

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERBEST YÜZEYLİ AKIMLARDA DEĞİŞKENLİK DERECESİNİN
HİDROLİK KARAKTERİSTİKLER ÜZERİNE ETKİSİNİN SAYISAL
MODELLEME İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Buğra BAYKUŞ

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERBEST YÜZEYLİ AKIMLARDA DEĞİŞKENLİK DERECESİNİN
HİDROLİK KARAKTERİSTİKLER ÜZERİNE ETKİSİNİN SAYISAL
MODELLEME İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Buğra BAYKUŞ
(517111002)**

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA

Teslim Tarihi: 4 MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 517111002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Buğra Baykuş**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SERBEST YÜZEYLİ AKIMLARDA DEĞİŞKENLİK DERECESİNİN HİDROLİK KARAKTERİSTİKLER ÜZERİNE ETKİSİNİN SAYISAL MODELLEME İLE BELİRLENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Oral YAĞCI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Burak AYDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **25 Mayıs 2015**

Aileme ve dostlarıma,

ÖNSÖZ

Öncelikle bu çalışma sürecinde değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yardıma ihtiyaç duyduğum her anda benden desteğini esirgemeyen, çalışma disipliniyle öğrencilerine örnek olan, danışman hocam Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA'ya teşekkürü borç bilirim.

Değerli katkı ve destekleri için Doç. Dr. Oral Yağcı'ya teşekkür ederim.

Gerektiğinde benden yardımlarını esirgemeyen tüm dostlarıma, CEC ailesine ve bu süreçte bana verdiği her türlü destek için sevgili Canan Türker'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Ayrıca tüm öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda oldukları ve beni her konuda destekledikleri için sevgili aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Mehmet Buğra BAYKUŞ
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1 Serbest Yüzeyle Akımlar	3
2.2 Permanan ve Üniform Olmayan Açık Kanal Akımları	4
2.3 Tipik Bir Yağış Hidrografının İncelenmesi	6
2.4 Tek Boyutlu De Saint Venant Denklemleri	7
2.5 Değişkenlik Parametresinin Hidrolik Karakteristikler Üzerindeki Etkileri	9
2.6 Değişkenlik Yayılma Hızı	13
3. YÖNTEM.....	15
3.1 Kullanılan Denklemler	15
3.2 Denklemlerin Sayısallaştırılması.....	17
4. SAYISAL MODELLEME VE MODEL SONUÇLARI.....	23
4.1 Parametrik Çalışma	26
4.1.1 Senaryo-1	27
4.1.2 Senaryo-2	29
4.1.3 Senaryo-3	31
4.1.4 Senaryo-4	33
4.1.5 Senaryo-5	35
4.2 Parametrelerin Boyutsuzlaştırılması	36
5. SAYISAL MODELİN FİZİKSEL MODEL ÖLÇÜMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI VE DOĞRULANMASI	45
6. SAYISAL MODELİN UYGULAMA ÖRNEĞİ.....	49
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59

KISALTMALAR

A	: Akarsu kesit alanı
B	: Akarsu kesit genişliği
β	: Clauser denge parametresi
C^*	: Chézy katsayısı
C	: Değişkenliğin yayılma hızı
c	: Değişkenlik yayılım hızı parametresi
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Akım derinliği
h^*	: Boyutsuz akım derinliği parametresi
I	: Akarsu taban eğimi
J	: Enerji çizgisinin eğimi
J^*	: Boyutsuz taban eğimi
k_s	: Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısı
k_s^+	: Boyutsuz Nikuradze eş-değer pürüzlülük parametresi
n	: Manning pürüzlülük katsayısı
R	: Hidrolik yarıçap
U_f	: Sürtünme hızı
U_f^*	: Boyutsuz sürtünme hızı parametresi
V	: Kesitsel ortalama hız
V^*	: Boyutsuz kesitsel ortalama hız parametresi
T^*	: Akarsu hidrografi için tanımlanan zaman ölçeği
Δq	: Dolaysız akış debisi
γ	: Özgül ağırlık
ρ	: Özgül kütle
τ	: Kayma gerilmesi
Γ	: Değişkenlik parametresi
Φ	: Histeriklik parametresi
v	: Kinematik viskozite

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Sayısal modelde kullanılan sabit parametreler	12
Çizelge 3.2 : Sayısal modele tanımlanan başlangıç koşulu değerleri.	13
Çizelge 6.1 : İncelenen dere kesitine ait özellikler ve ortalama akım koşulları [16].	51
Çizelge 6.2 : Model testleri sonucunda incelenen hidrograflar için elde edilen değişkenlik dereceleri.	52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Uzayda sabit konumlu, sonlu kontrol hacim [6].	5
Şekil 2.2	: Tipik bir hidrografa ait elemanlar [7].	7
Şekil 2.3	: Saint Vennant denklemlerinin çıkartılışı sırasında kullanılan örnek kanal kesiti [5].	9
Şekil 2.4	: Su seviyesi ile debi arasındaki ilişki.	10
Şekil 2.5	: Beş farklı hidrograf için boyutsuz Clauser parametresi ile sürtünme hızı arasındaki ilişki [12].	11
Şekil 2.6	: Değişkenlik parametresinin hidrolik karakteristikler üzerindeki etkisi [13].	12
Şekil 2.7	: Değişkenlik parametresi ile histeriklik arasındaki ilişki [1].	12
Şekil 3.1	: Sayısal modelleme için oluşturulan akarsu hidrografi.	19
Şekil 3.2	: Sayısal modelleme için hazırlanan akış şeması.	20
Şekil 4.1	: Modele girilen hidrograf ve elde edilen su seviyesindeki değişim.	24
Şekil 4.2	: Elde edilen akım ve sürtünme hızları dağılımı.	24
Şekil 4.3	: Boyutsuz Nikurazde eş-değer pürüzlülük katsayısının zamanla değişimi.	25
Şekil 4.4	: Su seviyesi ve akarsu debisi arasındaki ilişki.	25
Şekil 4.5	: Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen debi ve su seviyesi değişimleri.	27
Şekil 4.6	: Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen akım hızı ve sürtünme hızındaki değişimler.	28
Şekil 4.7	: Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen boyutsuz pürüzlülük katsayıları.	28
Şekil 4.8	: Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen histeriklikler.	29
Şekil 4.9	: Farklı taban akış debileri ile elde edilen debi ve su seviyesi değişimleri.	29
Şekil 4.10	: Farklı taban akış debileri ile elde edilen akım ve sürtünme hızları dağılımı.	30
Şekil 4.11	: Farklı taban akış debileri ile elde edilen boyutsuz pürüzlülük katsayıları.	30
Şekil 4.12	: Farklı taban akış debileri ile elde edilen histeriklikler.	31
Şekil 4.13	: Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen debi ve su seviyesi değişimleri.	31
Şekil 4.14	: Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen akım ve sürtünme hızı değişimleri.	32
Şekil 4.15	: Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen pürüzlülük katsayıları.	32
Şekil 4.16	: Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen histeriklikler.	33
Şekil 4.17	: Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen boyutsuz pürüzlülük katsayıları.	34
Şekil 4.18	: Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen histeriklikler.	34
Şekil 4.19	: Değişkenlik hızı katsayısının histerikliğe etkisi.	35
Şekil 4.20	: Histeriklik parametresinin hesabında kullanılan referans grafik.	36
Şekil 4.21	: Değişkenlik parametresi ile histeriklik parametresi arasındaki ilişki.	38
Şekil 4.22	: Değişkenlik parametresi ile boyutsuz akım derinliği arasındaki ilişki.	39

Şekil 4.23 :	Değişkenlik parametresi ile boyutsuz sürtünme hızı arasındaki ilişki. ...	39
Şekil 4.24 :	Değişkenlik parametresi ile boyutsuz akım hızı arasındaki ilişki.	40
Şekil 4.25 :	Değişkenlik parametresi ile boyutsuz taban eğimi arasındaki ilişki.	40
Şekil 4.26 :	Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve histeriklik parametresi arasındaki ilişki.	41
Şekil 4.27 :	Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz akım derinliği arasındaki ilişki.	42
Şekil 4.28 :	Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz sürtünme hızı arasındaki ilişki.	42
Şekil 4.29 :	Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz akım hızı arasındaki ilişki.	43
Şekil 4.30 :	Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz taban eğimi arasındaki ilişki.	43
Şekil 5.1 :	Deneysel çalışma ile sayısal modellemede kullanılan hidrografların karşılaştırılması	46
Şekil 5.2 :	Deneysel çalışma ile sayısal modelleme sonucunda elde edilen histeriklik eğrilerinin karşılaştırılması.	46
Şekil 6.1 :	Akçay Deresi'ne ait D.S.İ'den temin edilen hidrograflar [16].	49
Şekil 6.2 :	Uygulama bölgesine ait uydu görüntüsü [16].	50
Şekil 6.3 :	Uygulama bölgesine ait bir fotoğraf [16].	50
Şekil 6.4 :	Sayısal modelleme sonucunda farklı dönüş aralıklarına karşılık gelen histeriklik eğrileri (q-h).	51

SERBEST YÜZEYLİ AKIMLARDA DEĞİŞKENLİK DERECESİNİN HİDROLİK KARAKTERİSTİKLER ÜZERİNE ETKİSİNİN SAYISAL MODELLEME İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Son yıllarda, etkileri giderek daha da fazla hissedilen küresel iklim değişikliği ile birlikte, akarsu ve nehir hidrograflarında belirgin değişimler görülmektedir. Değişen akarsu rejimleri ile oluşan değişken akım koşullarında, hidrolik özelliklerin ne derecede değiştiğinin saptanması büyük önem kazanmıştır.

Bu çalışmada, açık kanal akımlarında görülen histerik etkilerin, hidrolik özelliklere olan etkilerinin sayısal modelleme yoluyla belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple, herhangi bir cidar pürüzlülüğüne sahip bir prizmatik açık kanal akımı üzerinde permanan olmayan debi zaman serisine sahip tipik bir hidrograf oluşturulmuştur. Daha sonra, bu hidrografın ortaya çıkaracağı akım derinliği, kesitsel ortalama hız ve taban kayma gerilmesi zaman serilerini verecek mansap şartlarına ve hiçbir konvektif terime bağlı olmaksızın parametrik olarak çalışabilen bir hesap modeli ortaya konmuştur.

Yapılan çalışma kapsamında, tek boyutlu Saint Venant denklemleri kullanılarak, belirlenen başlangıç koşulları esas alınarak; derinlik, hız ve taban kayma gerilmesi gibi akım özelliklerinin yanı sıra akıma ait kararsızlık derecesi (histerik özellikler) yürütülen sayısal modelleme çalışması ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapılan parametrik çalışma ile akıma etki edecek farklı parametrelerin kararsızlık derecesi (histerik özellikler) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalara ek olarak, sayısal modelin doğruluğunun tayin edilebilmesi amacıyla, sayısal modellemede kullanılan veriler, Erdog (2014) tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi Laboratuvarı'nda yapılan deneysel çalışma verileri ile karşılaştırılmış; elde edilen sonuçların deneysel veri ile uyumluluğu, mevcut sayısal modelin değişken akımların fiziğini başarılı bir biçimde yansıtabildiği ortaya konmuştur.

Çalışma kapsamında histerik etkilerin ne ölçüde değiştiğini gözlemlemek için histerik etkiler boyutsuzlaştırılmıştır. Bunun için bir döngü şeklinde verilen histerik grafiklerde, su seviyesi ve debi eğrisi içerisinde kalan alan, maksimum su seviyesi ile başlangıç su seviyesi arasındaki fark ile maksimum debi ile başlangıç debisi arasındaki farka bölünmüştür. Bu boyutsuz sayıya göre histerik etki tanımlanmıştır. Bu sayı ne kadar büyük olursa histeri o kadar fazla etkin ve ne kadar küçük olursa histeri o kadar etkisiz olarak değerlendirilmiştir. Geniş diyagrama sahip grafikler dolayısıyla daha büyük histeriye sahip olup, dar diyagramlar etkisiz histeriye sahip olacaktır.

Model testleri göstermiştir ki, değişkenlik (kararsızlık) derecesindeki değişim belirli bir değere kadar (yaklaşık $\Gamma=10^{-4}$) önemsenmeyecek miktarda iken; belirli bir değerden sonra hızlı bir şekilde artmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, değişkenlik parametresinin yaklaşık 10^{-4} değerine kadar permanan akım koşulları için yapılan kabullerin yanlış olmayacağı; bu değerden daha yüksek değerlerde ise hata payının artacağı ortaya konmuştur. Öte yandan, pürüzlülük etkilerinin de incelendiği çalışmada, taban pürüzlülüğünün kayma gerilmelerini arttırdığı ve bu sebeple akımın daha kararlı özellik gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, daha önceden Nikuradze pürüzlülük katsayısı ile modele tanımlanan taban pürüzlülüğü, Manning pürüzlülük katsayısı cinsinden de ifade edilerek, yapılan analizlere ek olarak ilave sayısal modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Manning pürüzlülük katsayısı ile yürütölen sayısal modelleme çalışması neticesinde de, bir önceki çalışma ile örtüşen şekilde pürüzlülük arttıkça histerik etkilerin azaldığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlardan hareketle, şehirleşme ve dere ıslahı projeleri ile akarsu yataklarındaki pürüzlülüğün azalmasının akımdaki histerik etkileri arttırdığı; bununla paralel olarak permanan akımlar için türetilen direnç formüllerinin pürüzsüz yataklarda, pürüzlü yataklarda olduğu kadar doğru sonuç veremeyebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

THE INFLUENCE OF UNSTEADINESS DEGREE ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS IN FREE SURFACE FLOW VIA NUMERICAL MODELING

SUMMARY

In recent years, there have been significant changes in the stream and river hydrographs with the effects, which increasingly more, of global climate change. It has become very important to determine the variation of hydraulic characteristics, at the unsteady flow conditions caused by changing river regimes.

In this study, it is aimed to determine the effects on hydraulic characteristics caused by the hysterical effects seen in the free surface flows, via numerical modeling. Therefore, a typical hydrograph with non-permanent discharge time series has been introduced, on a prismatic open channel flow with a wall roughness. Then, a numerical model has been set up which is independent from the flow depth revealed by the aforementioned hydrograph, cross-sectional average velocity, the downstream conditions which gives bed shear stress and any convective term.

In the scope of the study, unsteadiness degree (hysterical properties) has been determined by numerical modeling as well as the flow properties such as depth, velocity and bed shear stress, using one-dimensional Saint Venant equations based on the specified initial conditions. Furthermore, the effects of different parameters on the unsteadiness degree have been analyzed in this study.

In order to verify the accuracy of the numerical model; the model results have been compared with the experimental data obtained by Erdog (2014) at the Hydraulics Laboratory of Istanbul Technical University. Due to the fact that the results of the numerical model and the physical model fit well, it is concluded that the existing numerical model can represent the unsteady flow physic successfully.

In the scope of the study, hysterical effects have been nondimensionalized in order to observe the fluctuation of hysteresis. Therefore, in the hysterical graphs, the area between water level and the flow curve has been divided by the difference between peak discharge and base discharge and the difference between maximum water level and initial water level. The hysteria has been defined with this non-dimensional parameter. It has been considered that the effectiveness increases as the parameter gets bigger and decreases as the parameter gets smaller. As a result, the plots with large diagrams have big hysteria, whereas narrow diagrams will have ineffective hysteria.

According to model results, while the change in unsteadiness degree is negligible up to a value (approx. $\Gamma=10^{-4}$), after a certain value it is increasing rapidly. In consequence of analysis, it is revealed that the assumptions for permanent flow conditions are accurate when the unsteadiness parameter is approximately up to 10^{-4} and the error margin will increase at higher values. On the other hand, it's determined that roughness increases the bed shear stress when the flow is more steady, in the study of roughness effect analysis.

However, additional numerical modeling studies have been carried out by expressing roughness in terms of Manning roughness coefficient, while it was previously defined as Nikuradse roughness coefficient in the model. In consequence of the study carried out with Manning roughness coefficient, it has been concluded compatible with the previous study that when the roughness increases the hysterical effects are decreasing. Conclusively, it has been revealed that the decrease in the roughness of the waterways, caused by river restoration projects and urbanization, increases the flow hysterical effects; correspondingly, in smooth waterways flow resistance formulas derived for permanent flow conditions can not be as accurate as in rough waterways.

1. GİRİŞ

Günümüzün en büyük sorunlarından biri olan küresel iklim değişikliği ile birlikte, akarsu akış hacimlerinde belirgin değişimler görülmektedir. Zaman içerisinde yağış miktarlarında ve akarsu akışlarında görülen değişimler, yıl içerisinde görülen taşkın sıklığındaki artışlar, konsantrasyon zamanlarının kısalması, kıyılara ulaşan debilerde ve katı madde miktarlarındaki değişimler gibi su bilimi için önemli sonuçlar doğurabilmektedir.

Akarsu, nehir, gel-git kanalları, haliç ve dalyanlar gibi su yüzeyi atmosfer ile temas halinde olan doğal kanallarda görülen akımlar, genellikle kararsız akım özellikleri gösterirler. Son yıllarda yaşanan iklim değişiklikleri, akarsu ve nehir hidrograflarında da belirgin değişimlere sebep olmaktadır. Pek çok bölgede, karakteristik nehir akışlarında mevsimsel kaymalar ile birlikte yıllık debi miktarlarında da artış ya da azalmalar gözlemlenmektedir. Diğer yandan katlanarak artan nüfus dolayısıyla hızla genişleyen şehirleşme faaliyetleri ve bitki örtüsündeki azalmalar, havzalardaki pürüzlülüğün azalarak akış katsayılarının köklü biçimde değişmesine ve konsantrasyon zamanlarının kısalmasına sebep olmaktadır. Bahsi geçen sebeplerden dolayı, değişen akarsu rejimleri ile oluşan değişken akımlardaki hidrolik özelliklerin belirlenebilmesi, açık kanal akımlarında karşılaşılan mühendislik problemlerinin çözümünde büyük önem taşımaktadır.

Bilindiği üzere hidrolik özelliklerin zamanla değiştiği akımlara kararsız akımlar denir. Bu tip akımlar doğada en çok karşılaşılan akım türü olmakla beraber, hidrolik olarak incelenmesi en zor akım tipleridir. Bu sebeple, birçok akım problemi kararlı akım kabulü ile çözülebilmektedir. Yapılan kabuller, karşılaşılan problemlerin çözümlerinde, her ne kadar faydalı ve kullanışlı olsalar da, değişken akım koşullarını tanımlamak konusunda çoğu zaman yeterli olamazlar. Bu nedenle, hidrolik formüllerin kararsız akım koşullarına göre yeniden düzeltilmeleri gerekmektedir.

Kararsız akım koşullarında geçerli sayılan kararlı akım kabullerinin doğruluğunun belirlenmesinde, histerik etkilerin önemi büyüktür. Histerik etkiler, bir hidrolik

özelliğın (akım hızı, taban kayma gerilmesi, vb.), aynı derinlik değeriinde hızlanan ve yavaşlayan akımlarda farklılıklar göstermesi durumudur. Bir akımdaki histerik etkilerin belirlenmesi, akımın ne derecede kararlı ya da kararsız özellikte olduğının anlaşılmasında büyük fayda sağlar. Histerik etkilerin baskın olduğı akımlarda klasik anahtar eğrisi yaklaşımı veya kararlı akım için üretilen direnç formülleri doğru sonuç veremezler.

1.1 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada, açık kanal akımlarında görülen histerik etkilerin, hidrolik parametreler üzerindeki etkilerinin sayısal modelleme yoluyla belirlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, herhangi bir cıdar pürüzlülüğüne sahip bir prizmatik açık kanal akımı üzerinde permanan olmayan debi zaman serisine sahip tipik bir hidrograf oluşturulmuştur. Daha sonra, bu hidrografın ortaya çıkaracağı akım derinliğı, kesitsel ortalama hız ve taban kayma gerilmesi zaman serilerini verecek mansap şartlarına ve hiçbir konvektif terime bağılı olmaksızın parametrik olarak çalışabilen bir hesap modeli ortaya konmuştur.

Yapılan çalışma kapsamında, tek boyutlu Saint Venant denklemleri kullanılarak, belirlenen başlangıç koşulları esas alınarak; derinlik, hız ve taban kayma gerilmesi gibi akım özelliklerinin yanı sıra akıma ait kararsızlık derecesi (histerik özellikler) yürütölen sayısal modelleme çalışması ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapılan parametrik çalışma ile akıma etki edecek farklı parametrelerin kararsızlık derecesi (histerik özellikler) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalara ek olarak, kullanılan yöntemin doğruluğının tayin edilebilmesi amacıyla, sayısal model, İstanbul Teknik Üniversitesi Laboratuvarı'nda yapılan deneysel çalışma verileri [1] ile doğrulanmış; elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak mevcut sayısal modelin değışken akımların fizliğini başarılı bir biçimde yansıtabildiğı ortaya konmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Serbest Yüzeyli Akımlar

Su yüzeyi atmosferle temas halinde olan akımlara serbest yüzeyli akımlar, başka bir deyişle açık kanal akımları denilmektedir. Bu tür akımlar genellikle, akarsular ve nehirlerde, haliç ve dalyanlar gibi kıyı bölgelerinde, gel-git kanallarında, sulama kanallarında, dren borularında, yağmur suyu ve kanalizasyon kanallarında meydana gelmektedir. Serbest yüzeyli akımların başlıca sebebi, hidrolik eğim veya basınç gradyanı olarak da ifade edilebilecek olan enerji farklılığıdır. Akışkan, enerjisi büyük olan noktadan küçük olan noktaya doğru akar [2].

Açık kanal akımlarında hız dağılımı genellikle üç boyutludur. Bununla birlikte, mühendislik uygulamalarında denklemler, kanalın akım doğrultusunda bir kesitindeki ortalama hıza göre yazılır. Buna kesitsel ortalama hız (V) denir. Kesitsel ortalama hız sadece akım yönünde değiştiğinden bir boyutlu bir değişkendir. Bu durum gerçek hayatta karşılaşılan önemli problemlerin çözümünde büyük kolaylık sağlar [3].

Açık kanal akımlarının sınıflandırılması, akımın zamana ve mesafeye göre değişimi esas alınarak yapılmaktadır. Zamanın kriter olarak baz alındığı akımlar, permanan (kararlı) ve permanan olmayan (kararsız) akımlar olmak üzere ikiye ayrılır. Eğer açık kanal üzerindeki belirli bir noktadaki akım derinliğinde, zamana bağlı olarak bir değişim gözlemlenmiyorsa ($\partial h/\partial t=0$), bu tarz akımlara permanan akımlar denir. Öte yandan, su seviyesinde, zamana bağlı olarak değişimin görüldüğü akımlara ($\partial h/\partial t \neq 0$) permanan olmayan akımlar denir [4].

