

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKARSULARDA TAŞKIN ÖTELENMESİNDE MUSKINGUM
MODELİNİN ARAŞTIRILMASI**

İclal ŞATSU SAY

**Danışman
Prof. Dr. Mesut ÇİMEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2018**



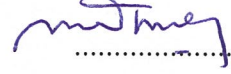
©2018 [İclal ŞATSU SAY]

TEZ ONAYI

İclal ŞATSU SAY tarafından hazırlanan "**Akarsularda Taşkın Ötelenmesinde Muskingum Modelinin Araştırılması**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

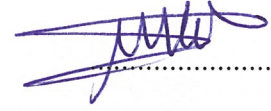
Danışman

Prof. Dr. Mesut ÇİMEN
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT
Afyon Kocatepe Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Kemal SAPLIOĞLU
Süleyman Demirel Üniversitesi



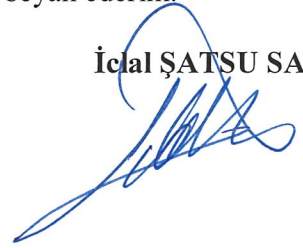
Enstitü Müdürü

Prof.Dr.Yasin TUNCER

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

İclal ŞATSU SAY



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Taşkın Tahmin Yöntemleri.....	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenilen Yol	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Hidrolik Yönden Taşkın Dalgası Ötelenmesi ve Yapılan Çalışmalar.....	6
2.2. Hidrolojik Yönden Taşkın Dalgası Ötelenmesi ve Yapılan Çalışmalar.....	21
3. MUSKINGUM MODELİ İLE TAŞKIN ÖTELENMESİ	30
3.1. Giriş.....	30
3.2. Teklif Edilen Muskingum Metodu ve Hesaplama Yöntemi	35
4. UYGULAMA VE TARTIŞMA	38
4.1 Değirmendere-Isparta Taşkını	38
4.2. Wilson (1974) Verisi	40
4.3. River Wye Taşkını	42
4.4. Viessman and Lewis Verisi	44
5. SONUÇLAR.....	47
6. KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	52

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKARSULARDA TAŞKIN ÖTELENMESİNDE MUSKINGUM MODELİNİN ARAŞTIRILMASI

İclal ŞATSU SAY

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mesut ÇİMEN

Suyun akarsu yatağı dışına çıkmasıyla meydana gelen taşkınlar, ülkemizde ve dünyanın pek çok yerinde önemli derecede maddi ve manevi zararlara neden olmaktadır. İklim değişikliğinin belirgin olarak hissedildiği günümüzde, toplumlar taşkınlarla daha fazla karşılaşmaktadır. Taşkın zararlarının en aza indirilmesi amacıyla yerel ve kamusal yönetimler birçok tedbir almaktadır. Bir yağış esnasında/sonrasında meydana gelebilecek olan taşkın büyüklüğünün tayini, taşkın zararlarından korunabilmek için yapılabilecek ilk adımdır. Bir taşkın dalgasının pik değeri, akarsuyun memba kısmında daha büyük değerlerde; mansap kısmında ise, taşkın dalgasının sönmelenmesi (yayılması) nedeniyle daha küçük değerlerde olmaktadır. Su mühendisliğinde taşkın dalgasının ötelenmesi olarak adlandırılan bu durumun önemi, pekçok bilim insanı tarafından araştırılmaktadır.

Taşkın dalgasının ötelenmesi problemi, genellikle hidrolik ve hidrolojik öteleme yöntemleri ile incelenmektedir. Tüm taşkın ötelenme metotları incelendiğinde, ihtiyaç duyulan akım şartlarının ve akarsu karakteristiklerininöteleme metodu seçimine etki ettiği görülmektedir. Bu çalışmada, hidrolojik yöntemlerden biri olan Muskingum metodu ele alınmış ve yeni bir öteleme denklemi teklif edilmiştir. Literatürden alınmış olan taşkın dalgası örnekleri teklif edilen yöntem ile çözülmüş ve önceki yöntemlerle kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Taşkın ötelenmesi, Muskingum metodu, hidrolojik ötelenme, akarsu akımı

2018, 52 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MUSKINGUM MODEL IN FLOOD ROUTING OF STREAMS

İclal ŞATSU SAY

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mesut ÇİMEN

The floods that occur when the water overflows out of the river bed cause monetary and moral damages in our country and in many parts of the world to a considerable degree. In these days when climate change is noticeable, communities are more exposed to floods. Local and public administrations take a lot of measures in order to minimize the flood damages. Determining the flood size that can occur during / after a rainfall is the first step that can be done to protect against flood damages. The peak value of an flood wave is greater in the upstream part of the stream; in the downstream part, it is smaller due to the spread of the flood wave. The importance of this problem, which is called the flood routing in water engineering, is being investigated by many scientists.

Flood routing is usually investigated by hydraulic and hydrological routing methods. When all flood routing methods are examined, it is seen that the flow conditions and river characteristics required affect the choice of flood routing method. In this study, the Muskingum method which is one of the hydrological methods was dealt with and a new Muskingum routing equation was proposed. The flood wave samples taken from the literature were been solved by the proposed method and compared with the previous methods.

Keywords: Flood routing, Muskingum method, hydrological routing, streamflow

2018, 52 pages

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyerek yol gösteren Danışman Hocam Prof. Dr. Mesut Çimen'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tezimin her aşamasında beni cesaretlendiren, destekleyen eşim Semih SAY'a ve doğduğu günden beri ailemize şans getiren sevgili oğlum Fikret Ediz'e sonsuz teşekkür ederim.

İclal ŞATSU SAY
İSPARTA, 2018



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Bir akarsu parçasına giren ve çıkan akımların hidrografları ve akarsu parçasında depolanan hacim.....	31
Şekil 3.2. Bir akarsu bölümünde taşkın esnasında meydana gelen depolama şekilleri.....	32
Şekil 3.3. Akarsu parçasında depolama ile çıkan akım arasındaki anahtar eğrisi	33
Şekil 3.4. Klasik Muskingum yöntemine göre bir x değeri için K 'nın belirlenmesi	34
Şekil 4.1. Değirmendere çayı taşkın hidrografları.....	40
Şekil 4.2. Wilson (1974) verisi taşkın hidrografları	42
Şekil 4.3. River Wyeverisi taşkın hidrografları.....	44
Şekil 4.4. Viessman and Lewis (2003) verisi taşkın hidrografları	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Değirmendere Çayı Taşkın Değerleri ve Hesap Sonuçları.....	39
Çizelge 4.2. Değirmendere Çayı Taşkını Hata Değerleri	39
Çizelge 4.3. Taşkın Değerleri (Wilson, 1974) ve Hesap Sonuçları.....	41
Çizelge 4.4. Wilson Verisi Hata Değerleri.....	41
Çizelge 4.5. River Wye Taşkın Değerleri (NERC, 1975) ve Hesap Sonuçları.....	43
Çizelge 4.6. River Wye Verisi Hata Değerleri	44
Çizelge 4.7. Taşkın Değerleri (Viessman and Lewis, 2003)ve Hesap Sonuçları.....	45
Çizelge 4.8. Viessman and Lewis (2003) Verisi Hata Değerleri.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	En kesit alanı
a	Giren akım için ağırlık katsayısı
b	Çıkan akım için ağırlık katsayısı
g	Yer çekimi ivmesi sabiti
I(t)	Giren akımın hidrografi
n	Manning katsayısı
O(t)	Çıkan akımın hidrografi
Q	Debi
R	Hidrolik yarıçap
S	Akarsu parçasındaki depolanma
S_f	Sürtünme eğimi
S_0	Kanal yatağı eğimi
t	Zaman
x	Kanal eksenı boyunca olan mesafe
α	Sabit katsayı
β	Sabit katsayı
γ	Sabit katsayı

1. GİRİŞ

İnsan toplulukları için başta ölüm olmak üzere ekonomik ve sosyal kayıplara neden olan, genel hayatı ve yaşam idamelerini belirli bir süre duraksatarak yaşandığı bölgedeki geniş halk kitlelerini olumsuz olarak etkileyen, doğal veya insani etkiler kaynaklı olaylar “afet” olarak tanımlanmaktadır. Dünya genelinde birçok ülke; iklim koşulları, jeolojik ve coğrafi özelliklerine bağlı olarak zaman zaman çok önemli boyutlarda mal ve can kaybı ile sonuçlanan meteorolojik orijinli doğal afetlere maruz kalmaktadır (Kılıçer vd., 2000).

Doğal afet olarak taşkın, bir akarsuyun çeşitli nedenlerle yatağından taşarak, çevresindeki arazilere, yerleşim yerlerine, altyapı tesislerine ve canlılara zarar vererek, etki bölgesinde normal sosyo-ekonomik faaliyeti kesintiye uğratabilecek ölçüde bir akış büyüklüğü oluşturması olayıdır. Bu tanımı, deniz sahillerine mücavir bölgelerdeki dalga hareketlerinden kaynaklanan kıyı taşkınları, göllerdeki seviye değişiklikleri ile dalga etkilerinden kaynaklanan göl taşkınları ve buzul erime ve parçalanmalarından kaynaklanan buz hareketi taşkınları ile genişletmek mümkündür (Uşakay ve Aksu, 2002). Taşkın, doğal ve yapay olarak teşkil edilen ana (normal) yataktan taşarak çevredeki arazileri su altında bırakan akış miktarları, genellikle taşkın olarak tanımlanır. Kritik taşkın seviyesi, yerel özelliklere göre belirlenen ve bu değerin üzerine çıktığında akarsuyun taşkın halinde olduğu kabul edilen su seviyesidir (Erkek ve Ağırlioğlu, 1993).

Bir taşkın dalgası, akarsu yatağı, kapalı mecra veya biriktirme haznesinden geçerek mansaba doğru ilerlerken değişime uğrar. Bu değişim, taşkın dalgasının geçtiği kesimin suyu geri tutma (depolama) özelliklerine bağlı olarak az veya çok olur. Taşkın dalgası geçişi sırasında zamana göre bir miktar ötelenmesi için bu harekete taşkın ötelenmesi denir (Erkek ve Ağırlioğlu, 1993). Taşkınların sebep olduğu zararlar ve bunun neticesinde alınan önlemler, o yerin ekonomik değerleriyle doğru orantılıdır. Ekonomik değeri yüksek olan bölgeler taşkınlar neticesinde daha fazla etkileneceğinden alınan önlemler de bu yönde daha derin çalışmaları beraberinde getirmiştir. Yalnız bilimsel yaklaşım bölgenin ekonomik kayıplarından ziyade, taşkınların ortaya çıkaracağı zararları en aza indirme doğrultusunda çalışmalar yapmıştır. Ölümle sonuçlanan afetler içerisinde taşkınların oranı dünya üzerinde

önemli bir paya sahipken ülkemizde yeterli araştırmaların yapılmamasından geriye dönük veri eksikliği söz konusudur. Taşkınlar insan hayatının sona ermesi dışında yaralanmalar, taşkın sonrası meydana gelen hastalıklar, iş gücü kaybı ayrıca alt ve üst yapı zararları, endüstriyel gerileme, tarım alanlarında ürün kayıpları ve bu alanların kullanılamaz hale gelmesi, elektrik ve kanalizasyon şebekelerinde bozulma ülke ekonomisini derinden etkilemektedir. Daha sonrasında bu bölgelerin iyileştirilmesi ve yine aynı şekilde kullanılabilir hale gelmesi ekonomik yükleri beraberinde getirir.

Taşkın doğanın getirilerinden biri olsa da bunun bir afete dönüşmesi ve toplumların bundan etkilenerek yaşamlarının sekteye uğraması, doğal denge üzerine yaptığı müdahalelerin bir sonucu olabilmektedir. Bu çerçevede, ülkemizdeki taşkınları meydana getiren yağışların daha çok ilkbahar ve sonbahar aylarında olduğu görülmektedir.

1.1. Taşkın Tahmin Yöntemleri

Bir yağış sonrasında, belirli ve sınırlı bir zaman aralığında bir su yatağına giren su akımının, yatak taban uzunluğuna bağlı olarak mansaba ilerlemesi sırasında taşkın dalgasının uzun dalga boyuna ve küçük genliğe dönüşmesiyle sonuçlanan, ilerlemesiyle niteliklerindeki değişimleri beraberinde getiren olay taşkın olarak tanımlanmaktadır. Taşkın ötelenmesi ise taşkın dalgasının bir kesitten başka bir kesite hareket ederken geçirdiği değişimin araştırılmasıdır.

Baraj ve sedde gibi yapıların yapımında ve hesabında taşkın hidrograflarının belirlenmesi ve akarsuyun belirli bir noktasındaki su seviyesinin tahmini, ortaya çıkacak çalışmanın daha net sonuçlar vermesini sağlar. Taşkın havzası alanı belirlenirken ve barajlar için yapılan yıkılma analizlerinde, genellikle akarsulardaki kontrol yapılarının mansabındaki su kalitesinin devamlılığının sağlanmasında ve taşkın devir çözümlemelerinde kullanılacak kayıp taşkın piklerinin belirlenmesinde taşkın ötelenmesi tekniklerine ihtiyaç duyulur. Ayrıca taşkın ötelenmesi teknikleri hem sel baskını haritalarının hazırlanmasında da hem de taşkın sırasında insani değerlerin korunması için önemlidir.

Hidroloji mühendisliğinde, taşkın kontrol problemlerinin tüm çözümlerinde ve bir taşkın tahmin yöntemi çalışmalarında, bazı metotlara gerek duyulur. Bu amaçla kullanılan taşkın öteleme teknikleri hem kanallara hem de haznelere uygulanabilmektedir. Taşkın öteleme hesaplamalarında, akarsulardaki akımın üniform olmadığı ve zamanla değişken olduğu kabulleri yapılır.

Bu yöntemlerden birisi olan deneysel öteleme metotları, sadece katsayıların kullanımını kapsamaktadır. Bu katsayılar sezgiye ve geçmiş taşkın olaylarının gözlemlenmesine dayanarak elde edilir. Giriş ve çıkış akımları arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için nehirde yeterli miktarda giriş ve çıkış akımlarının ölçülmüş olması gerekmektedir.

