T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PRİZMATİK KANALLARDA YAVAŞ DEĞİŞEN AKIMIN SAYISAL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EZGİ ACAR

DENİZLİ, KASIM - 2020

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PRİZMATİK KANALLARDA YAVAŞ DEĞİŞEN AKIMIN SAYISAL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EZGİ ACAR

DENİZLİ, KASIM - 2020

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İmza:

Öğrenci Adı Soyadı: Ezgi ACAR

ÖZET

PRİZMATİK KANALLARDA YAVAŞ DEĞİŞEN AKIMIN SAYISAL ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
EZGİ ACAR
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:PROF. DR. ÜLKER GÜNER BACANLI)
(EŞ DANIŞMAN:PROF. DR. GÜRHAN GÜRARSLAN)
DENİZLİ, KASIM - 2020

Bu tez çalışmasında yavaş değişen akımın su yüzü profillerinin farklı sayısal yöntemler ile belirlenmesi amaçlanmaktadır. Farklı profillere sahip 8 örnek incelenmiş ve farklı yöntemler ile çözümler elde edilmiştir. Bu çözümleri elde edebilmek için MATLAB programı ile algoritmalar oluşturulmuş ve bu algoritmalara örnek problemler uygulanarak çözümler elde edilmiştir. Bu algoritma çözümlerinin yanı sıra HEC-RAS programı ile de bir çözüm yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Tedrici değişken akım, Su yüzü profilleri, Sayısal analiz yöntemleri, Açık kanal, MATLAB, HEC-RAS.

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS OF GRADUALLY VARIED FLOW IN PRISMATIC CHANNELS
MASTER THESIS
EZGI ACAR
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR:PROF. DR. ÜLKER GÜNER BACANLI)
(CO-SUPERVISOR:PROF. DR. GÜRHAN GÜRARSLAN)
DENİZLİ, NOVEMBER 2020

In this study, water surface profiles of gradually varied flow is aimed tor determine by different numerical methods. Eight example with different profiles were examined and solutions were obtained with different methods. In order to obtain these solutions, algorithms were created with the MATLAB program and solutions were obtained by applying example problems to these algorithms. In addition to these solutions, a solution was made with the HEC-RAS program. The results obtained were compared with each other.

KEYWORDS: Gradually varied flow, Water surface profiles, Numerical analysis, Open channel, MATLAB, HEC-RAS.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

TABLO LİSTESİ

Sayfa

SEMBOL LİSTESİ

α	:	Hız Dağılım Katsayısı
A	:	Kesit Alanı
U	:	Kesit Çevresi
ΔA	:	Kesit Alanının Küçük Bir Parçası
γ	:	Özgül Ağırlık
g	:	Yerçekim İvmesi
v	:	Hız
V	:	Ortalama Hız
E	:	Özgül Enerji
y	:	Derinlik
J_0	:	Kanal Taban Eğimi
Q	:	Debi
n	:	Manning Katsayısı
R	:	Hidrolik Yarıçap
Fr	:	Froude Sayısı
J_e	:	Enerji Çizgisi Eğimi
H	:	Toplam Enerji Yüksekliği
z	:	Kod Farkı
B	:	Su Yüzey Genişliği
q	:	Birim Genişlik Debisi
y_c	:	Kritik Derinlik
y_n	:	Normal Derinlik
K	:	Konveyans
Z	:	Kesit Faktörü
J_c	:	Kritik Eğim
h_k	:	Yük Kaybı
h	:	Adım Boyutu
k_1	:	Birinci Noktadaki Eğim
k_2	:	İkinci Noktadaki Eğim
k_3	:	Üçüncü Noktadaki Eğim
k_4	:	Dördüncü Noktadaki Eğim
m	:	Şev Eğimi

KISALTMA LİSTESİ

TDA	**:**	Tedrici Değişken Akım
NDÇ	**:**	Normal Derinlik Çizgisi
KDÇ	**:**	Kritik Derinlik Çizgisi
USBR	**:**	U.S. Bureau of Reclamation/B.D. Tarıma Uygunlaştırma Dairesi
HEC-RAS	**:**	Hydraulic Engineering Center, River Analysis System

ÖNSÖZ

Bu çalışmada prizmatik kanallarda su yüzü profillerinin farklı sayısal yöntemler ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Su yüzü diferansiyel denklemi kullanılarak oluşturulan MATLAB programında oluşturulan algoritmalarla ve HEC-RAS programı yardımıyla su yüzü profilleri belirlenmiş ve farklı yöntemler ile elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkıda bulunan başta tez danışmanım Prof. Dr. Ülker Güner Bacanlı’ya, tezde kullanılan algoritmaların hazırlanmasında ve tezin her aşamasında bilgi, deneyim ve sabrını esirgemeyerek beni tavsiyeleriyle yönlendiren ve destekleyen eş danışmanım Prof. Dr. Gürhan Gürarslan’a teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde katkısı olan ismini sayamadığın bütün hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca eğitim yaşamım ve bütün hayatım boyunca üzerimde büyük emeği olan hem maddi hem manevi gücünü benden esirgemeyen annem, babam ve abime minnettarım.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Açık kanal akışı, sıvının sınırlarının tamamen çevrili olmadığı, atmosfer ile temas halinde olan serbest yüzeyli akış modeline denir (Kaçmaz, A., 2018). Açık kanallara; dereler, nehirler, sulama kanalları, yağmur suyu ve kanalizasyon borularındaki akımlar, oluk boyunca akan su gibi örnekler verilebilir. Açık kanallar, prizmatik ve prizmatik olmayan kanallar olarak iki sınıfa ayrılabilir. Kesit şeklinin, boyutunun ve taban eğiminin sabit olduğu kanallar *prizmatik kanal* olarak adlandırılır. Yapay kanallara (sulama kanalları, oluklar vb.) örnek olarak prizmatik kanallar verilebilir. Dikdörtgen, yamuk, üçgen ve daire yapay kanallarda yaygın olarak kullanılan şekillerdir. Doğal kanallar ise (nehir, dere vb.) değişen kesitlere sahip kanallar olduğu için *prizmatik olmayan kanal* olarak adlandırılır.

Açık kanal akışını pek çok şekilde sınıflandırmak mümkündür. Aşağıdaki sınıflandırma, derinliğin zamana ve konuma bağlı olarak değişimine göre yapılmıştır.

Kararlı Akım

Kararlı Üniform Akım

Kararlı Üniform Olmayan Akım

i. Tedrici Değişken Akım

ii. Ani Değişken Akım

Kararsız Akım

Kararsız Üniform Akım

Kararsız Üniform Olmayan Akım

i. Tedrici Değişken Akım

ii. Ani Değişken Akım

1.1.1 Kararlı Akım ve Kararsız Akım

Bir akım bölgesinde herhangi bir noktada hız, basınç gibi akımla ilgili değerler zamana bağlı olarak değişmezse ya da ihmal edilecek kadar küçük bir değişim mevcutsa bu akım tipine *kararlı akım* denir. Eğer zamana bağlı bir değişim var ise ve ihmal edilemeyecek düzeyde ise oluşan akım *kararsız akım* olarak adlandırılır.

1.1.2 Üniform ve Üniform Olmayan Akım

Bir akım bölgesinde, akım derinliği kanal boyunca değişmiyor ise akım *üniform akım* olarak adlandırılır. Eğer derinlik kanal boyunca değişiyorsa akıma *üniform olmayan akım* denir. Üniform akımda, hız değişimi olmadığı için ivme sıfıra eşit olacaktır. Bu durumda akım çizgileri doğrusal ve paralel olacaktır. Üniform akımın oluşması için, kanal sabit eğimli ve sabit en kesitli olmalıdır.

1.2 Temel Kavramlar

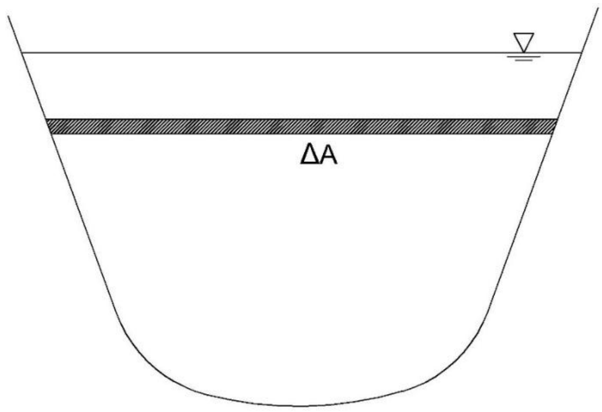
1.2.1 Hız Dağılım Katsayısı

Açık kanallarda oluşan düzensiz hız dağılımı sebebiyle, akım hız yüksekliğini ortalama hız ile hesaplamak doğru sonuçlar vermeyebilir. Bu sebeple bir α düzeltme katsayısı kullanılır.

A kesit alanına sahip bir kanalda ΔA gibi küçük bir alan ve kanalda akan sıvının özgül ağırlığı γ olsun. Bu durumda kütle:

$$\frac{\gamma}{g}(\Delta v) \tag{1.1}$$

olur. Bu ifade γ özgül ağırlığı, g yerçekim ivmesini ve v hızı temsil etmektedir.



Şekil 1.1: Bir kanal en kesiti

ΔA kesitinden geçen akımın kinetik enerjisi:

$$Kinetik\ Enerji = \frac{1}{2}\left(\frac{\gamma}{g}(\Delta v)\Delta A\right)v^2 \tag{1.2}$$

Tüm alan, A için toplam kinetik enerji ise:

$$Toplam\ Kinetik\ Enerji = \sum \frac{1}{2}\left(\frac{\gamma}{g}\Delta A v^3\right) \tag{1.3}$$

Toplam kinetik enerji formülünde bulunan v hızı yerine ortalama hız olan V, düzeltme katsayısı ile kullanılırsa formül aşağıdaki gibi olacaktır:

$$Toplam\ Kinetik\ Enerji = \alpha \frac{\gamma A V^3}{2g} \tag{1.4}$$

Denklem (1.3) ve (1.4) birbirine eşitlenirse:

$$\sum \frac{1}{2}\left(\frac{\gamma}{g}\Delta A v^3\right) = \alpha \frac{\gamma A V^3}{2g} \tag{1.5}$$

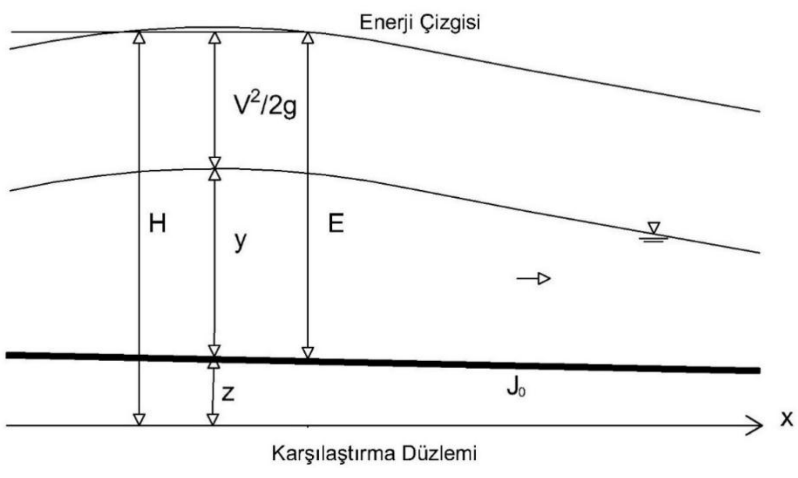
$$\alpha = \frac{\sum v^3 \Delta A}{V^3 A} \tag{1.6}$$

şeklinde bulunur. (Das, 2008)

Bu katsayısı prizmatik kanallarda, düzensiz hız dağılımı etkisi ihmal edilebilir düzeyde olduğu için $\alpha = 1$ alınabilir. Bu çalışmada da α katsayısının değeri bir olarak alınmıştır.

1.2.2 Özgül Enerji

Özgül enerji, bir açık kanalda kanal tabanı karşılaştırma düzlemi olarak kabul edilirse, sıvının basınç yükünün ve dinamik yükünün toplamıdır.



Şekil 1.2: Tedrici değişken akım parametreleri gösterimi

Burada; y derinliği, V ortalama hızı ve E özgül enerjiyi temsil etmektedir.

$$E = \frac{V^2}{2g} + y \tag{1.7}$$

1.2.3 Normal Derinlik

Bir açık kanalda oluşan üniform akımda, kanal içindeki sıvının derinliği kanal boyuna sabittir. Bu sebeple enerji çizgisi eğimi, kanal taban eğimine eşittir. Kanalın enerji çizgisi eğimi Manning denklemi ile hesaplanabilir (Demirel, 2002).

$$J_0 = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} \tag{1.8}$$

Burada J_0 kanal taban eğimini, n Manning katsayısını, Q debiyi, A kanal alanını ve R hidrolik yarıçapı ifade etmektedir. Denklem çözüldüğünde bulunan y değeri normal derinliği (y_n) verecektir.

1.2.4 Kritik Derinlik

Açık kanal akım türünü sınıflandırmak için de kullanılan kritik derinlik kavramı, Froude sayısı (Fr) ile ilişkilendirilmektedir. $Fr = 1$ iken oluşan akım *kritik akım* olarak adlandırılır. Kritik akım durumunda oluşacak derinliğe de *kritik derinlik* denir. Fr ile akım türünün sınıflandırılması aşağıdaki gibidir.

$Fr > 1$ Nehir Akımı

$Fr = 1$ Kritik Akım

$Fr < 1$ Sel Akımı

1.3 Tedrici Değişken Akım

Bir açık kanal akımında, su derinliği kanal boyunca kademeli olarak değişiyorsa oluşan akıma *tedrici değişken akım (TDA)* denir. Tedrici değişken akımda, belirli bir zaman dilimi içerisinde hidrolik karakterinin değişmediği ve akım çizgilerinin birbirine paralel olduğu kabulü yapılır. Ayrıca kanal içerisindeki herhangi bir en kesitte basınç dağılımının hidrostatik basınç dağılımına uyduğu ve akımın kararlı olduğu varsayılır (Das, 2008).

1.3.1 Tedrici Değişken Akımın Diferansiyel Denklemi

Tedrici değişen akımın diferansiyel denklemi aşağıdaki varsayımlar üzerine geliştirilmiştir (Das, 2008):

a. Üniform akım için kullanılan Manning Denklemi'nde kanal taban eğimi yerine enerji çizgisi eğimi alınarak tedrici değişken akımda da kullanılır. Bu kabulün doğruluğu herhangi bir deney ya da teoriyle kanıtlanmamıştır. Fakat yapılan çalışmalardaki sonuçlar karılaştırıldığında hataların ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür (Chow, 1959). Burada J_e enerji çizgisi eğimini ifade etmektedir.

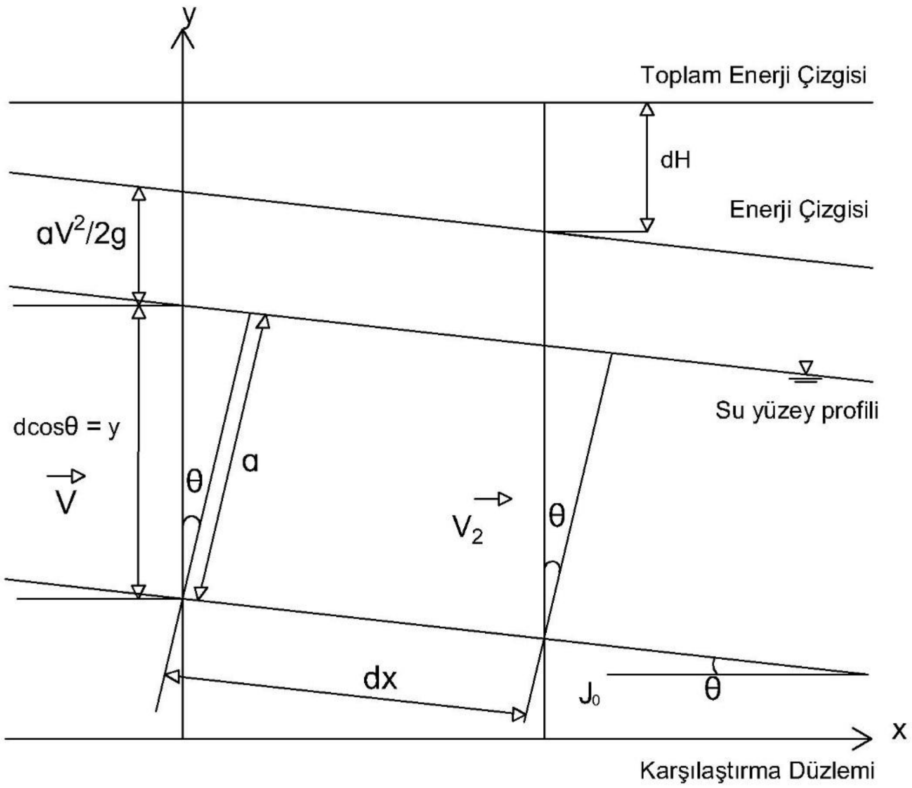
$$J_e = \frac{Q^2n^2}{A^2R^{4/3}} \tag{1.9}$$

b. Kanal taban eğiminin çok küçük olduğu varsayılır. Bu varsayım doğrultusunda kanal tabanının yatay düzlem ile yaptığı açı da (θ) çok küçük olacaktır ve kanal taban eğimi $tan\theta$'ya yaklaşık eşit kabul edilecektir $(tan\theta \cong J_0)$. $tan\theta \cong sin\theta \cong 0$ olacağından $cos\theta \cong 1$ olacaktır ve $y = dcos\theta$ bağıntısı, $y = d$ şeklinde olacaktır.

c. Kanal sabit bir eğime, en kesiti ve cidara sahiptir. Taban eğimi kanal uzunluğu boyunca değişmez. Başka bir deyişle kanal prizmatik kanaldır.

d. Hız dağılım katsayısı $\alpha = 1$ olduğu kabul edilir.

e. Akım alanına herhangi bir şekilde hava giriş çıkışı olmadığı kabul edilir.



Şekil 1.3: Tedrici değişken akımın parametreleri detaylı gösterimi

Bernoulli Denklemi'nden yola çıkılarak, bir açık kanal akımında toplam enerji yüksekliği H aşağıda verilen denklem ile bulunur. Burada z karşılaştırma düzlemi ile kanal tabanı arasındaki kod farkını ifade etmektedir.

$$H = E + z = \frac{V^2}{2g} + y + z \tag{1.10}$$

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi su yüzü x doğrultusunda değişmektedir. Bu değişim akım derinliğinin ve toplam enerjinin x'in bir fonksiyonu olduğunu gösterir.

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dE}{dx} + \frac{dz}{dx} = \frac{d(V^2/2g)}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{dz}{dx} \tag{1.11}$$

Denklem (1.11)'de, x arttıkça H azalacağı için:

$$\frac{dH}{dx} = -J_e \tag{1.12}$$

olacaktır.

Taban eğimi de şekil 1.3'te görüldüğü üzere x arttıkça z azalacağı için:

$$\frac{dz}{dx} = -J_0 \tag{1.13}$$

olacaktır.

Burada dy/dx ise su yüzü değişimini verecektir.

Denklem (1.12) ve (1.13) doğrultusunda denklem (1.11) tekrar düzenlenirse:

$$-J_e = -J_0 + \frac{d(V^2/2g)}{dy}\frac{dy}{dx} + \frac{dy}{dx} \tag{1.14}$$

şeklinde olacaktır. Denklem (1.14)'den de su yüzü değişimini elde edilirse:

$$J_0 - J_e = \frac{dy}{dx}\left(1 + \frac{d(V^2/2g)}{dy}\right) \tag{1.15}$$

şeklinde olur.

$d(V^2/2g)/dx$ teriminde $V = AQ$ yazılır ve denklemdeki Q ile g sabit değişkenler olduğu için denklem aşağıdaki gibi yazılabilecektir.

$$\frac{d(V^2/2g)}{dx} = \frac{Q^2}{2g}\left(\frac{d(A^{-2})}{dy}\right) = \frac{Q^2}{2g}\left(\frac{-2dA}{A^3dy}\right) \tag{1.16}$$

$dA/dy = B$ olduğu için denklem (1.16) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d(V^2/2g)}{dx} = -\frac{Q^2B}{g\,A^3} \tag{1.17}$$

Denklem (1.17)'de elde edilen ifadeyi denklem (1.14)'te yerine yazıldığında:

$$J_0 - J_e = \frac{dy}{dx}\left(1 - \frac{Q^2B}{g\,A^3}\right) \tag{1.18}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0 - J_e}{\left(1 - \frac{Q^2 B}{g\, A^3}\right)} \tag{1.19}$$

elde edilir.

$$\frac{Q^2 B}{g\, A^3} = Fr^2 \tag{1.20}$$

Denklem (1.20)’de elde edilen ifade denklem (1.19) da yerine yazıldığında:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0 - J_e}{1 - Fr^2} \tag{1.21}$$

olur.

Yapılan varsayımlar üzerine elde edilen denklem (1.21) tedrici değişken akımın diferansiyel denklemidir. Bu denklem x’in bağımsız değişken ve y’nin bağımlı değişken olduğu birinci dereceden diferansiyel denklemdir (Das, 2008).

Kanal çok geniş bir dikdörtgen en kesite sahip olduğu kabulü yapılırsa, hidrolik yarıçapın derinliğe eşit olacağı aşikardır. Kanal en kesiti dikdörtgen olduğu için ve $q = Q/B$ olduğu bilindiği için denklem (1.20)’yi aşağıdaki formda yazmak mümkündür.

$$\frac{Q^2 B}{g\, A^3} = \frac{Q^2}{B^2} \frac{B}{gBy^3} = \frac{q^2}{gy^3} \tag{1.22}$$

Dikdörtgen kanallar için:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \tag{1.23}$$

olduğu bilinmektedir. O halde denklem (1.23)’deki ifade denklem (1.22)’de yerine yazıldığında:

$$\frac{Q^2 B}{g\, A^3} = \left(\frac{y_c}{y}\right)^3 \tag{1.24}$$

olur.

Yapılan kabuller Manning Denklemi’nde uygulanırsa:

$$Q = \frac{1}{n}(By)y^{2/3}J_e^{1/2} \tag{1.25}$$

elde edilir. Denklem (1.25) düzenlenirse:

$$Q = \frac{1}{n}By^{5/3}J_e^{1/2} \tag{1.26}$$

olur.

Akım tedrici değişken ve üniform olduğunda:

$$Q = \frac{1}{n}By_n^{5/3}J_0^{1/2} \tag{1.27}$$

olur.

Denklem (1.26) ve (1.27) oranlandığında:

$$\frac{Q}{Q} = \frac{\frac{1}{n}By^{5/3}J_e^{1/2}}{\frac{1}{n}By_n^{5/3}J_0^{1/2}} \tag{1.28}$$

$$\frac{J_e}{J_0} = \left(\frac{y}{y_n}\right)^{10/3} \tag{1.29}$$

elde edilecektir.

Denklem (1.19) aşağıdaki gibi yazıldığında:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0\left(1 - \frac{J_e}{J_0}\right)}{\left(1 - \frac{Q^2B}{gA^3}\right)} \tag{1.30}$$

Denklem (1.24) ve (1.29)’da elde edilen ifadeler denklem (1.30)’da yazıldığında:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_0\left(1 - \left(\frac{y}{y_n}\right)^{10/3}\right)}{\left(1 - \left(\frac{y_c}{y}\right)^3\right)} \tag{1.31}$$

elde edilecektir.

Özgül enerji denkleminin de x'e göre diferansiyeli alındığında aşağıdaki ifade elde edilecektir.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dH}{dx} - \frac{dz}{dx} = J_0 - J_e \tag{1.32}$$

Denklem (1.32), özgül enerjinin diferansiyel denklemi olarak kabul edilir (Das, 2008).

1.3.2 Su Yüzü Profilinin Sınıflandırılması

Su yüzü profili, akım boyunca oluşan derinliklerin grafiği olarak tanımlanabilir. Su yüzü profillerini sınıflandırmak için yatak eğiminden ve derinlikten faydalanılır. Yatak eğiminin küçük, büyük, yatay, ters ve kritik olmasına bağlı olarak 5 sınıfa ayrılır.

Tablo 1.1: Kanallarda oluşan su yüzü profilleri isimlendirilmesi

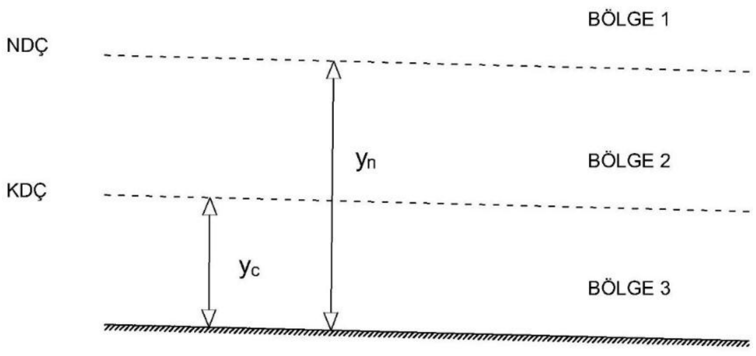
Kanal Tipi	Eğim	Gösterim
Küçük Eğimli Kanal	$0 < J_0 < J_c$	M
Büyük Eğimli Kanal	$0 < J_c < J_0$	S
Yatay Eğimli Kanal	$0 = J_0$	H
Ters Eğimli Kanal	$J_0 < 0$	A
Kritik Eğimli Kanal	$J_0 = J_c$	C

Tablo 1.1'de görüldüğü gibi kanal eğimine bağlı harf ile kodlandırılarak kullanılır. Bir kanal profilini, normal derinliğin oluşturduğu normal derinlik çizgisi

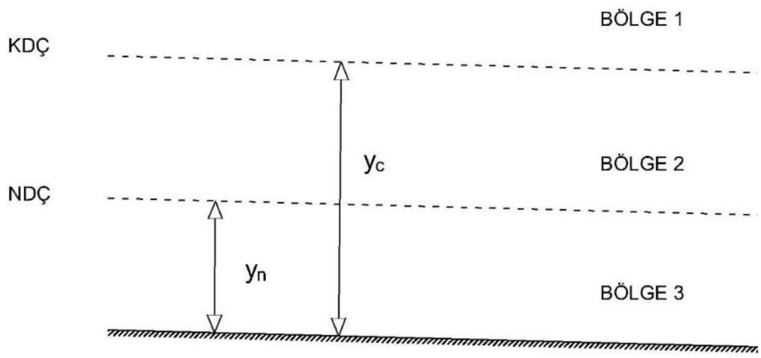
(NDÇ) ve kritik derinliğin oluşturduğu kritik derinlik çizgisi (KDÇ) ile de 3 bölgeye ayrılır (Das, 2008).