Akım derinliği ve hızının tüm kanal kesiti boyunca sabit olması durumunda ($\partial h/\partial x=0$, $\partial V/\partial x=0$), bu tarz akımlara üniform akımlar denir. Üniform akım durumu sadece prizmatik kanallarda gerçekleşebilmektedir. Bununla birlikte, üniform açık kanal akımlarında, basınç kesit içerisinde, hidrostatik kanunlara uygun olarak değişir. Öte yandan, su seviyesinin ve akım hızının kanal kesiti boyunca değişmesi

durumunda ($\partial h/\partial x \neq 0$, $\partial V/\partial x \neq 0$) ise bu tarz akımlara üniform olmayan akımlar denir. [4].

Üniform akımların hesabında genel olarak Chézy ve Manning denklemleri kullanılmaktadır. Aşağıda görülmekte olan Chézy denkleminde V, akım hızını, R, hidrolik yarıçapı, I_0 , taban eğimini, C_* ise Chézy katsayısını ifade etmektedir. Chézy denklemi 19. yüzyıldan beri su biliminde kullanılan, deneysel olarak elde edilmiş bir denklemdir.

$$V = C_* \cdot \sqrt{R \cdot I_0} \quad (2.1)$$

Manning denklemi için verilen bağıntı ise aşağıda görülmektedir. Burada, n ile ifade edilen terim Manning pürüzlülük katsayısını ifade etmektedir [2].

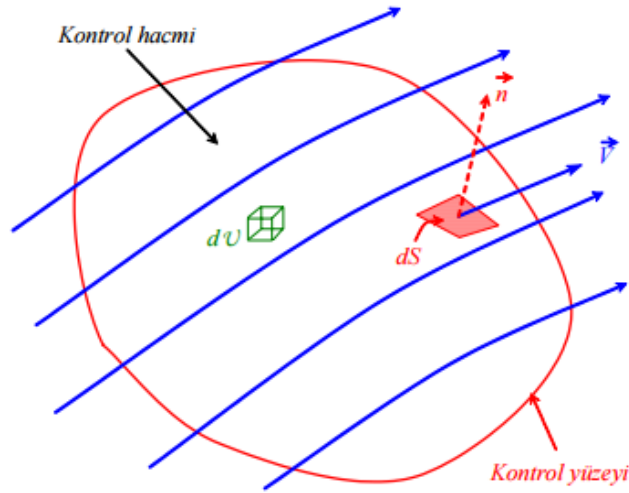
$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I_0^{1/2} \quad (2.2)$$

Yukarıda bahsi geçen bağıntılarda dikkat edilmesi gereken husus, denklemlerdeki Chézy ve Manning katsayılarının boyutlu olmalarıdır. Bu sebeple bağıntılarda, bu katsayıların boyutuna uygun boyutlar kullanılması gerekmektedir.

2.2 Permanan ve Üniform Olmayan Açık Kanal Akımları

Su seviyesinin hem zamana hem de konuma bağlı olarak değişmesi durumunda, böyle akımlara permanan ve üniform olmayan açık kanal akımları denir. Doğada en çok karşılaşılan akım türü olmakla beraber çözümü en zor olan akım çeşididir. Permanan ve üniform olmayan açık kanal akımlarının çözümünde süreklilik ve hareket denklemlerinden faydalanılmaktadır. Öte yandan, pratikte birçok açık kanal problemi kararlı (permanan) akım kabulü yapılarak çözülmektedir [5].

Süreklilik denkleminin çıkartılışında, kütlenin korunumu prensibinden yararlanılır. Şekil 2.1’de görülen örnek bir kesitte alınan dV kontrol hacminin S yüzeyinden birim zamanda çıkan net kütle miktarının, aynı kontrol hacimdeki kütle miktarının birim zamandaki değişimine eşit olması süreklilik denklemi ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.1 : Uzayda sabit konumlu, sonlu kontrol hacim [6].

Denklem (2.3)'te süreklilik denklemi görülmektedir.

$$\iint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot dv \quad (2.3)$$

Burada, ρ , akışkanın yoğunluğunu, V , akışkanın hızını ifade etmektedir. Öte yandan, momentumun korunumu prensibi ele alındığında; dış kuvvetler toplamının atalet kuvvetine eşit olduğu bilinmektedir. En genel hali ile hareket denklemi aşağıda görülmektedir [6].

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.4)$$

Permanan olmayan açık kanal akımları, tedrici değişken ve ani değişken akımlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tedrici değişken akımlarda, değişimlerin uzun mesafeler dâhilinde ve nispeten yavaş meydana geldiği, düşey ivmelerin yerçekimi ivmesinin yanında ihmal edilebileceği ve dolayısıyla basınç dağılışılarının hidrostatik olacağı kabul edilebilir. Hareket uzun mesafelerde meydana geleceğinden, incelemeler sırasında taban eğiminin ve sürtünme etkilerinin göz önünde tutulması gerekir. Tedrici değişken akımların incelenmesi sırasında De Saint Venant denklemleri kullanılabilir.

Ani değişken hareketlerin incelenmesi sırasında, akım parametrelerinde meydana gelen değişimlerin çok kısa mesafelerde olması sebebiyle, taban eğimi ve sürtünme etkileri ihmal edilebilmektedir. Bu halde süreksizlik enkesitinin memba ve mansap

taraflarında mevcut basınç dağılımlarının hidrostatik olduğu kabul edilebildiği halde, süreksizlik enkesitinde bu kabul yapılamaz ve düşey ivmelerin de göz önünde tutulması gerekir. Bu tip dalgalar seviye artışı olan hallerde pozitif, seviye azalışı olan hallerde negatif dalga olarak adlandırılır [5].

2.3 Tipik Bir Yağış Hidrografının İncelenmesi

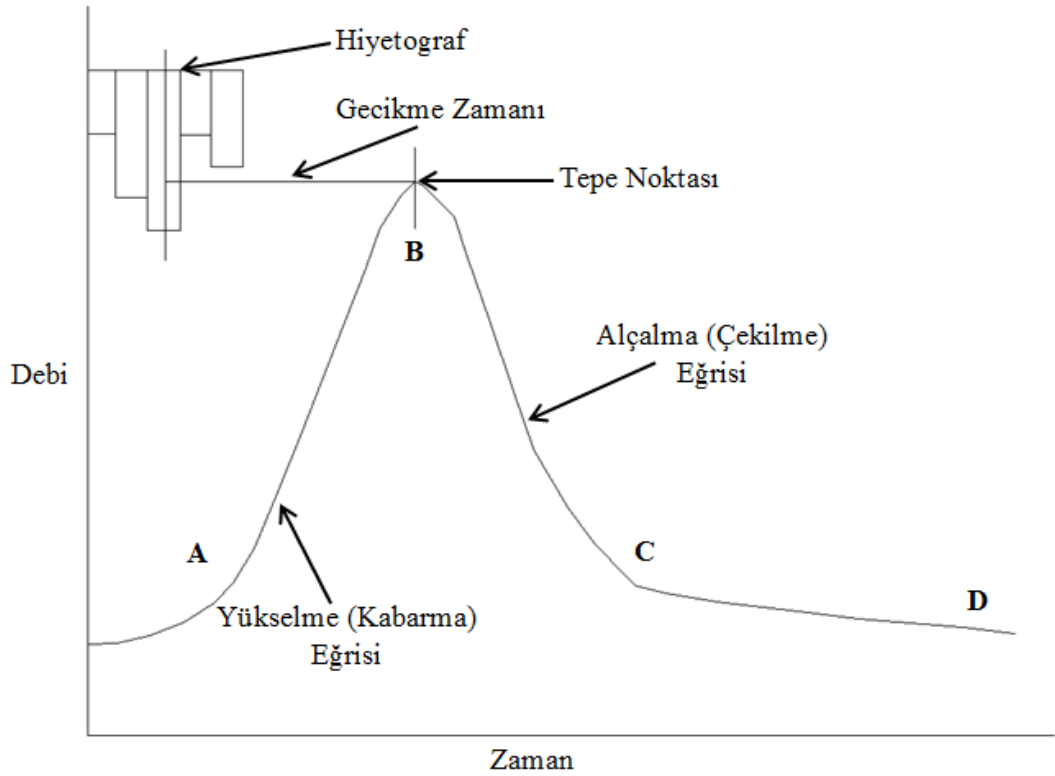
Hidrograf incelemeleri, çoğunlukla taşkın çalışmalarında su debisinin zaman içerisinde değişimini belirlemek için kullanılır. Böylelikle akarsuyu besleyen havzalar ile yağışı akışa dönüştüren bir sistem biçiminde düşünüp, yağış hiyetografi ile akış hidrografı arasındaki bağ ortaya çıkartılır.

Bir akarsuyun herhangi bir kesitindeki akışın zaman içerisindeki farklılığını gösteren eğriye hidrograf denir. Şekil 2.2’de tipik bir hidrografa ait öğeler görülmektedir. Burada düşey eksen debi (genellikle m^3/s), yatay eksen zaman (genellikle saat) bulunur.

Aşağıdaki şekilde görülen yükselme eğrisinin A ve B noktadaki kısmının eğimi oldukça fazladır. Bu görünüm, bölgenin yağmur ve kar yağışı özelliklerine, bölgedeki bitki örtüsü ve toprağın nemi gibi havza özelliklerine bağlıdır.

Hidrografın tepe noktası olan B noktasında akış en yüksek seviyeye ulaşır. Akışın hiyetografinin ağırlık merkezi ile B tepe noktası arasındaki zaman farkına gecikme zamanı denilir.

Çekilme eğrisi başka bir deyişle alçalma eğrisi, akarsu debisinin gittikçe azaldığı B ile D noktası arasındaki bölümdür. Bu bölüm iki kısımdan oluşur. BC kısmında havzanın yüzeyinde biriken suyun ve yüzeyaltı akışının çıkış noktasına ulaştığı kısımdır. CD kısmı ise taban akışı ile akarsu beslemesinin olduğu kısımdır.



Şekil 2.2 : Tipik bir hidrografa ait elemanlar [7].

Bir akış hidrografında dolaysız akış ve taban akışı kısımları yaklaşık olarak belirlenebilir. Yağış sona erdikten sonra havzanın en uzak noktasından çıkış noktasına akışın ulaşması olan geçiş süresi sonunda dolaysız akış son bulur. Büyük havzalarda en yüksek debi zaman aralığı ile dolaysız akışın bittiği zaman aralığı aşağıdaki amprik denklemle yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$N = 0.9 \cdot A^2 \quad (2.5)$$

Bu denklemde, A (km²) olarak havza alanı ve N (gün) olarak elde edilir. Taban akışı değerinin belirlenmesinde çeşitli kabuller yapılabilir [7].

2.4 Tek Boyutlu De Saint Venant Denklemleri

Tek boyutlu Saint Venant denklemleri açık kanallardaki kararsız ve tedrici değişken akımların hesaplanabilmesi amacıyla, 1848 yılında Adhemar Jean Claude Barre de Saint Vennant tarafından geliştirilmiştir. Sığ su denklemleri olarak da bilinen bu denklem sistemi; bir boyutlu, zamanla değişen açık kanal akımları için kütle ve momentumun korunumu prensiplerinden yararlanarak, bu akımların tek

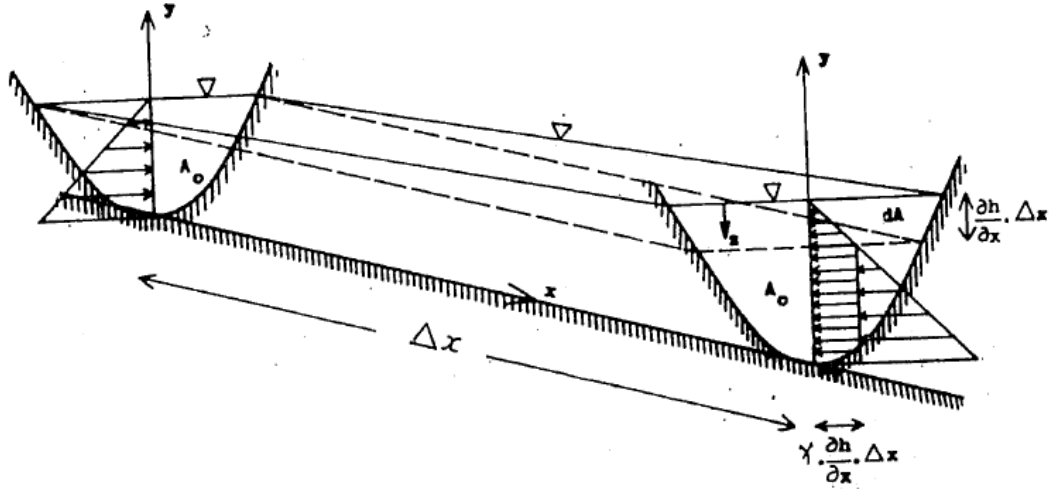
boyutlu olarak çözümünde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu denklem seti iki boyutlu biçimde yazıldığında derinlik ortalamalı Navier Stokes olarak da anılır. Bu denklem setinin çözümünde sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yaklaşımları kullanılarak çok sayıda çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Günümüzde kullanılan birçok akım modeli (HEC-RAS, SWMM5, ISIS, Flood Modeller, TU-Flow, MIKE 11 and MIKE SHE), bu denklem sisteminden faydalanmaktadır [8].

Süreklilik denklemi, akışkan maddelerin akış mikatrının, aktığı hacim içerisinde korunarak taşınmasını tanımlayan denklemlerdir. Kütle, enerji, momentum, elektrik yükü ve diğer doğal miktarlarda kendi uygun koşullarda korunduğundan, çeşitli fiziksel olaylar süreklilik denklemi kullanılarak tarif edilebilir.

Hareket denklemi, fiziksel sistemin davranışını, sistemin hareketinin zamanın fonksiyonu olarak tanımlayarak izah eder [9].

Saint Vennant denklemlerinin çıkartılışı sırasında, öncelikle Şekil 2.3'ten referansla, süreklilik denkleminden yararlanarak, birbirinden Δx mesafesindeki iki enkesitten dt zaman aralığında giren ve çıkan debilerin farkıyla, aynı zaman aralığında Δx boyunca kanala giren veya çıkan q debisinin toplamının, hacimde meydana gelen değişime eşit olduğu yazılır. Daha sonra hareket denklemi kullanılarak, hareket miktarında zamanla meydana gelen değişimin, sisteme etki eden dış kuvvetlere eşit olacağı göz önünde tutulur. Sisteme etki eden basınç kuvvetleri de hesaba katılıp gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, dikdörtgen kesit ve $q=0$ özel hali için De Saint Vennant tarafından çıkartılmış Saint Vennant denklemleri elde edilir.

Özel halde elde edilmiş olan Saint Vennant denklemleri Denklem (2.6) ve (2.7)'de görülmektedir. Bu bağıntılarda, A , kesit alanını, V , kesitsel ortalama hızı, B , kesite genişliğini, $\partial V/\partial x$, hızın konuma bağlı olarak değişimini, $\partial V/\partial t$, hızın zamana bağlı olarak değişimini, $\partial h/\partial x$, su seviyesinin konuma bağlı olarak değişimini, $\partial h/\partial t$ ise su seviyesinin zamana bağlı olarak değişimini ifade etmektedir [5].



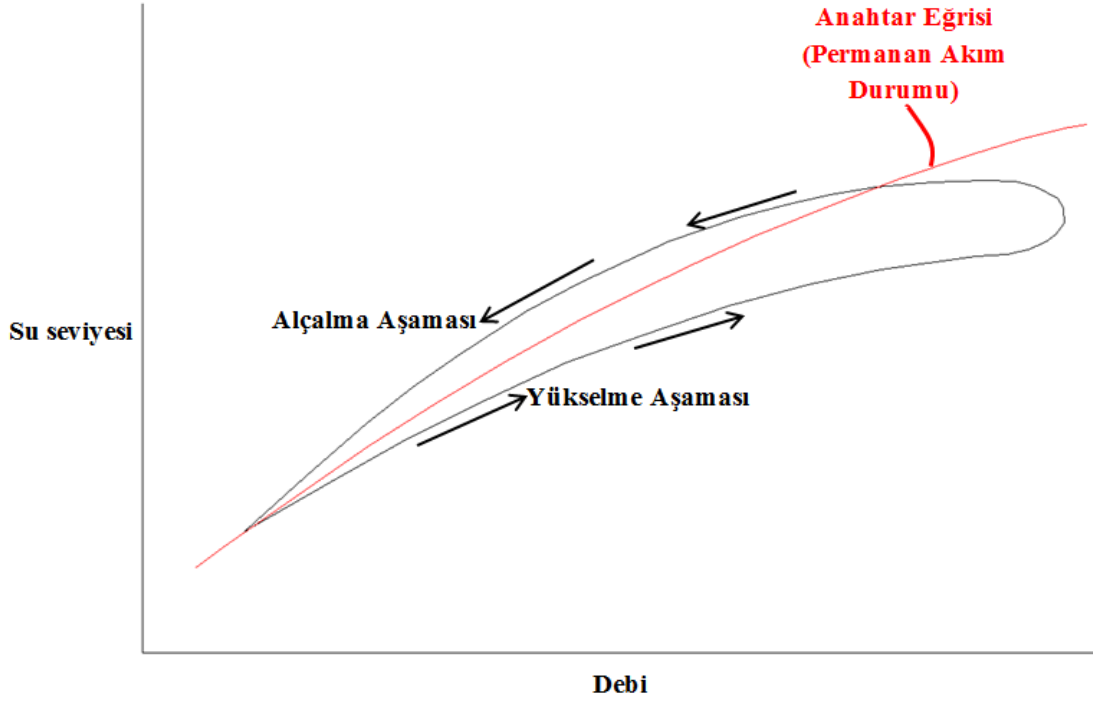
Şekil 2.3 : Saint Vennant denklemlerinin çıkartılışı sırasında kullanılan örnek kanal kesiti [5].

$$A \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + J - I_0 = 0 \quad (2.7)$$

2.5 Değişkenlik Parametresinin Hidrolik Karakteristikler Üzerindeki Etkileri

Akarsularda, değişkenlik (kararsızlık) parametresi akım özelliklerinin değişiminin belirlenmesinde önemli bir etkidir. Akarsulardaki kararsız akımların hidrolik karakteristikler üzerindeki etkilerini anlayabilmek amacıyla birçok araştırmacı bu konu üzerine çalışmalar yürütmüştür. Henderson (1966) yaptığı çalışmalarda, belirli akarsu akımlarına ait kararsızlık derecelerini ortaya koyabilmek amacı ile bu akımlara ait su seviyesi-debi değişimlerini irdelemiş ve histeriklik eğrileri ile akımların kararsızlık derecelerini değerlendirmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, histeriklik eğrileri arasındaki mesafe ne kadar fazla ise akımın o kadar kararsız olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere akımın kararsızlığı, hidrografın yükselen kısmında (rising stage), azalan kısmına (falling stage) göre daha fazladır [10].



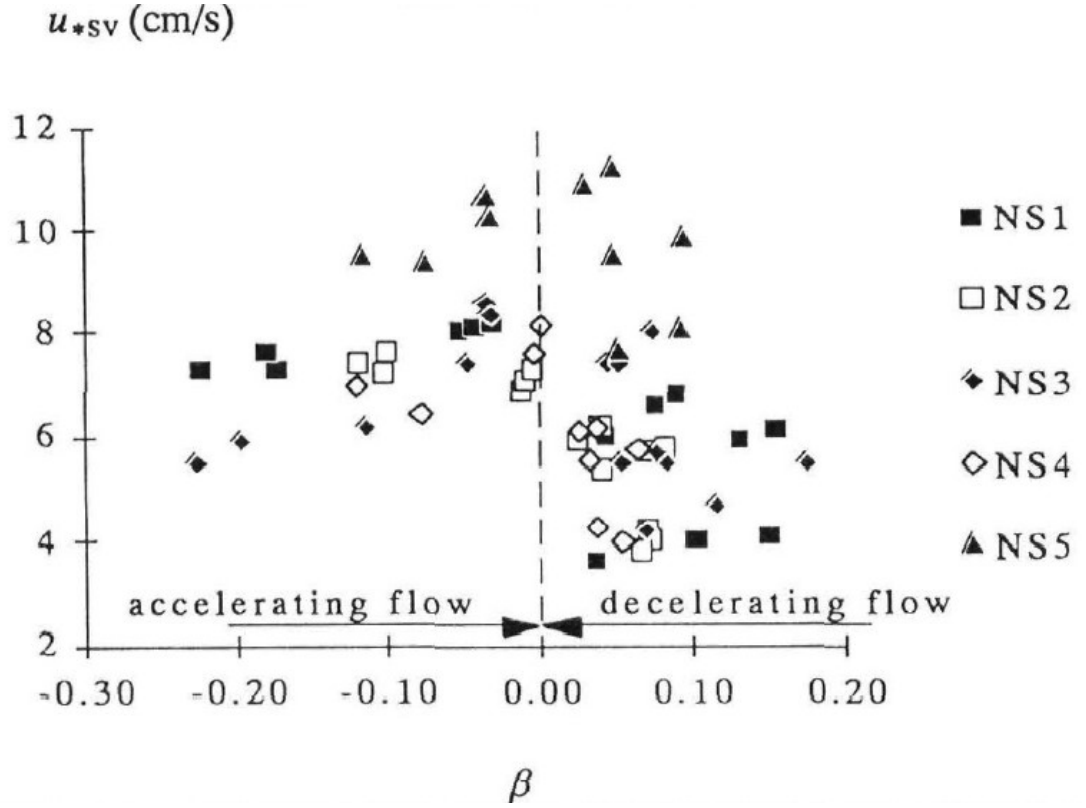
Şekil 2.4 : Su seviyesi ile debi arasındaki ilişki.

Hayashi (1988) tarafından yürütülen çalışmalarda türbülans derecesinin, hidrografın yükselen kısmında, alçalan kısma göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma ile aynı zamanda kararsızlık derecesinin artması ile birlikte türbülans derecesinin de arttığı ortaya konmuştur [11].

