin oluşturulmasında “*grafik çizim metodu*” olarak adlandırılan bir yöntem kullanılmıştır. Artık yağışın belirlenmesinin, askı maddesi debisinden yatak askı malzemesinin ayrılmasının zorunlu olması ve çok fazla grafik çizim ve kullanımını gerektirmesi bu modelin zorlukları ya da zaafları olarak görülebilir. Esas itibarı ile birim askı madde eğrisine dayanan bu modelin iyi sonuç vermiş olması ise bu yaklaşımla daha iyi modellerin geliştirilebileceği noktasında ümit oluşturmaktadır.

2.3.2 Nonlinear Modeller

Nonlinear modellerin akarsu havzaları için uygulamalarına son 25 yılda rastlanmaktadır. Bu alandaki uygulamaların genellikle yağış-akım sürecinin modellenmesinde gerçekleştirildiği görülmektedir. Yağış ve katı madde ilişkisinin nonlinear modellerle temsilinde ise henüz tatminkar bir sonucun ortaya konulamamış olduğu söylenebilir [41].

2.3.2.1 Nonlinear Bir Model Olarak Fonksiyonel Dizi

Fonksiyonel dizilerin havza modeli olarak uygulamalarına literatürde genellikle yağış-akım sürecinin modellenmesinde rastlanmaktadır. Bu sürecin fonksiyonel bir dizi ile temsil edilebileceği ilk defa 1961'de Amarocho ve Orlob tarafından düşünülmüştür [62]. O tarihten bu yana pek çok araştırmacı tarafından kapsamlı çalışmalar yapılmış ve çeşitli uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Fakat havzanın girdisi yağış, çıktısı ise katı maddeler olan bir kara-kutu sistemi olarak

modellenmesinde fonksiyonel dizinin, yağış-akış modeli gibi kullanılabileceğinin fikri ilk defa Müftüoğlu (1978) tarafından ileri sürülmüştür [29]. Ancak araştırmacı tarafından ileri sürülen bu fikrin data yokluğu sebebiyle uygulaması gerçekleştirilmemiştir. Burada bu çalışmalara girilmeyecek, sadece fonksiyonel dizi genel bir havza modeli olarak yorumlanmaya çalışılacaktır.

Zamanla değişmeyen, sonlu bir hafızaya sahip nonlinear bir kara-kutu sisteminde girdi ve çıktı süreçleri arasındaki bağıntı genellikle,

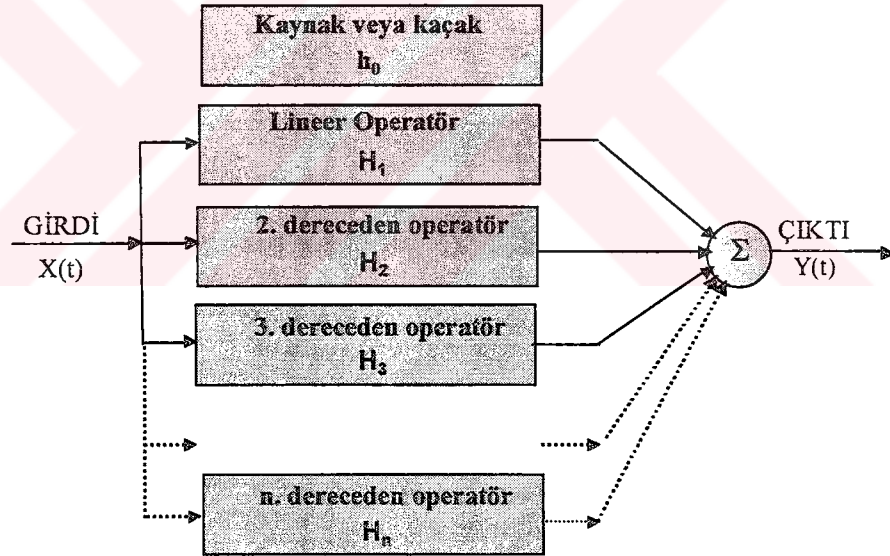
$$\begin{aligned}
 y(t) = & h_0 + \int_0^t h_1(t-s)x(s)ds + \int_0^t \int_0^t h_2(t-s_1, t-s_2)x(s_1)x(s_2)ds_1ds_2 \\
 & + \int_0^t \int_0^t \int_0^t h_3(t-s_1, t-s_2, t-s_3)x(s_1)x(s_2)x(s_3)ds_1ds_2ds_3 \\
 & \dots \dots \dots \\
 y(t) = & h_0 + \sum_{n=1}^M \left(\int_0^t \right)_n h_n(t-s_1, \dots, t-s_n) \prod_{i=1}^n x(s_i)ds_1 \dots ds_n
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

entegral denklemi ile ifade edilebilir.

Matematikte Volterra entegrali ya da fonksiyonel dizi (functional series) olarak adlandırılan [63] bu denklemde t hafıza uzunluğunu, entegrasyon değişkeni olarak tanımlanan s_i de t 'ye bağlı bir gecikme zamanını gösterir. h_0 terimi sistemin içindeki bir kaynağın katkısı ya da kaçaktır. $y(t)$ t anında sistemin çıktısını, $x(s_i)$ s_i anındaki girdi değerini ve $h_n(t-s_1, \dots, t-s_n)$ de n 'inci derece davranış fonksiyonlarını göstermektedir. M sistemin nonlinearlık derecesidir. Matematikte sadece kernel veya kernel fonksiyonları olarak tanımlanan bu fonksiyonlar sistem analizinde, genellikle davranış fonksiyonu olarak bilinirler.

Şimdi genel bir havza modeli olarak (2.5) denklemini yorumlamaya çalışalım. Denklemdaki $y(t)$, t anında havza çıkışında gözlenen akım ya da katı madde debisi, $x(s_i)$ bu debiye katkıda bulunan yağışları, $h_1, h_2, \dots, h_n$ ise havza

davranışını temsil etmesi beklenen kernel fonksiyonlarını (lineer, kuadratik, kübik, ...) göstermektedir. $s_1, s_2, \dots, s_n$ 'ler dikkate alınan yağış değerleri ile söz konusu debiler arasındaki gecikme süreleridir. Burada dikkat edileceği üzere, havza davranışını yansıtacak olan kerneller sadece “ s ” gecikme terimlerinin fonksiyonudur. Bu özellikleri sayesinde davranış fonksiyonlarının belirlenmesi, havza fiziğinden tamamen bağımsız olarak gerçekleştirilebilir. Yağış değerlerinden bağımsız ve bir sabit olan h_0 terimi ise komşu havzalardan beslenen bir kaynağın veya ölçme kesitine gelmeden oluşabilecek herhangi bir kaçığın debiye etkisini temsil için kullanılabilirse de sabit olması yüzünden çözüme hassaslık getirmesi mümkün değildir. Havzalar arası alışverişlerin önem arz ettiği hallerde, h_0 terimi için belirlenen değer kullanılması gerekir. Ancak, model testleri için genellikle böyle havzalar seçilmediğinden bu terime de gerek kalmaz.



Şekil 2.7 Nonlineer Bir Sistemin Fonksiyonel Temsili

(2.5) denklemindeki terimlerden her biri birer fonksiyonel olarak ifade edilir ve denklemin ilk terimi konvolüsyon entegrali yani birim hidrograf modelidir. $h_1(t - s)$ anlık birim hidrografın ordinatlarını temsil etmektedir. Hidrograflarla askı maddesi eğrileri arasındaki benzerlikler düşünüldüğünde ise $h_1(t - s)$ 'in anlık birim askı maddesi eğrisi ordinat değerlerine tekabül ettiği görülmektedir. Denklemin

diğer terimleri konvolüsyon entegralinin katlı ifadesinden başka bir şey olmayıp iki, üç ve daha yüksek dereceden fonksiyonellerdir. Yani; bu terimler yağış değerlerini ikişer ikişer, üçer üçer, ... , vb. şekilde çarpımlar halinde hesaba katmaktadırlar. Fonksiyonel dizinin genel bir model olarak havza davranışını temsil edebileceği düşünüldüğünde, havza işlevinin Şekil 2.7 de şematik olarak gösterildiği haliyle lineer, kuadratik, kübik ve daha yüksek dereceli bileşenlerden oluştuğu, bu bileşenlerin $x(t)$ girdisi üzerinde paralel bir operasyon gerçekleştirdikleri kabul edilmiş olmaktadır.

Hidrolojik ve meteorolojik değişkenlerin gerek ölçümlerdeki zorluklar gerekse ekonomik nedenlerle sürekli kayıtlarının elde edilmesi pek mümkün olmamaktadır. Ayrıca pratikte, problemlerin çözümü için nümerik yöntemler uygulanmak istendiğinde sürekli kayıtların da kesikli hale getirilerek kullanılması zorunlu olmaktadır. Bu sebeplerle fonksiyonel dizinin aşağıda verilen kesikli şekli daha çok kullanılmaktadır.

$$y(t) = \sum_{s_1=1}^t h_1(t-s_1)x(s_1) + \sum_{s_1=1}^t \sum_{s_2=1}^t h_2(t-s_1, t-s_2)x(s_1)x(s_2) + \sum_{s_1=1}^t \sum_{s_2=1}^t \sum_{s_3=1}^t h_3(t-s_1, t-s_2, t-s_3)x(s_1)x(s_2)x(s_3) + \dots \quad (2.6)$$

Burada, h_0 terimi terkedilmiştir. Toplamların alt sınırları bir alınmakla sistem hafızasının içine aldığı $x(s)$ lerin bütün çarpımları hesaba katılmış olmaktadır. Halbuki $x(s)$ lerin sadece farklı çarpımlarının hesaba katılması yeterlidir. Bu çarpımların simetri özelliği dikkate alındığında ve benzer şekilde davranış fonksiyonları için de aynı özellik hesaba katıldığında (2.6) denklemi, daha kullanışlı bir notasyonla ve sadece kübik terimlere kadar açık olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$y_m = \sum_{i=1}^m h_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m h_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=j}^m h_{i,j,k} x_i x_j x_k + \dots \quad (2.7)$$

Davranış fonksiyonlarının sayısı model derecesine ve hafıza uzunluğunun içerdiği birim zaman aralığı sayısına bağlıdır. Bu sayı, N model derecesini D de fonksiyonel derecesini göstermek üzere,

$$0 = \sum_{D=1}^N \binom{m-1+D}{D} = \sum_{D=1}^N \frac{(m-1+D)!}{D!(m-1)!} \quad (2.8)$$

kombinezonlar toplamı ile hesaplanır. Burada m, sistem hafızasının içerdiği birim zaman aralığı sayısıdır. Ayrıca, hatırlanacağı gibi burada “ x ” değerlerinin kareleri, küpleri ve diğer üstleri dahil olmak şartıyla sadece farklı çarpımları hesaba katılmıştır. Bu durumda; örneğin, 3’ üncü derece bir modeldeki davranış fonksiyonu sayısı,

$$0 = m + \frac{m(m+1)}{2} + \frac{m(m+1)(m+2)}{6}$$

olmaktadır. Modelin derecesi yükseldikçe bu sayının da hafıza uzunluğunun fonksiyonu olarak hızla artacağı açıktır.

Kaçıncı dereceden nonlinear olduğu bilinmeyen bir sistem için mümkün olduğunca yüksek dereceli fonksiyonel dizilerin sınanarak en uygun olanının seçilmesi gerekir. Genel bir kural olarak, yüksek dereceli fonksiyonların modelin uyum kabiliyetini arttırdığı söylenebilir. Fakat böyle bir uygulamada kullanılacak datanın hatalı olmaması gerekir. Halbuki hidrolojik veriler pek çok ölçme ve değerlendirme hatası içerirler. Hatalı dataların kullanılması durumunda ise ele alınan sistemin gereğinden daha yüksek dereceli bir modelle temsili, davranış fonksiyonlarının bu hatalardan önemli oranda etkilenmesine sebep olur. Çünkü böyle bir model, gerekli ya da yeterli olandan daha fazla uyum kabiliyeti gösterecek ve davranış fonksiyonları sistemin davranışı ile hataları ayıramayacağından hepsine birden uyum sağlayacaktır. Bu sebeple, en uygun modelin seçilmesi için çeşitli dereceden modellerin denenmesi gerekir. Benzer düşünceler hafıza uzunluğunun belirlenmesinde de uygulanır. Bu bakımdan, yüksek dereceli fonksiyonların davranış fonksiyonlarının belirlenmesindeki matematiksel güçlükler bir yana,

deneme - yanılma yolu izlenerek uygun bir modelin seçilmesi hem zaman alıcı hem de pahalı bir iştir. Bu nedenle şimdiye kadar yapılmış uygulamalar çoğunlukla ikinci en yüksek ise üçüncü dereceden modellerle gerçekleştirilmiştir. Bu modeller ile elde edilen sonuçların lineer modellerin sonuçları ile karşılaştırılması, yüksek dereceli fonksiyonların (kuadratik veya kübik bileşenlerin) hassasiyete önemli miktarda katkıda bulunduğunu ortaya çıkarmıştır.

Fonksiyonel dizinin havza modeli olarak en önemli zaafı, kernel fonksiyonlarının fiziksel bir anlam taşımayışı ve bunların sadece matematiksel birer eleman olarak kalmasıdır. Kara-kutu yaklaşımının sistemin fiziğinden bağımsız olması dolayısıyla bu zaaf pek önemli sayılmayabilir. Fakat, davranış fonksiyonları negatif değerler alabilmekte ve bu da tahminlerde önemli hatalara, hatta negatif akım veya katı madde değerlerine yol açabilmektedir. Halbuki, havza davranışı negatif olmayan bir süreçtir.

Yukarıdaki açıklamaların ışığında genel fonksiyonel dizinin askı maddesi tahmini için bir kara-kutu modeli olarak kullanılabileceği açıkça görülmektedir. Bu çalışmada havzanın erozyona karşı davranışını temsil için ikinci dereceden bir yağış-katı madde modeli olarak fonksiyonel dizinin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Literatürde henüz böyle bir uygulamanın yapılmamış olduğu görülmektedir.

2.3.2.2 Williams'ın Birim Sediment Eğrisi Modeli

Katı madde eğrilerinin tahmini için tam nonlineer olmasa da nonlineer sayılabilecek bir model ilk olarak 1978'de Williams tarafından yayınlanmıştır [25]. Kendisi her ne kadar "*Instantaneous Unit Sediment Graph*", IUSG, "*Anlık Birim Sediment Eğrisi*" adını vermiş ise de Williams'ın modeli bir "*Birim Sediment Eğrisi*", USG, modelidir. Bu modelde birim katı madde eğrisinin değişimi,

$$u_i = h_i C_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada, u birim katı madde eğrisinin ordinatını, h birim hidrografın ordinatını, C de askı maddesi konsantrasyonunu temsil etmektedir. N ise birim hidrograf ordinat sayısını göstermektedir.

Williams herhangi bir zaman aralığındaki askı maddesi konsantrasyonunun artık yağışların karelerinin lineer bir fonksiyonu olduğunu kabul ederek,

$$y_i = \sum_{j=1}^i x_i^2 u_k \quad k = i+1-j \quad \text{ve} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.10)$$

ifadesini vermiştir. Burada y_i askı maddesi eğrisinin ordinatlarını, x_i artık yağış değerlerini M ise aranan askı maddesi konsantrasyon eğrisi ordinatları sayısını göstermektedir. Williams'ın modeli sadece feyez anımları sırasındaki katı madde eğrisinin tahminlerine imkan vermektedir.

BÖLÜM 3

NONLİNEER BİR ASKI MADDESİ MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Bir havzadaki hidrolojik şartların ve havza ile ilgili özelliklerin zamana ve yere bağlı değişkenler olması ve bu değişken faktörlerin etkilerinin kantitatif olarak belirlenmesinde ortaya çıkan güçlükler askı maddesi tahminleri için de kara-kutu-sistem yaklaşımının uygulanmasını teşvik etmektedir. Hatırlanacağı üzere bu yaklaşımda sistemin etkin geçmişi ve davranışının lineer ya da nonlineer oluşu dikkate alınarak bir model belirlenir. Bu modelin sistem davranışını temsil eden davranış fonksiyonları, sistemin girdi ve çıktı dataaları üzerinde belirlenir. Bizim sistemimizin girdisi yağış, çıktıları ise katı maddeler de taşıyan akım ve su buharıdır. Yağış yerine etkin yağış verisinin kullanılması, buharın ayrı bir çıktı olarak hesaba katılması külfetinden bizi kurtaracaktır. Amaç, askı maddesi debisinin tahmini olduğuna göre akımla hiç ilgilenilmeden sistemin çıktısı, doğrudan doğruya askı maddeleriymiş gibi düşünülebilir. Böylece havza, girdisi yağış, çıktısı ise askı maddeleri olan bir kara-kutu sistemi olarak ele alınmış olacaktır.

3.1 Nonlineer Bir Askı Maddesi Modeli

Havza erozyonunda etkili olan en önemli faktörün yağmur olduğu söylenebilir. Hatırlanacağı üzere yağmur, damlalarının çarpma etkisi ile havza zeminini başlangıçta erozyona hazırlayan ve oluşturduğu yüzeysel akış ve yatak akımları ile de erozyonu fiilen meydana getiren en önemli faktördür. Burada, diğer faktörlerin etkileri ihmal edilerek yağmur ve askı maddesi ilişkisi arasında nonlineer bağıntı kuran bir kara-kutu modeli geliştirilmeye çalışılacaktır. Ancak bu derivasyona geçmeden önce düşünce şeklinin daha açık olarak ifade edilmesi için bazı bilgilerin tekrarında fayda görülmüştür.

Bütün akarsularda askı maddelerinin tamamının taşkınlar esnasında geldiği ve bunların yataktaki akım şartlarından ziyade havzadan taşınan yıkanmış malzemeler olduğu düşünülebilir. Hatta bunun bütün katı maddeler için de genellenmesi mümkündür. Çünkü düşük akımlarda yatak malzemesi hareketlerinin çok az olduğu bilinen bir gerçektir. Ayrıca, katı maddelerin büyük çoğunluğunu zaten yıkanmış malzemeler teşkil etmektedir. Hatırlanacağı gibi yıkanmış malzeme oranı olarak % 90-95 gibi değerler verilmektedir. Bu nedenle taban akımlarına katkıda bulunan geçmiş yağışların, askı madde debisi yönünden etkileri ihmal edilebilir.

Bir havzada sızma ve artık yağış oranlarını havza özellikleri ile nemlilik derecesi belirler. Havza özelliklerinin zamanla değişiminin erozyonda doğuracağı etkilerin hesaba katılmasındaki güçlükler bunların ihmalini zorunlu kılmaktadır. Ancak önceki yağışların bir fonksiyonu olan toprak nemlilik derecesinin hesaba katılması mümkün ve kolaydır. Yağış suları zamanla önemli miktarlarda hatta tamamen buharlaşarak kaybolabilirler. Bu bakımdan buharlaşmanın mutlaka hesaba katılarak etkin yağışların bulunması hatta önceki etkin yağışların da, zamanla maruz kalacakları buharlaşmaya göre güncelleştirilmiş değerlerinin hesaba katılmaları gerekmektedir. Bunun da pratik yolu havza sisteminin girdisi olarak buharlaşma kayıplarından geriye kalan yağış miktarlarının yani etkin yağışların dikkate alınmasıdır. Zira bu kayıpların ihmalı, modelin gerek kalibrasyon gerekse tahmin periyodunda önemli hatalara yol açabilir. Burada da model girdi sürecinin doğrudan etkin yağış süreci olduğu kabul edilecek ve etkin yağış yerine sadece yağış terimi kullanılacaktır. Bu hatırlatmaların ışığında modelin derivasyonu aşağıda verilmiştir.

Herhangi bir andaki akım ve beraberinde taşıdığı askı maddesi debisi o zamanda ve önce meydana gelen etkin yağışların mahsulü olduğuna göre; herhangi bir t anındaki askı maddesi konsantrasyonu, $C(t)$, $x(s_1)$ herhangi bir s_1 anındaki etkin yağışı ve $h_1(t - s_1)$ hafızanın sonsuz küçük süreli birim hacimli etkin yağışa karşı davranışını göstermek üzere, havza hafızası boyunca meydana gelen etkin yağışlara bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$C(t) = \int_0^t h_1(t-s_1)x(s_1)ds_1 \quad (3.1)$$

Konvolüsyon ya da süperpozisyon entegrali olarak bilinen bu denklem genellikle zamanla değişmeyen lineer sistemlerin temsilinde kullanılmaktadır. Hatırlanacağı üzere bu denklem, hidrolojide birim hidrograf modelinin matematiksel ifadesi olarak bilinir. Davranış fonksiyonu olarak adlandırılan $h_1(t-s_1)$ anlık birim hidrografi temsil eder.

Havza lineer bir sistem olsa idi davranışı sabit bir $h_1(t-s_1)$ fonksiyonu ile temsil edilebilirdi. Halbuki havza nonlinear davranış gösteren bir sistemdir. Dolayısıyla, herhangi bir s_1 anındaki birim etkin yağışın t anındaki askı maddesi debisine katkısını temsil için yeterli olabilecek $h_1(t-s_1)$, birim etkin yağışın katkısını temsilde yeterli olmaz. Çünkü herhangi bir t anındaki yağışın oluşturduğu askı maddesi debisi, yalnızca yağışın şiddetine ve süresine değil aynı zamanda havzanın yağış öncesindeki ıslaklık derecesine yani tutma, yüzeysel biriktirme, toprağın doygunluk derecesi gibi yağış öncesi havza şartlarına da bağlıdır. Bu sebeple herhangi bir s_1 anındaki yağışın askı maddesi konsantrasyonuna katkı miktarını kendi şiddeti kadar, havza hafızası başlangıcından s_1' e kadar geçen süredeki yağışların hasıl ettiği ıslaklığın derecesi belirleyecektir. Dolayısıyla $h_1(t-s_1)'$ in yağış öncesi havza şartlarının etkilerini de yansıtacak bir fonksiyon olması gerekir.

Geçmiş herhangi bir 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,

$$\delta h_1(t-s_1) = h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2) x(s_2) ds_2 \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $x(s_2)$ terimi s_2 anındaki geçmiş etkin yağışı göstermektedir. $h_1(t-s_1)'$ in gerçek değeri ise bu denklemin integrasyonundan kolayca bulunabilir.

$$h_1(t-s_1) = \int_0^t h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2) x(s_2) ds_2 \quad (3.3)$$

Davranış fonksiyonunun (3.3) denklemi ile belirlenen yeni değeri (3.1) denkleminde yerine konulduğunda,

$$C(t) = \int_0^t \int_0^t h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2) x(s_1) x(s_2) ds_1 ds_2 \quad (3.4)$$

denklemi elde edilir. Burada $h_1(t-s_1) h_1^*(t-s_2)$ terimleri yerine $h_2(t-s_1, t-s_2)$ yazılarak aranan yağış-askı maddesi konsantrasyonu ilişkisi aşağıdaki şekliyle bulunmuş olur.

$$C(t) = \int_0^t \int_0^t h_2(t-s_1, t-s_2) x(s_1) x(s_2) ds_1 ds_2 \quad (3.5)$$

Herhangi bir andaki erozyon, dolayısıyla da askı maddesi miktarı geçmiş yağışların nonlinear etkilerinin sonucu olduğu gibi her bir s_1 anındaki yağışın askı madde miktarına katkısı o andaki etkin yağış şiddetinin nonlinear bir fonksiyonudur. Bu nedenle (3.5) denkleminde s_2 'nin sadece s_1 'den küçük değerleri değil, s_1 'e eşit değerleri de hesaba katılmış olmalıdır. Böylece, $s_2 \leq s_1$ olacağı için yağışların bütün ikili çarpımları hesaba alındığı gibi kareleri de dahil edilmiş olmaktadır.

Kolayca görüleceği üzere bu model, iki boyutlu bir süperpozisyon entegrali olup fonksiyonel dizinin ikinci teriminden başka bir şey değildir. Model nonlinear biriktirme ve iletim etkilerini de yansıttığı için havza davranışının bütünü temsil etmektedir.

3.1.1 Modelin Özellikleri

1) Bu model, bütün kara-kutu modelleri gibi, havza davranışını belirleyen fiziksel kanunlara dayanmamakta ise de havzanın yağışa karşı davranışı dikkate alınarak türetilmiştir.

2) Aksı maddesi miktarının sadece ve doğrudan artık yağışa bağlı değişimini temsil eden birim askı maddesi eğrisi modellerinin aksine bu model havzanın bir alt sisteminin değil bütününün davranışını temsil eder.

3) Modelin davranış fonksiyonu, geçmiş bir andaki birim hacimli etkin yağışın tesiri altındaki havzanın herhangi bir andaki birim etkin yağışa karşı “erozif” davranışını temsil eden sonsuz sayıda eğriden oluşan bir aile olarak yorumlanabilir. Bu sebeple model “iki boyutlu anlık birim askı maddesi eğrisi” olarak adlandırılabilir.

4) İki boyutlu birim askı maddesi eğrisi, birim hidrograf gibi fiziksel açıdan mümkün davranışları temsil etmektedir. Yani iki boyutlu birim askı maddesi eğrilerinin daima pozitif değerler alması gerekir. Bu özellik davranış fonksiyonlarının belirlenmesinde bir kontrol kriteri olarak kullanılabilir. Böylece bulunacak davranış fonksiyonları ile yapılacak tahminler daima pozitif değerli olacaktır.

3.1.2 Modelin Kesikli Süreçler İçin Türetilmesi

Modelin kesikli hali doğrudan (3.5) denklemindeki entegrallerin toplam ifadelerine dönüştürülmesi suretiyle bulunabilecektir. Bununla birlikte kesikli modelin Müftüoğlu tarafından 1978’ de verilmiş olan türetimi daha aydınlatıcı olacağı düşünülerek, yeni bir biçimde aşağıda verilmiştir.

Havza, erozif davranışı lineer olan bir sistem olsaydı askı maddesi konsantrasyonu C_m toplam hafıza süresince her birim zaman aralığındaki etkin yağışlara, x_i , bağlı olarak,

$$C_m = \sum_{i=1}^m a_{m-i} x_i \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilebilirdi. Burada m , hafıza uzunluğunun içerdği birim zaman aralığı sayısı, a_{m-i} ise $(m - i)$ ' inci zaman aralığındaki yağışın askı maddesi konsantrasyon değerine katkı oranını gösteren bir katsayıdır. Herhangi bir andaki askı maddesi konsantrasyonu yüzey ve kanal erozyonuna bağlıdır ki, bu da tutma, yüzeysel biriktirme, toprağın doygunluk derecesi gibi önceki yağışların nonlinear etkilerinin belirlediği toprak şartlarına, bir başka deyişle toprağın erozyona müsaitlik derecesine ve yüzeysel akışa geçen su miktarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle, a_{m-i} katsayıları sabit değildirler ve bunların haldeki ve önceki yağışların fonksiyonları olarak ifade edilmeleri gerekir. Yani,

$$a_{m-i} = \sum_{j=1}^m h_{m-i, m-j} x_j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.7)$$

Burada, $h_{m-i, m-j}$ yeni bir katsayıdır ve j ' inci zaman aralığındaki birim etkin yağışın tesiri altındaki havzada i ' inci zaman aralığındaki birim etkin yağışın katkı oranını temsil eder. (3.6) denklemindeki a_{m-i} yerine bu denklemdaki eşdeğeri konulursa,

$$C_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{m-i, m-j} x_i x_j \quad (3.8)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklem kısa ve daha kullanışlı bir notasyonla aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$C_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{i,j} x_i x_j \quad (3.9)$$

Bu denklemde birim askı madde eğrisinin ordinatlarını temsil eden h terimleri ve x yağış değerleri aynı yönde numaralandırılırken (3.8) denkleminde ters yönde numaralandırılmıştır.

3.1.3 Kesikli Modelin Özellikleri

Modelin kesikli hali de esas itibari ile sürekli halinin asli özelliklerine sahiptir. Kesikli olmasından kaynaklanan farklar aşağıda açıklanmıştır.

1) Modelin davranış fonksiyonu, $h_{i,j}$, her biri birim hacimde eski bir anlık etkin yağışın tesiri altındaki havzada herhangi bir birim etkin yağışa karşı havzanın “erozif” davranışını temsil eden bir askı maddesi konsantrasyon eğrileri ailesi olarak yorumlanabilir. Bu sebeple, model davranış fonksiyonu “ *iki boyutlu birim askı madde eğrisi*” olarak isimlendirilebilir.

2) Birim sediment eğrisi modellerinin en gelişkini sayılabilecek olan Willams’ın modeli (2.10 denk.), bu modelin

$$C_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^i h_{i,j} x_i x_j \quad (3.10)$$

şeklinde bir özel halinden ibarettir.

3) Havza, davranışı zamanla değişmeyen bir sistem olarak ele alındığında bu sistemin erozif davranışını temsil eden iki boyutlu askı maddesi eğrileri kümesi $\{h_{i,j}\}$ sabit bir kümedir. Bundan dolayı model, zamanla değişmeyen bir havza için gerçek zaman tahmin operatörü olarak kullanılabilir. Model $(m(m+1)/2)$ adet davranış fonksiyonu ordinatının, $h_{i,j}$, belirlenmesini gerektirmektedir.

3.2 Modellerin Tadili

Havza davranışının nonlineerliğinin bütün hafıza boyunca aynı şiddette olmadığı dikkate alındığında yukarıdaki modellerin lineer bir bileşen de içerecek şekilde yeniden düzenlenmeleri mümkündür. Daha önce belirtildiği gibi önceki yağışların yüzeysel akışlar ya da akarsu tarafından taşınmakta olan askı maddesi miktarına katkıları, toprağın erozyona müsaitlik başka bir deyişle hazır olması derecesi ile görülmektedir. Dolayısıyla bu gecikmiş etkilerin doğurduğu nonlinerliliğin, yağış-akım modellerinde belirtildiği gibi, zayıf olduğu ve lineerliliğe yaklaştığı kabul edilebilir. Hatırlanacağı üzere (bölüm 2.1.2) feyezan

hidrograflarının tahmininde alçalma bölgesinin ortalarından itibaren yağış- akış ilişkisinin lineer bir ifade ile temsil edilmesi yeterli olmaktadır. Hidrograflar ile askı maddesi eğrileri arasındaki benzerlik de askı maddesi eğrisi modellerinin aynı düşünce ile kısmen lineerleştirilebileceğini düşündürmektedir.

Yukarıda özetlenen bilgilerin ışığında havza davranışının, etkileri taban akımı şeklinde devam eden eski yağışlara karşı lineer ve haldeki ve hemen önceki yağışlara karşı ise ikinci dereceli bir fonksiyonel ile temsil edilmesi mümkün olduğu düşünülerek (3.5) denklemi aşağıdaki Şekilde değiştirilebilir.

$$C(t_2) = \int_0^{t_1} h_1(t-s_1)x(s_1)ds_1 + \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} h_2(t-s_1, t-s_2)x(s_1)x(s_2)ds_1ds_2 \quad (3.11)$$

Burada (0 - t₁), havzanın gecikmiş tepki periyodunu yani hafıza uzunluğunun eski geçmişe ait ilk bölümünü (t₁ - t₂) ise az gecikmiş ve ani tepki periyodunu yani hafızanın yakın geçmişe ait olan bölümünü kapsamaktadır. Açıkça görüldüğü gibi birinci periyot lineer, ikinci periyot ise nonlinear model hafızası uzunluklarını göstermektedir. Bunlara kısaca “*lineer*” ve “*nonlinear hafıza*” denilecektir.

Model davranış fonksiyonları h₁ (t - s₁) ve h₂ (t - s₁, t - s₂) sırasıyla anlık birim askı maddesi eğrisi ve iki boyutlu birim askı maddesi eğrisidir. Bunlar alışılmış anlık birim hidrograf ve iki boyutlu anlık birim hidrografa benzer Şekilde olup anlık yağışların askı maddesi eğrileridir. Burada, anlık deyiminin birim yağışlara ait olduğunun belirtilmesinde fayda vardır.

Tadil edilmiş modelin kesikli şekli (3.9) denkleminde olduğu gibi kullanışlı bir notasyonla,

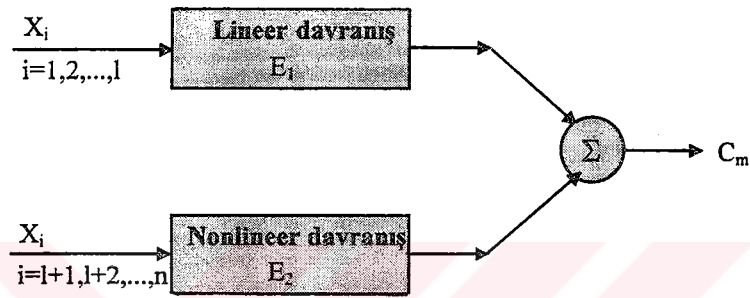
$$C_m = \sum_{i=1}^l h_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{i,j} x_{i+1} x_{j+1} \quad (3.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada l ve n sırasıyla lineer ve nonlinear hafızanın içerdiği birim zaman aralığı sayılarını, h_i ve h_{i,j}’ ler de yine sırasıyla birim askı madde eğrisi

ve iki boyutlu birim askı madde eğrisini temsil etmektedir. Tüm etkin geçmişin başka bir değişle modelin toplam hafızasının $m = 1 + n$ olduğu açıktır.

