



**MUSKINGUM METODU  
KULLANILARAK TAŞKIN ÖTELENMESİ**

**Aşlı ÜLKE**

**Yüksek Lisans Tezi  
İNŞAAT MÜH. ANABİLİM DALI  
Isparta-2003**

T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MUSKINGUM METODU KULLANILARAK TAŞKIN ÖTELENMESİ

Danışman : Doç. Dr. M. Erol KESKİN

135794

ASLI ÜLKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜH. ANABİLİM DALI

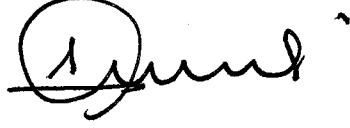
ISPARTA 2003

135794

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne,

Bu çalışma jürimiz tarafından İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

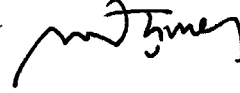
Başkan : Doç.Dr. M.Erol KESKİN (Danışman)



Üye : Yrd.Doç.Dr. Recep BAKIŞ



Üye : Yrd.Doç.Dr. Mesut ÇİMEN



#### ONAY

Bu tez 01.07.2003 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

01.07/2003

**S.D.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ**

**Adı Soyadı : Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL**

**İmza**



**İÇİNDEKİLER**

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Konunun Tanıtılması ve Önemi.....	1
1.2. Türkiye’de Taşkınlar .....	1
1.3. Taşkın Ötelenmesi .....	5
1.4. Taşkın Ötelenme Hesaplarının Taşkın Kontrolüne Faydaları .....	7
1.5. Taşkın Ötelenme Yöntemleri.....	9
1.5.1. Deneysel Ötelenme .....	9
1.5.2. Hidrolik Ötelenme.....	9
1.5.3. Hidrolojik Ötelenme.....	10
1.6. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol .....	10
2. KAYNAK BİLGİSİ .....	12
3. MATERYAL ve METOT .....	42
3.1. Materyal.....	42
3.1.1. Havza Özellikleri .....	42
3.1.2. Taşkın Havzasının Jeolojik Yapısı.....	42
3.1.3. Taşkın Alanı Hidrolojisi ve Sütçüler Taşkını .....	43
3.2. Metot .....	47
3.2.1. Temel Denklemler.....	47
3.2.1.1. Kararsız Akım Denklemleri.....	48
3.2.2. Akarsularda Taşkın Ötelenmesi .....	53
3.2.3. Hidrolik Modeller .....	61
3.2.3.1. Difüzyon Analogisi .....	62
3.2.3.2. Kinematik Dalga Modeli .....	63

3.2.3.3. Muskingum Cunge Modeli .....	66
3.2.3.4. Dinamik Ötelenme .....	69
3.2.4. Hidrolojik Metotlar .....	69
3.2.4.1. Haznelerde Taşkın Ötelenmesi .....	72
3.2.4.2. Puls Metodu; .....	74
3.2.4.3. Değişken Değerler Metodu .....	76
3.2.4.4. Muskingum Modeli .....	77
4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	83
5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	87
6. KAYNAKLAR .....	88
ÖZGEÇMİŞ .....	93



**ÖZET**

Akarsu havzalarında, debinin akarsu yatak kapasitesini aşması halinde sular yatak dışına taşar ve bu olay taşkın olarak adlandırılır. Yurdumuzda meydana gelen taşkın olayları incelendiğinde taşkınların, erozyona maruz bulunan, üzerinde bitki örtüsü tahrip olmuş veya yok olmuş su havzalarında ve de taşkın koruma yapılarının olmadığı akarsularda ortaya çıktığı görülmektedir. Eğimli ve çıplak arazilerde yağış sularının büyük bir bölümü yüzeysel akışa geçerek kısa sürede yüksek akış hızına ulaşmaktadır. Erozyon sonucu katı madde ile yüklenen taşkınlar, can ve mal kaybına neden olmaktadır. Bu yüzden taşkınlar Türkiye için, gerek arazi yapısı gerek çarpık kentleşme ve orman arazilerinin tahribatı neticesiyle depremlerden sonra gelen en önemli doğal afet olmuştur. Taşkınlar, büyük debi, büyük hızlar ve yüksek su seviyeleri ile karakterize edildiğinden, akarsular üzerinde inşa edilecek tüm yapılar için bu taşkın karakteristiklerinin bilinmesi ve bu karakteristiklere göre önlemlerin alınması gerekir. DSİ' nin 1998 yılında yayınlamış olduğu Türkiye' de son otuz yılda gözlenen taşkın olayları envanterine göre 1970-1997 yılları arasında 626 taşkın olayı meydana gelmiştir. Tüm bu taşkınlarda oluşan maddi zarar 1,6 milyon dolardır.

Taşkın ötelenmesi, akarsu yatağı, kapalı mecra veya biriktirme haznelinde ilerleyen taşkın dalgasının zamana ve konuma bağlı değişiminin matematiksel olarak belirlenmesidir. Taşkın ötelenme hesapları, hidrolik ve hidrolojik olarak ikiye ayrılır. Hidrolik metotlar kütle ve momentum korunum prensibine dayanırken hidrolojik metotlar sadece kütlenin korunum prensibine dayanır. Çalışmada 4 kasım 1995 yılında Aksu Akarsuyu' nun bir kolu olan Sütçüler Değirmendere' de meydana gelen, can ve mal kaybına yol açan taşkın olayı dikkate alınmıştır. Yatakta oluşan taşkın piklerinin matematiksel olarak modellenmesinde hidrolojik metotlardan biri olan Muskingum modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile DSİ. 18. Bölge Müdürlüğü tarafından ölçülmüş olan taşkın pik değerleri karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonucunda sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Taşkın ötelenmesi, Muskingum Modeli, Açık kanal, Hidrolojik metot, Hidrolik metot, Kararsız akım

## ABSTRACT

In river basins, the flooding event occurs when the discharge of water running through of a river is more than a river capacity and this is called the water overflow. When the flooding event occurred in Turkey are studied, it is observed that floods are occurred in water basins which are under erosion, and have a plant cover which is destroyed or disappeared and rivers which do not have flood protection facilities. Large amount of rainfall start to run on surface and reach high current speeds in a short time in lands with slope and no plants. The floods loaded with sediment as a result of erosion cause life and property losses. Therefore, floods are the most important natural disasters for Turkey after earthquakes because of land shapes, unusual urban and destruction of forest areas. Since floods are characterized by large amount of discharges, high speeds, and high water levels, these flood characteristics should be known and preventive actions must be taken for all buildings to be built in river basins. 626 flood events are monitored from 1970 to 1997 according to the inventory of flood events observed in last thirty years which is published by DSI in 1998. The monetary loss is \$1.6 million because of these floods.

Flood routing is determined mathematically based on time and place of moving of flood waves in river basins, closed channels, or collection tanks. Flood routing calculations can be classified into two groups which are hydraulic and hydrologic methods. While the hydraulic methods are based on conservation of mass and momentum, the hydrological methods are only based on conservation of mass. In this study, the flood which occurred in Sütçüler Değirmendere, a branch of the Aksu River, and cause loss of lives and properties in November 4<sup>th</sup>, 1995 is considered. The Muskingum Model, one of the hydrological methods, was used to mathematical modelling of the flood peaks occurred in the river. The results of this model were compared to the results which were measured by DSI 18<sup>th</sup> Regional Office and an agreement between these values was obtained.

**Key Words:** Flood routing, Muskingum Model, Open channel, Hydrologic method, Hydraulic method, Unsteady flow.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Taşkınlar, Türkiye için, gerek arazi yapısı gerek çarpık kentleşme ve orman arazilerinin tahribatı neticesiyle depremlerden sonra gelen en önemli doğal afet olmuştur. Taşkınlar, büyük debi, büyük hızlar ve yüksek su seviyeleri ile karakterize edildiğinden, akarsular üzerinde inşa edilecek tüm yapılar için bu taşkın karakteristiklerinin bilinmesi ve bu karakteristiklere göre önlemlerin alınması gerekir.

Taşkın felaketlerinin önlenmesi için elbette Türkiye'nin topografik yapısını ve iklim koşullarını değiştiremez, ancak taşkın kontrol çalışmalarına ağırlık vererek taşkınlardaki can ve mal kaybını önleyecek önlemler alınabilir. Taşkınların ötelenmesi, taşkın kontrolüne büyük faydalar sağlayan yöntemlerden biridir.

Bu çalışmanın tamamlanmasında, yardım ve görüşlerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. M. Erol KESKİN' e teşekkürlerimi sunarım. Gerekli verileri almamda bana yardımcı olan DSİ XVIII. Bölge Müdürlüğüne, manevi desteğini benden esirgemeyen Araştırma Görevlisi Özlem TERZİ' ye ve başta annem olmak üzere bana güvenen aileme sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.



**SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ**

A	En Kesit Alanı
B	Su Yüzü Genişliği
b	Kanal Genişliği
c	Taşkın Dalga Yayılım Hızı
C	Chezy Sürtünme Katsayısı
C <sub>1</sub>	Muskingum Denklemi Parametresi
C <sub>2</sub>	Muskingum Denklemi Parametresi
C <sub>3</sub>	Muskingum Denklemi Parametresi
D	Difüzyon Katsayısı
F	Froude Sayısı
g	Yer Çekimi İvmesi
h	Su Derinliği
I	Giren Akım
J <sub>0</sub>	Yatak Eğimi
J <sub>f</sub>	Su Yüzü Eğimi
J <sub>i</sub>	İlave Sürtünme Terimi
K	Geçiş Parametresi
L	Kanal Uzunluğu
m	Kütle
n	Manning Sürtünme Katsayısı
O	Çıkan Akım
P	Islak Çevre
q	Yanal Akım Debisi
q <sub>0</sub>	Birim Kanal Genişliğindeki Su Debisi
Q	Debi
S	Depolama
x	Ağırlık Parametresi
R	Reynolds Sayısı
t <sub>p</sub>	Taşkının Pike Ulaşma Süresi
t	Zaman
V	Ortalama Akım Hızı

$z$	DüŖey Koordinat
$\Delta S$	Depolamadaki DeęiŖim
$\Delta x$	Dikkate Alınan Kanalın Uzunluğu
$\Delta t$	Dikkate Alınan TaŖkının GeçiŖ Süresi
$\gamma$	Özgöl Ağırlık
$\eta$	Dispersiyon Katsayısı
$\rho$	Yoğunluk
$\tau_0$	Kayma Gerilmesi



**ŞEKİLLER DİZİNİ**

Şekil 3.1. Taşkın Havza Alanı.....	46
Şekil 3.2. Bir boyutlu akımlarda $x$ , $z$ , $h$ ve $V'$ nin tanımı.....	47
Şekil 3.3. Kanal en kesiti ve hız dağılımı.....	48
Şekil 3.4. Akıma etkiyen kuvvetler.....	50
Şekil 3.5. Sisteme etki eden dış kuvvetler.....	51
Şekil 3.6. Modelleme adımları.....	60
Şekil 3.7. Dört noktalı tipik bir ağ.....	68
Şekil 3.8. Bir akarsu parçasına giren ve çıkan akımların hidrograflarından biriktirme hacminin hesabı.....	71
Şekil 3.9. Depolama ile giriş ve çıkış akımları arasındaki ilişki.....	78
Şekil 3.10. Akarsu parçasında depolama ile çıkan akım arasındaki bağıntının seviyenin alçalması ve yükselmesi hallerinde aldığı şekiller.....	78
Şekil 4. 1. $K$ ve $x$ parametrelerinin bulunuşu.....	84
Şekil 4. 2. Hesaplanan ve ölçülen taşkın debileri.....	85

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

Çizelge 1.1. Türkiye’ de 1970-1999 Dönemi Meydana Gelmiş Taşkınların İstatistiksel Kayıtları (Beyazıt, 2002) .....	3
Çizelge 1.2 Türkiye’de 1970-1998 Dönemi Meydana Gelmiş Önemli Taşkınlar (Beyazıt, 2002).....	4
Çizelge 4.1. Hesaplanan ve ölçülen taşkın değerleri .....	86



## 1. GİRİŞ

### 1.1. Konunun Tanıtılması ve Önemi

Bir yağıştan doğan akışların ilk evresi genellikle bir havzada başlar. Havza akışı havza alanını kaplayan bir su tabakasının akması olayıdır. Havzada akış herhangi bir tür yağıştan ya da kar erimesinden meydana gelebilir. Şiddetli yağmurlardan ya da kar erimelerinden doğan havza akışları genellikle büyük debiler ortaya çıkarır. Bu durumda özellikle ova kesimlerde sular geniş alanlara yayılır ve büyük hızlarla akar. Akarsu havzalarında debinin akarsu yatak kapasitesini aşması halinde sular yatak dışına taşar ve bu durum taşkın olarak adlandırılır. Taşkınları oluşturan ve büyük debilere yol açan bu yağışlar genellikle bahar aylarında görülür. Taşkınlar suyun zararlarından korunmak ve potansiyelinden yararlanmak açısından, su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarında büyük önem taşır (Ağırlioğlu, 1981).

Taşkınlar, tarım arazilerinin, yerleşim merkezlerinin sular altında kalmasına, çeşitli yapıların hasara uğramasına ya da yıkılmasına sebep olabilir. Taşkınlar büyük debi, yüksek su seviyesi ve büyük hızlar ile karakterize edildiğinden akarsular üzerinde inşa edilen tüm yapılar için taşkın debilerinin bilinmesi ve bunların zararsız hale getirilmesi gerekir. Özellikle baraj, bağlama ve su kuvveti tesislerinde taşkın debilerinin bilinmesi büyük önem taşır. Bütün bunlardan dolayı çeşitli amaçlarla kullanılacak taşkın hidrograflarının elde edilebilmesi için taşkınların meydana geliş mekanizmasının iyice anlaşılması ve mekanizmayı iyi temsil eden matematik modellerin kurulması gerekmektedir (Ağırlioğlu, 1981).

### 1.2. Türkiye’de Taşkınlar

Tarihteki ilk yerleşimlerden beri taşkınlar Türkiye’de önemli bir doğal afet olmuştur. Türkiye’nin iklimi yarı kurak olmakla birlikte yıllık yağış Güney Doğu’da 25 cm ile Doğu Karadeniz Bölgesinde 300 cm arasında değişir. Akarsularda akım zaman içinde büyük değişimler gösterir. İlkbaharda kar erimesi ve şiddetli yağışlar büyük taşkınlara yol açar. Yaz aylarında da ani taşkınlar görülebilir. Taşkınların en çok

görüldüğü dönem Mart-Temmuz arasındır. Karadeniz, Akdeniz ve Ege Denizi kıyılarında orografik yağışlar taşkınlara yol açar. Orta Anadolu'da da konvektif yağış ile kar erimesi büyük taşkınlar oluşturabilir.

Son yıllarda bitki örtüsünün yok edilmesi ve akarsuların taşkın yataklarındaki yerleşmeler yüzünden yüzeysel akışlar artmıştır. Erozyon ve sediment taşınımı da zararlara yol açmaktadır. Taşkın altında kalan alanlara yerleşilmesi, taşkınların zarar potansiyelini de arttırmaktadır.

Taşkın zararlarını önlemek ya da azaltmak için baraj, sel kapanı, sedde gibi taşkın kontrol yapıları uygulanabileceği gibi havzada ya da akarsu yatağında bir takım düzenlemelerde yapılabilir. 1953 yılında ülke çapında su yapılarının planlanması, tasarımı, inşası ve işletmesini yürütmek için kurulmuş olan Devlet Su İşleri (DSİ)'nin başlıca görevlerinden biri de taşkınlara karşı korunma yapıları inşa ederek taşkın zararlarının önüne geçmektir.

DSİ' nin 1998 yılında yayınlanmış Türkiye'de son 30 yılda görülen taşkın olaylarının envanterine göre 1970-1997 yılları arasında altı yüz yirmi altı taşkın olayı kaydedilmiştir (Çizelge 1.1). Yine DSİ' nin 1998 yılında yayınlanmış envanterine göre Türkiye'de 1970-1998 yılları arasında meydana gelmiş önemli taşkın olayları ve bunların etkileri Çizelge 1.2' de verilmiştir.

Taşkınlarda can kaybı en çok, büyük şehirlerin çevresinde taşkın etkisindeki akarsu yakınındaki alanlarda kurulan gecekondular bölgesinde olmaktadır. Bunun en iyi örneği 1995 Kasım' ında İzmir' de meydana gelen taşkındır. Bu taşkında bir günde meydana gelen 11 cm' lik yağış yüksekliği sonunda küçük derelerin evleri basmasıyla altmış bir kişi hayatını kaybetmiş, bin kadar ev yıkılmış, toplam zarar da bir milyar doların üstünde olmuştur. 1995 Temmuz' unda Senirkent' te 15 dakikada 16 mm yağış düşmesiyle oluşan sellerde vadilerde oturan yetmiş dört kişi hayatını kaybetmiş, kırk iki kişi de yaralanmıştır. Eğimleri %40'ı bulan derelerdeki erozyon ve sediment hareketi zararı arttırmıştır. Eğimlerin çok dik olduğu Doğu Karadeniz Bölgesinde ani taşkınlar ve toprak kaymaları sık sık can kaybına neden olur. Yağış

çok şiddetli olmadığı halde, taşkın alanlarındaki yerleşmeler yüzünden büyük zararların ve can kaybının olduğu taşkınlara son yıllarda meydana gelen taşkınlar örnek olarak verilebilir. 1974 Kasım' ında Dicle' de bir köprünün tıkanmasıyla nehrin, yatağının dışına taşması sonucunda sürülerini otlatan otuz sekiz çoban ölmüştür. 1979 Ağustos' unda dönüş aralığı 500 yıl olarak tahmin edilen bir taşkın Yeşilirmak havzasında altmış bir can almıştır. Seyhan nehrinde 1980 Mart taşkınında bin iki yüz ev yıkılmış, 47000 hektar tarım arazisi sular altında kalmış, taşkın koruma seddeleri çökmüştür. 1995 yılı Kasım ayında Sütçüler-Aksu taşkınında 12 saatte düşen 43 cm yağış 200000 hektar arazinin su altında kalmasına ve dört can kaybına sebep olmuştur.

Çizelge 1.1. Türkiye' de 1970-1999 Dönemi Meydana Gelmiş Taşkınların İstatistiksel Kayıtları (Beyazıt, 2002)

Yıl	Taşkın Sayısı	Can Kaybı	Su Altında Kalan Alan (10 <sup>3</sup> hektar)	Toplam Zarar (10 <sup>6</sup> dolar)
1970	8	3	2	1
1971	29	6	7	12
1972	118	35	13	15
1973	20	21	6	5
1974	40	75	10	5
1975	62	8	37	1
1976	29	5	23	8
1977	27	11	3	4
1978	21	0	14	3
1979	21	61	41	17
1980	44	6	83	12
1981	16	2	58	11
1982	10	0	1	155
1983	14	33	2	19
1984	12	0	29	4
1985	7	0	2	1
1986	8	4	1	1
1987	7	0	1	1
1988	24	17	4	8
1989	10	1	10	2
1990	26	57	7	194
1991	23	23	16	13
1992	14	1	1	10
1993	2	0	0	-
1994	9	4	2	1
1995	20	164	201	1080
1996	4	1	11	1
1997	1	0	1	-

Taşkınların yol açtığı zararları önlemek amacıyla, taşkınların özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşır. Taşkınların gelmeden önce haber verilmesi, yerleşim yerlerinin boşaltılması ve barajların işletilmesi bakımından aynı derecede önem taşır. Nitekim, 1999 Ocak ayında şiddetli yağışlar Oymapınar ve Manavgat Barajlarının kontrol ettiği Manavgat Akarsuyunda debiyi arttırınca, suyun barajların üzerinden aşmasını önlemek için büyük miktarda su boşaltılması aşağı havzalarda taşkına neden olmuştur. İnsanlar zamanında uyarılmış, fakat tarım arazisi ve evler su altında kalmış, yollar kapanmıştır. 1999 Temmuz' unda İzmit yakınlarındaki su temini maksatlı Kirazdere (Yuvacık) Barajında baraj kapakların zamanında açılmayışi nedeniyle su yatak kapasitesini aşmış, aşağıdaki havzalar su altında kalmıştır. Her iki olay da barajların taşkın kontrolü düşünülerek işletilmesi gerekliliği bakımından önemlidir (Beyazıt, 2002).

Çizelge 1.2 Türkiye'de 1970-1998 Dönemi Meydana Gelmiş Önemli Taşkınlar (Beyazıt, 2002)

Tarih	Yer	Can Kaybı	Su Altında Kalan Alan (10 <sup>3</sup> hektar)	Toplam Kayıp (10 <sup>6</sup> dolar)
1974 Kasım	Dicle	38	-	-
1979 Ağustos	Yeşilirmak	61	2	9
1980 Mart	Seyhan	1	47	1
1982 Ocak	Gaziantep	-	-	154
1983 Temmuz	D.Karadeniz	27	-	-
1990 Haziran	D.Karadeniz	56	7	19
1995 Temmuz	Senirkent	74	-	-
1995 Kasım	İzmir	61	-	1070
1995 Kasım	Sütçüler-Aksu	4	201	1
1998 Mayıs	B.Karadeniz	5	25	310

Tablolardan da görüldüğü gibi, Türkiye'de taşkınlar depremlerin ardından en çok zarara yol açan doğal afetlerdir. Dolayısıyla taşkın zararlarını azaltmak için taşkın kontrol çalışmalarına büyük önem verilmelidir.



### 1.3. Taşkın Ötelenmesi

Akarsuyun belirli bir kesimine veya bir hazneye giren taşkın dalgası su seviyesinin yükselmesine sebep olur. Suyun bir kısmı bu şekilde geri tutulurken diğer kısmı çıkış kesitinden mansaba geçer. Giren ve çıkan taşkın hidrografları karşılaştırıldığında giren taşkın dalgasının yayvanlaşmış olarak çıkış kesitinden geçtiği görülür. Taşkın dalgası geçişi sırasında zamana göre bir miktar ötelendiği için bu harekete “Taşkın Ötelenmesi” denir. Taşkın ötelenmesi, bir akarsu veya bir göl boyunca ilerleyen taşkın dalgasının zamana bağlı olarak değişiminin hesaplanmasıdır. Başka bir deyişle belirli bir akarsu kesitine giren taşkın dalgasının bu kesitin sonundaki değişimi taşkın ötelenmesi ile belirlenir. Taşkın ötelenmesi en büyük debinin değerinde azalma ve en büyük debinin oluş zamanında gecikme şeklinde iki önemli sonuç doğurur. Problem kendi başına, taşkın dalga probleminin doğasına özgü özellikleri de dikkate alarak, açık kanallarda kararsız akım şartlarının bir uygulamasıdır. Bir taşkın dalgasının hareketi, düzensiz açık kanal akımları prensipleri, kütlelerin korunumu ve momentum denklemi ile incelenir. Süreklilik denklemi, kütlelerin korunumunu, hareketin denklemi de momentum denklemini içerir. Bu denklemler henüz analitik çözümü tamamlanmamış bir yarı doğrusal kısmi diferansiyel denklemi oluşturur. Bilgisayar teknolojisinin ve programlama tekniklerinin gelişimiyle birlikte taşkın ötelenme problemlerinin kapalı çözümlerine akılcı, yeterli alternatif sunan sayısal çözümler gelişmiştir. Bir taşkın dalgasının gelişimini anlatmaya yarayan iki fiziksel parametre vardır;

- 1) Taşkın dalgasının göz önüne alınan yol boyunca hızı,
- 2) Alçalmanın hızı yada taşkın dalgasının sönümlenmesi.

Taşkın dalgasının sönümlenmesini de kontrol eden iki mekanizma vardır:

- 1) Depolamanın etkisi,
- 2) Etki eden kuvvetlerin dengesi.

Depolamaya bağlı sönümlenmeyi en iyi, bir taşkın dalgasının göl ya da haznedeki geçişi sırasında pikteki azalma örnekler. Depolama etkilerinin eksikliğinde, prizmatik bir kanalda ötelenme gibi, taşkın dalgasının sönümlenmesi sürtünme, yerçekimi, basınç ve atalet kuvvet etkilerinin birleşimi ile ortaya çıkar.

Depolamanın mekanizması, sürtünme ve atalet mekanizmalarına, baskınsa; göl yada hazneden geçen taşkın dalgasında olduğu gibi, kuvvetlerin dengesine bakılmaksızın, ötelenme problemi süreklilik denkleminde çözülür. Bu sadeleştirme, bir göl ya da nehirdeki taşkının ötelenmesi probleminin çözümünü, hazne ötelenmesi diye bilinen bir cebirsel ifade ile yapar. Hareketin denklemi ise sürtünme, yerçekimi, basınç ve atalet kuvvetlerinin dengesini ifade eder. Problem tüm dengelemede her bir terimin birbirine göre önemi olarak karşımıza çıkar. Eğer bir ya da daha fazla terim diğerlerine göre ihmal edilebilir ölçüde ise o terimler sıfıra eşit kabul edilebilir. İhmal edilen terimlerin çözüme büyük bir katkısının olmadığı durumlar, dalga modeli yaklaşımlarını artırır.

Hidroloji ve hidrolik mühendisliğinde taşkınların ötelenmesi, modellenmesi konusu oldukça geniş bir yer tutar. Esas problem, verilenler membada giriş hidrografi ve kanalın karakteristikleri olduğu halde, akarsu boyunca seçilen noktalardaki hidrografların bulunması, akarsu boyunca akım profillerinin belirlenmesi ve kanal ya da akarsuya ait özelliklerin bulunması şeklinde sıralanabilir (Hydrologic Engineering Center, 1990b ).

Akarsu havzalarındaki akış olayına bir çok faktör etki etmektedir. Bu faktörlerin başlıcaları; yağışın şekli, zamana bağlı dağılımı, diğer bir deyişle şiddeti, süresi, zamanla değişimi ve bir önceki yağıştan sonra geçen süre, yağışın havza içindeki dağılımı, rüzgar, sıcaklık gibi meteorolojik faktörler, zeminin cinsi, geçirimsizlik oranı ve suya doygunluk derecesi gibi jeolojik faktörler, havzanın geometrisi, uzunluğu, alanı, eğimi gibi topoğrafik etkenlerdir. Ayrıca bitki örtüsü tipi, havzadaki dağılımı, kapladığı alan, yüksekliği, büyüme devresi ile birlikte yerleşme merkezi, yol ve benzeri alt yapıların varlığı, toprağın kullanılma şekli gibi etkenler de akışa etki etmektedir. Bütün bu faktörler birbirlerinden bağımsız olmayıp birbirlerine karşılıklı etkileri olmaktadır. Üstelik uzun süreler içinde bu faktörlerin, tabiat olayları, insanlar ve hayvanlar tarafından değiştirilmesi söz konusudur. Dolayısıyla bu değişik faktörlerin etkisi altında ortaya çıkan akış, yağıştan yağışa, havzadan havzaya, aynı havzada noktadan noktaya değişmekte ve hatta aynı yağış şartlarında, aynı havzanın aynı noktasında zamandan zaman farklı olmaktadır. Bu bakımdan akışın meydana

geliş şekli, farklı havzalarda birbirine benzemekle beraber, bir akarsu havzasının bir yağıştan sonraki davranışı, en doğru şekilde ancak kendisine ait bilgilerden bulunabilir.

Bir havzanın akışı laboratuvar modeli ile incelenebilir. Ancak böyle bir modelde akış özelliklerini, özellikle yağışı ve bitki örtüsünü, prototiptekine benzetmek oldukça güçtür. Üstelik bütün bu havza faktörlerini modele yansıtamamaktan ötürü bulunacak sonuçlar gerçeklerden çok uzak olabilir. Bu arada model kurmanın zaman alıcı ve pahalı olması da göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı taşkın hesaplarının matematik modellerle yapılması istenir (Ağırlioğlu, 1981).

Taşkın ötelenme hesapları için kullanılan matematiksel modele göre gereken temel veriler kanal karakteristikleri ve akım karakteristikleri olmak üzere ikiye ayrılır, kanal karakteristiklerinde; akarsuyun yada rezervuarın topoğrafyası, rezervuarda ya da akarsu vadisindeki depolama hacmi, kanal taban eğimi  $S_0$ , kanalın en kesit alanı, kanalın sürtünme karakteristikleri (Manning'in  $n$ , Chezy'nin  $C$  katsayıları gibi ), akım karakteristiklerinde ise; seviye-depolama, seviye-debi ve debi-depolama ilişkilerini kurabilmek için gerekli olan geçmiş taşkın kayıtları, kanal boyunca kanala giriş yapacak yersel yüzey akışın ölçümleri ya da tahminleri, yağış kayıtları, toprak özellikleri, akış karakteristikleri, drenaj alanları ve yağış-akış ilişkisini belirleyen diğer veriler, giren akım hacminin zamanın bir fonksiyonu olarak tahmin yada ölçümü, kullanılan tekniğe bağlı olarak zamana karşılık seviye veya zamana karşılık debi yada seviye eğrisine karşılık debinin belirlenmesi, geçmiş taşkınlardan belirlenen seviye-zaman yada debi-zaman verileri yer alır (Miller ve Cunge, 1975).

#### **1.4. Taşkın Ötelenme Hesaplarının Taşkın Kontrolüne Faydaları**

Taşkın dalgası hesaplamaları bir taşkın dalgasının şu karakteristiklerini bulmakta kullanılır; taşkın dalgasının çıkabileceği maksimum yükseklik, taşkın dalgasının yükseliş ve düşüş hızları ayrıca bu süre içinde geçen zaman, pik debi, toplam akım hacmi, su altında kalan alan ve taşkının akarsudan geçiş zamanı. Tüm bu özellikler akarsu üzerindeki su yapılarının tasarlanmasında oldukça önem kazanır.