Taşkın öteleme yöntemlerinden diğer bir yöntem hidrolojik modellemedir. Bu modelde, akım ötelenirken akarsu uygun uzunluktaki parçalara ayrılır. Akarsuyun en yukarısındaki (membaındaki) parçadan başlayarak sırayla her bir parça için giriş hidrografi bilindiğine göre çıkış hidrografi hesaplanır. Elde edilen çıkış hidrografi bundan sonraki parçanın giriş hidrografi olarak hesaplar devam ettirilir. Hem taşkın ötelenmelerinde hem de hidrolojik modellemeler içerisinde en çok kullanılan ve ilk yöntemlerden birisi Muskingum modelidir (McCarty, 1938). Bu model, bir kontrol hacmi için süreklilik denklemini ve basit bir doğrusal depolama eşitliğine dayanmaktadır. Daha sonraki tarihlerde, bu doğrusal model doğrusal olmayan modellerle ele alınmıştır.

Taşkın öteleme yöntemlerinden sonuncusu ve hidrolik modeller olarak bilinen ve hem süreklilik denklemini ve hem de momentum (hareket) denklemini göz önüne alan modellerdir. Taşkın sırasında akımın ana yataktan sel yatağına yayılması, problemi daha da karmaşık bir hale getirir. Yan kollar, baraj hazneleri, köprüler ve kesit değişimleri de su yüzeyinde kabarma etkileri oluşturur. Bu gibi olaylar Saint Venant denklemleri ile incelenir. Bir akarsu yatağında enerji kayıplarını belirlemek zor olduğundan enerji denklemi hesaba ilave edilmez. Süreklilik ve momentum denklemleri yardımıyla her kesitte debinin ve akım derinliğinin zamanla değişimi belirlenir. Denklem takımının çözülmesi zor olduğundan bir takım basitleştirmeler yapılmıştır. Bu basitleştirmeler akarsu boyunca her noktada akımın zamana göre değişimi belirlenmiş ve bazı terimler ihmal edilerek farklı yöntemler bulunmuştur.

Bu yöntemlerden kinematik dalga modeli; sürtünme eğiminin kanal yatak eğimi ile dengelendiği, düzgün kararlı akım şartlarındaki hareketin denklemi varsayımına dayanır. Bu yaklaşım birinci tür konvektif-difüzyon denklemine öncülük eder. Düzgün, kararlı akımdan anlaşılan tek değerli debi-kesit alanı ilişkisinin varlığıdır. Bu şekilde, kinematik dalga denklemi difüzyonu değil, konveksiyonu açıklar. Bu model, yeni teorik çalışmalarda desteklenmiş, bu çalışmalar ya yatak eğiminin dik ya da taşkın süresinin geniş olduğu durumlarda uygulanabilmiştir. Hidrolik modellerden bir diğeri de difüzyon dalga modelidir. Hareket denkleminde ki atalet terimlerinin diğer terimlerle kıyaslandığında ihmal edilebilir olduğu varsayımına dayanır. Sürtünme eğimi, su yüzü eğimi ile dengelenmiştir. Bu dengelenme difüzyon dalga modelini bir tür kinematik dalga yaklaşımına benzetir, böylece uygulanabilirlik oranını arttırır. Fakat atalet terimlerinin önem kazandığı ve ihmalinin doğru olmadığı durumlarda model geçerliliğini kaybeder. Akarsu yatağı eğiminin büyük olmaması ve akım yönüne ters yönde yayılan kabarma etkilerinin (baraj hazneleri, yan kollar, kesit daralması, köprüler) bulunması halinde, yer çekimi ve sürtünme kuvvetlerinin yanında basınç ve atalet kuvvetlerinin de önem kazanmasıyla, taşkın öteleme modelleri içerisinde en çok kullanılan model dinamik dalga modelidir (Barry and Bajracharya, 1995).

1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenilen Yol

Bu tez çalışmasında, taşkın ötelenme yöntemleri ele alınmış ve hidrolojik yöntemlerden biri olan Muskingum modeli incelenmiştir. Literatürde Muskingum modeli ile yapılmış olan çalışmalar irdelenmiş ve bu çalışmada yeni bir Muskingum modeli ortaya konmuştur. Teklif edilen bu model ve diğer Muskingum modelleri, literatürde bulunan arazi örnekleri (gerçek örnekler) üzerinde uygulanarak, model parametreleri optimize edilmiş ve metotlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Bu amaca dayanarak, bu tez de izlenilen yol aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Birinci bölümde; konu hakkında bir giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümde; konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiş, üçüncü bölümde; tez konusu olan Muskingum metodu ile ilgili genel bir yaklaşım verilerek yeni bir çözüm metodu teklif edilmiştir. Dördüncü bölümde; göz önüne alınan taşkın dalgası örnekleri üzerinde teklif edilen yöntemin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar ile literatürde

Çeşitli metotlar ile daha evvel bulunmuş olan sonuçlar verilerek, yöntemlerin kıyaslaması ve tartışması yapılmıştır. Son bölüm olan sonuçlar kısmında ise, elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Akarsu yataklarında taşkın dalgasının ötelenmesi ile ilgili literatürde yapılmış olan pek çok teorik ve uygulamalı çalışmalar görülmektedir. Bu kısım da taşkın ötelenmesi ile ilgili çalışmalar iki kısım halinde, hidrolojik ve hidrolik esaslı yöntemler ele alınmıştır. Hidrolojik çalışmaların temelini oluşturan Muskingum metodu ve bu metoda dayanan diğer çalışmalar kısa tutulmuş ve üçüncü bölümde yöntem ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Hidrolik yöntemlerde ise, önemli görülen çalışmalar kısa bir şekilde özetlenmiştir.

2.1. Hidrolik Yönden Taşkın Dalgası Ötelenmesi ve Yapılan Çalışmalar

Sığ akıma sahip bir akarsu yatağı sisteminde taşkın dalgasının hareketine atalet, basınç, yer çekimi ve sürtünme kuvvetleri etkiye bulunmaktadır. Taşkın dalgasının hareketi sırasında ve baraj yıkılmaları ya da büyük rezervuar tahliyesi gibi akım karakteristiklerinde meydana gelen büyük süreksizliklerde üniform olmayan akım ve kararsız akım durumları oluşur (Ramirez, 2000). Dinamik dalga denklemleri, açık kanallarda bir boyutlu kararsız akım problemlerinin en doğru ve en kapsamlı çözümlerinin elde edilmesi için dikkate alınır. Ancak bu denklemler, belirli varsayımlara ve bundan dolayı bazı sınırlamalara dayanır. Denklemlerin oluşturulmasında aşağıdaki varsayımlar göz önünde bulundurulur:

- a- Herhangi bir kanal kesitinde akım yüzeyi yataydır ve kesitteki hız ortalama akım hızı olarak alınabilir.
- b- Akımın her bir noktasında hidrostatik basınç kabulü yapılır ve tedrici değişken akım hali mevcuttur, bundan dolayı düşey ivmeler ihmal edilebilir.
- c- Yatay ikincil çevrintinin meydana gelmediği varsayılır.
- d- Kanal sınırları sabit olarak dikkate alınır, bu nedenle herhangi bir erozyon ve oturma meydana gelmediği varsayılır.
- e- Akım üniformdur ve akım direnç kuvvetleri Manning ve Chézy denklemleri ile tanımlanabilir.

Dinamik dalga denklemleri; taşkın dalgası ötelenmesi, bir akarsu sistemindeki hız ve yüzey kotları, bir kanal sistemindeki akım ötelenmeleri gibi akım problemlerinde

geniş ölçüde uygulanır. Dinamik taşkın öteleme denklemleri Saint Venant denklemleri olarak bilinen aşağıdaki süreklilik ve momentum denklemleri olarak göz önüne alınır.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_0 \right) = 0 \quad (2.2)$$

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (2.3)$$

Burada; x kanal ekseni boyunca mesafe, t; zaman, Q; debi A; enkesit alanı, g; yerçekimi ivmesi sabiti, S_f; sürtünme eğimi, S₀; kanal yatağı eğimi, n; Manning katsayısı ve R; hidrolik yarıçaptır.

Bu denklemlerin çözümü kapalı veya açık sonlu fark teknikleri ile yapılır. Denklemler kanal boyunca t zaman ve x mesafe artımları için çözülür. Momentum denklemleri, denklemdaki farklı terimlerin göreceli önemlerine bağlı olarak, farklı uygulamalar için sadeleştirilebilir. Tam dinamik dalga denklemleri yaklaşımı, momentum denkleminin çeşitli sadeleştirmeleriyle birlikte süreklilik denkleminin birleştirilmesiyle elde edilir. Kararsız akımların tam denklemlerine ait yaklaşımların kullanılması momentum denklemindeki belirli terimlerin yatak eğimi ile karşılaştırıldığında küçük olması halinde kabul edilebilir (USACE, 1994). Denklem 2.2 'de verilen eşitlik aşağıdaki şekilde de gösterilebilir.

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte $\frac{\partial V}{\partial t}$, 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; $g \frac{\partial y}{\partial x}$, basınç gradyanı diye de adlandırılan basınç kuvvetinin mesafeye bağlı değişimini gösteren hidrostatik

basınç kuvveti terimi; gS_0 , yerçekimi kuvvet etkilerini gösteren yerçekimi kuvveti; gS_f sürtünme ya da direnç kuvvet etkilerini gösteren sürtünme kuvveti terimi şeklindedir. $\frac{\partial V}{\partial t}$ terimi kararsız, üniform olmayan akımlar için önemli olurken (Dinamik yöntem), $\frac{\partial y}{\partial x}$ terimi kararlı üniform olmayan akımlar için (Difüzyon yöntemi) ve $\partial y/\partial x$ terimi ise kararlı ve üniform akımlar için (Kinematik yöntem) önem kazanır.

Bu denklemlerin çözümü, karakteristik çizgiler ve sonlu fark yöntemlerinin kullanılmasıyla, eşitlikler içerisindeki zaman ve mesafe türevlerinin ayrıklaştırılmasına dayanır. Sonlu eleman teknikleri, hiperbolik sistemlerin entegrasyonunda özellikle tavsiye edilmemesine rağmen; sonlu eleman şemalarının uygulamaları üzerine çalışmalar çok sayıda yayımlanmıştır. Ayrıklaştırılmış zaman aralığının miktarı, Courant şartı olarak belirtilen bir üst limitten daha büyük olması durumunda; açık semalar stabilite problemleri meydana getirmektedir. 1960'lı yıllardan sonra, sonlu fark kapalı şemaları, lineerize denklem sistemlerinin tekrarlı çözümleriyle sonuçlandırılan taşkın ötelenmesi olayları çözümleri sayesinde geliştirilmiştir.

Pratik uygulamaların birçoğunda, Saint Venant denklemindeki ivme terimleri ihmal edilmiş ve sistem difüzyon dalga denklemi şeklinde sadece bir parabolik denkleme dönüştürülmüştür. Bazı şartlar altında bu denklem analitik olarak da çözülebilir. Süreklilik denklemiyle birlikte kararlı momentum denklemi üniform akım için farklı bir biçimde kullanılabilir. Hareketi bu modelle tanımlanan dalgalar kinematik dalga olarak tanımlanır. Dalganın bir özelliği olan debi, atalet kuvvetlerini dikkate almaksızın sadece süreklilik denkleminde elde edilir ve sadece su derinliğinin bir fonksiyonudur. Kinematik dalga teorisini oluşturan farklı denklemler ve bağıntılar içeren modellere literatürde rastlanmaktadır. Bir kanaldaki dalga hareketi tanımlanırken modelin kullanımı kinematik taşkın ötelenmesi olarak adlandırılır. Yatak eğiminin oldukça dik ve debi değişimlerinin küçük ölçülerde olması durumunda basınç ve ivme terimleri, yatak ve sürtünme eğimleri ile karşılaştırıldığında küçük olacaktır. Bu nedenle sürtünme eğimi ve yatak eğimi yaklaşık olarak birbirine eşittir. Kinematik dalga yaklaşımı olarak adlandırılan bu durumda akım sadece mansaba ötelenebilir. Her bir kesitteki su seviyesi kotları

Manning denklemi ile hesaplanabilir veya herhangi bir debi için tek değerli anahtar eğrisinden elde edilebilir. Kural olarak; kinematik dalga yaklaşımı, hidrografın şekline bağlı olarak, eğimin yaklaşık 0,002 değerinden büyük olduğu durumlarda uygulanabilir. Yapılan çalışmalar, kinematik dalgaların akarsu akımlarının analizine uygun olmadığını göstermiştir. Kinematik dalga ile hesaplanan taşkın dalgası davranışının karakteristik özelliği, yanal giriş ve çıkış akımlarının olmadığı durumlarda, pikte çok az bir azalmaya sebep olmasıdır (USACE, 1993).Aşağıda, hidrolik açıdan taşkın öteleme çalışmaları derlenmiştir.

Mozayeny ve Song (1969), memba kesiminde, 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. Çalışma sonucunda, sönümleme katsayılarının başlangıç şiddetinin, Manning sürtünme katsayısının ve kanal eğiminin bir ilişki olduğu, bundan dolayı da birim hidrograf metodunun dikkatli kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Ponce vd. (1978), kinematik ve difüzyon modellerinin uygulanabilirliğini, dinamik, difüzyon ve kinematik modeller için kararlı üniform akımların sinüsoidal karşılıkların ve yayılım karakteristiklerini karşılaştırmak suretiyle değerlendirmişlerdir.

Ponce vd. (1979), konvektif denklemin stabilitesini 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 dâhilinde her ikisi için ikinci dereceden doğruluğun mümkün olduğunu göstermek için Von Neumann ve Hirt analizlerini kullanmışlardır. Konvektif denklemin açık şemasının sayısal özelliklerinin birleştirilmiş kurumsal yönteminin verildiği bu çalışmada, yavaş değişen Courant sayısının bulunduğu durumlar için teoremin, mutlak stabiliteyi ve açık formülasyonun iskeleti dâhilinde ikinci derece doğruluğa ulaşabileceğini ortaya koymuşlardır.

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 uygulamışlardır. Temel difüzyon denklemini, ortalama bir derinlik değeri etrafında doğrusallaştırmışlar ve durgun su etkileri ile yanal akımları da hesaba katan sınır şartları kullanarak çözmüşlerdir.