3.2.1 Modelin Özellikleri

Bu model esas itibari ile özel bir ikinci dereceli fonksiyonel dizidir. Bu model veya temsil ettiği sistemin blok diyagramı Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1 Havza Davranışında Modelin İşlevi

Halbuki ikinci derece fonksiyonel dizide (2.7 denk.) hem lineer hem de kuadratik bileşenler etkin geçmişi bir bütün olarak hesaba katar. Görülüyor ki genel fonksiyonel dizide gereğinden fazla sayıda davranış fonksiyonunun hesaplanması gerekmektedir. Mesela; bir günlük yağışın sebep olduğu yüzeysel akışın iki gün sürdüğü, toplam hafızası 20 gün olan bir havza düşünelim. Bu havza için genel bir ikinci derece fonksiyonel dizide 230 davranış fonksiyonu ordinatının belirlenmesi gerekmektedir. Buna karşılık, tadil edilmiş (3.12. denk.) model, sadece 18 davranış fonksiyonu ordinatı içermektedir. Bu durum tadil edilmiş iki boyutlu birim askı maddesi eğrisi modelinin önemli bir avantajıdır. Ayrıca bu model, yeterli serbestlik derecesine sahip olduğundan genel fonksiyonel diziden daha güvenlidir. Çünkü, aynı hafıza uzunluğuna sahip ikinci derece fonksiyonel dizi daha çok serbestlik derecesine sahip olduğu için daha yüksek bir uyum kabiliyeti gösterecektir. Fakat gereğinden yüksek olan bu uyum kabiliyeti, modelin kalibrasyonda kullanılan dataların taşıdığı

hatalardan daha fazla etkilenmesine sebep olur. Bu açıdan bakıldığında, yeterli uyum kabiliyetine sahip olan yeni modelin daha stabil olduğu söylenebilir.

Modeldeki bütün davranış fonksiyonları yağışların erozyona dolayısıyla da askı maddesi debisine olan katkılarını temsil etmektedir. Bu nedenle bunların negatif değerler alması mümkün değildir. Zira katkı ya vardır veya yoktur. Tabiatıyla bazılarının da sıfır olması mümkündür. Bu özellik model kalibrasyonunda bir kontrol imkanı sağlamaktadır. Halbuki genel fonksiyonel dizi için “fiziksel mümkünlik” diye bir özellik tanımlamak mümkün değildir.

3.3 Modellerin Kullanımı

Yağış, akım, askı maddesi konsantrasyonu gibi hidrometeorolojik büyüklüklere ait veriler çoğunlukla kesikli birer data olarak mevcuttur. Bu sebeple uygulamalarda, sürekli modellerin kesikli şekilleri kullanılır. Burada da sadece kesikli model ele alınacaktır.

(2.7), (3.9), ve (3.12) denklemleri ile verilen biçimlerdeki modeller yalnızca mevcut kayıtların uzatılmasında kullanabilir. Bununla birlikte, eğer model hafızasının en son birimindeki yağışla, hızlı tepkisi arasında bir gecikme (L) varsa model, gerçek zaman tahmin operatörü olarak da kullanılabilir. Bir başka ifadeyle, bu kullanım yağışla askı madde pik debisi arasında yeterli sürenin bulunmasını gerektirir. Bunun için de modele önceden tahmin süresini temsil etmek üzere kullanılacak bir sembol (L) ithal edilmelidir.

Tabiatıyla bu modeller ile ardışık tahminler üretmek mümkündür. Bu da, model başlangıcı ötelenmek suretiyle gerçekleştirilebilir. Modele öteleme sayısını gösterecek bir sayıcının da (c) ilavesi uygulamalarda kolaylık sağlayacaktır. Bu yeni parametrelerin ilavesi ile model,

$$C_{m+L+c} = \sum_{i=1}^L h_i x_{i+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n h_{i,j} x_{i+1+c} x_{j+1+c} \quad (3.13)$$

şeklinde daha genelleştirilmiş olarak yazılabilir.

Model, hem mevcut kayıtların uzatılmasında hem de gerçek zaman tahminleri için kullanılabilir. Ayrıca modelin filtre olarak da kullanılması mümkündür. Gerek askı maddesi gerekse yağmur verilerinin kaçınılmaz ölçme hataları taşıdığı bilinen bir gerçektir. Hatta, tabii şartlar yüzünden istenildiği zaman askı maddesi ölçümü yapılmamış da olabilir. Bu nedenle bariz olarak hatalı görünen veya eksik kalan data değerlerinin enterpolasyonla bulunması, başlangıçta bir çözüm gibi görünse de bu işin hatasız yapılma ihtimali oldukça zayıftır. İşte bu ve benzer durumlarda model filtre olarak kullanılabilir. Eğer çıktı datası kabul edilemez büyüklükte hata içeriyorsa model, önce orijinal data üzerinde kalibre edilir ve kalibre edilmiş bu model tahmin için kullanılır. Hatalı olduğu düşünülen datalar ilgili uyarlanmış değerleri ile değiştirilir ve yeni datalar üzerinde model tekrar kalibre edilerek tahminler için kullanılır. Bu yeni kalibrasyonun daha güvenilir sonuçlar vereceği düşünülebilir.

Yukarıda anlatılanlara ilave olarak model çıktılarında, havza özellik ve şartlarının zamanla değişmesinden ileri gelebilecek hataların da olacağı açıktır. Havzada geniş alanda bir ağaçlandırma ya da yangın gibi önemli değişiklikler olduğu zaman modelin yeni özelliklerini yansıtan datalar üzerinde yeniden kalibre edilmesi tahmin hatalarını azaltıcı bir etken olarak ayrıca dikkate alınmalıdır. Bunun yanında, sıcaklık, bitki örtüsü gibi bazı faktörler yaz - kış aylarına göre büyük farklılıklar gösterdiğinden bu tür mevsimlik değişimleri de dikkate almak için modelin, yaz ve kış periyotlarında ayrı ayrı kullanılması daha gerçekçi olacaktır.

3.4 Lineer Bir Akım - Askı Maddesi Modeli

Akarsuların genellikle yeterli akım ölçümleri mevcuttur. Ancak bazıları için yeterli yağış ölçümleri bulunmayabilir. Böyle durumlarda, yağış - askı maddesi yerine akım - askı maddesi verileri kullanılarak uygulanabilecek bir modelin pratikte faydalı olacağı açıktır.

Askı maddesi anahtar eğrilerinden söz ederken belirtildiği üzere debi ile askı maddesi konsantrasyonu arasında lineer ve tek değerli bir ilişki mevcut değildir ve aynı debi değerine yükselme fazında bir konsantrasyon değeri, alçalma fazında ise bir

başka konsantrasyon değeri isabet etmektedir. Bu sebeple önceki debilerin lineer bir ilişki içinde temsil edildiği bir model isabetli tahminler verebilir.

Bu düşüncelerin ışığı altında C_m askı maddesi konsantrasyonunun, geçmiş ve haldeki akımların lineer bir fonksiyonu olarak

$$C_m = \sum_{i=1}^m h_i Q_i \quad (3.14)$$

şeklindeki bir model ile sağlıklı şekilde tahmin edilebileceği düşünülmüştür.

Burada Q_i , indisile işaret edilen zaman aralığındaki debiyi h_i ise bu debinin askı maddesi konsantrasyonuna katkı oranını temsil eden bir katsayıdır. Bu model, özellik itibari ile bir kara-kutu modeli olup girdisi akım, çıktısı ise askı maddesi konsantrasyonu olan lineer bir modeldir. Bu durumda m hafızayı temsil eder. h_i katsayıları ise lineer davranış fonksiyonları olup askı maddesi eğrisinin ordinatlarını temsil etmektedir. Aslında bu model, yağış yerine akım datalarının kullanılması ile tadil edilmiş askı madde eğrisi modelinin (3.12 denk.) ilk terimi için gerçekleştirilecek bir model uygulamasından başka bir şey değildir.

Model akım kayıtları mevcut bir akarsuyun askı maddesi debisine ait datalarının tahmininde önemli bir araç olarak kullanılabilir. Yani kalibrasyon için yeterli uzunlukta akım ve askı maddesi datası varsa h_i katsayılarının optimal değerleri belirlenerek model, debiden askı maddesi konsantrasyonunun hesaplanabildiği bir formül gibi kullanılabilir. Modelin performansı, bütün benzer kara-kutu modellerinde olduğu gibi katsayıların tahminindeki başarı derecesine, bu da kullanılacak datanın doğruluk derecesine bağlıdır.

BÖLÜM 4

MODEL KALİBRASYONU

Askı maddesi tahminlerinin yapılabilmesi için önce modelin girdi ve çıktı dataları üzerinde yani etkin yağış ve askı maddesi dataları üzerinde kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyondan sonra yapılacak iş, bilinen etkin yağışlardan bilinmeyen askı maddesi değerlerini tahminden ibarettir. Bu işlem ise kalibre edilmiş modelin, her tahmin için yeniden uygulanması ile gerçekleştirilir.

Model kalibrasyonu, model hafızasının ve davranış fonksiyonlarının belirlenmesini gerektiren bir iştir. Nonlineer modellerin kalibrasyonu, lineer modellere göre daha karmaşık bir problem niteliğindedir. Buna rağmen problemin çözümü için pek çok metot geliştirilmiş ve bunların bazılarının hidrolojik alanda uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Konuyu ilk defa elektronik sistemlerin davranışları ile ilgili olarak inceleyen Wiener [62, 64] kernellerin uygun ortogonal fonksiyonlara açılabilceği fikrini ileri sürmüştür. Schetzen de [65] böyle bir açılımı Laguerre fonksiyonları kullanarak gerçekleştirmiştir. Wiener'in genel bir nonlineer sistemin tanımlanması için beyaz-Gaussian gürültü (White Gaussian noise) kullanılabileceğini ortaya atmasından sonra Lee ve Schetzen, [66] bu teklife dayanarak kros-korelasyon hesaplarıyla kernellerin belirlenmesinde bir metot geliştirmiş ve uygulamasını yapmışlardır.

Hidrolojide Jacoby [67] Wiener'in geliştirdiği nonlineer modeli 1966'da ilk olarak akarsu havzaları için uygulamıştır. Bu yöntemde akım gecikmelerini dikkate alan lineer elemanlar, Laguerre fonksiyonları kullanılarak teşkil edilmiş ve bunlar nonlineer bir polinomda paralel olarak birleştirilmiştir. Hino ve arkadaşları [68] günlük yağışların özellik itibarı ile Beyaz-Gaussian gürültüye benzer olduğunu kabul ederek 1971'de yapmış oldukları bir uygulamada (Japonya'da Kannawaga havzası için) Lee ve Schetzen'in geliştirdikleri metodu kullanmışlardır. Amorocho ve Brandstetter [69] 1971'de yapmış oldukları bir çalışma ile önce kernelleri ortogonal

sonlu dizi fonksiyonlarına açmak suretiyle problemin çözümünü ortogonal açılım katsayılarının belirlenmesine indirgemişler ve bu katsayılarla bağlı kernellerin açılımında Meixner fonksiyonlarını kullanmışlardır. Bidwell [70] 1971'de model girdisi değerlerini keyfi bir guruplamaya tabi tutarak bir değişken dönüşümü uygulamış, bu değişkenleri ikinci derece bir fonksiyonel dizi için kullanarak bir polinom denklemi elde etmiş ve kernelleri bu yeni denklemdeki katsayılar üzerinde belirlemiştir. Diskin ve Boneh [71] 1973 'deki çalışmalarında ikinci dereceden nonlinear bir sistem için davranış fonksiyonlarını, iteratif optimizasyon tekniğini kullanarak tayin etmişlerdir. Optimizasyon için amaç fonksiyonu, gözlenmiş ve tahmini değerler arasındaki sapma hatalarının karesinin toplamı şeklinde tanımlanmıştır. Kernellerin belirlenmesinde kullanılan bu metotlardan bazıları Amorocho'nun 1973 'deki bir çalışmasında [62] tartışılmış ve nonlinear hidrolojik sistemlerin analizi için genişçe bir teorik özet verilmiştir. Hidrolojide, daha sonra bu çalışmaları, 1975 ve 1976 'da Papazafiriou [49, 72], 1982'de Helweg ve diğerleri [73], 1987 'de Rao [74], 1991 'de Xia [75] ve Papamichail [76], 1992'de Kachroo ve Natele [77], 1994'de Liang ve digr. [78], Ahsan ve O'Conner [79] gibi araştırmacılar izlemiştir. Ülkemizde, hidrolojik sistemlerin analizi ile ilgili olarak ilk defa 1971'de birim hidrografın belirlenmesi konusuna Bayazıt [80] eğilmiş, nonlinear modeller üzerinde çalışmaları ise 1978, 1984 ve 1991 yıllarında Müftüoğlu [81, 82, 83] gerçekleştirmiştir.

Yukarıdaki çalışmaların genelinde havza modeli olarak uygulanan (2.7) denklemi ikinci dereceye kadar yani kuadratik terimden itibaren kesilerek kullanılmıştır. Bu çalışmada da havza modeli olarak ifade edilen (3.9) ve (3.12) denklemlerinin uygulama yöntemlerinin geliştirilmesi ve bunların hem kendi aralarında hem de (2.7) denklemi ve Williams modeli (2.10 denk.) ile karşılaştırılmaları amaçlanmaktadır.

Havza davranışını temsilde bu modeller davranış fonksiyonlarının, ortogonal polinom açılımının kullanılması ile yaklaşık olarak belirlenmesi mümkündür. Ancak, bu yöntemle bulunacak davranış fonksiyonu değerlerinin yaklaşık çözüm tekniğinden hangi oranda etkilendiklerini belirleyebilmek için herhangi bir metodun bulunmayışı, doğru bir karşılaştırma yapmaya engel gibi görünmektedir. Bu yüzden, davranış fonksiyonlarının tam değerlerinin bulunması bir

başka ifade ile problemin kesin çözüme kavuşturulması tercih edilen bir durumdur. Bunun için de regresyon analizinin uygulanması daha gerçekçi görüldüğünden çalışmada bu yöntemin kullanılması uygun görülmüştür.

Hatırlanacağı üzere model, havza davranışını tam olarak temsil eden matematik bir ifade olsaydı, kernellerin hesaplanması için model girdisi ve çıktısı olarak etkin yağış ve katı madde datası üzerinde bilinmeyen fonksiyon sayısı kadar denklemin geliştirilip çözülmesi yeterli olurdu. Tadil edilmiş iki boyutlu askı maddesi eğrisi modeli için bu denklem takımının oluşturulmasında,

$$\left\{ (1 + m) + \left(1 + \frac{n(n+1)}{2} \right) \right\} .$$

tane ardışık zaman aralığında ölçülmüş yağış ve

$$\left\{ 1 + \frac{n(n+1)}{2} \right\}$$

tane zaman aralığında ölçülmüş askı maddesi değerine ihtiyaç olurdu. Halbuki, modelin havza davranışını yaklaşık olarak temsil ettiği ve kalibrasyon için kullanılacak dataların da çeşitli hatalar taşıdığı bilindiğine göre davranış fonksiyonlarının, havza davranışını tam olarak yansıtacak nitelik ve uzunluktaki datalar üzerinde, optimum değerlerinin belirlenmesi gerekir. Tahmini ve gözlenmiş askı madde değerleri arasında en iyi uyumu sağlayacak bu davranış fonksiyonları “*optimum davranış fonksiyonları*” olacaktır. Optimize edilmiş bir model ile yapılacak tahminlerin, bazıları büyük hatalar taşısa da tahminlerin tamamının gözlenmiş değerlere en iyi yaklaşıklığı sağlayacağı söylenebilir.

Optimum bir modelin, öncelikle optimum sayıda davranış fonksiyonu içermesi beklenir. Bu çalışmada ileri sürülen modellerde, davranış fonksiyonları sayısını lineer ve / veya nonlinear hafıza uzunlukları belirleyecektir. Halbuki, genel fonksiyonel dizi modelde, hatırlanacağı üzere, bu sayıyı tüm hafıza tayin etmektedir. Model davranış fonksiyonlarının optimum değerlerinin hesaplanmasından önce, lineer ve nonlinear model bileşenlerinin kapsayacağı hafıza uzunlukları ve toplam

hafıza uzunluğu için en uygun değerlerin belirlenmesi gerekir. Bu işlemler için Müftüoğlu [82]'nin 1984'de geliştirdiği yöntem kullanılmıştır.

4.1 Hafızanın Belirlenmesi

Hatırlanacağı üzere erozyon oluşumunda etkili olan nemlilik derecesinin ve yüzeysel akışa geçen su miktarının, haldeki ve geçmişteki yağış şiddetinin nonlineer bir fonksiyonu olduğundan ve nonlineerliğin de dolaysız akış periyodunun önemli bir kısmında ihmal edilemeyecek şiddette olduğundan bahsedilmiştir. Nonlineer ve lineer hafıza ve toplam hafıza uzunluğu gerçekte değişkendir. Fakat, model hafızasının ve buna bağlı olarak da davranış fonksiyonlarının belirlenebilmesi için “ l ” ve “ n ” parametrelerinin sabit alınması zorunludur. Bu sebeple bu parametrelerin gerçek değerlerinden değil ancak optimum değerlerinden söz edilebilir.

Model hafıza uzunluğu gerekli olandan büyük olursa, davranış fonksiyonu sayısı da gerekenden fazla olacağı için modelin yeterinden fazla uyumlu olmasına yol açar. Bu durum ise modelin data hatalarından daha fazla etkilenmesine yani kalibrasyon sırasında data hatalarını da havzanın gerçek davranışını yansıtıyormuş gibi dikkate almasına, hiçbir etkisi olmayan geçmiş yağışları hesaba katmasına ve etkileri lineer sayılabilecek eski yağışları nonlineer davranış fonksiyonları ile hesaba katmasına, sebep olur. Böyle bir model, kalibrasyon için kullanılan dataya iyi bir uyum gösterebilir ancak havza davranışını doğru temsil etmeyeceği için yapılacak tahminler hatalı olur. Hafıza uzunluğu gerekenden küçük tutulan modellerin de havza davranışını iyi temsil etmesi beklenemez.

Model hafızasının l 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 kombinezonu için optimizasyon yapmak ve uygun modeli böylece bulmak gerekir. Herhangi bir zaman aralığındaki askı maddesi debisi o zaman aralığında ve daha önce meydana gelen etkin yağışların ürünü olduğundan, bu parametrelerin belirlenmesi için yağış ile askı maddesi konsantrasyonu arasındaki korelasyondan faydalanmak mümkündür.

Amacımız, herhangi bir zamandaki katı madde debisinin kaç tane geçmiş zaman aralığındaki yağışa bağımlı bulunduğunu belirlemek olduğuna göre yağış - askı maddesi korelogramı bu konudaki bilinmezliğe bir yaklaşım getirebilir. Süreci kesikli zamanda ele alırsak, korelogram ordinatları yağış ile askı maddesi debisi arasındaki fasılanın fonksiyonu olarak,

$$r_k = \frac{\left(\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i c_{i+k} \right) - \left(\frac{1}{(N-k)^2} \sum_{i=1}^{N-k} x_i \sum_{i=1}^{N-k} c_{i+k} \right)}{\left\{ \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i^2 - \frac{1}{(N-k)^2} \left(\sum_{i=1}^{N-k} x_i \right)^2 \right\}^{1/2} \left\{ \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} c_{i+k}^2 - \frac{1}{(N-k)^2} \left(\sum_{i=1}^{N-k} c_{i+k} \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad (4.1)$$

denklemini ile hesaplanır [84]. Burada, N korelogramın çizilmesi için kullanılan dataların uzunluğunu, k fasılayı, r_k ise korelasyon katsayısını göstermektedir.

Yağışlardan hemen sonra erozyonun yüksek değerlere ulaştığı ve zamanla tedricen azaldığı gözlemlerden bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, saatlik ya da günlük datalarla hesaplanacak korelasyon katsayısının, başlangıçta maksimum değere ulaşması, maksimumdan sonra ise önce ani daha sonra da yavaş-yavaş bir düşüş göstermesi beklenir. Korelogramın maksimum ordinatının görüldüğü fasıla, yağışların maksimum etkilerinin ne kadar bir gecikme ile meydana geldiğini gösterir. Korelogramdaki ani azalmanın sonu da nonlinear hafıza uzunluğunu belirler. Korelasyon katsayısının sıfır olduğu ilk fasıla değeri ise tüm hafıza uzunluğunu belirleyecektir. Korelasyon katsayısının rastlantı etkisi de taşınması muhtemeldir. Bu durumda l ve n uzunluklarının korelogramdan bulunan değerleri yaklaşık olacağı için bunlara yakın bir kaç değer arasından uygun olanının seçilmesi gerekmektedir. Yani model, hafıza parametrelerinin korelogramdan bulunan değerleri civarında değerler ile kalibre edilerek denenmeli ve optimal davranış fonksiyonları bulunmalıdır.

4.2 Davranış Fonksiyonu Optimum Değerlerinin Hesaplanması

Gerçek askı maddesi değerlerine en yakın tahminleri veren bir davranış fonksiyonları takımını elde edebilmek için tahmin hataları toplamını minimum yapmak gerekir. Bu çalışmada, tahmini ve gerçek katı madde değerleri arasındaki farkların kareleri toplamının yani karesel hatanın minimum yapılması amaçlanmıştır. Bu durumda amaç fonksiyonu

$$E = \sum_i (C_i - C'_i)^2 \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, C'_i tahmini C_i ise ölçülmüş konsantrasyon değerleridir. Bu fonksiyon ikinci derece bir model için

$$E = \sum_{c=0}^{K-m-L} \left[C_{m+L+c} - \left(\sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} \right) \right]^2 \quad (4.3)$$

şeklini alır. Açık olarak ifade edilecek olursa amaç, h_i ve $h_{i,j}$ davranış fonksiyonu ordinatlarının, E amaç fonksiyonunu minimum yapan değerlerinin bulunmasıdır. Burada K , kalibrasyon için kullanılan gözlemlerin sayısını göstermektedir. Benzer problemlerin çözümünde genellikle, en küçük kareler yöntemi diye bilinen [85, 86] bu yaklaşım kullanılmaktadır.

(4.3) denkleminin sağ tarafı h_i ve $h_{i,j}$ cinsinden belli bir kuadratik ifade olup h_i veya $h_{i,j}$ 'lerin herhangi birinin yeterince büyük tutulması yolu ile E 'nin istenilen oranda artırılması mümkündür. Başka bir deyişle, E için maksimum bir değer yoktur. Bu sebeple de denklemin tekil çözümü E 'nin minimum değerine karşılık gelen davranış fonksiyonları takımı olmaktadır. Böyle bir çözümün elde edilebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Burada, "*regresyon analizi*" olarak bilinen çözüm tekniği uygulanacaktır. Bu analiz için geliştirilecek denklem takımına normal denklemler veya regresyon denklemleri adı verilir. Denklemlerin elde edilişi ve farklı modeller için uygulanma esasları aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

4.2.1 Normal Denklemlerin Çıkarılması

Normal denklemlerin elde edilmesinde işlemlerin gelişimini kolayca görebilmek için daha kısa bir notasyon kullanılarak, (4.3) denklemi ile ifade edilen amaç fonksiyonu,

$$E = \sum_{c=0}^{K-m-L} [C - (H_1 + H_2)]^2 \quad (4.4)$$

veya açık olarak,

$$E = \sum_{c=0}^{K-m-L} [C^2 + H_1^2 + H_2^2 - 2C(H_1 + H_2) + 2H_1H_2] \quad (4.5)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada H_1 ve H_2 terimleri sırasıyla, lineer ve kuadratik fonksiyonellere karşılık gelen bileşenleri göstermektedir. Yani,

$$H_1 = \sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} \quad (4.6a)$$

$$H_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} \quad (4.6b)$$

Bu denklemlerde; h_i ve $h_{i,j}$ fonksiyonlarının E ' yi minimum yapan değerleri, E ' nin bunlara bağlı kısmı türevlerinin alınıp sıfıra eşitlenmesi sureti ile elde edilir. Kısmı türevler alındığında aynı h_i ; $h_{i,j}$ ve aynı x_i ; $x_i x_j$ terimleri ikişer defa geleceğinden bu karışıklığı önlemek maksadıyla " i " ve " i, j " indisleri için " α " ve " (β, ϕ) " gibi değişik indislerinin kullanılması gerekmektedir. Buna göre (4.5) ' in kısmı türevleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial E}{\partial h_\alpha} = \sum_{c=0}^{K-m-L} (H_1 + H_2 - C) \frac{\partial H_1}{\partial h_\alpha} = 0 \quad (4.7a)$$

$$\frac{\partial E}{\partial h_{\beta,\phi}} = \sum_{c=0}^{K-m-L} (H_1 + H_2 - C) \frac{\partial H_1}{\partial h_{\beta,\phi}} = 0 \quad (4.7b)$$

Fonksiyonların kısmi türevleri alınır,

$$\frac{\partial H_1}{\partial h_{\alpha}} = x_{\alpha+c} \quad \text{ve} \quad \alpha = 1, 2, \dots, l \quad (4.8a)$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial h_{\beta,\phi}} = x_{\beta+l+c} x_{\phi+l+c} \quad \text{ve} \quad \beta = 1, 2, \dots, n \quad (4.8b)$$

$$\phi = \beta, \beta + 1, \dots, n$$

elde edilir. Bu türev ifadeleri ve H_1 ve H_2 'nin (4.6) denklem takımı ile tanımlanan değerleri, (4.7a) ve (4.7b) denklemlerindeki yerlerine konup yeniden bir düzenleme yapılacak olursa aşağıdaki denklemler elde edilmiş olur.

$$\sum_{c=0}^{K-m-L} \left(\sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} x_{\alpha+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} x_{\alpha+c} \right) = \sum_{c=0}^{K-m-L} C_{m+L+c} x_{\alpha+c} \quad \text{ve} \quad \alpha = 1, 2, \dots, l \quad (4.9a)$$

$$\sum_{c=0}^{K-m-L} \left(\sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} x_{\beta+l+c} x_{\phi+l+c} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{i,j} x_{i+l+c} x_{j+l+c} x_{\beta+l+c} x_{\phi+l+c} \right) = \sum_{c=0}^{K-m-L} C_{m+L+c} x_{\beta+l+c} x_{\phi+l+c} \quad \text{ve} \quad \beta = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.9b)$$

$$\phi = \beta, \beta + 1, \dots, n$$

“Normal denklemler” olarak bilinen bu denklemler $1 + n(n+1)/2$ tane bilinmeyen davranış fonksiyonu sayısına eşit, lineer denklemden oluşan bir denklem takımını temsil ederler. Regresyon denklemleri diye bilinen bu denklem takımı matris notasyonu ile aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$[A][h] = [B] \quad (4.10)$$

Burada $[A]$ katsayılar matrisi, etkin yağış sürecinin 3. dereceye kadar oto-korelasyon fonksiyonlarından oluşmaktadır. Oto-korelasyon fonksiyonlarının simetri özelliği, yani $x_i x_j = x_j x_i$; $x_i x_j x_k = x_k x_j x_i = \dots$ oluşu sebebiyle katsayılar matrisi simetrik bir matris olmaktadır. Bu özellik, çift katlı toplamların alt sınırlarının $i = 1$ ve $j = i$ olarak ve diğer indisler için de $\beta = 1, 2, \dots, l$ ve $\phi = \beta, \beta+1, \dots, n$ olarak alınması sureti ile hesaba katılmıştır. Bunun, davranış fonksiyonlarının belirlenmesinde gerekli hesaplamaları kısaltacağı aşikardır. $[h]$, bilinmeyen davranış fonksiyonu ordinatlarının teşkil ettiği sütun matrisini göstermektedir. $[B]$ sütun matrisi ise etkin yağış ile askı maddesi konsantrasyonunun birinci ve ikinci derece kros-korelasyon fonksiyonlarını temsil etmektedir.

Hatırlanacağı üzere, yukarıdaki normal denklemler tadil edilerek geliştirilmiş model (3.12 denk.) için çıkarılmıştır. Modelin orijinal şekli olan (3.9 denklemi) için sağ tarafı aynı kalmak şartı ile (4.9b) denkleminin sadece sol tarafındaki ikinci terimi yeterli olacaktır ve nonlinear hafıza parametresi olan n yerine de m gelmelidir. Lineer bir model için ise normal denklemler, (4.9a) denkleminin sol tarafındaki ilk terimi ve sağ tarafının aynen alınması ile teşkil edilecektir.

Normal denklemler ikinci derece bir fonksiyonel dizi (2.7denk.) için de uygulanabilir haldedir. Bu durumda, toplam işaretlerinin üst sınırında " l " ve " n " ler yerine " m " yazılacak ve bütün indislerdeki l 'ler kaldırılacaktır. (veya sol taraftaki ilk toplam işaretlerinin üst sınırı olan " l " yerlerine " n " yazılması ile indislerdeki l 'ler kaldırılacaktır). Zaten (3.12) denklemindeki toplam işaretlerinin üst sınırı olan " l " ve " n " yerine " m " yazılması ve indislerdeki l 'lerin yok edilmesi halinde bu denklemin (2.7) denklemi ile aynı olduğu görülmektedir. Bu lineer denklemler takımının çözümü bilinmeyen davranış fonksiyonu, h_i ve $h_{i,j}$ ordinatlarının değerlerini verir. Bunlar bir ve iki boyutlu askı maddesi eğrileri olarak yorumlanan ve birim hidrograf ve iki boyutlu birim hidrograf gibi fiziksel açıdan mümkün fonksiyonlardır. Bu eğrilerin gerçekleşebilir bir eğri olduklarını garanti

edebilmek için bir lineer programlama uygulaması yapılabilir². Ancak bu çalışmada böyle bir uygulama yapılmamıştır.

4.3 Kalibrasyon için Kullanılacak Datanın Uzunluğu

Regresyon denklemlerinin tekil bir çözümünün olması için en az, davranış fonksiyonu ordinatları sayısı, model hafızasının içerdiği zaman aralığı sayısı ve tahmin süresinin içerdiği zaman aralığı sayısının toplamına eşit sayıda gözleme ihtiyaç vardır.

$$D_{\min} = m + L + 0 = m + L + \left[1 + n (n + 1) / 2 \right] \quad (4.11)$$

Bununla birlikte, daha önce de ifade edildiği üzere kalibrasyonda kullanılacak datanın havza davranışını yansıtmaları için mümkün mertebede çeşitli şiddette yağışların kombinezonlarını içermesi gerekir. Örneğin kısa süreli bir kalibrasyon periyodu üzerinde belirlenecek davranış fonksiyonları, havza davranışının yalnızca bir geçiş dönemini yansıtır olabilir. Bu sebeple kalibrasyon periyodunun mümkün olduğu kadar uzun tutulması faydalıdır. Ayrıca, kalibrasyon periyodunun yeterince uzun tutulması, bazı data hatalarının birbirlerini yok etmesi ihtimalini artırır. Fakat uzun süreli gözlem verileri, bazı önemli havza değişimlerini de yansıtabilir. Böyle bir durum için optimal uzunluğun hassas olarak belirlenmesi gerekir. Ayrıca kalibrasyondan önce yağış, akım ve askı maddesi gözlemleri arasında bariz bir tutarsızlığın bulunup bulunmadığının araştırılmasında da fayda vardır.

4.4 Geçmiş Etkin Yağışların Güncelleştirilmesi

(3.9) denkleminde ve (3.12) denklemi ile ifade edilen modelin ise nonlineer kısmında, herbir zaman aralığındaki etkin yağışın, önceki yağış değerleri ile çarpımlar halinde yer aldığı görülmektedir. Yağış sularının ise, tutma, yüzeysel akış

² İki boyutlu birim hidrografın gerçekleşebilir bir hidrograf olduğunu Müftüoğlu, 1991'deki bir çalışmada [83] göstermiş ve böyle bir uygulama için gerekli prosedürü vermiştir. Benzer bir uygulama iki boyutlu askı maddesi eğrisi için de gerçekleşebilir.

veya biriktirme ve zemin altına sızma gibi bütün safhalarda, bir kısmının hatta bazı durumlarda tamamının buharlaşarak kayboldukları bilinmektedir. Çünkü, havzadaki tutma ve yüzeysel biriktirme elemanlarının tümü ve zemin yüzeyi sürekli olarak buharlaşmaya maruz kalmaktadır. Dolayısıyla da bu nonlinear süreçler için yağışsız periyotların izlemiş olduğu bir periyottaki (yani potansiyel buharlaşmanın etkin yağıştan yüksek olduğu zaman aralıklarında) yağışın katkı oranının güncelleştirilmesi gerekir.

Güncelleştirme işlemi basit bir örnek ile daha iyi açıklanabilir. Şöyle ki; 4 tane zaman aralığına ait mesela, ikinci derece bir fonksiyonelde model hafızasının nonlinear bileşeni için 4 birim zamanı kapsayan periyodunda, yağış ve potansiyel buharlaşmanın aşağıdaki Tablo 4.1 de verildiği gibi olduğunu düşünelim.