Taşkın ötelenme hesaplarının taşkın kontrolü açısından birçok faydaları vardır. Bunlar;

- 1 Akarsuyun belirli bir noktasındaki taşkın büyüklükleri bilindiğinde, taşkın ötelenmesi hesapları ile bu noktanın kilometrelerce mansabındaki bir yerde taşkın büyüklükleri saatlerce hatta günlerce önce hesaplanabilir. Bu durumda can ve mal kaybının azaltılması için gerekli zaman kazanılır ve bu şekilde taşkın zararlarının azaltılması sağlanır.
- 2 Taşkın ötelenmesi hesapları ile akarsu boyunca taşkın debilerinin ve su seviyelerinin değişimi hesaplanabildiğinden taşkın koruma yapılarının, örneğin seddelerin, boyutları emniyetle belirlenir.
- 3 Baraj göllerinde taşkın ötelenmesi ile göle giren taşkın hidrografi bilindiğinde dolu savaktan çıkan debiler hesaplanabilir. Bu çalışmalar sonunda dolu savak boyutları, batardo yüksekliği, baraj gölündeki en yüksek su seviyesi, baraj yüksekliği, baraj gölü altında kalacak toprak ve su altında kalma süreleri belirlenmiş olur.
- 4 Yağmur sularını toplayan kanalizasyon şebekelerinde taşkın ötelenmesi hesapları yapılarak sağanaklardan sonraki taşkın dalgasının şebeke boyunca değişimi belirlenir. Boru ve kanalların nerede olacağı, şehrin hangi bölgelerini su basacağı tespit edilir (Erkek ve Ağırlioğlu, 1993).

Kısacası hidroloji mühendisliğinde, bir taşkın kontrol probleminin tüm çözümünde ve bir taşkın tahmini servisinin çalışmalarında taşkın ötelenme tekniklerine gerek duyulur.

Taşkın kontrol çalışmaları için yapılan yatırımlar projeden sağlanan ekonomik fayda ile çok kısa sürelerde geri kazanılmaktadır. Öte yandan taşkın kontrolü çok amaçlı bir projenin içinde planlandığı zaman, projenin verimliliği çoğunlukla başka alanlardaki yatırımlarla karşılaştırılmayacak kadar yüksek olmaktadır (Ağırlioğlu, 1981).

## 1.5. Taşkın Ötelenme Yöntemleri

Taşkın ötelenme yöntemleri kullanılan metotlara göre deneysel, hidrolojik ve hidrolik olmak üzere üçe ayrılabilir;

### 1.5.1. Deneysel Ötelenme

Deneysel taşkın ötelenme metotları, katsayıların kullanımını kapsar. Bu katsayılar sezgiye ve geçmiş taşkın olaylarının gözlenmesine dayanarak kalibre edilir. Giriş ve çıkış akımları arasındaki ilişkinin kalibre edilmesi için nehirde yeterli miktarda giriş ve çıkış akımlarının ölçülmüş olması gerekmektedir.

### 1.5.2. Hidrolik Ötelenme

Hem kütle hem momentum dengesini dikkate alan su ötelenmesidir. Problem su sürekliliği ve hareket denkleminde ya da alternatif olarak konvektif difüzyon denkleminde formüle edilir.

Muskingum-Cunge Ötelenme Modeli, doğrusal olmayan katsayılı bir hidrolik tekniğidir. Giriş hidrografıyla, kanalın fiziksel özelliklerine dayanan hidrograf ötelenmesini hesaplar. Bu yüzden hidrolik bir model olarak sınıflandırılır.

Kinematik Dalga Ötelenme Metodu, hareket denklemindeki atalet ve basınç terimlerinin, sürtünme ve yerçekimi terimleri ile karşılaştırılınca ihmal edilebilir olduğu varsayımına dayanır. Bu varsayım konvektif difüzyon denklemine birinci dereceden yol gösterir.

Difüzyon Dalga Ötelenme Metodu, hareket denklemindeki atalet teriminin, direnç, yerçekimi ve basınç terimleri ile karşılaştırılınca ihmal edilebilir olduğu varsayımına dayanır.

Dinamik Öteleme Modeli, tüm hareket denklemini hesaba katan, taşkın ötelenmesinde en genel modeldir (Hydrologic Engineering Center, 1990b ).

### 1.5.3. Hidrolojik Ötelenme

Etki eden kuvvetlerin dengesine bakılmaksızın su hacminin ötelenmesidir. Problem sadece su sürekliliği denkleminde formüle edilir.

Hazneden geçen taşkını öteleyen Puls Metodu, küçük taban eğimli kanallarda tedrici değişen akımların ötelenmesinde ve kontrolsüz haznelerdeki taşkın dalgalarının etkilerini değerlendirmede kullanılır.

Değişken Değerler Metodu, Puls metodu ile Muskingum modellerinden her ikisinin birleştirilmiş bir varyasyonu sayılabilir. Kama depolamasını hesaplayan Puls metodu ya da değişken geçiş zamanlı Muskingum Modeli olarak adlandırılabilir.

Muskingum Modeli, giriş, çıkış ve depolama arasında lineer bir matematiksel ilişki olduğunu varsayar. Lineer fonksiyonun parametreleri ölçülmüş dataların kalibrasyonundan saptanır. Elbette metodun gelişimi deneysel esaslara dayanır, model ayrıca konvektif-difüzyon denkleminin bir benzeri olarak da gösterilebilir.

Uygulamacı var olan modeller içinden en uygununu seçerken zorlanabilir. Bu çalışmanın prensibi doğal nehirlerde değişik ötelenme modellerini teorik olarak karşılaştırmak ve bu modellerden Muskingum Modelini Sütçüler havzası için uygulayarak örneklemeaktır.

### 1.6. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Yurdumuzda meydana gelen taşkın olaylarını incelediğimizde; taşkınlar, erozyona maruz bulunan, üzerinde bitki örtüsü tahrip olmuş veya yok olmuş su havzalarında ve de taşkın koruma yapılarının olmadığı akarsularda ortaya çıkmaktadır. Eğimli ve çıplak arazilerde yağışların büyük bir bölümü yüzeysel akışa geçerek kısa sürede yüksek akış hızı kazanmaktadır. Erozyon sonucu katı maddelerle yüklenen sular,

taşkınlr halinde can ve mal kaybına neden olmaktadır. Bu yzden taşkınlr Trkiye iin, depremlerden sonra gelen doğal afetlerden biri olmuştur.

Taşkın felaketlerinin önlenmesi iin yurdumuzun topografik yapısını ve iklim koşullarını değiştirmeyiz, ancak taşkın kontrol çalışmalarına ağırlık vererek taşkınlardaki can kaybını önleyecek önlemler alabiliriz.

Çalışmada Isparta, Sütçüler havzasından geçen Değirmendere nehrinde 4 Kasım 1995 tarihinde meydana gelen taşkın olayı dikkate alınıp, havza özellikleri de göz önünde tutularak, taşkın ötelenme yöntemlerinden, Muskingum Metodu' nun kullanılmasıyla taşkın pikleri tahmin edilmeye çalışılacaktır.

Birinci bölümde, Trkiye'de meydana gelmiş çeşitli taşkınlr, bunların sonuçları ve taşkın ötelenmesinin taşkın kontrol yöntemlerine faydaları verilmiştir.

İkinci bölümde, konu ile ilgili olarak, daha önce yapılmış çalışmalar sunulmuştur. Bu aşamada, özellikle yurt dışında akarsulardaki taşkın hesaplarının belirlenmesinde kullanılmış taşkın ötelenme yöntemleri incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, çalışma alanına ait özellikler verilmiş, taşkın ötelenme yöntemleri ile ilgili genel bilgilerle Muskingum Modeli özellikleri ve Sütçüler Taşkını' na uygulanışı anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, Muskingum Modeli' nin K geçiş ve x ağırlık parametreleri Sütçüler Taşkını giriş akım verileri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu parametrelere ait grafikler ve Muskingum Modeli ile hesaplanan ve DSI 18. Bölge Müdürlüğü tarafından ölçülen taşkın değerlerini gösteren taşkın hidrografi verilmiştir.

Beşinci bölümde ise, çalışma alanında yapılan uygulamalar dikkate alınarak sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 2. KAYNAK BİLGİSİ

Mozayeny ve Song (1969), yarı sonsuz düzgün dikdörtgen açık kanalın membasında verilen bir sürede, sinüsoidal değişime bağlı olan geçiş akımlarına ait süreklilik ve momentum denklemlerini karakteristikler metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Memba kesiminde, sinüsoidal değişimlere bağlı, farklı kısımlardaki kararsız akımların anahtar eğrileri üzerinde çalışmalarının sebebini sonuç taşkın hidrografının, birim hidrograf metoduna benzer bir metot olan fourier serilerinin benzeştirilmesi şeklinde kurulmuş herhangi bir verilen giriş hidrografına bağlı olan esas hidrograf gibi tanımlanabilmesi olarak vermişler, giren akım şiddetini, Manning sürtünme katsayısı ve kanal eğimini değiştirerek, taşkın dalgasının sonuç dağılımını hesaplamışlardır. Pik seviyenin ve hareket eden taşkın pik debisinin yavaşlaması üzerinde detaylı olarak çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda, sönümleme katsayılarının başlangıç şiddetinin, Manning sürtünme katsayısının ve kanal eğiminin bir ilişki olduğunu, bunun da taşkın dalgasının esasında doğrusal olmayan bir olay olduğunu, bundan dolayı da birim hidrograf metodunun dikkatli kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte; pik seviye ve pik debinin ilk şiddetin bir ilişki olduğunu, bu ikisi ile ilişkili doğrusallık katsayılarının özdeş olduğunu bulmuşlar, her ikisinin de kanal eğimi, Manning sürtünme katsayısı, membadan uzaklık ve taşkın şiddetinin bir üstel ilişki olarak temsil edilebildiğini belirlemişlerdir. Diğer taraftan doğrusallık katsayılarının 1'den büyük ya da küçük olabildiğini, tanıma göre şiddetin 0 olduğu durumda ise 1'e eşit olabileceğini, ayrıca doğrusallık katsayılarının büyük uzunluktaki mesafe için sabite yaklaşır görüldüğüne dikkat çekmişlerdir ki; bunun da anlamı, sonsuz bir kanalda hidrografın doğrusallaşmasıdır.

Ponce vd. (1978), Kinematik ve difüzyon modellerinin uygulanabilirliği, difüzyon, Kinematik ve Dinamik Modeller için kararlı üniform akımlarının sinüsoidal karşılıklarını, yayılım karakteristiklerini karşılaştırmak suretiyle değerlendirmişlerdir. Saint Venant denklemlerinin doğrusallaştırılmış bir formuna dayanan, açık kanal akımlarında dalga yayılımı için analitik bir çözüm geliştirmişlerdir. Doğrusallaştırılmış denklemleri alıp, homojen doğrusal denklem sistemine götüren bir sinüsoidal formda çözüm aramışlardır. Buna ilave olarak



Kinematik ve difüzyon dalga modellerine göre logaritmik azalmayı ve dalga yayılma hızını da hesaplamışlardır. Bu teoriden, bulunan sonuçların dalga yayılma hızını ve logaritmik azalmanın orijinal Saint Venant denklemleri ile kıyaslanmasıyla bu yaklaşık modellerin uygulanabilirliğine ait limitleri bulmada kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Yaptıkları karşılaştırma, Kinematik ya da difüzyon modellerin doğruluklu bir şekilde fiziksel olayı benzeştirip, benzeştiremeyeceğini belirleyen eşitsizlik kriterinin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Büyük yatak eğimleri veya büyük dalga periyotlarının eşitsizlik kriterini belirleyeceğini, uygulamada yüzeysel akışın büyük yatak eğimleri ve dalga periyotlarının tedrici yükselen taşkın dalgalarına ait olduğunu ortaya koymuşlardır. Her iki modelin de başarısız olduğu yerlerde fiziksel olguyu sadece dinamik dalga modelinin benzeştirebileceği, fakat Dinamik Modelin de önemli derecede farklı eğilimlere sahip olduğunu sonuç olarak belirtmişlerdir.

Ponce ve Yevjevich (1978), geleneksel Muskingum Modelinde, Muskingum denklemindeki  $K$  ve  $x$  parametrelerinin ölçülmüş giriş ve çıkış hidrografları kullanılarak kalibrasyonla belirlenmesini, bununla birlikte Muskingum Cunge versiyonunda ise Cunge tarafından verilmiş denklemlerle hesaplanmasını göz önünde bulundurarak, çalışmada Muskingum Cunge Modeli kullanılarak yapılan deneyleri açıklamışlardır. Burada parametrelerin hesaplanmasında tüm modellerin doğruluğu üzerinde kesin bir ifade ortaya koymuşlardır. Sabit parametrelili Muskingum Cunge Modeli ile sonuçların, sabit parametreleri değerlendirmek üzere seçilen taban debisine bağlı olduğunu göstermişler, taban debisinin artması geçiş zamanının artmasına ve taşkın dalgasındaki alçalmanın ise azalmasına neden olduğunu ve hesaplanan çıkış hidrografının ilk sinüsoidal şekilden ihmal edilebilir bir sapma gösterdiğini belirlemişlerdir. Sonuç olarak, değişken parametrelerin hesabında üç noktalı ve tekrarlamalı bir dört noktalı yaklaşımın taşkın dalgalarının doğru benzeşimini yapmada yeterli olduğunu, iki noktalı bir yaklaşımın ise pik debi ve geçiş zaman hesabında yanlış sonuç verdiğini göstermişlerdir. Bununla birlikte iki noktalı metodun büyük bir kütle kaybına neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

Ponce (1979), sadeleşmiş Muskingum ötelenme modeli üzerinde çalışmıştır. Geleneksel olarak K ve x parametreleri ölçülmüş giriş çıkış hidrografları kullanılarak kalibrasyonla belirlenmiştir. K ve x parametrelerinin fiziksel problemle alakalı olabileceğini gösteren Cunge tarafından geliştirilen bir versiyonla birlikte kalibrasyondaki deneme yanılmayı yok etmiş, aynı zamanda metodun tahmin yeteneğini artırmıştır. Cunge'un bulduklarının yardımıyla hesapları ya sadeliğinden dolayı büyük avantajı olan döngülü parametre modunda ya da değişken parametrelili moda başlatmıştır. Zaman ve mesafe aralıklarının hesaplanmasında; doğal prizmatik olmayan kanallar için; kanal sürtünmesi ve kesit alanı şeklini, kararlı debi alan ilişkisini kullanarak elde etmiş, model testi, hipotetik testi ve gerçek veri testlerini Goldsboro ve Kinston eyaletleri arasındaki 72 km uzunluğuna sahip Neuse nehrine ait verileri kullanarak yapmıştır. Çalışma sonucunda hiçbir metodun Kinston'da ölçülen hidrografi tam olarak yansıtmadığını, sadeleştirilmiş Muskingum ötelenme modelinde  $\Delta x$  mesafe ve  $\Delta t$  zaman aralıklarının  $x=0$  ve  $K=\Delta t$  olarak belirlediğini ve bu durumda ötelenme denkleminin basit bir ortalama hesabına indirgenmiş olduğunu ortaya koymuştur.

Ponce, vd. (1979), konvektif denklemin stabilitesi ve açık sayısal şemanın yakınsama özellikleri ile birlikte bu çalışmada konvektif hesaplamalarda mutlak stabilitenin tayiniyle ilgili olarak birleştirilmiş teorik işleyişi sunmuşlardır. Mutlak stabilitenin nasıl olduğunu ve açık şemanın iskeleti dahilinde her ikisi için ikinci dereceden doğruluğun mümkün olduğunu göstermek için Von Neumann ve Hirt analizlerini kullanmışlardır. Saf konvektif denklemin açık şemasının sayısal özelliklerinin birleştirilmiş kuramsal yönteminin verildiği bu çalışmada, yavaş değişen Courant sayısının bulunduğu durumlar için teorinin, mutlak stabilizeyi ve açık formülasyonun iskeleti dahilinde ikinci derece doğruluğa ulaşabileceğini ortaya koymuşlardır.

Strupczewski ve Kundzewicz (1980), Muskingum Modeli varsayımları, model parametrelerinin değişkenliği ve doğasıyla ilgilenen hidrolojistlerin düşüncelerini yeniden gözden geçirmişlerdir. Çalışmayı; sistem yaklaşımı, Muskingum model sonuçları ile doğrusal dinamik dalga modeli sonuçlarının karşılaştırılması, mesafenin hem giriş hem de çıkışların ortak döngülerde yer alması ve mesafe boyunca su

tablasında oluşacak doğrusal değişimler varsayımları altında dikdörtgen enine kesitli üniform kanallar için geliştirilen doğrusal olmayan denkleminin analizi başlıkları altında toplamışlardır. Bu metodun bağlı olduğu sistemin fiziksel karakteristikleri ve akım değişimleri üzerinde çalışmışlar, Muskingum Modeli için karakteristiklerin uygulama mesafesi ve buna göre  $x$  parametresinin değerlerini hesaplamışlardır.  $x$  parametresine bağlı fiziksel sistemde meydana gelen gecikmenin etkisi üzerinde çalışmış, doğrusal olmayan depolama denklemine dayanarak Muskingum modeli giriş ve çıkış değerlerine bağlı olan parametrelerin güvenilirliğini irdelemişlerdir. Sonuç olarak, kama depolama için kısa mesafelerde  $x'$  in negatif değerlerinin, uzun mesafelerde ise pozitif değerlerinin kullanılması gerektiğini ortaya koymuşlar, bu prensibi Muskingum modelinin etki-tepki ilişki ile dinamik dalga modeline ait momentlerin eşleştirilmesiyle elde ettikleri formülasyonla da onaylamışlardır.  $x'$  in negatif değerlerinin geçiş prosedürü ile ilgili olarak model performansının yeterliliği azalttığını ortaya koymuşlar, Muskingum modelde en iyi yarı çevrinti özelliklerinin  $x=0.5$  değeri için elde edilebileceği belirlemişlerdir.

Ponce ve Theurer (1982), ötelenme parametrelerinin kanal ve ağ karakteristiklerine bağlı olduğu Muskingum modelinin bir analizini yapmışlardır. Yaptıkları sayısal deneyler yardımıyla mesafe adımına bir üst sınır getirmek için ortaya konulan kriterlere yeni bir bakış açısı kazandırmışlardır. Muskingum difüzyon modelindeki mesafe ve zaman çözümlerine dair mevcut katkıları gözden geçirmek ve test etmek, modeldeki doğruluğu korumak için mesafe çözümlerine ait bir kriter geliştirmek amaçları doğrultusunda çalışmada mesafe adımları için  $\Delta x$ ,  $c$  ve  $D$  katsayılarını tespit etmişler, sayısal deneyleri Courant sayısı ve adım Reynolds sayısına bağlı olarak değerlendirmişlerdir.  $\Delta x$ 'in büyük değerlerinde  $D$  ve  $c$  katsayılarının düşük değerlerinin elde edildiği, doğruluk korunmak ve  $x$  gerçel bir sayı olmak üzere;  $c > x$  olduğu duruma dikkat çekerek pratik uygulamalar için  $x=0.33$  değerini sonuç olarak önermişlerdir. Bununla birlikte  $k$  doğruluk parametresinin en uygun değeri için pratik uygulamalarda  $K=2.00$ ' yi önermişlerdir.

Tingsanchali ve Manandhar (1985), durgun su etkileri ile yan dere akımlarını hesaba katan bir taşkın ötelenmesi için analitik difüzyon modeli geliştirmişlerdir. Modeli, hipotetik düzgün bir dikdörtgen kanalda değişik memba, mansap ve yan dere sınır şartları ile taşkın ötelenme çalışmalarına uygulamışlar ve Kuzey Tayland' daki Lowermun akarsuyuna ait 1980-1981 yıllarındaki akım şartları ile benzeştirmişlerdir. Temel difüzyon denklemini, ortalama bir derinlik değeri etrafında doğrusallaştırmışlar ve durgun su etkileri ile yanal akımları da hesaba katan sınır şartları kullanarak çözmüşlerdir. Modelin uygunluğunu akım ivmesinin ihmal edilebildiği tedrici yükselen taşkınlarla sınırlamışlar, su derinliğinin çözümünü sınır şartlarına uyan bir dizi histogramla yaklaştıran bir formda ifade etmişlerdir. Chezy, c ve kanal düzensizliklerine bağlı difüzyon hızı K değerini kullanmışlar ve parametreleri modelin kalibrasyonu sırasında deneme-yanılma yoluyla bulmuşlardır. K=0 olan hipotetik dikdörtgen kanaldaki uygulama sonucu elde edilen çıktılarını ( $\Delta t=1$  saat,  $\Delta x=1$  km) alınan ve Saint Venant denklemlerine dayanan kapalı sonlu fark modeli sonuçları ile kıyaslamışlardır. Sonuç olarak modelin, en kesit alanının detaylı verisi ya da akarsu yatağının geometrisini kapsamadığı, sadece onların ortalama değerlerine ihtiyaç duyduğunu, modelin, sınır şartlarının tek ya da tüm etkilerinin analizlerini sağladığını ve belirli şartlarda hesap için daha az zamana ihtiyaç duyduğunu belirlemişlerdir.

Aldama (1990), arazi verilerindeki eksiklikler nedeniyle, doğal akarsularda taşkın ötelenmesinde Saint Venant denkleminin kullanımını engellemesi, sonuçta Muskingum Modeli gibi yaklaşık tekniklerin uygulanmasını göz önünde bulundurarak, önemli bir yönünün model parametrelerinin kalibrasyonu olan bu çalışmada Muskingum ötelenmesi için mevcut en küçük karelerle parametre tahmin tekniklerini araştırmış, Gill, Heggen ve O'Donnell tarafından çeşitli yıllarda sunulmuş Muskingum taşkın ötelenme parametrelerinin en küçük kareler yöntemiyle bulunmuş sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. O'Donnell' in metodunu diğer iki teknikle karşılaştırabilecek şekilde değiştirmiş, Gill' in metodu ve O'Donnell' in değiştirilmiş metodu için taşkın ötelenme hesaplarında açık ifadeler elde etmiştir. Heggen' in metodunun en büyük dezavantajını global minimumda temsil etmesi gerekmeyen, köke giden matematiksel denklemin iterasyon sonucunu gerektirdiği, ayrıca tahmin

aşamasında  $K$  ve  $x'$  i doğrudan uygulayan hiçbir test edilmiş prosedürün olmadığını, bu parametrelere karşılık tamamının optimum olduğunu ortaya koymuştur. Gill' in  $K$  ve  $x$  üzerine olan tahminlerinin Heggen ve O'Donnell' ın değiştirilmiş metodundan tahmin amaçlarına daha iyi uyduğunu sayısal deneylerle göstermiştir. Diğer taraftan doğrusal debi, depolama ilişkisi ile momentum denklemi yaklaşımına dayanan uygulamaları akarsu boyunca giriş hidrografına cevap veren Muskingum Modeli ile tahmin edilmesi, Gill' in yönteminin bu açıdan tutarlı olduğu ve bu yüzden ötelenme parametreleri için kullanılan kalibrasyondan farklı olarak bir akarsuyun giriş hidrografına vereceği yanıtı tahmin için en yeterli model olduğunu ortaya koymuştur.

Schmid (1990), birbiri ardına gelen iki yüzey üzerinde, sabit etkili yağış şiddeti varsayımı ve varsa şok dalgaların etkisi dahil edilerek Kinematik dalga denkleminin çözümünü ve sürekli olmayan çözümlerin kapsandığı durumlara özel dikkat göstererek Muskingum Cunge Modelinin verimliliğini, yarı analitik çözümlerde sayısal sonuçların karşılaştırılmasıyla ortaya koymayı amaçlamıştır. Çalışmanın birinci kısmında uygulanmış, kaydedilmiş ve hesaplanmış niceliklerin (yağış, su derinliği gibi) Muskingum Cunge ötelenme modelinin, Kinematik kaskatlara uygulanabilir en uygun model olduğunu göstermiş, modelin geçerliliği çok az sayıdaki durumlarda söz konusu olduğundan konuyu tamamlamak için Muskingum Cunge model performansının daha detaylı bir analizi gerektiği, bu yüzden yarı analitik bir taban modelin yardımıyla beraber yönetilen bir analizle uğraşmıştır. Şok dalga şekilleri üzerinde çalışmıştır. Çalışma sonucunda iki düzlemlili bir kaskatta Kinematik akımın yarı analitik ve Muskingum Cunge Modeline dayanan metot arasında tüm bir karşılaştırma yapabilmek için geniş bir dizi benzeştirme ile hem güçlü dalgalarla hem de bu tür dalgalar olmaksızın türbülanslı akım durumları için Muskingum Cunge ötelenmesinin yeterli sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur. Şok dalgasız laminer akımlar için iyi sonuçlar elde etmiş ancak şok dalga etkili laminer Kinematik akımları, Muskingum-Cunge Modelinin uygulanabilirlik sınırlarının dışında tutmuştur.

Ponce (1991), Kinematik ve difüzyon dalgalarının doğallığı ve uygulamaları üzerindeki tartışmaları dikkate alarak Kinematik dalgalar üzerinde çalışmış,

Kinematik dalga modelinin yapısı ve uygulanabilirliği ile ilgili olarak, Kinematik dalga difüzyonunun açıklanabilirliği ve Kinematik şokun uygulamadaki hesaplamalarda dikkate alındığı biçimde olup olmadığı sorularının ışığında Kinematik dalga kavramını yeniden gözden geçirmiş, uygulama alanlarının belirlenmesine ve tüm modelleme kriterlerini kontrol etmeye çalışmıştır. Lokal ivme, konvektif ivme ve hareket denkleminin temel terimleri momentum ihmal edilerek akarsu ve kanal akımları için difüzyon dalga denklemi ve benzer bir yaklaşımla D, hidrolik yayılımı kullanarak yüzey akışı için bir denklem oluşturmuş, denklemi, parabolik denklemler için sayısal tasarım yardımıyla hem analitik hem de sayısal olarak çözmüştür. Düzgün bir Kinematik dalga, düşük bir taban/pik akım oranı, hidrolik açıdan geniş ve yeterli uzunlukta bir kanal ve Froude sayısı yüksek olan akım şartlarında Kinematik şok oluştuğunu ortaya koymuştur. Yapay sayısal etkileri ve ağ boyutu küçültüldüğünde yok olma eğilimindeki sayısal etki çözümleri dikkate alındığında sonlu farkları kullanan Kinematik dalga çözümlerinin, sonlu ağ boyutunun bir sonucu olarak sayısal difüzyon ve dağıtımın gerçek miktarına sahip olduğunu göstermiştir. Yüzeysel akış Kinematik dalga çözümlerinin ağa bağlı olduğu; yani oldukça önemli miktarda sayısal difüzyonla dağıtımın rol oynadığı tipik bir çözümle birlikte sonuçların ağ boyutunun bir ilişki olduğunu, pratik akış hesaplamalarında Kinematik dalga metodunun 2.5 km<sup>2</sup>' den küçük özellikle fiziksel detayların, modelin deterministik yapısıyla uzlaşmadan çözülebildiği durumlarda, birim hidrograf metodunun ise 2.5 km<sup>2</sup>' den büyük 1000 km<sup>2</sup>' den küçük orta ölçekli havzalarda kullanılmasının uygun olduğunu ortaya koymuştur. Kinematik ve difüzyon dalga teorilerine doğru dinamik bir genişleme ile bu tip bir modellemenin kanal ve akım şartlarının Verdernikov sayısının sıfırdan farklı olduğu durumlarda; örneğin sel rejimine yakın ve sel rejimli akımlarda uygulanabilirliğini sonuç olarak elde etmiştir.

Perumal (1992), kullandığı çoklu doğrusal modellemede, zaman dağıtım planına dayanan bir taşkın dalgasını göz önünde bulundurarak, halihazırdaki çoklu doğrusal modellerin sınırlamalarını ve eksik yönlerini ortadan kaldırmak için çalışmıştır. Hesaplamalarda dikkate alınan Muskingum Modelini, doğrusal bir alt model şeklinde kullanmıştır. Önerilen bu metodun, giriş hidrografının ötelenme bölgeleri için sabit

tutulan parametrelerin yer aldığı mevcut haldeki çoklu doğrusal modellere hiç benzemeyen bir yönünün her ötelenme zaman adımında değişmesi olarak belirtmiş, bunun, taşkın dalga hareketinin doğrusal olmayan davranışının daha iyi modellenmesini sağladığı ve verilen bir giriş hidrografını ötelenmede kullanılan akım bölgelerinin sayısına karar vermedeki göreceliğini ortadan kaldırdığını açıklamıştır. Yanal debisiz düzgün geniş dikdörtgen kanallarda taşkın ötelenme için kullanılan bu metodun uygunluğu üzerinde kuramsal verileri kullanarak çalışmış, önerilen metodun, dar döngülü bir eğri etrafında karakterize edilen bir taşkın hidrografının sonucu olarak açık kanallarda taşkın dalga hareketini tanımlayabileceğini ortaya koymuştur. Taşkın dalga yayılımının çoklu doğrusal modellenmesinde, ötelenme zaman aralıklarının eşit sabit zamanlı bloklara bölerek başarıyla sonuçlandırdığı çalışmada, ağırlık parametresinin değişimi, giriş hidrografi geniş döngülü bir eğri ile karakterize edildiğinde oldukça büyük olduğu, giriş hidrografi kararlı bir hız eğrisi etrafında karakterize edildiğinde ise ağırlık parametresinin değerini 0.5 olarak tahmin etmiştir. Burada yapılan tüm ötelenme çalışmalarında geçiş zamanı  $K$  oldukça büyüktür. Giriş hidrografi, geniş döngülü bir eğri ile karakterize edildiğinde daha uzun bir geçiş süresi ile daha geniş bir oran gerektiğini, ağırlık parametresinin tahmininde Froude sayısını, hesaplamada kullanmayan bir eşitliğin kullanılmasının daha uygun olacağını sonuç olarak söylemiştir.