Keskin (1989), kinematik model kullanarak dikdörtgen, trapez ve üçgen kesitli akarsularda taşkın ötelenme hesaplarını yapmış, çıkan sonuçları birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Akıma ait temel denklemleri çıkarmış, bu denklemleri kinematik modele dönüştürmüştür. Modelin uygulanacağı farklı tip en kesitli akarsulardaki akım alanının başlangıç ve sınır şartlarını dikkate alarak sonlu farklar yaklaşımı ile çözüm yapmış, ötelenmeye etki eden faktörleri ve bunların etki biçimlerini ortaya koymuştur. Dikdörtgen ve trapez kesitli akarsularda, üçgen en kesitli akarsularda taşkın hızının daha düşük olduğunu, zaman ve mesafe aralığının ters orantılı olduğunu, kinematik modelin Muskingum modeline göre kolay uygulanabilir olduğunu belirlemiştir.

Schmid (1990), birbiri ardına gelen iki yüzey üzerinde, sabit etkili yağış şiddeti varsayımı ve 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, modeli 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 analize uğramıştır. Şok dalga şekilleri üzerinde çalışmıştır. Çalışma sonunda iki düzlemli 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 hemde bu tür dalgalar olmaksızın türbülanslı akım durumları için Muskingum -

Cunge ötelenmesinin yeterli sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur. Şok dalgasız laminar akımlar için iyi sonuçlar elde etmiş ancak şok dalga etkili laminar 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, uygulamadaki hesaplamalarda dikkate alındığı biçimde olup olmadığı sorularının ışığında Kinematik Dalga kavramını yeniden gözden geçirmiş, uygulamada alanların 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, hidrolik yayılımı kullanarak yüzey akışı için bir denklem oluşturmuş, denklemi, parabolik denklemler için sayısal tasarım yardımıyla hem analitik hem 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 oluşturduğunu 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 ilişkisi olduğunu, pratik akış hesaplamalarında Kinematik dalga metodunun 2.5 km²'den küçük özellikle fiziksel detayların, modelin deterministik yapısıyla uzlaşmadan çözülebildiği durumlarda, birim hidrograf metodunun ise 2.5 km²'den büyük 1000 km²'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.

Shultz (1992), hazırlamış olduğu tezde, çok geniş bir kanalda hızlı yükselen hidrografın ötelenmesi için taşkın ötelenme metotlarının karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmasında, Muskingum-Cunge metodunun tavsiye edilen metot olduğunu, Muskingum metodunun ötelenme benzeşiminin mansap hidrografiyle uyuşması halinde diğerlerinden daha iyi olduğunu ifade etmiştir.

Ponce (1994), değişken parametrelili Muskingum - Cunge Modelini yeniden değerlendirmiştir. Modelin doğrusal ve doğrusal olmayan biçimlerine ait özellikleri vermiş, doğrusal moda hesaplamanın başında ötelenme parametrelerinin hesabında ortalama akım değerini kullanmış ve bunları hesaplama zamanı boyunca sabit tutmuştur. Doğrusal olmayan modda ise bölgesel akım değerlerinin bir ilişki gibi ötelenme parametrelerini her hesaplama 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 alternatifi olduğunu ortaya koymuştur.

Ponce ve Huston (1994), taşkın dalgalarına ait konveksiyon-difüzyon ve dağılımın 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 konvektif dalga yayılım hızı (c) veya taşkın dalga hızı, hidrolik geniş kanallarda Chezy sürtünmesi için D difüzyon katsayısı veya hidrolik difüzivite, F Froude katsayısı ve η dispersiyon katsayısı veya hidrolik dağılıma ait formülasyon ile Ponce tarafında Froude ve Verdnikov sayılarına bağlı olarak değiştirilmiş

değerlere ait formülasyonu vermişler, konveksiyon-difüzyon-dağılım denkleminin boyutsuzluğunu ortaya koymuşlardır. Froude sayısının, esas hızın rölatif dinamik denklemine bir oranı, Verdernikov sayısının ise rölatif Kinematik dalga yayılım hızının, rölatif dinamik dalga yayılım hızına bir oranı olduğunu göstermişlerdir. Hem difüzyon 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 ilişkisi 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 problemi genel sonlu fark şemasından başlayarak irdelenmişlerdir. 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 şemasını 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 belirlemişler, verilen şartların doğru çözümlerinin ispatı için sayısal örneklere yer ermişlerdir. Çıkarılan şartların topraktaki reaktif kimyasal geçişinin Freundlich tipinin yumuşak doğrusal olmayan etkileri olduğunu, uygulamada toprak profilin 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 olmasından ötürü, Cunge tarafından

değiştirilip Muskingum - Cunge modeli adını alan model detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

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 denklemin 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.

Çimen (1995), akarsu yatağındaki taşkın dalgasının ötelenmesi probleminde, difüzyon yöntemini kullanmış ve farklı geometrilerdeki akarsu kesitlerinde taşkın dalgasının ilerlemesini incelemiştir. Çalışmada akarsu yatağı taban eğiminin, yatak şevinin, en kesit şekillerinin ve ayrıca mesafe ve taşkın dalgası süresinin etkileri sonlu farklar tekniği ile araştırılmış ve taşkın hidrografının yükselen ve alçalan kısımları için kesit alanı ve debi bağıntılarını teklif etmiştir.

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 öteleme modellemesi için test etmişlerdir. Denklemin iki parametresi olan dalga yayılım hızı ve difüzyon hızının 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. Moussa ve Bocquillon (1996b), Parabolik Difüzyon dalga denkleminin çözümünde Crank-Nicholson sonlu fark yaklaşımının kullanılmışlardır. Sayısal metotların değerlendirilmesinde üç hata kriterini (maksimum debi, zamanda maksimum pozisyon ve giriş sinyali tarafından oluşturulan stabilitesizlik) seçmişler, her üç algorithmada da testlerden olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Sonuçlar aynı zamanda x aksı yönündeki durumun rotasyonla değiştirilmesi halinde yeni algoritmaların etkisinin önemli ölçüde gelişebildiğini ortaya koymuştur.

Ponce vd. (1996), uzun yıllardan beri taşkın modellenmesinde e tahmininde başarıyla uygulanan Muskingum - Cunge modelinde 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 sönmülemeyi, 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.

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 şemaninkine 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 kanıtlamıştır. Çeşitli çözümlerin verimliliklerini gerçekçi sürekli sınır şartlarına dayanan örnekler kullanılarak bir Crank Nicolson çözümü ve doğrusal difüzyon denklemi ile karşılaştırılarak çalışmanın sonunda doğruluk kriteri de göz önüne alınarak kullanımı uygun olan ve olmayan formülasyonları vermişlerdir.

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 karşılaşılardan tek bir anahtar eğrisinin mümkün olduğu mansap kontrol kesitinin bölge seçimi için bir kriter sunmuşlardır. Önerdikleri kriteri ipotetik 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 sair 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 karakteristiklerine 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.

Cunge (1999), çalışmasında, Bajracharya ve Barry tarafından hazırlanan lineerleştirilmiş difüzyon taşkın dalgası ötelenmesi için doğruluk kriterlerinin verildiği çalışma ile bunun üzerindeki Szymkiewicz tarafından hazırlanan kinematik ve difüzyon dalgalarının benzerliklerinin ortaya konulduğu çalışmalar hakkındaki görüşlerini ortaya koymuştur. Muskingum metodunun gerçekte bir başlangıç değer fonksiyonu olduğunu fakat tam difüzyon dalga problemi yaklaşımının yetersiz

olduğunu, bunun sebebinin de herhangi bir dalga çözümünde gerekli olan mansap sınır şartlarının dikkate alınmadığını ifade etmiştir. Bundan dolayı Muskingum metodunun dik akarsular için kullanılabileceğini, bu tür akarsuların hesaplamada mansap sınır şartı etkilerini azalttığını belirtmiştir. Metodun en kesit geometrisindeki düşey değişimleri, dikkate almadığını, bu yüzden genellikle uygulamalarda verilen akarsu için gözlenmiş ya da hesaplanmış değerler kullanılarak kalibre edilen K ve x parametrelerine yer verildiğini, metotta, kinematik dalga denklemi içinde yer alan bir hipotez olan kapalı bir tek değerli anahtar eğrisi varsayımının kullanıldığını ifade etmiştir. Difüzyon dalga denkleminin, sadece bir boyutlu kararsız akım problemlerinin bir yaklaşımı olduğunu, atalet teriminin direnç terimleriyle karşılaştırılmadığı sürece denklemin doğru sonuç vermeyeceğini ve taşkın dalgasını doğru simüle edemeyeceğini belirtmiştir.

Tsai (2005), hafif eğimli akarsularda kararsız tedrici değişken akımların, derinlikteki değişimlerine mansaptaki durgun suyun etkisinin olduğunu teorik olarak keşfetmişlerdir. St. Venant denklemleri ve diğer öteleme modelleri, taban akışı için doğrusallaştırılmıştır. M1 ve M2 su yüzeyi profilleriyle birlikte kritik altı akımın kararlı ve boyutsal değişimini yönetmişlerdir. Dalga hacminin yükselmesi ya da azalmasıyla ilgili fiziksel mekanizmaların çalışmalarında lineer stabilitenin, akım boyutlarının değişim gösterdiğini kabul etmişlerdir. Dalga sayılarını, tüm aralıklardaki kanal özelliklerine göre ifade etmişlerdir, dalga hızı ve dalga sönümlenme faktörü gibi yayılım karakteristiklerinin analitik tanımlarıyla üniform akım, Froude sayısı tanımlanamayan dalga sayısını, taban akış derinliği ve yatak eğimi olarak tanımlamışlardır. Mansaptaki durgun suyun dalga karakteristiklerine olan etkilerini geniş taşkın öteleme modellerinde konu etmişlerdir.

Kazezyılmaz-Alhan vd. (2005), kinematik ve difüzyon dalga teorilerini gözden geçirdikleri bir çalışma sunmuşlardır. Zaman ve mesafede ikinci mertebeden doğruluğa sahip biri açık diğeri kapalı formda olmak üzere sırasıyla MacCormack ve 4 noktalı kapalı sema kullandıkları 2 sayısal sema oluşturmuşlardır. Elde ettikleri sayısal yaklaşım sonuçlarını iki sentetik akımın kinematik ve difüzyon denklemlerinin analitik çözüm sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Zaman adımları büyüklüklerini CFL (Courant–Friedrichs–Lewy) stabilite şartlarından seçtiklerini bildirmişler, özel bir analitik çözümle karşılaştırıldığında 4 noktalı kapalı metodun

kinematik dalga çözümünün daha doğru sonuç verdiğini, bunun MacCormack metodundan daha ağır olduğunu ve formüle etmenin MacCormack metoduna göre daha zor olduğunu belirlemişlerdir. MacCormack metodu kullanarak elde ettikleri sonucun pratik amaçlar için yeterince iyi olduğunu, hesaplama açısından ise en etkili metot olduğunu ifade etmişlerdir. MacCormack metodunun, kinematik veya difüzyon dalga denklemlerinin çözümünde kullanılan lineer sema açık metot ve kapalı metot üzerinde bir çözüm tekniği olarak tercih edilmesi gerektiği sonucunu çıkarmışlardır.

Fan ve Li (2006), uniform ve toplanmış yanal akımla birlikte hidrolik açıdan homojen olmayan terimlerle birlikte difüzyon dalga denklemi üzerinde çalışmışlardır. Bütün çözümleri, K fonksiyonu olarak adlandırdıkları sonuç fonksiyonuna bağlı olan birleştirilmiş bir formda sistematik olarak tanımlamışlardır. K fonksiyonunun integrasyonunu, S fonksiyonuna çevrilen Laplace dönüşümünü kullanarak elde etmişler, genellikle debide ve hem mansap sınır şartına hem de yanal akıma bağlı olarak memba su yüzeyi seviyesinde azalmaya sebep olan durgunsu etkisini analiz etmişlerdir. Sırasıyla memba sınır giriş akımı, mansap sınır çıkış akımı ve yanal giriş akımlarında kanalın debi atım hidrograflarını S fonksiyonu kullanarak ötelemişlerdir. Sonsuz bir kanaldaki yanal akım etkisinin incelenmesiyle birleşim noktasında maksimum durgunsu etkisinin görüldüğünü, memba yönünde birleşme bölgesinde ilerleyen akımla bu etkinin azaldığını belirlemişlerdir. Dahası yanal giriş akımının söz konusu etkiye sınır şartlarıyla birlikte bariz bir şekilde tesir ettiğini ve mansap sınır şartlarının etkiyi arttırırken memba sınır şartlarının ise azalttığını göstermişlerdir.

Gasiorowski ve Szymkiewicz (2007), adveksiyon ya da adveksiyon-difüzyon akım iletim denklemi formunda sadeleştirilmiş taşkın ötelenmesi modellerinin klasik özelliklerini analiz etmişlerdir. Yaptıkları analizle, hem nonlinear kinematik hem de difüzyon dalga denklemlerinin sayısal çözümlerinde karşılaşılan kütle dengesi hatasının sebeplerini açıklamayı amaçlamışlardır. Kinematik dalga denkleminin varsayılan klasik formuna dayanan modelin ya kütlenin korunumu kanunu ya da momentumun korunumu kanunu ile uyum sağlayacağını, her iki kanunun sadece lineer denklemle es zamanlı olarak uyuşacağını, dahası, bilinmeyen debi değeri ile nonlinear difüzyon dalga modeli için kütle ve momentum dengesi hatalarının ortadan

kaldırılmayacağını belirlemişlerdir. Akım debisindeki mesafe türevinin karesini içeren terimden dolayı etkilenen momentum ve kütle dengesi nedeniyle görece küçük olan tedrici değişen dalgalara göre, dik dalgalarda daha önemli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Tadjeran ve Meerschaert (2007), klasik difüzyon denkleminin genelleştirilmiş hali olan mesafe kesitli difüzyon denkleminin, akımların süperdifüzyon problemlerinin pratik modellemelerinde kullanıldığını, çalışmada ise kesitli süperdifüzyon diferansiyel denklemin çözümü için kullanılabilecek doğru ve etkili bir sayısal metot sunduklarını belirtmişlerdir. Bu sayısal metodun, şartsız kararlı ikinci dereceden doğru bir sonlu fark metodu elde etmek için Crank-Nicolson ayrıklaştırmasıyla kapalı bir yaklaşımı ve Richardson ekstrapolasyonunu birleştirdiği, dolayısıyla metodun kararlılığı ve uygunluğunun sağlandığını bildirmişlerdir. Bilinen bir analitik çözümle birlikte bir süper difüzyon denklemi örneğinin sayısal çözümünü ve metodun doğruluk yakınsamasını göstermek için hata analizini sunmuşlardır. Yakınsama derecesini düzeltmek için ve yüksek dereceden doğruluklu bir metot elde etmek için Richardson ekstrapolasyonunu başarıyla uygulamışlar, ortalama bir çözüm için Dirichlet sınır şartlarını ele almışlardır.