Tu ve Graf 1992 yılında, yürüttüğü çalışmalarda 5 farklı hidrograf kullanarak akımların kararsızlık derecesini belirlemek amacıyla Clauser denge parametresini (β) aşağıdaki şekilde modifiye etmişlerdir.

$$\beta = K \cdot \left(-\frac{h}{V^2} \cdot \frac{dV}{dt} \right) \quad (2.8)$$

Akımın hızlandığı kısımda “ β ” negatif değerler alırken akımın yavaşladığı kısımlarda “ β ” pozitif değerler almıştır. Bu çalışmada, akımın hızlandığı kısımda elde edilen sürtünme hızı değerlerinin, akımın yavaşladığı kısımda elde edilen değerlere göre daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Şekil 2.5’te modifiye edilmiş Clauser parametresi ile sürtünme hızı arasındaki ilişki görülmektedir [12].



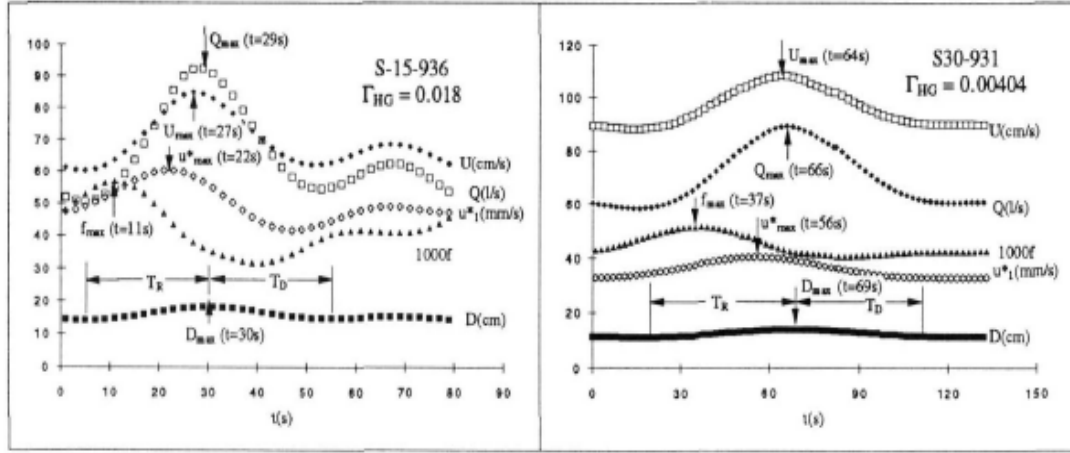
Şekil 2.5 : Beş farklı hidrograf için boyutsuz Clauser parametresi ile sürtünme hızı arasındaki ilişki [12].

Song ve Graf 1996 yılında, pürüzlü yüzeye sahip bir açık kanalda yürüttükleri deneysel çalışmalarda, permanan olmayan (kararsız) ve üniform olmayan akım koşullarında taban kayma gerilmelerini elde etmeyi amaçlamışlardır.

Yapılan çalışmalarda, değişkenlik parametresi, aşağıdaki bağıntı yoluyla tanımlanmıştır. Burada, U_f sürtünme hızını, Δh , maksimum su seviyesi ile başlangıç su seviyesi arasındaki farkı, Δt , toplam hidrograf süresini ifade etmektedir.

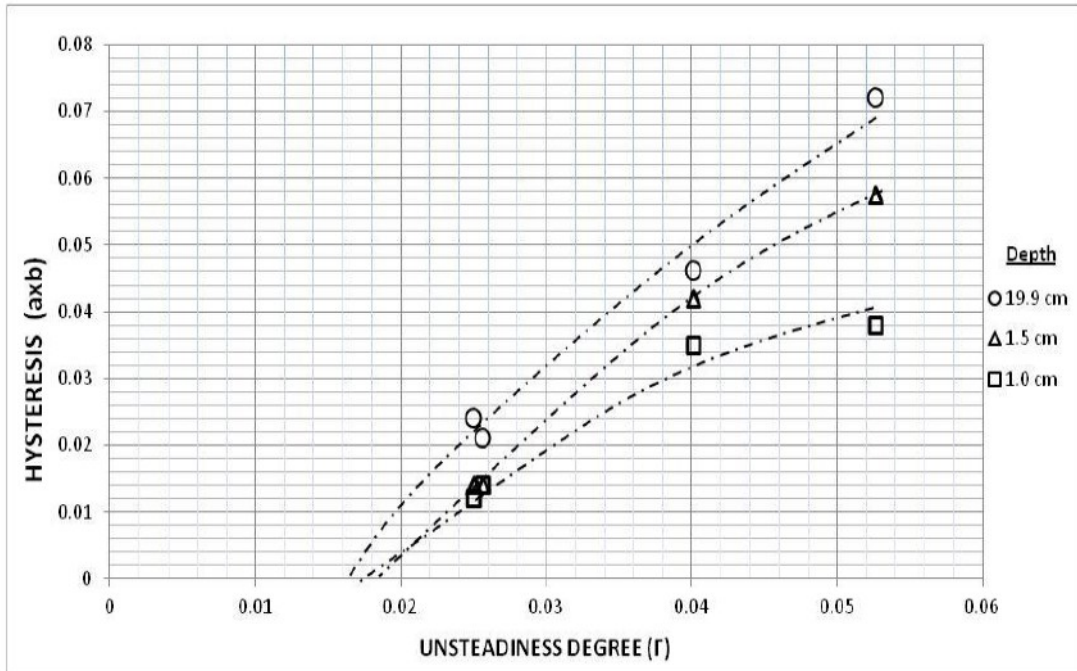
$$\Gamma = \frac{1}{U_f} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2.9)$$

33 hidrografın ele alındığı çalışmada, akımların kararsızlık derecesinin hidrolik karakteristikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 2.4'te, yapılan deneyler neticesinde elde edilen hidrolik karakteristikler, en düşük ve en yüksek değişkenlik parametresi değerleri için verilmiştir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere, değişkenlik parametresinin artması ile taban kayma gerilmelerinde de bir artış gözlemlenmiştir [13].



Şekil 2.6 : Değişkenlik parametresinin hidrolik karakteristikler üzerindeki etkisi [13].

2014 yılında kararsızlık derecesinin hidrolik özellikler üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacı ile Eryılmaz Erdog tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda farklı hidrograflar kullanılarak çeşitli deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalarda da akıma ait kararsızlık derecesini belirleyebilmek için Song ve Graf tarafından kullanılan kararsızlık parametresinden (Denklem 2.9) faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde (Şekil 2.7) histerikliğin artması ile birlikte akımın kararsızlık derecesinin arttığı ortaya konmuştur [1].



Şekil 2.7 : Değişkenlik parametresi ile histeriklik arasındaki ilişki [1].

2.6 Değişkenlik Yayılma Hızı

“Değişkenlik yayılma hızı” terimi bu çalışmada taşkın dalgalarının ilerleme hızını ifade etmek için kullanılmaktadır. Sığ su seleritesi ($\sqrt{gh}$) ile karıştırılmaması adına “dalga ilerleme hızı” terimi kullanılmamıştır.

Değişkenlik yayılma hızının hesabında, öncelikle, akım genişliğinin akım derinliğine göre çok fazla olduğu düşünülürse; hidrolik yarıçapın su derinliğine eşit olduğu kabul edilebilir. Akımın membasında yavaşça değişen bir taşkın dalgası (debi-zaman serisi $q(x,t)$) etkili olmaya başladığında, bu debi değişimi mansaba doğru yayılacaktır. Langrangyan (Langrangian) yaklaşımı ile bizim de membadan mansaba doğru taşkın dalgası ile birlikte hareket ettiğimiz düşünülürse; bu durumda bulunduğumuz noktada debi değişmeyecektir. Başka bir deyişle $C (\partial x / \partial t)$ hızında gidiyor iken, $dq=0$ olacaktır. Bu sebeple C hızı, değişkenliğin yayılma (taşkın dalgasının ilerleme) hızı olarak kabul edilebilmektedir. Debideki değişim aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\partial q = \frac{\partial q}{\partial t} \cdot dt + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot dx \quad (2.10)$$

Burada süreklilik denklemi yardımı ile;

$$\frac{\partial q}{\partial x} = - \frac{\partial q}{\partial h} \quad (2.11)$$

olacağından, değişkenliğin yayılma hızı C ;

$$C = \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial q / \partial t}{\partial h / \partial t} = \frac{\partial q}{\partial h} = \frac{\partial(V \cdot h)}{\partial h} = V + h \cdot \frac{\partial V}{\partial h} \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Kesitsel ortalama hız (V) daha önceki bölümlerde de bahsi geçen Manning bağıntısı kullanılarak aşağıdaki denklem ile elde edilebilir.

$$V = \frac{1}{n} \cdot h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (2.13)$$

Hızdaki değişim ($\partial V / \partial h$) ise;

$$\frac{\partial V}{\partial h} = \frac{1}{n} \cdot I^{1/2} \cdot \frac{2}{3} \cdot h^{-1/3} \quad (2.14)$$

olacaktır. Denklem (2.13) ve (2.14)'ü denklem (2.12)'de yerine koyarsak, değişkenliğin yayılma hızı;

$$C = V + h \cdot \frac{\partial V}{\partial h} = \frac{5}{3} \cdot V \quad (2.15)$$

olur.

Eğer Manning denklemi yerine Chézy denklemi kullanılırsa, kesitsel ortalama hız (V);

$$V = C_* \cdot h^{1/2} \cdot I^{1/2} \quad (2.16)$$

olarak elde edilir. Hızdaki değişim ($\partial V / \partial h$) ise;

$$\frac{\partial V}{\partial h} = C_* \cdot I^{1/2} \cdot \frac{1}{2} \cdot h^{-1/2} \quad (2.17)$$

olur. Buradan değişkenliğin yayılma hızı;

$$C = V + h \cdot \frac{\partial V}{\partial h} = \frac{3}{2} \cdot V \quad (2.18)$$

olarak bulunabilmektedir [14].

3. YÖNTEM

3.1 Kullanılan Denklemler

Bu çalışmada amaç; herhangi bir cidar pürüzlülüğüne sahip bir prizmatik açık kanal akımı üzerinde, verilen herhangi bir hidrografın (permanan olmayan debi zaman serisinin) ortaya çıkaracağı;

- 1) akım derinliği,
- 2) kesitsel ortalama hız,
- 3) taban kayma gerilmesi,

-zaman serilerini verecek mansap şartlarına ve hiçbir konvektif terime bağlı olmaksızın parametrik olarak çalışabilen bir hesap modeli ortaya konmasıdır. Yapılan çalışma kapsamında Bölüm 2.4'te bahsi geçen Saint Venant denklemleri, yürütülen sayısal modelleme analizinde kullanılmak üzere konvektif terimlerden bağımsız bir hale uyarlanmıştır. Saint Vennant denklem setinden kullanılan bağıntı aşağıda görülmektedir.

$$\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + J - I_0 = 0 \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda V , kanaldan geçen akımın hızını, I_0 , taban eğimini, J ise enerji çizgisinin eğimini ifade etmektedir. Enerji çizgisinin eğimi aşağıdaki denklemde görüldüğü üzere taban kayma gerilmesi (τ_0) ve sürtünme hızına (U_f) bağlanabilir.

$$J = \frac{\tau_0}{\gamma \cdot R} = \frac{U_f^2 \cdot \rho}{\rho \cdot g \cdot R} = \frac{U_f^2}{g \cdot R} \quad (3.2)$$

Yapılan incelemeler sırasında taban eğimi I_0 olan bir kanal göz önünde tutulmuştur ve bu eğimin;

$$\sin(\theta) \approx \tan(\theta) = I_0$$

kabul edilebilecek kadar küçük olduğu düşünülmüştür. Denklem (3.1)'de görülen $\partial h / \partial x$ parametresini hesaplarken ise açık kanal akımındaki değişkenliğin yayılım hızından yararlanılmıştır. Su seviyesindeki değişim $h(x,t)$;

$$dh = \frac{\partial h}{\partial t} \cdot dt + \frac{\partial h}{\partial x} dx = 0 \quad (3.3)$$

gibi ifade edilirse, değişkenliğin yayılım hızı $C(x/t)$ aşağıdaki gibi elde edilir [9].

$$\frac{\partial x}{\partial t} = - \frac{\partial h}{\partial t} / \frac{\partial h}{\partial x} = C \quad (3.4)$$

Buradan $\partial h / \partial x$ parametresini yalnız bırakırsak;

$$\frac{\partial h}{\partial x} = - \frac{1}{C} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.5)$$

bağıntısı elde edilir. Değişkenliğin yayılma hızı $C=c.V$ şeklinde kesitsel ortalama hızın bir c katı şeklinde tanımlanabileceği ve c katsayısının Manning denklemi kullanarak hesaplandığında $5/3$ değerinde, Chézy denklemi kullanılarak hesaplandığında ise $3/2$ değerinde ortaya çıkacağı Bölüm 2.6'da gösterilmiştir. Henderson 1966 yılında yazdığı kitabında bu yaklaşımı ilk kez ortaya koymuştur [10]. Denklem (3.5)'i özel olarak birim genişlikten geçen debi (q) için yazıp, C yerine $c.V$ yerleştirilirse;

$$\frac{\partial h}{\partial x} = - \frac{h}{q \cdot c} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.6)$$

elde edilecektir.

Denklem (3.1)'de görülen hız teriminin kısmi türevlerini $V=q/h$ kabulü ile açarsak, $\partial V / \partial t$;

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial(q/h)}{\partial t} = \left(\frac{\partial q}{\partial t} \cdot h - q \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \right) \cdot \frac{1}{h^2} = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{q}{h^2} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.7)$$

bağıntısındaki gibi ifade edilebilir.

Bununla birlikte, $\partial V / \partial x$ terimi açılırsa;

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial(q/h)}{\partial x} = \left(\frac{\partial q}{\partial x} \cdot h - q \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) \cdot \frac{1}{h^2} = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{q}{h^2} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.8)$$

olarak elde edilir.

Öte yandan, süreklilik denklemi kullanılarak , $\partial q / \partial x$ parametresi;

$$\frac{\partial q}{\partial x} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.9)$$

olmaktadır.

Denklem (3.6), (3.9), Denklem (3.8)'de yerlerine konulup, gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;

$$\frac{\partial V}{\partial x} = - \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{h \cdot c} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.10)$$

bağıntısı elde edilir.

Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen Denklem (3.2), (3.6), (3.7) ve (3.10), Denklem (3.1)'de yerlerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapılırsa; sayısal modellemede kullanılacak olan (3.11) bağıntısına ulaşılmaktadır.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{I_0 \cdot g \cdot h - h \cdot \frac{U_f^2}{R} - \frac{\partial q}{\partial t}}{- \frac{2q}{h} + \frac{q}{h \cdot c} - \frac{g \cdot h^2}{q \cdot c}} \quad (3.11)$$

3.2 Denklemlerin Sayısallaştırılması

Denklemlerin modele uygulanabilmesi için öncelikle, yer çekimi ivmesi (g), kinematik viskozite (v) ve kanal genişliği (B) gibi sabit parametreler modelde tanımlanmıştır. Bahsi geçen parametrelere ait değerler Çizelge 3.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.1 : Sayısal modelde kullanılan sabit parametreler.

Parametre	Değer
$g \text{ (m/s}^2\text{)}$	9,81
$\nu \text{ (m}^2\text{/s)}$	10^{-6}
$B \text{ (m)}$	10

Modelde başlangıç koşulunun permanan ve iniform bir taban akışı olduğu ve taban akışının sabit kaldığı kabul edilmiştir. Çizelge 3.1’de verilen parametreler modele girildikten sonra, başlangıç koşulu olarak modele, birim genişlikten geçen taban akışı debisi (q_0), başlangıç su seviyesi (h_0), hidrograf zaman ölçeği (T^*), Nikuradze eş-değer ürüzlülük katsayısı (k_s), maksimum dolaysız akış debisi (Δq) miktarları ve değişkenlik yayılım hızı parametresi (c) tanımlanmıştır. Tanımlanan parametrelere ait başlangıç değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Sayısal modele tanımlanan başlangıç koşulu değerleri.

Parametre	Değer
$q_0 \text{ (m}^3\text{/s/m)}$	0,15
$h_0 \text{ (m)}$	0,50
$T^* \text{ (sa)}$	20,0
$k_s \text{ (m)}$	0,01
$\Delta q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$	1,20
c	3/2

Bahsi geçen başlangıç koşullarına ek olarak akım hızı (V);

$$V_0 = \frac{q_0}{h_0} \quad (3.12)$$

elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, hidrolik yarıçap (R_0) denklem (3.13) vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$R_0 = \frac{h_0 \cdot B}{h_0 + 2 \cdot B} \quad (3.13)$$

Modelde hız dağılımının daima logaritmik olduğu (cidar kanuna uyduğu) kabul edilmiş, başlangıç sürtünme hızı (U_f) değerini kesitsel ortalama hız (V_0), hidrolik yarıçap (R_0) ve eş-değer pürüzlülüğe (k_s) bağlı olarak hesaplayabilmek amacıyla Colebrook-White denkleminden faydalanılmıştır. Açık kanal akımları için düzeltilmiş olan bu denklem (3.14) vasıtasıyla başlangıç sürtünme hızı değeri, verilen başlangıç değerden yola çıkarak iteratif olarak elde edilmektedir.

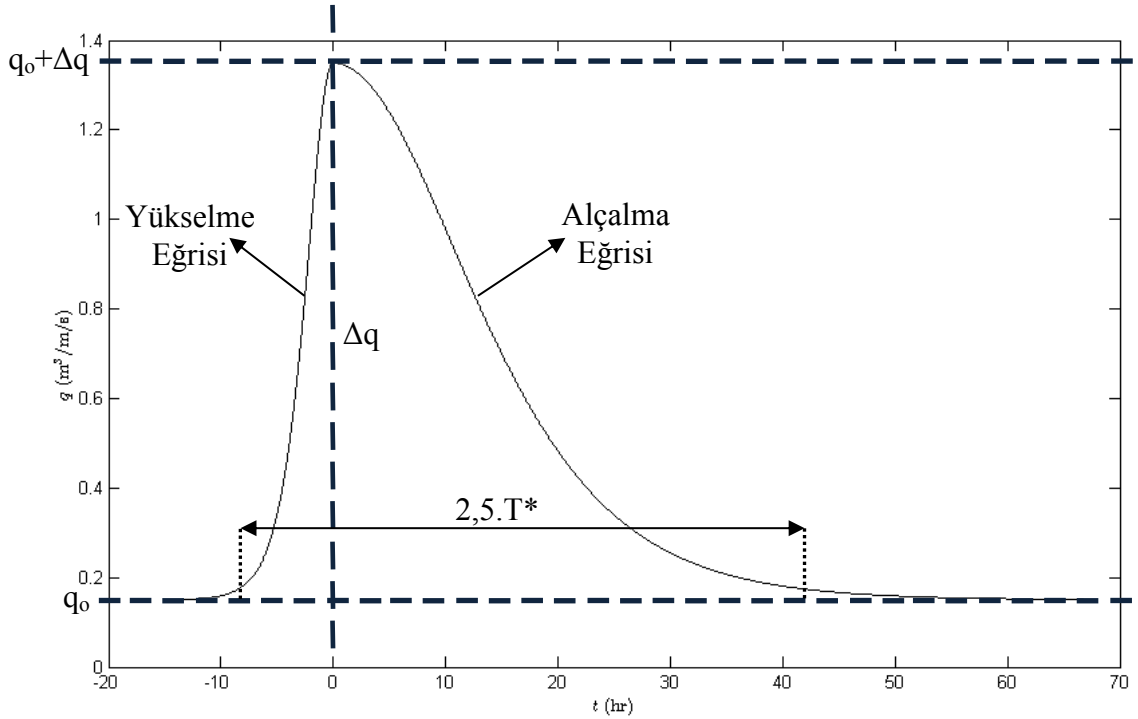
$$\frac{V_0}{\sqrt{8} \cdot U_{f_0}} = -2 \cdot \log \left[\frac{k_s}{14,8 \cdot R_0} + \frac{2,51}{V_0 \cdot 4 \cdot R} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{8} \cdot U_{f_0}} \right] \quad (3.14)$$

Model başlangıçta üniform akım koşullarını sağlayan taban eğimi değerini (I_0) de bu denklemden bulduğu cidar kayma gerilmesinin kullanarak otomatik hesaplamaktadır.

Yapılan sayısal modelleme çalışmasında tipik bir akarsu hidrografını temsil edebilmek amacıyla, yukarıda tanımlanan q_0 , T^* ve Δq parametreleri ile örnek bir hidrograf şablonu oluşturulmuş ve tüm modelleme çalışmalarında bu hidrograf şablonu kullanılmıştır. Buna göre hidrografın yükselme eğrisinin, alçalma eğrisine göre yaklaşık 5 kat hızlı değiştiği öngörülerek, hidrograf için aşağıdaki parametrik bağıntı uygun bulunmuştur.

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + \Delta q \cdot \sec h^2 \left(\frac{2 \cdot \pi}{T^*} \cdot t \right), & t < 0 \text{ (Yükselme eğrisi)} \\ q_0 + \Delta q \cdot \sec h^2 \left(\frac{2 \cdot \pi}{5 \cdot T^*} \cdot t \right), & t > 0 \text{ (Alçalma eğrisi)} \end{cases} \quad (3.15)$$

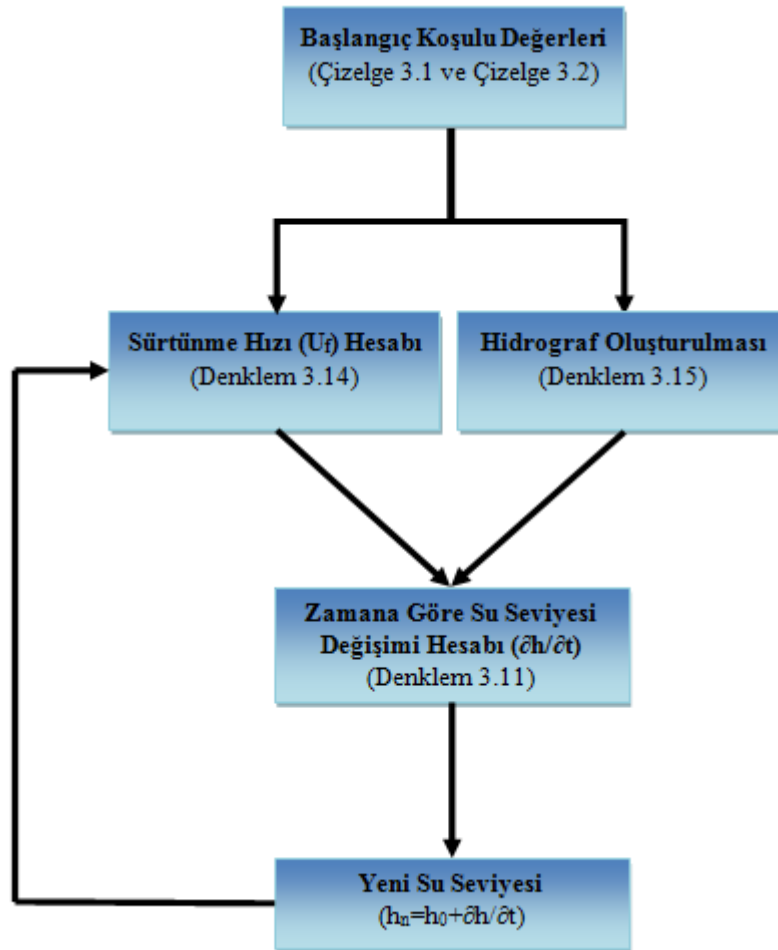
Sayısal modelleme için oluşturulan bu hidrograf Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1 : Sayısal modelleme için oluşturulan akarsu hidrografı.