Tablo 4.1 Güncelleştirilmiş Etkin Yağışlar (Örnek durum).

Enterval No	1	2	3	4
Yağış (Yağmur)	R_1	-	-	R_4
Buharlaşma	E_1	E_2	E_3	E_4
Etkin yağış	$x_1 = R_1 - E_1$	-	-	$x_4 = R_4 - E_4$
Güncelleştirilmiş Etkin Yağış	-	$x_1^* = x_1 - E_2$	$x_1^{**} = x_1^* - E_3$	-

Her bir zaman aralığındaki etkin yağış, o zaman aralığındaki yağıştan, buharlaşma miktarının çıkarılması şeklinde basit bir işlemle hesaplanır. Buna göre 2 'inci ve 3 'üncü zaman aralıklarında, yağış olmadığından herhangi bir etkin yağış da olmayacaktır.

Birinci zaman aralığı için güncelleştirilmiş yağış 2 'inci zaman aralığında $x_1^* = x_1 - E_2$, 3 'üncü zaman aralığında ise $x_1^{**} = x_1^* - E_3$ olacaktır. Etkin yağış, negatif olmayan bir süreç olduğundan eğer $R_i \leq E_i$ ise $x_i = 0$ 'dır. Benzer şekilde $x_i \leq E_{i+1}$ ise $x_i^* = 0$ olur.

Nonlinear hafıza parametresinin $n = 4$ olduğu bir model için bu dört entervali kapsayan nonlinear terim,

$$\sum \sum h_{i,j} x_i x_j = h_{1,1} x_1^2 + h_{1,4} x_1 x_4 + h_{4,4} x_4^2 \quad (4.12)$$

şeklinde olacaktır.

4.5 Modellerin Uygunluk Kriterleri

Genel olarak matematik modellerde, elde edilen sonuçlar ve model performansı değerlendirilirken, model çıktıları ile ölçülmüş değerler arasında görsel ve istatistiksel bir karşılaştırma yapılmakta ve bazı test kriterleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen modellerin kalibrasyon datasına olan uyumu ve gerçek tahminlerinin isabet derecesi yani modellerin performansı, ASCE Task Committee (1993) tarafından kabul edilmiş ve “*havza modellerinin değerlendirilme kriterleri*” adlı makalede [87] anlatılmış olan üç uygunluk kriteri kullanılarak değerlendirilecektir. Bunlar; “*root mean square error*” (RMSE), Nash ve Sutcliffe katsayısı (R^2) ve toplam değerlerin sapma yüzdesi (%D) veya hata oranı olarak tanımlanan kriterlerdir. Bunların matematiksel ifadeleri sırasıyla, aşağıda verilmiştir.

$$RMSE = \frac{1}{K - m - L} \left[\sum_{c=m+L}^K (C_c - C'_c)^2 \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{c=m+L}^K (C_c - C'_c)^2}{\sum_{c=m+L}^K (\bar{C}_c - C_c)^2} \quad (4.14)$$

$$D(\%) = \frac{\sum_{c=m+L}^K C_c - \sum_{c=m+L}^K C'_c}{\sum_{c=m+L}^K C_c} \quad (4.15)$$

Burada, C_c ve C'_c askı maddesi konsantrasyonunun gözlenmiş ve hesaplanmış değerlerini, $\bar{C}_c$ gözlenmiş ortalama askı maddesi konsantrasyonunu göstermektedir. L , m ve c ise hatırlanacağı üzere sırasıyla, gecikme süresini, hafıza uzunluğunu ve öteleme sayısını gösteren bir sayıcıyı temsil eden parametrelerdir.

4.6 Bilgisayar Programlaması ve Akış Şeması

Bu çalışmada geliştirilen modellerin çözümü için genel bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Programlama dili olarak MsQuick BASIC kullanılmıştır. Esası itibari ile programda, regresyon denklemleri olarak adlandırılan normal denklemlerin temsil ettiği denklem takımı çözülerek optimal davranış fonksiyonları hesaplanmakta, sonra da bu davranış fonksiyonları kullanılarak tahminler yapılmaktadır. Bu amaç için geliştirilen bilgisayar programının akış şeması Şekil A.1'de gösterilmiş olup programla birlikte çalışmanın sonunda Ek A olarak verilmiştir.

Genel olarak programın akışı üç ana bölüm ve alt-programlar şekliyle özetlenebilir. İlk iki bölüm, davranış fonksiyonlarının optimizasyonu için bazı matematiksel işlemler ve denklem takımına ait oto-korelasyon ve kros-korelasyon matrislerinin programlama dili ile teşkil edilmesini ve kurulan denklem takımının bir alt-program yardımıyla çözülerek model davranış fonksiyonlarına ait optimal değerlerin belirlenmesini içermektedir. Lineer denklem takımlarının çözümü için çeşitli yöntemler kullanılarak geliştirilmiş alt programlar vardır. Burada kullanılan alt-program (SUB.PRG.1000) [88]' nolu kaynakdan uyarlanarak geliştirilmiştir. Bütün işlemlerde katsayılar matrisinin simetri özelliği dikkate alınmıştır. Modellerin, özellikle nonlinear hafızalarının uzun olması halinde katsayılar matrisi büyük boyutlara varmaktadır. Simetri özelliği sayesinde bu matrisin yarısının kullanılabilir olması hesaplamaları ve işlem süresini kısaltmaktadır. Akış şeması Şekil A.1a da verilen optimizasyon programı lineer ve nonlinear modellerin davranış fonksiyonlarını hesaplayabilen genel bir yapıya sahip olup çeşitli varyasyonlar için de kullanılabilir bir özellik taşımaktadır.

Programın son kısmı ise hesaplanmış optimal davranış fonksiyonlarına bağılı olarak, tahmin işlemlerinin kurulan modeller için ardışık olarak uygulanması şeklinde oluşturulmuştur. Bu amaç için kullanılmak üzere geliştirilen programın akış şeması da Şekil A.1b de verilmiştir. Ayrıca burada, modellerin performansının değerlendirilebilmesi için hem tahminlerin hata oranları hem de gerçek ve tahmini toplam sediment konsantrasyonları hesaplatılmıştır.

Bu çalışmada alternatif çözümler gereği, bazı işlemlerin tekrarından doğabilecek zaman kaybının önlenmesi için uygulamalar safhasında kalibrasyon ve tahmin programı birlikte kullanılmıştır. Halbuki, kalibrasyon programı sadece, model davranış fonksiyonlarının belirlenmesi gerektiğinde bir kez kullanılır.



BÖLÜM 5

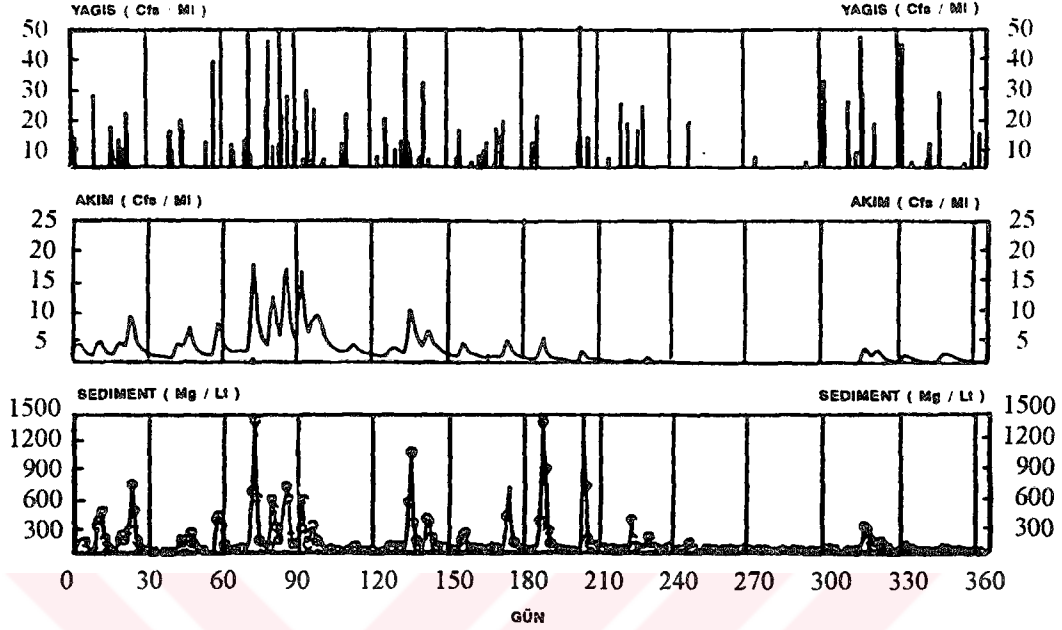
UYGULAMALAR

Önceki bölümlerde anlatılan modeller hakkında doğru tesbitlerin yapılabilmesi için uygulamalarda kullanılan datanın havza davranışını güvenilir olarak yansıtacak nitelikte, saatlik ya da günlük kayıtlardan oluşan sıhhatli ve yeterli uzunlukta bir data olması gerektiğini önceki bölümde söylemiştik. Hidrometeorolojik süreçlerin yerel dağılımının hesaba katılmamasından doğacak hataların küçük olması ve havzanın, komşu havzalardan gelen akımlardan etkilenmesinin ihmal edilebilecek mertebede kalması gibi şartlar, uygulamalar için elverişli nitelikte data teminini fevkalade zorlaştırmaktadır.

5.1 Uygulamada Kullanılan Datalar

Bu çalışmada geliştirilen modellerin ve tekniklerin uygulanması için önce, Türkiye'deki havzalara ait sediment ölçüm faaliyetleri ve yayınlanmış ölçüm kayıtları gözden geçirilmiştir. Türkiye havzalarında sediment ölçüm faaliyetleri 1958 'de ilk defa DSİ tarafından başlatılmış, sistematik ölçümler ise 1962 'de EİEİ tarafından başlatılıp devam ettirilmiştir [89]. Aylık olarak gerçekleştirilen bu ölçümlerin havza davranışını yansıtmaması yüzünden data arama faaliyetine girilmiş ve uzun bir literatür taraması sonunda bulunan Brown ve Choate [90] tarafından verilmiş olan dataların amacımız için çok uygun olduğu görülmüştür. Ancak bu dataların da temini mümkün olmamış ve testler için adı geçen makaledeki grafiklerden okunan datalar kullanılmıştır. Sözü edilen çalışmada verildiği şekliyle, yağış, akım ve askı maddesi konsantrasyonu eğrileri Şekil 5.1'de verilmiştir. Dataların temin edildiği havzaya ait açıklayıcı bilgiler elde edilememiş olmakla birlikte Carey ve arkadaşlarının 1988 'de hazırladıkları bir rapordan [91] anlaşıldığı üzere bu dataların

A.B.D 'de Tennessee Havzası içerisinde yer alan bir alt havzaya ait olduğu sanılmaktadır.



Şekil 5.1 Günlük yağış, Akım ve Askı Maddesi Konsantrasyon Eğrileri [90].

Etkin yağışın hesaplanmasına imkan sağlayacak meteorolojik dataların elde edilmesi mümkün olmadığı için uygulamalarda yağış datası doğrudan doğruya bahsedilen çalışmadan alındığı şekliyle kullanılmıştır.

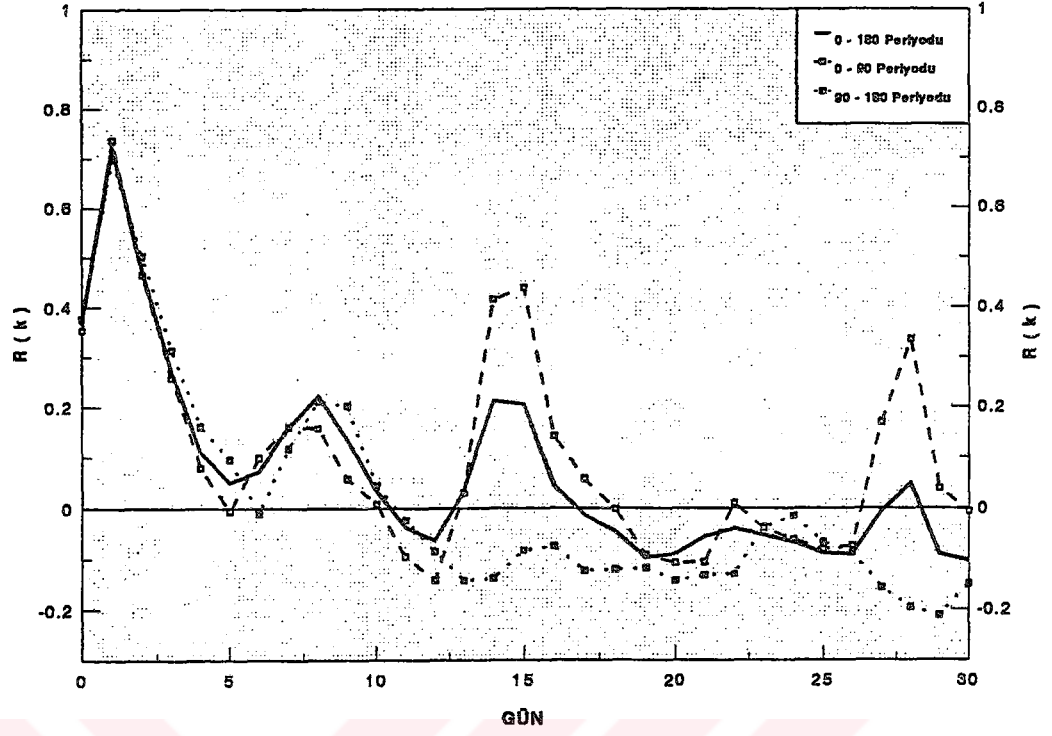
365 günlük bir süreyi kapsayan bu datalar, birisi modelin kalibre edildiği periyot diğeri ise test edildiği periyot olmak üzere önce, iki eşit bölüme ayrılmıştır. Başlangıçtaki uygulamalar dataların tutarlılık ve homojenliği konusunda dikkatli bir incelemeyi zorunlu kılmış, dikkatlice yapılan incelemeler bu dataların tutarsız denebilecek değerler içerdiğini göstermiştir. Datanın, mevsimler yüzünden homojen olmaması özellikle yaz aylarında etkisini göstermektedir. Etkin yağışların kullanılmayışı bu etkinin yer yer çok belirgin olmasına yol açmaktadır. Bu sebeplerle uygulamalar, 365 günlük datalar üzerinde değil de homojenliği bozduğu düşünülen bölümün bir çözüm için tamamı, diğer bir çözüm için de 120 günlük kısmı hariç tutularak geriye kalan 180 ve 240 günlük datalar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Askı maddesi tahminleri için geliştirilmiş bulunan modellerin akım tahminleri için de uygulanması mümkün olduğundan elde edilen datalar üzerinde akım tahminleri de yapılmıştır. Akım tahminlerinde, feyezan akımlarının daha önem kazandığı dikkate alınarak modellerin kalibrasyonu ve denenmeleri için bu akımların ağırlık taşıdığı (Şekil 5.1) 180 günlük periyoda ait datalar kullanılmıştır.

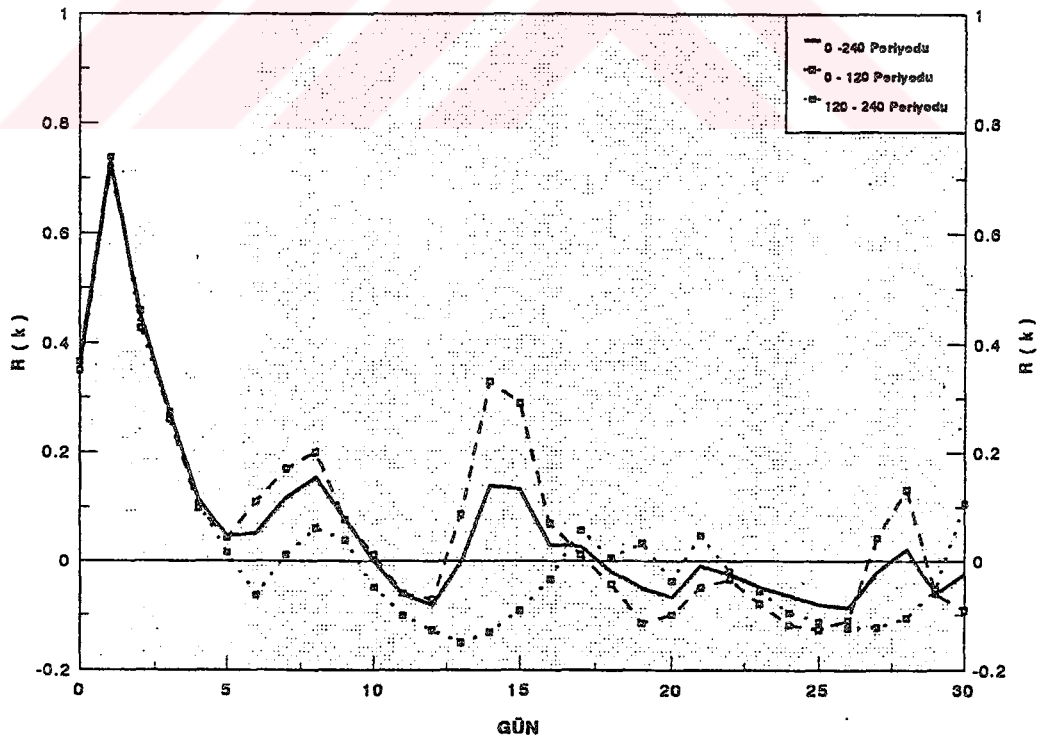
5.2 Hafıza Uzunluğu ve Tahmin Süresinin Belirlenmesi

Model hafızasını karakterize eden parametrelerin tayininde korelogramlardan faydalanılabileceğini 4. bölümde söylemiştik. Uygulamalarda da önce, yağış ve askı maddesi konsantrasyonu arasındaki korelasyon incelenmiş ve yaklaşık hafıza uzunluğunun belirlenmesine çalışılmıştır. Bu maksatla yağış-akım ve akım-askı maddesi korelasyon analizleri yapılarak, seçilen uygulama periyotlarına göre bütün kros-korelogramlar ayrı ayrı teşkil edilmiştir. Şekil 5.2 ve 5.3 'de sırasıyla, 0 - 90 ve 90 - 180 günlük periyotlar ile toplamda 0 - 180 günlük periyoda ve 0 - 120, 120 - 240 ile 0 - 240 günlük periyotlara ait yağış ve askı maddesi dataları arasında teşkil edilen korelogramlar görülmektedir.

Her iki şekil incelendiğinde, fiziksel bir anlam taşımayan ve rastlantı etkilerinden dolayı meydana geldiği düşünülen tali sayılabilecek pikler dışında genel olarak, korelogramların birbirlerine oldukça yakın bir gidişleri olduğu söylenebilir. Korelogramların en büyük değeri, yağışlara karşı maksimum erozyon etkilerinin bir günlük gecikme ile meydana geldiğini göstermektedir ki, bu da aranan büyüklüğün bir gün önceden tahmin edilmesine imkan sağlar. Örneğin yağış ve askı maddesi konsantrasyon piki arasındaki bu gecikme askı maddesi debisinin bir gün önceden tahmin edilebileceğini göstermektedir. Korelogramlardaki maksimum ordinattan sonra gözlenen ani azalmanın sonu, hafıza periyodunun nonlineer kısmının yaklaşık 3 gün olduğuna işaret etmektedir. Bu ani azalmanın sonrasında yine her iki şekildeki korelogramların trendi izlenecek olursa, bunların tedricen azaldığı ve belirli bir süre sonra da sıfır oldukları görülmektedir. Korelasyon katsayılarının yaklaşık ilk sıfır değerini aldığı süre 10 gün civarında olmaktadır. Bu durum, gecikmiş etkiler de dahil bütün askı maddesi taşınım süreci için havzanın yaklaşık 10 günlük bir hafızaya sahip olduğu izlenimini oluşturmaktadır.



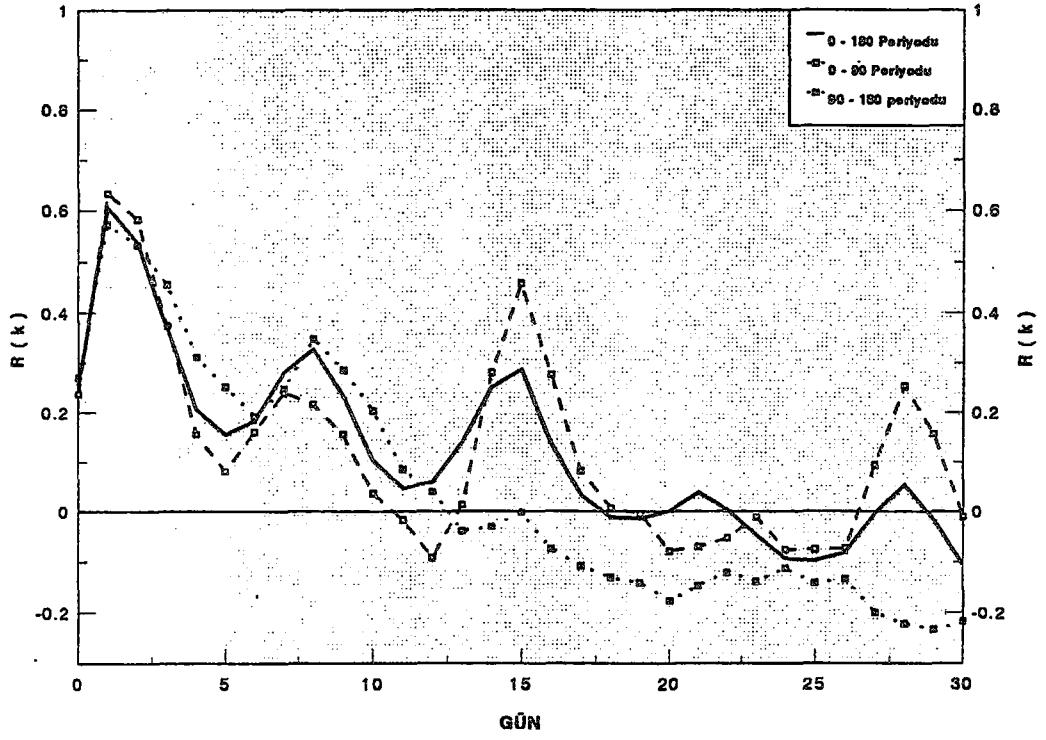
Şekil 5.2 Yağış - Askı Maddesi Kros - Korelogramları, (0 - 90, 90 - 180 ve 0 - 180 günlük periyotlar için).



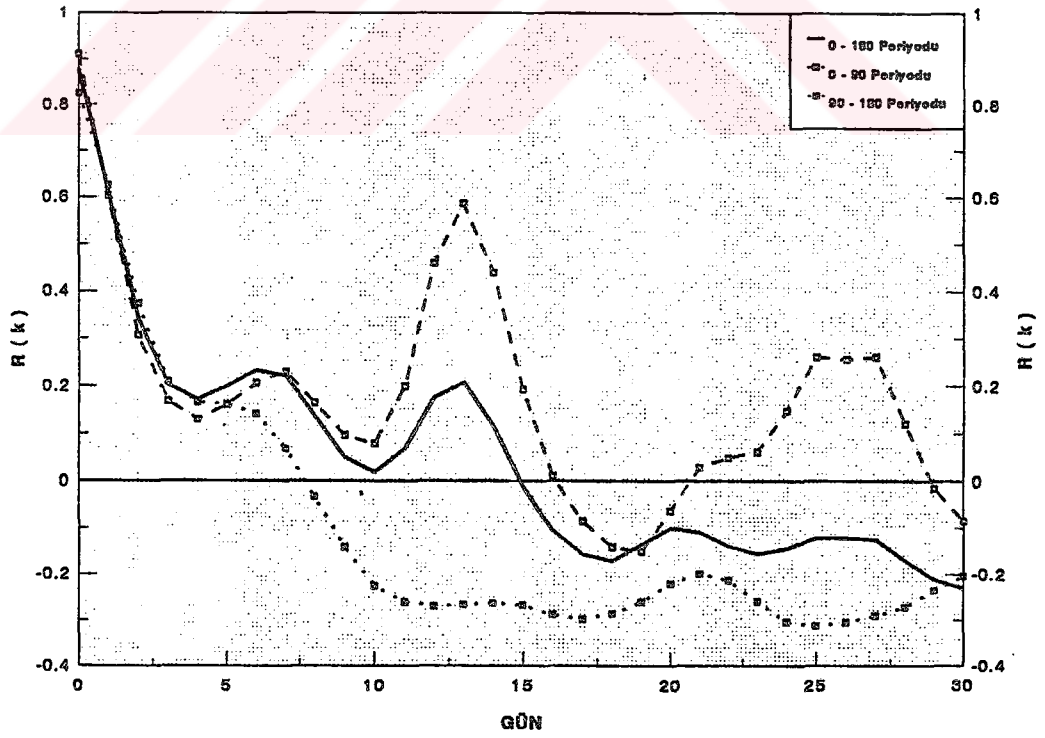
Şekil 5.3 Yağış - Askı Maddesi Kros - Korelogramları, (0 - 120, 120 - 240 ve 0 - 240 günlük periyotlar için).

Yağış-akım ve akım-askı maddesi arasında ayrı ayrı teşkil edilen kros-korelogramlara gelince bunlar, Şekil 5.4 ve 5.5 'de verilmiştir. Yukarıdaki açıklamalara benzer Şekilde bu korelogramlara da bakıldığında, kendi içlerinde birbirlerine yakın bir seyir takip ettikleri hemen görülmektedir. Şekil 5.4'e bakılırsa, korelogramların maksimumları bir gün değerine karşılık gelmektedir ki, bu da akımların bir gün önceden tahmin edilebileceğini gösterir. Maksimum korelasyon katsayılarının Şekil 5.2 veya 5.3 ile bir karşılaştırması yapıldığında daha düşük oluşu, bu havzada, yağışların bir gün sonraki akımlara olan etkisinin erozyona olan etkisinden daha az olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte, yağışlarla akımlar arasında iyi bir korelasyonun olduğu söylenebilir. Maksimum ordinatlardan sonraki 3 - 4 gün aralığında görülen ani düşüş, yüzeysel akış sürecinin yani nonlineer hafıza uzunluğunun 3 - 4 gün civarında seyrettiğine işaret etmektedir. Söz konusu ani azalmadan sonra ise korelasyon katsayısının 0 - 90 periyodu için 11 'inci, 90 - 180 için 13 'üncü ve 0 - 180 periyodu için 18 'inci günde yaklaşık sıfır değerini alması bu havzanın akım sürecinde etkili olan toplam hafıza uzunluğunun yaklaşık 11 - 18 gün arasında olabileceğini göstermektedir.

Akım ve askı maddesi korelogramlarında (Şekil 5.5) ise maksimum ordinatın yüksek oluşu (0 - 90 için 0.91, 90 - 180 için 0.82 ve 0 - 180 için 0.88) bu değişkenler arasında diğerindeki gibi çok iyi bir korelasyonun varlığına işaret etmektedir. Bu değerlerin hepsi sıfırcı günde gerçekleşmiştir. Bu durum ise bu havza için günlük ölçümler esas alındığında hidrograf ve askı maddesi konsantrasyon pikleri arasında herhangi bir gecikmenin olmadığını gösterir. Askı maddelerinin oluşumu ve taşınımı sürecinde hatırlanacağı üzere, daha çok havza ile ilgili fiziksel ve hidrolojik değişkenlerin etkileri söz konusu olduğundan, yataktaki akım ve beraberinde taşınan askı maddesi arasında bu tür bir etkileşim olmadığından pikler arasında da herhangi bir gecikmenin gerçekleşmediği sanılmaktadır. Bu taşınım sürecinde hafıza periyodunun da yaklaşık 7 - 16 gün arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Bu da askı maddesi tahminleri için akımların önceki değişimlerini dikkate alan (3.15) denkleminin anahtar eğrilerinden daha güvenilir sonuçlar verebileceği fikrini doğrular niteliktedir.



Şekil 5.4 Yağış – Akım Kros – Korelogramları, (0 - 90, 90 - 180 ve 0 - 180 günlük periyotlar için).



Şekil 5.5 Akım – Askı Maddesi Kros – Korelogramları, (0 - 90, 90 - 180 ve 0 - 180 günlük periyotlar için).

5.3 Hatalı Dataların İyileştirilmesi (Filtering)

Bölümün başında da bahsedildiği üzere, 240 günlük datalar üzerinde başlangıçta gerçekleştirilen uygulamalar, askı maddesi konsantrasyonuna ait bir veya iki günlük ölçümler için bazı hatalı değerlerin olabileceğini ortaya çıkarmıştır. Daha dikkatli bir inceleme bu dataların hatalı olduğu izlenimini kuvvetlendirmiştir. Bu sebeple, uygulamalar için kesin çözümlere geçmeden önce model bir filtre gibi kullanılmıştır. Yani, hatalı olduğu anlaşılan datalar yeniden tayin edilerek belirlenmiş, model düzeltilmiş datalar üzerinde yeniden kalibre edilmiştir. Böylece tekrar kalibre edilmiş modelin uygulanması ile tahminlerde daha iyi bir performans elde edilmiştir. Bununla birlikte, diğer uygulanma periyotlarında (180 günlük datalar) hatalı düşünülebilecek veriler görülmediği için modellerin filtre olarak kullanılmasına gerek duyulmamış ve tahminler direkt olarak orijinal datalar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

5.4 Uygulamalarda Esas Alınan Modeller ve Sonuçları

Bu çalışmada esas alınan model tipleri şunlardır;

- 1) İki boyutlu birim askı maddesi eğrisi modeli,
- 2) Tadil edilerek geliştirilmiş (1nolu modelden) askı maddesi eğrisi modeli,
- 3) Klasik lineer model,
- 4) İkinci derece fonksiyonel dizi,
- 5) Willams'ın "*birim sediment eğrisi*" modeli.

Önceki bölümlerde elde edilmiş olan bu modeller, daha kolay hatırlanmaları ve uygulanma sonuçlarının kolayca takip edilebilmesi için denendikleri periyotlar ile hangi tahminlerde kullanıldıklarına bağlı olarak Tablo 5.1'de toplu halde verilmiştir. Gerçekleştirilen uygulamalar aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

5.4.1 Davranış Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Bütün modeller önce 180 günlük yağış ve askı maddesi dataları üzerinde hafıza periyotları (m), 9, 10 ve 11 gün alınmak sureti ile denenmiştir. Tadil edilmiş

askı maddesi eğrisi modeli nonlinear hafıza periyodu (n), 2, 3 ve 4 gün alınarak uygulanmıştır. Her bir uygulanma periyodu için modeller önce birinci bölüm data üzerinde (0 - 90 gün) kalibre edilmiş ve ikinci bölüm data üzerinde (90 - 180 gün) denenmiştir. Uygulamalar kalibrasyon ve test periyotları yer değiştirilerek tekrarlanmıştır. Tadil edilmiş modelin uygulamaları 9, 10 ve 11 günlük toplam hafıza uzunluklarının her biri için lineer ve kuadratik (nonlinear) hafıza elemanlarının üç değişik kombinezonu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Bütün bu işler, 0 - 120 ve 120 - 240 gün şeklinde bölünen periyotlara ait datalar üzerinde de tekrarlanmıştır. 180 günlük datalar haricinde ayrıca seçilen bu periyotlar için uygulamaların yapılmasındaki asıl amaç, mevsimlik değişimlerin tahminlerde doğuracağı etkileri görmek ve bir karşılaştırma yapmaktır.

Tablo 5.1 Uygulamalarda Esas Alınan Model Tipleri ve Kullanımı.

Model No	Modelin Kullanımı	Data	Seçilen Periyot	Tahminler
1	$C_{m+L+c} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{ij} x_{i+c} x_{j+c}$	Yağış ve Askı Maddesi	0 - 180	Askı Maddesi
2	$C_{m+L+c} = \sum_{i=1}^l h_i x_{i+c} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n h_{ij} x_{i+l+c} x_{j+l+c}$	Yağış, akım ve Askı Maddesi	0 - 180 ve 0 - 240	Askı maddesi ve Akım
3*	$C_{m+L+c} = \sum_{i=1}^m h_i x_{i+c}$	Yağış, akım ve Askı Maddesi	0 - 180	Askı Maddesi ve Akım
4	$C_{m+L+c} = \sum_{i=1}^m h_i x_{i+c} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{ij} x_{i+c} x_{j+c}$	Yağış, akım ve Askı Maddesi	0 - 180	Askı Maddesi ve Akım
5**	$C_{m+L+c} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^i h_{ij} x_{i+c} x_{j+c}$	Yağış ve Askı Maddesi	0 - 180	Askı Maddesi

* Bu modelde x_i 'ler yerine Q_i yazıldığında lineer bir akım-askı maddesi modeli olarak (3.14 denk.) verilen modelin elde edileceği açıktır.

** Willams'ın modeli uygulama kolaylığı için iki boyutlu birim askı maddesi eğrisi modelinin özel hali olarak yazılmıştır.