Perumal (1994), zaman dağılım şemasına dayalı bir çoklu doğrusal modelleme kullanarak, sabit kanal yatakları üzerinde taşkın ötelenmesi metodu üzerinde çalışmış, parametreleri, bir zaman eşleştirme tekniği ile kanal ve akım karakteristiklerini ilişkilendiren farklı kademeli modelini doğrusal alt model şeklinde kullanmıştır. Kullandığı iki parametrelili alt modelin en önemli avantajını ötelenmenin başlangıcında, çıkış hidrografını batık ya da artık debi olarak ortaya koyan Muskingum modelinden daha gerçekçi bir biçimde benzeştirmesi olarak belirlemiştir. Çalışmada Perumal, düzgün dikdörtgen kanallarda taşkın ötelenmesinde modelin uygunluğunu, matematiksel olarak ifade edilmiş giriş hidrografının ötelenmesi olarak incelemiştir. 25 m genişliğindeki farklı eğim ve Manning pürüzlülüğüne sahip 3 kanal tipi üzerinde çalışılmış, dikdörtgen kesite sahip bu kanalda giriş kesitinden 20 km, 40 km, 60 km, 80 km, 100 km ve 120 km

mesafelerde hidrograf ötelenmeleri yapmıştır. Saint Venant kapalı çözümü kullanılarak deneme yanılma ile tahmin edilen ve taban debinin hesaplanmasında kullanılan  $a$  katsayısı değerini 0.4 olarak almış ve tüm çalışma boyunca ötelenme süresini 15 dakika olarak göz önüne almıştır. Çalışmada anahtar eğrisinin, kanal kesitinin daraldığı yerlerde tanımlanan giriş hidrografının yerini aldığı zaman, ilgili çoklu doğrusal modelin, Saint Venant çözümlerine çok yakın sonuçları tekrar ortaya koyduğunu, metodun kullanımı sonucu giriş hidrografını doğrusal alt modellerin uygulanışında bölgelere ayırmakta kullanılan akış oranlarının belirlenmesinde özelliğın göz ardı edileceğini, ele alınan kanal boyunca tek bir ötelenme için kanal pürüzlülüğünün azalması, yatak eğimini artmasıyla  $n_d$  parametresinin değişim ve şiddetinin artacağını, kanaldaki anahtar eğrisi verilen giriş hidrografına göre daha geniş bir döngü ile karakterize edildiğinde geniş bir oran gerektiğini, çıkış hidrografı verilen model tarafından giriş hidrografı zaman değişimli birim hidrografa dönüştürülerek elde edildiğinden kütle korunumu prensibinin bozulmayacağını göstermiştir.

Ponce (1994), değişken parametrelı Muskingum Cunge Modelini yeniden değerlendirmiştir. Modelin doğrusal ve doğrusal olmayan biçimlerine ait özellikleri vermiş, doğrusal modda hesaplanmanın başında ötelenme parametrelerinin hesabında ortalama akım değerlerini kullanmış ve bunları hesaplama zamanı boyunca sabit tutmuştur. Doğrusal olmayan modda ise bölgesel akım değerlerinin bir ilişki gibi ötelenme parametrelerini her hesaplama adımı için yeniden hesaplamıştır. İlk defa uygulanan değiştirilmiş üç noktalı direkt ve dört noktalı iterasyonlu değişken parametreler metodu ile yapılan sayısal deneylerle pik debiler geniş bir aralıkta denendiğinde kütle kaybının küçük fakat anlaşılabilir olduğunu belirlemiş, uygulamada, değişken parametre metodu ile test edilen küçük bir kütle kaybının çok fazla dezavantaj oluşturmadığını belirlemiştir. Muskingum Cunge Modelinin, hidrolojik verilerinin (akarsu akım verilerinin) olmadığı, hidrolik verilerinin (enine kesit alanı, kanal eğimi v.s.) daha kolay belirlendiği durumlarda klasik Muskingum Modelinin, büyük veri gereksinimleri olan daha karmaşık dinamik dalga modelinin de bir alternatifini olduğunu ortaya koymuştur.



Ponce ve Huston (1994), taşkın dalgalarına ait konveksiyon-difüzyon ve dağılımının boyutsuz kısmi diferansiyel denkleminde ait katsayılar üzerinde çalışarak konveksiyon difüzyon dağılım denkleminde yeni bir bakış açısı kazandırmışlardır. Çalışmada mevcut denklem sistemine ulaşılması için Hayami, Dooge, Ponce ve Ferrick tarafından yapılan çalışmaların teorik özelliklerine yer vererek, literatürden elde edilen  $c$ , konvektif dalga yayılım hızı veya taşkın dalga hızı, hidrolik geniş kanallarda Chezy sürtünmesi için  $D$  difüzyon katsayısı veya hidrolik difüzyon hızı, Froude sayısı ve  $\eta$  dispersiyon katsayısı veya hidrolik dağılıma ait formülasyon ile Ponce tarafından Froude ve Verdernikov sayılarına bağlı olarak değiştirilmiş değerlere ait formülasyonu vermişler, konveksiyon-difüzyon-dağılım denkleminin boyutsuzluğunu ortaya koymuşlardır. Froude sayısının, esas hızın rölatif dinamik dalga denkleminde bir oranı, Verdernikov sayısının ise rölatif kinematik dalga yayılım hızının, rölatif dinamik dalga yayılım hızına bir oranı olduğunu göstermişlerdir. Hem difüzyonun hem de yayılımın büyük olduğu kısımlarda taşkın yayılım problemlerinin analizinde üçüncü dereceden konvektif difüzyon dağılım denklemini kullanmışlar, sonuç olarak; taşkın dalgalarının konvektif difüzyon dağılımının kısmi diferansiyel denkleminin katsayılarının sadece Verdernikov ve Froude sayılarının bir ilişki olduğunu göstermişlerdir.

Bajracharya ve Barry (1995), doğrusal olmayan dengeli bir Freundlich izoterme bağlı olan bir boyutlu eriyik geçişi için sayısal çözümleri, Muskingum Cunge yaklaşımı ile hızlı ve doğru bir biçimde çözülebileceğini göstermek amacıyla, doğrusal olmayan kimyasal madde taşınım problemini genel sonlu fark şemasından başlayarak irdelemişlerdir. Freundlich izoterminin seçilmesinin amacının, toprağa olan kimyasal tutunmayı açıklayan bir model bakımından geniş bir kullanıma sahip olduğunu belirtmişler, Muskingum Cunge Modelinde sonucun zayıf olduğu ve hiçbir zaman doğru sonuç vermeyen mesafe ve zaman adım ölçülerinin birleşimi ile oluşan belirsiz bir sayının varlığını göz önünde bulundurarak, aynı yaklaşımı, doğrusal olmayan reaktif eriyik geçişi problemini çözmek için uyarlamışlardır. Optimize edilmiş bir Muskingum Cunge şemasının önererek test etmişler ve Crank-Nicolson gibi var olan standart sayısal bir çözümle karşılaştırdıklarında basit ve etkili bulmuşlardır. Optimize edilen prensipleri gecikme kolonu ve sayısal işlemlerden doğan

yuvarlanma hatasının minimizasyonu olarak belirtmişler, verilen şartların doğru çözümlerinin ispatı için sayısal örneklere yer vermişlerdir. Çıkarılan şartların topraktaki reaktif kimyasal geçişinin Freundlich tipinin yumuşak doğrusal olmayan etkileri olduğunu, uygulamada toprak profilinin uzunluğunun mesafe adımlarının integral sayısına benzemediğini sonuç olarak ortaya koymuşlardır.

Barry ve Bajracharya (1995), 1930'da Ohio'da Muskingum akarsuyunun havzasında taşkın kontrolü için geliştirilen, iki parametre içeren, giriş ve çıkış arasında doğrusal bir ilişki şeklinde ifade edilen, depolamanın diferansiyel denklemine dayanan Muskingum modeli ve bu modelin parametrelerinin hesaplanış yönteminin zaman alması ile tahmin yeteneğinden yoksun olmasında ötürü Cunge tarafından değiştirilip Muskingum Cunge Modeli adını alan model detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmada dinamik dalga modelleri, difüzyon dalga modelleri, Kinematik dalga modelleri ile bunlara ait formülasyonu vererek sonlu fark çözümünü yapmışlar, uygunluk analiziyle birlikte sayısal çözümleri grafiksel olarak ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmanın esas amacı açık şartlar sunulduğunda Muskingum Cunge yaklaşımını takip eden difüzyon dalga denkleminin her zaman doğru sonuçlar verip vermediğini göstermektir. Hidrolik ötelenme şemalarında genişçe kullanılan yuvarlanma hataları III. dereceden hesaplanmış  $c\Delta x/4$  sayısal dağılımını veren en uygun Courant sayısının  $c=1/2$  olduğu, böylece bu şartların hem mesafe hem de zaman adımlarını sabitlediği sonucuna ulaşmışlardır.

Kshirsagar vd. (1995), Hindistan'daki Godavari akarsu kesitinde kontrolsüz yanal akışlar için Muskingum taşkın ötelenme modelini, yağış akış etki-tepki (impuls-response) ilişki modeli ile birleştirerek, 1 veya 2 memba noktasında verilen akış hidrografından akarsu mansabındaki bir noktada akış hidrografını ve kontrolsüz havza için yağış hiyetograflarını belirlemişlerdir. Modelin verilerini geçmiş verilerden belirlemek için sınırlandırılmış doğrusal olmayan (ardışık ikinci dereceden) program algoritması kullanılmıştır. Çalışmada K sönümleme katsayısı ve  $x$ , kontrolsüz havzalar da akım hızının etki parametreleri için ilk değerler gözlenmiş debi hidrograflarına, diğer parametreler ise geçmiş deneylere dayandırılmıştır. Durum 1: yanal akışsız yapay veri belirlenmesi, durum 2: yanal akışlı yapay veri

belirlenmesi, durum 3: yanal akışlı gerçek veri belirlenmesi şeklinde 3.durum için taşkın hidrograflarını,  $K$ ,  $x$  ve diğer katsayıları belirlemişler, sonuçları grafiksel olarak vermişlerdir. 1. ve 2. durumda belirli kabullere dayalı çalışmışlar, 3. durumda ise Hindistan'ın büyük akarsularından biri olan Godavari de Haziran-Ekim ayları arasında yapılan gözlemleri kullanmışlardır. 93 km uzunluğundaki kesitin memba ve mansabı arasındaki havza genişliği 3035 km olarak verilmiştir. Havzada ki toplam günlük yağışı yerleşik kontrollü 7 istasyondan 24 saatte, 1 saatlik olarak toplanan verilerle Thiessen Poligon Metodu kullanılarak belirlemişler, bu verileri kullanarak kontrolsüz havza için toplam saatlik yağış dağılımını elde ederek diğer katsayıları tespit etmişlerdir. Bu üç çalışmadan tahmin edilen kontrolsüz yanal akışlarla birlikte ötelenen ve gözlenmiş hidrografları elde etmişler, ötelenen ve gözlenen çıkış hidrografları arasında kabul edilebilir bir uyumu belirlemişlerdir.

Nguyen ve Kawano (1995), döngüsüz açık kanal ağlarındaki dinamik dalga taşkın ötelenmesinin eş zamanlı çözümleri için bir "çift tarama" algoritması sunmuşlardır. Vietnam su kaynakları planlaması ve yönetimi ulusal enstitüsünden elde edilen Kuzey Vietnam' daki en büyük sistem olan Red River sistemine ait verileri kullanarak yürüttükleri çalışmada birleştirilmemiş matris denkleminin geleneksel çözümünde ihtiyaç duyulan aşırı miktardaki bilgisayar belleği kapasitesinin ortaya çıkardığı zorluğu her tip kanal kesiti için yazılmış tekrarlamalı denklem kümeleri kullanarak yok etmişler,  $n$  girdili sistemin toplam düğümleri olmak şartıyla katsayılar matrisinin boyutunu  $2n \times 2n$ ' den  $2n \times 4$ ' e düşürmüşlerdir. Bu sayede uygulama süresini büyük ölçüde kısaltmışlardır. Uzaysal koordinat yönünün seçimindeki esneklikle birlikte, tüm kanal kavşaklarının aynı şekilde davranabildiğini ve tüm döngüsüz kanal şebekelerinin doğrusal çok kollu şebekelermiş gibi düşünülebileceğini ortaya koymuşlar, modelin herhangi bir kanal koluna yerleşmiş tek döngüyü içeren şebekeler için, üstteki ve alttaki matrislerin katsayılar matrisinden bozulmasının genelleşmeyi daha kolay kıldığından, basit bir algoritmanın gelişimini de olası hale getireceğini belirlemişlerdir. Çalışmada sunulan formülasyonun sadece maksimum dört kollu kavşakları ihtiva eden döngüsüz kanal şebekelerine uygulanabileceği, dörtten fazla kolun birleştiği şebekeler için formülasyonun değiştirilmesi gerektiği sonuç olarak belirtilmiştir.

Rashid ve Chaudry (1995), taşkın yatağı ile birlikte kanallarda kararsız akımlar üzerine deneysel verilerin laboratuvar deneyleri ile elde edilmesini sunmuşlardır. Kanalin membasındaki taşkın akımı, besleme borusuna yerleştirilen, elektrikle çalışan bir kelebek valf ile elde etmişler, su seviyesi değişimlerini, dokuz istasyonda kapasitans milleri ve bir hesap verisi elde etme sistemi kullanarak kaydetmişlerdir. Testleri, çeşitli başlangıç şartları, değişik süre ve taşkın dalgalarının çeşitli pikleri için uygulamışlar, sayısal modellemede kullanılabilecek iki test için tüm verileri sunmuşlardır. Taşkın akımını benzeştirmek için, Saint Venant denklemini Preissmann'ın dört noktalı kapalı sonlu fark şeması kullanarak çözen bir boyutlu sayısal bir model geliştirmişler, kanal enine kesit alan yaklaşımı için iki metodun uygunluğunu araştırmışlardır: I. metot taşkın yatağının sadece depo gibi davranması ve momentum transferine katkıda bulunmaması, II. metot ise başlangıç kanal kesitinin momentum akışına katkıda bulunması. I. yaklaşımın akımın pik derinliğini deneysel pikten %3.6'lık bir sapma ile benzeştirdiğini, II. yaklaşım kullanıldığında bu değer %7.5 olduğunu, doğal bir kanalda giriş verilerini etkileyen belirsizliklerle karşılaştırıldığında bu iki yaklaşım arasındaki sonuç farkının öneminin olmadığını, ancak I. yaklaşımın modellemede zaman ve paradan tasarruf sağladığını sonuç olarak belirlemişlerdir. I. yaklaşımı, ana kanalla taşkın yatağı derinlik ve genişlik oranlarının aynı olduğu istasyonlarda maksimum derinliği belirlemede tavsiye etmişlerdir.

Moussa ve Bocquillon (1996a), difüzyon dalga denkleminin değiştirilmiş bir formunu, geliştirilmiş ve karmaşık bir akarsu ağında taşkın ötelenmesine daha iyi uyum sağlayabilen yeni bir çözüm algoritmasını önermişlerdir. Yeni metodun doğruluğunu sayısal deneyler yaparak, geleneksel sayısal şemalarla karşılaştırmışlar ve daha sonra Gerolon d'Anduze havzası üzerindeki taşkın ötelenme modellemesi için test etmişlerdir. Denklem iki parametresi olan dalga yayılım hızı ve difüzyon hızının, debinin fonksiyonları olarak alınabildiğini ve çözüm algoritmasının yanal akımın yerel ve zamana bağlı herhangi bir dağılımın kullanılmasına olanak sağladığını ortaya koymuşlar, memba sınır şartlarından oluşan giriş sinyalinin neden olduğu stabilitesizliğe dikkat çekmişlerdir. Parabolik difüzyon dalga denkleminin çözümünde Crank-Nicholson sonlu fark yaklaşımını kullanmışlardır. Sayısal

metotların değerlendirilmesinde üç hata kriteri –maksimum debi, zamanda maksimum pozisyon ve giriş sinyali tarafından oluşturulan stabilitesizlik- seçmişler, her üç algoritmada da testlerden olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Sonuçlar aynı zamanda  $x$  aksı yönündeki durumun rotasyonla değiştirilmesi halinde yeni algoritmaların etkisinin önemli ölçüde gelişebileceğini ortaya koymuştur.

Moussa ve Bocquillon (1996b), akarsularda oluşan dalgaların ifade edilmesinde Saint Venant denklemlerinin kullanılması, genel olarak taşkın ötelenmesinde Saint Venant sisteminin sonlu fark algoritması kullanarak çözüm yapan difüzyon dalga denklemini kısalttığı, sayısal bir metotta kullanılacak mesafe ve zaman aralıklarının seçimi esas olarak taşkın hidrografının biçimi ve akarsuyun hidrolik özelliklerine bağlı olduğunu göz önüne alarak bu alanlar üzerinde çalışmışlar ve iki kriter önermişlerdir. Birinci kriter, ilk analizin sürtünme ve ivme terimleri arasında dengelenen akarsu dalga davranışı kavramına dayandığı, difüzyon dalga modelinde olduğu gibi, her dalga biçimini temsil eden parametre oranlarını bulup ardından sayısal algoritma seçimi için uygun mesafe, zaman adımlarıyla kriteri belirlemek şeklinde ifade edilmiştir. Taşkın dalgasının zamana bağlı karakteristiklerinin şiddeti ile ilgili sonuçları, kararlı üniform akımlardaki Froude sayısının ve hareketin kararsız ögesinin boyutsuz bir dalga sayısı olarak ifade etmişlerdir. İkinci kriteri ise, olayın difüzyon dalga problemi ve sayısal kararsızlığı ile ilgili olan parçasının incelenmesi olarak ifade etmişler, sayısal algoritma seçiminde kullanıcılara rehber olabilecek ve sayısal metotlarla ortaya çıkan hataları belirleyen bir teknik önermişlerdir. Önerdikleri bu tekniği Fransa'daki Loire akarsuyundaki verileri kullanarak taşkın ötelenmede kullanmışlardır. Bununla birlikte iki sonlu fark algoritmasını, verilen analitik metot sonuçları ile kıyaslamışlardır. Önerilen tekniğin üç hata kriteri ile iki algoritmaya (cnx ve cnt)'ye uygulanabilirliği ayrıca aynı metodun bir dizi parametreyle diğer algoritmalarla da kullanılabilirliği sonuç olarak söylenmiştir.

Ponce vd. (1996), uzun yıllardan beri taşkın modellenmesinde ve tahmininde başarıyla uygulanan Muskingum Cunge Modeline ve Cunge tarafından çıkarılan ve aralık fonksiyonun Taylor serisi açılımıyla elde edilen yaklaşım hatasına dayanarak Muskingum Cunge Modelini analitik olarak türemiş dalga yayılım hızı ile pik

sönümlenmeyi, bu modelin gerçek sayısal uygulamaları kullanarak elde ettikleri değerlerle karşılaştırarak test etmişlerdir. Analitik ve sayısal sonuçların uyuşmasının, model uygulamada gerçek taşkınların ötelenmesinde kullanıldığında, potansiyel doğruluğun bir göstergesi olduğunu ortaya koymuşlardır. Ponce ve Yevjevich, Muskingum Cunge Modelinin boyutsuz Courant ve Hücresel Reynolds Sayısını ifade ederek geliştirmişlerdir. Burada Courant sayısı fiziksel ve sayısal dalga hızlarının bir oranını, Hücresel Reynolds sayısı da fiziksel ve sayısal dağılma gücünün bir oranını ifade etmiştir. Muskingum ötelenme parametrelerinin ardından  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ötelenme katsayılarını da Courant ve hücresel Reynolds sayılarına bağlı olarak tanımlamışlardır. Ponce tarafında verilen kullanım ve limitler dahilinde Ponce ve Simons'ın bir seri sinüsoidal hidrograf için çıkış piki ile ulaşım zamanının analitik hesabının sonuçları ile Muskingum Cunge sayısal çözümü kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, bunun temelinde Muskingum Cunge ötelenmesinin taşkın dalga yayılımını doğru benzeştirdiği sonucuna varmışlardır. 12 testte uygulamada rastlanabilecek şartları geniş bir biçimde kapsamış, sayısal çıkış pikinin analitik çıkış pikine oranı 0.991 ile 1.003 arasında değişmiş, sayısal geçiş zamanı ile analitik geçiş zamanının oranının da 0.987 ile 1.021 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Bajracharya ve Barry (1997), çalışmada doğrusallaştırılmış difüzyon ötelenme problemi için doğruluk kriterlerini belirlemeye çalışmışlardır. Kinematik dalga denklemini çözmeye kullanılan genel sonlu fark şemasının yuvarlanma hatasından başlamak üzere doğrusallaştırılmış difüzyon denkleminin türetildiği 2., 3. ve 4. dereceden doğru sonuçları elde etmek için Wye nehrinin verileri kullanılmıştır. 2. ve 3. dereceden çözümlerin bağımsızca seçilen mesafe adımlarıyla mümkün olduğu, 2. dereceden doğru şemanın en iyi çözümlerine ulaşmak için yuvarlama hata kriteri gecikme kavramından oluşan bir durumla birleştirilerek, bu birleşmenin 3. ve 4. dereceden doğru şemalarınınkine benzer sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Çalışmanın esas amacının doğrusallaştırılmış difüzyon dalga denklemi için genel açık sonlu fark şemasından başlayarak en uygun çözümleri elde etmek olması sebebiyle Cunge ve Ponce tarafından ifade edilen yuvarlama hatası terimleri, Taylor serisi açılımından sonuçlanan zamana bağlı ve sabit türevleri yok etmek için Kinematik Dalga denklemi tekrarlandığı zaman kanıtlanmıştır. Çeşitli çözümlerin verimliliklerini

gerçekçi sürekli sınır şartlarına dayanan örnekler kullanılarak bir Crank Nicolson çözümü ve doğrusal difüzyon denklemi ile karşılaştırılarak çalışmanın sonucunda doğruluk kriterleri de göz önüne alınarak kullanımı uygun olan ve olmayan formülasyonları vermişlerdir.

Keskin ve Ağırlioğlu (1997), sabit genişliğe sahip dikdörtgen kanallarda taşkın ötelenmesinde kullanılan Saint Venant denklemlerinin çözümü için momentum denkleminin yeni bir formunu geliştirmişlerdir. Yeni formülasyonda momentum denklemini enine kesit alanı ve kanal debisi ile ilişkili iki parametreye sahip kısmi diferansiyel denkleme dönüştürmüşler, modeli açık sonlu fark şeması kullanarak çözmüşler, modelde basit bir kademeli tipine ait sayısal algoritma kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçları literatürden seçtikleri genel Dinamik Model çözümleriyle karşılaştırmışlar, bunun sonucunda kullanılan Dinamik Modele ait sonuçların diğer genel Dinamik Model sonuçlarıyla iyi uyduğunu göstermişlerdir. Sonuç olarak sadeleştirilmiş modelin formüle edilmesi ve diğerlerine göre daha basit ve hesaplama süresinin daha kısa olduğunu, modelin Kinematik Modelle karşılaştırılmasından daha düşük pik debi ve zaman elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Sadeleştirilmiş Dinamik Model kullanılarak elde ettikleri sönümlenme giriş hidrografının, hidrografın geometrik formu ve akımın piki gibi bazı karakteristiklerine dayanırken, Kinematik Model kullanılarak elde edilen sönümlenme giriş hidrografının biçimine bağlı olmadığı, bu durumda Kinematik Modelin uygun olmadığı hallerde sadeleştirilmiş Dinamik Modelin kullanımının uygun olacağını göstermişlerdir.

Jin ve Fread (1997), doğal nehirlerin bir boyutlu kararsız akım modellenmesi için karakteristiklere dayalı açık bir şema geliştirmişler ve US (NWS)' nin geliştirdiği Fldwav modeli orijinal kapalı dört noktali şema ile birleştirerek uygulamışlardır. Bununla birlikte; kritik akımların meydana geldiği kontrol noktalarını belirleyerek, giriş ötelenme mesafesini her zaman aralığı için nehir ve sel alt bölgelerine ayırmayı ve mümkün sel ya da nehir çözüm algoritmalarıyla birlikte uygun iç ve dış sınır şartlarını kullanarak her alt havzayı ayrıca hesaplamayı amaçlayan karışık rejimli bir akım tekniği geliştirmişlerdir. Bu teknikte, doğru sayısal karakteristik iletim yönü, nehir rejimli akımlar bir çift tarama yöntemiyle çözülürken, sel rejimli akımların

mansap ilerleme yönünde çözüldüğü bir çözüm yönteminde korumuşlar, kontrol noktalarının ya da kanal eğiminin birden selden nehre (ya da tersi durum) değiştiği noktalar veya hidrolik sıçramanın oluştuğu, Froude sayısının memba ve mansapta büyük değişimler gösterdiği, noktaların tanımlanması ve yerinin belirlenmesinin kolay olduğu durumlarda iyi sonuçlar veren bir teknik kullanmışlardır. Sonuç olarak sunulan açık-kapalı çok yönlü ötelenmeler için Fldwav modelinin bir uygulamasıyla birlikte her iki şema kullanımının da avantajlarını kapsayan bir teknikle; açık şemanın özellikle baraj yıkılmasıyla oluşan dalgalar ve kritik akım rejimleri ile diğer kararsız akımlar gibi bazı durumlarda gelişmiş çok yönlülük ve doğruluk sağladığını göstermişlerdir.

Mohan (1997), Muskingum modelinin doğasında var olan kanal depolaması ile ağırlıklı akım arasında doğrusal bir ilişki varsayımından dolayı modelin akarsu ve kanal taşkın ötelenmelerine uygulanışının zorluklarını ve Muskingum modelinin doğrusal olmayan formları ile birlikte, kalibrasyonda parametre tahmini için etkili bir metodun eksikliğini göz önünde bulundurarak çalışmada iki doğrusal olmayan Muskingum ötelenme modelinin parametre tahmini için genetik algoritmanın nesnel bir yaklaşımını sunmuştur. Bu yaklaşımın verimini seçilmiş bir problemde değişik kriterlere sahip olan literatürdeki diğer metotlarla karşılaştırmıştır. Yaklaşımın uygulanışının sonuçları depolama ağırlıklı akım arasındaki yüksek doğrusal olmayan örnekler ve doğrusal olmayan model parametrelerinin tahminde genetik algoritmanın etkili olduğunu belirlemiştir. İlave olarak genetik algoritmanın herhangi bir parametrenin tahminini gerektirmediği, böylelikle özneliğin ve geleneksel tahmin metotlarındaki hesaplama zamanının göz ardı edilebileceğini söylemiştir. Birçok yönden genetik algoritmanın, 3' nolu model için kullanılan diğer doğrusal olmayan model tekniklerinden daha iyi sonuçlar verdiğini, 4' nolu doğrusal olmayan model tipinde genetik algoritma doğrusal olmayan modellerdeki değerleri geliştirerek sonuçlandığını belirlemiştir. Genetik algoritmadan faydalanılarak bulunan ötelenme model parametrelerinin hassaslık analizi, herhangi bir ötelenme probleminde bir dizi parametrenin küçük bir hata ile bulunduğunu göstermiştir. Seçilen veriler için, genetik algoritma çıkış hidrografının ötelenmesinde kullanılan ve daha iyi



tahminlerle sonuçlanan parametreleri mantıklı bir doğrulukla belirlemekte olduğunu sonuç olarak ifade etmiştir.

Singh vd. (1997), bazı hidrolojik problemlerin çözümleri için gerekli olan taşkın ötelenme teknikleri ve bu tekniklerin en genel biçiminin dinamik taşkın ötelenme tekniği olması, dinamik taşkın ötelenme tekniğinin mansap sınır şartlarından dolayı genellikle döngülü bir anahtar eğrisi olmasına rağmen tek bir anahtar eğrisi varsayımına dayanması ilkelerinin ışığında memba bölgesi için hesaplanan sonuçlarda büyük hatalarla karşılaşılmadan tek bir anahtar eğrisinin mümkün olduğu mansap kontrol kesitinin bölge seçimi için bir kriter sunmuşlardır. Önerdikleri kriteri hipotetik hidrografın taşkın havzası ile beraber ve ayrı, bir dört nokta merkezli açık şema kullanarak ötelenmesiyle elde edilen sonuçların esası üzerine geliştirmişlerdir. Yapılan bu çalışma göz önünde tutulan bölgelerde doğru sonuçlara ulaşabilmek için uzatılması gereken kanal uzunluğunun ne olması gerektiğine dair kriterlere bir bakış açısı sağlamıştır. Taşkın havzaları ve kanallarda ana kanalla taşkın havzasındaki pürüzlülük katsayısının aynı olduğu varsayımıyla mansap kontrol bölgesinin etkilerini ortaya koymak için bir dizi hipotetik hidrograf setleri mesafe boyunca öteleyerek karakteristiklerinde geniş oranda değişimler gösteren kanallar kullanılarak hesaplamaları yapmışlar ve akarsu mansabında kontrol kesiti için optimum mesafenin belirlenmesi amacıyla yaptıkları analizlerde ise iki denklem geliştirerek, optimum mesafenin hesaplanmasında kanal karakteristiklerinin bilinmesinin gerekliliğini ortaya koymuşlardır.