Bu tür hidrograf, akarsu yatağı taşkınları kadar, kıyı bölgelerinde, haliç ve akarsu ağızlarında ve özellikle gel-git kanallarındaki (tidal inlet) akımlarda görülebilmektedir. Her ne kadar bu çalışmadaki tüm hidrograflar denklem (3.15) ile tanımlanmış olsa da, önerilen sayısal modelleme yönteminin istenilen türde sentetik birim hidrograf veya ölçülmüş hidrograf verisi ile çalışabildiğini hatırlatmak yerinde olacaktır.

Sayısal modelleme için hazırlanan akış şeması Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 : Sayısal modelleme için hazırlanan akış şeması.

Sayısal modellemede, hesaplama için bir Δt zaman aralığı seçilmiştir. Bu değer denklem (3.15)’te verilen T^* zamanının $1/3600$ kadarı olarak seçilmesinin yeterli hassasiyette sonuç verdiği görülmektedir. Değişken akım (q) zaman serisinin denklem (3.15) yardımıyla elde edilmesinden sonra, aşağıdaki çözüm stratejisi ile Δt zaman aralıklı her n . adım için akım çözülmüştür:

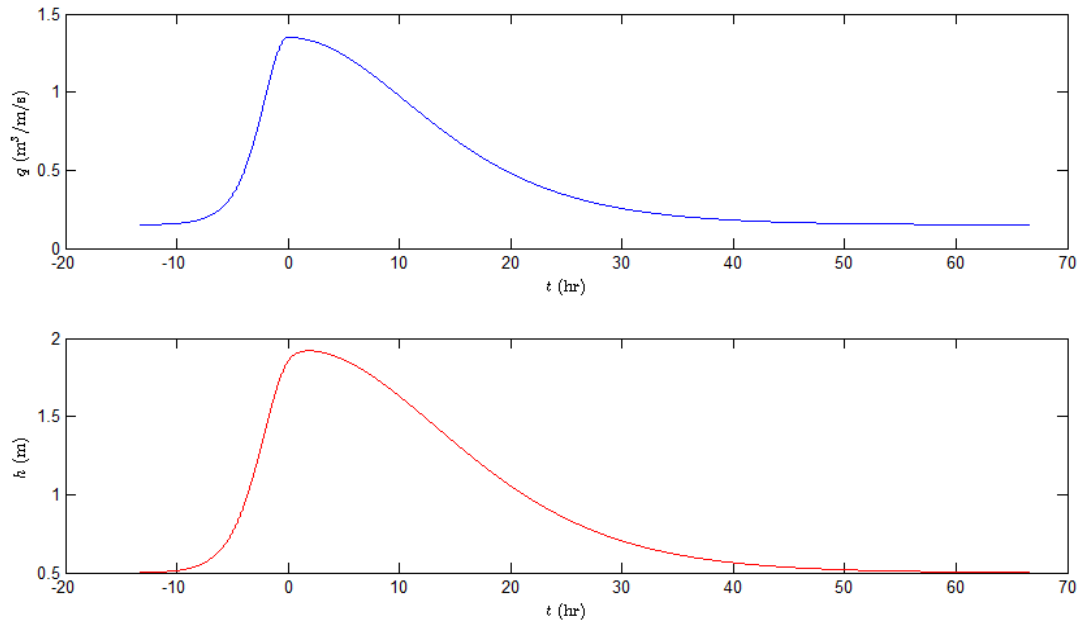
- I. Denklem (3.11)'in sol tarafına n. adımdaki değerleri koyarak, (n+1). adımdaki $\partial h / \partial t$ 'yi hesapla,
- II. (n+1). adımdaki h değerini, n. adımdaki h değerine yukarıda bulunan $\partial h / \partial t . \Delta t$ değerini ekleyerek hesapla,
- III. (n+1). adımdaki R ve V değerleri ile denklem (3.14)'ü kullanarak (n+1). adımdaki U_f değerini iterasyon ile hesapla,
- IV. İlk basamağa dönerek hidrografın toplam süresinin sonuna kadar h'ı, V'yi ve U_f 'i zamanın bir fonksiyonu olarak hesapla.

4. SAYISAL MODELLEME VE MODEL SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamında, geniş bir dikdörtgen kesite sahip bir açık kanalda, tipik bir kararsız akım hidrografi için, tek boyutlu Saint Venant denklemi (3.1) ve Bölüm 3.2’de bahsi geçen başlangıç koşulları esas alınarak; derinlik, hız ve taban kayma gerilmesi gibi akım özelliklerinin ve akıma ait kararsızlık derecesinin (histerik özelliklerin) belirlenmesi amacı ile bir sayısal modelleme çalışması yürütülmüştür. Sayısal modelin özelliği, tüm konvektif (mesafeye bağlı) terimlerin, değişkenlik yayılma hızı yaklaşımı kullanılarak mansap koşullarına bağlı olmaksızın modele dahil edilmesi ve çözülmesidir.

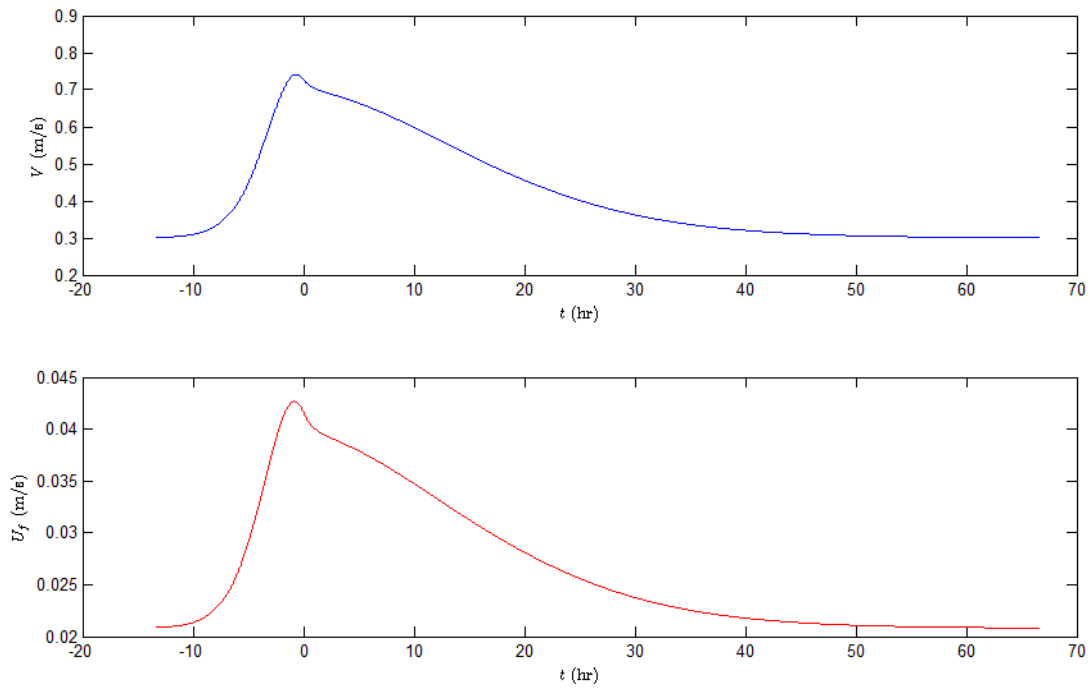
Sayısal modelleme çalışmasında MATLAB yazılım dili kullanılmıştır. “MATLAB” programı (MATrix LABoratory) mühendislik uygulamalarının, hesaplamalarının ve simülasyonlarının çoğunun gerçekleştirildiği matris ve matematik esaslı, C++ tabanlı bir programdır. İstenilen dereceden matrislerle işlem yapılarak lineer ve non-lineer sistemler çözülebildiği, diğer programlama dillerinde bulunmayan birçok matematiksel fonksiyon hazır halde kütüphanesinde bulunduğu ve her türlü grafiksel sonuçlar istenilen tarzda alınabildiği için kullanım alanı oldukça geniştir [15].

Bölüm 3.2’de bahsedildiği şekilde, model parametrelerinin Çizelge 3.1 ve 3.2’de sunulan değerleri ile oluşturulan tipik hidrograf için yürütülen model testleri neticesinde, modele girilen debi zaman serisi (q) için elde edilen su seviyesindeki (h) değişim Şekil 4.1’de verilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere, başlangıç anında (taban akış koşulları için) akımın üniform olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.1 : Modele girilen hidrograf ve elde edilen su seviyesindeki değişim.

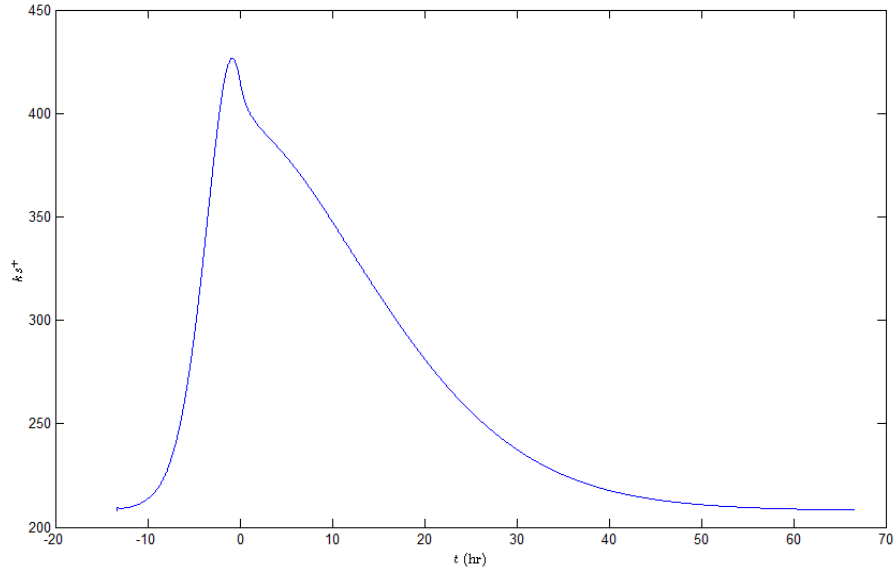
Yukarıda bahsedildiği üzere, Şekil 4.1'de verilen hidrograf modelde şablon olarak kullanılmış, yalnız hidrografın zaman ölçeği (dolaysız akımın süresi), başlangıç debisi (sabit taban akışı debisi, q_0) ve en yüksek dolaysız akış debisi (Δq) parametrik olarak değiştirilmiştir. Şekil 4.1'deki hidrografa belirlenen zaman ölçeği için elde edilen akım hızındaki (V) ve sürtünme hızındaki (U_f) değişim Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2 : Elde edilen akım ve sürtünme hızları dağılımı.

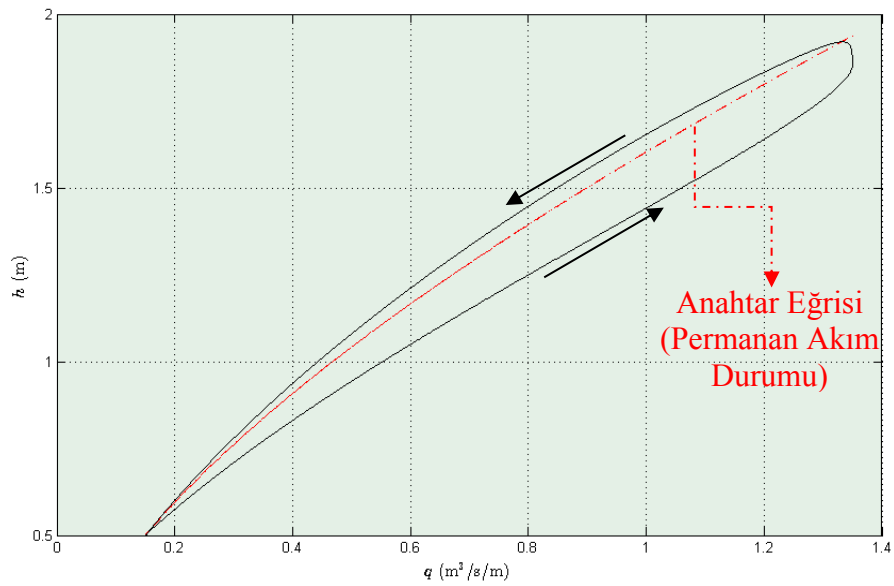
Aşağıdaki şekilde boyutsuzlaştırılan kanal cidarı Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.3'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere kayma gerilmesinin artmasıyla birlikte akım daha pürüzlü davranmaktadır.

$$k_s^+ = \frac{k_s \cdot U_f}{\nu} \quad (4.1)$$



Şekil 4.3 : Boyutsuz Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısının zamanla değişimi.

Yapılan çalışma neticesinde, akıma ait histeriklik derecesinin belirlenebilmesi amacıyla debi ile su seviyesi (q-h) arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Şekil 4.4'te q-h arasındaki ilişki sunulmaktadır.



Şekil 4.4 : Su seviyesi ve akarsu debisi arasındaki ilişki.

4.1 Parametrik Çalışma

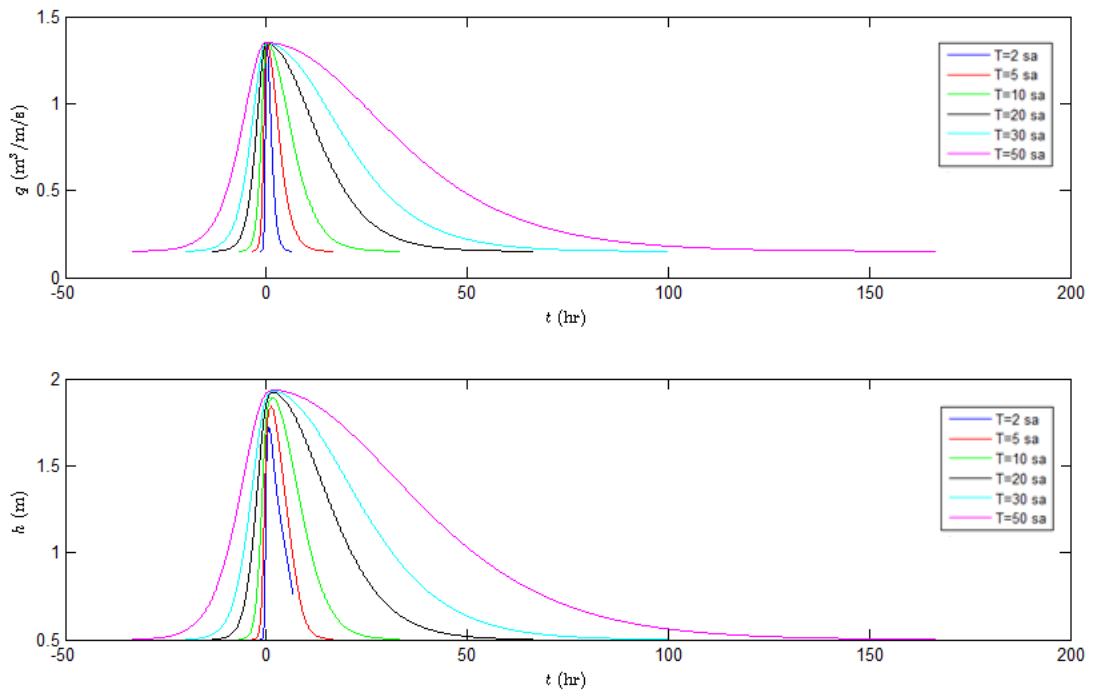
Belirlenen başlangıç ve sınır koşulları ile yürütülen modelleme çalışmasına ek olarak, başlangıç ve sınır koşulları için kullanılan parametrelerin modelleme üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla, farklı parametrik değerler kullanılarak ilave model testleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde, zaman ölçeği (T^*), taban akış debisi (q_0), maksimum dolaysız akış debisi (Δq), Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısı (k_s) ve değişkenlik yayılım hızı parametresi (c) için farklı değerler denenerek bu parametrelerdeki değişimin hidrolik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Farklı sınır koşullarının modelleme üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacı ile oluşturulan senaryolar aşağıda açıklanmaktadır:

- **1. Senaryo**'da, taban akış debisi(q_0), maksimum dolaysız akış debisi (Δq), Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısı (k_s) ve değişkenlik yayılım hızı parametresi (c) sabit tutularak; zaman ölçeğinin (T^*) farklı değerleri için modelleme çalışması yapılmıştır.
- **2. Senaryo**'da, zaman ölçeği (T^*), maksimum dolaysız akış debisi (Δq), Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısı (k_s) ve değişkenlik yayılım hızı parametresi (c) sabit tutularak; farklı taban akış debileri (q_0) için parametrik çalışma yapılmıştır.
- **3. Senaryo**'da, zaman ölçeği (T^*), taban akış debisi(q_0), Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısı (k_s) ve değişkenlik yayılım hızı parametresi (c) sabit tutularak; maksimum dolaysız akış debisinin (Δq) farklı değerleri için numerik modelleme çalışması yürütülmüştür.
- **4. Senaryo**'da, zaman ölçeği (T^*), taban akış debisi (q_0), maksimum dolaysız akış debisi (Δq) ve değişkenlik yayılım hızı parametresi (c) sabit tutularak; farklı Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayıları (k_s) için model testleri yapılmıştır.
- **5. Senaryo**'da, zaman ölçeği (T^*), taban akış debisi (q_0), maksimum dolaysız akış debisi (Δq) ve Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısı (k_s) sabit tutularak; değişkenlik yayılım hızı parametresinin (c) farklı değerleri için modelleme çalışması yapılmıştır.

4.1.1 Senaryo-1

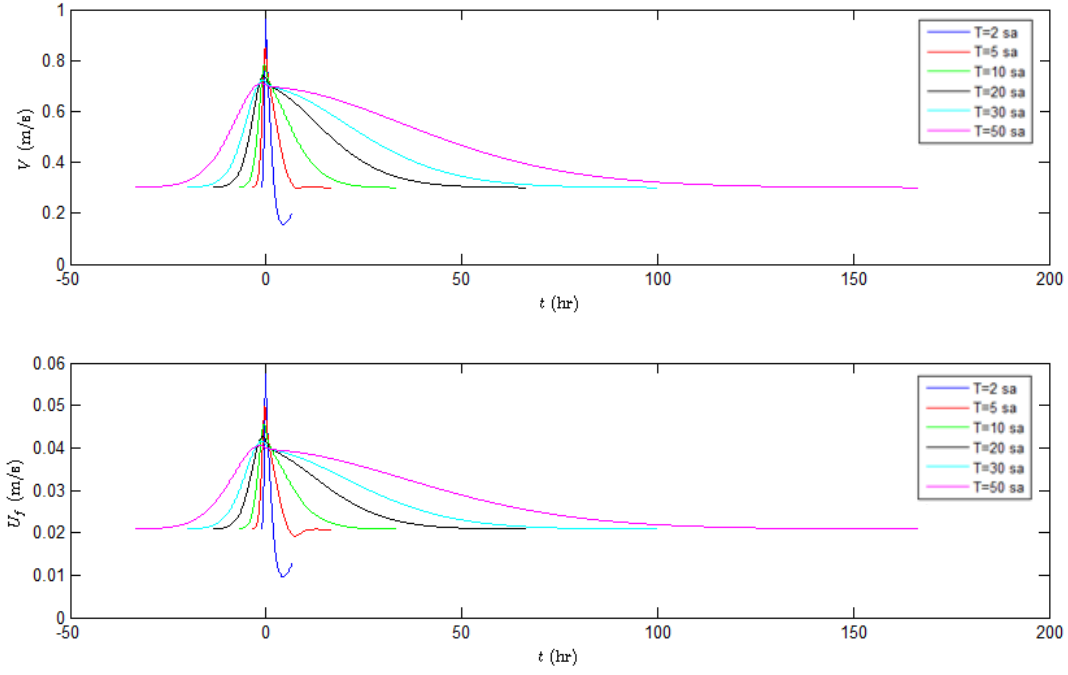
Zaman ölçeğinin (T^*) farklı değerleri için yürütülen model testleri neticesinde, akarsu debisindeki ve su seviyesindeki değişimlere ait sonuçlar Şekil 4.5'te verilmiştir. Zaman ölçeği yukarıda da bahsedildiği üzere (bkz. Şekil 3.1) dolaysız akış hidrografının taban süresi genişliğini belirlemektedir. Model sonuçları incelendiğinde, zaman ölçeği arttıkça beklendiği gibi akımın permanan akım koşullarına yaklaştığı, uzun zaman ölçeklerinde maksimum su seviyesinin değişmediği görülmüştür.



Şekil 4.5 : Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen debi ve su seviyesi değişimleri.

