

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜNİFORM OLMAYAN AKIMLARDA SU YÜZEYİ
PROFİLLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
ARAŞTIRILMASI**

Oğuzhan ESATOĞLU

Ekim, 2022

İZMİR

ÜNİFORM OLMAYAN AKIMLARDA SU YÜZEYİ PROFİLLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik-Hidroloji ve Su Kaynakları

Programı

Oğuzhan ESATOĞLU

Ekim, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

OĞUZHAN ESATOĞLU, tarafından **PROF. DR. BİROL KAYA** yönetiminde hazırlanan **“ÜNİFORM OLMAYAN AKIMLARDA SU YÜZEYİ PROFİLLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından **“Yüksek Lisans Tezi”** olarak kabul edilmiştir.

.....

Prof. Dr. Birol KAYA

Yönetici

Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Gökçen BOMBAR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecinde hem akademik hem de sosyal açıdan gelişimime bilgi, tecrübe ve birikimleriyle katkı sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Birol KAYA' ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarda bilgi ve birikimlerinden yararlandığım değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Mustafa DOĞAN, Sayın Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY ve Öğr. Gör. Dr. Yalçın ÖZDEMİR' e, deneyler sırasındaki teknik desteklerinden dolayı İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı Teknisyeni İsa ÜSTÜNDAĞ' a teşekkür ederim.

Tez sürecinde her daim yanımda olan ve manevi destekleriyle bana güç veren başta annem Nesrin ESATOĞLU olmak üzere, sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarını, 2020.KB.FEN.027 numaralı proje ile destekleyen Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' ne teşekkür ederim.

Oğuzhan ESATOĞLU

ÜNİFORM OLMAYAN AKIMLARDA SU YÜZEYİ PROFİLLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Tez kapsamında, üniform olmayan akımlarda su yüzeyi profilleri hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan 9,2 m uzunluğa, 25 cm genişliğe ve 24 cm yüksekliğe sahip dikdörtgen kesitli prizmatik açık kanal deney düzeneği kullanılmıştır. Çeşitli su yüzeyi profili tiplerini oluşturabilmek için deney düzeneğinin eğimi değiştirilebilir hale getirilmiştir. Ayrıca, profillerin oluşumu amacıyla kanal membasında kapak mansabında ise eşik kullanılmıştır.

Farklı debi ve eğimlerde su yüzeyi profillerinin oluşturulmasının ardından, bu profillerin sayısal çözümleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümler, MATLAB paket programıyla yapılmıştır. Sayısal çözüm kapsamında; Euler Yöntemi, Geliştirilmiş Euler Yöntemi, Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi, Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi, Standart Adım Yöntemi, Doğrudan Adım Yöntemi ve Diferansiyel Kuadratur Yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmadan alınan başlangıç koşulu kullanılarak yapılan sayısal çözümler neticesinde elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve hangi yöntemin mevcut profil açısından daha gerçekçi ve hızlı sonuç verdiği tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Açık kanal akımları, tedrici değişken akımlar, fiziksel model, sayısal analiz

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF WATER SURFACE PROFILES IN NONUNIFORM FLOWS

ABSTRACT

Within the scope of the thesis, water surface profiles in nonuniform flows were investigated both experimentally and numerically. For this purpose, a rectangular cross-section prismatic open channel experimental setup with a length of 9.2 m, a width of 25 cm and a height of 24 cm, located in the Hydraulics Laboratory of the Department of Civil Engineering of Dokuz Eylul University was used. In order to create various water surface profile types, the slope of the experimental setup has been made changeable. In addition, for the formation of profiles, a threshold was used at the upstream of the channel and a gate at the downstream of the channel.

After the water surface profiles were created at different flow rates and slopes, numerical solutions of these profiles were carried out. Numerical solutions were made with the MATLAB package program. Within the scope of numerical solution; Euler Method, Improved Euler Method, Modified Euler Method, Fourth Order Runge Kutta Method, Standard Step Method, Direct Step Method and Differential Quadrature Method were used. The outcomes obtained as a result of numerical solutions made by using the initial condition obtained from the experimental study were compared with the experimental data and it was discussed which method gave more realistic and faster results in terms of the current profile.

Keywords: Open channel flows, gradually varied flows, physical model, numerical analysis

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xv
BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ – MEVCUT ÇALIŞMALAR.....	3
BÖLÜM ÜÇ – AÇIK KANAL AKIMLARI.....	12
3.1 Açık Kanalların Geometrik Elemanları.....	12
3.2 Akımların Sınıflandırılması.....	14
3.2.1 Kararlı ve Kararsız Akımlar.....	14
3.2.2 Üniform ve Üniform Olmayan Akımlar.....	15
3.2.3 Tedrici Değişken ve Hızlı Değişken Akımlar.....	15
3.3 Hız Dağılımı.....	17
3.4 Enerji.....	19

3.4.1 Özgöl Enerji.....	20
3.5 Kararlı Üniform Akım Temel Denklemleri.....	25
3.6 Üniform Olmayan Akım.....	30
3.6.1 Tedrici Değişken Akım.....	30
3.6.1.1 Tedrici Değişken Akımın Diferansiyel Denklemleri.....	31
3.6.2 Su Yüzeyi Profillerinin Sınıflandırılması.....	33
BÖLÜM DÖRT – SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ.....	39
4.1 Euler Yöntemi.....	39
4.2 İyileştirilmiş Euler Yöntemi.....	41
4.3 Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi.....	43
4.4 Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi.....	44
4.5 Doğrudan Adım Yöntemi.....	45
4.6 Standart Adım Yöntemi.....	46
4.7 Diferansiyel Kuadratur Yöntemi.....	50
4.7.1 Quan ve Chang Yaklaşımı.....	51
4.7.2 Grid Noktası Dağılımları.....	52
4.7.2.1 Chebyshev- Gauss- Lobatto Grid.....	52
4.7.2.2 Chebyshev Grid.....	53
4.7.2 Çözüm için Ters Matris Yöntemi.....	53

BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....55

5.1 Deney Düzenegi.....	55
5.2 Ölçüm Cihazları.....	57
5.2.1 Ultralab ULS Cihazı.....	58
5.2.2 Limnimetre.....	59
5.2.3 Nivelman ve Mira.....	61
5.2.4 Elektromanyetik Debimetre.....	63
5.3 Su Yüzeyi Profillerinin Deneysel Olarak Oluşturulması.....	64
5.3.1 Küçük Eğimli Kanallarda Su Yüzeyi Profillerin Deneysel Olarak Oluşturulması.....	64
5.3.1.1 M1 Profili.....	64
5.3.1.2 M2 Profili.....	66
5.3.1.3 M3 Profili.....	68
5.3.2 Büyük Eğimli Kanallarda Su Yüzeyi Profillerin Deneysel Olarak Oluşturulması.....	69
5.3.2.1 S1 Profili.....	69
5.3.2.2 S3 Profili.....	71

BÖLÜM ALTI – SAYISAL MODEL SONUÇLARININ DENEYSEL BULGULARLA KARŞILAŞTIRILMASI.....73

6.1 Deneysel Bulgular.....	73
6.2 Deneysel Bulgular İle Sayısal Çözümlerin Karşılaştırılması.....	84

6.2.1 Karesel Ortalama Hata (KOH).....	84
6.2.2 Rölâtif Hata (RH).....	85
BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	130
KAYNAKLAR.....	133



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Açık kanal kesit elemanlarının şematik görünümü.....	12
Şekil 3.2 Farklı tür açık kanal akımları: (a) Üniform akım (b) Tedrici değişken akım ve (c) Hızlı değişken akım	16
Şekil 3.3 Farklı kanal kesitlerindeki hız dağılımı.....	17
Şekil 3.4 Akım hızının derinlikle değişimi.....	18
Şekil 3.5 Sabit birim genişlik debisi için özgül enerjinin derinlikle değişimi.....	22
Şekil 3.6 Su yüzeyi profillerinin sınıflandırılmasında kullanılan bölgeler.....	34
Şekil 3.7 Küçük eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri.....	36
Şekil 3.8 Büyük eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri.....	37
Şekil 3.9 Yatay kanallardaki su yüzeyi profilleri.....	37
Şekil 3.10 Ters eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri.....	38
Şekil 3.11 Kritik eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri.....	38
Şekil 4.1 Euler yönteminin geometrik açıklaması.....	41
Şekil 4.2 İyileştirilmiş Euler yönteminin geometrik açıklaması.....	42
Şekil 4.3 Modifiye edilmiş Euler yönteminin geometrik açıklaması.....	44
Şekil 5.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	56
Şekil 5.2 Deney düzeneği.....	57
Şekil 5.3 Ultralab ULS.....	59
Şekil 5.4 Derinlik ölçümünde limnimetrenin kullanımı.....	60
Şekil 5.5 Laboratuvarında bulunan ve derinlik ölçümünde kullanılan limnimetre.....	61

Şekil 5.6 Laboratuvarda bulunan ve kot ölçümünde kullanılan nivelman.....	62
Şekil 5.7 Laboratuvarda bulunan ve debi ölçümünde kullanılan elektromanyetik debimetre.....	63
Şekil 5.8 Deney düzeneğinin mansap kısmında bulunan ve düşey yönde hareket edebilen eşik.....	65
Şekil 5.9 Oluşturulan M2 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi.....	67
Şekil 5.10 Oluşturulan M3 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi.....	68
Şekil 5.11 Oluşturulan S1 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi.....	70
Şekil 5.12 Oluşturulan S3 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi.....	71
Şekil 6.1 Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı M1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	73
Şekil 6.2 Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı M1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	74
Şekil 6.3 Deneysel olarak oluşturulan 3 numaralı M1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	74
Şekil 6.4 Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	75
Şekil 6.5 Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	75
Şekil 6.6 Deneysel olarak oluşturulan 3 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	76
Şekil 6.7 Deneysel olarak oluşturulan 4 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	76
Şekil 6.8 Deneysel olarak oluşturulan 5 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	77
Şekil 6.9 Deneysel olarak oluşturulan 6 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	77
Şekil 6.10 Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	78

Şekil 6.11	Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	78
Şekil 6.12	Deneysel olarak oluşturulan 3 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	79
Şekil 6.13	Deneysel olarak oluşturulan 4 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	79
Şekil 6.14	Deneysel olarak oluşturulan 5 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	80
Şekil 6.15	Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	80
Şekil 6.16	Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	81
Şekil 6.17	Deneysel olarak oluşturulan 3 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	81
Şekil 6.18	Deneysel olarak oluşturulan 4 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	82
Şekil 6.19	Deneysel olarak oluşturulan 5 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	82
Şekil 6.20	Deneysel olarak oluşturulan 6 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	83
Şekil 6.21	Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı S3 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	83
Şekil 6.22	Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı S3 profilinin boy kesitsel gösterimi.....	84
Şekil 6.23	1 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	86
Şekil 6.24	1 numaralı M1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	86
Şekil 6.25	2 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	88

Şekil 6.26	2 numaralı M1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	88
Şekil 6.27	3 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	90
Şekil 6.28	3 numaralı M1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	90
Şekil 6.29	1 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	92
Şekil 6.30	1 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	92
Şekil 6.31	2 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	94
Şekil 6.32	2 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	94
Şekil 6.33	3 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	96
Şekil 6.34	3 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	96
Şekil 6.35	4 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	98
Şekil 6.36	4 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	98
Şekil 6.37	5 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	100
Şekil 6.38	5 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	100

Şekil 6.39	6 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	102
Şekil 6.40	6 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	102
Şekil 6.41	1 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	104
Şekil 6.42	1 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	104
Şekil 6.43	2 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	106
Şekil 6.44	2 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	106
Şekil 6.45	3 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	108
Şekil 6.46	3 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	108
Şekil 6.47	4 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	110
Şekil 6.48	4 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	110
Şekil 6.49	5 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	112
Şekil 6.50	5 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	112

Şekil 6.51	1 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	114
Şekil 6.52	1 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	114
Şekil 6.53	2 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	116
Şekil 6.54	2 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	116
Şekil 6.55	3 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	118
Şekil 6.56	3 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	118
Şekil 6.57	4 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	120
Şekil 6.58	4 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	120
Şekil 6.59	5 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	122
Şekil 6.60	5 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	122
Şekil 6.61	6 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	124
Şekil 6.62	6 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	124

Şekil 6.63	1 numaralı S3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	126
Şekil 6.64	1 numaralı S3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	126
Şekil 6.65	2 numaralı S3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	128
Şekil 6.66	2 numaralı S3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi.....	128



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Açık kanal geometrik elemanları ve tanımları.....	13
Tablo 3.2 Farklı tipteki prizmatik kanal kesitleri için geometrik elemanların matematiksel ifadeleri.....	14
Tablo 3.3 Farklı tipteki kanal kesitleri için α değerleri.....	19
Tablo 3.4 Açık kanallar için Manning pürüzlülük katsayıları.....	26
Tablo 3.5 Kanal taban eğimlerinin sınıflandırılması.....	34
Tablo 5.1 Deneysel olarak oluşturulan M1 profillerine ait deney koşulları.....	66
Tablo 5.2 Deneysel olarak oluşturulan M2 profillerine ait deney koşulları.....	67
Tablo 5.3 Deneysel olarak oluşturulan M3 profillerine ait deney koşulları.....	69
Tablo 5.4 Deneysel olarak oluşturulan S1 profillerine ait deney koşulları.....	70
Tablo 5.5 Deneysel olarak oluşturulan S3 profillerine ait deney koşulları.....	72
Tablo 6.1 1 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	87
Tablo 6.2 2 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	89
Tablo 6.3 3 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	91
Tablo 6.4 1 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	93
Tablo 6.5 2 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	95
Tablo 6.6 3 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	97

Tablo 6.7 4 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	99
Tablo 6.8 5 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	101
Tablo 6.9 6 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	103
Tablo 6.10 1 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	105
Tablo 6.11 2 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	107
Tablo 6.12 3 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	109
Tablo 6.13 4 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	111
Tablo 6.14 5 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	113
Tablo 6.15 1 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	115
Tablo 6.16 2 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	117
Tablo 6.17 3 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	119
Tablo 6.18 4 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	121
Tablo 6.19 5 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	123

Tablo 6.20 6 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	125
Tablo 6.21 1 numaralı S3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	127
Tablo 6.22 2 numaralı S3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri.....	129



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Yağışların yeryüzündeki alansal ve zamansal dağılımı farklılık göstermektedir. Bu sebeple, yağışların fazla olduğu zamanlarda depolanması sonraki dönemlerdeki su ihtiyaçlarının karşılanmasında büyük bir önem arz etmektedir. Bu amaçla, suyun depolanmasında baraj, bağlama gibi su yapıları kullanılmaktadır. Su yapılarının, ekonomik ve güvenilir olarak inşa edilmesi hidrolik mühendisliğinin önemli konularından biridir.

Su yapılarının tasarım aşamasında, üniform olmayan akımlarla özellikle yapının öncesinde ve sonrasında karşılaşılmaktadır. Yapılara etki eden su yüzeyi profilini belirlemek yapıyı hem güvenilir hem de ekonomik olarak inşa edebilmek için önemlidir. Bu kapsamda, tedrici değişken akımlar için doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemi belirli başlangıç koşulu altında sayısal biçimde çözerek, konuma bağlı su yüzeyi kotlarını böylelikle de su yüzeyi profilini belirlemek gerekmektedir. Bahsi geçen denklemin sayısal çözümü için literatürde farklı yöntemler uygulanmakta olup, her biri farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Dolayısıyla, elde edilen sayısal çözümlerde farklılık göstermektedir. Yapılan çözümlerin doğru olması daha önceden de bahsedildiği gibi tasarım aşamasında büyük bir öneme sahiptir.

Tez kapsamında, seçilen sayısal yöntemlerin sıklıkla karşılaşılan su yüzeyi profillerinin sayısal çözümünde ne ölçüde doğru sonuç verdiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Karşılaştırmaları doğru bir şekilde gerçekleştirmek için sahadan alınan verilere gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan dikdörtgen kesitli deney düzeneğinde çeşitli değişiklikler gerçekleştirilerek farklı su yüzeyi profilleri oluşturulmuştur. Oluşturulan su yüzeyi profillerinden ölçüm yoluyla alınan veriler kullanılarak, MATLAB paket programında sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan sayısal çözümlerle deneysel bulgular karşılaştırılarak, yöntemlerin doğruluk derecesi ve birbirlerine karşı üstünlüğü tartışılmıştır. Tez kapsamında M1, M2, M3, S1 ve S3 türündeki su yüzeyi profilleri iki farklı eğim ve üç farklı debi için gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözüm için seçilen yöntemler ise Euler Yöntemi, Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi, Geliştirilmiş Euler Yöntemi, Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi, Standart Adım Yöntemi, Doğrudan Adım Yöntemi ve Diferansiyel Kuadratur Yöntemidir.



BÖLÜM İKİ

MEVCUT ÇALIŞMALAR

Çalışmanın konusu, üniform olmayan akımlarında su yüzeyi profillerinin deneysel ve sayısal araştırılması olup üniform olmayan kararlı açık kanal akımlarını kapsamaktadır. Konuyla ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bazıları doğal açık kanallarla ilgiliyken bazıları ise yapay açık kanallarla ilgili olmuştur. Bununla birlikte bu alanda yapılan çalışmaları durum tespitine yönelik çalışmalar ve modellemeye yönelik çalışmalar olarak da sınıflandırmak mümkündür. Günümüzde teknolojinin de gelişmesine paralel olarak su yüzeyi profilleri HEC-RAS, Flow3D gibi programlarla belirlenebilmektedir. Fakat, bu programlar da çözüm yaparken çeşitli sayısal yaklaşımlar kullandığından bir miktar hatayla sonucu vermektedir. Konu özelinde daha iyi bir sayısal çözüm yöntemi için araştırmalar devam etmektedir. Aşağıda konuyla ilgili yapılan çalışmalar özet halinde sunulmuştur.

Wilson (1969), bir akımın analiz edilmesinin ancak su yüzeyi eğimi ile derinlik arasındaki korelasyonun bilinmesiyle mümkün olacağını belirterek bu amaca yönelik bir dizi prizmatik olmayan dikdörtgen kesitli açık kanalı deneysel olarak inceleyerek bu kanallar için su yüzeyi profillerini araştırmıştır.

Fread ve Harbaugh (1971), kararlı tedrici değişen akımlarda su yüzeyi profilinin Newton-Raphson Yöntemi ile çözülebileceğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda trapez kesitli bir açık kanal için Fortran IV dilinde bir program geliştirmişlerdir.

Tavener (1973), akarsularda tedrici değişken akımın kabarma profillerine ait hesaplamalarda gerçek akım durumlarından meydana gelen sapmaların kaynağının adım yöntemlerinde kullanılan temsili enerji çizgisi eğiminden ve hesap adım aralığından kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Bu amaçla, birkaç problem üzerinde temsili eğimi ifade eden değişik formülasyonları kullanmış ve hesap adım aralığı için

hata değerini minimize eden bir teorik bağıntı geliştirerek farklı profil tipleri için hangi temsili enerji çizgisi formülasyonun daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuştur.

Hu (1980), USBR standardında bir at nalı tünel için su yüzeyi profilini hesaplayan yöntem geliştirmiştir. Yöntem enerji denkleminin doğrudan entegrasyonunu kullanmaktadır. Yazar geliştirmiş olduğu çalışmayı örneklerle açıklayarak bir izelge halinde çalışmasında sunmuştur.

Schaefer (1985), prizmatik olmayan kanallarda su yüzeyi profilini Standart Adım Yöntemi ile hesaplayan BAKWATR isimli bir program geliştirmiştir. Bu program vasıtasıyla, yalnızca kritikaltı rejime sahip su yüzeyi profilleri hesaplanabilmektedir. Yazar, programın yeterli sonuçlar verdiğini kontrol etmek amacıyla Chow (1959), yayınından bir örnek problem seçmiş ve mevcut sonuçlar ile birlikte HEC-2 paket programından elde ettiği sonuçları, geliştirdiği programın sonuçlarıyla karşılaştırmıştır.

Zaghloul ve Darwish (1987), tedrici değişken akımlar için doğrudan adım yöntemini kullanarak Lotus 1-2-3 tabanlı bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Bu program sayesinde normal derinlik, kritik derinlik ve tedrici değişen akım derinliği bulunmaktadır. Ayrıca, program akım profilinin türünü de belirleyerek kanal boy kesiti boyunca derinlikleri bir tablo haline getirmektedir.

Paine (1992), kararlı üniform olmayan tedrici değişen akımlarda su yüzeyi profilinin çözümü için en kabul gören yöntemin standart adım yöntemi olduğunu belirtmiştir. Standart adım metodunda çok fazla girdi olması sebebiyle bu eksikliği giderebilmek için yeni bir algoritma geliştirmiştir. Newton-Raphson yöntemi temelinde oluşturulan bu algoritmanın kritik, kritik altı, kritik üstü, yatay ve ters eğimli kanallara uygun olduğunu belirtmiştir. Ayıca yazar, kararlı akım durumu için bu algoritmayı kullanan bir bilgisayar programı yazmıştır.

Zaghloul (1992), dairesel kesitli prizmatik açık kanallarda değişken pürüzlülük katsayısının tedrici değişken akım için su yüzeyi profilinin hesabına olan etkisini incelemiştir. Bu amaçla, Camp (1946) tarafından deneysel olarak belirlenen derinliğe bağlı Manning pürüzlülük katsayısının değişimi göz önüne alınmıştır. Sayısal çözüm için değişken Manning pürüzlülük katsayısı göz önüne alınarak, Doğrudan Adım yöntemi modifiye edilmiştir. Ek olarak sayısal çözümde su yüzeyinin diferansiyel denklemi sayısal olarak Simpson Kuralı ile entegrasyonu kullanılmıştır. Yazar, sözü geçen yöntemlerle çözümü gerçekleştirebilen Lotus 1-2-3 tabanlı bir program geliştirmiştir. Bu program ,12 adet su yüzeyi profili için hesap yapılabilme ve normal derinlik, kritik derinlik ile su yüzeyinin yer aldığı bir çizim gerçekleştirebilmekteydi. Her iki yöntem için değişken ve sabit Manning pürüzlülük katsayısı için örnek bir problem üzerinde çözüm gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tablolar ile grafikler halinde sunulmuştur.

Zaghloul ve Shanin (1993), dairesel kesitli prizmatik kanallar için tedrici değişken akım profillerini Doğrudan Adım Yöntemi ile hesaplayan Lotus 1-2-3 tabanlı bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Program, bütün akım profilleri için çözüm yaparak sonuçları hem grafik hem de tablo halinde sunabilmektedir.

Rhodes (1995), tedrici değişken akımlarda su yüzeyi profilini hesaplamak için kullanılan standart adım yönteminde çözümü Newton-Raphson sayısal yöntemi ile belirlemiştir. Yazar, enerji denklemi eşitliğinden yararlanan bu yöntemde sürekli enerji kaybını belirlemekte kullanılan enerji çizgisi eğimini, Manning denklemi yardımıyla ifade etmiştir. Ayrıca, çalışmada en kesit geometrisine ilişkin herhangi bir kabul yapılmadığından aynı konu üzerinde Paine (1992)' nin yaptığı çalışma daha genel en kesit şekillerine uygulanabilir hale getirilmiştir.

Rhodes (1998), trapez kesitli prizmatik kanallarda tedrici değişken akımlar için su yüzeyi denkleminin çözümünü Standart Adım Yöntemi ile Newton-Raphson sayısal

yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir. Denklemden mevcut enerji çizgisi eğimini ise Chezy, Manning ve Colebrook-White akış direnci formülasyonlarıyla ifade etmiştir.

Dubin (1999), yapmış olduğu çalışmada sabit debi, sabit manning pürüzlülük katsayısı ve küçük boyuna eğime sahip dikdörtgen kesitli prizmatik kanallar için su yüzeyinin diferansiyel denklemini polinom yaklaşımı ile dönüştürerek cebirsel çözümünü elde etmiştir. Yeni yöntem ile elde ettiği sonuçları adım yöntemi ile karşılaştırarak yeterli sonuçlar elde etmiştir.

Dey (2000), yapmış olduğu çalışmasında standart adım yöntemi ile su yüzeyi profillerinin çözümü için Chebyshev yaklaşımını kullanmış, enerji çizgisinin eğimi Chezy, Colebrook-White ve Manning denklemleriyle hesaplamıştır. Yöntemin daha önceden tedrici değişken akımların su yüzeyi profillerini elde etmek için kullanılan Newton-Raphson yöntemine göre daha az iterasyonla sonuca ulaştığını belirtmiştir.

Demirel ve Tozluk (2002), su yüzeyi denkleminin çözümü için Euler metodunu kullanarak çözüm için gerekli adım sayısının ne olması gerektiğini araştırmışlardır. Çalışmada önceden belirlenen hata miktarını aşmayacak adım sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Birsoy (2002), birleşik kanallarda su yüzeyi profillerini bulabilmek için bir Froude sayısı tanımlamış, enerji ve momentum eşitlikleri ile birleştirmiştir. Hesapları kolaylaştırmak amacıyla C++ dilinde yazılmış bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Yapmış olduğu hesaplamaları karşılaştırmak amacıyla laboratuvarında M2 tipinde su yüzeyi profili oluşturup yapmış olduğu hesaplamalarla karşılaştırdığında programın vermiş olduğu değerlerin olması gerekenden daha fazla olduğunu görmüştür. Bunu hesaplamalar esnasında yapılan kabullere dayandırarak açıklamıştır.

Swamee (2003), kararlı tedrici değişken akımlar için su yüzeyi denklemini boyutsuz formda ifade ederek, dar ve geniş dikdörtgen kesitli kanallar ile üçgen kesitli pozitif ve yatay eğimli kanallarda akım profillerinin uzunluğunu analitik ve sayısal olarak araştırmıştır. Sayısal zm Gauss-Chebyshev kuadratur yöntemi ile belirlemiş, çözüm neticesinde elde ettiği sonuçları cebirsel olarak ifade etmiştir. Analitik ve sayısal çözüm neticesinde elde ettiği bu formülasyonların nasıl kullanılacağını iki adet pratikte karşılaşılan problem üzerine uygulayarak göstermiştir.

Venutelli (2004), su yüzeyi profilinin diferansiyel denklemini geniş dikdörtgen kanallar için doğrudan integre ederek, küçük ve büyük eğimli kanallardaki su yüzü profillerine yöntemi uygulamış ve sonuçları, Bresse yöntemiyle çözüm neticesinde elde edilen sonuçlarla kıyaslamıştır.

Spena ve diğerleri (2007), kritik derinlikten geçen su yüzeyi profillerinin hesabında birinci mertebeden adi diferansiyel su yüzeyi denkleminin kullanılmasıyla elde edilen sonuçların bu denklemin çıkarılmasında ortaya konulan varsayımlar sebebiyle gerçek durumdan farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple, kritik derinlikten geçen su yüzeyi profillerinin hesabında Boussinesq yaklaşımı kullanılarak elde edilen üçüncü mertebeden adi diferansiyel su yüzeyi denklemin sayısal çözümünü iki farklı eğime sahip kanaldan oluşan prizmatik kanal sisteminin eğimlerinin ani veya tedrici değişmesi durumu için gerçekleştirmiş, elde ettikleri çözümleri birinci merteden adi diferansiyel su yüzeyi denkleminin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Bu yaklaşımının gerçek durumu daha iyi açıkladığını ifade etmişlerdir.

Gnal ve zcan (2008), Visual programlama dilinde kararlı tedrici değişken akımlar için su yüzeyi profilini Geliştirilmiş Euler Yöntemi ile hesaplayan bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Bu program, verilen başlangıç koşulu ve kanal özelliklerine göre, akımın profil tipini belirleyerek, kanal uzunluğu boyunca su yüzeyi profilini grafiksel olarak çizme kabiliyetine sahiptir. Yazarlar, programın çalışma

sistematikliğini göstermek amacıyla, trapez kesitli bir kanal örneği üzerinde çözüm yaparak, sonuçları grafiksel olarak sunmuşlardır.

Öztürkmen (2008), sabit debi ve sabit taban eğimine sahip açık kanalda 12 farklı taban eşiği ile açık kanalın memba ve mansabında meydana gelen su yüzeyi değişimlerini incelemiştir. Çalışmanın sonucunu grafik ve tablolar halinde sunmuştur.

Kaya (2010), yapmış olduğu çalışmada, tedrici değişken akımların diferansiyel denkleminin çözümü için diferansiyel kuadratur metodu trapez kesitli iki eğime sahip bir açık kanal örneği üzerine uygulayarak M ve S profillerini hesaplamıştır. Bu yöntem ile elde ettiği sonuçları Doğrudan Adım Yöntemi ile yapılan çözümlerle karşılaştırarak metodun diğer yöntemlere göre daha az hesap noktası gerektirerek hızlı ve gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini grafik ve tablolarla sunmuştur.

Vatankhah (2010), üçgen kesitli prizmatik kanallar özelinde enerji çizgisi eğiminin Manning denklemi ile temsil edildiği tedrici değişken akım denklemini boyutsuz parametreler cinsinden ifade ederek, denklemi analitik olarak entegre etmiştir. Analitik çözümü, küçük ve büyük eğimli kanal profillerine uygulayarak sonuçları grafiksel olarak sunmuştur. Yazar ayrıyeten yöntemin üçgen kesitli kanallarda, kanalın başı ve sonundaki derinlikler yardımıyla debi hesabında kullanılabileceğini de belirtmiştir. Bu durum, çalışmada örnek bir kanal üzerinde gösterilmiştir.

Kurnatowski (2011), sonsuz genişliğe sahip dikdörtgen kesitli açık kanalda kararlı tedrici değişken akım için derinlikleri Bresse tarafından geliştirilmiş analitik çözüm ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin entegrasyonunda kullanılan trapez kuralı yöntemleriyle hesaplamıştır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçları karşılaştırmış ve sayısal entegrasyon hatalarını minimize eden optimum entegrasyon adımının seçimi için bir yöntem sunmuştur.

Vatankhah (2011), parabolik kesitli açık kanallarda tedrici değişken akım durumunda su yüzeyinin diferansiyel denklemini, enerji çizgisinin eğimi ifadesi yerine Manning denklemini kullanarak, yarı analitik formda çözmüştür. Önerilen yöntem ile, tek bir adımda profil uzunluğu belirlenebilmektedir.

Vatankhah ve Easa (2011), genel dikdörtgen kesitli kanallar için enerji çizgisinin Manning denklemi ile ifade edildiği TDA denklemini analitik olarak entegre etmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımı ve Kumar (1978) tarafından geliştirilen çözüm yöntemi ile büyük ve küçük eğimli kanallardaki profil tipleri için çözümler gerçekleştirip, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu iki yöntem ile elde edilen sonuçların, 1 ve 2 bölgesinde mevcut olan profiller için birbirine yakın olduğunu; fakat 3 bölgesinde bulunan profil tipleri için aralarında önemli miktarda farklılıkların bulunduğu belirtilmiştir. Bunun sebebini yazar, Kumar (1978), tarafından geliştirilen yöntemde enerji çizgisinin eğimini Manning denklemine kıyasla daha basit bir yaklaşım olan Chezy denklemi ile ifade etmesine bağlamıştır.

Tuncer (2011), yapmış olduğu tez çalışması kapsamında HEC-RAS programını kullanarak İstanbul'da bulunan Nakkaş deresi uygulama alanında kaplamalı ve kaplamasız trapez kesitli kanal tasarlanması durumunda su yüzeyi profillerini hesaplamıştır. Ayrıca, Keulegan, Manning ve Üniversal yöntemlerle hesaplamış olduğu ortalama hızları Doğrudan Adım Yönteminde kullanarak su yüzeyi profillerini elde edip HEC-RAS programının sonuçları ile karşılaştırmasını yapmıştır.

Vatankhah (2011), trapez kesitli kanallarda tedrici değişken akım için su yüzeyi denklemini, enerji çizgisi eğimini Manning denklemi ile ifade ederek yarı analitik formda çözmüştür. Yazar, bu çözüm yönteminin akım profillerinin hesabında minimum hesaplama süresi ile doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Artichowicz ve Szymkiewicz (2014), kapalı formdaki diferansiyel enerji denkleminin başlangıç koşuluna ve adım aralığına bağlı olarak birden fazla kökünün olabileceğini belirterek bu durumu Lipschitz teoremini kullanarak incelemiş, örnek

problemlerin farklı başlangıç koşulları ve adım aralıkları için kapalı trapez yöntemi ile çözümünü yaparak bu durumu grafik halinde sunmuştur. Ayrıca, bu özellik kullanılarak kritik derinlikten geçen su yüzeyi profillerinin hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

Artichowicz ve Studnicka (2014), kararlı, tedrici değişen akımlarda su yüzeyi profillerinin adım yöntemleriyle hesabını yaparken, iki komşu kesit arasında belirlenmesi gereken enerji çizgisinin eğim değerini, literatürde daha önceden önerilen yaklaşımlar ve geleneksel yöntemlerle hesaplayarak, dört farklı su yüzeyi profili için sayısal çözümleri gerçekleştirmiş ve analitik çözümlerle karşılaştırmıştır. Yazarlar, sonuçları mühendislik pratiği ve sayısal yaklaşım açısından değerlendirerek, tablo ve grafikler halinde sunmuşlardır.

Damangir ve Abedini (2014), kararlı tedrici değişken akımlarda yalnızca derinlik ölçümü ile debi ve pürüzlülük katsayısı değerlerinin belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Bu amaçla, geniş dikdörtgen kesitli ve prizmatik olmayan kanal örneklerini göz önüne almış; geniş dikdörtgen kesitli kanal örneği için Bresse (1868) tarafından geliştirilen analitik çözüm; prizmatik kanal için ise su yüzeyinin diferansiyel denkleminin Euler yöntemi ile sayısal çözümü gerçekleştirilerek bu çözümleri gözlenmiş değerler olarak kabul etmişlerdir. Sonrasında, genetik algoritma kullanılarak bu çözümlere en yakın sonuç verecek en uygun debi ve pürüzlülük değer çifti belirlenebilmiştir. Yazarlar, böylelikle kararlı tedrici değişken akım durumu için hız ölçümüne gerek duyulmadan sadece derinlik ölçümü ile debinin belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

Vatankhah ve Easa (2014), dairesel enkesitli açık kanallarda su yüzeyinin diferansiyel denklemini boyutsuz parametreler cinsinden ifade ederek doğrudan çözümünü yapmış önerdikleri bu yöntemi örnek problem üzerine uygulayarak grafik halinde sunmuşlardır.

Vatankhah (2014), dairesel kesitli prizmatik kanallarda tedrici değişken akımlar için su yüzeyinin diferansiyel denklemini değişken Manning pürüzlülük katsayısı kullanarak yarı analitik olarak entegre etmiştir. Elde edilen yaklaşım, su yüzeyi profillerinin hesabını tek adımda gerçekleştirmektedir.

Altaş (2017), yapmış olduğu tez çalışması kapsamında daha önceden Öztürkmen (2008), tarafından farklı eşik türleri için deneysel olarak elde edilen su yüzeyi profilleri verilerini kullanarak Bulanık SMRGT yöntemiyle modellemesini yapmış elde ettiği sonuçları deneysel verilerle karşılaştırarak su yüzeyi hesaplamalarında yöntemin iyi sonuçlar verdiği sonucuna varmıştır.