Birkhead ve James (1998), akarsulardaki çevresel su ihtiyacının belirlenebilmesi için debinin hidrolik şartlarda açıklanabilmesi gerektiğini, araştırılan kısımdaki anahtar eğrileri temel bir gereksinim olmasına karşılık konvansiyonel metotlar kullanarak derlenmesinin zor ve zaman alıcı olduğunu, akarsu seviyelerinin bir dereceye kadar kolayca izlenebildiği ve taşkın ötelenme teknikleriyle aynı akarsu üzerindeki değişik lokasyonlarda izlenen debi ile ilişkilendirilebileceğini ortaya koymuşlardır. Eş zamanlı, kısa süreli yerel seviye ve uzak debi kayıtlarını doğrusal olmayan Muskingum modelinde kullanarak yerel alandaki tahmin fonksiyonunun parametrelerini uygun şekle getirmişlerdir. yaklaşımı varsayım dayalı bir kanaldaki

daha titiz bir ötelenmede kullanılan tahmin değerlendirme ilişkisini yeniden düzenleyip dinamik akarsu depolamasını da hesaba katarak Güney Afrika' da Sabie nehri üzerinde izlenen alana uygulamışlar ve doğruluğunu belirlemişlerdir.

Molls ve Molls (1998), Chang tarafından açılanmış yeni bir sayısal tekniği, bir boyutlu ve iki boyutlu Saint Venant denklemlerinin çözümünde kullanmışlardır. Bu yeni teknik, sonlu fark, sonlu kütle, sonlu eleman, spektral metotlar gibi diğer geleneksel metotlardan farklıdır. Chang' in metodu, mesafe ve zamanı aynı adımda işler, böylece mesafe ve zaman birleşmiş, yeni bir anahtar karakteristiği oluşmuştur. Açık bir metot olan bu metotta, şaşırtmalı bir ağ kullanmışlar, zamanla mesafede akım korunumunu uygulamışlardır. Akış ayrılması, akış sınırlaması ile öz değer hesaplanmasına ya da ilave bir yapay viskoziteye gerek olmadığını, bununla birlikte şemanın sade, uygulamasının kolay ve daha büyük boyutlara genişletilebilir olduğunu belirlemişlerdir. Chang tarafından geliştirilen modelin Saint Venant denklemlerine uygulanmasının etkisini örneklemek için düzgün dikdörtgen bir kanalda idealize edilmiş bir baraj yıkılmasını ve hidrolojik sıçrama modellemişlerdir. Green'in teoreminin ilgili denklemlerin integrasyon formuna uygulanması ile geliştirilen yeni şemayı Strang'ın 2D problemini 1D'ye indirgeyen ayrışma metodunu kullanarak bu tür problemleri çözecek şekilde genişletmişlerdir. Tipik olarak bu türdeki metotların sür eksizliklerin yakınında çevrıntiler oluşturduğunu, bunları azaltmak için yapay viskozite kullanıldığını ancak yeni şemanın süreksizliklerde yüksek doğruluklu sonuçlar ürettiğini ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte şaşırtmalı ağ kullanımının bazı şemalardaki adım sınırları için enterpolasyon gereksinimini ortadan kaldırdığını belirlemişlerdir.

Camacho ve Lees (1999), kanal ötelenmesi için iki parametrelilikli doğrusal farklı kademeli modelinin uzantısını sunmuşlardır. Uzantılı üç parametrelilikli modelin doğrusal alt ögesi bir zaman, gecikme parametresi tarafından karakterize edilen farklı kavramsal bir doğrusal kanal elemanı ile farklı bir kademeli şekilde birleştirmiştir. Bu adveksiyon, zaman gecikmesinin eklenmesi modeli özellikle tahmin uygulamalarında uygundur. Değişken zamanlı parametrelerin herhangi bir şekil ve sürtünme yasasına sahip üniform bir kanalın genelleşmiş doğrusal etkisini kullanan

momentum metodu ile birlikte fiziksel kanal karakteristikleri ile ilgili olduğunu belirlemişler, genişletilmiş modelin faydasını çeşitli hidrolik şartlar ve kanal geometrisi için çoklu doğrusal model sonuçları ile tam Saint Venant denklemlerinin karşılaştırılması suretiyle test etmişlerdir. Sonuçlar, modelin sadeliğini bozmadan, genişletilmiş modelin ilave serbestlik derecesi denklemlerle açıklanan taşkın dalga dağılımının daha iyi tahminlerine olanak sağladığını, ilave olarak önerilen matematiksel modelin doğrusal yaklaşımlarının kısa mesafelerde yeterli doğru tahminleri verdiğini göstermiştir. Mansap ve memba sınırları içinde açık döngülü anahtar eğrileri tarafından karakterize edilen üniform kanallarda uygun sonuçlar elde etmişler, fakat Manning denkleminin dayanan mansap sınır şartları düşünüldüğünde, bu kısımdaki hidrolik yapıların ya da fiziksel kanalda değişimlerin meydana gelmediği yerlerde veya gelgitlere, yan dereler ve kritik kontrol kısımlarına bağlı durgun su etkilerinin sınırdaki hidrolik şartları etkilemediği durumlarda geçerli olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak; çoklu doğrusal yaklaşım taşkın dalgasının doğrusal olmayan etkilerini benzeştirmekte etkili olduğunu, taşkın dalgası geçiş oluşumunun önemli bir oranı farklı kanalın açık zaman gecikmesi ile açıklandığını, integral yaklaşımı ve çoklu doğrusal şemanın sonunda kütle korunumunda herhangi bir eksiklik oluşturmadığını ortaya koymuşlardır.

Jin ve Fread (1999), National Weather Service (NWS)'nin bir boyutlu taşkın ötelenme modeli olan FLDWAV'da Saint Venant denklemlerinden momentum denkleminin, içsel viskoz kayma sürtünmesiyle, içsel tane temas sürtünmesini temsil eden  $J_s$  sürtünme terimi ilave ederek çamur ya da katı atıklı akımların da modellenmesini içerecek şekilde bir model geliştirmişlerdir. Sürtünme davranışının sınır türbülans kayma gerilmesine bağlı olduğu ve bu yüzden momentum transfer mekanizmasıyla, enerji dağılımının genel olduğu saf suya ait bir açık kanal akımı ile karşılaştırıldığında, katı atıklı akımlara ait sürtünme davranışının; 1. kanal sınır pürüzlülüğüne bağlı türbülans kayma gerilmesi, 2. katı-sıvı karışımının viskozitesi ile akma gerilmesi, 3. aynı seviyedeki akışkan karışımının sürtünmeye bağlı ayırıcı gerilmesi, 4. akışkan karışımının içindeki katı parçacıkların elastik olmayan çarpışması gibi bazı kaynaklara bağlı olduğunu bulmuşlar, bu özel sürtünme davranışını modellemek için üç teknik

geliştirmişlerdir; 1. çamur akımların modellenmesinde viskoplastik bir teknik, 2. katı atıklı akımların modellenmesi için granüler bir kayma tekniği, 3. katı atıklı veya çamur akımların modellenmesi için birleştirilmiş bir sürtünme katsayısı tekniği. tüm bu teknikler arazi verileri ve deneysel verilerle test edilmiş, sonuçların modeli yansıttığı görülmüştür.

Lange vd. (1999), 1400 km<sup>2</sup>'lik Nahal Zin (İsrail) kurak havzası için dağıtılmış, alana dayalı bir yağış akış modeli geliştirmişlerdir. Kalibre edilmemiş, ölçülmüş verilerle çalışmışlar ve modelde hidrolojik yüzey karakteristiklerine bağlı olarak değişik yersel alanlara ayrılmış bir havzaya uygulanan yağış radar verilerini kullanmışlardır. Her bir tip için, mevcut arazi çalışmalarından elde edilen birincil kayıp ve zaman bağlı infiltrasyon azalması değerleri kullanılarak horton yüzey akış oluşumunu parametrelendirmişlerdir. Model elemanlarından kanala birleşik kısımlara akışın dağılımı, şekil olarak benzer bir havzadan deneysel biçimde belirlenen bir yaklaşık sonuç ilişkinin uygulanmasıyla zamanlandırılmıştır. Lange, vd.'lerinin kanal ağı içinde kanal boyutları ve pürüzlülüğünü dikkate alarak, akım ötelenmesinde Muskingum-Cunge tekniğinin MVP3C3 metodunu kullandıkları bu çalışmada her bir kanal bölümünde iletim kaybını hesaplamak üzere sabit bir infiltrasyon oranını uygulamışlar, nemliliğin alüvyonal depolamanın en alt noktasına ulaşmasıyla çalışmayı sonuçlandırmışlardır. Sonuç olarak parametrelendirmenin yerel bir akış-ölçüm istasyonundan alınmamasından dolayı modelin ölçüm yapılmamış havzalara uygulanabileceği, genel olarak bu çalışmanın veri tabanı oluşumu üzerinde uygulandığı, akış kaybı az veri kayıtlarıyla kuraklığın yüksek olduğu olaylarda kalibrasyon sorununu ortadan kaldırmaya çalışan bir hidrolojik modele dahil edilebileceği söylenmiştir.

Moramarco vd. (1999), yayılı hidrolojik modellerin hem yamaç akışını hem de kanaldaki ilerlemeyi tanımladığını, çok sayıdaki yamaç akışı varlığının bir kanal ağı boyunca taşkın ötelenme metodunun etkin hesaplanmasını ve yamaç veya yanal akışları hesaba katması gerektiğini dikkate alarak; kanal boyunca üniform yayılmış yanal akışlı doğrusallaştırılmış Saint Venant denklemi için analitik bir çözüm sunmuşlardır. Verdikleri iki ilişkinin toplamı şeklindeki çözümlerden birincisi

membadan giriş akımının tepkisini temsil etmesi, ikinci ilişki ise yanal ya da yamaç giriş debisinden gelen katkıyı temsil ettiği şeklinde belirtmişler, ikincisini basit bir kanalda test etmişler ve sonuçları kanallar için detaylı sayısal bir modelle karşılaştırmışlardır. Bunun yanında, ikinci çözümü bir sonlu fark modeli ile test ederek, tahmin edilen pik debi, pik zaman, değişik kanal eğimleri için debi; doğrusallaştırma için taban hız ve Manning pürüzlülük katsayısındaki hataları sunmuşlardır. Yaptıkları karşılaştırma sonucu, analitik çözümün eğimi 0.01'den 0.0001'e değişen kanallar için pik hidrografını yeter derecede yeniden oluşturduğunu, düşük eğimli kanallar için düzgün bir taban debisinin seçimine dikkat edilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. Dik eğimli kanallar içinse sonuçlar seçilen taban debisine daha az hassastır. Bu sebepten dolayı, metodun dik eğimli kanalların genel olarak bulunduğu hidrolojik havza modellerinde daha gerçekçi olduğunu, sayısal ve analitik çözümler arasında yaptıkları zamanı karşılaştırılmasından, ikincisinin daha verimli hesaplanabildiğini ve yayımlı yağış-akış modelleri için ideal olduğunu sonuç olarak ortaya koymuşlardır.

Ping ve Xiaofang (1999), çok kollu akarsular için çift tarama metodu kullanarak imajiner bir kanal vasıtasıyla hidrolik bir taşkın ötelenme metodu üzerinde çalışmışlardır. Metodu, hidrolik metotlarla elde edilmesi mümkün olmayan çözümleri olan taşkın ötelenme problemlerini çözen ve kanal akımlarının hareketlerini açıklayan Saint Venant denklemlerine dayandırmışlardır. Çok kollu akarsulardaki taşkın ötelenmesinin akarsu ağlarındakinden daha kolay olması sebebiyle çift tarama metoduna dayanarak, çok kollu akarsulardaki taşkın ötelenmesinde çıkan düzensiz matris sonuçlarını çalışmada hayali bir kanal boyu gibi kabul ederek; taşkın hareketi üzerine savak kontrolünün etkisini de bu hayali kanala göre ele almışlardır. Çalışmada geliştirdikleri çok kollu akarsular için taşkın ötelenme metodunu 143 km uzunluğundaki, 6 yan deresi olan Çin' deki Chu nehrine uygulamışlar, yan dere noktalarının etkilerini, hayali kanal boyu ile birlikte test ederek, taşkın ötelenme metodunu daha basit ve uygulanabilir bir hale getirmişlerdir. Modelin, taşkın ötelenme problemlerini ele almada ve taşkın hareketinin savak kontrol problemini işlemede etkili bir yöntem sağladığını, mansap kaynaklarındaki geri dönüş suyu etkilerinin sonuçlarını ele almada mevcut hidrolojik taşkın ötelenme

metotlarından daha fazla esnek olduğunu, bu nedenle geliştirilmeye ve uygulamadaki uygulamalarda kullanılmaya daha uygun olduğunu ortaya koymuşlardır.

Tang vd. (1999a), büyük taşkın ovalarına sahip prizmatik birleşik kanallarda varsayıma dayalı birkaç taşkın hidrografi kullanarak taşkın ötelenmesinde değişken parametrelili Muskingum Cunge Modelinin (VPMC) özelliklerini araştırmışlardır. Bu araştırmaya sebep olan en önemli etkenleri; VPMC modelinin değişken ağ çözümlerinde tutarlı sonuçlar vermesi, difüzyon dalga ötelenmesi ile karşılaştırılabilirliği, doğrusal olmayan bir model olup dalga dikliğini benzeştirebilmesi, küçük ancak fark edilebilir kütle kaybı ve uç cidarda oluşan batıklıktan dolayı yetersizliği olarak belirtmişlerdir. VPMC modelinin genel özelliklerini sergilemek üzere birleşik kanallardaki taşkın ötelenmelerine uygulanan bir dizi sayısal deneyler yapmışlar, bu deneylerin sonucunda depolamanın hidrograf yayılımı üzerine önemli etkisi olduğunu gösteren çıkış hidrografının yükselme kolunda düzleşme, yassılaşıma, şeklinde büyük deformasyonlar olduğunu ortaya koymuşlardır. VPMC metodunun iki değişik varyasyonu olan VPMC3 ve VPMC4-1 metodları ile batıklık ve çalkantıları yok etmek için uygun mesafe ve zaman adımlarını seçmede yeni bir durum elde etmişlerdir. D ve c ötelenme parametreleri ile birlikte boyuna hidrostatik basınç teriminin etkisini hesaba katan yeni bir modeli ilk VPMC modelleriyle karşılaştırmışlar, buna göre kütle kaybında bir gelişme sergilediğini göstermişlerdir. Çalışmada sonuç olarak; sayısal deneylerin çıkış hidrograflarında hem MVPMC3 modelinin hem de VPMC4-1 modelinin kütle kaybı nedeniyle yetersiz kaldığını, özellikle VPMC4-1 modelinde, batıklık olmadığı zaman ötelenmiş debinin farklı  $\Delta x$  ve  $\Delta t$  değerlerinden etkilenmediğini, her iki giriş hidrograf şekillerinde pik ve pike ulaşma zamanı benzer olmasına rağmen kütle kaybı giriş hidrograflarındaki simetriklikten daha az asimetric olduğunu, giriş pikinin sönümlenmesi genellikle, daha düşük yatak eğimiyle ve taşkın havzasının pürüzlülüğünün artması ile arttığı; dolayısıyla bunun yatak eğimi ile pürüzlü havzanın taşkın dalga difüzyonuna önemli oranda katkıda bulunduğunu, VPMC için c-O eğrilerinin değişik tahmin metodlarının ötelenmiş sonuçlar üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Tang vd. (1999b), taşkın ötelenmesinde basit değişken parametrelili Muskingum Cunge (VPMC) modelinin hala sıklıkla kullanıldığını, bununla beraber ötelenme parametrelerinin değerlendirilmesinde, uygun taban debisinin seçiminde meydana gelen küçük kütle kayıplarından dolayı ortaya çıkan zorlukları göz önünde bulundurarak değişken parametrelili Muskingum Cunge Modelindeki kütle korunumunu incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde VPMC metodu için genellikle kullanılan şema özelliklerinin detaylarının da inceleyerek özellikle iki yeni şemayı değişik kanal yatak eğimleri ve mesafe adımı ile zaman adımının farklı çözümleri ile beraber bir dizi sayısal deneyler yapmışlardır. Deneylerde 4 noktalı şemanın 3 noktalı şemadan daha uygun sonuçlar verdiğini, özellikle VPMC4-1 biçiminde adlandırılan şemanın en uygun şema olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu şemayı boyuna hidrostatik basınç gradyanının ( $\partial h/\partial x$ ), c, D ötelenme parametreleri üzerine olan etkilerini hesaplamak amacıyla modifiye etmişlerdir. Sayısal deneylere dayanarak kütle kaybı yüzdesi ile yatak eğimi arasında VPMC4-1 metodunun pratik uygulamalarında kılavuz görevi gören deneysel bir ilişki elde etmişlerdir. Sonuç olarak, VPMC metodu için tüm şemalarda aynı pike ulaşma zamanını,  $t_p$ 'yi elde etmişler,  $t_p \Delta x/L$  seçiminden etkilenmemekle birlikte sınırlı ölçüde de olsa  $\Delta t/t_p$  değerinden etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Akım dalgasının difüzyona katkıda bulunan ana faktör olan yatak eğimi azaldıkça pik akımın sönümlenmesinin azaldığını, sabit parametrelili Muskingum Cunge Modelinin yatak eğimi ve  $\Delta x$ ,  $\Delta t$  çözümü ne olursa olsun daima hacmi koruduğunu, VPMC metodunun ise yatak eğimine bağlı olarak belli bir miktarda kütle kaybını ortaya çıkardığını belirlemişlerdir.

Yen ve Tsai (2000), çalışmada, taşkın ötelenmesindeki yanlış tanımlamaları belirlemek amacıyla Saint Venant denklemi veya bunun yaklaşımlarının kullanıldığı kanallardaki kararsız akım çözümleri; Kinematik dalga, ivmesizlik dalgası, ağırlık ve yarı kararlı dinamik dalgayı ele almışlar, geçmişte yapılan, literatürdeki çalışmalarda yer alan tanımlamaları, formülasyonu sunmuşlardır. Konuyu daha detaylandırmak için, dalgaları matematiksel olarak formüle etmişler ve fiziksel olarak açıklamışlardır. Matematik formülasyonları oluştururken doğrusal dalga, doğrusal olmayan dalga, Kinematik ve ivmesizlik dalgası perspektiflerini kullanmışlar,

difüzyon dalgasının dalga yayılım hız ve hidrolik difüzyon hızının sabit olduğu varsayımıyla sığ su dalga yayılımının değişik seviyelerinden matematiksel olarak ifade edilebileceğini göstermişlerdir. Dalgaların hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yönlerini ve ivmesiz dalganın difüzyon dalga modelinin özel durumlarından biri olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır. Bir başka deyişle ivmesiz dalgayı, ivme terimlerinin basınç gradyanı, yerçekimi ve sürtünme eğimi terimleri ile kıyaslandığında önemsiz olduğu düşünüldüğü dinamik dalga modelinin fiziksel bir sadeleştirilmesi olarak tanımlamışlar, çeşitli dalga yaklaşımları arasındaki farkların, kendi fiziksel mekanizmalarından ve dalga yayılım hızı ile hidrolik difüzyon katsayısından yansıyan matematik yapıdan kaynaklandığını belirlemişlerdir.

Moussa ve Bocquillon (2001), fractional step (kesir adımı) tekniğine dayanarak yanal akışlı difüzyon dalga probleminin çözümünde, difüzyon dalga problemini konveksiyon ve difüzyon için farklı denklemleri kullanarak iki ayrı probleme dönüştüren bir hesap modeli sunmuşlardır. Bu modelde

$$\text{Konveksiyon için (D=0)} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = -C \frac{\partial Q}{\partial x} + Cq,$$

$$\text{Difüzyon için (c=0)} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$$

denklemleri ile çalışılmıştır. Bu iki denklem de c ve D parametrelili kısmi diferansiyel denklemlerdir ve başlangıç sınır şartları ile yanal akımın zamana ve yere göre dağılımına bağlıdır. Bu çeşitli kısmi diferansiyel denklemleri çözmeye kullanılan şemaya göre türevler diferansiyel niceliklerle yer değiştirir ve denklem diferansiyel denkleme dönüşür. Kesir adım metodunun doğruluğunu analiz etmek için ilk önce networkteki bir P noktası etrafında Taylor serisi kullanılarak genel difüzyon dalga denkleminin matematiksel özellikleri araştırılmış ardından sayısal çözüme dayalı hataları analiz etmek ve metodun stabilitesini belirlemek için sayısal uygulamalar yapılmıştır. Sonuçlar konveksiyon ve difüzyon için ayrı denklem kullanımının yayılı hidrolojik modelleri iyi yansıttığını, metodun difüzyon dalga denkleminin mesafe ve zaman adımlarında özel şartlarla yanal akımın zamana ve yere bağlı dağılımı için özel şartları altında etkili ve doğru sonuç verdiğini göstermiştir.



Ponce ve Lugo (2001), Muskingum Cunge taşkın ötelenme modelinin döngülü eğrilerin alanına doğru genişlemesi ve geleneksel dört noktalı modelin değiştirilip, hidrolik difüzyon ifadesindeki su yüzü eğimi ile Verdernikov sayısında kullanımını dikkate alarak Muskingum Cunge ötelenmesinde döngülü anahtar eğrilerinin modellenmesi üzerinde çalışmışlardır. Geliştirilmiş bu modelin geniş bir orandaki kinematik ya da difüzyon kararsız akım şartları altında döngülü eğrilerin oluşumunda uygun olduğunu, modelin denenmesi için sayısal deneylerin uygulandığını ortaya koymuş, döngü kalınlığı, kütle korunumunun yüzdesini belirlemek üzere çözüm seviyesinin, taşkın dalgası periyodunun, baz akışı ve giriş-çıkış akımlarının pik oranının değişiklik gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu çalışmadaki döngülü eğriler, dinamik dalga modeli kullanılarak hesaplanan eğrilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmadaki doğrusal olmayan modelde ötelenme parametreleri her bir adımdaki  $q$  ve  $c$ 'nin ortalama değerlerine dayanmış, her bir hesap adımındaki kanal eğimi değişmeden kalmıştır. Muskingum Cunge ile oluşturulan döngülü anahtar eğrileri, Saint Venant denklemlerine dayanan dinamik bir dalga modelinden oluşan anahtar eğrileri ile karşılaştırmışlar, her iki modelinde anahtar eğrileri oluşturmada yetenekli olduğunu ve çıkış hidrograflarını doğrulukla karşılaştırabildiğini göstermişlerdir. Çalışmada geliştirdikleri modelin, Muskingum Cunge Modelinin geniş uygulanabilirliği ile geniş bir Kinematik /Difüzyon kararsız akım şartları altında döngülü eğrilerin oluşturulmasında başarılı olduğunu sonuç olarak söylemişlerdir.

Szymkiewicz (2001), çalışmada tıpkı doğrusal rezervuarlarda olduğu gibi Muskingum modeli için de alternatif bir anlık birim hidrograf sunmuştur. Bu yaklaşımın iki model tarafında da verilen sonuçların dengesine dayandığını, bu yolla elde edilen anlık birim hidrografın klasik olan modellerle türetilenlerle kıyaslandığında daha iyi özelliklere sahip olduğunu, Muskingum model için olan IUH'nin, difüzyon dalga modeli için olan Anlık Birim Hidrograf (IUH) formunu alabildiğini ortaya koymuştur. Kanalım mansabında herhangi bir negatif debi oluşturmayan taşkın dalgasının bir kanal boyunca geçişini ve sönümlenmesini eş zamanlı olarak yeniden oluşturabilmiştir. Sonuç olarak klasik ani birim hidrografların mesafe yaklaşım olarak Kinematik dalga modelinden türetilmesi nedeniyle genel bir karakteri olmadığı, bu nedenle bu hidrografların sayısal difüzyon

mekanizmasına dolaylı olarak dahil edildiğini ortaya koymuştur. Bu gerçeği kullanarak, hidrolojik toplu modelleri direkt olarak süreklilik ve üniform düzgün akım denkleminde çıkarmıştır. Giriş ve çıkış akımlarıyla ilgili ilave bir formülasyonun uygulanması, depolamanın sayısal integrasyonu ile düzgün kararlı akım denkleminin bir uygulamasının sonucu olarak yorumlanabileceğini göstermiştir. Doğrusal difüzyon dalga için Hayami tarafından önerilmiş IUH'ye dayanan bu modelin, tek bir doğrusal rezervuar, doğrusal rezervuarların kademeli modeli ve Muskingum ile Kinematik dalga modelleri için geçerli olması sebebiyle daha genel bir karaktere sahip olduğunu, bununla birlikte zamanında dalga geçişi ve sönümlenmesi gibi aynı anda çok önemli etkileri sağlayabildiğini, önerilen IUH'ın yağış-akış gelişiminin modellenmesinde de bu denklemin kullanılmasının mümkün olduğunu ortaya koymuştur.

Tseng vd. (2001), kanal ötelenmesi hesaplarında sayısal modellerin kullanımının yaygın ancak yetersizliğinden dolayı kritik akımları tahminindeki başarısızlıkları dikkate alarak, çalışmada şok dalgalı açık kanal akımlarında kanal ötelenmesi ile ilgili olarak; hızlı değişken açık kanal akımlarında iki ileri çözüm ve 1 boyutlu benzeşim için şok dalga tutucu şemalar sunmuşlardır. Kararsız kanal akımlarında 1 boyut için, gaz dinamiğindeki Euler denklemlerinin hidrolik benzeri olan Saint Venant denklemleri ile birlikte taban eğimleri ve sürtünme etkisini de dahil etmek için Strang tipi ayırma operatörü kullanmışlardır. Kullanılan şemaların doğrulanmasında hem kararlı hem de kararsız akımlar için analitik çözümlerle mevcut deneysel verileri karşılaştırmışlar, ilave olarak kararlı ötelenme kullanımının risklerini örneklemek amacıyla kararlı bir ötelenme ile dinamik taşkın ötelenmesi arasında da bir karşılaştırma yapmışlardır. Sunulan modellerin, prizmatik ve prizmatik olmayan kanallarda, taşkın ötelenmesinde çok önemli olan taban eğimleri ve sürtünme terimleri ile beraber kanal akımlarını hesaplayabildiği, bu modellerin kullanılmasıyla elde edilen şemanın sonuçlarının güçlü şok dalgaları ve sağlam stabilite sergilediğini bununla beraber taşkın periyodu sırasında kararlı ötelenmenin, su derinliğini azımsayabildiğini, bundan dolayı kararlı ötelenmenin akarsu planlanması ile hidrolik yapıların güvensiz dizaynı şeklinde sonuçlanabildiğini belirlemişlerdir.

Birkhead ve James (2002) , Muskingum modelini, kanal akımı ile değişken hidrolik kondüktiviteye bağlı olarak geçirimli kıyılarına sahip akarsulardaki kıyı depolaması arasındaki etkileşimi daha açık bir şekilde için değiştirmişlerdir. Muskingum geleneksel modelinin sadece kanal depolamasını hesapladığını, model parametrelerinin tipik olarak, kanal boyunda toplam depolama ile değişimlerin ilişkisini sağlayan, ölçülmüş giriş-çıkış debi hidrograflarının kalibrasyonundan çıkarıldığını göz önünde bulundurarak, daha önce Güney Afrika'daki Sabie akarsuyuna ait seviye hidrograflarına ve nehrin uzak bir bölgesindeki debi hidrograflarına dayanan anahtar eğrisi ilişkisini sentezlendiği sırada değiştirmişler, bu çalışmada ise herhangi bir hidrolik kondüktiviteye sahip geçirimli akarsu kıyıları ile beraber akarsulardaki kanal ve kıyı depolaması arasındaki etkileşimi hesaplamak üzere daha da geliştirilmiştir. Kıyı depolamasını açık ve kapalı bir şekilde hesaplanın, ölçülmüş debi hidrograflarından doğrusal olmayan Muskingum ötelenme parametrelerinin tahmini üzerine etkilerini de incelemişlerdir. Genişletilmiş modelleri geçirimli kıyıları olan bir kanalda taşkın ötelenmesi ile kıyaslayarak doğrulamışlardır. Sonuçlar hem depolamanın hem de kalibrasyon parametrelerinin doğru temsiline geliştirilmiş iki modelde de kıyı depolamasının açıkça hesaplanmasıyla sağlandığını göstermiştir. Giriş ve çıkış debi hidrograflarını kullanan kıyı depolamasını ihmal eden geleneksel Muskingum modelinin, anahtar eğrisi katsayılarına dair doğru olmayan tahminlerle sonuçlandığını, depo ağırlık faktörü değerini düşürdüğü fakat zaman bağlı toplam depolamayı iyi temsil ettiğini, bundan dolayı ilk modelin anahtar eğrisi katsayılarını değerlendirmede, ikinci modelin ise akarsu kanalları boyunca debinin ötelenmesinde güçlü bir çözüm sağladığını belirlemişlerdir. Sabie nehri için kıyı depolanmasında modellenmiş varyasyonu, akım olayı sırasında gözlenmiş değişimlerle de karşılaştırmışlar, bu uygulamanın, kıyı depolamasının, toplam depolamanın % 40'ı olduğunu, Sabie nehri boyunca bu depolamanın ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Szél ve Gáspár (2002), Muskingum Cunge Modelinin bir boyutlu kararsız adveksiyon-difüzyon denklemine uygulanmasını araştırmışlardır. Sayısal difüzyonu yok etmek için şemanın katsayılarını, Courant ve Peclet sayılarından başka ağırlık katsayılarını açıkça içermeyen şema yoluyla tanımlamışlardır. Kinematik dalga

denkleminin, sonlu fark metodu ile çözümünde kullanılan Muskingum dalga modelinde genellikle negatif ağırlık parametreleri de tanımlanır, fakat negatif parametrelerin uygun yaklaşımları verdiği bazı durumlar söz konusudur. Çalışmada şemanın en son formunda ağırlık parametrelerinin bir rolü olmadığı ve bunların yerine sadece Courant ve Peclet sayıları tarafından karakterize edilen şema özelliklerinden bahsetmişler, doğruluğu daha fazla arttırmak için Courant ve Peclet sayıları arasında basit bir ilişkinin tanımlanması ile sayısal kararsızlığın yok edilebileceğini belirtmişler, güçlü bir stabilite için yeterli durum ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte sayısal yayılımın elimine edilmesi ve Muskingum Cunge şemasının zayıf ve güçlü stabiliteleri için yaklaşımlarla birlikte sayısal örneklere yer vermişlerdir. Sonuç olarak ağırlık parametrelerini ayırıp 0-1 arasında tanımlanmasına ihtiyaç duymayan formülasyonu, Peclet ve Courant sayılarından başka ağırlık parametresi içermeyen formülasyonu ve sayısal kararsızlığı yok edip doğruluğu arttıracak formülasyonu belirlemişlerdir. Bu durumun ancak adveksiyonun baskın olduğu, daha kesin olarak  $pe^2 > 3$  olduğu durumda geçerli olduğunu, adveksiyon hızı pozitif ise şemanın sürekli zayıf hassasiyette bile stabil olduğunu ortaya koymuşlardır.