Ayrıca bütün uygulamalarda, modellerin performansı için seçilmiş olan üç uygunluk kriteri de kullanılmıştır. Bunların 180 ve 240 günlük periyotlara ait tahminlerdeki hata miktarları Tablo 5.2 ve Tablo 5.3 de ve kalibrasyon ve test periyotlarında toplam konsantrasyon değerleri Tablo 5.4 ve 5.5 de verilmiştir. Bu tahminlerde 4 günlük nonlinear hafıza uzunluğu için bulunan sonuçlar, diğerleri ile karşılaştırıldığında iyi bir netice vermediği için tablolarda verilmesine gerek duyulmamıştır.

Yukarıdaki tahminlerin dışında, lineer modelle gerçekleştirilen uygulamalar benzer şekliyle akım ve askı maddesi dataları üzerinde de denenmiştir. Buradaki amaç hem denklem (3.14) olarak ileri sürülen akım-askı maddesi modelinin bir uygulamasını gerçekleştirmek hem de yağış ve askı maddesi dataları üzerinde denenilen lineer modelin sonuçları ile bir karşılaştırma yapmaktır. Bunun için de sadece 0 - 180 periyodu yeterli görülmüştür. Bu halde model lineer hafıza uzunluğu 7 ile 16 arasında ve gecikme süresi $L = 0$ alınarak denenmiştir.

Uygulamalardaki asıl amaç, askı maddesi tahminleri olmakla birlikte çalışmada esas alınan modellerin akım tahminleri için de uygulanması mümkün olduğu için bütün bu modellerle gerçekleştirilen uygulamalar bir deneme maksadıyla akım tahminleri için de tekrarlanmıştır. Ancak, bu tahminlerde yalnız feyzan akımlarının daha çok ağırlık taşıdığı 180 günlük bölüme ait dataların kullanılması uygun görülmüştür. Bu datalar da 0 – 90 ve 90 - 180 günlük bölümlere ayrılmış ve toplam hafıza uzunluğunun (m) 11 - 18 gün arasında değiştiği dikkate alınarak, modellerin, önce birinci bölüm data üzerinde kalibrasyonu sonra da ikinci bölüm data üzerinde testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı işlemler, periyotlar değiştirilerek tekrarlanmıştır. Tadil edilmiş model için ise nonlinear hafıza periyodu (n), 3 ve 4 gün alınarak denemeler yapılmıştır. Modellerin performansı ile ilgili bütün uygunluk kriterleri bu uygulamalarda da kullanılmıştır. Bunların sonuçları Tablo 5.6 ve 5.7 'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Askı Maddesi Tahminlerinde Kalibrasyon ve Test Periyotlarına Ait Modellerin Uygunluk Kriterleri, (180 Günlük Datalar İçin).

Model	Model Parametreleri				Verimlilik Kriterleri					
					RMSE		R ²		D(%)	
	L	n	m	NRFO*	Kalib. Periyodu	Test Periyodu	Kalib. Periyodu	Test Periyodu	Kalib. Periyodu	Test Periyodu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kalibrasyon Periyodu: 0-90, Test Periyodu: 90-180										
Orjinal Model	--	9	9	45	4.56	15.38	0.97	0.80	4.95	-19.39
	--	10	10	55	3.93	14.30	0.98	0.83	3.18	-12.78
	--	11	11	66	2.38	22.31	0.99	0.59	0.75	-20.23
Tadil Edilmiş Model	7	2	9	10	8.07	5.08	0.92	0.98	0.02	-6.15
	8	2	10	11	7.58	5.18	0.93	0.98	0.19	-3.87
	9	2	11	12	7.60	5.23	0.93	0.98	0.00	-3.34
	6	3	9	12	8.91	5.28	0.90	0.98	3.33	1.11
	7	3	10	13	8.69	5.48	0.91	0.97	3.44	3.49
	8	3	11	14	8.77	5.52	0.91	0.98	3.30	2.96
Lineer Model	9	--	9	9	11.51	8.69	0.84	0.94	-6.78	-23.90
	10	--	10	10	10.94	9.16	0.86	0.93	-6.11	-20.11
	11	--	11	11	11.05	9.28	0.86	0.93	-5.97	-21.17
Fonksiyonel Dizi	--	--	9	54	2.27	12.42	0.99	0.87	-0.35	-23.65
	--	--	10	65	1.33	16.26	1.00	0.78	-0.30	-23.52
	--	--	11	77	22.60	34.55	0.41	0.02	-48.08	-86.70
Williams Modeli	--	--	9	9	10.46	6.26	0.87	0.97	10.06	19.70
	--	--	10	10	10.01	7.02	0.88	0.96	10.41	22.22
	--	--	11	11	10.09	6.96	0.88	0.96	10.27	20.28
Kalibrasyon Periyodu: 90-180, Test Periyodu:0-90										
Orjinal Model	--	9	9	45	3.17	46.43	1.00	-0.08	5.76	-48.52
	--	10	10	55	2.17	54.79	1.00	-0.47	3.06	-63.04
	--	11	11	66	1.47	49.75	1.00	-0.18	1.46	-54.63
Tadil Edilmiş Model	7	2	9	10	4.60	8.92	0.99	0.96	0.37	6.09
	8	2	10	11	4.62	8.76	0.99	0.96	0.23	4.91
	9	2	11	12	4.58	8.94	0.99	0.96	-0.66	3.48
	6	3	9	12	4.41	11.94	0.99	0.93	5.73	2.09
	7	3	10	13	4.26	12.81	0.99	0.92	4.16	1.12
	8	3	11	14	4.30	13.02	0.99	0.92	4.03	0.02
Lineer Model	9	--	9	9	7.89	12.73	0.97	0.92	-8.38	6.95
	10	--	10	10	7.78	13.11	0.97	0.92	-10.09	4.80
	11	--	11	11	7.83	13.38	0.97	0.91	-10.72	4.22
Fonksiyonel Dizi	--	--	9	54	2.12	41.69	1.00	0.13	1.98	-35.44
	--	--	10	65	1.36	61.48	1.00	-0.85	1.08	-40.31
	--	--	11	77	0.77	436.28	1.00	-0.89	0.88	-649.80
Williams Modeli	--	--	9	9	5.83	10.83	0.99	0.94	16.65	7.52
	--	--	10	10	5.88	11.05	0.99	0.94	16.50	6.90
	--	--	11	11	5.90	11.20	0.99	0.94	15.95	6.85

*NRFO, Davranış Fonksiyonu Ordinatları.

Tablo 5.3 Askı Maddesi Tahminlerinde Kalibrasyon ve Test Periyotlarına Ait Modellerin Uygunluk Kriterleri, (240 Günlük Datalar İçin)

Model	Model Parametreleri				Verimlilik Kriterleri					
					RMSE		R ²		D(%)	
	<i>l</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	NRFO*	Kalib. Periyodu	Test Periyodu	Kalib. Periyodu	Test Periyodu	Kalib. Periyodu	Test Periyodu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kalibrasyon Periyodu: 0-120, Test Periyodu: 120-240.										
Orjinal Model	--	9	9	45	4.95	10.68	0.95	0.87	7.99	4.53
	--	10	10	55	4.26	11.53	0.96	0.85	6.11	2.78
	--	11	11	66	3.60	13.27	0.97	0.81	5.36	2.82
Tadil Edilmiş Model	7	2	9	10	6.19	5.17	0.92	0.97	-0.23	1.85
	8	2	10	11	5.92	5.11	0.93	0.97	-0.07	2.48
	9	2	11	12	5.94	5.17	0.93	0.97	-0.17	2.88
	6	3	9	12	6.76	5.41	0.91	0.97	2.80	5.04
	7	3	10	13	6.68	5.46	0.91	0.97	2.87	5.89
	8	3	11	14	6.74	5.50	0.91	0.97	2.86	6.32
Lineer Model	9	--	9	9	9.14	8.79	0.83	0.91	-5.90	-5.65
	10	--	10	10	8.91	8.93	0.84	0.91	-5.52	-5.34
	11	--	11	11	8.98	8.98	0.84	0.91	-5.37	-5.16
Fonksiyonel Dizi	--	--	9	54	3.03	10.00	0.98	0.89	-1.15	-2.52
	--	--	10	65	2.42	10.16	0.99	0.89	-0.67	-0.70
	--	--	11	77	1.17	10.46	1.00	0.88	-0.60	-5.20
Kalibrasyon Periyodu: 120-240, Test Periyodu: 0-120.										
Orjinal Model	--	9	9	45	3.89	29.46	0.99	0.37	11.00	-6.24
	--	10	10	55	3.57	36.54	0.99	0.05	8.86	-16.48
	--	11	11	66	3.23	25.61	0.99	0.54	6.63	-16.22
Tadil Edilmiş Model	7	2	9	10	5.01	6.67	0.99	0.97	3.47	0.46
	8	2	10	11	4.98	6.56	0.99	0.97	3.49	-0.96
	9	2	11	12	5.00	6.61	0.99	0.97	3.13	-1.85
	6	3	9	12	5.03	7.97	0.99	0.95	7.54	3.49
	7	3	10	13	4.98	8.41	0.99	0.95	6.65	1.38
	8	3	11	14	5.01	8.45	0.99	0.95	6.61	0.60
Lineer Model	9	--	9	9	8.63	9.36	0.96	0.94	-3.88	-4.51
	10	--	10	10	8.67	9.54	0.96	0.94	-4.44	-5.91
	11	--	11	11	8.73	9.52	0.96	0.94	-4.26	-5.52
Fonksiyonel Dizi	--	--	9	54	2.75	23.16	1.00	0.61	3.19	1.84
	--	--	10	65	2.12	21.80	1.00	0.66	1.99	16.11
	--	--	11	77	1.58	27.97	1.00	0.45	0.86	10.76

*NRFO Davranış Fonksiyonu Ordinatları.

Tablo 5.4 Kalibrasyon ve Test Periyotlarında Gerçek ve Tahmini Toplam Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri, (180 Günlük Datalar İçin).

Model	Model Parametreleri			Toplam Askı Maddesi Hacmi (ml/t)											
				Kalibrasyon 0-90 gün		Test 90-180 gün		Kalibrasyon 90-180 gün		Test 0-90 gün					
	<i>I</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
Original Model	--	9	9	17092	16246	9620	11485	9620	9096	17092	25385				
	--	10	10	16827	16291	9410	10612	9410	9122	16827	27435				
	--	11	11	16472	16348	9240	11109	9240	9105	16472	25470				
Tadil Edilmiş Model	7	2	9	17092	17089	9620	10211	9620	9585	17092	16051				
	8	2	10	16827	16794	9410	9774	9410	9389	16827	16001				
	9	2	11	16472	16472	9240	9549	9240	9301	16472	15899				
	6	3	9	17092	16523	9620	9513	9620	9069	17092	16735				
	7	3	10	16827	16248	9410	9081	9410	9018	16827	16639				
	8	3	11	16472	15929	9240	8967	9240	8867	16472	16469				
	9	--	9	17092	18251	9620	11920	9620	10427	17092	15909				
	10	--	10	16827	17855	9420	11302	9420	10359	16827	16019				
Lineer Model	11	--	11	16472	17456	9240	11196	9240	10231	16472	15777				
	--	--	9	17092	17252	9620	11896	9620	9429	17092	23149				
Fonksiyonel Dizi	--	--	10	16827	16878	9410	11623	9410	9308	16827	23610				
	--	--	11	16472	24392	9240	17252	9240	9159	16472	123507				
Williams Modeli	--	--	9	17092	15372	9620	7724	9620	8018	17092	15806				
	--	--	10	16827	15076	9410	7319	9410	7857	16827	15667				
	--	--	11	16472	14780	9240	7366	9240	7770	16472	15350				

Tablo 5.5 Kalibrasyon ve Test Periyotlarında Gerçek ve Tahmini Toplam Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri, (240 Günlük Datalar İçin).

Model	Model Parametreleri			Toplam Askı Maddesi Hacmi (ml/lt)											
				Kalibrasyon 0-120 gün		Test 120-240 gün		Kalibrasyon 120-240 gün		Test 0-120 gün		Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini
				Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini	Gerçek	Tahmini				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
Original Model	--	9	9	21272	19573	15065	14383	15065	13408	21272	22600				
	--	10	10	21007	19723	14995	14579	14995	13666	21007	24470				
	--	11	11	20652	19546	14935	14514	14935	13945	20652	24002				
Tadil Edilmiş Model	7	2	9	21272	21322	15065	14786	15065	14543	21272	21173				
	8	2	10	21007	21021	14995	14622	14995	14471	21007	21209				
	9	2	11	20652	20688	14935	14505	14935	14468	20652	21035				
	6	3	9	21272	20677	15065	14306	15065	13929	21272	20529				
	7	3	10	21007	20404	14995	14112	14995	13999	21007	20717				
	8	3	11	20652	20061	14935	13995	14935	13948	20652	20527				
Lineer Model	9	--	9	21272	22527	15065	15916	15065	15650	21272	2231				
	10	--	10	21007	22168	14995	15795	14995	15660	21007	22248				
	11	--	11	20652	21761	14935	15705	14935	15572	20652	21792				
Fonksiyonel Dizi	--	--	9	21272	21517	15065	15444	15065	14585	21272	20880				
	--	--	10	21007	21147	14995	15100	14995	14696	21007	17622				
	--	--	11	20652	20776	14935	15712	14935	14807	20652	18829				

Tablo 5.6 Akım Miktarları Tahmininde Kalibrasyon ve Test Periyotlarına Ait Modellerin Uygunluk Kriterleri, (180 Günlük Datalar İçin).

Model	Model Parametreleri				Verimlilik Kriterleri					
	l	n	m	NRFO*	RMSE		R ²		D(%)	
					Kalib. Periyodu	Test Periyodu	Kalib. Periyodu	Test Periyodu	Kalib. Periyodu	Test Periyodu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kalibrasyon Periyodu: 0-90, Test Periyodu: 90-180.										
Orjinal Model	--	13	13	91	1.83	6.96	-20.69	-236.15	-82.99	-1106
	--	14	14	105	4.78	84.84	-143.59	-34382	-380.57	-6866
	--	15	15	120	2.29	21.86	-31.31	2229.25	-142.19	-2889
Tadil Edilmiş Model	12	3	15	18	0.06	0.07	0.98	0.98	3.52	2.77
	13	3	16	19	0.06	0.06	0.98	0.99	3.01	0.70
	14	3	17	20	0.06	0.05	0.98	0.99	2.94	0.50
	15	3	18	21	0.06	0.06	0.98	0.99	2.92	0.98
	11	4	15	22	0.09	0.08	0.96	0.96	5.25	5.77
	12	4	16	23	0.08	0.08	0.97	0.97	4.63	3.10
	13	4	17	24	0.08	0.08	0.97	0.97	4.27	1.85
	14	4	18	25	0.09	0.07	0.97	0.97	4.43	3.57
Lineer Model	15	--	15	15	0.11	0.10	0.92	0.96	-1.34	-10.74
	16	--	16	16	0.10	0.10	0.94	0.96	-2.22	-14.69
	17	--	17	17	0.10	0.10	0.94	0.96	-2.35	-15.77
	18	--	18	18	0.10	0.10	0.94	0.96	-2.08	-15.41
Fonksiyonel Dizi	--	--	12	90	3.73	4.70	-91.58	-109.79	-381.67	837.88
	--	--	13	104	8.56	13.37	-473.54	-873.54	-808.24	2515.6
	--	--	14	119	4.86	8.12	-148.04	-313.70	-469.43	-1330.0
Kalibrasyon Periyodu: 90-180, Test Periyodu: 0-90.										
Orjinal Model	--	13	13	91	28.46	4362	-1.980	-532314	-3761	-33.00
	--	14	14	105	3.56	49.21	-29.24	-6588	-296.95	-4648
	--	15	15	120	2.10	13.52	-3.34	484.97	-278.75	-1198
Tadil Edilmiş Model	12	3	15	18	0.04	0.10	1.00	0.97	5.12	8.16
	13	3	16	19	0.04	0.09	1.00	0.98	3.84	8.02
	14	3	17	20	0.04	0.09	1.00	0.98	3.52	7.59
	15	3	18	21	0.04	0.09	1.00	0.98	3.07	7.20
	11	4	15	22	0.05	0.20	0.99	0.89	6.54	2.14
	12	4	16	23	0.05	0.20	0.99	0.89	5.00	0.95
	13	4	17	24	0.05	0.20	1.00	0.90	4.61	1.31
	14	4	18	25	0.05	0.20	1.00	0.89	4.07	0.09
Lineer Model	15	--	15	15	0.06	0.16	0.99	0.93	-1.67	8.30
	16	--	16	16	0.06	0.15	0.99	0.94	-2.35	8.05
	17	--	17	17	0.06	0.16	0.99	0.94	-1.99	8.20
	18	--	18	18	0.06	0.16	0.99	0.94	-1.76	8.59
Fonksiyonel Dizi	--	--	12	90	3.12	105.30	-23.37	-3.3166	-361.45	-9360.8
	--	--	13	104	1.79	57.06	-6.81	-9067	-254.36	-4222
	--	--	14	119	4.34	138.80	-43.90	52405	-527.65	-10286

*NRFO Davranış Fonksiyonu Ordinatları.

5.4.2 Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Modellerin performansı ile ilgili Tablo 5.2 ve 5.3'deki hata miktarlarına ve Tablo 5.4 ve 5.5 'deki toplam tahmini ve gerçek askı maddesi konsantrasyon değerlerine bakıldığında en iyi tahmin sonuçlarının her iki periyot için de $l = 8$ ve $n = 2$ alınarak tadil edilmiş iki boyutlu askı maddesi eğrisi modeli ile elde edildiği görülecektir. Nonlineer hafızada etkin periyodun 2 gün oluşu mevcut yağışların erozyona olan katkı oranlarının, başka bir ifade ile havzadaki nonlineer etkilerin, 2 gün sürdüğüne işaret etmektedir. Bunlar da göstermektedir ki, gerçekten akarsuyun taşıdığı askı maddesi debisinin tamamına yakını daha çok feyezanlar sırasında gelmekte ve bu debi için esas etkili olan tabaka erozyonu da sadece yüzeysel akış sürecinde oluşmaktadır. Taban akımına katkıda bulunan gecikmiş akımların ve önceki yağışların askı maddesi debisi yönünden etkileri ise tabaka erozyonu yanında ihmal edilebilir seviyede kalmaktadır. Fakat bu akımların yatak erozyonuna katkısının olduğu söylenebilir.

Tablo 5.1'de verilen alternatif modeller için uygulama sonuçları dikkate alındığında bütün uygunluk kriterleri, yine iki boyutlu tadil edilmiş modelin en iyi sonuçları verdiğiine işaret etmektedir. Bu da model hakkındaki ileri sürülen teorik düşüncelerin tutarlı olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Tadil edilmiş modelin, bu modelin orijinal hali olan iki boyutlu askı maddesi eğrisi modeli ile ikinci derece fonksiyonel diziye göre daha geçerli ve stabil olduğu söylenilebilir. Çünkü bu model daha az serbestlik derecesine sahip olduğu için daha az fakat yeterli kabul edilebilir bir uyum kabiliyeti göstermiş ve kalibrasyonunda kullanılan dataların hatasından da daha az etkilenmiştir. Halbuki aynı hafıza uzunluğuna sahip orijinal model ve fonksiyonel dizi ile yapılan uygulamalara bakıldığında bu modellerin kalibrasyon datasına çok iyi bir uyum gösterdikleri görülmekle birlikte gerçek tahminlerde sergilediği hata oranlarının tadil edilmiş modelle kıyas kabul etmeyecek kadar büyük olduğu açıktır. Hatta bu modellerde davranış fonksiyonlarının birçoğu negatif değer almıştır. Aslında orijinal iki boyutlu modelin davranış fonksiyonlarının pozitif değerler olması gerekmektedir. Çünkü davranış fonksiyonlarının fiziksel anlamı yağışların erozyona ve dolayısı ile de askı maddesi debisine olan katkılarıdır. Tabiatıyla bunların negatif olmaması

gerekir. Ayrıca, model hafızası genişledikçe davranış fonksiyonu sayısı hızla arttığından modellerin data hatalarından etkilenme ihtimali de artmıştır ki, bu durum Tablo 5.2 ve 5.3 ile Tablo 5.4 ve 5.5'te açıkça görülmektedir.

Tadil edilmiş modelin 180 ve 240 günlük datalar üzerindeki uygulamalarında, davranış fonksiyonlarının farklı kalibrasyon periyotlarına ait değerleri Tablo 5.8 ve Tablo 5.9 'da, lineer davranış fonksiyonları, Şekil 5.6 ve 5.7'de verilmiştir. Bu davranış fonksiyonlarının ordinatları arasında mertebe farkı olmayışı ve iki ayrı kalibrasyonda bulunan değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oluşu bunların, stabil olduğu şeklinde yorumlanabilir. Şekiller üzerinde daha açık görülen bu durum model hakkındaki olumlu düşünceleri kuvvetlendirmektedir.

Tablo 5.8 Davranış Fonksiyonu Ordinatlarnın Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri, (Tadil Edilmiş Model : $l = 8$, $n = 2$).

Davranış Fonksiyonu Ordinatlarnı		Kalibrasyon Periyodu			
		0-90		90-180	
		Lineer	Nonlineer	Lineer	Nonlineer
Lineer	h_1	-2.23780	--	-0.09474	--
	h_2	0.445077	--	0.614479	--
	h_3	1.999292	--	1.931044	--
	h_4	0.474973	--	0.652777	--
	h_5	1.056913	--	1.379298	--
	h_6	3.090262	--	2.645213	-
	h_7	6.150979	--	4.704767	-
	h_8	9.422017	--	8.155081	--
Nonlineer	h_{11}	--	0.379324	--	0.310118
	h_{12}	--	0.210264	--	0.408142
	h_{22}	--	0.154218	--	0.133438

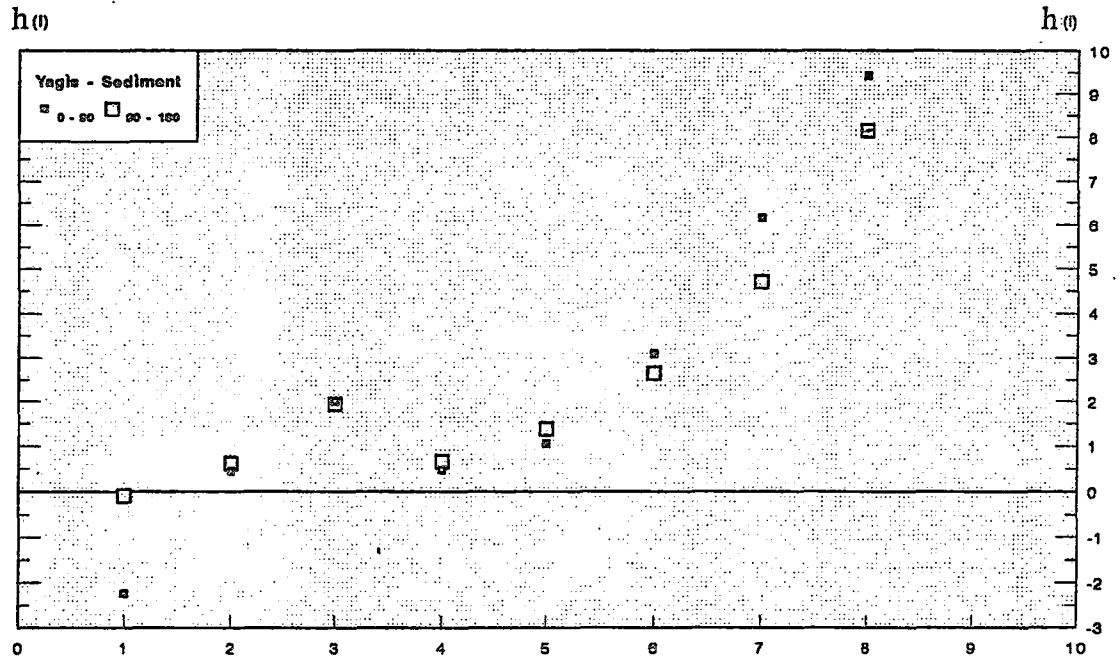
Modelin $l = 8$ ve $n = 2$ alınarak gerçekleştirilmiş uygulamasında yani Tablo 5.5 ve 5.6'da verilen davranış fonksiyonları kullanılarak yapılmış tahminlerde en iyi sonuçlar alınmıştır. Bu tahminler, sırası ile kalibrasyon ve test periyotlarına ait yağış ve askı maddesi konsantrasyon şeklinde 180 gün için Şekil 5.8a ve 5.8b ile Şekil 5.9a

ve 5.9b'de 240 gün için ise Şekil 5.10a ve 5.10b ile Şekil 5.11a ve 5.11b'de verilmiştir. Her iki deneme sonucunda da, kalibrasyon periyotlarına ait tahmini ve gerçek askı maddesi eğrisi arasında iyi bir uyumun varlığı hatta, pik değerlerde bu uyumun daha da kuvvetlendiği açıkça görülmektedir. Keza, aynı uyumlar test periyotları için de gözlenmektedir.

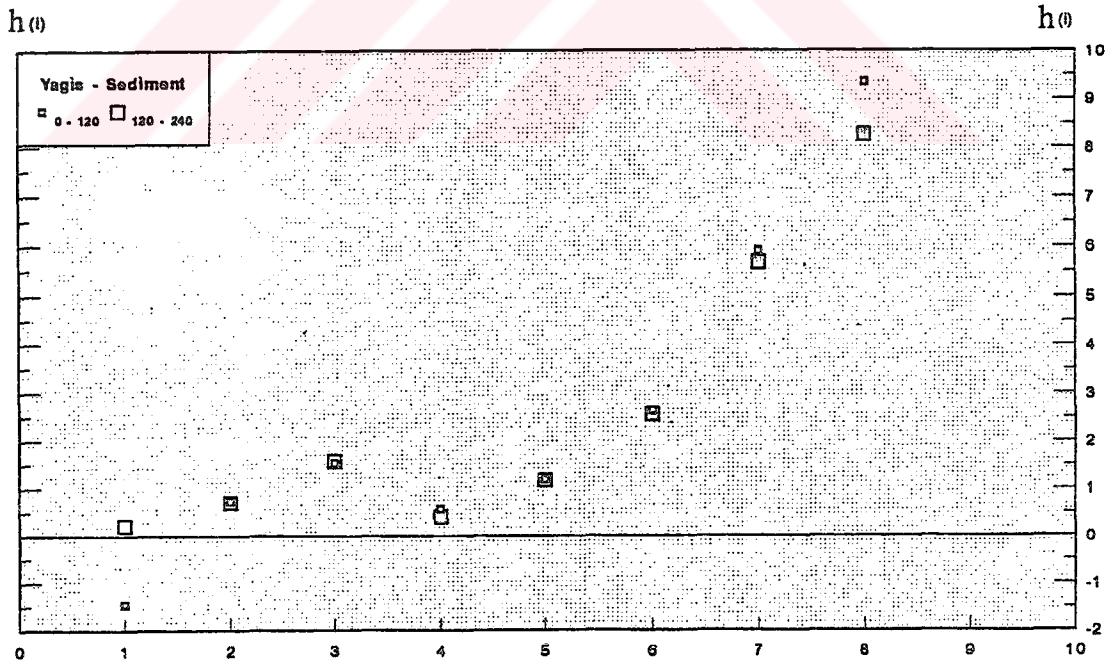
Tablo 5.9 Davranış Fonksiyonu Ordinatlarnın Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri, (Tadil Edilmiş Model : $l = 8, n = 2$).

Davranış Fonksiyonu Ordinatlarnı		Kalibrasyon Periyodu			
		0-120		120-240	
		Lineer	Nonlinear	Lineer	Nonlinear
Lineer	h_1	-1.44411	--	0.220040	--
	h_2	0.736266	--	0.710968	--
	h_3	1.544305	--	1.588713	--
	h_4	0.569818	--	0.405014	--
	h_5	1.192317	--	1.176141	--
	h_6	2.643279	--	2.557634	--
	h_7	5.907981	--	5.675647	--
	h_8	9.345868	--	8.263910	--
Nonlinear	h_{11}	--	0.3780976	--	0.352424
	h_{12}	--	0.213565	--	0.490121
	h_{22}	--	0.1463869	--	0.099753

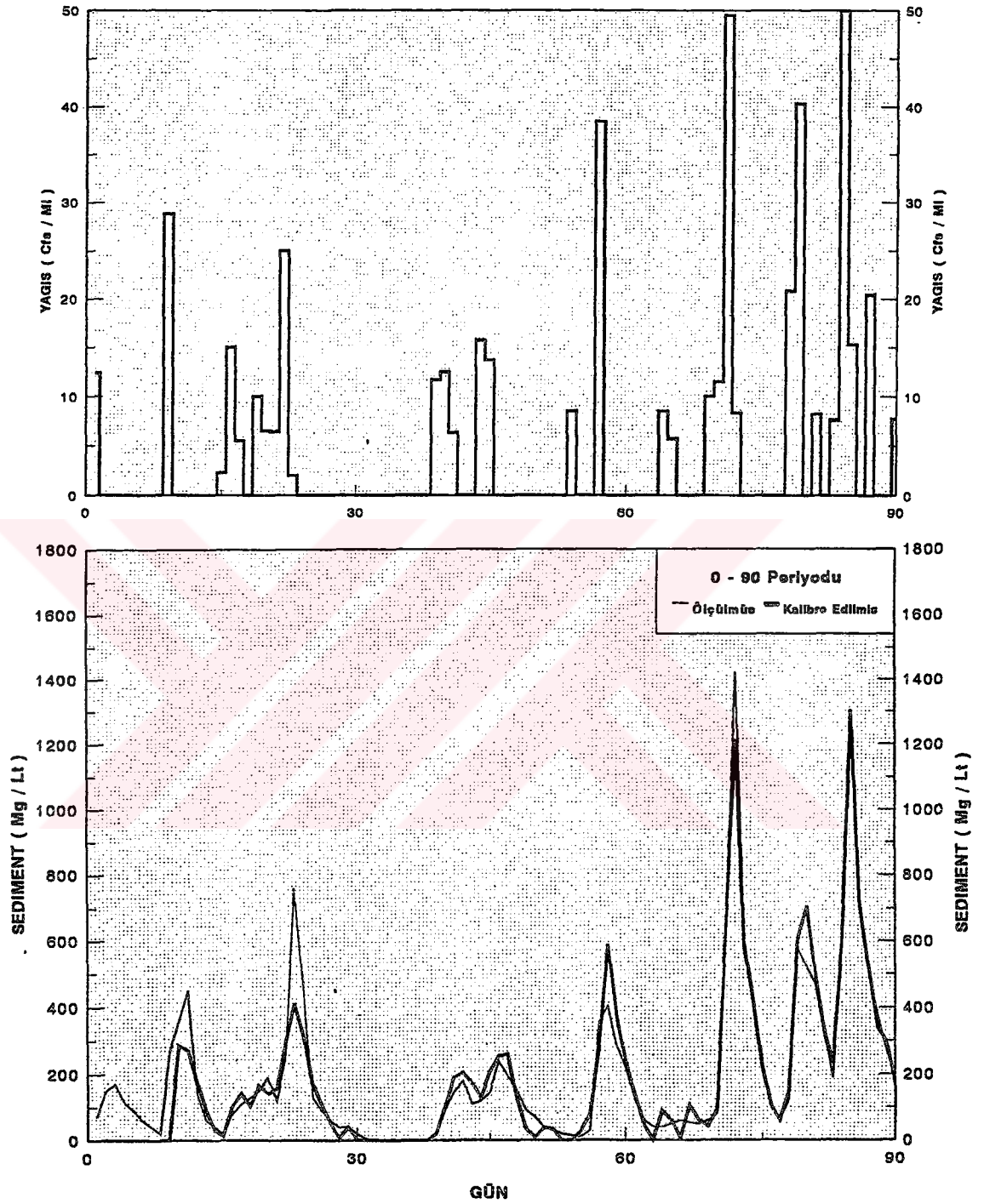
Tablo 5.8 ile 5.9'un karşılaştırılması modelin 180 günlük data üzerindeki uygulamalarının 240 günlük data üzerindeki uygulamalarına göre çok daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. 180 günlük data üzerindeki bulunan davranış fonksiyonları 0 - 90 ve 90 - 180 günlük kalibrasyon periyotlarında oldukça iyi bir uyum göstermekte iken 240 günlük data üzerinde bulunan davranış fonksiyonları farklı kalibrasyon periyotlarında merteye farkları içermektedir. Bu da mevsim etkilerine işaret etmektedir.