Kaçmaz (2018), trapez kesitli tedrici değişen açık kanallar akımları için su yüzeyi profilini elde etmek amacıyla, Excel Makro altında çalışan visual basic programlama dilinde Newton-Raphson yöntemine dayanan bir algoritma oluşturarak örnek problemlere uygulayıp elde ettiği sonuçları Doğrudan Adım Yöntemi ile kıyaslamıştır.

Shahvand ve diğerleri (2021), parabolik ve dairesel kesitli kanallardaki tedrici değişken akımlar için su yüzeyinin denklemini Adomian dekompozisyon yöntemini kullanarak yarı analitik şekilde çözmüştür. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar, dairesel ve parabolik kesitli kanallar özelindeki birkaç örnek problem için sayısal sonlu fark yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yazar, Adomian dekompozisyon yöntemi ile elde edilen sonuçların sonlu farklarla elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmiştir.

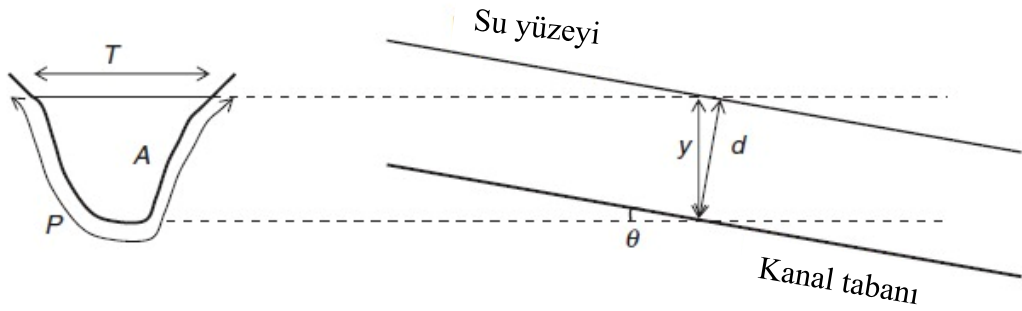
BÖLÜM ÜÇ

AÇIK KANAL AKIMLARI

Açık kanallar, yüzeyi atmosfere açık olan doğal veya insan yapımı su taşıyıcı yapılardır. Nehirler, akarsular ve ırmaklar açık kanallara örnek olarak verilebilmektedir. Açık kanal akımlarının önemli bir özelliği, serbest yüzeyine atmosfer basıncının etkimesidir. Açık kanal akımları, kapalı bir yüzeye sahip ortamlarda da oluşabilmektedir. Bu durumda kapalı ortamda açık kanal akışının oluşabilmesi için ortamın kısmi dolu olması şarttır. Menfezlerdeki ve kanalizasyon borularındaki akış bu duruma örnek olarak verilebilmektedir.

3.1 Açık Kanalların Geometrik Elemanları

Bir kanal kesiti, ana akım doğrultusunda dik şekilde alınan en kesit olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1' in referans alınması durumunda, bir açık kanalın geometrik elemanları aşağıdaki şekilde tanımlanır.



Şekil 3.1 Açık kanal kesit elemanlarının şematik görünümü (Akan, 2006)

Tablo 3.1 Açık kanal geometrik elemanları ve tanımları (Akan, 2006)

Geometrik Eleman Adı	Tanımı
Akım derinliği, y	Kanal tabanından serbest yüzeye olan düşey uzaklıktır.
Akım kesitinin derinliği, d	Kanal tabanına dik olarak ölçülen akım derinliğidir. d ve y arasındaki ilişki $d = y \cos \theta$ şeklindedir. Çoğu doğal ve yapay kanallar için $\cos \theta \approx 1$ olup, böylelikle iki terim birbirini yerine kullanılabilir.
Su yüzeyi genişliği, T	Kanal kesitinin serbest yüzeydeki genişliğidir.
Islak çevre, P	Kanal cidarı ve su arasındaki arayüzeyin uzunluğudur.
Islak alan, A	Akışın en kesit alanıdır.
Hidrolik derinlik, D	Islak alanın su yüzeyi genişliğine oranıdır. $D = A/T$
Hidrolik yarıçap, R	Islak alanın, ıslak çevreye oranıdır. $R = A/P$
Taban eğimi, S_0	Kanal tabanının boyuna eğimidir. $S_0 = \tan \theta \approx \sin \theta$

Prizmatik kanallarda, farklı en kesit türleri için açık kanal geometrik elemanlarının ifadeleri, Tablo 3.2’ de sunulmuştur.

Tablo 3.2 Farklı tipteki prizmatik kanal kesitleri için geometrik elemanların matematiksel ifadeleri

Kesit tipi	Islak alan	Islak çevre	Hidrolik yarıçap	Su yüzeyi genişliği	Hidrolik derinlik
Dikdörtgen	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y
Trapez	$(b + my)y$	$b + 2y\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{(b + my)y}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}}$	$(b + 2my)$	$\frac{(b + my)y}{b + 2my}$
Üçgen	my^2	$2y\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{my}{2\sqrt{1 + m^2}}$	$2my$	$\frac{y}{2}$

Tablo 3.2’ de yer alan b , kanal taban genişliğine; m ise kanal şev eğimine karşılık gelmektedir.

3.2 Akımların Sınıflandırılması

3.2.1 Kararlı ve Kararsız Akımlar

Doğadaki akımlar; akım parametrelerinin zaman içerisinde değişip değişmemesi durumlarına göre kararlı ve kararsız akım olarak sınıflandırılmaktadır.

Kararlı akım durumunda, bir kesitteki derinlik veya debi gibi akım özellikleri zamanla değişiklik göstermemektedir. Doğal olarak, derinlik veya debi zamanla değişiyorsa akım kararsız olarak adlandırılır.

Pratik uygulamalarda, akımın türbülanslı yapısı ve rüzgâr, yüzey gerilimi gibi farklı kuvvetlerin etkileşimi sebebiyle genellikle akım özellikleri zamana bağlı dalgalanmalar gösterebilmektedir. Bu sebeple, kararlı akımın tanımı yapılırken; örnek olarak bir kanalda oluşan akımda esen rüzgâr neticesinde akım derinliğinde oluşan küçük dalgalanmalar verilebilmektedir. Böyle bir durumda, yeteri kadar uzun bir

zaman aralığında bir kesitteki ortalama su derinliğinin sabit olduğu dolayısıyla da akımın kararlı özellik gösterdiği söylenebilmektedir. Fakat, açık denizde rüzgar sonucu oluşan yüzey dalgaları kararsız akıma örnek olarak verilebilmektedir (Subramanya, 2009).

Kararsız akımları analiz etmek, kararlı akımlara göre çok daha fazla zaman gerektirmektedir. Fakat, uygulamada karşılaşılan açık kanal problemlerinin büyük bir çoğunluğu anlamlı sonuçlar elde edebilmek için kararlı akım durumu esas alınarak çözülmektedir. Şekil 3.2a' da üniform akıma ait bir örnek görülmektedir.

3.2.2 Üniform ve Üniform Olmayan Akımlar

Bir açık kanalda akım özellikleri kanal boyunca sabit ise, akım üniform olarak adlandırılır. Akım özelliklerinin kanal boyunca değiştiği durum, üniform olmayan akım olarak adlandırılmaktadır.

Sabit hızla, sabit bir debinin taşındığı prizmatik bir kanaldaki akım, üniform akıma örnek olarak verilebilir. Bu durumda, akım derinliği kanal boyunca sabit olacak ve böylelikle su yüzeyi kanal tabanına paralel olacaktır.

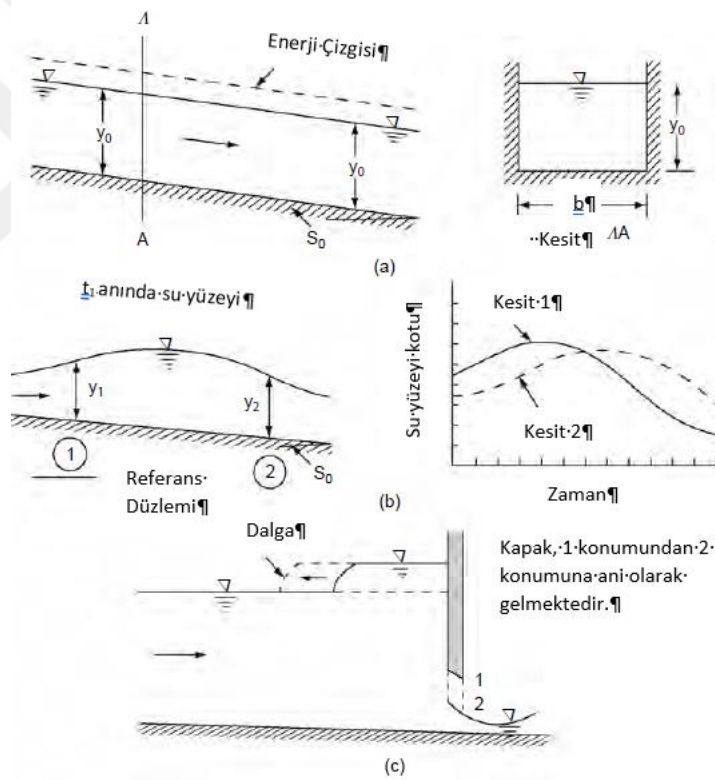
Prizmatik olmayan bir kanalda akım ve prizmatik bir kanalda değişen hızlara sahip akım değişken akım örnekleridir. Hızlı değişken akım, kararlı veya kararsız olabilmektedir.

3.2.3 Tedrici Değişken ve Hızlı Değişken Akımlar

Bir değişken akımda, konuma bağlı derinlik değişimi tedrici ise bu durumda akım çizgilerinin eğriliği çok büyük değildir. Böyle bir akım, tedrici değişken akım (TDA) olarak adlandırılmaktadır. Bu akımlarda, sürtünme direnci önemli bir rol oynamaktadır. Bir baraj sebebiyle su yüzeyinde oluşan kabarma veya kanal tabanında

ani bir düşü sebebiyle su yüzeyin oluşan düşüş kararlı TDA' ya örnek olarak verilebilmektedir.

Bir değişken akımda, akım çizgilerinin eğrilği büyükse ve akım derinliği kısa mesafelerde önemli ölçüde değişiyorsa, bu akım türü, hızlı değişken akım (HDA) olarak adlandırılmaktadır. Bu tür akımda, sürtünme direnci göreceli olarak önemsizdir. Bir dolusavağın eteğinde oluşan hidrolik sıçrama kararlı HDA' ya örnek olarak verilebilmektedir. Şekil 3.2b ve Şekil 3.2c' de tedrici değişken akım ve hızlı değişken akıma ait örnekler yer almaktadır.

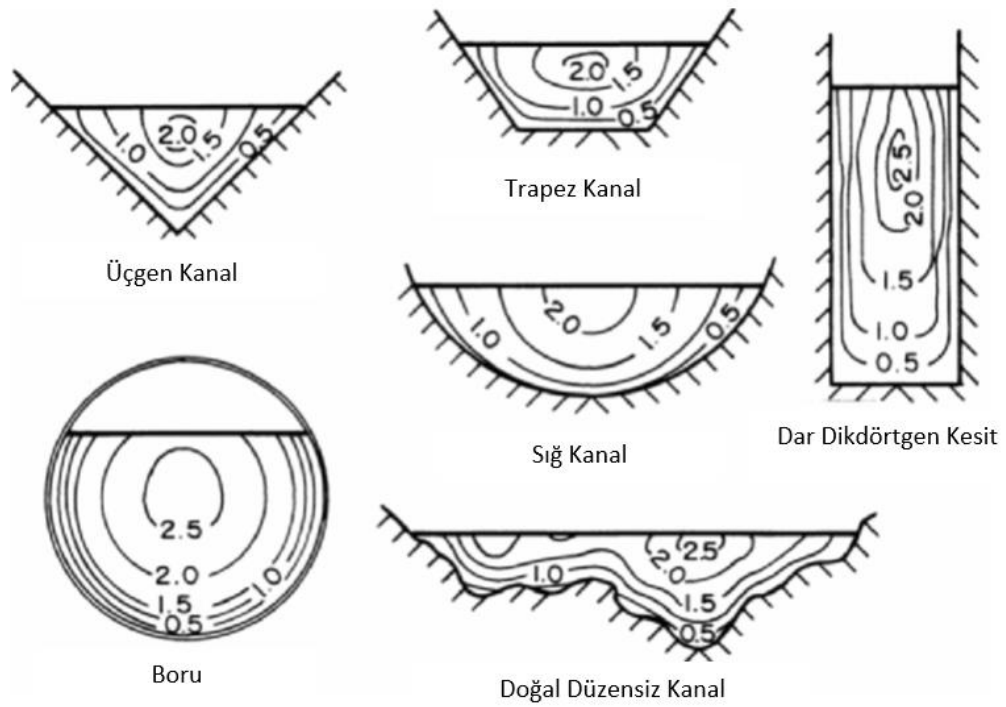


Şekil 3.2 Farklı tür açık kanal akımları: (a) Üniform akım, (b) Tedrici değişken akım, ve (c) Hızlı değişken akım (Subramanya, 2009)

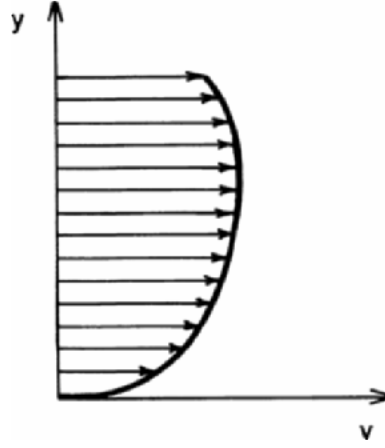
3.3 Hız Dağılımı

Bir kanal kesitinde akış hızı bir noktadan diğer noktaya farklılık göstermektedir. Bu durum, kanalın tabanındaki ve kenarlarındaki kayma gerilmelerinin varlığından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.3’ de farklı enkesitlerdeki hız dağılımları görülmektedir.

Akım hızı, Kartezyen koordinat sisteminde üç adet bileşene sahiptir. Fakat, düşey ve enine doğrultudaki hız değerleri genellikle küçüktür ve ihmal edilebilir. Böylelikle, yalnızca akım doğrultusundaki hız bileşeninin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu hız bileşeni, su yüzeyinden itibaren derinlikle değişim göstermektedir. Akım hızının derinlikle değişimi Şekil 3.4’ de görülmektedir (Chaudry, 2008).



Şekil 3.3 Farklı kanal kesitlerindeki hız dağılımı (Chow, 1959)



Şekil 3.4 Akım hızının derinlikle değişimi (Chaudry, 2008)

Şekil 3.4’ de görüldüğü üzere ana akım doğrultusundaki hız, derinlikle değişmektedir. Bu sebeple, hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından kesiti temsil eden tek bir hız değeri ile çalışılması uygun görülmektedir. Bu hız, kesitsel ortalama akım hızı olarak adlandırılmaktadır. Fakat, bahsi geçen hızla bir kanal kesitindeki $\frac{v^2}{2g}$ hız yüksekliği değeri hesaplanması durumunda, gerçek duruma nazaran hatalı bir sonuç elde edilecektir. Elde edilen sonucu, gerçek duruma yaklaştırmak için hız yüksekliği değeri α katsayısı ile çarpılarak düzeltilir. Bu katsayı, Coriolis katsayısı olarak bilinmekte olup, farklı kanal türleri için aldığı değerler Tablo 3.3’ de sunulmuştur.

Tablo 3.3 Farklı tipteki kanal kesitleri için α değerleri (Chow, 1959)

Kanal kesiti	α
Düzgün kanallar	1,10-1,20
Doğal kanallar	1,15-1,50
Buz örtüsü altındaki nehirler	1,20-2,00
Nehir vadileri	1,50-2,00

3.4 Enerji

Bir akımda, hareketi sağlayan temel unsur enerjidir. Bir akışkanın, birim zamanda bir kesitten geçerken birim ağırlığının sahip olduğu enerji aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenebilmektedir.

$$H = \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} + z \quad (3.1)$$

Bu denklemde mevcut bulunan P basınca, γ akışkanın birim hacim ağırlığına, α hız düzeltme katsayısına, V kesitsel ortalama akım hızına, g yerçekim ivmesine, z ise kanal tabanının seçilen bir referans eksenine olan düşey uzaklığına karşılık gelmektedir.

3.1 denkleminde mevcut bulunan terimlere bakıldığında, hepsi uzunluk boyutundadır. Bu sebeple; denklemdeki terimler sırasıyla basınç yüksekliği, hız yüksekliği ve geometrik yükseklik olarak adlandırılmaktadır.

Açık kanal akımında iki kesit arasındaki enerji farkını belirlemek için denklem 3.2 ile ifade edilen enerji denklemi kullanılmaktadır.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_k \quad (3.2)$$

Kanalda akım çizgilerinin eğrilikleri ihmal edildiğinde denklem 3.2’ deki P_1 ve P_2 parametreleri yerine hidrostatik basınç kanunu gereği 3.3 ve 3.4’ de yer alan eşitlikler kullanılabilir.

$$P_1 = \gamma y_1 \quad (3.3)$$

$$P_2 = \gamma y_2 \quad (3.4)$$

3.3 ve 3.4 eşitlikleri, denklem 3.2’ de yerine yazılırsa açık kanal akımlarında iki kesit arasındaki enerji denkleminin nihai hali aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_k \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’ de bulunan y_1 ve y_2 akım derinliklerine, V_1 ve V_2 kesitsel ortalama akım hızlarına, α_1 ve α_2 hız düzeltme katsayılarına, z_1 ve z_2 taban seviyelerine, h_k ise iki kesit arasındaki yük kaybına karşılık gelmektedir. Denklemden de görüldüğü üzere, 1 numaralı kesit kanalın membasında bulunan kesite; 2 numaralı kesit ise kanalın mansabında bulunan kesite karşılık gelmektedir.

3.4.1 Özgül Enerji

Özgül enerji kavramı, ilk olarak 1912 yılında Bakhmeteff tarafından ortaya konulmuştur. Özgül enerji, referans ekseni olarak kanal tabanının kabul edilmesi neticesinde elde edilen toplam enerji olarak adlandırılmaktadır. Referans ekseni olarak kanal tabanının kabul edilmesi durumunda, denklem 3.1’ de yer alan z taban seviyesi

terimi sıfıra eşit olacaktır. Böylelikle, özgül enerjinin ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6' da mevcut bulunan E özgül enerjiye karşılık gelmektedir. Denklem 3.6' da bulunan hız düzeltme katsayısı değerinin $\alpha = 1$ olduğu ve dikdörtgen kesitli bir kanalda hız ifadesi yerine denklem 3.7' de bulunan eşitliğin kullanılması durumunda, özgül enerji ifadesi denklem 3.8' deki son halini almaktadır.

$$V = \frac{q}{y} \quad (3.7)$$

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad (3.8)$$

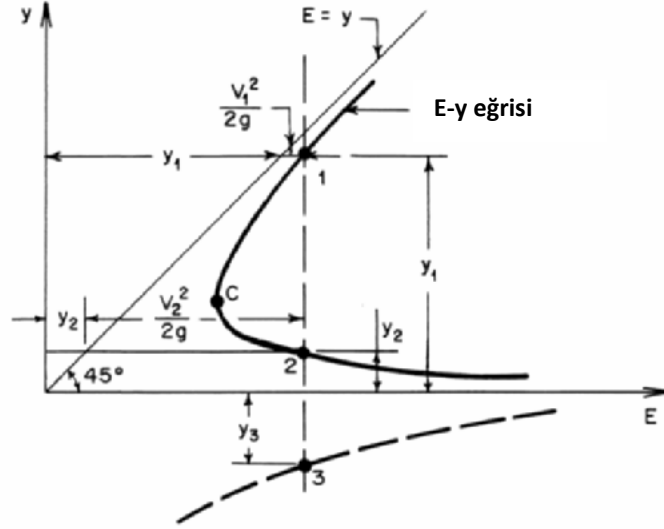
Denklem 3.7 ve 3.8' de bulunan q terimi, birim genişlik debisi olarak ifade edilmekte olup, dikdörtgen kesitli bir kanalın birim genişliğinden geçen debi olarak tanımlanmaktadır. Birim genişlik debisi q , denklem 3.9 eşitliğiyle ifade edilebilmektedir.

$$q = \frac{Q}{b} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9' da yer alan Q terimi debiye; b terimi ise kanal taban genişliğine karşılık gelmektedir. Bu denklem, özgül enerjinin, birim genişlik debisi ve derinliğe, bağlı olduğunu göstermektedir. Özgül enerjinin, derinlikle değişimini inceleyebilmek için denklemde mevcut bulunan birim genişlik debisi ifadesini sabit olarak kabul etmek gereklidir. Böylelikle, sabit birim genişlik debisi için özgül enerji, denklem 3.10 ile ifade edilmektedir.

$$(E - y)y^2 = \frac{q^2}{2g} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10, sabit bir q için E ve y arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Bu denklemi temsil eden $E - y$ eğrisi şekil 3.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Sabit birim genişlik debisi için özgül enerjinin derinlikle değişimi (Chaudry, 2008)

Matematiksel olarak, $E - y$ eğrisinin $(E - y) = 0$ ve $y = 0$ olmak üzere iki adet asimptotu mevcuttur. İlk asimptot, orijinden geçen ve yatayla 45° açı yapan bir doğruya karşılık gelirken; ikinci asimptot yatay eksene karşılık gelmektedir.

Denklem 3.10 üçüncü dereceden polinom ifadesi olduğundan üç farklı köke sahiptir. Bu köklerden birisi her zaman negatiftir. Fakat; fiziksel olarak negatif bir derinlik mümkün olmadığından, verilen E değeri için yalnızca iki farklı y değeri mevcuttur. Şekilde görülen y_1 ve y_2 derinlikleri bu duruma örnek olup, alternatif derinlikler olarak adlandırılmaktadır. Özel bir durum olarak; C noktasında, $y_1 = y_2$ olabilmektedir. Bu derinlik, kritik derinlik (y_c) olarak adlandırılmakta olup bu derinliğe karşılık gelen akım, kritik akım olarak adlandırılmaktadır.

Kritik derinlikten daha büyük akım derinliğine sahip akım, kritik-altı akım; kritik derinlikten daha büyük akım derinliğine sahip akım ise kritik-üstü akım olarak adlandırılmaktadır. Bu kapsamda, akım rejimini belirleyebilmek için kritik derinliğin ifadesini çıkarabilmek büyük bir önem arz etmektedir. Şekil 3.5’ de görüldüğü üzere C noktası mevcut eğrinin tepe noktası olup, buradan geçen teğetin eğimi sıfıra eşittir. Bu ifadeden yola çıkarak, denklem 3.11 eşitliği yazılabilmektedir.

$$\frac{dE}{dy} = 0 \quad (3.11)$$

Denklem 3.8’ de bulunan kesitsel ortalama hız ifadesi yerine, denklem 3.12 yerleştirilir ise denklem 3.13 elde edilmiş olur.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3.12)$$

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13’ de yer alan Q debiye, A ise ıslak alana karşılık gelmekte olup, farklı kanal en kesit şekilleri için ifadesi tablo 3.2’ de yer almaktadır. Denklem 3.13’ e denklem 3.11’ de bulunan türev operatörü uygulandığında aşağıda bulunan eşitlik elde edilmektedir.

$$1 - \frac{Q^2 T}{gA^3} = 0 \quad (3.14)$$

Denklem 3.14’ ün düzenlenmesi sonucu kritik derinliği bulmak için kullanılan denklem 3.15 elde edilmiş olur.

$$\frac{A^3}{T} = \frac{Q^2}{g} \quad (3.15)$$

Denklem 3.15' in sağ tarafında bulunan ifade sabit olup, sol tarafında bulunan ıslak alan ve su yüzeyi genişliği parametreleri kanalın kesit şekline ve derinliğe bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, bu denklemin çözümü neticesinde elde edilen kritik derinliğin dikdörtgen kesitli kanallar dışında açık bir ifadesi mevcut değildir. Bu sebeple, denklemin sayısal çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Dikdörtgen kesitli kanallar için kritik derinliğin ifadesi denklem 3.16' da yer almaktadır.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (3.16)$$

Kritik rejimde, akımın sahip olduğu enerji minimum özgül enerji E_{min} olarak tanımlanmak olup, denklem 3.13' de yer alan derinlik ifadesi yerine y_c yerleştirilerek elde edilmektedir. Dikdörtgen kesitli kanallar için E_{min} ifadesi denklem 3.17' de yer almaktadır.

$$E_{min} = \frac{3}{2}y_c \quad (3.17)$$

Şekil 3.5' den görüldüğü üzere, özgül enerjinin E , minimum özgül enerjiden E_{min} küçük olduğu bölge $E - y$ eğrisinin dışında kalmakta olup, bu bölgede akım oluşmamaktadır. Bu sebeple, akımın oluşabilmesi için gerek ve yeter koşul $E > E_{min}$ olmasıdır.

3.5 Kararlı Üniform Akım Temel Denklemleri

Daha önceden de bahsedildiği üzere; üniform akım, kanal boyunca akım derinliği, kesitsel ortalama akım hızı ve debinin değişmediği akım türü olarak adlandırılmaktadır. Üniform akım durumunda, kanal tabanı, su yüzeyi ve enerji çizgisi birbirine paralel konumdadır. Üniform akım, kanal kesitinin değişmediği yeteri kadar uzun kanallarda oluşmaktadır. Doğada böyle bir durumla zor karşılaşmakta olup, çoğu zaman üniform akım kabulü ile problemler çözülmektedir.

Üniform akım, uzun zaman boyunca araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Bu amaçla, üniform akım durumunda akım hızını belirleyebilmek için araştırmacılar tarafından bazı ampirik formülasyonlar önerilmiştir. Bunlardan ilki, 1769 yılında Fransız mühendis Antoine Chezy tarafından geliştirilen Chezy formülüdür. Bu ampirik bağıntı denklem 3.18' de sunulmuştur.

$$V = C \sqrt{RS_f} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18' de yer alan V kesitsel ortalama akım hızına, R hidrolik yarıçapa, S_f enerji çizgisinin eğimine ve C Chezy katsayısına karşılık gelmekte olup, birçok farklı yaklaşımla hesaplanmaktadır (Chow, 1959). Chezy katsayısını belirlemek için sıklıkla kullanılan formülasyon denklem 3.19' da verilmiştir.

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (3.19)$$

Denklem 3.19' da bulunan g yerçekimi ivmesine, f ise üniversal sürtünme katsayısına karşılık gelmektedir.

Üniform akımlar için bir diğer formülasyon ise 1889 yılında İrlandalı mühendis Robert Manning tarafından geliştirilen ampirik denklemdir. Manning denklemi, basit formu ve tatminkar sonuçlar vermesi sebebiyle pratik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Manning denklemi, denklem 3.20 ile verilmektedir.

$$V = \frac{k_n}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3.20)$$

Denklem 3.20’ de bulunan k_n denklemin kullanıldığı birim sistemine göre farklılık göstermekte olup, SI birim sisteminde $1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ değerini almaktadır. Denklem 3.20, süreklilik denklemi ile benzeştirilerek aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3.21)$$

Manning pürüzlülük katsayısı, kanal cidarının cinsine ve durumuna bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 3.4 Açık kanallar için Manning pürüzlülük katsayıları (Güney,2010)

Kanalın tanımı	n
Mineli veya camlı kaplamalar; cam; pirinç vb. gibi oldukça pürüzsüz ve düzgün yüzeyler	0,009
Çok iyi düzeltilmiş ve yerleştirilmiş ahşap kaplamalar; pürüzsüz metal; saf çimentolu sıva; pürüzsüz katran veya boyalı tabaka	0,010

Tablo 3.4 Devamı

Kanalın tanımı	n
Rendelenmiş ahşap; 1/3 kum oranlı, pürüzsüz, düzeltilmiş, kıvrıntısız harç	0,011
Dikkatlice yerleştirilmiş fakat rendelenmemiş ahşap; çelik malayla düzeltilmiş kıvrıntısız beton	0,012
Oldukça düz, temiz ve pürüzsüz yüzeyler; iyi ahşap; dikkatlice yapılmış tuğla duvarlar; tahta malayla yerleştirilmiş beton; pürüzsüz ve düzgün yerleştirilmiş pere	0,013
Çok küçük çıkıntıları olan, az yosunlu ve az algli veya az çakıl birikintili, kıvrıntısı az olan ahşap, metal veya beton yüzeyler; malayla düzeltilmiş şat-krit	0,014
Pürüzlü tuğla; orta kalitede taş kaplama; algli veya yosunlu ahşap; pürüzlü beton; perçinli çelik	0,015
Çok pürüzsüz, düz ve bitkisiz toprak kanallar; çimento harçlı taş kaplama; malayla düzeltilmemiş şat-krit; bozulmuş tuğla duvar; doğal kayada çok iyi kazılmış ve düzeltilmiş kanal	0,017

Tablo 3.4 Devamı

Kanalın tanımı	n
Kalın ve üniform silt depozitli iyi açılmış toprak kanal; çok çıkıntılı, içinde birikim oluşmuş aşırı derecede kıvrıntılı metal kanal	0,018
Pürüzsüz iyi sıkıştırılmış toprak; pürüzlü taş duvarlar; çatlaksız yumuşak kayada açılmış kanallar; normal durumda olan, bitkisiz silt depozitli kil, çakıl veya löste açılmış az kıvrıntılı kanallar; kıvrıntılı, birikintili, çürüyen, pürüzlü metal kanal; iyi durumda olan çok geniş kanallar	0,020
İyi korunan yapay küçük toprak kanallar; oldukça temiz ve üniform tabanında çukurlar, engeller havuzlanmalar bulunmayan düz doğal akarsular	0,025
Hendekler; yatağında seyrek taşlar bulunan düşük kaliteli yapay kanallar	0,028
İyi bakılmış geniş sel yatağı; oyukların, heyelanların ve sucul bitkilerin bulunduğu korunmasız yapay kanallar; enkediti oldukça sabit olan kıvrıntısız akarsular	0,030
Enkesitinde normal değişimler bulunan sürekli su bulunduran akarsular; çok iyi durumda ve hafif kıvrıntılı akarsular	0,033

Tablo 3.4 Devamı

Kanalın tanımı	n
Sucul bitkilerle yarı tıkanmış, küçük ve bozulmuş yapay kanallar; havuzlanmalar ve sığılıklar bulunan temiz tabanlı kıvrıntılı akarsular	0,035
Sediment tabakaları bulunan, yatağı iyi oluşmuş büyük eğimli akarsuların alt kesimi; iyi durumdaki kuruyan akarsular; heyelanlar, yosunlar ve kayalarla oldukça bozulmuş yapay kanallar	0,040
Kırıntılar, kökler ve otlarla kısmen tıkanmış yapay toprak kanallar; kısmen bitkilerle kaplı veya kaya yataklı düzensiz olarak kıvrıntılı akarsular; uzun çalılar ve otlarla kaplı taşkın yatakları	0,067
Dar ve derin büyük eğimli akarsular; tamamen bitki örtülü küçük yapay kanallar; derin hendeklerle kesişen, akımın yavaş olduğu düz taşkın yatakları	0,080
Şelali ve sarp yataklı akarsular; çok engebeli taşkın yatakları; ağaç ve çalılarla kaplı yavaş akan doğal kanallar	0,100
Çok pürüzlü ve büyük eğimli akarsular; bataklık, yoğun bitki örtülü, tabanında kütük ve ağaç dalları bulunan akarsular	0,133

Tablo 3.4’ de pratikte sıklıkla karşılaşılan açık kanallardaki Manning pürüzlülük değerleri yer almaktadır. Görüldüğü üzere akışa uygulanan dirence paralel olarak pürüzlülük katsayısı da artmaktadır. Buna bağlı olarak da enerji çizgisinin eğimi artmak da dolayısıyla sürtünmeden kaynaklı enerji kayıpları çoğalmaktadır. Bu amaçla açık kanal tasarım aşamasında Manning pürüzlülük katsayısının doğru seçimi büyük bir önem arz etmektedir.

3.6 Üniform Olmayan Akım

Doğal veya yapay bir kanaldaki akım koşullarında herhangi bir değişiklik meydana gelmez ise akım üniform akım olarak adlandırılır. Fakat, kanal taban eğiminde, kanal pürüzlülüğündeki değişim veya inşa edilen hidrolik yapılar sebebiyle akım değişimin meydana geldiği bölgelerde üniformalıktan uzaklaşır. Üniform olmayan akımlar, ani değişken ve tedrici değişken akımlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ani değişken akım durumunda akım özellikleri kısa bir mesafede hızla değişmekte olup, akım çizgileri arasındaki paralellik bozulmakta ve hidrostatik basınç kabulü bu tarz bir problemin çözümünde geçerli olmamaktadır. Ani değişken akımlara verilecek en iyi örnek hidrolik sıçrama olup, akım rejiminin selden nehre geçişinde ortaya çıkmaktadır. Tedrici değişken akımlar ise ani değişken akımların aksine akım özelliklerinin uzun bir mesafede yavaşça değişmesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Böylelikle, akım boyunca akım çizgilerinin paralelliği bozulmamakta ve problemler hidrostatik basınç kabulü altında çözülebilmektedir.

3.6.1 Tedrici Değişken Akım

Konuma bağlı olarak su yüzeyi kotlarının yavaş bir şekilde değiştiği prizmatik bir kanaldaki kararlı üniform olmayan akım tedrici değişken akım olarak adlandırılmaktadır. Bir barajın arkasında oluşan kabarma profili ve bir kanalın sonundaki düşü sebebiyle oluşan alçalma profili TDA’ nın birkaç tipik örneğidir. Bir TDA’ da hız kanal boyunca değişmekte bunun sonucu olarak da taban eğimi, su yüzeyi eğimi ve enerji çizgisi eğimi birbirinden farklılık göstermektedir.

TDA’ nın analizinde kullanılan iki temel kabul aşağıdaki gibidir.

- Herhangi bir kesitteki basınç dağılımının hidrostatik olduğu kabul edilir. Bu durum, TDA’ da su yüzeyi kotlarının yavaş bir şekilde değişmesinden ve bunun sonucu olarak da hidrostatik basınç dağılımından olan sapmaların ihmal edilebilir olmasından kaynaklanmaktadır.
- Herhangi bir derinlikteki akım direncinin üniform akım hesabında kullanılan Manning denklemi gibi bir ampirik bağıntı ile hesaplanabileceği kabul edilmektedir (Subramanya, 2009).

3.6.1.1 Tedrici Değişken Akımın Diferansiyel Denklemi

TDA’ nın diferansiyel denklemini elde edebilmek için aşağıdaki denklem ile ifade edilen bir kesitteki enerji yüksekliği tanımlanmalıdır.

$$H = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad (3.22)$$

Bu denklemde mevcut bulunan z kanal taban yüksekliğine, y akım derinliğine, V kesitsel ortalama akım hızına ve g yerçekimi ivmesine karşılık gelmektedir. Denklem 3.22’ de özgül enerji ifadesine karşılık gelen denklem 3.6 kullanılması durumunda denklem 3.23 elde edilmiş olur.

$$H = z + E \quad (3.23)$$

Denklem 3.23’ ün her iki tarafının x ’ e göre diferansiyeli alınırsa, denklem 3.24 elde edilir.