Zhang vd. (2002), doğrusal bir ötelenme yapısını içeren ve depolama etkilerinin fiziksel doğruluklu bir dağılımını sağlayan bir akış modeli (LSRM) geliştirmişlerdir. Fiziksel gerçekçi depolama etkileri ile modeli, parametre uyumluluğu ya da kalibrasyon gerektirmeden gözlenmiş geniş taşkınları tutarlı bir biçimde oluşturmayı ve modelin performansını iki klasik model şemasıyla (RORB, WBNM) karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Yağış akış performansını karşılaştırmada geleneksel biçimde uygulanan hata kriterlerini kullanmışlar, mümkün olan kısımlarda bu modelin oluşturduğu PMF'yi de ayrıca kıyaslamışlardır. Önerilen modelin diğer iki modelleme şemasına göre yetersiz kaldığı durumlarda sonuçları buna özdeşleştirmişler, Kuzeydoğu Avustralya'daki üç havzanın uygulama sonuçlarının temsilini izleyen Çin'de bir havzada yapılan uygulamayı açıklamışlar, ele aldıkları sekiz havzadaki üç modelin geniş bir dizi taşkın olayına uygulanmasının sonuçlarını da kıyaslamışlardır. Önerilen modelin, direkt optimizasyonuna ya da deneme-yanılma parametre uyumluluğuna ihtiyaç duymaksızın gözlenmiş büyük taşkınların yeniden oluşturulabileceğini, bu yeni modelin büyük taşkınların dizaynında

kullanılabileceğini belirlemişlerdir. Gözlenen jeomorfolojik gelişimi diğer modellerden daha gerçekçi temsil ettiğinden ve gözlenmiş büyük taşkınları bu çalışmada yer alan en az diğer modeller kadar iyi oluşturduğundan önerilen kütle yasasını kullanan doğrusal modeli dizayn taşkınının tahmini için tavsiye etmişler, model performanslarının karşılaştırılması varolan taşkınları benzeştirmede LSRM'nin RORB ve WBNM gibi diğer doğrusal olmayan modellerden daha iyi olduğunu gösterse de doğrusal olmayan modellerin aşırı taşkınları ve pik debileri tahmin etme eğilimi gösterdiklerini sonuç olarak ortaya koymuşlardır.



### **3. MATERYAL ve METOT**

#### **3.1. Materyal**

##### **3.1.1. Havza Özellikleri**

Batı Toros kuşağı üzerinde yer alan yörenin, doğusunda Dedegöl, güneyinde Kuyuluk dağı yükseltileri yer alır. Her iki yükseltiden boşalan kaynaklarla beslenen Aksu ve Köprü çayları, Toros kuşağı üzerinde derin kanyonlar oluşturarak Akdenize ulaşır. Dağlık kesimler meşe, köknar, sedir, kızılçam, karaçam ve ardıçtan oluşan sık ormanlarla kaplıdır.

Yöre, Akdeniz ikliminin yayla tipi özelliğinde olup, yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve yağışlıdır.

Sütçüler ilçe merkezindeki yıllık ortalama yağış 916.7 mm' dir. Günlük en çok yağış ise 1990 yılı Eylül ayında ölçülmüş olup 212 mm' dir.

##### **3.1.2. Taşkın Havzasının Jeolojik Yapısı**

Sütçüler ilçe merkezi, kuzeyinde yükselen Kale tepenin eteklerinde kurulmuş olup güneyinde, doğudan batıya doğru akan Değirmendere yer alır. Kale tepenin Sütçülere bakan yüzündeki zirve kotu 1270 m, Sütçülerden inen drenaj ağının Değirmendere' ye kavuştuğu kot 730 m, ikisinin arasında kalan ilçe merkezinin yoğun yerleşim kotu ortalaması ise 950 m' dir. İlçe 900 m ile 1000 m arasında dağınık yerleşim sunar. Kale tepe Jura-Kretase yaşlı karstik kireç taşlarından oluşmuştur. İlçenin üst yerleşim kotu olan 1000 m kotları sınır olmak üzere, Değirmendere' nin aktığı 730 m kotlarına kadar, kireçtaşlarının altında Triyas çökelleri yer alır. Bu çökeller radyolarit, çört, yastık lav, plaket kireçtaşı, kil taşı, bitkili kum taşı ardışıklanmasından oluşmuş, karmaşık bir seri olup, genel stratigrafik konumları itibariyle Kale tepeyi oluşturan, geçirimli, bol kırıklı ve eklemli karstik kireçtaşlarının altında geçirimsiz bir taban oluştururlar. Bu stratigrafik konuma bağlı olarak, ilçe merkezinin üst kotlarında, akifer özelliğindeki kireçtaşlarının boşalımı, pınarlanmalar şeklinde açığa çıkıp, güneydeki Değirmendere' ye ulaşır. Bu

pınarlardan en büyüğü, ilçenin içme ve kullanma suyunu temin ettiği, yaz-kış akışı devam eden Sütçüler Pınarıdır. Pınar suları, Sütçülerin doğusunda, drenaj alanı dışındaki, mevsimlik akış gösteren Belen Dere ve devamındaki Başkoz Dere ile Sütçülerin altında birleşip, Azmak Dere adını alarak Değirmendere' ye ulaşır. Ortalama debisi 100-200 lt/s olan bu pınarın, feyezan sırasında debisi artarak 601 lt/s 'ye ulaşmıştır.

### 3.1.3. Taşkın Alanı Hidrolojisi ve Sütçüler Taşkını

Isparta iline 102 km. Mesafede yer alan Sütçüler ilçe merkezi ve civarında 4 Kasım 1995 günü saat 15.00 de önce dolu şeklinde başlayıp, daha sonra yağmura dönüşen yağış, aralıksız 4 saat çok şiddetli olarak devam etmiştir. Yağışın dolu şeklinde başlaması akışı geciktirmiş, yağmura dönüşmesi ile birlikte biriken yağış hızla akışa geçmiştir. Şiddetli yağış Sütçüler ilçe merkezinde çok sayıda konut ve işyeri ile içme-kullanma suyu isale hattında, yol kaplamaları ve alt yapı tesislerinde büyük hasara yol açmıştır. Aynı yağıştan Sütçülere bağlı birçok yerleşim birimi de etkilenmiştir.

Sütçüler ilçe merkezinde bulunan Devlet Meteoroloji İstasyonunun 1.5 yıl önce kapatılmış olması nedeniyle yöreye düşen yağış miktarı ölçülememiştir. Aynı havzada bulunan akım rasat istasyonlarından geçen debilerden giderek havzaya düşen yağış miktarı tespit edilebilmiştir. Buna göre yöreye 4 saat boyunca düşen yağış miktarı 111.4 mm' dir ve 25 yıllık yağış-şiddet-süre tekerrür değerlerine tekabül etmektedir. 9-89 istasyonu Değirmendere Sütçüler ve Boğazköy drenaj alanlarını da içine alan toplam 313.9 km<sup>2</sup> yağış alanlı Çandır Drenaj alanının tamamını temsil etmektedir. Taşkın sırasında bu istasyonun bulunduğu deredeki kabarma 5.90 m.yi bulmuş olup, akım rasat istasyonunun tamamı yıkılmış ve tüm tesisatı ile birlikte kaybolmuştur. Taşkın izlerinden yapılan tespitite, bu dereден geçen debinin 456.64 m<sup>3</sup>/s olduğu hesaplanmıştır. Bu değer 25 yıllık yinelemeye karşılık gelmektedir.

Aralarında 10 km mesafe bulunan iki istasyonun yer aldığı Değirmendere' nin taşkın sırasında aşırı kabarması sonucu, üzerinde bulunan köprüler su altında kalmış, yatak

kenarında yer alan balık üretme çiftliği hasar görmüş ve can kayıpları meydana gelmiştir. Sütçülerin 6 km kuzeyinde yer alan Boğazköy havzasını yağış alanı 35.54 km<sup>2</sup> olup, menfezin yıkılmasına neden olan taşkın debisi 80.01 m<sup>3</sup>/s olarak hesaplanmıştır. Sütçüler, Değirmendere, Boğazköy yağış alanlarının da içine alan 9-89 no' lu istasyona bağlı olarak çevrelenen Çandır havzası, Karacaören I Barajının drenaj alanı içerisinde kalmaktadır. Barajın drenaj alanı çok geniş olup, Eğirdir gölü dışında 3309 km<sup>2</sup>' lik bir yağış alanına sahiptir. Bu istasyondan geçen debiye karşılık gelen bir günlük taşkın hacmi 17.1\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>' tür. Bu da 24 saatte 101 mm yağışa tekabül eder. Yine aynı gün baraj gölüne 5,3\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> su diğer kollardan gelmiştir. Taşkın günü baraj gölüne gelen toplam 25.5\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> su 0.81 m' lik seviye artışına ve bunun 0.54 m' si sadece Çandır havzasının suyuna bağlı olan yükselmeye karşılık gelir. Ancak barajdan, enerji üretimi için bırakılan 25 m<sup>3</sup>/s' lik suyun etkisi ile taşkın günü baraj gölünde seviye yükselimi 0.75 m olmuştur.

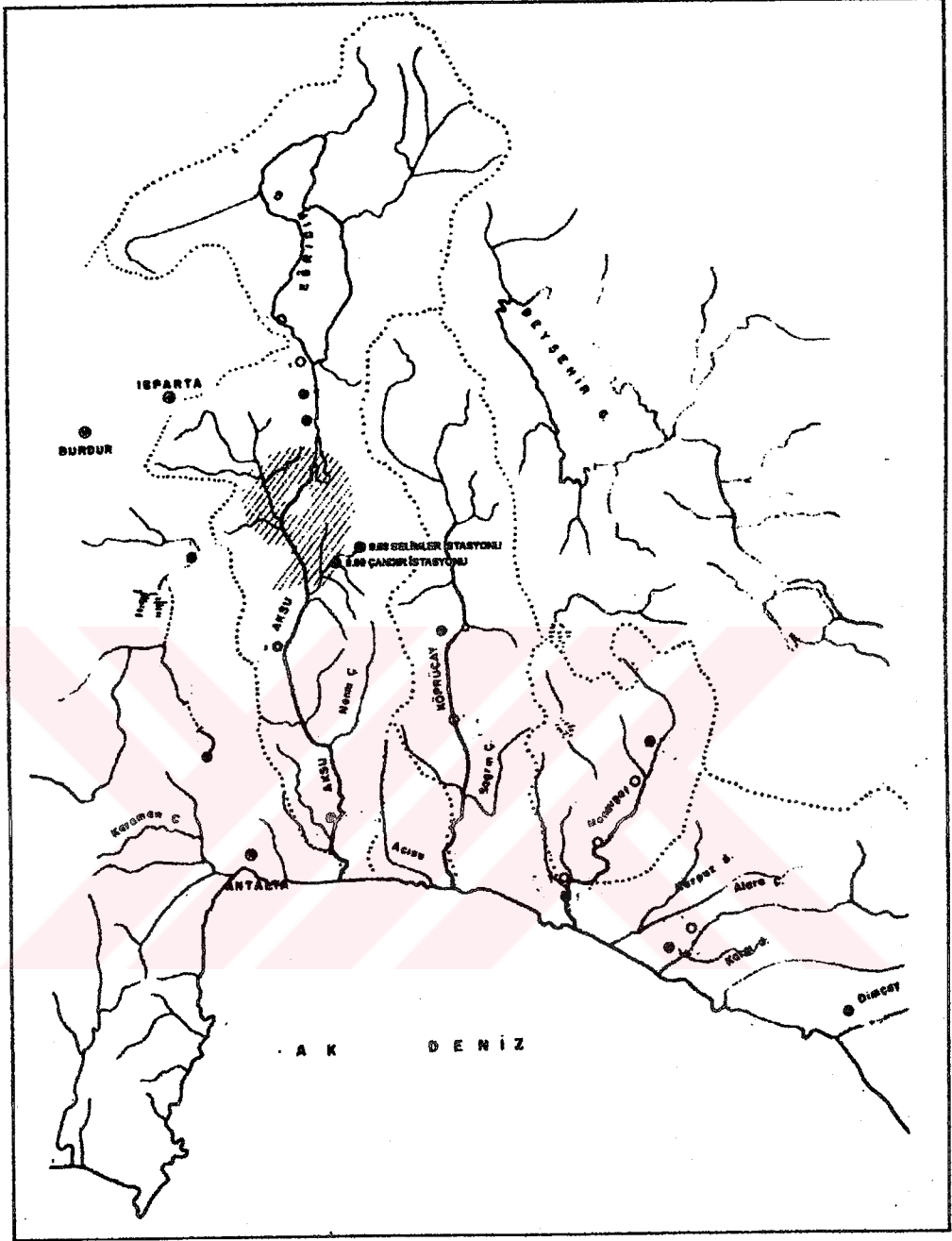
Sütçüler ilçe merkezinin mansap teşkil ettiği feyezanın yağış alanı, kot farkı 320 m, uzunluğu 1.5 km olan, 1.56 km<sup>2</sup> gibi çok küçük bir alanı kapsar. Belirgin bir dere yatağı bulunmayan bu alanda, yağış önce dolu şeklinde başlamış, daha sonra şiddetli yağmur şeklinde yaklaşık 4 saat sürmüştür. Üst kotlarda ve yamaçlarda biriken yağış, belirgin bir dere yatağının olmamasına da bağlı olarak, yamaç topografyasında uygun bulunduğu 4 koldan akışa geçerek 1 saat gibi kısa bir zamanda ilçe merkezini geçip Değirmendere'ye ulaşmıştır. Bu kollardan ikincisi Sütçüler pınarının üzerine isabet etmiş ve bunun sonucunda pınarın sularını kanalize eden kaptaj tamamen tahrip olmuştur. Yağışa bağlı olarak, pınarın bağlı olduğu akiferi oluşturan kireçtaşlarında doygunluk yükselirken, Sütçüler pınarından da boşalım, o nispette artmıştır. Pınarın boşalımı kendisini kanalize eden sistemin tahrip olmasıyla, üzerine isabet eden 2. taşkın kolunun sularıyla birleşip ilçe merkezinde en büyük hasarı meydana getiren kolu oluşturmuştur.

Taşkın alanında belirgin bir dere yatağı olmaması suyun farklı kollardan dağınık bir şekilde geçmesini sağlamış ve aynı zamanda belirgin bir sediment birikimi olmadığı için ilçede zarar az olmuştur. Bu nedenle ilçe merkezinde oluşan hasar daha ziyade taşkın suyunun akış hızından ve bundan kolayca etkilenebilecek nitelikteki ilçenin



oturduğu zemin türünden kaynaklamıştır. Sütçüler ilçe merkezi ile taşkın geliştği drenaj alanının en üst seviyesi arasındaki 320 m' lik kot farkı, 50 m' lik bir mesafede kat edilmektedir. Yaklaşık 1/1.5 gibi bir yamaç eğiminde akış hızına ulaşan taşkın bu hızla ilçe merkezinden geçmiştir. Daha sonra genişleyen topografyaya bağlı olarak taşkın ilçe merkezi ile Değirmendere arasındaki 220 m' lik kot farkını 2 km de geçerek dereye ulaşmıştır. İlçe merkezi kısa mesafede hızlı akışın etkisinde kalmış, daha sonra uzun mesafede tüm kolların drene olduğu Azmak Dere de birleşerek, Değirmendere' ye boşalmıştır. Ayrıca zeminin doygunluk derecesinin artması, drenaj alanı dışında kalan ve taşkın kollarının geçmediği Triyas çökelleri üzerinde yüzeysel akışların da etkisiyle heyelanlar meydana getirmiştir. Oluşan heyelanlar Triyas çökellerinin kilaşı, radyolarit istiflenmesinin yaygın olduğu ve üzerine gelen karstik kireçtaşlarının sınırına yakın olan kesimlerde meydana gelmiştir.

Yine Sütçüler ilçe merkezi radyolarit, çört, spilitik yastık lav, kil taşı ve kumtaşı ard arda sıralanmasından meydana gelen, kuvvetli tektonik ile büyük ölçüde bozulmuş hava ve su şartlarından kolayca etkilenebilen erozif çökeller üzerinde yer aldığından, kuvvetli akış, zeminde oyulmalara ve aşınmalara neden olmuştur. Bu durum özellikle ilçeyi 4 yerden kat eden taşkın kollarının üzerinde yer alan konutların temel şartlarında bozulmalar meydana getirmiştir. Hızlı akış az da olsa beraberinde getirdiği malzeme ile birlikte, özellikle kerpiç-ahşap evler ile istinat duvarlarının ve elektrik direklerinin yıkılmasına, akış hızının zeminde meydana getirdiği aşındırma ve oyulma da kollar üzerine isabet eden konutların temel şartları ile alt yapı tesislerinin zarar görmesine neden olmuştur (DSİ XVIII. Bölge, 1995).



Şekil 3.1. Taşkın Havza Alanı

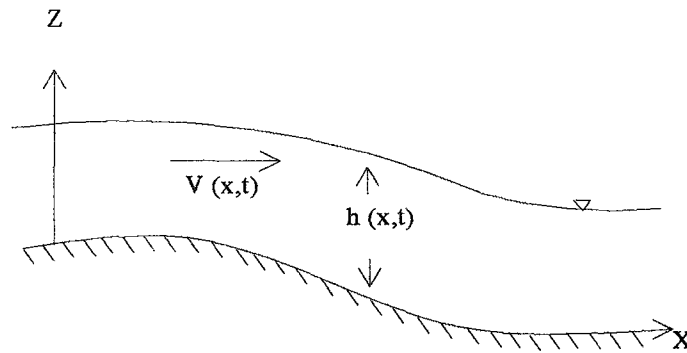
### 3.2. Metot

#### 3.2.1. Temel Denklemler

Sıg su denklemlerini çıkarmak için çeşitli yollar vardır. Sıg su teoremi hidrostatik basınç dağılımının doğrusal kabul edildiği serbest yüzeyli akımlara uygulanır. Bu teori düşey yöndeki ivmelerin önemsenmediği varsayımlarına dayanan problemlerin çözümünde kullanılır. Sıg su akımlarında hız alanı bir, iki yada üç boyutlu olabilir, fakat basınç alanı sadece zaman ve yatay boyutlara bağlı olarak değişir. Bu yüzden çıkartılan kararsız akım denklemleri akarsulardaki, kanallardaki yüzey akışı hareketinin yanı sıra göl ve okyanuslardaki sirkülasyon hareketini de kapsar.

Sıg su denklemlerini ortaya çıkarmak için bir dizi metot vardır. Her birinin, denklemlerde göstermiş olduğu yaklaşımlar ve varsayımlardan ötürü avantajları vardır. Türevlerin içinde en çok kullanılanı hidrodinamikteki Navier Stokes denklemi ile başlar.

Sıg su teoreminde en temel varsayım basıncın hidrostatik olarak düşeyde değişim göstermesidir.



Şekil 3.2. Bir boyutlu akımlarda  $x$ ,  $z$ ,  $h$  ve  $V$ ' nin tanımı

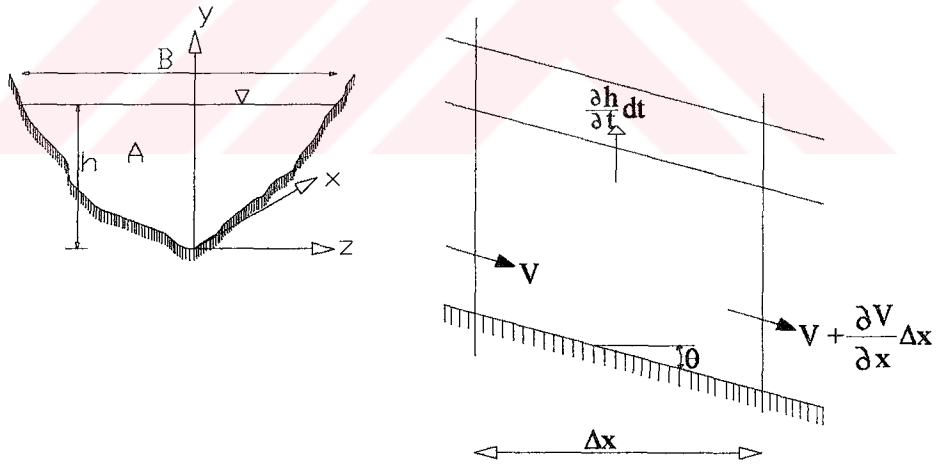
$$P = \rho g(h - z) \quad (3.1.)$$

Burada  $z$  düşey koordinat,  $h$  su derinliği,  $\rho$  sıvının yoğunluğu,  $g$  yer çekimi ivmesidir. 3.1. denklemi, mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan birinci mertebe sığ su teorisinin de temel yaklaşımıdır. Bir boyutlu olarak çıkarılan denklemde bağımlı değişkenler;  $V$  kesitteki ortalama hız,  $h$  su yüksekliğidir.

Bağımsız değişkenler ise uzunluk doğrultusundaki  $x$  ve zaman olarak da  $t$ ' dir. Düşey boyut bu yöndeki bütün büyüklüklerin ortalaması alınarak işe katılır. Yatay boyut daha sonra eklenir. Ayrıca  $x$  ekseninin taban olduğuna ve  $z$  ekseninin düşey olduğuna dikkat edilmelidir. Buradaki taban eğiminin kosinüsünün 1 olacak şekilde küçük olduğu kabul edilir (Liggett, 1975; Keskin, 1989).

### 3.2.1.1. Kararsız Akım Denklemleri

Bu denklemlerin çıkartılışı sırasında taban eğimi  $J_0$  olan bir kanal göz önüne alınmış ve bu eğimin  $\sin \theta \cong \text{tg} \theta \cong J_0; \Rightarrow \cos \theta = 1$  olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 3.3. Kanal en kesiti ve hız dağılımı

Süreklilik Denklemi kütle korunumu prensibine göre aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$AVdt - \left[ A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right] \left[ V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right] dt + q \Delta x dt = B \Delta x \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad (3.2)$$

Burada A en kesit alanını, B su yüzü genişliğini, V akım hızını,  $\Delta x$  göz önüne alınan kanal uzunluğunu, h su derinliğini, q yanal debiyi ve  $\partial h/\partial t$  de seviye değişim hızını göstermektedir. 3.2. denkleminde ikinci mertebeden küçük olan  $\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)$  terimi ihmal edilerek, eşitliğin her iki yanındaki  $\Delta x \cdot dt$  terimleri sadeleştirilirse denklemin yeni şekli aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$q - \frac{\partial(AV)}{\partial x} = B \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.3)$$

ve  $Q=A \cdot V$  olduğu dikkate alınarak 3.3 denklemini

$$q - \frac{\partial Q}{\partial x} = B \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.4)$$

şekline dönüştürülür. 3.4 bağıntısının çıkartılması sırasında en kesit şekli için hiçbir şart koşulmamış ve denklemin en genel hal için yazılmıştır. Kesitin dikdörtgen olması durumunda 3.4 denklemini

$$\frac{\partial A}{\partial t} = q - \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3.5)$$

veya

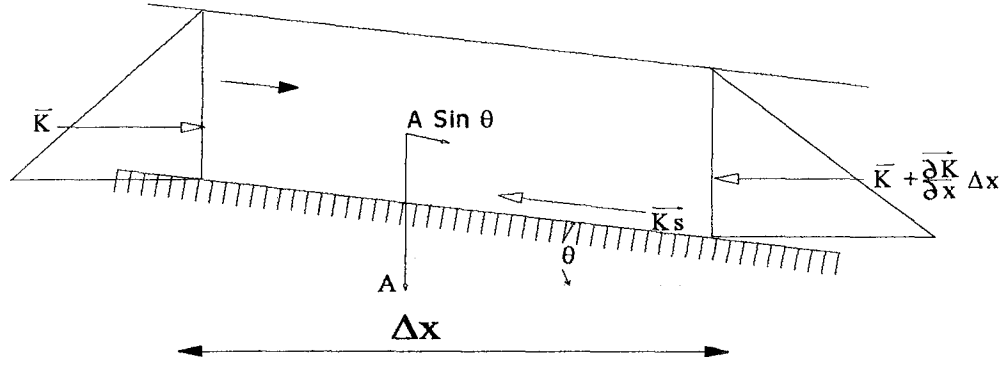
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q}{B} - \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3.6)$$

şeklinde yazılır.

Dinamik (Momentum) Denklem; momentum korunum prensibine göre

$$\frac{d}{dt}(m\vec{V}_i) = \sum \vec{K} \quad (3.7)$$

ifade edilebilir. Burada  $\bar{K}$  şekil 3.4' te gösterilen kontrol hacmine etkiyen kuvvetlerin bileşkesi,  $V$  kesitteki ortalama hızdır.



Şekil 3.4. Akıma etkiyen kuvvetler

3.7 eşitliğinin sol tarafı hesaplanırken şekilde gösterilen  $\Delta x$  uzunluğundaki eleman göz önüne alındığı ve kütlesi  $m$  ile gösterildiği takdirde, bu kütlenin hareket miktarındaki toplam değişim, akım sıkıştırılmaz kabul edilerek; gerekli matematiksel işlemler sonucunda 3.7 denklemi

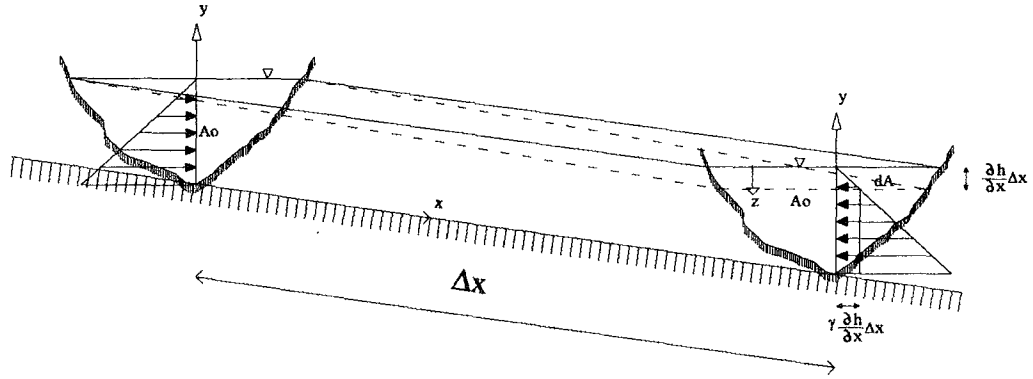
$$\rho V \Delta x \left( V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \rho A \Delta x \left( V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) = \sum \bar{K} \quad (3.8)$$

şekline dönüşür. Dikdörtgen kesit durumu için 3.8 denklemi

$$\rho V q \Delta x + \rho A \Delta x \left( V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) = \sum \bar{K} \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilir.

Denklemden  $\bar{K}$ , en kesitlere etkiyen basınç kuvvetleri farkı ile, yerçekimi ve sürtünmelerden oluşur. Gerçekte bu kuvvetler birbirine paralel değildir fakat doğrultuları arasındaki farklar çok küçük olduğundan, bunların birbirine ve  $-x$ -eksenine paralel oldukları kabul edilir.



Şekil 3.5. Sisteme etki eden dış kuvvetler

Basınç kuvvetlerinin hesabında, birbirine uzaklıkları  $\Delta x$  olan en kesitlerdeki basınç dağılımlarının hidrostatik olduğu kabul edilir. Şekilde yatay taralı üçgen yükler birbirine eşit ve zıt yönlü olduklarından sadeleşerek sadece  $A_0$  alanına gelen üniform yükü,  $dA$  alanına gelen hidrostatik yük kalır.

$$-\gamma A_0 \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \int_0^{(\partial h / \partial x) \Delta x} b \cdot z \cdot dz \quad (3.10)$$

Burada  $b$ , yüzeyden itibaren  $z$  derinliğindeki kanal genişliğini gösterir. 3.10 bağıntısındaki ilk terim üniform yüke, ikinci terim hidrostatik yüke tekabül etmektedir.  $(\partial h / \partial x) \Delta x$  çok küçük olduğundan, bundan doğan kuvvetler daha da küçük olacağı için üçgen yükün değeri, üniform yükten doğan basınç kuvvetlerinin yanında ihmal edilirse, basınç kuvvetleri için;

$$-\gamma A_0 \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (3.11)$$

elde edilir.

Ağırlık Kuvvetleri; göz önüne alınmış olan hacim elemanın ağırlığı  $\gamma.A.\Delta x$  ile gösterildiği takdirde, bu kuvvetin akım doğrultusundaki bileşeni  $\gamma.A.\Delta x.\sin\theta$  olur. Başlangıçta yapılan kabule göre  $\sin\theta=1$  olduğundan denklem;

$$\gamma.A.\Delta x.J_0 \quad (3.12)$$

haline dönüşür. Bu bağıntıda  $\gamma$  mevcut akışkanın özgül ağırlığını,  $J_0$  kanalın taban eğimini göstermektedir. Kanal tabanı akım doğrultusunda alçaldığı takdirde  $J_0$  pozitifdir.