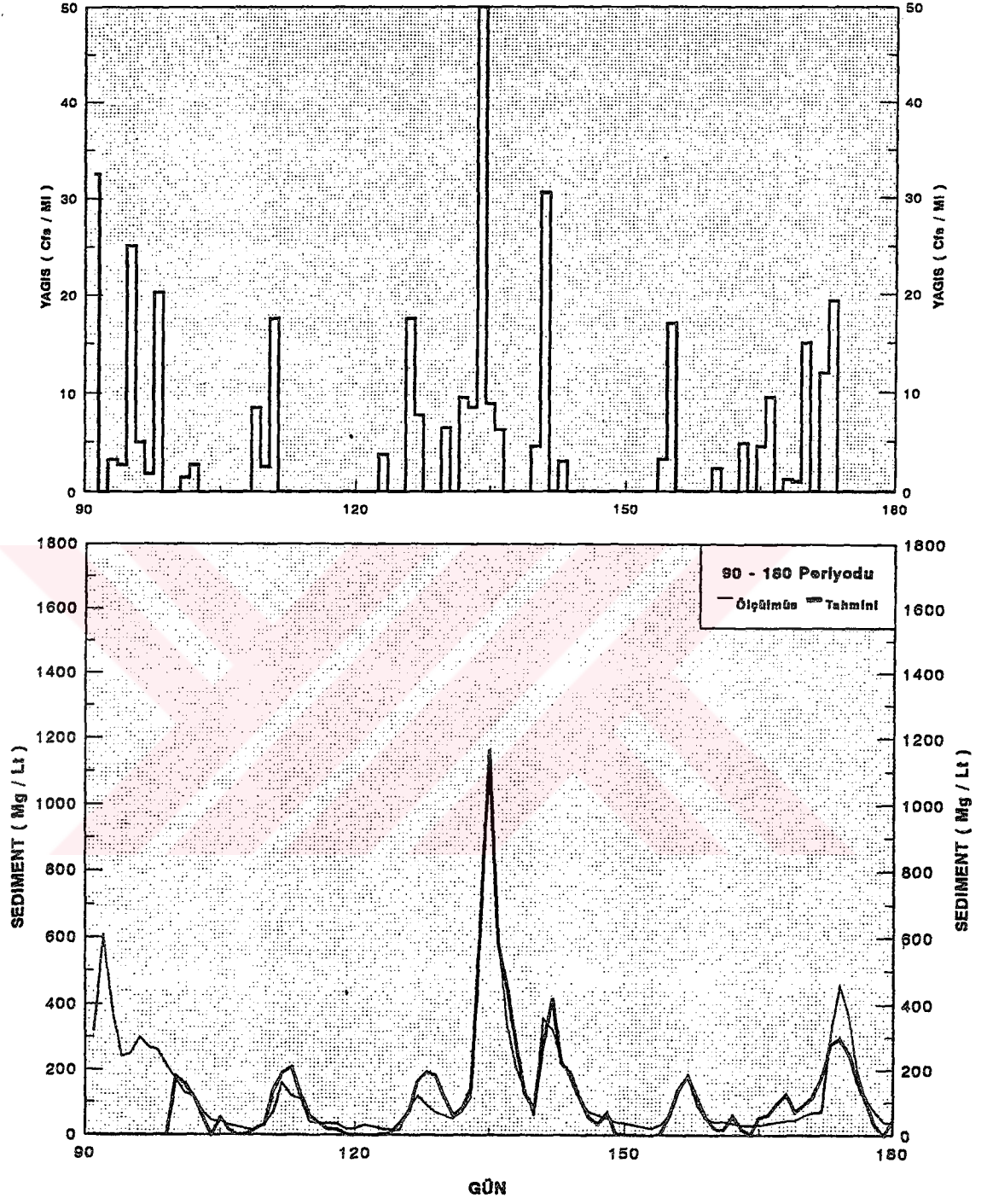
Şekil 5.6 Lineer Davranış Fonksiyonlarının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri (180 Günlük Datalar İçin Lineer hafıza : $l = 8$).



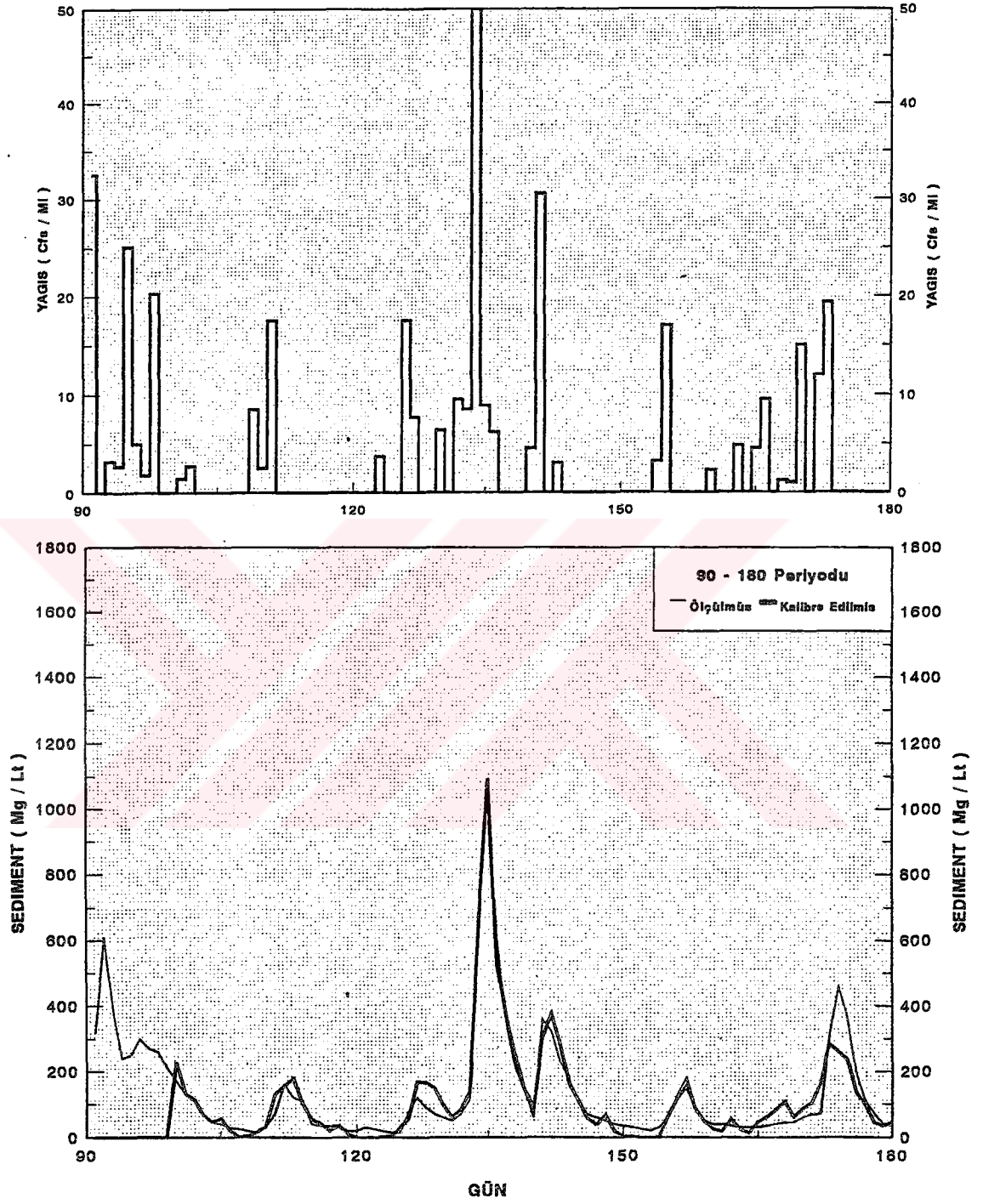
Şekil 5.7 Lineer Davranış Fonksiyonlarının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri (240 Günlük Datalar İçin Lineer hafıza : $l = 8$).



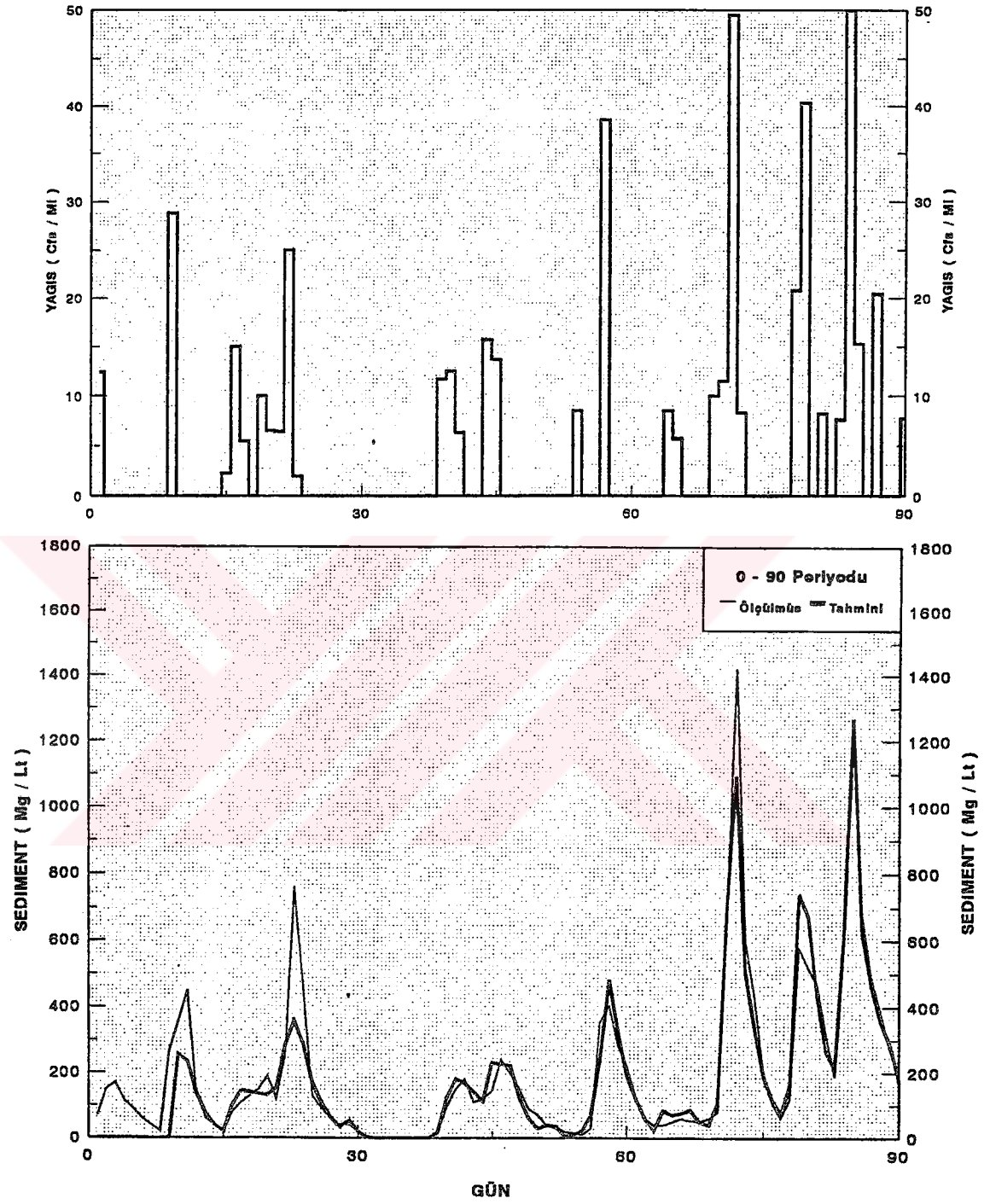
Şekil 5.8a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0 - 90, Model parametreleri: $l = 8, n = 2$).



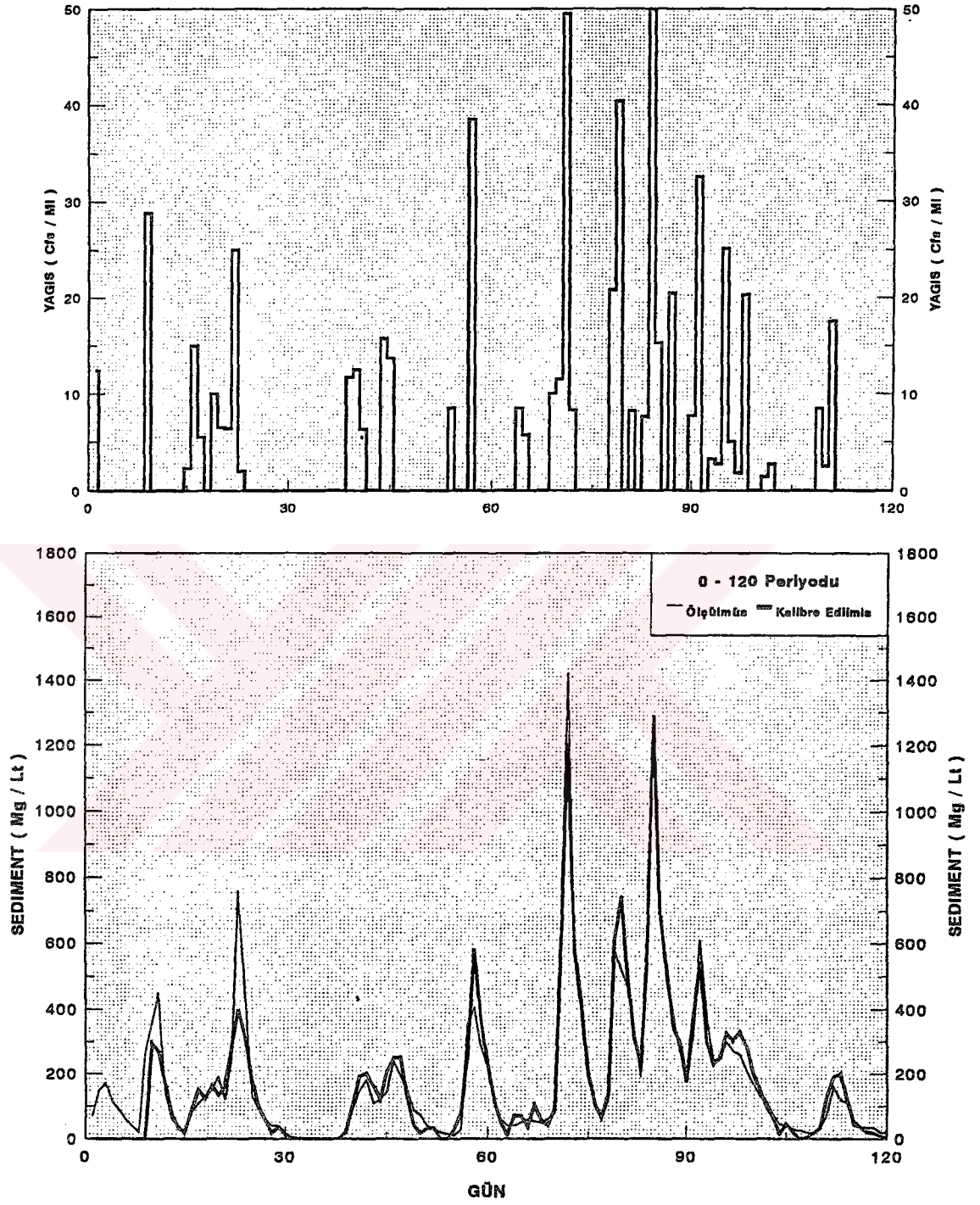
Şekil 5.8b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 90 - 180, Model parametreleri: $l = 8, n = 2$).



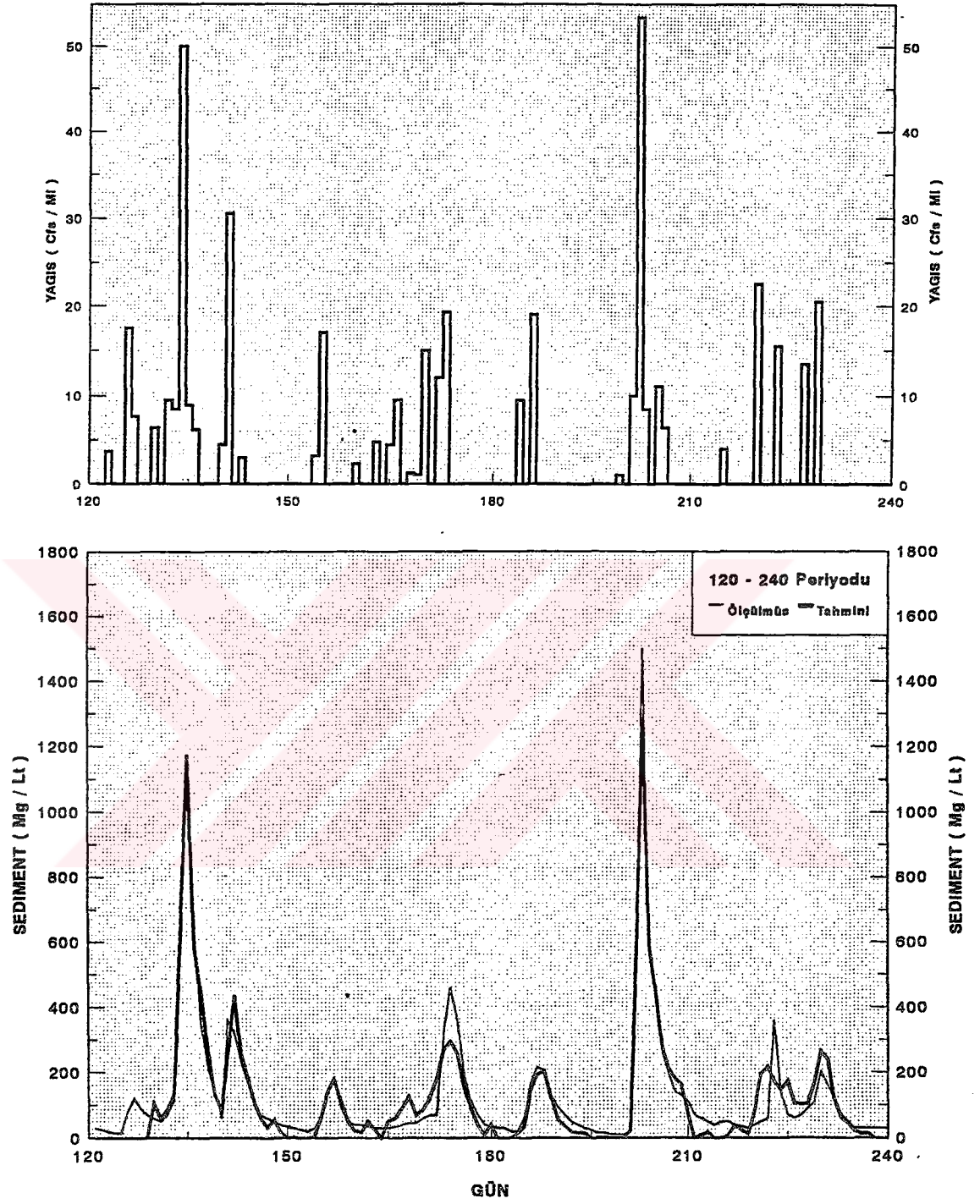
Şekil 5.9a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90 -180, Model parametreleri: $l = 8$, $n = 2$).



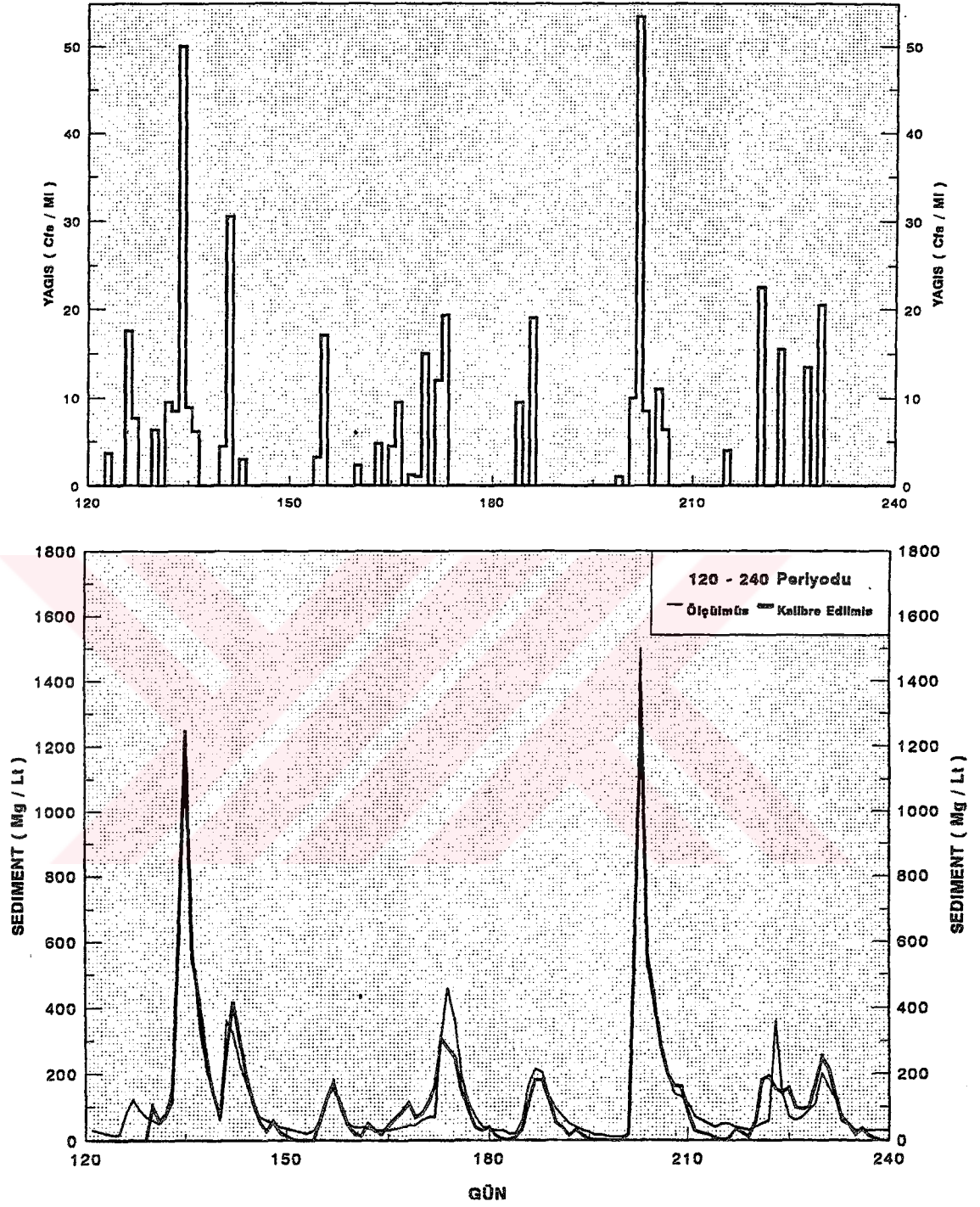
Şekil 5.9b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0 - 90, Model parametreleri: $l = 8$, $n = 2$).



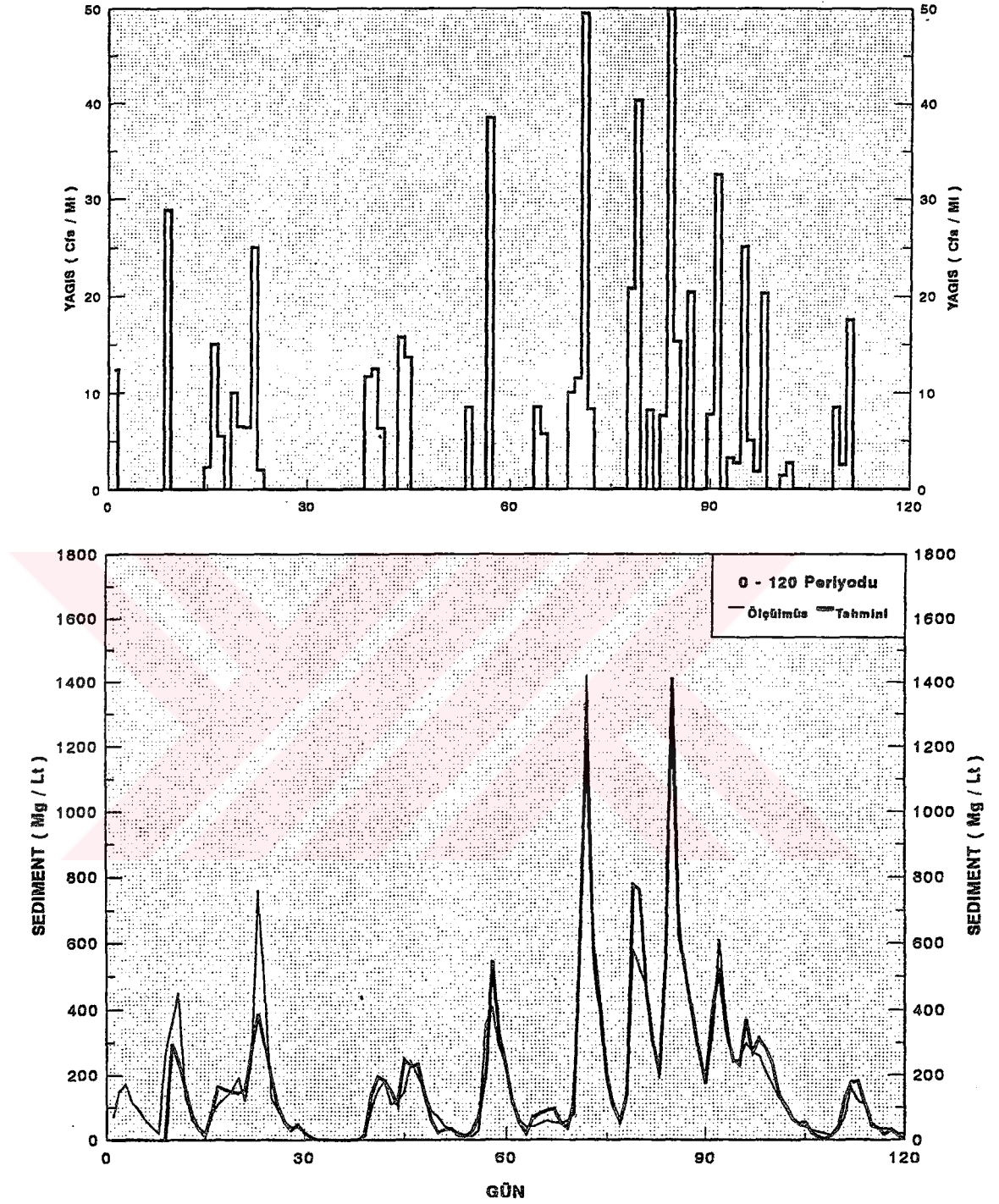
Şekil 5.10a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0 - 120, Model parametreleri: $l = 8$, $n = 2$).



Şekil 5.10b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 120 - 240, Model parametreleri: $l = 8$, $n = 2$).



Şekil 5.11a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu:120-240, Model parametreleri: $l = 8, n = 2$).



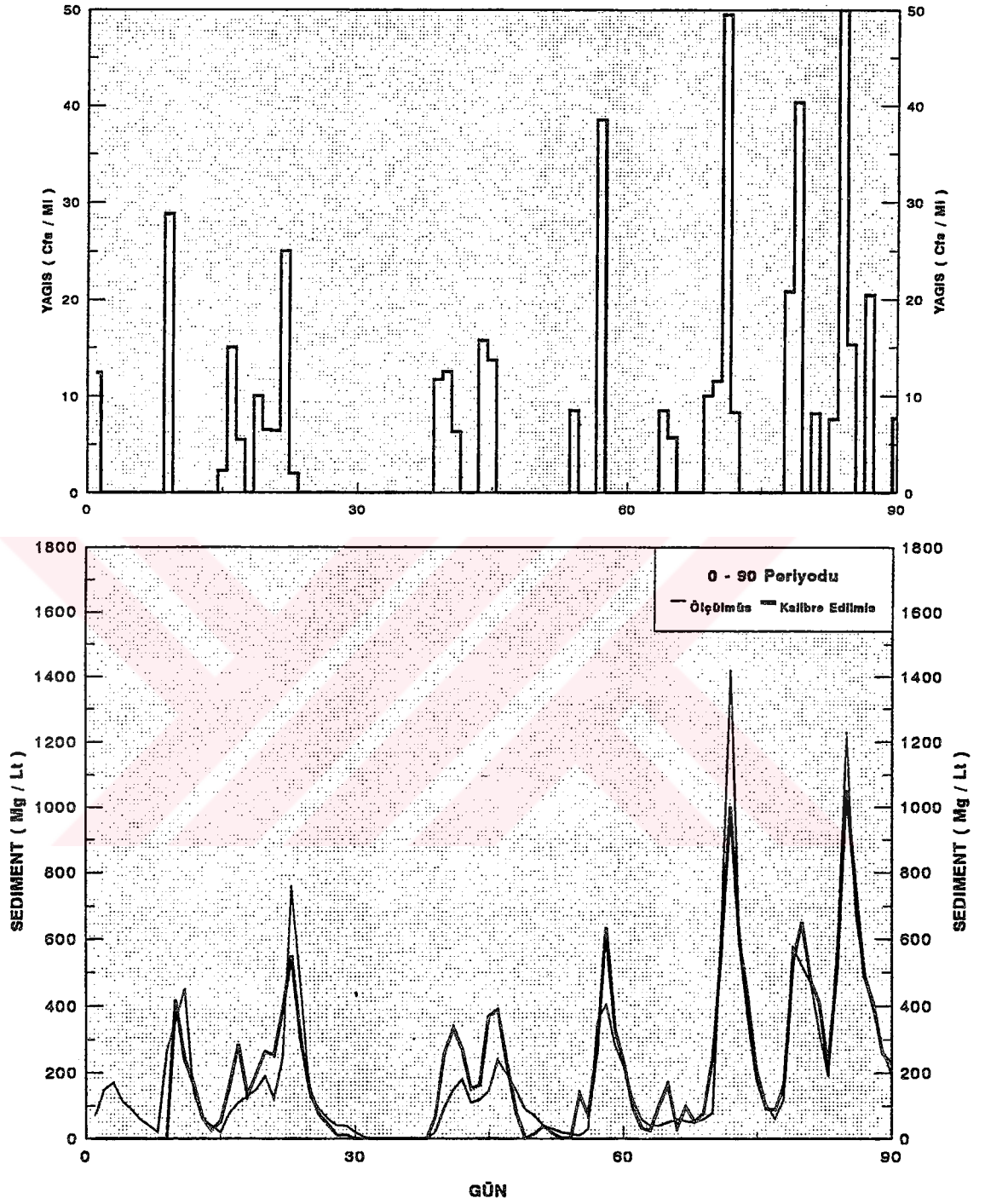
Şekil 5.11b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Aski Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0 - 120, Model parametreleri: $l = 8$, $n = 2$).

Diğer modellerle gerçekleştirilen uygulama sonuçlarına gelince, bu tahminler ayrı ayrı grafik halinde sunulmaya değer bulunmamıştır. Bu noktada, Tablo 5.2 ve 5.3'de verilen hataların, tahmini ve gerçek askı maddesi değerlerinin sonuçları hakkında yeterli bilgi verdikleri düşünülmektedir. Ancak, objektif bir mukayese açısından, tadil edilmiş iki boyutlu askı maddesi eğrisi modeli ile aynı uzunlukta bir hafızaya sahip olan ($m = 10$) lineer model ile elde edilen sonuçlar Şekil 5.12a ve 5.12b ile Şekil 5.13a ve 5.13b olarak verilmiştir. Bu karşılaştırmadan da iki boyutlu askı maddesi eğrisi modelinin üstünlüğü kolayca anlaşılmaktadır.