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dE}{dx} \quad (3.24)$$

Burada, x akım doğrultusundaki yer değiştirmediir. Denklem 3.25 ve 3.26' da yer alan eşitliklerin denklem 3.24' e yerleştirilmesi ile TDA denkleminin bilinen formlarından biri elde edilmiş olur.

$$S_f = -\frac{dH}{dx} \quad (3.25)$$

$$S_0 = -\frac{dz}{dx} \quad (3.26)$$

$$\frac{dE}{dx} = S_0 - S_f \quad (3.27)$$

TDA denkleminin daha çok bilinen diğer formunu elde edebilmek için $\frac{dE}{dx}$ ifadesi yerine denklem 3.28' de bulunan eşitlik yazılabilmektedir.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dy}{dx} (1 - Fr^2) \quad (3.28)$$

Denklem 3.28' de bulunan Fr terimi boyutsuz bir parametre olan Froude sayısına karşılık gelmekte olup, denklem 3.29' da yer alan eşitlikle ifade edilmektedir.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (3.29)$$

Bu denklemde mevcut bulunan D hidrolik derinliğe karşılık gelmekte olup, farklı kanal enkesit türleri için ifadesi Tablo 3.2' den bulunabilmektedir. Denklem 3.27 ve 3.28 birlikte kullanılarak TDA denkleminin son hali denklem 3.30 ile verilebilmektedir.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \quad (3.30)$$

3.6.2 Su Yüzeyi Profillerinin Sınıflandırılması

Farklı su yüzeyi profillerinin tanımlanmasında kanal taban eğimi türünü tanımlayan bir harf ve Kritik Derinlik Çizgisi (KDC) ile Üniform Derinlik Çizgisi (ÜDC)' ne göre profilin konumunu ifade eden bir sayı kullanılmaktadır.

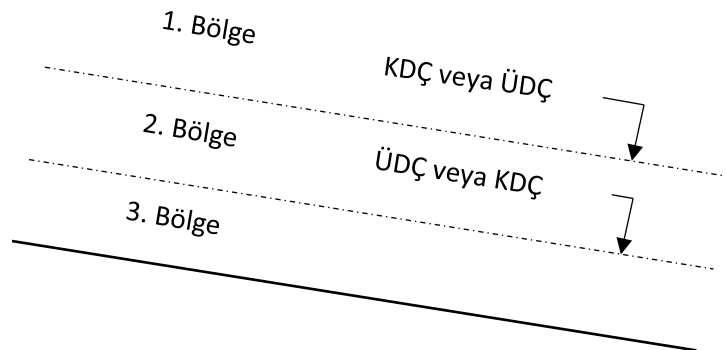
Kanal taban eğimleri; küçük (mild), büyük (steep), kritik (critical), yatay (horizontal) ve ters (adverse) olmak üzere 5 kategoride sınıflandırılmaktadır. Bu eğimlerin İngilizce dilindeki karşılıklarının ilk harfleri kanal taban eğiminin türüne karşılık gelmektedir.

Bir kanalın taban eğimi, kanaldan geçen üniform akım derinliğinin kritik derinlikten büyük olması durumunda ($y_0 > y_c$), küçük eğimli olarak adlandırılmaktadır. Üniform akım derinliğinin kritik derinliğe eşit olması durumunda ($y_0 = y_c$), kanal taban eğimi kritik olarak adlandırılmaktadır. Üniform derinliğin kritik derinlikten küçük ($y_0 < y_c$), olması durumunda kanal taban eğimi büyük eğimli olarak adlandırılmaktadır. Denklem 3.21' den de görüldüğü üzere kanal tabanının yatay olması durumunda üniform derinlik sonsuza eşit olmakta, negatif eğimli bir kanalda ise üniform derinlik mevcut olmamaktadır. Tablo 3.5' de kanal taban sınıflandırmasına ait özet tablo yer almaktadır.

Tablo 3.5 Kanal taban eğimlerinin sınıflandırılması

Kanal Sınıfı	Sembol	Koşul
Küçük eğim	M	$y_0 > y_c$
Büyük eğim	S	$y_0 < y_c$
Kritik eğim	C	$y_0 = y_c$
Yatay taban	H	$S_0 = 0$
Ters eğim	A	$S_0 < 0$

Şekil 3.6' dan da görüldüğü üzere küçük ve büyük eğimli kanallarda üniform derinlik ve kritik derinlik çizgileri kanal tabanı üzerindeki alanı 3 kısma ayırmaktadır. Fakat; ters, yatay ve kritik eğimli kanallarda üniform derinlik mevcut olmadığından sadece 2 adet bölge mevcuttur. Sınıflandırma yapılırken; iki çizginin de üzerinde bulunan bölge 1. bölge olarak, üst ve alt çizgiler arasındaki bölge 2. bölge olarak, alt çizgi ve kanal tabanı arasındaki bölge ise 3. bölge olarak göz önüne alınmaktadır. Kanal taban eğiminin küçük olması durumunda üst çizgi ÜDÇ, alt çizgi ise KDÇ olmaktadır. Büyük eğimli kanal durumunda ise durum tam tersidir.

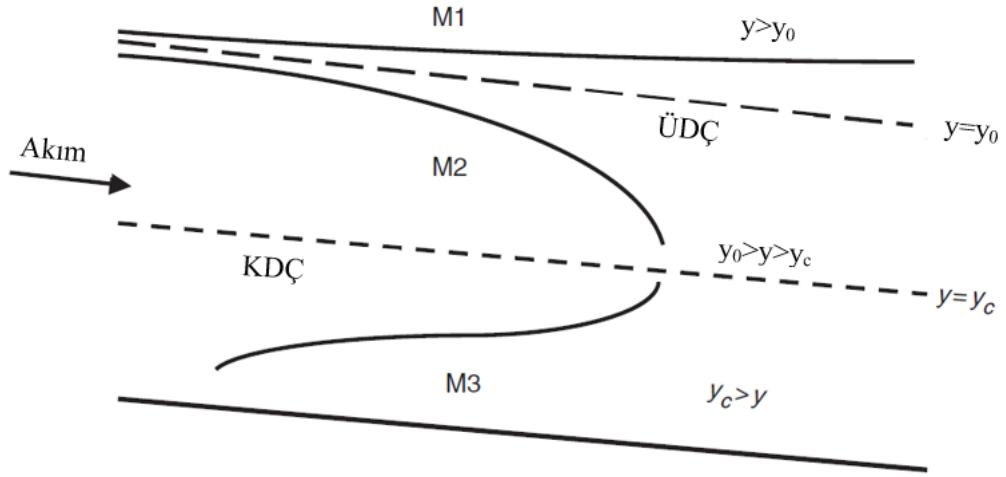


Şekil 3.6 Su yüzeyi profillerinin sınıflandırılmasında kullanılan bölgeler

Toplamda 13 adet su yüzeyi profil türü mevcuttur. Bunlardan 3 tanesi küçük eğimli kanallarda, 3 tanesi büyük eğimli kanallarda, 2 tanesi kritik eğimli kanallarda, 2 tanesi yatay eğimli kanallarda, 2 tanesi ise ters eğimli kanallarda oluşmaktadır. Su yüzeyi profillerinin çiziminde profilin sınırlar etrafındaki davranışını belirlemek büyük önem taşımaktadır. Bu anlamda, denklem 3.30 ile verilen TDA diferansiyel denklemi kullanılacaktır.

Şekil 3.7' de verilen küçük eğimli bir kanal göz önüne alındığında kanal tabanı, KDÇ ve ÜDÇ' nin kanalı düşey doğrultuda üç bölgeye ayırdığı görülmektedir. Bu bölgelerde yer alan profiller M1, M2 ve M3 olarak adlandırılacaktır. Şekildeki eğriler bu üç bölgede oluşabilecek akım profillerinin şeklini ifade etmektedir. M1 profilinde su yüzeyi ÜDÇ' nin üzerindedir. Bu bölgede; $y > y_0$ ve $S_f < S_0$ olmaktadır. Ayrıca, bu bölgede $y > y_c$ ve $Fr < 1$ dir. Böylelikle, denklem 3.30' un hem pay hem de paydası pozitif olmakta, $\frac{dy}{dx} > 0$ haline gelmektedir. Diğer bir ifadeyle M1 profilinde akım doğrultusunda akım derinliğinin artması gerekmektedir. Aynı şekilde M2 ve M3 profilleri incelendiğinde; M2 profili için $\frac{dy}{dx} < 0$, M3 profili için ise $\frac{dy}{dx} > 0$ olmaktadır.

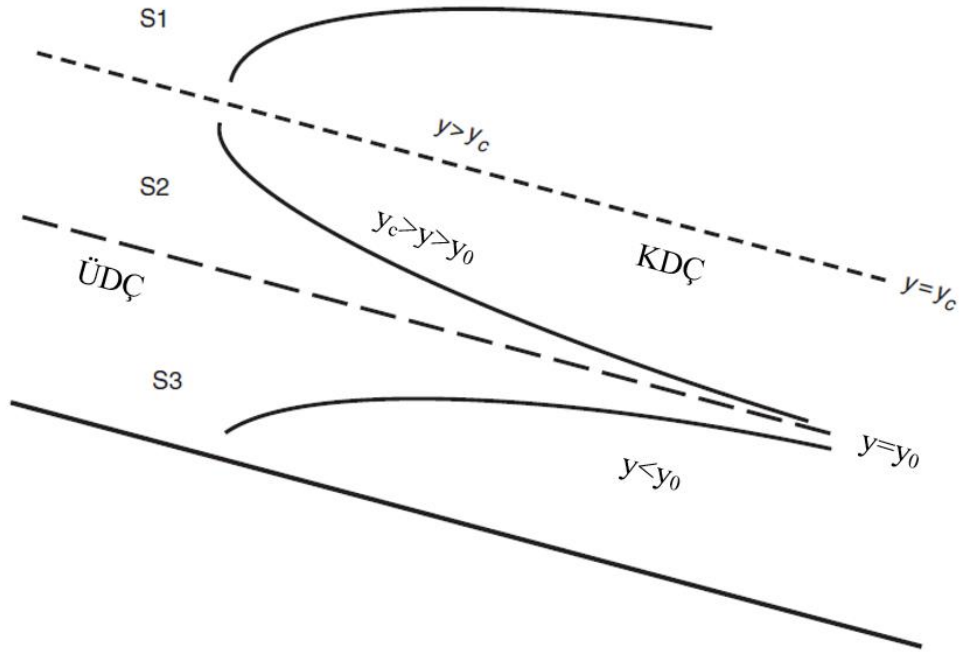
Bölge sınırları etrafında su yüzeyi profilinin davranışını belirlemek profillerin çizimi açısından önem arz etmektedir. Denklem 3.30' da $y \rightarrow \infty$ yakınsadığında $Fr \rightarrow 0$ ve $S_f \rightarrow 0$ yakınsamaktadır. Bu durumda ise $dy/dx \rightarrow S_0$ yakınsamakta olup, su yüzeyi profili yataya asimptot olmaktadır. Benzer şekilde, $y \rightarrow y_0$ yakınsadığında, $S_f \rightarrow S_0$ yakınsamakta ve böylelikle $dy/dx \rightarrow 0$ olmaktadır. Bu durumda, su yüzeyi profili ÜDÇ' ye asimptot olmaktadır. KDÇ civarında $y \rightarrow y_c$ ve $Fr \rightarrow 1$ değerlerine yakınsamaktadır. Böylelikle $dy/dx \rightarrow \infty$ olmakta, ve böylelikle su yüzeyi profili KDÇ' ye dik açıyla yaklaşmaktadır. Kanal tabanı civarında $y \rightarrow 0$, $S_f \rightarrow \infty$ ve $Fr \rightarrow \infty$ yakınsamaktadır. Bunun sonucunda, su yüzeyi profili kanal tabanına pozitif bir açıyla yaklaşmaktadır. Bu açının büyüklüğü kullanılan ampirik formüle ve kanal kesitinin türüne göre değişmektedir.



Şekil 3.7 Küçük eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri (Akan,2006)

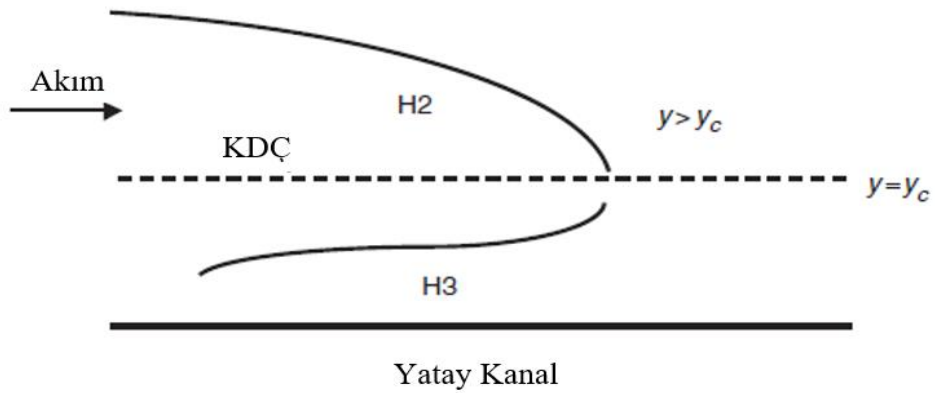
Büyük eğimli bir kanalda $y_0 > y_c$ ' dir. Kanal tabanı, ÜDÇ ve KDC kanalı düşey doğrultuda 3 bölgeye ayırmaktadır. Bu bölgeler Şekil 3.8' de görüldüğü üzere S1, S2 ve S3 olarak adlandırılmaktadır. S1 bölgesinde su yüzeyi KDC' nin üzerinde bulunmakta bunun sonucunda $y > y_c$ ve $Fr < 1$ olmaktadır. Aynı zamanda, $y > y_c > y_n$ ilişkisi sebebiyle $S_f < S_0$ olmaktadır. Bu sebeple, denklem 3.30' un hem payı hem de paydası pozitifdir. Dolayısıyla, S1 bölgesinde $\frac{dy}{dx} > 0$ ' dır. Diğer bir değişle, akım derinliği akım doğrultusunda artmaktadır. S2 ve S3 bölgelerinde aynı şekilde inceleme yapıldığında; S2 bölgesinde $\frac{dy}{dx} < 0$ ve S3 bölgesinde $\frac{dy}{dx} > 0$ olduğu görülmektedir.

Küçük eğimli kanallarda sınırlar etrafında su yüzeyi profilinin davranışı büyük eğimli kanallar için de geçerli olmaktadır. Dolayısıyla, S1 profili KDC ile dik bir açıda kesişmekte olup, $y \rightarrow \infty$ yakınsadığında asimptotik olarak yatay bir doğruya yaklaşmaktadır. S2 profili KDC ile dik bir açıda kesişmekte ve asimptotik olarak ÜDÇ' ye yaklaşmaktadır. S3 profili kanal tabanı ile pozitif bir açı yapmakta ve asimptotik olarak ÜDÇ' ye yaklaşmaktadır. Büyük eğimli kanallardaki profil türleri Şekil 3.8' de sunulmuştur.

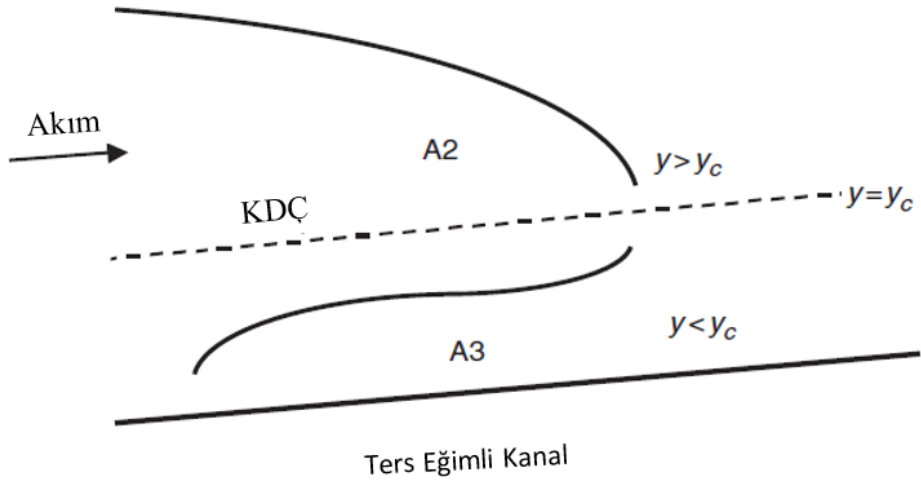


Şekil 3.8 Büyük eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri (Akan,2006)

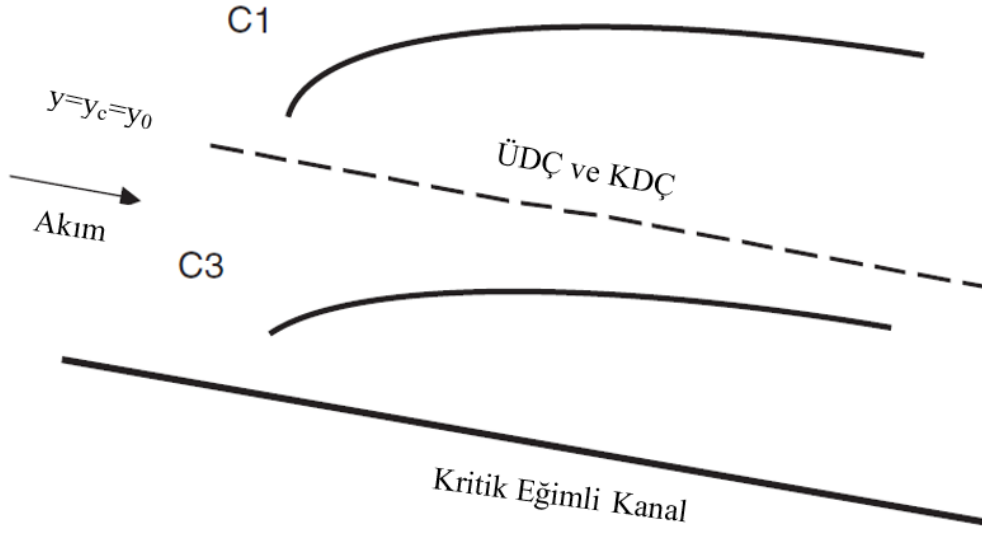
Yatay, ters ve kritik eğimli kanallarda oluşabilen su yüzeyi profilleri Şekil 3.9-3.11’ da gösterilmiştir. Yatay ve ters eğimli kanallarda üniform akım mümkün olmadığından y_0 tanımlanamamaktadır. Bu sebeple, H1 ve A1 profilleri mevcut değildir. Benzer şekilde, kritik eğimli kanallarda $y_0 = y_c$ olduğundan C2 profili mevcut değildir.



Şekil 3.9 Yatay kanallardaki su yüzeyi profilleri (Akan,2006)



Şekil 3.10 Ters eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri (Akan,2006)



Şekil 3.11 Kritik eğimli kanallardaki su yüzeyi profilleri (Akan,2006)

BÖLÜM DÖRT

SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

TDA' da bir kanal boyunca farklı kesitlerdeki akım derinliklerini belirlemek için denklem 3.30 veya denklem 3.27' nin çözümü gerekli olmaktadır. Bu denklemler doğrusal olmayan adi diferansiyel denklem sınıfına girmekte olup, çözümleri için sınır koşullarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda; kritik altı akımın mansap kontrollü, kritik üstü akımın ise memba kontrollü olduğu bilinmelidir. Dolayısıyla, bir kanaldaki akım kritik altı rejimde ise bu durumda denklemin çözümü için mansap sınır koşulunun kullanılması gerekmektedir. Tam tersi durumda ise, yani kanaldaki akımın kritik üstü rejimde olması durumunda, sınır koşulu olarak memba sınır koşulunun kullanılması gerekmektedir. Buradaki sınır koşulundan kastedilen bilinen bir debi için bilinen bir akım derinliğidir.

Denklem 3.30 ile ifade edilen TDA denklemi doğrusal olmayan diferansiyel denklem olup, çözümünde birçok sayısal yöntem kullanılmaktadır. Tez kapsamında, bu denklemin çözümünde Euler Yöntemi, Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi, İyileştirilmiş Euler Yöntemi, Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi, Standart Adım Yöntemi, Doğrudan Adım Yöntemi ve Diferansiyel Kuadratur Yöntemi kullanılmıştır.

Sayısal çözümler için Matlab paket programında her bir yöntem özelinde kodlar yazılmış ve deneysel olarak elde edilen profiller için başlangıç koşulları kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Çözüm yöntemlerine dair detaylar aşağıda sunulmuştur.

4.1 Euler Yöntemi

Euler Yöntemi, doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde sıklıkla tercih edilen bir yöntem olup, çalışma kapsamında da kullanılmıştır. Yöntem,

çözümde akım özellikleri bilinen konumdaki eğrinin teğetinin eğimini belirlemekte ve sonraki konumdaki derinlik değerini bu eğimden yola çıkarak hesaplamaktadır. Matematiksel olarak bir eğrinin bir noktasından geçen teğetinin eğimi türeve karşılık geldiğinden, bilinen konumdaki eğim değeri denklem 3.30' dan doğrudan hesaplanabilmektedir.

Akım derinliğinin, konuma göre değişim oranı denklem 4.1' den aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir.

$$y'_i = \left. \frac{dy}{dx} \right|_i = f(x_i, y_i) \quad (4.1)$$

Bu denklemde mevcut bulunan i alt indisi x_i konumundaki büyüklüklere karşılık gelmekte olup, $'$ üst indisi ise akım derinliğinin (y), konuma (x) göre türevine karşılık gelmektedir. Denklem 4.1' de mevcut bulunan $f(x_i, y_i)$ ifadesi, denklem 4.2 ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$f(x_i, y_i) = \frac{S_0 - S_{f,i}}{1 - \frac{Q^2 T_i}{g A_i^3}} \quad (4.2)$$

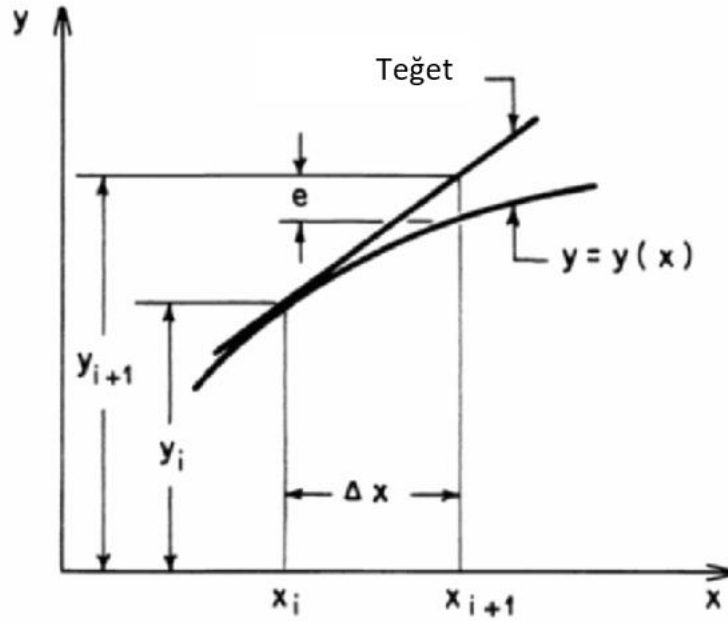
Denklem 4.2' nin sağ tarafındaki değişkenlerin hepsi bilindiğinden denklem 4.1 ile (x_i, y_i) noktasındaki y' nin değişim oranı belirlenebilmektedir. Bu y'_i değişim oranının x_i ve x_{i+1} aralığında sabit olduğu varsayımıyla x_{i+1} konumundaki akım derinliği denklem 4.3 ile belirlenebilmektedir.

$$y_{i+1} = y_i + y'_i \Delta x \quad (4.3)$$

Bu denklemde mevcut bulunan $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ olup, denklem 4.1, denklem 4.3' de yerine konulursa, denklem 4.4 elde edilmiş olur.

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i) \Delta x \quad (4.4)$$

Denklem 4.4 ile y_{i+1} elde edilebilmektedir. y_{i+1} elde edildikten sonra aynı şekilde x_{i+2} konumundaki y_{i+2} değeri bulunabilmektedir. Şekil 4.1' de Euler Yöntemi' nin geometrik açıklaması yer almaktadır.



Şekil 4.1 Euler yönteminin geometrik açıklaması (Chaudhry,2008)

4.2 İyileştirilmiş Euler Yöntemi

İyileştirilmiş Euler Yöntemi ile hesap yapabilmek için Euler Yönteminden elde edilen akım derinliği kullanılmakta olup, bu derinlik y_{i+1}^* sembolü ile ifade

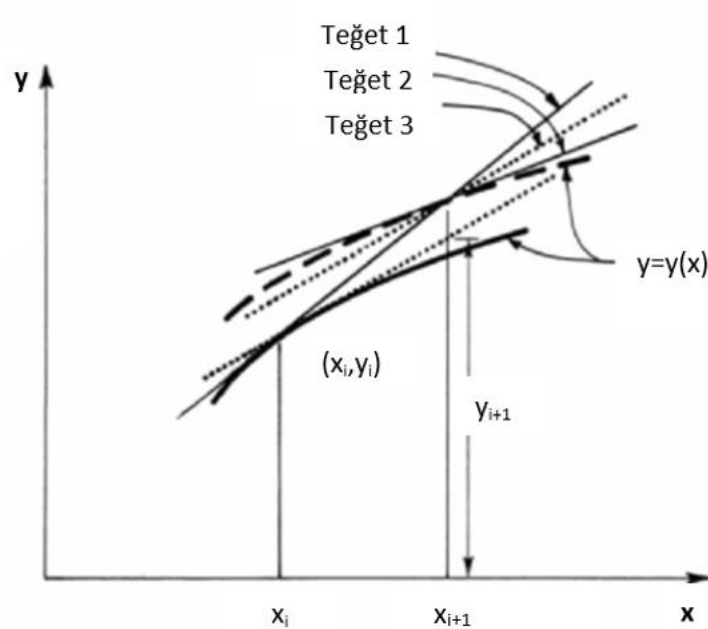
edilmektedir. y_{i+1}^* değeri kullanılarak $x = x_{i+1}$ konumundaki çözüm eğrisinin ($y = y(x)$) eğimi denklem 4.5 ile hesaplanabilmektedir. $x = x_{i+1}$ konumundaki akım derinliğini belirlemek için x_i ve x_{i+1} konumlarındaki çözüm eğrisinin eğimlerinin ortalama değeri kullanılmakta olup denklem 4.6 ile hesap yapılabilmektedir.

$$y'_{i+1} = f(x_i, y_{i+1}^*) \quad (4.5)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2}(y'_i + y'_{i+1})\Delta x \quad (4.6)$$

Denklem 4.6, alternatif olarak denklem 4.7 ile de verilebilmektedir. İyileştirilmiş Euler Yöntemi' nin geometrik açıklaması şekil 4.2 de sunulmuştur.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2}[f(x_i, y_i) + f(x_i, y_{i+1}^*)]\Delta x \quad (4.7)$$



Şekil 4.2 İyileştirilmiş Euler yönteminin geometrik açıklaması (Chaudhry,2008)

Şekil 4.2' de teğet 1, (x_i, y_i) noktasındaki teğete karşılık gelmekte ve eğimi y'_i olmaktadır. Buna karşılık, teğet 2 (x_{i+1}, y_{i+1}) noktasındaki teğete karşılık gelmekte olup, eğimi y'_{i+1} ' dir. Teğet 3 ise (x_i, y_i) noktasından geçen eğimi $\frac{1}{2}(y'_i + y'_{i+1})$ olan bir doğrudur.

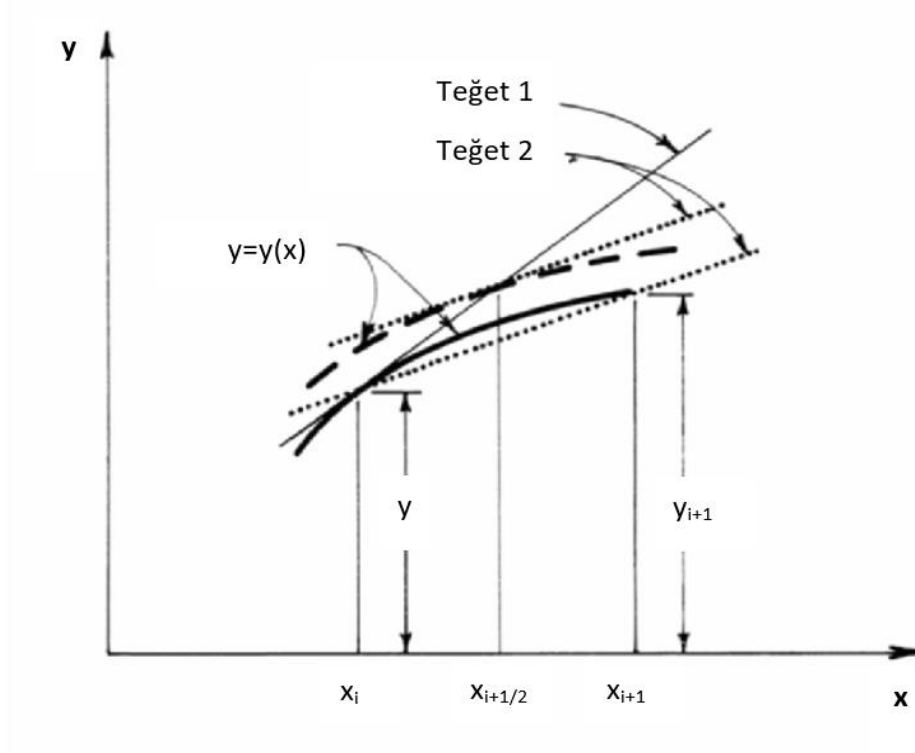
4.3 Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi

Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi ile hesap yapılırken $y = y(x)$ eğrisinin $(x_{i+\frac{1}{2}}, y_{i+\frac{1}{2}})$ noktasındaki eğimi kullanılmaktadır. Burada, $x_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(x_i + x_{i+1})$ ve $y_{i+\frac{1}{2}} = y_i + \frac{1}{2}y'_i\Delta x$ şeklinde ifade edilmektedir. Bu noktadaki teğetin eğimi $y'_{i+\frac{1}{2}}$ şeklinde adlandırılmaktadır. Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi ile hesaplamalar denklem 4.8 veya denklem 4.9 ile gerçekleştirilebilmektedir.

$$y_{i+1} = y_i + y'_{i+\frac{1}{2}}\Delta x \quad (4.8)$$

$$y_{i+1} = y_i + f\left(x_{i+\frac{1}{2}}, y_{i+\frac{1}{2}}\right) \quad (4.9)$$

Şekil 4.3' de bu yöntemin geometrik olarak açıklaması yer almaktadır.



Şekil 4.3 Modifiye edilmiş Euler yönteminin geometrik açıklaması (Chaudhry,2008)

Şekil 4.3’ de bulunan teğet 1 çözüm eğrisinin (x_i, y_i) noktasındaki teğetine karşılık gelmekte olup, eğimi y'_i ’ dir. Buna karşılık teğet 2 çözüm eğrisinin $(x_{i+\frac{1}{2}}, y_{i+\frac{1}{2}})$ noktasındaki teğetine karşılık gelmekte olup, eğimi $y'_{i+\frac{1}{2}}$ ’ dir.

4.4 Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi

Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi’ nde $y = y(x)$ çözüm eğrisini temsil eden eğimi belirlemek için denklem 4.10-4.13 arasında yer alan bağıntılar kullanılmaktadır.

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (4.10)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}k_1\Delta x\right) \quad (4.11)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}k_2\Delta x\right) \quad (4.12)$$

$$k_4 = f(x_i + \Delta x, y_i + k_3\Delta x) \quad (4.13)$$

Yukarıdaki bağıntılar kullanılarak Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi ile denklem 4.14 kullanılarak hesaplamalar yapılabilmektedir.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\Delta x \quad (4.14)$$

4.5 Doğrudan Adım Yöntemi

Doğrudan Adım Yöntemi, prizmatik kanallar özelinde geliştirilmiş bir yöntem olup, derinlik yardımıyla mesafe hesabı olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemle çözüm yapılırken, denklem 3.27 ile TDA denklemi sonlu farklar cinsinden denklem 4.15 ile ifade edilebilmektedir.

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = S_0 - \bar{S}_f \quad (4.15)$$

Bu denklemde mevcut bulunan $\bar{S}_f$, Δx uzunluğundaki bir kanal parçasındaki ortalama enerji çizgisi eğimine karşılık gelmektedir. Denklem 4.15, 1 ve 2 kesitleri arasında denklem 4.16 şeklinde yazılabilmektedir.

$$(x_2 - x_1) = \Delta x = \frac{(E_2 - E_1)}{S_0 - \frac{1}{2}(S_{f1} + S_{f2})} \quad (4.16)$$

Denklem 4.16, Doğrudan Adım Yöntemi ile hesaplamalar yapılacak şekilde denklem 4.17 ile ifade edilmektedir.

$$x_2 = x_1 + \frac{(E_2 - E_1)}{s_0 - \frac{1}{2}(s_{f1} + s_{f2})} \quad (4.17)$$

Denklem 4.17’ de bulunan 1 kesiti akım özelliklerinin bilindiği kesit olup, 2 kesiti için belirlenen derinliğinin bu kesitten ne kadar uzaklıkta olduğu belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu kapsamda, her iki kesitteki akım derinlikleri bilindiğinden denklemin sağ tarafında bulunan kesirli ifade hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda, 1 kesiti özellikleri tamamıyla bilinen kesit olduğundan denklemin sağ tarafı doğrudan belirlenebilmektedir. Sonuç olarak ise denklem 4.17 vasıtasıyla 2 kesitin konumu (x_2) elde edilebilmektedir. Böylelikle, belirli derinlik aralığındaki profiller için iteratif olarak konuma bağlı derinlik grafiği bulunabilmek de yani su yüzeyi profilleri çizilebilmektedir.

Tez kapsamında, kullanılan sayısal yöntemler ile çoğunlukla belirli bir konumdaki derinlikler hesaplandığından ve bu konumlarda deneysel olarak ölçülen derinliklerin kıyası gerektiğinden, bu yöntem ile sayısal çözüm gerçekleştirirken istenilen konumlarda akım derinliği elde edilecek şekilde iterasyonlar yapılmıştır.

4.6 Standart Adım Yöntemi

Doğrudan Adım Yöntemi, prizmatik kanallarda yapılan hesaplamalar için uygunken; doğal kanallara uygulamada bazı zorluklara sahiptir. Bunun sebebi, doğal kanallarda enkesit şekillerinin bir kesitten diğerine farklılık gösterebilme olasılığıdır. Bu sebeple, doğal bir kanal için TDA profilinin belirlenmesinde; iki komşu kesitteki enkesit, debi, ve bir kesitteki derinlik bilinerek diğer kesitteki derinliğin hesabı gerekmektedir. Bu amaçla, denklem 4.18 ile verilen temel enerji denkleminden yararlanılabilmektedir.

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_k \quad (4.18)$$

Denklem 4.18' de bulunan h_k terimi sürtünmeden dolayı meydana gelen enerji kaybı yüksekliğine karşılık gelmekte olup, denklem 4.19 ile ifade edilebilmektedir.

$$h_k = \bar{S}_f \Delta x = \frac{1}{2} (S_{f1} + S_{f2}) \Delta x \quad (4.19)$$

Denklem 4.18' e denklem 4.19 yerleştirilir ve düzenlemeler gerçekleştirilirse denklem 4.20 elde edilebilir.

$$y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2} + \frac{1}{2} S_{f2} (x_2 - x_1) + z_2 - H_1 + \frac{1}{2} S_{f1} (x_2 - x_1) = 0 \quad (4.20)$$

Denklem 4.20' de mevcut bulunan H terimi bir kesitteki toplam enerji yüksekliğine karşılık gelmekte olup, denklem 3.22 ile ifade edilebilmektedir. Denklem 4.20' deki A_2 ve S_{f2} terimleri y_2 derinliğinin fonksiyonu olup, diğer terimlerin hepsinin değeri bilinmektedir. Böylelikle, y_2 terimi aşağıda yer alan 4.21 cebirsel denklemi çözülerek belirlenebilmektedir.

$$F(y_2) = y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2} + \frac{1}{2} S_{f2} (x_2 - x_1) + z_2 - H_1 + \frac{1}{2} S_{f1} (x_2 - x_1) = 0 \quad (4.21)$$

Denklem 4.21, y_2 terimi için deneme yanılma yöntemiyle veya sayısal kök bulma yöntemleri (Newton-Raphson, yarılama vs.) ile çözülebilmektedir. Tez çalışması kapsamında Newton-Raphson yöntemi kullanılmış olup, yönteme dair detaylar aşağıda sunulmuştur.

Bu yöntem ile çözüm yapılırken, $\frac{dF}{dy_2}$ ifadesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ifade, denklem 4.21' in y_2 terimine göre türevi alınarak denklem 4.22 ile ifade edilebilmektedir.

$$\frac{dF}{dy_2} = 1 - \frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^3} \frac{dA_2}{dy_2} + \frac{1}{2} (x_2 - x_1) \frac{d}{dy_2} \left(\frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right) \quad (4.22)$$

Denklem 4.22' de bulunan son terim denklem 4.23 ile ifade edilebilmektedir.

$$\frac{d}{dy_2} \left(\frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right) = -2 \left(S_{f2} \frac{T_2}{A_2} + \frac{2}{3} \frac{S_{f2}}{R_2} \frac{dR_2}{dy_2} \right) \quad (4.23)$$

Bu denklemde, dA_2/dy_2 terimi yerine T_2 yerleştirilmiş olup, denklem 4.22' ye denklem 4.23 yerleştirilmesi durumunda denklem 4.24 elde edilir.

$$\frac{dF}{dy_2} = 1 - \frac{\alpha_2 Q^2 T_2}{gA_2^3} - (x_2 - x_1) \left(S_{f2} \frac{T_2}{A_2} + \frac{2}{3} \frac{S_{f2}}{R_2} \frac{dR_2}{dy_2} \right) \quad (4.24)$$

Denklem 4.24' de yer alan $\frac{dR_2}{dy_2}$ terimi denklem 4.25 ile ifade edilebilmektedir.

$$\frac{dR_2}{dy_2} = \frac{T_2}{P_2} - \frac{A_2}{P_2^2} \frac{dP_2}{dy_2} \quad (4.25)$$

Newton-Raphson yöntemi ile y_2 teriminin hesaplanma adımları aşağıdaki gibidir.

1. Bilinen y_1 ve z_1 değerleri için denklem 3.22 ile 1 kesitindeki enerji yüksekliği (H_1) hesaplanır.

2. 2 numaralı kesitteki y_2 akım derinliği tahmin edilir. Burada tahmin edilen akım derinliği ve buna karşılık gelen büyüklükler * üst indisi ile belirtilmiştir.
3. 2 numaralı kesit için tahmin edilen y_2^* derinliğinden yararlanılarak, T_2^* , R_2^* ve S_{f2}^* parametreleri hesaplanır. z_2 teriminin değeri mevcut veri olarak verilebilir. Yahut bilinen kanal taban eğimi ve z_1 değerinden yola çıkılarak belirlenebilmektedir.
4. y_2^* , T_2^* , A_2^* , R_2^* ve S_{f2}^* terimleri kullanılarak denklem 4.21 yardımıyla $F(y_2^*)$ 'nin değeri hesaplanır.
5. y_2^* akım derinliği ve bu derinliğe karşılık gelen A_2^* , R_2^* ve S_{f2}^* vb. değerler kullanılarak denklem 4.24 vasıtasıyla dF/dy_2 'nin değeri hesaplanır.
6. y_2 akım derinliğinin daha iyi bir tahmini aşağıdaki denklem 4.26 ile belirlenebilir.

$$y_2 = y_2^* - \frac{F(y_2^*)}{\left[dF/dy_2\right]^*} \quad (4.26)$$

7. Eğer $|y_2 - y_2^*| \leq \mathcal{E}$ ise iteratif çözümün yakınsadığı söylenir. Burada $\mathcal{E}$ tolerans miktarına karşılık gelmektedir. Bu durumda 2 kesitindeki akım derinliği y_2^* olmaktadır. Eğer koşul sağlanmaz ise 3-7 aralığındaki adımlar çözüm elde edilinceye kadar tekrarlanır.

4.7 Diferansiyel Kuadratur Yöntemi

Diferansiyel Kuadratur (DK) Yöntemi, 1970' li yılların başında R. E. Bellman vd. tarafından geliştirilmiştir. DK Yöntemi, türevlerin tahmini için kullanılan sayısal ayrıklaştırma yöntemi olup, alışlageldik integral kuadratur fikrinden yola çıkılarak geliştirilmiştir.

DK Yöntemi, doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin çözümünde son zamanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Yöntem, su yüzeyi profillerinin çözümünde ise ilk olarak Kaya (2010) tarafından kullanılmıştır. Bu çalışmada; yazar aynı problem için DK yöntemi ile elde ettiği sonuçları Doğrudan Adım Yöntemi ile elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır. Çalışma ile, yöntemin iyi sonuçlar verdiği çıkarımı yapılmıştır. Tez kapsamında, Kaya (2010) tarafından yapılan çalışmaya ilaveten sayısal olarak DK ile elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylelikle, yöntem ile yapılan sayısal sonuçların gerçek durum ile ne ölçüde benzeştiğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Su yüzeyi profillerinin sayısal olarak çözümü tek boyutlu bir problem olmakla beraber, Bellman ve diğerleri (1972) tarafından önerilen şekliyle DK ile çözüm yapılırken birinci mertebeden diferansiyel denklem, denklem 4.27' deki gibi ayrıklaştırılabilmektedir.

$$\left. \frac{dx}{dy} \right|_{y_i} = \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x(y_j), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.27)$$

Denklem 4.27' de mevcut bulunan dx/dy türevi denklem 4.28 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1-Fr^2}{S_0-S_f} = \frac{1-\frac{Q^2T}{gA^3}}{S_0-\left[\frac{nQP^{2/3}}{A^{5/3}}\right]^2} \quad (4.28)$$

Denklem 4.27' de $x(y)$ fonksiyonunun y değişkenine göre birinci mertebeden türevinin y_i grid noktasındaki değerinin tüm çözüm alanı içerisindeki fonksiyonel değerlerin doğrusal olarak toplamı şeklinde tahmin edildiği görülmektedir.

Bu denklemde mevcut bulunan a_{ij} ağırlık katsayılarına ve N ise tüm çözüm alanı içerisindeki grid noktalarının sayısına karşılık gelmektedir. a_{ij} ağırlık katsayıları y_i noktalarında farklılık göstermekte olup, DK Yöntemi' nde en önemli kısım ağırlık katsayıları matrisini belirleyebilmektir. Bu kapsamda, çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan Quan ve Chang (1989a) tarafından geliştirilen yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımın detayları aşağıdaki bölümde sunulmuştur.

4.7.1 Quan ve Chang Yaklaşımı

Quan ve Chang (1989a), ağırlık katsayıları matrisini hesaplamak için denklem 4.29 ile verilen Lagrange enterpolasyon polinomlarını test fonksiyonları olarak kullanmıştır.

$$g_k(y) = \frac{M(y)}{(y-y_k) \cdot M^{(1)}(y_k)}, k = 1, 2, \dots, N \quad (4.29)$$

Bu denklemde mevcut bulunan $M(y)$ ve $M^{(1)}(y_k)$ terimleri denklem 4.30 ve denklem 4.31 ile aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$M(y) = (y - y_1)(y - y_2) \dots (y - y_N) \quad (4.30)$$

$$M^{(1)}(y_k) = \prod_{k=1, k \neq i}^N (y_i - y_k) \quad (4.31)$$

Sonuç olarak, N adet grid noktasına denklem 4.29 uygulanarak, a_{ij} ağırlık katsayılarını hesaplamak için kullanılan cebirsel formülasyonlar denklem 4.32 ve denklem 4.33’ deki gibi elde edilmiştir.

$$a_{ij} = \frac{1}{y_j - y_i} \prod_{k=1, k \neq i}^N \frac{y_i - y_k}{y_j - y_k}, \quad j \neq i \quad (4.32)$$

$$a_{ii} = \sum_{k=1, k \neq i}^N \frac{1}{y_i - y_k} \quad (4.33)$$

Ağırlık katsayılarını hesaplamada denklem 4.32 ve denklem 4.33 kullanıldığında grid noktalarının seçiminde herhangi bir kısıtlama söz konusu değildir. Bu sebeple, çalışmada sözü geçen yaklaşımdan yararlanılmıştır.

Denklem 4.33’ de bulunan y akım derinliği değerlerinin seçimi DK Yöntemi ile çözüm yaparken, sonuca doğrudan etki etmektedir. Bu kapsamda, bu noktaların seçimi için DK Yöntemi özelinde kullanılan grid noktası dağılımları söz konusudur. Yapılan çalışmada, su yüzeyi profillerinin çözümü için Chebyshev grid ve Chebyshev-Gauss-Lobatto grid noktası dağılımları kullanılmıştır.

4.7.2 Grid Noktası Dağılımları

4.7.2.1 Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid

Bu grid yapısında, $[a, b]$ fiziksel alan için akım derinlikleri denklem 4.34’ deki gibi belirlenebilmektedir.

$$y_i = \frac{1}{N-1} ((b - a) \cdot i + (aN - b)) \quad (4.34)$$

Bu denklemde mevcut bulunan N terimi hesap noktası sayısına, y_i akım derinliğine, i ise $[1, N]$ arası değişen grid noktasının sıra sayısına karşılık gelmektedir. Bu grid noktası dağılımında N terimi kullanıcı tarafından tanımlanmakta olup, bu parametrenin seçimi çözümü önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun sebebi, N değerinin çok küçük seçilmesi durumunda çözümün yeterli hassasiyette gerçekleşmemesinden; çok büyük seçilmesi durumunda ise çözümün stabil olmamasından kaynaklanmaktadır. Denklem 4.34’ de bulunan a ve b katsayıları ise hesap yapılan profilin alt ve üst derinlik değerlerine karşılık gelmekte olup, su yüzeyi profilleri özelinde sınır koşulu olarak laboratuvar ölçümlerinden elde edilen derinlik değeri kullanılmakta ve diğer sınır ise profil türüne bağlı olarak kritik derinlik veya üniform derinlik olmaktadır.

4.7.2.2 Chebyshev Grid

Bu grid yapısında, $[a, b]$ fiziksel alan için akım derinlikleri denklem 4.35’ deki gibi belirlenebilmektedir.

$$y_i = a - (d - a) \frac{\left(\cos\left[\frac{(2i-1)\pi}{2N}\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2N}\right)\right)}{2 \cos\left(\frac{\pi}{2N}\right)} \quad (4.35)$$

4.7.3 Çözüm için Ters Matris Yöntemi

Su yüzeyi profillerinin çözümünde DK Yöntemi kullanılırken, öncelikli olarak çözüm alanı denklem 4.34 veya denklem 4.35 ile verilen bağıntılar yardımıyla N adet noktaya bölünmektedir. Burada N adet noktadaki seçilen derinliklere karşılık gelen konumların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için, denklem 4.30 ve 4.31 ile verilen bağıntılar yardımıyla $N \times N$ boyutlarına sahip olan katsayılar matrisi oluşturulmalıdır. Daha sonrasında ise denklem sistemini oluşturabilmek amacıyla sağ taraf vektörü olan b vektörünün hesabı gerekmektedir. Denklem 4.27 çözüm için matris formunda denklem 4.36 ile ifade edilebilmektedir.

$$AX = b \quad (4.36)$$

Denklem 4.36' da bulunan denklem sistemi doğrusal bir denklem sistemi olup, çözümü için birçok yöntem kullanılabilir. Tez kapsamında, ters matris yöntemi kullanılmış olup, denklem 4.37 ile çözümler gerçekleştirilmiştir.

$$X = A^{-1}b \quad (4.37)$$

Denklem 4.37' da bulunan A^{-1} katsayılar matrisinin tersine karşılık gelmektedir. Bu denklem yardımıyla seçilen derinliklerin hangi konumlarda meydana geleceği belirlenebilmektedir. Çalışma, deneysel ve sayısal çözümlerin karşılaştırılmasını kapsadığından, ölçüm yapılan konumlardaki akım derinliklerinin sayısal olarak çözümüne gereksinim duymaktadır. Bu amaçla, çözüm ile elde edilen konumlardan yola çıkılarak doğrusal enterpolasyon yardımıyla deneysel olarak ölçüm yapılan konumlardaki akım derinlikleri elde edilebilmiştir.

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ

5.1 Deney Düzenegi

Tez kapsamında, deneysel çalışmalar Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan dikdörtgen kesitli prizmatik açık kanal deney düzeneginde gerçekleştirilmiştir.

Deney düzenegi; 9,2 m uzunluğa, 25 cm genişliğe ve 24 cm yüksekliğe sahip olup, taban ve yan duvarlar pleksiglas malzeme ile kaplıdır. Deney düzeneginde 2 adet 500 L hacme sahip PVC' den imal edilmiş hazne bulunmaktadır. Bu hazneler birbirlerine tabandan plastik bir boru yardımıyla bağlanmış olup, sızdırmazlık silikon yardımıyla sağlanmıştır.

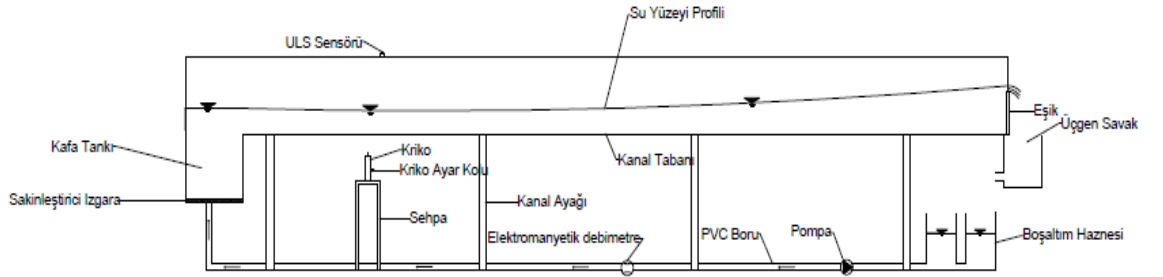
Haznelerde bulunan suyun kanala girişi 1 kW güce sahip pompa ve 9 m uzunluk, 2 inç çapa sahip dairesel boru yardımıyla gerçekleşmektedir. Bu boru üzerinde debi ölçümünün hassas bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlayan elektromanyetik debimetre bulunmaktadır. Kanala giriş yapacak suyu debisi pompa üzerinde bulunan kelebek vana ile ayarlanmaktadır. Ayrıca, kanal girişinde suyun türbülans etkisini en aza indirebilmek için sakinleştirici ızgaralar yer almaktadır.

Deney düzenegi, laboratuvarında bulunan teknik ekibin yardımıyla kanal tabanı hareket ettirilebilir şekilde yeniden tasarlanmıştır. Bunun sebebi çalışma kapsamında farklı kanal taban eğimlerinin oluşumunu olanaklı kılmaktır. Böylelikle, farklı su yüzeyi profilleri deney düzeneginde oluşturulabilmektedir. Kanal taban eğimi, kanal başlangıcında yer alan şişe krika ile ayarlanmaktadır. Bu kapsamda; kanal krika ile kaldırıldığında oluşan taban eğimi laboratuvarında bulunan nivo ve mira yardımıyla belirlenmiştir. Ayrıca, kanalda doğrusal bir eğim oluşturulabilmesi için kanal

kaldırıldığında tabanda oluşan sehimleri en aza indirebilmek için nivo ile belirlenen yerlerden kanal çelik profiller ile güçlendirilerek rijitlik sağlanmıştır.

Deney düzeneğinin başlangıcında ve sonunda hem kapak hem de eşik olarak kullanılabilecek dikdörtgen şeklinde pleksiglas malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemelerin kanal başlangıcında ve sonunda kullanılmasının nedeni profillerin oluşturulabilmesi için kanal uzunluğunun etkin bir şekilde kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, deney düzeneğinin sonunda üçgen savak bulunmakta olup, çalışma kapsamında debimetre ile yapılan ölçümlerin kontrolü amacıyla kullanılmıştır.

Şekil 5.1’ de deney düzeneğinin şematik çizimi yer almakta olup, Şekil 5.2’ de ise düzeneğin görseli mevcuttur.



Şekil 5.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 5.2 Deney düzeneği

5.2 Ölçüm Cihazları

Deneyler sırasında akım derinliklerinin ölçümü için Ultralab ULS cihazı ve limnimetre eşzamanlı olarak kullanılmıştır. Debi ölçümü için elektromanyetik debimetre cihazı, kanal taban eğiminin belirlenmesinde ise nivelman ve mira kullanılmıştır.

5.2.1 Ultralab ULS Cihazı

Ultralab ULS cihazı General Acoustics firması tarafından üretilen ve birçok hidrolik uygulamasında derinlik ölçümünde yararlanılan bir cihazdır. Çalışma kapsamında, derinlik ölçümlerinde limnimetre ile birlikte kullanılmıştır. Cihaz verilerin işlendiği ana kutu ve bu kutuya bağlı sensörlerden oluşmaktadır. Cihazın çalışma prensibi, sensörler tarafından gönderilen ses dalgaları ile su yüzeyine çarpan ses dalgaları arasındaki mesafenin ölçülmesi üzerinedir. Bu kapsamda, sensörler ölçüm yapabildikleri aralıklar ile adlandırılmaktadır. Bunlar; USS325 (3 cm- 25 cm), USS635 (6 cm- 35 cm), USS20130 (20 cm- 130 cm) ve USS35340 (35 cm- 340 cm) dir. Yapılan çalışmada, hidrolik laboratuvarında bulunan 4 adet USS325 ve 4 adet USS635 türündeki sensörlerden yararlanılmıştır.

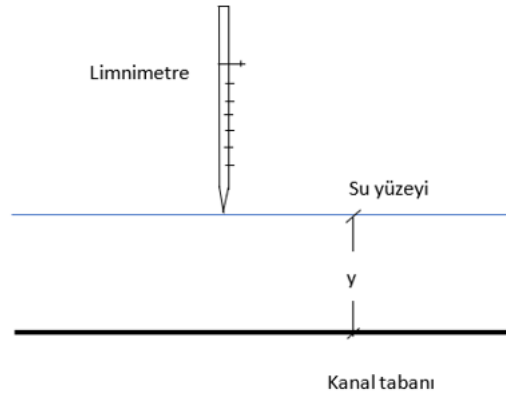
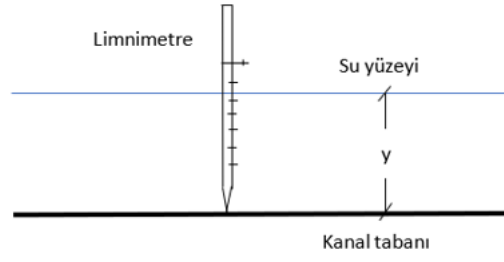
ULS cihazı belirli bir kesitteki su derinliğinin zamana bağlı olarak değişimini ölçebilmektedir. Yapılan çalışma, kararlı akım durumunu kapsadığından derinliğin zamana bağlı değişimi ile ilgilenilmemektedir. Bu sebeple, toplam 8 adet sensörden yararlanılarak kanal boş durumda iken sensörler ile okumalar gerçekleştirilmiştir. Okumalar, belirli aralıklarla tüm kanal boyunca gerçekleştirilmiştir. Kanalda akım meydana geldikten sonra sensörlerle tekrardan su yüzeyi için ölçümler alınmakta ve kararlı akım durumu için su derinliği belirli bir kesit için bu iki değer farkına eşit olmaktadır. ULS cihazı ile elde edilen ölçümler cm cinsinden virgülden sonra iki anlamlı hassasiyette elde edilmektedir. Şekil 5.3’ de derinlik ölçümlerinde kullanılan ULS cihazı yer almaktadır.



Şekil 5.3 Ultralab ULS (General Acoustics, 2007)

5.2.2 Limnimetre

Tez kapsamında derinlik ULS cihazı ve limnimetre ile eşgüdümlü olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi, ULS cihazı ile elde edilen verilerin kontrolünden kaynaklanmaktadır. Limnimetre ile derinlik ölçümleri mekanik olarak yapılmaktadır. Limnimetre kanal üzerinde hareket ettirilebilir şekilde tasarlanmış olup, böylelikle derinlik ölçümü yapılmak istenen konuma kolaylıkla taşınabilmektedir. Bu mekanik aygıt ile istenilen kesitteki su derinliğinin ölçümü için öncelikle limnimetrenin metalden oluşan ucu kanal tabanına değdirilerek bir okuma alınır. İkinci okuma ise limnimetrenin ucunun su yüzeyinde bulunması durumunda alınmaktadır. Böylelikle bu iki değer arasındaki fark kesitteki su derinliğine eşit olmaktadır. Limnimetre ile yapılan derinlik ölçümleri cm cinsinden virgülden sonra 2 basamak hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4’ de bu durum şematik olarak gösterilmiş olup, Şekil 5.5’ de ise kullanılan limnimetre aygıtı görülmektedir.



Şekil 5.4 Derinlik ölçümünde limnimetrenin kullanımı



Şekil 5.5 Laboratuvarda bulunan ve derinlik ölçümünde kullanılan limnometre

5.2.3 Nivelman ve Mira

Tez kapsamında, kanal taban eğiminin ölçümü büyük bir önem arz etmektedir. Bu sebeple, eğimin hassas bir şekilde ölçümü için nivelman ve mira birlikte kullanılmıştır. Ölçüm yapılırken; bir kişi mira adı verilen üzerinde su terazisi ve metre bulunan ucu sivri metal cismin ucunu kanal tabanına değdirmekte, ikinci kişi sehpa üzerine konulmuş ve teraziye getirilmiş nivelman ile miraya bakarak okuma yapmakta, diğer kişi ise bu okuma değerini not almaktadır. Böylelikle, bir konumdaki okuma değeri alınabilmektedir.

Belirli aralıklarla kanal taban ölçümleri alındıktan sonra konuma bağlı olarak kanal taban kotları elde edilmekte ve böylelikle kanal taban eğimi hesaplanabilmektedir. Tez kapsamında, her bir profil tipi için iki farklı eğim değeri kullanılmış olup, her eğim değişiminde kanal taban kotları nivelman ve mira yardımıyla belirlenmiştir. Şekil 5.6' da laboratuvarda bulunan ve ölçümlerde yararlanılan nivelman görülmektedir.



Şekil 5.6 Laboratuvarda bulunan ve kot ölçümünde kullanılan nivelman

5.2.4 Elektromanyetik Debimetre

Çalışma kapsamında, debi sayısal çözümde girdi olarak kullanıldığından, hassas bir şekilde ölçümü büyük bir önem arz etmektedir. Bu kapsamda, yapılan deneylerde debi ölçümü için elektromanyetik debimetre kullanılmıştır. Debimetre biri giriş biri çıkış olmak üzere iki adet flanş bağlantısı, gösterge paneli ve ana gövdeden oluşmaktadır. Montaj için kanala su iletimini sağlayan plastik boru cihaz yerleştirilebilecek ölçüde

kesilmiştir. Cihaz ile 0,45 m³/saat ila 45,3 m³/saat aralığındaki debiler %0,5 hassasiyetle ölçülebilmektedir. Elektromanyetik Akış ölçümü; elektromanyetik Alan prensibine dayanan akış ölçme yöntemidir. Bu prensibin fiziksel temelleri 1831 yılında manyetik alan yardımıyla elektrik akımı üretilebileceğini keşfeden İngiliz Fizikçi Michael FARADAY'a dayanmaktadır. 1941 yılında İsviçreli Mucid Bonaventura Thurlemann bu bilgiyi borulardan geçen iletken sıvılar uygulamış ve dünyanın ilk elektromanyetik akış ölçerini üretmiştir. Şekil 5.7' de laboratuvarında bulunan ve deneyler kapsamında debi ölçümünde kullanılan elektromanyetik debimetre bulunmaktadır.



Şekil 5.7 Laboratuvarında bulunan ve debi ölçümünde kullanılan elektromanyetik debimetre (Kişisel arşiv, 2022)

5.3 Su Yüzeyi Profillerinin DeneySEL Olarak Oluşturulması

5.3.1 Küçük Eğimli Kanallarda Su Yüzeyi Profillerin DeneySEL Olarak Oluşturulması

5.3.1.1 M1 Profili

Hazneden kanalı besleyen pompa maksimum 3 L/s' lik debi basabilmektedir. Dolayısıyla bu debi aralığında küçük eğimli kanal oluşturabilmek için $S_0 < S_c$ şartı sağlanmalıdır. Çalışma kapsamında, bu debi aralığında bahsi geçen şartı sağlayacak eğimler Excel yardımıyla belirlenmiş ve kanal eğimi buna göre ayarlanmıştır.

Deneyssel olarak oluşturulan su yüzeyi profilleri 2 farklı eğim ve 3 farklı debi için gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, her bir profil türünden 6 adet oluşturulmuştur. Fakat; M1 profili diğer profil türlerine kıyasla daha uzun olduğundan tek bir eğim ve 3 farklı debi için gerçekleştirilebilmiştir.

Deney düzeneğinde M1 profilini oluşturabilmek için kanal sonunda hem kapak hem de eşik olarak işlev gösterebilen ve Şekil 5.8' de mevcut bulunan üstünde bulunan vida ile aşağı ve yukarı yönde hareket edebilen bir düzenek kullanılmıştır. Bu düzeneğin kanalın sonunda tertip edilmesinin temel sebebi kanal uzunluğunu efektif olarak kullanabilmekten kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.8 Deney düzeneğinin mansap kısmında bulunan ve düşey yönde hareket edebilen eşik

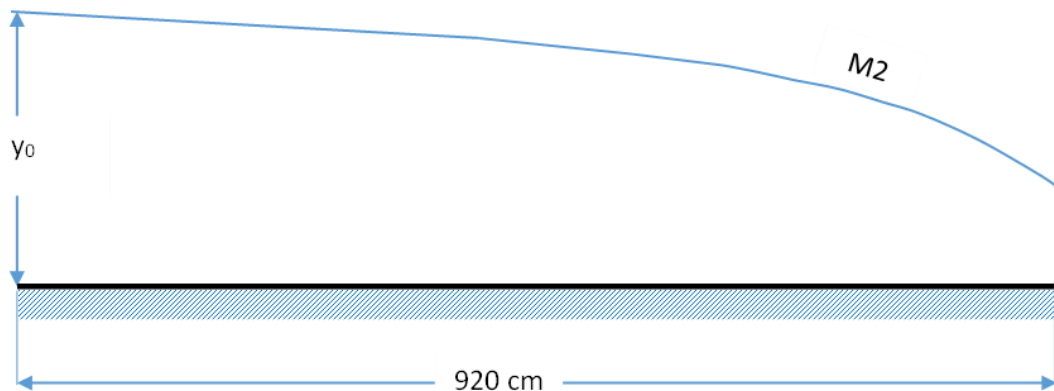
Çalışma kapsamında deneysel olarak oluşturulan M1 profillerine ait deney koşulları Tablo 5.1’ de görülmektedir. Oluşturulan M1 profillerine ait derinlik ölçümleri 50 cm aralıklarla gerçekleştirilmiş olup, sayısal çözümde kullanılan başlangıç koşulu ise eşik arkasında ölçülen su derinliğidir.

Tablo 5.1 Deneysel olarak oluşturulan M1 profillerine ait deney koşulları

Deney numarası	Debi (L/s)	Kanal taban eğimi	Eşik yüksekliği (cm)
1	1,2	0,002	1,5
2	2,4		
3	3		

5.3.1.2 M2 Profili

M2 profili; deneysel olarak 3 farklı debi ve 2 farklı kanal taban eğimi için gerçekleştirilmiş olup, toplamda 6 adet su yüzeyi profili elde edilmiştir. Bu türden profili oluşturabilmek için kanalda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Kanala giriş yapan akım kanal sonunda beslenme haznesine dökülmekte ve böylelikle oluşan düşü ile M2 profili elde edilebilmektedir. Bu duruma ait şematik çizim Şekil 5.8’ de yer almaktadır. Deneysel çalışmaya başlarken öncelikli olarak M2 profili oluşturulmuştur. Bunun sebebi diğer profillerin oluşumu için kanal içerisinde yapılacak değişikliklerin bu profili bozma durumunu engellemekten ötürüdür.



Şekil 5.9 Oluşturulan M2 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi

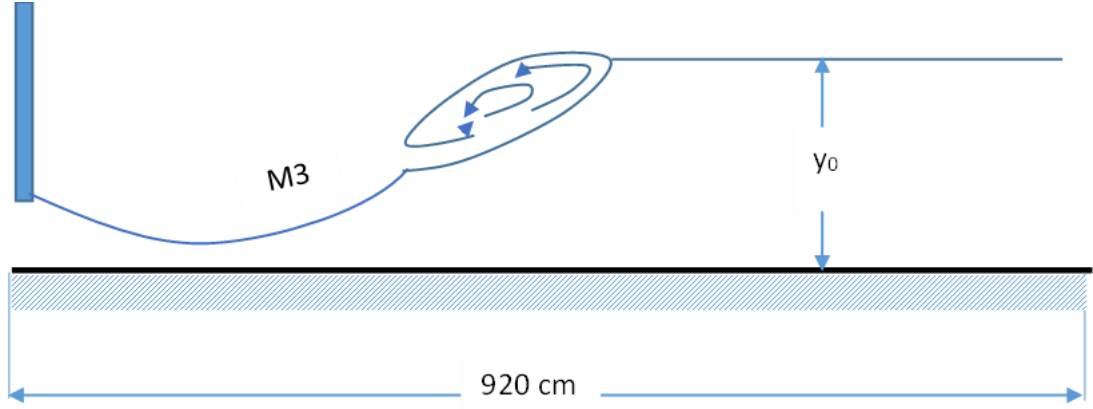
Şekil 5.9’ da şematik olarak gösterilen M2 profiline ait derinlik ölçümleri 50 cm aralıklarla gerçekleştirilmiş olup, sayısal çözümde kullanılan başlangıç koşulu kanal mansabında ölçülen derinlik olmaktadır Oluşturulan M2 profillerine ait deney koşulları Tablo 5.2’ de bulunmaktadır.

Tablo 5.2 Deneyssel olarak oluşturulan M2 profillerine ait deney koşulları

Deney numarası	Debi (L/s)	Kanal taban eğimi
1	1	0,002
2	2,1	
3	3	
4	1,5	0,003
5	2,6	
6	3	

5.3.1.3 M3 Profili

M3 profilini deneyssel olarak oluşturabilmek için kanalın memba kısmına kapak yerleştirilmiştir. 3 farklı debi ve 2 farklı eğim için deneyler tekrarlanmış olup, oluşturulan M3 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 5.10’ da sunulmuştur.



Şekil 5.10 Oluşturulan M3 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi

Şekil 5.10’ da görüldüğü üzere kapak altından geçen akım bir süre sonra büzülmektedir. Dolayısıyla bu bölge hızlı değişen akım bölgesidir. Bu sebeple, akım ölçümleri bu bölge sonu ile sıçrama başlangıcı arasındaki kısımda 50 cm aralıklar ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözüm için kullanılan başlangıç koşulu ise hızlı değişen akım bölgesi sonundaki derinlik değeridir.

Tablo 5.3’ de oluşturulan M3 profillerine ait deney koşulları bulunmaktadır.

Tablo 5.3 Deneysel olarak oluşturulan M3 profillerine ait deney koşulları

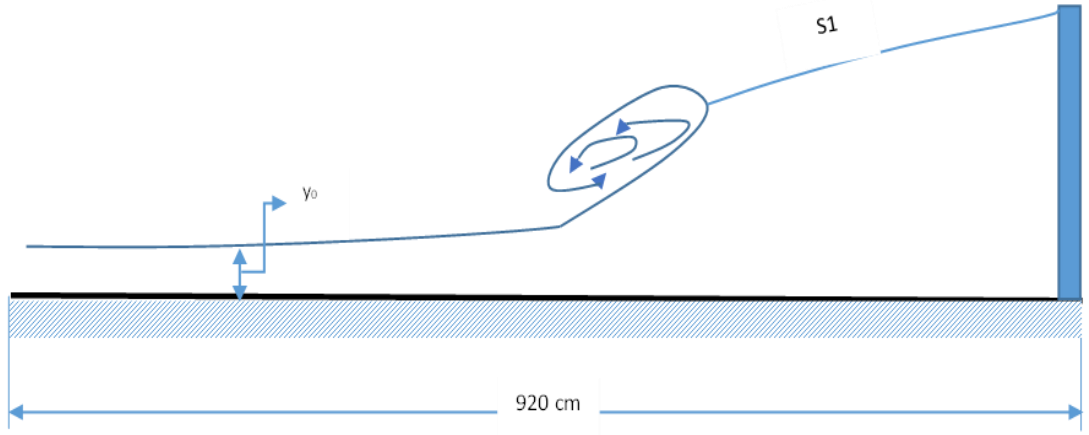
Deney numarası	Debi (L/s)	Kanal taban eğimi	Kapak açıklığı (cm)
1	0,8	0,002	0,2
2	2,2		0,6
3	3		0,9
4	2,4	0,003	0,7
5	3		1

5.3.2 Büyük Eğimli Kanallarda Su Yüzeyi Profillerin Deneysel Olarak Oluşturulması

5.3.2.1 S1 Profili

Büyük eğimli kanallarda oluşan profillerin deneysel olarak oluşturulabilmesi için 0-3 L/s debi aralığında $S_0 > S_c$ şartının sağlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, bu şartı sağlayacak eğim değerleri Excel ile belirlenmiş ve şişe krika yardımıyla bu eğimler oluşturulmuştur. S1 profili Şekil 5.8’ de yer alan kanal düzeneğinin mansabında bulunan eşik yardımıyla oluşturulmuştur. Deneyler 2 farklı kanal taban eğimi ve 3 farklı debi için gerçekleştirilmiş olup, böylelikle toplamda 6 adet S1 türü su yüzeyi profili elde edilmiştir.

Sayısal analizde kullanılacak başlangıç koşulu olan derinlik değeri eşik arkasında ölçülen su derinliği olup, derinlik ölçümleri sıçrama sonundan eşiğe kadar olan aralıkta gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak oluşturulan S1 profillerine ait şematik gösterimi Şekil 5.11’ de sunulmuştur.



Şekil 5.11 Oluşturulan S1 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi

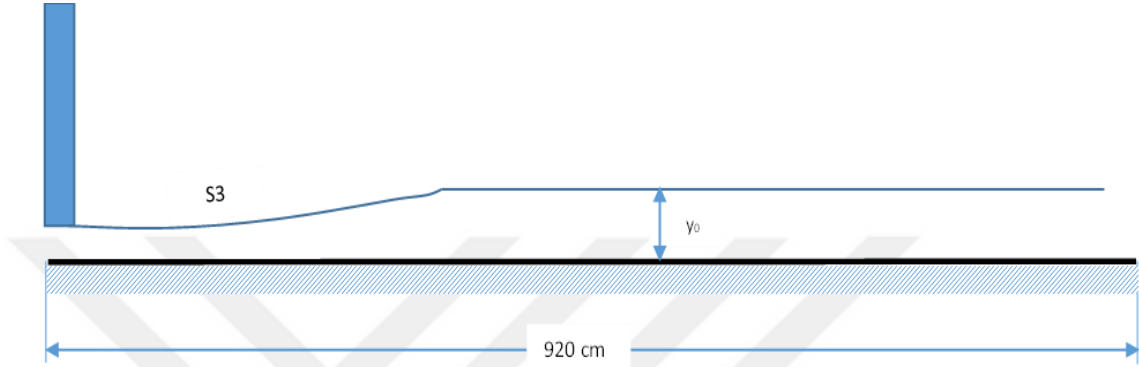
Tablo 5.4’ de oluşturulan S1 profillerine ait deney koşulları bulunmaktadır.

Tablo 5.4 Deneysel olarak oluşturulan S1 profillerine ait deney koşulları

Deney numarası	Debi (L/s)	Kanal taban eğimi	Eşik yüksekliği (cm)
1	0,6	0,008	3,5
2	2,5		
3	3		
4	0,6	0,009	4,8
5	2		
6	3		

5.3.2.2 S3 Profili

S3 profilini deneysel olarak oluşturabilmek için kanalın memba kısmına kapak yerleştirilmiştir. 2 farklı debi ve 1 eğim için deneyler tekrarlanmış olup, oluşturulan M3 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 5.10’ da sunulmuştur.



Şekil 5.12 Oluşturulan S3 profili ve deney düzeneğinin şematik çizimi

Şekil 5.12’ da görüldüğü üzere kapak altından geçen akım bir süre sonra büzülmektedir. Dolayısıyla bu bölge hızlı değişen akım bölgesidir. Bu sebeple, akım ölçümleri bu bölge sonu ile üniform derinliğin olduğu bölge arasındaki kısımda 50 cm aralıklar ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözüm için kullanılan başlangıç koşulu ise hızlı değişen akım bölgesi sonundaki derinlik değeridir.

Tablo 5.5’ de oluşturulan M3 profillerine ait deney koşulları bulunmaktadır.

Tablo 5.5 Deneysel olarak oluşturulan S3 profillerine ait deney koşulları

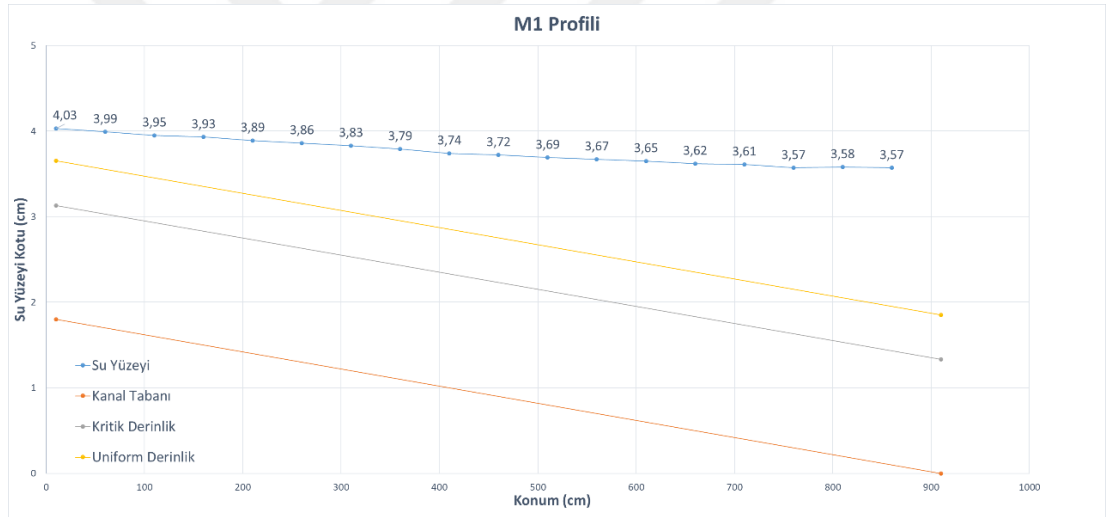
Deney numarası	Debi (L/s)	Kanal taban eğimi	Kapak açıklığı (cm)
1	0,7	0,009	1
2	2,7		

BÖLÜM ALTI

DENEYSEL BULGULAR VE DENEYSEL BULGULAR İLE SAYISAL ÇÖZÜMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

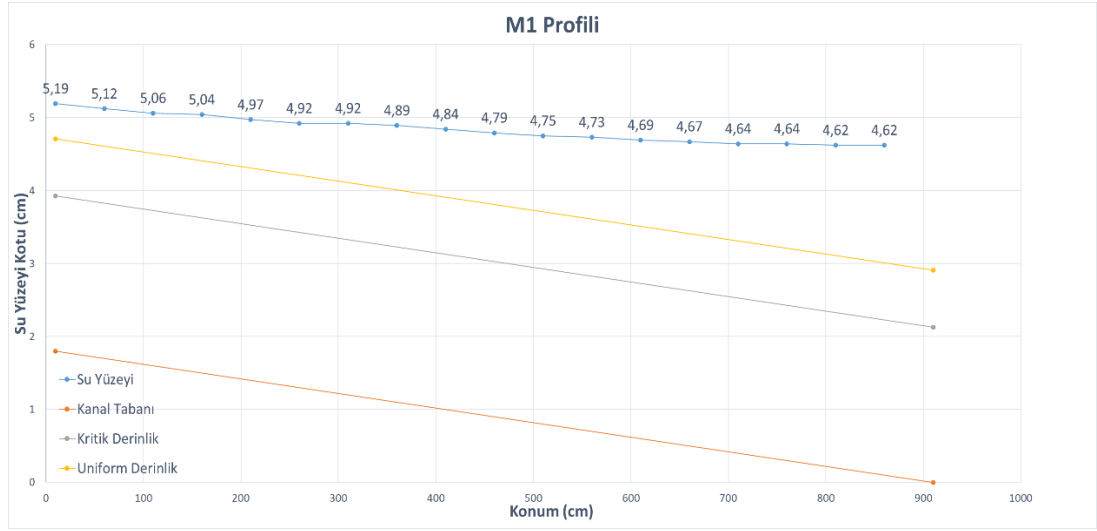
6.1 Deneysel Bulgular

Deneysel olarak yapılan ölçümlerin Excel yardımıyla; ÜDÇ, KDC, kanal tabanı ve su yüzeyi birlikte gösterilerek boy kesitsel grafiği çizilmiştir. ÜDÇ kanal pleksiglas malzemeden olduğundan dolayı Manning pürüzlülük katsayısı 0,011 alınarak belirlenmiştir. Şekil 6.1’ de 1 numaralı M1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



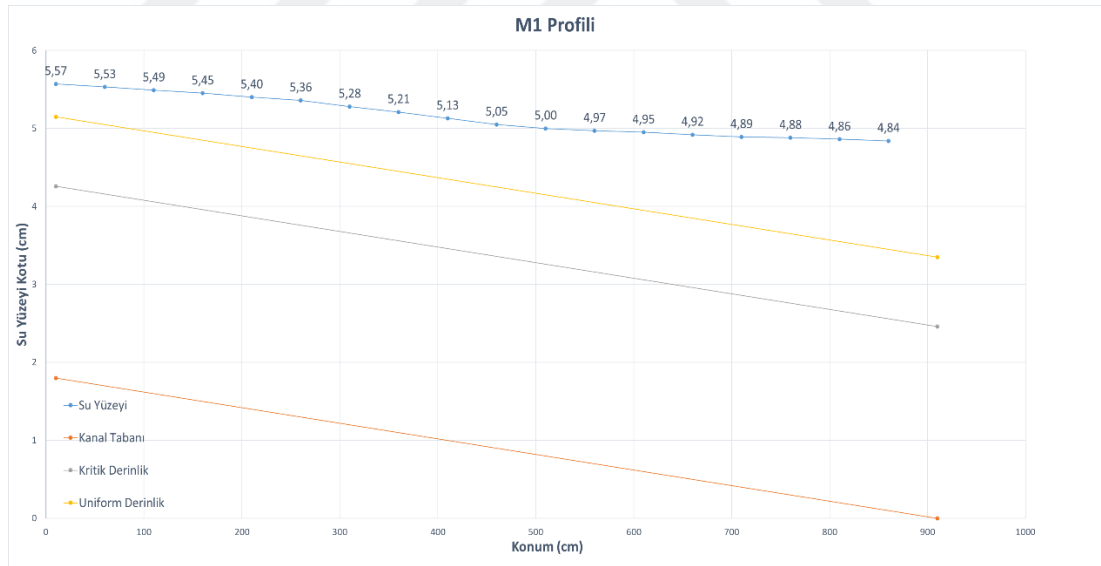
Şekil 6.1 Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı M1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.2’ de 2 numaralı M1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



Şekil 6.2 Deneyssel olarak oluşturulan 2 numaralı M1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.3’ de 3 numaralı M1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



Şekil 6.3 Deneyssel olarak oluşturulan 3 numaralı M1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.4’ de 1 numaralı M2 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



Şekil 6.4 Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.5’ de 2 numaralı M2 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



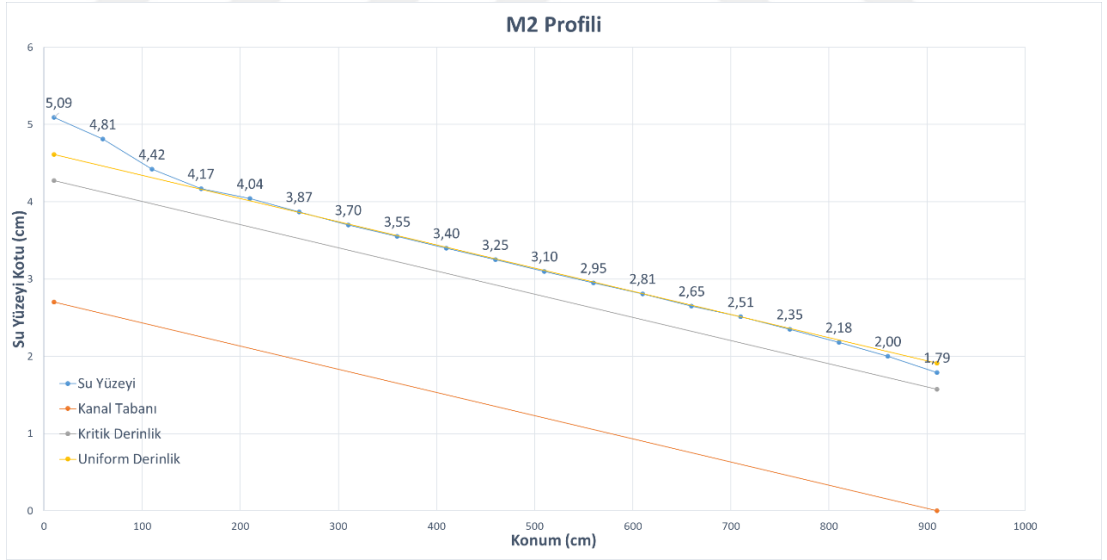
Şekil 6.5 Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.6’ da 3 numaralı M2 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



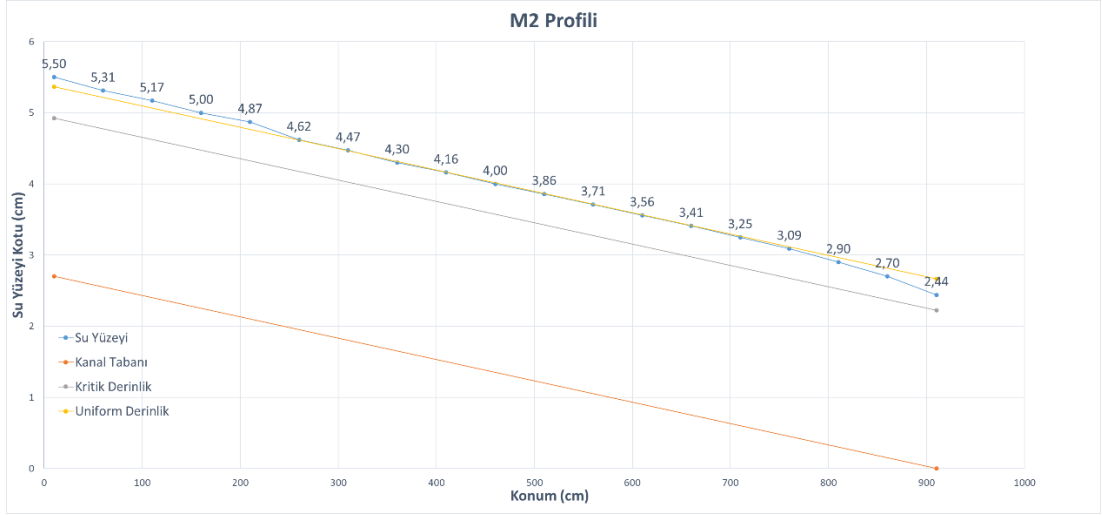
Şekil 6.6 Deneysel olarak oluşturulan 3 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.7’ de 4 numaralı M2 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



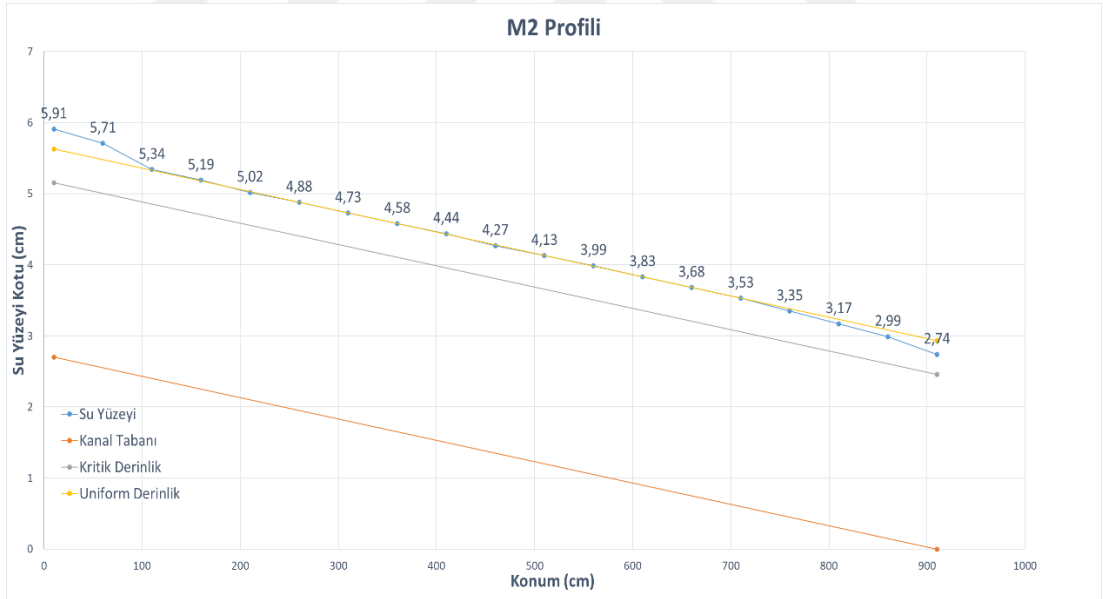
Şekil 6.7 Deneysel olarak oluşturulan 4 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.8’ de 5 numaralı M2 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



Şekil 6.8 Deneysel olarak oluşturulan 5 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.9’ da 6 numaralı M2 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



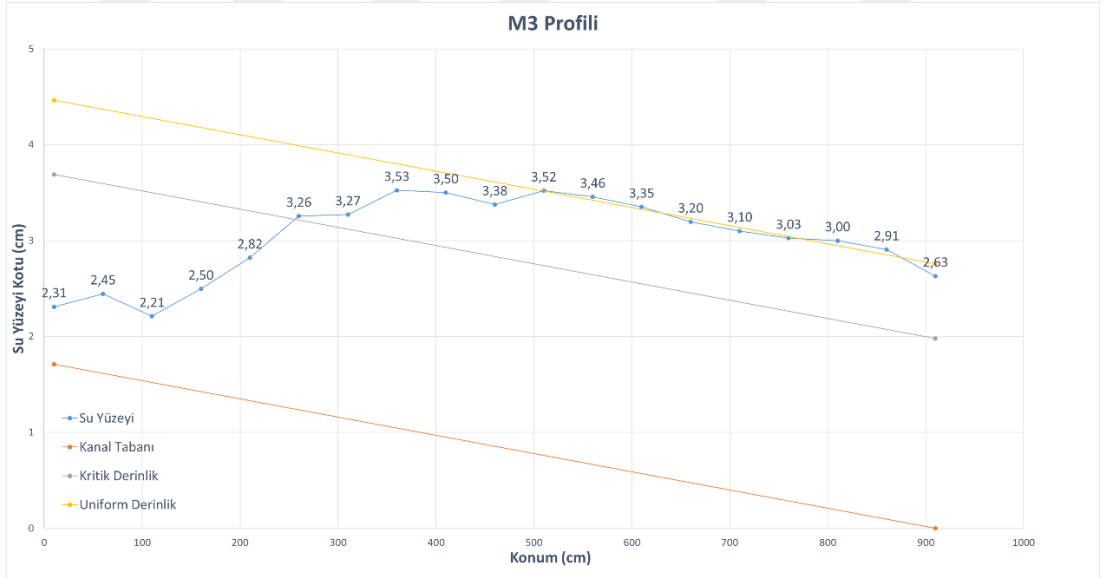
Şekil 6.9 Deneysel olarak oluşturulan 6 numaralı M2 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.10’ da 1 numaralı M3 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



Şekil 6.10 Deneyssel olarak oluşturulan 1 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.11’ de 2 numaralı M3 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



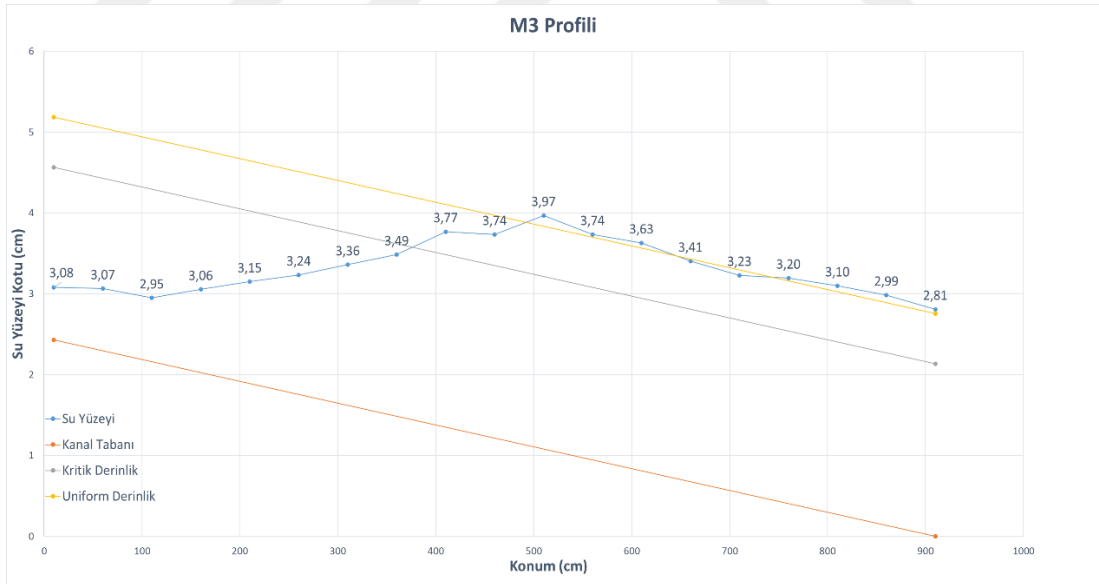
Şekil 6.11 Deneyssel olarak oluşturulan 2 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.12’ de 3 numaralı M3 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



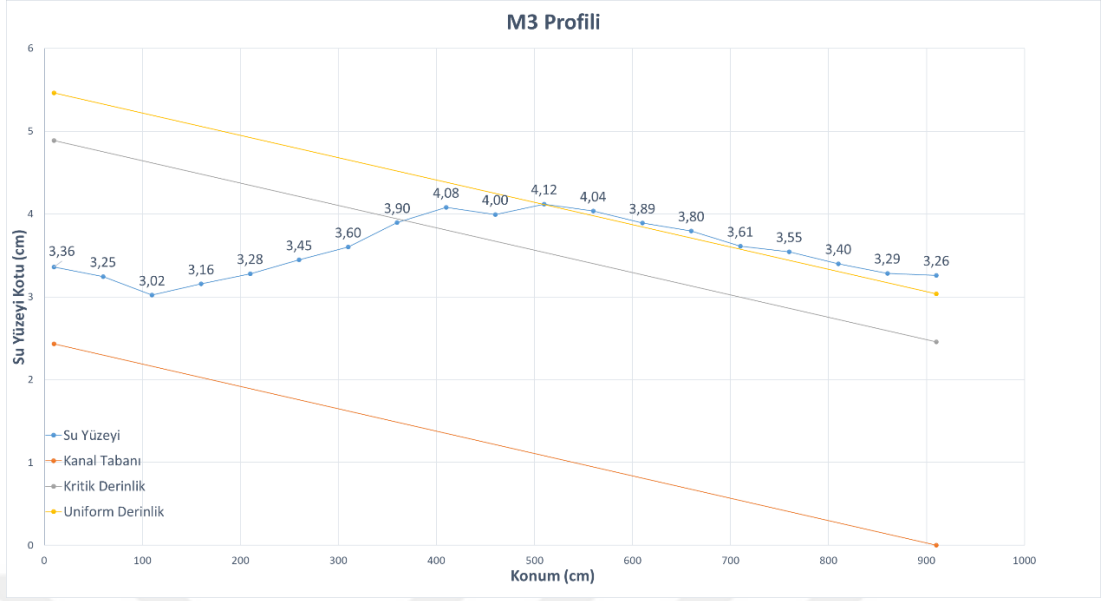
Şekil 6.12 Deneysel olarak oluşturulan 3 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.13’ de 4 numaralı M3 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



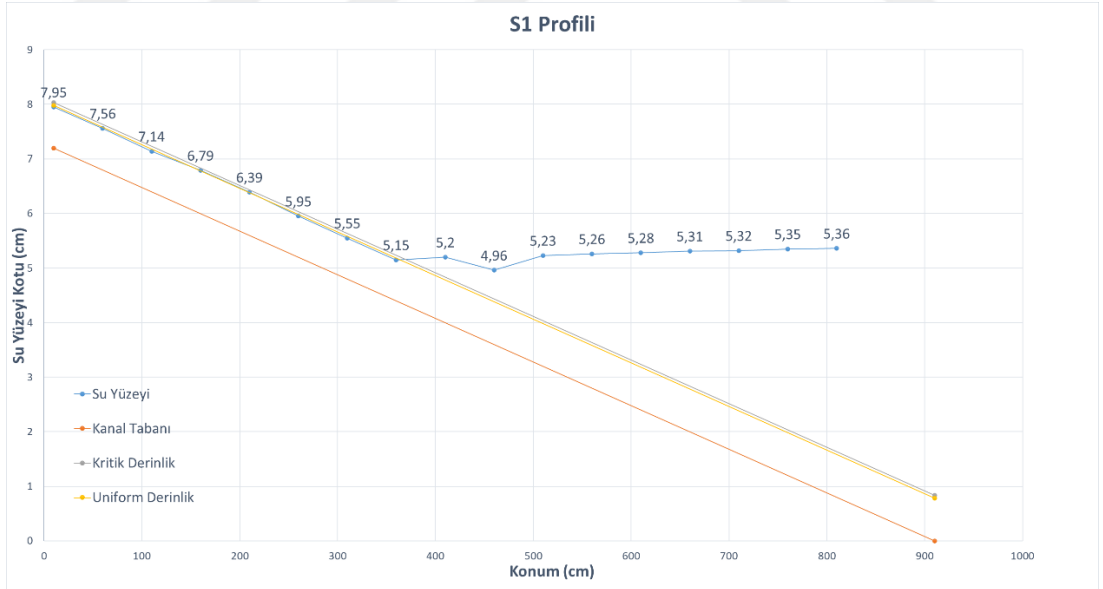
Şekil 6.13 Deneysel olarak oluşturulan 4 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.14’ de 5 numaralı M3 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



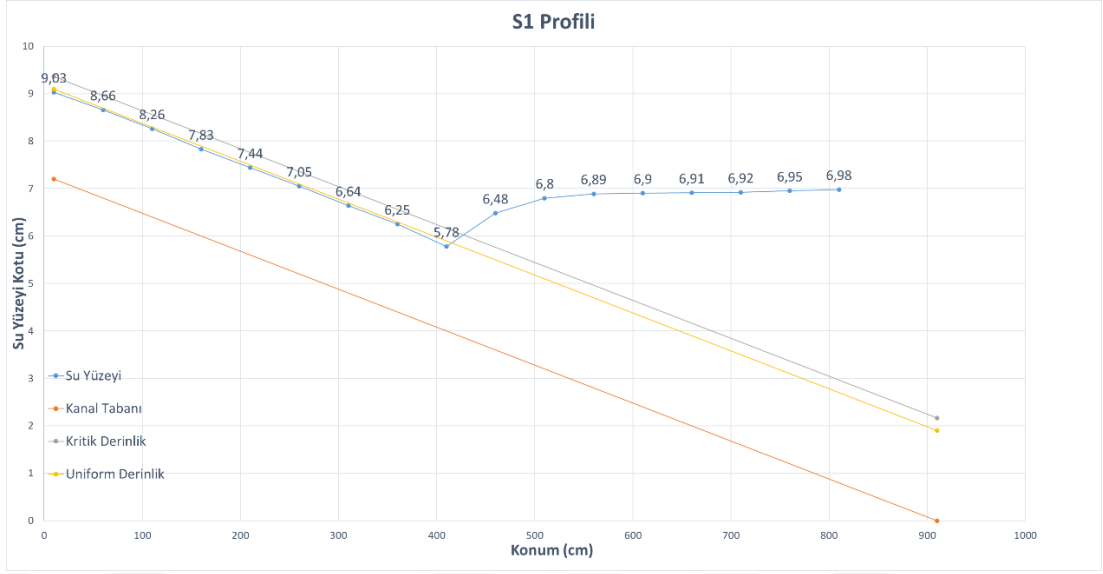
Şekil 6.14 Deneysel olarak oluşturulan 5 numaralı M3 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.15’ de 1 numaralı S1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



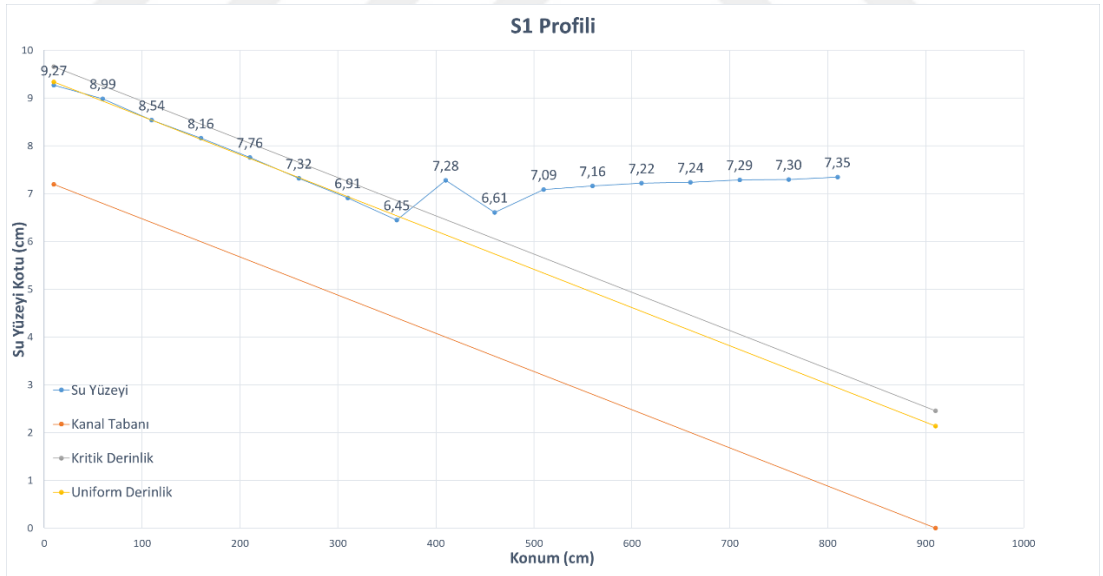
Şekil 6.15 Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.16’ da 2 numaralı S1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır.



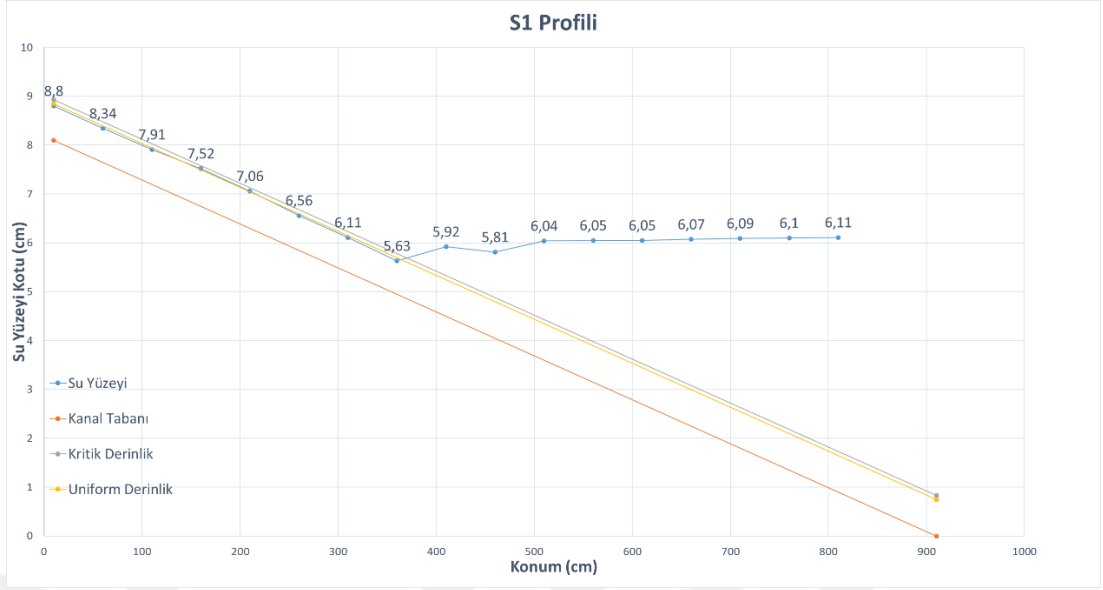
Şekil 6.16 Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.17’ de 3 numaralı S1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır



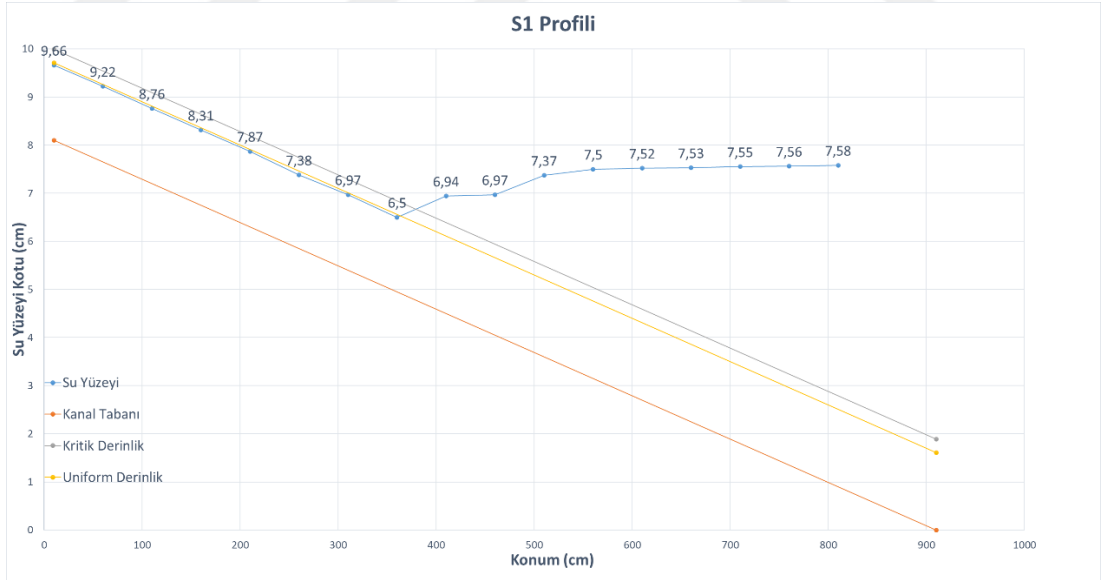
Şekil 6.17 Deneysel olarak oluşturulan 3 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.18’ de 4 numaralı S1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır



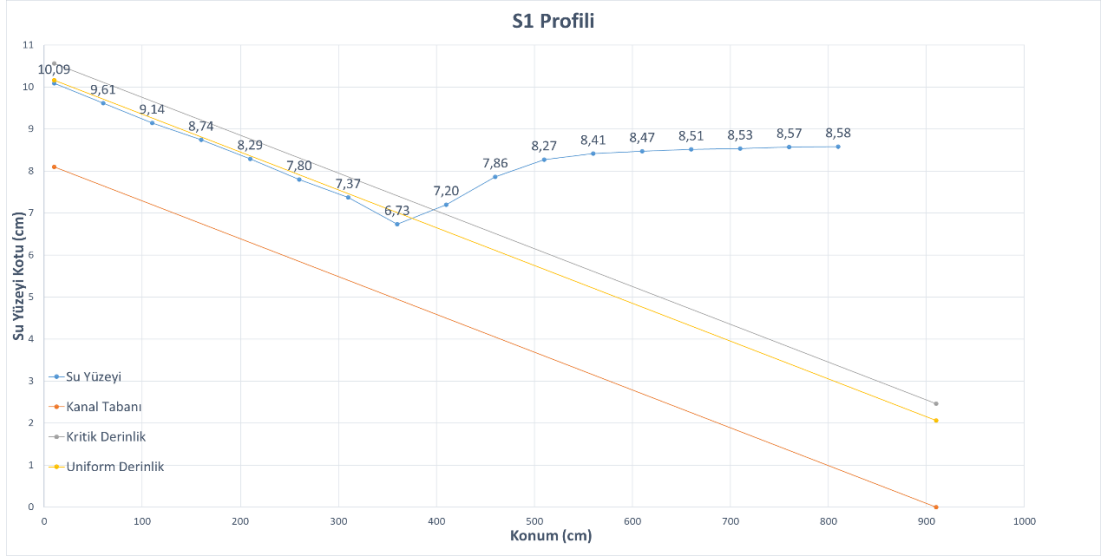
Şekil 6.18 Deneysel olarak oluşturulan 4 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.19’ da 5 numaralı S1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır



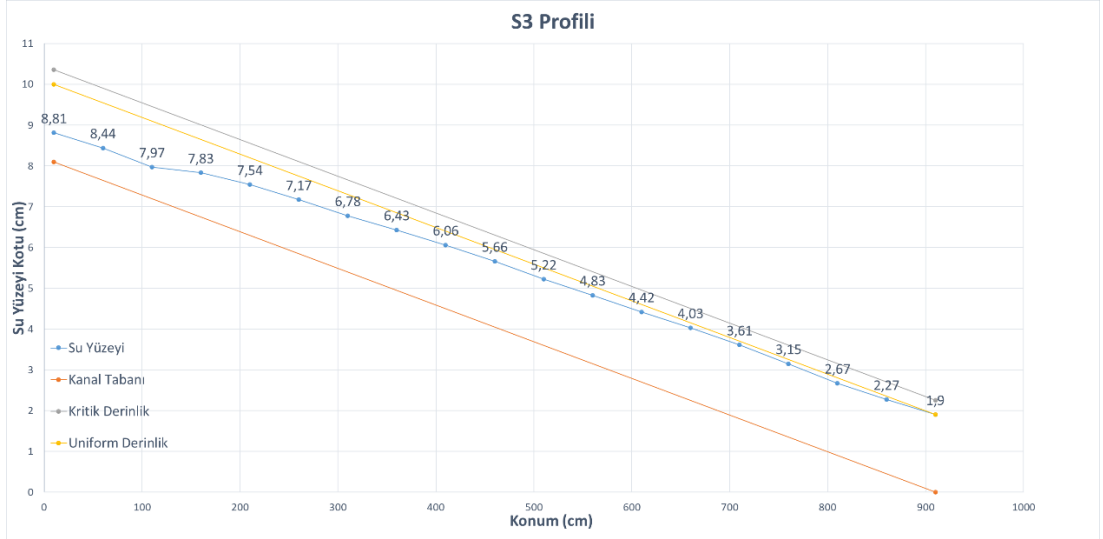
Şekil 6.19 Deneysel olarak oluşturulan 5 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.20’ de 6 numaralı S1 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır



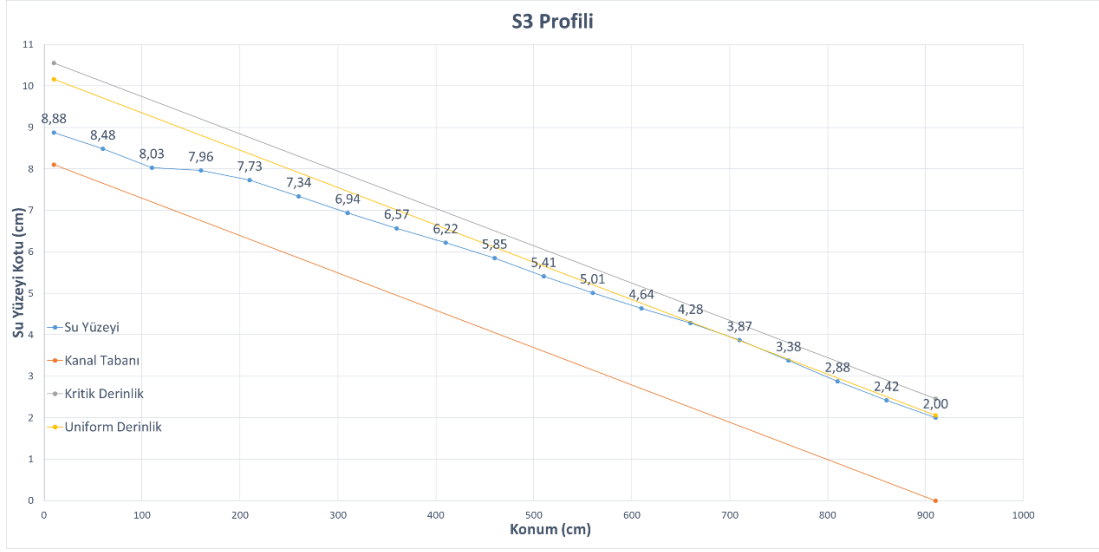
Şekil 6.20 Deneysel olarak oluşturulan 6 numaralı S1 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.21’ de 1 numaralı S3 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır



Şekil 6.21 Deneysel olarak oluşturulan 1 numaralı S3 profilinin boy kesitsel gösterimi

Şekil 6.22’ de 2 numaralı S3 profiline ait su yüzeyi profili yer almaktadır



Şekil 6.22 Deneysel olarak oluşturulan 2 numaralı S3 profilinin boy kesitsel gösterimi

6.2 Deneysel Bulgular İle Sayısal Çözümlerin Karşılaştırılması

Deneysel bulgular ile sayısal çözümler karşılaştırılırken iki farklı parametreden yararlanılmıştır. Bunlar; karesel ortalama hata ve rölatif hata parametreleridir.

6.2.1 Karesel Ortalama Hata (KOH)

Karesel ortalama hata; doğruluk ölçütü olarak sıklıkla kullanılmakta olup, deneysel bulgular ile sayısal çözümlerin karşılaştırılmasında aşağıda verilen formülasyonla elde edilen değerler kullanılmıştır.

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{si} - y_{öi})^2}{N}} \quad (6.1)$$

Denklem 6.1' de yer alan m değeri çözümü yapılan su yüzeyi profili için karesel ortalama hata değerine, y_{si} i kesitinde sayısal çözüm ile elde edilen derinlik değerine,

$y_{\bar{o}i}$ i kesitinde deneysel olarak ölçülen derinlik değerine, N ise kanalda derinlik ölçümü gerçekleştirilen kesit sayısına karşılık gelmektedir.

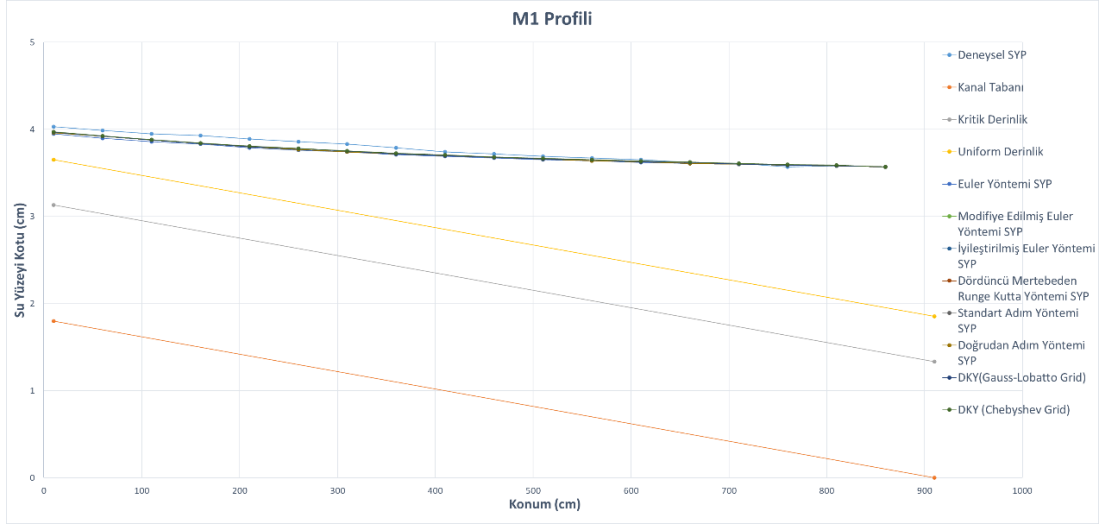
6.2.2 Rölatif Hata (RH)

Deneysel bulgular ile sayısal çözümlerin karşılaştırılmasında kullanılan diğer bir hata formülasyonu ise rölatif hatadır. Karesel ortalama hata değeri gibi tek bir değer ile ilgilenebilmek için her bir kesitteki rölatif hata bulunmuş ve bunların içerisinde maksimum değer alınmıştır. Rölatif hata denklem 6.2 ile verilen formülasyon ile belirlenmektedir.

$$RH = \frac{|y_{si} - y_{\bar{o}i}|}{y_{\bar{o}i}} \quad (6.2)$$

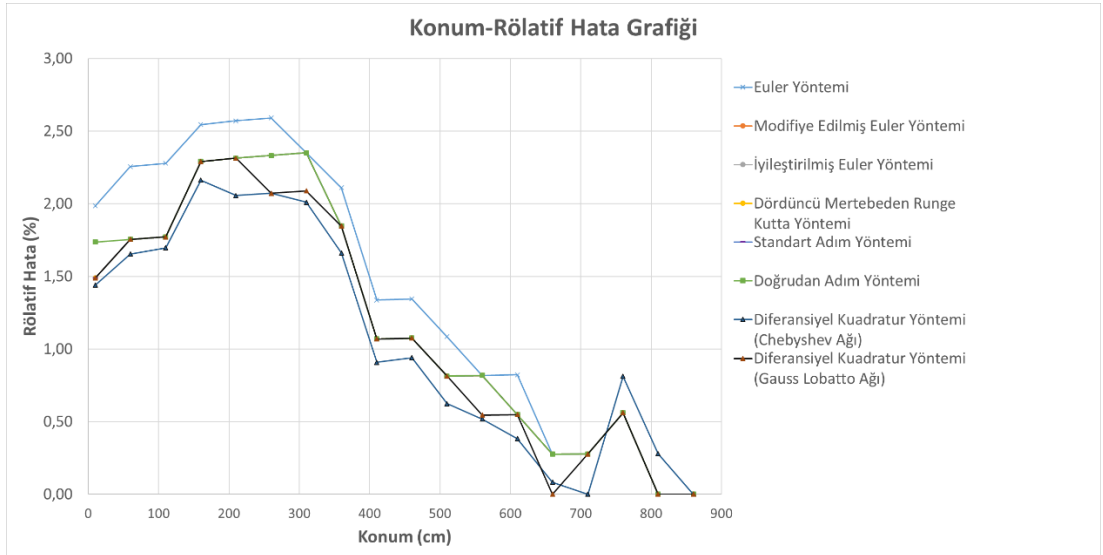
Denklem 6.2 verilen formülasyon ile bir su yüzeyi profili özelinde N adet RH değeri elde edilmiş olup, bu değerlerin en büyüğü alınarak karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, RH' nin her bir sayısal çözüm yöntemi için konuma bağlı değişimi grafiklerle gösterilmiştir.

Şekil 6.23' de 1 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.23 1 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

1 numaralı M1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.24’ de sunulmuştur.



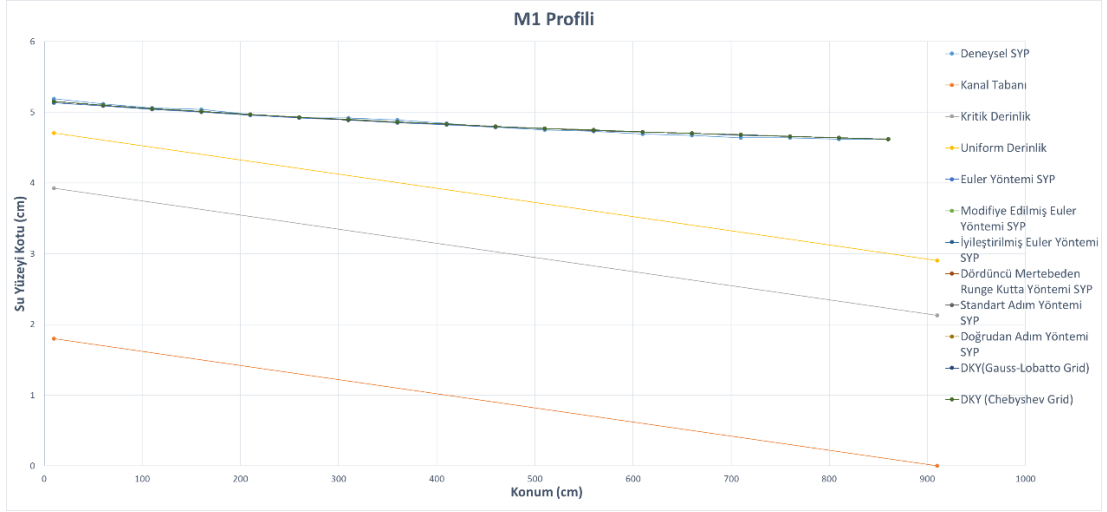
Şekil 6.24 1 numaralı M1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

1 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.1’ de sunulmuştur.

Tablo 6.1 1 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

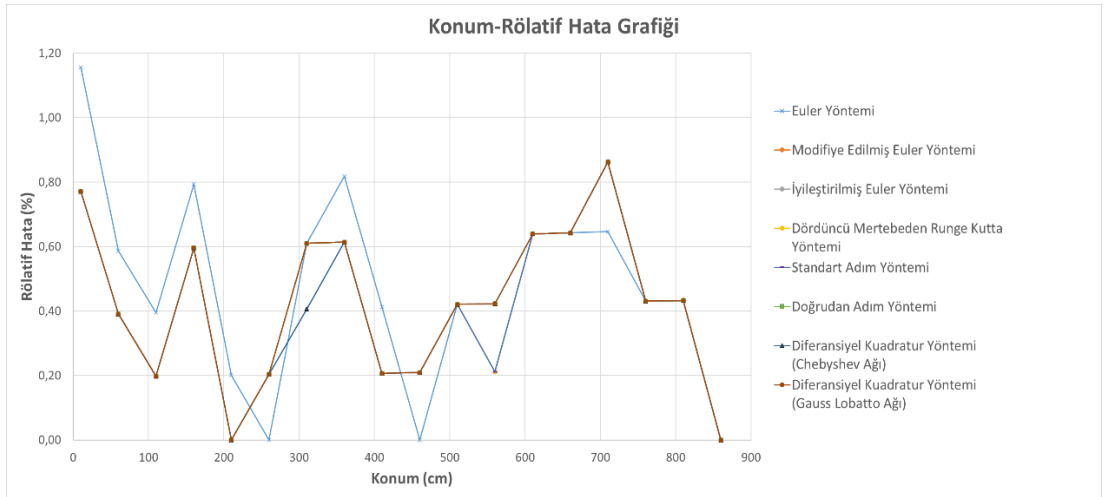
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	2,59	0,067
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	2,35	0,058
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	2,35	0,058
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	2,35	0,058
Standart Adım Yöntemi	2,35	0,058
Doğrudan Adım Yöntemi	2,35	0,058
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	2,16	0,052
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	2,31	0,056

Şekil 6.25’ de 2 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.25 2 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

2 numaralı M1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.26’ da sunulmuştur.



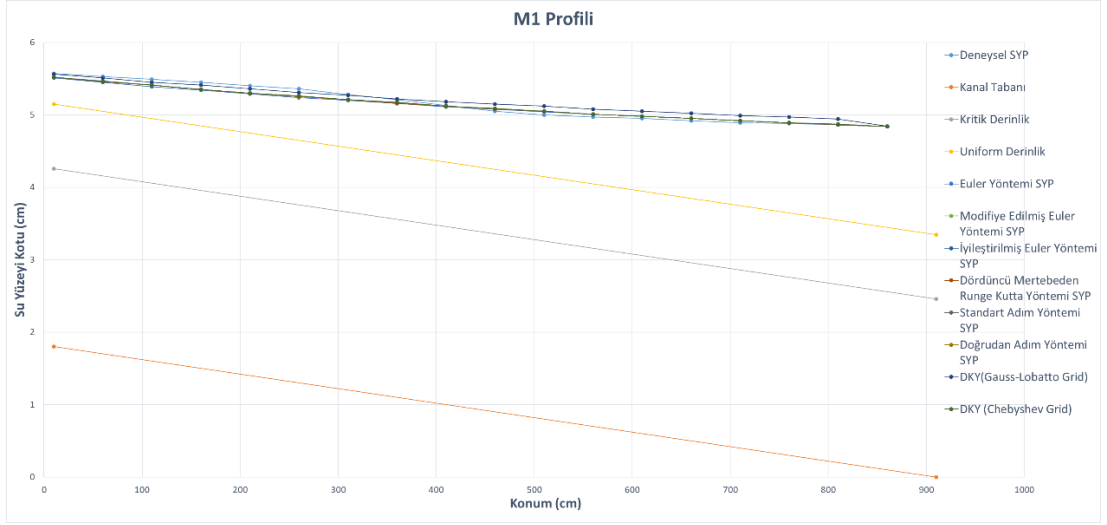
Şekil 6.26 2 numaralı M1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

2 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.2’ de sunulmuştur.

Tablo 6.2 2 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

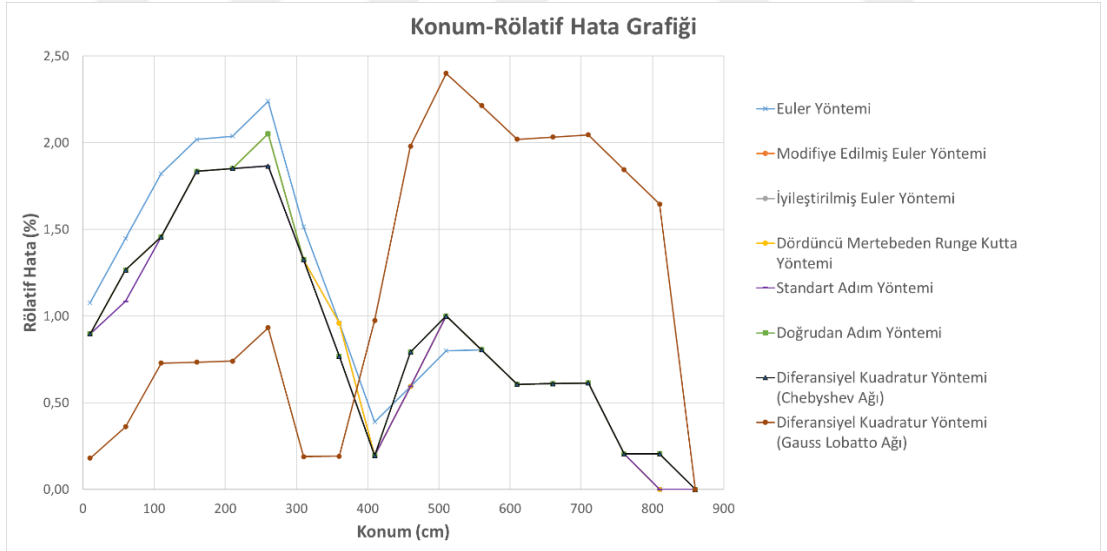
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	1,16	0,028
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	0,86	0,024
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	0,86	0,024
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	0,86	0,024
Standart Adım Yöntemi	0,86	0,024
Doğrudan Adım Yöntemi	0,86	0,024
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	0,86	0,024
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	2,31	0,024

Şekil 6.27’ de 3 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.27 3 numaralı M1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

3 numaralı M1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.28’ de sunulmuştur.



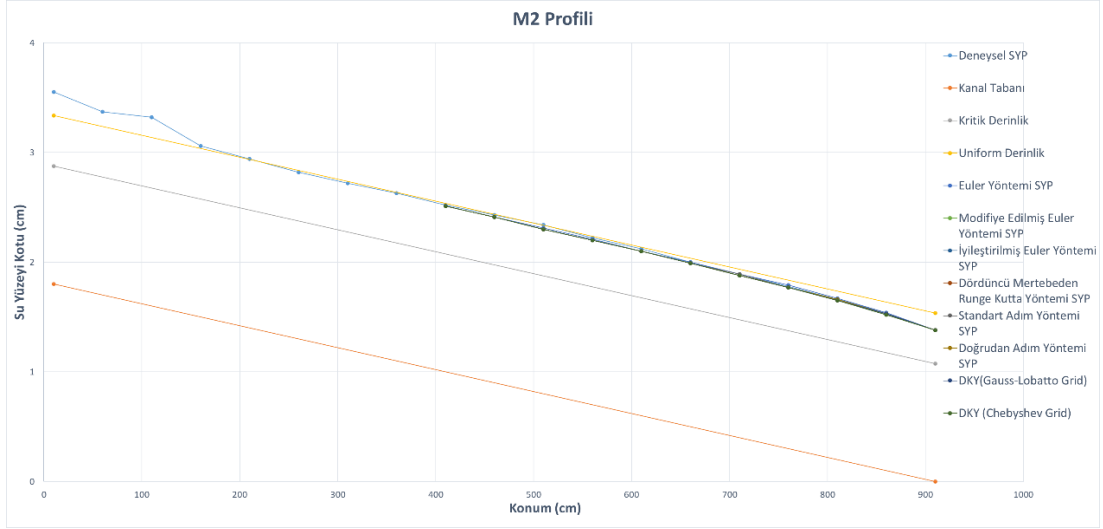
Şekil 6.28 3 numaralı M1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

3 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.3’ de sunulmuştur.

Tablo 6.3 3 numaralı M1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

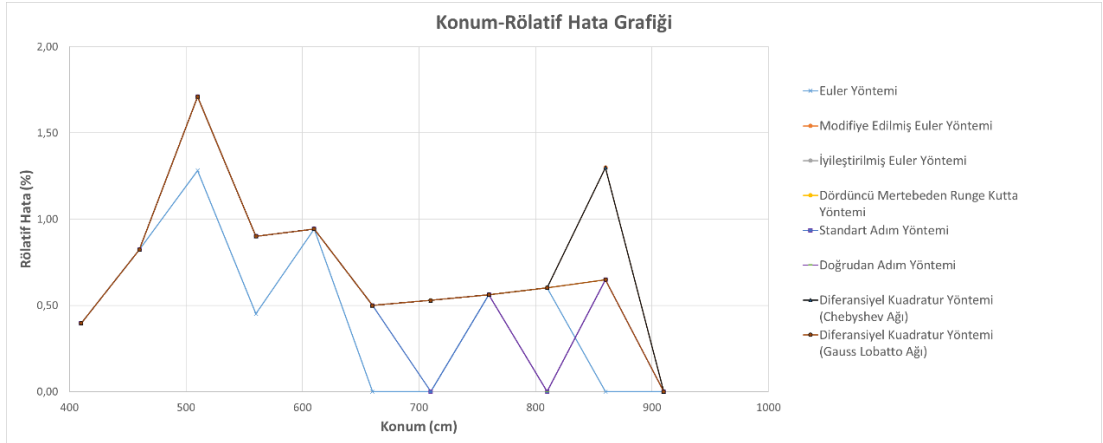
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	2,24	0,066
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	2,05	0,06
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	2,05	0,06
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	2,05	0,06
Standart Adım Yöntemi	1,87	0,058
Doğrudan Adım Yöntemi	2,05	0,06
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	1,87	0,059
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	2,40	0,073

Şekil 6.29’ da 1 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.29 1 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

1 numaralı M2 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.30’ da sunulmuştur.



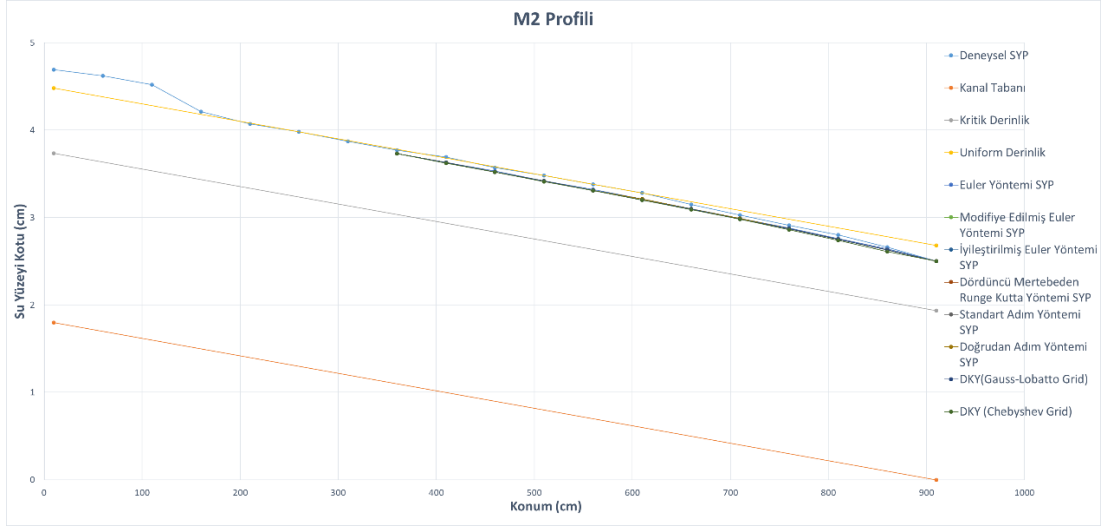
Şekil 6.30 1 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

1 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.4’ de sunulmuştur.

Tablo 6.4 1 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

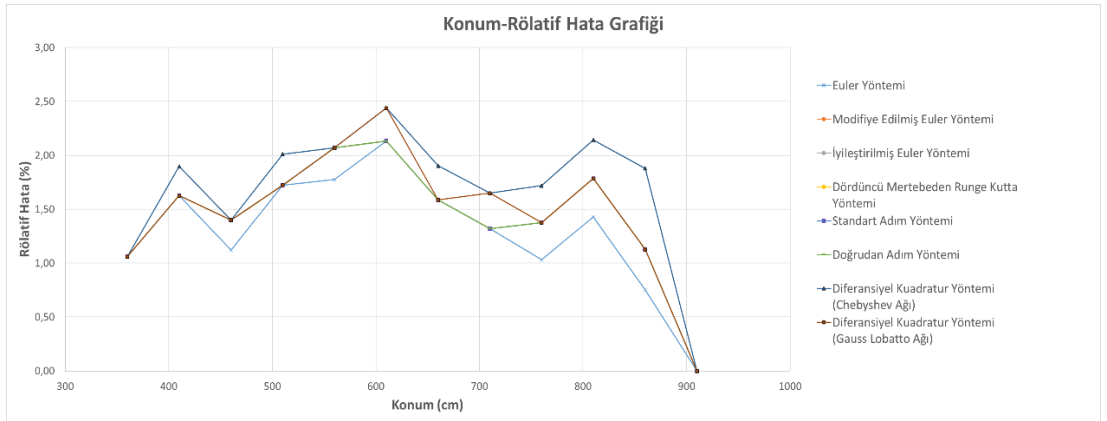
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	1,28	0,0046
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	1,71	0,0061
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	1,71	0,0058
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	1,71	0,0058
Standart Adım Yöntemi	1,71	0,0057
Doğrudan Adım Yöntemi	1,71	0,0057
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	1,71	0,0061
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	1,71	0,0058

Şekil 6.31’ de 2 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.31 2 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

2 numaralı M2 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.32’ de sunulmuştur.



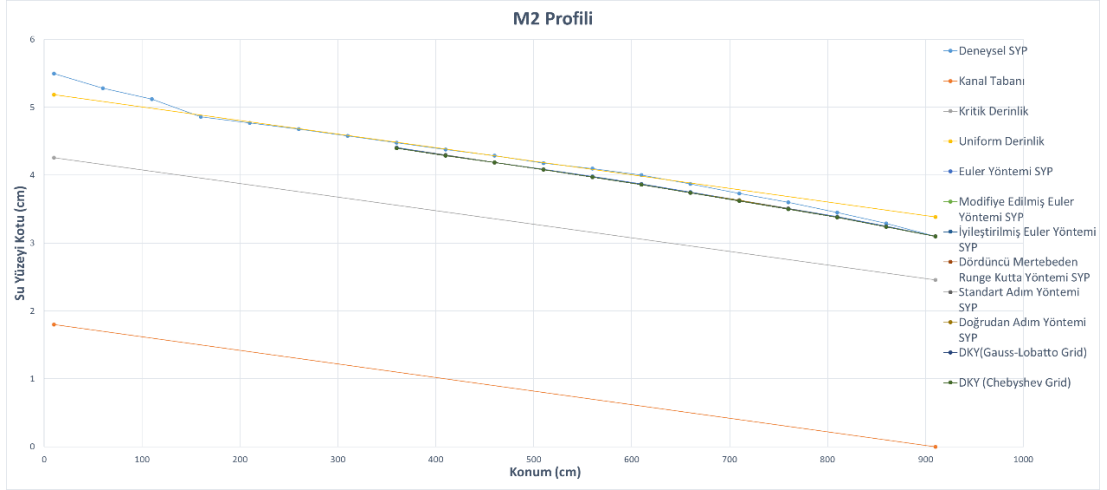
Şekil 6.32 2 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

2 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.5’ de sunulmuştur.

Tablo 6.5 2 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

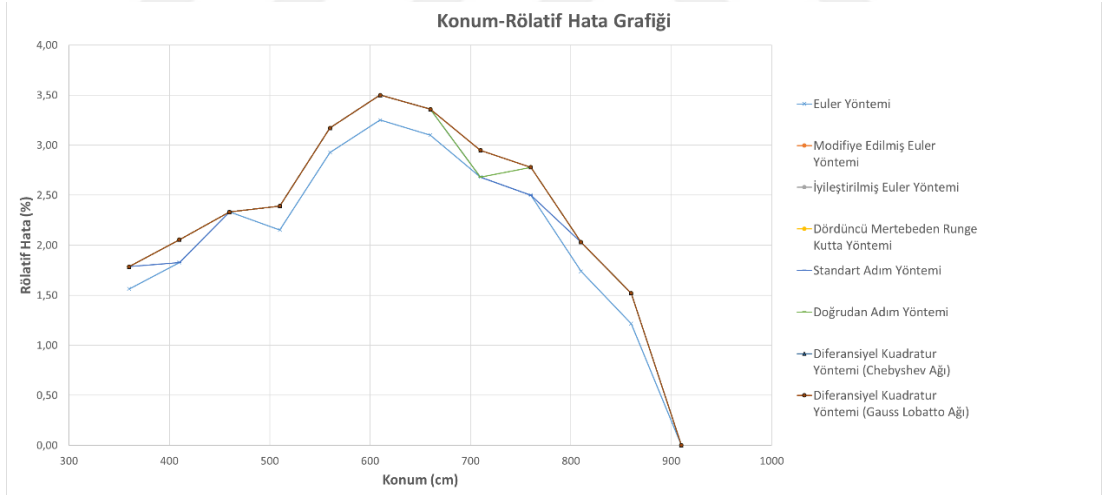
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	2,13	0,0146
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	2,13	0,0158
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	2,13	0,0158
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	2,13	0,0158
Standart Adım Yöntemi	2,13	0,0158
Doğrudan Adım Yöntemi	2,13	0,0158
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	2,44	0,0182
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	2,44	0,0164

Şekil 6.33’ de 3 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.33 3 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

3 numaralı M2 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.34’ de sunulmuştur.



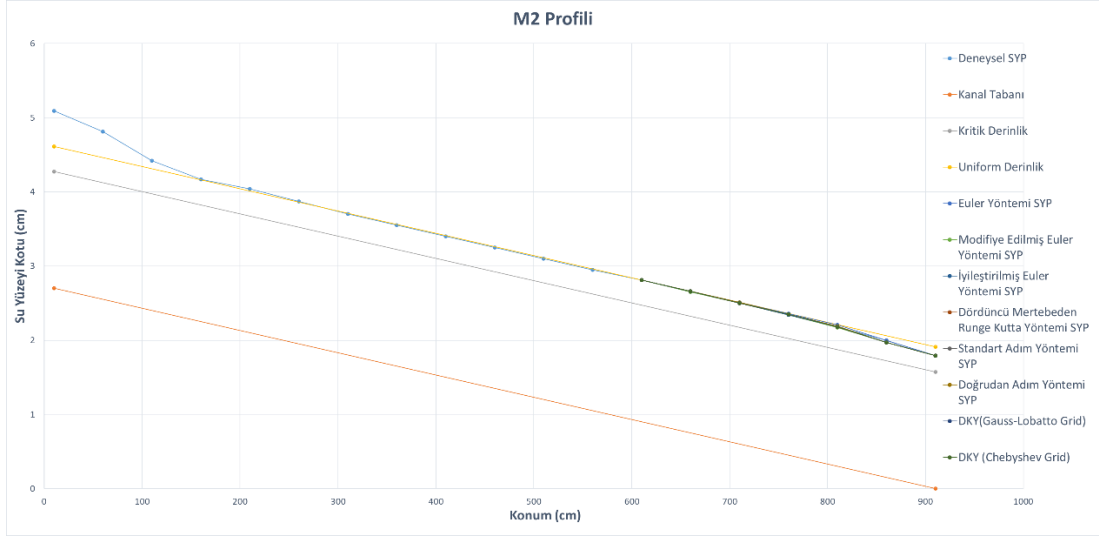
Şekil 6.34 3 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

3 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.6’ da sunulmuştur.

Tablo 6.6 3 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

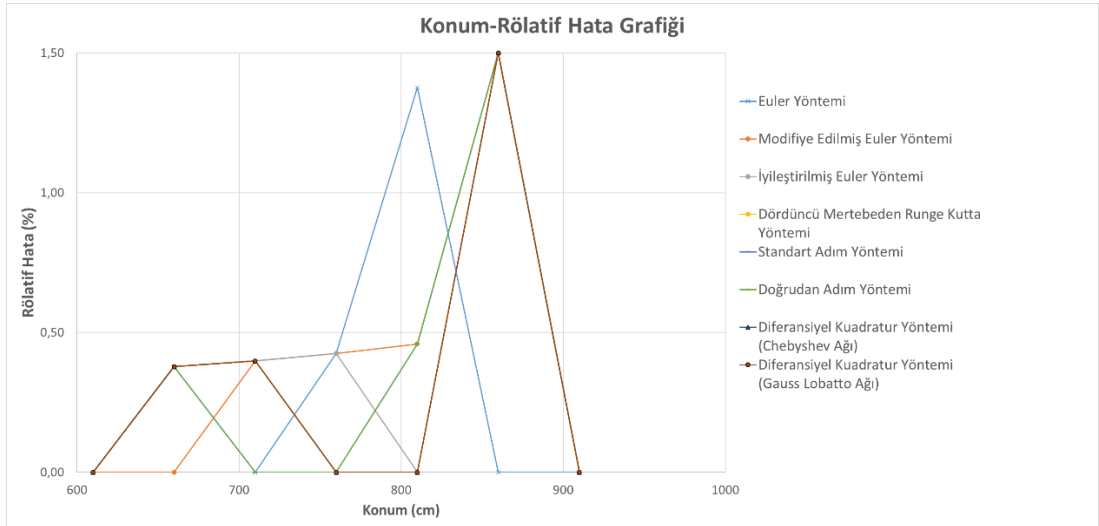
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	3,25	0,0285
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	3,50	0,0311
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	3,50	0,0311
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	3,50	0,0311
Standart Adım Yöntemi	3,50	0,0304
Doğrudan Adım Yöntemi	3,50	0,0309
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	3,50	0,0311
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	3,50	0,0311

Şekil 6.35’ de 4 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.35 4 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

4 numaralı M2 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.36’ da sunulmuştur.



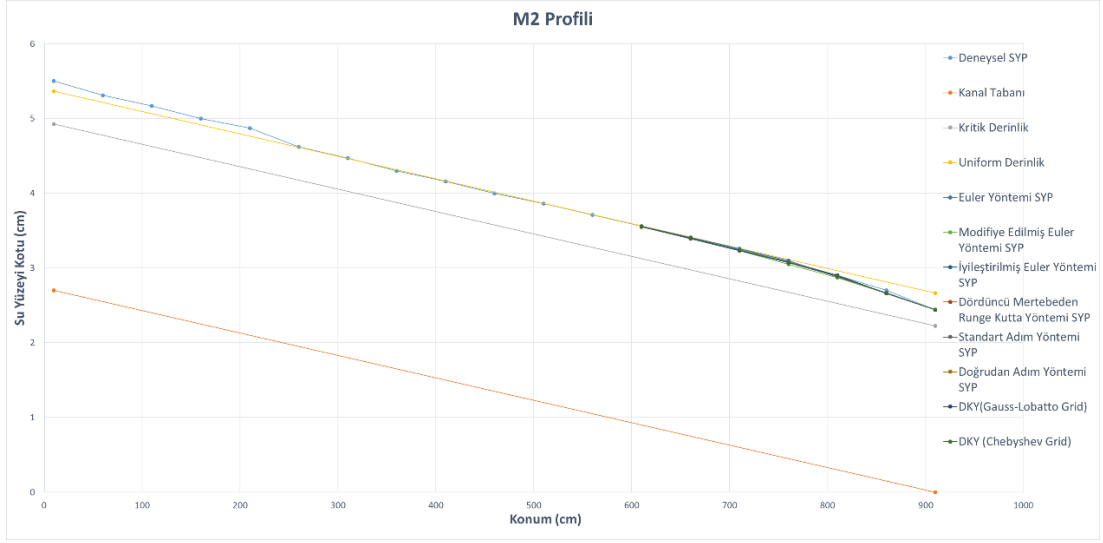
Şekil 6.36 4 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

4 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.7’ de sunulmuştur.

Tablo 6.7 4 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

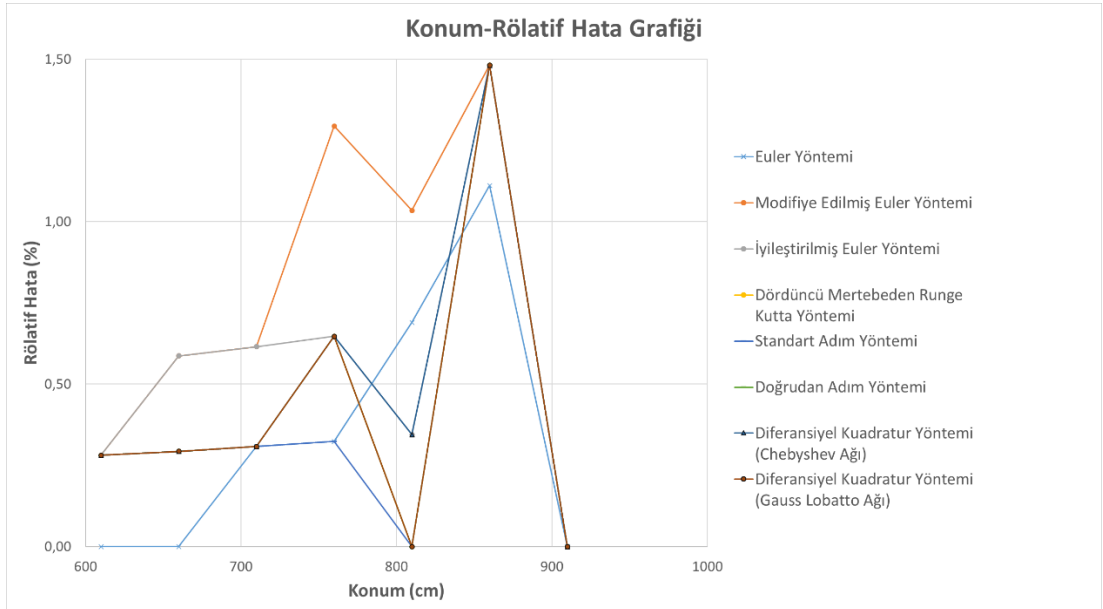
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	1,38	0,0055
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	1,50	0,0058
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	1,50	0,0058
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	1,50	0,0055
Standart Adım Yöntemi	1,50	0,0055
Doğrudan Adım Yöntemi	1,50	0,0055
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	1,50	0,0055
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	1,50	0,0055

Şekil 6.37’ de 5 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.37 5 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

5 numaralı M2 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.38’ de sunulmuştur.



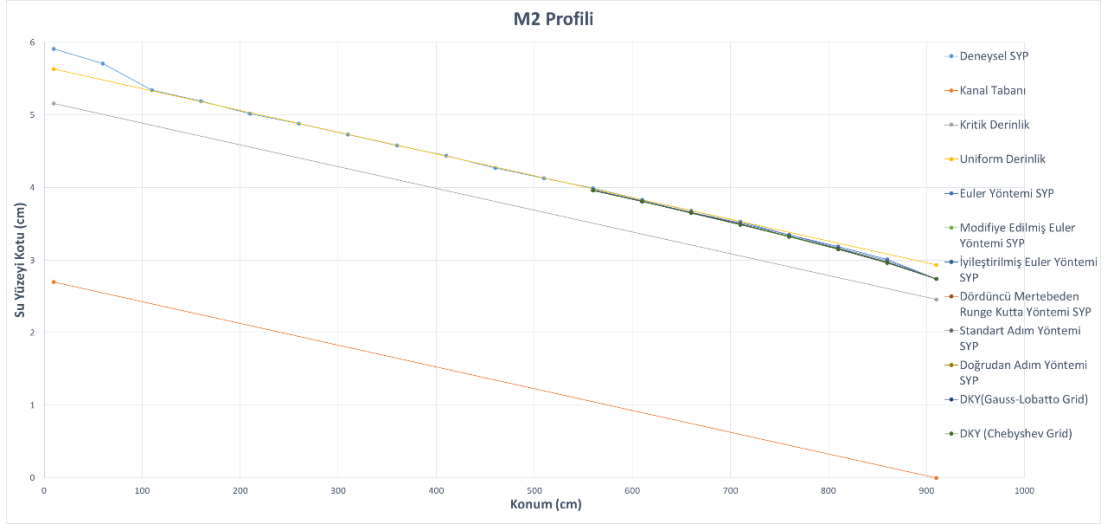
Şekil 6.38 5 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

5 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.8’ de sunulmuştur.

Tablo 6.8 5 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

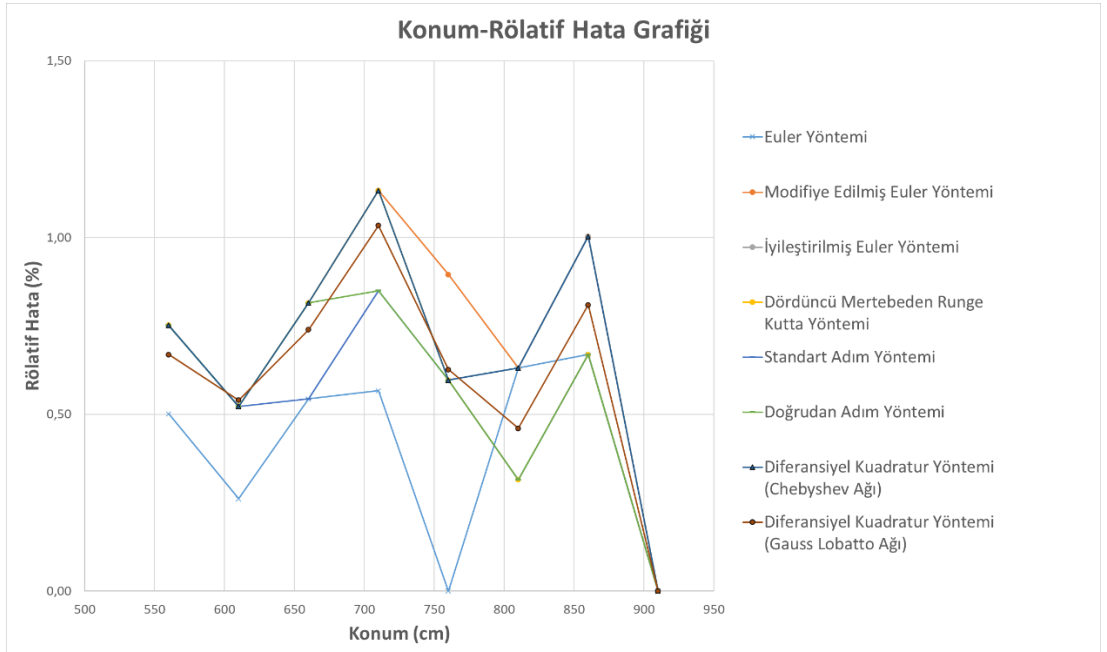
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	1,11	0,0065
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	1,48	0,0118
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	1,48	0,0091
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	1,48	0,0080
Standart Adım Yöntemi	1,48	0,0075
Doğrudan Adım Yöntemi	1,48	0,0080
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	1,48	0,0082
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	1,48	0,0080

Şekil 6.39’ da 6 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.39 6 numaralı M2 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

6 numaralı M2 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.40’ da sunulmuştur.



Şekil 6.40 6 numaralı M2 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

6 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.9’ da sunulmuştur.

Tablo 6.9 6 numaralı M2 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

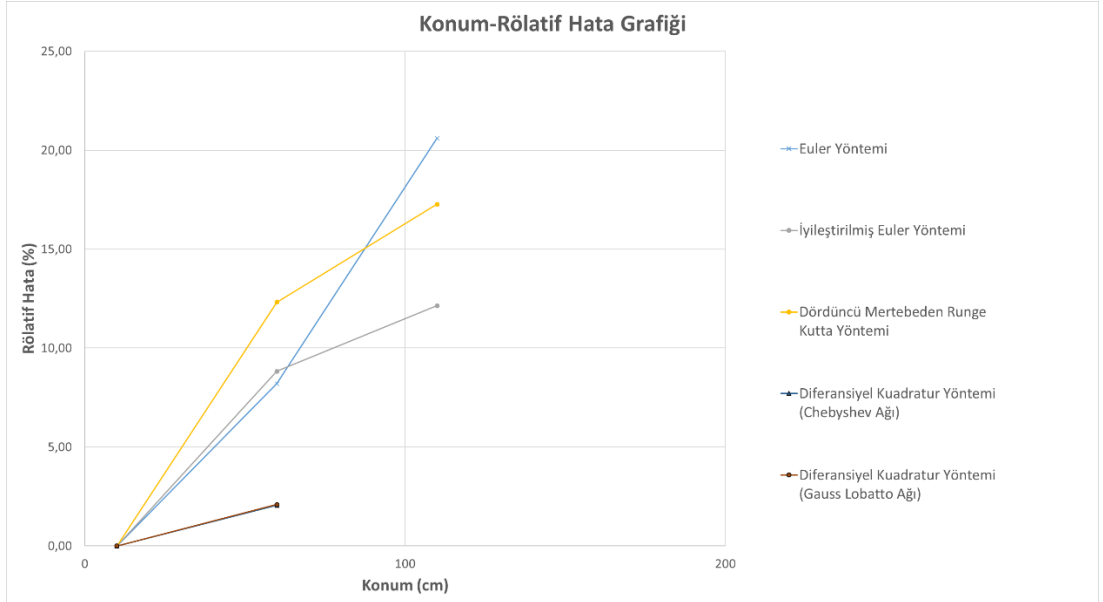
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	0,67	0,0065
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	1,13	0,0111
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	1,13	0,0106
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	1,13	0,0098
Standart Adım Yöntemi	0,85	0,0085
Doğrudan Adım Yöntemi	0,85	0,0090
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	1,13	0,0106
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	1,03	0,0095

Şekil 6.41’ de 1 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.41 1 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

1 numaralı M3 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.42’ de sunulmuştur.



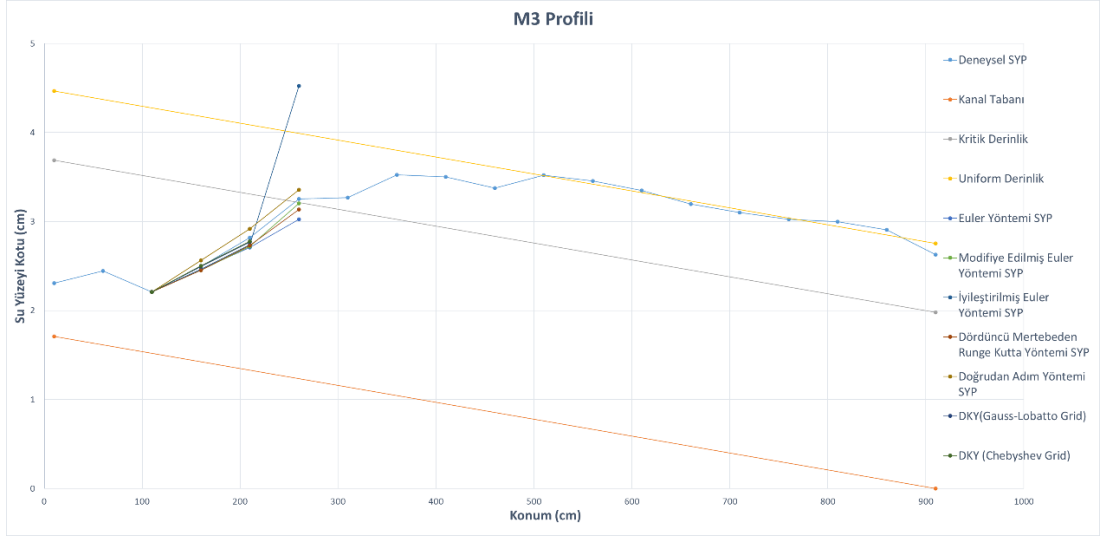
Şekil 6.42 1 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

1 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.10' da sunulmuştur.

Tablo 6.10 1 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

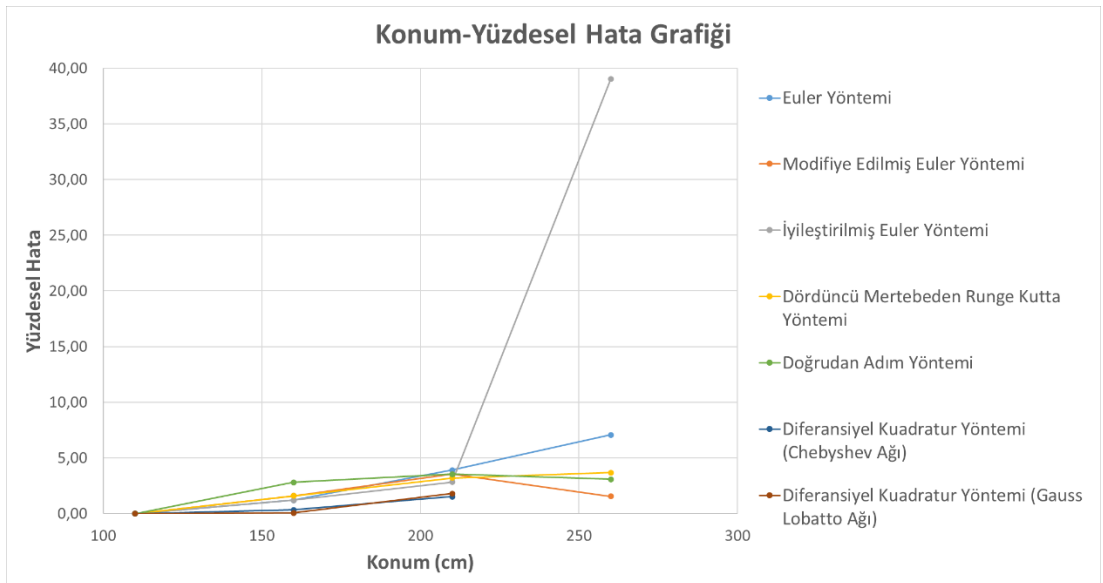
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	20,60	0,2563
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	12,14	0,2
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	17,27	0,2825
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	2,06	0,0559
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	2,09	0,0569

Şekil 6.43' de 2 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.43 2 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

2 numaralı M3 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.44’ de sunulmuştur.



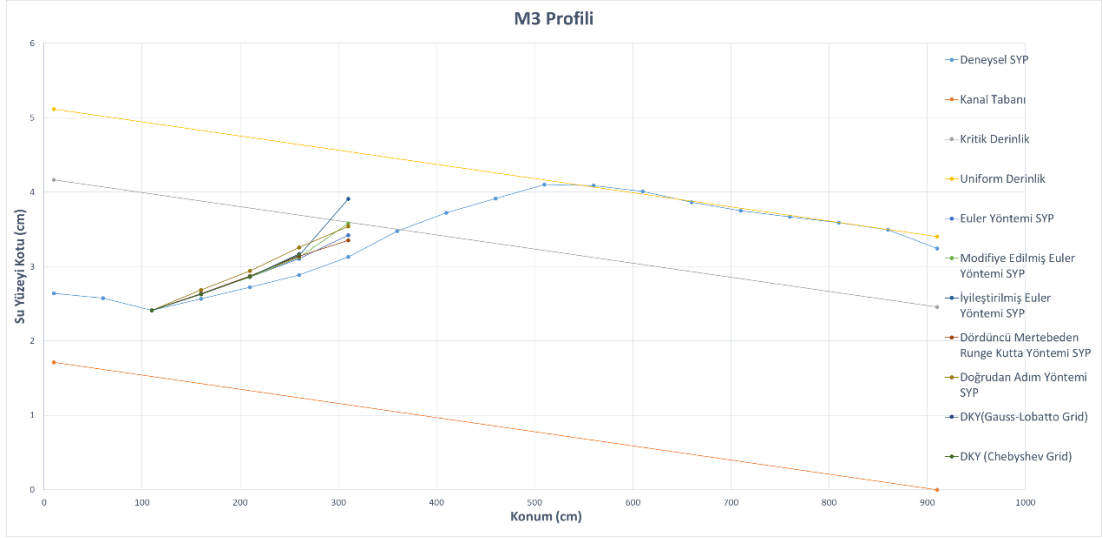
Şekil 6.44 2 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

2 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.11’ de sunulmuştur.

Tablo 6.11 2 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

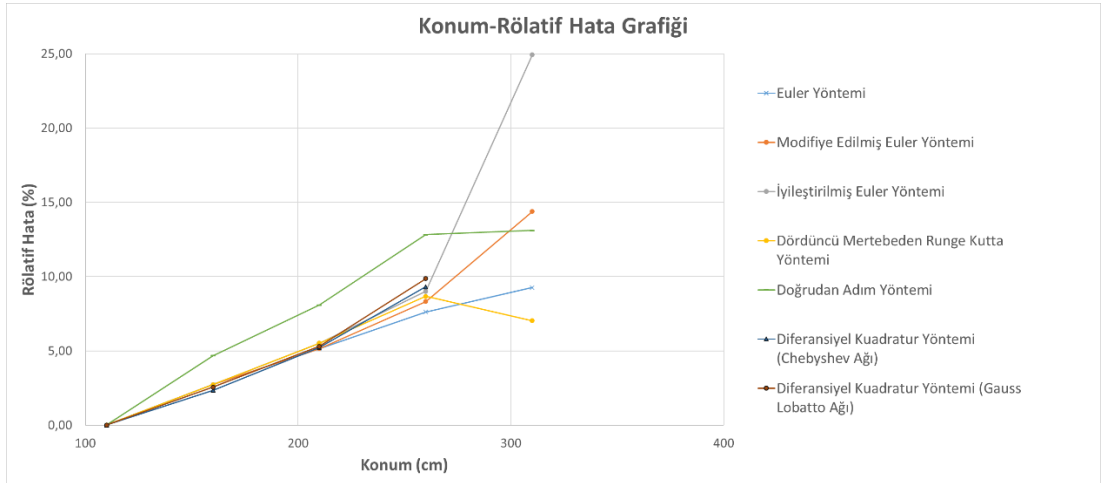
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	7,07	0,2563
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	3,55	0,0396
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	39,02	0,4243
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	3,69	0,0517
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	3,55	0,0526
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	1,53	0,0146
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	1,80	0,0169

Şekil 6.45’ de 3 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.45 3 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

3 numaralı M3 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.46’ da sunulmuştur



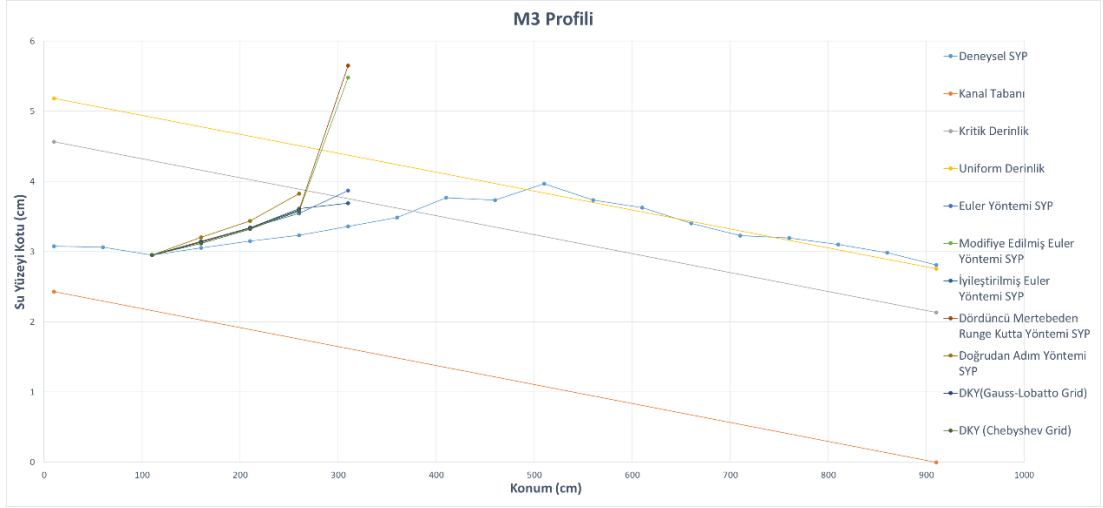
Şekil 6.46 3 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

3 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.12’ de sunulmuştur.

Tablo 6.12 3 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

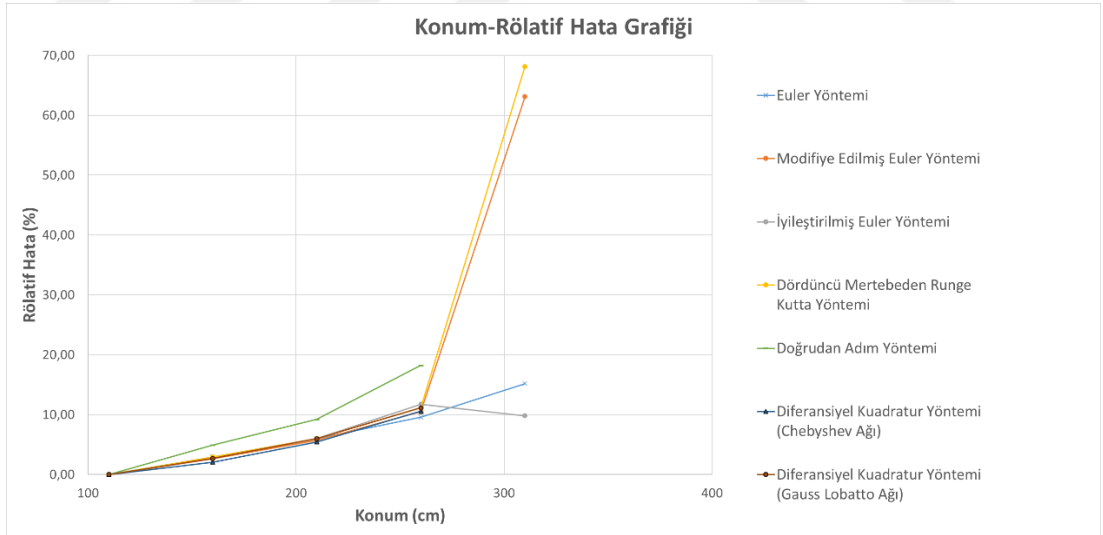
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	9,27	0,0991
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	14,38	0,1334
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	24,92	0,2097
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	8,67	0,0930
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	13,10	0,1516
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	9,32	0,1034
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	9,86	0,1085

Şekil 6.47’ de 4 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.47 4 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

4 numaralı M3 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.48’ de sunulmuştur.



Şekil 6.48 4 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

4 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.13’ de sunulmuştur.

Tablo 6.13 4 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

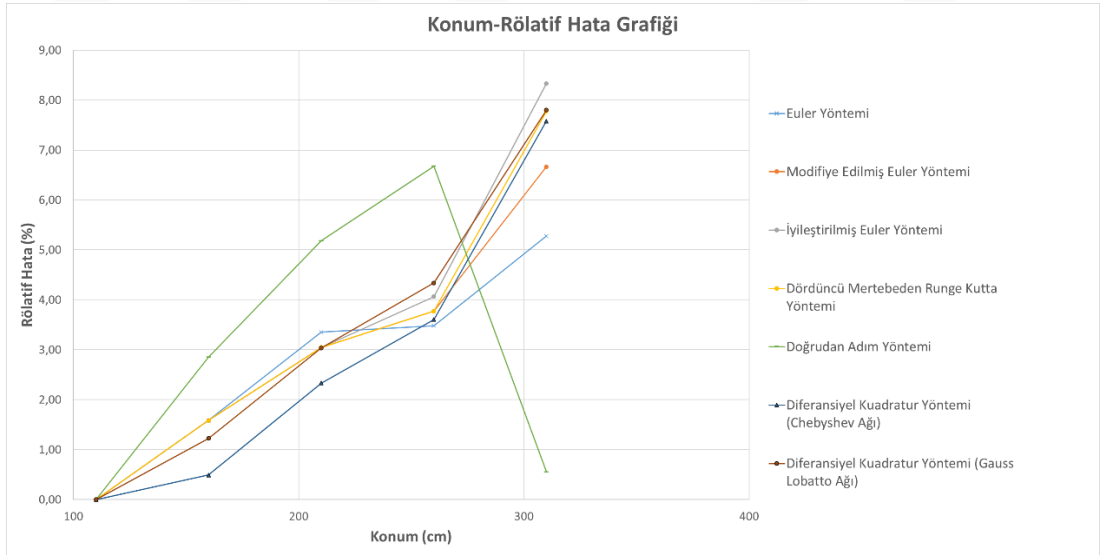
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	15,18	0,1582
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	63,10	0,5390
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	11,75	0,1364
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	68,15	0,5819
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	18,24	0,2248
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	10,58	0,1293
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	11,16	0,1385

Şekil 6.49’ da 5 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.49 5 numaralı M3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

5 numaralı M3 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.50’ de sunulmuştur.



Şekil 6.50 5 numaralı M3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

5 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.14’ de sunulmuştur.

Tablo 6.14 5 numaralı M3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

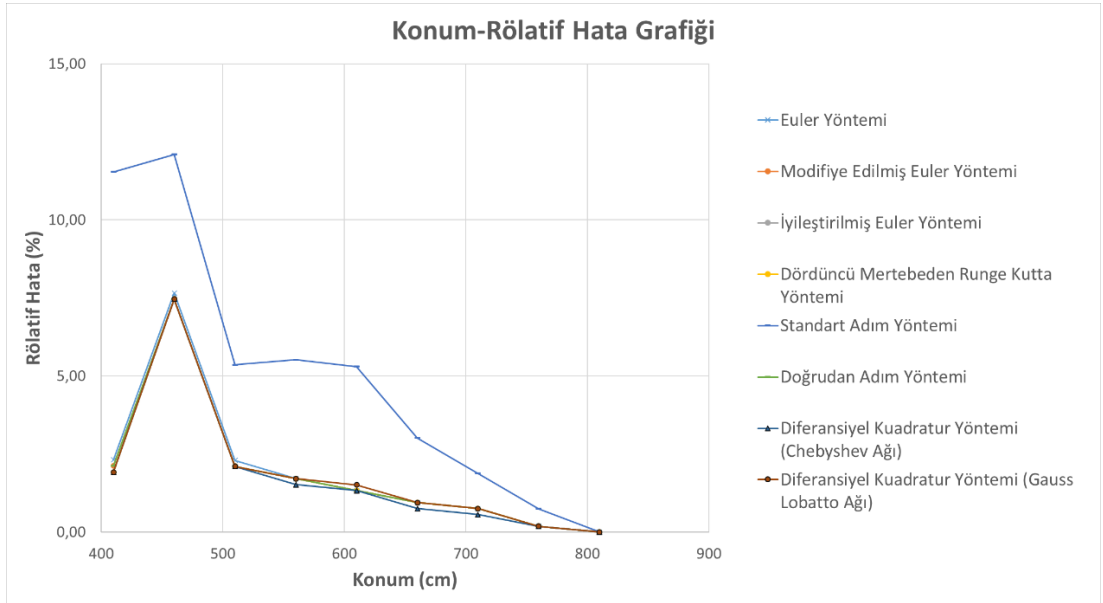
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	5,28	0,0638
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	6,67	0,0737
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	8,33	0,0874
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	7,78	0,0821
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	6,68	0,0751
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	7,58	0,0775
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	7,80	0,0839

Şekil 6.51’ de 1 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.51 1 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

1 numaralı S1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.52’ de sunulmuştur.



Şekil 6.52 1 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

1 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.15’ de sunulmuştur.

Tablo 6.15 1 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

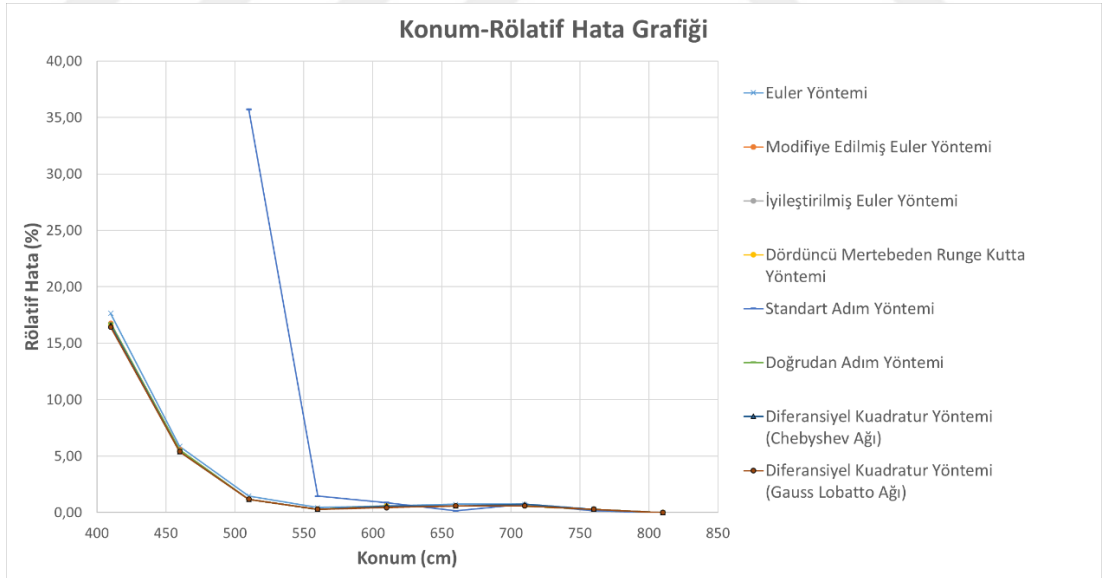
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	7,66	0,0545
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	7,46	0,0528
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	7,46	0,0525
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	7,46	0,0525
Standart Adım Yöntemi	12,10	0,1249
Doğrudan Adım Yöntemi	7,46	0,0528
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	7,46	0,0520
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	7,46	0,0527

Şekil 6.53’ de 2 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.53 2 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

2 numaralı S1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.54’ de sunulmuştur.



Şekil 6.54 2 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

2 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.16' da sunulmuştur.

Tablo 6.16 2 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

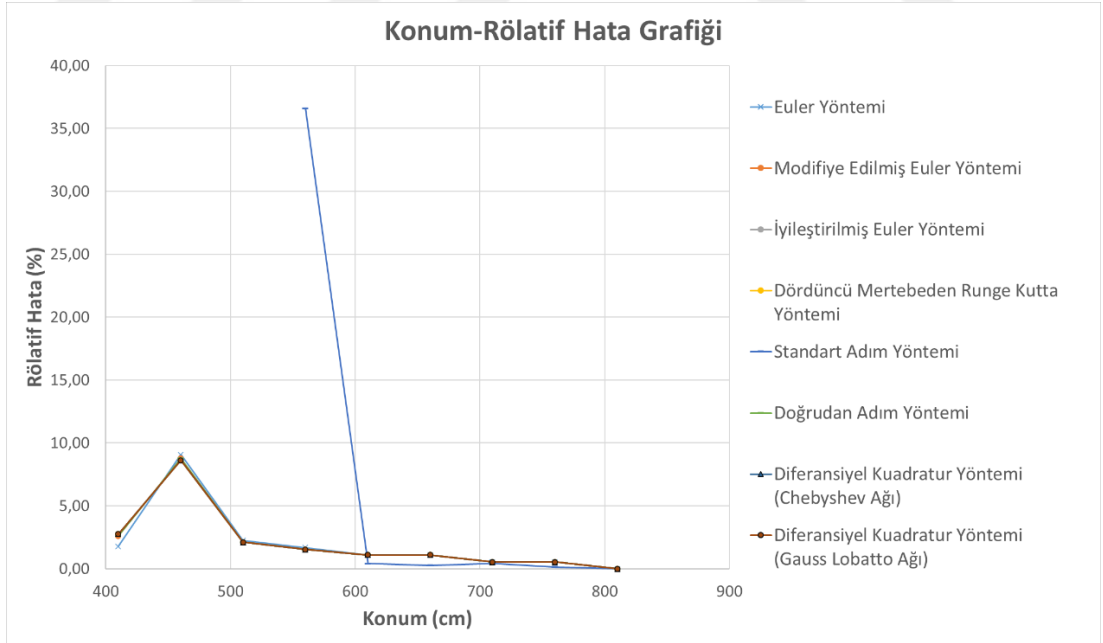
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	17,65	0,1371
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	16,78	0,1301
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	16,44	0,1273
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	16,61	0,1285
Standart Adım Yöntemi	35,74	0,4056
Doğrudan Adım Yöntemi	16,78	0,1301
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	16,61	0,1285
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	16,44	0,1272

Şekil 6.55' de 3 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.55 3 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

3 numaralı S1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.56’ da sunulmuştur



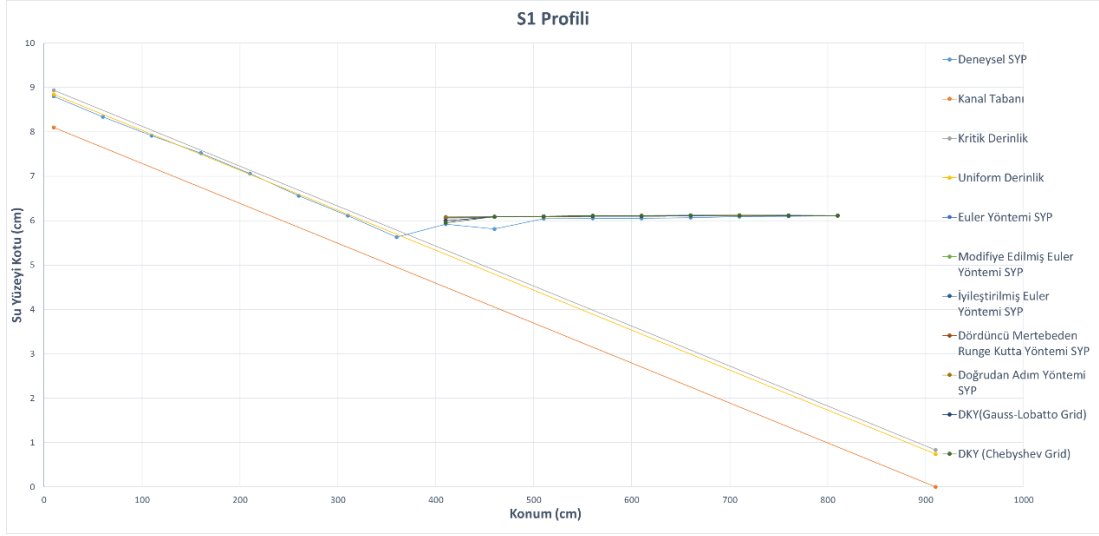
Şekil 6.56 3 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

3 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.17’ de sunulmuştur.

Tablo 6.17 3 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

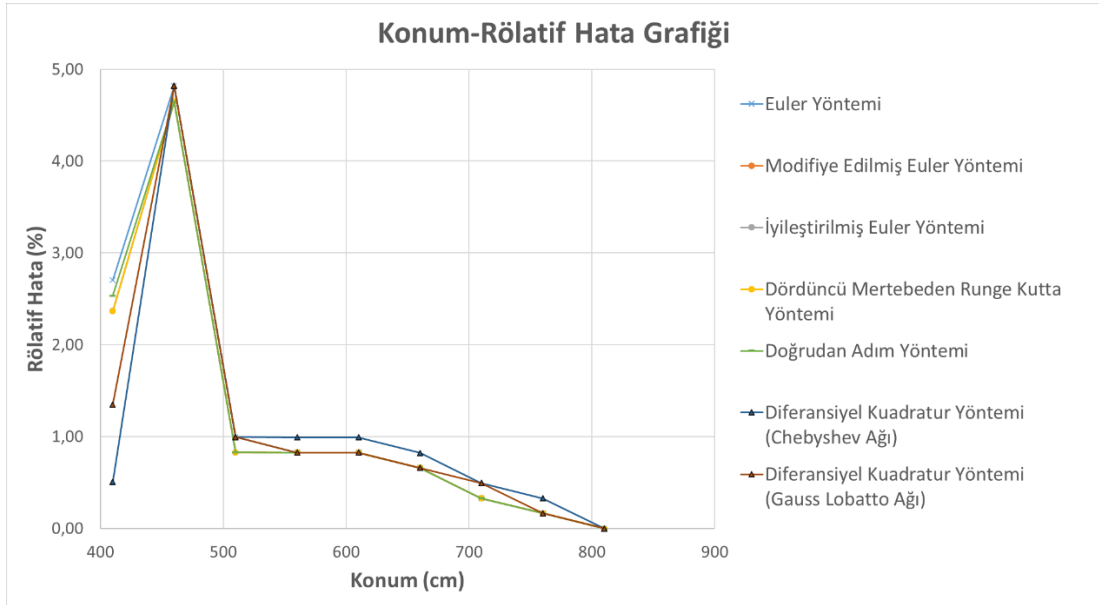
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	9,08	0,0822
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	8,77	0,0813
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	8,62	0,0806
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	8,62	0,0806
Standart Adım Yöntemi	36,59	0,5241
Doğrudan Adım Yöntemi	8,77	0,0813
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	8,62	0,0806
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	8,62	0,0806

Şekil 6.57’ de 4 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.57 4 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

4 numaralı S1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.58’ de sunulmuştur.



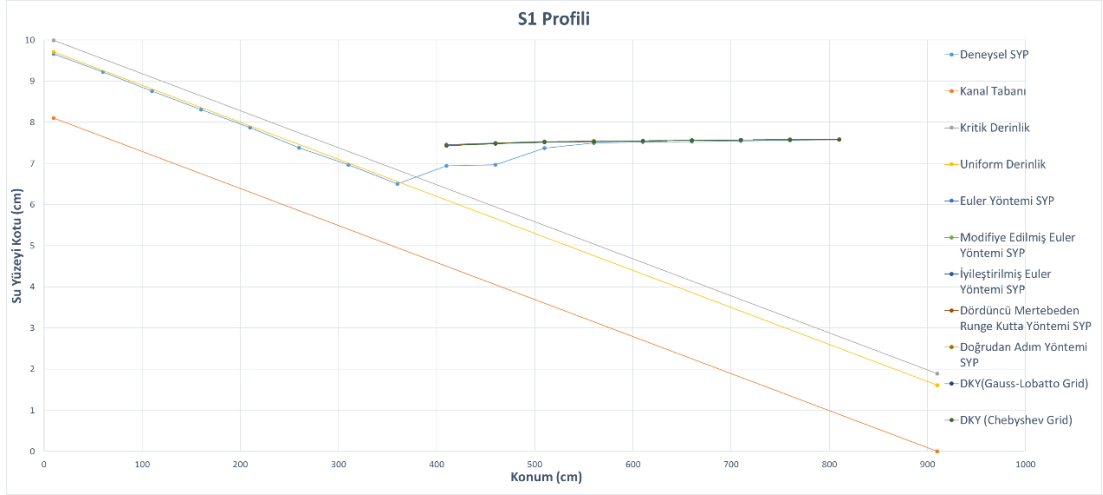
Şekil 6.58 4 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

4 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.18’ de sunulmuştur.

Tablo 6.18 4 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

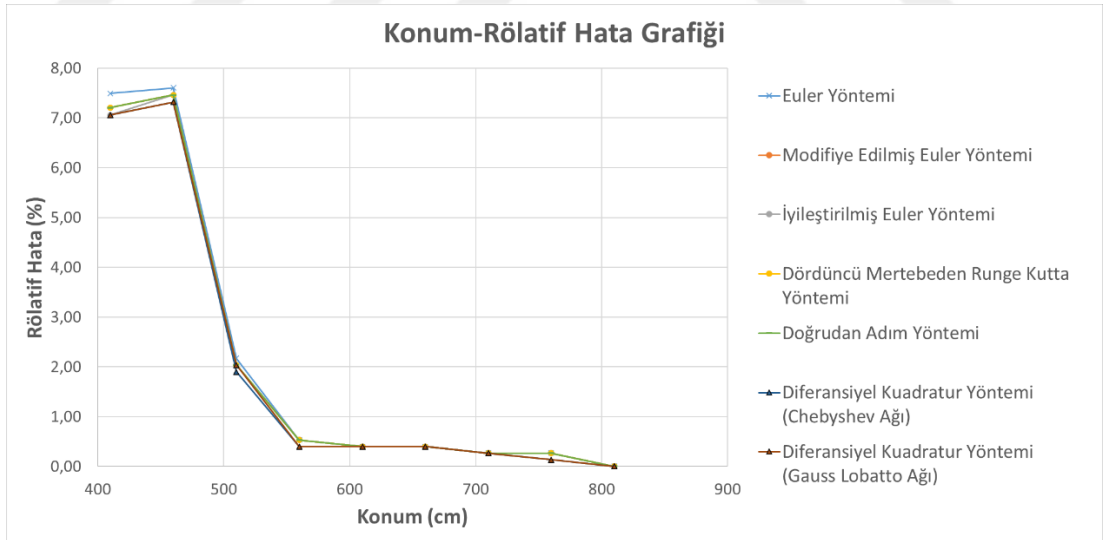
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	4,82	0,0423
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	4,65	0,0399
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	4,65	0,0399
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	4,65	0,0399
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	4,65	0,0405
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	4,82	0,0383
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	4,82	0,0387

Şekil 6.59’ da 5 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.59 5 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

5 numaralı S1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.60’ da sunulmuştur.



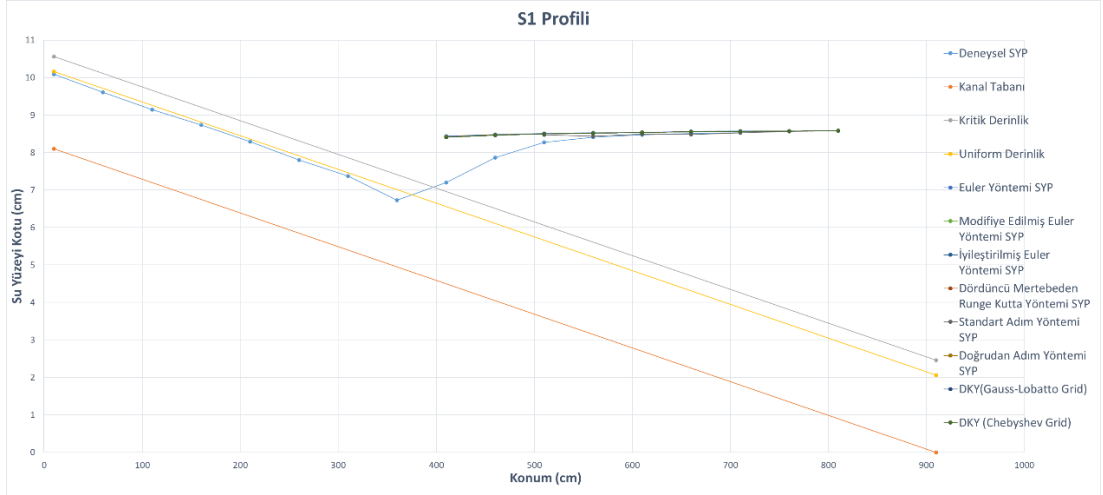
Şekil 6.60 5 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

5 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.19’ da sunulmuştur.

Tablo 6.19 5 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

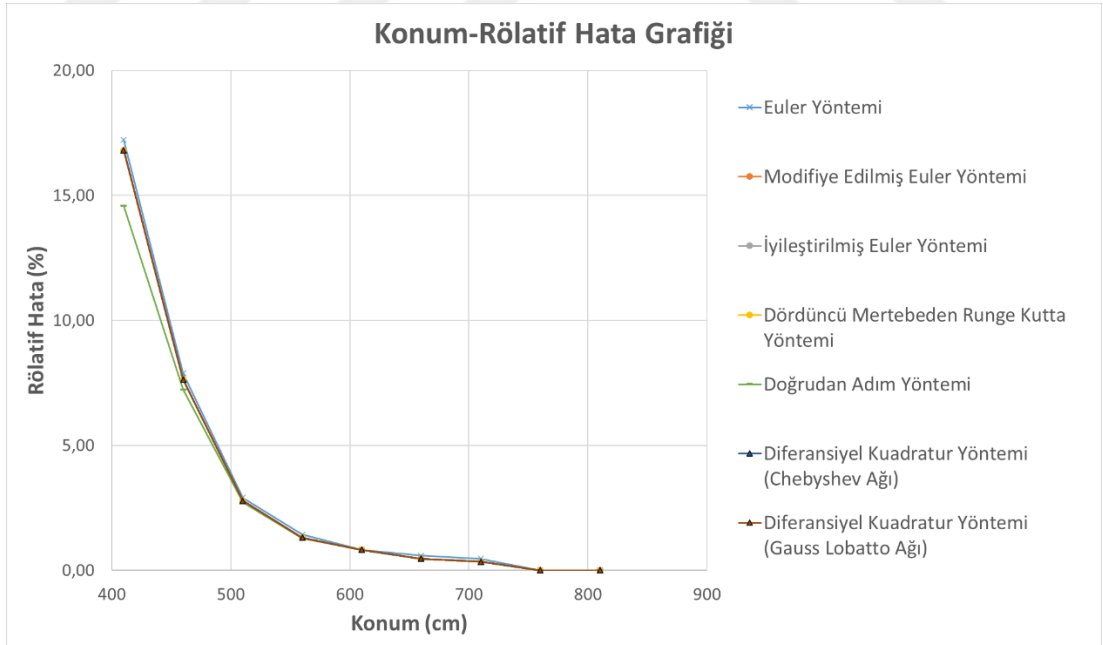
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	7,60	0,0953
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	7,46	0,0925
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	7,46	0,0916
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	7,46	0,0925
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	7,46	0,0925
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	7,32	0,0904
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	7,32	0,0906

Şekil 6.61’ de 6 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.61 6 numaralı S1 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

6 numaralı S1 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.62’ de sunulmuştur.



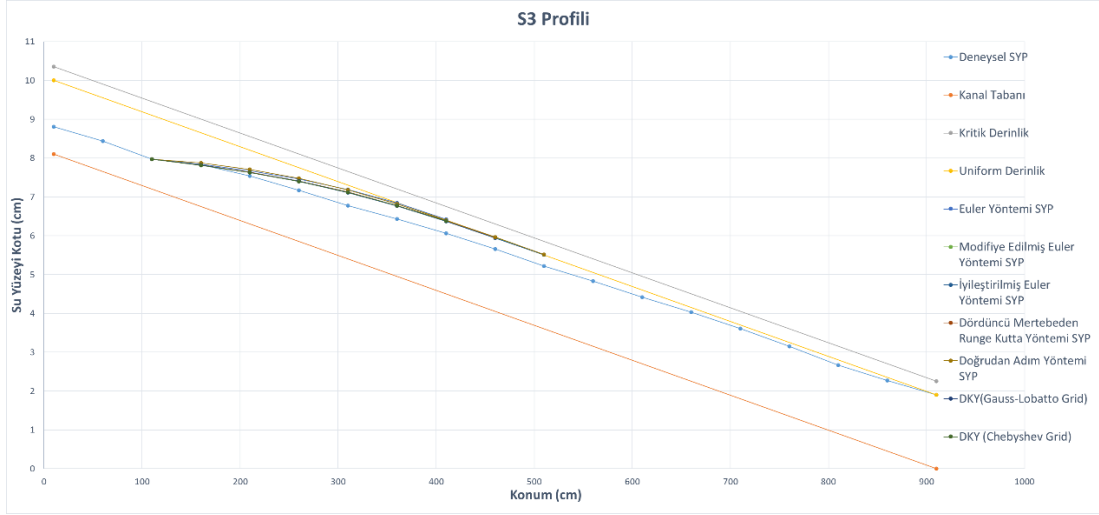
Şekil 6.62 6 numaralı S1 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

6 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.20' de sunulmuştur.

Tablo 6.20 6 numaralı S1 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

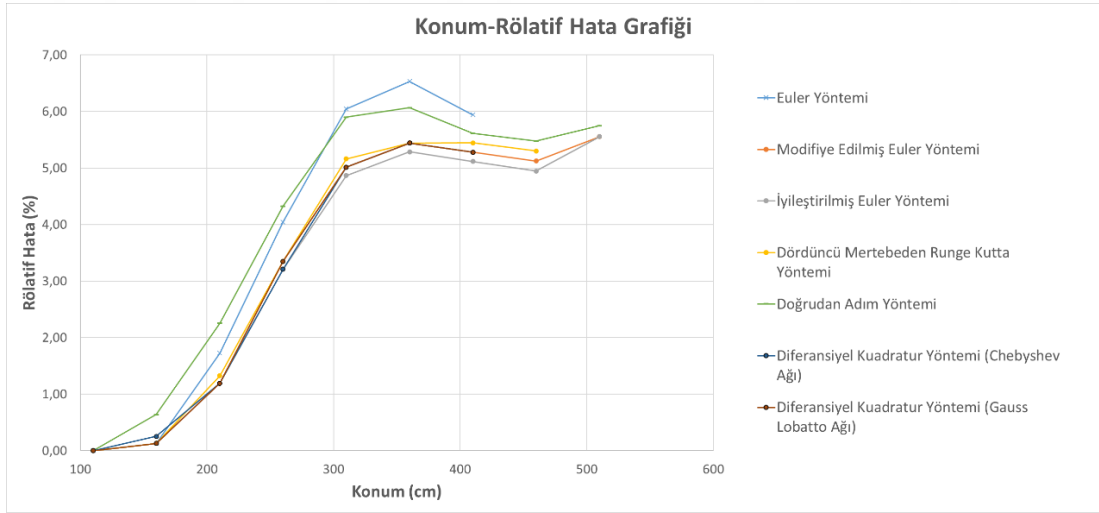
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	17,22	0,1769
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	16,81	0,1721
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	16,81	0,1721
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	16,81	0,1721
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	14,58	0,1738
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	16,81	0,1721
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	16,81	0,1721

Şekil 6.63' de 1 numaralı S3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.63 1 numaralı S3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

1 numaralı S3 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.64’ de sunulmuştur.



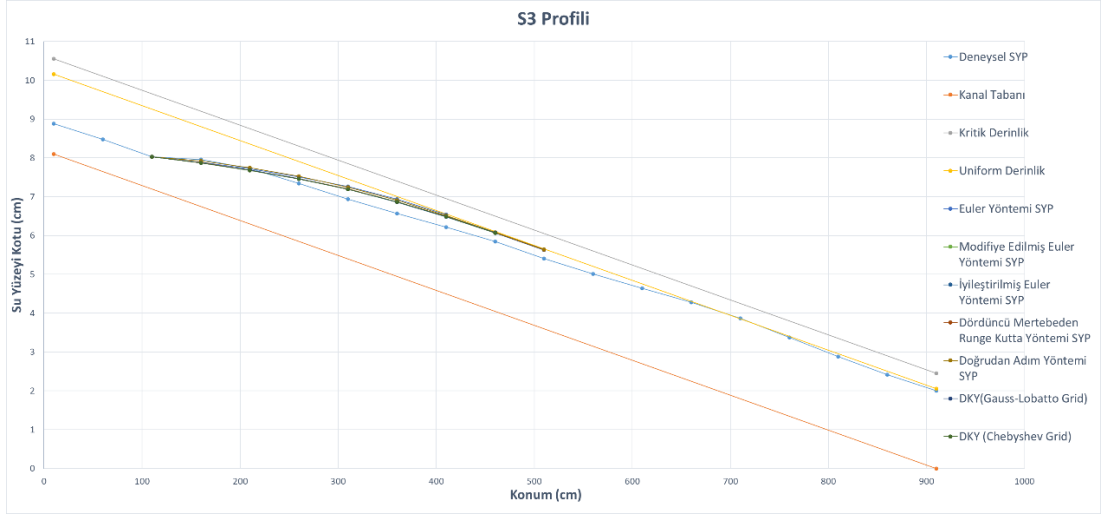
Şekil 6.64 1 numaralı S3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

1 numaralı S3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.21’ de sunulmuştur.

Tablo 6.21 1 numaralı S3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

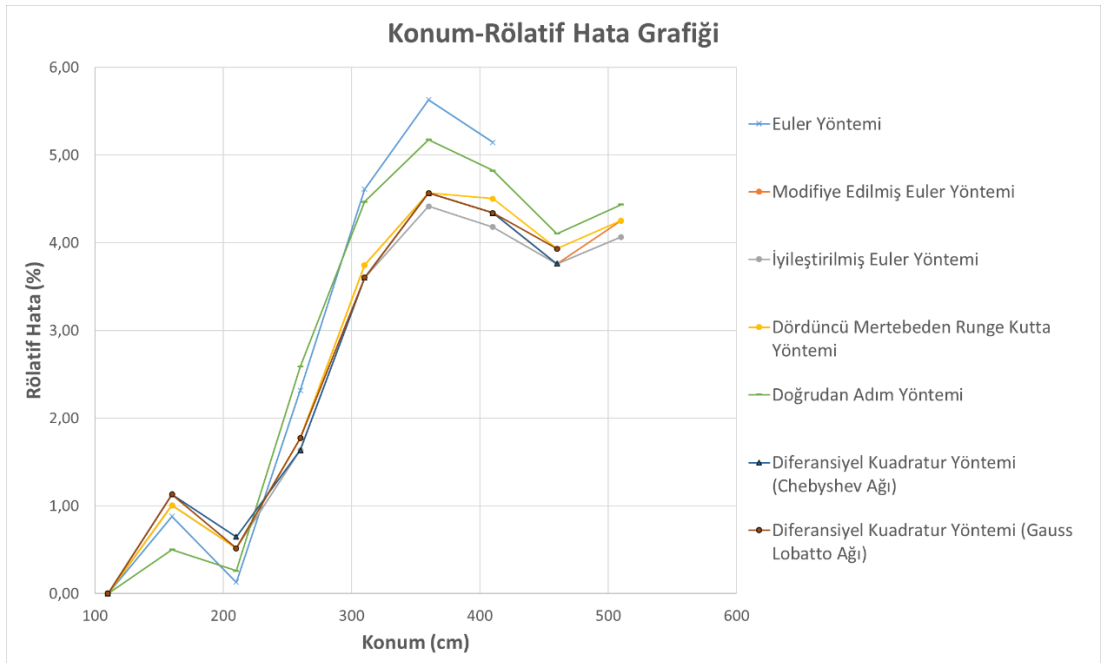
Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	6,53	0,1264
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	5,44	0,0947
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	5,56	0,0922
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	5,45	0,1022
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	6,07	0,1076
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	5,44	0,1057
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	5,44	0,1062

Şekil 6.65’ de 2 numaralı S3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 6.65 2 numaralı S3 profiline ait deneysel ve sayısal çözümlerden elde edilmiş su yüzeyi profillerinin karşılaştırmalı gösterimi

2 numaralı S3 profilinin farklı yöntemler ile yapılan sayısal çözümlerinden elde edilen RH değerlerinin konuma bağlı değişimi Şekil 6.66’ da sunulmuştur.



Şekil 6.66 2 numaralı S3 profilinin farklı sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen rölatif hatalarının konuma göre değişimi

2 numaralı S3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri Tablo 6.22’ de sunulmuştur.

Tablo 6.22 2 numaralı S3 profilinin sayısal yöntemlerle yapılan çözümlerinden elde edilen KOH ve maksimum RH değerleri

Sayısal Yöntem	Maksimum RH	KOH
Euler Yöntemi	5,63	0,1021
Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi	4,57	0,0995
İyileştirilmiş Euler Yöntemi	4,41	0,0962
Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi	4,57	0,1009
Standart Adım Yöntemi	Stabil çözüm mevcut değil	
Doğrudan Adım Yöntemi	5,18	0,0843
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev Grid)	4,57	0,0781
Diferansiyel Kuadratur Yöntemi (Chebyshev-Gauss-Lobatto Grid)	4,57	0,0789

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, Tedrici Değişken Akımlarda oluşan su yüzeyi profilleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneyler, Dokuz Eylül Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan 920 cm uzunluğa ve 25 cm genişliğe sahip dikdörtgen kesitli açık kanal deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler en az 2 kez tekrarlanmış ve böylelikle herhangi bir yanlış ölçüm olasılığının önüne geçilmiştir. Deneysel olarak oluşturulan su yüzeyi profili tipleri küçük ve büyük eğimli olup, her bir profil tipi farklı eğim ve farklı debilerle gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi, akım koşulları değişse dahi en iyi çözümü verebilecek ve bu değişimlerden en az etkilenecek sayısal yöntemi bulabilmektir. Deney düzeneğinde sayısal çözüm için girdi oluşturacak kanal taban eğimi laboratuvarında mevcut bulunan mira ve nivo yardımıyla, debiler elektromanyetik debimetre yardımıyla, akım derinlikleri ise ULS sensörü yardımıyla belirlenebilmiştir. Deneysel veriler elde edildikten sonra herbir deney koşulu için farklı sayısal yöntemlerle Matlab paket programında yazılan kodlar yardımıyla sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sayısal yöntemler; Euler Yöntemi, Modifiye Edilmiş Euler Yöntemi, İyileştirilmiş Euler Yöntemi, Dördüncü Mertebeden Runge Kutta Yöntemi, Standart Adım Yöntemi, Doğrudan Adım Yöntemi ve Diferansiyel Kuadratur Yöntemidir. Deneylerden elde edilen başlangıç koşulundan yararlanılarak sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan parametreler ise KOH ve RH değerleridir.

Kullanılan parametreler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda M1 profili için en doğru sonuçlar veren ve akım koşullarına en az duyarlı yöntemin Diferansiyel Kuadratur yöntemi olduğu, bu yöntemde ise en uygun ağı Chebyshev Ağı olduğu görülmektedir.

Kullanılan parametreler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda M2 profili için en doğru sonuçlar veren ve akım koşullarına en az duyarlı yöntemin Euler yöntemi olduğu, bu yöntemin basit ve sade oluşu ile en hızlı mler elde edilebildiği görülmektedir.

Kullanılan parametreler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda M3 profili için Modifiye Edilmiş Euler, Standart Adım ve Doğrudan Adım Yöntemlerinin akım koşullarının değişmesine karşı duyarlılığı oldukça yüksek olup, bazı durumlarda stabil mler alınamamıştır. Dolayısıyla bu tarz bir profil türü özelinde bahsi geçen yöntemlerin kullanımın gerçekçi mler alınması yönünden kullanılmaması gerektiği düşünülmektedir. Bunun yanında, bu profil özelinde Diferansiyel Kuadratur Yöntemi ve Euler Yöntemi' nin değişen akım koşullarına karşı hassasiyeti en az olmakla birlikte en gerçekçi mler verdiği görülmektedir.

Kullanılan parametreler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda S1 profili için Standart Adım Yöntemi' nin akım koşullarının değişmesine karşı duyarlılığı oldukça yüksek olup, bazı durumlarda stabil mler alınamamıştır. Dolayısıyla bu tarz bir profil türü özelinde bahsi geçen yöntemlerin kullanımın gerçekçi mler alınması yönünden kullanılmaması gerektiği düşünülmektedir. Bunun yanında, bu profil özelinde Diferansiyel Kuadratur Yöntemi ve İyileştirilmiş Euler Yöntemi' nin değişen akım koşullarına karşı hassasiyeti en az olmakla birlikte en gerçekçi mler verdiği görülmektedir. Diferansiyel Kuadratur Yöntemi' nde ise en uygun hesap noktası dağılımı Chebyshev Ağ yaklaşımı ile elde edilebilmektedir.

Kullanılan parametreler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda S3 profili için Standart Adım Yöntemi' nin akım koşullarının değişmesine karşı duyarlılığı oldukça yüksek olup, bazı durumlarda stabil mler alınamamıştır. Dolayısıyla bu tarz bir profil türü özelinde bahsi geçen yöntemlerin kullanımın gerçekçi mler alınması yönünden kullanılmaması gerektiği düşünülmektedir. Bunun yanında, bu profil özelinde Diferansiyel Kuadratur Yöntemi ve İyileştirilmiş Euler Yöntemi' nin değişen

akım koşullarına karşı hassasiyeti en az olmakla birlikte en gerçekçi çözümler verdiği görülmektedir. Diferansiyel Kuadratur Yöntemi' nde ise en uygun hesap noktası dağılımı Chebyshev Ağ yaklaşımı ile elde edilebilmektedir.

Konu özelinde daha sonra yapılabilecek çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

- Çalışma kapsamında laboratuvarında bulunan açık kanal düzeneği eski olup, bunun yerine daha uzun ve geniş ebatlarda bir kanal inşa edilerek, profiller daha net olarak gözlenebilir.
- Deney düzeneğinde bulunan pompa kanala maksimum 3 L/s' lik debi iletebilmektedir. Yeni kanal ile birlikte daha yüksek kapasiteye sahip bir pompa yerleştirilerek daha geniş debi aralığında profiller oluşturulabilir.
- Kullanılan sayısal yöntemlere ek olarak son zamanlarda sıklıkla kullanılan fakat hidrolik alanında kullanımı sınırlı olan LDK (Local Diferansiyel Kuadratur Yöntemi) bu konu özelinde kullanılabilir.
- Yapılan çalışma kapsamında yalnızca büyük ve küçük eğimli kanallarda oluşan su yüzeyi profilleri gözlenmiş olup, diğer profil türleri gözlenememiştir. Deney düzeneği, diğer profil türleri gözlemlenecek şekilde ayarlanabilir. Böylelikle literatürde bu anlamda yaşanan deneysel veri eksikliği giderilmiş olur.

KAYNAKLAR

- Altaş, E. (2017). *Açık kanallarda farklı hidrolik koşullar altında su yüzü profilinin bulanık SMRGT yöntemiyle belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi.
- Akan, A. O. (2006). *Open channel hydraulics*. Butterworth-Heinemann.
- Artichowicz, W. ve Szymkiewicz, R. (2014). Computational issues of solving 1D steady gradually varied flow equation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(3), 226-233.
- Artichowicz, W. ve Studnicka, P. M. (2014). Comparison of average energy slope estimation formulas for one-dimensional steady gradually varied flow. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 61, 89-109.
- Bellman, R., Kashef, B. G. ve Casti, J. (1972). Differential quadrature: a technique for the rapid solution of nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 10(1), 40-52.
- Birsoy, O. (2002). *Water surface profiles in compound channels* [Yüksek Lisans Tezi]. Ortadoğu Teknik Üniversitesi.
- Chaudry, M. H. (2008). *Open-Channel flow*. Springer Science+Business Media.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. Caldwell.
- Damangir, H. ve Abedini, M. J. (2014). System identification and subsequent discharge estimation based on level data alone—Gradually varied flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 36, 24-31.
- Demirel, E. ve Tozluk, H. (2002). Su yüzü profilinin euler metodu ile sayısal çözümünde gerekli adım sayısının belirlenmesi. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Dergisi*, 15(1), 31-40.
- Dey, S. (2000). Chebyshev solution as aid in computing GVF by standart step method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 271-274.

- Dubin, J. R. (1999). On gradually varied flow profiles in rectangular open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 37(1), 99-106.
- Güney, M. Ş. (2010). *Laboratuvar uygulamalı hidrolik*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Fread, D. L. ve Harbaugh T. E. (1971). Open channel profiles by Newton's iteration technique. *Journal of Hydrology*, 13, 70-80.
- Günel, M. ve Özcan, A. (2008). Open channel design using Visual Basic. *Computer Applications in Engineering Education*, 16, 127-136.
- Hu, W. W. (1980). Water surface profile for horseshoe tunnel. *ASCE Transportation Engineering Journal*, 106(2), 133-139.
- Kaçmaz, A. (2018). *Açık kanal su yüzü profil hesabının Newton-Raphson ile çözümü ve bilgisayar programı geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Dicle Üniversitesi.
- Kaya, B. (2010). Investigation of gradually varied flows using differential quadrature method. *Scientific Research and Essays*, 6(13), 2630-2638.
- Kurnatowski, J. (2011). Comparison of analytical and numerical solutions for steady, gradually varied open-channel flow. *Pol. J. Environ. Study*, 20(4), 925.
- Öztürkmen, G. (2008). *Açık kanallarda su yüzü profilinin farklı hidrolik koşullar altında belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Dicle Üniversitesi.
- Paine, J. N. (1992). Open channel flow algorithm in Newton-Raphson form. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(2), 306-319.
- Quan, J. R. ve Chang, C. T. (1989). New insights in solving distributed system equations by the quadrature method—I. Analysis. 13(7), 779-788.
- Rhodes, D. G. (1995). Newton-Raphson solution for gradually varied flow. *Journal of Hydraulic Research*, 33(2), 213-218.
- Rhodes, D. G. (1998). Gradually varied flow solutions in Newton-Raphson form. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(4), 233-235.

- Schaefer, R. L. (1985). BAKWATR-Computation of gradually varied flow. *Advances in Engineering Software* (1978), 7(4), 170-172.
- Shahvand, N. S., Sanayei, H. R. Z., ve Kamgar, R. (2021). Modeling the gradually varied flow profile in circular and parabolic channels using the Adomian decomposition method. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1207-1216.
- Spena, A. R., Farroni, A. ve Nucci, C. D. (2007). Water surface profiles of gradually varied flow in prismatic channels with variable slope. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 10(1), 47-60.
- Subramanya, K. (2009). *Flow in open channels*. McGraw-Hill.
- Swamee, P. K. (2003). Length of gradually varied flow profiles. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 9(2), 70-79.
- Tavener, G. F. (1973). Stability and reach length in water surface profile determination. *Journal of the American Water Resources Association*, 9(5), 950–962.
- Tuncer, İ. (2011). *Açık kanallarda su yüzü profilinin belirlenmesi, Nakkaş Dere örneğinde bir HEC-RAS uygulaması* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi.
- Vatankhah, A. R. (2010). Analytical integration of the equation of gradually varied flow for triangular channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(4), 546-549.
- Vatankhah, A. R. (2011). Direct integration of manning based GVF equation in trapezoidal channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22, 235-241.
- Vatankhah, A. R. Ve Easa, S. M. (2011). Direct integration of Manning-based gradually varied flow equation. *Water Management*, 164(5), 257-264.
- Vatankhah, A. R. ve Easa, S. M. (2014). Direct solution for water surface profile in circular channels. *Water Management*, 167(6), 311-317.
- Venutilli, M. (2004). Direct integration of the equation of gradually varied flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(1), 88-91.

Wilson E. H. (1969). Surface profiles in non-prismatic rectangular channels. *Water Power*, 21(11), 438-443.

Zaghloul N. A. ve Darwish A. Y. (1987). Solution of gradually varied flow problems using the direct step method the IBM Lotus 1-2-3 system, *Environmental Software*, 2(4), 199-206.

Zaghloul, N. A. (1992). Gradually varied flow in circular channels with variable roughness. *Advances in Engineering Software*, 15(1), 33-42.

Zaghloul, N. A. ve Shanin, M. S. (1993). Computer simulation of gradually varied flow profiles in circular sections, *Advances in Engineering Software*, 16(1), 37-46.