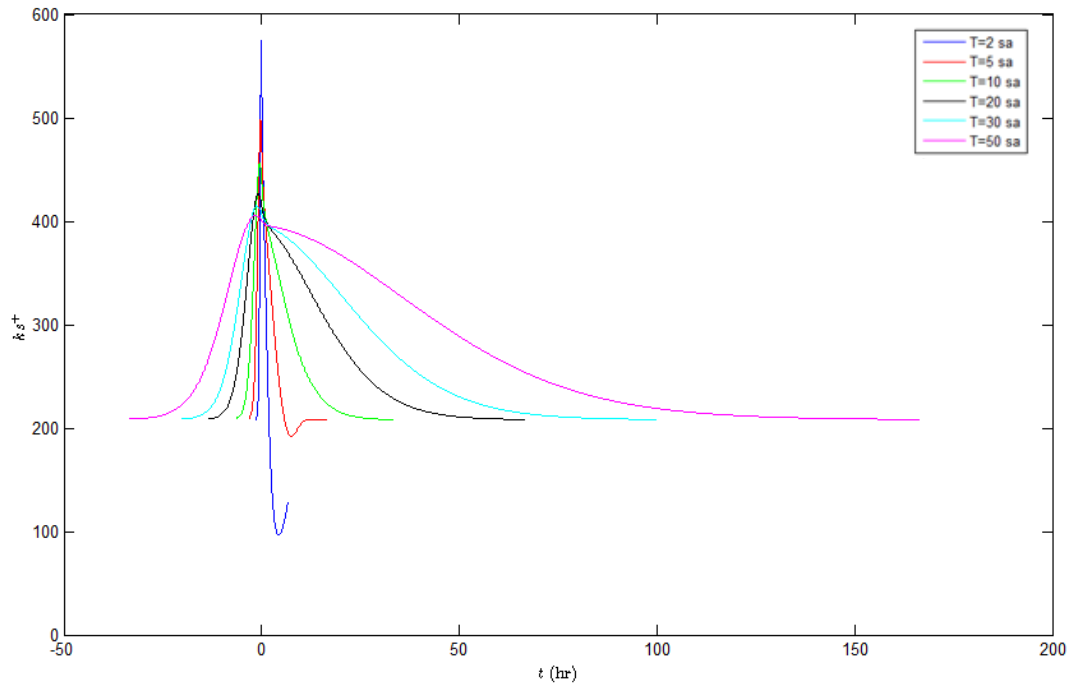
Öte yandan, akım ve sürtünme hızı değerlerinin zaman ölçeği artışıyla giderek azaldığı ve permanan akım değerlerine münker olduğu, Şekil 4.6'da görülebilmektedir.

Zaman ölçeği azaldıkça (akım daha kararlı hale geldikçe) hem akım hızının hem de sürtünme hızının arttığı, denenen minumum zaman ölçeğinde akım ve sürtünme hızlarının en yüksek değerlerine ulaştıkları görülmüştür. Bu değer permanan akım formülleri ile hesaplanacak değer yaklaşık 1,5 katıdır.



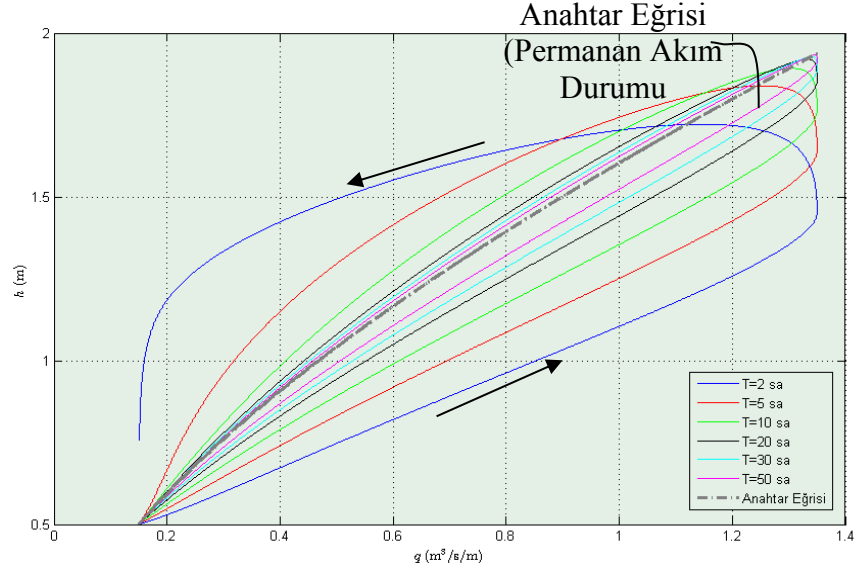
Şekil 4.6 : Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen akım hızı ve sürtünme hızındaki değişimler.

Zaman ölçeği parametresindeki değişimin, boyutsuz Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısına etkisi ise Şekil 4.7 görülmektedir. Akımın kararsızlık miktarı arttıkça (zaman ölçeği kıaldıkça) tepe noktasındaki akımın daha da pürüzlü davrandığı görülmektedir.



Şekil 4.7 : Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen boyutsuz pürüzlülük katsayıları.

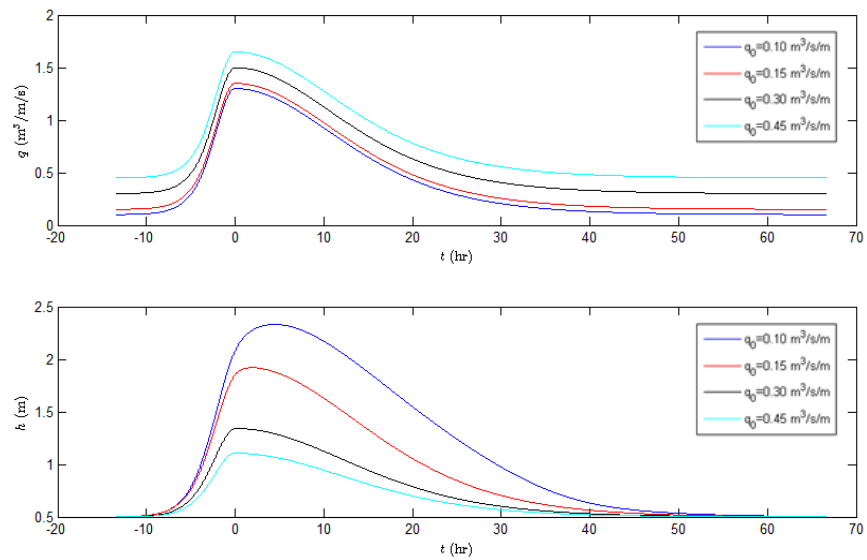
Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen histeriklikler Şekil 4.8’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, zaman ölçeği arttıkça akım permanan koşullara daha da yaklaştığı için akımdaki histeriklik beklendiği şekilde azalmıştır. Öte yandan, zaman ölçeği azaldıkça, akımdaki histeriklik artmıştır.



Şekil 4.8 : Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen histeriklikler.

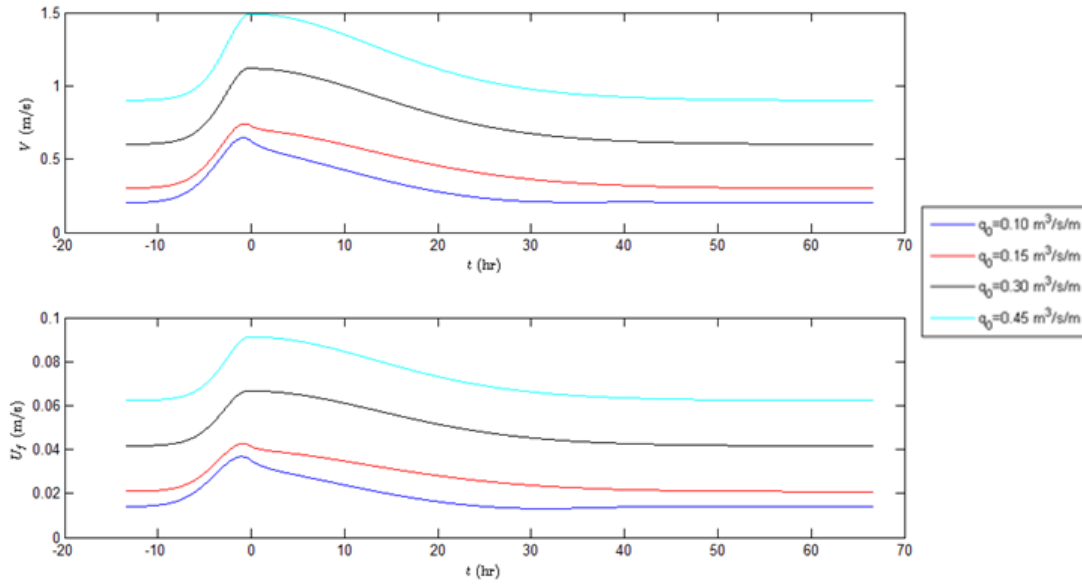
4.1.2 Senaryo-2

Taban akışı akım derinliği (başlangıç akım derinliği, h_0) sabit tutularak, taban akış debisinin (q_0) farklı değerleri ile yürütülen sayısal modelleme çalışması neticesinde elde edilen akarsu debisi ve su seviyesi değişimine ait sonuçlar Şekil 4.9’da verilmiştir.



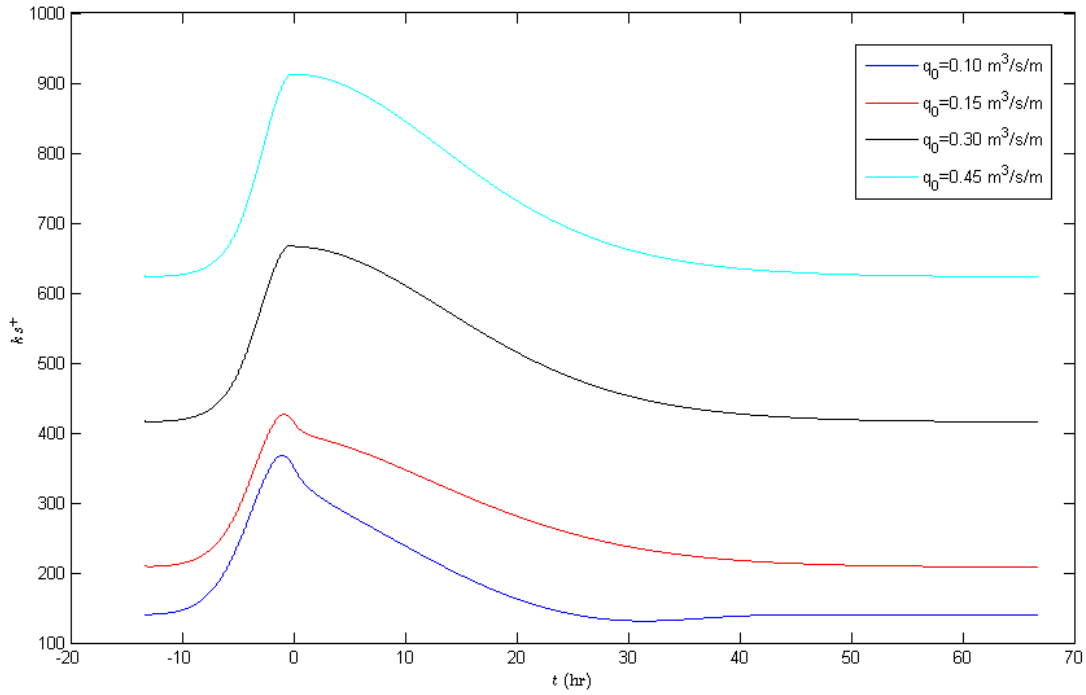
Şekil 4.9 : Farklı taban akış debileri ile elde edilen debi ve su seviyesi değişimleri.

Farklı taban akış debileri ile elde edilen akım ve sürtünme hızları dağılım Şekil 4.10'da sunulmuştur.



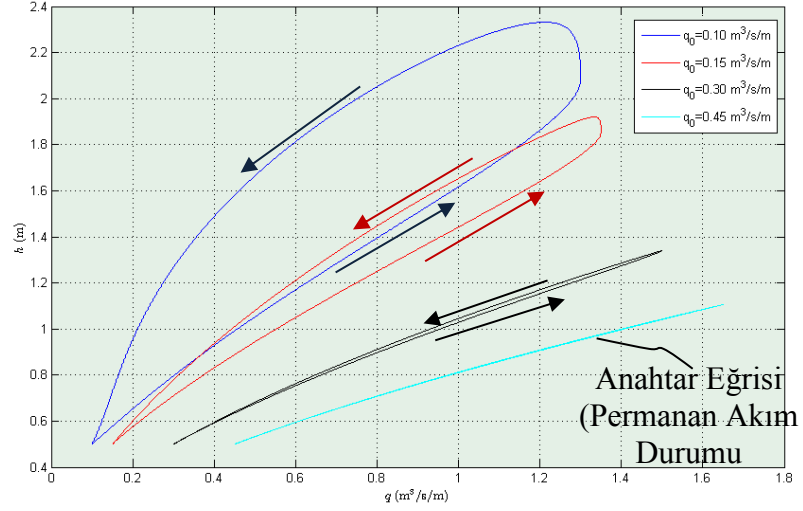
Şekil 4.10 : Farklı taban akış debileri ile elde edilen akım ve sürtünme hızları dağılımı.

Taban akış debisindeki değişimin, boyutsuz Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısına etkisi Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11 : Farklı taban akış debileri ile elde edilen boyutsuz pürüzlülük katsayıları.

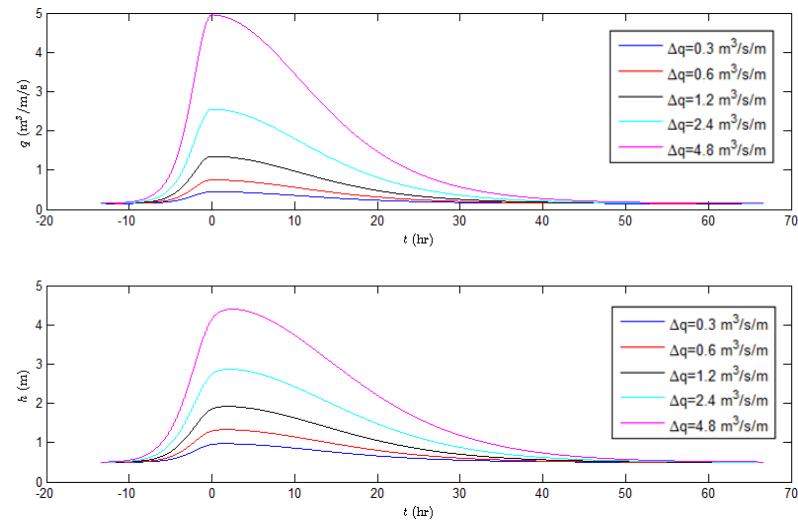
Farklı taban akış debileri ile elde edilen histeriklikler Şekil 4.12’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, başlangıç (taban akışı) debisi arttıkça akımdaki histeriklik azalmıştır. Şekil 4.12 ‘de görüldüğü üzere yüksek taban akışı debilerinde akım daha kararlı bir davranış sergilemiştir. Öte yandan, başlangıç debisi miktarı azaldıkça, akımdaki histeriklik artmıştır. Bu sonuç, yılın büyük bir kısmında durgun olan ve taşkın durumunda yüksek debiler geçiren haliçlerde ve kuru akarsularda büyük orandan histeriklik gözlemlenmesi ile paralellik göstermektedir.



Şekil 4.12 : Farklı taban akış debileri ile elde edilen histeriklikler.

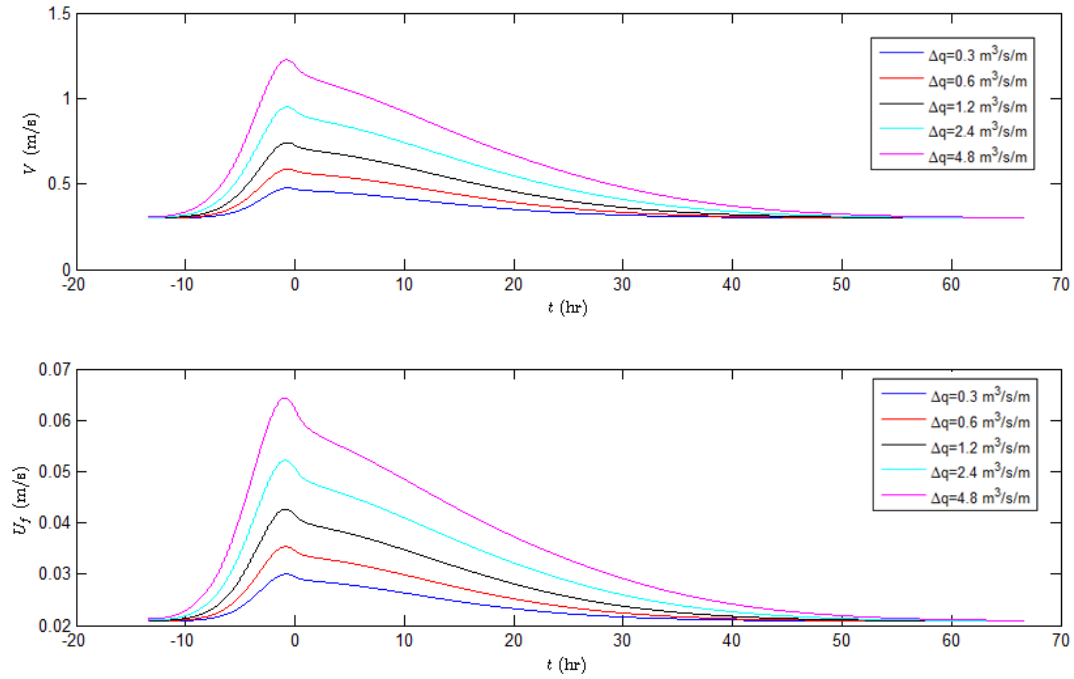
4.1.3 Senaryo-3

Δq 'ya (maksimum dolaysız akış debisine) ait farklı değerler ile yürütülen sayısal modelleme çalışması neticesinde elde edilen akarsu debisi ve su seviyesi değişimi sonuçları Şekil 4.13'te görülmektedir.



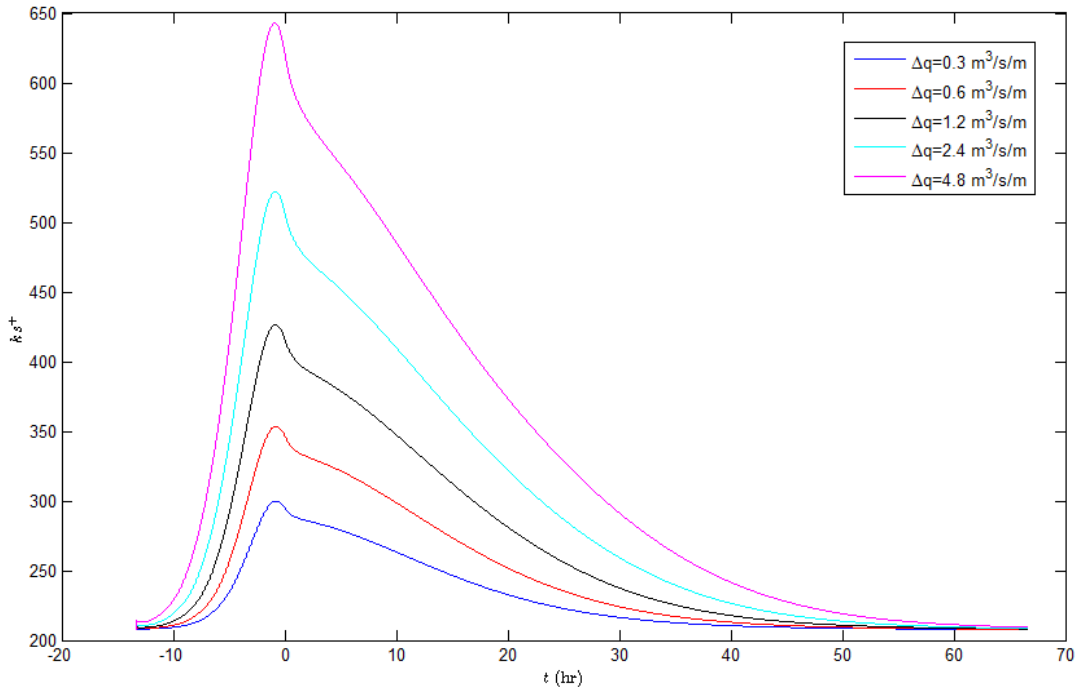
Şekil 4.13 : Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen debi ve su seviyesi değişimleri.

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere Δq (maksimum dolaysız akış debisi) arttıkça, akım ve sürtünme hızı değerlerinde artış gözlemlenmektedir.



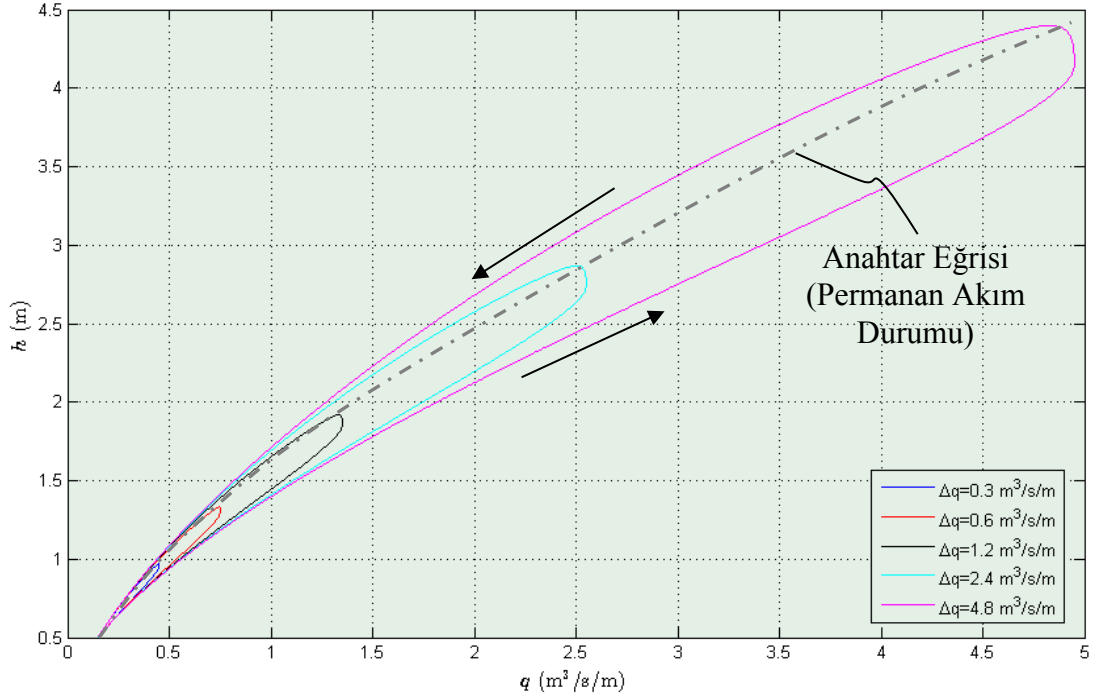
Şekil 4.14 : Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen akım ve sürtünme hızı değişimleri.

Maksimum debi ile taban akış debisi arasındaki farkın (Δq), boyutsuz Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısına etkisi Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.15 : Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen pürüzlülük katsayıları.