Tablo 1.2: TDA Profil türleri

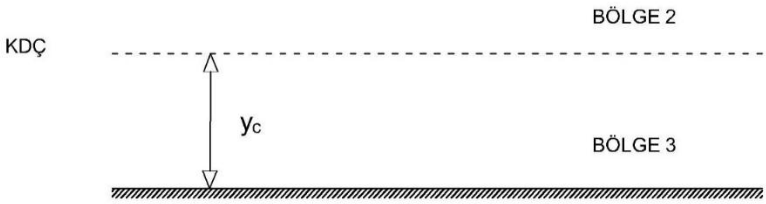
Kanal Tipi	Eğim	Derinlik	Gösterim
Küçük Eğimli Kanal	$0 < J_0 < J_c$	$y_c < y_n < y$	M_1
	$0 < J_0 < J_c$	$y_c < y < y_n$	M_2
	$0 < J_0 < J_c$	$y < y_c < y_n$	M_3
Büyük Eğimli Kanal	$0 < J_c < J_0$	$y_n < y_c < y$	S_1
	$0 < J_c < J_0$	$y_n < y < y_c$	S_2
	$0 < J_c < J_0$	$y < y_n < y_c$	S_3
Yatay Eğimli Kanal	$0 = J_0$	$y_c < y$	H_2
	$0 = J_0$	$y < y_c$	H_3
Ters Eğimli Kanal	$J_0 < 0$	$y_c < y$	A_2
	$J_0 < 0$	$y < y_c$	A_3
Kritik Eğimli Kanal	$J_0 = J_c$	$y_n = y_c < y$	C_1
	$J_0 = J_c$	$y < y_n = y_c$	C_3



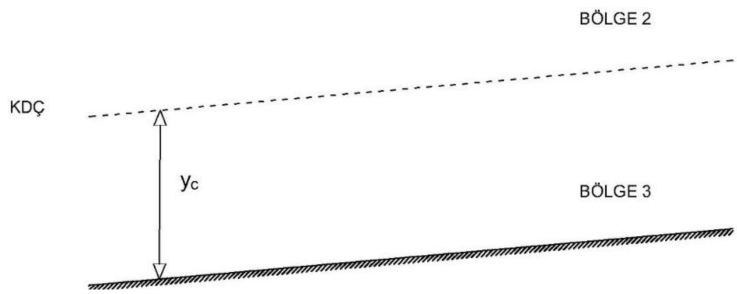
Şekil 1.4: Küçük eğimli kanal tipi (M)



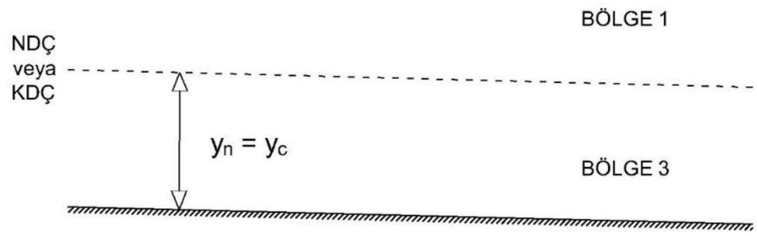
Şekil 1.5: Büyük eğimli kanal tipi (S)



Şekil 1.6: Yatay eğimli kanal tipi (H)



Şekil 1.7: Ters eğimli kanal tipi (A)



Şekil 1.8: Kritik eğimli kanal tipi (C)

1.3.2.1 Profil Karakteristikleri

Profil karakterinin belirlemek için denklem (1.31) kullanılır.

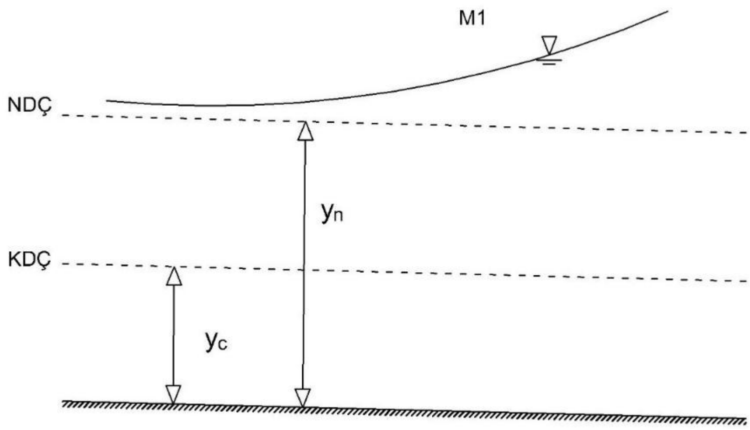
1.3.2.1.1 Küçük Eğimli Kanal Profilleri (M)

- **M1 Profili**

  Bu profil NDÇ'nin üzerinde, yani bölge 1'de gözlenir.

  Memba kesitinde, $y \rightarrow y_n$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow 0$

  Mansap kesitinde, $y \rightarrow \infty$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow J_0$



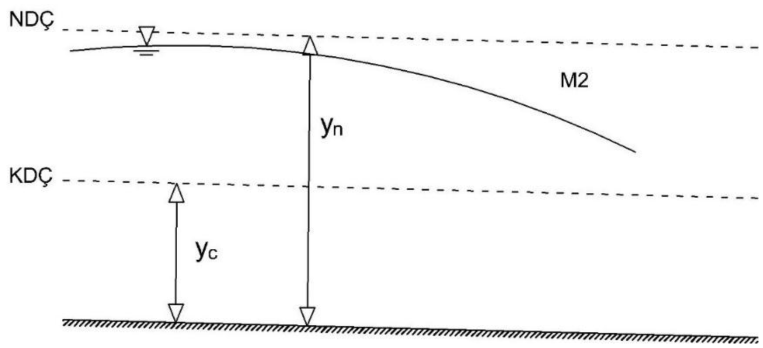
Şekil 1.9: M1 Profili

- **M2 Profili**

  Bu profil NDÇ'nin altında ve KDÇ'nin üzerinde, yani bölge 2'de gözlenir.

  Memba kesitinde, $y \rightarrow y_n$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow 0$

  Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$



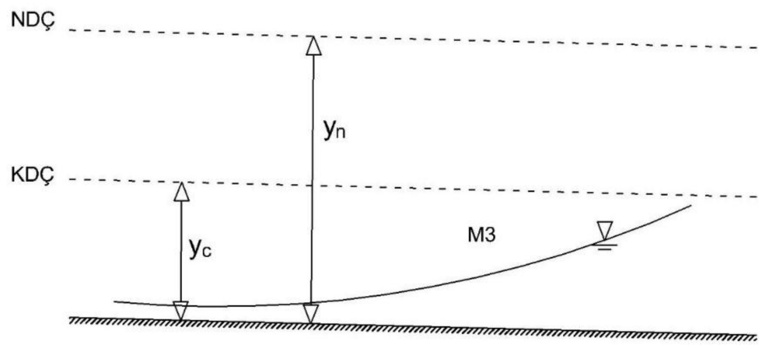
Şekil 1.10: M2 Profili

- **M3 Profili**

Bu profil KDÇ'nin altında, yani bölge 3'te gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow 0$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$



Şekil 1.11: M3 Profili

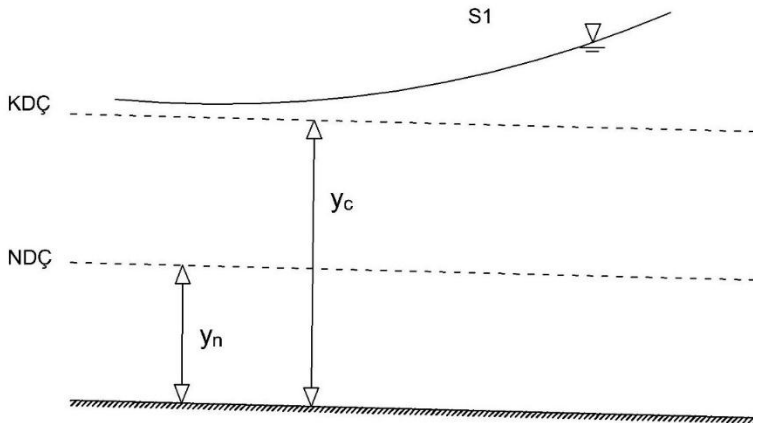
1.3.2.1.2 Büyük Eğimli Kanal Profilleri (S)

- **S1 Profili**

Bu profil KDÇ'nin üzerinde, yani bölge 1'de gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow \infty$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow J_0$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$



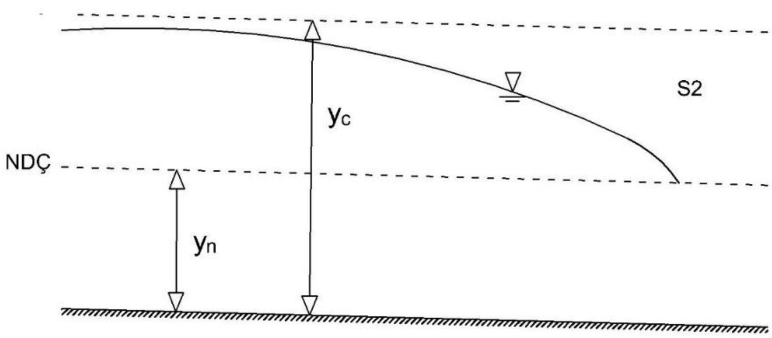
Şekil 1.12: S1 Profili

- **S2 Profili**

Bu profil KDÇ'nin ve NDÇ'nin arasında, yani bölge 2'de gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow y_n$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow 0$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$



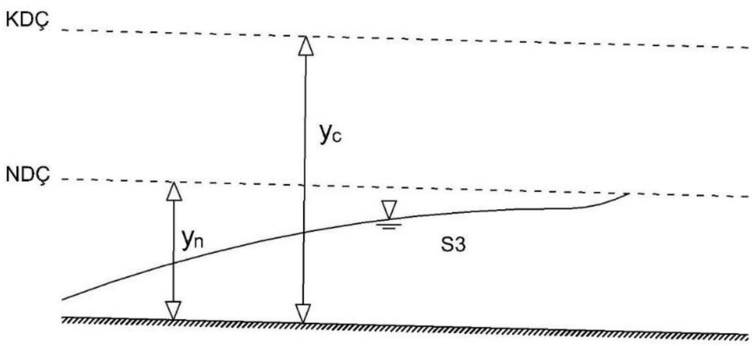
Şekil 1.13: S2 Profili

- **S3 Profili**

Bu profil NDÇ'nin altında, yani bölge 3'te gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow 0$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_n$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow 0$



Şekil 1.14: S3 Profili

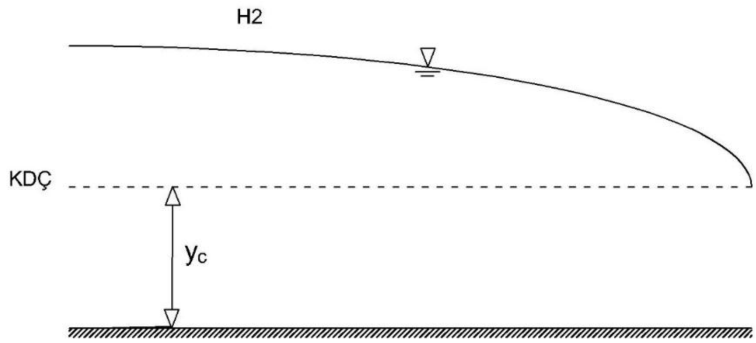
1.3.2.1.3 Yatay Eğimli Kanal Profilleri (H)

- **H2 Profili**

Bu profil KDÇ'nin üzerinde, yani bölge 2'de gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow \infty$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow 0$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$



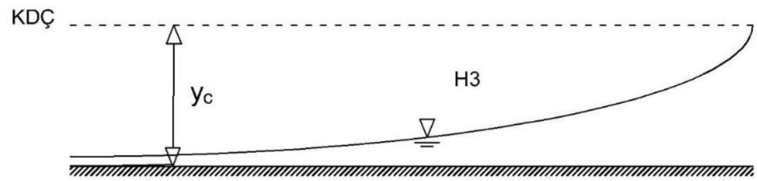
Şekil 1.15: H2 Profili

- **H3 Profili**

Bu profil KDÇ'nin altında, yani bölge 3'te gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow 0$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$



Şekil 1.16: H3 Profili

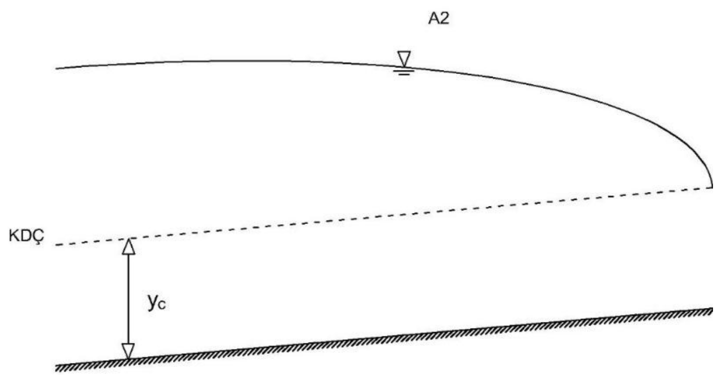
1.3.2.1.4 Ters Eğimli Kanal Profilleri (A)

- **A2 Profili**

Bu profil KDÇ'nin üzerinde, yani bölge 2'de gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow \infty$ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow J_0$



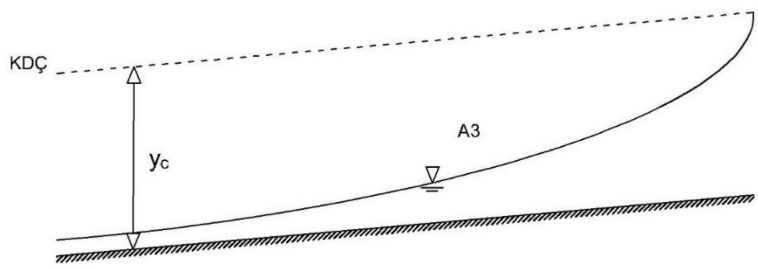
Şekil 1.17: A2 Profili

- **A3 Profili**

Bu profil KDÇ'nin altında, yani bölge 3'te gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow 0$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow \infty$



Şekil 1.18: A3 Profili

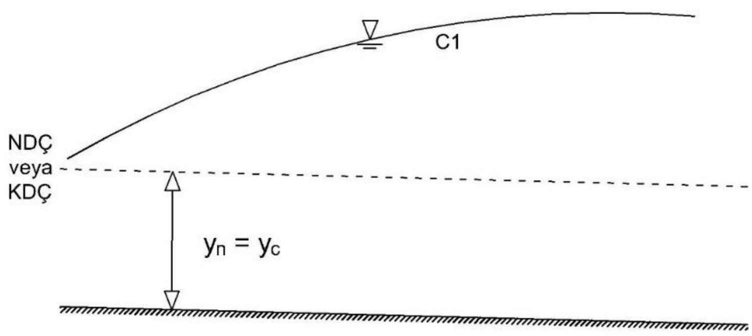
1.3.2.1.5 Kritik Eğimli Kanal Profilleri (C)

- **C1 Profili**

Bu profil NDÇ veya KDÇ'nin üzerinde, yani bölge 1'de gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow y_c = y_n$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow J_0 = J_c$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow \infty$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow J_0 = J_c$



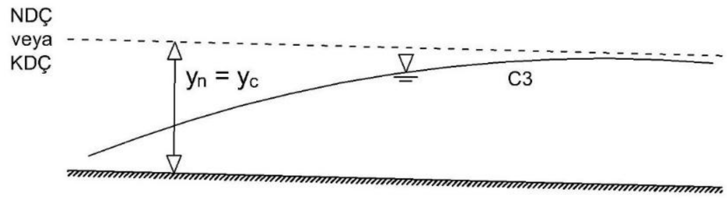
Şekil 1.19: C1 Profili

- **C3 Profili**

Bu profil NDÇ veya KDÇ'nin altında, yani bölge 3'te gözlenir.

Memba kesitinde, $y \rightarrow 0$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow J_0 = J_c$

Mansap kesitinde, $y \rightarrow y_c$ ve $\frac{dy}{dx} \rightarrow J_0 = J_c$



Şekil 1.20: C3 Profili

1.4 Problemin Tanımı ve Çalışmanın Amacı

Açık kanal akımlarının olduğu her hidrolik yapının güvenli, ekonomik ve etkili çalışabilmesi için su yüzü profillerinin belirlenmesi önem arz etmektedir (Öztürkmen, G., 2008). Akım yolu boyunca; kanal kesiti ve cidar pürüzlülüğü değişimlerinin, inşa edilmiş sanat yapılarının ve olası hidrolojik koşulların akımı nasıl etkileyeceğinin belirlenmesi zordur (Öztürkmen, G., 2008). Oluşabilecek senaryoları önceden tahmin edip su yüzü profillerinin belirlenmesi hem alınması gereken önlemler için hem de kanal tasarımı için önemli bir unsurdur. Bunun yanı sıra doğal kanallardaki taşkın tahmini için de su yüzü profilinin belirlenmesi önemli bir çalışmadır.

Su yüzü profilinin belirlenmesi, su yüzü profilinin diferansiyel denkleminin farklı sayısal yöntemlerle çözümüne dayalıdır. Bu çalışma kapsamında doğrudan ve sayısal integrasyon yöntemlerinin su yüzü profilini belirlemek için kullanılması amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında test edilen örnekler literatürden temin edilmektedir. Farklı sayısal yöntemler ile çözülecek bu örnekler, HEC-RAS yazılımı ile de çözümlenecek ve ulaşılan sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Su yüzü profillerinin belirlenmesinde klasik yöntemlerin kullanılması oldukça yaygındır. Bu çalışma kapsamında da literatürde var olan yöntemlerin yanı sıra farklı sayısal integrasyon yöntemlerinin kullanımı test edilecektir. Daha önce bu problem çözümünde kullanılmayan yöntemler kullanılmaya çalışılarak literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Su yüzü profilinin belirlenmesi, açık kanalların tasarımı ve doğal kanallardaki taşkınların tahmini gibi nedenlerden dolayı hidroliğin önemli bir konusudur. Su yüzü profillerinin belirlenmesi için 1930 yıllından günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Su yüzü profilleri hesabı için geliştirilen yöntemler genellikle enerji denkleminin çözümüne dayalıdır. Bu yöntemler klasik yöntemler olarak da bilinir ve su yüzü profilleri hesabında yaygın olarak kullanılır.

Wilson (1969), tedrici değişken akımın analiz edilmesi için su yüzey eğimi ve akım derinliği arasında bir ilişkinin belirlenmesi gerektiği üzerinde durmuştur. Bu çalışmada su yüzü profillerinin kapsamlı araştırılmasının önemi vurgulanmış ve bu doğrultuda prizmatik olmayan dikdörtgen kanal tipleri üzerinde su yüzü profilleri araştırılmıştır.

Yao (1971), dikdörtgen kesitli kanallarda üniform olmayan akımlarla ilgili çalışmasında, tedrici değişken akım için su yüzü profilini belirleyen bir çizelge geliştirmiştir. Çizelgenin kullanımında gerekli değişken kritik derinliktir.

Fread ve Harbaugh (1971), kararlı tedrici değişken akımlar için su yüzü profillerinin belirlenmesinde Newton-Raphson tekniğine dayalı bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Bununla beraber yazarlar, trapez kanallar için FORTRAN IV dilinde yazılmış bir bilgisayar kodunu da sunmuşlardır. Çalışma kapsamında, Newton-Raphson Yöntemi'nin tedrici değişken akımlar için su yüzünün belirlenmesinde etkili olduğu belirlenmiştir.

Kumar (1979), dikdörtgen, trapez, dairesel, parabolik, üçgen, ters eğimli dikdörtgen ve geniş parabolik kanallarda su yüzü profilini elde etmek için doğrudan entegrasyon yöntemini önermiştir. Sürtünmeden kaynaklanan yük kayıplarını ise Chezy hız denklemi cinsinden ifade ederek diferansiyel denkleme dahil etmiştir. Bu çalışmada ayrıca prizmatik yatay ve ters eğimli kanallarda su yüzü profillerinin hesaplanması için kullanılan yöntemler de incelenmiştir.

Hu (1980), USBR standartlarında bir at nalı tüneli için su yüzü profili hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada özel kesitlerin geometrisi verilmiştir. Hidrolik ifadeler tablo ve eğriler ile sunulmuştur. Çalışmada kullanılan yöntem enerji denkleminin doğrudan integrasyona dayalıdır. Yazar çalışmada uygulama örneklerine yer vermiş ve bu örnekler ile yöntemin su yüzü profili belirlemedeki kolaylığını göstermiştir.

Molinas ve Yang (1985), enerji ve momentum denklemlerini kullanarak bir bilgisayar yazılımı geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model ile hidrolik sıçramalarda su yüzü profillerinin hesaplanabileceği, bununla birlikte kanal taban eğimi ne olursa olsun su yüzü profilinin belirlenebileceği ifade edilmiştir. Kontrol kesitinin bir göl, savak kapak veya doğal akarsu olabileceği söylenmiştir. Çalışmada, su yüzü profilinin belirlenmesi, farklı örnekler çözülerek ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Zaghloul (1987), tedrici değişen akımın su yüzü profillerini belirlemek için doğrudan adım yöntemini kullanarak, Lotus 1-2-3 tabanlı bir paket program geliştirmiştir. Program, normal derinlik, kritik derinlik ve su derinliği gibi parametreleri belirlemesinin yanı sıra akım profili sınıflandırması da yapabilmektedir. Kritik derinlik, normal derinlik ve taban eğimi kullanılarak su yüzü profili grafik ile temsil edilebilmektedir.

Paine ve Drogin (1992), prizmatik kanallarda su yüzü profillerini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntem olan standart adım yöntemini kullanan bir bilgisayar modeli geliştirmiştir. Newton-Raphson formunda sunulan algoritma, sel, nehir, kritik, ters ve yatay akım rejimleri için uygundur. Standart adım denklemlerinin sayısal çözümü hızlı uygulama süreleri ile sonuçlanmıştır. Geliştirilen bu program ücretsiz olarak ilgililere sunulmuştur.

Baril ve Drogin (1993), açık akımı veya boru içerisindeki akım için, hesaplanmış sel ve nehir rejimlerinde su yüzü profillerini ve basınç grandyanlarını birleştiren iki modern bilgisayar programı önermişlerdir.

Ilhan (1994), dikey eğrilikli kanallarda akımın hesabına yönelik bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada serbest yüzeyli akım için sayısal bir çözüm yöntemi sunulmuştur. Çalışma kapsamında su yüzü profili hesabı ve basınç dağılımı hesabı için iki ayrı denklem önermiştir ve bu önerilen denklemler Dressier (1978) tarafından elde edilen genelleştirilmiş sığ akım denklemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında önerilen denklemlerden su yüzü profili hesabı için kullanılan denklemin başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenirken, basınç dağılımı için önerilen denklemin doğru sonuçlar vermediği ifade edilmiştir.

Yazıcılar (1997), pek çok taşkın problemine maruz kalan Bartın Nehri üzerinde, taşkın önleme önerileri geliştirmek için su yüzü profili hesaplamaları yapmıştır. Hesaplamalarda, A.B.D. Mühendisler Birliği Hidroloji Mühendisliği Merkezi tarafından geliştirilen HEC-RAS programı kullanılmıştır. Su yüzü profili hesabı için çok yaygın olarak kullanılan bu programın, taşkın problemlerine maruz kalan doğal bir nehirde uygulanıp sonuçları tartışılmıştır.

Barutçular (1999), bir açık kanal akımında tedrici değişken akımın su yüzü profilinin hesaplanması için daha önce geliştirilen yöntemlerin bazıları kullanarak hesaplamaları yapmıştır. Farklı durumlarda farklı yöntemleri kullanarak yaptığı hesaplamaları karşılaştırmıştır. Sonuç olarak sayısal integrasyon ve sonlu farklar yöntemlerinin genel olarak daha güvenilir olduğunu ifade etmiştir.

Birsoy (2002), bileşik kanallarda su yüzü profili hesabı için bir bileşik kanal Froude sayısı tanımı yapmış, enerji ve momentum denklemleri ile birleştirmiştir. Hesaplamalar için C++ ile yazılmış bir bilgisayar programı (CCWASP) geliştirilmiştir. Geliştirilen programın çözümlerini test etmek amacıyla bir laboratuvar ortamında M2 profili elde edilen deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile deneyler karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu ancak kullanılan yönteme göre daha yüksek su yüzü profilleri elde edildiği, bunun sebebinin de yapılan varsayımlar olduğu ifade edilmiştir.

Demirel (2002), tedrici değişken akımın su yüzü profilinin belirlenmesi için kullanılan birinci mertebeden diferansiyel denklemin doğrudan integralinin alınamamasından dolayı yaklaşık yöntemler ile çözülmesinde ortaya çıkan hata miktarları Euler yöntemi ile hesaplanmış ve bu hesaplanan hata %1'i geçmeyecek şekilde bilgisayar programına adapte edilmiştir. Bu program ile prizmatik kanallar için Euler, Heun, Runge-Kutta, Doğrudan Adım, Standart Adım ve Grafik İntegrasyon yöntemi gibi yöntemler kullanılmıştır.

Ponce ve Lohani (2002), tedrici değişken akım denklemini kritik eğim ile ifade ederek su yüzü profillerine yeni bir bakış açısı getirmişlerdir. Bu bakış açısıyla, akım-derinlik gradyanının kritik eğim ve kanal taban eğimi aralığında sınırlı olduğu ifade edilmiştir. Bu yeni bakış ile su yüzü profillerinin analizinde akış-derinlik gradyanı aralıkları tanımı geliştirilmiştir.

Öztürkmen (2008), açık kanal akımında ani değişken akımının su yüzü profilini belirlemeye çalışmıştır. Bu çalışmada, sabit debi ve taban eğiminde farklı eşik tipleri için su yüzü profilleri incelenmiştir. Deneyler dikdörtgen kesitli ve kararlı akım durumunda yapılmış olup farklı eşikler için su yüzü profilleri belirlenmiştir. Belirlenen su yüzü profilleri incelenerek eşiklerin su yüzü profiline etkileri araştırılmıştır.