Sürtünme kuvveti; kayma gerilmesi  $\tau_0$ , ıslak çevre  $P$  ile gösterilmek üzere  $\Delta x$  boyundaki elemanla cidarlar arasında meydana gelecek olan sürtünme kuvveti

$$\tau_0.P.\Delta x \quad (3.13)$$

olur. Dış kuvvetler için elde edilmiş olan bu değerler 3.11 bağıntısında yerlerine yazıldığı takdirde

$$\rho V \Delta x \left( V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \rho A \Delta x \left( V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) = -\gamma A \Delta x \frac{\partial h}{\partial x} + \gamma A \Delta x J_0 - \tau_0 P \Delta x$$

bu denklemde her iki taraf  $(\gamma.A.\Delta x)$  ile bölünerek, düzenlenip

$V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{dA}{dt}$  ifadesi yerine yazıldıktan sonra,

$$\frac{V}{gA} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{V^2}{g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau_0}{\gamma R} - J_0 = 0 \quad (3.14)$$

denklemini elde edilir. Bu ifade prizmatik kanallar için dinamik denklemdir ve  $R=A/P$ , hidrolik yarıçapı göstermektedir.  $J$  enerji çizgisi eğimi olmak üzere;  $J = \tau_0 / \gamma.R$  denklemdeki yerine yazılırsa;



$$\frac{V}{gA} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{V^2}{g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + J - J_0 = 0 \quad (3.15)$$

elde edilir. Bu bağıntıya genelleştirilmiş De Saint Venant Denklemi denir. Özel olarak dikdörtgen kesitler ele alınırsa 3.14 denklemi şu hale dönüşür;

$$\frac{V}{gA} \left( \frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{VA}{gA} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + J - J_0 = 0$$

bu denklemde 3.5 bağıntısı göz önünde tutulursa

$$\frac{V \cdot q}{g \cdot A} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + J - J_0 = 0 \quad (3.16)$$

elde edilir. 3.5 ve 3.16 bağıntıları ilk olarak  $q=0$  hali için De Saint Venant tarafından çıkartılmışlardır, bu denklemler şöyledir;

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

$$\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + J - J_0 = 0 \quad (3.18)$$

(Liggett, 1975; Ünsal, 1978; Keskin, 1989)

### 3.2.2. Akarsularda Taşkın Ötelenmesi

Akarsu akımı, sınırlı bir fiziksel oluşuma sahip boru akımından farklı olarak, hidrolojik çevrimin bu evresini meydana getiren birkaç bileşenin kombinasyonundan meydana gelir. Bu yardımcı bileşenler, hem mesafe hem de zamandaki büyük değişkenlikleri ve oluşumları arasında kesin bir farktan ziyade, bir oluşumdan diğerine sürekli değişiklik göstermeleriyle karakterize edilirler. Her ne kadar fiziksel ve matematiksel araçların, olayın nitelikli ve detaylı anlatımına imkan kılacak

derecede gelişmiş olmasına rağmen, pratik uygulamalar için gereken giriş bilgileri miktarı bu tip modellemelerin kullanımını zorlaştırmaktadır. Uygun başlangıç ve sınır şartları ile beraber bir boyutlu tedrici değişen akım denklemleri, iki kısmi diferansiyel denklemin doğrusal olmayan doğasından ötürü zor bir matematiksel problemi oluşturur. Bu yüzden pratik uygulamalar için kullanılacak tüm modeller, önemli sadeleştirmeleri içerirler.

Bu sadeleştirmeler için, genelleştirilmiş De Saint Venant denklemlerinin, kanal genişliği  $B$  ile gösterilmek üzere, 3.17 denklemi

$$V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $V \partial h / \partial x$ , kama depolama terimi olup, mesafeye bağlı akım alanında meydana gelen değişimi gösterir;  $h \partial V / \partial x$ , prizma depolama terimidir ve hızda mesafeye bağlı meydana gelen değişimi gösterir;  $\frac{\partial h}{\partial t}$  terimi de, seviyenin zamana göre değişimini, kısaca derinliğe ya da su yüzü seviyesine bağlı olarak zamanla depolamada meydana gelen değişimleri gösterir.

3.18 momentum denklemi ise

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(J_o - J_f) = 0 \quad (3.20)$$

şeklini alır. Momentum denklemindeki terimlerin anlamları;  $\frac{\partial V}{\partial t}$ , hızda meydana gelen zamana bağlı değişimleri gösteren ve yerçekimi ivmesine katkıda bulunan lokal ivme terimi;  $V \frac{\partial V}{\partial x}$ , lokal ivme terimi ile birlikte atalet terimi olarak adlandırılan, hızda mesafeye bağlı değişimleri gösteren ve yerçekimi ivmesine katkıda bulunan konvektif ivme terimi;  $g \frac{\partial h}{\partial x}$ , basınç gradyanı diye de adlandırılan

basınç kuvvetinin mesafeye bağlı değişimini gösteren hidrostatik basınç kuvveti terimi;  $gJ_0$ , yerçekimi kuvvet etkilerini gösteren yerçekimi kuvvetleri (yatak eğimi ya da normal akım gradyanı);  $gJ_f$ , sürtünme ya da direnç kuvvet etkilerini gösteren sürtünme kuvveti terimi şeklindedir (Weinmann, 1977).

$\frac{\partial V}{\partial t}$  terimi kararsız, üniform olmayan akımlar için önemli olurken,  $\frac{\partial V}{\partial x}$  terimi de kararlı üniform olmayan akımlar için önemlidir.  $\partial h / \partial x$  terimi ise kararlı ve üniform akımlar için önem kazanır.

Denklemlerde sadeleştirme yapılmadıkça, tek çözüm yöntemi sayısal teknikler olarak kalacaktır. Sayısal tekniklerin tekrarlı olması, bununla birlikte el ile çözümlerinin zaman alıcı olması sebebiyle, tedrici değişen akımların kısmi diferansiyel denklemlerinin sadeleştirilmiş şekillerini çözmek için pek çok yöntem geliştirilmiştir.

Denklemlerdeki sadeleştirmeler kısaca şu şekillerde olabilir;

- Süreklilik denklemi tek başına kullanılarak,
- Momentum denklemi tek başına kullanılarak,
- Momentum denkleminde şu sadeleştirmeler yapılarak; sürtünme terimleri

ihmal edilerek, sürtünme terimleri doğrusallaştırılarak, lokal ivme terimi  $\frac{\partial V}{\partial t}$  ihmal

edilerek, konvektif ivme terimi  $V \frac{\partial V}{\partial x}$  ihmal edilerek (Miller ve Cunge, 1975).

Sadeleştirme sonucunda elde edilen tüm denklemler analitik olarak integre edilebilir. Fakat sadeleştirilmiş denklemlerin analitik integrasyonundan elde edilen sonuç denklemleri sadece bir yaklaşımdır ve ancak havzada su depolanmasını tek başına anlatan diferansiyel bir denklem olan süreklilik denklemi ile karşılaştırılabilir. Analitik çözümün etkileyici yanı, hız, yüzey seviyesi, su yüzü eğimi ve diğer özelliklerin herhangi bir (x, t) mesafe ve zaman değeri için direkt olarak bulunabilmesidir. Ayrıca, dalga yüksekliği, su yüzü eğiminin dikleştiği yer ve zaman da analitik çözümden doğrudan elde edilebilir. Analitik çözümün tek dezavantajı çözümün geçerli olduğu durumların çok sınırlı olmasıdır.

Tedrici değişken akım denklemlerinin analitik çözümlerinde yapılan genel kabuller;

1. En kesit alanı içinde akımın hızı üniformdur ve sadece akım yönünde değişim gösterir,
2. Akım yönüne dik hız bileşenleri ihmal edilebilir çünkü bu yönlerdeki akışkan ivmelenmesi ihmal edilmektedir,
3. Herhangi bir düşey kesitte basınç dağılımı hidrostatiktir çünkü düşey yönde ivmelenmeler bulunmamaktadır,
4. Düşey ivmelenme olmadığı için akımın tedrici değiştiği kabul edilir, seviye değişimleri çok büyük yatay mesafelerde oluşur,
5. Herhangi bir kanal kesitinde su yüzü seviyeleri sabittir, ve akım bir boyutlu olduğundan akım yönüne diktir,
6. Sürtünme eğim hesaplarında sürtünme direncinin hem kararlı hem de kararsız akımlar için aynı olduğu varsayılır,
7. Akışkan yoğunluğu sabittir,
8. Manning ve Chezy gibi sürtünme denklemleri kullanılabilir,
9. Yanal ikincil sirkülasyonlar oluşmaz,
10. Kanal sınırları sabittir, en kesitte oyulma ve yığılmanın meydana gelmediği kabul edilir (Shultz, 1992).

Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi akarsularda taşkın ötelenmesini kullanılan mevcut matematiksel modeller hidrolik metotlar diye adlandırılan işlemsel tipli modeller ve bir kavram ya da sistem yaklaşımını kullanan, genelde hidrolojik metotlar olarak bilinen modeller şeklinde sınıflandırılabilir. Bu ayırım düzgün dikdörtgen kanallar için uygun olurken, doğal akarsularda yanlış olabilir. Çünkü doğal akarsu sistemlerinin karmaşık fiziksel özellikleri tam bir matematiksel ifadeyle anlatılamaz. Doğal akarsuların üniform olmayan özellikleri kanal düzensizliklerinin değişik seviyeleri ile karakterize edilebilirler.

1. Geniş ölçekli düzensizlikler; akarsu boyunca meydana gelen jeomorfolojik değişimleri yansıtır. Bu düzensizlikler akarsu uzunluğunun taşıma ve depolama karakteristiklerini belirler.

2. Küçük ölçekli düzensizlikler; belirli bir en kesit alanında kanal yüzeyindeki değişimlerle alakalıdır ve akım sürtünmesinin özelliklerini belirler.

Tüm bu düzensizlikler hep birlikte, akımın bölgeden bölgeye değişimlerini ve herhangi bir kesitte akım seviye ilişkisini belirler. Farklı düzensizlik derecelerinin ayrımları çok açık değildir ve akım üzerindeki etkileri düşünülecek olursa önemsiz hale gelir. Düzensizliklerin her iki tipi de, akımın geçiş hızı ile geçiş süresinin sürekli değişimine katkıda bulunurlar. Bu düzensizlikler, akarsu boyunca akım karakteristiklerinin değişimi üzerine doğrudan sorumlu iken, taşkın ötelenme sonuçları, bunları büyük detaylar dahilinde yansıtmaz.

Bütün bunlardan şu sonuç çıkar; bir akarsu ötelenme modelinin başarılı olması için, kanal düzensizliklerinin ayrıntılı tanımlanmasına ihtiyaç yoktur fakat model, bu düzensizliklerin oluşturduğu etkileri içerecek kapasitede olmalıdır (Weinmann, 1977).

Taşkın ötelenme hesaplarında kullanılan parametreler iki kategoriye ayrılabilir:

- a) Kanal sisteminin fiziksel karakteristiklerini temel matematik denklemlerin içinde temsil eden parametreler,
- b) Çözüm yönteminin etkinliğini, doğruluğunu ve stabilitesini yönlendiren sonlu fark şemasını tanımlayan parametreler.

İlk gruptaki parametreler kanal karakteristikleri ya da taşkın dalga yayılım parametreleri olarak adlandırılabilir. Matematiksel modellemedeki iki temel yaklaşıma göre, bu parametreleri iki değişik forma ayırmak mümkündür:

1. Ölçülebilen fiziksel niceliklerle direkt ilgili olan parametreler (geometrik ölçüler, yerçekimi sabiti ve sürtünme katsayısı gibi),
2. Fiziksel niceliklerle direkt ilgili olmayan parametreler (depolama sabiti, geçiş zamanı, dalga geçiş hızı, difüzyon katsayısı gibi).

Bu ayırım, taşkın ötelenme modellerini hidrolik ve hidrolojik olmak üzere ikiye ayıran bir sınıflandırma ile aynıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu sınıflandırma, düzensizliklerin çok olduğu doğal kanallar için pek çok durumda karışıktır. Bu durumda, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve yatak eğimi, akım derinliği, akım alanı gibi ikinci kategoride yer alan bazı parametrelerle doğrudan ilişkili olamaz. Bu açıdan, hidrolik ve hidrolojik modeller arasında bu anlamda bir fark olup olmayacağı kuşkuludur.

Uzun yıllar boyunca her iki gruptaki değişik modeller, belirli uygulamalar için en uygun olacak şekilde farklı özelliklere sahip olmayı amaçlayarak ayrı çizgilerde gelişmiştir. Yüksek hızlı bilgisayar ve sayısal teknik alanlarındaki gelişimlere bağlı olarak, işlemsel tipli hidrolik modeller kusursuz bir seviyeye ulaşmış ve taşkın ötelenmesi uygulamalarında gittikçe artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Fakat nitelikli giriş verilerine olan ihtiyaçları gibi, bilgisayar kaynaklarına olan ağır talepleri de bu modellerin uygulamalardaki etkisini azaltmaktadır. Diğer yandan yaklaşık modeller, yani hidrolojik modeller sonuçları daha ucuza mal etmekle beraber doğrulukları modelin detaylı özellikleri ile özel uygulamanın performansına bağlıdır. Modelleme adımlarına geçmeden önce, taşkın ötelenmesindeki çeşitli tanımlar aşağıdaki gibi verilebilir:

**Ötelenme Periyodu:** Sayısal metotlar, denklemleri çözmek için ötelenme periyodu tanımını kullanır. Taşkın ötelenme modellerinin sonuçları mesafe uzunluğu  $\Delta x$  ve zaman aralığı  $\Delta t$ 'nin seçiminden çok etkilenir.

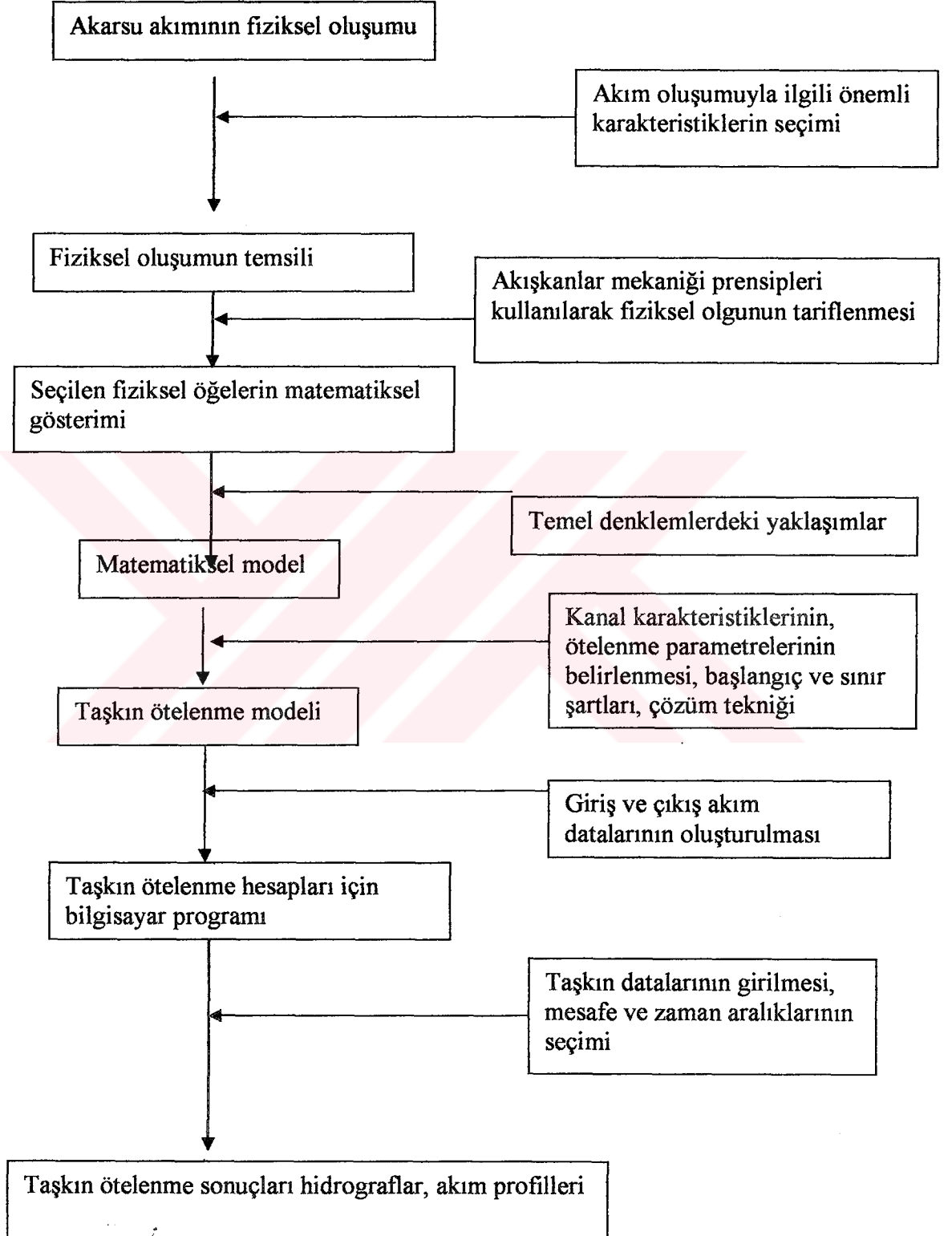
Sayısal testler sırasında deneysel sonuçlar, ulaşım mesafe seçiminin kanal sisteminin fiziksel özelliklerine uygun olmak zorunda olduğunu göstermiştir. Zaman adımı  $\Delta t$ 'nin ötelenmiş hidrografın biçimine çok büyük etkisi vardır.

Teorik olarak ötelenme periyodu  $\Delta t$  akımın kanaldan geçiş süresine eşit ya da daha az olmalıdır. Eğer giriş hidrografi yükselişten düşüşe keskin bir değişim ya da giriş hidrografi günden güne çok büyük değişimler gösteriyorsa sonuçların doğruluğunu koruyabilmek için daha kısa bir ötelenme periyodu seçmek gerekir. Depolamaya

bağlı olarak çıkış akımının piki giriş akımının pikinden daha büyük olamayacağı için de daha kısa bir zaman periyodu seçilir.

**Depolamanın Tayini:** Çeşitli su yüzü seviyelerinde depolama hacmi, akarsu vadisi en kesitlerinden ya da arazinin detaylı topoğrafik haritalarından belirlenebilir. Gerçek taşkın kayıtlarından depolama hacminin belirlenmesine dair genel bir yöntem, geçmiş taşkınlarda elde edilen sonuçların gelecek taşkınlarda da geçerli olacağı gibi bir yaklaşımdır. Depolamanın hidrograflardan bu şekilde belirlenmesi, bölgesel akımın ve havza içindeki dağılımının değişebileceği gibi bir dezavantaja sahiptir. Dahası depolama hacminin tayin edildiği hidrograflar, taşkın esnasında debi ölçümlerinden elde edilen anahtar eğrilerine dayanmadıkça tam doğru sayılamaz. Taşkın sırasında böyle ölçüm yapılmış akarsular ise çok nadirdir. Eğer en kesitler mevcutsa, depolama taşkın kayıtlarından ziyade bu en kesitlerden sağlanmalıdır.

**Giriş Akımının Tayini:** Memba kanal istasyonuna giren akımların toplamıdır, ölçülmüş yan dere akışları ve ölçülmemiş havza akışları gibi. Ölçümü yapılmayan alanlardan gelen akış yağış kayıtlarından, birim hidrograf metodundan hesap edilirken ana kanaldaki ölçülmüş ve yan derelerden gelen akımlar da anahtar eğrilerinden hesap edilir (Miller ve Cunge, 1975).



Şekil 3.6. Modelleme adımları



### 3.2.3. Hidrolik Modeller

Hidrolik ötelenme açık kanallarda kararsız akımlar için çıkartılmış Saint Venant denklemlerinden kütle ve momentum korunumu denklemlerine dayanır. Bu diferansiyel denklemlerin sayısal integrasyonu, karakteristikler metodu ve sonlu fark metodu şeklinde olabilir.

Karakteristikler metodunda, temel denklemler, toplam dört diferansiyel denkleme çevrilir. Bu derinlikle hız arasında diferansiyel bir ilişki,  $x-t$  düzleminde bir dizi karakteristik eğrilerle sonuçlanır. Derinlik, hız, mesafe ve zaman gibi dört bilinmeyeni belirlemek üzere, eğrisel ağdaki her noktada dört denklem sayısal olarak integre edilebilir (Linsley vd., 1975).

Sonlu fark metodunda ise,  $x-t$  düzleminde fonksiyonlar ve onların türevleri  $x-t$  düzlemindeki düzgün dikdörtgen bir ağ üzerinde tanımlı farklı değerler ifade edilir. Bir sonlu fark şeması; dikdörtgen ağ üzerindeki değişkenlerin komşu değerlerini ifade eden bir formülasyondur. Sonlu fark formülasyonu açık ve kapalı şemalar olmak üzere iki farklı şekilde olabilir. Açık şemalar bağımlı değişkenlerin bilinmeyen değerlerini bir zamanda bir ağ noktasında çözerek ilerleyen şemalardır. Kapalı şemalarsa bağımlı değişkenleri bir zamanda bir çizgi üzerindeki ağ noktaları için eş zamanlı çözerek çözümü ilerletir.

Açık şemaların formüle edilmesi daha basittir fakat sınırlı stabilite kriteri ile küçük bir zaman adımında sınırlanmıştır. Diğer yandan kapalı şemaların formülasyonları daha karmaşıktır fakat zaman adımı daha doğru gereksinimlerle sınırlanmıştır. Bu yüzden pratikte kapalı şemalar, açık şemalardan daha etkilidir. Açık şemalar iki memba ve iki mansap sınır şartı gerektirirken, kapalı şemalar sadece iki sınır şartı gerektirir. Bu da kapalı şemaların açık şemalara göre hesap avantajlarından biridir (Hydrologic Engineering Center, 1990b).

Hidrolik ötelenme modelleri şunlardır;

- 1) Difüzyon Dalga Yaklaşımı
- 2) Kinematik Dalga Yaklaşımı
- 3) Muskingum Cunge Metodu
- 4) Dinamik Öteleme

### 3.2.3.1. Difüzyon Analjisi

Difüzyon analjisi, hareket denklemindeki atalet teriminin, sürtünme, yerçekimi ve basınç kuvveti terimleri ile karşılaştırılınca ihmal edilebilir olduğu varsayımına dayanır. Difüzyon dalga denklemleri, Hayami Lighthill ve Whitham tarafından atalet terimlerinin ihmal edilebileceği her durumda taşkın dalga hareketini tanımlayan iyi bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Bu modelde sürtünme eğimi, su yüzü eğimi ile dengelenmiştir. Difüzyon dalga modeli kinematik modelden farklı olarak konveksiyona ve difüzyona izin verir. Difüzyon denklemi debi cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (3.21)$$

Burada c; dalga yayılım hızını, D de difüzyon katsayısını gösterir.

Difüzyon modellerin başarısı büyük oranda, akarsu karakteristiklerinden c ve D parametrelerinin iyi belirlenmesine bağlıdır. D=0 için c geçiş hızı kinematik dalga hızına eşit olur ve  $c = \frac{dQ}{dA}$  'dan hesaplanabilir. Difüzyon katsayısı D ise;

$$D = \frac{Q}{2BJ_0} \quad (3.22)$$

şeklinde dir. Burada Q debiyi, B kanal genişliğini,  $J_0$  kanal yatak eğimini gösterir.

Sürtünme eğiminin kanal yatak eğimi yerine su yüzü eğimi ile dengelenmesi difüzyon dalga modelini bir tür kinematik dalga yaklaşımına indirger, böylece uygulanabilirlik oranı artar. Fakat atalet terimlerinin önem kazandığı ve ihmalinin doğru olmadığı durumlarda model başarısız kalır (Hydrologic Engineering Center, 1990b).

Difüzyon modelinin 3 değişik formu vardır; doğrusal difüzyon modeli, yarı doğrusal bir model, değişken parametrelili difüzyon modeli. Doğrusal difüzyon modelinde hem  $c$  hem de  $D$  sabit olurken, yarı doğrusal modelde  $c$  sabit  $D$ , debi ile orantılıdır. Değişken parametrelili difüzyon modelinde ise  $c$  ile  $D$  parametreleri sabit olmayıp, debinin bir fonksiyonu şeklindedir.

Doğrusal difüzyon denklemi, analitik ya da sayısal metotlarla çözülebilir. Diğer metotlarla, belirli zaman adımında katsayıları doğrusallaştırırken, yani iterasyon yaklaşımını kullanırken, bir zaman parametresine ihtiyaç duyar. Doğrusal ve yarı doğrusal difüzyon modellerinde  $c$  ve  $D$  parametreleri temsili bir  $Q_0$  debisi için hesaplanır. Fakat değişken parametrelili difüzyon modelinin uygulandığı düzgün olmayan kanallar için, Hayami (1951) aynı etkileri yapacak ikinci bir difüzyon katsayısının eklenmesini önermiştir.

Price'ın araştırmaları I. ve II. metotlar arasında küçük bir fark olduğunu fakat III. metotta beklenildiği üzere, akarsu sistemindeki doğrusal olmayan özelliklerin daha iyi sonuçlandırıldığı görülmüştür (Weinmann, 1977).

### **3.2.3.2. Kinematik Dalga Modeli**

Yüzeysel akış problemlerinde genişçe kullanılan, bir boyutlu kararsız akımlardaki süreklilik denklemini, momentum denkleminin kararlı üniform versiyonu ile birlikte kullanan sadeleştirilmiş matematiksel bir modeldir. Hareketleri bu modelle anlatılabilen dalgalara “kinematik dalgalar” denir. Kinematik dalgalarda debi atalet kuvvetleri dikkate alınmaksızın sadece süreklilik denkleminin derinliğin bir fonksiyonu olarak çıkartılır. Bu modelin yer aldığı denklemler ve ilişkiler ortaklaşa temelini, Lighthill ve Whitham'ın 1955'deki çalışmalarından alan kinematik dalga

teorisi oluşturur. Bir kanaldaki dalga hareketini anlatmada kullanıldığı zaman adı kinematik taşkın ötelenmesi olurken, yüzeysel akışa uygulandığı zaman adı kinematik model ya da kinematik akış olur. Bir taşkın dalgasının esas kütlesi taban eğimi  $J_0$ 'ın etkin olmasından dolayı kinematik bir dalga gibi taşınır.

Kinematik dalga modeline göre;

$$\begin{aligned} J_0 &= J_f \\ Q &= Q_n \end{aligned} \quad (3.23)$$

idi. 3.23 denklemi debiyi, akım derinliğinin ya da akım alanının bir fonksiyonu olarak ifade eder. Saint Venant denklemlerinden 3.5 süreklilik denklemindeki ilk terim şöyle yazılabilir;

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \left( \frac{dA}{dQ} \right)_x \frac{\partial Q}{\partial t} = B \left( \frac{dh}{dQ} \right)_x \frac{\partial Q}{\partial t} \text{ ve 3.5 denklemi şu hale döndürür;}$$

$$B \left( \frac{dh}{dQ} \right)_x \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.24)$$

$dQ = q dx$  'dir.

$$\frac{dt}{dx} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.25)$$

3.24 ve 3.25 denklemlerindeki katsayıların karşılaştırması Kleitz-Seddon yasasına göre kinematik dalga hızı tanımını verir.

$$\frac{dx}{dt} = c = \frac{1}{B} \left( \frac{dQ}{dh} \right)_x \quad (3.26)$$

bundan sonra kinematik dalga denklemi şöyle yazılabilir;

$$\frac{1}{c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.27)$$

veya,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = cq \quad (3.28)$$

3.28 denkleminde  $1/c$  sadece  $Q$  ya da  $h$ 'ın bir fonksiyonudur. 3.28 denklemini 3.5 ve 3.23 denkleminde denktir.

Kinematik dalgalar sadece,  $\frac{dx}{dt} = c$  tarafından verilen bir karakteristikler sistemine sahiptir. Bu yüzden Courant stabilite şartı şöyle ifade edilebilir.

$$\Delta t \leq \Delta t_c = \frac{\Delta x}{c} \quad (3.29)$$

Kinematik modeller, tüm taşkın ötelenme modellerine ve debinin sadece seviyenin fonksiyonu olduğu bir yaklaşıma uygulanır. Kinematik modelde, taşkın dalga hareketini anlatan genel denklem yanal akış olmaksızın seviye ve debi arasında verilen bir tek ilişkiye dayanır.

Kinematik ötelenme modellerinin sınıflandırılması geliştirilmiş katsayılar denklemindeki katsayıların hesaplanışına bağlıdır. Bu katsayılar,  $\Delta t$ ,  $\Delta x$ ,  $x$ ,  $c$  parametrelerinden oluşur ve bu parametre değerleri değişik bir dizi model üreten birkaç yoldan seçilebilir.

Zaman adımı;  $\Delta t$  bağımsızca seçilemez fakat Courant Stabilite şartına uymalıdır. Böylece,  $\Delta t$  için uygun değerlerin çeşitliliği, kinematik dalga hızındaki farklılıklardan dolayı sınırlanmıştır. Eğer  $\Delta t$  karakteristik zaman adımı  $\Delta t_c$ ' den daha küçük seçilirse, bu farklılıklar mansap kısmına ulaşmadan, mansapta sonuçlar değerlendirilir. Böylelikle muhtemelen sayısal hata ile karşılaşılır (yani ötelenme hesaplarının başında negatif çıkış akımları meydana gelir).