Witek vd. (2008), yaptıkları çalışmada, bir boyutlu yayılım-difüzyon denklemini integre etmek için iki kararlı ve açık sayısal metot sunmuşlardır. Kullandıkları şemaların tasarım açısından kararlı olduğunu ve açık metodun da kararlı hale getirildiği sanal bir ağ kurularak yarı Lagrangian metodunun kullanıldığı genel konsepti uyguladıklarını belirtmişlerdir. Sabit difüzyon katsayıları kullandıklarını, hataları, problemin iki serbest parametrenin fonksiyonu olarak kararlı ve açık metot ile elde ettiklerini, pratikte bunun σ_0 ve S arasındaki oranın bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir. Bu oranın büyük değerlerinin, kapalı metotla karşılaştırıldığında çok doğru sonuçlar verdiğini, düşük değerlerinin kapalı metottan daha az doğru sonuçlar ortaya koyduğunu göstermişlerdir. Akım denkleminin çözümünde kullandıkları iki kararlı ve açık sema ile adveksiyon difüzyon denkleminin birleştirildiği tek bir sayısal algoritmayı çözmeyi, difüzyon için kararlı ve açık metot, adveksiyon için yarı Lagrangian metot kullanan kademeli adım yaklaşımı kullanmayı amaçlamışlardır. Birleştirilmiş yaklaşımı ayrıntılı bir şekilde incelemişler ve sonuçları kapalı sonlu fark semalarıyla karşılaştırmışlardır.

Adveksiyon difüzyon değerlerine ve δ parametresine bağlı olarak değişken hata elde etmişler ancak adveksiyon ve difüzyon sayılarının birleştirilmesiyle maksimum hatanın sadece σ_0 ve S arasındaki orana bağlı olduğunu göstermişlerdir. Daha fazla difüzyon veya adveksiyonun problemi baskıladığını, daha küçük hataların, açık adveksiyon difüzyon denklemi kullanılarak elde edildiğini belirtmişlerdir. Hatayı minimize etmek için $\delta = 2/3$ olduğu durumlarda difüzyonun adveksiyonu baskıladığı durumlar hariç $\delta \rightarrow 0$ için en iyi sonuçları elde etmişlerdir. Sadece difüzyon semaları karakteristiklerinin benzer hatalarına sahip olmak üzere kademeli adımlar versiyonunun tüm analiz durumları için en iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Ahmed ve Tanaka (2009), yaptıkları çalışmada Japonya’da ki bir nehrin dinamik durumunu inceleyerek, nehri difüziv model teknikleriyle incelemişlerdir. Mamba bölgesinde arazi ve nehirdeki difüziv akımları serbest yüzeyde akım denklemlerinden biri olan difüzyon dalga yaklaşımıyla ötelemişlerdir. Nehrin mansap bölgesinde ise nehirdeki akımı bir boyutlu dinamik dalga denklemiyle ötelemişlerdir. Nehrin 11 farklı kesitinde tahminler yapılmıştır. Yanal akımların nehir dinamiğinde önemli etkilere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Delphi vd. (2010), Saint Venant denklemlerinin tam dinamik denklemi ile difüzyon dalga denklemine İran da ki Karun nehrinin bir bölümünde kıyaslamışlardır. Yazarlar bu nehirde difüzyon denklemiyle oldukça iyi sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir.

Tavakoli ve Zarmehi (2011), Saint Venant denklemlerinin çözümünde sonlu eleman metoduyla çözümünün uzun zaman aldığını, şayet kanal uzunluğunun büyük olması halinde sistemin kolay bir şekilde çözülemeyeceğini ve bu nedenle iteratif metotların kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Yazarlar, Saint Venant denklemlerinin çözümü için 3 tane uyarlamalı sonlu eleman metodu teklif etmişlerdir. Bu metotların taşkın ötelenmesinde daha hızlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Barati vd. (2012), doğal nehirlerde dinamik yöntemle taşkın ötelenmesinde mansaptaki hidrografın doğruluğunu araştırılması gerektiğini ve buna etki eden girdi parametrelerinin öteleme probleminde çok etkili olduğunu belirtmişlerdir. Proje hidrografının karakteristikleri üzerinde daha düşük Manning pürüzlülük katsayısının değerlerinde ve daha yatak eğiminde, kanal karakteristikleri üzerinde daha büyük

çarpıklık faktörü ve pike ulaşma zamanlarında, Δx uzunluğu üzerinde daha büyük Manning pürüzlülük katsayısı ve yatak eğimi değerlerinde ve Δt ve ağırlık faktörü üzerinde daha düşük Manning pürüzlülük katsayısının ve daha dik yatak eğimi değerlerinin etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Liu vd (2012), lineer difüzyon dalga denklemi için Lattice Boltzmann metodunu geliştirerek Muskingum metoduyla karşılaştırmışlardır. Metodun Muskingum metoduna göre daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Hossain ve Ema (2013), kinematik dalga denkleminin çözümünün sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleriyle yapmışlar ve bunlar için bir bilgisayar programı sunmuşlardır.

Liu vd. (2015), bir boyutlu Saint Venant denklemlerinin çözümü için yeni bir Lattice Boltzmann yaklaşımı sundular. Geliştirilen modelin bir boyutlu sel rejimindeki akıma, baraj yıkılması dalgası akım durumunu ve bir nehirdeki taşkın olayına uyarlanmıştır. Sonuçların oldukça iyi olduğu vurgulanmıştır.

Atallah vd. (2016), Cezayir'deki kuru bir kanalda meydana gelen katasrofik hızlı taşkınların ötelenmesini göz önüne almışlardır. Bunun için Saint Venant denklemlerini çözmek için Runge-Kutta süreksiz Galerkin sonlu eleman şemasını kullanmışlardır. Model sonuçlarının gerçek değerlerle iyi simüle edildiğini ifade etmişler ve kullanılan bu şemanın 2 boyutlu serbest yüzeyli akımlara da uyarlanabileceğini belirtmişlerdir.

2.2. Hidrolojik Yönden Taşkın Dalgası Ötelenmesi ve Yapılan Çalışmalar

Açık kanallarda bir boyutlu kararsız akımların dinamik modellenmesi genellikle St. Venant denklemlerinin sayısal çözümlerine dayanır. Hiperbolik yarı lineer kısmi diferansiyel denklem sistemini meydana getiren St. Venant denklem sisteminin çözümü birkaç sayısal metotla yapılmaktadır. Büyük sistemler dikkate alındığında tam olarak problemin çözülmesi hem zaman almakta ve hem de analitik sonuçlar alınamamaktadır. Hidrologlar, depolama ötelenmesi, Muskingum ötelenmesi ve Kalinin - Miljukov ötelenmesi gibi pek çok alternatif sadeleştirilmiş modeller teklif

etmişlerdir. Çalışmaların tamamında, verilen mansap kesitinde hesaplanacak debiler, bir memba kesitindeki debilerin fonksiyonu olarak kabul edilmiştir. Modeller, hesaplama için az bir süreye ihtiyaç duyarlar fakat sadece akarsu kesitinin tüm etkilerini tanımlayabilirler ve kesitte yer alan hidrolik yapılardan etkilenmezler. Bu husus, birçok hidroloğun St. Venant denklemlerini neden sadeleştirmeye çalıştıkları sorusunun yanıtını oluşturur.

McCarthy (1938), Ohio ‘daki Muskingum nehrindeki taşkın kontrol amaçları için geliştirdiği Muskingum modeli, yaygın olarak kullanılan hidrolojik öteleme modellerinden birisidir. Model süreklilik ve depolama denklemlerinden meydana gelir. Süreklilik denklemi kütlenin korunumu esasına dayanır. Depolama denklemi ise doğrusal basit bir bağıntıdan meydana gelmektedir. Bu konu ile ilgili detaylar Bölüm 3’te verilecektir. Hidrolojik taşkın öteleme modelleri üzerinde yapılan çalışmalar aşağıda derlenmiştir.

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 denklemler ile 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 belirlemişlerdir. Sonuç olarak, değişen parametrelerin hesabında üç noktalı ve tekrarlamalı bir dört noktalı yaklaşımın taşkın dalgalarının doğru benzeşimini yapmada yeterli olduğunu, iki noktalı bir yaklaşımın pik debi ve geçiş zaman hesabında yanlış sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Ponce (1979), sadeleşmiş Muskingum ötelenme modeli üzerinde çalışmıştır. Geleneksel olarak K ve x parametrelerinin ölçülmüş giriş ve 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. Çalışma sonucunda Muskingum ötelenme modelinde mesafe ve zaman aralıklarının $x=0$, $K=t$ olarak belirlendiğini ve bu durumda ötelenme denkleminin basit bir ortalama hesabına indirgenmiş olduğunu ortaya koymuştur.

Strupczewski ve Kundzewicz (1980), Muskingum modeli varsayımları, model parametrelerinin değişkenliği ve doğasıyla ilgilenen hidrologistlerin 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 çalışmalar, 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 onaylanmışlardır. x 'in negatif değerinin geçiş prosedürü ile ilgili olarak model performansının yeterliliği azatlığını 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 çözümlemelerine dair mevcut katkıları gözden geçirmek ve test etmek, modeldeki doğruluğu korumak için bakış açısı kazandırmışlardır. Muskingum

difüzyon modelindeki mesafe ve zaman çözümlemelerine dair mevcut katkıları gözden geçirmek ve test etmek, modeldeki doğruluğu korumak için mesafe çözümlerine ait bir kriter geliştirmek amaçları doğrultusunda çalışmada mesafe adımları için yeni katsayılar tespit etmişlerdir.

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 modellemesini 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 sonuçlandığı 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 kullanılmayan bir eşitliğin kullanılmasının daha uygun olacağını sonuç olarak söylemiştir.

Shultz (1992), hazırlamış olduğu tezde, çok geniş bir kanalda hızlı yükselen hidrografın ötelenmesi için taşkın ötelenme metotlarının karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmasında, Muskingum - Cunge metodunun tavsiye edilen metot olduğunu,

Muskingum metodunun ötelenme benzeşiminin mansap hidrografiyle uyuşması halinde diğerlerinden daha iyi olduğunu ifade etmiştir.

Perumal (1994), zaman dağılım şemasına dayalı 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 ötelemenin başlangıcında, çıkış hidrografını batık ya da artık debi olarak ortaya koyan Muskingum modelinden daha gerçekçi bir biçimde benzeştirmesi olarak belirlemiştir.

Kshirsagar vd. (1995), Hindistan'daki Godavari akarsu kesitinde kontrolsüz yanal akışlar için Muskingum taşkın ötelenme modelini, yağış akış etki-tepki 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 program algoritması kullanılmıştır.

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 birlikte, kalibrasyonda parametre tahmini için etkili bir metodun eksikliğini göz önünde bulundurarak çalışmada iki doğrusal olmayan Muskingum ötelenme modelinin parametre tahmini için genetik algoritmasının nesnel bir yaklaşımı 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 parametrelerin tahmininde genetik algoritmanın etkili olduğu belirlenmiştir.

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 ipotetik 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 sair 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 karakteristiklerine 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 derlemesinin 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 ötelenme kullanılan tahmin değerlendirme ilişkisini yeniden düzenleyip dinamik akarsu depolamasını da hesaba katarak Güney Afrika'da Sabie Nehri üzerinde izlenen alana uygulamışlar ve doğruluğunu belirlemişlerdir.

Syzmkiewicz (2001), çalışmada tıpkı doğrusal rezervuarlarda olduğu gibi Muskingum modeli için de alternatif bir anlık birim hidrograf sunmuştur. Bu yaklaşımın iki model tarafından 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 IUH'ın, difüzyon dalga modeli için olan Anlık Birim Hidrograf (IUH) formunu alabildiğini ortaya koymuştur. Kanalin mansabında herhangi bir negatif debi oluşturmeyen taşkın dalgasının bir kanal boyunca geçişini ve sönümlenmesini eş zamanlı olarak yeniden oluşturabilmiştir. Sonuç olarak, klasik ani birim hidrografların mesafe yaklaşım sal 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 denkleminin bir uygulamasının sonucu olarak yorumlanabileceğini göstermiştir. Doğrusal difüzyon dalga için Hayami tarafından önerilen 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.

Birkhead ve James (2002), Muskingum modelini, kanal akımı ile değişken hidrolik kondüktiviteye bağlı olarak geçirimli kıyılara sahip akarsulardaki kıyı depolaması arasındaki etkileşimi daha açık bir şekilde değiştirmişlerdir. Muskingum geleneksel modelinin sadece kanal depolanmasını 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 depolaması açık ve kapalı bir şekilde hesaplamının, 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 temsilinin geliştirilmiş iki modelde de kıyı depolamanın açıkça hesaplanmasıyla sağlandığını göstermiştir. Giriş ve çıkış debi hidrograflarını kullanan kıyı depolamasını ihmal eden geleneksel Muskingum modelinin, anahtar eğrisi katsayılarına dair doğru olamayan tahminlerle sonuçlandığını, depo ağırlık faktörü değerinin düşürdüğü fakat zamana 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.

Al-Humoud ve Esen (2006), taşkın öteleme metotlarından biri olan Muskingum metodunda x ve K katsayılarını belirlemek için çeşitli teknikleri incelemişlerdir. Tek ana sorun, aynı akarsu üzerinde meydana gelebilecek akımların olması ve bu durumun parametrelerin neden olmasıdır. İstatistiksel analizlerle bu parametrelerin büyük değişimler gösterebildiğini göstermişlerdir. Hesaplarda kesin sonuçlar isteniyorsa, sonuçları elde ederken a ve K katsayıları için doğruluk derecesi önemli olmayabilir. Bu katsayıların kolayca nasıl tahmin ettiklerini iki metotla anlatmışlardır. İlk metot, giren ve çıkan hidrograflarının kesiştiği noktalardaki eğiminin hesabını ve maksimum depolama kapasitesinin bulunması esasına dayalı olduğunu belirtmişlerdir. İkinci metot giriş ve çıkış hidrograflarının iki özel noktadan hesaplanmasını içerir. 3 adımlı çalışmalarda, hidrografların lineer karakteristiklerinden türetilen geleneksel tahmin prosedürüyle kıyaslanabilir hale getirildiğini göstermişlerdir.