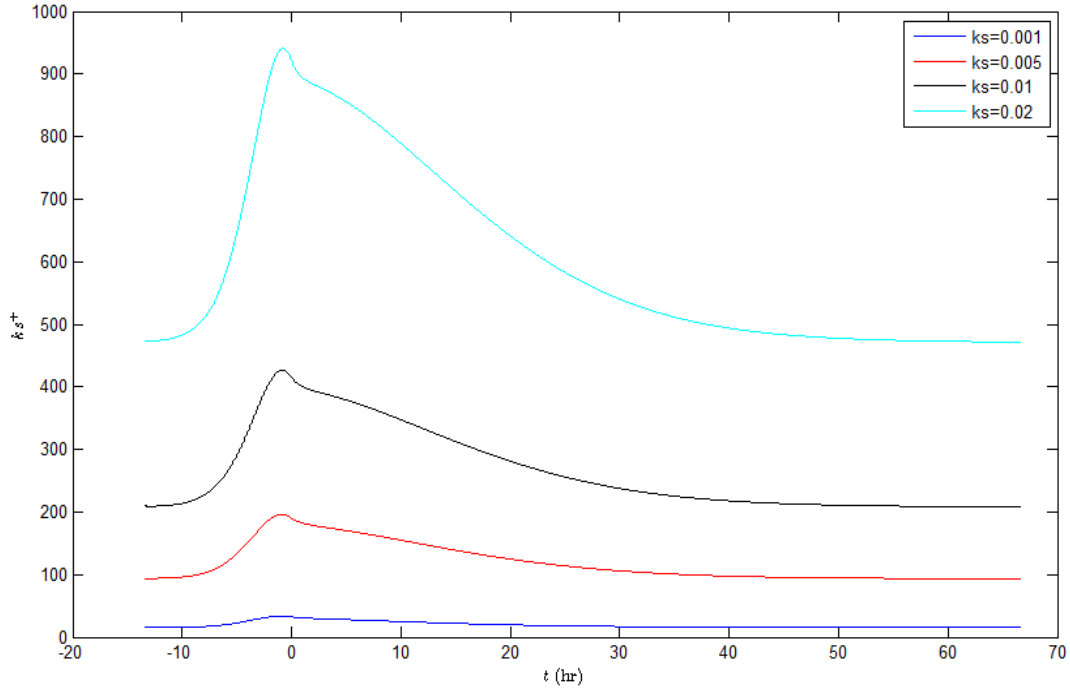
Farklı “ Δq ” değerleri ile elde edilen histeriklikler Şekil 4.16’da verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum debi ile taban akış debisi arasındaki fark arttıkça akımdaki histeriklik artmıştır. Öte yandan, maksimum debi ile taban akış debisi arasındaki fark azaldıkça, akımdaki histeriklik azalmıştır.



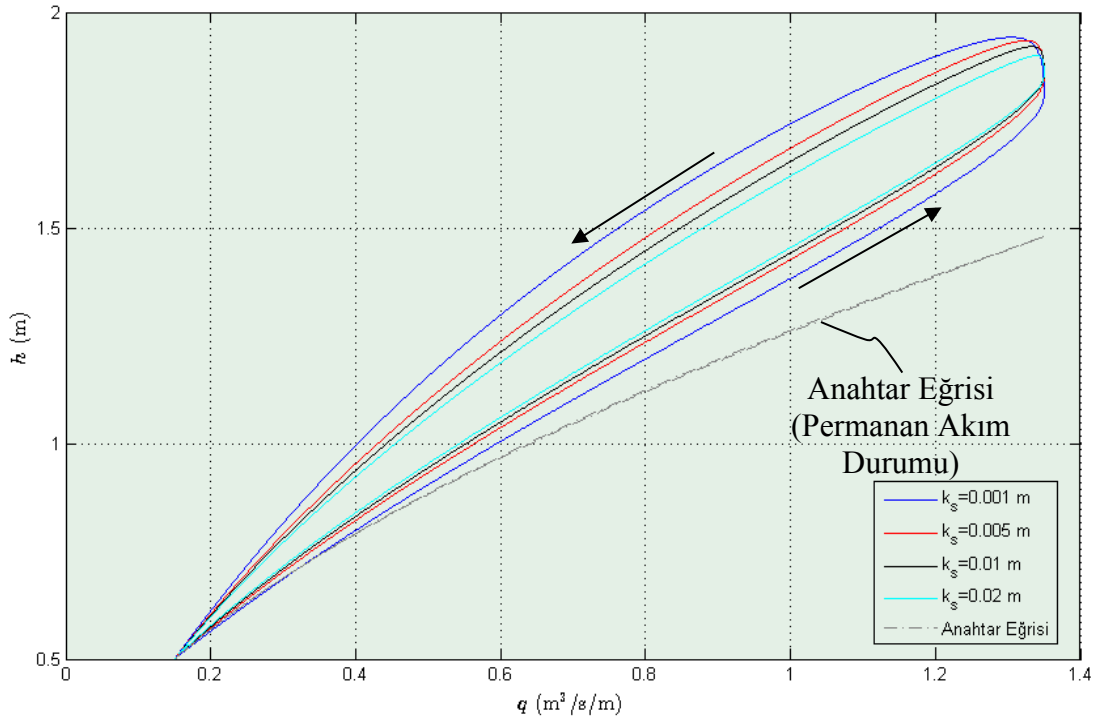
Şekil 4.16 : Farklı “ Δq ” değerleri için elde edilen histeriklikler.

4.1.4 Senaryo-4

Farklı Nikuradze eş-değer pürüzlülük yükseklikleri (k_s , m olarak) ile yürütülen sayısal modelleme çalışmasında elde edilen boyusuz pürüzlülük katsayıları ve histeriklikler Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, taban pürüzlülüğü arttıkça akımın daha az histerik hale geldiği, ancak bu etkinin diğer parametrelerin etkisi kadar bariz olmadığı ortaya çıkmaktadır. Şehirleşme ve dere ıslahı projeleri ile akarsu yataklarındaki pürüzlülüğün azalmasının akımdaki histerik etkileri arttırdığı; bununla paralel olarak permanan akımlar için türetilen direnç formüllerinin pürüzsüz yataklarda olduğu kadar doğru sonuç vermeyebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.



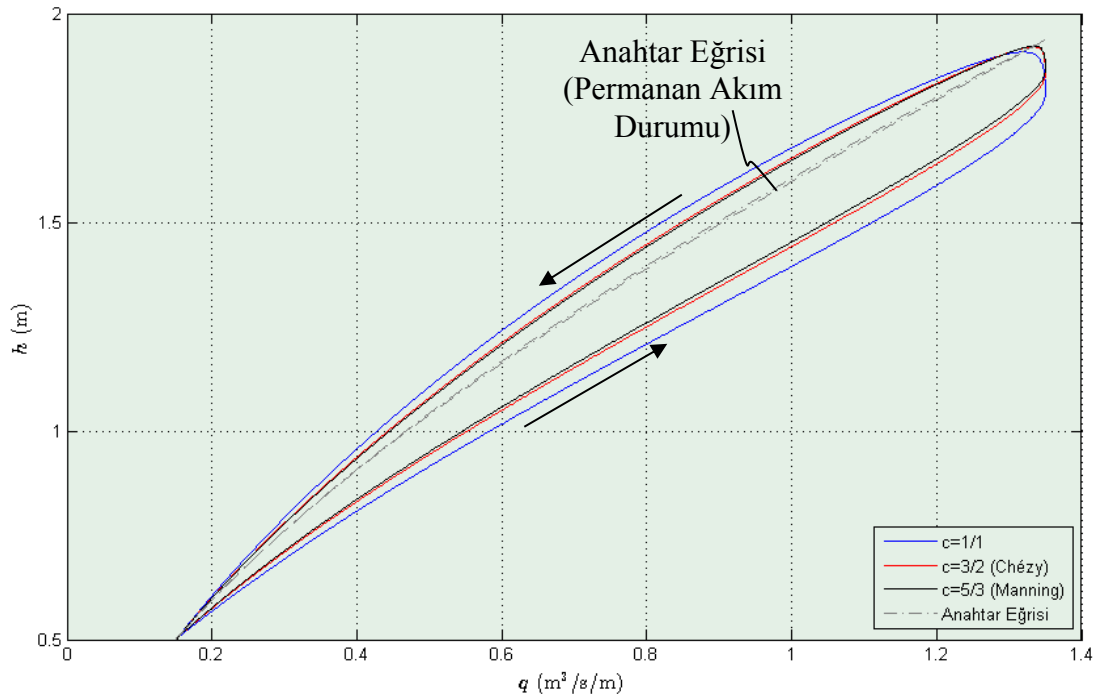
Şekil 4.17 : Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen boyutsuz pürüzlülük katsayıları.



Şekil 4.18 : Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen histeriklikler.

4.1.5 Senaryo-5

Öte yandan, Bölüm 3.1’de bahsi geçen “c” parametresinin (değişkenlik hızının akım hızına oranı olarak tanımlanan katsayı) histeriklik üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla, farklı “c” değerleri kullanılarak ayrıca bir sayısal modelleme çalışması yürütülmüştür. Yürütülen çalışmada değişkenler için başlangıç koşulları tanımlanmış olup, sadece “c” parametresinin değeri değiştirilmiştir. Hatırlanacağı üzere taban direnci Chézy denklemi kullanılarak çözüldüğünde $c=3/2$, Manning denklemi kullanılarak çözüldüğünde ise $c=5/3$ olarak ortaya çıkmaktadır. Bunlara ek olarak, yıkım dalgası (roll wave) tarzında bir dalganın ilerleme hızını gösteren $c=1$ durumu [10] da değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 4.19’da sunulmuştur.



Şekil 4.19 : Değişkenlik hızı katsayısının histerikliğe etkisi.

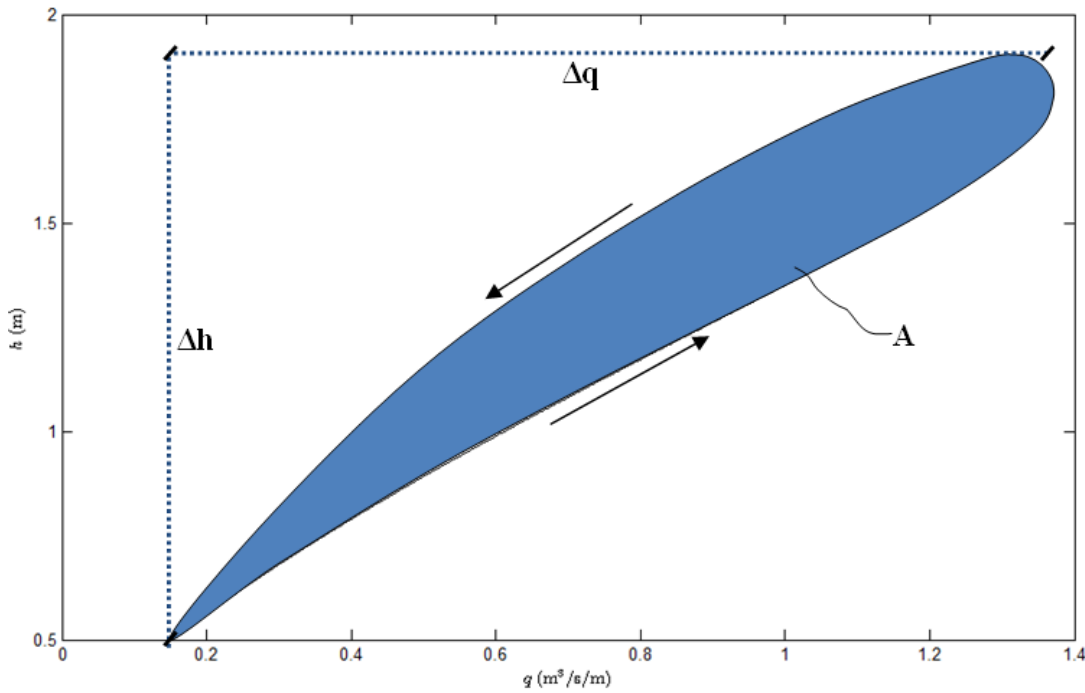
Şekil 4.19’da görüldüğü üzere Chézy ve Manning denklemleri vasıtasıyla hesaplanan “c” katsayıların histerikliğe olan etkisinin çok fazla değişmediği, dolayısı ile her iki yaklaşımın da modelde kullanılabileceği görülmektedir. Bununla birlikte bekleneceği üzere değişkenlik hızı katsayısının azalması neticesinde, histerikliğin bir miktar artacağı yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuştur.

4.2 Parametrelerin Boyutsuzlaştırılması

Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçların genel bir anlam ifade etmesi ve evrensel manada yorumlanabilmesi amacı ile bir boyutsuzlaştırma çalışması yapılmıştır. Boyutsuz sayıları elde edebilmek amacıyla, aşağıda görüldüğü üzere bir değişkenlik parametresi (Γ) tanımlanmıştır. Bu parametre, Bölüm 2.5'te bahsi geçtiği üzere Tu Haizhou&Walter ve H. Graf tarafından yapılan çalışmalarda da aşağıda verilen şekilde kullanılmıştır. Aşağıdaki bağıntıda Δh , maksimum su seviyesi ile başlangıç su seviyesi arasındaki farkı, Δt , toplam hidrograf süresini, U_{f0} başlangıç sürtünme hızı değerini ifade etmektedir.

$$\Gamma = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{1}{U_{f0}} \quad (4.2)$$

Şekil 4.20'de histeriklik parametresinin hesabı için kullanılan referans grafik görülmektedir.



Şekil 4.20 : Histeriklik parametresinin hesabında kullanılan referans grafik .

Histeriklik parametresi (Φ), Şekil 4.20'den referansla denklem (4.3)'te görülmektedir. Burada A, su seviyesi ve debi (q-h) eğrisi içerisinde kalan alanı, Δh , maksimum su seviyesi ile başlangıç su seviyesi arasındaki farkı göstermektedir.

Bununla birlikte, Δq maksimum debi ile başlangıç debisi arasındaki farkı (maksimum dolaysız akış debisini) ifade etmektedir.

$$\Phi = \frac{A}{\Delta q \cdot \Delta h} \quad (4.3)$$

Parametrelerin boyutsuzlaştırılması çalışmasında, pürüzlülük katsayısı k_s^+ olarak denklem (4.1)'deki şekliyle boyutsuzlaştırılmıştır. Bununla birlikte boyutsuz akım derinliği (h^*);

$$h^* = \frac{h_{\max.}}{h_{\max.(\Gamma=0)}} \quad (4.4)$$

olarak tanımlanmıştır. Boyutsuz sürtünme hızı parametresi (U_f^*);

$$U_f^* = \frac{U_{f \max.}}{U_{f \max.(\Gamma=0)}} \quad (4.5)$$

şeklinde, boyutsuz kesitsel ortalama hız (V^*) ise;

$$V^* = \frac{V_{\max.}}{V_{\max.(\Gamma=0)}} \quad (4.6)$$

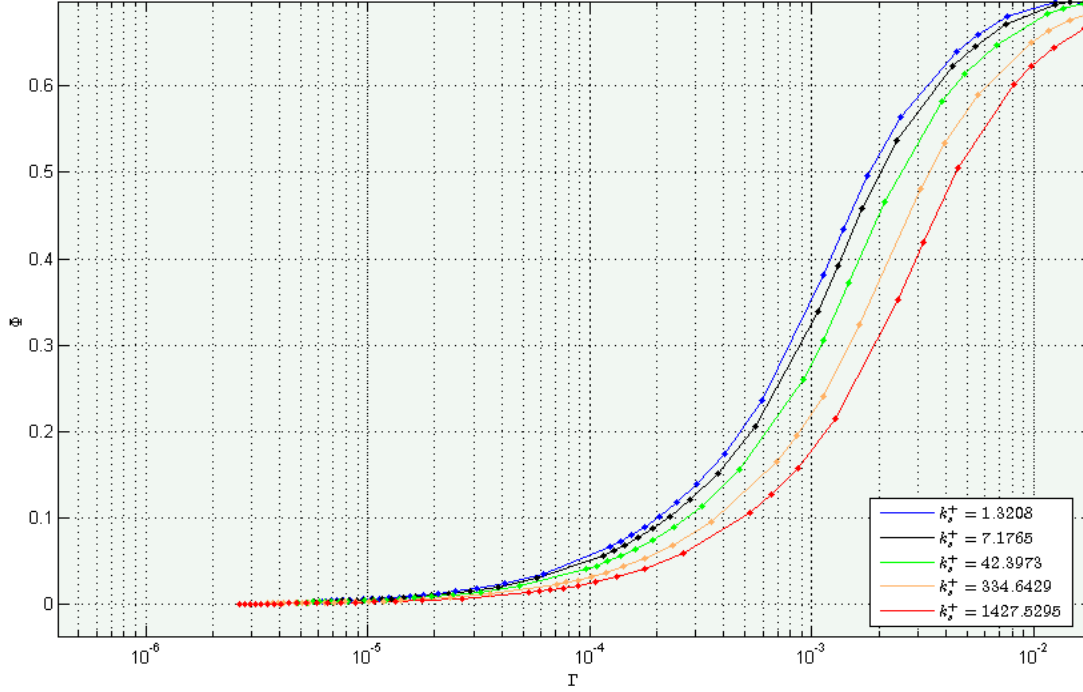
olarak belirlenmiştir. Boyutsuz taban eğimi (J^*) ise aşağıdaki denklem yardımı ile elde edilmiştir.

$$J^* = \frac{J_{\max.}}{J_{\max.(\Gamma=0)}} \quad (4.7)$$

Yukarıdaki boyutsuz parametlerin elde edilmesi amacı ile türetilen denklemlerin paydalarında verilen değerler, maksimum debiyi permanan akım koşullarında geçiren bir kesitteki değerlere tekabül etmektedir. Başka bir deyişle bu parametreler permanan olmayan akımdaki değerlerin permanan akım durumundaki değerlere oranını ifade etmektedir.

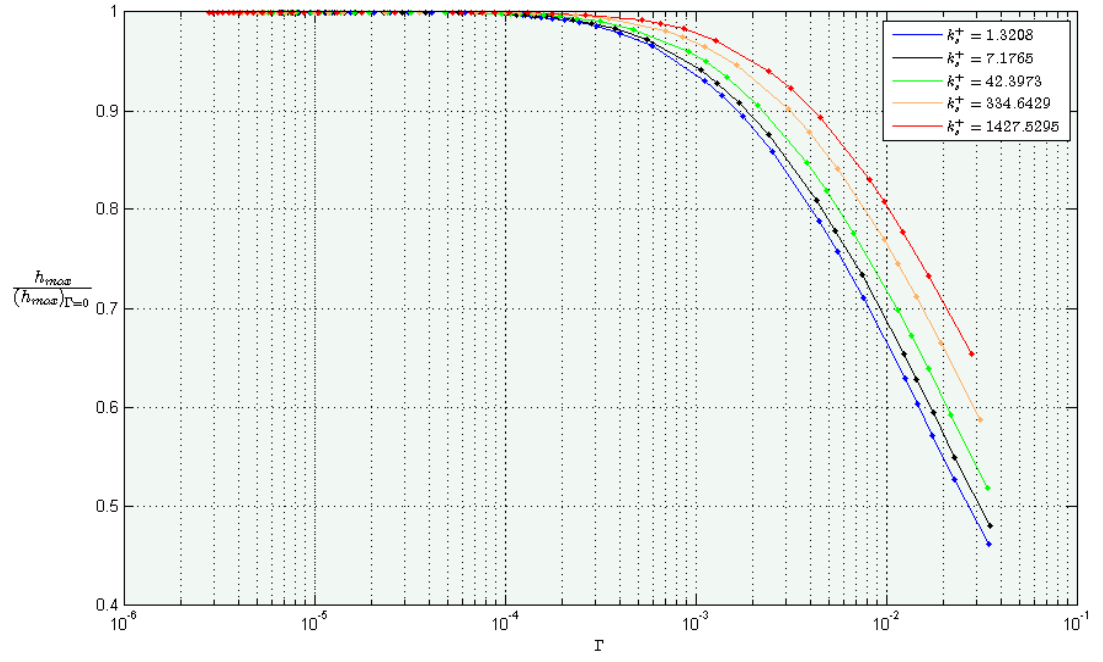
Yapılan çalışmada, farklı hidrograf süreleri (T^*) ve pürüzlülük katsayıları (k_s) kullanılarak, değişkenlik parametresi belirlenmiştir. Bu parametre yardımıyla yukarıda bahsi geçen hidrolik özellikler boyutsuzlaştırılmıştır.

Model testleri sonucunda elde edilen histeriklik parametresi ile değişkenlik parametresi arasındaki ilişki Şekil 4.21’de farklı pürüzlülük katsayıları için sunulmuştur.

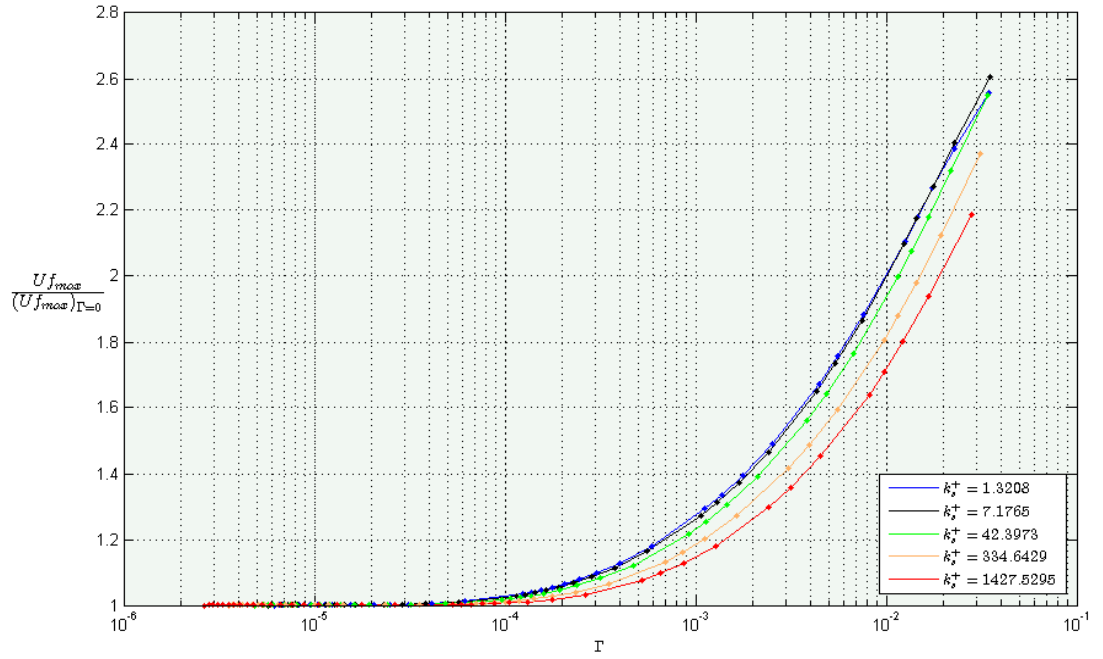


Şekil 4.21 : Değişkenlik parametresi ile histeriklik parametresi arasındaki ilişki.