Bu yüzden  $\Delta t'$  yi, üst limit  $\Delta t_c'$  ye kadar seçmek ve eğer gerekli ise,  $\Delta t_c'$  nin küçük bir değerini elde etmek için mesafeyi alt havzalara bölmek,  $\Delta x'$  i küçültmek gerekir. Bu şartla birlikte parametrelerin sayısı 3' e indirilmiş olur. Genelleştirilmiş kinematik model, doğrusal formuyla birlikte, bu yüzden 3 parametrelili bir model olarak tanımlanabilir.

Kinematik modelin esas avantajı, dinamik denklemlerinden daha kolay olmasıdır. Bir boyutlu tedrici değişen akım modelinin sayısal çözülmesinin zorunlu olduğu yerlerde kinematik akım sıklıkla analitik çözümlerle çözülebilir. Tüm sadeleştirilmiş modellerde olduğu gibi, kinematik ötelenmenin de dezavantajı, model çözümleri ile fiziksel geçerlilik arasındaki belirsizliktir. Bu belirsizliğin derecesi sadeleştirilmenin artmasıyla artar. Model sonuçları ile prototip ölçümleri arasında daha fazla karşılaştırılma yapılması değişik tipteki uygulamalar için kinematik modelin geçerliliğini ortaya koyar.

Süreklilik ve momentumun tüm bir boyutlu denklemlerinin düzgün kullanımı, sadece süreklilik denklemi ile momentum denkleminin bir yaklaşımını kullanan kinematik dalga teorisinden elde edilenlerle aynı doğruluktadır. Kinematik metodun kullanımının, hesapları sadeleştirme gibi bir avantajı vardır. Fakat kinematik dalga teorisinin denklemlerini çözmek üzere programlanmış uygun bir çözüm tekniğinin denklemlerini çözmek için geniş kapasiteli bilgisayarlara duyulan ihtiyaç, kinematik modelin avantajını bir parça azaltır (Miller ve Cunge, 1975).

### 3.2.3.3. Muskingum Cunge Modeli

Muskingum Cunge metodu, doğrusal katsayılı olmayan bir ötelenme tekniğidir. Giriş hidrografıyla kanalın fiziksel özelliklerine dayanan taşkın ötelenmesini hesapladığı için hidrolik bir model olarak kabul edilebilir. Bu model için gereken nitelikli ve detaylı arazi verileri diğer hidrolik metodlar için gerekenden daha azdır. Muskingum Cunge Modeli Saint Venant denklemlerinin difüzyon formuna dayanır. Bölüm 3.2.3.1. de anlatıldığı gibi, difüzyon dalga modelleri basınç, ağırlık ve sürtünme kuvvetlerinin bir fonksiyonu olup atalet terimleri ihmal edilmekte idi. Taşkın

mansaba doğru ilerlerken taşkını sönmüleyen, kanalın fiziksel şartlarına ve akımın karakteristiklerine bağlı iki ağırlık parametresi akımın bir fonksiyonu gibi değiştiğinden Muskingum Cunge metodu doğrusal katsayılı olmayan bir modeldir.

Problem, Muskingum formülasyonu ile birinci dereceden difüzyon denkleminde benzeyen bir sonlu fark formülasyonunun birbirine eşit olduğunu gösteren Cunge tarafından aydınlatılmıştır. Böylece Muskingum metodunun geliştirilmiş şekline “Muskingum Cunge Metodu” denilmiştir.

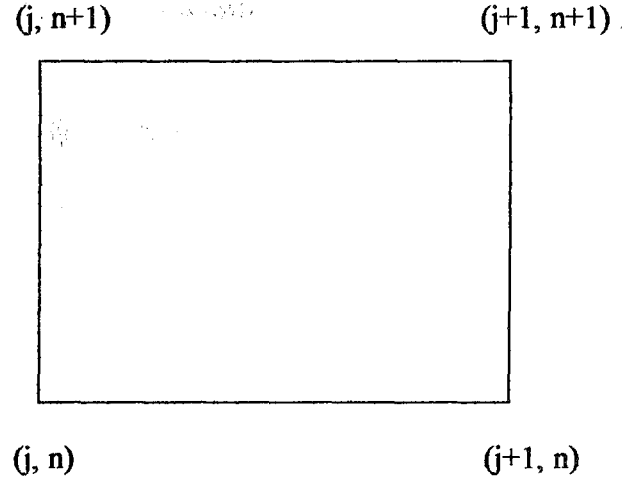
Muskingum Cunge metodunda taşkın dalgasının yayılım zamanını ifade eden K parametresi şöyle tanımlanır;

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (3.30)$$

Burada  $\Delta x$  taşkın dalgasının ulaşım uzunluğu,  $c$  ise taşkın dalgasının selertesidir.  $x$  ise ulaşım uzunluğu sonunda ki nümerik sönmülenmenin bir ölçüsüdür ve şöyle tanımlanır:

$$x = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{q_0}{J_0 \cdot c \cdot \Delta x} \right) \quad (3.31)$$

3.31 denkleminde  $q_0$  birim kanal genişliğindeki su debisi ve  $J_0$  da kanal yatak eğimidir. Muskingum Cunge ötelenme metodu sonlu fark sayısal tekniğinin açık formundan faydalanır ve dört noktalı iterasyon yaklaşımı kullanarak ötelenmeyi değerlendirir. Bu sistem dört noktalı ağ şebekesine dayanan bir hesap hücresi kullanır bu ağ sisteminin şematik bir diyagramı Şekil 3.7’ de verilmiştir.



Şekil 3.7. Dört noktalı tipik bir ağ

Burada  $(j, n)$ ,  $(j+1, n)$ ,  $(j, n+1)$  noktalarındaki debi değerleri bilinmekte,  $(j+1, n+1)$  noktasındaki debi değeri aranmaktadır.

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^n + C_2 Q_j^{n+1} + C_3 Q_{j+1}^n \quad (3.32)$$

Burada  $\Delta t$  ötelenme periyodu,  $K$  geçiş parametresi,  $x$  ağırlık parametresi olmak üzere;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  katsayıları şöyle tanımlanır;

$$C_1 = \frac{2Kx + \Delta t}{2K(1-x) + \Delta t} \quad (3.33)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t - 2Kx}{2K(1-x) + \Delta t} \quad (3.34)$$

$$C_3 = \frac{2K(1-x) - \Delta t}{2K(1-x) + \Delta t} \quad (3.35)$$

Mühendislik uygulamalarında Muskingum Cunge Modeli geniş yer almaktadır. Geçmiş tecrübeler, uzun süreli taşkınlar için metodun uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Model, aynı ortak teorik esaslara dayanan difüzyon dalga modeli ile eşit düzeyde uygulanabilirliğe sahiptir (Shultz, 1992).



### 3.2.3.4. Dinamik Ötelenme

Dinamik dalgalar matematiksel anlatımlarında hem süreklilik hem de momentum denklemleri gerektiren büyük dalgalar olarak ifade edilir. Momentum denklemi tamamen dalga hareketinin tanımından oluştuğundan dinamik dalgalar membaya ya da mansaba doğru yayılabilirler.  $cd = V + \sqrt{gh}$  hızıyla mansap yönünde,  $cd' = V - \sqrt{gh}$  hızıyla memba yönünde.

Bir boyutlu dinamik dalga modeli Saint Venant denklemindeki tüm parametreleri hesaba katar. Bu parametreler ağırlık, sürtünme, hidrostatik basınç ve atalet kuvvetleridir. Dinamik dalga modeli pek çok akım durumu ve kanal karakteristiklerini modelleyebilir. Genelde fiziksel temellidir. Tahmin edilmesi gereken sadece Mannings'ın  $n$  pürüzlülük katsayısıdır. Bu değer kanalın araştırılması yapılarak bulunabilir.

Dinamik dalga modeli için gerekli olan veriler şöyledir; akım hidrografları, kanal uzunluğu, kanalın en kesit alanı, Mannings'ın  $n$  pürüzlülük katsayısı, başlangıç ve sınır şartları.

### 3.2.4. Hidrolojik Metotlar

Taşkın ötelenmesi ile ilgili pek çok mühendislik metodu, bir taşkın dalgasının akarsuyun membasından mansaba doğru hareketinin gözlenmesine ve aynı akarsudaki geçmiş kayıtlardan bulunacak hıza bağlıdır. Bu metotlar sadece süreklilik denklemini kullanır. Hidrolojik akım ötelenmesine aynı zamanda toplu akım ötelenme modelleri de denir. Toplu akım ötelenme modelleri zamanın bir fonksiyonudur. Ve hem kütlenin korunumu kavramına hem de mesafe boyunca çıkış akımı ile depolama arasında yaklaşık bir ilişkiye dayanır. Pek çok taşkın ötelenme prosedüründe kullanılan süreklilik denklemi, verilen bir zaman aralığında  $\Delta x$  mesafesine giriş akımıyla (I),  $\Delta x$  mesafesinden çıkış akımı (O) arasındaki fark  $\Delta x$  mesafesi boyunca depolamadaki (S) değişime eşit olduğunu ifade eder.

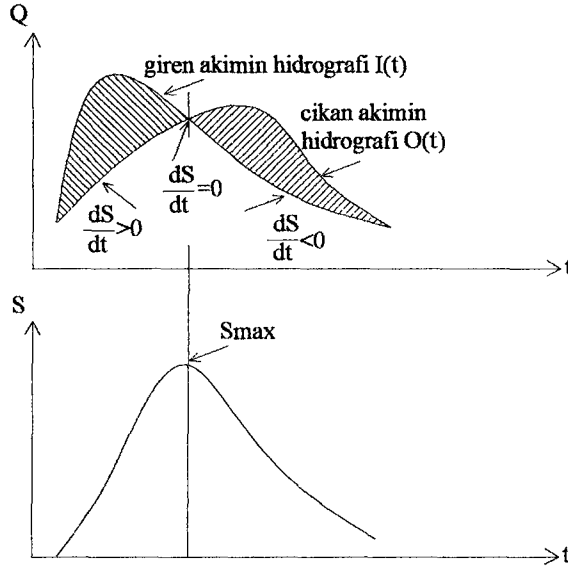
Depolamanın Matematiksel İfadesi;

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3.36)$$

3.36 kararsız akımların depolama denklemi çıkış akımı (O), giriş akımı (I), depolama (S), zaman (t) şeklinde dört değişkene dayanır.

Fiziksel akım matematiksel olarak doğrusal olmadığından fiziksel davranışın beklentisi, ancak denklemdeki doğrusal olmayan terimlerin çok küçük olmasıyla mümkündür. Başka bir deyişle daha kararlı taşkın akımı şartlarında, sadece kütlenin korunum prensibinden ortaya çıkan depolama diferansiyel denklemini kullanan hidrolojik taşkın ötelenmesi daha iyi sonuç verir. Sadece süreklilik denklemine dayanan akarsu akımının doğrusal matematiksel modelleri, kavşaklar, barajlar ya da kanal en kesitindeki düzensizlikler gibi dalganın mabdan geçişini hesaba katamazlar. Hidrolojik ötelenme süreklilik denklemi ve depolama ile çıkış arasında ya analitik ya da varsayılan bir ilişkinin kullanımını gerektirir. Depolama hem giriş hem de çıkış akımlarının bir fonksiyonudur. Genelde giriş hidrografi tek bilinen değişkendir. Çıkış debisi ve depolama değerleri bilinmediğinden, depolama, giriş ve çıkış debileri arasında bir depolama fonksiyon ilişkisi gerekmektedir. Bu iki denklemin ve iki bilinmeyenin çözülebilir bir birleşimini sağlar.

Hidrolojik ötelenme şu varsayımları yapar; konvektif ivme terimi ihmal edilebilir ve verilen bir kanal kesitinde akım, derinliğin tek değerli bir fonksiyonudur. Hidrolojik ötelenme metotlarının geniş çeşitliliği, depolama denkleminin giriş ya da çıkış akımına veya da bunların ikisine birden bağlı olması durumuyla ilgilidir. 3.36 no' lu depolama denklemi nümerik, grafik ya da analitik olarak integre edilebilir. Şekil 3.8, 3.36 no' lu denklemi örnelemektedir.



Şekil 3.8. Bir akarsu parçasına giren ve çıkan akımların hidrograflarından biriktirme hacminin hesabı

Bir taşkın dalgası bir nehir boyunca ilerlerken, genellikle çıkış hidrografı piki depolama kapasitesi ve kanal direncine bağlı olarak geciktirilir ve sönümlenir. Kanal sonuna yaklaşan şekilsiz bir depolama düşünülerek, giriş ve çıkış hidrografları arasındaki fark, Şekil 3.8' de taralı alanla belirtilen, 3.36 denkleminde gösterilen kanal boyunca oluşan depolamadaki değişim hızına eşittir. Depolama artarken süreklilik denkleminde ki  $\frac{\Delta S}{\Delta t}$  değeri pozitifdir ve depolama düşerken negatiftir.

Burada depolama S zamanın bir fonksiyonu olarak çizilebilir. 3.36 denklemi sonlu farklar formuyla 3.37' deki gibi yazılabilir, burada  $\Delta t$  ötelenme zamanı periyodunu, 1 ve 2 alt indisleri ise periyodun başlangıç ve bitiş zamanını belirtir.

$$\frac{(I_1 + I_2)}{2} - \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} = (S_2 - S_1) / \Delta t \quad (3.37)$$

Hidrolojik akım ötelenme modelleri ya fiziksel ya da fiziksel olmayan temellere dayanır. Fiziksel temele dayalı modeller, akarsu boyunca ötelenmenin fiziksel temsiline dayanır. Fiziksel esasa dayalı olmayan modellerse katsayılar kullanır. Depolama ile çıkış debisi arasındaki ilişkinin doğruluğu tabii ki sınırlıdır. Bir

akarsuda su yüzü her zaman yatak eğimine paralel olmaz. Akarsu yükselirken, ortalama su yüzü eğimi nehir seviyesinin düşük olduğu zamanlardaki yatak eğiminden yüksek olur. Bu, çeşitli akarsu seviyeleri için çeşitli depolama çıkış debisi ilişkilerine neden olur. Fakat genelde hidrolojik metotların kullanımı daha kolaydır. Sürtünme eğiminin neredeyse yatak eğimine eşit olduğu dik eğimli akarsularda taşkın ötelenme çalışmaları için uygundur. Sadece, bir taşkın dalgasının mansaba doğru doğal yayılımını belirlemede diğer modeller kadar etkili olmayabilirler. Haznelerden salınan suyun neden olduğu kuyruksuyu ve kabarma etkileri, hidrolojik ötelenme metotlarının içinde açıklanamaz (Miller ve Cunge, 1975; Linsley vd., 1975)

Taşkın ötelenmesindeki can sıkıcı bir problem, giriş, çıkış istasyonları arasında kanal giren yanal debilerdir. Eğer membranın sonunda kanala giriş yapıyorsa, bu yanal akım toplam giriş akımına eklenir. Büyük bir kavşakta ise giriş istasyonu, membada kalmalıdır. Eğer yanal giriş akımı kanalın sonunda meydana geliyorsa, depolama hesaplanmadan önce çıkış akımından çıkartılır. Bu arada ana kanaldaki akım akarsu boyunca ötelenir ve ötelenme bittikten sonra, yanal giriş akımı eklenir. Bu iki olasılık arasında pek çok olasılık olabilir. Eğer yanal giriş akımı, ana kanalla kıyaslandığında küçükse makul bir artış yeterli olacaktır, büyükse kanal boyunun azalması yönünde bir düşünce doğar. Ölçümü yapılmayan yanal giriş akımın toplam hacmi, aynı düşük akımda başlangıç ve bitiş periyotları arasında çıkış debisinden giriş debisinin çıkartılıp  $\Delta S=0$  alınmasıyla bulunur. Ölçülmemiş yanal giriş akımın zaman dağılımının, aynı karakter ve aynı ölçüde küçük bir yan derede ölçülmüş akımlarla aynı olduğu kabul edilir. Bu yöntem, akım ölçümlerindeki tüm hataları ölçülmemiş giriş akımına atar ve sonuç akımları hepsi birden mantıklı olmayabilir. Eğer sızıntı büyükse, hesaplanan yanal giriş akımı negatif bile olabilir (Linsley vd., 1975).

Bu bölümün içinde haznelerde taşkın ötelenmesi, Puls Metodu, Değişken Değerler Metodu ve Muskingum Modeli anlatılacaktır.

#### 3.2.4.1. Haznelerde Taşkın Ötelenmesi

Depolama çıkış debisinin bir fonksiyonu gibi alındığında, süreklilik denkleminin en basit uygulamalarındandır. Pek çok depolama ötelenmesi metodu 3.37 denklemine

dayanır; denklemde  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $O_1$  ve  $S_1$  bilinirken,  $O_2$  ve  $S_2$  hesaplanması gerektirir. İki bilinmeyen olduğu için çözümü tamamlamak için depolama ile akım arasında ikinci bir ilişkiye ihtiyaç duyulur. Hazne ötelenmesindeki en büyük sorun bu ikinci ilişkidir.

$\frac{I_1 + I_2}{2} = \bar{I}$  varsayımı,  $t$  periyodu boyunca hidrografın düz bir çizgide ilerlediğini ima eder. Böylelikle ötelenme periyodunun seçimindeki kontrol faktörü bu varsayımı bozmamak için yeterince küçük seçilmelidir. Ötelenme periyodu kesinlikle geçiş zamanından daha büyük seçilemez, eğer öyle olursa dalga pikinin ötelenme periyodu içinde çabucak geçmesi söz konusu olur. Ötelenme periyodu gerekenden daha kısa seçilirse, her ötelenme periyodu için aynı hesaplamalar gerekeceğinden, ötelenme çalışması artar. Genellikle geçiş zamanının yarısı ya da üçte biri kadar bir ötelenme periyodu, iyi sonuç verecektir. Hidrolojik ötelenme süreklilik denkleminin bir çözümü olduğundan, bir taşkın için hesaplanan çıkış akımı hacmi, depolamadaki herhangi bir değişime uyum sağlayarak giriş akım hacmine eşit olmalıdır. Eğer hacimler birbirini tutmazsa yöntemde ciddi bir hata var demektir. Eğer herhangi bir aralıktaki çıkış debisi çok fazla tahmin edilmişse, aralığın sonundaki depolama çok düşük olacak ve bir sonraki aralıkta çıkış akımı da olduğundan daha küçük olacaktır. Bu tip hatalar çözümde stabilitesizliğe yol açar.

Depolama ile akım arasında bir ilişki kurulmazdan önce değişik zamanlarda akarsudaki su hacmini belirlemek oldukça önemlidir. Depolamayı bulmak için en aşikar metot, prizmatik formülasyonu kullanarak kanalda en kesitlerde hacim hesabı yapmaktır. Hazneler için depolama-seviye eğrileri genellikle topoğrafik bir haritadan, kapalı alanın hesaplanması ile bulunur. Alanın kontur aralıkları ile çarpılması, kontur aralığının ortasından daha yüksek bir aralığa kadar olan fark hacimdeki artışı verir. Pek çok hazne için su yüzü seviyesinin tahmini yeterli bir durumdur.

### 3.2.4.2. Puls Metodu;

Süreklilik denkleminde  $\Delta t$  zaman aralığında giren ve çıkan debilerin farklarının hacimdeki değişikliğe eşit olacağı yazılırsa ortalama değerlerden

$$\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)\Delta t - \left(\frac{O_1 + O_2}{2}\right)\Delta t = S_2 - S_1 \quad (3.38)$$

elde edilir.  $\Delta L$  seçilen parçanın boyu olmak üzere;  $\Delta L < \Delta t \cdot V_{ort}$  dir. 3.38 bağıntısında  $I_1, I_2, O_1, S_1$  bilinir ve  $O_2, S_2$  araştırılır. Bu bağıntıda bilinmeyenler bir tarafta toplanırsa;

$$S_2 + \frac{1}{2}O_2\Delta t = S_1 - \frac{1}{2}O_1\Delta t + \frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t \quad (3.39)$$

bulunur. Buradan sonra

$$N = \frac{S}{\Delta t} + \frac{O}{2} \quad (3.40)$$

tanımlaması yapılır, 3.39 denklemini de  $\Delta t$  ile bölünür ve 3.40 tanımı kullanılırsa;

$$\frac{S_2 + \frac{1}{2}O_2\Delta t}{\Delta t} = \frac{S_1 - \frac{1}{2}O_1\Delta t + \frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t}{\Delta t} \quad (3.41)$$

elde edilir. Bu denklemin sağ tarafına  $(\pm \frac{O_1}{2})$  eklenirse

$$N_2 = N_1 + \frac{1}{2}(I_1 + I_2) - O_1 \quad (3.42)$$

yazılabilir. Sayısal çözüm sırasında bu bağıntılardan yararlanılarak grafikler hazırlanır ve bu grafiklerle çıkan akım değerleri belirlenir. Burada depolama denklemini çözmekte kullanılan S-O arasındaki ilişki, N' nin, S ve O' nun bir

fonksiyonu olduğu N-O arasındaki bir ilişkiye dönüşür. Henderson depolama denkleminin bu formunun mantığını açıklamak için şöyle örneklemiştir; eğer S-O arasındaki ilişki doğrusalsa, ve giriş hidrografının şekli sade ise ve de 3.42 denklemi açıkça kullanılabilir değilse, bir sayısal adım yöntemi kullanılmalıdır. 3.42 denkleminin çözümü için sadece depolama ve çıkış debisi arasındaki ilişki ilgili olduğundan, Henderson tarafından kullanılan yöntem, giriş debisinin en az çıkış debisi kadar depolama üzerine etkili olduğu durumlardan çok, sadece çıkış debisinin depolama üzerine etkili olduğu durumlarda kullanılmalıdır (Miller ve Cunge, 1975).

Hazneden geçen taşkını öteleyen metot, küçük taban eğimli kanallarda tedrici değişen akımların ötelenmesinde ve kontrolsüz göllerdeki taşkın dalgalarının etkilerini değerlendirmede ve benzeri durumlardaki gibi denklemdaki terimler integrasyonlu ifadelere yaklaştıkça, bu yöntem kullanışlı olur. Metot şunları gerektirir; ölçümlerle elde edilen depolama ya da alan fonksiyonu, hidrolik hesaplamalar ya da model çalışmalarından elde edilen çıkış akımı için anahtar eğrisi, giriş ya da çıkış hidrografları. Çıkan akım ya da giren akım hidrografı, bu datalardan ve depolama denkleminde hesap edilmelidir. Analitik integrasyon yönteminin dezavantajı ise, analitik ifadelerin hidrograf, dalga profilleri gibi başlangıç dalga şartları ve en kesitler, seviye-debi ilişkisi eğim, yanal akış gibi sınır şartları için belirlenmesi zorunluluğudur.

Puls ötelenme metodu, pek çok akarsu havzasındaki taşkın dalgalarının hareketini yeterli derecede modelleyebilir. Fakat, bu metot, aşağıdaki durumlarda taşkın dalga hareketini modellemede başarılı olamaz:

- Eğimin çok düz olduğu akarsularda ( $j_0 < 0.00057$ ),
- Kabarma, alçalma gibi mansap sınır şartlarının zamanla değiştiği yerlerde ve
- Baraj yıkılma sonrasında oluşan hızlı yükselen taşkınlarda (Shultz, 1992).

### 3.2.4.3. Değişken Değerler Metodu

Bu metot hidrolojik bir ötelenme tekniği olup, Puls metodu ile Muskingum modellerinin her ikisinin birleştirilmiş bir varyasyonu sayılabilir. Kama depolamasını hesaplayan Puls metodu ya da değişken geçiş zamanlı Muskingum modeli olarak adlandırılabilir. Değişken değerler tekniği, taşkın dalgasının bir akarsudaki doğrusal olmayan hareketini modelleyebilir. Daha doğru sonuçların alınmasında yardımcı olan değişken bir geçiş zamanın kullanıldığı yerlerde daha faydalıdır. Değişken değerler metodu, Puls metodu gibi depolamalara karşılık gelen aynı debi değerlerini kullanır. Değişken değerler metodunda, Puls metodundaki  $x$  katsayısından farklılık gösterir. Muskingum modelinde kullanılan benzer bu katsayı ötelenmenin kalibre edilmesinde kullanılmaktadır.  $x$  katsayısı 0 ile 0,5 arasında değişim gösterir. 0 değerinin alınması değişken değerler metodunu Puls metodu ile aynı yapar. Bu, verilen bir debi-depolama ilişkisi için maksimum sönümlenmenin elde edilmesinde giren akımın hiçbir etkisinin olmadığını gösterir.  $x=0,5$  olduğu zamansa hidrograf hiçbir sönümlenme olmaksızın akarsudan geçer.  $x$  değeri en iyi ötelenme sonuçlarına ulaşmak için memba ve mansap hidrograflarından kalibre edilir.

Değişken değerler metodunda kullanılan denklemler şöyledir;

$$D = xI + (1 - x)O \quad (3.43)$$

$$R = \frac{S}{\Delta t} + \frac{D}{2} \quad (3.44)$$

ifadesi tanımlanır.

$$R_{j+1} = R_j + \frac{I_j + I_{j+1}}{2} - D_j \quad (3.45)$$

$$O_{j+1} = D_{j+1} - \frac{x}{1-x} (I_{j+1} - D_{j+1}) \quad (3.46)$$

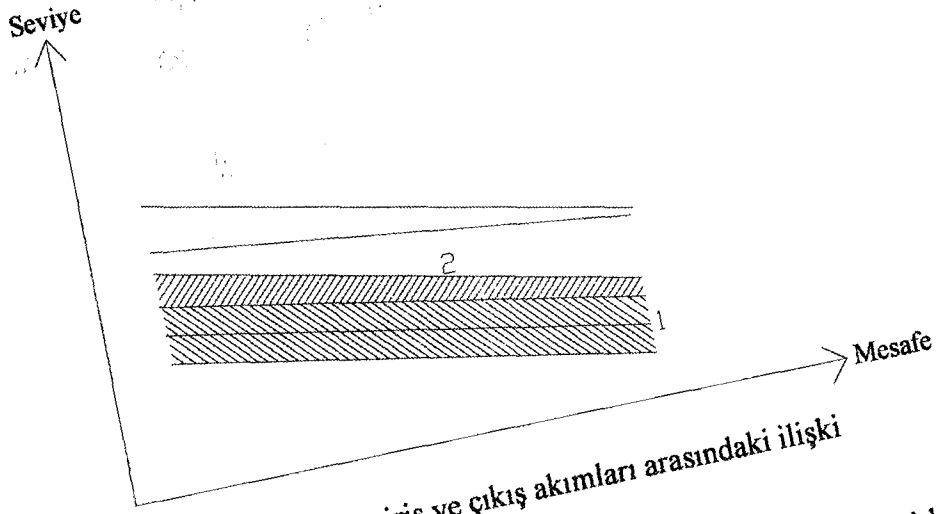
şeklinde çıkış debi değerleri bulunur (Hydrologic Engineering Center, 1990a; Shultz, 1992).



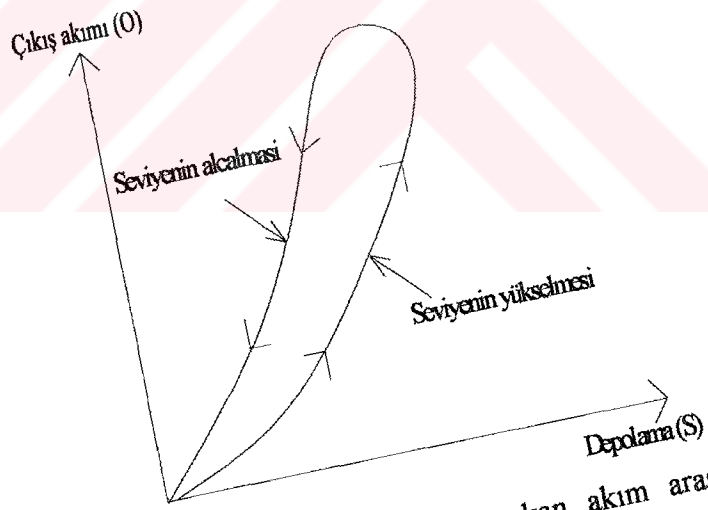
#### 3.2.4.4. Muskingum Modeli

1934-1935 yıllarında Ohio'daki Muskingum akarsu havzasındaki taşkınların kontrolü için ilk kez U.S Army Corps of Engineers ve McCarthy tarafından geliştirilen Muskingum Modeli en iyi bilinen ve geniş kullanıma sahip bir katsayılar modelidir. Modelin temelinde süreklilik denklemi vardır, dinamik denklem ihmal edilir. Muskingum Modeli kanaldaki depolamayı iki kısma ayırır; prizma depolama ve kama depolama. Prizma depolama permanan akım şartlarında oluşan depolamadır ve sadece çıkış akımına bağlı olarak  $\Delta x$  mesafesi boyunca su hacminde meydana gelen değişimdir. Şekil 3.9 bu kavramları açıklamaktadır. Kama depolama ise giriş ve çıkış akımları arasındaki değişikliklere bağlı olarak permanan su yüzü profili ile gerçek su yüzü profilleri arasında kalan depolamadır. Bir taşkın dalgası için seviye yükseldiği zaman, kama depolama pozitifdir ve prizma depolamaya eklenir. Seviye düştüğü zamanlarda da, prizma depolamadan çıkartılır, giriş debisi çıkış debisinden daha küçük olduğundan kama depolama negatif olur. Böylelikle akarsu ve kanallardaki hidrolojik ötelenme kama depolamaya izin veren bir depolama bağıntısını gerektirir. Bu ise ancak depolamanın hem giriş hem de çıkış debilerinin fonksiyonu olmasına olanak veren taşkın ötelenme metodu Muskingum da başarıya ulaşmıştır. Muskingum Modeli kama depolamayı hesaplayan hem süreklilik, hem de depolama ve giriş, çıkış akımları arasında lineer bir ilişki varsayımına dayanan hidrolojik bir ötelenme tekniğidir (Şekil 3.10).