Choudhury (2007), Muskingum modelini taşkın öteleme şartlarının iki boyutlu basit kanallarda yatay akış olmadan kabul etmişlerdir. Muskingum modeli, sınırlı bir zaman aralığı ve mevcut akıma bağlı olarak mansaptaki akımı kararlaştırabilmek için tahmini bir form oluşturmuştur. Farklı havzalardan çıkıp mansapta birleşen giriş akımlarını, tek bir çıkış akımı olarak kombine edebilmek için uyguladığı Muskingum şartı, giren akımlara denk tek bir giriş akımı seçilerek ideal bir Muskingum modeli oluşturmuştur. Çalışmasında Muskingum modeliyle birden fazla giriş akımının hesaplanmasını anlatmaktadır; ayrıca bu model parametreleri olmayan akarsularda kullanılabilir olduğunu söylemiştir. Bu yeni model, Muskingum yaklaşımında birden fazla giriş ve çıkış akımını uygun bir şekilde tek bir giriş ve tek bir çıkış akımı olarak tanımlayabilir; bir Muskingum-Cunge modeliyle çok akımlı bir tahmini modelle

benzer bir şekilde tanımlama yapmıştır. Birden fazla giren akım olması durumunda tek çıkış akımlı tahmini modellerde hesaplar daha basittir ve sınırlı zamanda mansaptaki çıkış akımının önceden tahmini böylece mümkün kılmıştır ve aynı zamana rastlayan akım değerleri ölçüm istasyonunda gözlemlenmiştir. Bu modelin sonuçlarını ve performansını kinematik dalga modeliyle karşılaştırmıştır. Hindistan'daki Normada Havzası'ndaki taşkınlara bu modeli uygulamış ve sonuçlarda başarıya ulaşmıştır.

Karahan vd. (2013), doğrusal olmayan Muskingum modelinin parametre tahmini için hibrid harmoni araştırma tekniğini kullanmışlardır. Araştırmada, teklif edilen algoritmanın en optimum parametre değerlerini verdiğini ifade etmişlerdir.

Haddad vd (2015), Muskingum parametre tahmininde 4 ve 5 parametrelili modellerde hibrid bir algoritma kullanarak parametre tahminleri yapmışlardır. Çalışmalarını diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırmışlardır.

Hamedi vd (2016), doğrusal olmayan Muskingum modelinde depolama ifadesini hareketli ortalama şeklinde ifade ederek 6 parametrelili bir model kullanmışlardır. Bu model sonuçlarının diğer doğrusal olmayan Muskingum yöntemlerine göre %29'a varan bir iyileştirme yaptığını belirtmişlerdir.

Ayvaz ve Gürarlan (2017), doğrusal olmayan Muskingum metodu için taşkın dalgasını bazı debi seviyelerinden bölerek iki ya da üç parçaya ayırdılar. Ayrıca modelde yanal akımı da dikkate aldılar. Bu yöntemin diğer Muskingum modellerine göre %80 daha iyi sonuçlar verdiğini belirttiler.

3. MUSKINGUM MODELİ İLE TAŞKIN ÖTELENMESİ

3.1.Giriş

1930'lu yılların ortasında 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 kullanım alanına sahip bir katsayılar modelidir. Modelin temelinde süreklilik denklemi vardır ve dinamik (momentum) denklem ihmal edilir.

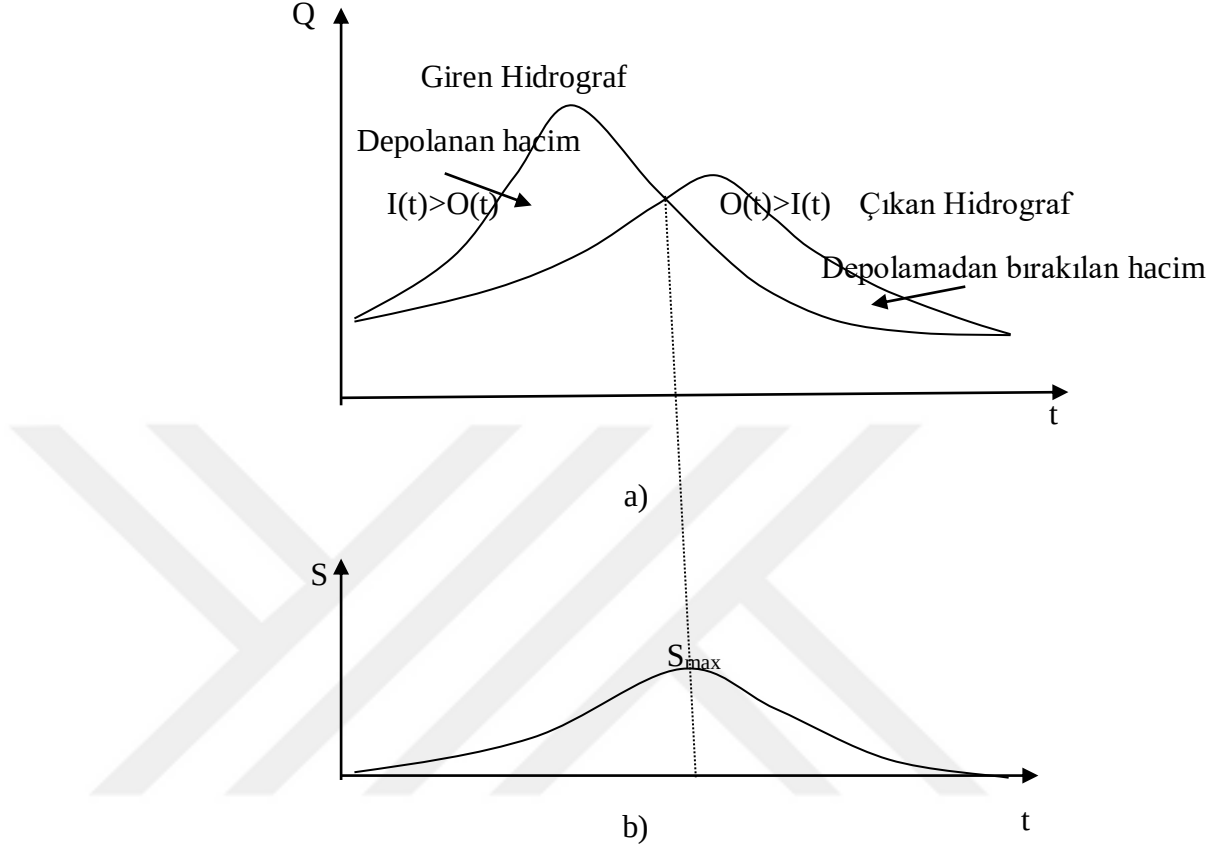
Muskingum modelinde, akarsu uygun uzunlukta parçalara ayrılırken, bu parçaların her birinde akarsuyun özellikleri (kesit, eğim, pürüzlülük) yaklaşık olarak sabit olmalıdır. Δt zaman aralığı taşkın dalgasının akarsu parçasından geçmesi için gerekli süreden daha küçük seçilmelidir ki, hidrografın pik değeri birkaç Δt zaman aralığı içerisinde görülebilmelidir. Muskingum modeli taban eğimi yüksek olan akımlarda ve hidrografın yükselme süresinin büyük olması halinde iyi sonuç verir. Hidrografi ötelerken söz konusu akarsu parçası içinde akarsuya kollarından katılan akımları da göz önüne almak gerekmektedir. Kol, akarsuya o akarsu parçasının membaya yakın bir yerinde katılıyorsa getirdiği akımlar giriş hidrografına eklenebilir. Kol, akarsuya akarsu parçasının mansaba yakın bir yerinde katılıyorsa o parça için çıkış hidrografi hesaplandıktan sonra kolun getirdiği akımlar bu hidrografa eklenir. Daha genel olarak kolun getirdiği akım uygun oranda iki kısma ayrılıp biri membada diğeri mansapta hesaba katılabilir.

Bir akarsu yatağın da taşkın dalgası hareketi göz önüne alındığında, Δx kadar bir akarsu bölümünde herhangi bir zaman içerisinde giriş ve çıkış en kesitlerine ait hidrografların eksenleri arasındaki fark, o anda hacimdeki değişimin ölçüsünü (süreklilik denklemini) gösterir (Şekil 3.1):

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t) \quad (3.1)$$

Burada akarsuyun bir parçasına giren akımın hidrografi $I(t)$, bu parçadan çıkan akımın hidrografi $O(t)$, bu parçada birikmiş su hacmi de $S(t)$ ile gösterilir. $I(t)$ ve

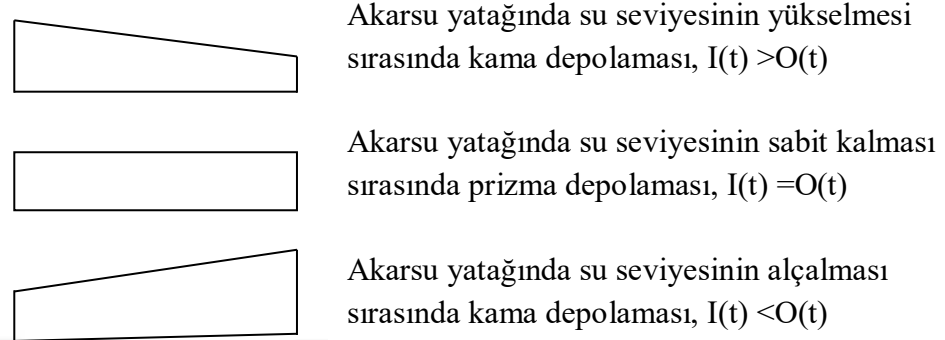
$O(t)$ verileri biliniyorsa zamana bağlı olarak değişen akarsu yatağındaki depolama $S(t)$ fonksiyonu hesaplanabilir.



Şekil 3.1. a) Bir akarsu parçasına giren ve çıkan akımların hidrografları ve b) akarsu parçasında depolanan hacim

Meydana gelen hacim birikmesi esas olarak giriş ve çıkış hidrograflarıyla yatağın geometrik ve hidrolik karakteristiklerine ve mevcut kontrol yapılarına bağlıdır. Giriş ve çıkış akımları arasındaki değişkenlere bağlı olarak daimi su yüzeyi profili ile gerçek su yüzeyi profilleri arasında kalan depolama kama depolamadır (Şekil 3.2). Bir taşkın dalgası için su seviye arttığı zaman, kama depolama pozitifdir ($I(t) > O(t)$ olan bölgede $dS/dt > 0$) ve prizma depolamaya eklenir. Seviye azaldığı zamanlarda ise, prizma depolamadan çıkartılır, giriş debisi çıkış debisinden daha küçük olduğundan kama depolama negatif olur ($O(t) > I(t)$ olan bölgede $dS/dt < 0$). Böylece akarsu ve kanallardaki hidrolojik ötelenme kama depolamaya izin veren bir depolama bağıntısını gerektirir. Bu ise ancak depolamanın hem giriş hem de çıkış debilerinin fonksiyonu olmasını sağlayan taşkın öteleme metodu Muskingum modeli

ile başarıya ulaşmıştır. Muskingum Modeli kama depolamayı hesaplayan süreklilik denkleminde ve depolamayı ifade eden basit bir bağıntıya dayanır. Bu iki ifade ile akarsuyun Δx mesafesi boyunca giren ve çıkan akımlar modellenir. Dolayısıyla bir hidrolojik öteleme işlemi gerçekleşmiş olur.

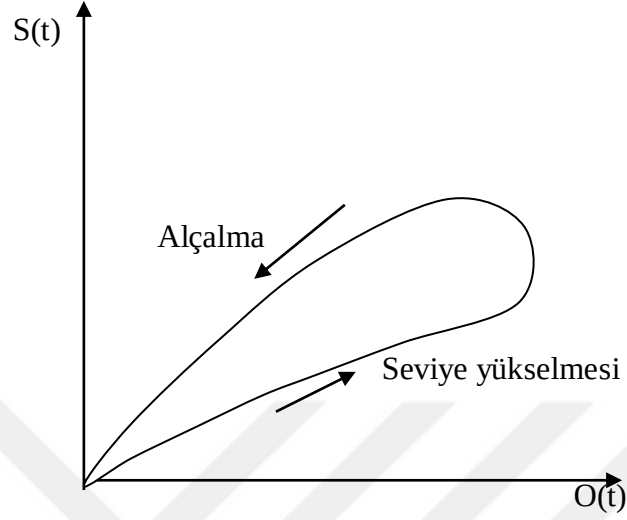


Şekil 3.2. Bir akarsu bölümünde taşkın esnasında meydana gelen depolama şekilleri

Bir akarsu kesitinde su seviyesinin yükselmesinden kaynaklanan depolamadaki değişim ile kesitten geçen debi arasında çizilmiş olan anahtar eğrisi Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Bu şekildeki döngüye baktığımızda, kesitten geçen akımın alçalma değerlerinde daha büyük bir depolamanın olduğu görülmektedir. Bu ifadeye ve Şekil 3.2’deki depolama şekillerine bakıldığında, kesitten geçen debinin alçalma zamanlarında daha büyük miktarda suyun depolandığı, debinin yükselme zamanlarında (taşkın başlangıcında) ise daha az miktarlarda suyun depolandığı sonucu ortaya çıkar. Böylece nehir ve kanallardaki hidrolojik öteleme kama depolamaya izin veren bir depolama bağıntısını gerektirir. Bu ise taşkın öteleme metodlarından birisi olan Muskingum yönteminde, depolamanın hem giriş hem de çıkış debilerinin fonksiyonu olarak ifade edilmesine imkân vermektedir.