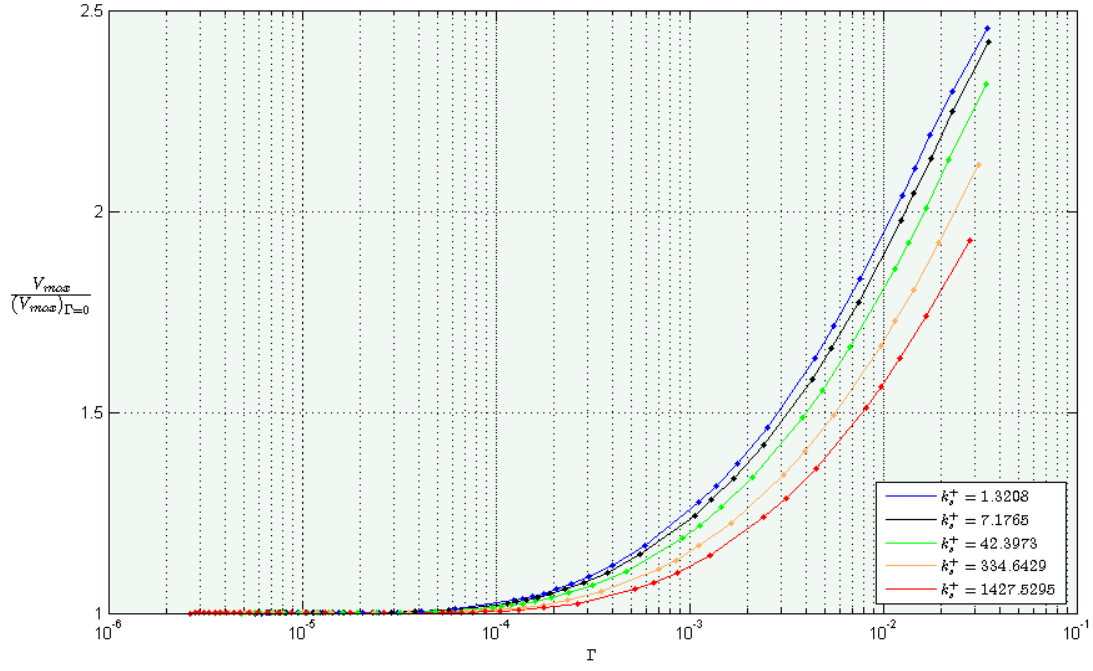
Şekil 4.21’de görüldüğü üzere akımın değişkenlik (kararsızlık) derecesi arttıkça, histerikliği de artmıştır. Öte yandan, taban pürüzlülüğünün artışı ile akımın histerikliğinin bir miktar azaldığı görülmektedir. Değişkenlik parametresi ile akıma ait özellikler arasındaki ilişkiler Şekil 4.22~4.25’te sunulmuştur.



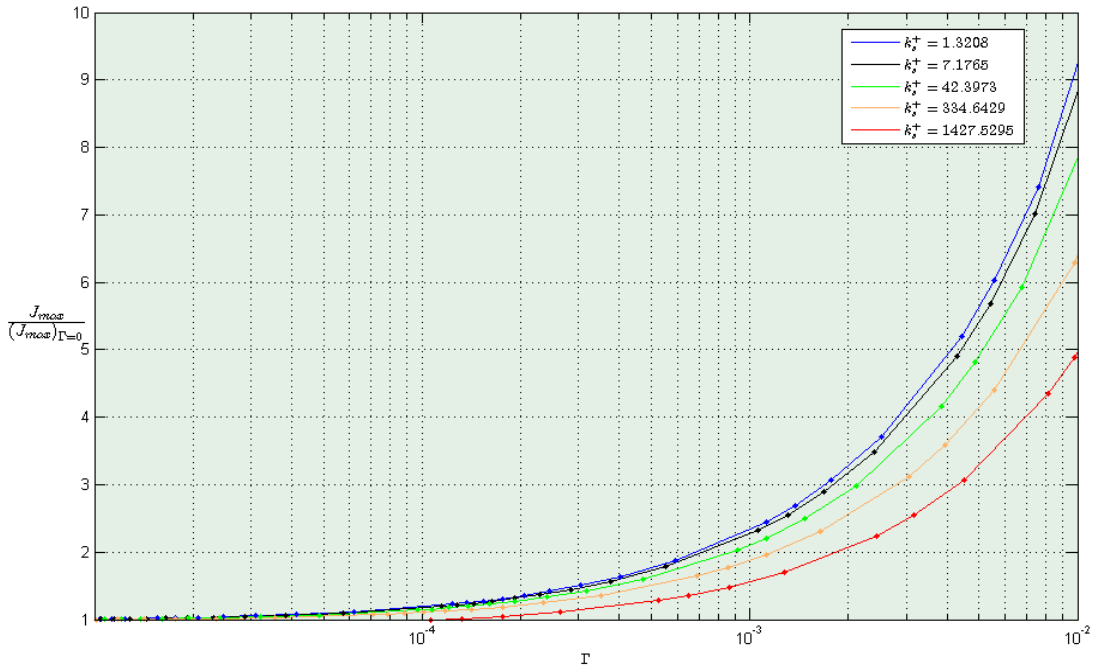
Şekil 4.22 : Değişkenlik parametresi ile boyutsuz akım derinliği arasındaki ilişki.



Şekil 4.23 : Değişkenlik parametresi ile boyutsuz sürtünme hızı arasındaki ilişki.



Şekil 4.24 : Değişkenlik parametresi ile boyutsuz akım hızı arasındaki ilişki.

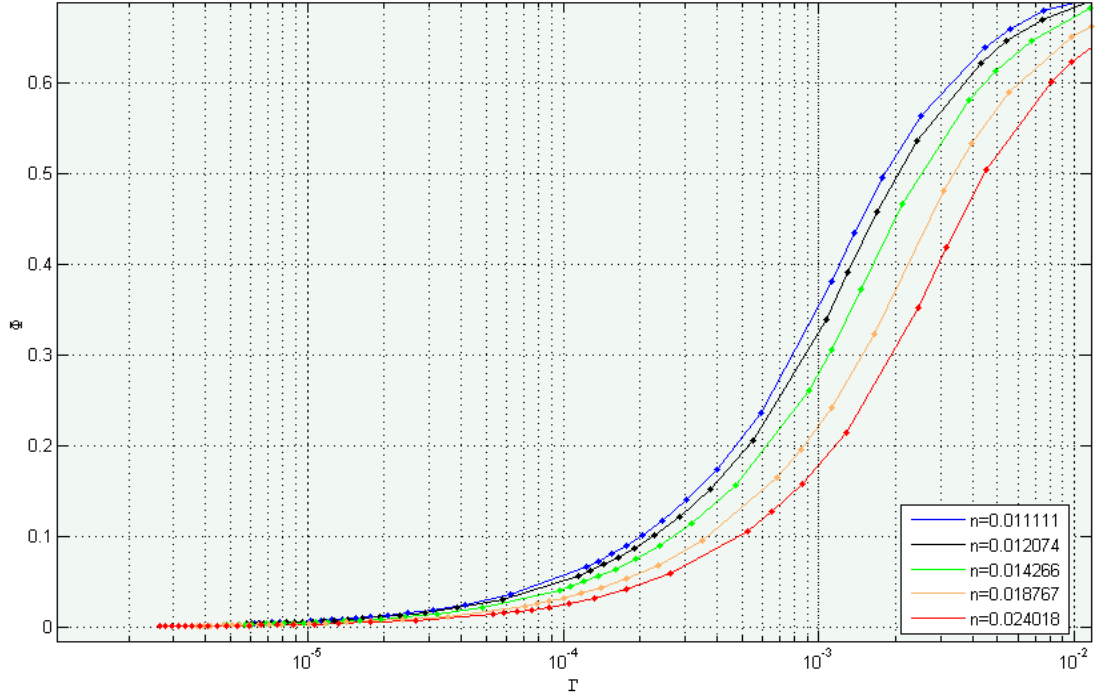


Şekil 4.25 : Değişkenlik parametresi ile boyutsuz taban eğimi arasındaki ilişki.

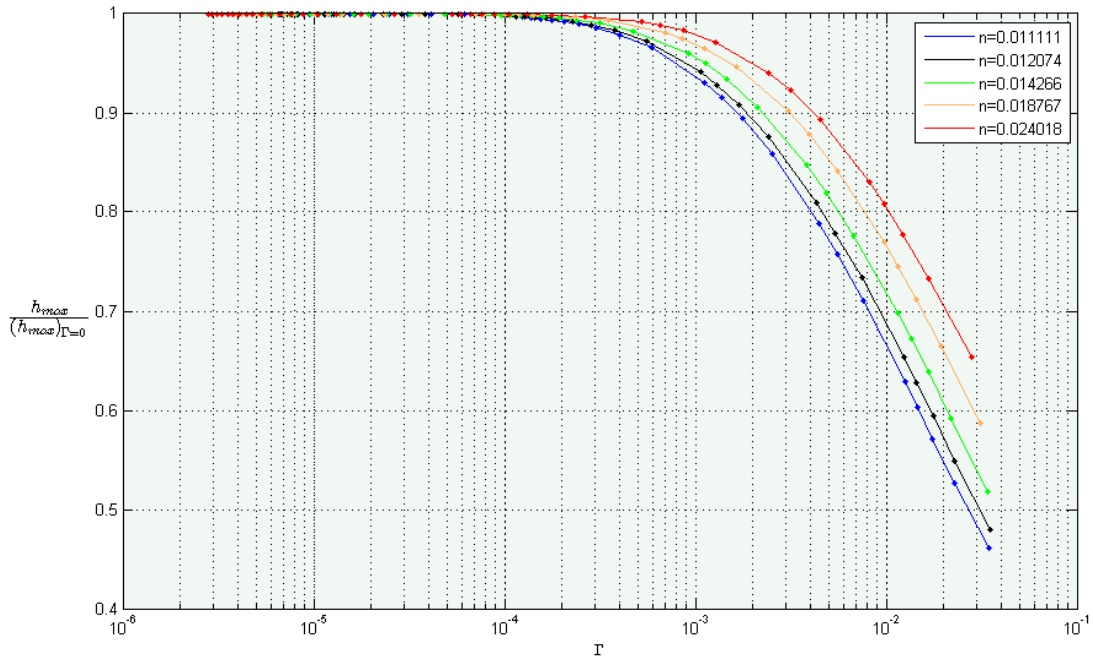
Şekil 4.22~4.25'te de görüldüğü üzere, değişkenlik (kararsızlık) derecesindeki değişim belirli bir değere kadar (yaklaşık $\Gamma=10^{-4}$) önemsenmeyecek miktarda iken; belirli bir değerden sonra hızlı bir şekilde artmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, değişkenlik parametresinin yaklaşık 10^{-4} değerine kadar permanan akım koşulları için yapılan kabullerin yanlış olmayacağı; bu değerden daha yüksek değerlerde ise hata payının artacağı ortaya konmuştur.

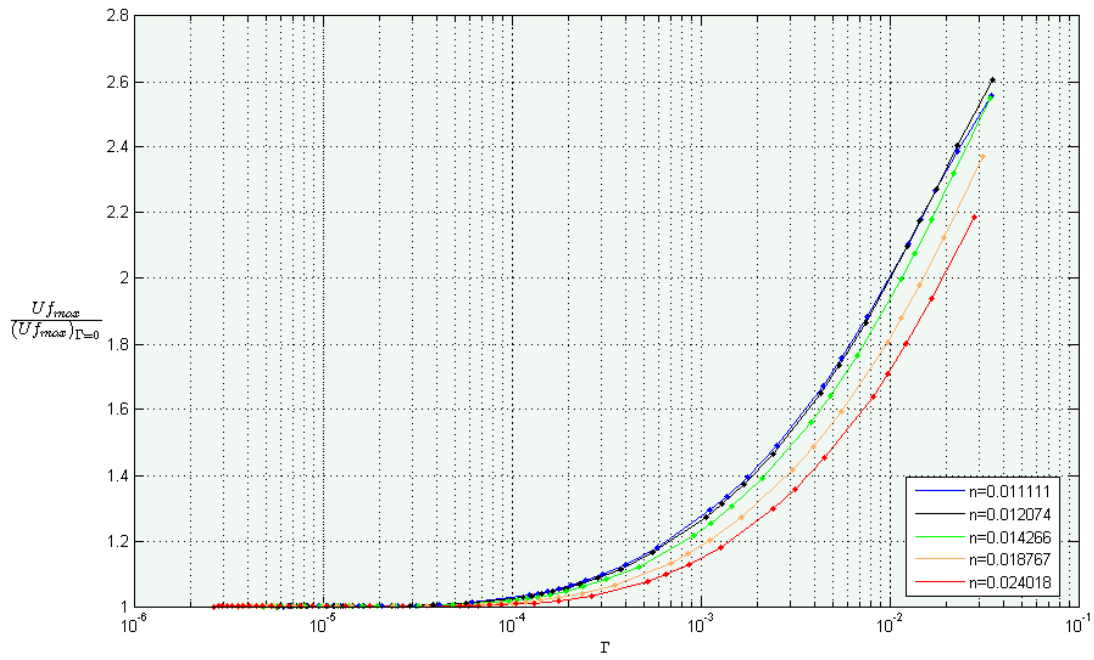
Öte yandan, pürüzlülük etkilerinin de incelendiği çalışmada, taban pürüzlülüğünün kayma gerilmelerini arttırdığı ve bu sebeple akımın daha kararlı bir karakter gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, daha önceden Nikuradze pürüzlülük katsayısı ile modele tanımlanan taban pürüzlülüğü, Manning katsayısı ile ifade edilip, yukarıdaki analizler ek olarak ilave sayısal modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Model testlerine ait sonuçlar Şekil 4.26~4.30’da görölmektedir. Manning pürüzlülük katsayısı ile yürütölen sayısal modelleme çalışması neticesinde, bir önceki çalışma ile benzer sonuçlara varılmıştır.



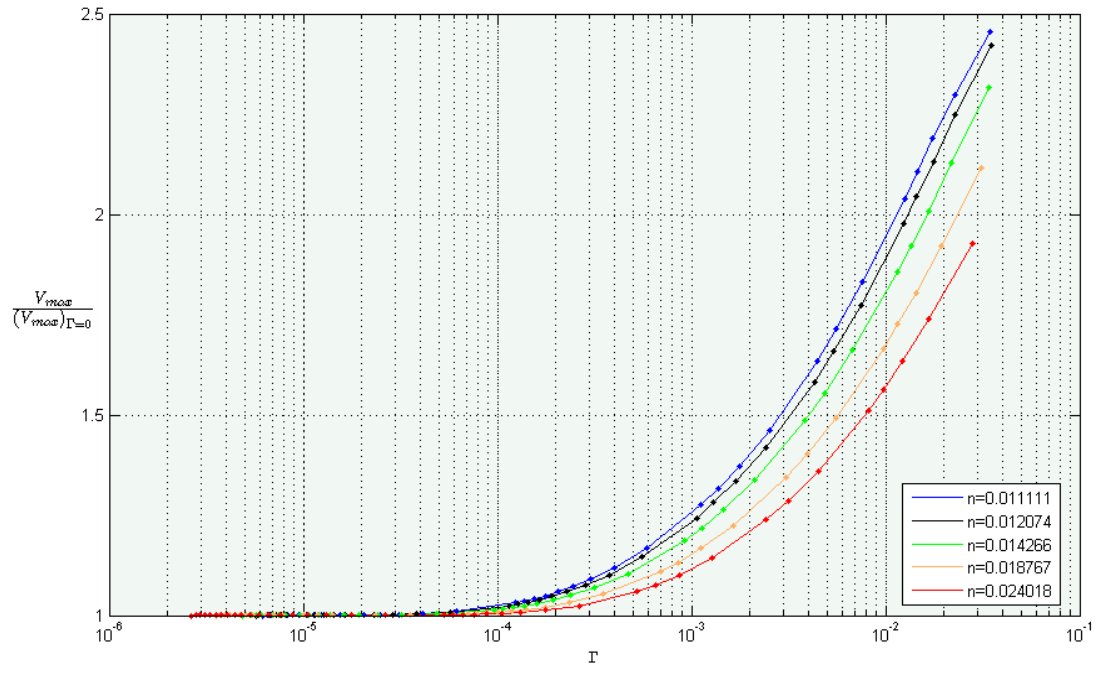
Şekil 4.26 : Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve histeriklik parametresi arasındaki ilişki.



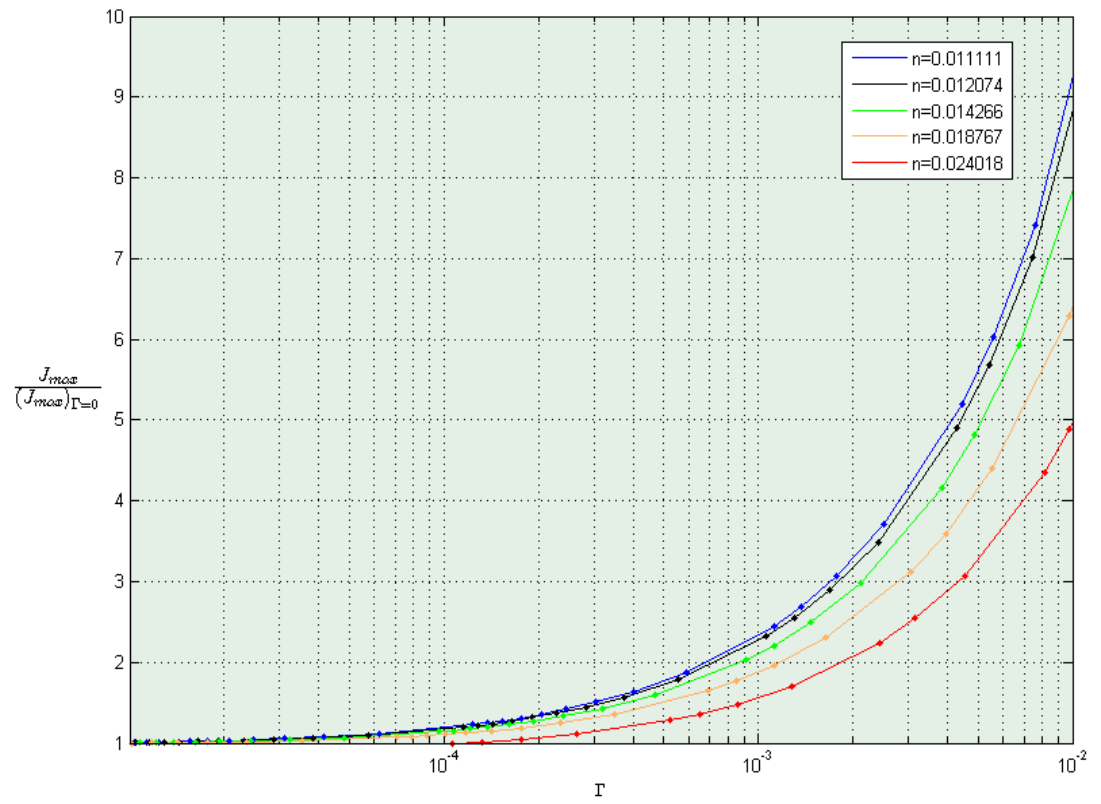
Şekil 4.27 : Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz akım derinliği arasındaki ilişki.



Şekil 4.28 : Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz sürtünme hızı arasındaki ilişki.



Şekil 4.29 : Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz akım hızı arasındaki ilişki.



Şekil 4.30 : Manning pürüzlülük katsayısı ile elde edilen değişkenlik parametresi ve boyutsuz taban eğimi arasındaki ilişki.

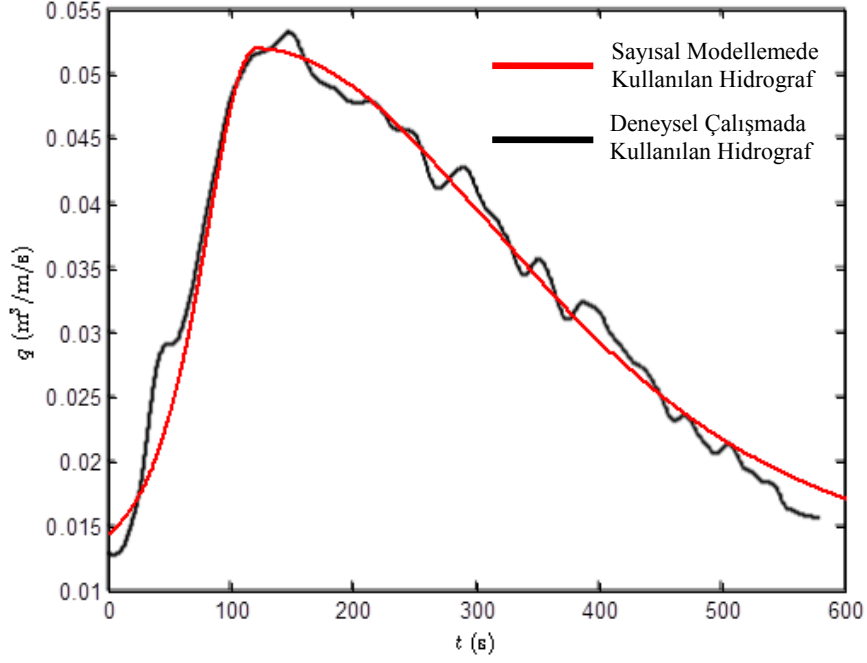
5. SAYISAL MODELİN FİZİKSEL MODEL ÖLÇÜMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI VE DOĞRULANMASI

Kıyı mühendisliğinde kullanılan sayısal modellerin geçerliliğinin doğrulanabilmesi ve ilgili parametrelerin hangi limitlerinde kullanılabileceklerinin belirlenebilmesi için, saha ölçümleri ve/veya laboratuvar fiziksel model verileri ile karşılaştırılmaları büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada kullanılan sayısal modelin doğrulanması amacıyla, Erdog (2014) tarafından yapılan çalışma kullanılacaktır [1].