Vatankhah (2011), trapez kesitli prizmatik bir açık kanal boyunca tedrici değişken akımın su yüzü profilini belirlemek için doğrudan entegrasyon yöntemi sunmuştur. Akım profilinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayan bu çözüm için trapez kanalların değerlendirilmesinde uygun olduğu ifade edilmiştir.

Kaçmaz, A. (2018), tedrici değişken akımda su yüzü profilini belirlemek için standart adım yöntemi kullanmıştır. Kolaylık sağlamak açısından denklemlerin sayısal çözümü Newton-Raphson yöntemi ile yapılmıştır. Trapez bir kanal için Visual Basic programlama dili kullanılarak bir bilgisayar programı oluşturulmuş ve elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır.

3. YÖNTEM VE METOTLAR

Bir açık kanalda tedrici değişken akım için su yüzü profilini hesaplamada kullanılan diferansiyel denklem birinci bölümde elde edilmişti. Elde edilen denklemin genel ifadesi aşağıdaki formda olacaktır.

$$\frac{dy}{dx} = f(x,y) = y' = \frac{J_0 - J_e}{(1 - Fr^2)} \tag{3.1}$$

Prizmatik bir kanalda tedrici değişken akımın su yüzü profili hesaplamasında kullanılan denklem (3.1) yalnızca y'nin bir fonksiyonu olacak ve yalnız bir bağımsız değişkene göre türevleri kapsayacağından adi diferansiyel denklem olarak adlandırılacaktır.

Su yüzü profili hesabında koşullar bağımsız değişkenin aynı değeri için belirlendiğinden problem bir başlangıç değer problemi olur. Bir başlangıç değer probleminde, başlangıç noktasından bağımsız değişkenin değeri arttırılarak adım adım sayısal çözüme ulaşılır. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen ve bu çalışma kapsamında kullanılan yöntemler; direk adım, standart adım, Euler, Heun, dördüncü mertebeden Runge-Kutta, trapez integral ve Gauss kareleme yöntemleridir.

3.1 Bakhmeteff Yöntemi

Bu yöntem tedrici değişken akımın su yüzü profilini belirlemek için kullanılan eski bir yöntemdir. Üniform olmayan akım için Manning denklemi;

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} J_e^{1/2} \tag{3.2}$$

yazılabilir.

Konveyans cinsinden Manning denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q = K J_e^{1/2} \tag{3.3}$$

Burada K konveyans terimidir ve kesitin su taşıma kapasitesini ifade eder.

Akım üniform olduğunda denklem (3.3) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q = K_n J_0^{1/2} \tag{3.4}$$

Denklem (3.3) ve denklem (3.4) oranlandığında;

$$\frac{J_e}{J_0} = \left(\frac{K_n}{K}\right)^2 \tag{3.5}$$

eşitliği elde edilebilir. Görüldüğü üzere denklem (3.5) bize enerji çizgisi eğimi ile kanal taban eğiminin oranını vermektedir.

Bir açık kanalda kesit faktörü Z'nin formülü aşağıdaki gibidir.

$$Z = \frac{A\sqrt{A}}{\sqrt{B}} \tag{3.6}$$

Kritik akışlı bir kanalda ise kesit faktörü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Z_c = \frac{Q}{\sqrt{g}} \tag{3.7}$$

Denklem (3.6) ve (3.7)'in kareleri alınarak oranlandığında:

$$\left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2 = \frac{Q^2 B}{g\, A^3} \tag{3.8}$$

elde edilebilir. Görüldüğü üzere denklem (3.8) bize Froude sayısının karesini vermektedir.

Elde edilen denklem (3.5) ve (3.8) su yüzü diferansiyel denklemi olan denklem (3.1)'de yerine yazılırsa:

$$\frac{dy}{dx} = J_0 \left[\frac{1 - \left(\frac{K_n}{K}\right)^2}{1 - \left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2} \right] \tag{3.9}$$

elde edilebilir. Bu denklem su yüzü profili diferansiyel denkleminin düzenlemiş başka bir formudur.

Bakhmeteff yöntemi kullanıldığında bazı kabuller yapılmaktadır ve bu kabuller aşağıda verilmiştir.

$$Z^2 = c_1 y^M \tag{3.10}$$

$$Z_c^2 = c_1 y_c^M \tag{3.11}$$

$$K^2 = c_2 y^N \tag{3.12}$$

$$K_n^2 = c_2 y_n^N \tag{3.13}$$

Yapılan kabuller doğrultusunda denklem (3.9) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dy}{dx} = J_0 \left[\frac{1 - \left(\frac{y_n}{y}\right)^N}{1 - \left(\frac{y_c}{y}\right)^M} \right] \tag{3.14}$$

Denklem (3.14)'ü sadeleştirmek için:

$$u = \frac{y_n}{y} \tag{3.15}$$

olarak yazılabilir. Bu durumda denklem (3.14) düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{y_n du}{dx} = J_0 \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{u}\right)^N}{1 - \left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M \left(\frac{1}{u}\right)^M} \right] \tag{3.16}$$

$$dx = \frac{y_n}{J_0}\left[\frac{1-\left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M\left(\frac{1}{u}\right)^M}{1-\left(\frac{1}{u}\right)^N}\right]du \tag{3.17}$$

Denklem (3.17)'nin integralini almak oldukça karmaşık ve zor olacağından, daha kolay integralini almak amacıyla tekrar düzenlenir ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$dx = \frac{y_n}{J_0}\left[1-\frac{1}{1-u^N}+\left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M\frac{u^{N-M}}{1-u^N}\right]du \tag{3.18}$$

Denklem (3.18)'in integrali alındığında:

$$x = \frac{y_n}{J_0}\left[u-\int\frac{du}{1-u^N}+\left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M\int\frac{u^{N-M}}{1-u^N}du\right]+c \tag{3.19}$$

elde edilebilir.

Denklem (3.19)'da bulunan aşağıdaki ifade değişken akım fonksiyonunu ifade eder.

$$\int\frac{du}{1-u^N} = F(u,N) \tag{3.20}$$

Bu durumda $\int\frac{u^{N-M}}{1-u^N}du$ integralinin formu aşağıdaki gibi denklem (3.20)'ye benzetilebilir.

$J = \frac{N}{N-M+1}$ ve $u^{N-M+1} = v$ şeklinde değişken dönüşümleri yapılsın.

Bu durumda v'nin türevi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$dv = (N-M+1)u^{N-M}du \tag{3.21}$$

Denklem (3.21) düzenlendiğinde:

$$u^{N-M}du = \frac{dv}{N-M+1} \tag{3.22}$$

elde edilebilir. Elde edilen denklem ile integral aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\int \frac{u^{N-M}}{1-u^N}du = \int \frac{dv}{(N-M+1)(1-v^j)} = \frac{J}{N}\int \frac{dv}{(1-v^j)} \tag{3.23}$$

Görüldüğü gibi denklem (3.23)'te bulunan integral denklem (3.20)'ye benzetilmiştir. Bu durumda:

$$\int \frac{dv}{(1-v^J)} = F(v,J) \tag{3.24}$$

şeklinde yazılabilir ve denklem (3.23) düzenlendiğinde aşağıdaki gibi olur.

$$\int \frac{u^{N-M}}{1-u^N}du = \frac{J}{N}F(v,J) \tag{3.25}$$

Elde edilen denklem (3.20) ile (3.25) denklem (3.19)'da yerine yazıldığında:

$$x = \frac{y_n}{J_0}\left[u - F(u,N) + \left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M \frac{J}{N}F(v,J)\right] + c \tag{3.26}$$

elde edilebilir ve denklem (3.26) iki ayrı kesit için yazılıp farkları alındığında bize Δx'i verir. Yani:

$$x_1 = \frac{y_n}{J_0}\left[u_1 - F(u_1,N) + \left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M \frac{J}{N}F(v_1,J)\right] + c \tag{3.27}$$

$$x_2 = \frac{y_n}{J_0}\left[u_2 - F(u_2,N) + \left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M \frac{J}{N}F(v_2,J)\right] + c \tag{3.28}$$

şeklinde iki ayrı kesit için yazılabilir ve aşağıdaki gibi bu iki denklemin farkı bize Δx'i verir.

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \frac{y_n}{J_0}[(u_2 - u_1) - (F(u_2,N) - F(u_1,N)) + \left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M \frac{J}{N}$$
$$(F(v_2,J) - F(v_1,J))] \tag{3.29}$$

Görüldüğü üzere Bakhmeteff yöntemiyle iki kesit arasındaki mesafe denklem (3.29) ile bulunabilir. Bu yöntem için asıl önemli olan nokta M ve N parametreleri nasıl bulunduğudur. M ve N parametreleri aşağıdaki gibi bulunabilir.

Denklem (3.10)'da verilen kesit faktörü denkleminin doğal logaritması alındığında:

$$\ln Z^2 = \ln(c_1 y^M) \tag{3.30}$$

eşitliği elde edilebilir ve bu eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$2\ln Z = \ln c_1 + \mathrm{M}\ln y \tag{3.31}$$

Buradaki M parametresi 'kritik akım hesabına ait hidrolik üs' olarak adlandırılmaktadır (Ünsal, 1978). Denklem (3.31)'in derinliğe göre türevi alındığında:

$$\frac{2Z'(y)}{Z} = \frac{M}{y} \tag{3.32}$$

olacaktır. Yukarıdaki denklemde M parametresi kesit faktörü formülü yardımıyla elde edilebilir. Bilindiği üzere kesit faktörünün formülü de denklem (3.6)'da verilmiştir. Bu denklem için de benzer işlemler yapılabilir. Denklem (3.6)'nın karesinin doğal logaritması alındığında aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$\ln Z^2 = \ln\frac{A^3}{B} \tag{3.33}$$

Denklem (3.33) düzenlendiğinde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$2\ln Z = 3\ln A - \ln B \tag{3.34}$$

Denklem (3.34)' ün derinliğe göre türevi alındığında;

$$\frac{2Z'(y)}{Z} = \frac{3A'(y)}{A} - \frac{B'(y)}{B} \tag{3.35}$$

eşitliği elde edilebilir. Bilindiği üzere $A'(y)$ ifadesi su yüzey genişliği B'ye eşit kabul edilebilmektedir. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{2Z'(y)}{Z} = \frac{3B}{A} - \frac{B'(y)}{B} \tag{3.36}$$

Denklem (3.32) ve denklem (3.36)'da görüldüğü gibi sol taraftaki iki ifade birbirine eş ifadelerdir. Böylece M parametresi aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

$$\frac{M}{y} = \frac{3B}{A} - \frac{B'(y)}{B} \tag{3.37}$$

Denklem düzenlendiğinde:

$$M = \frac{y}{A}\left(3B - \frac{A}{B}\frac{dA}{dy}\right) \tag{3.38}$$

eşitliği elde edilebilir.

N parametresi de benzer şekilde bulunabilir. Denklem (3.12)'de verilen konveyans denkleminin doğal logaritması alındığında:

$$\ln K^2 = \ln(c_2 y^N) \tag{3.39}$$

eşitliği elde edilir ve bu eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$2\ln K = \ln c_2 + \mathrm{N}\ln y \tag{3.40}$$

Buradaki N parametresi 'üniform akım hesabı için hidrolik üs' olarak adlandırılmaktadır (Ünsal, 1978). Denklem (3.40)'ın derinliğe göre türevi alındığında:

$$\frac{K'(y)}{K} = \frac{N}{2y} \tag{3.41}$$

elde edilebilir. Yukarıdaki denklemde N parametresi konveyans formülü yardımıyla bulunabilir. Konveyans formülünün karesinin doğal logaritması alınarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\ln K = \ln\frac{1}{n} + \ln A + \frac{2}{3}\ln R \tag{3.42}$$

Denklem (3.42)’nin derinliğe göre türevi alındığında:

$$\frac{K'(y)}{K} = \frac{A'(y)}{A} + \frac{2}{3}\frac{R'(y)}{R} \tag{3.43}$$

Denklem (3.41) ve denklem (3.43)’te görüldüğü gibi sol taraftaki iki ifade birbirine eş ifadelerdir. Böylece N parametresi aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

$$\frac{N}{2y} = \frac{A'(y)}{A} + \frac{2}{3}\frac{R'(y)}{R} \tag{3.44}$$

Bu denklemde $A'(y) = B$ ve $R = \frac{A}{U}$ ifadeleri yerine yazılarak denklem düzenlendiğinde:

$$N = \frac{2y}{A}\left[B + \frac{2}{3}U\frac{d(A/U)}{dy}\right] \tag{3.45}$$

olacaktır. Bu denklemde bulunan $\frac{d(A/U)}{dy}$ ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d(A/U)}{dy} = \frac{A'(y)U - U'(y)A}{U^2} = \frac{BU - U'(y)A}{U^2} \tag{3.46}$$

Denklem (3.46) denklem (3.45)’te yerine yazıldığında:

$$N = \frac{2y}{A}\left[B + \frac{2}{3}U\frac{BU - U'(y)A}{U^2}\right] \tag{3.47}$$

elde edilebilir ve denklem düzenlendiğinde N parametresinin bulunacağı denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$N = \frac{2y}{3A}\left[5B - 2R\frac{dU}{dy}\right] \tag{3.48}$$

M ve N parametreleri elde edildikten sonra Bakhmeteff yöntemi için kullanılan denklem (3.29) ile iki derinlik arasındaki mesafe kolayca hesaplanabilir. Böylece su yüzü profili kademe kademe elde edilir.

3.2 Direk Adım Yöntemi

Direk adım yöntemi, tedrici değişken akımlarda su yüzü profilini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemlerden birdir. Ayrıca hesaplama açısından son derece kolay ve pratik bir çözüm yöntemidir. Daha çok prizmatik kanallarda uygulanır. Bu yöntemde su yüzü profili kanal boyunca belli aralıklarla adım adım hesaplanır. Seçilen derinliklerdeki kesitlerin ara mesafeleri veya aynı şekilde seçilen ara mesafeler ile derinlikler belirlenir.

Denklem (1.32) verilen enerji denklemi düzenlenip integrali alınırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\int_{x_1}^{x_2} dE = \int_{x_1}^{x_2} (J_0 - J_e) dx \tag{3.49}$$

$$E_2 - E_1 = \left(J_0 - J_{e,ort}\right) \int_{x_1}^{x_2} dx \tag{3.50}$$

$$E_2 - E_1 = \left(J_0 - J_{e,ort}\right) \Delta x \tag{3.51}$$

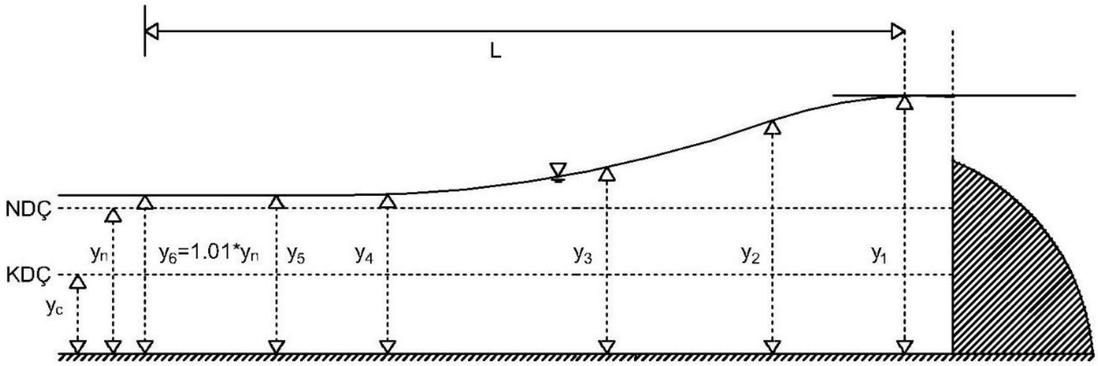
Denklem (3.51)'den Δx çekilirse eşitlik aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{J_0 - J_{e,ort}} \tag{3.52}$$

Denklem (3.52)'de $J_{e,ort}$ aşağıdaki gibi ifade edilirse;

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{J_0 - \left(\frac{J_{e,2} + J_{e,1}}{2}\right)} \tag{3.53}$$

eşitliği elde edilir.



Şekil 3.1: Direk adım yöntemi parametreleri

Yöntemin uygulanış adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Debi Q, Manning katsayısı n ve taban eğimi J_0 eğerleri bilindiğine göre y_n ve y_c değerleri elde edilir.

Adım 2: Profil tipi varsayımı yapılır.

Adım 3: y_0 değeri bilindiği $y_1, y_2, \ldots, 1.01y_n$ derinlikleri sırasıyla hesaplanır.

Adım 4: Her adımda Δx'ler hesaplanır ve hesaplanan Δx'ler ile toplam uzunluk L bulunur. ($L = \Delta x_0 + \Delta x_1 + \cdots + \Delta x_n$)

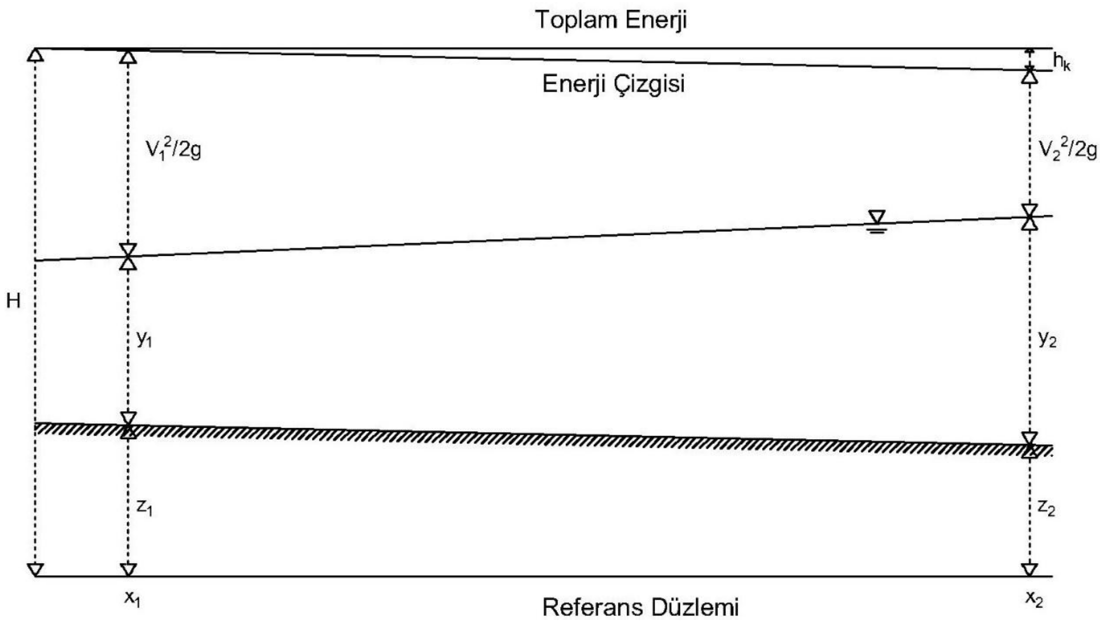
Adım 5: y_0 değeri bilindiği için E_0 ve $J_{e,0}$ değerleri de hesaplanır. y_1 değeri için bir varsayım yapılır ve Δx_0 değeri de tahmin edilir.

Adım 6: Tahmin edilen y_1 değerine göre E_1 ve $J_{e,1}$ yaklaşık olarak hesaplanır. Daha sonra denklem (3.4) ile yeni bir Δx_0 değeri hesaplanır. Hesaplanan ve tahmin edilen Δx_0 arasındaki fark belirli bir değerin altında olmalıdır.

Adım 7: Diğer derinlikler ve adım boyutları benzer şekilde hesaplanarak su yüzeyi profili hassas bir şekilde çizilebilir.

3.3 Standart Adım Yöntemi

Standart adım yöntemi ile kanalın seçilen Δx ara mesafelerinde akım derinlikleri hesaplanır.



Şekil 3.2: Yatay mesafenin hesaplanması

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi belirli bir Q debisi için x_1, mesafesinde y_1 akım derinliği bilinmekte ve x_2 mesafesinde y_2 derinliği belirlenecektir (Demirel, 2002).

y_1 bilindiğinden dolayı süreklilik denkleminden V_1 değeri hesaplanır. Başlangıç noktasındaki her değer bilindiği için toplam enerji de:

$$H_1 = y_1 + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} \tag{3.54}$$

denklemi ile hesaplanabilir.

Toplam enerjinin her yerde aynı olmasından faydalanarak ikinci kesitteki toplam enerji:

$$H_2 = H_1 - h_k \tag{3.55}$$

denklemi ile elde edilebilir. Denklem (3.55)'deki h_k yük kaybıdır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir. Yersel kayıpların ihmal edildiği varsayılmaktadır.

$$h_k = \Delta x J_{e,ort} = \Delta x \frac{J_{e,1} + J_{e,2}}{2} \tag{3.56}$$

Denklem (3.55) düzenlenirse:

$$H_2 = H_1 - \Delta x \frac{J_{e,1} + J_{e,2}}{2} \tag{3.57}$$

olacaktır.

Denklem (3.57)'deki H_2, y_2, derinliğinin bir fonksiyonudur ve aşağıdaki formda yazılarak Newton-Raphson yöntemlerinden biri kullanılarak çözülür.

$$F(y_2) = y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2} + z_2 + \Delta x \frac{J_{e,1} + J_{e,2}}{2} - y_1 - \frac{\alpha_1 Q^2}{2gA_1^2} - z_1 \tag{3.58}$$

Yöntem çözümü aşağıdaki gibi adımlanabilir (Chaudhry, 1993):

Adım 1: Bilinen y_1 değeri ile H_1 değeri hesaplanır.

Adım 2: İkinci kesitte akım derinliği tahmini bir y_2^k değeri alınır.

Adım 3: $F(y_2^k)$ değeri denklem (3.58) ile hesaplanır.

Adım 4: Newton-Raphson yöntemi kullanıldığında kökleri hesaplamak için denklem (3.58)'in birinci mertebeden türevi alınması gerektiğinden aşağıdaki şekilde türev alınır.

$$\frac{dF}{dy_2} = 1 - \frac{\alpha_2 Q^2}{gA_2^3}\frac{dA_2}{dy_2} + \frac{\Delta x}{2}\frac{d}{dy_2}\left(\frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}}\right) \tag{3.59}$$

$$\frac{d}{dy_2}\left(\frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}}\right) = -\frac{2Q^2 n^2}{A_2^3 R_2^{4/3}}\frac{dA_2}{dy_2} - \frac{4Q^2 n^2}{3A_2^2 R_2^{7/3}}\frac{dR_2}{dy_2} \tag{3.60}$$

Denklem (3.60)'ta $\frac{dA_2}{dy_2} = B_2$, $\frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}} = J_2$ yazılarak:

$$\frac{d}{dy_2}\left(\frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}}\right) = -2\left(J_2\frac{B_2}{A_2} + \frac{2J_2}{3R_2}\frac{dR_2}{dy_2}\right) \tag{3.61}$$

Denklem (3.59) düzenlenecek olursa:

$$\frac{dF}{dy_2} = 1 - \frac{\alpha_2 Q^2}{gA_2^3}\frac{dA_2}{dy_2} + \frac{\Delta x}{2} - 2\left(J_2\frac{B_2}{A_2} + \frac{2J_2}{3R_2}\frac{dR_2}{dy_2}\right) \tag{3.62}$$

elde edilir.

Adım 5: Newton-Raphson yöntemiyle aşağıdaki denklem kullanılarak y_2 değeri hesaplanır.

$$y_2^{k+1} = y_2^k - \frac{F(y_2^k)}{(dF/y_2^k)} \tag{3.63}$$

$$\varepsilon = \left|\frac{y_2^{k+1} - y_2^k}{y_2^{k+1}}\right| \leq \varepsilon_{tol} \tag{3.64}$$

Adım 6: $\varepsilon \leq \varepsilon_{tol}$ oluncaya dek iterasyon işlemleri devam ettirilir. Bu şart sağlandığında en son elde edilen değer y_2 olarak alınır. Eğer ε hata değeri belirlenenden ε_{tol} değerinden büyük ise adımlar tekrarlanır.

3.4 Euler Yöntemi

Taylor serisi açılımının ilk iki terimi alınarak yapılan yaklaşım olarak da bilinen Euler yöntemi, adım boyutunu küçük tutarak ve Taylor serisi açılımındaki terimlerin sayısını azaltarak yaklaşık ve güvenilir bir çözüm vermektedir.

$$y(x_1) = y(x_0) + \frac{h}{1!}y'(x_0) + \frac{h^2}{2!}y''(x_0) + \cdots + \frac{h^n}{n!}y^n(x_0) \quad (3.65)$$

Euler yöntemi, Taylor serisi açılımın ilk iki terimini kapsadığı için geriye kalan terimler ihmal edilir ve denklem aşağıdaki gibi olur.

$$y(x_1) \cong y(x_0) + hy'(x_0) \quad (3.66)$$

Her x noktasındaki y değeri bu şekilde ifade edilebilir ve Euler yöntemi için kullanılan denklemin genel hali aşağıdaki gibi olacaktır.

$$y_n = y_{n-1} + hf(x_{n-1}, y_{n-1}) \quad (3.67)$$

Burada bulunan $f(x_{n-1}, y_{n-1}) = \frac{dy}{dx}$ olacaktır. Yani $f(x_{n-1}, y_{n-1})$ ifadesi integral eğrinin (x_{n-1}, y_{n-1}) noktasındaki eğimini verir (Demirel, 2002).

Adım boyutu kullanılan yöntemlerde, adım boyutunu belirlemek çok önemlidir. Adım boyutunun çok küçük seçilmesi yuvarlama hatalarına yol açacağından ve fazladan işlem yükü oluşturacağından doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Aynı şekilde çok büyük seçmek de bizi çözüm değerinden uzaklaştıracaktır o yüzden adım boyutu belirlemek önemli bir konudur. Birden fazla adım boyutu için hesaplamalar yapılmalı ve bulunan çözümler karşılaştırılmalıdır. Ardışık iki adım boyutu arasındaki mutlak hata belirlenen hatadan daha az ise adım boyutu ikisinden birisi seçilebilir.

3.5 Heun Yöntemi (Düzeltilmiş Euler Yöntemi)

Euler yönteminde bir aralığın sayısal çözümünü hesaplamak için tahmini eğim gerçek eğim gibi kullanılır (Karaboğa, N., 2000). Bundan dolayı oluşan hataları gidermek amacıyla Heun yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde ise ortalama eğimler kullanılarak çözüme ulaşılır.

$$y_n = y_{n-1} + \frac{h}{2}\left(f(x_{n-1}, y_{n-1}) + f(x_n, y_n)\right) \tag{3.68}$$

Denklem (3.68)'de görüldüğü gibi $f(x_n, y_n)$ bilinmemektedir. Bu ifade Euler yöntemi kullanılarak tahmin edilir.

$$y_n^* = y_{n-1} + hf(x_{n-1}, y_{n-1}) \tag{3.69}$$

Denklem (3.69) ile bir y_n^* değeri tahmin edilir. Tahmin edilen y_n^* değeri ile $f(x_n, y_n^*)$ değeri elde edilir. Tahmin edilen değerler aşağıdaki denklem ile düzeltilerek çözüm daha hassas bir şekilde elde edilir.

$$y_n = y_{n-1} + \frac{h}{2}\left(f(x_{n-1}, y_{n-1}) + f(x_n, y_n^*)\right) \tag{3.70}$$

3.6 Dördüncü Mertebeden Runge-Kutta Yöntemi

İki Alman matematikçi Carl Runge ve Wilhelm Kutta'nın geliştirdiği bu yöntemde bulunan değerler birden fazla adımda kullanılarak elde edilen sonuçlar iyileştirilmektedir. Bu yöntemde formülasyonunda bazı fonksiyonların Taylor seri açılımı kullanılmaktadır ve Taylor serisinde kullanılan en büyük türevin derecesine göre adlandırılmaktadır (Karaboğa, N., 2000). Eğim dört noktada hesaplandığı için yöntem dördüncü mertebeden Runge-Kutta yöntemi (RK4) olarak adlandırılır ve birinci dereceden diferansiyel denklemin sayısal çözümünde yapılan hata diğer yöntemlere nazaran daha az olmaktadır.

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \tag{3.71}$$

Denklem (3.71) gibi birinci dereceden diferansiyel denklemin bir başlangıç koşulu altında Runge-Kutta yöntemi için kullanılan genel denklem aşağıdaki gibi olacaktır.

$$y_n = y_{n-1} + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{3.72}$$

Denklem (3.72)'de bulunan terimler k_1, k_2, k_3, k_4 eğimdir ve y_n değeri hesaplanmasında ağırlıklı ortalamaları kullanılır.

$$k_1 = f(x_{n-1}, y_{n-1}) \tag{3.73}$$

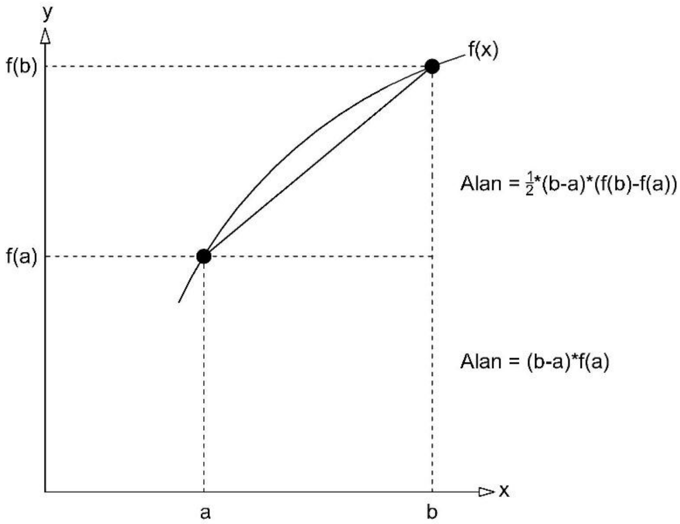
$$k_2 = f\left(x_{n-1} + \frac{h}{2}, y_{n-1} + \frac{k_1}{2}\right) \tag{3.74}$$

$$k_3 = f\left(x_{n-1} + \frac{h}{2}, y_{n-1} + \frac{k_2}{2}\right) \tag{3.75}$$

$$k_4 = f(x_{n-1} + h, y_{n-1} + k_3) \tag{3.76}$$

3.7 Trapez İntegral Yöntemi

İntegral, belirli iki sınır arasında bir eğrinin altında kalan alan olarak bilinmektedir. Sayısal integral yöntemleri de genellikle bu tanımı baz alarak çözüme ulaşmayı sağlar.



Şekil 3.3: Trapez yönteminin detaylı gösterimi

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi iki nokta arasındaki integralin sonucu üçgen ve dikdörtgen alanlarının toplamı olarak bulunabilmektedir. Yani Şekil 3.3'tee a ve b noktaları arasındaki $f(x)$ fonksiyonunun integrali aşağıdaki gibi ifade edilir.

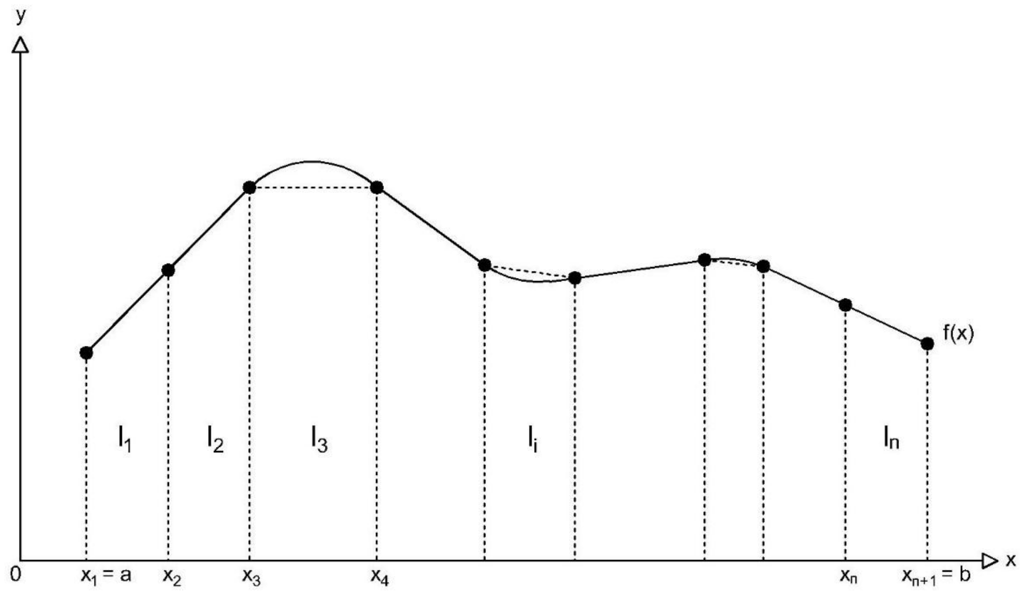
$$I = f(a)(b-a) + \frac{1}{2}[f(b) - f(a)](b-a) \tag{3.92}$$

Aşağıdaki denklem $f(x)$ fonksiyonunun yaklaşık olarak integralini vermektedir. Bu yaklaşık çözümün daha doğru hesaplanması için fonksiyonun sınırları arasındaki alan daha fazla parçaya ayrılarak daha küçük alt aralıklara bölünür. Bu durumda bulunan alanların toplamı toplam integrali verir.

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi n alt aralığa bölündüğünde $x_1 = a$ ve $x_{n+1} = b$ arasındaki alanların toplamı $f(x)$ fonksiyonunun integralini verecektir ve genel denklem aşağıdaki gibi olacaktır.

$$I = \int_a^b f(x)dx = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n \tag{3.93}$$

$$I = \int_a^b f(x)dx = \int_{x_1 = a}^{x_2} f(x)dx + \cdots + \int_{x_n}^{x_{n+1} = b} f(x)dx = \sum_{i=1}^{n} \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)dx \tag{3.94}$$



Şekil 3.4: Trapez yöntemiyle $f(x)$ fonksiyonunun integralinin belirlenmesi

$[x_1, x_2]$ aralığındaki I_1 aşağıdaki denklem ile elde edilmektedir.

$$I_1 = \int_{x_1 = a}^{x_2} f(x)dx \approx \frac{[f(x_1) + f(x_2)]}{2}(x_2 - x_1) \tag{3.95}$$

Diğer alanları da benzer şekilde hesaplamak mümkündür ve toplam alanın genel denklemi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$I = \int_{x_1=a}^{x_{n+1}=b} f(x)dx \approx \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}[f(x_i) + f(x_{i+1})]\,(x_{i+1} - x_i) \tag{3.96}$$

Denklem (3.96)'da bulunan $(x_{i+1} - x_i)$ ifadesi adım büyüklüğü olarak kabul edilirse n aralık için ifade aşağıdaki gibi olacaktır.

$$h = (x_{i+1} - x_i) = \frac{b-a}{n} \tag{3.97}$$

Böylece trapez yöntemi ile integral almak için kullanılan denklemin genel hali aşağıdaki gibi olacaktır.

$$I \approx \frac{h}{2}\left[f(a) + f(b) + 2\sum_{i=2}^{n-1} f(x_i)\right] \tag{3.98}$$

3.8 Gauss Kareleme Yöntemi

Bu yöntemde en önemli unsur $f(x)$ fonksiyonunun integrali [-1,1] aralığı üzerinde alınmasıdır. Fonksiyonun noktalarının sabitlenmesi ve eşit aralıklarla alınmadan hesaplama yapılırsa hesap duyarlığının artacağı düşünülmüş ve bu yöntem ilk olarak Carl Fredrich Gauss tarafından ortaya atılmıştır. Gauss kareleme formülleri gereken duyarlılığı sağlamak amacıyla ortagonal polinomların özelliklerini kullanır. Sınırları [-1,1] aralığında olan belirli integral:

$$I = \int_{-1}^{1} f(x)dx \approx \sum_{i=1}^{n} c_i f(x_i) \tag{3.77}$$

ifadesi ile yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bu ifade de x_i fonksiyonun hesaplandığı noktaları, c_i ise ağırlık fonksiyonlarını belirtir.

Eğer belirtilen integral [a,b] aralığında bir integral ise:

$$\int_{a}^{b} f(x)dx \tag{3.78}$$

[-1,1] aralığına aşağıdaki gibi dönüştürülür.

$$\int_{a}^{b} f(x)dx = \int_{-1}^{1} f\left(\frac{(b-a)t+b+a}{2}\right)\frac{b-a}{2}dv \tag{3.79}$$

İntegral değeri hesaplanırken denklem (3.77)'de görüldüğü üzere toplamın sınırları nokta sayısı n'ye bağlı olarak değişmektedir. Örneğin $n = 2$ durumu için aşağıdaki gibi x_i ve c_i değerleri hesaplanabilmektedir ve denklem (3.77) aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\int_{-1}^{1} f(x)dx \approx \sum_{i=1}^{n=2} c_i f(x_i) = c_1 f(x_1) + c_2 f(x_2) \tag{3.80}$$

Bu ifadede c_1, c_2, x_1 ve x_2 değerleri bilinmemektedir. Bilinmeyen değerlerin hesaplanması için $f(x) = 1$, $f(x) = x$, $f(x) = x^2$ ve $f(x) = x^3$ fonksiyonları kullanılarak hesaplanabilir (Karaboğa, N., 2000).

$f(x) = 1$ durumunda:

$$\int_{-1}^{1} f(x)dx = \int_{-1}^{1} 1dx = [1-(-1)] = 2 = c_1 + c_2 \tag{3.81}$$

$$c_1 + c_2 = 2 \tag{3.82}$$

$f(x) = x$ durumunda:

$$\int_{-1}^{1} f(x)dx = \int_{-1}^{1} xdx = \frac{1}{2}[1-(-1)^2] = 0 = c_1x_1 + c_2x_2 \tag{3.83}$$

$$c_1x_1 + c_2x_2 = 0 \tag{3.84}$$

$f(x) = x^2$ durumunda:

$$\int_{-1}^{1} f(x)dx = \int_{-1}^{1} x^2dx = \frac{1}{3}[1-(-1)^3] = \frac{2}{3} = c_1x_1^2 + c_2x_2^2 \tag{3.85}$$

$$c_1x_1^2 + c_2x_2^2 = \frac{2}{3} \tag{3.86}$$

$f(x) = x^3$ durumunda:

$$\int_{-1}^{1} f(x)dx = \int_{-1}^{1} x^3dx = \frac{1}{4}[1-(-1)^4] = 0 = c_1x_1^3 + c_2x_2^3 \tag{3.87}$$

$$c_1x_1^3 + c_2x_2^3 = 0 \tag{3.88}$$

Denklem (3.82), (3.84), (3.86) ve (3.98) birlikte çözülerek x_i ve c_i değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$c_1 = c_2 = 1 \tag{3.89}$$

$$x_1 = -\frac{1}{\sqrt{3}}, \qquad x_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \tag{3.90}$$

Bu durumda integralin değeri aşağıdaki gibi bulunabilecektir.

$$\int_{-1}^{1} f(x)dx \approx c_1 f(x_1) + c_2 f(x_2) \approx f\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right) + f\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \tag{3.91}$$

n'nin daha yüksek değerleri için eşitlik düzenlenip, elde edilen doğrusal olmayan sistemden x_i ve c_i değerleri belirtilerek yöntemin genel formu elde edilebilir (Karaboğa, N., 2000). $n = 1, 2, 3, 4$ ve 5 için x_i ve c_i değerleri tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1: Gauss kareleme yönteminin [-1,1] aralığındaki değerleri

n	c_i	x_i
1	2.0000000	0.000000000
2	1.0000000	-0.577335027
	1.0000000	0.577335027
3	0.5555556	-0.774596670
	0.8888889	0.000000000
	0.5555556	0.774596670
4	0.3478548	-0.861136310
	0.6521452	-0.339981040
	0.6521452	0.339981040
	0.3478548	0.861136310
5	0.2369269	-0.906179850
	0.4786287	-0.538469310
	0.5688889	0.000000000
	0.4786287	0.538469310
	0.2369269	0.906179850

Yukarıda bahsedilen yöntemler MATLAB ile kodlanacak ve her örnek için elde edilen sonuçlar tablolar halinde verilecektir. Bu yöntemlerin yanı sıra gerçeğinden çok daha fazla nokta alınarak referans bir çözüm oluşturulup, bu çözüm sayesinde hangi yöntemin doğruya daha yakın sonuç verdiği gözlemlenebilecektir. Referans çözüm ile yapılan karşılaştırmada toplam mutlak hata formülü kullanılmıştır. Toplam mutlak hata formülü aşağıda sunulmaktadır.

$$\varepsilon_{tm} = \sum_{i=1}^{n} |y_i - y_i^*| \tag{3.92}$$

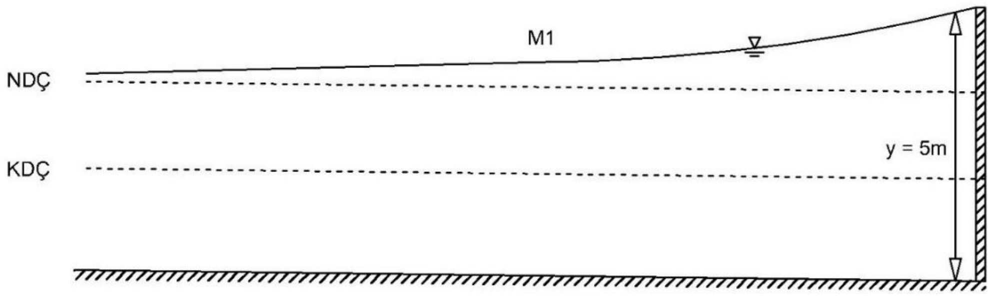
denklemi ile elde edilir. Denklem (3.92)'de bulunan y_i referans çözüm değerini, y_i^* sayısal çözüm değerini ifade etmektedir. Yöntemlerin karşılaştırılması için toplam mutlak hata baz alınarak toplam mutlak hata değeri en az olan yöntemin doğruya en yakın yöntem olduğu söylenebilecektir.

Aynı zamanda HEC-RAS programı ile de çözüm elde edilecektir. HEC-RAS programı yardımıyla bilinen derinlik değerleri için Δx ara mesafeleri bulunacaktır. HEC-RAS programı çözüm yaparken standart adım yöntemi kullandığı için standart adım yöntemiyle elde edilen Δx değerleri HEC-RAS programı içerisinde kullanılarak derinliklere karşılık gelen mesafeler elde edilecektir.

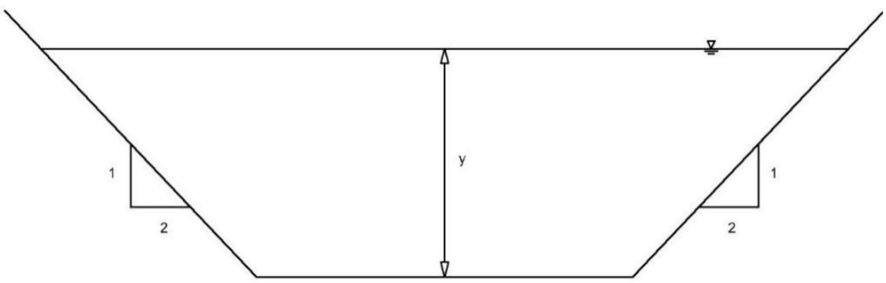
4. SAYISAL UYGULAMALAR

4.1 Uygulama 1

30 m^3/s debinin geçtiği trapez kesitli bir kanalda, taban eğimi 0.001, taban genişliği 10.0 metre ve şev eğimi $1/2$'dir. Kontrol yapısında su derinliğinin 5.0 metre olduğu bilinmektedir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.013$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.1: Uygulama 1 için kanal boy kesiti



Şekil 4.2: Uygulama 1 için kanal en kesiti

Bu uygulama için farklı yöntemlerin sonuçları ve M. H. Chaudhry'nin (Chaudhry, 1993) çözümü tablo 4.1'de, HEC-RAS programı çözümleri tablo 4.4'te sunulmuştur. Yapılan çözümler ile kritik derinlik y_c = 0.91 metre, normal derinlik y_n = 1.09 metre bulunmuştur. Akım sel rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili M1 olarak belirlenmiştir. Kullanılan yöntemlerden elde edilen sonuçlar birbiriyle benzer olmakla birlikte M. H. Chaudhry'nin çözümüne yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Uygulama 1 için direk adım ve standart adım yöntemi aynı sonucu vermekte ve M. H. Chaudhry'nin çözümü ile kıyaslandığında en yakın çözümü bu iki yöntem vermektedir.

Tablo 4.1: Uygulama 1 için kullanılan yöntemlerin ve M.H.Chaudhry çözümünün karşılaştırılması

y (m)	x (m)								
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**M.H. Chaudhry Çözümü**	**Referans Çözüm**
5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	-500.45	-500.45	-500.31	-500.43	-500.41	-500.41	-500.41	-500.50	-500.41
4.00	-1001.25	-1001.25	-1000.85	-1001.17	-1001.14	-1001.14	-1001.14	-1001.30	-1001.14
3.66	-1342.10	-1342.10	-1341.50	-1341.99	-1341.94	-1341.94	-1341.94	-1342.10	-1341.94
3.33	-1673.37	-1673.37	-1672.46	-1673.22	-1673.15	-1673.15	-1673.15	-1673.40	-1673.15
3.00	-2005.39	-2005.39	-2003.95	-2005.17	-2005.05	-2005.05	-2005.05	-2005.40	-2005.05
2.75	-2257.70	-2257.70	-2255.78	-2257.43	-2257.28	-2257.28	-2257.28	-2257.70	-2257.28
2.50	-2511.20	-2511.20	-2508.47	-2510.84	-2510.63	-2510.63	-2510.63	-2511.20	-2510.63
2.25	-2766.72	-2766.72	-2762.61	-2766.22	-2765.89	-2765.89	-2765.89	-2766.70	-2765.89
2.00	-3025.93	-3025.93	-3019.24	-3025.19	-3024.60	-3024.60	-3024.60	-3025.90	-3024.60
1.80	-3238.05	-3238.05	-3228.28	-3237.11	-3236.22	-3236.21	-3236.22	-3238.00	-3236.22
1.60	-3458.98	-3458.98	-3443.08	-3457.83	-3456.16	-3456.15	-3456.15	-3459.00	-3456.15
1.40	-3700.39	-3700.39	-3669.71	-3699.81	-3695.37	-3695.30	-3695.33	-3700.40	-3695.33
1.30	-3838.22	-3838.22	-3798.38	-3838.50	-3832.70	-3832.61	-3832.65	-3838.20	-3832.65
1.20	-4010.17	-4010.17	-3947.08	-4016.74	-4004.60	-4004.30	-4004.42	-4010.20	-4004.42

Tablo 4.2: Uygulama 1 için Referans çözümü ile diğer çözümler arasındaki mutlak hata

$y\ (m)$	$x\ (m)$							
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**	**M.H. Chaudhry Çözümü Mutlak Hata**
5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.04	0.04	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09
4.00	0.11	0.11	0.29	0.03	0.00	0.00	0.00	0.16
3.66	0.16	0.16	0.44	0.05	0.00	0.00	0.00	0.16
3.33	0.22	0.22	0.69	0.07	0.00	0.00	0.00	0.25
3.00	0.34	0.34	1.10	0.11	0.00	0.00	0.00	0.35
2.75	0.42	0.42	1.50	0.15	0.00	0.00	0.00	0.42
2.50	0.57	0.57	2.16	0.21	0.00	0.00	0.00	0.57
2.25	0.83	0.83	3.29	0.33	0.00	0.00	0.00	0.81
2.00	1.33	1.33	5.36	0.59	0.00	0.00	0.00	1.30
1.80	1.83	1.83	7.94	0.90	0.00	0.00	0.00	1.78
1.60	2.83	2.83	13.07	1.67	0.01	0.00	0.00	2.85
1.40	5.06	5.06	25.62	4.48	0.04	0.03	0.00	5.07
1.30	5.58	5.58	34.27	5.85	0.05	0.03	0.00	5.55
1.20	5.75	5.75	57.33	12.32	0.18	0.12	0.00	5.78
ε_{tm}	**25.07**	**25.07**	**153.16**	**26.77**	**0.29**	**0.19**	**0.00**	**25.14**

Uygulama 1 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri bir santimetre artacak şekilde 381 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.1'de ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında trapez integral yönteminin referans çözüm ile bire bir aynı çözümü verdiği görülmektedir. Dördüncü mertebeden Runge-Kutta yöntemi, Gauss kareleme yöntemi ve trapez integral yöntemlerinin mertebeleri daha yüksek olduğu için daha iyi çözüm elde edilmesi beklenen bir durumdur ve tablo 4.2'de de görüldüğü gibi bu yöntemler için çok az toplam mutlak hata değeri elde edilmektedir. En iyi çözümü trapez integral yöntemi, en kötü çözümü ise Euler yönteminin verdiği söylenebilir.

Tablo 4.3: Uygulama 1 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçlar

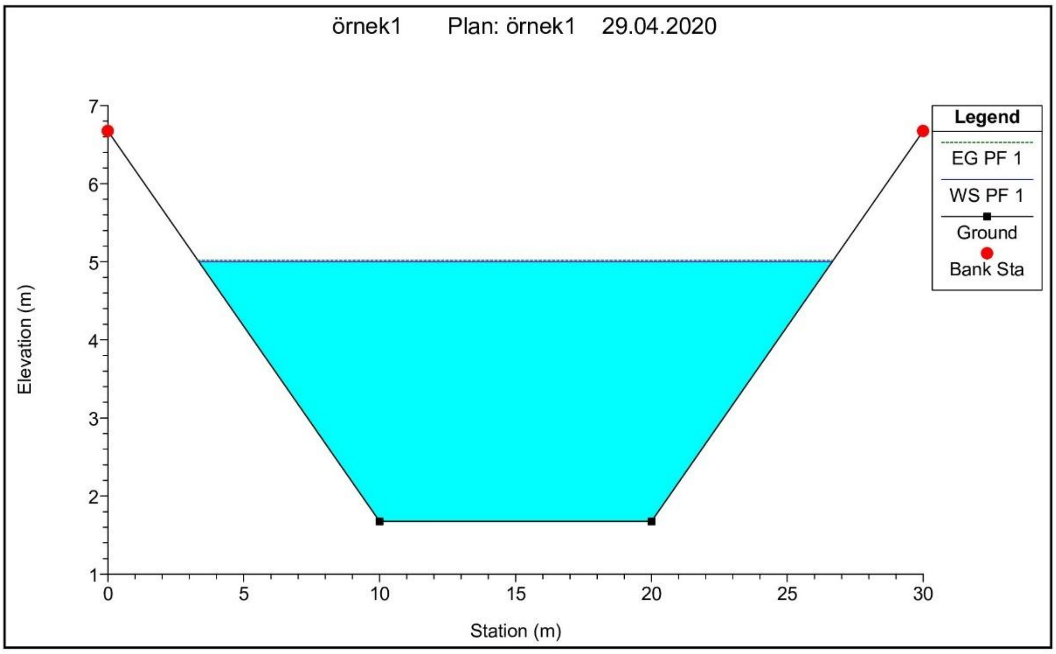
HEC-RAS Plan: örnek1 Reach: 1 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min.Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
14	PF1	30	4.01	5.20		5.41	0.000731	2.03	14.78	14.77	0.65
13	PF1	30	3.84	5.13		5.30	0.000551	1.84	16.27	15.17	0.57
12	PF1	30	3.70	5.09		5.24	0.000424	1.68	17.81	15.57	0.50
11	PF1	30	3.46	5.05		5.16	0.000261	1.43	21.05	16.38	0.40
10	PF1	30	3.24	5.03		5.11	0.00017	1.23	24.43	17.19	0.33
9	PF1	30	3.03	5.02		5.08	0.000116	1.07	27.96	17.99	0.27
8	PF1	30	2.77	5.02		5.06	0.000075	0.92	32.60	18.99	0.22
7	PF1	30	2.51	5.01		5.04	0.000051	0.80	37.48	20.00	0.19
6	PF1	30	2.26	5.01		5.03	0.000035	0.70	42.61	21.00	0.16
5	PF1	30	2.01	5.00		5.02	0.000025	0.63	47.99	22.00	0.14
4	PF1	30	1.67	5.00		5.02	0.000017	0.54	55.47	23.32	0.11
3	PF1	30	1.34	5.00		5.01	0.000012	0.47	63.38	24.64	0.09
2	PF1	30	1.00	5.00		5.01	0.000008	0.42	71.99	26.00	0.08
1	PF1	30	0.50	5.00		5.01	0.000005	0.35	85.50	28.00	0.06
0	PF1	30	0.00	5.00	0.91	5.00	0.000003	0.30	100.00	30.00	0.05

Tablo 4.4: Uygulama 1 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

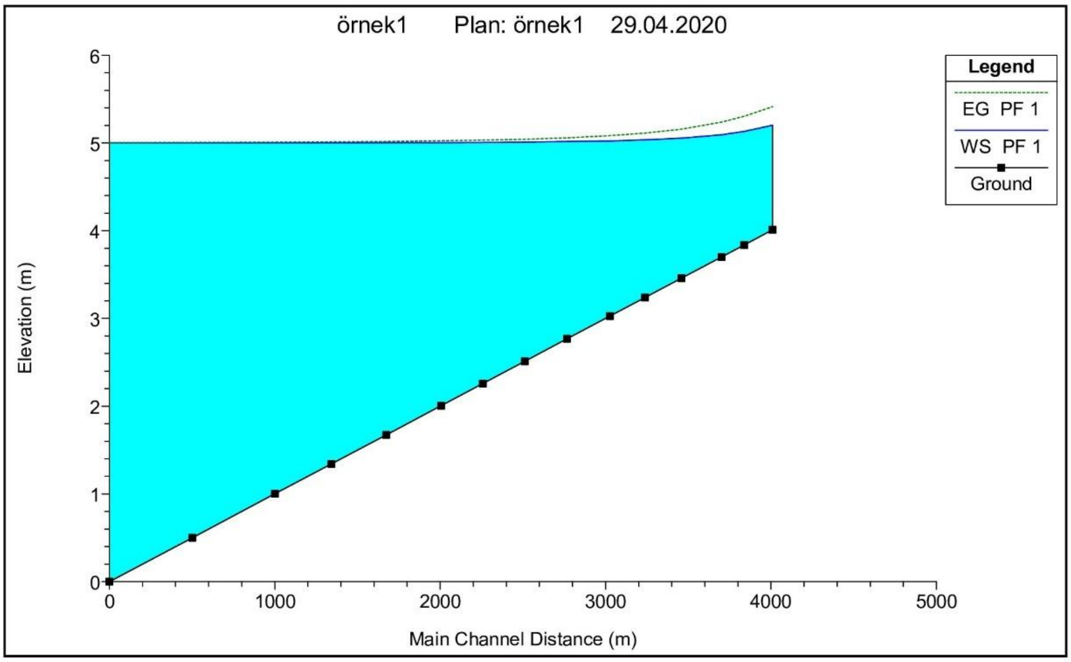
Δx	x	y
0.00	0.00	5.00
-500.45	-500.45	4.50
-500.80	-1001.25	4.00
-340.85	-1342.10	3.66
-331.27	-1673.37	3.33
-332.02	-2005.39	3.00
-252.31	-2257.70	2.75
-253.50	-2511.20	2.50
-255.52	-2766.72	2.25
-259.21	-3025.93	2.00
-212.12	-3238.05	1.80
-220.93	-3458.98	1.60
-241.41	-3700.39	1.39
-137.83	-3838.22	1.29
-171.94	-4010.16	1.19

HEC-RAS programında bilinen mesafelerdeki derinlikler belirlenebilmektedir. Diğer bir deyişle, y_0 ve Δx_0 kullanılarak y_1 derinliği, y_1 derinliği ve Δx_1 kullanılarak y_2 derinliği, y_{n-1} ve Δx_{n-1} kullanılarak y_n derinliği bulunabilmektedir. HEC-RAS yazılımı çözüm yaparken standart adım yöntemini kullanmaktadır. Bu nedenle HEC-RAS programında çözüm yaparken kullanılan mesafeler, standart adım yöntemiyle elde edilen mesafelerdir. Tablo 4.3'te HEC-RAS programı ile elde edilen mesafelere göre derinlikler verilmiştir. Kullanılan yöntemler ile karşılaştırıldığında çok küçük farklılıkların olduğu görülmektedir.

Şekil 4.3'te herhangi bir noktadaki kanal en kesit görünümü verilmiştir. Şekil 4.4'te su yüzü profilinin görünüşü verilmektedir.



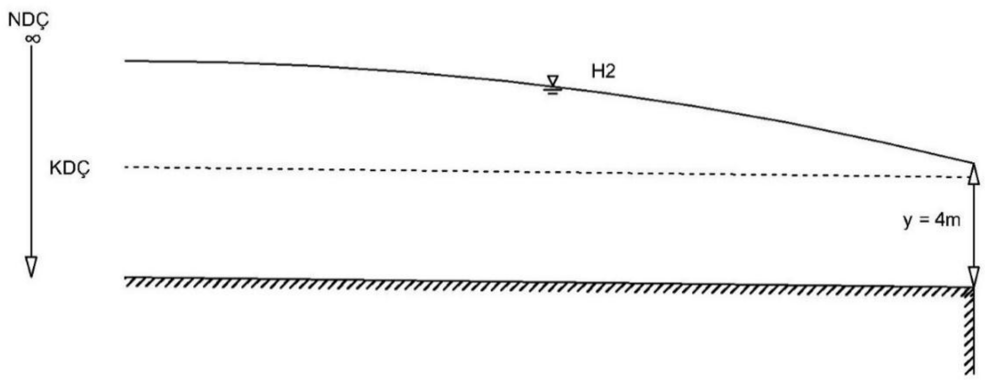
Şekil 4.3: Uygulama 1 için HEC-RAS programından alınan en kesit



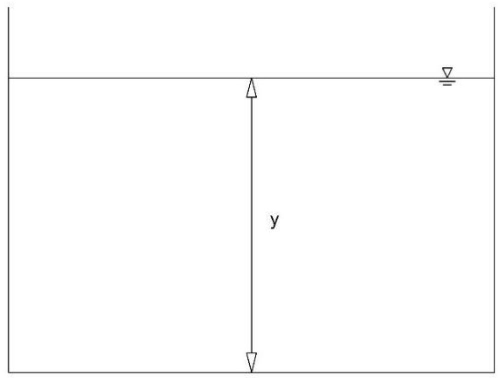
Şekil 4.4: Uygulama 1 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

4.2 Uygulama 2

10 metre genişliğinde dikdörtgen kesitli, yatay eğimli bir kanalda 200 m^3/s debi iletilmektedir. Kanal sonunda, serbest düşü yapmadan hemen önce su derinliği 4.0 metredir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.025$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.5: Uygulama 2 için kanal boy kesiti



Şekil 4.6: Uygulama 2 için kanal en kesiti

Bu uygulama için farklı yöntemlerin sonuçları tablo 4.5'te ve HEC-RAS program çözümleri tablo 4.8'de sunulmuştur. Yapılan çözümler ile kritik derinlik y_c = 3.44 metre bulunmuştur. Akım sel rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili H2 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar kendi aralarında karşılaştırıldığında Euler yöntemi dışında kullanılan yöntemlerin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Euler yönteminin düzenlenmiş hali olan Heun yönteminde yapılan düzeltmelerle sonuç iyileştirilmiştir.

Tablo 4.5: Uygulama 2 için kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

y (m)	***x (m)***							
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**Referans Çözüm**
4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.13	-9.97	-9.97	-8.82	-10.01	-10.00	-10.00	-10.00	-9.91
4.24	-20.02	-20.02	-18.05	-20.08	-20.07	-20.07	-20.07	-20.17
4.33	-30.06	-30.06	-27.45	-30.13	-30.11	-30.11	-30.11	-29.88
4.41	-39.99	-39.99	-36.88	-40.07	-40.05	-40.05	-40.05	-39.54
4.49	-50.00	-50.00	-46.45	-50.09	-50.07	-50.07	-50.07	-50.21
4.56	-60.01	-60.01	-59.08	-60.11	-60.08	-60.08	-60.08	-60.38
4.62	-69.99	-69.99	-56.73	-70.09	-70.07	-70.07	-70.07	-69.74
4.68	-79.97	-79.97	-75.41	-80.08	-80.05	-80.05	-80.05	-79.71
4.74	-90.03	-90.03	-85.18	-90.13	-90.11	-90.11	-90.11	-90.29
4.79	-100.07	-100.07	-94.98	-100.18	-100.15	-100.16	-100.16	-99.58
4.84	-110.03	-110.03	-104.71	-110.15	-110.12	-110.12	-110.12	-109.32
4.89	-120.04	-120.04	-114.50	-120.16	-120.13	-120.13	-120.13	-119.50
4.94	-130.06	-130.06	-124.32	-130.18	-130.15	-130.15	-130.15	-130.15
4.99	-140.03	-140.03	-134.10	-140.15	-140.12	-140.12	-140.12	-141.25
5.03	-149.91	-149.91	-143.81	-150.03	-150.00	-150.01	-150.00	-150.47
5.07	-159.90	-159.90	-153.63	-160.03	-159.99	-160.00	-159.99	-159.99
5.11	-169.98	-169.98	-163.55	-170.11	-170.08	-170.08	-170.08	-169.83
5.15	-179.88	-179.88	-173.30	-180.00	-179.97	-179.97	-179.97	-179.97
5.19	-190.07	-190.07	-183.34	-190.19	-190.16	-190.17	-190.16	-190.43
5.23	-200.02	-200.02	-193.15	-200.14	-200.11	-200.12	-200.11	-201.20

Tablo 4.6: Uygulama 2 için Referans çözümü ile diğer çözümler arasındaki mutlak hata

y (m)	***x (m)***						
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**
4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.13	0.06	0.06	1.09	0.10	0.09	0.09	0.09
4.24	0.14	0.14	2.11	0.09	0.10	0.10	0.10
4.33	0.18	0.18	2.43	0.25	0.23	0.23	0.23
4.41	0.45	0.45	2.66	0.53	0.51	0.51	0.51
4.49	0.21	0.21	3.76	0.12	0.14	0.14	0.14
4.56	0.37	0.37	1.30	0.28	0.30	0.30	0.30
4.62	0.25	0.25	13.02	0.35	0.32	0.32	0.32
4.68	0.27	0.27	4.30	0.37	0.34	0.35	0.34
4.74	0.26	0.26	5.11	0.15	0.18	0.18	0.18
4.79	0.49	0.49	4.61	0.60	0.57	0.57	0.57
4.84	0.71	0.71	4.61	0.83	0.80	0.80	0.80
4.89	0.54	0.54	5.00	0.65	0.63	0.63	0.63
4.94	0.09	0.09	5.83	0.03	0.00	0.00	0.00
4.99	1.22	1.22	7.15	1.10	1.13	1.13	1.13
5.03	0.56	0.56	6.66	0.44	0.47	0.46	0.47
5.07	0.09	0.09	6.36	0.03	0.00	0.00	0.00
5.11	0.16	0.16	6.27	0.28	0.25	0.25	0.25
5.15	0.09	0.09	6.67	0.03	0.00	0.00	0.00
5.19	0.36	0.36	7.09	0.23	0.27	0.26	0.27
5.23	1.19	1.19	8.05	1.06	1.09	1.09	1.09
ε_{tm}	**7.68**	**7.68**	**104.09**	**7.51**	**7.42**	**7.43**	**7.42**

Uygulama 2 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri bir santimetre artacak şekilde 124 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.5'te ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında Euler yöntemi dışındaki yöntemlerin referans çözüm ile arasındaki farkın yaklaşık olarak benzer olduğu gözlemlenmektedir. En yakın çözümü ise dördüncü mertebeden Runge-Kutta yöntemi ve trapez integral yönteminin verdiği söylenebilir.

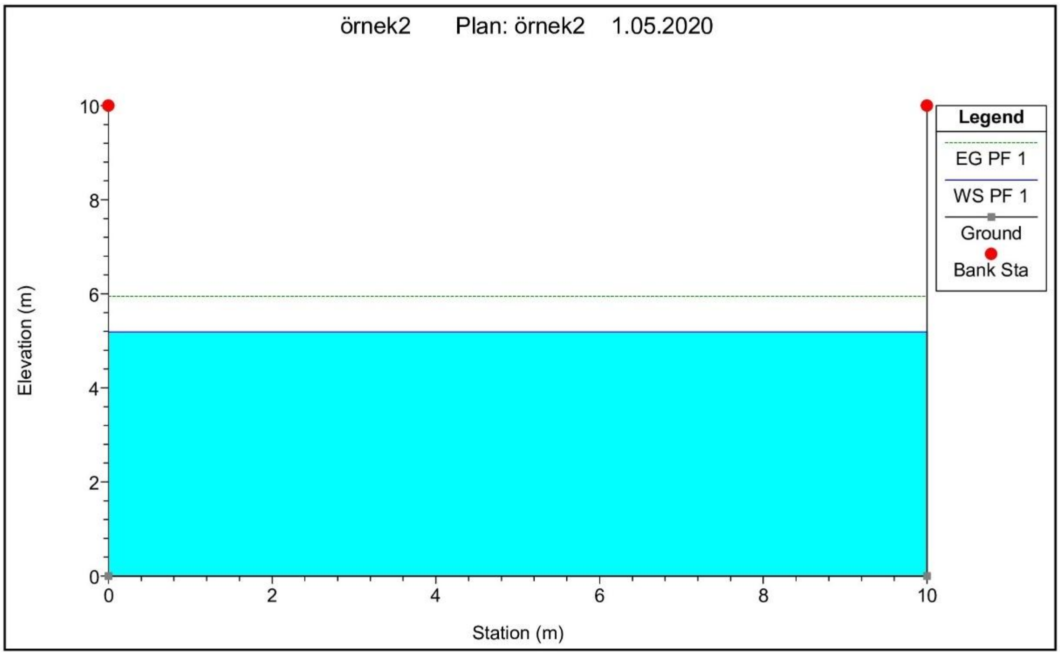
Tablo 4.7: Uygulama 2 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçlar

HEC-RAS Plan: örnek2 Reach: 2 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min. Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
200	PF1	200	0	5.23		5.97	0.00262	3.83	52.26	10	0.53
190	PF1	200	0	5.19		5.95	0.00267	3.85	51.89	10	0.54
180	PF1	200	0	5.15		5.92	0.00272	3.88	51.51	10	0.55
170	PF1	200	0	5.11		5.89	0.00278	3.91	51.11	10	0.55
160	PF1	200	0	5.07		5.86	0.00284	3.94	50.71	10	0.56
150	PF1	200	0	5.03		5.84	0.0029	3.98	50.29	10	0.57
140	PF1	200	0	4.99		5.81	0.00297	4.01	49.85	10	0.57
130	PF1	200	0	4.94		5.78	0.00304	4.05	49.40	10	0.58
120	PF1	200	0	4.89		5.75	0.00312	4.09	48.93	10	0.59
110	PF1	200	0	4.84		5.71	0.00321	4.13	48.44	10	0.60
100	PF1	200	0	4.79		5.68	0.0033	4.17	47.93	10	0.61
90	PF1	200	0	4.74		5.65	0.0034	4.22	47.39	10	0.62
80	PF1	200	0	4.68		5.61	0.00351	4.27	46.83	10	0.63
70	PF1	200	0	4.62		5.58	0.00364	4.33	46.22	10	0.64
60	PF1	200	0	4.56		5.54	0.00378	4.39	45.58	10	0.66
50	PF2	200	0	4.49		5.50	0.00394	4.46	44.89	10	0.67
40	PF3	200	0	4.41		5.46	0.00412	4.53	44.14	10	0.69
30	PF4	200	0	4.33		5.42	0.00434	4.62	43.32	10	0.71
20	PF5	200	0	4.24		5.37	0.0046	4.72	42.39	10	0.73
10	PF6	200	0	4.13		5.33	0.00493	4.84	41.31	10	0.76
0	PF7	200	0	4.00	3.44	5.27	0.00539	5.00	40.00	10	0.80

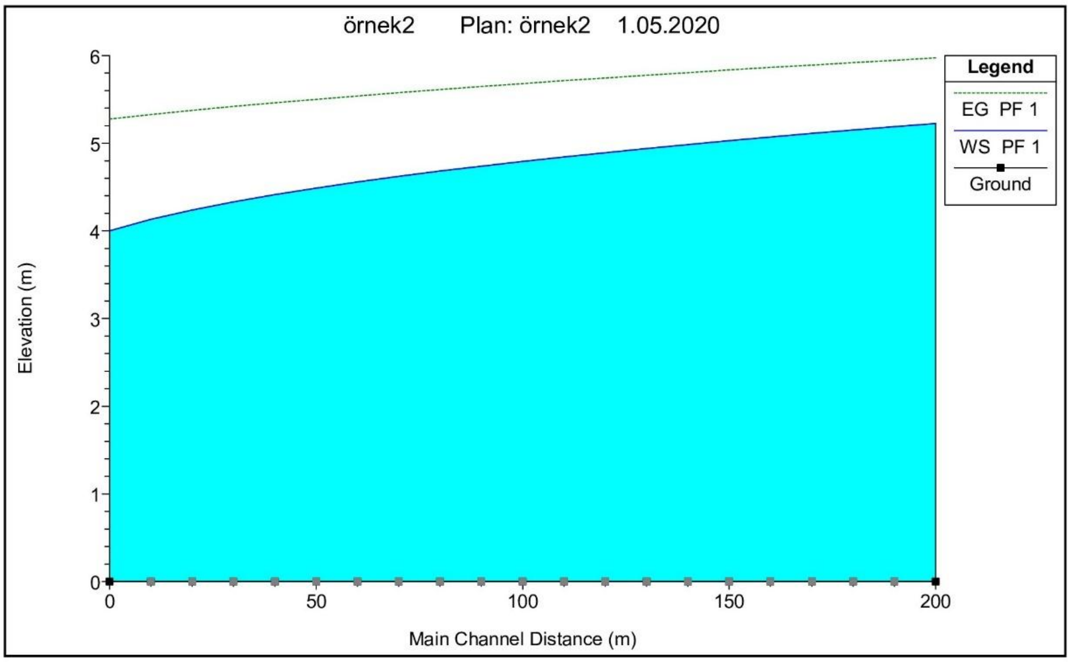
Kanal taban eğimi sıfıra eşit olduğu için tablo 4.7’de bulunan 4. sütunda sıfır değerleri görülmektedir bu sayede 5. sütunda yer alan W.S.Elev bölümü bize doğrudan derinlikleri vermektedir. Tablo 4.8’de mesafelere göre derinlikler verilmiştir. Kullanılan yöntemler ile karşılaştırıldığında aynı sonuçları verdiği görülmektedir.

Tablo 4.8: Uygulama 2 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

Δx	x	y
0.00	0.00	4.00
-10.00	-10.00	4.13
-10.00	-20.00	4.24
-10.00	-30.00	4.33
-10.00	-40.00	4.41
-10.00	-50.00	4.49
-10.00	-60.00	4.56
-10.00	-70.00	4.62
-10.00	-80.00	4.68
-10.00	-90.00	4.74
-10.00	-100.00	4.79
-10.00	-110.00	4.84
-10.00	-120.00	4.89
-10.00	-130.00	4.94
-10.00	-140.00	4.99
-10.00	-150.00	5.03
-10.00	-160.00	5.07
-10.00	-170.00	5.11
-10.00	-180.00	5.15
-10.00	-190.00	5.19
-10.00	-200.00	5.23



Şekil 4.7: Uygulama 2 için HEC-RAS programından alınan en kesit

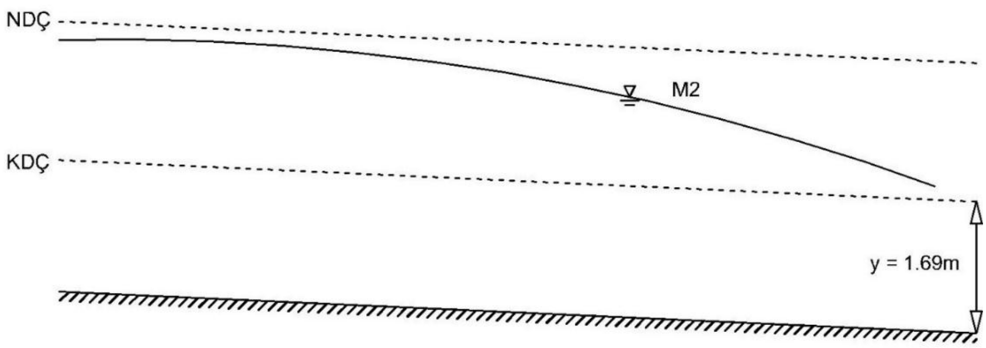


Şekil 4.8: Uygulama 2 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

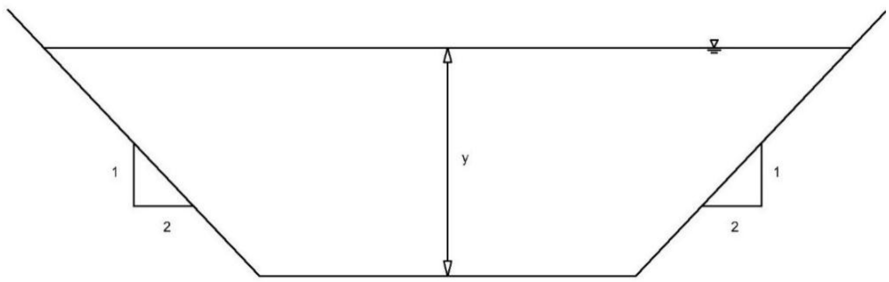
Şekil 4.7’de herhangi bir noktadaki kanal en kesit görünümü verilmiştir. Şekil 4.8’de su yüzü profilinin görünüşü verilmektedir. Su yüzü profili üzerinde görülen yeşil kesikli çizgi ile tanımlanan EG PF 1 çizgisi enerji çizgisini, düz mavi çizgi ile tanımlanan WS PF 1 çizgisi su yüzeyini, noktalı siyah çizgi ile tanımlanan Ground çizgisi de kanal tabanını belirtmektedir. Kanal tabanı yatay olduğu için grafikte kanal tabanı çizgisi düz olarak görülmektedir.

4.3 Uygulama 3

48.70 m^3/s debinin geçtiği trapez kesitli bir kanalda, taban eğimi 0.0004, taban genişliği 5.0 metre ve şev eğimi $1/2$'dir. Mansaptaki kontrol yapısında su derinliği 1.69 metre olduğu bilinmektedir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.02$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.9: Uygulama 3 için Kanal Boy Kesiti



Şekil 4.10: Uygulama 3 için Kanal En Kesiti

Bu uygulama için farklı yöntemlerin sonuçları tablo 4.9'da ve HEC-RAS program çözümleri tablo 4.12'de sunulmuştur. Yapılan çözümler ile kritik derinlik y_c= 1.69 metre, normal derinlik y_n = 3.00 metre bulunmuştur. Akım sel rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili M2 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar kendi aralarında karşılaştırıldığında Euler yöntemi ve Heun yönteminin diğer yöntemlere göre daha uzak sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 4.9: Uygulama 3 için kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

y (m)	*x (m)*							
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**Referans Çözüm**
1.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.80	-3.71	-3.71	-0.57	-4.08	-3.90	-3.90	-3.87	-3.90
1.89	-13.60	-13.60	-7.27	-14.28	-13.97	-13.97	-13.94	-13.97
2.01	-38.96	-38.96	-25.54	-40.62	-39.90	-39.90	-39.88	-39.90
2.13	-82.93	-82.93	-59.95	-86.01	-84.72	-84.72	-84.69	-84.72
2.25	-152.48	-152.48	-116.33	-157.66	-155.50	-155.50	-155.47	-155.50
2.37	-258.11	-258.11	-203.25	-266.59	-263.01	-263.01	-262.98	-263.01
2.49	-416.93	-416.93	-334.17	-430.93	-424.85	-424.84	-424.81	-424.84
2.61	-659.47	-659.47	-531.94	-684.03	-672.85	-672.80	-672.79	-672.82
2.73	-1049.17	-1049.17	-840.38	-1098.81	-1074.50	-1074.31	-1074.36	-1074.39
2.82	-1539.57	-1539.57	-1231.22	-1620.43	-1578.57	-1578.14	-1578.28	-1578.31
2.91	-2440.80	-2440.80	-1883.60	-2665.97	-2536.81	-2533.04	-2534.50	-2534.53
2.94	-3023.40	-3023.40	-2363.18	-3276.16	-3129.67	-3125.68	-3127.22	-3127.25
2.97	-4019.81	-4019.81	-3103.97	-4405.00	-4173.14	-4165.94	-4168.74	-4168.81

Tablo 4.10: Uygulama 3 için Referans çözümü ile diğer çözümler arasındaki mutlak hata

y (m)	*x (m)*						
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**
1.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.80	0.19	0.19	3.32	0.18	0.00	0.00	0.03
1.89	0.36	0.36	6.70	0.31	0.00	0.00	0.03
2.01	0.94	0.94	14.37	0.71	0.00	0.00	0.03
2.13	1.78	1.78	24.77	1.29	0.00	0.00	0.03
2.25	3.02	3.02	39.17	2.16	0.00	0.00	0.03
2.37	4.89	4.89	59.76	3.58	0.00	0.00	0.03
2.49	7.92	7.92	90.67	6.09	0.01	0.01	0.03
2.61	13.35	13.35	140.88	11.21	0.03	0.02	0.03
2.73	25.22	25.22	234.01	24.42	0.12	0.08	0.03
2.82	38.74	38.74	347.09	42.12	0.26	0.17	0.03
2.91	93.73	93.73	650.92	131.45	2.28	1.48	0.03
2.94	103.85	103.85	764.08	148.91	2.42	1.57	0.03
2.97	149.00	149.00	1064.83	236.19	4.33	2.87	0.06
ε_{tm}	**443.00**	**443.00**	**3440.56**	**608.62**	**9.45**	**6.20**	**0.39**

Uygulama 3 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri bir santimetre artacak şekilde 129 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.9'da ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında Euler yönteminin kötü bir sonuç verdiği, direk adım, standart adım ve Heun yöntemleri Euler yöntemine göre daha yaklaşık fakat yine referans çözüme uzak bir çözüm verdikleri görülmektedir. Trapez integral yönteminin ise en yakın sonucu verdiği söylenebilir.

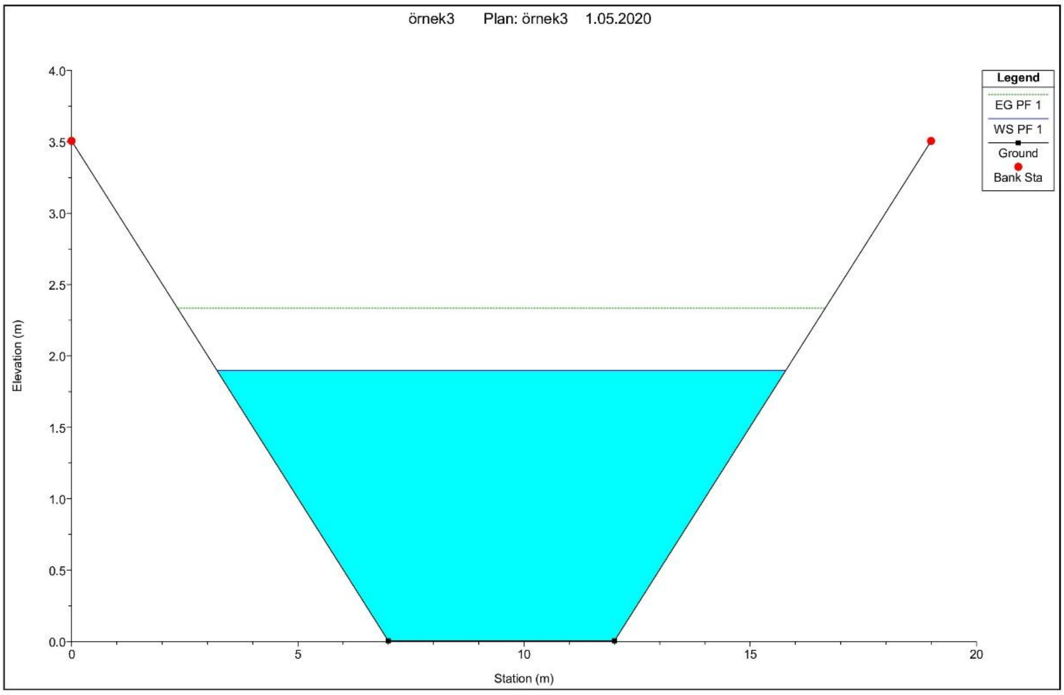
Tablo 4.11: Uygulama 3 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçları

HEC-RAS Plan: örnek3 Reach: 3 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min.Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
13	PF1	48.7	1.61	4.58		4.69	0.000418	1.5	32.47	16.88	0.35
12	PF1	48.7	1.21	4.15		4.27	0.000437	1.52	31.96	16.75	0.35
11	PF1	48.7	0.98	3.88		4.01	0.000456	1.55	31.45	16.63	0.36
10	PF1	48.7	0.62	3.43		3.57	0.000520	1.63	29.95	16.27	0.38
9	PF1	48.7	0.42	3.15		3.3	0.000595	1.71	28.5	15.91	0.41
8	PF1	48.7	0.26	2.87		3.04	0.000716	1.83	26.63	15.43	0.44
7	PF1	48.7	0.17	2.65		2.85	0.000868	1.96	24.81	14.95	0.49
6	PF1	48.7	0.1	2.47		2.7	0.001061	2.11	23.04	14.47	0.53
5	PF1	48.7	0.06	2.31		2.57	0.001305	2.28	21.36	14	0.59
4	PF1	48.7	0.03	2.16		2.47	0.001623	2.47	19.72	13.52	0.65
3	PF1	48.7	0.02	2.03		2.39	0.002036	2.68	18.15	13.05	0.73
2	PF1	48.7	0.01	1.9		2.34	0.002588	2.93	16.63	12.57	0.81
1	PF1	48.7	0	1.8	1.69	2.31	0.003158	3.15	15.47	12.2	0.89
0	PF1	48.7	0	1.69	1.69	2.29	0.004069	3.45	14.11	11.74	1.01

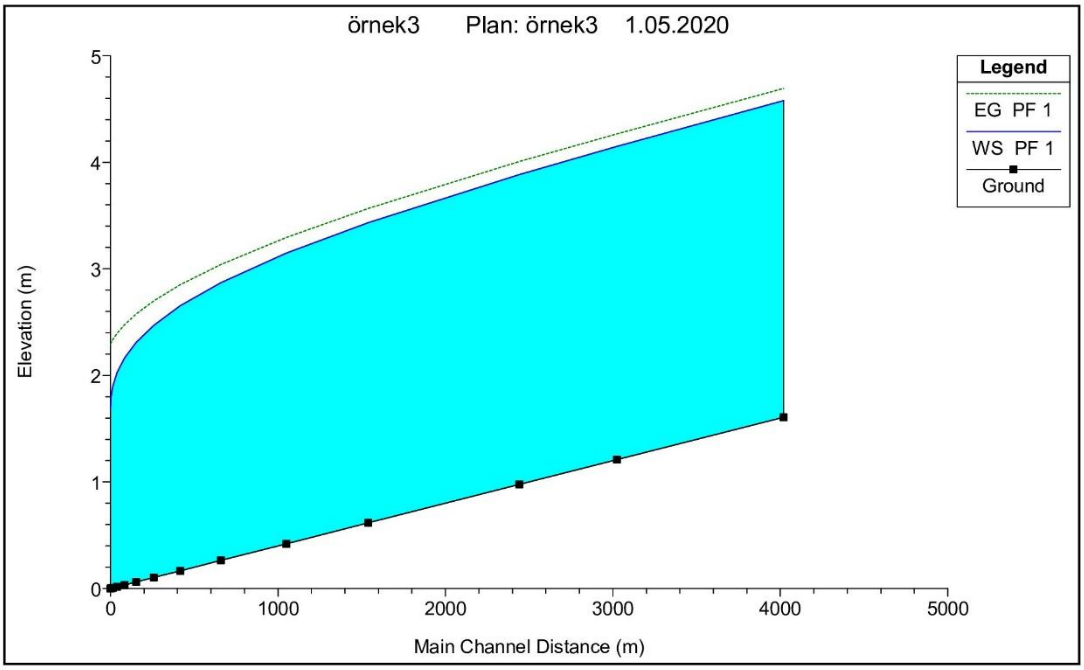
Tablo 4.11'de bulunan 5. sütun ile 4. sütun arasındaki fark derinlikleri vermektedir ve bu değerler tablo 4.12'de mesafelere göre derinlikler şeklinde verilmiştir.

Tablo 4.12: Uygulama 3 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

Δx	x	y
0.00	0.00	1.69
-3.71	-3.71	1.80
-9.90	-13.60	1.89
-25.36	-38.96	2.01
-43.97	-82.93	2.13
-69.54	-152.48	2.25
-105.64	-258.11	2.37
-158.81	-416.93	2.49
-242.54	-659.47	2.61
-389.70	-1049.17	2.73
-490.40	-1539.57	2.82
-901.23	-2440.80	2.91
-582.60	-3023.40	2.94
-996.41	-4019.81	2.97



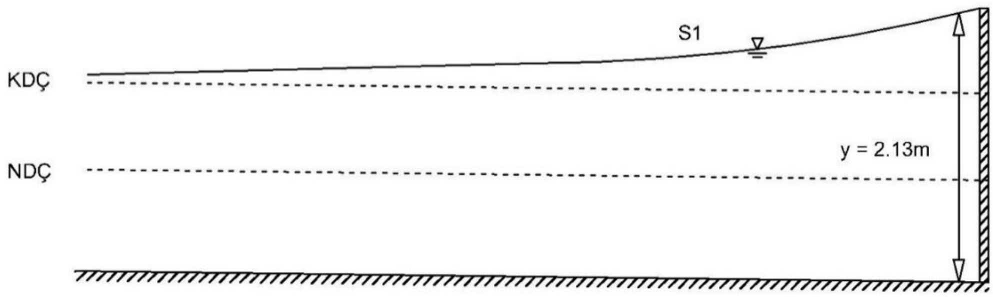
Şekil 4.11: Uygulama 3 için HEC-RAS programından alınan en kesit



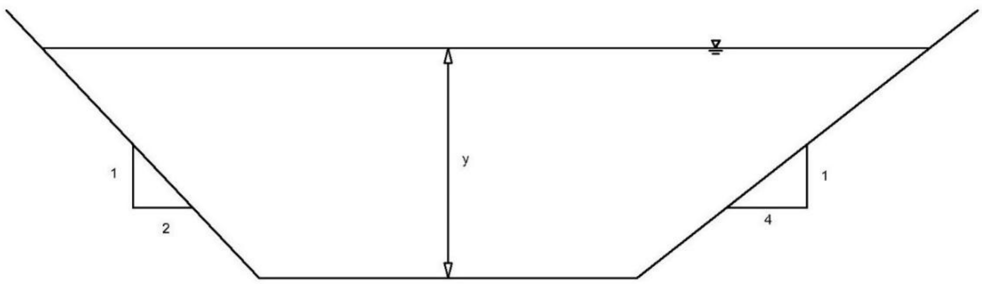
Şekil 4.12: Uygulama 3 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

4.4 Uygulama 4

Taban eğimi 0.02 olan trapez kesitli bir kanaldan 4.81 m^3/s debi geçmektedir. Kanal taban genişliği 4.57 ve şev eğimleri $1/2$, $1/4$ olarak verilmiştir. Mansapta bir baraj inşa edilmiş ve barajın hemen arkasındaki su yüksekliği 2.13 metredir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.001$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak barajın memba tarafında oluşacak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.13: Uygulama 4 için kanal boy kesiti



Şekil 4.14: Uygulama 4 için kanal en kesiti

Bu uygulama için farklı yöntemlerin sonuçları tablo 4.13'te ve HEC-RAS program çözümleri tablo 4.16'da sunulmuştur. Yapılan çözümler ile kritik derinlik y_c = 0.44 metre, normal derinlik y_n = 0.05 metre bulunmuştur. Akım sel rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili S1 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar kendi aralarında karşılaştırıldığında Euler yöntemi hariç diğer yöntemlerin aynı sonucu verdiği, Euler yönteminin de yakın sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 4.13: Uygulama 4 için kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

y (m)	*x (m)*							
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**Referans Çözümü**
2.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.07	-2.99	-2.99	-2.99	-2.99	-2.99	-2.99	-2.99	-2.99
2.01	-5.98	-5.98	-5.98	-5.98	-5.98	-5.98	-5.98	-5.98
1.95	-8.97	-8.97	-8.97	-8.97	-8.97	-8.97	-8.97	-8.97
1.89	-11.95	-11.95	-11.95	-11.95	-11.95	-11.95	-11.95	-11.95
1.82	-15.43	-15.43	-15.43	-15.43	-15.43	-15.43	-15.43	-15.43
1.76	-18.41	-18.41	-18.42	-18.41	-18.41	-18.41	-18.41	-18.41
1.70	-21.39	-21.39	-21.40	-21.39	-21.39	-21.39	-21.39	-21.39
1.64	-24.36	-24.36	-24.37	-24.36	-24.36	-24.36	-24.36	-24.36
1.58	-27.34	-27.34	-27.35	-27.34	-27.34	-27.34	-27.34	-27.34
1.52	-30.30	-30.30	-30.32	-30.30	-30.30	-30.30	-30.30	-30.30
1.46	-33.26	-33.26	-33.28	-33.26	-33.26	-33.26	-33.26	-33.26
1.39	-36.71	-36.71	-36.73	-36.71	-36.71	-36.71	-36.71	-36.71
1.33	-39.65	-39.65	-39.68	-39.65	-39.65	-39.65	-39.65	-39.65
1.27	-42.59	-42.59	-42.62	-42.59	-42.59	-42.59	-42.59	-42.59
1.21	-45.51	-45.51	-45.55	-45.51	-45.51	-45.51	-45.51	-45.51
1.14	-48.90	-48.90	-48.95	-48.90	-48.90	-48.90	-48.90	-48.90
1.08	-51.78	-51.78	-51.84	-51.78	-51.78	-51.78	-51.78	-51.78
1.01	-55.11	-55.11	-55.19	-55.10	-55.11	-55.11	-55.11	-55.11
0.95	-57.92	-57.92	-58.02	-57.92	-57.92	-57.92	-57.92	-57.92
0.88	-61.14	-61.14	-61.28	-61.14	-61.14	-61.14	-61.14	-61.14

Tablo 4.14: Uygulama 4 için Referans çözüm ile diğer çözümler arasındaki mutlak hata

y (m)	*x (m)*						
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**
2.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.76	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
1.70	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
1.64	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
1.58	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
1.52	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
1.46	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
1.39	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
1.33	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
1.27	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
1.21	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
1.14	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
1.08	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
1.01	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
0.95	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
0.88	0.00	0.00	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00
ε_{tm}	**0.00**	**0.00**	**0.61**	**0.02**	**0.00**	**0.00**	**0.00**

Uygulama 4 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri bir santimetre artacak şekilde 126 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.13'te ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında tüm sonuçların referans çözüme çok yakın hatta aynı sonucu verdiği görülmektedir. Bu uygulama için çözümlerde fazla nokta kullanıldığından Euler yönteminin de iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir.

Tablo 4.15: Uygulama 4 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçlar

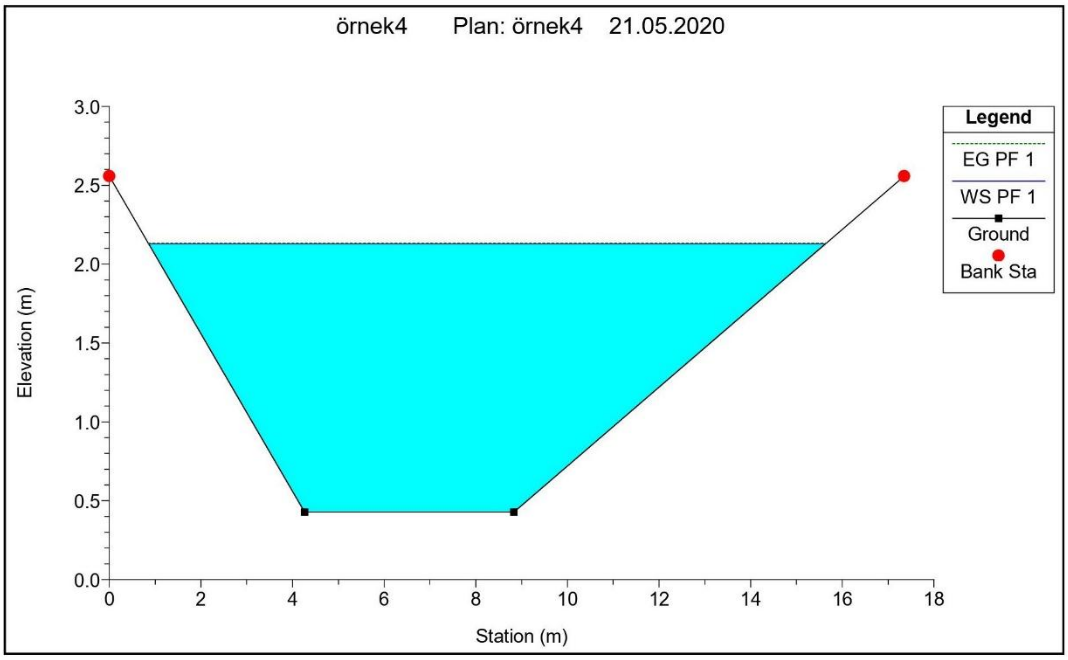
HEC-RAS Plan: örnek Reach: 4 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min.Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
20	PF1	4.81	1.22	2.1		2.13	0.000001	0.76	6.34	9.85	0.30
19	PF1	4.81	1.16	2.11		2.13	0.000001	0.68	7.04	10.27	0.26
18	PF1	4.81	1.1	2.11		2.13	0.000001	0.63	7.67	10.62	0.24
17	PF1	4.81	1.04	2.12		2.13	0.000000	0.57	8.43	11.05	0.21
16	PF1	4.81	0.98	2.12		2.13	0.000000	0.53	9.11	11.41	0.19
15	PF1	4.81	0.91	2.12		2.13	0.000000	0.48	9.92	11.83	0.17
14	PF1	4.81	0.85	2.12		2.13	0.000000	0.45	10.64	12.19	0.15
13	PF1	4.81	0.79	2.12		2.13	0.000000	0.42	11.38	12.55	0.14
12	PF1	4.81	0.73	2.12		2.13	0.000000	0.4	12.15	12.91	0.13
11	PF1	4.81	0.67	2.13		2.13	0.000000	0.37	13.07	13.33	0.12
10	PF1	4.81	0.61	2.13		2.13	0.000000	0.35	13.88	13.69	0.11
9	PF1	4.81	0.55	2.13		2.13	0.000000	0.33	14.7	14.05	0.10
8	PF1	4.81	0.49	2.13		2.13	0.000000	0.31	15.55	14.41	0.10
7	PF1	4.81	0.43	2.13		2.13	0.000000	0.29	16.44	14.77	0.09
6	PF1	4.81	0.37	2.13		2.13	0.000000	0.28	17.34	15.13	0.08
5	PF1	4.81	0.31	2.13		2.13	0.000000	0.26	18.26	15.49	0.08
4	PF1	4.81	0.24	2.13		2.13	0.000000	0.25	19.37	15.92	0.07
3	PF1	4.81	0.18	2.13		2.13	0.000000	0.24	20.34	16.28	0.07
2	PF1	4.81	0.12	2.13		2.13	0.000000	0.23	21.32	16.63	0.06
1	PF1	4.81	0.06	2.13		2.13	0.000000	0.22	22.33	16.99	0.06

Tablo 4.16’da HEC-RAS programı ile elde edilen mesafelere göre derinlikler verilmiştir.

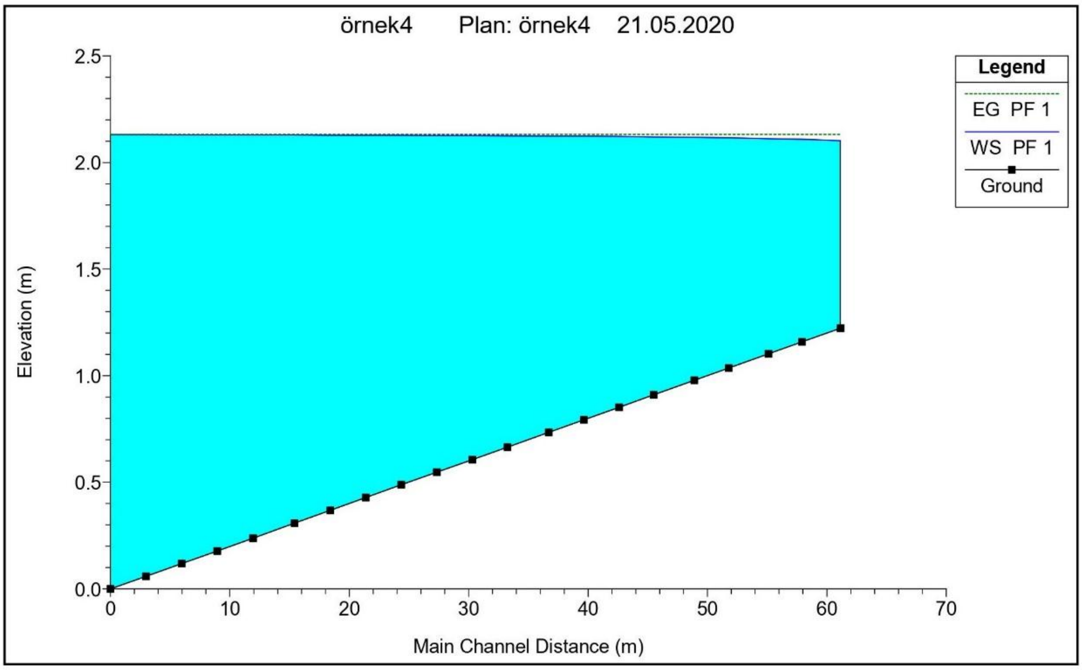
Aşağıda bulunan şekil 4.15’te herhangi bir noktadaki kanal en kesit görünümü verilmiştir. Şekil 4.16’da su yüzü profilinin görünüşü verilmektedir.

Tablo 4.16: Uygulama 4 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

Δx	x	y
0.00	0.00	2.13
-2.99	-2.99	2.07
-2.99	-5.98	2.01
-2.99	-8.97	1.95
-2.99	-11.95	1.89
-3.48	-15.43	1.82
-2.98	-18.41	1.76
-2.98	-21.39	1.70
-2.97	-24.36	1.64
-2.97	-27.34	1.58
-2.97	-30.30	1.52
-2.96	-33.26	1.46
-3.45	-36.71	1.39
-2.94	-39.65	1.33
-2.93	-42.59	1.27
-2.92	-45.51	1.21
-3.39	-48.90	1.14
-2.88	-51.78	1.08
-3.33	-55.11	1.01
-2.81	-57.92	0.95
-3.22	-61.14	0.88



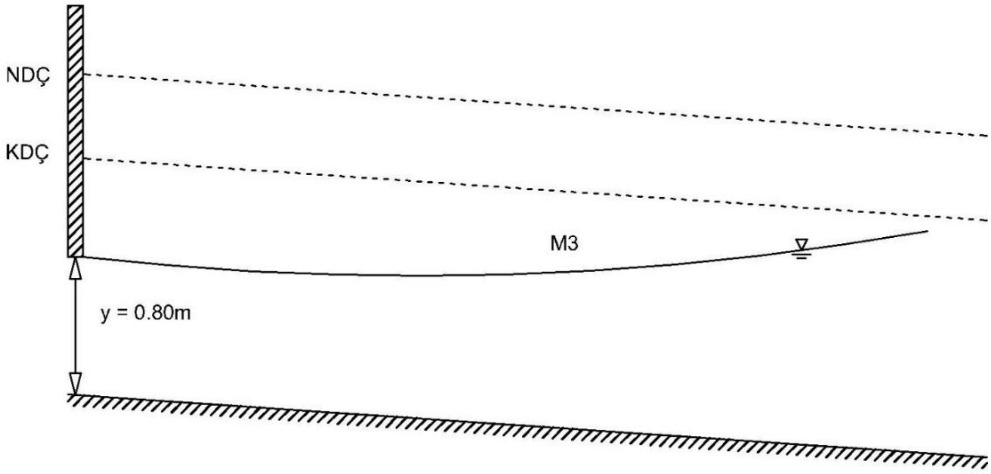
Şekil 4.15: Uygulama 4 için HEC-RAS programından alınan en kesit



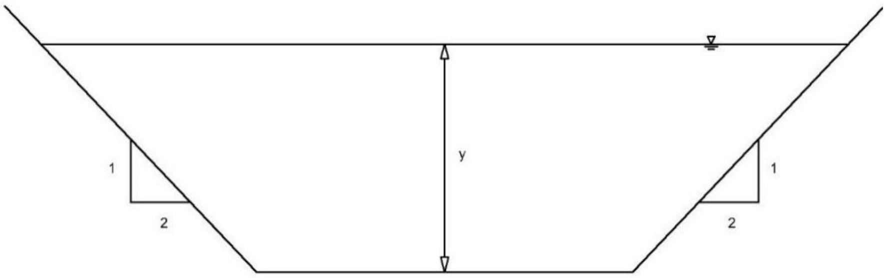
Şekil 4.16: Uygulama 4 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

4.5 Uygulama 5

Bir bent kapağı altında, trapez kesitli kanaldan 200 m^3/s debi ile su iletilmektedir. Kanal taban eğimi 0.004, genişliği 20 metre ve şev eğimi $1/2$ olarak verilmiştir. Bent kapağı altındaki su derinliği 0.8 metre olarak bilinmektedir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.025$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak kapağın mansap kısmında oluşacak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.17: Uygulama 5 için kanal boy kesiti



Şekil 4.18: Uygulama 5 için kanal en kesiti

Bu uygulama için farklı yöntemlerin sonuçları tablo 4.17’de ve HEC-RAS program çözümleri tablo 4.20’de sunulmuştur. Yapılan çözümler ile kritik derinlik y_c = 2.02 metre, normal derinlik y_n = 2.20 metre bulunmuştur. Akım nehir rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili M3 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında Euler yönteminin daha uzak bir sonuç verdiği, diğer sonuçların birbirine yakın sonuçlar olduğu görülmektedir. Euler yönteminin düzenlenmesiyle elde edilen Heun yöntemi ile sonuç diğer yöntemlerin sonuçlarına biraz daha yaklaştırılmıştır.

Tablo 4.17: Uygulama 5 için kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

y (m)	***x (m)***							
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**Referans Çözüm**
0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.87	9.89	9.89	9.89	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98
0.93	18.52	18.52	18.52	18.66	18.67	18.67	18.67	18.67
1.00	28.71	28.71	28.72	28.93	28.93	28.93	28.93	28.93
1.06	37.56	37.56	37.57	37.81	37.82	37.82	37.82	37.82
1.12	46.47	46.47	46.49	46.76	46.77	46.77	46.77	46.77
1.19	56.90	56.90	56.95	57.24	57.25	57.25	57.25	57.25
1.25	65.88	65.88	65.96	66.25	66.26	66.26	66.26	66.26
1.31	74.85	74.85	74.96	75.24	75.26	75.26	75.26	75.26
1.37	83.78	83.78	83.94	84.19	84.21	84.21	84.21	84.21
1.43	92.64	92.64	92.87	93.08	93.10	93.10	93.10	93.10
1.50	102.83	102.83	103.18	103.30	103.33	103.33	103.33	103.33
1.56	111.40	111.40	111.87	111.89	111.92	111.92	111.92	111.92
1.63	121.11	121.11	121.77	121.61	121.61	121.65	121.65	121.65
1.69	129.10	129.10	129.95	129.61	129.66	129.66	129.66	129.66
1.76	137.87	137.87	139.07	138.37	138.45	138.45	138.45	138.45
1.84	146.84	146.84	148.69	147.31	147.43	147.43	147.43	147.43
1.99	158.28	158.28	164.15	157.30	158.46	158.49	158.48	158.48

Tablo 4.18: Uygulama 5 için Referans çözümü ile diğer çözümler arasındaki mutlak hata

$y\ (m)$	$x\ (m)$						
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**
0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.87	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
0.93	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.22	0.22	0.22	0.01	0.00	0.00	0.00
1.06	0.26	0.26	0.25	0.01	0.00	0.00	0.00
1.12	0.30	0.30	0.28	0.01	0.00	0.00	0.00
1.19	0.35	0.35	0.30	0.01	0.00	0.00	0.00
1.25	0.38	0.38	0.30	0.01	0.00	0.00	0.00
1.31	0.41	0.41	0.29	0.02	0.00	0.00	0.00
1.37	0.44	0.44	0.27	0.02	0.00	0.00	0.00
1.43	0.46	0.46	0.23	0.02	0.00	0.00	0.00
1.50	0.50	0.50	0.14	0.03	0.00	0.00	0.00
1.56	0.52	0.52	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00
1.63	0.55	0.55	0.12	0.04	0.04	0.00	0.00
1.69	0.56	0.56	0.29	0.05	0.00	0.00	0.00
1.76	0.58	0.58	0.62	0.07	0.00	0.00	0.00
1.84	0.59	0.59	1.25	0.13	0.00	0.00	0.00
1.99	0.20	0.20	5.68	1.17	0.02	0.01	0.00
ε_{tm}	**6.55**	**6.55**	**10.55**	**1.65**	**0.06**	**0.01**	**0.00**

Uygulama 5 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri 1 santimetre artacak şekilde 120 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.17'de ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında trapez integral yönteminin referans çözüm ile bire bir aynı çözümü verdiği en uzak çözümü Euler yönteminin verdiği görülmektedir.

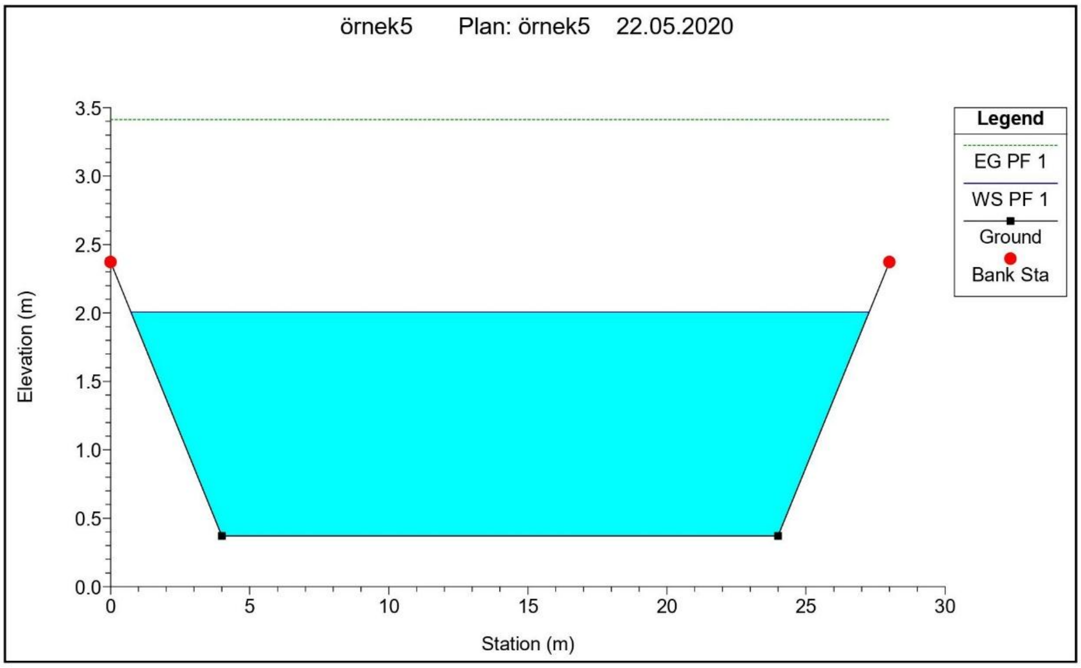
Tablo 4.19: Uygulama 5 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçlar

HEC-RAS Plan: örnek Reach: 5 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min.Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
17	PF1	200	0	0.8	2.01	7.63	0.126652	11.57	17.28	23.2	4.28
16	PF1	200	0.05	0.93	2.06	6.42	0.089858	10.37	19.28	23.54	3.66
15	PF1	200	0.08	1.04	2.09	5.71	0.069946	9.57	20.89	23.81	3.26
14	PF1	200	0.12	1.14	2.13	5.17	0.055533	8.89	22.5	24.08	2.94
13	PF1	200	0.15	1.23	2.16	4.77	0.045358	8.33	24.01	24.33	2.68
12	PF1	200	0.19	1.35	2.2	4.38	0.03575	7.71	25.94	24.65	2.40
11	PF1	200	0.22	1.46	2.23	4.11	0.02908	7.21	27.74	24.94	2.18
10	PF1	200	0.26	1.59	2.27	3.85	0.022751	6.66	30.05	25.31	1.95
9	PF1	200	0.3	1.71	2.31	3.67	0.018241	6.19	32.3	25.66	1.76
8	PF1	200	0.33	1.85	2.35	3.53	0.014439	5.73	34.88	26.06	1.58
7	PF1	200	0.37	2.01	2.38	3.41	0.011076	5.25	38.07	26.54	1.40
6	PF1	200	0.41	2.22	2.42	3.33	0.007833	4.68	42.72	27.23	1.19
5	PF1	200	0.45	2.46	2.46	3.33	0.005408	4.14	48.33	28.00	1.01
4	PF1	200	0.48	2.49	2.49	3.37	0.005408	4.14	48.33	28.00	1.01
3	PF1	200	0.52	2.53	2.53	3.4	0.005408	4.14	48.33	28.00	1.01
2	PF1	200	0.56	2.57	2.57	3.44	0.005408	4.14	48.33	28.00	1.01
1	PF1	200	0.59	2.61	2.61	3.48	0.005409	4.14	48.33	28.00	1.01
0	PF1	200	0.63	2.64	2.64	3.52	0.005408	4.14	48.33	28.00	1.01

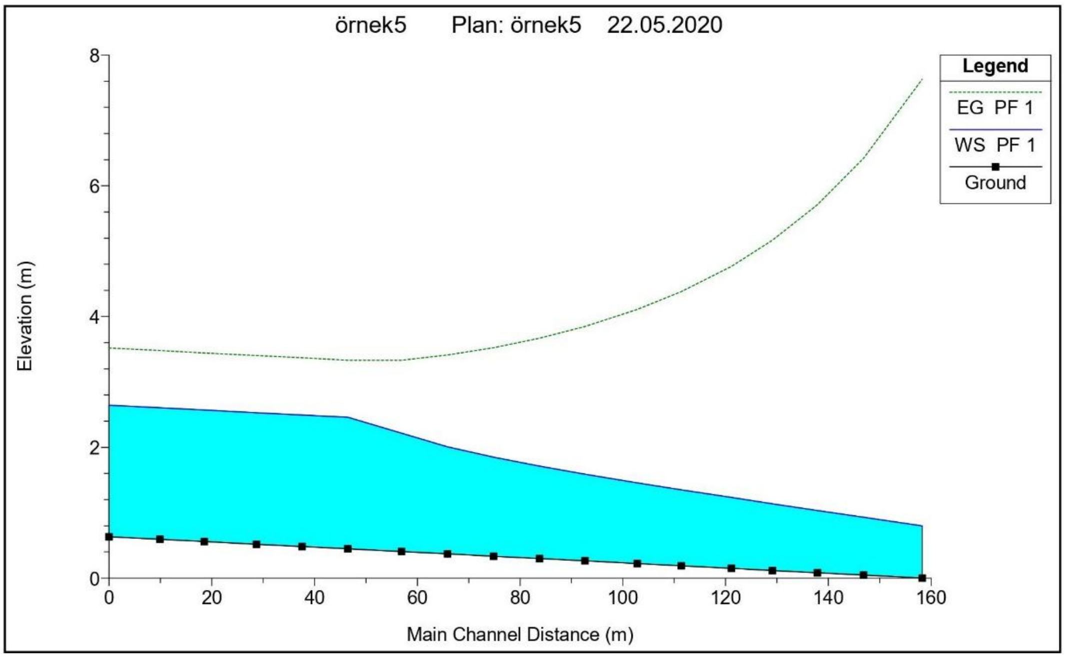
Tablo 4.20: Uygulama 5 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

Δx	x	y
0.00	0.00	0.80
9.89	9.89	0.88
8.64	18.52	0.96
10.19	28.71	1.02
8.84	37.56	1.08
8.91	46.47	1.16
10.43	56.90	1.24
8.98	65.88	1.33
8.97	74.85	1.41
8.93	83.78	1.52
8.86	92.64	1.64
10.19	102.83	1.81
8.57	111.40	2.01
9.71	121.11	2.01
7.99	129.10	2.01
8.77	137.87	2.01
8.98	146.84	2.02
11.43	158.28	2.01

Kullanılan yöntemler ile HEC-RAS çözümleri karşılaştırıldığında küçük farklılıkların olduğu görülmektedir. Şekil 4.19'da herhangi bir noktadaki kanal en kesit görünümü verilmiştir. Şekil 4.20'de su yüzü profilinin görünüşü verilmektedir.



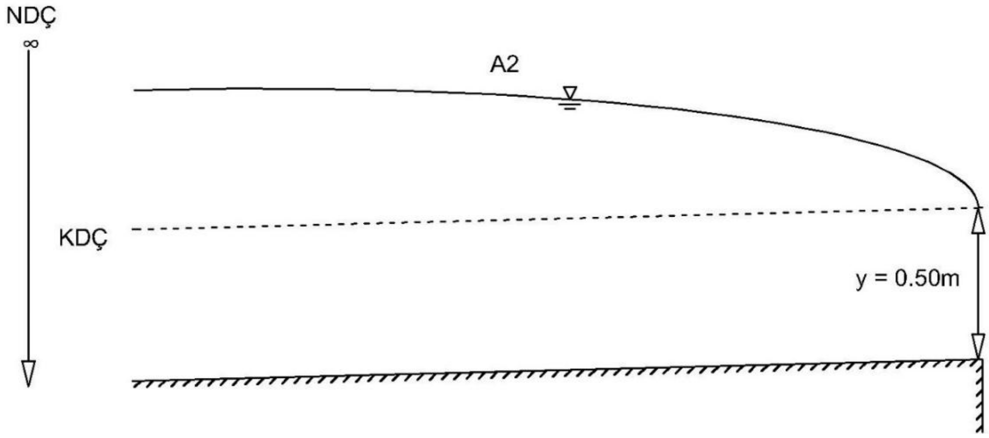
Şekil 4.19: Uygulama 5 için HEC-RAS programından alınan en kesit



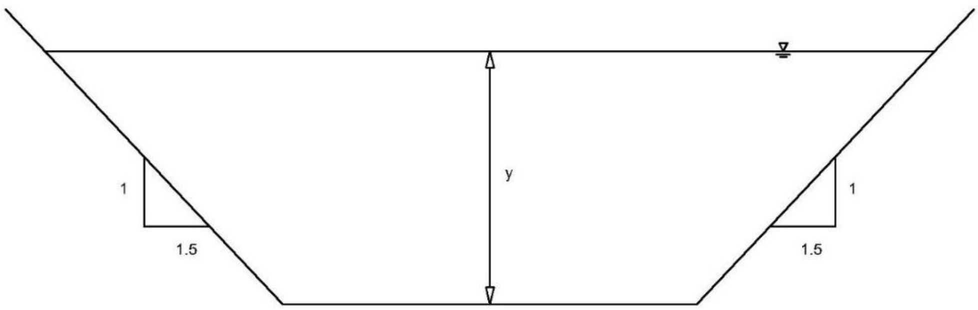
Şekil 4.20: Uygulama 5 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

4.6 Uygulama 6

Ters eğimli trapez bir kanalda taban eğimi -0.001, taban genişliği 3.5 ve şev eğimi $1/1.5$ olarak verilmiştir. Kanaldan 4 m^3/s debi geçmekte ve serbest düşü ile akım sona ermektedir. Serbest düşünün olduğu yerde derinliğin 0.50 metre olduğu bilinmektedir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.015$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.21: Uygulama 6 için kanal boy kesiti



Şekil 4.22: Uygulama 6 için kanal en kesiti

Bu uygulama için farklı yöntemlerin sonuçları tablo 4.21'de ve HEC-RAS program çözümleri tablo 4.24'te sunulmuştur. Yapılan çözümler ile kritik derinlik

y_c = 0.48 metre bulunmuştur. Kanal ters eğime sahip bir kanal olduğu için normal derinlik çizgisi sonsuza gitmektedir. Akım sel rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili A2 olarak belirlenmiştir. Kullanılan yöntemlerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırıldığında Euler yönteminin uzak çözüm verdiği görülmektedir. İntegral çözümüne dayalı yöntemler olan Gauss kareleme yöntemi ve trapez integral yönteminin aynı sonuç verdiği, RK4 yönteminin de yakın sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 4.21: Uygulama 6 için kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

y (m)	***x (m)***							
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**Referans Çözüm**
0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.60	-11.89	-11.89	-4.06	-12.94	-12.85	-12.85	-12.85	-12.85
0.70	-41.65	-41.65	-25.89	-43.46	-43.51	-43.51	-43.51	-43.51
0.85	-115.06	-115.06	-84.68	-118.04	-118.98	-118.98	-118.98	-118.98
1.00	-215.72	-215.72	-175.05	-219.02	-220.75	-220.74	-220.75	-220.75
1.15	-333.96	-333.96	-286.65	-337.31	-339.57	-339.56	-339.56	-339.56
1.30	-463.12	-463.12	-411.63	-466.46	-469.04	-469.03	-469.04	-469.04
1.75	-880.04	-880.04	-811.58	-882.80	-888.75	-888.80	-888.78	-888.78
2.00	-1122.40	-1122.40	-1051.99	-1125.11	-1131.26	-1131.30	-1131.29	-1131.29

Tablo 4.22: Uygulama 6 için Referans çözümü ve diğer çözümler arasındaki mutlak hata

y (m)	***x (m)***						
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**
0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.60	0.96	0.96	8.79	0.10	0.00	0.00	0.00
0.70	1.86	1.86	17.62	0.05	0.00	0.00	0.00
0.85	3.92	3.92	34.30	0.94	0.00	0.00	0.00
1.00	5.03	5.03	45.70	1.73	0.00	0.00	0.00
1.15	5.61	5.61	52.91	2.25	0.00	0.00	0.00
1.30	5.92	5.92	57.41	2.58	0.00	0.00	0.00
1.75	8.74	8.74	77.20	5.98	0.03	0.02	0.00
2.00	8.89	8.89	79.30	6.17	0.03	0.02	0.00
ε_{tm}	**40.92**	**40.92**	**373.22**	**19.79**	**0.07**	**0.05**	**0.00**

Uygulama 6 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri bir santimetre artacak şekilde 151 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.21'de ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında Euler yönteminin çok uzak bir sonuç verdiği görülmektedir. Heun yönteminin Euler sonucunu iyileştirerek referans çözüme biraz daha yaklaştırdığı söylenebilir. Bu uygulama için de görüldüğü gibi en iyi yöntemi trapez integral yöntemi vermektedir.

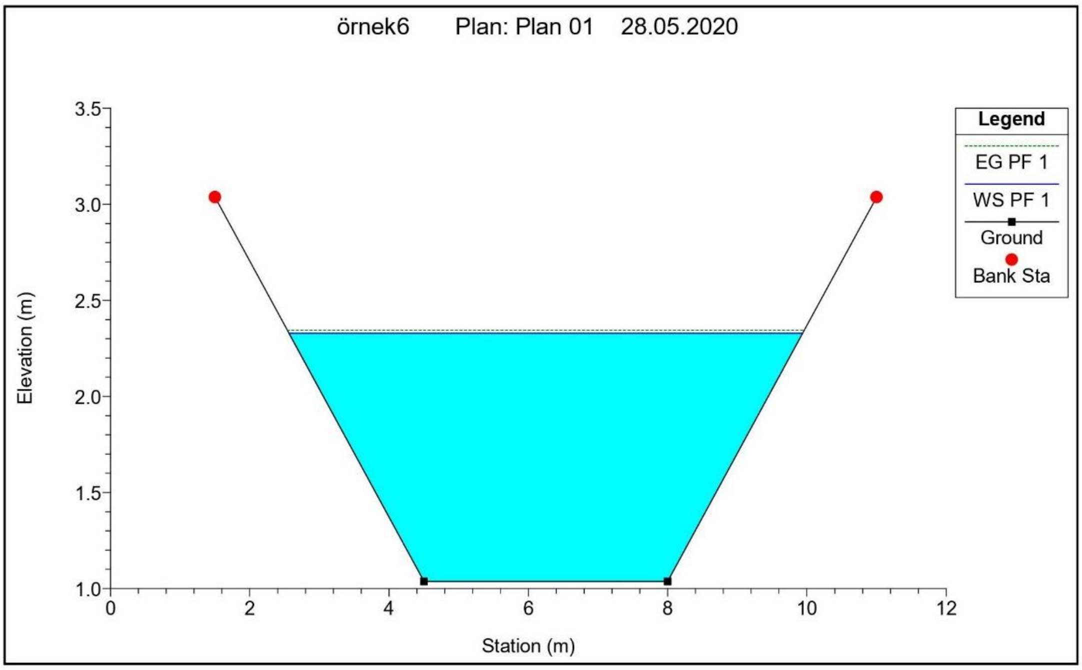
Tablo 4.23: Uygulama 6 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçlar

HEC-RAS Plan: örnek Reach: 6 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min. Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
8	PF1	4	0.38	2.37		2.37	0.000017	0.31	12.88	9.46	0.09
7	PF1	4	0.62	2.36		2.36	0.000029	0.38	10.61	8.71	0.11
6	PF1	4	1.04	2.33		2.35	0.000089	0.57	7.02	7.38	0.19
5	PF1	4	1.17	2.31		2.33	0.000141	0.67	5.95	6.93	0.23
4	PF1	4	1.28	2.28		2.31	0.000237	0.81	4.95	6.48	0.3
3	PF1	4	1.39	2.23		2.28	0.000428	1	4.01	6.03	0.39
2	PF1	4	1.46	2.15		2.24	0.000848	1.27	3.16	5.59	0.54
1	PF1	4	1.49	2.08	1.96	2.2	0.001457	1.53	2.62	5.29	0.69
0	PF1	4	1.5	1.97	1.97	2.18	0.003252	2.01	1.99	4.92	1.01

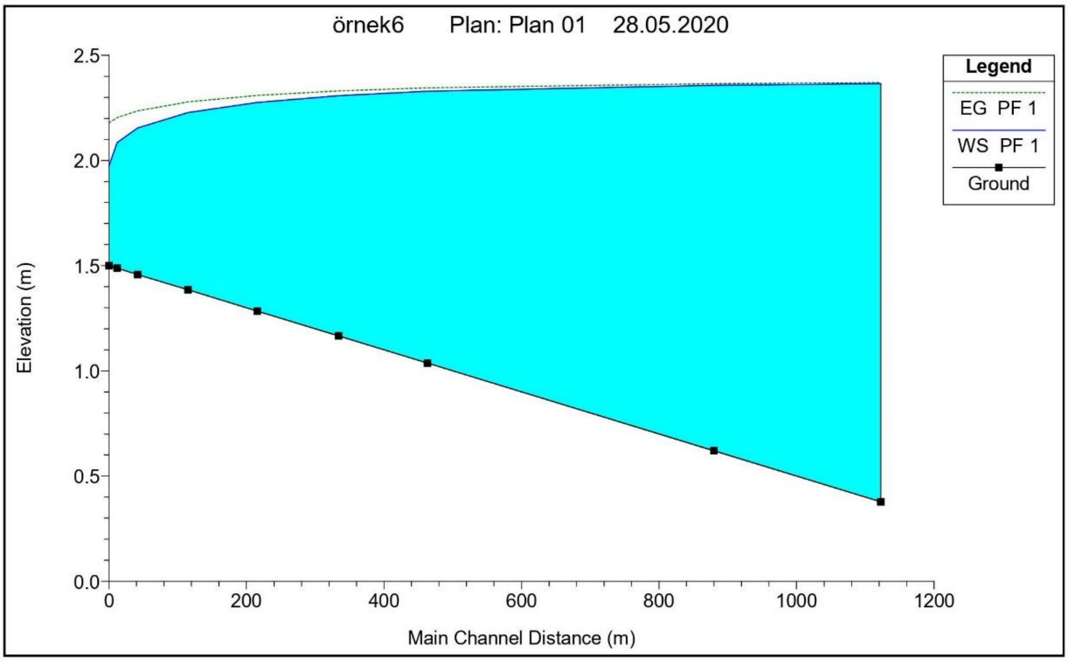
Tablo 4.24: Uygulama 6 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

Δx	x	y
0.00	0.00	0.47
-11.89	-11.89	0.60
-29.76	-41.65	0.70
-73.41	-115.06	0.84
-100.66	-215.72	0.99
-118.24	-333.96	1.14
-129.16	-463.12	1.29
-416.92	-880.04	1.74
-242.36	-1122.40	1.99

Tablo 4.24'te mesafelere göre derinlikler verilmiştir. Kullanılan yöntemler ile karşılaştırıldığında küçük farklılıkların olduğu görülmektedir. Aşağıda görülen şekil 4.23'te herhangi bir noktadaki kanal en kesit görünümü verilmiştir. Şekil 4.24'te su yüzü profilinin görünüşü verilmektedir.



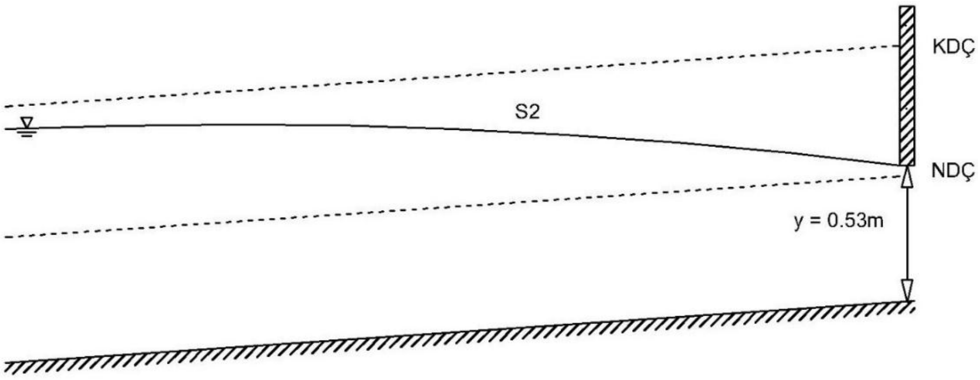
Şekil 4.23: Uygulama 6 için HEC-RAS programından alınan en kesit



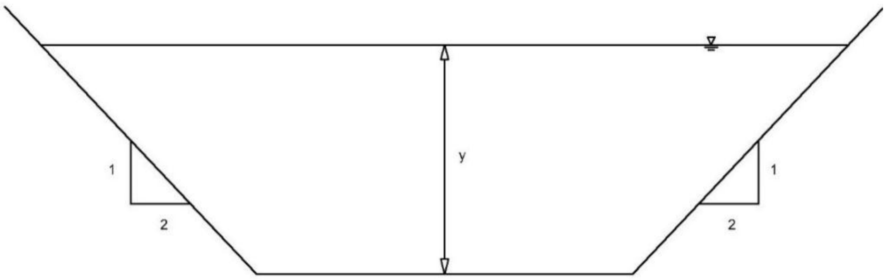
Şekil 4.24: Uygulama 6 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

4.7 Uygulama 7

Trapez kesitli bir kanaldan 11.33 m^3/s debi su iletilmektedir. Kanal taban eğimi 0.0169, genişliği 6.1 metre ve şev eğimleri $1/2$ olarak verilmiştir. Kanal kapağı altındaki su derinliğinin 0.53 metre olduğu bilinmektedir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.025$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak kapağın memba kısmında oluşacak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.25: Uygulama 7 için kanal boy kesiti



Şekil 4.26: Uygulama 7 için kanal en kesiti

Bu uygulama için tablo 4.25'te farklı yöntemlerin sonuçları ve HEC-RAS program çözümleri aşağıda sunulmuştur. Sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında, Euler yöntemi dışında kullanılan yöntemlerin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Yapılan çözümler ile kritik derinlik y_c = 0.66 metre, normal derinlik y_n = 0.52 metre bulunmuştur. Akım nehir rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili S2 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.25: Uygulama 7 için kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

y (m)	*x (m)*							
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**Referans Çözüm**
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.54	-7.88	-7.88	-14.94	-10.04	-8.55	-8.44	-8.48	-7.10
0.55	-11.63	-11.63	-20.07	-14.04	-12.37	-12.26	-12.30	-10.93
0.57	-15.43	-15.43	-25.83	-18.24	-16.28	-16.15	-16.20	-14.83
0.60	-17.91	-17.91	-29.77	-20.97	-18.82	-18.69	-18.74	-17.36
0.64	-18.96	-18.96	-31.82	-22.18	-19.90	-19.77	-19.82	-18.45

Tablo 4.26: Uygulama 7 için Referans çözümü ile diğer yöntemler arasındaki mutlak hata

y (m)	*x (m)*						
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**
0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.54	0.77	0.77	7.84	2.93	1.44	1.33	1.38
0.55	0.70	0.70	9.15	3.12	1.45	1.33	1.38
0.57	0.61	0.61	11.01	3.41	1.45	1.33	1.38
0.60	0.55	0.55	12.41	3.61	1.45	1.33	1.38
0.64	0.52	0.52	13.37	3.73	1.45	1.33	1.38
ε_{tm}	**3.14**	**3.14**	**53.78**	**16.80**	**7.25**	**6.65**	**6.88**

Uygulama 7 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri bir milimetre artacak şekilde 110 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.27'de ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında en yakın çözümü direk adım ve standart adım yönteminin, en uzak çözümü ise Euler yönteminin verdiği görülmektedir.

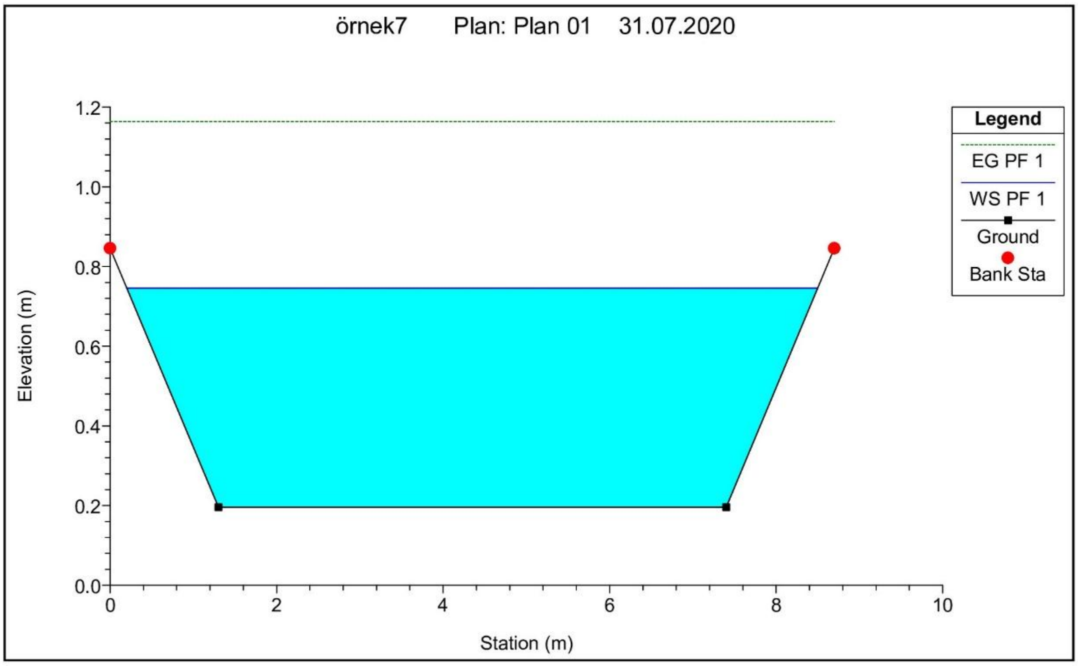
Tablo 4.27: Uygulama 7 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçlar

HEC-RAS Plan: örnek Reach: 7 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min. Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
5	PF1	11.33	0.32	0.97	0.97	1.25	0.007895	2.35	4.83	8.70	1.01
4	PF1	11.33	0.30	0.9	0.95	1.24	0.010853	2.61	4.34	8.48	1.16
3	PF1	11.33	0.26	0.83	0.91	1.22	0.012858	2.76	4.10	8.37	1.26
2	PF1	11.33	0.20	0.75	0.85	1.16	0.01434	2.86	3.96	8.30	1.32
1	PF1	11.33	0.13	0.67	0.79	1.11	0.015113	2.91	3.89	8.26	1.36
0	PF1	11.33	0.00	0.53	0.65	0.98	0.016196	2.98	3.80	8.22	1.40

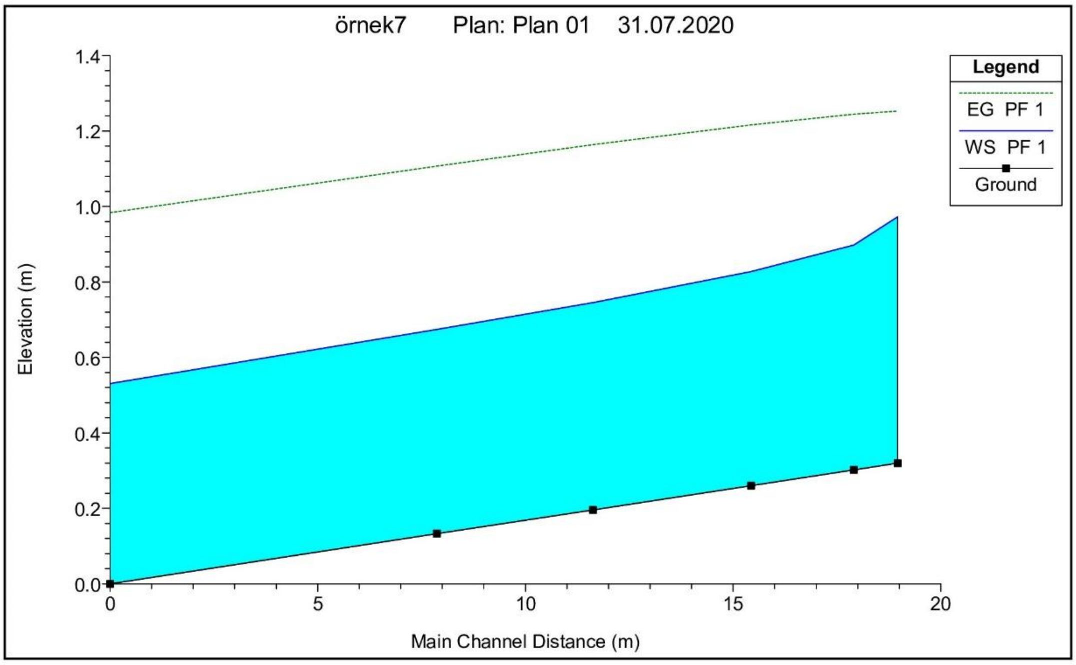
Tablo 4.28: Uygulama 7 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

Δx	x	y
0.00	0.00	0.53
-7.88	-7.88	0.54
-3.75	-11.63	0.55
-3.80	-15.43	0.57
-2.48	-17.91	0.60
-1.05	-18.96	0.64

Tablo 4.28'de mesafelere göre derinlikler verilmiştir. Kullanılan yöntemler ile karşılaştırıldığında direk adım ve standart adım ile aynı sonucu verdiği görülmektdir. HEC-RAS programı çözüm yaparken direk adım yöntemini kullandığı için direk adım yöntemiyle aynı sonucu veriyor olması MATLAB kodunun da doğru çalıştığını göstermektedir Aşağıda görülen şekil 4.27'de herhangi bir noktadaki kanal en kesit görünümü verilmiştir. Şekil 4.28'de su yüzü profilinin görünüşü verilmektedir.



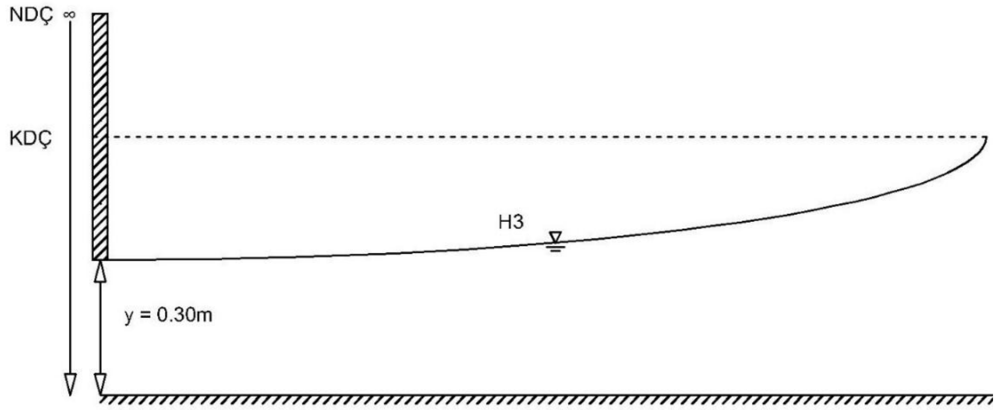
Şekil 4.27: Uygulama 7 için HEC-RAS programından alınan en kesit



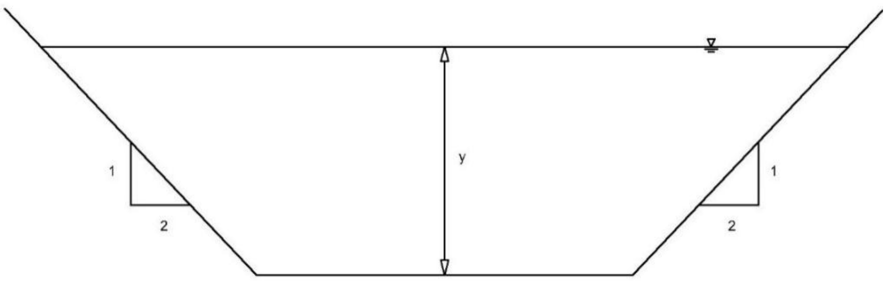
Şekil 4.28: Uygulama 7 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

4.8 Uygulama 8

Trapez kesitli bir kanaldan 11.33 m^3/s debi su iletilmektedir. Yatay eğimli kanalın taban genişliği 6.1 metre ve şev eğimleri $1/2$ olarak verilmiştir. Kanal kapağı altındaki su derinliğinin 0.30 metre olduğu bilinmektedir. Manning pürüzlülük katsayısı $n = 0.025$ ve hız düzeltme katsayısı $\alpha = 1$ alarak kapağın mansap kısmında oluşacak su yüzü profilini belirleyiniz.



Şekil 4.29: Uygulama 8 için kanal boy kesiti



Şekil 4.30: Uygulama 8 için kanal en kesiti

Bu uygulama için farklı yöntemlerin sonuçları tablo 4.29'da ve HEC-RAS program çözümleri tablo 4.32'de sunulmuştur. Yapılan çözümler ile kritik derinlik y_c = 0.66 metre bulunmuştur. Kanal yatay eğime sahip olduğu için normal derinlik çizgisinin sonsuza gittiği kabul edilmektedir. Akım nehir rejiminde akmaktadır ve su yüzü profili H3 olarak belirlenmiştir. Kullanılan yöntemlerin sonuçları birbiriyle karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Tablo 4.29: Uygulama 8 için kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

y (m)	***x (m)***							
	Direk Adım Yöntemi	**Standart Adım Yöntemi**	**Euler Yöntemi**	**Heun Yöntemi**	**RK4 Yöntemi**	**Gauss Kareleme Yöntemi**	**Trapez İntegral Yöntemi**	**Referans Çözüm**
0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.33	2.80	2.80	2.84	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83
0.35	4.67	4.67	4.72	4.70	4.71	4.71	4.71	4.71
0.37	6.51	6.51	6.59	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56
0.40	9.21	9.21	9.34	9.26	9.27	9.27	9.27	9.27
0.43	11.79	11.79	12.00	11.86	11.87	11.87	11.87	11.87
0.45	13.45	13.45	13.69	13.52	13.53	13.53	13.53	13.53
0.50	17.17	17.17	17.73	17.26	17.29	17.29	17.29	17.29
0.55	20.21	20.21	21.18	20.29	20.34	20.34	20.34	20.34
0.60	22.32	22.32	23.80	22.37	22.44	22.44	22.44	22.44

Tablo 4.30: Uygulama 8 için Referans çözümü ile diğer çözümler arasındaki mutlak hata

y (m)	*x (m)*						
	Direk Adım Yöntemi Mutlak Hata	**Standart Adım Yöntemi Mutlak Hata**	**Euler Yöntemi Mutlak Hata**	**Heun Yöntemi Mutlak Hata**	**RK4 Yöntemi Mutlak Hata**	**Gauss Kareleme Yöntemi Mutlak Hata**	**Trapez İntegral Yöntemi Mutlak Hata**
0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.33	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.35	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.37	0.05	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
0.40	0.06	0.06	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00
0.43	0.08	0.08	0.13	0.01	0.00	0.00	0.00
0.45	0.08	0.08	0.17	0.01	0.00	0.00	0.00
0.50	0.12	0.12	0.45	0.03	0.00	0.00	0.00
0.55	0.13	0.13	0.84	0.05	0.00	0.00	0.00
0.60	0.12	0.12	1.36	0.07	0.00	0.00	0.00
ε_{tm}	**0.70**	**0.70**	**3.06**	**0.19**	**0.00**	**0.00**	**0.00**

Uygulama 8 için yapılan referans çözümünde y derinlik değerleri bir milimetre artacak şekilde 301 nokta alınarak elde edilmektedir. Tablo 4.31'de ise referans çözümü için sadece diğer yöntemlerde kullanılan y derinlikleri verilmektedir. Toplam mutlak hata değerlerine bakıldığında trapez integral, Gauss kareleme ve dördüncü mertebeden Runge-Kutta yönteminin referans çözüm ile bire bir aynı çözümü verdiği görülmektedir. Çok kötü olmamakla birlikte en kötü çözümü yine Euler yönteminin verdiği söylenebilir.

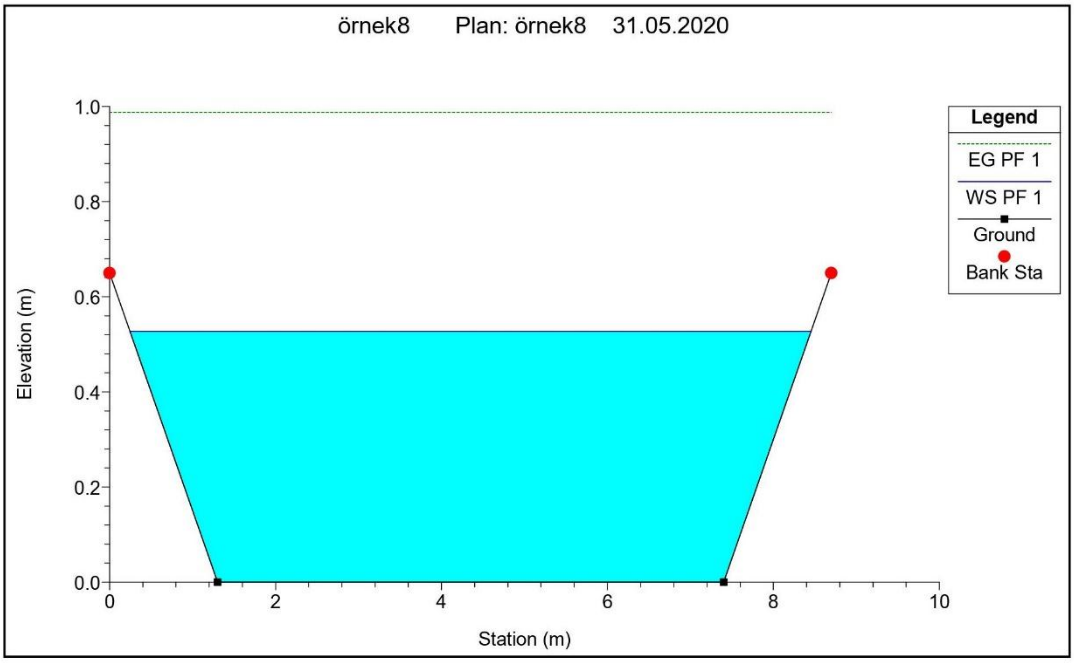
Tablo 4.31: Uygulama 8 için HEC-RAS yardımıyla elde edilen sonuçlar

HEC-RAS Plan: örnek Reach: 8 Profile: PF1											
River Sta	Profile	Q Total	Min.Ch.El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
		m^3/m	m	m	m	m	m/m	m/s	m^2	m	
9	PF1	11.33	0	0.3	0.65	1.92	0.113842	5.64	2.01	7.3	3.43
8	PF1	11.33	0	0.32	0.65	1.71	0.089439	5.22	2.17	7.39	3.07
7	PF1	11.33	0	0.35	0.65	1.48	0.064875	4.7	2.41	7.52	2.65
6	PF1	11.33	0	0.39	0.65	1.28	0.04507	4.18	2.71	7.67	2.24
5	PF1	11.33	0	0.41	0.65	1.22	0.038508	3.97	2.86	7.75	2.09
4	PF1	11.33	0	0.44	0.65	1.13	0.03025	3.67	3.09	7.87	1.87
3	PF1	11.33	0	0.48	0.65	1.06	0.023524	3.37	3.36	8	1.66
2	PF1	11.33	0	0.5	0.65	1.02	0.019853	3.19	3.55	8.1	1.54
1	PF1	11.33	0	0.53	0.65	0.99	0.016565	3	3.77	8.21	1.42
0	PF1	11.33	0	0.58	0.65	0.95	0.011897	2.69	4.21	8.42	1.22

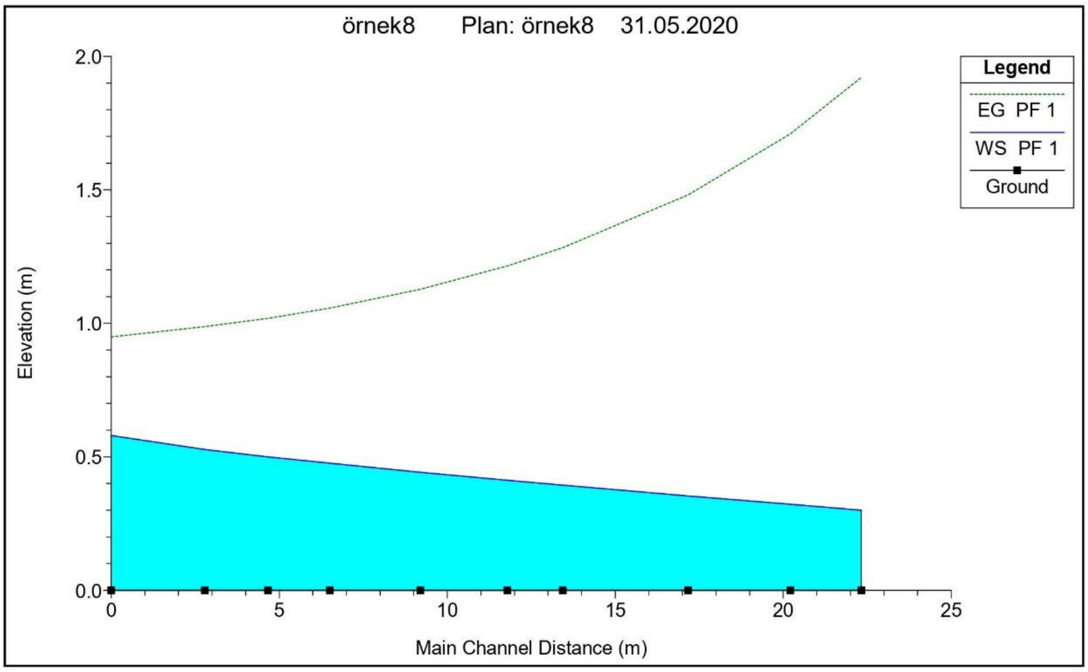
Tablo 4.32: Uygulama 8 için HEC-RAS ile mesafelere göre derinlik değerleri

Δx	x	y
0.00	0.00	0.30
2.80	2.80	0.32
1.87	4.67	0.35
1.84	6.51	0.39
2.69	9.21	0.41
2.59	11.79	0.44
1.65	13.45	0.48
3.73	17.17	0.50
3.04	20.21	0.53
2.11	22.32	0.58

Tablo 4.29'da mesafelere göre derinlikler verilmiştir. Kullanılan yöntemler ile karşılaştırıldığında küçük farklılıkların olduğu görülmektedir. Aşağıda görülen şekil 4.31'de herhangi bir noktadaki kanal en kesit görünümü verilmiştir. Şekil 4.32'de su yüzü profilinin görünüşü verilmektedir.



Şekil 4.31: Uygulama 8 için HEC-RAS programından alınan en kesit



Şekil 4.32: Uygulama 8 için HEC-RAS programından alınan su yüzü profili

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada tedrici değişen akımın prizmatik kanallarda oluşturduğu farklı su yüzü profilleri, farklı yöntemler ile belirlenmeye çalışılmıştır. Su yüzü diferansiyel denklemi kullanılarak belirli derinlikler için Δx mesafeleri bulunmuştur. Her örnek için birden fazla yöntem kullanılmış ve bunun için MATLAB programı yardımı ile algoritmalar oluşturulmuştur. Bu algoritmalar ile elde edilen sonuçlar HEC-RAS programı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. HEC-RAS programında belirli Δx mesafeleri ile derinlikler belirlenmiştir. Program çözüm yaparken standart adım yöntemini kullandığı için standart adım yöntemi ile elde edilen Δx mesafeleri kullanılmıştır. Bu Δx mesafelerine göre belirlenen y derinlikleri karşılaştırılmış ve örneklerin çoğunda aynı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. HEC-RAS program çözümleri ile MATLAB algoritma çözümlerinin aynı olması, algoritmanın doğru çalıştığına ve güvenilir sonuçlar verdiğine işaret etmiştir.

Derinlikler arasındaki adım boyu yaklaşık sonuçlar için önemli bir yer kapladığından, adım boyutu seçiminin dikkat edilmesi gereken bir unsur olduğu bilinmektedir. Derinlikler seçilirken bu unsur göz önünde bulundurulmuş ve bazı örnekler için başlangıç mesafesine yakın yerlerde adım boyutu daha yüksek seçilirken, başlangıç noktasına olan mesafe arttıkça adım boyutu küçültülmüştür. Böylece daha hassas bir çözüm elde etmeye çalışılmıştır. HEC-RAS programı ile belirli mesafelerdeki derinlikler bulunabilmekte ve bulunan mesafelerin derinlikleri ile su yüzü profilinin şeklini oluşturabilmektedir. HEC-RAS programında en önemli unsurlardan biri programa sınır koşullarını doğru tanımlanmasıdır. Memba kısmından suyun nasıl geldiğini ve mansap kısmından suyun nasıl geçeceğini doğru tanımlama su yüzü profilinin şekli için önem arz etmektedir. HEC-RAS programı standart adım yöntemi kullanarak çözüm yapmaktadır. Bu nedenle çözümlerin direk adım yöntemi ve standart adım yöntemi ile çok yakın olduğu görülmüştür.

Yapılan uygulamalar için yöntemlerin sonuçları kendi aralarında karşılaştırıldığında, standart adım yöntemi ile direk adım yönteminin birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği; dördüncü mertebeden Runge-Kutta, trapez integral ve Gauss kareleme yöntemlerinin birbirleri ile çok yakın sonuçlar verdiği ve en uzak çözümü

Euler yönteminin verdiği gözlenmiştir. Düzeltilmiş Euler yöntemi olarak bilinen Heun yöntemi, Euler yöntemiyle bulunan sonuçları düzelterek diğer yöntemlerin sonuçlarına yaklaştırmıştır.

Elde edilen çözümlerin doğruya ne kadar yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemek için bir referans çözümü elde edilmiştir. Bu çözümün temeli nokta sayıları arasındaki mesafenin çok küçük seçilmesine dayanmaktadır. Uygulama 1,2,3,4,5 ve 6 için y derinlikleri arası bir santimetre, uygulama 7 ve 8 için ise bir milimetre alınarak çözüm yapılmıştır. Toplam mutlak hata değerlerine bakılarak yapılan kıyaslamada; trapez integral yönteminin her uygulama için referans çözümle aynı ya da çok yakın sonuç verdiği, dördüncü mertebeden Runge-Kutta yöntemi ile Gauss kareleme yönteminin 3 uygulama için en yakın sonucu verdiği, direk adım ve standart adım yöntemlerinin sadece uygulama 7'de en yakın sonucu verdiği ve Euler yönteminin her uygulama için en kötü sonucu verdiği görülmektedir. Euler yönteminde diğer yöntemlere nazaran daha fazla kesme hatası oluşmaktadır. Bu yüzden diğer yöntemlere göre daha kötü sonuç vermesi beklenilen bir durumdur. Bununla birlikte nokta sayısının arttığı uygulamalarda Euler yönteminin de referans çözüme yaklaştığı söylenebilmektedir. Sonuç olarak tüm uygulamalar göz önünde tutulduğunda prizmatik kanallarda su yüzü profilinin belirlenmesinde en etkili ve en güvenilir yöntemin trapez integral yöntemi olduğu söylenebilmektedir.

6. KAYNAKLAR

Baril, G.J. and Drogin, G., "Computational Hydraulics - The Systems Approach”, *National Coference on Hydraulic Engineering*, pp. 779–784, (1993).

Barutçular, S., "Açık Kanallarda Yavaş Değişen Su Yüzeyi Profilleri Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Diyarbakır, (1999).

Birsoy, O., "Water Surface Profiles in Compound Channels", Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara, (2002).

Chaudhry, M. H., "Gradually Varied Flow", *Open-Channel Flow*, ABD: Springer Science, (1993).

Chow, V. T., "Gradually Varied Flow", *Open Channel Hydraulics*, New York: McGraw-Hill Book Company, (1959).

Das, M. M., "Gradually Varied Flow", *Open Channel Flow*, New Delhi: PHI Learning PVT LTD, (2008).

Demirel, E., "Prizmatik Kanallarda T.D.A. Su Yüzü Profillerinin Bilgisayar Destekli Hesabı", Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2002).

Fread, D.L. and Harbaugh, T.E., “Open Channel Profiles by Newton’s Iteration Technique”, *Journal of Hydrology,* 13, pp. 70–80, (1971).

Hu, W. W., “Water Surface Profile for Horseshoe Tunnel”, *ASCE Transportation Engineering Journal*, 106(2), pp. 133–139, (1980).

Ilhan, M. H., "Computation of Flow Over Vertically Curved Channels", Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1994).

Kaçmaz, A., "Açık Kanal Su Yüzü Profil Hesabının Newton-Raphson ile Çözümü ve Bilgisayar Programı Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, (2018).

Karaboğa, N., *Sayısal Yöntemler ve Matlab Uygulamaları*, İstanbul: Nobel Akademik Yayıncılık, (2000).

Kumar, A., *Proceedings of the ICE,* Sheffield: ICE, pp. 435–452, (1979).

Molinas, A. and Yang, C.T., "Generalized Water Surface Profile Computations", *Journal of Hydraulic Enineering*, 111(3), pp. 381–397, (1985).

Öztürkmen, G., "Açık Kanallarda Su Yüzü Profillerinin Farklı Hidrolik Koşullar Altında Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, (2008).

Paine, G.J. and Drogin, G., "Open-Channel Flow Algorithm in Newton-Raphson Form", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(2), pp. 306–319, (1992).

Ponce, V. M. and Lohani, A. and Shetty, A. V., "New Perspective on Water-Surface Profiles Using Critical Slope", Bachelor Thesis, *San Diego State University,* San Diego, (2002).

Ünsal, İ., *Değişken Akımların Hidroliği*, İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi, (1978).

Vatankhah, A. R., "Direct Integration of Manning-based GVF Equation in Trapezoidal Channels", *ASCE Journal of Hydraulic Division*, 22, pp. 235–41, (2011).

Wilson, E. H., "Surface Profiles in Non-Prismatic Rectangular Channels", *Water Power*, v 21, n 11, p 438-43, (1969).

Yao, K. M., "Non-uniform Flow in Flat Rectangular Channels", *ASCE Journal of Hydraulic Division*, 97, pp. 1343–1348, (1971).

Yazıcılar, F., "Water Surface Profile Cmputations in Floodplain Channels", Yüksek Lisans Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara, (1997).

Zaghloul Nabil, A. and Darwish, A. Y., "Solution of Gradually Varied Flow Problems Using The Direct Step Method with the IBM PC Lotus 1-2-3 System", *Environmental Software*, 2(4), pp. 199–206, (1987).

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:	Ezgi ACAR
Doğum Yeri ve Tarihi	:	01.01.1997/DENİZLİ
Lisans Üniversite	:	Pamukkale Üniversitesi
Elektronik posta	:	ezgi.acar20@gmail.com
İletişim Adresi	:	Fatih mahallesi 1926 sokak no 11 kat 3 DENİZLİ\PAMUKKALE