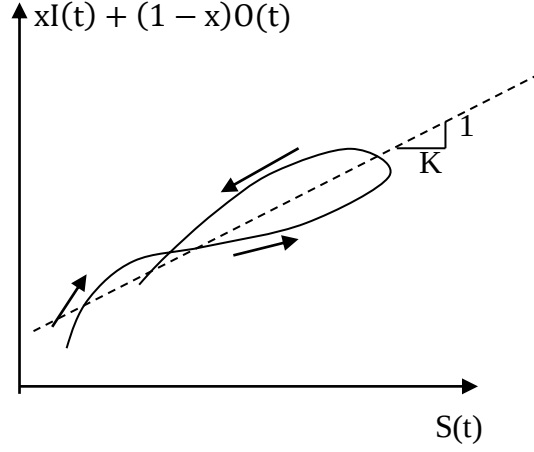
McCarty (1938), yaptığı çalışmada akarsu yatağı için bu depolama şeklini aşağıdaki basit doğrusal formülasyonla ifade etmiştir. Bu eşitlik, akarsuyun Δx boyu uzunluğunca herhangi bir anda depolanmış olan su miktarının $S(t)$, akarsu bölümüne giren, $I(t)$, ve çıkan, $O(t)$ debilerin K ve x sabit parametrelerince belirlenmesini gösterir. Bu eşitlikte x ağırlık faktörü olarak rol oynar ve $0 \leq x \leq 0,5$ arasında değerler almaktadır. K ise akarsu yatağı özelliklerini ve taşkın dalgasının mambadan mansaba doğru hareket ederken geçtiği süreyi dikkate alan zamanın boyutuna sahip bir katsayıdır.

$$S(t) = K[xI(t) + (1 - x)O(t)] \quad (3.2)$$



Şekil 3.3. Akarsu parçasında depolama ile çıkan akım arasındaki anahtar eğrisi

Klasik Muskingum metodunda bir akarsu parçası için giren ve çıkan debiler ölçüldükten sonra K ve x parametrelerinin belirlenmesi hedeflenir. Bu amaçla x değerine 0'dan 0,5'e kadar çeşitli değerler verilerek Denklem 3.2'ye göre S(t) ile $xI(t) + (1 - x)O(t)$ arasında gözlenmiş akım verilerinden bir doğrusal ilişki (grafik) aranır. Doğrusal ilişkiyi gösteren x değeri bu akarsuyun giriş ve çıkış bölümleri için ağırlık faktörü olarak hizmet eder. Doğruyu veren bu grafiğin eğimi ise Denklem 3.2'ye göre K'yı vermektedir. Bu işlemler yapılırken S(t) değerleri denklem 3.1.'den hesaplanır(Şekil 3.4). K ve x parametreleri belirlenen akarsu bölümüne başka bir yağıştan sonra girecek olan taşkın dalgasının ötelenmesi ve Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 yardımıyla yapılmaktadır. Yani Muskingum modeli tüm akımlar için K ve x değerlerinin sabit olduğunu varsayar. Pek çok durumda bu yeterlidir 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. Muskingum modeli taban eğimi yüksek olan akımlarda ve hidrografın yükselme süresinin büyük olması halinde iyi sonuç verir (Chow, 1959; Shultz, 1992).



Şekil 3.4. Klasik Muskingum yöntemine göre bir x değeri için K'nın belirlenmesi

Denklem 3.2'de $x=0$ olması hali depolamanın sadece çıkış debisine bağlı olmasını, $x=0,5$ olması hali ise depolamanın hem giriş hem de çıkış debisine eşit oranda bağlı olmasını gösterir. Δx uzunluğundaki akarsu bölümü çeşitli kısımlarda çeşitli geometrilere ve zemin özelliklerine sahip olduğu için x değeri 0 ile 0,5 arasında ve genellikle 0,3 etrafında bir değer almaktadır.

Günümüzde optimizasyon tekniklerinin gelişmesiyle beraber K ve x parametrelerinin belirlenmesi daha kolay olmaktadır. Bu durum Denklem 3.2 ile verilen doğrusal depolama bağıntısının yerine doğrusal olmayan bağıntıların kullanılmasının sağlamıştır. Dolayısıyla Muskingum metodu ile taşkın dalgası ötelenmesi doğrusal olmayan Muskingum ötelenme tekniği olarak literatüre girmiştir. Doğrusal olmayan Muskingum ötelenme yönteminde kullanılan depolama bağıntısının en genel hali aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir.

$$S(t) = K[xI^\alpha(t) + (1-x)O^\beta(t)]^\gamma \quad (3.3)$$

Burada α, β ve γ pozitif değerlere sahip ve sistemin doğrusal olmadığını gösteren sabit katsayılardır. Bu katsayıların 1'e eşit olması doğrusal Muskingum modelini vermektedir. Literatürde bu katsayıların olması/olmaması hallerine göre çeşitli modeller sunulmuş ve örnekler üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Ancak literatürde $\alpha = \beta = 1$ olan modeller daha sıklıkla görülmektedir. Denklem 3.3'de görülen 5 adet sabit parametrenin belirlenmesi ancak optimizasyon yöntemleriyle mümkün olmaktadır. Modellerde çok sayıda parametrenin belirlenecek olması tahmin

işleminin daha uzun sürede yapılmasını gerektirmekte, fakat bu durum hataların minimuma indirilmesi anlamına gelmemektedir. Bir akarsu bölümünü düşündüğümüzde Δx uzunluğu, enkesit ve yatak özellikleri, yatak eğimi ve taşkın dalgası hidrografının şekli problemin doğrusal olmayan şekilde çözümüne yani α , β ve γ parametrelerinin değerlerine etki eder.

3.2. Teklif Edilen Muskingum Metodu ve Hesaplama Yöntemi

Bu tez çalışmasında, Denklem 3.1 ile verilen süreklilik denklemi ve $\alpha = \beta = 1$ için Denklem 3.3'te verilen doğrusal olmayan depolama denklemi kullanılacaktır. Denklem 3.1 ile gösterilen ifade 1. mertebeden bir diferansiyel denklemdir. Denklem 3.1 ile denklem 3.3'ün birlikte çözümü ancak sayısal yöntemlerle, bu çalışmada sonlu fark yaklaşımıyla yapılacaktır. Dolayısıyla Denklem 3.1'in sonlu fark ifadesi göz önüne alınan bir Δt zaman aralığı için aşağıdaki hale gelir.

$$S(t + \Delta t) = S(t) + \Delta t[I(t) - O(t)] \quad (3.4)$$

Bu eşitlik literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında Denklem 3.1'in sonlu fark ifadesi aşağıdaki eşitlikle değerlendirilecektir. Bu denklemde ki a ve b katsayıların ağırlıklı zaman parametreleri olarak isimlendirilebilir. Bu parametreler, Denklem 3.1'de ki türev ifadesinin göz önüne alınmasından Δt zaman aralığının oldukça büyük değer alması nedeniyle. Normal şartlarda türev ifadesi sonsuz küçük zaman aralığını gösterir. Taşkın öteleme hesaplarında akım ölçümleri arasındaki mesafeler dakikalar ve hatta saatler mertebesinde. Bu yüzden hesaplamalarda ortaya çıkacak olan hataların en aza indirilmesi için a ve b katsayıları formülasyon içerisine sokulmuştur.

$$S(t + \Delta t) = S(t) + aI(t) - bO(t) \quad (3.5)$$

Çoğu çalışmada a ve b katsayıları göz önüne alınmaz. Bunun yerine giren ve çıkan akım değerlerinin t ve $t + \Delta t$ zaman aralıklarında görülen debilerin ortalaması hesaplamalara dahil edilir. Bu durum Taylor seri ifadesine (ikinci mertebe ifadelerin ihmal edildiği doğru denkleminde) karşı gelmemektedir. Dolayısıyla Denklem 3.5 ile

verilen fark ifadesinin Denklem 3.1 daha iyi ifade edeceği kanısındayız. Bu süreklilik denklemi ile birlikte göz önüne alınan depolama denklemi aşağıdaki gibidir.

$$S(t) = K[xI(t) + (1 - x)O(t)]^m \quad (3.6)$$

m burada doğrusal olmayan depolamayı gösteren bir katsayıdır.

Muskingum yöntemi ile taşkın öteleme hesaplamalarında süreklilik ve depolama denklemleri birlikte ele alınır. Böyle bir işlem yapılırken bir akarsu parçasına giren ve çıkan akımların ölçülmüş olması gerektiği ve dolayısıyla ölçülmüş akım değerleri süreklilik ve depolama denkleminde yerine konarak denklemlerde belirtilen sabit parametrelerin tahmin edilmesi yoluna gidilir. Bu çalışmada da benzer bir durum yapılacaktır. Yeni teklif edilen bu metoda göre, taşkın ötelenme hesapları aşağıdaki kademelerde yapılması öngörülmüştür.

1. Denklemlerde kullanılan x , m , a ve b katsayıları için ($0,001 \leq x \leq 0,5$; $0,8 \leq m \leq 3$; $0,5 \leq a, b \leq 2$) başlangıç değerleri verilmeli,
2. t anında akarsu bölümünde depolanmış olan su miktarını ($S(t)$), Adım 1de tahmin edilmiş olan parametreler yardımıyla Denklem 3.6'dan bulunmalı,

$$S(t) = K[xI(t) + (1 - x)O(t)]^m \quad (3.6)$$

3. $t + \Delta t$ anında akarsu bölümünde depolanmış su miktarını ($S(t + \Delta t)$) bulmak için Denklem 3.5 kullanılmalı,

$$S(t + \Delta t) = S(t) + aI(t) - bO(t) \quad (3.5)$$

4. Tahmin edilen parametre değerlerinin doğruluğunu tayin etmek için $t + \Delta t$ anında çıkan debinin tahmin edilmesi gereklidir. Bu nedenle $t + \Delta t$ anındaki çıkan debi aşağıdaki formülasyonla hesaplanır:

$$O(t + \Delta t) = \frac{(S(t + \Delta t)/K)^{1/m} - xI(t)}{1 - x} \quad (3.7)$$

5. Akarsu bölümünde ölçülmüş olan giren ve çıkan debilerin sayısı kadar ardışık işlemler yapılarak Adımlar 2-4 tekrarlanmalı ve Denklem 3,7'den çıkan akım değerleri tahmin edilmelidir.
6. Adım 5te tahmin edilmiş olan debiler ile ölçülmüş olan debilerin bir kıyası gereklidir. Tahmin edilen ve ölçülmüş debiler arasındaki toplam farkların en az olması en iyi çözümü verecektir. Dolayısıyla bu hatayı bulabilmek için aşağıdaki Toplam Karesel Hata (TKH) ifadesi bu çalışmada kullanılmıştır.

$$TKH = \sum [O_{ölçülmüş}(t) - O_{hesaplanmış}(t)]^2 \quad (3.8)$$

7. Adım 6ya kadar olan işlemler Adım 1de başlangıç değerleri verilen parametre değerleri için yapılmıştı. Daha küçük TKH elde edebilmek için Adım 1 deki parametrelerin başlangıç değerleri 0,001 kadar küçük miktarlarla arttırılarak Adım 6ya kadar olan işlemler tekrarlanmalıdır. Bu tekrarlar neticesinde elde edilen en küçük TKH değerine sahip durum yani bu TKH değerini veren parametreler ölçümü yapılmış akarsu bölümü için en uygun Muskingum parametreleri olarak göz önüne alınır.

Bu bölümde teklif edilen taşkın ötelenmesi yönteminin gerçek gözlemiş akım değerlerine uygulanması Bölüm 4'te verilecektir. Bölüm 4 problemlerin çözümleri yanında literatürde yer alan sonuçları da içerecektir. Dolayısıyla yöntemler arasında bir karşılaştırma yapılacaktır. Yukarıda verilen işlem adımları, 5 adet parametre değerinin hassas bir şekilde belirlenebilmesi için bir optimizasyon programına ihtiyaç duymaktadır. Bu amaçla Fortran programlama dilinde bir optimizasyon programı yazılmış ve göz önüne alınan örnekler bu program aracılığıyla işleme girerek 5 parametrenin en iyi değerleri elde edilmiştir.

4. UYGULAMA VE TARTIŞMA

Bu çalışmada teklif edilen Muskingum yönteminin uygulamaları için, literatürde mevcut olan örnekler göz önüne alınmıştır. Bölüm 3.2’de belirtilen hesap adımları için Fortran programlama dilinde yazılmış bir bilgisayar programı yardımı ile literatürdeki örnekler çözülmüş ve söz konusu 5 adet parametrenin (K , x , m , a ve b) en iyi sonuçları elde edilmiştir. Aşağıdaki alt bölümler, her bir örnek için ayrı ayrı göz önüne alınmış ve elde edilen bulgular tartışılmıştır.