Muskingum Modeli şu denklemlere dayanır; herhangi bir anda giriş ve çıkış en kesitlerine ait hidrografların ordinatları arasındaki fark, o anda hacmin değişme miktarını gösterir. Bu denklemse bize 3.36 süreklilik denklemini verir ve belirtildiği üzere hidrolojik metotlar bu denklem üzerine kurulmuştur.



Şekil 3.9. Depolama ile giriş ve çıkış akımları arasındaki ilişki  
Şekil 3.9'da 1 taralı bölgesi prizma biçiminde depolamayı gösterirken, 2 bölgesi de kama biçiminde depolamayı gösterir.



Şekil 3.10. Akarsu parçasında depolama ile çıkan akım arasındaki bağıntının seviyenin alçalması ve yükselmesi hallerinde aldığı şekiller  
Meydana gelen hacim birikmesi esas olarak giriş ve çıkış hidrograflarıyla yatağın geometrik ve hidrolik karakteristiklerine ve mevcut kontrol yapılarına bağlıdır.

Debi-Derinlik ve Hacim-Derinlik bağıntılarından;

$$I(t) = p \cdot h^n \quad (3.47)$$

$$S_I = r \cdot h^m \quad (3.48)$$

$$O(t) = p \cdot h^n \quad (3.49)$$

$$S_O = r \cdot h^m \quad (3.50)$$

yazılabilir. Burada p, n, en kesitlerin debi-derinlik karakteristiklerini; r, m, en kesitlerin hacim-derinlik karakteristiklerini göstermektedir. 3.47 ve 3.48 bağıntılarından h derinliği yok edilirse;

$$S_I = r \cdot \left( \frac{I}{p} \right)^{m/n} \quad (3.51)$$

3.49 ve 3.50 bağıntılarından da aynı şekilde h derinliği yok edilirse;

$$S_O = r \cdot \left( \frac{O}{p} \right)^{m/n} \quad (3.52)$$

elde edilir. Bundan sonra memba ve mansap en kesitlerine ait I(t) ve O(t) hidrograflarının birikmeye olan katkılarını belirten bir parametre "x" ile gösterildiği takdirde, toplam birikmenin

$$S = xS_I + (1-x)S_O \quad (3.53)$$

bağıntısıyla belirlenebilir. Bu ifade yazılırken memba ve mansap en kesitlerine ait hacimlerin toplam birikmeye katkılarının lineer olacağı düşünülmüştür. 3.51 ve 3.52 denklemleri 3.53 bağıntısında yerleştirilirse

$$S = xr \left( \frac{I}{p} \right)^{m/n} + (1-x)r \left( \frac{O}{p} \right)^{m/n} \quad (3.54)$$

denklemini elde edilir.

$$a=m/n \quad (3.55)$$

ve

$$K=r/p \quad (3.56)$$

tanımlamaları yapılır. Buradaki  $x$  parametresi derinliğin etkisini gösterir,  $K$  ise biriktirme katsayısı olarak adlandırılır. 3.55 ve 3.56 tanımları 3.54 denkleminde yerine konursa

$$S = K [xI^a + (1-x)O^a] \quad (3.57)$$

bulunur.

Geniş, dikdörtgen kanallarda Strickler bağıntısı kullanıldığı takdirde, debiler derinliklerin  $5/3$ 'ncü kuvvetiyle orantılı olduklarından  $m=1$  olur; buna göre geniş dikdörtgen en kesitler için  $a=m/n=0,6$  elde edilir, basitlik için  $a=1$  alınır.  $K$ , taşkın dalgasının göz önüne alınan parçada geçiş süresini göstermektedir. 3.57 denkleminde  $a$  yerine "1" yazılırsa bağıntı;

$$S = K [xI + (1-x)O] \quad (3.58)$$

şeklini alır.  $O^{n+1}$  ve  $I^{n+1}(t+\Delta t)$  zamanındaki çıkış ve giriş akımlarını,  $O^n$ ,  $I^n$  ise ( $t$ ) zamanındaki çıkış ve giriş akımlarını göstermek üzere,

$$\frac{dS}{dt} = \frac{S^{n+1} - S^n}{\Delta t} \quad (3.59)$$

$$I(t) \approx \frac{1}{2} (I^{n+1} + I^n) \quad (3.60)$$

$$O(t) \approx \frac{1}{2} (O^{n+1} + O^n) \quad (3.61)$$

$$S^{n+1} = K[xI^{n+1} + (1-x)O^{n+1}] \quad (3.62)$$

$$S = K[xI^n + (1-x)O^n] \quad (3.63)$$

3.59, 60, 61, 62, 63 eşitlikleri denklem 3.58'de yerine yazılırsa

$$O^{n+1} = C_1 I^{n+1} + C_2 I^n + C_3 O^n \quad (3.64)$$

denklemini bulunur. burada  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  Muskingum katsayılarıdır ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_1 = \frac{Kx - \frac{\Delta t}{2}}{K(1-x) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (3.65)$$

$$C_2 = \frac{Kx + \frac{\Delta t}{2}}{K(1-x) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (3.66)$$

$$C_3 = \frac{K(1-x) - \frac{\Delta t}{2}}{K(1-x) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (3.67)$$

Muskingum Modeli tüm akımlar için  $K$  ve  $x$  değerlerinin sabit olduğunu varsayar. Pek çok durumda bu yeterli ve doğrudur fakat bazı durumlarda depolama ve akım ilişkisi doğrusal değildir. Bu da bazı akım şartları için denklemin hatalı çıkış akımları vermesine yol açar.  $K$  ve  $x$  katsayılarının değişik kanal şartlarına göre değiştirilmesi gerekebilir (Chow, 1959; Ünsal, 1978; Shultz, 1992).

$K$  geçiş zamanı ve  $x$  ağırlık parametresi, gözlenmiş giriş ve çıkış hidrograflarından belirlenir. Geçiş zamanı, hidrograf pikleri arasındaki zamandan tahmin edilebilir. Ağırlık katsayısı  $x$  ise deneme, yanılma yoluyla elde edilir. Geçiş zamanı  $K$  da gözlenmiş hidrograflarla, ötelenmiş hidrograf birbirine uyacak şekilde olmalıdır (Shultz, 1992).

Aslında Muskingum Modeli giriş, çıkış hidrograflarına sahip akarsu havzalarıyla sınırlıdır. Ölçüm yapılmayan havzalarda depolama-debi ilişkisi elde edilemez. Bu da Muskingum Modelinin bu tip akarsu havzaları için uygulanmasını imkansız kılar.

Bu çalışmada, öncelikle DSİ. XVIII. Bölge Müdürlüğünden Sütçüler Taşkınına ait taşkın kayıtlarından seviye değerleri ve havzanın haritaları alınmış, istasyonlara ait genel bilgiler alınmıştır. Buna göre 9-88 no' lu istasyonun kotu 750 m olup 131 km<sup>2</sup> yağış alanına sahiptir. 37° 28' 38,8" enleminde ve 30° 58' 41,40" boylamındadır. 9-89 no' lu istasyonun kotu ise, 320 m olup, 314 km<sup>2</sup> yağış alanına sahiptir. 37° 27' 50,1" enleminde ve 30° 54' 29,9" boylamında yer almaktadır.



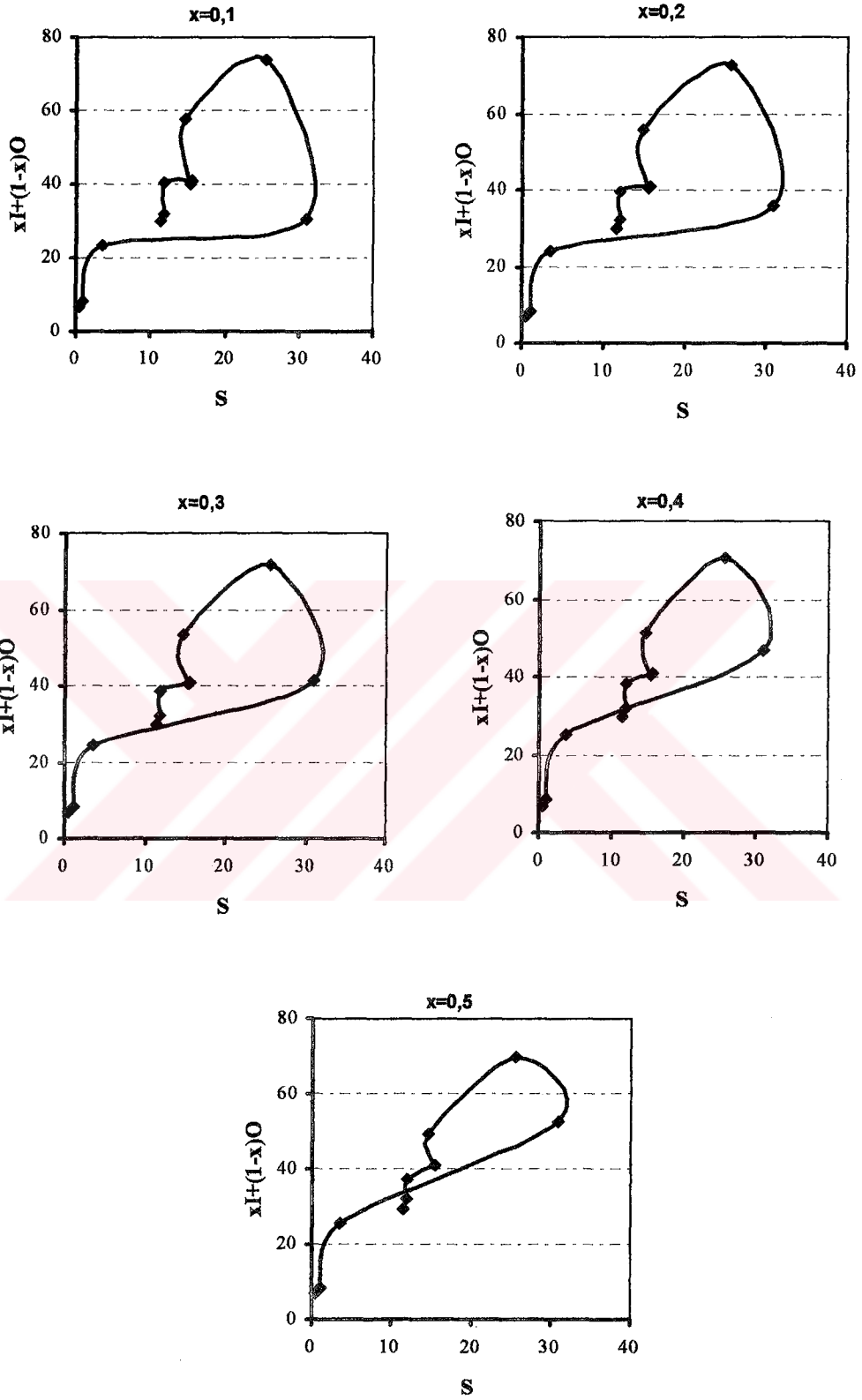
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4 Kasım 1995 tarihinde Değirmendere akarsuyunda meydana gelen taşkın değerlerinin tahmininde 3.64 denkleminde matematiksel bağıntısı verilen Muskingum Modeli kullanılmıştır.

Bağıntıdaki katsayıları hassas olarak belirlemek için DSİ 18. Bölge Müdürlüğü tarafından 9-88 no' lu istasyona ait giriş akım değerleri ve 9-89 no'lu istasyona ait çıkış akım değerleri kullanılmıştır. Muskingum Modeli' nin çalışma alanına uygun olup olmadığını belirlemek için ilk olarak bölgesel mevcut haritalardan yatak eğimi 0.07 olarak hesaplanmış ve sonuçta çıkan değer Muskingum Modeli sınırları içinde kaldığından uygulanabilirliği benimsenmiştir.

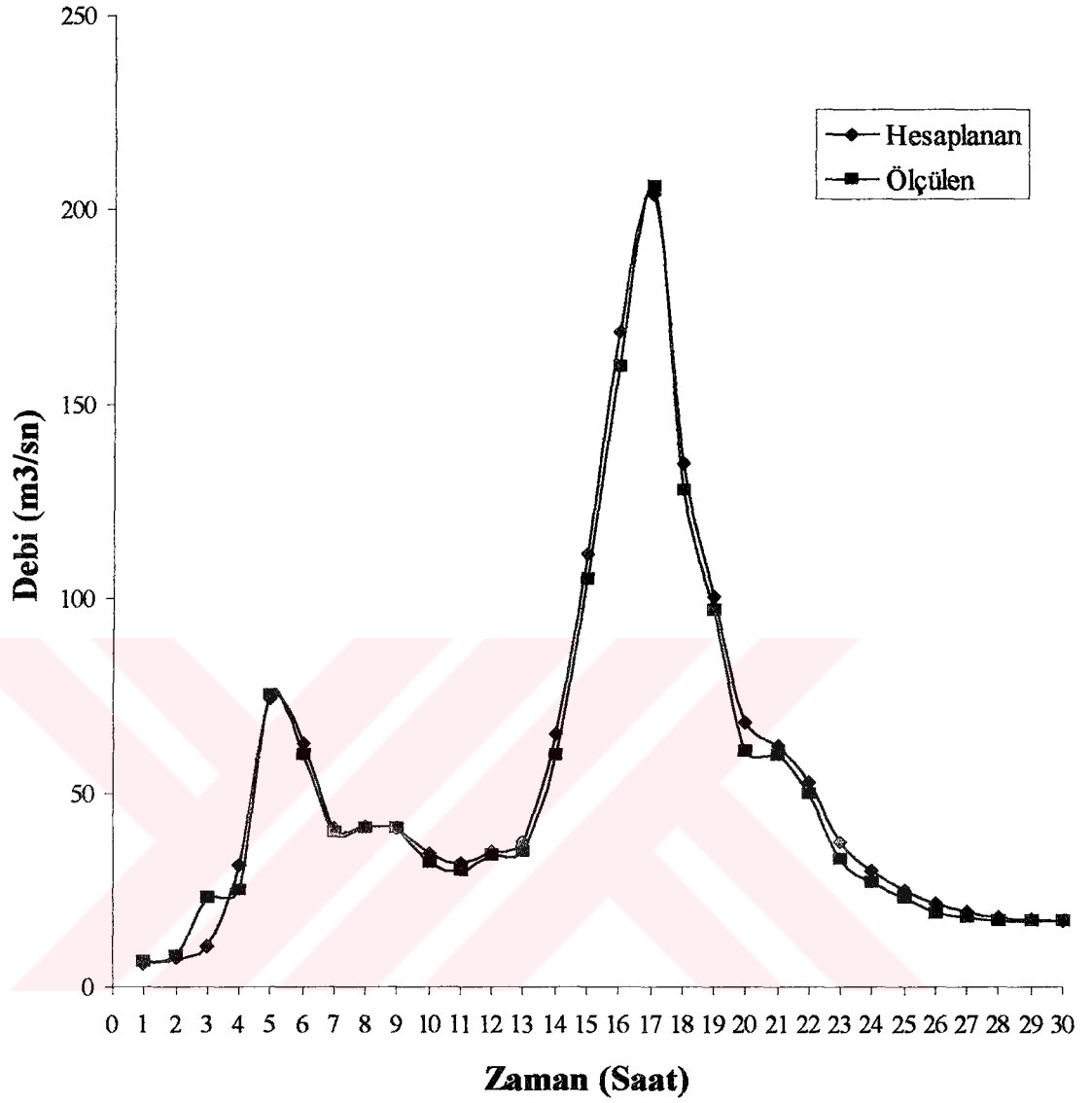
Daha sonra 3.58 bağıntısındaki  $x$  ağırlık ve  $K$  geçiş parametrelerini belirlemek için aşağıdaki yöntem kabul edilmiştir. Ponce (1978)' deki çalışmasında  $x$  ağırlık parametresinin 0-0.5 arasında seçilebileceğini belirtmiştir. Çalışmada  $x$  parametresine 0 ile 0.5 arasında çeşitli değerler verilerek,  $x$  ekseninde toplam depolamayı gösteren  $S$ ,  $y$  ekseninde ise  $xI + (1-x)O$  değerlerini hesaplayan grafikler çizdirilmiş (Şekil. 4.1), bunların içinden doğruya en yakın olan  $x=0.4$  değerine karşılık gelen eğri seçilmiştir.

$K$  parametresi ise Ponce (1979)' da belirtildiği gibi  $\Delta t'$  ye eşit 0.5 olarak seçilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  katsayıları belirlendikten sonra ölçülmüş giriş akımlarına bağlı olarak çıkış akım değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan ve ölçülen taşkın değerleri Çizelge 4.1' de, elde edilen taşkın pik değerleri ve ölçülen taşkın pik değerlerine ait taşkın hidrografi ise Şekil. 4.2 de verilmiştir.



Şekil 4. 1. K ve x parametrelerinin bulunuşu





Şekil 4. 2. Hesaplanan ve ölçülen taşkın debileri

Şekilden de görüldüğü üzere hesaplanan değerler ile ölçülmüş değerler iyi bir uyum içerisindedir. Değirmendere Taşkını' na ait çıkış taşkın değerlerinin hesaplanmasında qbasic dilinde yazılmış bilgisayar programı kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Ölçülen ve Hesaplanan Taşkın Değerleri

t (saat)	Giriş taşkın debileri (m <sup>3</sup> /sn)	Çıkış taşkın debileri (m <sup>3</sup> /sn)	Hesaplanan taşkın debileri (m <sup>3</sup> /sn)
0	7,53	7	6,00
1	9,06	8	7,53
2	28,0	23	10,64
3	79,8	25	31,13
4	64,3	75	73,97
5	38,2	60	62,81
6	41,4	40	40,73
7	41,3	41	41,33
8	33,8	41	40,62
9	32,0	32	34,26
10	29,0	30	31,93
11	35,0	34	35,00
12	63,1	35	37,55
13	110,0	60	65,04
14	170,0	105	111,37
15	216,0	160	168,85
16	131,0	206	203,99
17	101,0	128	134,91
18	65,0	97	100,81
19	62,4	61	68,02
20	53,8	60	62,13
21	36,3	50	52,97
22	29,6	33	37,21
23	25,0	27	29,87
24	21,3	23	25,11
25	19,6	19	21,49
26	18,0	18	19,63
27	17,3	17	18,08
28	17,0	17	17,34
29	16,0	17	16,94

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Sütçüler havzasında, 4 Kasım 1995 tarihinde meydana gelen taşkına ait piklerin matematiksel olarak modellenmesinde hidrolojik modellerden biri olan Muskingum Modeli kullanılmıştır. Modelin kullanılabilirliğini belirlemek için, ilk olarak yatak eğimi hesaplanmış ve belirlenen yatak eğimi Muskingum Modeli' nin uygulanabilirliğini göstermiştir. Daha sonra katsayılar modeli olarak bilinen Muskingum Modeli' ndeki mevcut  $x$  ve  $K$  parametreleri DSİ 18 Bölge Müdürlüğü tarafından ölçülen Değirmendere Akarsuyu' na ait giriş ve çıkış taşkın değerlerine göre hesaplanmıştır. Hesaplanan  $x$  ve  $K$  parametreleri dikkate alınarak  $C_1$ ,  $C_2$ , ve  $C_3$  katsayıları belirlenmiş ve yataktan çıkan taşkın pik değerleri bulunmuştur. Çizdirilen grafikten hesaplanan taşkın değerleri ile ölçülmüş taşkın değerlerinin uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; Muskingum Modeli' nin bir yataktaki taşkın piklerinin belirlenmesinde kullanılabilmesi için yatak eğiminin,  $x$  ağırlık parametresinin ve  $K$  geçiş zamanının kesin olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bölgesel bir araştırma olan bu çalışmada çalışılan havza sınırları içerisinde dik eğime sahip akarsularda meydana gelen taşkınların modellenmesinde Muskingum Modeli' nin kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Ağralıoğlu, N., 1981. Akarsu Havzaları İçin Birleşik Bir Akış Modeli. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doçentlik Tezi (yayınlanmamış), 125s, İstanbul.
- Aldama, A. A., 1990. Least Squares Parameter Estimation for Muskingum Flood Routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No: 4, p. 580-586
- Bajracharya, K., Barry, D. A., 1995. Optimised Muskingum-Cunge Solution Method for Solute Transport with Equilibrium Freundlich Reactions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 18, p. 221-238
- Bajracharya, K., Barry, D. A., 1997. Accuracy Criteria for Linearised Diffusion Wave Flood Routing. *Journal of Hydrology*, 195, p. 200-217
- Barry, D. A., Bajracharya, K., 1995. On the Muskingum-Cunge Flood Routing Method. *Environment International*, Vol. 21, No: 5, p. 485-490
- Bayazıt M., 2002. Türkiye' de Taşkınlar ve Taşkın Kontrol Yönetimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 418, 27-29
- Birkhead, A. L., James, C. S., 1998. Synthesis of Rating Curves from Local Stage and Remote Discharge Monitoring Using Nonlinear Muskingum Routing. *Journal of Hydrology*, 205, p. 52-65
- Birkhead, A. L., James, C. S., 2002. Muskingum River Routing with Dynamic Bank Storage. *Journal of Hydrology* 264, p. 113-132
- Camacho, L. A., Lees, M. J., 1999. Multilinear Discrete Lag-Cascade Model for Channel Routing. *Journal of Hydrology* 226, p. 30-47
- Chow, V. T., *Open Channel Hydraulics*. 1959. McGraw-Hill Book Company, New York. 680p. USA.
- Devlet Su İşleri XVIII: Bölge Müdürlüğü, 1995. Sütçüler Taşkın Raporu
- Erkek, C., Ağralıoğlu, N., 1993. Su Kaynakları Mühendisliği. Beta BasınYayın Dağıtım, Üçüncü Baskı, 360s. İstanbul.
- Hydrologic Engineering Center., 1990a. HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual. 412p. U.S. Army Corps Of Engineers, Davis, California USA.
- Hydrologic Engineering Center., 1990b. River Routing With HEC-1 and HEC-2. Training Document No: 30, 146p. U.S. Army Corps Of Engineers, Davis, California USA.

- Jin, M., Fread, D. L., 1997. Dynamic Flood Routing with Explicit and Implicit Numerical Solution Schemes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No: 3, p. 168-179
- Keskin, M. E., 1989. Farklı Enkesitli Akarsularda Kinematik Modelle Taşkın Ötelenmesi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi (yayınlanmamış), 83s, İstanbul.
- Keskin, M. E., Ağırlioğlu, N., 1997. A Simplified Dynamic Model for Flood Routing in Rectangular Channels. *Journal of Hydrology* 202, p. 302-314
- Kshirsagar, M. M., Rajagopalan, B., Lall, U., 1995. Optimal Parameter Estimation for Muskingum Routing with Ungauged Lateral Inflow. *Journal of Hydrology* 169, p. 25-35
- Lange, J., Leibundgut C., 1999. A Noncalibrated Rainfall-Runoff Model for Large, Arid Catchments. *Water Resources Research*, Vol. 35, No: 7, p. 2161-2172
- Liggett, J., 1975. Basic Equations of Unsteady Flow. *Unsteady Flow in Open Channel*, Vol. I (Mahmood, K., Yevjevich, V.,-eds.), 29-62, Colorado, USA.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., Paulhus J. L. H., 1975. *Hydrology for Engineers*. 482p. McGraw-Hill Book Company, New York, USA
- Miller, W.A., Cunge, J.A., 1975. Simplified Equations of Unsteady Flow. *Unsteady Flow in Open Channel*, Vol.I, (Mahmood, K., Yevjevich, V.,-eds.), 183-257, Colorado, USA.
- Mohan, S.,1997. Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models Using Genetic Algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No: 2, p. 137-142
- Molls, T., Molls, F., 1998. Space-time Conservation Method Applied to Saint Venant Equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No: 5, p. 501-508
- Moramarco, T., Fan, Y., Bras, R. L., 1999. Analytical Solution for Channel Routing with Uniform Lateral Inflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No: 7, p. 707-712
- Moussa, R., Bocquillon, C., 1996. Algorithms for Solving the Diffusive Wave Flood Routing Equation. *Hydrological Processes*, Vol. 10, p. 105-123
- Moussa, R., Bocquillon, C., 1996. Criteria for the Choice of Flood Routing Methods in Natural Channels. *Journal of Hydrology* 186, p. 1-30
- Moussa, R., Bocquillon, C.,2001. Fractional-Step Method Solution of Diffusive Wave Equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 6, No: 1, p. 11-19

- Mozayeny, B., Song, C. S., 1969. Propagation of Flood Waves in Open Channels. *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 95, No: HY3, p. 877-892
- Nguyen, Q. K., Kawano, H., 1994. Simultaneous Solution for Flood Routing in Channel Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No: 10, p. 744-750
- Perumal, M., 1992. Multilinear Muskingum Flood Routing Method. *Journal of Hydrology* 133, p. 259-272
- Perumal, M., 1994. Multilinear Discrete Cascade Model for Channel Routing. *Journal of Hydrology* 158, p. 135-150
- Ping, F., Xiaofang R., 1999. Method of Flood Routing for Multibranch Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No: 3, p. 271-276
- Ponce, V. M., Yevjevich, V., 1978. Muskingum- Cunge Method with Variable Parameters. *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 104, No: HY12, p. 1663-1667
- Ponce, V. M., Li, R., Simons, D. B., 1978. Applicability of Kinematic and Diffusion Models. *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 104, No: HY3, p. 353-361
- Ponce, V. M., Chen, Y. H., Simons, D. B., 1979. Unconditional Stability in Convection Computations. *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 105, No: HY9, p. 1079-1086
- Ponce, V. M., 1979. Simplified Muskingum Routing Equation. *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 105, No: HY1, p. 85-91
- Ponce, V. M., Theurer F. D., 1982. Accuracy Criteria in Diffusion Routing. *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 108, No: HY6, p. 747-757
- Ponce, V. M., 1991. The Kinematic Wave Controversy. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No: 4, p. 511-525
- Ponce, V. M., Chaganti, P. V., 1994. Variable Parameter Muskingum-Cunge Method Revisited. *Journal of Hydrology*, 162, p. 433-439
- Ponce, V. M., Huston, P. T., 1994. New Perspective on the Convection-Diffusion-Dispersion Equation. *Water Resources Research*, Vol. 30, No: 5, p. 1619-1620
- Ponce, V. M., Lohani, A. K., Scheyhing, C., 1996. Analytical Verification of Muskingum-Cunge Routing. *Journal of Hydrology*, 174, p. 235-241
- Ponce, V. M., Lugo, A., 2001. Modeling Looped Ratings in Muskingum-Cunge Routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 6, No: 2, p. 119-124

- Rashid, R. S. M. M., Chaudhry, M. H., 1995. Flood Routing in Channels With Flood Plains. *Journal of Hydrology*, 171, p. 75-91
- Shultz M. J., 1992. Comparison of Flood Routing Methods for a Rapidly Rising Hydrograph Routed Through a Very Wide Channel. Texas Arlington Üniversitesi, M.S. Thesis, 146p, USA. (Unpublished).
- Singh, A. K., Porey, P. D., Raju, K. G. R., 1997. Criterion for Location of Downstream Control for Dynamic Flood Routing. *Journal of Hydrology*, 196, p. 66-75
- Strupczewski, W., Kundzewicz, Z., 1980. Muskingum Method Revisited. *Journal of Hydrology*, 48, p. 327-342
- Szel, S., Gaspar, C., 2001. On the Negative Weighting Factors in the Muskingum-Cunge Scheme. *Journal of Hydraulic Research*, Vol.38, No: 4, p. 299-306
- Szymkiewicz, R., 2002. An Alternative IUH for the Hydrological Lumped Models. *Journal of Hydrology*, 259, p. 246-253
- Tang, X., Knight D., 1999a. Variable Parameter Muskingum-Cunge Method for Flood Routing in a Compound Channel. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No: 5, p. 591-614
- Tang, X., Knight D. W., Samuels, P. G., 1999b. Volume Conservation in Variable Parameter Muskingum-Cunge Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No: 6, p. 610-620
- Tingsanchali, T., Manandhar, S. K., 1985. Analytical Diffusion Model for Flood Routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, No: 3, p. 435-453
- Tseng, M. H., Hsu, C. A., Chu, C. R., 2001. Channel Routing in Open Channel Flows with Surges. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No: 2, p. 115-122
- Ünsal, İ., 1978. Değişken Akımların Hidroliği. Matbaa Teknisyenleri Basımevi. 286s. İstanbul.
- Weinmann, P. E., 1977. Comparison of Flood Routing Methods for Natural Rivers. Civil Engineering Research Reports Monash University, PhD Thesis, 181p, USA. (Unpublished).
- Yen, B. C., Tsai, C.W., 2001. On Noninertia Wave Versus Diffusion Wave in Flood Routing. *Journal of Hydrology*, 244, p. 97-104

Zhang, S., Cordery I., Sharma A., 2002. Application of an Improved Linear Storage Routing Model for the Estimation of Large Floods. *Journal of Hydrology*, 258, p. 58-68





**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : Aslı ÜLKE

Doğum Yeri : Konya

Doğum Yılı : 1974

Medeni Hali : Bekar

**Eğitim ve Akademik Durumu:**

İlk Öğretim : 1981-1986 Konya İnkılap İlkokulu

Orta Öğretim : 1986-1989 Antalya Koleji

Lise : 1989-1992 Antalya Çağlayan Lisesi

Lisans : 1994-2000 Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık  
Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce