

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZAMANLA DEĞİŞEN VE DEĞİŞMEYEN AKIM  
KOŞULLARINDA OLUŞAN HIZLARIN  
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK  
ARAŞTIRILMASI**

**Görkem TANIR**

**Ağustos, 2020  
İZMİR**

**ZAMANLA DEĞİŞEN VE DEĞİŞMEYEN AKIM  
KOŞULLARINDA OLUŞAN HIZLARIN  
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK  
ARAŞTIRILMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik-Hidroloji ve Su Kaynakları  
Programı**

**Görkem TANIR**

**Ağustos, 2020**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**GÖRKEM TANIR**, tarafından **DOÇ. DR. AYŞEGÜL ÖZGENÇ AKSOY** yönetiminde hazırlanan “**ZAMANLA DEĞİŞEN VE DEĞİŞMEYEN AKIM KOŞULLARINDA OLUŞAN HIZLARIN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY

Yönetici

Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Ali KUMANLIOĞLU

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Lisans yıllarımdan bu yana, hidromekanik alanına ilgi duymamda büyük katkıları olan, tez çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve birikimi ile yol gösteren, bana olan desteğini hiç bir zaman esirgemeyen tez danışmanım ve çok değerli hocam Doç. Dr. Ayşegül Özgenç Aksoy'a,

Alanındaki tecrübesi ve bilgisiyle akademik çalışmalarımda büyük katkıları olan, manevi desteğini her zaman hissettiğim, kıymetli hocam Doç. Dr. Mustafa Doğan'a,

Akademik kariyerimde manevi olarak beni her zaman destekleyen değerli hocam Öğr. Gör. Dr. Filiz Barbaros'a,

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana olan desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Ayşegül Kuzucu, Semire Oğuzhan ve Ceren Duyal'a, yaşamımda vermiş oldukları manevi desteklerden dolayı, başta ilkokul arkadaşım Fırat Terzioğlu olmak üzere, tüm yakın arkadaşlarıma,

Tezimde kullanmış olduğum MicroADV cihazının alınması konusunda, 116M237 numaralı proje kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a,

Hayatım boyunca bana sonsuz destek olan kıymetli ailem; babam Nevzat Tanır, ablam Duygu Tanır, abim Tansu Tanır ve annem Nurten Tanır'a

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Görkem TANIR

# ZAMANLA DEĞİŞEN VE DEĞİŞMEYEN AKIM KOŞULLARINDA OLUŞAN HIZLARIN DENEYSSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

## ÖZ

Bu çalışma kapsamında, açık kanalda kararlı (zamanla değişmeyen) ve kararsız (zamanla değişen) akım koşullarında oluşan akım hızlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarı'nda yer alan açık kanal deney düzeneğinde kararlı ve kararsız akım koşullarında hız ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sırasında ultrasonik yöntemle hız ölçümü yapan UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) ve ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) cihazları kullanılmıştır. Kararlı akım koşullarında düşey kesit boyunca oluşan hız profilleri UVP cihazı aracılığı ile elde edilmiştir. Hız profilleri, literatürde önerilen formüller kullanılarak ta elde edilmiş olup, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve formüllerde yer alan katsayılar için değerler önerilmiştir. Kullanılan formüller içerisinde, Üssel Yasa ve Parabolik Yasa formüllerinin akımın dış bölgesinde, Logaritmik Yasa formülünün ise akımın iç bölgesinde uyumlu olduğu görülmüştür. Kararsız akım koşullarında iki farklı cihaz aracılığı ile noktasal hızlar zamana bağlı olarak ölçülmüş ve elde edilen zamana bağlı hız ölçümlerinin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen deneyler, Flow3D paket programında sayısal olarak modellenmiş ve deneysel veriler ile sayısal çözüm aracılığı ile elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Açık kanal, hız ölçümü, kararlı akım, kararsız akım, Flow3D

# **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF VELOCITIES UNDER STEADY AND UNSTEADY FLOW CONDITIONS**

## **ABSTRACT**

In this study, velocity distribution in open channel flows was investigated experimentally and numerically under steady and unsteady flow conditions. The experiments were carried out in a channel which was available in the Hydraulics Laboratory of Civil Engineering Department in Dokuz Eylul University. The velocity measurements were conducted by using UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) and ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) devices. The velocity profiles under steady flow conditions were also obtained by means of UVP device and compared with those computed by using the equations available in the literature. According to the results it was observed that the Power Law and Parabolic Law are compatible in the outer region of the flow and the Logarithmic Law is compatible in the inner region of the flow. Temporal variation of the point velocities were measured by using ADV and UVP devices under unsteady flow conditions and it was observed that the obtained time dependent velocity measurements were consistent. Flow3D software was used for numerical analysis and the numerical results were compared with the experimental findings.

**Keywords:** Open Channel, velocity measurement, steady flow, unsteady flow, Flow3D

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
<b>BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	1
1.2 Geçmişte Yapılan Akademik Çalışmalar .....	2
1.3 Teorik Bakış .....	8
<b>BÖLÜM İKİ-YÖNTEM VE GEREÇ .....</b>	<b>10</b>
2.1 DeneY Düzenegi .....	10
2.2 Ölçüm Cihazları .....	11
2.2.1 Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) Cihazı.....	11
2.2.2 Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) .....	13
2.2.3 UltraLab ULS.....	14
2.3 Gerçekleştirilen DeneYler .....	15
2.3.1 Kararlı Akım DeneYleri .....	15
2.3.2 Kararsız Akım DeneYleri .....	21

<b>BÖLÜM ÜÇ-DENEYSEL SONUÇLAR .....</b>	<b>24</b>
3.1 Kararlı Akım Deneyleri.....	24
3.1.1 Zamana Bağlı Noktasal Hız Ölçümleri.....	24
3.1.2 Düşey Kesit Boyunca Ölçülen Hız Profilleri.....	28
3.2 Kararsız Akım Deneyleri.....	39
<b>BÖLÜM DÖRT-SAYISAL MODEL .....</b>	<b>50</b>
4.1 Flow3D Programı .....	50
4.2 Sayısal Model.....	51
4.3 Sayısal Çözüm Sonuçları.....	55
4.3.1 Kararlı Akım Koşullarında Noktasal Olarak Elde Edilen Zamana Bağlı Akım Hızı Değerleri.....	55
4.3.2 Kararsız Akım Deneylerinin Sayısal Çözüm Sonuçları.....	64
4.3.3 Kararlı Akım Koşullarında Elde Edilen Hız Profil Değerleri.....	73
<b>BÖLÜM BEŞ-SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>811</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>84</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1 Açık kanal düşey hız profili .....	8
Şekil 2.1 Deney düzeneği.....	10
Şekil 2.2 Deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	11
Şekil 2.3 Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) .....	12
Şekil 2.4 MicroADV cihazı .....	14
Şekil 2.5 Ultralab ULS .....	15
Şekil 2.6 ADV cihazının yerleşimi .....	17
Şekil 2.7 UVP cihazının yerleşimi .....	18
Şekil 2.8 UVP cihazının serbest su seviyesinden kanal tabanına bakacak şekilde yerleşimi .....	19
Şekil 2.9 Ölçüm noktasının şematik gösterimi .....	20
Şekil 2.10 Kararsız akım deneylerinde cihazların kanala yerleşimi .....	22
Şekil 3.1 K1 deneyi için ADV cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi .....	25
Şekil 3.2 K1 deneyi için UVP cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi.....	25
Şekil 3.3 K1 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi ....	26
Şekil 3.4 K2 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi ....	27
Şekil 3.5 K3 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi ....	27
Şekil 3.6 K1 deneyi için elde edilen hız profili ile Üssel Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	29
Şekil 3.7 K2 deneyi için elde edilen hız profili ile Üssel Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	30
Şekil 3.8 K3 deneyi için elde edilen hız profili ile Üssel Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	31
Şekil 3.9 K1 deneyi için elde edilen hız profili ile Parabolik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	32
Şekil 3.10 K2 deneyi için elde edilen hız profili ile Parabolik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	33
Şekil 3.11 K3 deneyi için elde edilen hız profili ile Parabolik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	34

Şekil 3.12 K1 deneyi için elde edilen hız profili ile Logaritmik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	35
Şekil 3.13 K2 deneyi için elde edilen hız profili ile Logaritmik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	36
Şekil 3.14 K3 deneyi için elde edilen hız profili ile Logaritmik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	37
Şekil 3.15 K4 deneyi için elde edilen hız profili ile İkili Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	38
Şekil 3.16 K5 deneyi için elde edilen hız profili ile İkili Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili .....	39
Şekil 3.17 T1 deneyi taşkın hidrografi .....	40
Şekil 3.18 T2 deneyi taşkın hidrografi .....	40
Şekil 3.19 T3 deneyi taşkın hidrografi .....	41
Şekil 3.20 T4 deneyi taşkın hidrografi .....	41
Şekil 3.21 T1 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi .....	42
Şekil 3.22 T2 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi .....	42
Şekil 3.23 T3 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi .....	43
Şekil 3.24 T4 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi .....	43
Şekil 3.25 T1 deneyi sırasında ADV cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi .....	44
Şekil 3.26 T1 deneyi sırasında UVP cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi .....	45
Şekil 3.27 T1 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi...	46
Şekil 3.28 T2 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi...	47
Şekil 3.29 T3 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi...	48
Şekil 3.30 T4 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi...	49
Şekil 4.1 Flow3D programında oluşturulmuş olan açık kanal modeli .....	52
Şekil 4.2 Flow3D programında oluşturulan 1.çözüm ağı .....	53
Şekil 4.3 Flow3D programında oluşturulan 2.çözüm ağı .....	54

Şekil 4.4 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.5 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$ türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması.....	56
Şekil 4.6 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, LES türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.7 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\varepsilon$ türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.8 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Prandtl Karışım Uzunluğu türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	59
Şekil 4.9 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Bir Denklemlili Türbülans Enerji Modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	60
Şekil 4.10 K2 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	62
Şekil 4.11 K3 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	63
Şekil 4.12 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	65
Şekil 4.13 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$ türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	66

Şekil 4.14 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, LES türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	67
Şekil 4.15 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\epsilon$ türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	68
Şekil 4.16 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Prandtl Karışım Uzunluğu türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması.....	69
Şekil 4.17 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Bir Denklemlili Türbülans Enerji Modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması.....	70
Şekil 4.18 T2 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$ türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	71
Şekil 4.19 T3 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$ türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	72
Şekil 4.20 T4 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$ türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması .....	73
Şekil 4.21 K4 deneyi için gerçekleştirilen sayısal çözümden elde edilen düşey hız profillerinin, UVP ölçümleri ve İkili Yasa formülü aracılığı ile elde edilen düşey hız profilleri ile karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.22 K4 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının sayısal model aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı.....	76
Şekil 4.23 K4 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının İkili Yasa formülü aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı.....	77

Şekil 4.24 K5 deneyi için gerçekleştirilen sayısal çözümden elde edilen düşey hız profillerinin, UVP ölçümleri ve İkili Yasa formülü aracılığı ile elde edilen düşey hız profilleri ile karşılaştırılması .....	78
Şekil 4.25 K5 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının sayısal model aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı.....	79
Şekil 4.26 K5 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının İkili Yasa aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı.....	80



## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 Standart UVP algılayıcılarının teknik özellikleri.....	12
Tablo 2.2 ADV modellerinin teknik özellikleri .....	13
Tablo 2.3 Kararlı akım deneylerinin özellikleri .....	20
Tablo 2.4 Kararsız akım deneylerinin özellikleri.....	22
Tablo 3.1 Kararlı akım deneyleri akım hızları .....	28
Tablo 4.1 K1 Deneyi sırasında gerçekleştirilen ölçümler ve farklı türbülans modelleri ile gerçekleştirilen sayısal çözümlerden elde edilmiş olan su seviyesi ve ortalama akım hızı değerleri .....	61
Tablo 4.2 K1, K2 ve K3 deneyleri sırasında gerçekleştirilen ölçümler ve RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözümlerden elde edilmiş olan su seviyesi ve ortalama akım hızı değerleri.....	64

# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Çalışmanın Amacı

Doğada oluşan akışkan akımlarının neredeyse tamamı, türbülanslı olarak gerçekleşmektedir. Türbülans olayını oluşturan etmenlerin tamamen anlaşılabilmesi, akışkan akımlarında oluşacak hızların, akım şartlarına göre değişiminin detaylı olarak incelenebilmesine bağlıdır. Ayrıca, akarsularda oluşacak akım hızı değerleri ve düşey hız profillerinin doğru bir şekilde öngörülebilmesi, açık kanal hidroliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sebeplerden dolayı, akım hızlarının ölçümü, hidromekanik alanında yapılan çalışmalarda kritik bir rol oynamaktadır.

Ultrasonik ölçüm yöntemleri, günümüzde hidromekanik alanında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Akım hızlarının ölçümünde birçok araştırmacı tarafından kullanılan ultrasonik ölçüm cihazları, deneysel çalışmalara büyük katkı sağlamaktadır. Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) ve Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), bilimsel çalışmalarda sıkça kullanılan ultrasonik ölçüm cihazları içerisinde yer almaktadır. ADV cihazı akım alanı içerisinde yer alan bir noktadaki hızın üç boyutlu olarak ölçülmesine olanak sağlarken UVP cihazı düşey kesit boyunca farklı noktalarda oluşan akım hızlarını ölçerek hız profiline elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında, kararlı (zamanla değişmeyen) ve kararsız (zamanla değişen) akım koşullarında akım hızları ADV ve UVP cihazları kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca kararlı akım koşullarında gerçekleştirilen deneyler sırasında elde edilen düşey hız profilleri, literatürde açık kanal akımlarında düşey kesiti boyunca oluşacak hız profillerinin belirlenmesi amacıyla verilen formüller kullanılarak elde edilen hız profilleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Flow 3D yazılımı kullanılarak sayısal çözüm de yapılmış olup sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır.

## 1.2 GemiŖte Yapılan Akademik alıŖmalar

Vedula ve Achanta (1985), boru akımı veya açık kanal akımı gibi farklı akım koŖullarında oluŖan akım bölgelerini incelemiŖler ve bu bölgelerdeki dŖey hız profillerinin, literatürde nerilen Parabolik Yasa ve Logaritmik Yasa formüllerine uyumluluğunu araŖtırmıŖlardır. Akımın i bölgesinde (inner region) Logaritmik, dıŖ bölgesinde (outer region) ise Parabolik Yasa ile temsil edildiği İkili Yasa (Binary Law) formülünü nermiŖler ve önerdikleri yasanın geçerliliğini, literatürde yapılmıŖ alıŖmalardan elde edilen deneysel verileri kullanarak araŖtırmıŖlardır.

Chiu ve Said (1995), açık kanalda oluŖan maksimum ve ortalama hız değerleri ile entropi parametresini incelemiŖlerdir. Literatürde konu ile ilgili yapılan alıŖmalarda elde edilen verileri kullanarak bu parametreler arasındaki matematiksel iliŖkiyi ortaya koymaya alıŖmıŖlardır.

Voulgaris ve Trowbridge (1998), laboratuvarında ADV lmleri yapmıŖlar ve bu ölçümlerin doğruluğunu test etmiŖlerdir. Deneyle, 17 m uzunluğunda, 60 cm geniŖlięinde ve 30 cm derinliğinde bir kanalda geekleŖtirilmiŖtir. Kararlı akım koŖullarında oluŖturulan deneylerde hız verilerinin yanı sıra Reynolds gerilmeleri de llmŖtir. Ölçümlerden elde edilen hız değerlerinin ve Reynolds gerilmelerinin matematiksel olarak hesaplanan değerler ile uyum içerisinde olduğu grlmŖtir.

Lane ve diğerleri (1998), bir nehir yatağında ADV cihazı ile hız ölçümleri geekleŖtirmiŖlerdir. ADV verilerini Marsh McBirney Electromagnetic Current Meters (ECMs) ile alınan ölçümler ile karŖılaŖtırmıŖlardır. alıŖmada cihazın arazi ölçümleri için konumlandırılması ve buna yönelik hesaplar ile ilgili önerilerde bulunulmuŖtur.

McLelland ve Nicholas (2000), ADV ölçümlerinde yer alan hatalı verileri tespit etmek amacı ile bir alıŖma geekleŖtirmiŖlerdir. alıŖmada yüksek frekansa sahip ölçümler yapılmıŖ olup bu ölçümlerde yer alan hataların dŖey hız bileŖenleri arasındaki dağılımı gstermiŖlerdir.

Kim, Friedrichs, Maa ve Wright (2000), Birleşik Devletler, Virginia Eyaleti içerisinde yer alan York Nehri'nde kanal tabanına yakın bölgelerde ADV ile ölçümler yapmışlar ve bu ölçümlerden hareketle taban gerilmelerini hesaplamayı amaçlamışlardır. Gerilmeler direkt kovaryans, türbülans kinetik enerjisi, atalet kırılımı ve logaritmik profil yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada kanal tabanında yapılan ölçümler sırasında ADV'nin konumlanacağı uzaklığın doğru belirlenmesi gerektiğini ve bu konumun sonuçlara olan etkisini vurgulamışlardır. Çalışmada ayrıca farklı yöntemlerin gerilme hesabında verdiği sonuçlar kıyaslanmıştır.

Song ve Chiew (2001), doğrusal olmayan türbülanslı akımlarda ADV cihazı ile hız ölçümleri yapmışlardır. Deneyler taban eğimi ayarlanabilir bir laboratuvar kanalında gerçekleştirilmiştir. Kanalın uzunluğu 18 m'dir. Kanal 60 cm genişliğe ve 80 cm yüksekliğe sahiptir. Deneylerde 10 MHz frekansa sahip ADV cihazı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarını kullanarak literatürde yer alan hız dağılımı formüllerine katkıda bulunmuşlardır.

Balachandar, Blakely ve Bugg (2002), türbülanslı akıma sahip, sığ açık kanallarda oluşan hız profillerini araştırmışlardır. Çalışma sırasında pürüzlü ve pürüzsüz kanallar üzerindeki akımlarda oluşan hızlar Laser-Doppler Anemometer (LDA) ile ölçülmüştür. Üssel Yasa (Power Law) formülünün farklı akım koşullarında uygulanabilirliği incelenmiştir. Deneyler, 10 m uzunluğa, 0,8 m genişliğe ve 0,6 m derinliğe sahip bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanalın pürüzlülük koşulları değiştirilerek farklı akım şartları oluşturulmuş ve bu şartlarda oluşan hız profillerinin formül ile karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak Üssel Yasa formülünde yer alan parametreler için optimum değerler önerilmiştir.

Goring ve Nikora (2002), ADV ile ilgili çalışmalarında ölçüm sırasında oluşan aykırı verileri tespit eden bir yöntem geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada öncelikle cihazın sonuçlarında anlamsız olarak çıkan hızların tespit edilmesi ve sonrasında o verilerin yerine doğru değerlerin girilmesi için model denemeleri

yapılmıştır. Aykırı verilerin tespiti için birden farklı eşik analizi yöntemleri denenmiş ve veri setleri için en uygun yöntem olarak faz-uzay eşiği (phase-spaced thresholding) yöntemi önerilmiştir.

Yang, Tan ve Lim (2004), açık kanalda oluşacak hız dağılımını araştırmışlardır. Çalışmalarında bir açık kanalda, kanal tabanından yüzeye kadar oluşacak olan hız dağılımının matematiksel modelini kurmayı hedeflemişlerdir. Literatürde yer alan çalışmalardan elde edilen veriler ile modeli kurmaya çalışmışlar ve kesitte oluşacak maksimum hızın konumunu belirlemeye çalışmışlardır. Geliştirdikleri model ile Reynolds kayma gerilmesi dağılımının belirlenebileceğini öngörmüşlerdir.

Mori, Suzuki ve Kakuno (2007), kabarcıklı akımlarda ADV cihazı ile ölçümler gerçekleştirmişler ve bu tip akımlarda cihazın verilerinde oluşan aykırı verileri incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında ADV verilerindeki aykırı değerlerin hava boşlukları ile ilişkisini ortaya koymaya çalışmışlardır. Deneyleri dairesel bir tankta gerçekleştirmişlerdir. Tankın içinde yer alan hava baloncuğu üretici sayesinde baloncuklu bir akım gerçekleştirilmiş ve bu akımda ADV ölçümleri yapılmıştır.

Bonakdari, Larrarte, Lassabatere ve Joannis, (2008), çalışmalarında Navier-Stokes denklemlerini kullanarak açık kanalda oluşan hız profili için yeni bir formülasyon geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, Logaritmik Yasa (Logarithmic Law) formülünün çok iyi sonuçlar vermediği dış bölge için dar ve geniş kanallar için yeni bir formül önerilmiştir. Deneylerden elde edilen ve literatürde yapılan çalışmalarda kullanılmış olan veriler, önerilen denklemin geçerliliğinin doğrulanması için kullanmışlardır.

Chanson, Trevethan ve Aoki (2008), nehir ağızlarında oluşan kararsız türbülanslı akımlarda ADV cihazı ile akım hızlarını ölçerek, literatürde ADV verilerindeki aykırı verilerin düzeltilmesi için önerilen yöntemlere ek olarak yeni bir teknik üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 2003 ve 2004 yıllarında, Erapah Deresi'nde (Avustralya) saha ölçümleri alınarak gerçekleştirilen çalışmada yazarlar, ADV

verisinin doğru bir ileri-işleme tekniği olmadan kullanılmasının doğru olmayacağını savunmuşlardır. Bu amaçla yeni aykırı veri atma yöntemleri önerilmiştir.

Obayashi, Tasaka, Kon ve Takeda (2008), UVP algılayıcılarını kullanarak akım sırasında oluşan hız profillerini incelemişlerdir. Çalışmada yeni bir sistem geliştirerek 2 boyutlu hız vektörlerinin ölçümüne olanak sağlamayı hedeflemişlerdir. Deneyler, 160 mm genişliğinde ve 40 mm yüksekliğinde bir kanalda gerçekleştirilmiştir.

Kantoush, De Cesare, Boillat ve Schleiss (2008), ölçülmesi zor olan düşük hız ve sığ derinlik koşullarındaki akımları; UVP cihazı, Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) tekniği ve sayısal analiz yolu ile araştırmışlardır. Sığ bölgelerdeki düşey hız bileşenlerinin katı madde birikimine olan etkisini incelemişlerdir.

Kotzé, Wiklund, Haldenwang ve Fester (2011), UVP cihazı yardımı ile karmaşık geometrilere oluşan akımları araştırmışlardır. Newtonyen olmayan akışkan kullanarak yaptıkları deneylerde hız profillerini UVP aracılığı ile ölçmüşlerdir.

Wada, Tezuka, Treenuson, Tsuzuki ve Kikura (2012), bir dirseğin mansabında oluşan akımın debisini hesaplamak amacı ile yapılan bir UVP deneyi için optimum algılayıcı sayısını ortaya koymaya çalışmışlardır. Kurdukları modelin geçerliliği için kurdukları düzenekte UVP ile deneyler yapmışlardır. Deneylere ek olarak CFD (Computational Fluid Dynamics) tabanlı bir model kurarak modeli test etmişlerdir.

Ihara, Kikura ve Takeda (2013), çok yavaş olan akımların karakteristiklerini incelemek amacı ile UVP cihazı kullanmışlardır. Belirli bir büyüklükteki hızları ölçebilen UVP sisteminin ölçüm aralığını arttırmayı hedefleyen çalışmada, geliştirilen sistem, deneyler ile test edilmiştir. Çalışma sonucunda önerilen sistemin düşük hızlar için güvenilir olduğu ortaya konulmuştur.

Durgesh, Thomson, Richmond ve Polagye (2014), ADV verilerindeki gürültülerin düzeltilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Veriler Birleşik Devletler'in

Washington eyaletinde yer alan Puget Boğazı'nda yapılan ölçümlerle elde edilmiştir. ADV deniz yatağının 4,6 m yukarısına bir üç ayaklı sehpa aracılığı ile yerleştirilmiş olup dört buçuk gün boyunca sürekli veri alımı gerçekleştirilmiştir. Alınan ham verilerde yer alan aykırı verileri vurgulayarak bu yanlış verilerin düzeltilmesi için bir yöntem ortaya konulmuştur.

Zrostlík, Bareš, Krupička, Pícek ve Matoušek (2015), açık kanalda oluşan hız profilini ve hızların ölçümünde kullanılan yöntemleri incelemişlerdir. Sedimentli bir kanalda gerçekleştirdikleri deneylerde pitot tübü, Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) ve Acoustic Doppler Velocity Profiler (ADVP) olmak üzere üç farklı ölçüm tekniği kullanmışlardır. Deneyler, suyun ve sedimentin devir daimini sağlayan bir düzeneğe sahip kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal, 8 m uzunluğunda, 0,2 m genişliğinde ve 0,25 m derinliğindedir. Kanal tabanı 16,7 derecelik açığa kadar eğimli hale getirilebilir. Sonuç olarak akımda oluşan hız profilinin üst tabakada logaritmik yasa ile ve sediment miktarınca zengin olan alt tabakada doğrusal olarak tanımlanabileceğini öngörmüşlerdir.

Gandhi, Verma ve Abraham (2016), dikdörtgen kesitli açık kanalda oluşan hız profillerinin matematiksel modelini kurmayı hedeflemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda kesitte oluşan düşey hızlar ve birim genişlik debilerini veren bir model kurmaya çalışmışlardır. Parabolik ve logaritmik yasaların birleşimini içeren modelde, kanal geometrisi ve fiziksel koşullar gibi 10 adet parametre kullanılmıştır. Bu parametreleri optimize eden Matlab kodu oluşturulmuş olup FLUENT programında CFD yöntemi ile modelin denemelerini yapılmıştır.

Hamdani, Ihara, Tsuzuki ve Kikura (2016), boru içinde oluşan kabarcıklı akımları incelemek amacı ile UVP cihazı ile ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Deneysel yöntem ile yürütülen çalışmada, UVP cihazının yanı sıra WMS ve HSC ile aynı anda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda UVP cihazının türbülanslı akımlar için önem arz eden kabarcıkların hızını ölçmek konusunda güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Luo, Singh ve Schmidt (2018), bir açık kanalda oluşan hız dağılımı için literatürde bulunan deterministik denklemler ile entropi teorisine dayanan hız dağılımı hesaplamalarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada Logaritmik Yasa ve Üssel Yasa denklemleri kullanılmıştır. Karşılaştırmalar, literatürde bu alanda yapılmış çalışmalardan elde edilen deneysel veriler kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda iki farklı yöntemin avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

Shojaeezadeh ve Amiri (2018), entropi teorisi üzerine dayanan açık kanal hız dağılımı hesaplamalarını incelemişlerdir. Yazarlar literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen verileri kullanarak modelin kullanılabilirliğini incelemişler ve model ile ilgili parametre tahminleri yapmışlardır.

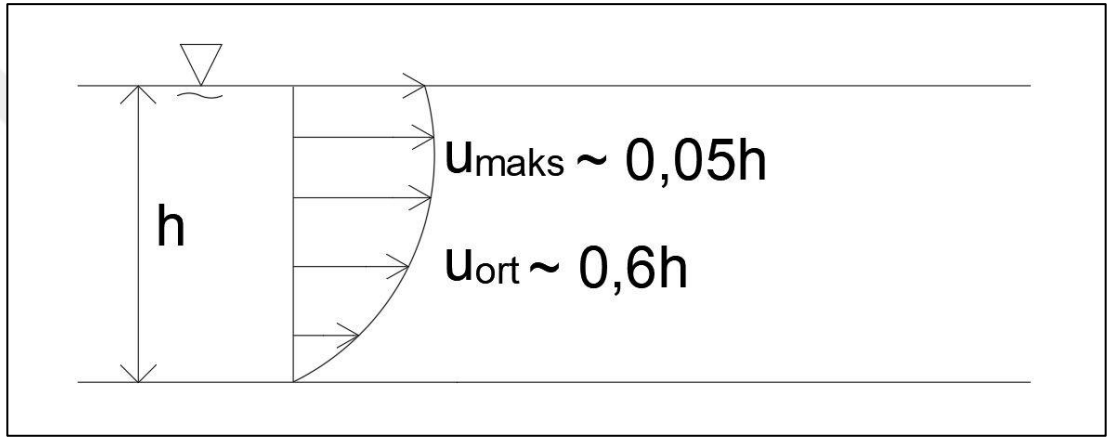
Wu, Liu, Chen ve Li (2018), açık kanal akımı karakteristiklerini ortaya koymak için kullanılan Reynolds gerilme modelini düzenleyerek hız dağılımı ve türbülans karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmada oluşturulan model, açık kanaldaki serbest yüzeyin hız dağılımını ve türbülans karakteristiklerinin etkisini incelemektedir. Model CFD yazılımı olan FLUENT programında yazılmış olup sonuçlar literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır.

Sharma, Maddirala ve Kumar (2018), ADV verilerindeki aykırı değerleri atmak için kullanılan tekil spektrum analizi üzerinde değişiklikler yapmışlar ve kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Yeni yöntemi test etmek amacı ile literatürde elde edilmiş yüksek seviyede aykırı veriye sahip ADV ölçümleri kullanılmıştır. Geliştirilen model mevcut olan ADV aykırı veri atma yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Yeganeh ve Heidari (2020), entropi teorisi üzerine bir model oluşturarak açık kanaldaki hız dağılımını ve debiyi hesaplayan bir model ortaya koymayı hedeflemişlerdir. Model iki farklı derinlikteki hız verisinin ölçümüne dayanmaktadır. Yazarlar oluşturdukları modeli, literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen deneysel verileri kullanarak denemişlerdir. Çalışmanın sonucunda modeldeki ampirik katsayılar için optimize değerler önerilmiştir.

### 1.3 Teorik Bakış

Açık kanal akımlarında hız değeri derinlik boyunca değişmektedir (Şekil 1.1). Şekil 1.1'den de görüldüğü üzere kanal tabanında hız sıfır olup maksimum hız değeri, serbest sıvı yüzeyinden yaklaşık olarak  $0,05h$  kadar aşağıda oluşmaktadır. Ortalama hız ise sıvı yüzeyinden  $0,6h$  kadar aşağıda veya  $0,2h$  ile  $0,8h$  değerindeki hızların ortalaması olarak alınabilmektedir. Maksimum hız değerinin serbest sıvı yüzeyinde oluşmama nedeni serbest sıvı yüzeyi ile hava arasındaki sürtünmedir.



Şekil 1.1 Açık kanal düşey hız profili

Açık kanalda düşey kesit boyunca oluşacak olan hız profilinin belirlenmesi amacı ile farklı çalışmalar yapılmış olup farklı formüller önerilmiştir.

Prandtl (1925), hız profilini belirlemek amacıyla aşağıda verilen Üssel Yasa (Power Law) formülünü önermiştir.

$$\frac{u(y)}{u_{max}} = \left(\frac{y}{h}\right)^{1/N} \quad (1.1)$$

burada  $h$ ; toplam su derinliği,  $u_{max}$ ; düşey kesit boyunca oluşan maksimum hız değeri,  $y$ ; herhangi bir noktanın kanal tabanına olan mesafesi ve  $u(y)$ ; kanal tabanından  $y$  kadar uzaklıkta yer alan noktada oluşan akım hızıdır.  $N$ , açık kanalın pürüzlülüğü ve

enkesit şekline göre değişen bir katsayıdır. N katsayısı, 4 ile 12 değerleri arasında değişmekte olup literatürde yaygın olarak 6 veya 7 değerleri alınarak kullanılmaktadır.

Nikuradse (1933) hız dağılımı üzerine yaptığı deneysel çalışmalarda logaritmik hız dağılımı (logaritmik law) formülünü önermiştir.

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \left( \frac{yu_*}{\nu} \right) + D \quad (1.2)$$

Formül (2.2) de yer alan  $\nu$  ve  $u_*$  sırası ile akışkanın kinematik viskozitesi ile kayma hızını simgelemektedir.  $K$ , Van-Korman sabiti olup 0,41 olarak alınabilir.  $D$  ise akım şartlarına göre değişen integrasyon sabitidir.  $D$  katsayısının değeri, yapılan çeşitli deneysel çalışmalar ile ortaya konulmuş olup, 5 ile 8,5 değerleri arasında bir değer olarak kabul edilebilmektedir.

Bazin (1865), parabolik hız dağılımı yasasını deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki gibi önermiştir.