4.1. Değirmendere-Isparta Taşkını

Isparta - Sütçüler ilçesi sınırları içerisinde bulunan Değirmendere çayında 4 Kasım 1995 tarihinde meydana gelen taşkın olayının değerlendirilmesinde Bölüm 3.2’de teklif edilen yöntem kullanılmıştır. Taşkın bölgesinde DSİ 18. Bölge Müdürlüğü tarafından işletilmekte olan 9-88 no’lu istasyona ait akımlar (girdi değerleri) ile 9-89 no’lu istasyona ait akım değerleri (çıkış değerleri) kullanılmıştır (Ülke, 2003). Taşkın sırasında, 1 saat arayla ölçülmüş giren ve çıkan akım değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

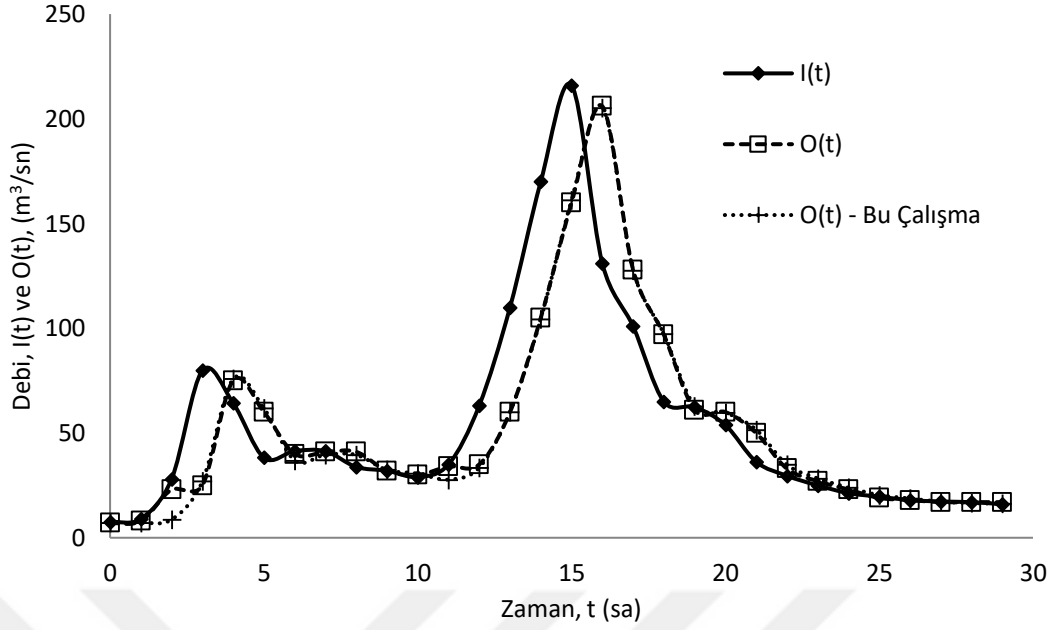
Bu taşkın olayı için, Muskingum metodunun kullanıldığı ilk çalışmalardan biri olan ve klasik bir Muskingum yönteminin kullanıldığı Ülke (2003)’nin sonuçları ile birlikte bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar da bu çizelgede sunulmuştur. Ayrıca, Ülke (2003) ‘nin elde ettiği model sonuçları ile bu çalışmadan elde edilen model sonuçlarına ait Toplam Karesel Hata (TKH) değerleri ise Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu çalışmada teklif edilen yöntemin içerdiği hata değerinin daha az olduğu bu çizelgeden görülmektedir. Eşitlikler 3.5 ve 3.6 ‘da göz önüne alınan model parametreleri $K=1,03402$, $x=0,14668$, $m=1,01276$, $a=0,89000$ ve $b=0,92998$ olarak elde edilmiştir. 9-89 no’lu istasyona ait ölçülmüş çıkış hidrografı ile Ülke (2003) ‘nin ve bu çalışmada elde edilen çıkış hidrografları arasındaki sonuçlara bakıldığında, bu çalışmada teklif edilen yöntemin daha iyi modelleme sonuçları verdiği görülmektedir. Çizelge 4.1 ‘de verilen akım değerlerine göre çizilmiş olan hidrograflar Şekil 4.1 ‘de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Değirmendere Çayı Taşkın Değerleri ve Hesap Sonuçları

t (saat)	Giren Akım (m ³ /sn)	Çıkan Akım (m ³ /sn)	Ülke (2003) (m ³ /sn)	Bu Çalışma (m ³ /sn)
0	7,53	7,0	6,0	7,00
1	9,06	8,0	7,53	7,21
2	28,0	23,0	10,64	8,69
3	79,8	25,0	31,13	26,88
4	64,3	75,0	73,97	75,79
5	38,2	60,0	62,81	61,77
6	41,4	40,0	40,73	36,85
7	41,3	41,0	41,33	39,60
8	33,8	41,0	40,62	39,53
9	32,0	32,0	34,26	32,40
10	29,0	30,0	31,93	30,63
11	35,0	34,0	35,0	27,76
12	63,1	35,0	37,55	33,47
13	110,0	60,0	65,04	60,10
14	170,0	105,0	111,37	104,41
15	216,0	160,0	168,85	161,17
16	131,0	206,0	203,99	205,31
17	101,0	128,0	134,91	127,73
18	65,0	97,0	100,81	97,39
19	62,4	61,0	68,02	62,86
20	53,8	60,0	62,13	59,76
21	36,3	50,0	52,97	51,60
22	29,6	33,0	37,21	34,90
23	25,0	27,0	29,87	28,36
24	21,3	23,0	25,11	23,93
25	19,6	19,0	21,49	20,38
26	18,0	18,0	19,63	18,75
27	17,3	17,0	18,08	17,22
28	17,0	17,0	17,34	16,55
29	16,0	17,0	16,94	16,27

Çizelge 4.2. Değirmendere Çayı Taşkını Hata Değerleri

	Ülke (2003)	Bu çalışma
TKH	531,44	286,56



Şekil 4.1. Değirmendere çayı taşkın hidrografları

4.2. Wilson (1974) Verisi

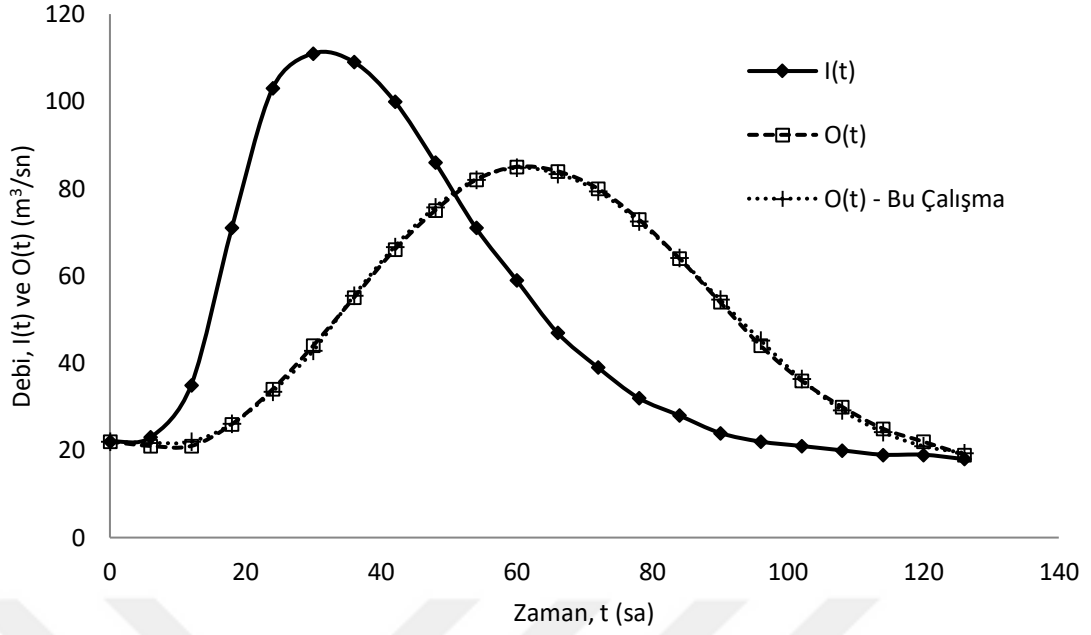
Bu veri seti, Muskingum modeliyle taşkın öteleme problemlerinin ele alınması araştırmalarında literatürde en çok kullanılan veri setidir. Veri seti, yanal (yan akarsu kollarından ve araziden gelen) debilerin oldukça önemsiz olduğu ve tek pike sahip bir taşkın dalgasını göstermektedir. Taşkın sırasında, 6 saat arayla ölçülmüş giren ve çıkan akım değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Bu çizelge, bu çalışmadan elde edilen çıkan akım değerlerini de göstermektedir. Eşitlikler 3.5 ve 3.6 ‘da göz önüne alınan model parametreleri $K=0,78518$, $x=0,29596$, $m=1,86420$, $a=1,45539$ ve $b=1,48758$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.4, bu problem için literatürde çeşitli yöntemlerden ve bu çalışmadan elde edilmiş TKH sonuçlarını sunmaktadır. Haddad vd. (2015) ‘nin TKH değeri en iyi olarak görülmektedir. Çizelge 4.3 ‘de verilen akım değerlerine göre çizilmiş olan hidrograflar Şekil 4.2 ‘de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Taşkın Değerleri (Wilson, 1974) ve Hesap Sonuçları

t (saat)	Giren Akım (m ³ /sn)	Çıkan Akım (m ³ /sn)	Bu Çalışma (m ³ /sn)
0	22	22	22,00
6	23	21	21,71
12	35	21	22,02
18	71	26	26,078
24	103	34	33,51
30	111	44	42,83
36	109	55	55,44
42	100	66	66,67
48	86	75	75,77
54	71	82	82,12
60	59	85	84,78
66	47	84	83,42
72	39	80	79,44
78	32	73	72,48
84	28	64	64,09
90	24	54	54,58
96	22	44	45,22
102	21	36	36,34
108	20	30	29,21
114	19	25	24,21
120	19	22	20,96
126	18	19	19,41

Çizelge 4.4. Wilson Verisi Hata Değerleri

	Karahan vd (2013)	Hamedî vd. (2016)	Haddad vd. (2015)	Bu çalışma
TKH	36,77	35,96	5,44	9,83



Şekil 4.2. Wilson (1974) verisi taşkın hidrografları

4.3. River Wye Taşkını (NERC, 1975)

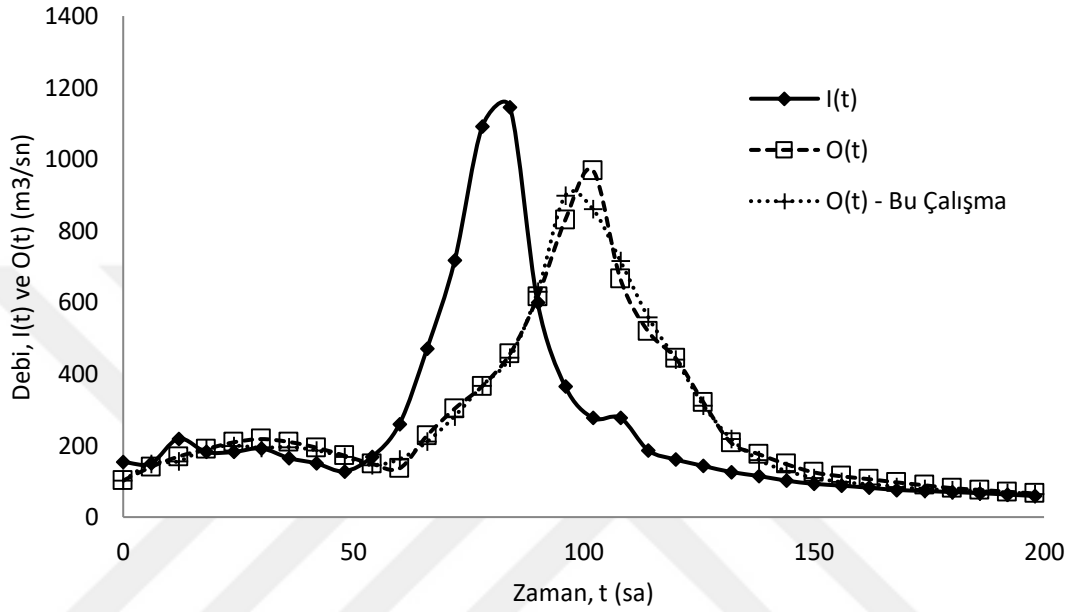
Bu veri seti, literatürde en çok kullanılan veri setlerinden birisi olup, İngiltere'deki River Wye nehrinde ölçülmüş gerçek taşkın değerlerini göstermektedir. Bu veri setinde, yanal debilerin katkısı oldukça önemsizdir ve tek pike sahip bir taşkın dalgasını göstermektedir. Taşkın sırasında, 6 saat arayla ölçülmüş giren ve çıkan akım değerleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Bu çizelge, bu çalışmadan elde edilen çıkan akım değerlerini de göstermektedir. Eşitlikler 3.5 ve 3.6 'da göz önüne alınan model parametreleri $K=0,32471$, $x=0,40366$, $m=1,61444$, $a=0,90207$ ve $b=0,86206$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.6, bu problem için literatürde çeşitli yöntemlerden ve bu çalışmadan elde edilmiş TKH sonuçlarını sunmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen TKH değeri en iyi olarak görülmektedir. Çizelge 4.5 'de verilen akım değerlerine göre çizilmiş olan hidrograflar Şekil 4.3 'de sunulmuştur.

Çizelge 4.5. River Wye Taşkın Değerleri (NERC, 1975) ve Hesap Sonuçları

t (saat)	Giren Akım (m ³ /sn)	Çıkan Akım (m ³ /sn)	Bu Çalışma (m ³ /sn)
0	154	102	102,00
6	150	140	149,59
12	219	169	155,82
18	182	190	191,45
24	182	209	199,75
30	192	218	193,64
36	165	210	196,07
42	150	194	186,54
48	128	172	168,63
54	168	149	145,74
60	260	136	161,92
66	471	228	210,64
72	717	303	282,04
78	1092	366	367,61
84	1145	456	445,77
90	600	615	629,26
96	365	830	897,94
102	277	969	860,77
108	277	665	715,35
114	187	519	559,12
120	161	444	440,79
126	143	321	312,54
132	126	208	219,26
138	115	176	160,34
144	102	148	129,23
150	93	125	109,99
156	88	114	97,90
162	82	106	91,90
168	76	97	85,16
174	73	89	78,42
180	70	81	75,76
186	67	76	72,41
192	63	71	69,17
198	59	66	64,38

Çizelge 4.6. River Wye Verisi Hata Değerleri

	Karahan vd. (2013)	Hamedı vd. (2016)	Haddad vd. (2015)	Bu çalışma
TKH	37944,14	31421,0	30894,5	25204,0