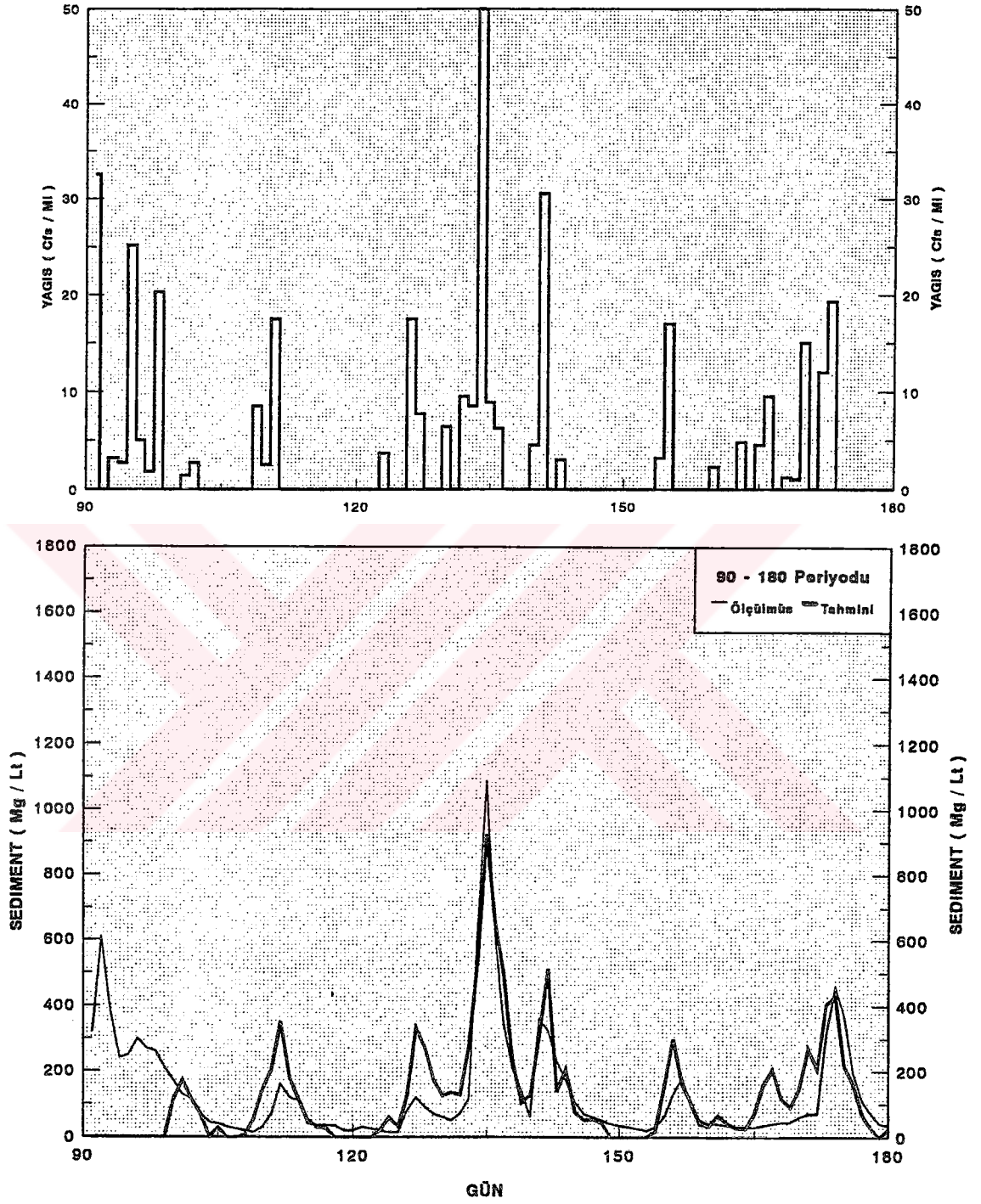
Yukarıdaki uygulamalar dışında ve yağış yerine akım verilerinin kullanılması ile yapılan askı maddesi tahminlerinde $m = 7 - 16$ arasında seçilerek lineer modelle gerçekleştirilen denemelerde en tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu uygulamalar için model, m 'in 7 ve 12 'inci değerlerinde kalibrasyon datasına iyi bir uyum göstermiş ise de gerçek tahminlerde özellikle küçük değerler için hatalı sayılabilecek sonuçlar vermiştir. Pik değerlerde ise iyi bir tutarlığın oluşu bu model hakkındaki düşüncelerin isabetli olduğu şeklinde yorumlanabileceği gibi (3.14) denklemi ile ifade edilen akım-askı maddesi modeli hakkındaki olumlu düşünceleri kuvvetlendirmektedir. Bu tahminler Şekil 5.14a ve 5.14b ile Şekil 5.15a ve 5.15b'de görülmektedir.

Bütün bu işlemler, bir deneme amacıyla akım tahminleri için de gerçekleştirilmiştir. Bunlarla ilgili olarak Tablo 5.6 ve 5.7 'ye bakıldığında en iyi tahminlerin l için 14 ve n için 3 alınarak tadil edilmiş model ile elde edildiği görülmektedir. Bu değerler ile model hem kalibrasyon datasına iyi bir uyum göstermiş hem de tahminlerde iyi sonuçlar vermiştir. Tahmin sonuçları Şekil 5.16a ve 5.16b ile Şekil 5.17a ve 5.17b 'de grafik olarak sunulmuştur. Ayrıca, davranış fonksiyonlarının bu tahminlerdeki değerlerinin, Şekil 5.18 'de görüldüğü üzere birbirlerine oldukça yakın oluşu ve hiçbirinin negatif değer almaması hem tahminlerdeki hem de model hakkındaki olumlu kanaati kuvvetlendirmektedir.

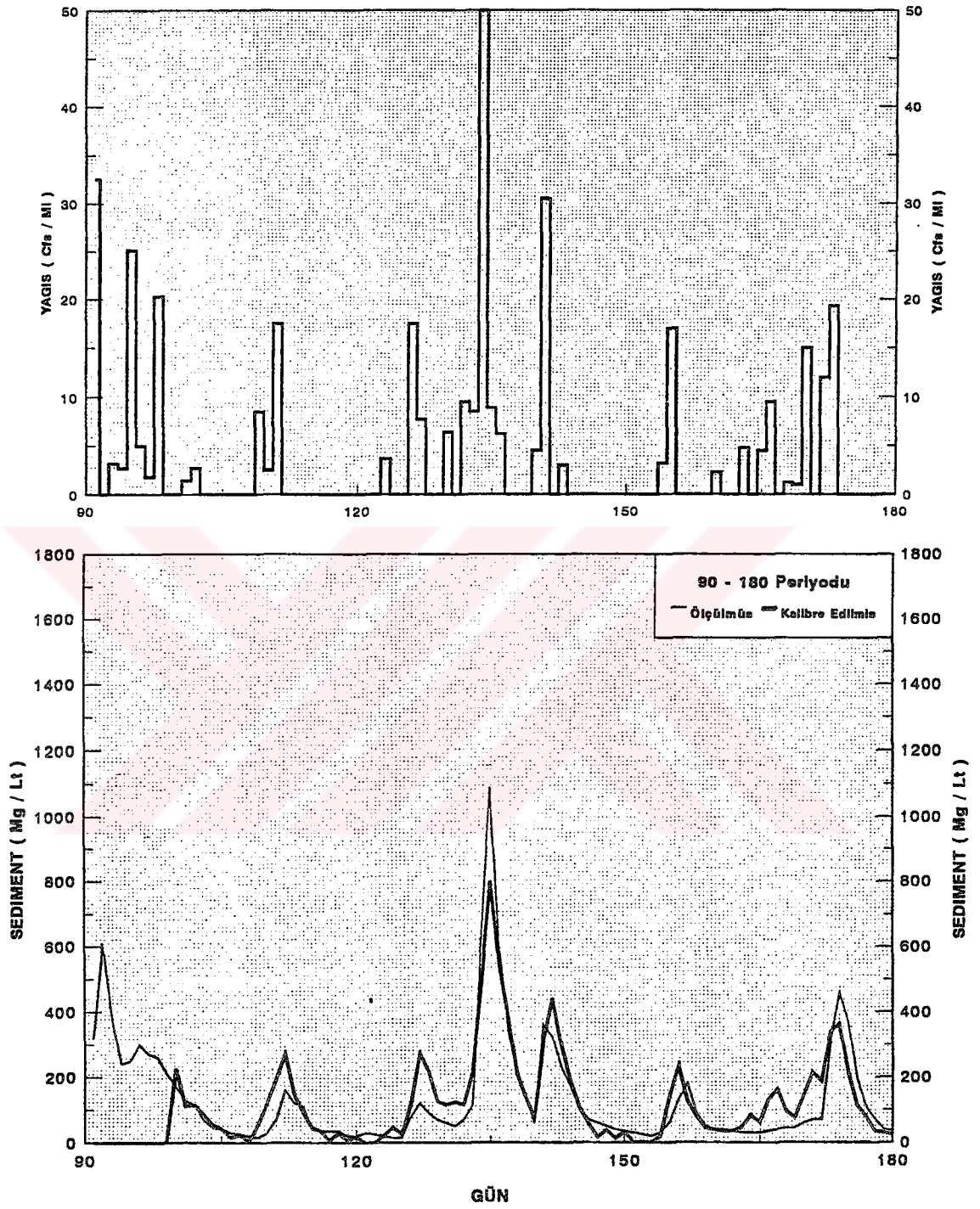
Akım tahminlerinin diğer modellerle gerçekleştirilen uygulamalarına gelince, bunlarda da askı maddesi tahminleri için yukarıda anlatılanlara benzer denemeler yapılmış fakat sonuçlarının kötü olması sebebiyle grafik olarak verilmesine gerek duyulmamıştır. Tablo 5.6 'de verilen modellerin performansına ait değerlerle bir karşılaştırma yapmanın yeterli fikir vereceği düşünülmüştür.



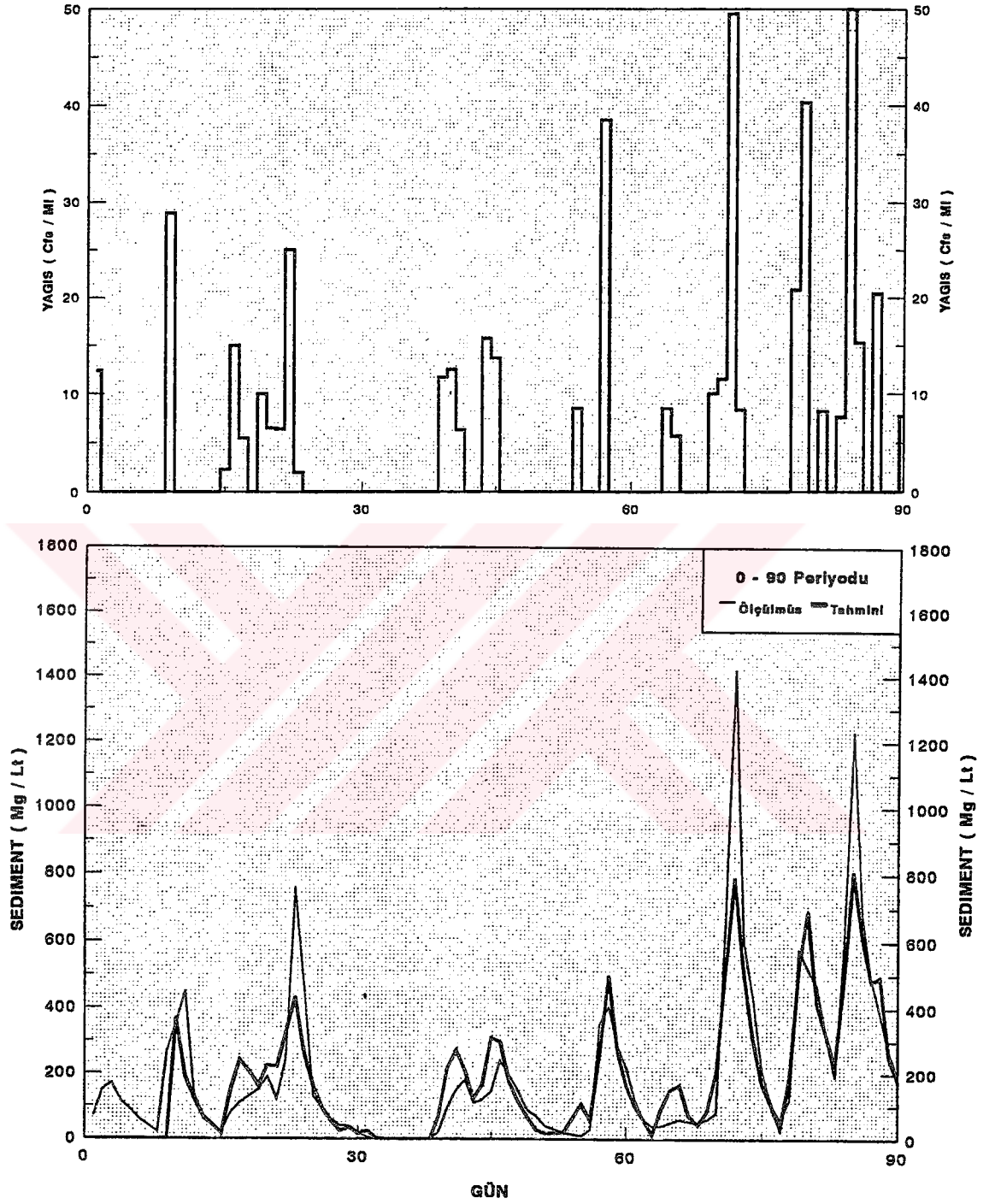
Şekil 5.12a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0 - 90, Lineer Model: $m = 10$).



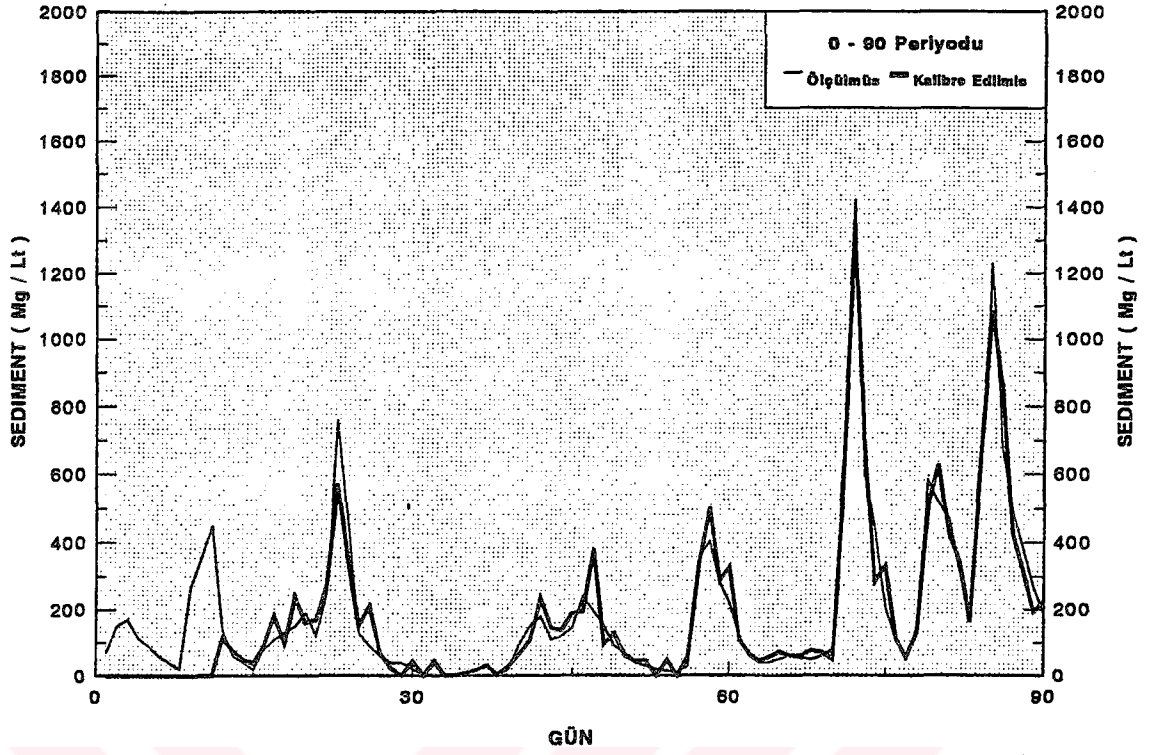
Şekil 5.12b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 90 - 180, Lineer Model : $m = 10$).



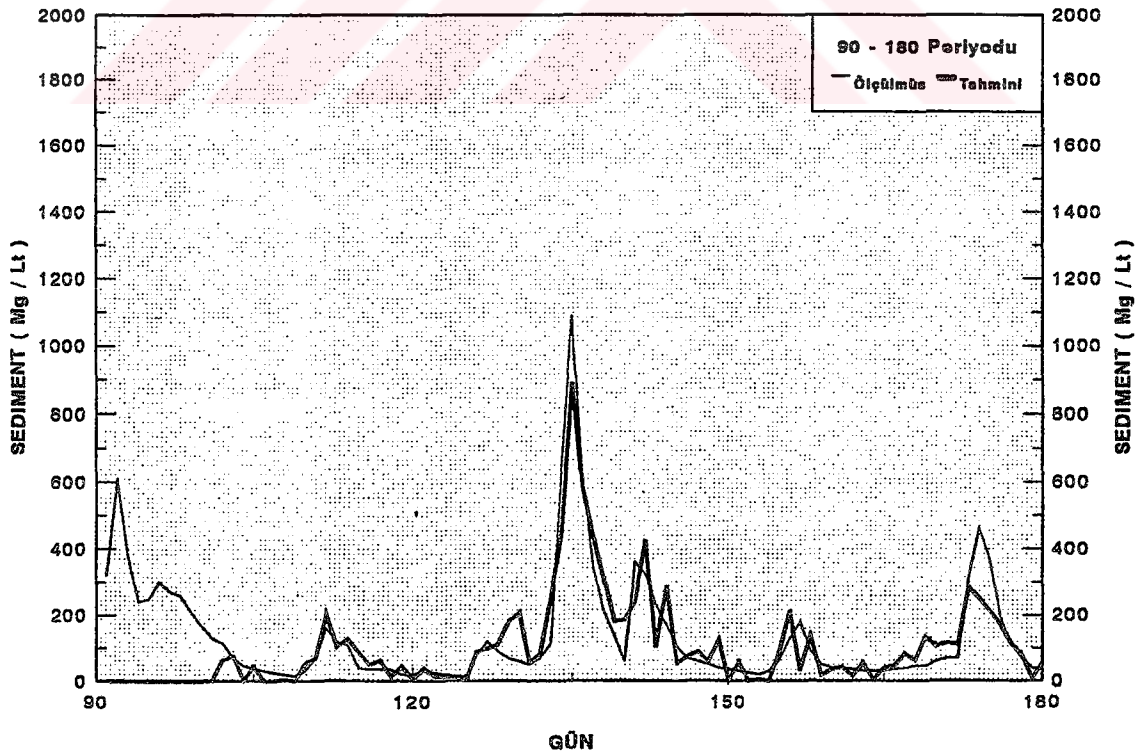
Şekil 5.13a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90 - 180, Lineer Model: $m=10$).



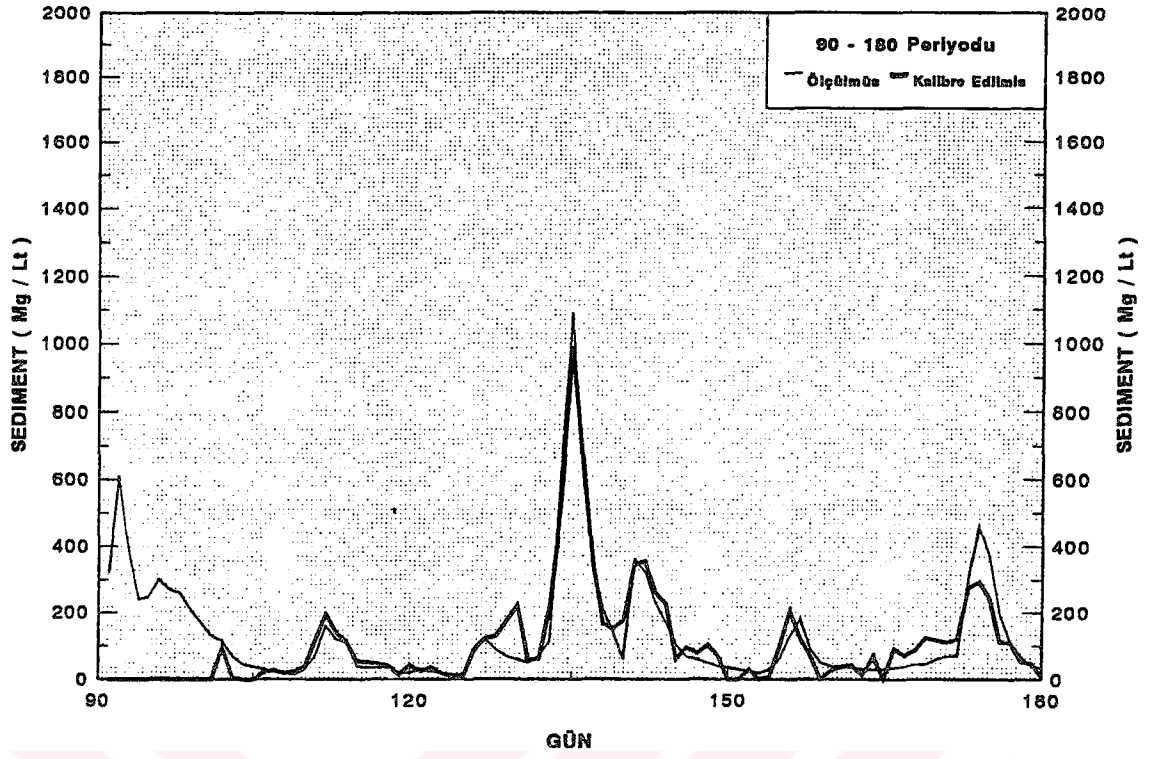
Şekil 5.13b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0 - 90, Lineer Model : $m = 10$).



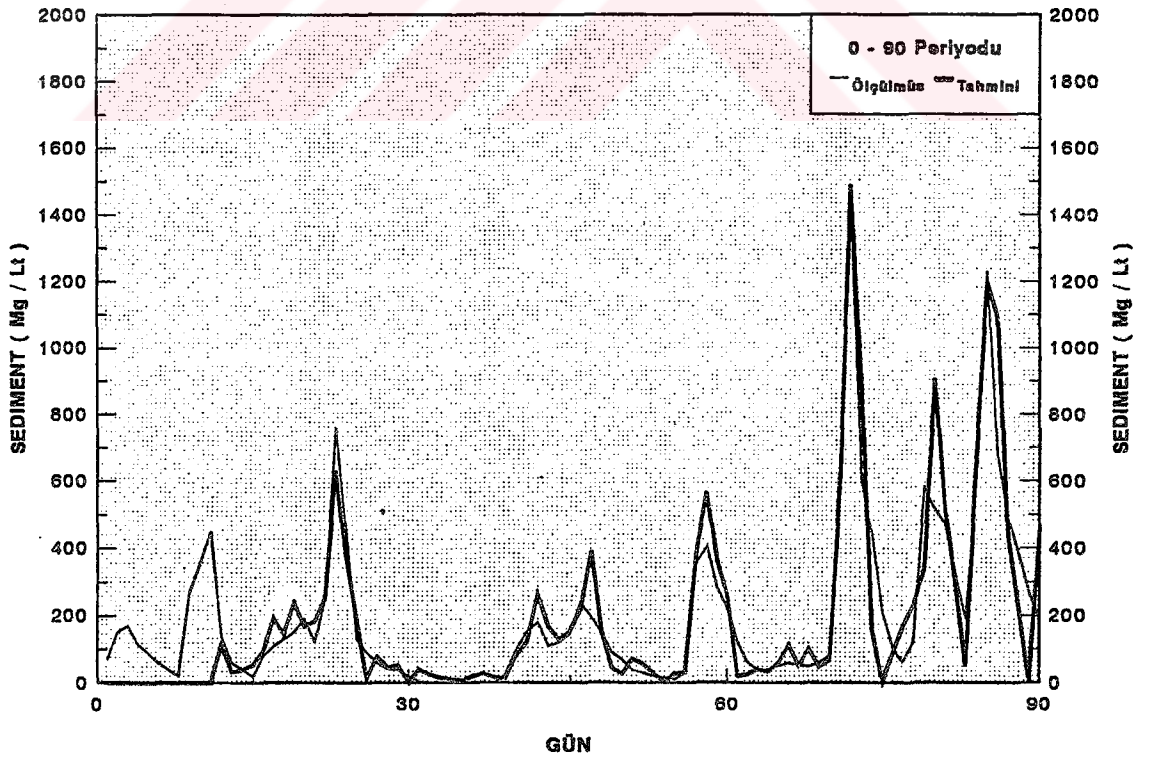
Şekil 5.14a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0 - 90, Model parametresi: $m = 12$).



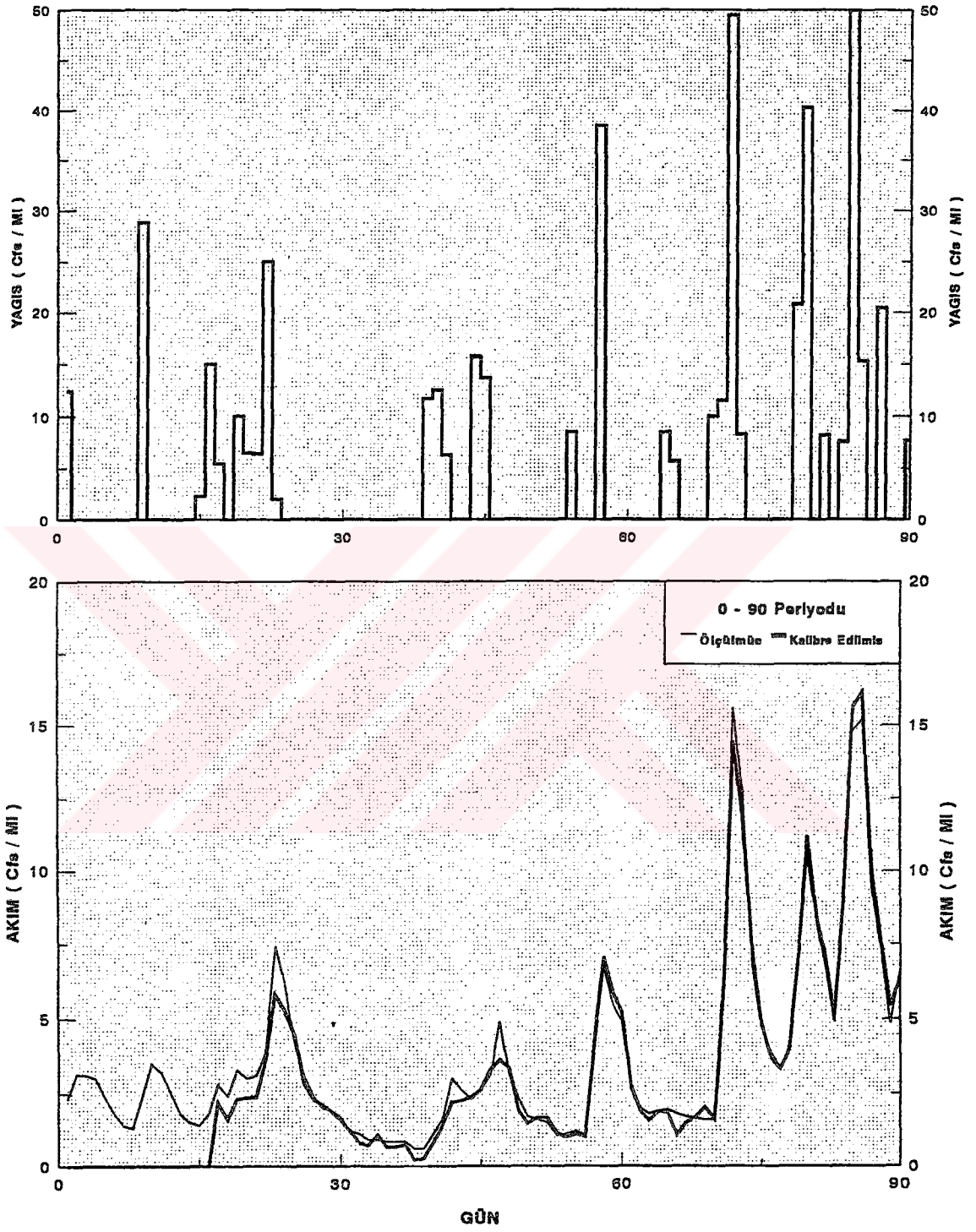
Şekil 5.14b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 90 - 180, Model parametresi: $m = 12$).



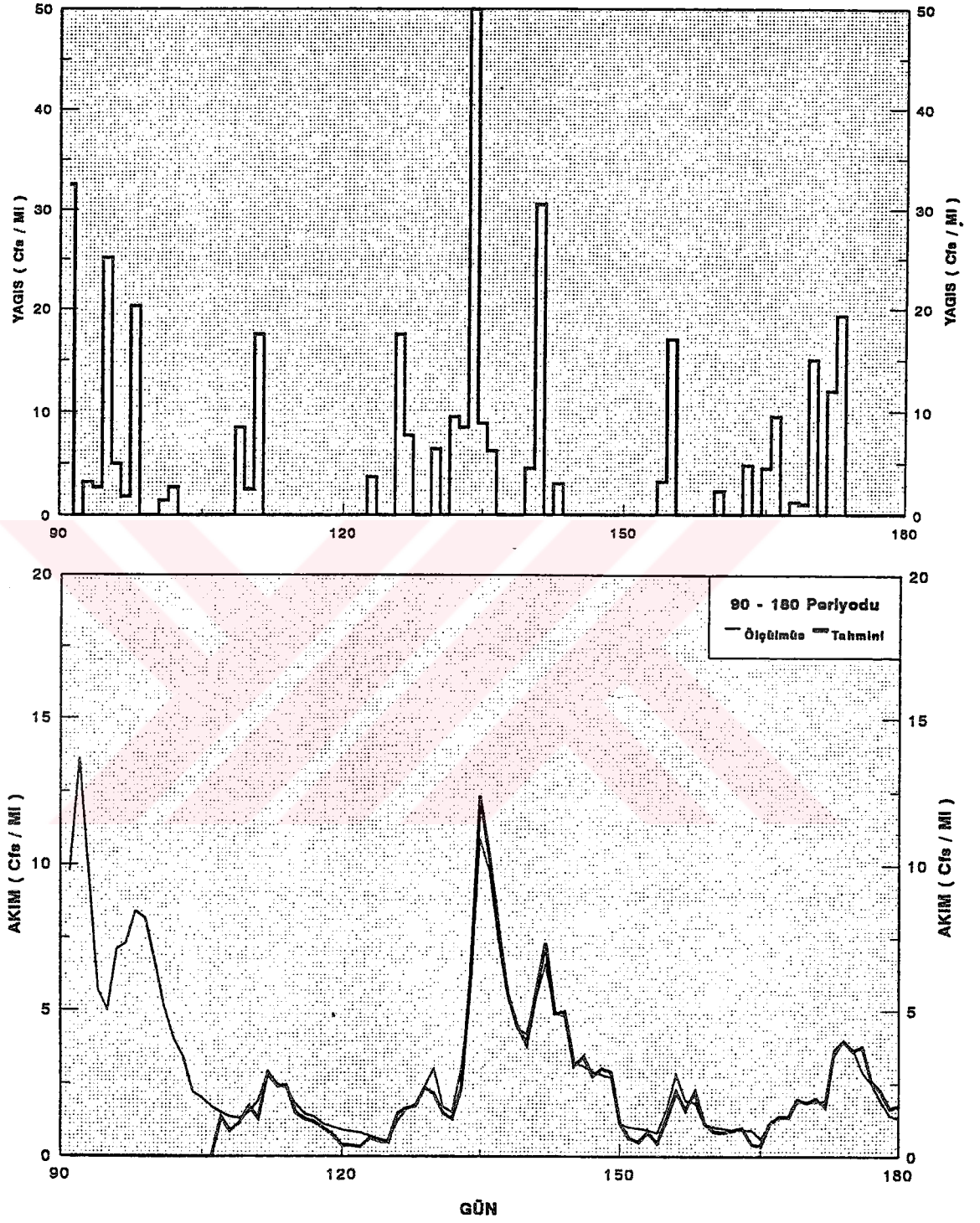
Şekil 5.15a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90 - 180, Model parametresi: $m = 12$).



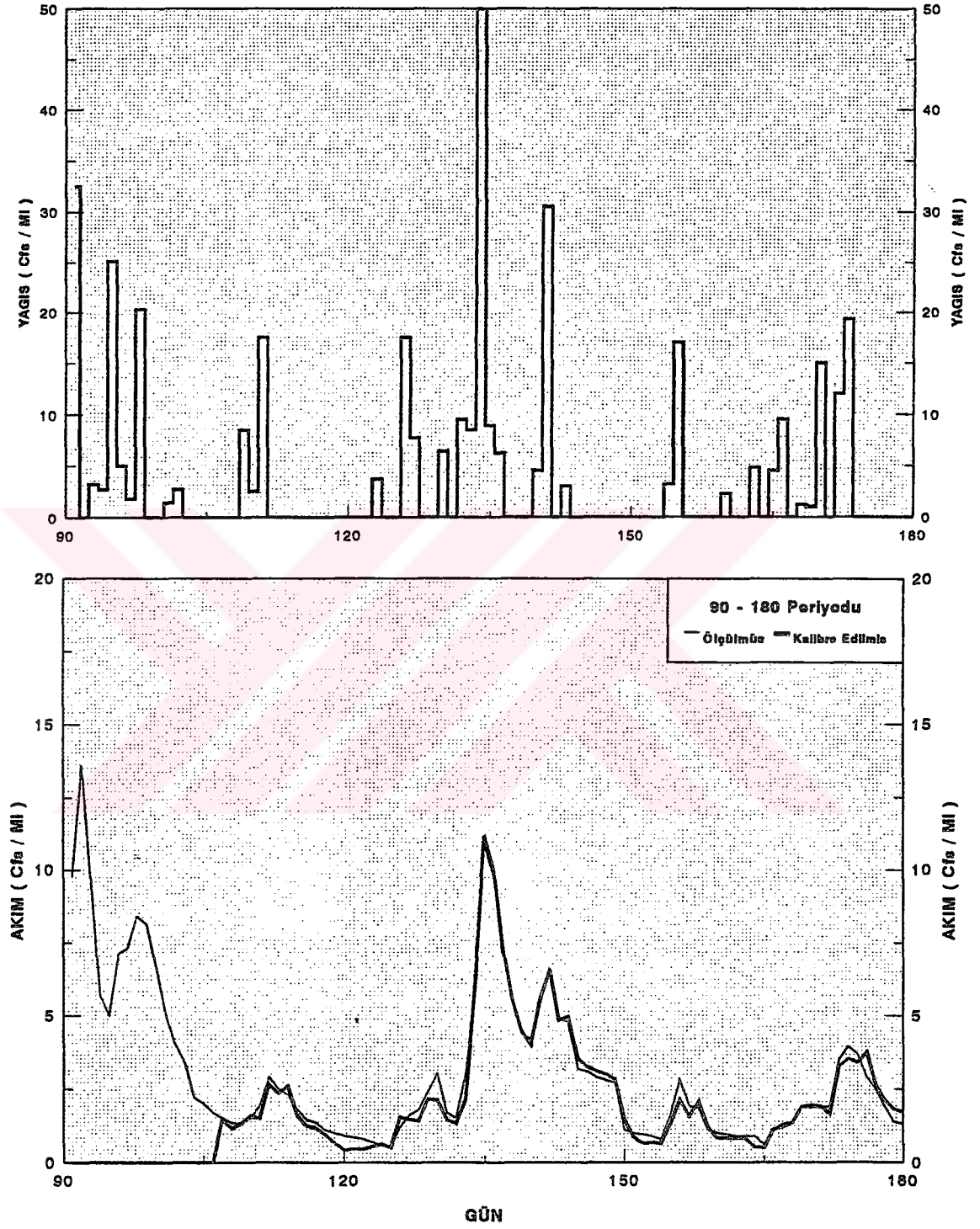
Şekil 5.15b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Askı Maddesi Konsantrasyon Değerleri (Test Periyodu: 0 - 90, Model parametresi: $m = 12$).



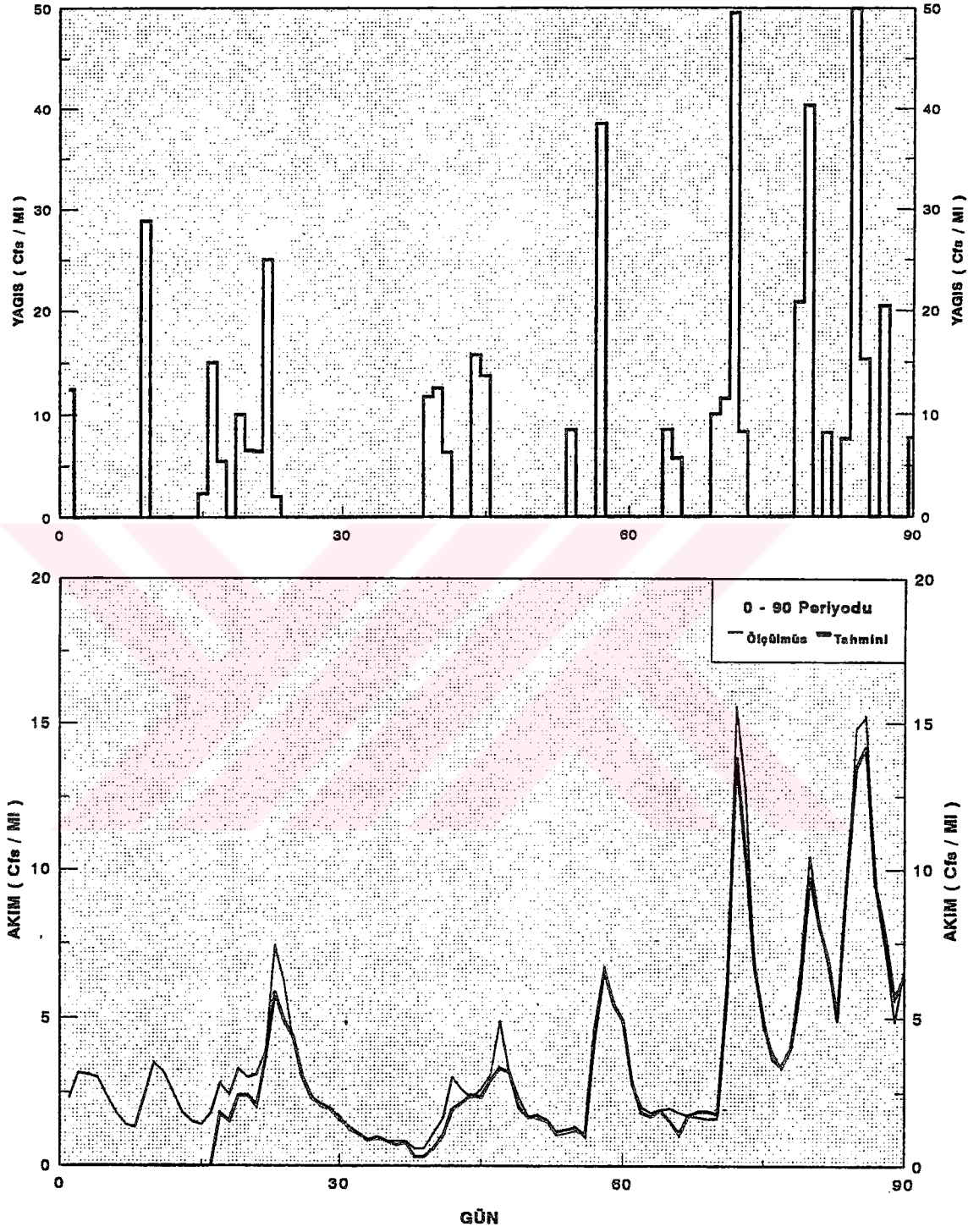
Şekil 5.16a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 0 - 90, Model parametreleri $l = 14, n = 3$).



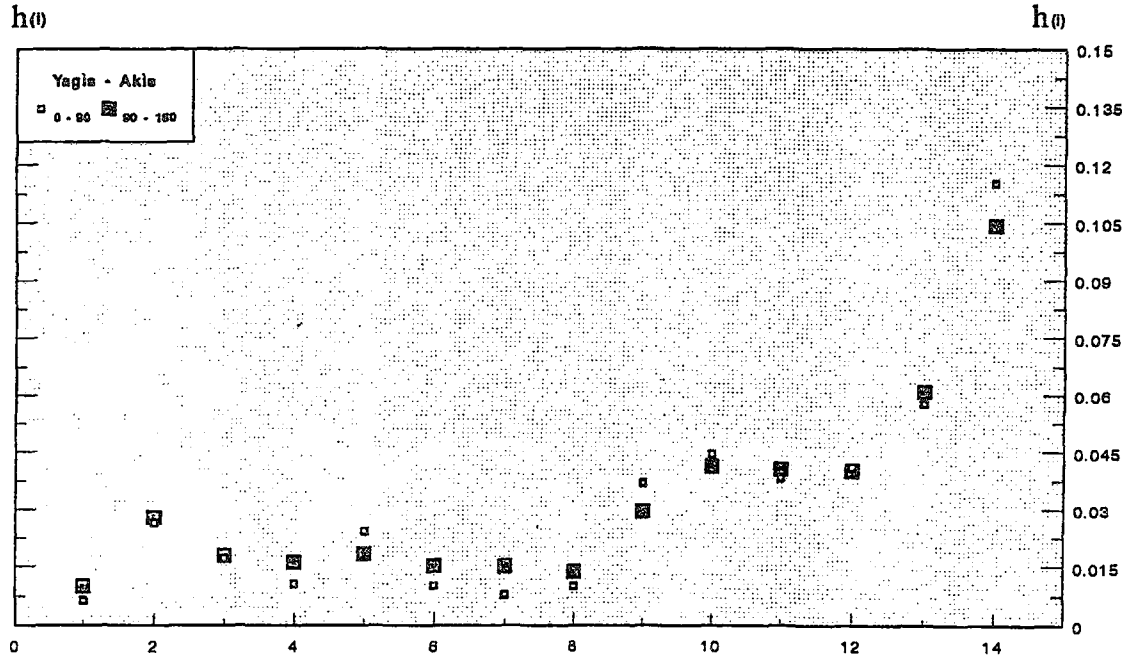
Şekil 5.16b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Test Periyodu: 90 - 180, Model parametreleri $l = 14$, $n = 3$).



Şekil 5.17a Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Kalibrasyon Periyodu: 90 - 180, Model parametreleri $l = 14$, $n = 3$).



Şekil 5.17b Gözlenmiş ve Hesaplanmış Akım Değerleri (Test Periyodu: 0 - 90, Model parametreleri $l = 14$, $n = 3$).



Şekil 5.18 Akım Tahminlerinde Davranış Fonksiyonu Ordinatlmasının Farklı Kalibrasyon Periyotlarına Ait Değerleri (Tadil Edilmiş Model : $l = 14, n = 3$).

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada akarsuların taşıdığı askı maddeleri konsantrasyonunu veya askı maddeleri debisini haldeki ve etkili geçmişteki etkin yağışlardan yararlanarak tahmin edebilen nonlinear kara-kutu modelleri geliştirilmiştir.

İki boyutlu birim askı maddesi eğrisi modeli diyebileceğimiz yeni modeller, havza davranışını bütün olarak temsil etmektedirler, bu sebeple de etkin yağışları kullanırlar ve birim askı maddesi eğrisi modellerinde olduğu gibi artık yağışın belirlenmesini gerektirmezler. Modellerin, sadece şiddetli sağanaklarda değil bütün yağış şiddetlerinde geçerli olmaları birim askı maddesi eğrisi modellerine göre önemli bir üstünlük sayılır. Model, genel olarak diğer kara-kutu modelleri ve özel olarak da birim askı maddesi eğrisi modelleri gibi havza davranışını götürü olarak temsil etmekte olup yağışın üniform dağılımı kabulüne dayanır ve havza özelliklerinin zamanla değişimini dikkate almaz. Bunlar da modelin dezavantajlarıdır.

İlk geliştirilmiş şekliyle model esasen bir fonksiyonel dizinin ikinci teriminden ibaret olup havza davranışının lineer sayılabildiği hafıza kesiminde bir lineerleştirme yapılarak hafızanın önemli bir bölümünde lineer ve geri kalan bölümünde ikinci derece bir fonksiyonel kullanılmak sureti ile tadil edilmiştir. Gerek orijinal gerekse tadil edilmiş halinde modelin davranış fonksiyonları birim etkin yağıştan hasil olan askı maddelerinin zamansal dağılımını temsil etmektedirler. Bunlar, bir ve iki boyutlu birim askı maddesi eğrisi olarak yorumlanan ve birim hidrograf gibi fiziksel olarak mümkün fonksiyonlardır ve havza davranışını bütün (veya götürü) olarak temsil ederler. Bu da hem orijinal hem de tadil edilmiş halde modelin bir başka önemli avantajıdır.

Model kalibrasyonu için regresyon analizi uygulanmıştır. Bu maksatla geliştirilen denklemler birkaç parametre değişikliği ile farklı modeller için uygulanabilir niteliktedir. Bu da uygulamalara büyük kolaylık getirmektedir.

Yeni modellerin literatürden sağlanan 180 ve 240 günlük datalar kullanılarak kapsamlı uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Uygulamada önce, 180 günlük datalar 90 'ar günlük iki kısma ayrılmış ve birinci kısım model kalibrasyonu için ikinci kısım ise test için kullanılmıştır. Hidrometeorolojik faktörlerin yaz ve kış aylarındaki değişimlerinin, davranış fonksiyonları veya tahminler üzerinde doğuracağı etkileri görmek ve bir karşılaştırma yapmak için ayrıca 120 'şer günlük iki kısma ayrılmış datalar için de benzer uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Yeni modellerin verdiği sonuçlar 1. ve 2. dereceden fonksiyonel dizi modellerin ve Willams'ın modelinin sonuçları ile karşılaştırılmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1) Lineer model, ki konvolüsyon - toplamdan ibarettir, havza davranışını temsile yeterli derecede uyumlu değildir.

2) İkinci derece fonksiyonel dizi gerekenden fazla uyumlu olup kalibrasyon periyodunda çok iyi tahminler vermekle birlikte test periyodunda aynı başarıyı göstermemektedir. Bunun nedeni, çok fazla sayıda davranış fonksiyonu ihtiva etmesidir ki, davranış fonksiyonlarının gerekenden fazla olması bu modelin kalibrasyon periyodunda kullanılan dataların taşıdığı hatalardan daha çok etkilenmesine yol açmaktadır.

3) Orijinal haliyle iki boyutlu birim askı maddesi eğrisi modeli uyum ve başarı itibarı ile lineer ve 2. derece fonksiyonel dizi modeller arasında kalmaktadır.

4) Tadil edilmiş model en isabetli tahminleri yapabilmektedir. Yeterince uyum kabiliyetine sahip ve daha stabildir. Uygulama havzasının hafızası 10 gün olup bunun 8 günü lineer 2 günü ise nonlinear hafıza kesimleridir. Dolayısıyla lineer bir model bileşeni ile temsil edilebilecek olan geçmişin fonksiyonel dizi ve orijinal modelde olduğu gibi nonlinear bir modelle temsili gereksiz uyum kabiliyeti hasıl etmekte bu da tahminlerde olumsuz rol oynamaktadır.

5) Buharlaşma verileri temin edilemediğinden uygulamalarda etkin yağışlar yerine doğrudan gözlenmiş değerler kullanılmıştır. Etkin yağışların (bilhassa

güncelleştirilmiş etkin yağışlar) kullanılması halinde modelin daha başarılı olacağı beklenebilir.

6) Model, yağışlardan gerçek zaman askı maddesi tahminleri yapmada, günlük ve aylık askı maddesi datalarını uzatmada kullanılabilir niteliktedir.

7) Erozyon ve çeşitli nedenler ile havza özellik ve şartları sürekli olarak değişebilir. Örneğin havzanın bazı kısımları çok fazla erozyona maruz kalabilir ve kayalık formasyonlar açığa çıkabilir veya farklı erozif özellik gösteren havza kısımları oluşabilir. Bu durumlarda model, mutlaka yeniden kalibre edilerek kullanılmalıdır.

8) Debi - askı maddesi konsantrasyonu ilişkisini temsil için ileri sürülen lineer model de başarılı sayılabilir. Bu model akım ölçümlerinden yararlanarak günlük ve aylık askı maddesi datası türetmede kullanılabilecek niteliktedir.



KAYNAKLAR

- [1] BAYAZIT, M. Su Kaynakları Sistemleri, İstanbul Teknik Üniv., İnşaat Fakültesi, İstanbul, (1994).
- [2] CHATURVEDI, M. C. Water Resources Systems Planning and Management, Tata McGraw-Hill Publ. Company Limited, New Delhi, (1992)
- [3] MÜFTÜOĞLU, R. F. Akarsu Yapıları, Cilt.1, İstanbul Teknik Üniv., İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, (1983).
- [4] ERKEK, C., AĞIRALIOĞLU, N. Su Kaynakları Mühendisliği, Beta Basım Yayın Dağıtım A. Ş., İstanbul, (1994).
- [5] SIMONS, D. B., ŞENTÜRK, F. Sediment Transport Tecnology, Water and Sediment Dynamics, Water Resources. Public., Littleton, Colorado, U.S.A., (1992).
- [6] BAYAZIT, M. Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği, İstanbul Teknik Üniv., İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, (1971).
- [7] CHOW, V. T. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, (1964).
- [8] GRAF, W. H. Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, (1971).
- [9] SHARMA, T. C., DICKINSON, W. T. Discrete Dynamic Model of Watershed Sediment Yield, J. Hydraulics Div., ASCE, Vol.105, No.HY5, (1979).
- [10] BENNETT, J. P. Concepts of Mathematical Modeling of Sediment Yield, Water Res. Research, Vol.10, No.3, June (1974).
- [11] KILINÇ, M. Y., RICHARDSON, E. V. Mechanics of Soil Erosion From Overland Flow Generated by Simulated Rainfall, Hydrologic Papers No.63, Colorado State Univ. Fort Collins, Colo., September (1973).
- [12] WALLING, D. E. Assessing the Accuracy of Suspended Sediment Rating Curves for a Small Basin, Water. Res. Res. Vol.13, No.3, June (1977).
- [13] MIZUMURA, K. Hydrologic Approach to Prediction of Sediment Yield, J. Hydraulic Engineering, Vol.115, No.4, ASCE, April, (1989).

- [14] VANSICKLE, J., BESCHTA, R. L. Supply-Based Models of Suspended Sediment Transport in Streams, Water Res. Res., Vol.19, No.3, (1983).
- [15] CRAWFORD, C. G. Estimation of Suspended-Sediment Rating Curves and Mean Suspended-Sediment Loads, J. Hydrology, 129, pp.331-348, (1991).
- [16] WALLING, D. E., TEED, A. A Simple Pumping Sampler for Research into Suspended Sediment Transport in Small Catchments, J. Hydrology, 13, pp.325-337, (1971).
- [17] WILLIAMS, G. P. Sediment Concentration Versus Water Discharge During Single Hydrologic Events in Rivers, J. Hydrology, 111, pp.89-106, (1989).
- [18] WILLIAMS, J. R. Sediment Yield Computed With Universal Equation, J. Hydraulic Division, ASCE, Vol.98, No. HY12, December (1972).
- [19] CEWRC-HEC-T. A Review of Watershed Erosion Models, Prepared by Jon Fenske, Res. Hydraulic Engineer, Hydro. Eng. Center, May (1993).
- [20] JOHNSON, J. W. Distribution Graphs of Suspended Matter Concentration, Proceedings of ASCE, Paper 2199, pp.941-956, (1942).
- [21] RENDON-HERRERO, O. Estimation of Washload Produced on Certain Small Watersheds, J. Hydraulic Division, ASCE, Vol.100, No. HY7, Proc. Paper 10638, (1974).
- [22] RENDON-HERRERO, O. Unit Sediment Graph, Water Resources Research. Vol.14, No.5, pp.889-901, (1978).
- [23] RENARD, K. G., LAURSEN, E. M. Dynamic Behaviour Model of Ephemeral Stream, J. Hydr. Div., ASCE, Vol.101, No. HY5, pp.511-528, (1975).
- [24] BRUCE, R. R., et al. Model for Runoff of Pesticides Small Upland Watershed, J. Environ. Qual., Vol.4, No.4, pp.541-548, (1975).
- [25] WILLIAMS, J. R. A Sediment Graph Model Based on An Instantaneous Unit Sediment Graph, Water Res. Res.h, Vol.14, No.4, pp.659-664, (1978).
- [26] SINGH, V. P., BANIUKIWICZ, A., CHEN, V. J. An Instantaneous Unit Sediment Graph Study For Small Upland Watersheds, Water Res. Public., Littleton, Colorado U.S.A. (1982).
- [27] KUMAR, S., RASTOGI, R. A. A Conceptual Catchments Model For Estimating Suspended Sediment Flow, J. Hydrology, 95, pp.155-163, (1987).

- [28] **DAS, G., AGARVAL, A.** Development of Conceptual Sediment Graph Model, American Society of Agricultural Engineers Vol.33 (1), (1990).
- [29] **MÜFTÜOĞLU, R. F.** Akarsu Havza Simulasyonunda Kara-Kutu-Sistem Modelleri, Doc. Tezi, İ.T.Ü, (1978).
- [30] **MUSLU, Y.** Hidroloji ve Meskun Bölge Drenajı, İstanbul Tek. Üniv. Matbaası, İstanbul, (1993)
- [31] **BAYAZIT, M.** Hidroloji, İstanbul Tek.Üniv., İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, (1991)
- [32] **KULANDAISWAMY, V. C.** The IUH of General Hydrologic System Model, Applied Sedimentology, by Richard C. Selley, Acade. Press Limited, London, (1989).
- [33] **MEYER, L. D.** How Rain Intensity Affects Interill Erosion, Transactions of the ASAE, Paper No.80-2503, pp.1472-1475, (1981).
- [34] **SELKER, J. S., HAITH, D. A., REYNOLDS, J. E.** Calibration and Testing of A Daily Rainfall Erosivity Model, Transactions of the ASAE, Vol.33 (5), Sept. – Octo. (1990).
- [35] **HAITH, D. A., MERRILL, D. E.** Evaluation of a Daily Rainfall Erosivity Model, Transactions of the ASAE, Vol.30 (1) Jan.-February (1987).
- [36] **AGARWAL, A., DICKINSON, W. T.** Effect of Texture, Rainfall and Slope on Rainfall Interril Sediment Transport, Nordic Hydrology Vol.22, pp.227-242, (1991).
- [37] **KOLAR, V., JICINSKY, K.** Estimation of Washload Produced on Certain Small Watersheds, Discussion, ASCE, Vol.101, No. HY7, (1975).
- [38] **AMOROCHO, J.** Measures of the linearity of Hydrologic Systems, Journal of Geophysical Research, Vol.68, No.8, (1963).
- [39] **AMOROCHO, J.** The Nonlinear Prediction Problem in the Study of the Runoff Cycle, Water Res. Res., Vol.3, No.23, (1967).
- [40] **GÜLDAL, V., MÜFTÜOĞLU, R. F.** Havza Simulasyonunda Nonlinear Hidrolojik Modeller, VIII. Müh. Haftası, S.D.Ü. Müh. Mim. Fak. Isparta, 26-38 Mayıs, (1994).
- [41] **DISKIN, M. H.** Nonlinear Hydrologic Models, Rainfall-Runoff Relationships, Ed. by V.P.Sing, Water Res. Publ. Littleton, Colo., U.S.A, (1982).

- [42] **MÜFTÜOĞLU, R. F.** Yağış-Akış Modelleri, Hidrolojik Analiz ve Tasarım, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, Hidrolik Anabilim Dalı, E.İ.E.İ için Hazırla. pp.107-161, 23 Eylül-4 Ekim (1991).
- [43] **CHOW, V. T., KULANDAISWAMY, V. C.** General Hydrologic System Model, J.Hydraulic Div. Proc. ASCE, Vol.97, No. HY6, June (1971).
- [44] **SING, V. P., CORRADINI, C., MELONE, F.** A Comparison of Some Methods of Deriving the Instantaneous Unit Hydrograph, Nordic Hydrology, 16, pp.1-10, (1985)
- [45] **SHARMA, T. C., DICKINSON, W. T.** System Model of Daily Sediment Yield, Water Res. Res. Vol.16, No.3, June (1980).
- [46] **EAGLESON, P. S., MEJIA, R. R., MARCH, F.** Computation of Optimum Realizable Unit Hydrographs, Water Res. Res., Vol.2, No.4, (1966).
- [47] **BAYAZIT, M.** Instantaneous Unit Hydrograph Derivation By Spectral Analysis and Its Numerical Application, Cent. Treaty Organization Symp. on Hydrology and Water Res. Dev. pp.127-149, Ankara, (1966).
- [48] **HINO, M.** Runoff Forecasts by Linear Predictive Filters, J. Hydraulics Division, ASCE, Vol.96, No. HY3, Proc. Paper 7146, March (1970).
- [49] **PAPAZAFIRIOU, Z. G.** Polynomial Approximation of the Kernels of Closed Linear Hydrologic Systems, Journal of Hydrology, Vol.27, (1975).
- [50] **DOOGE, J. C. I.** Problems and Methods of Rainfall-Runoff Modeling, Mathematical Models for Surface Water Hyd., Proc. of the Workshop Held at the IBM Sc. Cent., Pisa, Italy, Ed.by Tito A. Ciriani et al., John Wiley & Sons, Ltd., (1978).
- [51] **SING, V. P.** Estimation of Parameters of a Uniformity Nonlinear Surface Runoff Model, Nordic Hydrology, 8, pp 33-46, (1977).
- [52] **SING, V. P., McCANN, R. C.** Mathematical Modeling of Watershed Response, Proceedings. of the Int. Co. on Water Res. Dev., Taiwan, Republic of China, May.12-14, (1980).
- [53] **SING, V. P.** Mathematical Modeling of Watershed Runoff, Int. Con. on Water Resources Engin. , Thailand, 10-13 January (1978).
- [54] **GEORGAKAKOS, A. P., KBAOURIS, J. C.** A Streamflow Model Using Physically-Based Instantaneous Unit Hydrographs, Journal of Hydrology, 111, pp.107-131, (1989).

- [55] **JAKEMAN, A. J., LITTLEWOOD, I. G.** Computation of the Instantaneous Unit Hydrograph and Identifiable Component Flows With Application to Two Small Upland Catchments, *J. Hydrology*, 117, pp.275-300, (1990).
- [56] **DICKINSON, W. T., HOLLAND, M. E., SMITH, G. L.** An Experimental Rainfall-Runoff Facility, *Hydro. Papers*, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., September (1967).
- [57] **International Symposium on Runoff and Sediment Yield Modeling**, Dept. Hyd. Structures, Warsaw Agri.Univ. SGGW, ul Nowoursynowska 166, PL-02-766 Warsaw, Poland, September 14-16, (1993).
- [58] **Modeling Hydrologic Processes**, Proceeding of the Ford Collins Third International Hydrology Symposium on Theoretical and Applied Hydrology, Ed.by Hubert J. Monel-Seytoux and others, Water Res. Publ. Fort Collins, Colo., U.S A., pp.445-477, July 27-29, (1977).
- [59] **BRUNNER, G. W.** The Hydrologic Engineering Center's Activities in Watershed Modelling, U.S.Army Corps of Engin., The Hyd. Center, Tech.Paper No.116 July (1987).
- [60] **CLARKE, R. T.** Mathematical Models in Hydrology, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 19, FAO, Rome, (1984).
- [61] **Pre-Symposium Proceedings**, International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling Miss. State Univ., Mississippi. pp.233-315, May (1981).
- [62] **AMOROCHO, J.** Nonlinear Hydrologic Analysis, *Advances In Hydrosiences*, Vol.9, Academic Press, New York, pp.203-251, (1973).
- [63] **MOHLER, R. R.** Nonlinear Systems, Vol. II, Application to Bilinear Control, Prentice-Hall, Inc. Advising of Simon & Schuster Englewood Cliffs, New Jersey pp.86-120, (1991).
- [64] **WIENER, N.** Nonlinear Problems in Random Theory, MIT Press, Cambridge, Mass., (1958).
- [65] **SCHETZEN, M.** Measurement of the Kernels of A nonlinear System of Finite order, *Int. J. Contr.*1, No.3, pp.251-263, (1965).
- [66] **LEE, Y. M., SCHETZEN, M.** Measurement of the Wiener Kernels of a Nonlinear System by Cross-Correlation, *Int. J. Contr.*, Vol.2 (3) pp.237-254, (1965).
- [67] **JACOBY, S. L. S.** A Mathematical Model For Nonlinear Hydrologic Systems. *J. Geoph. Res.*, Vol.71(20), pp.4811-4824, (1966).

- [68] **HINO, M., SUKIGARA, T., KIKKAVA, T.** Nonlinear Runoff Kernels of Hydrologic Systems, Proceed. Bilateral U.S.Japan Seminar in Hydrology, Water Res. Publ., Fort Collins, Colo. pp.102-112, (1971).
- [69] **AMOROCHO, J., BRANDSTETTER, A.** Determination of Nonlinear Functional Response Functions in Rainfall-Runoff Processes, Water Res. Res., Vol.7 No.5, October, (1971).
- [70] **BIDWELL, V. J.** Regression Analysis of Nonlinear Catchments Systems. Water Resources Research Vol.7, No.5, pp.1118-1126, (1971).
- [71] **DISKIN, M. H., BONEH, A.** Determination of Optimal Kernels for Second-Order Stationary Surface Runoff Systems, Water Resources Research, Vol9, No.2, pp.311-325, (1973).
- [72] **PAPAZAFIRIOU, Z. G.** Linear and Nonlinear Approaches for short-term Runoff Estimations in Time-Invariant Open Hydrologic Systems Journal of Hydrology, 30, pp.63-80, (1976).
- [73] **HELVEG, O. J., AMOROCHO, J., FINCH, R. H.** Improvement of Nonlinear Rainfall-Runoff Model, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol.108, No. HY7, July (1982).
- [74] **RAO, S. G., RAO, A. R.** Recursive Estimation of Kernels of Nonlinear Rainfall-Runoff Models, J. Hydrology, Vol.95, pp.341-364, (1987).
- [75] **XIA, J.** Identification of a Constrained Nonlinear Hydrological System Described by Voltaire Functional Series, Water Res. Research, Vol.27, No.9, pp.2415-2420, (1991).
- [76] **PAPAMICHAIL, D., PAPAZAFIRIOU, Z.** Prediction of Daily Runoff by Using a Nonlinear Rainfall-Runoff Functional Model, Adv. in Water Resources Tech., Ed by G. Tsakiris, Ballgame, Hoterdam, (1991).
- [77] **KACHROO, R. K., NATALE, L.** Non-Linear Modeling of the Rainfall-Runoff Transformation, Journal of Hydrology, 135, pp. 341-369, (1992).
- [78] **LIANG, G. C., O'Connor, K. M., KACHROO, R. K.** A Multiple-Input Single-Output Variable Gain Factor Model, Journal of Hydrology, 155, pp.185-198, (1994).
- [79] **AHSAN, M., O'Connor, K. M.** A Simple Non-Linear Rainfall-Runoff Model With a Variable Gain Factor, J. Hydrology, 155, pp.151-183, (1994).
- [80] **BAYAZIT, M.** Lineer ve Non-Lineer Akış-Yağış Bağlılıları, İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Bülteni, Sayı.3-4, (1971).

- [81] **MÜFTÜOĞLU, R. F.** Nonlinear Havza Modelleri, 1. Ulusal Hidroloji Kongresi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, 12-14 Kasım, (1979).
- [82] **MÜFTÜOĞLU, R. F.** New Models for Nonlinear Catchments Analysis, Journal of Hydrology, 73, pp.335-357, (1984).
- [83] **MÜFTÜOĞLU, R. F.** Monthly Runoff Generation by Non-Linear Models, Journal of Hydrology, 125, pp.277-291, (1991).
- [84] **YEVJEVICH, V.** Stochastic Processes in Hydrology, Water Resources Publications, Fort Collins, Colo., U. S. A., (1972).
- [85] **JOHNSTON, P. R., PILGRIM, D. H.** Parameter Optimization for Watershed Models, Water Resources Research, Vol.12, No.3, June (1976).
- [86] **CHIEW, F. H. S., STEWARDSON, M. J., McMahon, T. A.** Comparison of Six Rainfall-Runoff Modeling Approaches, Journal of Hydrology, 147, pp.1-36, (1993).
- [87] **ASCE.** Task Committee., Criteria for evaluation of Watershed Models. J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE, Vol.119, No.3, (1993).
- [88] **HOSTETTER, G. H., SANTINA, M. S., D'CARPIO-MONTALVO, P.** Analytical, Numerical, And Computational Methods For Science and Engineering, Prentice-Hall International, Inc. (1991).
- [89] **DEMİRÖZ, E.** Sediment Sampling Activities In Turkey, Fourth International Symposium On River Sedimentation Beijing, China Nov.1-5, (1989).
- [90] **BROWN, R. T., CHOTE, K. D.** Daily Suspended Sediment Model For Water Resources Management, Sediment Transport Modeling, Ed. by Sam, S. Y. Wang, Publ. by the ASCE, pp.642-647, (1989).
- [91] **CAREY, W. P., BROWN, R. T., CHATHAM, G. C.** History of Suspended-Sediment Data Collection and Inventory of Available Data for the Tennessee and Cumberland River Basins, USGS Open File Report. 88-497, Prep. in Tennessee Tech. Univ., (1988).

EK A

BİLGİSAYAR PROGRAMI VE AKIŞ ŞEMASI

```
DIM X(500), KQ(500), PREDKQ(300)
DIM ER(300), ERI(300), FCAST(300), OER(300)
```

REM BOLUM: 1 Dataların OKUTULMASI ve ISLEMLER.

```
CLS
INPUT " NOD = " ; NOD
INPUT " NOD1 = " ; NOD1
INPUT " NL = " ; NL
INPUT " N = " ; N
INPUT " NDEG = " ; NDEG
INPUT " LTIME = " ; LTIME
FOR I = 1 TO NOD1
  READ X (I)
  PRINT "X (" ; I ; ") ="; X(I)
NEXT I
FOR I = 1 TO NOD1
  READ KQ (I)
  PRINT "KQ (" ; I ; ") ="; KQ(I)
NEXT I
```

REM DAVRANIS FONKSIYONLARI Sayısı (KERNEL SAYISI)

```
IF NDEG = 1 THEN NT = NL
IF NDEG = 2 THEN NT = NL + N * (N + 1) / 2
IF NDEG = 3 THEN NT = N
DIM A(NT, NT), B(NT), C(NT)
NODT = NOD1 - NOD
```

REM DAVRANIŞ FONKSIYONLARININ OPTİMİZASYONU

```
ISIRA = 1
PRINT "1. Kısım KALİPRASYON  2. Kısım TEST PERİYODU "
PRINT"*****"
NA = NL + N
10 C = 0
CLAST = NOD - NA - LTIME
IF ISIRA = 1 THEN GOTO 20
CLAST = NOD1 - NA - LTIME
PRINT "1. Kısım TEST  2. Kısım KALİBRASYON PERİYODU"
PRINT"*****"
```



```

20   IDM = 1
    FOR IR = 1 TO NT
    FOR IK = 1 TO NT
30   A(IR, IK) = 0
    NEXT IK
    NEXT IR
    FOR IR = 1 TO NT
    B(IR) = 0
    NEXT IR

    REM OTO-KORELASYON Fonks. MATRISI olusuyor
40   IR = 0
    CN = C + NL
    CQ = C + NA + LTIME
    FOR IR = 1 TO NL
    FOR IK = IR TO NL
    A(IR, IK) = A(IR, IK) + X(IR + CC) * X(IK + CC)
    NEXT IK
    NEXT IR
    IF NDEG = 1 THEN 80
    FOR I = 1 TO NL
    IK = NL
    IR = IR + 1
    FOR J = 1 TO N
    FOR K = J TO N
    IK = IK + 1
    A(IR, IK) = A(IR, IK) + X(I + CC) * X(J + CN) * X(K + CN)
    NEXT K
    NEXT J
    NEXT I
    FOR I = 1 TO N
    IF NDEG = 3 THEN J = I: GOTO 45
    FOR J = I TO N
45   IR = IR + 1
    IK = NL
    FOR K = 1 TO N
    IF NDEG = 3 THEN L = K: GOTO 50
    FOR L = K TO N
50   IK = IK + 1
    IF IK < IR THEN 55
    A(IR, IK) = A(IR, IK) + X(I + CN) * X(J + CN) * X(K + CN) * X(L + CN)
55   IF NDEG = 3 THEN GOTO 60
    NEXT L
60   NEXT K
    IF NDEG = 3 THEN GOTO 70
    NEXT J
70   NEXT I

```

```

      REM KROS- KORELASYON Fonksı. MATRISI Olusuyor
80    IR = 0
      FOR I = 1 TO NL
      IR = IR + 1
      B(IR) = B(IR) + X(I + CC) * KQ(CQ)
      NEXT I
      IF NDEG = 1 THEN 100
      FOR I = 1 TO N
      IF NDEG = 3 THEN J = I: GOTO 85
      FOR J = I TO N
85    IR = IR + 1
      B(IR) = B(IR) + X(I + CN) * X(J + CN) * KQ(CQ)
      IF NDEG = 3 GOTO 90
      NEXT J
90    NEXT I
      LOCATE 1, 30: PRINT "C"; C
100   C = C + 1
      IF C <= CLAST THEN 10

      REM A(I,J) Matrisı SMETRIK Olarak YAZILIYOR
      FOR I = 1 TO NT
      FOR J = I TO NT
      PRINT "A("; I; ", "; J; ")="; A(I, J)
      NEXT J
      NEXT I

      REM B(I) Vektörü SUTUN MATRISI Olarak YAZILIYOR
      FOR IK = 2 TO NT
      IK1 = IK - 1
      FOR IR = 1 TO IK1
      A(IK, IR) = A(IR, IK)
      NEXT IR
      NEXT IK
      PRINT
      PRINT"          OTO KOROLASYON Fonksiyonları MATRISI "
      PRINT"          *****"
      FOR I = 1 TO NT
      FOR J = 1 TO NT
      PRINT "A("; I; ", "; J; ")="; A(I, J);
      NEXT J
      NEXT I
      PRINT"          KROS-KOROLASYON Fonksiyonları MATRISI "
      PRINT"          *****"
      FOR I = 1 TO NT
      PRINT "B("; I; ")="; B(I)
      NEXT I

```

REM BOLUM 2: DAVRANIS FONKSIYONLARININ HESAPLANMASI

GOSUB 1000

PRINT *****

PRINT "DEGISKENLER"

PRINT *****

```
PRINT " Toplam Gozlem Sayısı .....="; NOD1
```

```
PRINT " Kalibrasyon İçin Kullanılan Gözlem Sayısı ...="; NOD
```

```
PRINT " Test İçin Kullanılan Gözlem Sayısı .....="; NODT
```

```
PRINT " Model Dereces1.....="; NDEG
```

```
PRINT " Lineer Hafiza.....="; NL
```

```
PRINT " Nonlinear Hafiza.....="; N
```

```
PRINT " Toplam Hafiza (Model Hafızası).....= "; NA
```

```
PRINT " Tahmin Suresi .....=" ; LTIME
```

```
PRINT " Sayıcı Operatoru (CLAST).....=" ; CLAST
```

REM BOLUM 3 : TAHMINLER ve HATA MIKTARLARI

$$\text{KIS} \approx 1$$
$$\text{TKQ} = 0$$
$$K = NA + LTIME$$

FOR I = K1 TO NOD

$$TKQ = TKQ + KQ(I)$$

NEXT I

$$OKQ = TKQ / (NOD - NA)$$
$$\text{CLAST} = \text{NOD} + \text{NA} + \text{LTIME}$$

```
PRINT "*****"
```

PRINT " TAHMIN ORTALAMADAN KALINTI "

PRINT " GUNLERI SAPMALAR HATALARI "

PRINT "*****"

110 SE = 0

120 JR = 1

$$\text{FCAST} = 0$$
$$CO = C - NA - LTIME$$

FOR I = 1 TO NL

$$\text{FCAST} = \text{FCAST} + C(\text{JR}) * X(I + C)$$
$$\mathbb{R} = \mathbb{R} + 1$$

130 NEXT I

```
IF NDEG = 1 THEN 150
```

FOR I = 1 TO N

IF NDEG = 3 THEN J = I: GOTO 135

FOR J = I TO N

```
135  FCAST=FCAST+C(JR)*X(I+CN)*X(J+CN)
```

140 JR = JR + 1

IF NDEG = 3 THEN GOTO 145

NEXT J

145 NEXT I

REM Modellerın UYGUNLUK KRİTERLERİ Hesaplanıyor

```
150 REDKQ(CQ) = FCAST
```

```

ER(CQ) = PREDKQ(CQ) - KQ(CQ)
OER(CQ) = KQ(CQ) - OKQ
PRINT USING"###  #####. ##  #####.## "; CQ; ER(CQ); OER(CQ)
ERI(CQ) = ER(CQ) / KQ(CQ) * 100
SE = SE + ER(CQ) ^ 2
KSE = SE ^ .5
OSE = OSE + OER(CQ) ^ 2
170 C = C + 1
IF C <= CLAST THEN 90
IF KIS = 2 THEN 200
RMSQE1 = KSE / (NOD1 - NA)
RR1 = 1 - (SE / OSE)
PRINT "*****"
PRINT "          OLCULMUS  TAHMINI  HATAMIKTARI"
PRINT " GUN  YAGIS  SEDIMENT  SEDIMENT      %"
PRINT "*****"
FOR I = 1 TO NOD1
PRINT USING"#  .#  .#  .#  .#  .# "; I; X(I); KQ(I); PREDKQ(I);ERI(I)
NEXT I

KIS = 2
C = NOD
MLAST = NOD - NA - LTIME
TKQ = 0
K2 = NOD + NA + LTIME
FOR I = K2 TO NOD
TKQ = TKQ + KQ(I)
NEXT I
OKQ = TKQ / (NODT - NA)
PRINT "*****"
PRINT "  TAHMIN  ORTALAMADAN  KALINTI  "
PRINT "  GUNLERI  SAPMALAR  HATALARI  ."
PRINT "*****"
200 RMSQE2 = KSE / (NODT - NA)
RR2 = 1 - (SE / OSE)
NM = NOD + 1
PRINT "*****"
PRINT "          OLCULMUS  TAHMINI  HATA MIKTARI"
PRINT " GUN  YAGIS  SEDIMENT  SEDIMENT      %"
PRINT "*****"
FOR I = NM TO NOD
PRINT USING"#  .#  .#  .#  .#  .# "; I; X(I); KQ(I);PREDKQ(I);ERI(I)
NEXT I
I1 = NA + LTIME
I2 = NOD + NA + LTIME
TKQ1 = 0
TPR1 = 0
FOR I = I1 TO NOD1

```

```

TKQ1 = TKQ1 + KQ(I)
TPR1 = TPR1 + PREDKQ(I)
NEXT I
DV1 = (TKQ1 - TPR1) / TKQ1 * 100
PRINT
PRINT"   TOPLAM DEGERLER VE HATA MITARLARI           "
PRINT"*****"
PRINT"                               O.K.K  N.-SUTCLIFFE YUZDE  "
PRINT"SIRA  OLC.  TAHMINI  HATA    H. KIRITE.  H.KIRITE.  "
PRINT"NO  DEGER  DEGER  (RMSQE)    (RR)    (DV(%))  "
PRINT" *****"
PRINT USING " K1s.2 #####.# #####.# #####.# #####.# ###.##"; TKQ2;
                                KQ1; TPR1; RMSQE1; RR1;DV1

TKQ2 = 0
TPR2 = 0
FOR I = I2 TO NOD1
TKQ2 = TKQ2 + KQ(I)
TPR2 = TPR2 + PREDKQ(I)
NEXT I
DV2 = (TKQ2 - TPR2) / TKQ2 * 100
PRINT USING " K1s.2 #####.# #####.# #####.# #####.# ###.##"; TKQ2;
                                TPR2; RMSQE2;RR2;DV2

ISIRA = ISIRA + 1
END
DATA

REM DAVRANIS FONKSIYONLARI Degerlerinin HESABI
CLS
1000 REDIM N(NT, NT), C(NT)
FOR J = 1 TO NT
FOR I = 1 TO NT
N(I, J) = 0
NEXT I
NEXT J
FOR I = 1 TO NT
N(I, I) = 1
NEXT I
FOR J = 1 TO NT
P = 0
FOR I = J TO NT
S = A(I, J) * A(I, J)
IF S > P THEN Q = I
IF S > P THEN P = S
NEXT I
IF P = 0 THEN GOTO 880
IF J = Q THEN GOTO 530
FOR K = 1 TO NT
S = A(J, K)

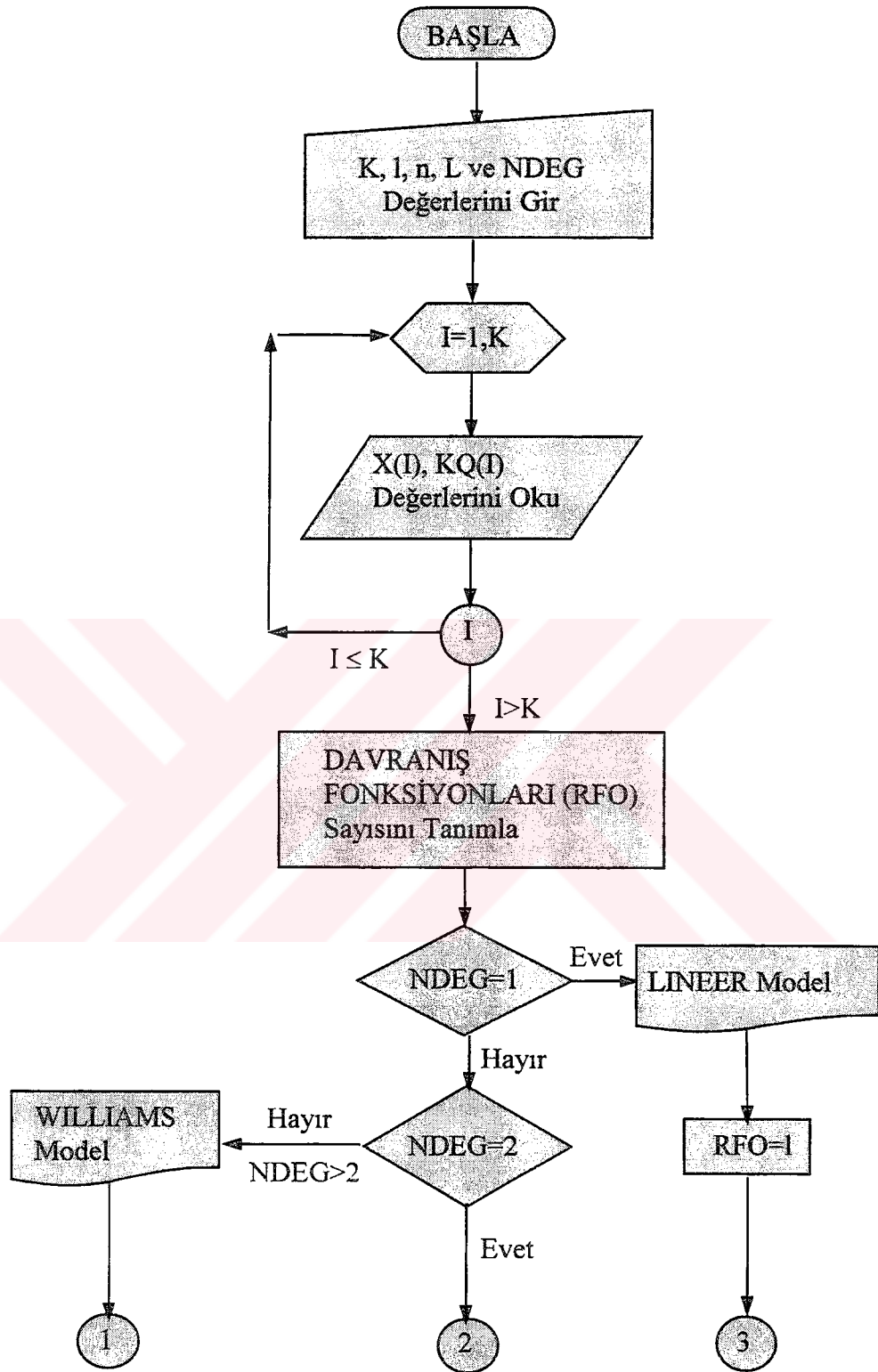
```

```

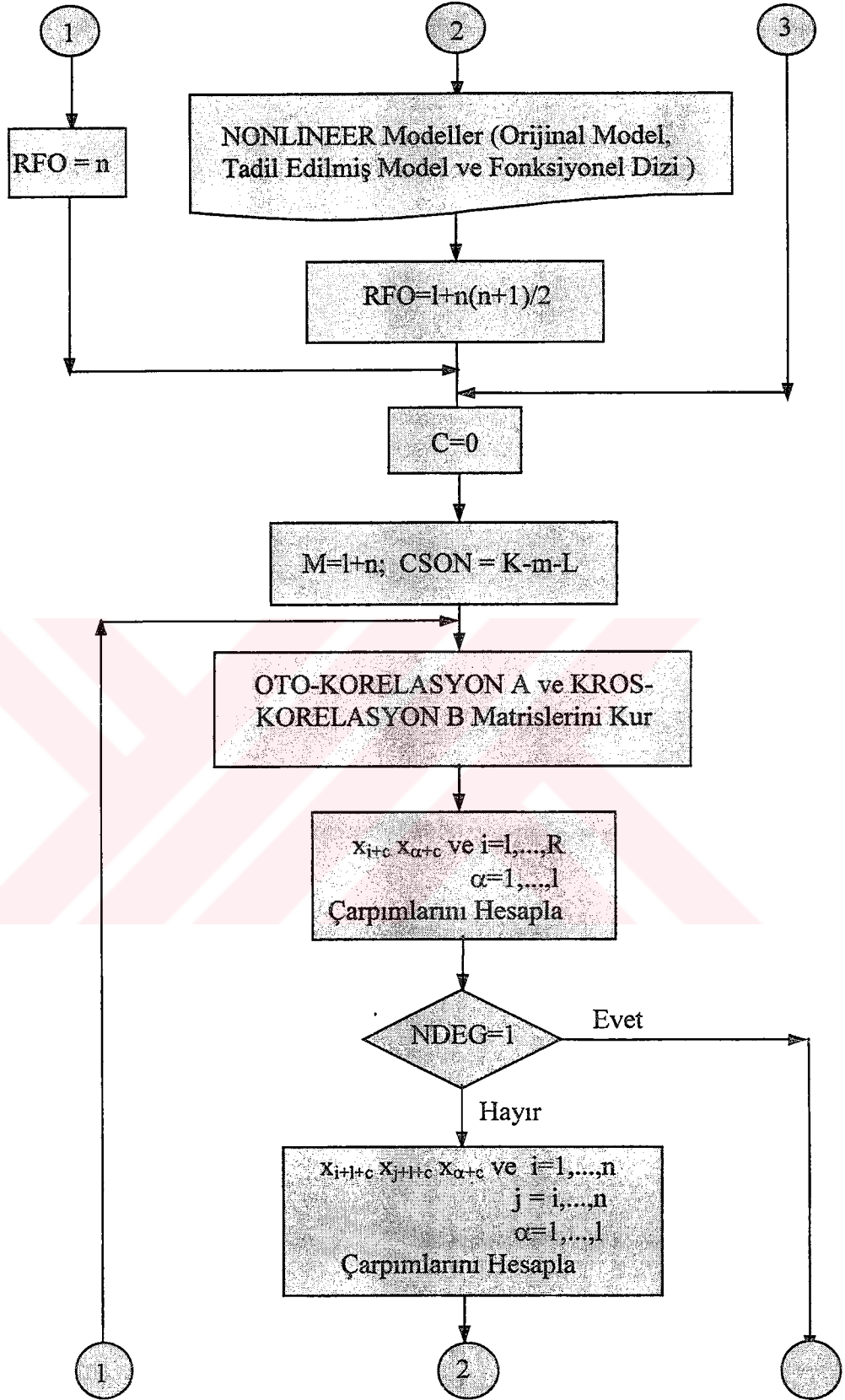
T = N(J, K)
A(J, K) = A(Q, K)
N(J, K) = N(Q, K)
A(Q, K) = S
N(Q, K) = T
NEXT K
530 S = A(J, J)
FOR K = 1 TO NT
A(J, K) = A(J, K) / S
N(J, K) = N(J, K) / S
NEXT K
FOR I = 1 TO NT
IF I = J THEN GOTO 680
S = A(I, J)
FOR K = 1 TO NT
A(I, K) = A(I, K) - S * A(J, K)
N(I, K) = N(I, K) - S * N(J, K)
NEXT K
680 NEXT I
NEXT J

REM N(I,J) =INVERS A(I, J)
PRINT " INVERSE A(I,J) MATRISI "
PRINT " ***** "
FOR I = 1 TO NT
FOR J = 1 TO NT
PRINT "N("; I; ", "; J; ")="; N(I, J)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NT
C(I) = 0
FOR J = 1 TO NT
C(I) = C(I) + N(I, J) * B(J)
NEXT J
NEXT I
PRINT
PRINT " DAVRANIS FONKSIYONLARI "
PRINT " *****"
FOR I = 1 TO NT
PRINT "C("; I; ")="; C(I)
NEXT I
GOTO 900
880 PRINT " SINGULAR MATRIS "
900 RETURN

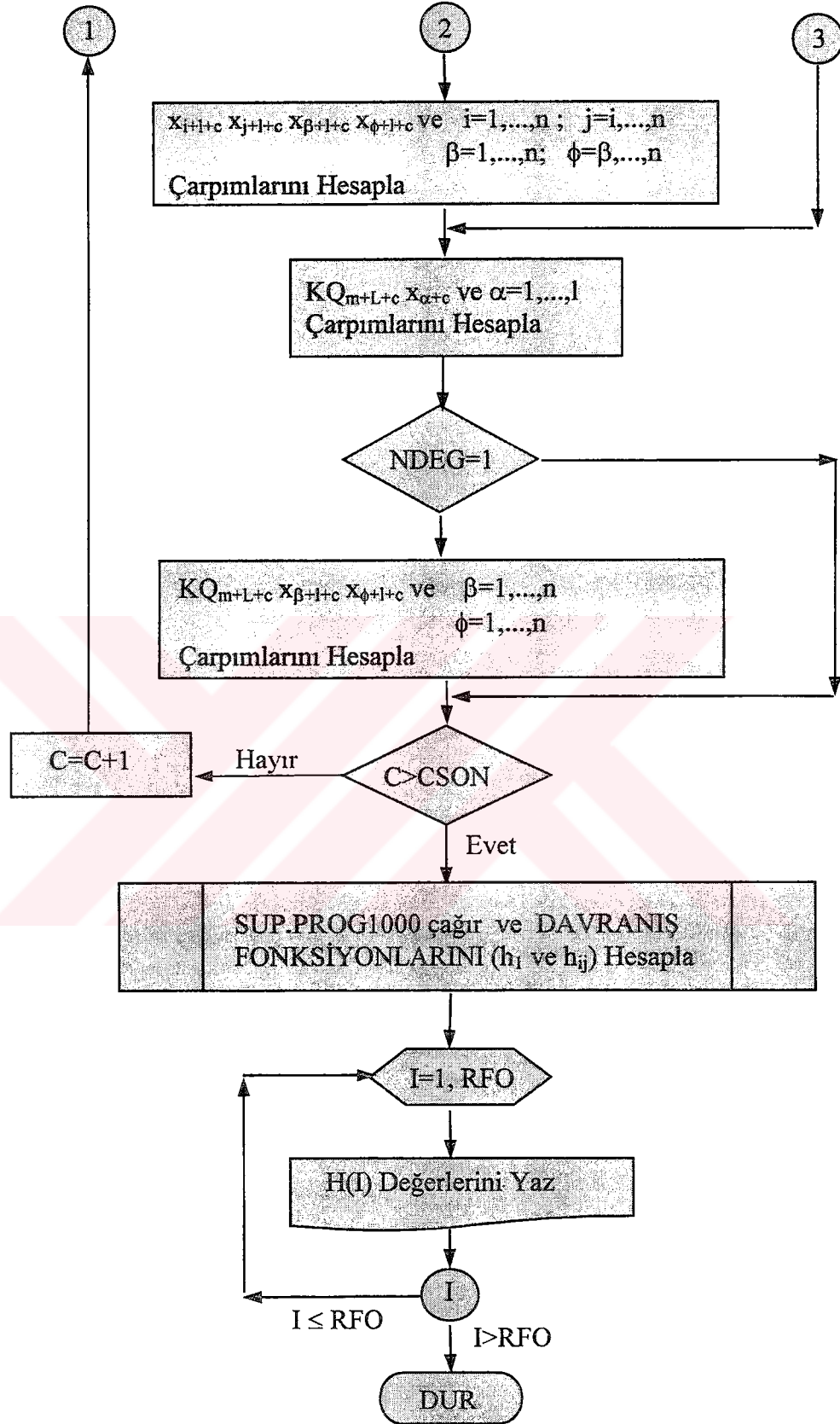
```

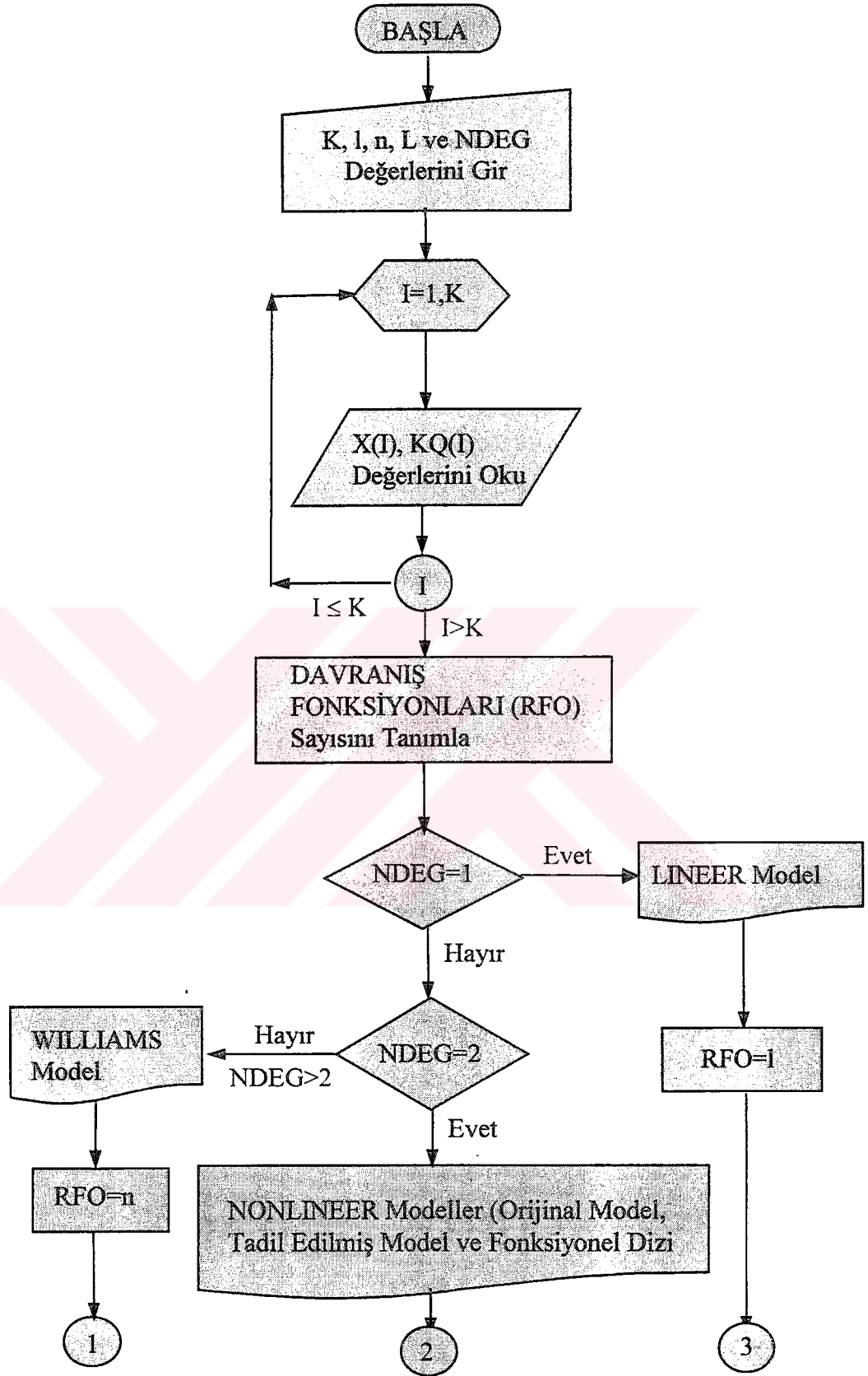
Şekil A.1a Optimizasyon Programına Ait Akış Şeması



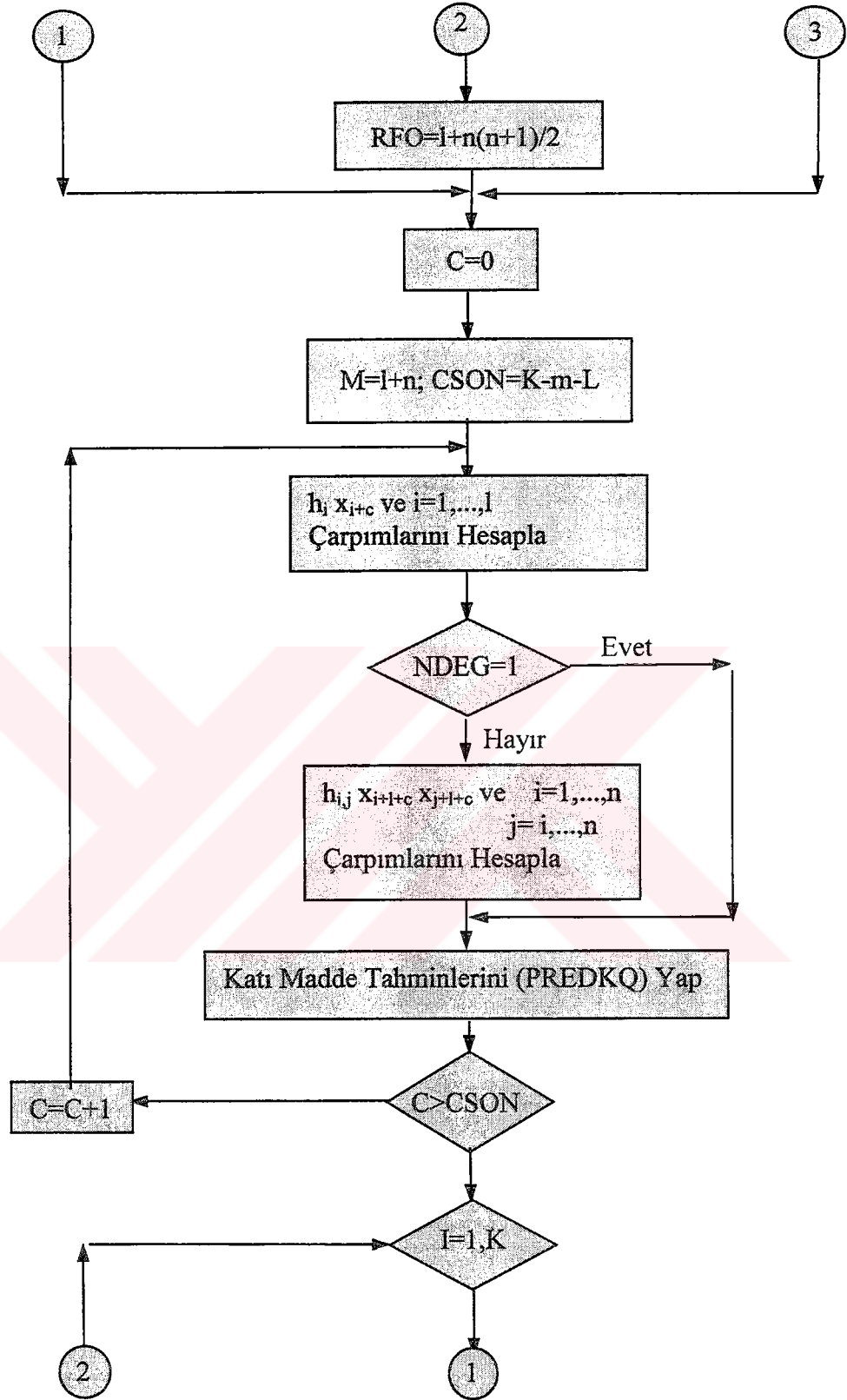
Şekil A.1a Devamı.



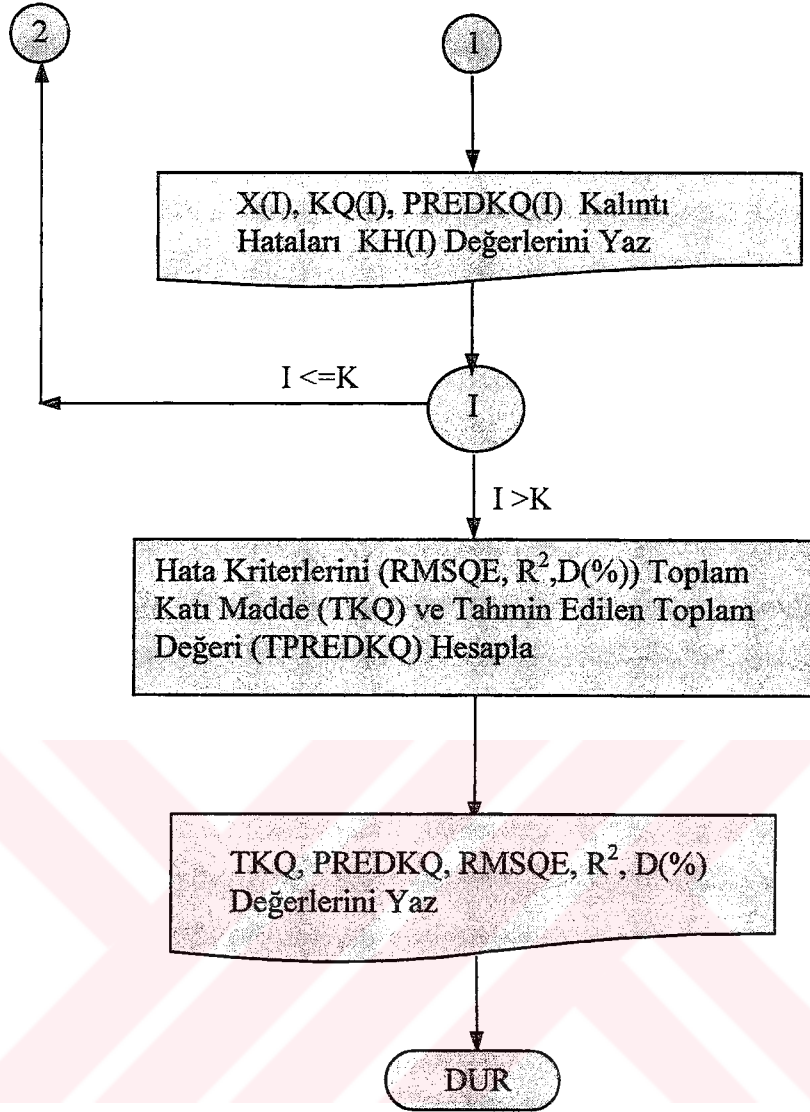
Şekil A.1a Devamı.



Şekil A.1b Tahmin Programına Ait Akış Şeması



Şekil A.1b Devamı.



Şekil A.1b Devamı.

ÖZGEÇMİŞ

Veysel GÜLDAL, 1964 yılında Uluborlu – Isparta’da doğmuştur. İlk öğrenimini Uluborlu Dereköyü İlkokulu ve ilçe merkez Atatürk İlkokulunda, Orta ve Lise Öğrenimini Uluborlu Lisesinde birinci olarak tamamlamıştır. 1981 yılında Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmiş, 1985 yılında mezun olmuştur.

1986 yılı sonunda İller Bankası XVI. Bölge Müdürlüğü İçme Suyu ve Kanalizasyon Dairesi Başkanlığında İnşaat Mühendisi olarak göreve başlamıştır. 1987 yılında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamış ve aynı yıl itibarıyla Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başlamıştır. 1990 yılında Yüksek Mühendis ünvanını almıştır. 1991 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora çalışmasına başlamıştır.

Halen Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta olup evli ve iki çocuk babasıdır.