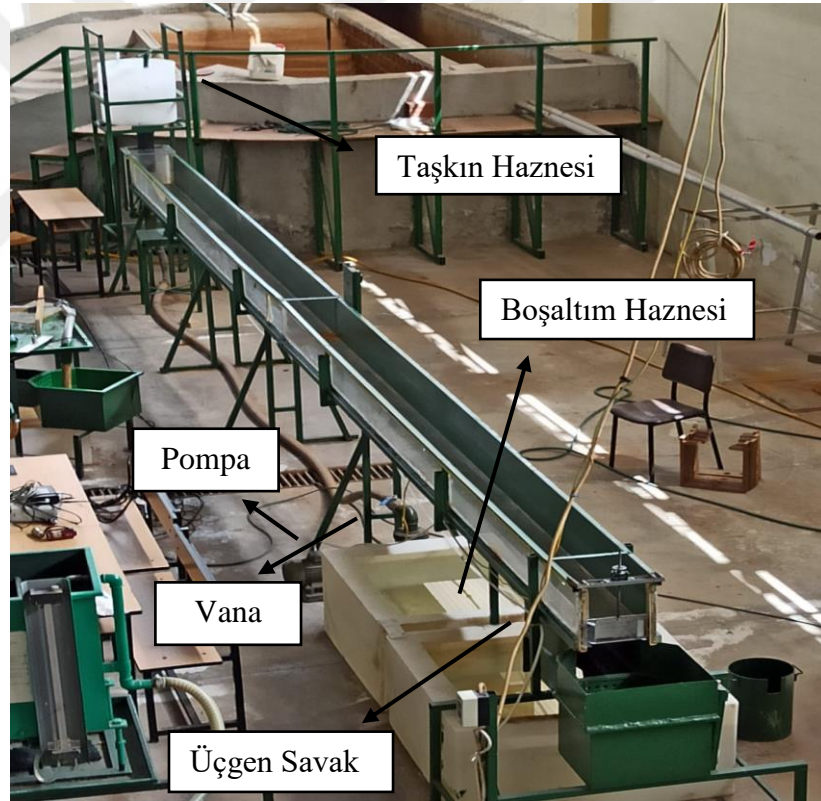
$$\frac{u_{max}-u(y)}{u_*} = C \left( 1 - \frac{y}{h} \right)^2 \quad (1.3)$$

Burada  $C$ ; akım şartlarına göre değişen deneysel bir katsayı olup 5 değerini alabileceği öngörülmüştür.

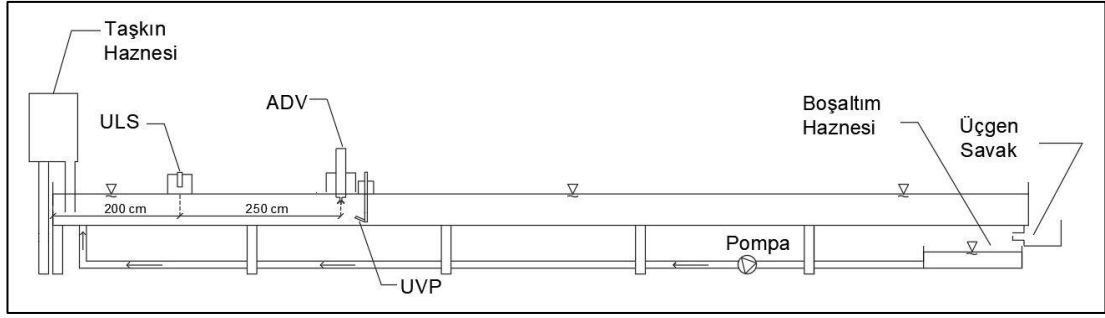
## BÖLÜM İKİ YÖNTEM VE GEREÇ

### 2.1 Deney Düzenegi

Bu tez kapsamında deneyler, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında yer alan açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Açık kanalın genel görüntüsü Şekil 2.1’de verilmektedir. Kanal, 25 cm genişliğinde, 27 cm yüksekliğinde ve 920 cm uzunluğundadır. Şekil 2.2’de deney düzeneginin şematik gösterimi verilmektedir. Heterojen bir enkesite sahip olan kanalın sağ cidarı pleksiglas, tabanı ve sol cidarı metal malzemeden yapılmıştır.



Şekil 2.1 Deney düzenegi (Kişisel arşiv, 2020)



Şekil 2.2 Deney düzeneğinin şematik gösterimi

## 2.2 Ölçüm Cihazları

Deneysel süreçlerde akım hızlarını ölçmek amacıyla Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) ve Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) cihazları aynı anda kullanılmıştır. Deneysel süreçlerde, zamana bağlı su seviye ölçümleri ise Ultralab ULS cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.1 Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) Cihazı

Met-Flow firması tarafından üretilen UVP cihazı, Doppler teknolojisini kullanarak ses dalgaları yardımı ile akım hızlarını ölçmektedir. Düşey kesit boyunca hız verilerinin ölçümünü yapabilen UVP cihazı, hız profillerinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Cihaz, Şekil 2.3'te verilen ana kutu ve bu kutuya bağlanan algılayıcılardan oluşmaktadır. UVP algılayıcısı, hız verilerinin ölçüleceği akımla belirli bir açı yapacak şekilde yerleştirilmelidir. Hız verilerinin ölçülmesi planlanan akıma yerleştirilen algılayıcı, suya dayanıklı kablosu yardımı ile ana kutuya bağlanmaktadır. Ethernet kablosu ile bilgisayara bağlanan cihazın elde ettiği veriler, UVPOptekDbg yazılımı ile kaydedilir. UVP cihazına ait; standart, uzun mesafeli, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve yüksek basınca dayanıklı olmak üzere dört farklı algılayıcı tipi mevcuttur. Çalışma kapsamında standart tipte algılayıcı kullanılmıştır.



Şekil 2.3 Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) (Kişisel arşiv, 2020)

UVP cihazının; 0,5, 1, 2, 4 ve 8 MHz frekanslarına sahip beş farklı standart algılayıcısı mevcuttur. Bu algılayıcıların teknik özellikleri Tablo 2.1’de görülebilmektedir.

Tablo 2.1 Standart UVP algılayıcılarının teknik özellikleri

<b>Algılayıcı Frekansı (MHz)</b>	<b>Ölçülebilir Hız Aralığı (m/s)</b>	<b>Hız Çözünürlüğü (mm/s)</b>	<b>Ölçüm Mesafesi Aralığı (m)</b>
0,5	0,36 - 52	1,4 - 203	0,021 - 3
1	0,18 - 51	0,7 - 199	0,011 - 3
2	0,09 - 49	0,3 - 193	0,006 - 3
4	0,045 - 49	0,2 - 181	0,003 - 3
8	0,023 - 41	0,1 - 161	0,002 - 3

Tablodan da anlaşılacağı üzere, algılayıcı frekansı arttıkça maksimum ölçülebilen hız düşmekte, ancak ölçümün hassasiyeti artmaktadır. Çalışma kapsamında, deneylerde oluşabileceği öngörülen hızlar göz önüne alınmış ve cihazın 2 MHz frekansa sahip algılayıcısı kullanılmıştır.

### 2.2.2 Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), yüksek hassasiyete sahip, noktasal 3 boyutlu akım hızlarının ölçümünü gerçekleştiren bir cihazdır. Laboratuvarlar, nehirler, nehir ağızları ve okyanuslar dahil, birçok ortamda yapılan çalışmalarda akım hızlarını ölçmek için yararlanılan ADV, Akustik Doppler teknolojisini kullanır. ADV cihazının; 16, 10 ve 5 MHz değerlerinde akustik frekansa sahip, 3 farklı modeli bulunmaktadır. Bu modeller sırasıyla, MicroADV, ADV ve ADVOcean olarak adlandırılmaktadır. Cihazın kullanımına yönelik bazı özellikler, bu modeller arasında değişim göstermektedir. Modellerin özellikleri Tablo 2.2’de görülebilmektedir.

Tablo 2.2 ADV modellerinin teknik özellikleri

Parametre	16 MHz	10 MHz	5 MHz
Maksimum Örnekleme Oranı (Hz)	50	25	25
Örnekleme Hacmi (cm <sup>3</sup> )	0,09	0,25	2
Örnekleme Hacmine Uzaklık (cm)	5	5, 10	18
Ölçülebilir Hız Aralığı (cm/s)	0 - 250	0 - 250	0 - 250

Bu çalışmada 16 MHz frekansa sahip MicroADV modeli kullanılmıştır. MicroADV; sonda, sinyal koşullama modülü ve işlemci olmak üzere üç temel elemandan oluşur. Cihaz, sondasından 5 cm uzaklıktaki akım hızlarını ölçmektedir. Bu sebeple sondanın ucu, ölçüm sırasında ölçülmek istenen akım noktasından 5 cm yukarıya denk gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Sondanın yerleşimi konusunda dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise sondanın yönüdür. Sondanın ucundaki üç algılayıcı içerisinde kırmızı şeritle işaretlenmiş olan algılayıcı, ölçümün ana akım yönünü (+x) yönünü göstermektedir. Sonda, suya batırılabilir bir gövde ile kapatılmış

halde bulunan ve alçak gürültü algılayıcı elektroniklerini içeren koşullama modülüne bağlıdır. Koşullama modülü ve sonda; operasyon sırasında, 10 m uzunluğa sahip, suya batırılabilen bir kablo aracılığı ile işlemci modülüne bağlanır. Bir kablo ile bilgisayara bağlanan işlemci modülü, verileri işler ve bilgisayara aktarır. İşlenen veriler, HorizonADV ismine sahip bir yazılım aracılığı ile kaydedilir. Şekil 2.4'te bu çalışmada kullanılmış olan MicroADV cihazı görülebilmektedir.



Şekil 2.4 MicroADV cihazı (SonTek, 2007)

### 2.2.3 *UltraLab ULS*

Deneylerde belirlenen noktalarda zamana bağlı su seviye değişimleri, General Acoustics firmasına ait olan UltraLab ULS cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 2.5). Cihaz, verilerin işlendiği ana kutu ve bu kutuya bağlanan sensörlerden oluşur. Şekil 2.5'de görüldüğü üzere, ULS cihazının bu modeline aynı anda dört sensör bağlanabilmekte ve böylece aynı anda dört farklı noktada zamana bağlı su seviye ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir. Cihaz, ultrasonik mesafe ölçümü prensibine dayanmaktadır. Elde edilen veriler, UltraLab adlı yazılım aracılığı ile kaydedilir. ULS sensörleri, ölçüm yapabildikleri mesafe aralıklarına göre adlandırılır. USS325 (3 cm- 25 cm), USS635 (6 cm- 35 cm), USS20130 (20 cm- 130 cm) ve USS35340 (35 cm- 340 cm) olmak üzere dört farklı ULS sensör çeşidi vardır. Kararsız akım deneyleri

sırasında, taşkın haznesinde bir tane ve kanalda bir tane olmak üzere iki farklı ULS sensörü kullanılmıştır. Ölçülmesi planlanan su seviyelerinin sensörlerin yerleştirildiği noktadan uzaklıkları göz önüne alınarak, taşkın haznesinde USS20130, kanalda ise USS635 sensörlerinin kullanılmasına karar verilmiş ve bu sensörler aracılığı ile bu noktalardaki zamana bağlı su seviyesi değişimleri elde edilmiştir.



Şekil 2.5 Ultralab ULS (General Acoustics, 2007)

## 2.3 Gerçekleştirilen Deneyler

Deneyler hem kararlı hem de kararsız akım koşulları altında gerçekleştirilmiştir.

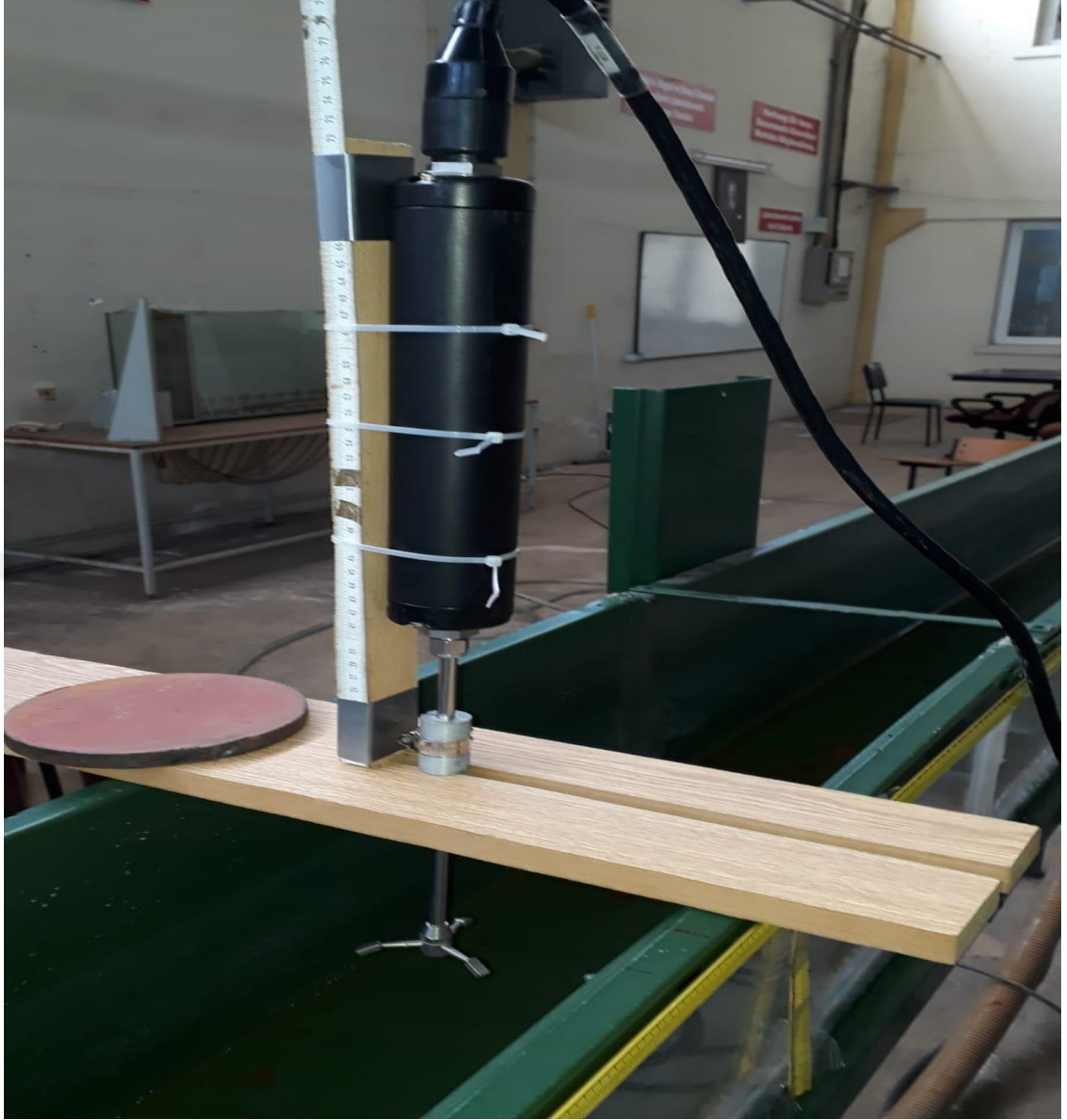
### 2.3.1 Kararlı Akım Deneyleri

Kararlı akım deneylerinde suyun kanalda yükselebilmesi için kanal mansabına bir eşik yerleştirilmiştir. Debi ölçümleri deney düzeneğinde mevcut olan üçgen savak yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Üçgen savak debi katsayısı deneyler öncesinde kalibre edilmiştir. Üçgen savak debi formülü:

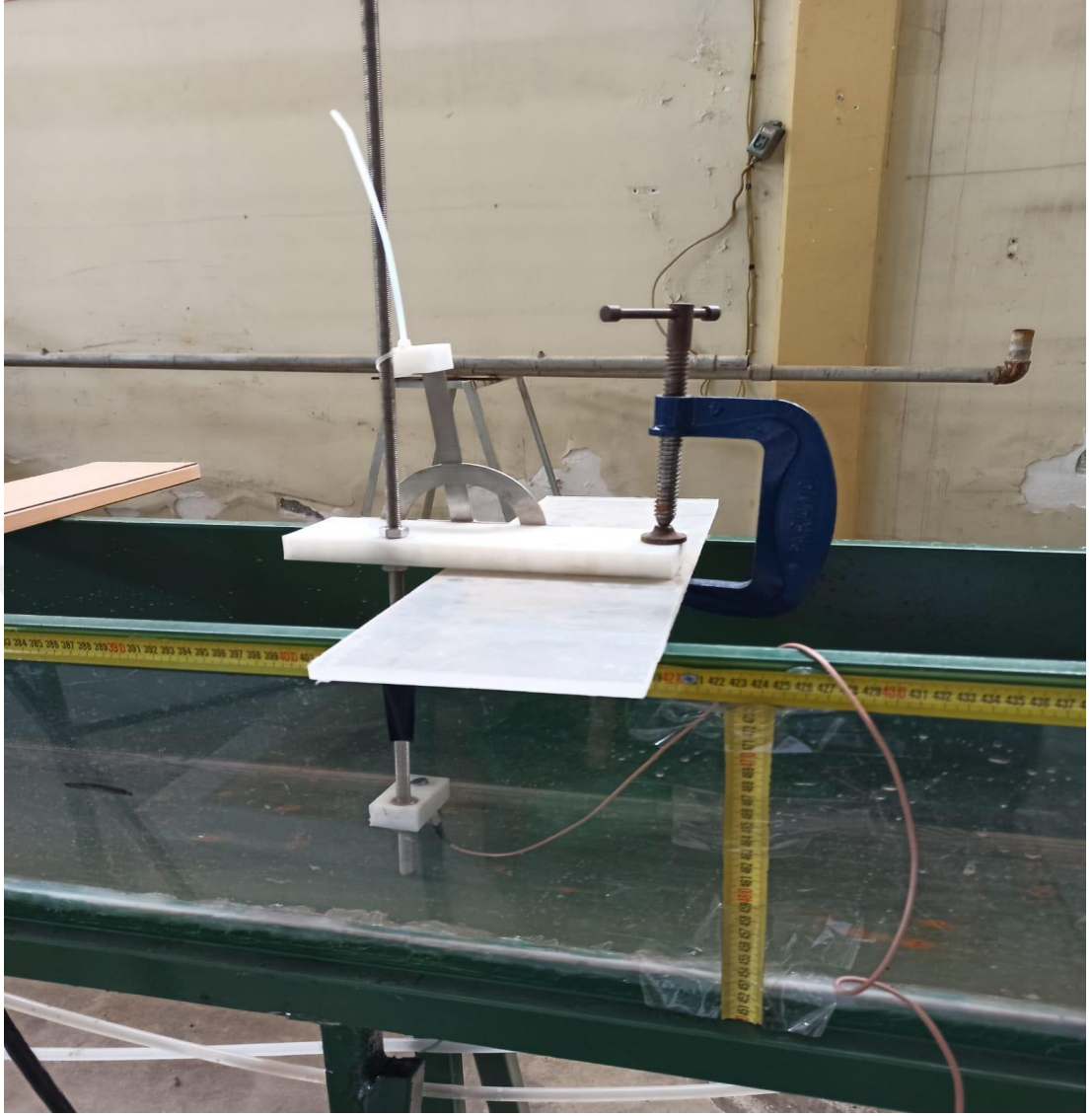
$$Q = K \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (2.1)$$

olup burada  $K$  debi katsayısı,  $h$  ise savak yüküdür. Debi katsayısı, deneyler öncesinde kalibre edilerek elde edilmiştir. Savak yükü ise savağa bağlı olan piyezometre tüpü kullanılarak belirlenmektedir. Kalibrasyon sonucunda  $K$  savak katsayısı 20,2 olarak belirlenmiştir. Savak yükü cm biriminde formüle konulduğunda debi değeri  $\text{cm}^3/\text{s}$  cinsinden elde edilmektedir.

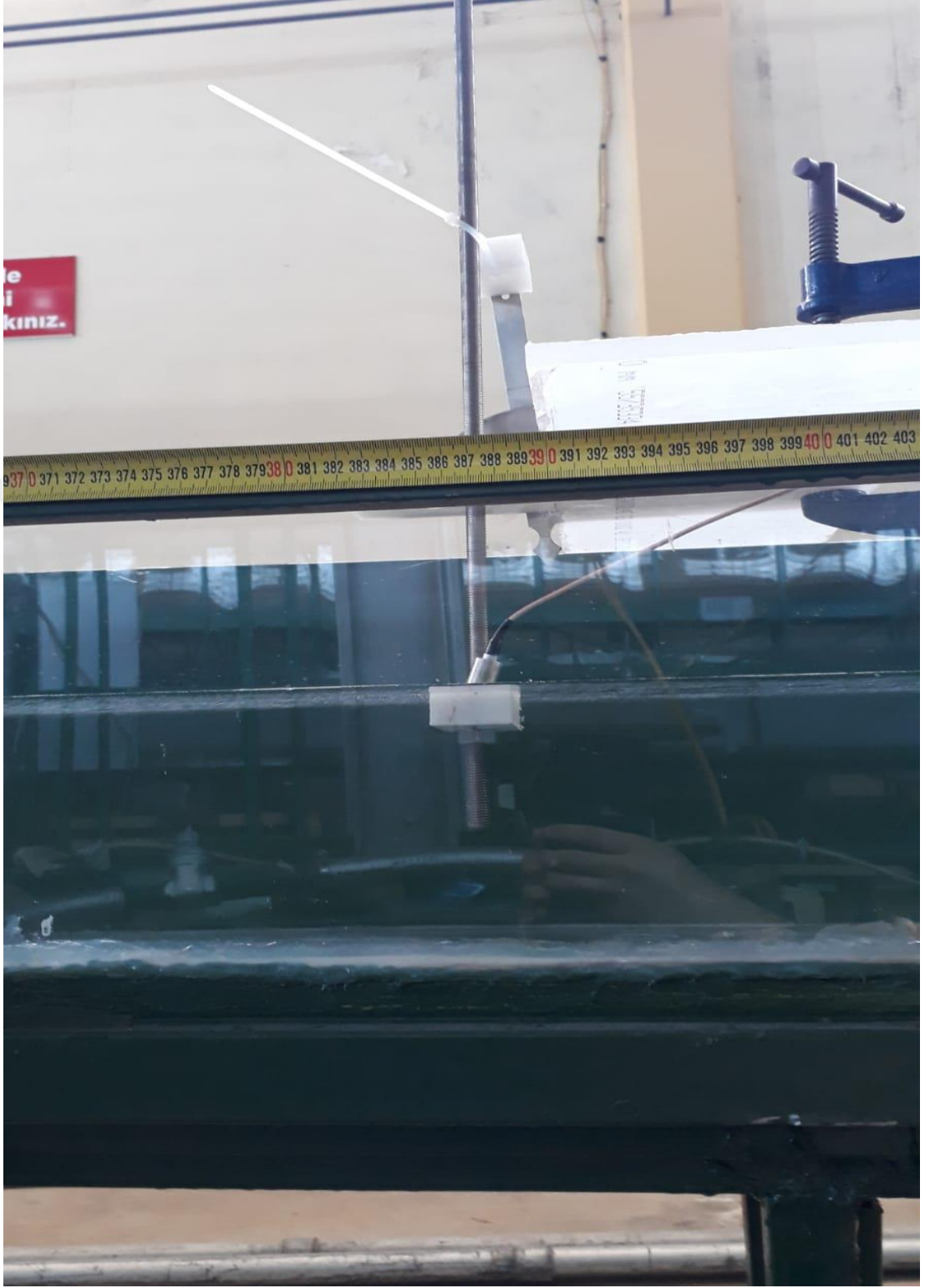
ADV ve UVP, kanala Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de görülen düzenekler yardımı ile ölçüm noktalarına yerleştirilmiştir. UVP cihazının yerleştirildiği düzenek, algılayıcının akıma 12 derecelik bir açı ile bakacak şekilde yerleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere UVP algılayıcısı kanal tabanına yerleştirilmiş olup ucu yukarı doğru bakmaktadır. K1, K2 ve K3 deneyleri bu şekilde gerçekleştirilmiş olup K4 ve K5 deneylerinde ise kanal tabanına yakın bölgede hızları ölçmek amacıyla UVP algılayıcısı serbest su seviyesinde ve ucu kanal tabanına bakacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.8). Bölüm 2.2’de belirtildiği üzere, ADV cihazı, sondasından 5 cm uzaklıktaki noktada oluşan akım hızlarını ölçmektedir. UVP cihazı ise düşey profil boyunca hız değerlerini ölçmekte olup profil içerisinde yer alan herhangi bir noktada akım hızı değerleri belirlenebilmektedir. Deneylerde cihazlar aralarında 7 cm olacak şekilde yerleştirilmiş olup noktasal hızları karşılaştırmak amacıyla UVP verilerinde, algılayıcıdan 2 cm uzaklıktaki noktaya ait ölçümler dikkate alınmıştır. Ölçüm noktasının şematik gösterimi Şekil 2.9’da verilmiştir.



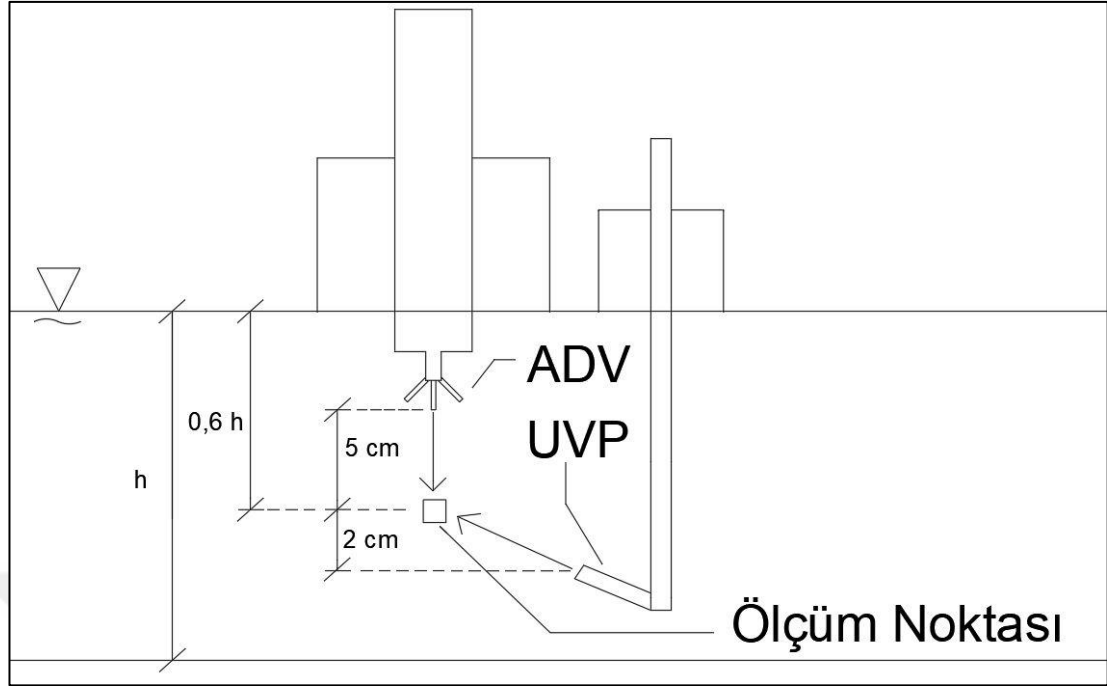
Şekil 2.6 ADV cihazının yerleşimi (Kişisel arşiv, 2020)



Şekil 2.7 UVP cihazının yerleşimi (Kişisel arşiv, 2020)



Şekil 2.8 UVP cihazının serbest su seviyesinden kanal tabanına bakacak şekilde yerleşimi (Kişisel arşiv, 2020)



Şekil 2.9 Ölçüm noktasının şematik gösterimi

Kararlı akım durumunda gerçekleştirilen deney özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Kararlı akım deneylerinin özellikleri

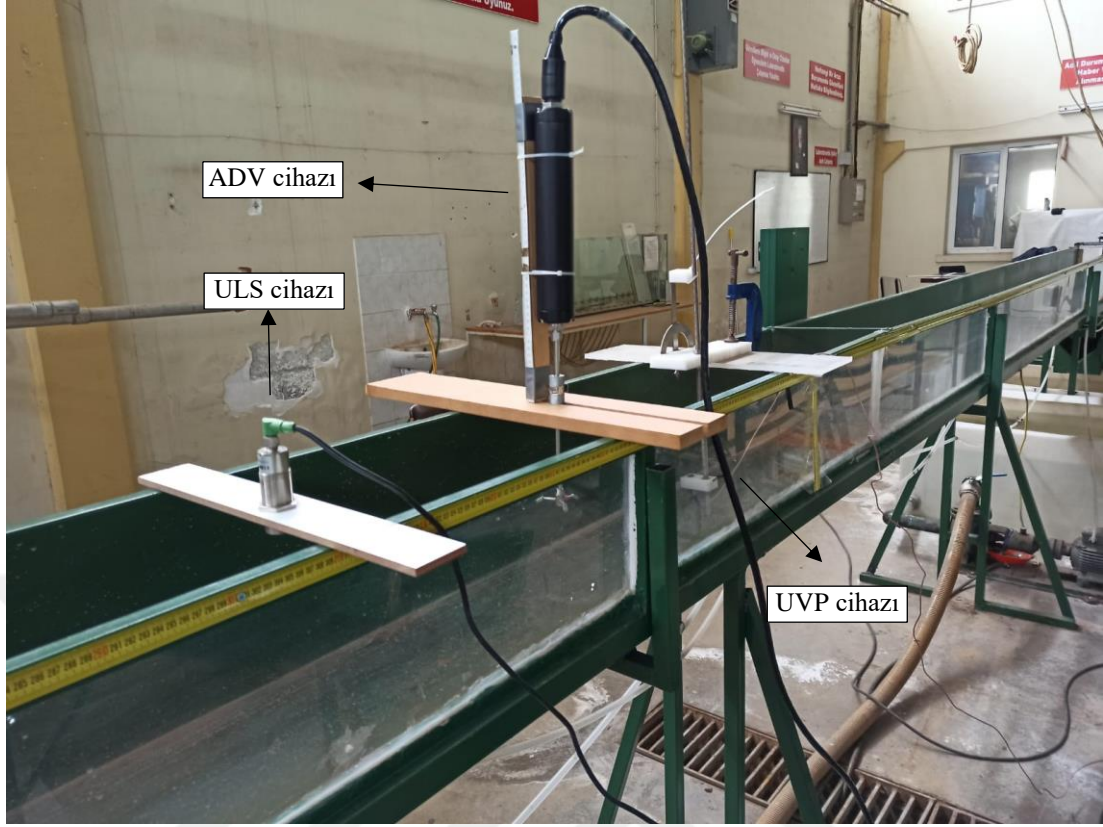
Deney	Su Derinliği (cm)	Debi (cm <sup>3</sup> /s)	UVP algılayıcısının yönü	Kesitsel Ortalama Hız (cm/s)
K1	13,5	1781	Yukarı	5,28
K2	13,8	2012	Yukarı	5,83
K3	14,3	2175	Yukarı	6,09
K4	14,3	2175	Aşağı	6,09
K5	14,5	2809	Aşağı	7,75

Kararlı akım deneylerinde farklı debi değerleri, pompa çıkışında bulunan ayar vanası yardımıyla elde edilmiştir. Pompa çalıştırıldıktan sonra akımın tamamen kararlı hale gelmesi beklenmiş ve ölçümler daha sonra başlatılmıştır. Kararlı akım deneylerinde kanal içerisindeki akım derinliği hem limnometre hem de ULS cihazı kullanılarak ölçülmüş olup ULS cihazının da doğru ölçüm aldığından emin

olunmuştur. Bu derinlik yardımıyla hesaplanan akım alanı ve üçgen savak ile belirlenen debi değeri süreklilik denkleminde yerine konularak kesitsel ortalama hız değeri hesaplanmıştır. Deneyle sırasında hız değeri hem UVP hem de micro ADV cihazlarıyla da ölçülmüştür. UVP cihazı aracılığı ile elde edilen düşey hız profil değeri literatürde yer alan formüller sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

### **2.3.2 Kararsız Akım Deneyleri**

Kararsız akım deneyleri, kanal membasında yer alan taşkın haznesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2). Taşkın haznesinin tabanında bir orifis mevcut olup deneyler sırasında orifisin tıpası açılarak haznedeki suyun kanal içerisine boşalımı sağlanmaktadır. Deneyler, farklı taşkın hazne seviyeleri için gerçekleştirilmiştir. Taşkın hidrografını belirleyebilmek amacıyla deneyler sırasında taşkın haznesindeki zamana bağlı su seviyesi, ULS algılayıcısı yardımıyla ölçülmüştür. Kanal içerisindeki zamana bağlı derinlikler ise ikinci bir ULS algılayıcısı kullanılarak eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Akım hızları ise yine hem UVP hem de ADV cihazı ile ölçülmüştür. Kararsız akım deneyleri sırasında cihazların kanala yerleşimi Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10 Kararsız akım deneylerinde cihazların kanala yerleşimi (Kişisel arşiv, 2020)

Kararsız akım durumunda gerçekleştirilen deney özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4 Kararsız akım deneylerinin özellikleri

Deney	Taşkın Haznesi Su Derinliği (cm)	Taşkın Hidrografi Pik Debi (cm <sup>3</sup> /s)	Taşkın Dalgası Yüksekliği (cm)
T1	20	16845	3,5
T2	25	20854	4
T3	30	22859	4,4
T4	40	28874	5,5

Kararsız akım deneylerinde ilk olarak kanala bir taban akımı verilmiştir. Daha sonra taşkın haznesinin tabanında bulunan orifis açılarak kanalda bir taşkın dalgası oluşturulmuştur. Hazneye yerleştirilen ULS sensöründen elde edilen zamana bağlı su

seviyesi değerleri kullanılarak haznedeki su hacminin zamana bağlı değişimi hesaplanmıştır. Bu veriler aracılığı ile taşkın hidrografları elde edilmiştir. Kararlı akım deneylerinde olduğu gibi cihazlardan elde edilen hız ölçümleri kendi aralarında karşılaştırılmıştır.



## BÖLÜM ÜÇ

### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 3.1 Kararlı Akım Deneyleri

##### 3.1.1 Zamana Bağlı Noktasal Hız Ölçümleri

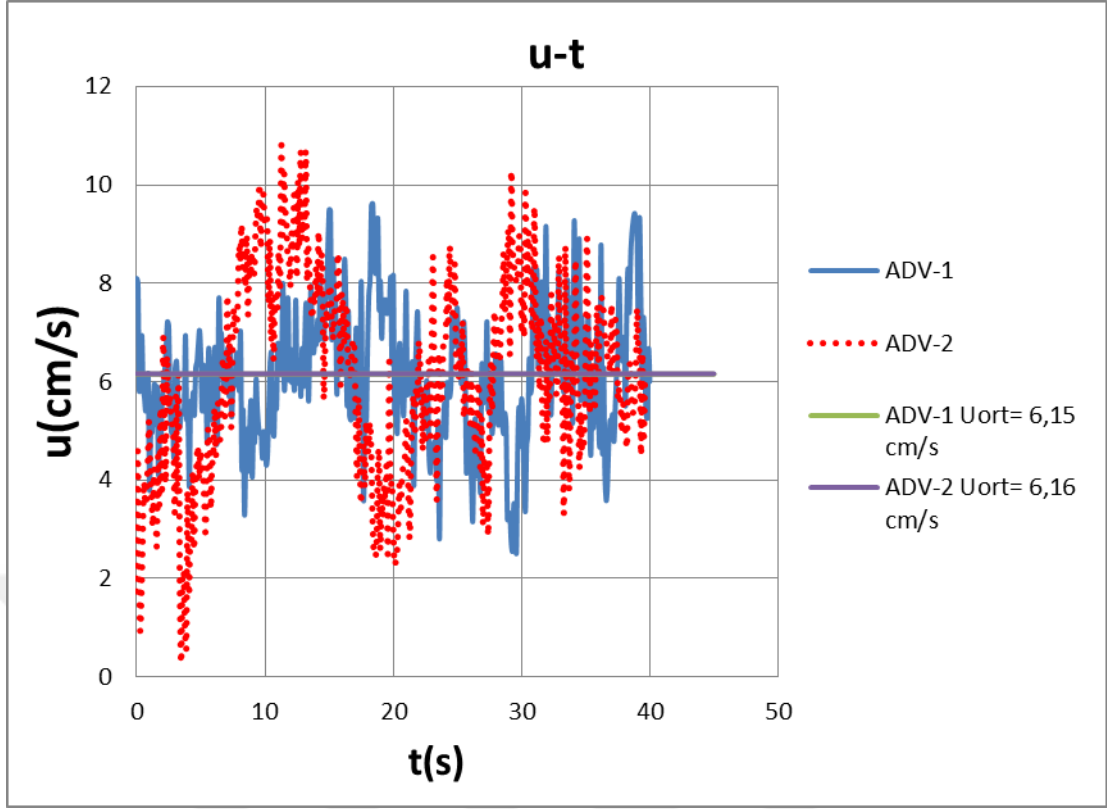
Tablo 2.3'te verildiği üzere, 4 farklı debi değeri kullanılarak 5 adet kararlı akım deneyi gerçekleştirilmiştir. ADV ve UVP cihazlarıyla elde edilen hız ölçüm değerlerinde mevcut olabilecek aykırı verileri ayıklamak amacıyla MATLAB programında mevcut olan “rmoutliers” fonksiyonunun medyan yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde MATLAB programı, verilerin ölçekli medyan mutlak sapmasını hesaplamakta, ve hesaplanan bu değer üç katından fazla değere sahip verileri tespit ederek atmaktadır. Ölçekli medyan mutlak sapması, 3.1 ve 3.2 formülleri aracılığı ile hesaplanmaktadır.

$$MAD = \text{medyan}(|x_i - \text{medyan}(x)|) \quad (3.1)$$

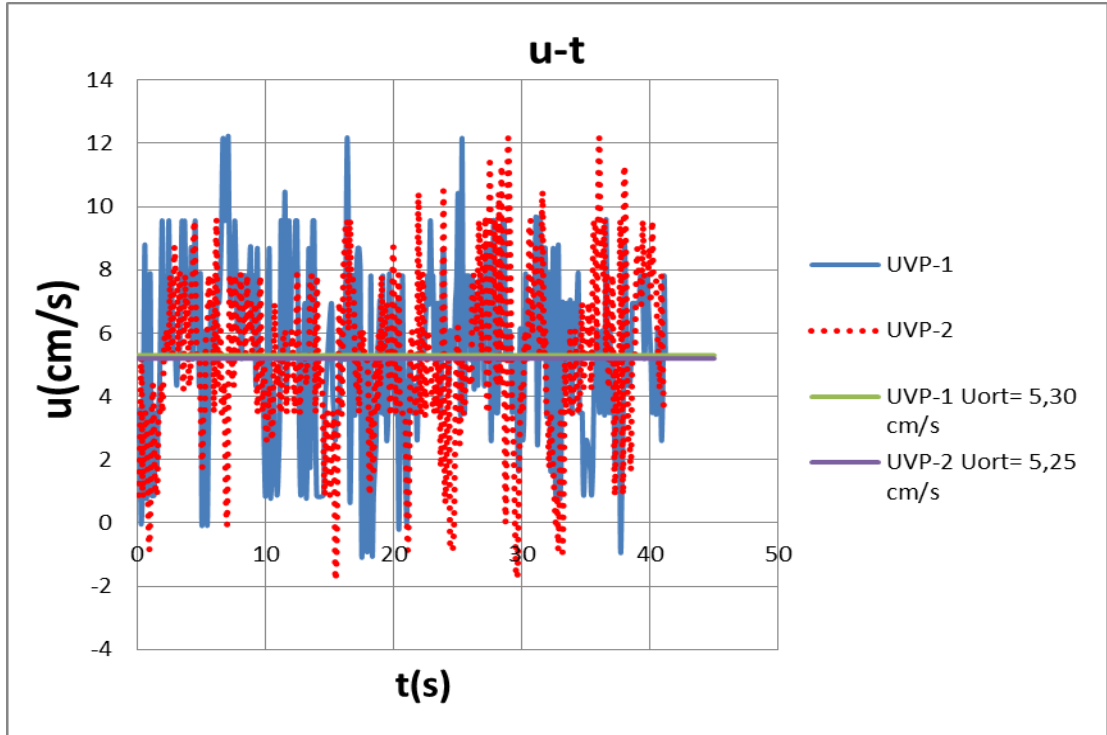
$$MADN = MAD / 0,6745 \quad (3.2)$$

Formüllerde yer alan MAD ve MADN; sırası ile medyan mutlak sapması ve ölçekli medyan mutlak sapmasını simgelemektedir. “x” veri setini temsil etmekte olup,  $x_i$  o veri setinde yer alan her bir değişkeni göstermektedir. Medyan ise bir veri setinin küçükten büyüğe doğru sıralanmış halinde ortada kalan sayı olarak tanımlanmaktadır.

Her bir deney en az iki kere tekrarlanmış olup deney sonuçlarının doğruluğundan emin olunmuştur. Şekil 3.1 ve 3.2’de K1 nolu deneye ait ADV ve UVP ölçümlerinin tekrarlı deneyler için elde edilen hız-zaman serileri örnek olarak verilmektedir.



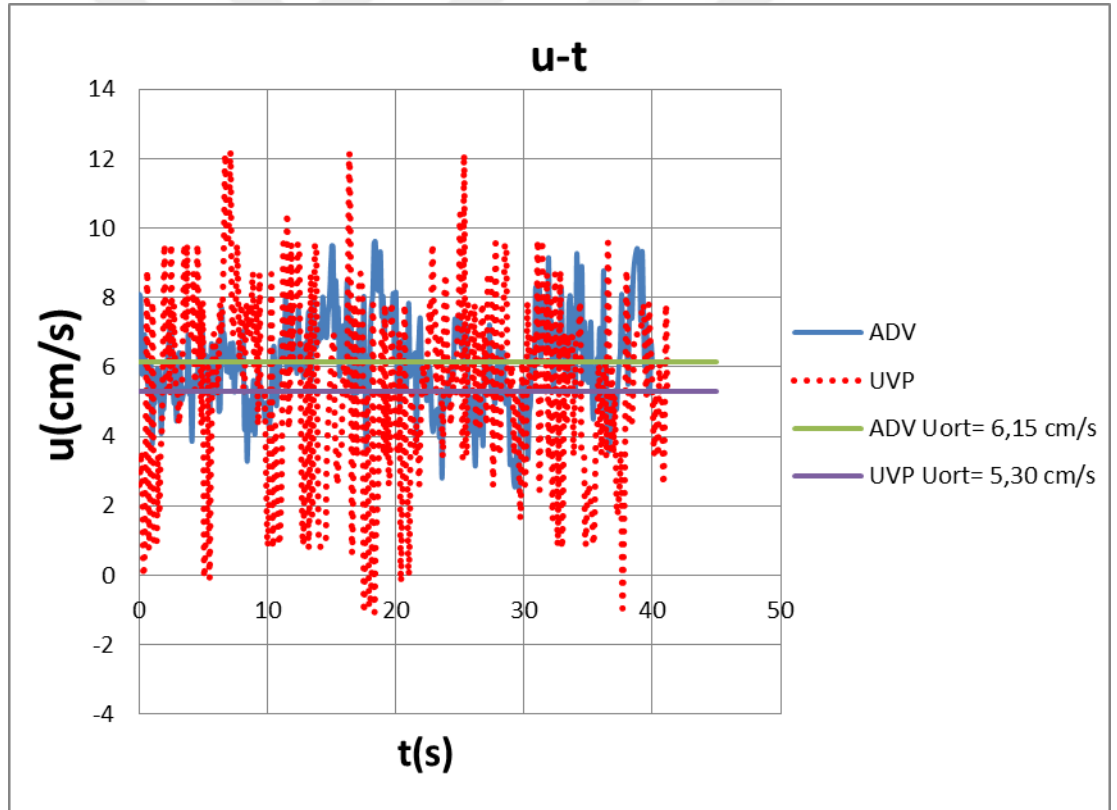
Şekil 3.1 K1 deneyi için ADV cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi



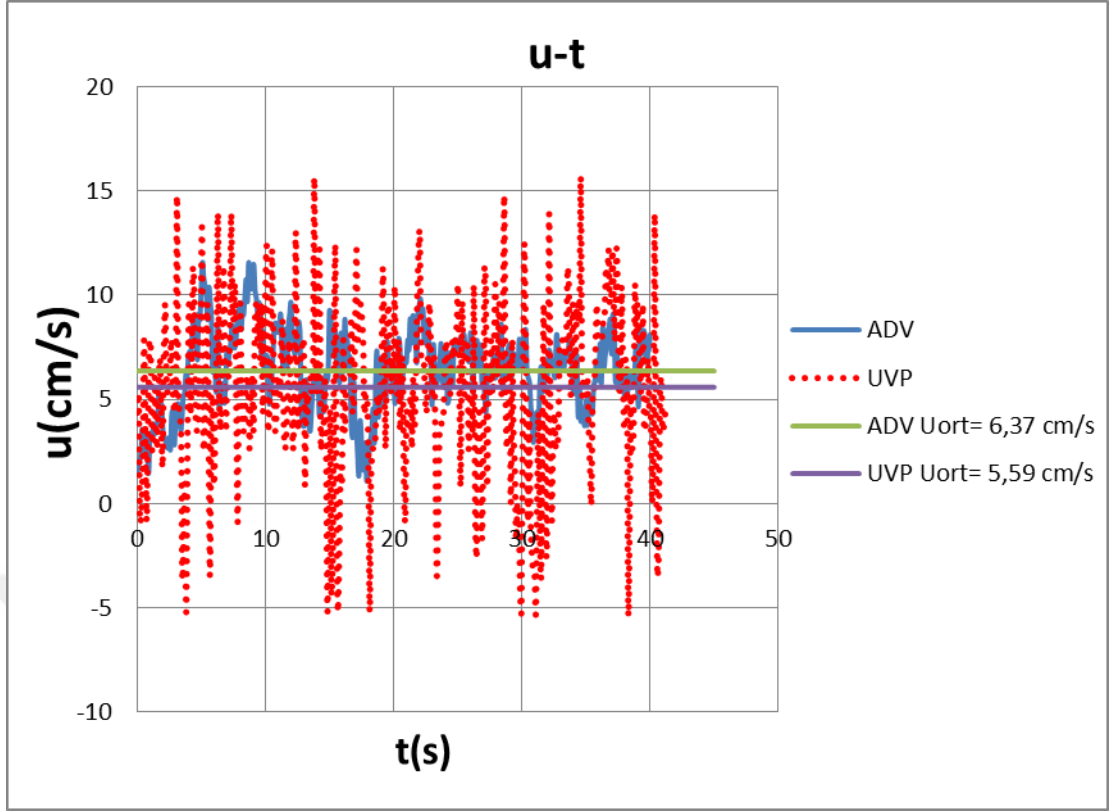
Şekil 3.2 K1 deneyi için UVP cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi

Tekrarlı deneylere ait grafiklerden de görüldüğü üzere, cihazlar aynı akım koşulları altında hemen hemen aynı sonuçları vermektedir. Akımın türbülanslı olması sebebiyle, akım yönü doğrultusunda elde edilen akım hızları belli bir ortalamanın etrafında salınmakta ve zamana bağlı hız değerlerinin ortalamaları göz önüne alındığında, cihazlardan elde edilen sonuçların kendi içerisinde tutarlı oldukları görülmektedir.

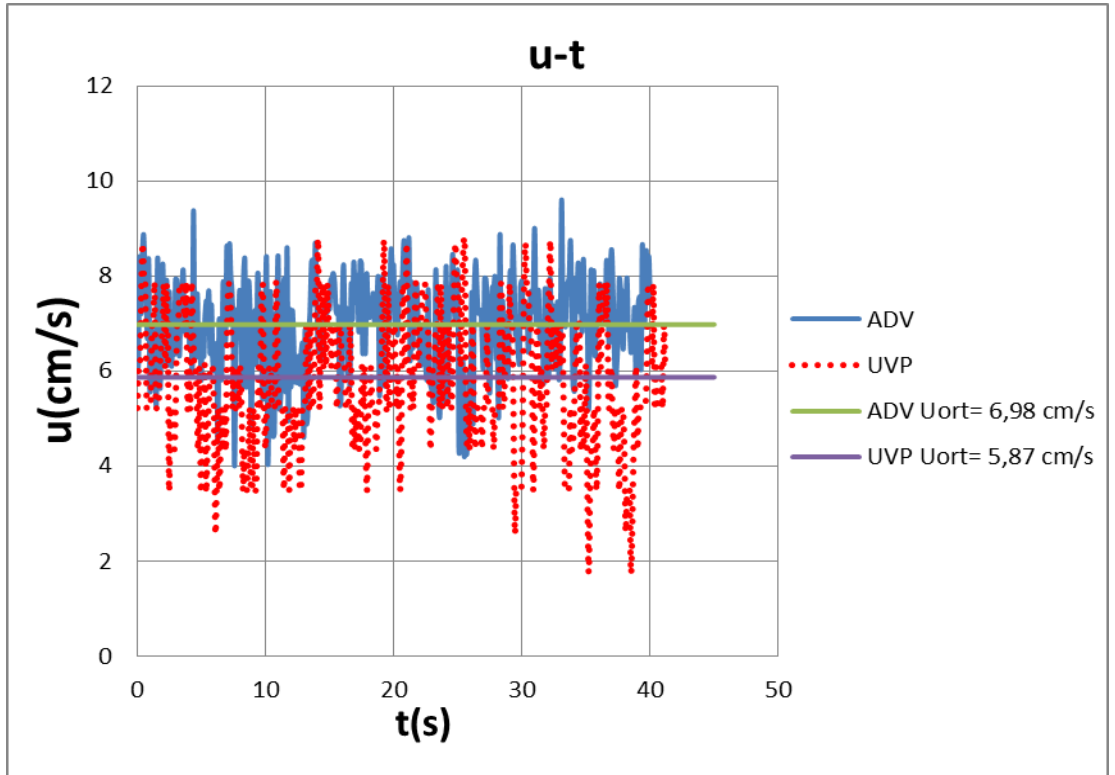
Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te K1, K2 ve K3 deneyleri sırasında hem ADV hem de UVP cihazları ile ölçülen zamana bağlı hız grafikleri verilmektedir. Deneylerde ADV ve UVP hız cihazları aracılığı ile ölçülen zamana bağlı hız değerlerinin ortalamaları alınarak, kararlı akımlara ait ortalama hız değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.3 K1 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi



Şekil 3.4 K2 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi



Şekil 3.5 K3 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi

Tablo 3.1’de K1, K2 ve K3 deneylerine ait ölçülen ve hesaplanan ortalama hız değerleri verilmektedir. Hesaplanan kesitsel ortalama hız değerleri  $Q=AV$  denklemi kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 3.1 Kararlı akım deneyleri akım hızları

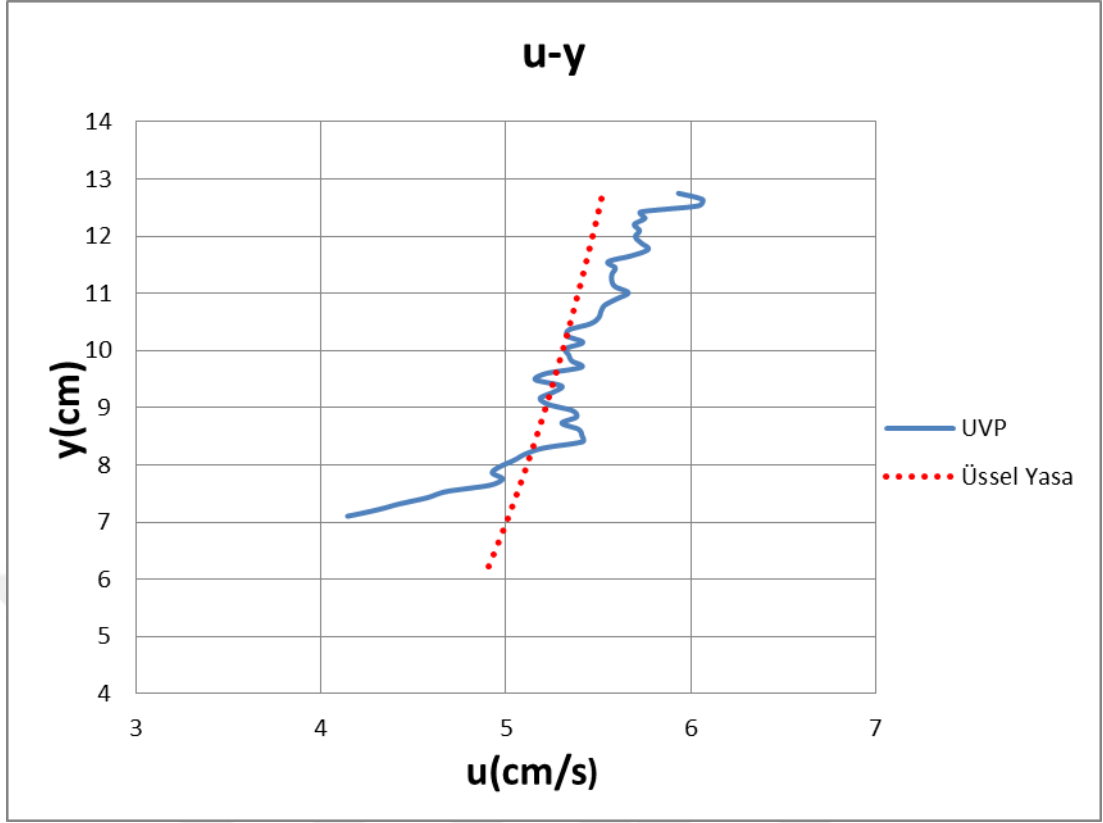
Deney No	ADV (cm/s)	UVP (cm/s)	HESAP (cm/s)
K1	6,15	5,30	5,28
K2	6,37	5,59	5,83
K3	6,98	5,87	6,09

Kararlı akım deneylerinden elde edilen hız-zaman serilerinden görülebileceği üzere, cihazlardan elde edilen ortalama akım hızları, birbirlerine yakın değerlerde olup süreklilik denklemi ile hesaplanan kesitsel ortalama hız değerleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere, UVP cihazından elde edilen akım hızları, ADV ölçümlerine kıyasla daha büyük salınımlar göstermektedir. Bunun sebeplerinden biri UVP cihazının membasında akım içerisinde yer alan ADV sondasının akımı etkilemesi olabilir.

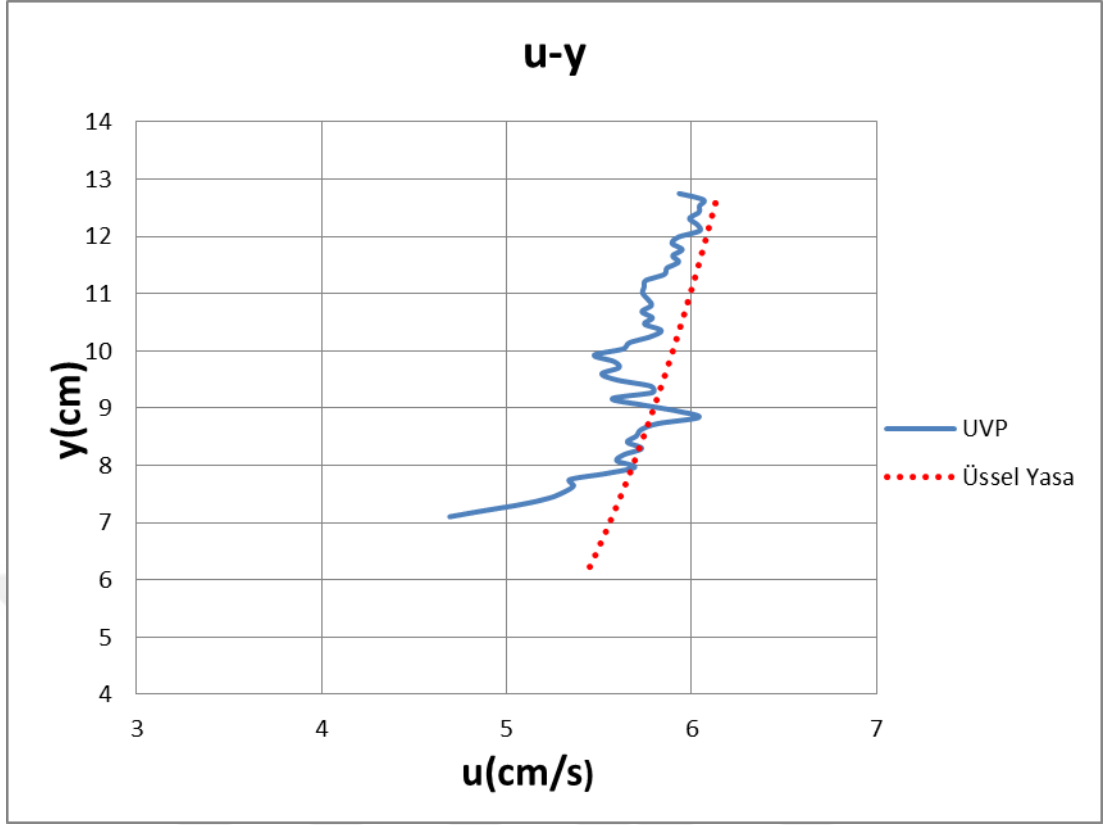
### 3.1.2 Düşey Kesit Boyunca Ölçülen Hız Profilleri

Kararlı akım deneyleri sırasında düşey kesit boyunca oluşan hız profilleri, UVP cihazı yardımı ile belirlenmiştir. Deneyler sonucu elde edilen veriler, literatürde açık kanal akımında oluşan hız profillerini belirlemek amacı ile önerilen formüllerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Üssel Yasa, Parabolik Yasa ve Logaritmik yasa formüllerinde yer alan ampirik katsayılar, K1, K2 ve K3 deneylerine ait sonuçlar kullanılarak optimize edilmiştir. N (Üssel Yasa), C (Parabolik Yasa) ve D (Logaritmik Yasa) katsayıları için sırasıyla 6, 4 ve 8,5 değerleri en uygun bulunmuştur.

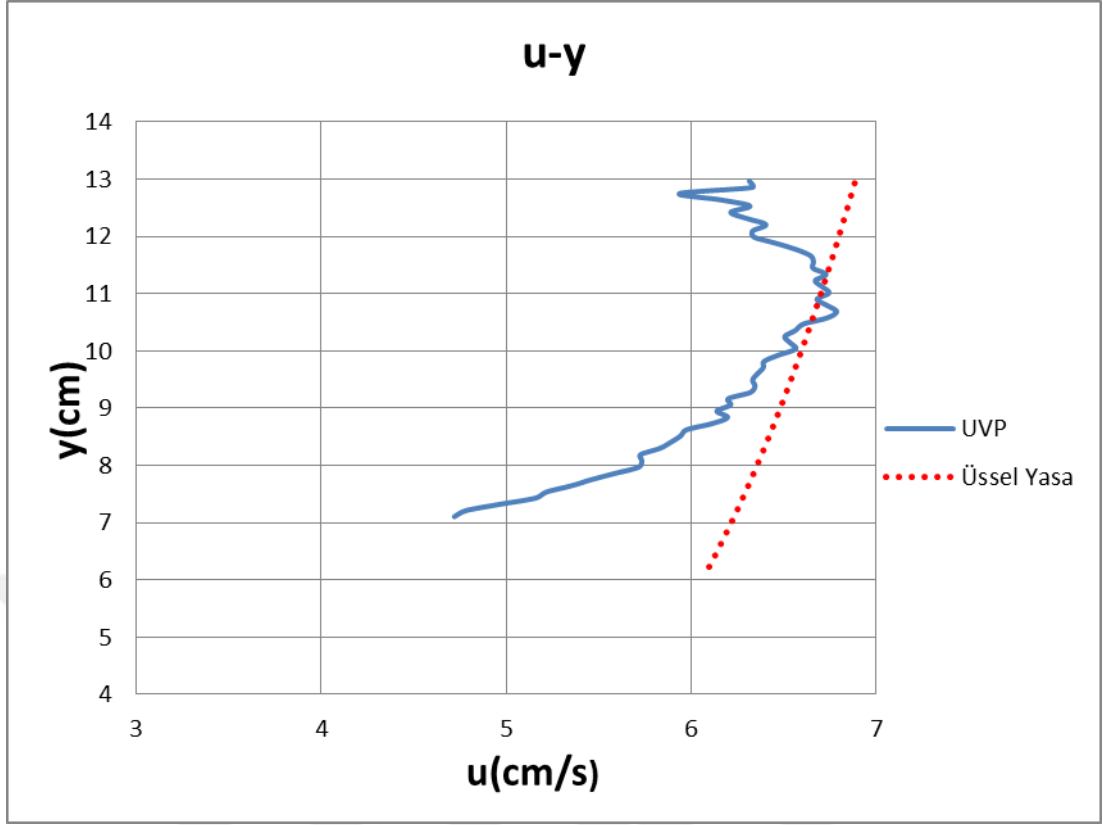
K1, K2 ve K3 deneylerinde oluşan düşey hız profillerinin, formüller aracılığı ile elde edilen hız profilleri ile karşılaştırmaları Şekil 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 ve Şekil 3.14’te verilmektedir.



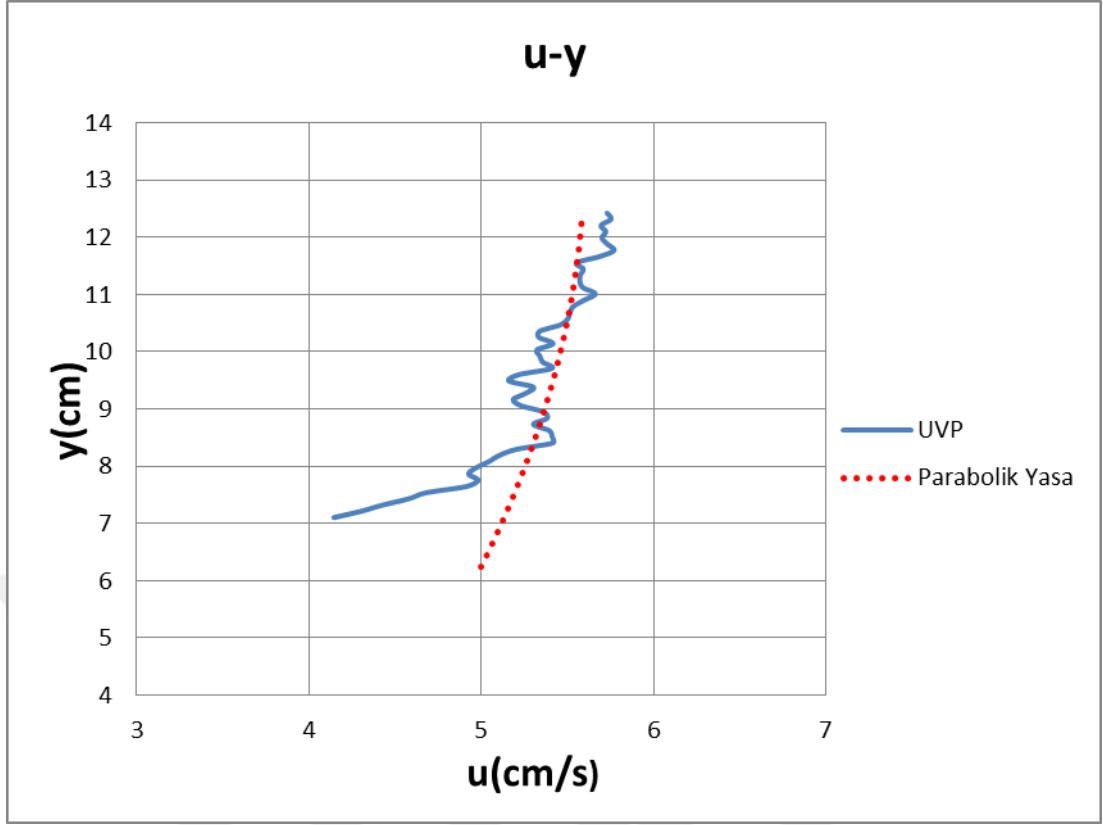
Şekil 3.6 K1 deneyi için elde edilen hız profili ile Üssel Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



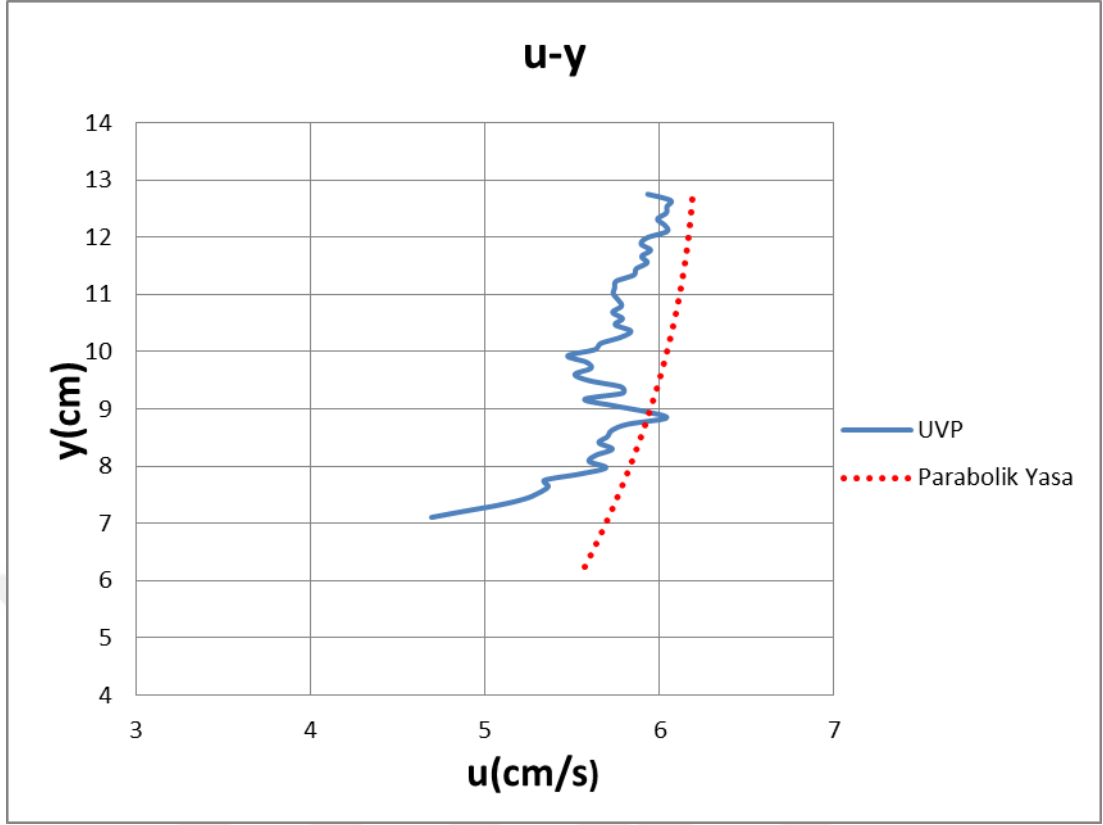
Şekil 3.7 K2 deneyi için elde edilen hız profili ile Üssel Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



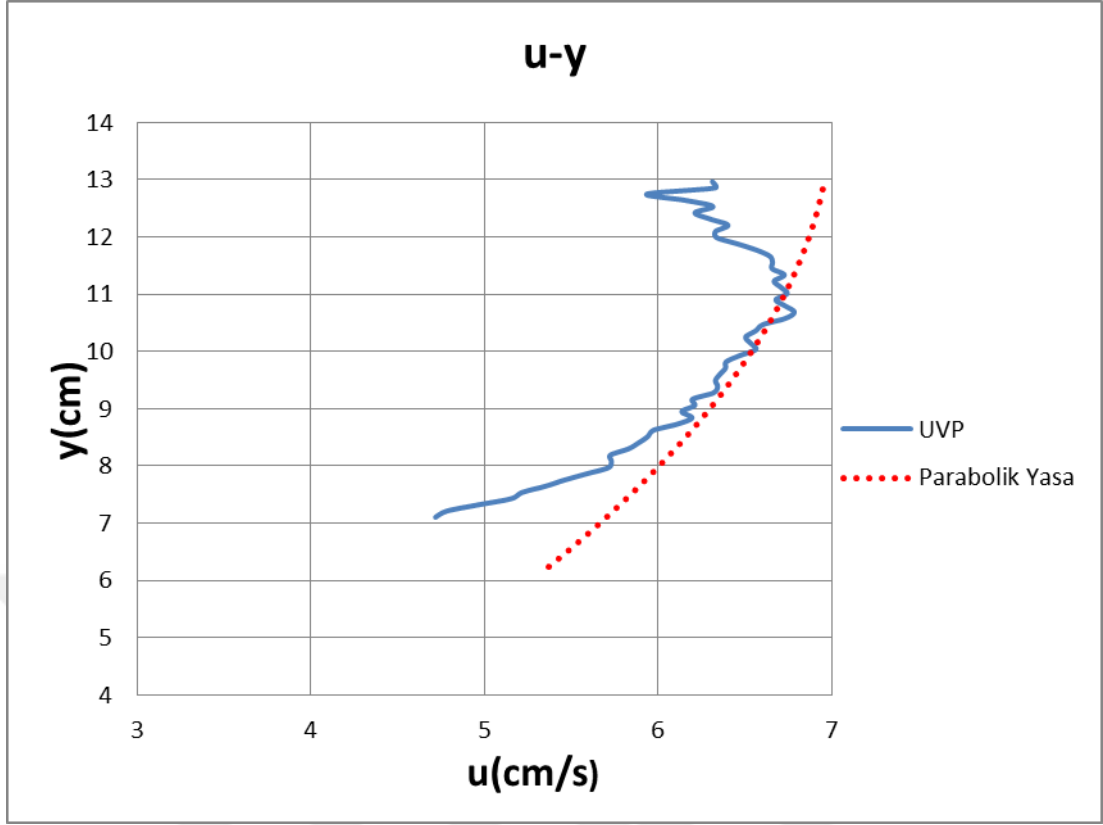
Şekil 3.8 K3 deneyi için elde edilen hız profili ile Üssel Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



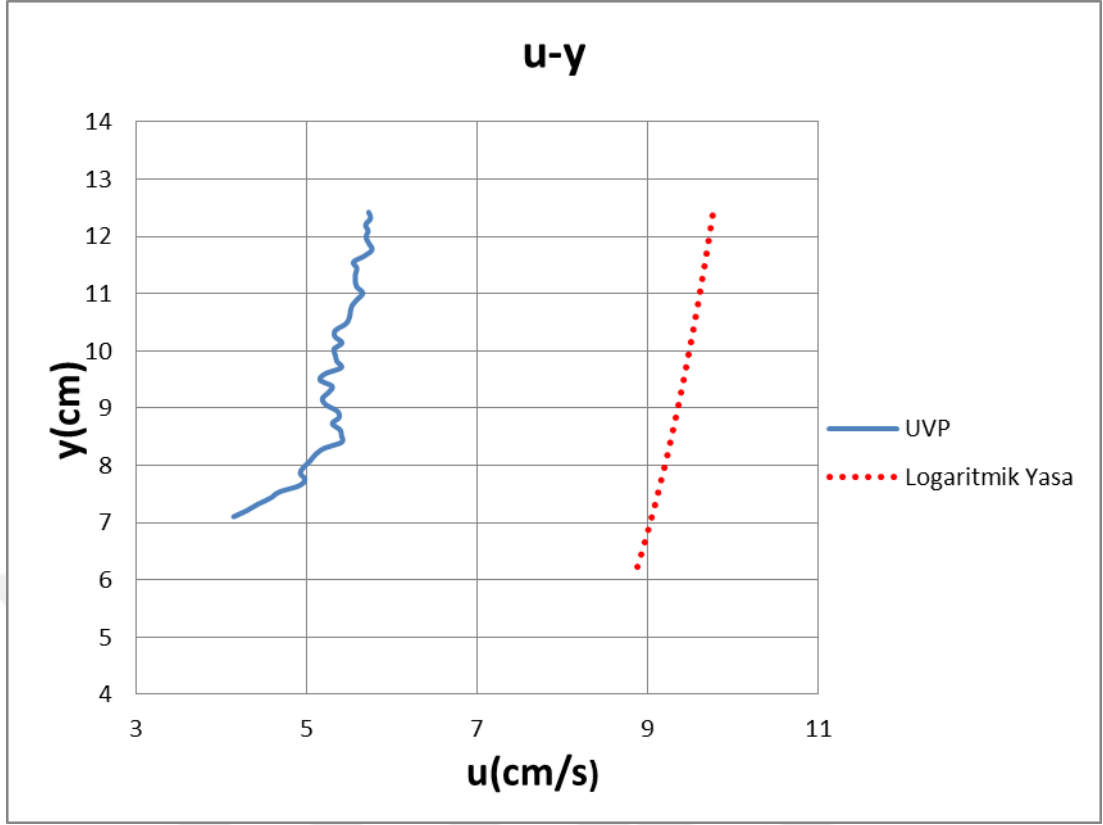
Şekil 3.9 K1 deneyi için elde edilen hız profili ile Parabolik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



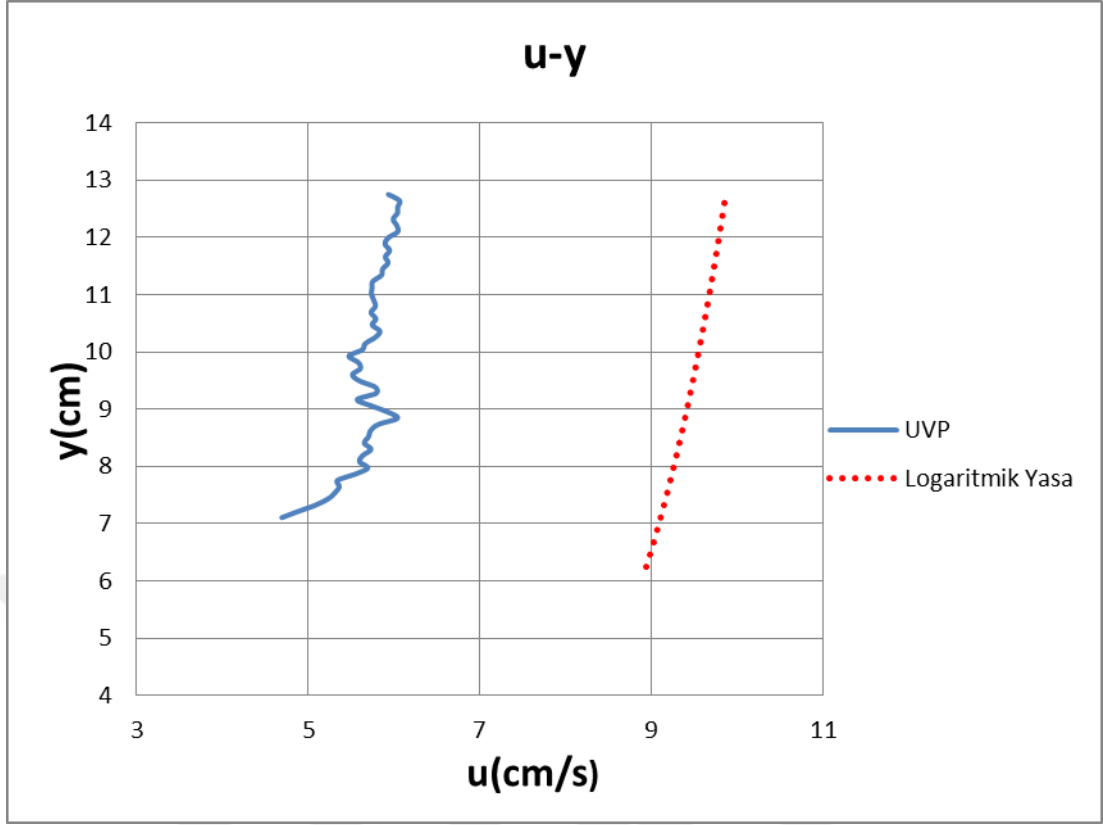
Şekil 3.10 K2 deneyi için elde edilen hız profili ile Parabolik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



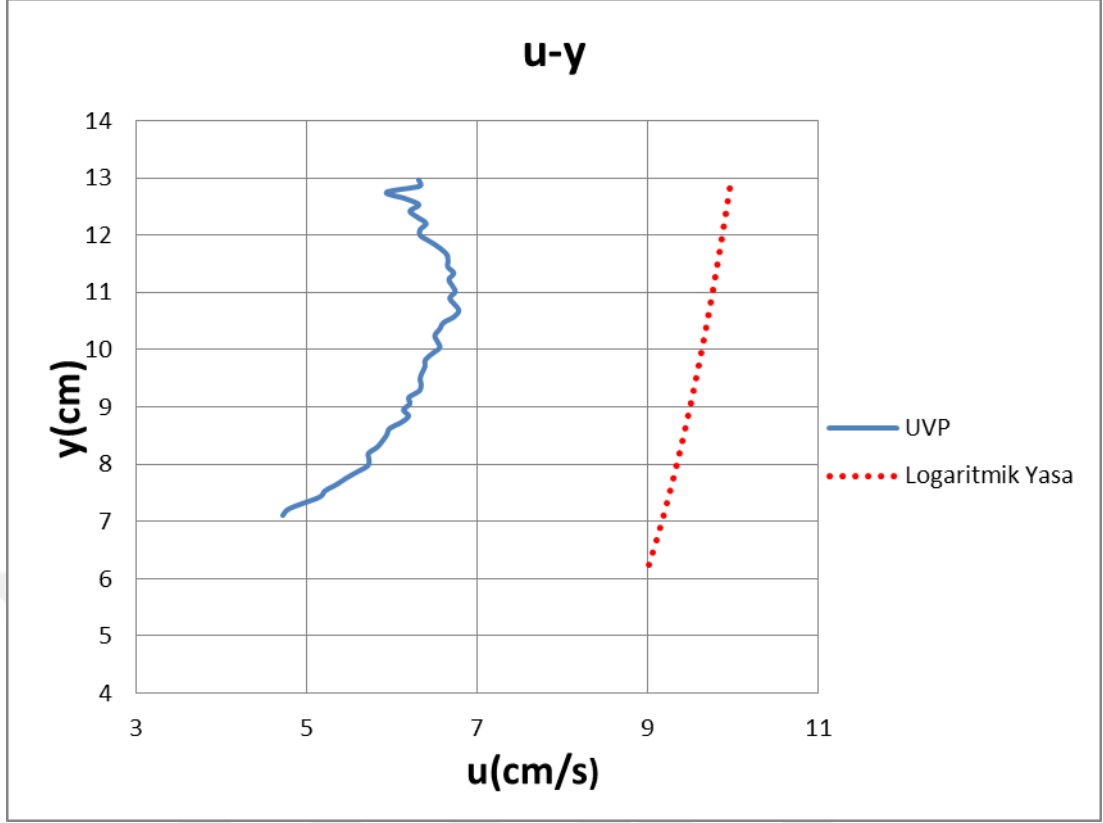
Şekil 3.11 K3 deneyi için elde edilen hız profili ile Parabolik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



Şekil 3.12 K1 deneyi için elde edilen hız profili ile Logaritmik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



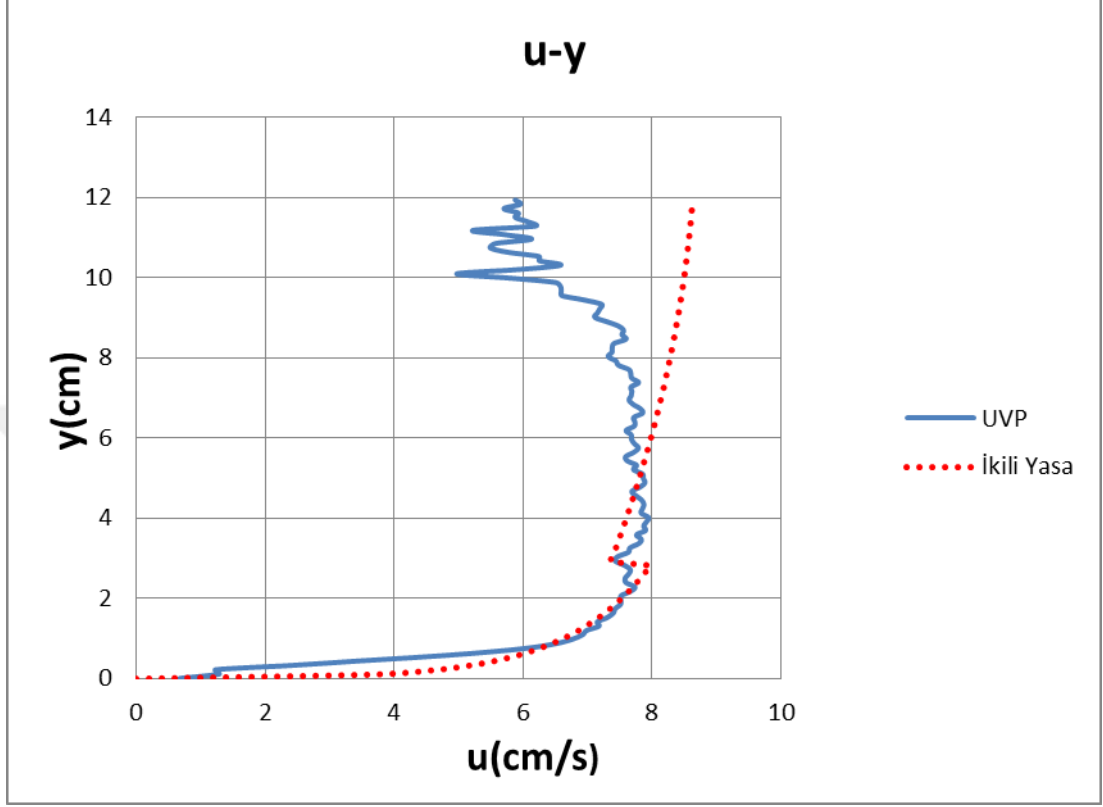
Şekil 3.13 K2 deneyi için elde edilen hız profili ile Logaritmik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili



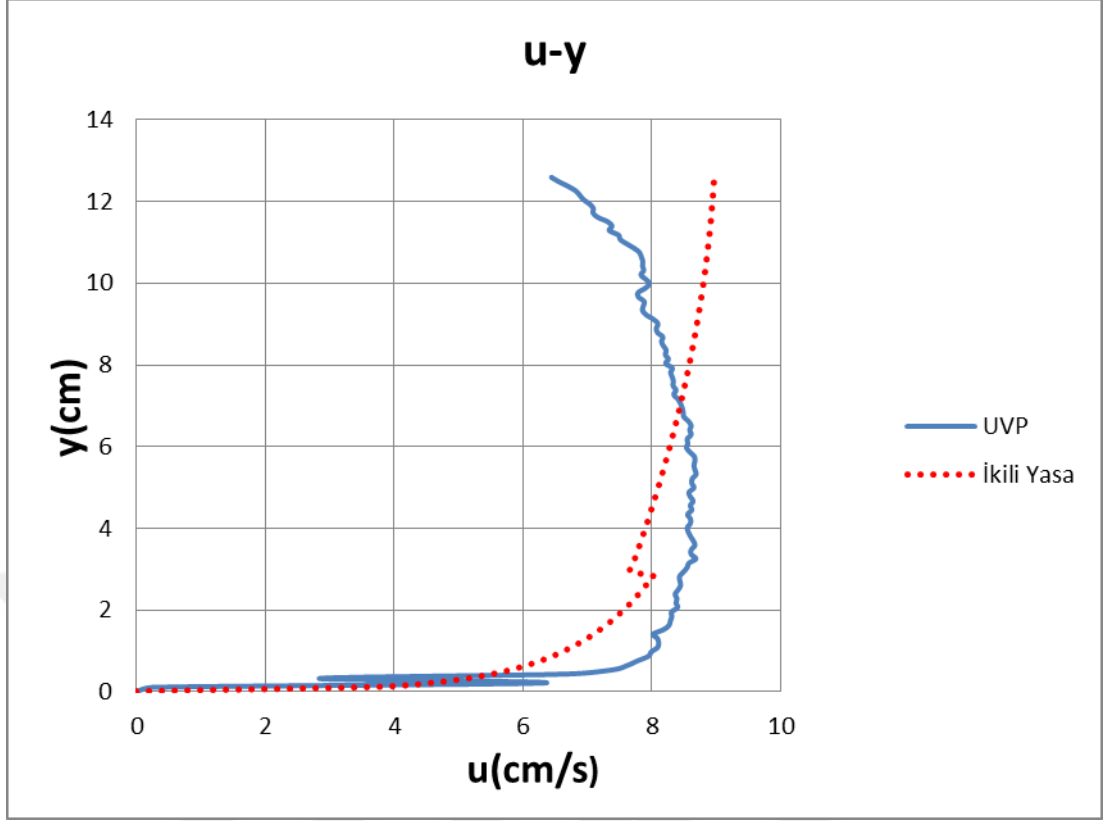
Şekil 3.14 K3 deneyi için elde edilen hız profili ile Logaritmik Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili

Yukarıda verilen düşey hız profili grafiklerinden de görülebileceği üzere Üssel ve Parabolik Yasa kullanılarak elde edilen profilleri deney sonuçlarıyla daha uyumlu olup Logaritmik yasa ile elde edilen hız profilleri deneysel verilerle uyuşmamaktadır. Bu uyuşmazlığın sebebi Logaritmik yasanın daha çok tabana yakın bölgelerde meydana gelen hız profilleri ile daha uyumlu olmasıdır. K1, K2 ve K3 nolu deneylerde UVP algılayıcısı kanal tabanından 5 cm yüksekliğe yerleştirilmiş olup kanal tabanından 0,2h yüksekliğe kadar olan kısmını temsil eden iç bölgede (inner region) oluşan düşey hız profili incelenememiştir. Düşey kesitte oluşan hız profilinin; iç bölgede Logaritmik, geriye kalan dış bölgede (outer region) ise Parabolik Yasa ile temsil edildiği ve Vedula ve Achanta (1985) tarafından önerilen İkili Yasa (Binary Law) kullanılarak elde edilen hız profilinin deney sonuçlarıyla uyumunu görmek amacıyla, K4 ve K5 deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında UVP algılayıcısı, serbest su seviyesi hizasında ve kanal tabanına bakacak şekilde yerleştirilmiş ve böylece düşey kesitin tamamında oluşan hız profili incelenebilmiştir. K4 ve K5 deneylerinden elde edilen

düŖey hız profillerinin, İkili Yasa ile elde edilen hız profilleri ile karşılaŖtırmaları Ŗekil 3.15 ve Ŗekil 3.16'da verilmiŖtir.



Ŗekil 3.15 K4 deneyi için elde edilen hız profili ile İkili Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili

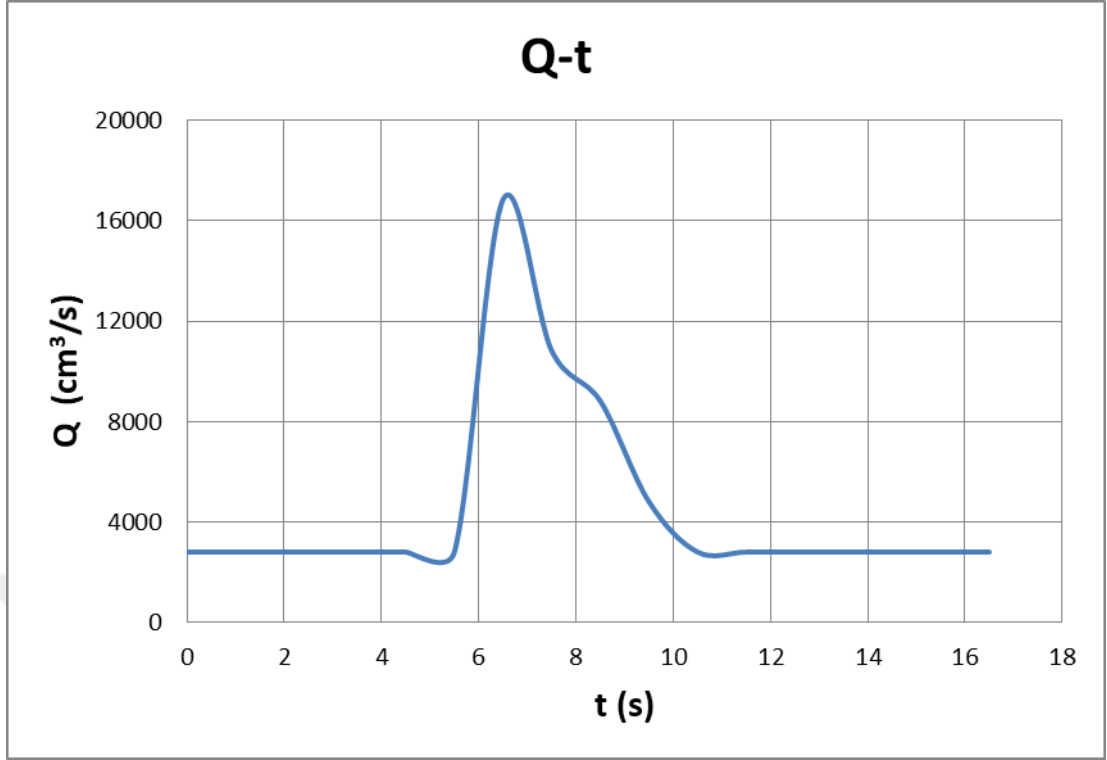


Şekil 3.16 K5 deneyi için elde edilen hız profili ile İkili Yasa kullanılarak hesaplanan hız profili

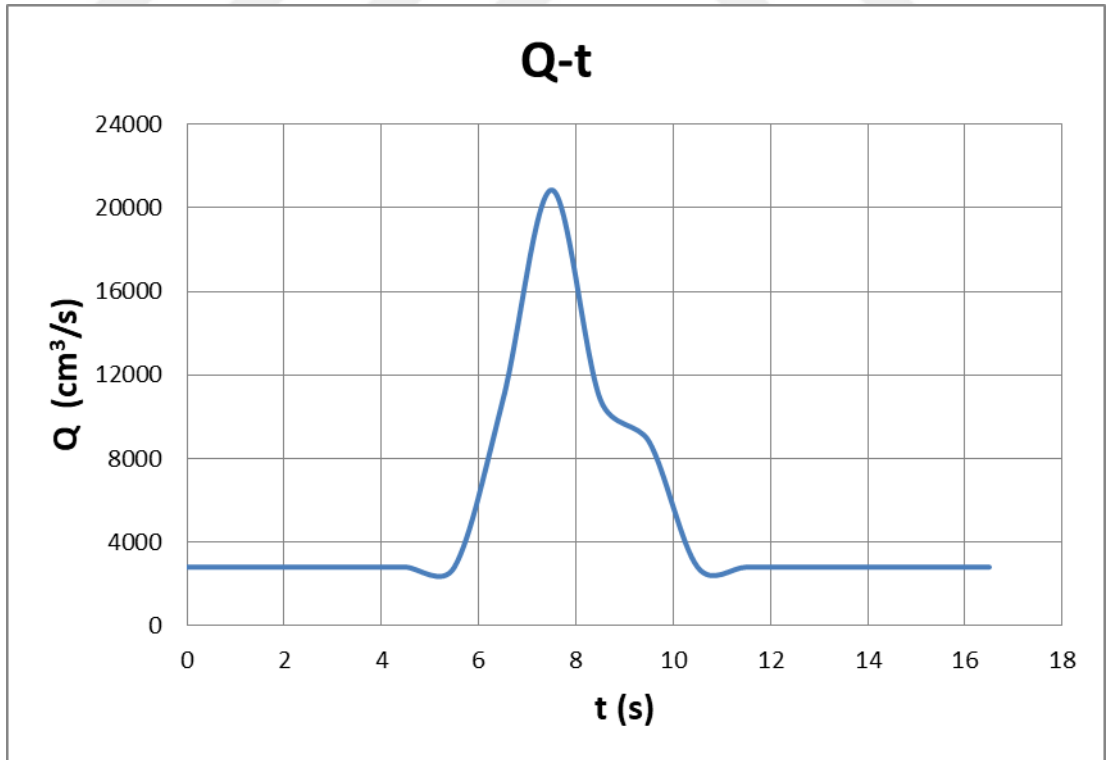
Bu grafiklerden de görüldüğü gibi açık kanal akımlarında hız profili belirlenirken kanal tabanına yakın olan iç bölgede logaritmik yasa dışı bölgede ise parabolik yasanın uygulanması uygun olmaktadır.

### 3.2 Kararsız Akım Deneyleri

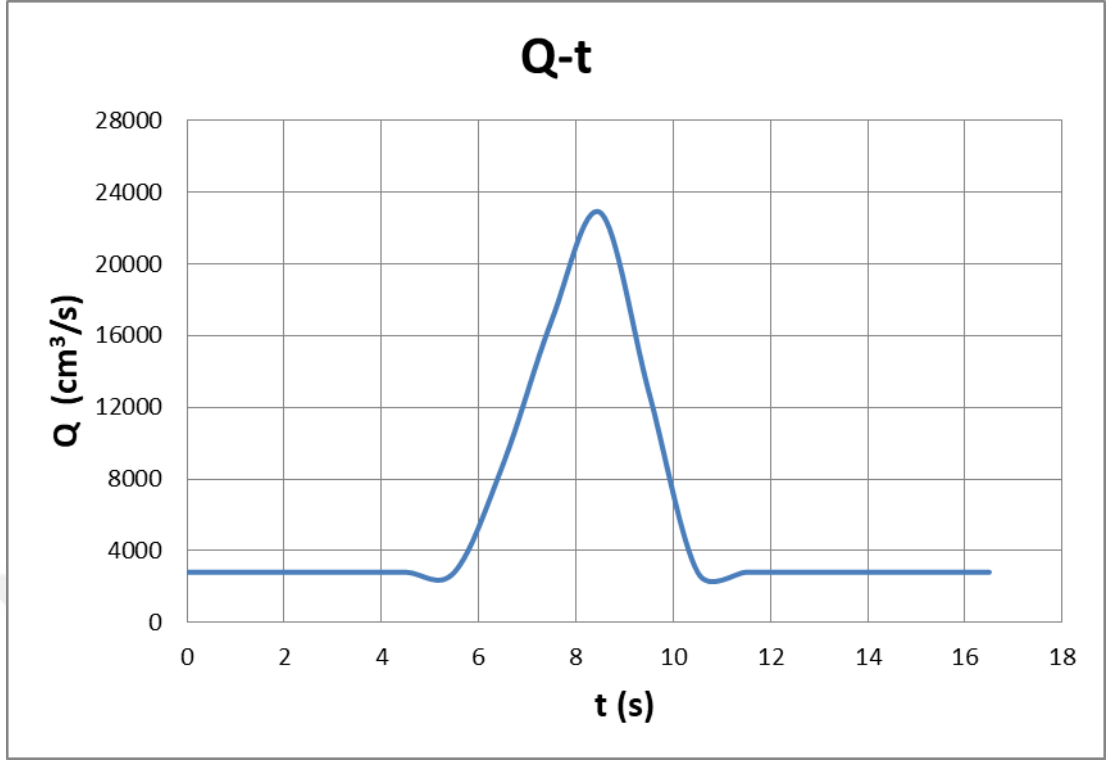
Kararsız akım deneyleri 4 farklı hidrograf kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu hidrograflar deney düzeneğinin membasında yer alan taşkın haznesinin farklı seviyelerde doldurulması ile elde edilmiştir. Deneyler sırasında taşkın haznesindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi ULS algılayıcısı kullanılarak ölçülmüş olup bu değerler aracılığı ile taşkın hidrografları çıkartılmıştır. T1, T2, T3 ve T4 deneylerine ait taşkın hidrografları, Şekil 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20’de verilmektedir. Şekil 3.21, 3.22, 3.23 ve 3.24’te ise deneyler sırasında kanal içerisinde bulunan ULS algılayıcısı ile ölçülen zamana bağlı su seviyesi değişimleri görülmektedir.



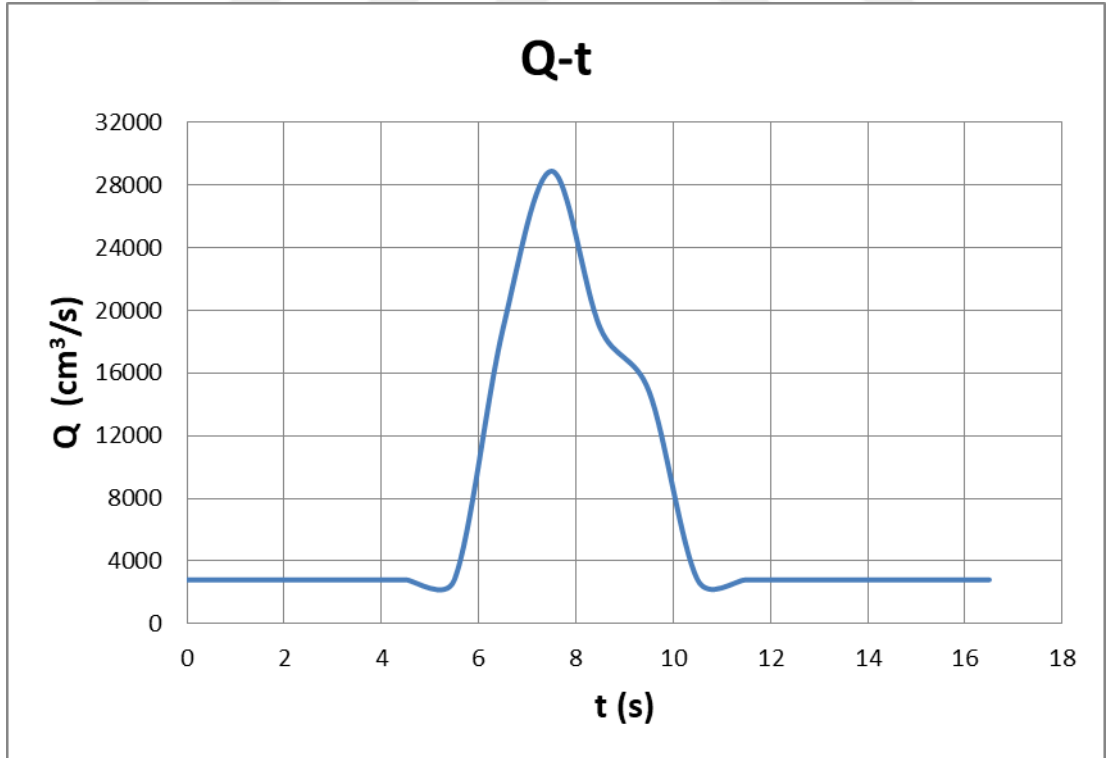
Şekil 3.17 T1 deneyi taşkın hidrografı



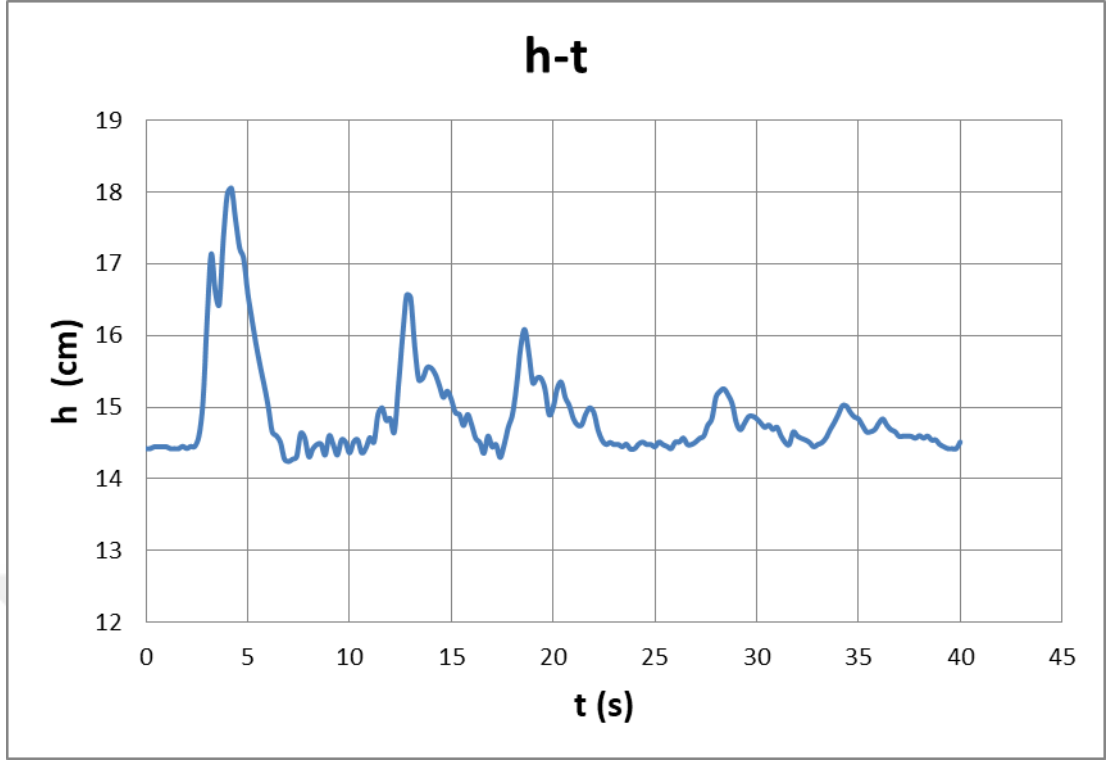
Şekil 3.18 T2 deneyi taşkın hidrografı



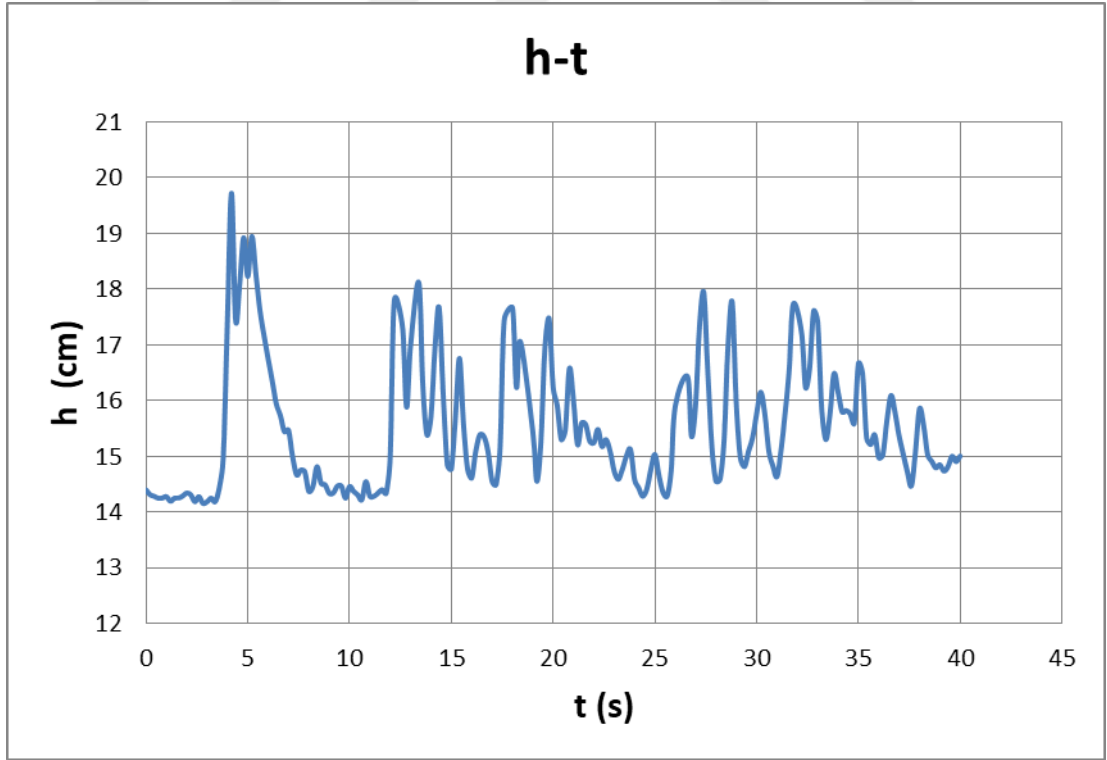
Şekil 3.19 T3 deneyi taşkın hidrografı



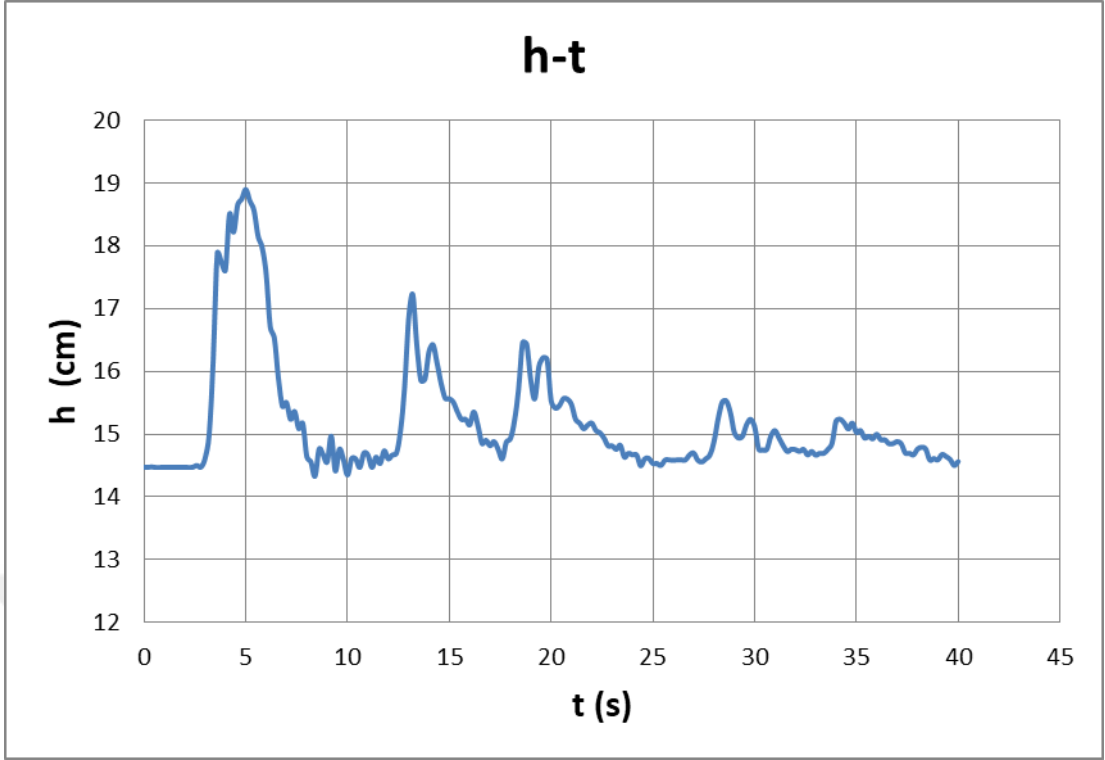
Şekil 3.20 T4 deneyi taşkın hidrografı



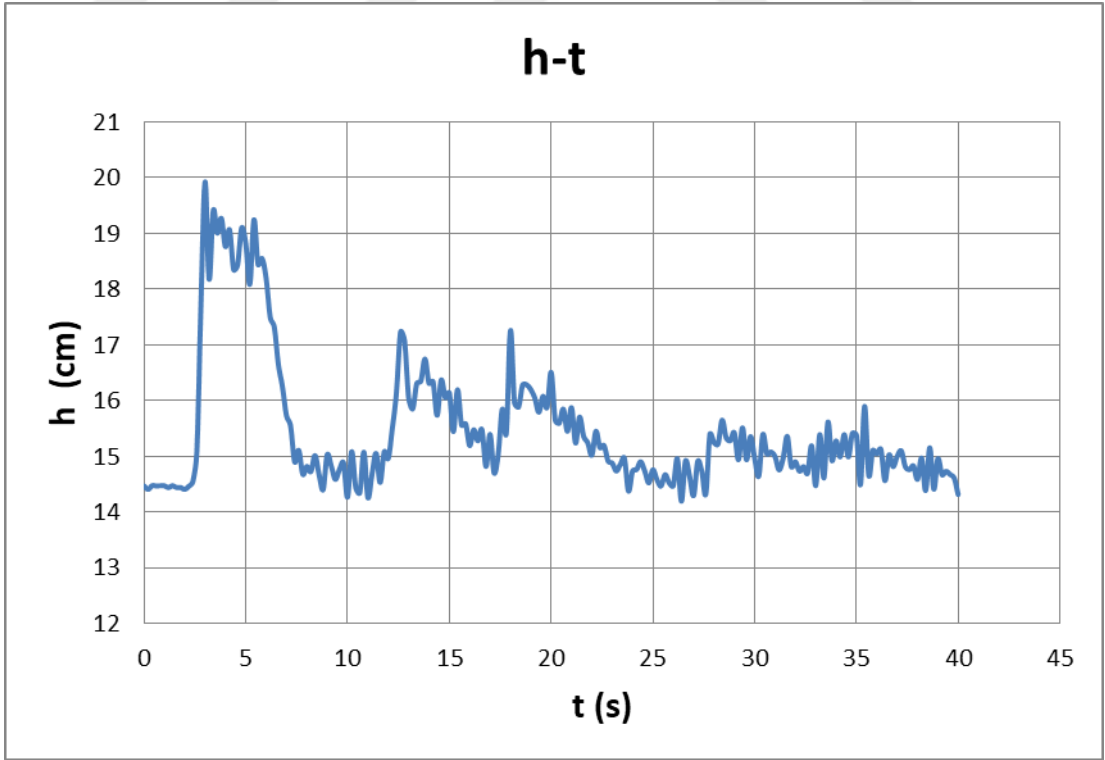
Şekil 3.21 T1 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.22 T2 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi

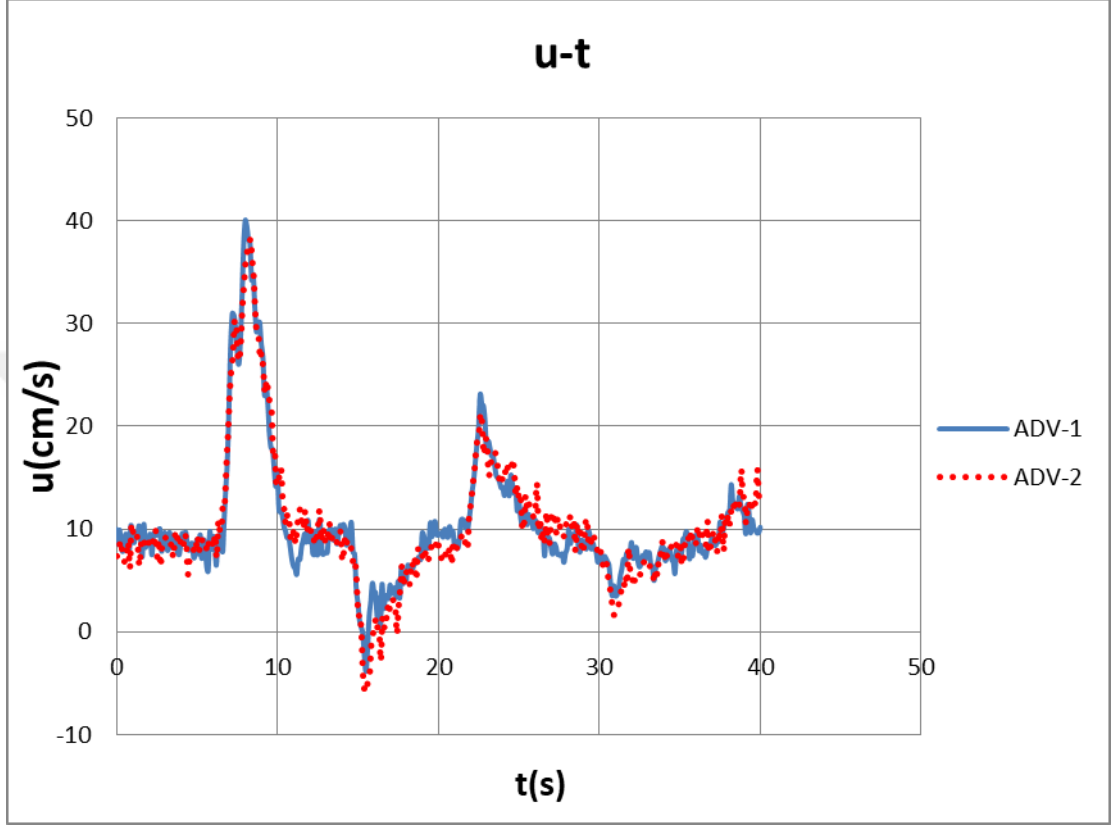


Şekil 3.23 T3 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi

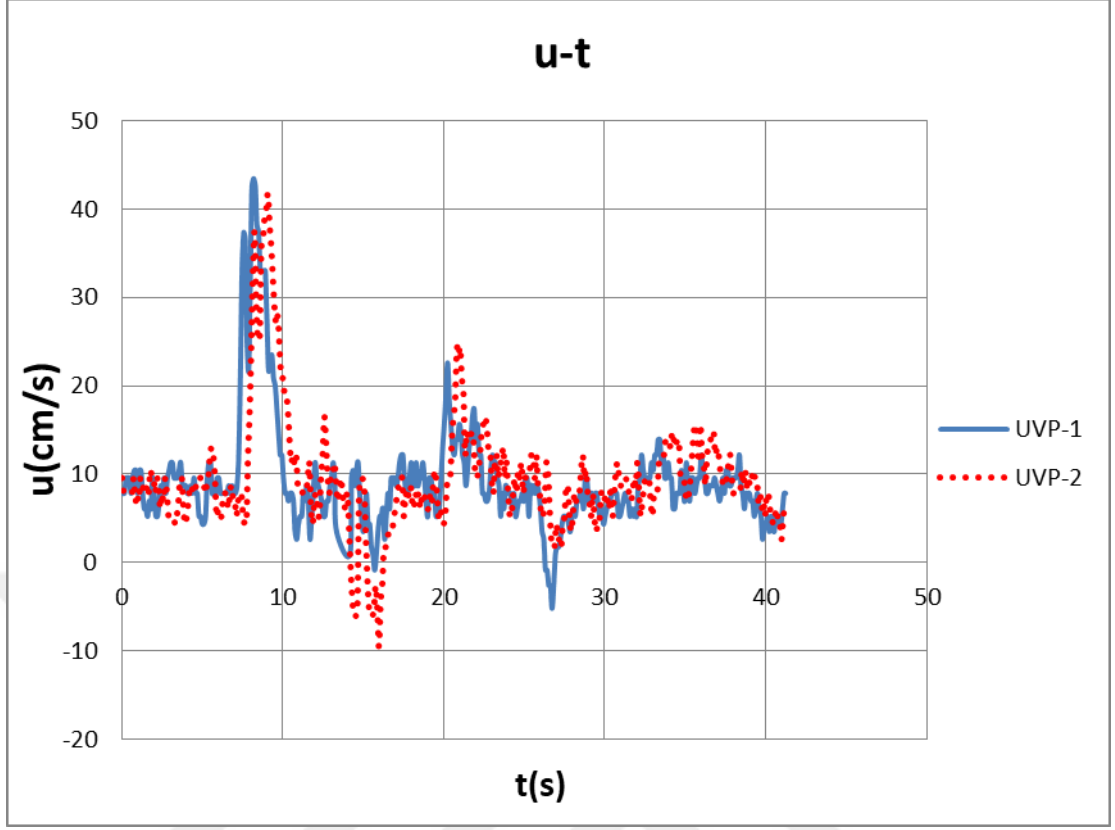


Şekil 3.24 T4 deneyi sırasında kanal içerisindeki su seviyesinin zamana bağlı değişimi

Kararlı akım deneylerinde olduğu gibi kararsız akım deneyleri de en az iki kere tekrarlanmıştır. Şekil 3.25 ve 3.26’da T1 nolu deneye ait ADV ve UVP ölçümlerinin tekrarlı deneyler için elde edilen hız-zaman serileri örnek olarak verilmektedir.



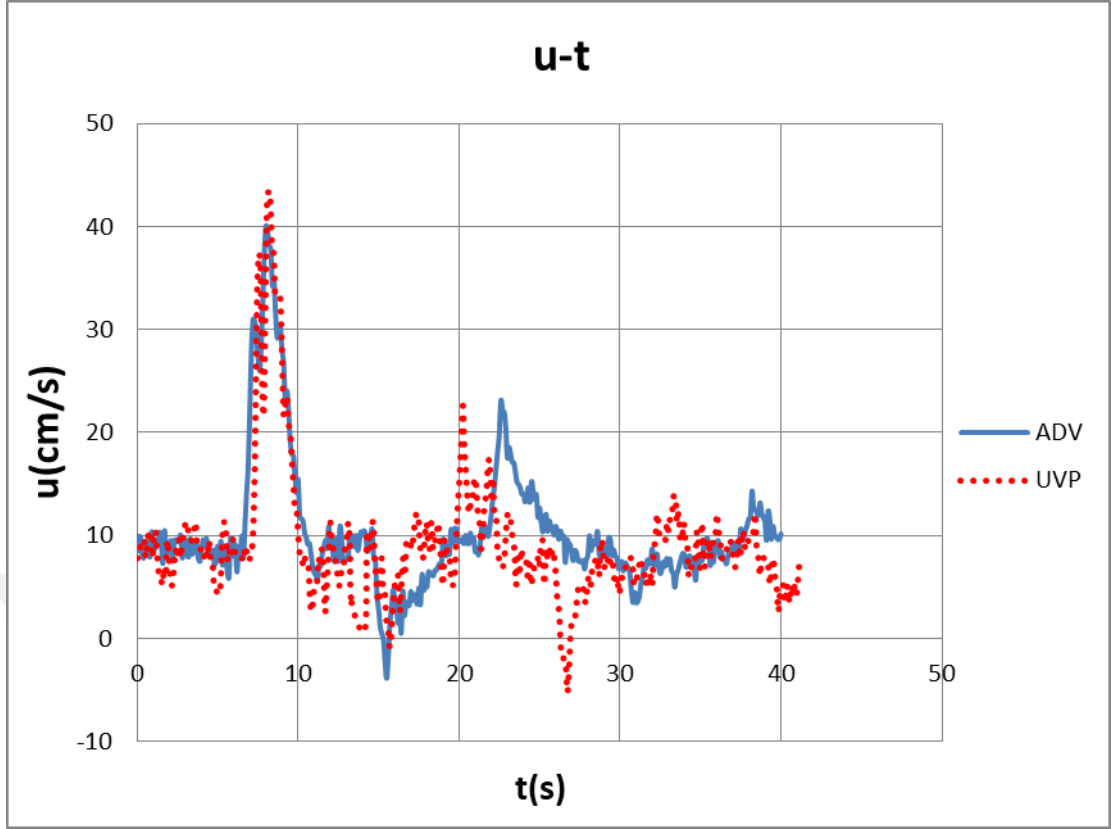
Şekil 3.25 T1 deneyi sırasında ADV cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi



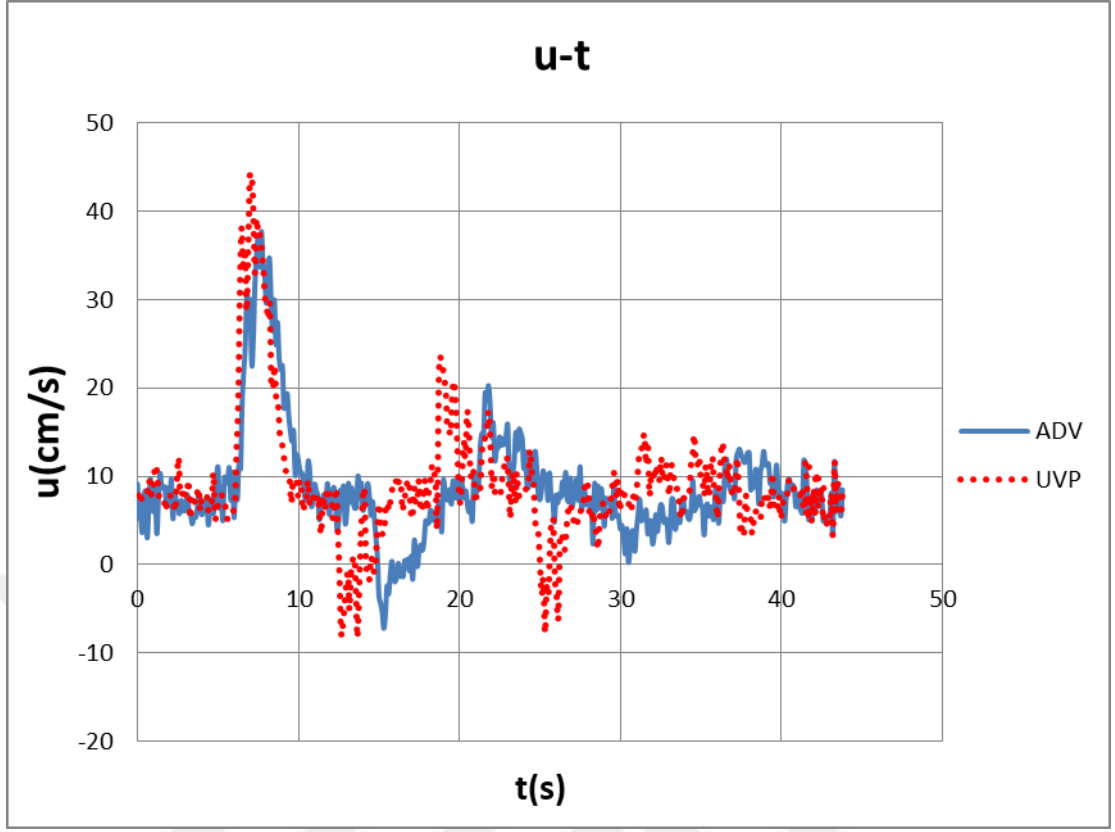
Şekil 3.26 T1 deneyi sırasında UVP cihazı ile elde edilen hız-zaman serisi

Kararsız akımların tekrarlı deneylerinden de görülebildiği üzere, cihazlardan elde edilen sonuçlar, kararlı akımlarda olduğu gibi kendi içlerinde tutarlıdır.

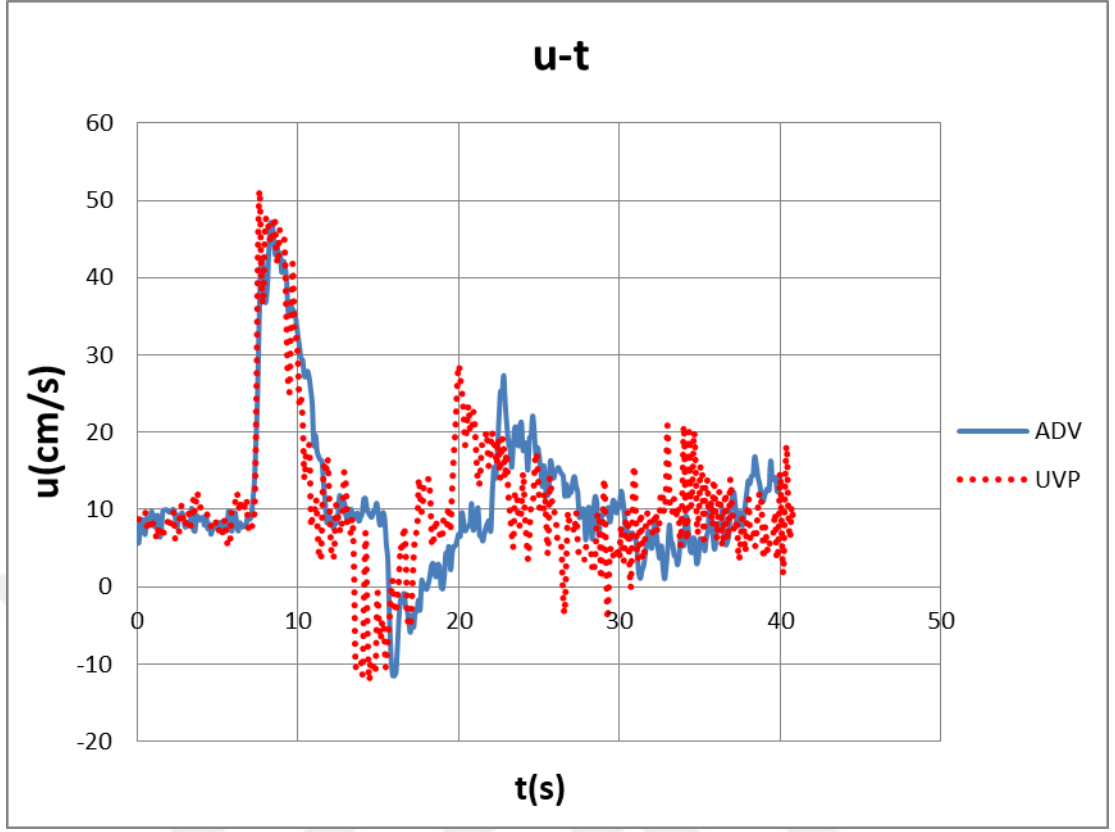
Şekil 3.27, Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve 3.30'da T1, T2, T3 ve T4 deneyleri sırasında hem ADV hem de UVP cihazları ile ölçüm noktasından elde edilen zamana bağlı hız grafikleri verilmektedir.



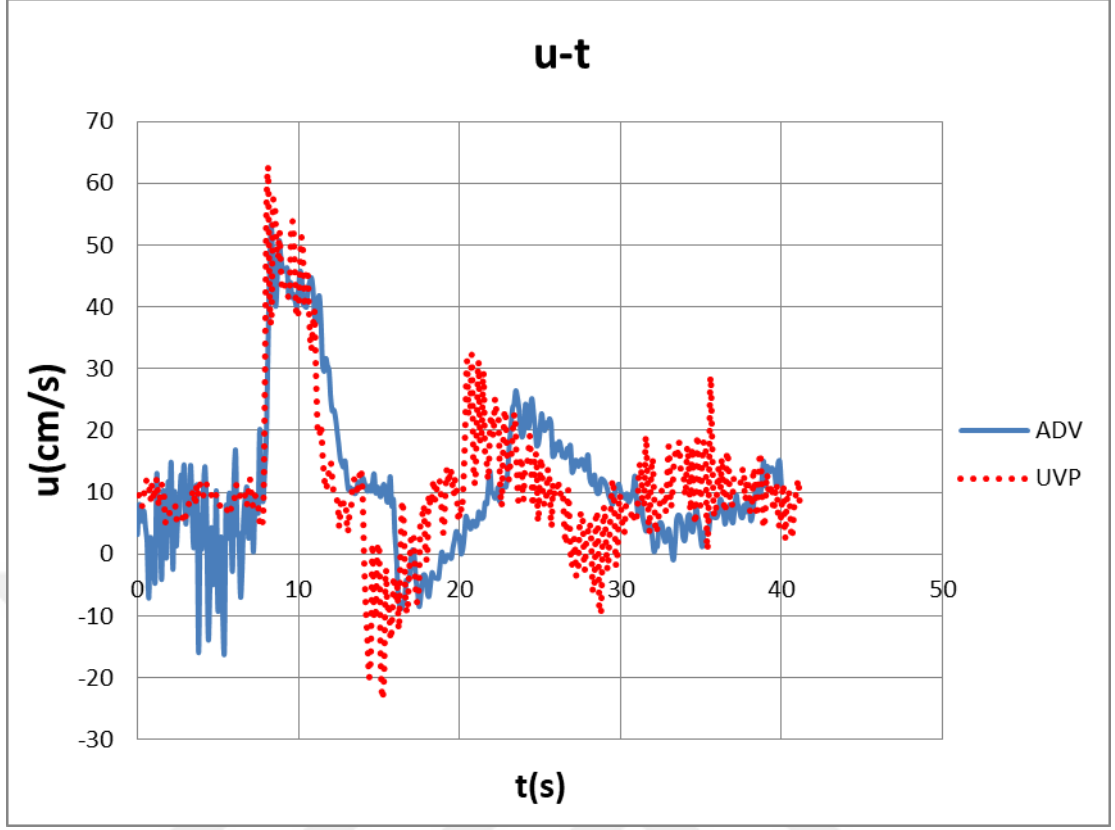
Şekil 3.27 T1 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi



Şekil 3.28 T2 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi



Şekil 3.29 T3 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi



Şekil 3.30 T4 deneyi için ADV ve UVP cihazları ile elde edilen hız-zaman serisi

Bu grafiklerden de görülebildiği üzere elde edilen hız verileri kararlı akımlarda olduğu gibi, kararsız akımlarda da birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Grafiklerde, taşkın dalgalarının yansımaları ve zaman içerisinde sönümlendiği de açık şekilde görülebilmektedir.

## BÖLÜM DÖRT

### SAYISAL MODEL

#### 4.1 Flow3D Programı

Çalışma kapsamında yapılmış olan deney koşulları kullanılarak sayısal model çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Sayısal model çalışmalarında D.E.Ü Hidrolik Laboratuvarı bünyesinde lisanslı olarak yer alan Flow3D yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, üç boyutlu akım problemlerinin sayısal olarak analizinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Flow3D yazılımı, akışkan akımlarına ait hareket denklemlerini, çeşitli yakınsamaları içeren nümerik yollarla çözmekte ve modellenmiş olan akışkan akımlarına ait parametrelerin çözümlerini gerçekleştirmektedir. Bu amaç doğrultusunda yazılım, üç boyutlu süreklilik ve hareket (RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemlerini sonlu hacimler yöntemi aracılığıyla eş zamanlı olarak çözmektedir. Bu denklemler 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (4.2)$$

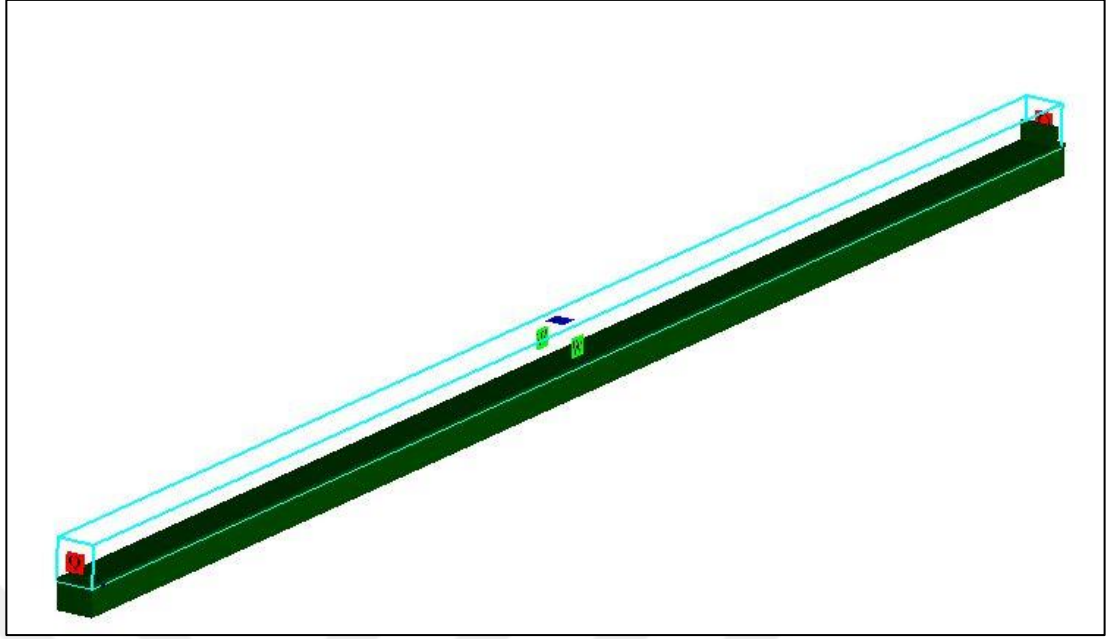
Denklemlerde yer alan  $A_j$  her bir hücrede yer alan akışkanın alanını,  $V_f$  her bir hücrede yer alan akışkan hacmini ve  $u_i$   $i$  doğrultusundaki akım hızını temsil etmektedir.  $G_i$ ,  $p$ , ve  $f_i$  simgeleri ise sırasıyla kütleli kuvvet, basınç ve herhangi bir türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini ifade etmektedir.

Teorik olarak yukarıda verilen denklemler ile türbülanslı bir akımın çözümü gerçekleştirilebilmesine rağmen, programın türbülansa ait her detayı algılaması için çok yüksek ağ çözünürlüğü gerekmektedir. Bu durum, bilgisayarların hafızası ve işlem hızı ile ilgili kısıtlardan dolayı genellikle mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, programda oluşturulan modelin basite indirgenmesi gerekmektedir. Programda mevcut olan çeşitli türbülans modelleri aracılığıyla basitleştirilmiş modeller oluşturulabilmekte ve istenilen sayısal çözümler sağlanabilmektedir. Flow3D programında Prandtl Karışım Uzunluğu (Prandtl Mixing Length), Bir Denklemli Türbülans Enerji Modeli, İki Denklemli  $k-\epsilon$ , İki Denklemli  $k-\omega$ , RNG (Renormalized Group Model) ve LES (Large Eddie Simulation) olmak üzere 6 farklı türbülans modeli mevcuttur.

Program içerisinde oluşturulan çözüm ağı, dikdörtgen hücrelerden oluşmaktadır. Modellemede elde edilen sonuçların doğruluğu, oluşturulan çözüm ağının, model geometrisini doğru bir şekilde algılayabilmesine bağlıdır. Modellenmek istenen geometri, CAD yazılımları aracılığıyla hazırlanarak dışarıdan eklenebileceği gibi, program içerisinde de çeşitli geometrik modeller oluşturulabilmektedir. Yazılım geometriyi algılama amacıyla FAVOR (fractional area/volume obstacle representation) yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntem ile çözüm ağındaki hücrelerin içerisinde yer alan bir engelin, hücre hacminin ne kadarını kapladığı belirlenmektedir. Ayrıca program, akışkan hacmi (VOF; Volume of Fluid) yöntemi ile hücre içerisindeki akışkan hacmini belirlemekte ve böylece su-hava arakesatine sahip serbest yüzeyleri tanımlamaktadır.

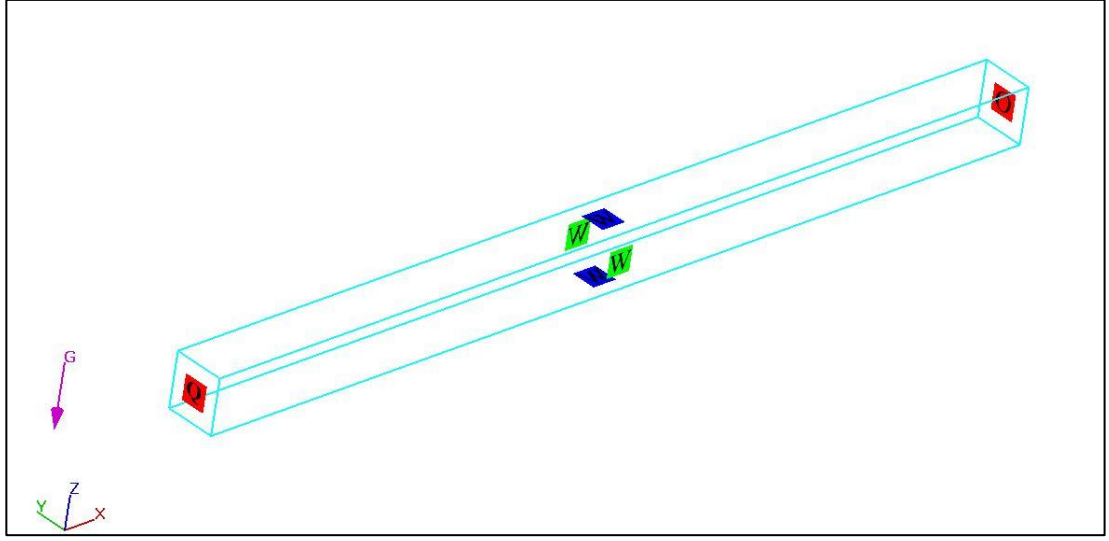
## 4.2 Sayısal Model

Deneylein gerçekleştirilmiş olduğu açık kanal, Flow3D programında modellenmiş olup, kanal modelinin program ara yüzündeki görüntüsü, Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Flow3D programında oluşturulmuş olan açık kanal modeli (Kişisel arşiv, 2020)

Şekil 4.1’de görülebildiği üzere açık kanal, programa dikdörtgen prizma şeklinde tanımlanmıştır. Çözüm ağı koordinatları, prizmanın üst bölgesini kapsayacak şekilde ayarlanmış olup, bu sayede programın kanal tabanını katı cisim olarak algılaması sağlanmıştır. Çözüm ağının, x, y, ve z eksenlerindeki sınırlarına uygun sınır koşulları tanımlanmış ve deneyler sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modelde tanımlanmış olan çözüm ağının, sınır koşulları ile birlikte görüntüsü Şekil 4.2’de görülebilmektedir.

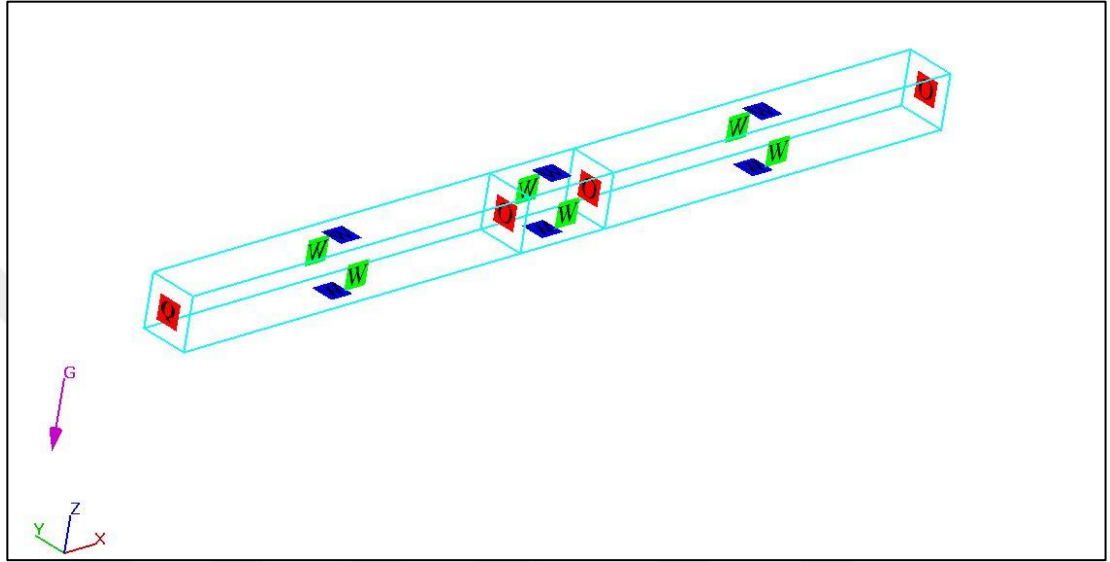


Şekil 4.2 Flow3D programında oluşturulan 1.çözüm ağı (Kişisel arşiv, 2020)

Burada x eksenini, suyun akış yönünü, y ve z eksenleri ise sırasıyla yatay ve düşey düzlemde akım yönüne dik eksenleri temsil etmektedir. Kanalın memba tarafında yer alan Q harfi, Debi (Volume Flow Rate) sınır koşulunu temsil etmektedir. Bu sınır koşuluna, akımın zamana bağlı olarak değişen debi ve su seviyesi değerleri girilmekte ve istenen akım şartları oluşturulmaktadır. Kanalın ucunda yer alan O harfi, Dışarı Akış (Outflow) sınır koşulunu simgelemekte olup, akımın kanaldan dışarı akışının tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Y ekseninde, W harfi ile görülebilmekte olan Duvar (Wall) sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu sınır koşulu aracılığı ile çözüm ağının y eksenindeki sınırlarının, kanalın yan cidarlarını temsil etmesi sağlanmıştır. Z eksenindeki sınırlara da Duvar sınır koşulu girilerek, suyun kanal boyunca akışı sağlanmıştır.

Çözüm ağı, boyutları 3x3 cm'lik hücrelere ayrılarak ızgara sistemi oluşturulmuştur. Bu ızgara sisteminde toplamda 24624 hücre bulunmaktadır. Kanal geometrisini algılaması açısından yeterli hassasiyete sahip olan bu sistem ile kararlı ve kararsız akım deneylerinde noktasal olarak ölçülen zamana bağlı hız değerlerinin sayısal çözümü gerçekleştirilmiştir. Ancak, kararlı akım deneylerinde UVP cihazı aracılığı ile ölçülen düşey hız profillerinin sayısal çözümü için yeni bir ızgara sistemi

oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun sebebi ise, düşey profil boyunca oluşan akım hızlarının ölçümü konusunda, 3x3 cm'lik hücrelerin yeterli hassasiyette bir çözüm gerçekleştirememiş olmasıdır. Bu doğrultuda yeni bir çözüm ağı oluşturulmuş olup, bu çözüm ağı Şekil 4.3'te verilmiştir.



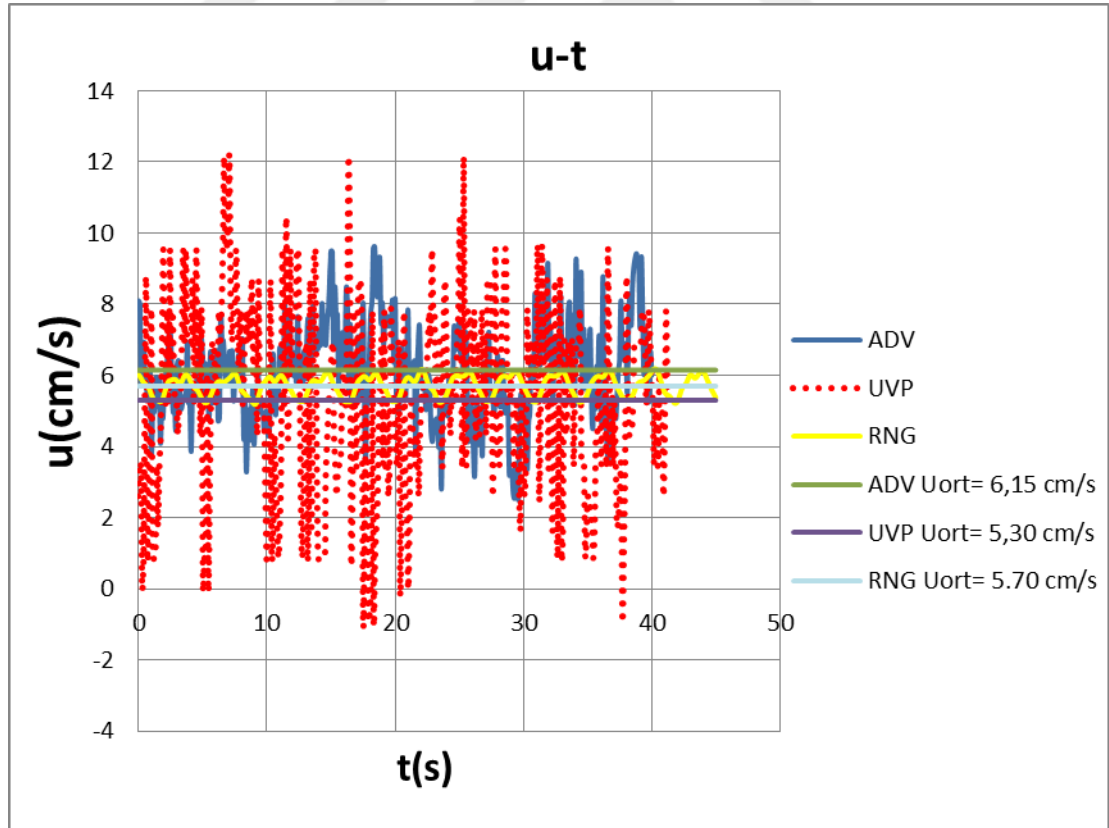
Şekil 4.3 Flow3D programında oluşturulan 2.çözüm ağı (Kişisel arşiv, 2020)

Şekil 4.3'den görülebileceği üzere bu çözüm ağı, 3 farklı alt çözüm ağının birleşimi ile oluşturulmuştur. Düşey kesit boyunca oluşan akım hızlarının hassas bir şekilde çözülmesi amacı ile ortadaki çözüm ağı 1x1 cm'lik hücrelerden oluşturulmuş olup diğer iki alt çözüm ağı ise, birinci çözüm ağı sisteminde olduğu gibi 3x3 cm'lik hücrelerden oluşturulmuştur. Yeni çözüm ağı sisteminde 57222 adet hücre mevcuttur.

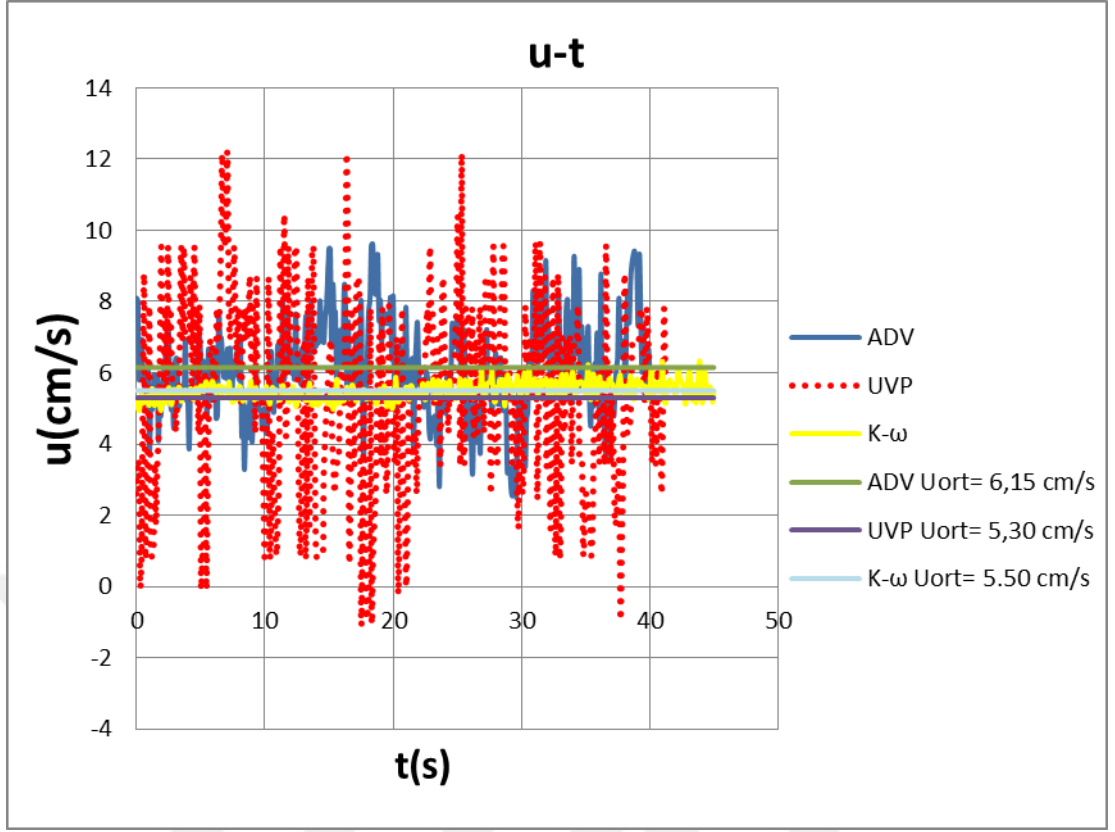
### 4.3 Sayısal Çözüm Sonuçları

#### 4.3.1 Kararlı Akım Koşullarında Noktasal Olarak Elde Edilen Zamana Bağlı Akım Hızı Değerleri

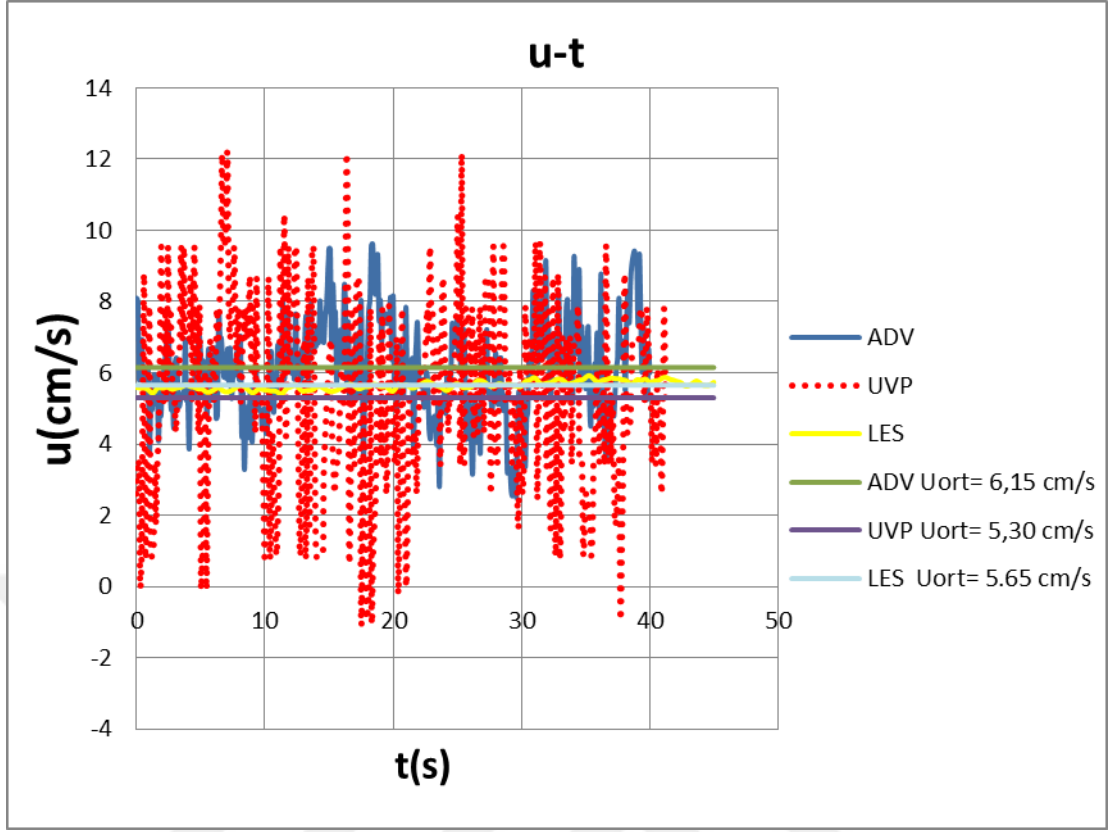
K1, K2 ve K3 nolu deneylerin sayısal çözümleri gerçekleştirilerek zamana bağlı noktasal akım hızları elde edilmiştir. Akım şartları, deneyler sırasında oluşan kararlı akımlara ait debi ve su seviyesi değerlerinin, kanalın memba kısmında yer alan Debi sınır koşuluna girilmesi ile elde edilmiştir. Farklı türbülans modellerinin uygunluğunu denemek amacı ile K1 deneyi, her bir türbülans modeli için ayrı ayrı çözdürülmüş olup elde edilen veriler deney sonuçları ile karşılaştırılmış olup sonuçlar Şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9’da verilmiştir.



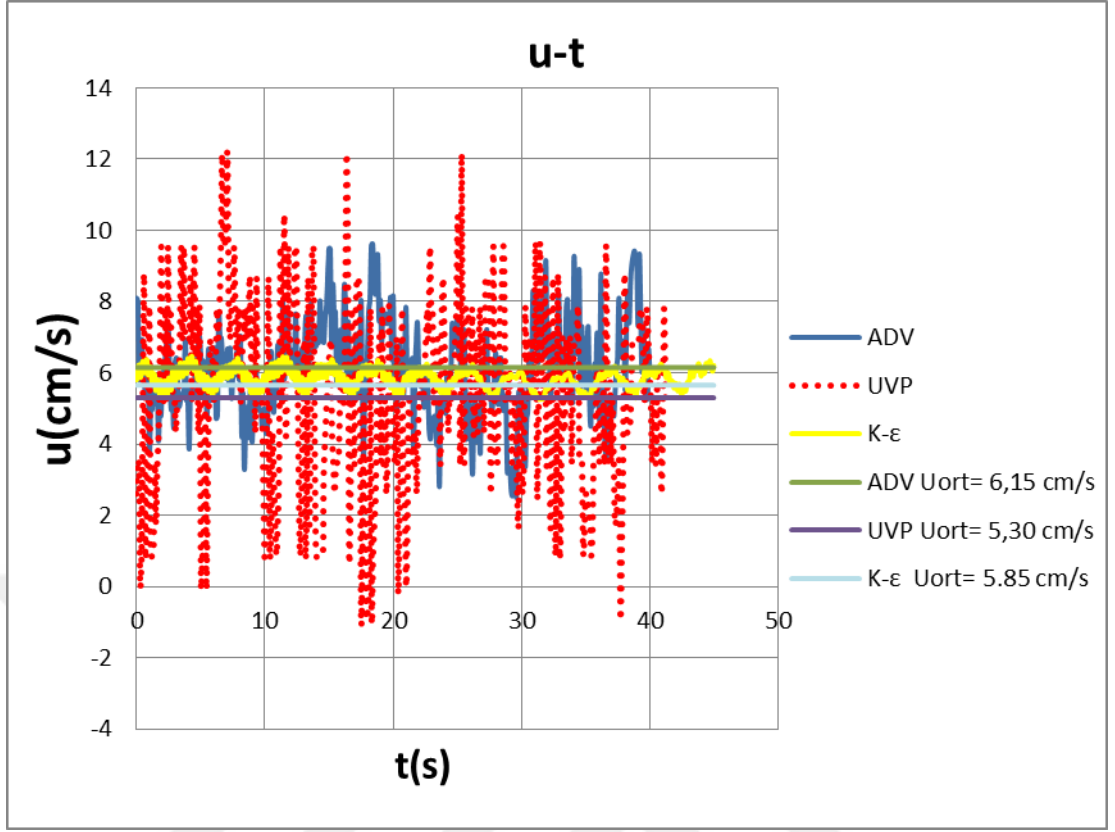
Şekil 4.4 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



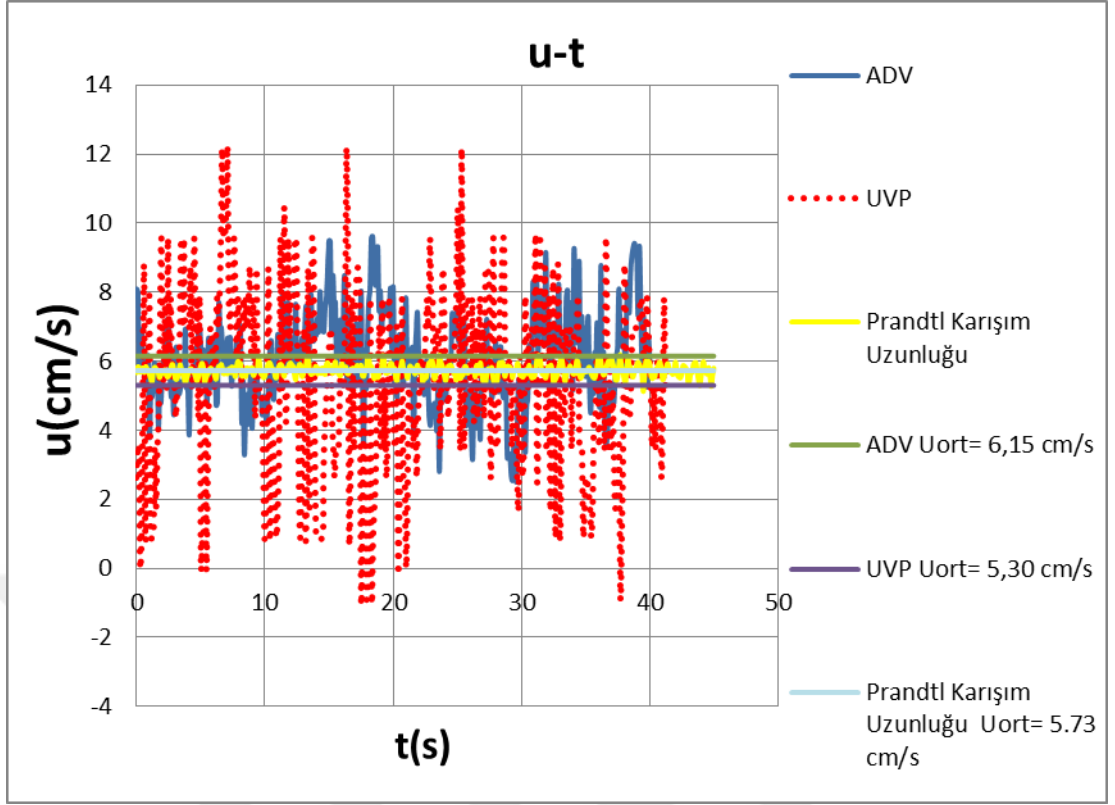
Şekil 4.5 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



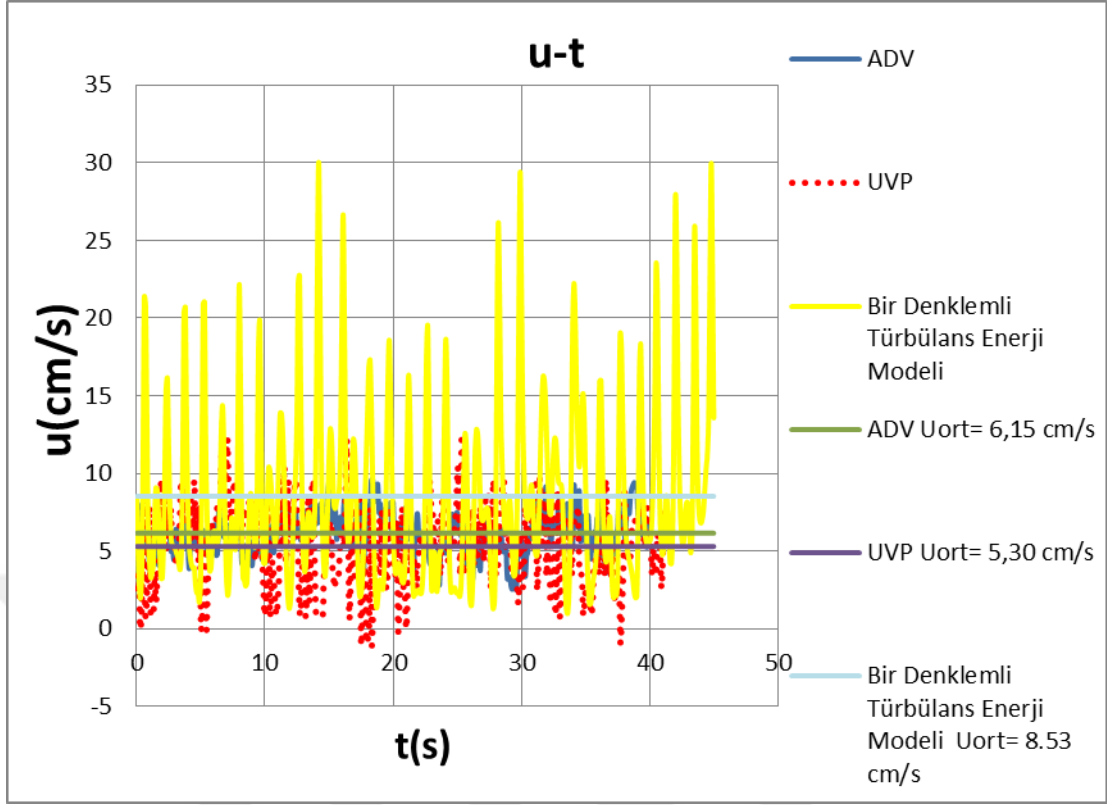
Şekil 4.6 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, LES türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



Şekil 4.7 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K-ε türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



Şekil 4.8 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Prandtl Karışım Uzunluğu türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



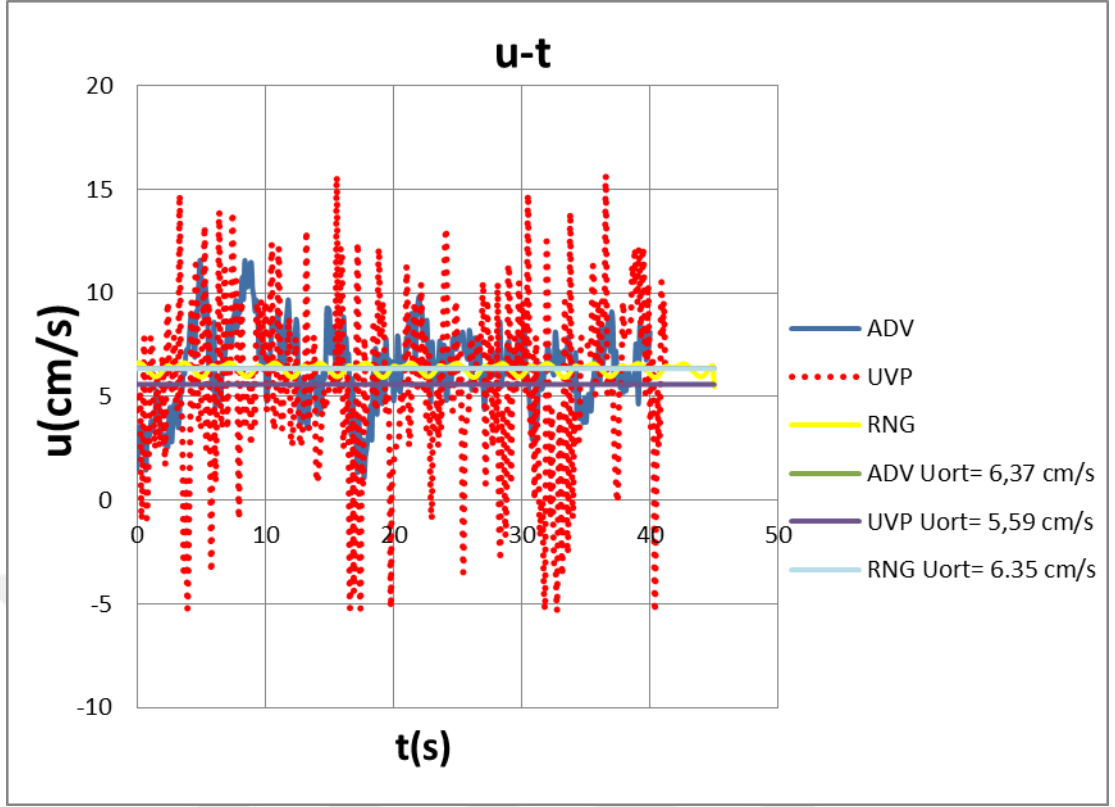
Şekil 4.9 K1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Bir Denklemlı Türbülans Enerji Modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması

Tablo 4.1’de farklı türbülans modelleri için sayısal modelden elde edilen su derinliği ve ortalama akım hızı değerlerinin sonuçları verilmektedir. Grafiklerden ve Tablo 4.1’den görüldüğü üzere, kararlı akım koşullarında Bir Denklemlı Türbülans Enerji Modeli dışındaki bütün türbülans modelleri ile gerçekleştirilen sayısal çözümler, ortalama akım hızları açısından deneysel sonuçlar ile uyumludur. Ancak, akım hızlarında deneysel ölçümler ile gözlemlenebilmiş olan salınımlar, sayısal model sonuçlarında elde edilememiştir.

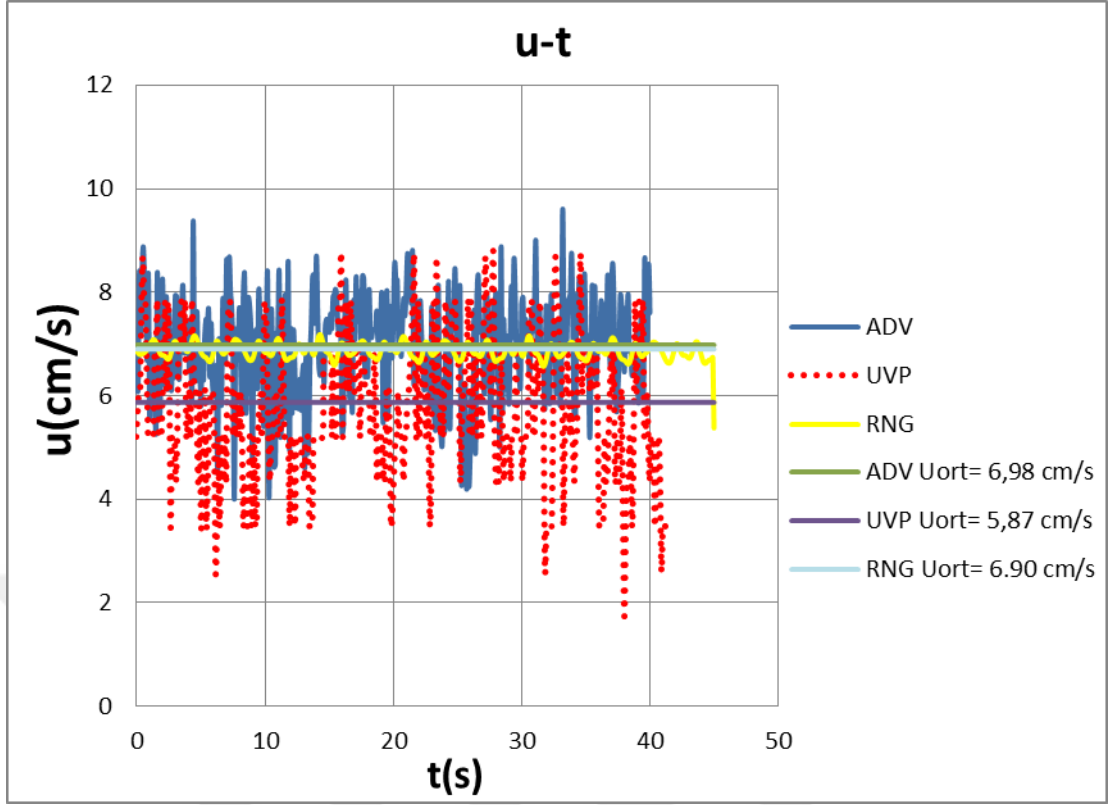
Tablo 4.1 K1 deneyi sırasında gerçekleştirilen ölçümler ve farklı türbülans modelleri ile gerçekleştirilen sayısal çözümlerden elde edilmiş olan su seviyesi ve ortalama akım hızı değerleri

Yöntem		h (cm)	u (cm/s)
Ölçüm	Q=VA	13,50	5,28
	ADV		6,15
	UVP		5,30
Sayısal Çözüm	RNG	13,22	5,70
	K- $\omega$	13,18	5,50
	K- $\epsilon$	13,20	5,85
	LES	13,21	5,65
	Prandtl Karışım Uzunluğu	13,18	5,73
	Bir Denklemlili Türbülans Enerji Modeli	12,60	8,53

K2 ve K3 deneylerinin sayısal çözümleri, RNG türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çözümlerden elde edilen zamana bağlı akım hızı değerlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırmaları Şekil 4.10 ve 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.10 K2 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



Şekil 4.11 K3 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması

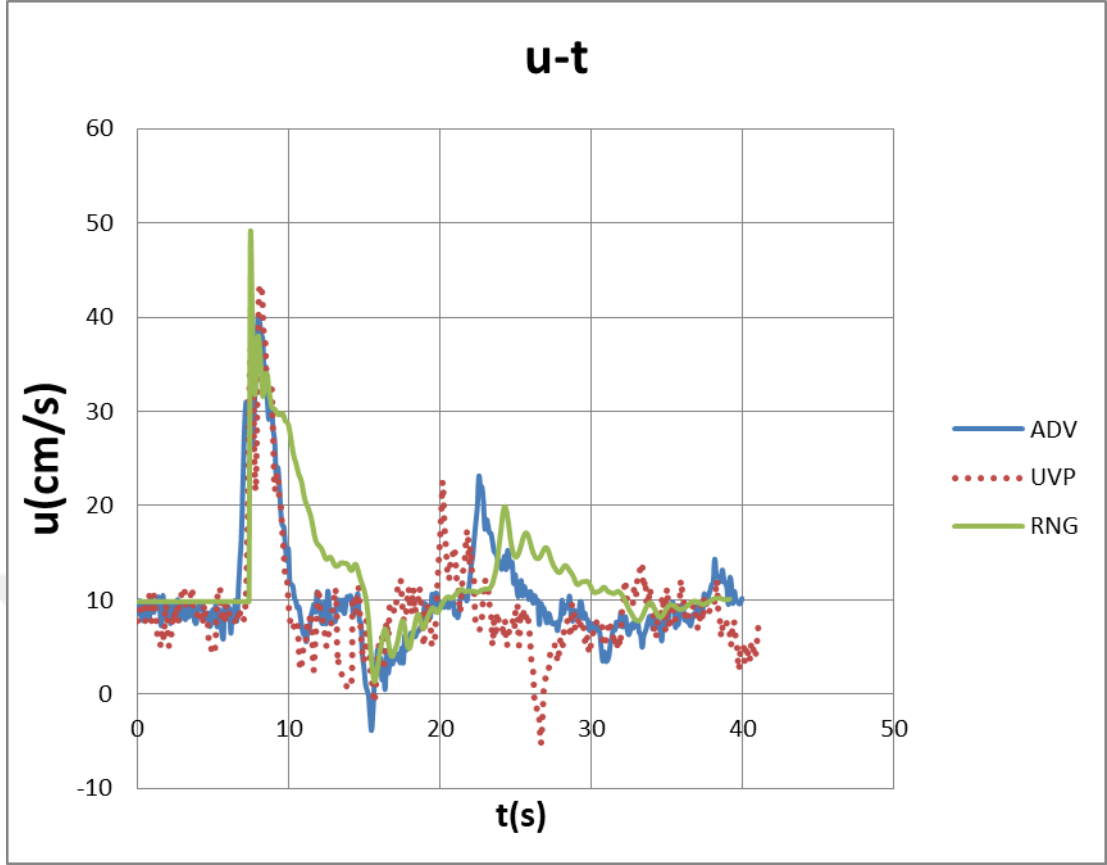
Tablo 4.2’de K1, K2 ve K3 deneylerine ait hesaplanan ve ölçülen su derinliği ve ortalama akım hızı değerleri verilmektedir. Bu sonuçlardan da görülebildiği üzere RNG türbülans modeli deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermiştir.

Tablo 4.2 K1, K2 ve K3 deneyleri sırasında gerçekleştirilen ölçümler ve RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözümlerden elde edilmiş olan su seviyesi ve ortalama akım hızı değerleri

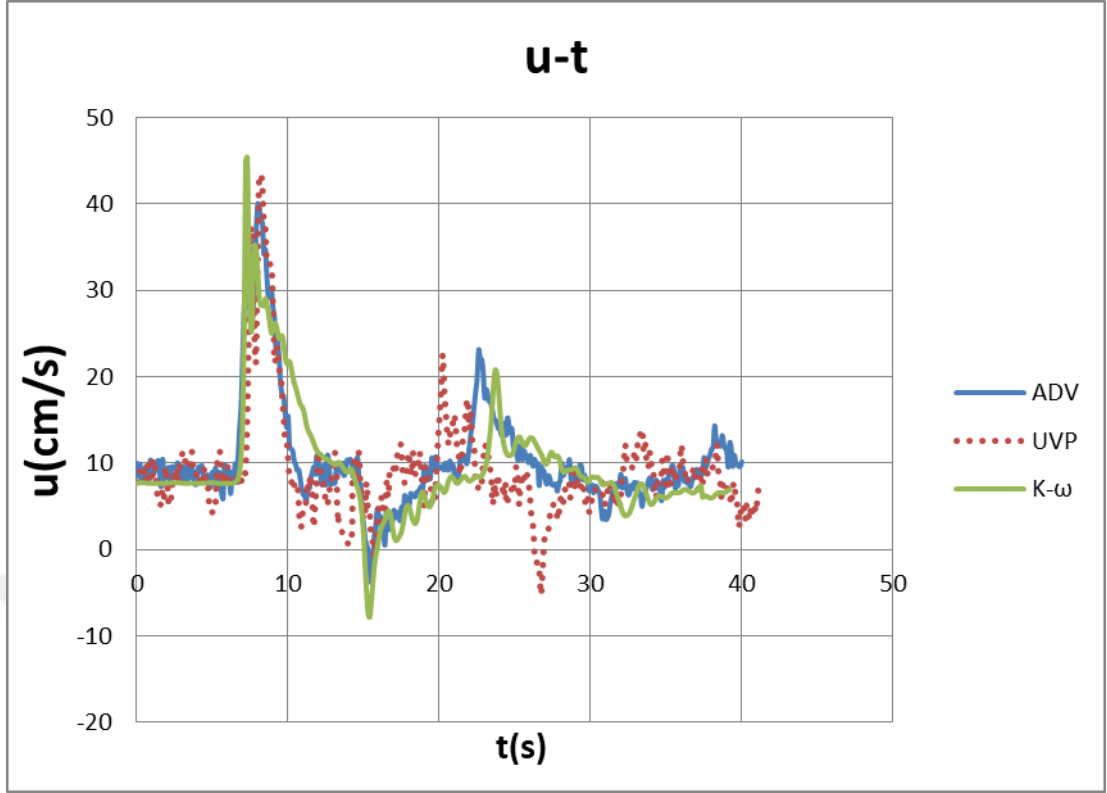
Deney	Yöntem		h (cm)	u (cm/s)
K1	Ölçüm	Q=VA	13,50	5.28
		ADV		6.15
		UVP		5.30
	Flow3D (RNG)		13,22	5,70
K2	Ölçüm	Q=VA	13,80	5.83
		ADV		6.37
		UVP		5.59
	Flow3D (RNG)		13,25	6,35
K3	Ölçüm	Q=VA	14,30	6.09
		ADV		6.98
		UVP		5.87
	Flow3D (RNG)		13,50	6,90

#### 4.3.2 Kararsız Akım Deneylerinin Sayısal Çözüm Sonuçları

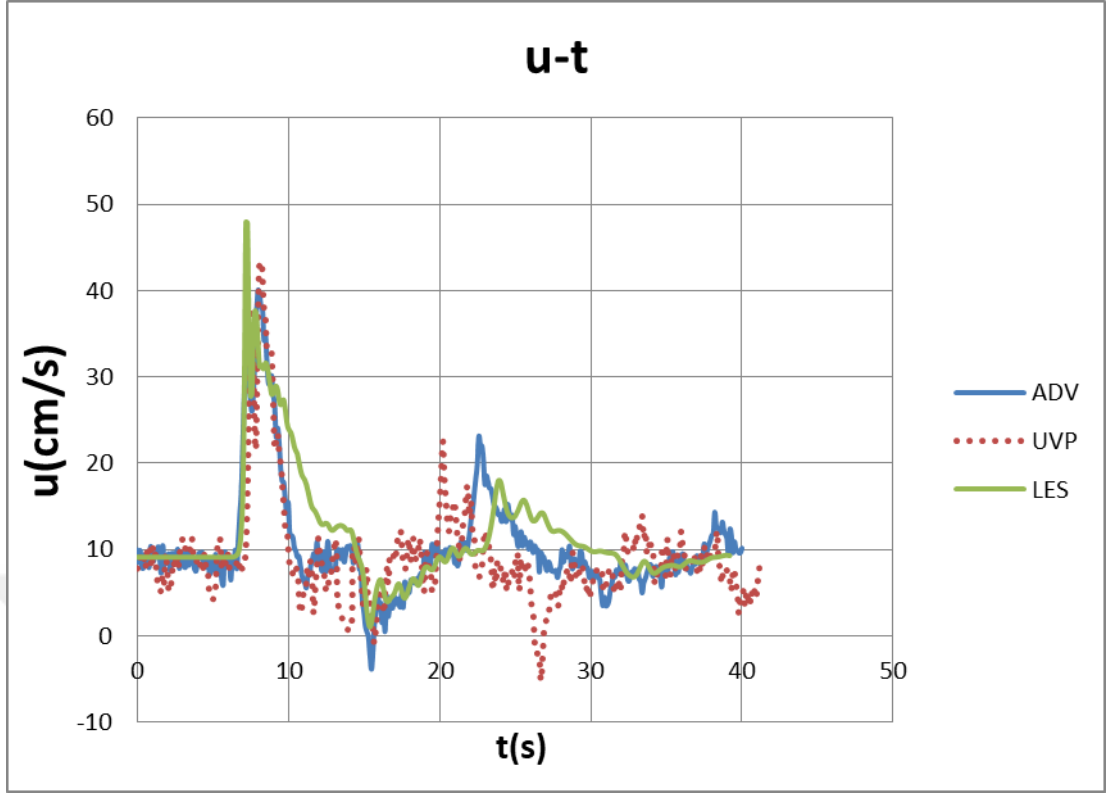
Kararsız akım deneylerinin modellenmesi amacı ile deneylerden elde edilen taşkın hidrografi ve taşkın dalgasının zamana bağlı su seviyesi değerleri, programda Debi sınır koşuluna girilmiştir. Farklı türbülans modellerinin uyumluluğunu test etmek amacı ile T1 deneyinin sayısal çözümü, her bir türbülans modeli için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup bu çözümlerden elde edilen zamana bağlı akım hızı değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırmaları Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17’de verilmiştir.



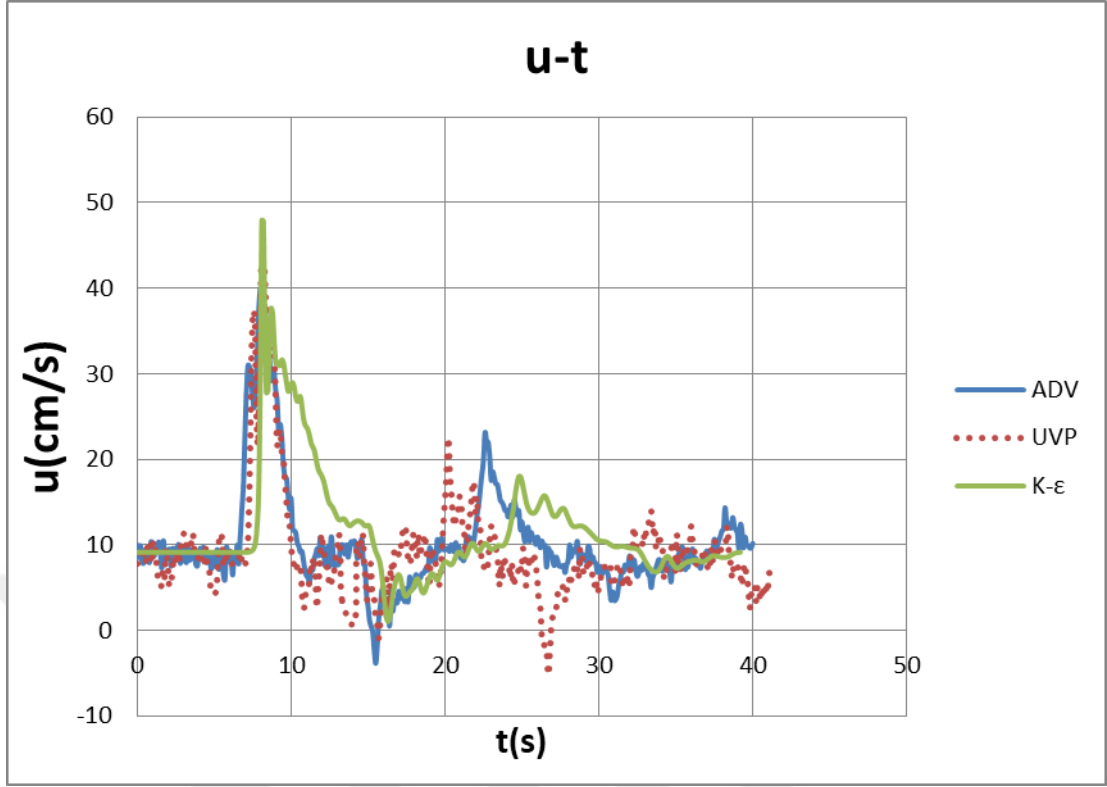
Şekil 4.12 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, RNG türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



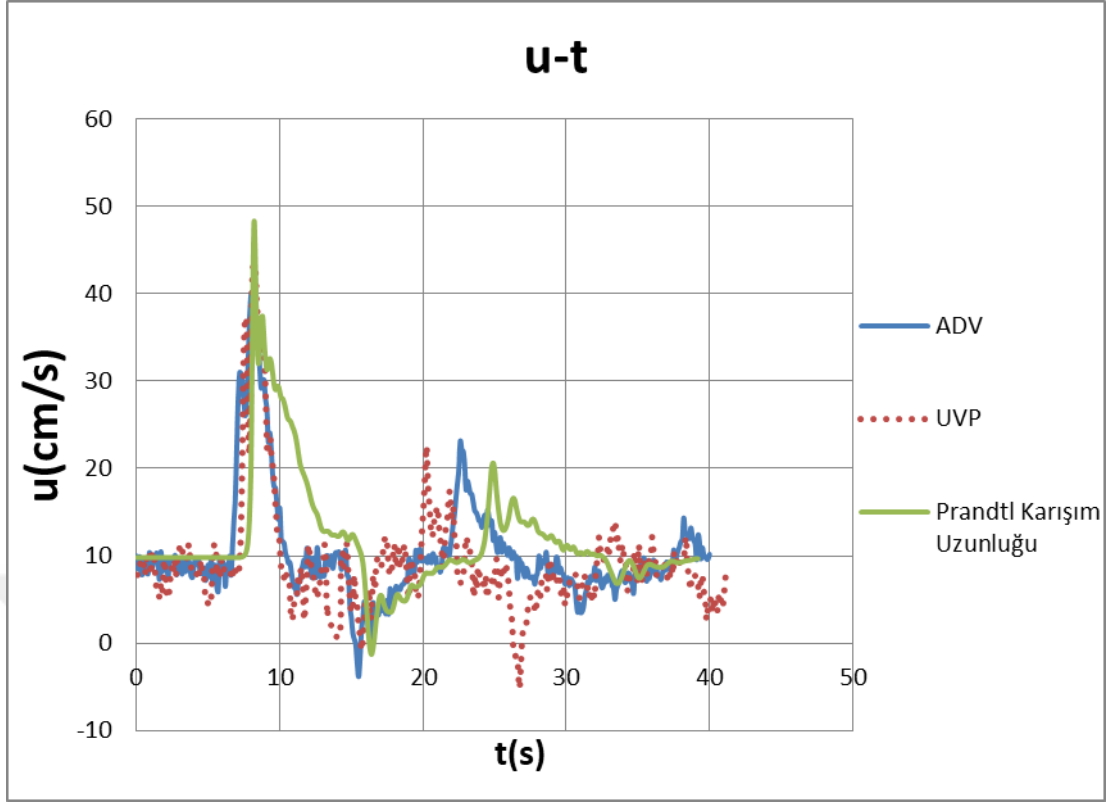
Şekil 4.13 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



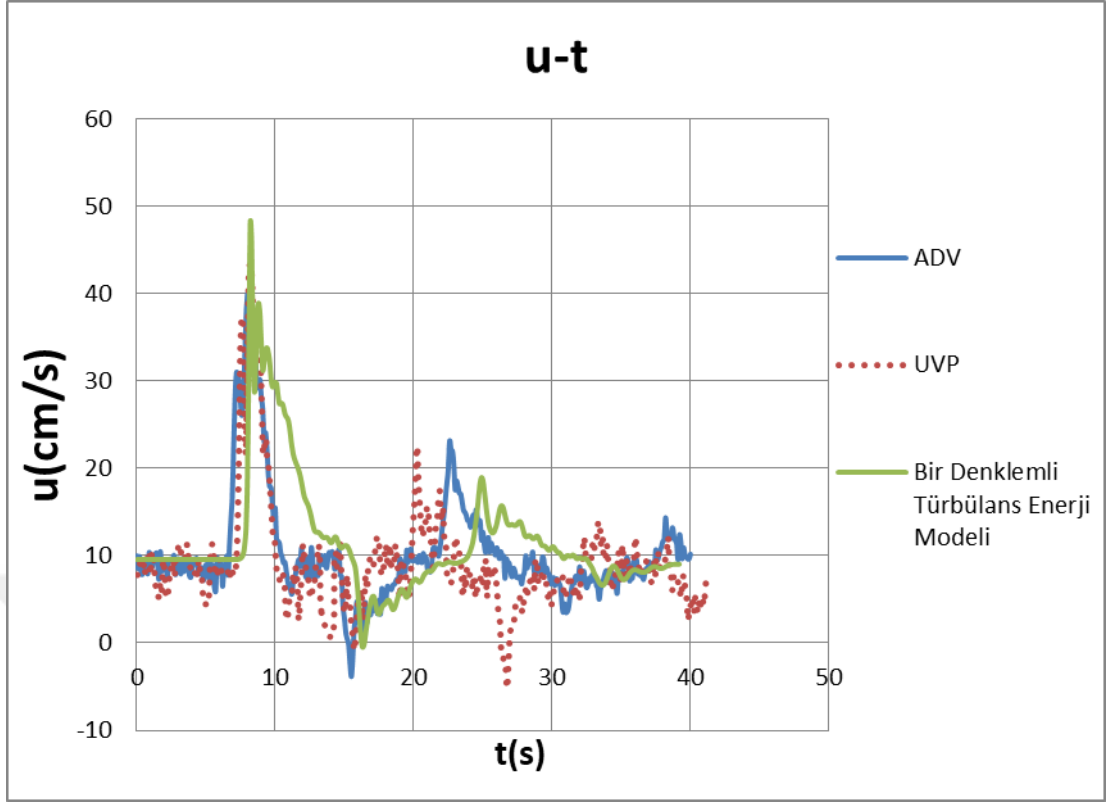
Şekil 4.14 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, LES türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



Şekil 4.15 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\epsilon$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması

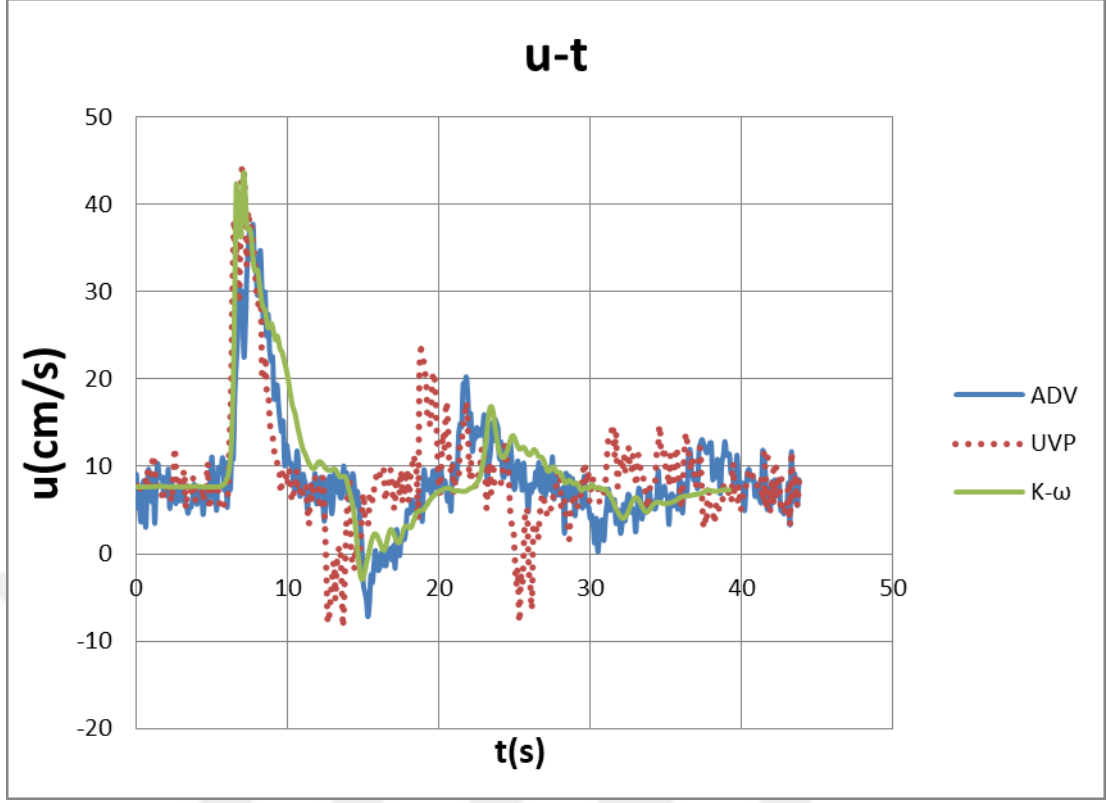


Şekil 4.16 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Prandtl Karışım Uzunluğu türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması

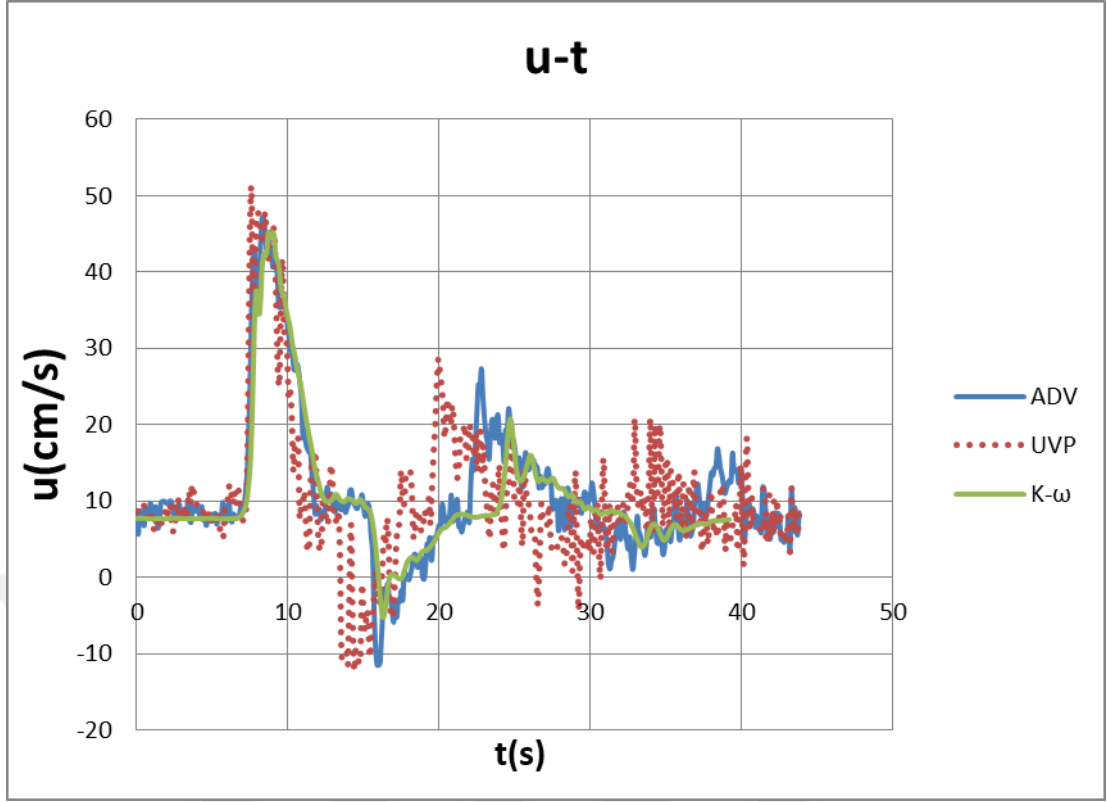


Şekil 4.17 T1 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, Bir Denklemli Türbülans Enerji Modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması

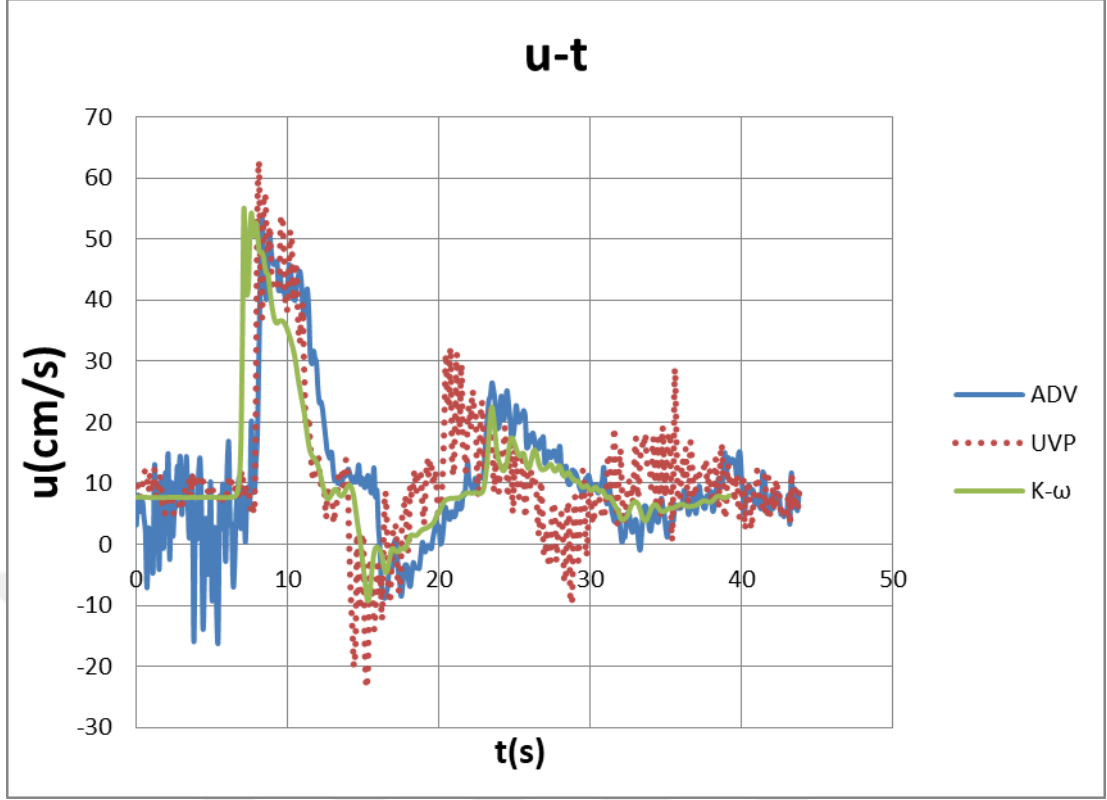
Grafiklerden görüldüğü üzere, bütün türbülans modelleri ile gerçekleştirilmiş olan sayısal çözüm sonuçları deneysel sonuçlarla uyumludur. Ancak K- $\omega$  modeli diğer türbülans modelleri ile karşılaştırıldığında nispeten daha yakın sonuçlar vermiştir. Bu sebeple T2, T3 ve T4 deneylerinin sayısal çözümlerinde K- $\omega$  türbülans modeli kullanılmıştır. Bu sayısal çözümlerden elde edilen zamana bağlı akım hızı değerlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırmaları Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.18 T2 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



Şekil 4.19 T3 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması



Şekil 4.20 T4 deneyinden elde edilen zamana bağlı akım hızı ölçümlerinin, K- $\omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen sayısal çözüm verileri ile karşılaştırılması

Grafiklerden de görüldüğü üzere, kararsız akımlar için gerçekleştirilmiş olan sayısal model sonuçları deneysel verilerle uyumludur.

#### 4.3.3 Kararlı Akım Koşullarında Elde Edilen Hız Profil Değerleri

K4 ve K5 deneylerinin sayısal modelinde 1x1 cm'lik hücrelerden oluşan çözüm ağı sistemi kullanılmış olup düşey profil boyunca 1cm aralıklarla akım hızı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sayısal model sonuçları, deneysel veriler ve İkili Yasa formülü aracılığı ile elde edilmiş olan düşey hız profilleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, Şekil 4.21 ve 4.24'te verilmiştir. İkili yasa ve sayısal model aracılığıyla elde edilen hız profillerinin deneysel sonuçlar ile uyumunu gösteren saçılma diyagramları Şekil 4.22, 4.23, 4.25 ve 4.26'da görülebilmektedir. Ölçülen hız

profilleri ile hesaplanan hız profilleri arasındaki regresyonun incelenmesi amacıyla  $R^2$  (Belirleme Katsayısı) ve SI (Saçılma İndisi) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler grafikler üzerinde görülebilmektedir.  $R^2$  ve SI değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formüller; Denklem 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2 \quad (4.3)$$

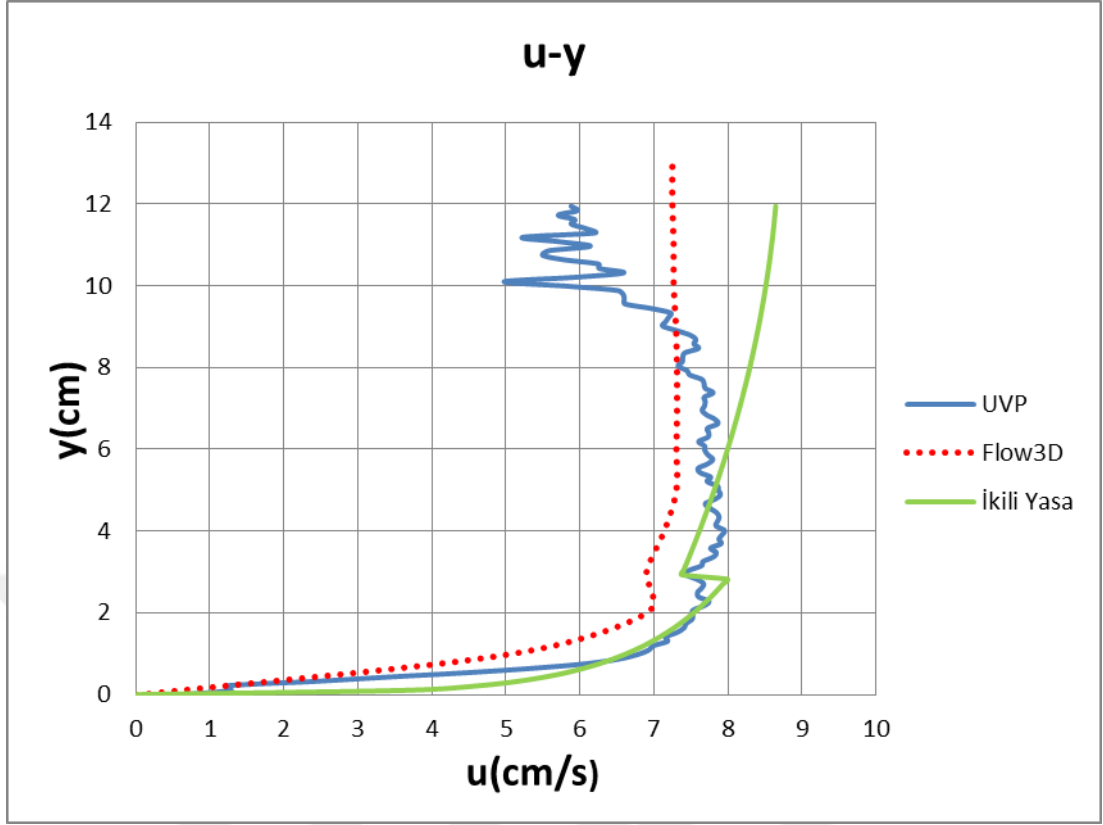
$$SSR = \sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_{ort})^2 \quad (4.4)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SSE+SSR} \quad (4.5)$$

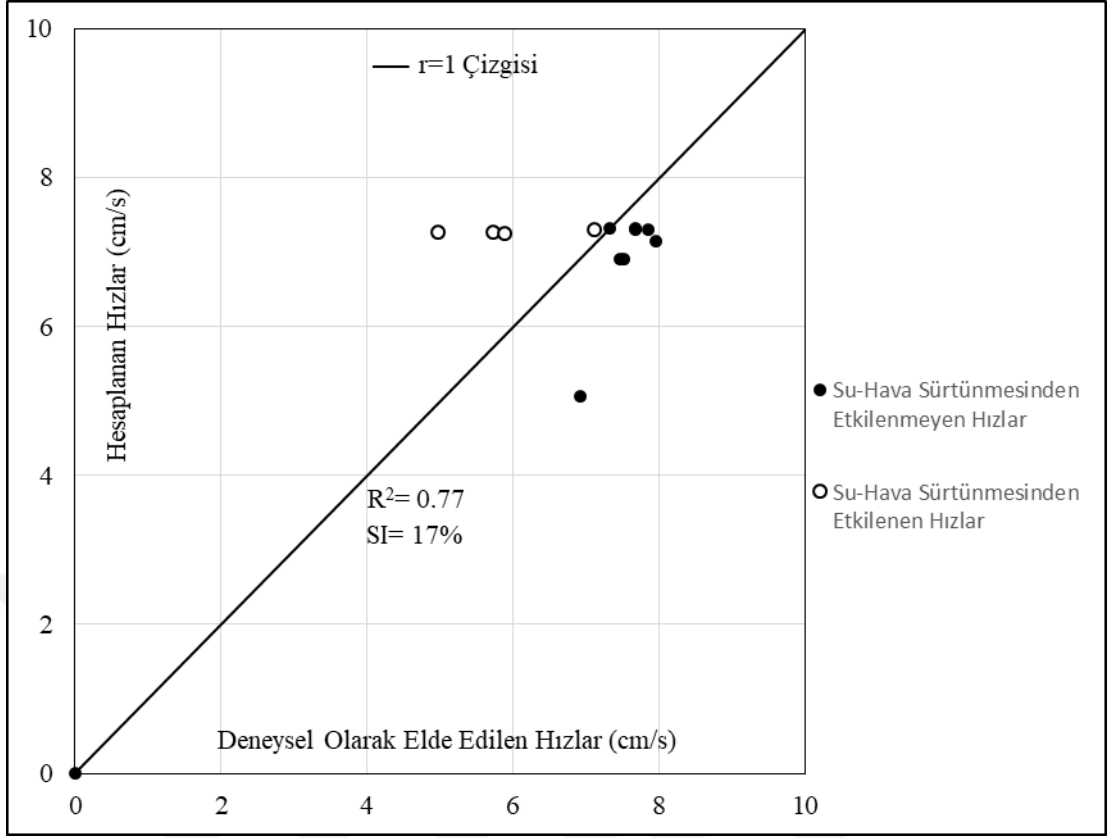
$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n}} \quad (4.6)$$

$$SI = \frac{RMSE}{Y_{ort}} \quad (4.7)$$

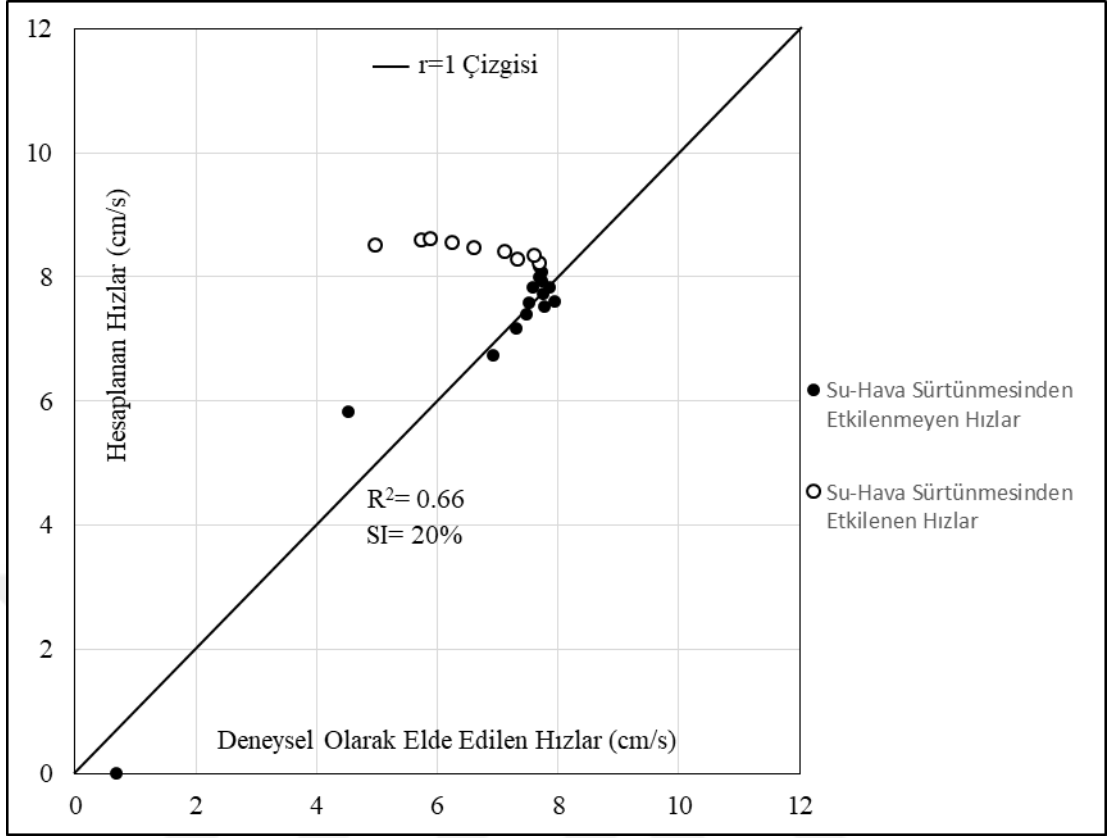
Denklemlerde yer alan  $Y_i$  ve  $Y'_i$ ; sırasıyla deneysel olarak elde edilen ve hesaplanan değerleri simgelemektedir.  $Y_{ort}$  ise deneysel olarak elde edilen veri setinin aritmetik ortalamasını temsil etmektedir. SSE; hata karelerinin toplamı, SSR; tahmin edilen değerlerin ortalamadan sapması, RMSE, hata karelerinin ortalamasının kare köküdür. 4.6 denkleminde yer alan n ise veri sayısını simgelemektedir.



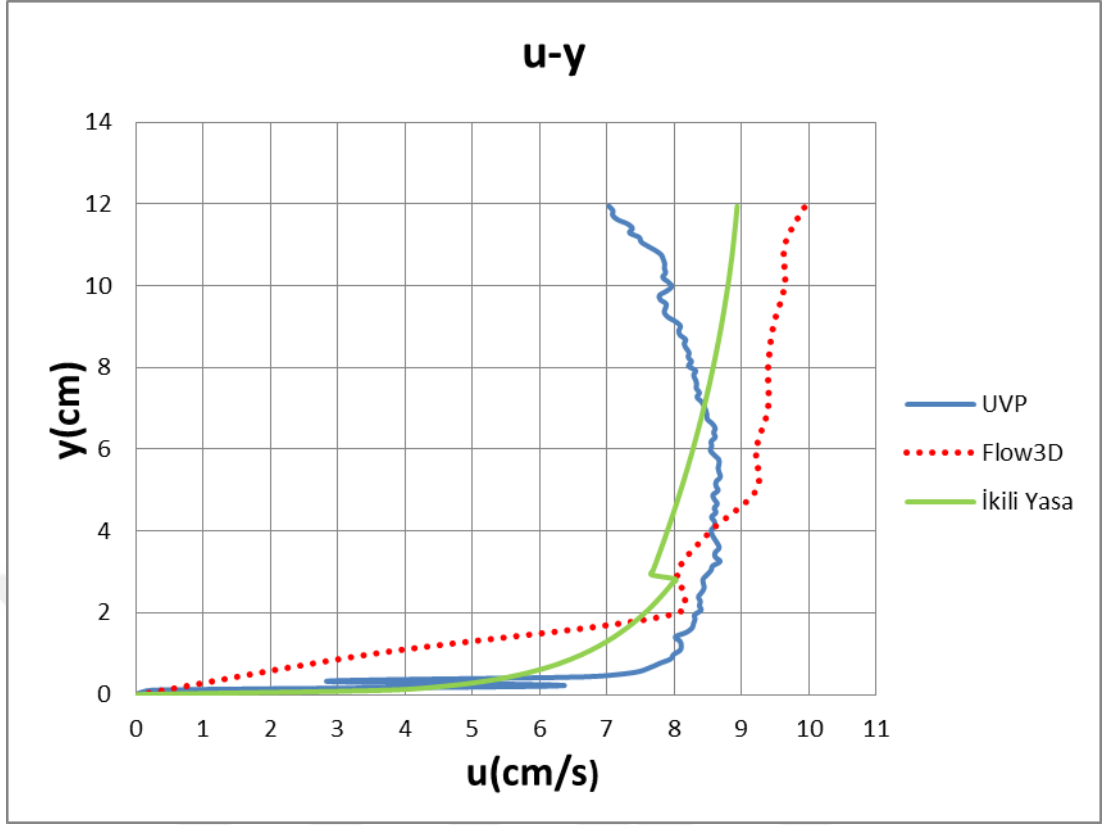
Şekil 4.21 K4 deneyi için gerçekleştirilen sayısal çözümden elde edilen düşey hız profillerinin, UVP ölçümleri ve İkili Yasa formülü aracılığı ile elde edilen düşey hız profilleri ile karşılaştırılması



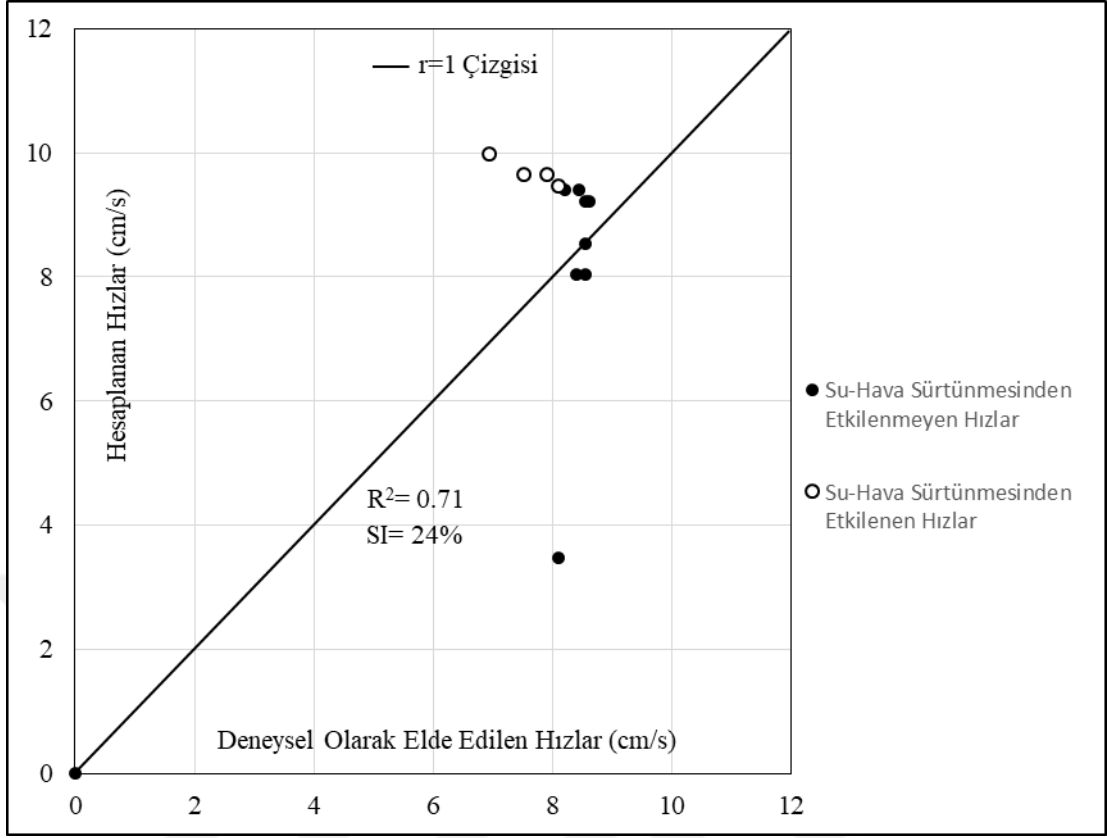
Şekil 4.22 K4 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının sayısal model aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı



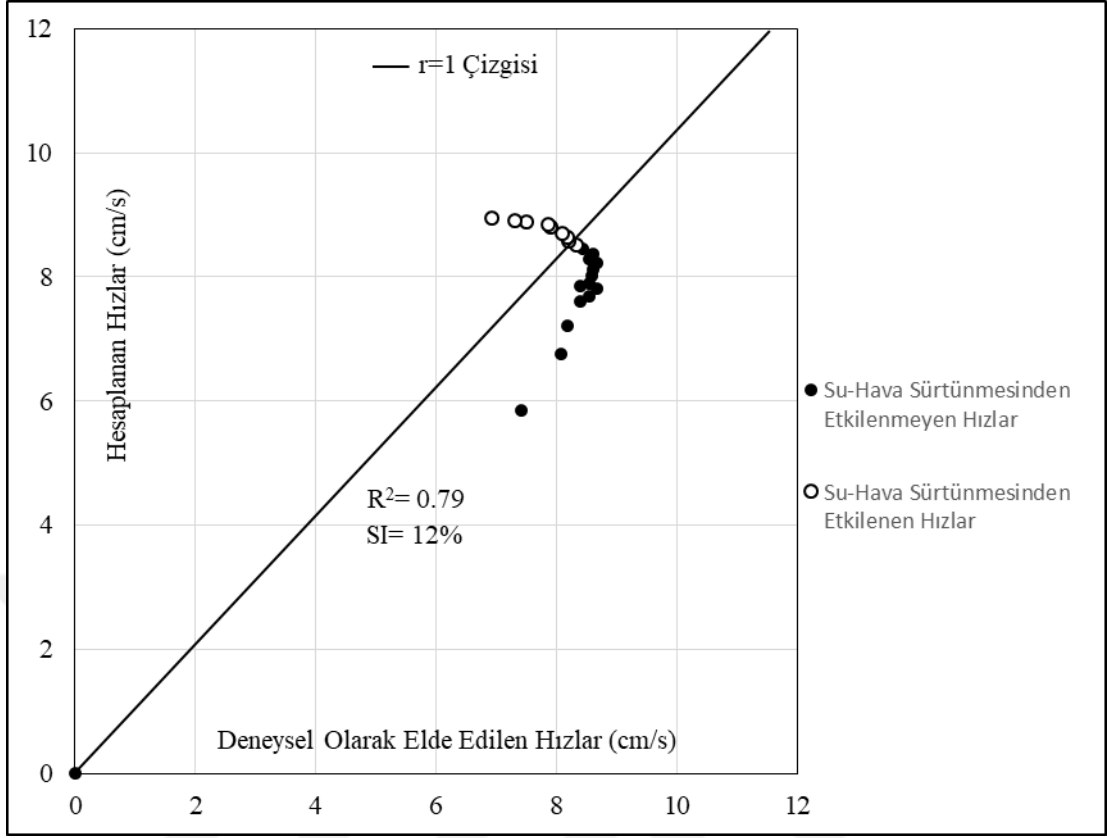
Şekil 4.23 K4 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının İkili Yasa formülü aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı



Şekil 4.24 K5 deneyi için gerçekleştirilen sayısal çözümden elde edilen düşey hız profillerinin, UVP ölçümleri ve İkili Yasa formülü aracılığı ile elde edilen düşey hız profilleri ile karşılaştırılması



Şekil 4.25 K4 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının sayısal model aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı



Şekil 4.26 K4 deneyi için gerçekleştirilen deneylerde düşey kesit boyunca elde edilen akım hızlarının İkili Yasa formülü aracılığıyla elde edilen akım hızları ile saçılma diyagramı

Grafiklerden görüldüğü üzere sayısal çözüm aracılığı ile elde edilmiş olan hız profilleri, deneyler sırasında ölçülen hız profilleri ve İkili Yasa formülü aracılığı ile elde edilen profiller ile uyumludur. Ancak serbest su seviyesine yaklaştıkça, sayısal model ve İkili Yasa ile elde edilen akım hızları, deneysel sonuçlardan uzaklaşmaktadır. Saçılma diyagramlarına bakıldığında, su ile hava arasındaki sürtünmenin akımı etkilediği bölgelerde, deneysel veriler ile hesaplanan verilerin  $r=1$  doğrusundan uzaklaştığı görülebilmektedir. Bu durum, sayısal model ve İkili Yasa formülü ile elde edilmiş olan çözümlerde, su ile hava arasındaki sürtünmenin modellenemediğini göstermektedir.

## **BÖLÜM BEŞ**

### **SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu çalışma kapsamında, açık kanalda kararlı ve kararsız akım koşullarında oluşan akım hızları, deneysel ve sayısal çözüm yöntemleri ile incelenmiştir. Deneysel, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Deneysel sırasında noktasal akım hızlarının zamana bağlı değişimi UVP ve ADV cihazları aracılığıyla ölçülmüştür. İki farklı cihazdan da elde edilen ham verilerden aykırı verilerin ayıklanması amacıyla MATLAB programı kullanılmıştır. Her bir deney en az iki kere tekrar edilmiştir. Debiler önceden kalibre edilmiş üçgen savak formülü aracılığıyla hesaplanmış olup su seviyeleri ise ULS cihazı ve limnometre kullanılarak ölçülmüştür. Cihazlardan elde edilmiş olan zamana bağlı akım hızı değerlerinin ortalamaları alınarak, kararlı akımlara ait ortalama akım hızları hesaplanmıştır. Bu ölçümlere ek olarak, kararlı akım deneylerinde açık kanalın düşey kesiti boyunca oluşan hız profilleri UVP cihazı aracılığıyla elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen düşey hız profilleri, literatürde önerilmiş Üssel Yasa, Parabolik Yasa, Logaritmik Yasa ve İkili Yasa formülleri ile elde edilen hız profilleri ile karşılaştırılmıştır. Formüllerde yer alan katsayılar için en uyumlu değerler belirlenmiştir. K1, K2 ve K3 deneylerinde cihazlardan elde edilen ortalama akım hızı değerlerinin, süreklilik formülü ile hesaplanan ortalama akım hızları ile çok yakın mertebelerde olduğu görülmüş olup, cihazların kararlı akım koşullarında güvenilir sonuçlar verdiği saptanmıştır. İki farklı cihazdan elde edilmiş olan ortalama akım hızı değerleri göz önüne alındığında, UVP cihazından elde edilen ortalama akım hızları, süreklilik formülü ile hesaplanan kesitsel ortalama hız değerlerine nispeten daha yakındır. K1, K2 ve K3 deneylerinden elde edilmiş olan düşey hız profilleri üzerine yapılan incelemeler, Üssel Yasa ve Parabolik Yasa formüllerinin, akımın 0,2h yüksekliğine kadar olan kısmını temsil eden dış bölgesinde olumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak Logaritmik Yasa formülü ile elde edilen düşey hız profillerinin, dış bölgede deneysel sonuçlar ile uyumlu olmadığı görülmüştür. Düşey hız profillerinin, akımın iç bölgesinde Logaritmik, dış bölgesinde ise Parabolik Yasa ile temsil edildiği İkili Yasa, K4 ve K5 deneylerinden elde edilen profiller ile yakın sonuçlar vermiş olup, Logaritmik Yasanın akımın iç bölgesine, Parabolik Yasanın ise

akımın dış bölgesinde uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Her bir düşey hız profili formülüne ait katsayılar, deneysel sonuçlar kullanılarak optimize edilmiştir. Bu doğrultuda N (Üssel Yasa), C (Parabolik Yasa) ve D (Logaritmik Yasa) katsayıları için sırasıyla 6, 4 ve 8,5 değerlerinin kullanılması uygun bulunmuştur.

Kararsız akım deneyleri sırasında oluşan taşkın dalgasına ait hidrograf ve zamana bağlı su seviyelerinin elde edilmesi amacı ile ULS cihazı kullanılmıştır. Zamana bağlı su seviyesi ölçümleri, iki farklı ULS algılayıcısı ile gerçekleştirilmiş olup algılayıcılardan biri taşkın haznesine, diğeri ise kanalın içine yerleştirilmiştir. Kararsız akım deneylerinde UVP ve ADV cihazlarından elde edilmiş olan zamana bağlı noktasal akım hızları karşılaştırılarak, cihazların kararsız akım koşullarındaki birbirleriyle uyumu incelenmiş olup gerçekleştirilen T1, T2, T3 ve T4 deneyleri için hızların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmalara ek olarak gerçekleştirilen deneylerin sayısal modelleri Flow3D yazılımı kullanılarak yapılmış olup elde edilen sonuçlar deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümlerde farklı türbülans modelleri denenmiş olup, sayısal model için en uygun türbülans modeli saptanmaya çalışılmıştır. Kararlı akım deneylerine ait sayısal çözümler göz önüne alındığında, Bir Denklemlilik Türbülans Enerji Modeli haricindeki bütün türbülans modelleri ile elde edilen sayısal sonuçların, deneyler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Kararsız akımda bütün türbülans modelleri deneysel sonuçlara yakın değerler vermiş olsa da K- $\omega$  modelinin tüm zaman serisi için daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Kararlı akım deneylerinde oluşan düşey hız profillerinin incelenmesi amacı ile K4 ve K5 nolu deneylerin sayısal modelleri gerçekleştirilmiş olup deneysel sonuçlar ve İkili yasa formülü ile elde edilen düşey hız profillerine yakın hız profilleri elde edilmiştir. Ancak sayısal model ve İkili Yasa formülü ile elde edilen hız profillerinin, serbest su seviyesine yaklaştıkça deneysel verilerden uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, sayısal model ve İkili Yasa çözümlerinin, su ile hava arasındaki sürtünmeyi modellemekte yetersiz olduğunu göstermiştir.

UVP cihazı, akımın düşey kesiti boyunca farklı noktalarda akım hızı ölçümleri almakta olup, bu sayede düşey hız profillerinin deneysel olarak elde edilmesine olanak sağlamaktadır. ADV cihazı ise akım hızı ölçümlerini yalnızca bir noktada gerçekleştirmektedir. Bu sebeple, düşey hız profilleri ADV cihazı ile ölçülememiştir. Ancak, ADV cihazının kanaldaki konumunun düşey kesit boyunca değiştirilmesi ile düşey hız profilleri elde edilebilir. Bu sayede, zamana bağlı olarak değişen noktasal akım hızlarında olduğu gibi, düşey hız profilleri de deneysel olarak karşılaştırılabilir.

Çalışma kapsamında kullanılmış olan deney düzeneğine kıyasla daha büyük bir deney düzeneğinin kullanılması, daha çeşitli ve büyük ölçekte debi değerlerine sahip akım koşullarının elde edilmesine olanak sağlayabilir. Böylece, akım hızları konusunda daha kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Balachandar, R., Blakely, D. ve Bugg, J. (2002). Friction velocity and power law velocity profile in smooth and rough shallow open channel flows. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(2), 256-266.
- Bazin, H. E. (1865). Recherches hydrauliques, memoires presentes par divers savants. *Science Mathematiques et Physiques, Series, 2*.
- Bonakdari, H., Larrarte, F., Lassabatere, L. ve Joannis, C. (2008). Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(1), 1-17.
- Chanson, H., Trevethan, M. ve Aoki, S. (2008). Acoustic Doppler velocimetry (ADV) in small estuary: Field experience and signal post-processing. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5), 307-313.
- Chiu, C.-L. ve Said, C. A. A. (1995). Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(1), 26-35.
- Durgesh, V., Thomson, J., Richmond, M. C. ve Polagye, B. L. (2014). Noise correction of turbulent spectra obtained from acoustic doppler velocimeters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 37, 29-41.

Gandhi, B. K., Verma, H. K. ve Abraham, B. (2016). Mathematical modeling and simulation of flow velocity profile for rectangular open channels. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 22(2), 193-203.

General Acoustics (2007). Ultralab ULS User Manual

Goring, D. G. ve Nikora, V. I. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117-126.

Hamdani, A., Ihara, T., Tsuzuki, N. ve Kikura, H. (2016). Experimental study of bubbly swirling flow in a vertical tube using ultrasonic velocity profiler (UVP) and wire mesh sensor (WMS). *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(9), 3897-3905.

Ihara, T., Kikura, H. ve Takeda, Y. (2013). Ultrasonic velocity profiler for very low velocity field. *Flow Measurement and Instrumentation*, 34, 127-133.

Kantoush, S. A., De Cesare, G., Boillat, J. L. ve Schleiss, A. J. (2008). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(3-4), 139-144.

Kim, S.-C., Friedrichs, C. T., Maa, J. P.-Y. ve Wright, L. D. (2000). Estimating bottom stress in tidal boundary layer from Acoustic Doppler Velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(6), 399-406.

- Kotzé, R., Wiklund, J., Haldenwang, R. ve Fester, V. (2011). Measurement and analysis of flow behaviour in complex geometries using the Ultrasonic Velocity Profiling (UVP) technique. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(2), 110-119.
- Lane, S. N., Biron, P. M., Bradbrook, K. F., Butler, J. B., Chandler, J. H., Crowell, M. D., ... & Roy, A. G. (1998). Three-dimensional measurement of river channel flow processes using acoustic Doppler velocimetry. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(13), 1247-1267.
- Luo, H., Singh, V. ve Schmidt, A. (2018). Comparative study of 1D entropy-based and conventional deterministic velocity distribution equations for open channel flows. *Journal of Hydrology*, 563, 679-693.
- McLelland, S. J., & Nicholas, A. P. (2000). A new method for evaluating errors in high-frequency ADV measurements. *Hydrological processes*, 14(2), 351-366.
- Mori, N., Suzuki, T. ve Kakuno, S. (2007). Noise of Acoustic Doppler Velocimeter data in bubbly flows. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(1), 122-125.
- Nikuradse, J. (1933). Stromungsgesetze in rauhen Rohren. *VDI-Forschungsheft*, 361, 1.

- Obayashi, H., Tasaka, Y., Kon, S. ve Takeda, Y. (2008). Velocity vector profile measurement using multiple ultrasonic transducers. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(3-4), 189-195.
- Prandtl, L. (1925). 7. Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 5(2), 136-139.
- Sharma, A., Maddirala, A. K. ve Kumar, B. (2018). Modified singular spectrum analysis for despiking acoustic Doppler velocimeter (ADV) data. *Measurement*, 117, 339-346.
- Shojaeezadeh, S. A. ve Amiri, S. M. (2018). Estimation of two-dimensional velocity distribution profile using General Index Entropy in open channels. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 491, 912-925.
- Song, T. ve Chiew, Y. M. (2001). Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). *Journal of Engineering Mechanics*, 127(3), 219-232.
- Sontek (2007). HorizonADV User Guide
- Vedula, S. ve Achanta, R. R. (1985). Bed shear from velocity profiles: A new approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(1), 131-143.

Voulgaris, G. ve Trowbridge, J. H. (1998). Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15, 19.

Wada, S., Tezuka, K., Treenuson, W., Tsuzuki, N. ve Kikura, H. (2012). Study on the optimal number of transducers for pipe flow rate measurement downstream of a single elbow using the Ultrasonic Velocity Profile method. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2012, 1-12.

Wu, Y., Liu, Z., Chen, Y. ve Li, M. (2018). Investigation of velocity distribution and turbulence characteristics in subcritical circular open channel flows using a modified Reynolds stress model. *Journal of Hydro-environment Research*, 19, 68-77.

Yang, S.-Q., Tan, S.-K. ve Lim, S.-Y. (2004). velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform open channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(12), 1179-1186.

Yeganeh, M. T. ve Heidari, M. M. (2020). Estimation of one-dimensional velocity distribution by measuring velocity at two points. *Flow Measurement and Instrumentation*, 73, 101737.

Zrostlík, Š., Bareš, V., Krupička, J., Pícek, T. ve Matoušek, V. (2015). One-dimensional velocity profiles in open-channel flow with intense transport of coarse sediment. *EPJ Web of Conferences*, 92, 02120.