Şekil 4.3. River Wye verisi taşkın hidrografları

4.4. Viessman and Lewis (2003) Verisi

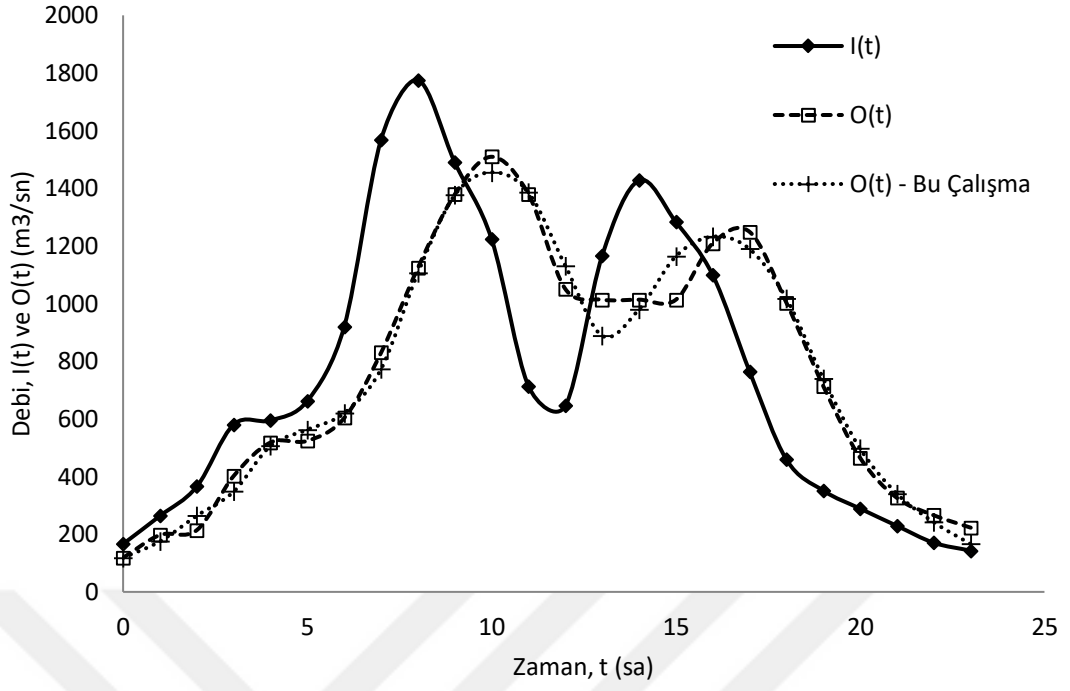
Bu veri seti, literatürde yine en çok kullanılan veri setlerinden birisi olup, ardışık zamanlarda meydana gelen 2 farklı yağışın sebep olduğu 2 pikli debiye sahip bir taşkın dalgasını göstermektedir. Bu veri setinde de yanal debilerin katkısı oldukça önemsiz olduğu görülmektedir. Taşkın sırasında, 1 saat arayla ölçülmüş giren ve çıkan akım değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Bu çizelge, bu çalışmadan elde edilen sonuçları da göstermektedir. Eşitlikler 3.5 ve 3.6 ‘da göz önüne alınan model parametreleri $K=0,10680$, $x=0,16744$, $m=1,46102$, $a=1,56731$ ve $b=1,57216$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.8, bu problem için literatürde çeşitli yöntemlerden ve bu çalışmadan elde edilmiş TKH sonuçlarını sunmaktadır. Hamedı vd.(2016) ‘nin çalışmasından elde edilen TKH değeri en iyi olarak görülmektedir. Çizelge 4.7 ‘de verilen akım değerlerine göre çizilmiş olan hidrograflar Şekil 4.4 ‘de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Taşkın Değerleri (Viessman and Lewis, 2003) ve Hesap Sonuçları

t (saat)	Giren Akım (m ³ /sn)	Çıkan Akım (m ³ /sn)	Bu Çalışma (m ³ /sn)
0	166,2	118,4	118,40
1	263,6	197,4	175,25
2	365,3	214,1	263,98
3	580,5	402,1	347,74
4	594,7	518,2	506,48
5	662,6	523,9	562,84
6	920,3	603,1	619,93
7	1568,8	829,1	772,86
8	1775,5	1124,2	1106,77
9	1489,5	1379,0	1376,66
10	1223,3	1509,3	1455,58
11	713,6	1379,0	1385,28
12	645,6	1050,6	1131,32
13	1166,7	1013,7	888,24
14	1427,2	1013,7	980,21
15	1282,8	1013,7	1164,22
16	1098,7	1209,1	1232,31
17	764,6	1248,8	1189,41
18	458,7	1002,4	1016,93
19	351,1	713,6	739,65
20	288,8	464,4	496,56
21	228,8	325,6	340,20
22	170,2	265,6	241,26
23	143,0	222,6	165,79

Çizelge 4.8. Viessman and Lewis (2003) Verisi Hata Değerleri

	Hamed vd. (2016)	Bu çalışma
TKH	52057	70393



Şekil 4.4. Viessman and Lewis (2003) verisi taşkın hidrografları

5. SONUÇLAR

Şiddetli yağışlar sonucu akarsu yataklarında meydana gelen taşkınların çevreye herhangi bir zarar vermeden mansap bölgelerine doğru ilerleyebilmesi oldukça önemlidir. Bu sağlıklı ilerleyiş, taşkın büyüklüğünün bilinmesi ile yapılacak akarsu ıslah kesiti ölçülerinin belirlenmesini ve taşkın dalgasının bu kanal içerisinde ya da doğal akarsu yatağında sönmülerek ilerleyebilmesini (ötelenmesini) kapsar. Taşkın dalgasının ötelenmesi için geliştirilmiş yöntemlerden biri olan Muskingum metodu bu çalışmada ele alınmıştır. Muskingum metodunun literatürde olmayan yeni bir modeli bu çalışmada teklif edilmiştir. Bu modelde göz önüne alınan yenilik, süreklilik denklemi ifadesinin fark açılımında kullanılan ve ağırlık parametreleri olarak ifade edilmiş olan sabit katsayılarıdır.

Teklif edilen yeni Muskingum modeli, Fortran programlama dilinde yazılmış bir bilgisayar programı yardımıyla, literatürden alınmış 4 taşkın örneği üzerinde değerlendirilmiştir. Teklif edilen modelden elde edilen sonuçlara bakıldığında:

- a) mansaptaki akım değerlerine ve dolayısıyla taşkın dalgası hidrografına yaklaşımın yeterli olduğu,
- b) mansapta ölçülmüş akım değerleri ile modelden hesaplanmış değerler arasında belirlenen Toplam Karesel Hata (TKH) değerlerinin oldukça küçük değerlerde kaldığı,
- c) modelin hem tek pike ve hem de 2 pikli debiye sahip taşkın dalgalarına uygulanabileceği,
- d) süreklilik denkleminin sayısal ifadesinde kullanılan a ve b gibi 2 ağırlık katsayısının sonuçlarda iyileştirme yaptığı,
- e) teklif edilen modelin programlanabilmesinin kolay olduğu.

bu yüksek lisans tez çalışmasından çıkarılan sonuçlar olarak ifade edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, H., Tanaka N., 2009. Distributed Water Balance with River Dynamic Diffusive Flow Routing Model, *Journal of Hydrodynamics*, 21(4), 564-572.
- Al-Humoud, J., Esen, İ., 2006. Approximate Methods for the Estimation of Muskingum Flood Routing Parameters. *Water Resources Management*, 20(6), 979- 990.
- Atalay, O., 2008. Taşkın Hidrografının Elde Edilmesiyle İlgili Yöntemlerin Karşılaştırılması. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Kocaeli.
- Atallah, M., Hazzab, A., Seddini, A., Ghenaim, A., Korichi, K., 2016. Hydraulic Flood Routing in an Ephemeral Channel: Wadi Mekerra, Algeria. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2:182.
- Ayvaz, M. T., Gürarlan, G., 2017. A New Partitioning Approach for Nonlinear Muskingum Flood Routing Models with Lateral Flow Contribution. *Journal of Hydrology*, 553, 142-159.
- Bajracharya, K., Barry, D. A., 1995. Optimized Muskingum-Cunge Solution Method for Solute Transport with Equilibrium Freundlich Reactions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 18, 221-238.
- Bajracharya, K., Barry, D. A., 1997. Accuracy Criteria for Linearised Diffusion Wave Routing. *Journal of Hydrology*, 195, 200–217.
- Barati, R., Rahimi, S., Akbari, G. H., 2012. Analysis of Dynamic Wave Model for Flood Routing in Natural Rivers. *Water Science and Engineering*, 5(3), 243-258.
- Barry, D. A., Bajracharya, K., 1995. On the Muskingum-Cunge Flood Routing Method. *Environment International*, 21(5), 485-490.
- Bayazıt, M., 2002. Türkiye’de Taşkınlar ve Taşkın Kontrolü Yönetimi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 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, 113-132.
- Choudhury, P., 2007. Multiple Inflows Muskingum Routing Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(5), 473-481.
- Çimen M., 1995. Difüzyon Yöntemi ile Akarsu Yatağındaki Taşkınların Ötelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Isparta.

- Delphi, M., Shooshtari, M.M., Zadeh, H.H, 2010. Application of Diffusion Wave Method for Flood Routing in Karun River. International Journal of Environmental Science and Development, 1(5), 432-434.
- Ercan, C., 2009.Kinematik Dalga Denkleminin Çözümünde Muskingum Yöntemi ve Diğer Sayısal Çözüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması. DEÜ İnşaat Müh. Böl.Bitirme Tezi,25s, İzmir.
- Erkek, C., Ağırlioğlu, N., 1993. Su Kaynakları Mühendisliği. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., 360s., İstanbul.
- Haddad,O.B., Hamed, F., Fallah-Mehdipour, E., Orouji, H., Marino, M.A., 2015. Application of a Hybrid Optimization Method in Muskingum Parameter Estimation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 141(12), 04015026.
- Hamed, F., Bozorg- Haddad, O., Orouji, H., Fallah-Mehdipour, E., Loaiciga, H.A., 2016. Nonlinear Muskingum Model for Flood Routing in Irrigation Canals Using Storage Moving Average. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 04016010.
- Hossain, M.M.,Ema, J.F., 2013. Solution of Kinematic Wave Equation Using Finite Difference Method and Finite Element Method. Global Journal of Science Frontier Research Mathematics and Decision Sciences,13(6), 25-35.
- Karahan, H., Gürarlan, G., Geem, Z.W., 2013. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Flood-Routing Using a Hybrid Harmony Search Algorithm, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 18(3), 352-360.
- Kılıçer, Ü., Değirmencioğlu, N., Yayvan, M., 2000. Meteorolojik Kaynaklı Doğal Afetler Alt Komisyon Raporu, 28 s., Ankara.
- Kshirsagar, M. M., Rjagopalan, B., Lall, U., 1995. Optimal Parameter Estimation for Muskingum Routing with Ungauged Lateral Inflow.Journal of Hydrology, 169, 25-35.
- Liu, H., Wang, H.,Liu,S.,Hu,C.,Ding,Y.,Zhang, J., 2015.Lattice Boltzmann Method for the Saint–Venant Equations.Journal of Hydrology,524,411-416.
- Liu,N., Feng, J., Zhu, J., 2012. Flood Routing Based on Diffusion Wave Equation Using Lattice Boltzmann Method. 2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering, Procedia Engineering, 28, 190-195.
- McCarthy, G.T. 1938. The Unit Hydrograph and Flood Routing. Proc., Conf. of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers,New London.
- Moussa, R., Bocquillon, C., 1996a.Algorithms for Solving the Diffusive Wave Flood Routing Equation.Hydrological Processes, 10, 105-123.

- Moussa, R., Bocquillon, C., 1996b. Criteria for the Choice of Flood Routing Methods in Natural Channel. *Journal of Hydrology*, 186, 1-30.
- Mozayeny, B., Song, C. S., 1969. Propagation of Flood Waves in Open Channels. *Journal of Hydraulics Division*, 95(HY3), 877-892.
- NERC (Natural Environment Research Council), 1975. Flood Studies Report. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Okkan, U., Gedik, N., 2017. Doğrusal Olmayan Bir Taşkın Öteleme Modelinin Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Kalibrasyonu, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 114-117.
- Perumal, M., 1992. Multilinear Muskingum Flood Routing Method. *Journal of Hydrology*, 133, 259-272.
- Perumal, M., 1994. Multilinear Discrete Cascade Model for Channel Routing. *Journal of Hydrology*, 158, 135-150.
- Ponce, V.M., Li, R., Simons, D.B., 1978. Applicability of Kinematic and Diffusion Models. *Journal of Hydraulics Division*, 104(HY3), 353-361.
- Ponce, V.M., Yevjevich, V., 1978. Muskingum- Cunge Method with Variable Parameters. *Journal of Hydraulics Division*, 104(HY12), 1663-1667.
- Ponce, V.M., 1979. Simplified Muskingum Routing Equation. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(HY1), 85-91.
- Ponce, V.M., Chen, Y.H., Simons, D.B., 1979. Unconditional Stability in Convection Computations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 105, 1079-1086.
- Ponce, V.M., Theurer F.D., 1982. Accuracy Criteria in Diffusion Routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(4), 511-525.
- Ponce, V.M., 1991. The Kinematic Wave Controversy. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(4), 511-525.
- Ponce, V.M., Huston, P.T., 1994. New Perspective on the Convection – Diffusion-Dispersion Equation. *Water Resources Research*, 30(5), 1619-1620.
- Ponce, V.M., Lohani, A.K, Scheyhing, C., 1996. Analytical Verification of Muskingum-Cunge Routing. *Journal of Hydrology*, 174, 235-241.
- Ramirez, J.A., 2000. Prediction and Modelling of Flood Hydrology and Hydraulics. Chapter 11 of *Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities*, Eds. Ellen Wohl; Cambridge University Press, 53s, İngiltere.

- Shultz M.J., 1992. Comparison of Flood Routing Methods for a Rapidly Rising Hydrograph Routed Through a Very Wide Channel.M.Sc. Thesis, Texas Arlington University, 146s,USA.
- Strupczewski, W., Kundzewicz, Z., 1980.Muskingum Method Revisited. Journal of Hydrology, 48, 327-342.
- Tavakoli, A., Zarmehi,F., 2011. Adaptive Finite Elements Methods for Solving Saint-Venant Equations. Scientia Iranica B, 18(6), 1321-1326.
- Tingsanchali, T., Manandhar, S.K., 1985.Analytical Diffusion Model for Flood Routing. Journal of Hydraulic Engineering, 111(3), 435-453.
- Tsai, C.W., 2005.Flood Routing in Mild-Sloped Riverswave Characteristics and Downstream Backwater Effects. Journal of Hydrology, 308(1-4),151-167.
- USACE, 1993. Engineering and Design - River Hydraulics. Engineer Manual,Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
- USACE, 1994. Engineering and Design - Flood-Runoff Analysis. Engineer Manual,Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington,DC, USA.
- Uşkay, S., Aksu, S., 2002. Ülkemizde Taşkınlar, Nedenleri, Zararları ve Alınması Gereken Önlemler. Türkiye Mühendislik Haberleri, 420-421-422, 133-136.
- Ülke, A., 2003. Muskingum Metodu Kullanılarak Taşkın Ötelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93s, Isparta.
- Wilson, E.M., 1974. Engineering Hydrology, MacMillan Education, Hampshire, UK.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İclal ŞATSU SAY

Doğum Yeri ve Yılı : Erzincan, 1986

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : iclalsatsu@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Erzincan Lisesi, 2003

Lisans : SDÜ, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Mesleki Deneyim

Erzincan Çukurkuyu Belediyesi 2011-2012

Erzincan İl Özel İdaresi 2012-.....(halen)