Erdog (2014) İTÜ Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan yatay tabanlı 26 m×1 m×1 m boyutlarındaki kanalda, farklı değişken akım hidrografları için debi, akım yüksekliği, akım hızı ve türbülans ölçümleri gerçekleştirmiştir. Bu deneysel çalışma esnasında kanalın sonunda bulunan 20,5 cm yüksekliğinde bir dolusavak kullanılarak akım kontrolü sağlanmış, akım hızı ve derinliği ölçümleri ise yaklaşık olarak kanalın ortasında yer alan gözlem kesitinde gerçekleştirilmiştir. Kanala gelen akımın debisi, elektronik bir lineer vana ile kontrol edilmiş; istenen değişken akım hidrografı el ile girilmiştir. Kanal yan cidarları cam, kanal tabanı da pürüzsüz beton olduğu için akım cilalı akımdır ($k_s^+ < 5$).

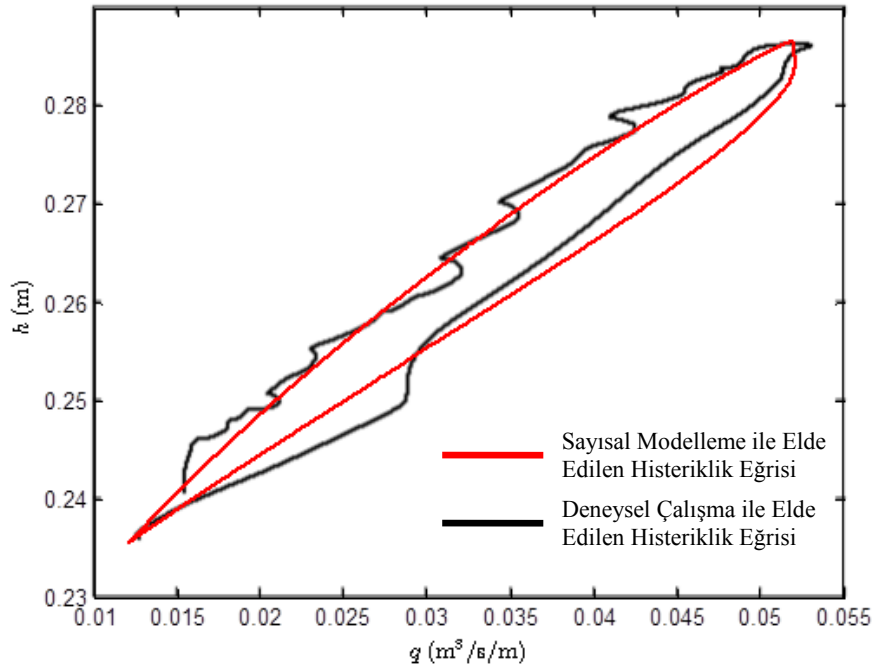
Kanalın sonunda bulunan dikdörtgen savak sayesinde bu noktadaki debiye göre akım yüksekliği bilinmektedir. Dolayısıyla mevcut sayısal model bu akıma uyarlanırken, $\partial h / \partial x$ terimi gözlem kesiti ve kanal sonu arasındaki yükseklik farkı ve iki kesit arasındaki mesafe kullanılarak doğrudan modele girilebilmiştir.

Erdog (2014) farklı yükselme ve çekilme eğrileri olan birçok farklı değişken akım hidrografı için deneyler gerçekleştirmiştir. Bu hidrograflar arasında, mevcut çalışmada denklem (3.15) ile idealleştirilen hidrografa en uygun olan hidrograf Şekil 5.1'de siyah eğri ile verilmektedir. Aynı şekilde kırmızı eğri ise denklem (3.15) ile çizilen idealleştirilmiş değişken akım hidrografını göstermektedir. Görüldüğü üzere, iki eğri oldukça örtüşmektedir. Buna göre taban akışı debisi $q_0 = 0,012 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $\Delta q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ve karakteristik zaman ölçeği $T^* = 0,1$ saat (6 dakika) olarak ortaya çıkmaktadır. Erdog (2014) başlangıç akım derinliğini (taban akışı derinliği, h_0) 23,5 cm olarak vermektedir.



Şekil 5.1 : Deneysel çalışma ile sayısal modellemede kullanılan hidrografların karşılaştırılması .

Şekil 5.2’de Erdog (2014) tarafından ölçülen q - h histeriklik eğrisi siyah ile, sayısal modelleme sonucunda elde edilen eğri kırmızı ile gösterilmiştir.

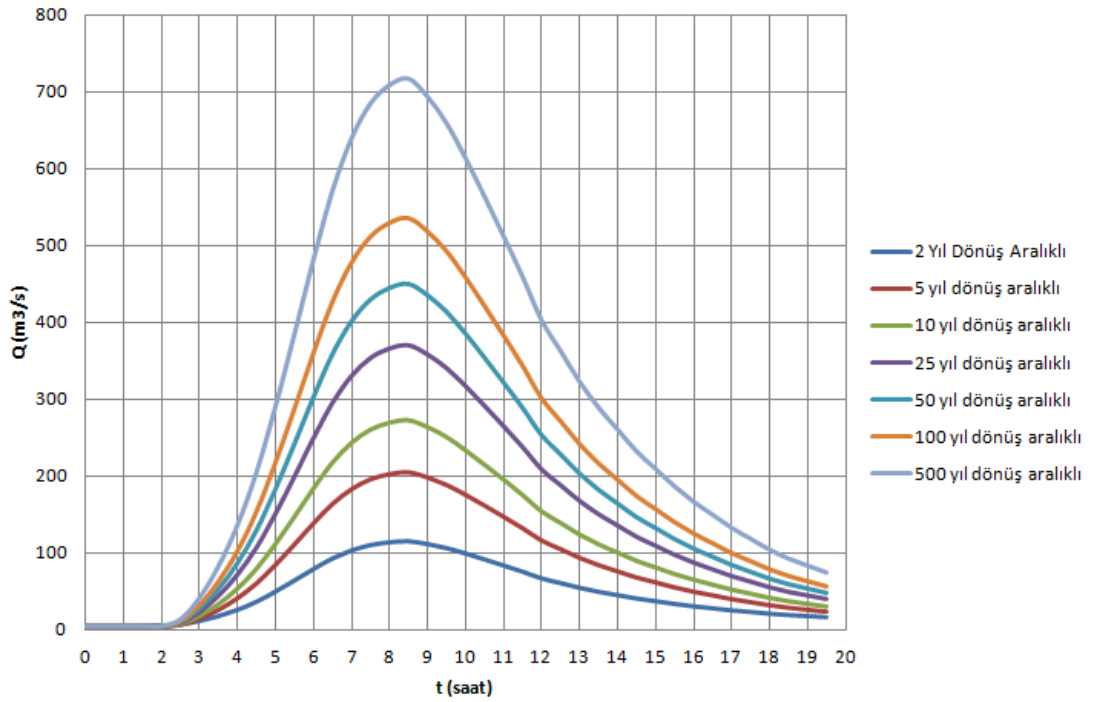


Şekil 5.2 : Deneysel çalışma ile sayısal modelleme sonucunda elde edilen histeriklik eğrilerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere sayısal model sonucu, laboratuvar verisi ile büyük bir uyum göstermektedir. Yapılan çalışmanın sonuçları, mevcut sayısal modelin değişken akımların fiziğini başarılı biçimde yansıtabildiğini ortaya koymaktadır.

6. SAYISAL MODELİN UYGULAMA ÖRNEĞİ

Bu çalışma kapsamında hazırlanan sayısal modelin uygulanabilirliğinin test edilmesi amacı ile Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nden (D.S.İ) temin edilen, Akçay Deresi'ne ait hidrograflar (Şekil 6.1) incelenmiştir. 2, 5, 10, 25, 50, 100 ve 500 yıl dönüş aralıklı taşkın koşullarının benzeştirildiği sayısal modelleme çalışması sonucunda bahsi geçen akım koşullarına ait değişkenlik dereceleri (Γ) belirlenmiş; kararlı akım kabullerinin hangi koşullarda daha doğru sonuçlar verebileceği ortaya konmuştur.



Şekil 6.1 : Akçay Deresi'ne ait D.S.İ'den temin edilen hidrograflar [16].

Uygulama bölgesi, Samsun ve Ordu il sınırlarını arasında bulunan Akçay Dere'si üzerinde bulunmaktadır. Taşkın açısından oldukça riskli bir bölgede bulunan uygulama alanında, konu ile alakalı pek çok ölçüm ve ıslah çalışmaları yapılmaktadır. Bölgeye ait uydu görüntüleri ve fotoğraflar Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te sunulmuştur.



Şekil 6.2 : Uygulama bölgesine ait uydu görüntüsü [16].



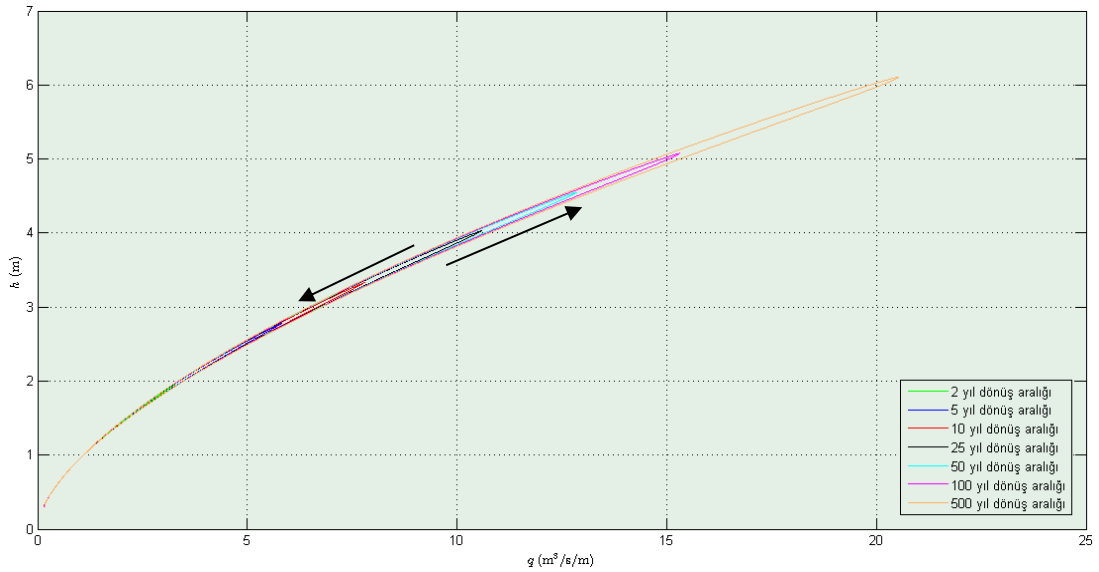
Şekil 6.3 : Uygulama bölgesine ait bir fotoğraf [16].

Dere üzerinde alınan bir kesit için yürütülen modelleme çalışmasında, dikdörtgen kesit kabulü yapılmış olup; kesite ait özellikler ve bahsi geçen kesitte görülen ortalama akım derinliği ile birlikte taban akış debisi değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Birim genişlikten geçen taban akış debisi ve hidrograflara ait birim debiler $q_0=Q_0/B$ bağıntısı ile elde edilmiştir.

Çizelge 6.1 : İncelenen dere kesitine ait özellikler ve ortalama akım koşulları [16].

Özellik	Değer
B (m)	35,00
h_0 (m)	0,30
Q_0 (m ³ /s)	5,00
q_0 (m ³ /s/m)	0,143

Yapılan modelleme çalışması neticesinde farklı dönüş aralıkları için elde edilen histeriklik eğrileri (q-h) Şekil 6.4’te görülmektedir.



Şekil 6.4 : Sayısal modelleme sonucunda farklı dönüş aralıklarına karşılık gelen histeriklik eğrileri (q-h).

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere sonuçlar Bölüm 3 ve 4’te elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Yapılan analizler göstermiştir ki dönüş aralığı arttıkça, başka bir deyişle maksimum debi ile taban akış debisi arasındaki fark arttıkça akım daha kararsız bir davranış sergilemiştir. Bununla birlikte, her bir dönüş aralığı için elde edilen değişkenlik dereceleri (Γ) Tablo 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Model testleri sonucunda incelenen hidrograflar için elde edilen değişkenlik dereceleri (Γ).

Dönüş Aralığı	Γ
2 yıl	$5,56 \times 10^{-4}$
5 yıl	$8,36 \times 10^{-4}$
10 yıl	0,0010
25 yıl	0,0013
50 yıl	0,0014
100 yıl	0,0016
500 yıl	0,0020

Elde edilen sonuçlar neticesinde, 2 ve 5 yıl dönüş aralıklı taşkın hidrografları kullanılarak yürütülen çalışmalarda yapılacak olan kararlı akım kabullerinin yanlış olmayacağı ($\Gamma < 10^{-4}$) sonucuna varılmıştır. Öte yandan, 10, 25, 50, 100 ve 500 yıl dönüş aralıklı taşkın hidrografları kullanılarak yapılan analizlerde kararlı akım varsayımlarının doğruyu yansıtmayacağı ($\Gamma > 10^{-4}$) ortaya konmuştur.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Açık kanal akımlarında kararsızlık parametresinin (histerik etkilerin) hidrolik özellikler üzerindeki etkisinin sayısal modelleme ile belirlenmesi amacı ile yürütülen bu çalışma neticesinde, aşağıda özetle verilen sonuçlara varılmıştır.

- Yapılan çalışma kapsamında, herhangi bir cidar pürüzlülüğüne sahip bir prizmatik kanal akımı üzerinde, permanan olmayan debi zaman serisine sahip tipik bir hidrograf oluşturulmuştur.
- Belirlenen kararsız akım hidrografı için, tek boyutlu Saint Venant denklemleri ve önerilen başlangıç koşulları (üniform akım ve sabit taban akışı debisi) esas alınarak bir sayısal modelleme çalışması yürütülmüştür.
- Ortaya konan sayısal modelin en önemli özelliği, tüm konvektif (mesafeye bağlı) terimlerin, değişkenlik yayılma hızı yaklaşımı kullanılarak mansap koşullarına bağlı olmaksızın modele dahil edilmesi ve çözülmesidir.
- Başlangıç ve sınır koşulları için kullanılan parametrelerin sayısal modelleme üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, farklı parametrik değerler kullanılarak model testleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde, zaman ölçeği (T^*), taban akış debisi (q_0), dolaysız akış debisi (Δq) ve Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayısı (k_s) için farklı değerler denenerek bu parametrelerdeki değişimin hidrolik özelliklere etkisi incelenmiştir.
- Zaman ölçeğinin (T^*) farklı değerleri için yürütülen model testleri neticesinde, zaman ölçeği arttıkça akım permanan koşullara daha da yaklaştığı için akımdaki histeriklik beklendiği şekilde azalmıştır. Bununla birlikte, hem akım hızının hem de sürtünme hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Zaman ölçeği azaldıkça akımdaki histeriklik artmış, akım daha kararsız hale gelmiştir. Denenen minimum zaman ölçeğinde akım ve sürtünme hızlarının en yüksek değerlerine ulaştıkları görülmüştür.
- Taban akışı akım derinliği (başlangıç akım derinliği, h_0) sabit tutularak, taban akış debisinin (q_0) farklı değerleri ile yürütülen sayısal modelleme

çalışması neticesinde, debi miktarı arttıkça akımdaki histeriklik azalmış, akım daha kararlı hale gelmiştir. Öte yandan, debi miktarı azaldıkça, akımdaki histeriklik artmıştır. Bu sonuç, yılın büyük bir kısmında durgun olan ve taşkın durumunda yüksek debiler geçiren haliçlerde ve kuru akarsularda büyük oranda histeriklik gözlemlenmesi ile paralellik göstermektedir.

- Δq 'ya (dolaysız akış debisine) ait farklı değerler ile yürütülen sayısal modelleme çalışması neticesinde, maksimum debi ile taban akış debisi arasındaki fark arttıkça akımdaki histeriklik artmıştır. Öte yandan, maksimum debi ile taban akışdebisi arasındaki fark azaldıkça, akımdaki histeriklik azalmıştır.
- Farklı Nikuradze eş-değer pürüzlülük katsayıları (k_s) ile yürütülen sayısal modelleme çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde, taban pürüzlülüğü arttıkça akımın daha az histerik hale geldiği, ancak bu etkinin diğer parametrelerin etkisi kadar bariz olmadığı ortaya konmuştur. Şehirleşme ve dere ıslahı projeleri ile akarsu yataklarındaki pürüzlülüğün azalmasının akımdaki histerik etkileri arttırdığı; bununla paralel olarak permanan akımlar için türetilen direnç formüllerinin pürüzsüz yataklarda olduğu kadar doğru sonuç veremeyebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.
- “c” parametresinin (değişkenlik hızının akım hızına oranı olarak tanımlanan katsayı) histeriklik üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla, farklı “c” değerleri kullanılarak ayrıca bir sayısal modelleme çalışması yürütülmüştür. Yürütülen çalışmada değişkenler için başlangıç koşulları tanımlanmış olup, sadece “c” parametresinin değeri değiştirilmiştir. Hatırlanacağı üzere taban direnci Chézy denklemi kullanılarak çözüldüğünde $c=3/2$, Manning denklemi kullanılarak çözüldüğünde ise $c=5/3$ olarak ortaya çıkmaktadır. Bunlara ek olarak yıkım dalgası (roll wave) tarzında bir dalganın ilerleme hızını gösteren $c=1$ durumu da değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, “c” katsayısının hesabında Chézy veya Manning yaklaşımı kullanılmasının histerikliğe olan etkisinin çok fazla olmadığı, ancak değişkenlik hızının azalması ile histerikliğin artma eğiliminde olduğu görülmektedir.

- Çalışma kapsamında histerik etkilerin ne ölçüde değiştiğini gözlemlemek için histerik etkiler boyutsuzlaştırılmıştır. Bunun için bir döngü şeklinde verilen histerik grafiklerde, su seviyesi ve debi eğrisi içerisinde kalan alan, maksimum su seviyesi ile başlangıç su seviyesi arasındaki fark ile maksimum debi ile başlangıç debisi arasındaki farka (maksimum dolaysız akış debisine) bölünmüştür. Bu boyutsuz sayıya göre histerik etki tanımlanmıştır. Bu sayı ne kadar büyük olursa histeri o kadar fazla etkin, ne kadar küçük olursa histeri o kadar az etkin olmaktadır.
- Yapılan analizler sonucunda, değişkenlik parametresinin yaklaşık 10^{-4} değerine kadar permanan akım koşulları için yapılan kabullerin yanlış olmayacağı; bu değerden daha yüksek değerlerde ise hata payının artacağı ortaya konmuştur. Öte yandan, pürüzlülük etkilerinin de incelendiği çalışmada, taban pürüzlülüğünün kayma gerilmelerini arttırdığı ve bu sebeple akımın daha kararlı bir karakter gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, daha önceden Nikuradze pürüzlülük katsayısı ile modele tanımlanan taban pürüzlülüğü, Manning katsayısı ile ifade edilip, yapılan analizlere ek olarak ilave sayısal modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Manning pürüzlülük katsayısı ile yürütülen sayısal modelleme çalışması neticesinde, bir önceki çalışma ile bire bir örtüşen sonuçlara varılmıştır.
- Yapılan çalışmalara ek olarak, sayısal modelin doğruluğunun tayin edilebilmesi amacıyla, sayısal modellemede kullanılan veriler, Erdog (2014) tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi Laboratuvarı'nda yapılan deneysel çalışma verileri ile karşılaştırılmış; elde edilen sonuçların deneysel veri ile uyumluluğu mevcut sayısal modelin değişken akımların fiziğini başarılı bir biçimde yansıtabildiğini ortaya konmuştur.
- Sayısal modelin uygulanabilirliğinin test edilmesi amacı ile Akçay Deresi'si için Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğünden temin edilen farklı dönüş aralıklıklarına sahip taşkın hidrografları kullanılarak bir sayısal modelleme çalışması yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar neticesinde, 2 ve 5 yıl dönüş aralıklı taşkın hidrografları kullanılarak yürütülen çalışmalarda yapılacak olan kararlı akım kabullerinin yanlış olmayacağı ($\Gamma < 10^{-4}$) sonucuna varılmıştır. Öte yandan, 10, 25, 50, 100 ve 500 yıl dönüş aralıklı taşkın

hidrografları kullanılarak yapılan analizlerde kararlı akım varsayımlarının doğruyu yansıtmayacağı ($\Gamma > 10^{-4}$) ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Erdog, E.** (2014). The Influence of Unsteadiness Degree on Hydraulic Characteristics in Open Channel.
- [2] **Sumer, B. M., Ünsal, İ., Bayazit. M.,** (2007). Hidrolik, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [3] **Çengel, Y. A., Cimbala, M. J.,** (2008). Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Güven Kitabevi, İzmir.
- [4] **Sleigh, A.** (2006). Lecture of Open Channel Hydraulics, University of Leeds.
- [5] **Ünsal, İ.,** (1978). Değişken Akımların Hidroliği, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [6] **Url-1** <web.itu.edu.tr/~yükselen/UZB362/02>, alındığı tarih: 03.05.2014.
- [7] **Bulu, A.** (2009). Su Mühendisliği El Kitabı, Es Yayınları, İstanbul.
- [8] **Url-2** <imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/cbfc9afa807b50d_ek.pps>, alındığı tarih: 01.04.2014.
- [9] **Url-3** <en.wikipedia.org/wiki/1-D_Saint_Venant_Equation>, alındığı tarih: 05.04.2014.
- [10] **Henderson, F. M.** (1966). Applied Hydrology, Macmillian Publishing, New York.
- [11] **Langhi, M., Hosoda T., Dey S.** (2013). Velocity Deformation Model for Unsteady Open-Channel Flows Over Smooth or Rough Beds. Journal of Hydraulic Research Vol. 139, No.4, pp. 433-443.
- [12] **Graf, W. ve Haizhou, T.** (1992). Friction in Unsteady Open-Channel Flow Over Gravel Beds. Journal of Hydraulic Research Vol. 31, No.1, pp. 99-110.
- [13] **Graf, W. ve Song, T.** (1996). Bed shear stres in non-uniform and unsteady open-channel flow. Journal of Hydraulic Research Vol. 33, No.5, pp. 699-704.
- [14] **Moots, E.E., Mavis F.T.** (1938). A Study in Flood Waves, University of Iowa, Bulletin No. 14.
- [15] **Url-4** <web.itu.edu.tr/kents/matlab.pdf>, alındığı tarih: 20.03.2014.
- [16] **Varol, E.Ö., Bora O.,** (2012). OMW Samsun CCPP, Report on Assesment of Flood Characteristics and Risks Due to Akçay River.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Mehmet Buğra BAYKUŞ

Doğum Yeri ve Tarihi : Havsa – 04.01.1987

E-Posta :mbbaykus@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı