

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Ali İSPİR**

**KRİTİK ALTI AÇIK KANAL AKIMININ DENEYSEL VE  $k$ - $e$  TÜRBÜLANS  
MODELLERİ İLE SAYISAL ANALİZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ADANA, 2014**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRİTİK ALTI AÇIK KANAL AKIMININ DENEYSEL VE k-e TÜRBÜLANS  
MODELLERİ İLE SAYISAL ANALİZİ**

**Mehmet Ali İSPİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez ....../...../2014 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından  
Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

.....  
Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ Prof. Dr. Galip SEÇKİN Doç. Dr. M. Sami AKÖZ  
DANIŞMAN ÜYE ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.  
**Kod No:**

**Prof. Dr. Mustafa GÖK  
Enstitü Müdürü**

Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.  
**Proje No: MMF2012YL10**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların  
kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere  
tabidir.

**ÖZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KRİTİK ALTI AÇIK KANAL AKIMININ DENEYSEL VE k-ε TÜRBÜLANS  
MODELLERİ İLE SAYISAL ANALİZİ**

**Mehmet Ali İSPİR**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ  
Yıl: 2014, Sayfa: 85  
Jüri : Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ  
: Prof. Dr. Galip SEÇKİN  
: Doç. Dr. M. Sami AKÖZ

Yavaş değişen kritik altı açık kanal akımının (M1 profili) hız alanı iki farklı debi durumu için bir boyutlu Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüştür. Deneyler ile aynı koşullara sahip akımları idare eden temel denklemler Standard k-ε (SKE), Renormalization Group k-ε (RNG), ve Realizable k-ε (RKE) türbülans modelleri kullanılarak sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS Fluent yazılımı ile sayısal olarak çözülmüştür. Su yüzü profilinin teorik olarak hesaplanmasında Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF) kullanılmıştır. Sayısal çözümde ağ yapısının sonuçlara olan etkisini belirlemek için Grid Convergence Index (GCI) ölçüt olarak kullanılmıştır. Sayısal hesaplardan elde edilen bulgular deneysel olarak elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, Reliazable k-ε (RKE) türbülans modelinin hız alanının hesaplanmasında, bu çalışmada kullanılan diğer türbülans modellerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Açık Kanal Akımı, LDA, Sonlu Hacimler Yöntemi, VOF, k-ε türbülans modelleri

## ABSTRACT

### MSc THESIS

# EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF SUBCRITICAL OPEN CHANNEL FLOW USING $k-\varepsilon$ TURBULENCE MODELS

Mehmet Ali İSPİR

ÇUKUROVA UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Danışman : Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ  
Yıl: 2014, Sayfa: 85  
Jüri : Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ  
: Prof. Dr. Galip SEÇKİN  
: Doç. Dr. M. Sami AKÖZ

The velocity field of gradually varied sub-critical open channel flow (M1 profile) is measured using a one-dimensional Laser Doppler Anemometry (LDA) for two different discharge conditions. Using Standard  $k-\varepsilon$  (SKE), Renormalization Group  $k-\varepsilon$  (RNG) and Realizable  $k-\varepsilon$  (RKE) turbulence models, the basic equations are solved by ANSYS-Fluent package program based on finite volume method for the same experimental conditions. The volume of fluid method (VOF) is used to determine the water surface profile theoretically. Grid Convergence Index (GCI) method is used to measure the performance of the selected grid structures. The results of numerical calculations compared with the values that obtained experimentally. The comparisons of the numerical and experimental results show that the Reliazable  $k-\varepsilon$  (RKE) turbulence model predict the velocity field more accurately compared to those of the other turbulence models used in this study.

**Key Words:** Open Channel Flow, LDA, Finite Volume Method, VOF,  $k-\varepsilon$  turbulence models

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitimim süresince, çalışmalarımnda çok büyük yardımı geçen Sayın Hocam, Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ'e en başta teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Değerli katkı ve yardımlarından dolayı Sayın Arş. Gör. Dr. Veysel GÜMÜŞ'e teşekkür ederim.

Desteklerinden dolayı Arş. Görevlileri, Oğuz ŞİMŞEK ve Nazire Göksu SOYDAN'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım esnasında tüm bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na, maddi destek veren Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: MMF2012YL10) içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, her zaman yaptıklarım ve yapacaklarım destek olan aileme teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

## SAYFA

ÖZ .....	I
ABSTRACT .....	II
TEŞEKKÜR .....	III
İÇİNDEKİLER .....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	X
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. DENEY DÜZENEĞİ VE YÖNTEM .....	13
3.1. Deney Düzeneği .....	13
3.2. Lazer Doppler Anemometresi İle Akım Hızının Ölçülmesi .....	16
4. TEMEL DENKLEMLER VE TÜRBÜLANS MODELLERİ.....	21
4.1. TEMEL DENKLEMLER .....	21
4.1.1.Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Süreklilik Denklemi .....	21
4.1.2.Sıkışmayan Türbülanslı, Newtonian Akışkan Akımında Hareket Denklemleri (Reynolds Denklemleri).....	22
4.2. TÜRBÜLANS MODELLERİ.....	27
4.2.1. Standard k-ε Türbülans Modeli (SKE).....	29
4.2.2. Renormalization Group k-ε Türbülans Modeli (RNG).....	30
4.2.3. Realizable k-ε Türbülans Modeli (RKE).....	33
5. SAYISAL ÇÖZÜM .....	35
5.1. Sonlu Hacimler Yöntemi.....	35
5.2. Akışkan Hacimleri Yöntemi ile Serbest Yüzeyin Bulunması.....	38
5.3. Ağ Yakınsama İndeksi (GCI).....	39
6. AÇIK KANAL AKIMININ HAD İLE MODELLENMESİ .....	41
6.1. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları.....	41
6.2. Cidar Bölgesinin Modellenmesi.....	42
6.3. Sonlu Hacimler Hesaplama Ağı.....	43

6.4. Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) Uygulaması .....	44
7. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	49
7.1 Hesaplanan Hız Profillerinin Deneylerle Karşılaştırılması.....	49
7.2. Deneysel Hızların Türbülans Özellikleri .....	60
7.3. Hız Dağılımının Modellenmesi.....	72
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	77
KAYNAKLAR .....	81
ÖZGEÇMİŞ .....	85

## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

Çizelge 3.1. Kanaldaki deney koşulları.....	15
Çizelge 6.1. Üç farklı yoğunluktaki ağlar için bölgelerdeki eleman sayıları.....	44
Çizelge 6.2. $x=0.35$ m kesiti için GCI değerleri .....	45
Çizelge 6.3. $x=0.70$ m kesiti için GCI değerleri .....	45
Çizelge 6.4. $x=1.10$ m kesiti için GCI değerleri .....	46
Çizelge 6.5. $x=1.50$ m kesiti için GCI değerleri .....	46
Çizelge 6.6. $x=1.90$ m kesiti için GCI değerleri .....	46
Çizelge 7.1. Deney 1 durumunda SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH değerleri.....	50
Çizelge 7.2. Deney 2 durumunda SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH değerleri.....	51





## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

Şekil 3.1. Deneş kanalının mansap tarafından görünümü .....	14
Şekil 3.2. Deneş kanalının memba tarafından görünümü.....	14
Şekil 3.3. Deneş düzeneğinin şematik gösterimi ve LDA yerleşimi .....	15
Şekil 3.4. BSA Flow Software yazılımının ekran görüntüsü .....	17
Şekil 3.5. BSA Flow Software yazılımının ekran görüntüsü .....	17
Şekil 3.6. Türbülanslı akımda zamansal ortalamalı hızın tespiti .....	18
Şekil 5.1. Örnek kontrol hacmi .....	36
Şekil 5.2. Hesaplama ağıında eleman doluluk oranı .....	38
Şekil 6.1. Sayısal hesaplama bölgesi ve sınır şartları .....	42
Şekil 6.2. Deneş 1 durumu için RKE türbülans modeli ile elde edilen $y^+$ değerinin kanal boyunca değişimi .....	43
Şekil 6.3. Sayısal modelin hesaplama ağıında kullanılan alt bölgeler .....	44
Şekil 7.1. Deneş 1 durumu için kanalın farklı kesitlerinde deneşsel ve sayısal hız profilleri .....	53
Şekil 7.2. Deneş 2 durumu için kanalın farklı kesitlerinde deneşsel ve sayısal hız profilleri .....	57
Şekil 7.3. Deneş 1 durumu için kanalın farklı kesitlerindeki deneşsel hız profilleri ile anlık hız değerlerinin zamansal değişimleri .....	62
Şekil 7.4. Deneş 2 durumu için kanalın farklı kesitlerindeki deneşsel hız profilleri ile anlık hız değerlerinin zamansal değişimleri .....	67
Şekil 7.5. Deneş 1 durumu için Logaritmik Duvar Kanunu dağılımı.....	74
Şekil 7.6. Deneş 2 durumu için Logaritmik Duvar Kanunu dağılımı.....	75



## SİMGELER VE KISALTMALAR

a	: İvme
C	: Türbülans modeli sabiti
CFD	: Computational Fluid Dynamics
D	: Difüzyon terimi
d	: Mesh yüksekliği
$\frac{1}{f}$	: Birim hacme gelen dış kuvvet
F	: Kuvvet
Fr	: Froude sayısı
g	: Yer çekimi ivmesi
G	: Türbülans kinetik enerji üretim miktarı
GCI	: Grid Convergence Index
I	: Türbülans şiddeti
$h_0$	: Su yüksekliği
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
k	: Türbülans kinetik enerjisi
$\vec{K}$	: Kütleli kuvvetlerin bileşkesi
LDA	: Lazer doppler anemometresi
$l_m$	: Uzunluk ölçeği
m	: Kütle
N	: Değer sayısı (adet)
OKH	: Ortalama karesel hata
OMGH	: Ortalama mutlak göreceli hata
$\bar{p}$	: Ortalama basınç
$p'$	: Basınç sapıncı
PIV	: Particle image velocimetry
Q	: Debi
r	: Mesh yükseklikleri oranı
R	: Hidrolik yarıçap

$Re$	: Reynolds sayısı
RKE	: Realizable k- $\epsilon$ türbülans modeli
RNG	: Renormalization Group k- $\epsilon$ türbülans modeli
SKE	: Standard k- $\epsilon$ türbülans modeli
$S_{ij}$	: Şekil değiştirme hızı tansörü
$t$	: Zaman
$T$	: Periyod
$\vec{T}$	: Gerilme vektörü
$u$	: x yönündeki akım hızı
$\bar{u}$	: x yönündeki ortalama akım hızı
$u'$	: x yönündeki hız sapıncı
$u_*$	: Kayma hızı
$v$	: y yönündeki akım hızı
$V$	: Bileşke hız
$\bar{v}$	: y yönündeki ortalama akım hızı
$v'$	: y yönündeki hız sapıncı
VOF	: Akışkan hacimleri yöntemi
$w$	: z yönündeki akım hızı
$\bar{w}$	: z yönündeki ortalama akım hızı
$w'$	: z yönündeki hız sapıncı
$\omega$	: Açısal hız
$X$	: x doğrultusunda etkiyen kütleel kuvvet
$Y$	: y doğrultusunda etkiyen kütleel kuvvet
$Z$	: z doğrultusunda etkiyen kütleel kuvvet
$t$	: Kayma gerilmesi
$r$	: Suyun özgül kütlesi
$u$	: Suyun kinematik viskozitesi
$\Delta t$	: Zamandaki değişim miktarı
$\sigma$	: Gerilme
$\bar{\sigma}$	: Ortalama Gerilme

$\mu$	: Dinamik viskozite
$\mu_t$	: Türbülans viskozitesi
$m_{t,2layer}$	: Viskoziteden etkilenen bölgedeki türbülans viskozitesi
$\delta_{ij}$	: Kronecker delta
$\varepsilon$	: Türbülans Kinetik enerji kayıp oranı
$\underline{\tau}^c$	: Çalkantı gerilmesi tansörü
$G$	: Difüzivite terimi
$\eta$	: Türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve kayıp oranının fonksiyonu
$\beta$	: Türbülans modeli sabiti
$\alpha$	: Efektif Prandtl sayılarının tersi
$\tilde{\Omega}_{ij}$	: Dönme miktarı
$\kappa$	: von-Karman sabiti
$\varphi$	: Basınç uzatma terimi
$\delta$	: Sınır tabakası yüksekliği
$l_e$	: Geçiş fonksiyonu



## 1. GİRİŞ

Açık kanal akımları; atmosfer basıncına maruz kalan, serbest yüzeyle, akım ıslak kesitinin katı sınırla tamamen çevrelenmediği akımlardır. Açık kanal akımları serbest yüzeyle akımlar olarak da adlandırılır ve doğal ortamlardaki akarsu ve deniz akımları ile sulama ve boşaltma kanalları gibi yapay kanallardaki akımları kapsar.

Açık kanal akımları akım karakteristiklerinin zamanla değişimine göre düzenli veya değişken, kesitten kesite değişimine göre ise üniform veya üniform olmayan şekilde sınıflandırılır. Düzenli akım; akım hızının veya derinliğinin zamanla değişmediği, değişken akım ise akım hızının veya derinliğinin zamanla değiştiği akım türüdür. Akım hızı ve derinliği kesitten kesite değişmiyorsa üniform akım, değişiyorsa üniform olmayan (değişen) akım olarak adlandırılır.

Açık kanal akımları, ağırlık ve sürtünme kuvvetlerinin etkisi altında oluşur. Ağırlık ve sürtünme kuvvetlerinin yanı sıra yüzeysel kuvvetler de, açık kanal akımlarının hareketinde az da olsa rol oynar. Açık kanal akımlarında akım karakteristiklerinin belirlenmesinde önemli bir parametre akımlarda atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine oranı ile ifade edilen Reynolds sayısıdır. Reynolds sayısı boyutsuz bir büyüklük olup akımın laminar, türbülanslı ya da geçiş akımı olup olmadığını belirleyicidir. Reynolds sayısı akımın hızı,  $V$ , akışkanın yoğunluğu,  $\rho$ , viskozite,  $\mu$ , ve karakteristik boyutlardan etkilenen bir büyüklüktür ( $Re=4\rho VR/\mu$ ,  $R$ =Hidrolik yarıçap). Viskoz kuvvetlerinin atalet kuvvetlerine baskın olduğu akımlarda Reynolds sayısı küçülür ve laminar akım özellikleri görülür. Aksi durumda ise atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlere baskın olacağından akım türbülanslı akışın etkisindedir. Geçiş akımı ise laminar akım ile türbülanslı akım arasında her iki oluşumdaki özelliklerin birlikte görüldüğü akış biçimidir.

Açık kanal akımlarının sınıflandırılmasında kullanılan diğer bir boyutsuz büyüklük ise Froude ( $Fr = V/\sqrt{gh}$ ,  $h$ = derinlik) sayısıdır. Froude sayısı atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranı ile ifade edilir. Froude sayısının 1'den küçük olması durumunda ( $V < \sqrt{gh}$ ) akım, 'kritik altı akım veya nehir rejimi akımı' olarak adlandırılır. Açık kanal akımlarında genellikle karşılaşılan durumdur. Büyük akım



derinliği küçük hız, küçük eğim bu rejimin belli başlı karakteristikleridir (Özbek, 2009). Bu durumda ağırlık kuvvetleri atalet kuvvetlerine üstün durumdadır. Froude sayısının 1'den büyük olması halinde ise ( $V > \sqrt{gh}$ ) akım, 'kritik üstü akım veya sel rejimi akımı' olarak adlandırılır. Nehir rejiminin aksine bu durumda atalet kuvvetleri ağırlık kuvvetlerine üstün durumda olur. Vahşi dereler ve dolusavakların boşaltım kanallarında karşılaşılan durumdur. Küçük akım derinliği, büyük hız, büyük eğim bu rejimin karakteristikleridir (Özbek, 2009). Froude sayısının 1'e eşit olması ( $Fr=1$ ) halinde ise akım 'kritik akım' olarak adlandırılır. Sel rejiminden nehir rejimine ve nehir rejiminden sel rejimine geçişlerde görülür. Açık kanallarda kritik altı akımlar normal su yüksekliğinin kritik su yüksekliğinden yüksek olduğu yerlerde, kritik üstü akım ise normal su yüksekliğinin kritik su yüksekliğinden düşük olduğu yerlerde görülür. Kritik su yüksekliği ise akımın kanal boyunca minimum enerjiye sahip olduğu yerdeki su yüksekliğidir.

Günümüzde su ile etkileşim halindeki yapıların analiz ve tasarımında açık kanallardaki akım davranışının analizi önemli bir yer tutmaktadır. Akım alanlarının incelenmesinde çoğunlukla diferansiyel yöntemler, integral yöntemleri, boyut analizi ve deneysel yöntemler kullanılır. Diferansiyel ve integral yöntemleri, Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin çözümüne dayandığından çoğu zaman bir takım kabullerle denklemler basitleştirilerek çözüm yapılır. Bazı durumlarda eğer çözüm bu kabullerle sağlanamıyorsa temel denklemlerin sayısal çözümünü sağlayan analiz yöntemlerine başvurulur. Bilgisayar teknolojilerinde kat edilen gelişmeler birçok mühendislik uygulamasında önemli yararlar sağlamış ve gerçek akım problemlerinin kabul edilebilir bir hata ile çözümünü mümkün hale getirmiş, su akımının davranışı hakkında ayrıntılı bilgi edinme olanağı sunmuştur. Özellikle türbülanslı akımların analitik çözümünde, türbülanslı akımları idare eden temel denklemlerin sayısal yöntemlerle çözülmesi, karşılaşılan güçlükler sebebiyle bilgisayar kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri bu zorunluluk neticesinde ortaya çıkmış ve akımların sayısal olarak analizinde büyük kolaylıklar getirmiştir. HAD yöntemleri yeni mühendislik uygulamaları ve geliştirilen çözüm teknikleri çerçevesinde sürekli olarak gelişimini devam ettirmektedir.

Su ile etkileşimde bulunan mühendislik yapılarının analiz ve tasarımında genellikle iki temel yaklaşımdan yararlanılmaktadır. Bunlar deneysel ve sayısal yöntemlere dayanmaktadır. Bu tür problemlerin sayısal yöntemlerle analizi günümüzde giderek daha yaygın bir hal almaktadır. Bir problem ele alınırken öncelikle laboratuvar ortamında bir fiziksel model kurulur ve ölçümler yapılır. Modelleme sonrasında ise akımın HAD yöntemleriyle analizine geçilir. HAD yazılımları ile temel denklemler çözülür ve akıma ait kayma gerilmeleri, hız, basınç dağılımları ve türbülans karakteristikleri ile ilgili bilgiler elde edilir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorumlamalarda bulunulur.

Bu çalışmada, dikdörtgen yumuşak eğimli yavaş değişen uniform-olmayan bir kanaldaki akımın hızları iki farklı debi durumunda Lazer Doppler Anemometresi (LDA) yardımıyla ölçülmüş, sonlu hacimler yöntemlerine dayalı ANSYS-Fluent paket programı ile akım sayısal olarak modellenmiş ve analizi yapılmıştır. Türbülanslı akımın sayısal çözümünde k- $\epsilon$  tabanlı türbülans modellerinden; Standard k- $\epsilon$  (SKE), Renormalization Group k- $\epsilon$  (RNG) ve Realizable k- $\epsilon$  (RKE) türbülans modelleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ağ yapısının sayısal çözümler üzerindeki etkisini araştırmak, çözümlerin ağ yapısından bağımsız hale geldiği durumu belirleyebilmek için Grid Convergence Index (GCI) yaklaşımı kullanılmıştır. Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF) kullanılarak su yüzü profili teorik olarak belirlenmiştir. Sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü profili ve çeşitli kesitlerdeki akım hız profilleri, deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış ve kullanılan türbülans modellerinin başarısı test edilmiştir.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yeryüzünde suyun var oluşundan bu yana geçmiş zamanlarda olduğu gibi günümüzde de açık kanal akımlarının önemi oldukça büyük olmuştur. Açık kanal akımları farklı mühendislik dallarının temel konuları arasında yer alması sebebiyle birçok farklı mühendislik disiplinde araştırma konusu olmuştur. Günümüzde de bu konudaki çalışmalar aralıksız bir şekilde devam etmektedir. İnşaat Mühendisliği açısından bakıldığında ise suyla etkileşim halinde olan birçok yapı açık kanal akımı kuvvetlerinin etkisi altında kalmaktadır. Bu sebeple İnşaat Mühendisliğini ilgilendiren yapıların analiz ve tasarımında açık kanal akımlarının analizi oldukça önemli bir yer tutmaktadır.

Açık kanal akımlarının deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak analizi ile ilgili geçmişte yapılan çalışmalardan bazıları hakkında aşağıda özet bilgiler sunulmaktadır.

Alfrink ve Van Rijn (1983), tarafından yapılan çalışmada basamaklı trapez kesitli açık kanal akımında iki denklemlilik türbülans modellerinin kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmış, değişken, çevrıntili bir akımda Reynolds denklemleri ve k-ε türbülans kapatma modeli kullanılarak akım matematiksel olarak modellenmiştir. Gelişmekte olan açık kanal akımı, giriş hız profili referans alınarak modellenmiş, sayısal çözüm bulguları deneysel ölçümlerle kıyaslanarak k-ε türbülans modelinin akımı idare eden temel denklemlerin çözümünde başarılı olduğu ve modeldeki sabitlerin pürüzlük koşullarından etkilendiği tespit edilmiştir.

Montes (1997), savak kapakları üzerine yaptığı çalışmasında düzlemsel bir kapak altındaki sürtünmesiz akım durumunu sayısal olarak incelemiştir. Akım boyunca elde edilen hız, su yüzü profili ve basınç dağılımı değerlerini deneysel ölçümlerle kıyasladığında sonuçların birbirine yakın olduğunu belirlemiştir. Çalışmasında, sayısal ve deneysel bulgulardaki daralma katsayısı değerlerindeki tutarsızlıklar üzerine yoğunlaşmış ve tutarsızlığın kapağın membasında oluşan çevrıntili akım yapısının neden olduğu enerji kaybından kaynaklandığını belirlemiştir.

Chen ve ark. (2002), çalışmalarında, daha önce fiziksel model testleri ile performansını değerlendirdikleri, iyi bir enerji kırıcı yapı olan basamaklı dolusavak üzerindeki akımı sayısal modelleme ile analiz etmişlerdir. Analizlerinde k- $\epsilon$  türbülans modelini kullanarak akıma ait parametreleri tespit etmiş, düzgün olmayan sınır tabakalarında; yapılandırılmamış ağ yapısı, kompleks su yüzünün analizinde ise VOF yöntemini kullanmışlardır. Elde edilen sayısal bulgular deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında basamaklı dolusavak üzerindeki karmaşık akımların analizinde, k- $\epsilon$  türbülans modeli ve VOF yönteminin türbülanslı sayısal çözümlerde etkili ve pratik metotlar olduklarını rapor etmişlerdir.

Chatila ve Tabbara (2004), Ogee profilli dolusavak üzerinde yaptıkları çalışmalarında laboratuvar ortamında farklı debilerle elde ettikleri ölçümleri, HAD yazılımı olan, sonlu elemanlar metoduna dayalı ADINA yazılımı ile sayısal analizleri sonucunda elde ettikleri bulgularla mukayese etmişlerdir. Analizlerinde türbülans modeli olarak Standart k- $\epsilon$  türbülans modelini kullanmış, sayısal ve deneysel bulguların birbiriyle uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır.

Sarker ve Rhodes (2004), dikdörtgen geniş başlıklı bir savak üzerindeki açık kanal akımında serbest yüzey profilinin deneysel ve sayısal olarak elde edilmesi amacıyla yaptıkları çalışma sonucunda, sayısal analizde standard k- $\epsilon$  türbülans modelini kullanarak memba su yüksekliğini mükemmel bir şekilde, savak üzerindeki hızlı değişen akım profilini ise oldukça iyi bir şekilde tahmin etmişlerdir.

Gao ve Chow (2005), tarafından yapılan çalışmada kübik bir yüzeye doğru hareket eden hava akımının sayısal olarak analizi k- $\epsilon$  türbülans modelleri kullanılarak yapılmıştır. Farklı giriş hava hızlarında RANS (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes) denklemlerinin sonuçları karşılaştırılmış, küp üzerindeki köşelerde akım ayrılmaları ve yeniden birleşmeleri, ayrılma seviyeleri araştırılmıştır. Türbülans kinetik enerjisinin maksimum olduğu yer ile akım ayrılma ve birleşme yerleri farklı türbülans modelleri ile tahmin edilmiş model sonuçlarının birbirleriyle kıyaslanmaları sonucunda ise SKE türbülans modelinden elde edilen bulguların deneysel olarak rüzgar tüneline modellenen kübik yüzey üzerinde yapılan ölçümlere daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

Berg ve ark. (2006), türbülanslı bir akımda serbest su jetini sayısal olarak modellemek için, k- $\epsilon$  ve k-w türbülans kapatma modellerini kullanmış, her model için sabit bir hız profili ve deneysel verilere adapte edilmiş hız profili sınır şartı tanımlamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda türbülans modellerini ve sınır şartlarını kıyaslamışlar, deneysel verilere adapte edilmiş hız profili sınır şartında k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak yapılan analizin akım özelliklerinin tahmin edilmesinde daha başarılı olduğunu belirlemişlerdir.

Ramamurthy ve ark. (2006), serbest yüzeyli açık kanal akımlarının çözümlerinde VOF yönteminin çözümlere getirdiği değişiklikleri tespit etmek amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Bu amaçla serbest yüzeyli 3 boyutlu trapez kesitli bir açık kanal akımına k- $\epsilon$  türbülans modeli ile uygulanan VOF modelini, basınç değişimi, hız dağılımı ve su yüzü profilini belirlemek için kullanmış özellikle su yüzü profilinin belirlenmesinde bu metodun deneysel bulgulara oldukça yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Aköz ve ark. (2007), çalışmalarında birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak gözlenen batmış silindirik yapılar etrafındaki akımı ele almıştır. Boru hatları, köprü ayakları gibi deniz dibine batırılmış yapılara gelen hidrodinamik kuvvetler ve bu yapıların hidrodinamik kuvvetlere karşı gösterdikleri tepkiler üzerine çalışmalar yapmışlardır.  $Re_D (=u_0D/\nu)=9500$  ( $Re_D$  : Silindir çapına bağlı Reynold sayısı,  $u_0$  : Hız, D: Silindir çapı,  $\nu$ : Kinematik viskozite) olan bir akımda, silindirle taban arasındaki boşluk oranı  $G/D=0.2$  (G: silindir ile taban arası mesafe, D: Silindir Çapı) olacak şekilde tabana yakın yatay bir silindir etrafındaki akımın hız alanı deneysel ve teorik olarak incelenmiş, akım hızları bir lazer yardımıyla akışkan partiküllerinin binlerce fotoğrafının çekilerek sıvının davranışının incelenmesini konu alan PIV (Particle Image Velocimetry) tekniği yardımıyla ölçülmüştür. Akım hızlarının hesaplanması için temel denklemler, k- $\epsilon$ , k-w ve SST (Shear Stress Transport) türbülans modelleri kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS yazılımı ile çözülmüştür. Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan akım hızları, akım çizgileri deneysel bulgularla uyumlu olmakla birlikte hız alanının ve silindir ayrılma

bölgesindeki vorteks çiftinin geometrik yapısı bakımından SST türbülans modelinin diğer modellerden daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Öner ve ark. (2007), geniş başlıklı bir savaktaki akımın analiz edilmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında, dikdörtgen geniş başlıklı bir savaktaki iki boyutlu akımın memba bölgesindeki akım hızları PIV tekniği ile ölçülmüş, akım k- $\epsilon$ , k-w ve SST türbülans modelleri kullanılarak ANSYS 10.0 CFD paket programı ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal hesaplamalar sonucunda bulguların hesaplama ağı yapısına büyük ölçüde duyarlılık gösterdiği tespit edilmiştir. Su yüzü profilinin elde edilmesinde ise VOF yöntemi kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında akım hızları ve su yüzü profilinin elde edilmesinde k-w türbülans modelinin, k- $\epsilon$  ve SST türbülans modellerine göre deneysel bulgulara daha yakın sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.

Aköz ve ark. (2009), dolusavak kapağı membasındaki türbülanslı iki boyutlu açık kanal akımını önce laboratuvar ortamında, daha sonra aynı koşullardaki akımı sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal çözümlerinde türbülans modeli olarak k- $\epsilon$  ve k-w modellerini, akımın su yüzü profili belirlemek için ise VOF yöntemini kullanmışlardır. Sekiz farklı hesaplama ağı için yaptıkları çalışmaları sonucunda sayısal ve deneysel bulguları karşılaştırarak en uygun ağ tasarımını belirlemişlerdir. Su yüzü profili ve hız alanı bulguları karşılaştırıldığında deneysel sonuçlara, k- $\epsilon$  türbülans modelinin, k-w türbülans modelinden daha çok yaklaştığını tespit etmişlerdir.

Kırkgöz ve ark. (2009), “Numerical Modeling of Flow Over a Chute Spillway” başlıklı çalışmalarında iki boyutlu dairesel başlıklı bir dolusavak şut kanalını sonlu elemanlar metodu kullanarak k- $\epsilon$  ve k-w türbülans modelleri yardımıyla sayısal olarak modellemiş ve serbest yüzey profilinin tahmininde VOF yöntemini kullanmışlardır. Araştırmalarında ağ yoğunluğu üzerinde çalışmış ve üç farklı yoğunluktaki ağ yapısından elde ettikleri sonuçları kıyaslamışlardır. Sayısal modellerin analizleri sonrasında hesaplanan ‘Ortalama Karesel Hata (OKH) değerleri kıyaslandığında; serbest yüzey profilinin tahmini ve hız profilleri bulgularına göre iki

türbülans modelinin de uygun sonuçlar verdiğini bununla birlikte k- $\epsilon$  türbülans modelinden k-w modeline göre daha iyi sonuçlar alındığını rapor etmişlerdir.

Kırkgöz ve ark. (2009), pürüzsüz yatay dairesel bir silindir etrafındaki katı sınıra yakın, açıklık oranı  $G/D=0.3$  ve  $Re_D (=u_0D/\nu)=9500$  olan iki boyutlu türbülanslı akımın sayısal olarak modellenmesi üzerine araştırmalarda bulunmuşlardır. Çalışmalarında türbülans modelleri olarak standard k- $\epsilon$ , standard k-w ve SST türbülans modellerini kullanarak modellerin performanslarını incelemişlerdir. Silindir yüzeyine yakın yerlerde türbülans modellerinin her biri için üç farklı yoğunlukta hesaplama ağı düzenlemişlerdir. PIV ile yaptıkları ölçümler ve sayısal analizlerin bulgularını kıyasladıklarında akımdaki zamansal ortalama hızın silindir yüzeyindeki ağ çözünürlüğünden etkilendiğini ve radyal yöndeki ağ sıkılaştırmalarının, sonuçları olumlu yönde geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda k-w ve SST türbülans modellerinin, akımdaki zamansal ortalama hız değerleri için en sıkı ağ durumunda başarılı sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Qu ve ark. (2009), tarafından keskin kenarlı bir savak ile etkileşim halindeki dikdörtgen kesitli bir açık kanal akımında basınç dağılımı, hız dağılımı ve su yüzü profilinin sayısal olarak elde edilmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada k- $\epsilon$  türbülans modeli ve su yüzü profilinin elde edilmesinde VOF yöntemi kullanılmış, deneysel bulgulara oldukça yakın değerler elde edilmiştir.

Bal (2011), tarafından yapılan “Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi” başlıklı çalışmada, geniş başlıklı bir savak içeren dikdörtgen kesitli açık kanal akımı irdelenmiştir. Akım iki farklı debi koşulunda laboratuvar ortamında deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve sonrasında sayısal olarak analiz edilmiştir. Akımın sayısal analizinde SKE, RNG, RKE, MKW (Modified k-w), SST ve RSM (Reynold Stress Model) türbülans modelleri kullanılmıştır.  $Re=18500$  olan debi durumunda akımın sayısal analizi sonucunda savak membasında, savak üzerinde ve savak mansabındaki sonuçlara göre RNG türbülans modelinin kullanıldığı analiz bulgularının,  $Re=25900$  olan debi durumunda ise SST



türbülans modelinin kullanıldığı analiz bulgularının deneysel bulgulara daha yakın değerler verdiği tespit edilmiştir.

Şimşek (2011), eğrisel geniş başlıklı bir savak akımını sonlu hacimler yöntemi temeline dayalı ANSYS Fluent paket programıyla sayısal olarak analiz etmiştir. Çalışmasında k- $\epsilon$  türbülans modellerinden SKE, RNG ve RKE modelleri, su yüzü profilinin hesabında ise VOF yöntemini kullanmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda sayısal ve LDA yardımıyla ölçülen deneysel bulgular kıyaslanmış ve RNG türbülans modelinin akım karakteristiklerinin belirlenmesinde diğer iki modele göre daha başarılı olduğunu tespit etmiştir.

Kırkgöz ve ark. (2011), tarafından üzerinde kayar kapak bulunan dikdörtgen kesitli geniş başlıklı bir savakla etkileşim halindeki açık kanal akımının hız alanı LDA tekniği yardımı ile ölçülmüş, akımı idare eden temel denklemler sayısal olarak ANSYS-Fluent yazılımı ile çözülmüştür. Çalışmada SKE, RNG, RKE, SST, RSM türbülans modelleri, su yüzünün teorik olarak hesaplanmasında ise VOF yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellerden elde edilen akım hızları ve su yüzü profilleri deneysel olarak elde edilen bulgularla karşılaştırılmış, RKE ve RSM türbülans modellerinin diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Memba ve mansaptaki üniform akım bölgelerinde ise RKE modelinin belirgin bir şekilde üstün olduğu rapor edilmiştir. Katı sınır sürtünmelerinin ve yüzey değişimlerinin bulunduğu bölgelerde yapılan ağ sıkılaştırmalarının da sonuçları olumlu yönde etkilediği bildirilmiştir.

Kırkgöz ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada düşey bir kapakla kontrol edilen yarı silindirik bir savak üzerindeki akımı, laboratuvar ortamında iki farklı debi durumunda incelemiştir. Akımın sayısal olarak modellenmesinde SKE, RNG, RKE türbülans modellerini, su yüzünün tahmininde ise VOF yöntemini kullanmışlardır. Sayısal analiz sonuçlarını deneysel bulgularla karşılaştırdıklarında SKE türbülans modelinin diğer modellerden açıkça daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Crookston ve ark. (2012), memba kaynak oranının (toplam memba su yüksekliğinin savak yüksekliğine oranı) 1 den büyük olduğu durumda çalışan labirent tipi savakların hidrolik performansının araştırılmasında fiziksel ve sayısal

model tekniklerini kullanmışlardır. Sayısal modellemede Flow-3D yazılımını kullanmışlar, analizleri sonucundaki tespitlerinde; HAD yazılımlarının, labirent tipi savaklarda yükseklik debi ilişkisini kaynak oranının 1 den büyük olduğu durumlarda yani memba su yüksekliğinin savak yüksekliğini geçtiği durumlarda oldukça iyi bir şekilde çözümleyebildiğini belirlemişlerdir.

Gümüş ve ark. (2012), tarafından yapılan “Tambur Kapak Mansabında Oluşan Batmış Hidrolik Sıçramanın Sayısal Analizi” başlıklı çalışmada açık kanal akımlarında debiyi kontrol etmek için kullanılan tambur kapak, mansabında batmış hidrolik sıçrama oluşan bir açık kanal akımı üzerinde kullanılmış ve bu akımın sayısal ve deneysel olarak analizi yapılmıştır. Deneysel ölçümler iki farklı debi durumunda gerçekleştirilmiş ve SKE, RNG, SST türbülans kapatma modelleri kullanılarak sayısal olarak da analiz edilmiştir. Kanal boyunca su yüzünün hesaplanmasında akışkan hacimleri yönteminden yararlanılmıştır. Sayısal sonuçları hesaplama ağının yoğunluğundan bağımsızlaştırabilmek için GCI analizi yapılmış ve ince ağıın tasarımı hesaplama hatası %2'nin altında olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel su yüzü profillerinin karşılaştırılması sonucunda ise SST türbülans modelinin diğer modellere göre daha iyi sonuç verdiği rapor edilmiştir.

Gümüş ve ark. (2012), düşey bir kapak mansabında oluşan serbest hidrolik sıçrama durumunu iki farklı akım durumu için sayısal ve deneysel olarak modellemişlerdir. İki boyutlu türbülanslı akımın sayısal çözümünde sonlu hacimler yöntemini, türbülanslı akımı idare eden temel denklemlerin çözümünde SKE, RNG, ve SST türbülans kapatma modellerini kullanmışlardır. Kanal boyunca akım profilinin elde edilmesinde VOF metodundan yararlanılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda SST türbülans modelinin deneysel olarak elde edilen bulgulara en yakın sonuçları verdiği ayrıca serbest hidrolik sıçrama geometrisinin en iyi SST türbülans modeli ile tespit edilebildiğini gözlemlemişlerdir.

Soydan (2013), trapez kesitli geniş başlıklı savak akımları üzerinde çalışmış, farklı koşullardaki deney akımlarını LDA tekniği yardımıyla laboratuvar ortamında ölçmüş akabinde SKE, RNG, RKE, MKW, SST ve RSM türbülans modellerini kullanarak sayısal olarak da analiz etmiştir. Çalışmasında Sonlu Hacimler Yöntemi

temeline dayalı ANSYS-Fluent yazılımını, su yüzü profilinin elde edilmesinde ise VOF yöntemini kullanmıştır. Sayısal ve deneysel bulguların karşılaştırılmasında genel olarak kullanılan tüm türbülans modellerinin akım profilinin tahmininde iyi sonuçlar verdiğini fakat SKE modelinin ortalama karesel hata değerine göre diğer modellerden daha başarılı olduğunu tespit etmiştir.

Gümüş ve ark. (2013), tarafından yapılan çalışmada düşey bir kapak mansabında batmış hidrolik sıçramanın olduğu bir açık kanal akımı iki farklı akım durumu için laboratuvar ortamında deneysel olarak modellenmiştir. Sayısal çözümde düzenlenen ağ yapısının uygunluğu GCI ile test edilmiştir. Deneylelerden elde edilen bulgular, VOF yöntemi ile birlikte RNG, SKE ve RKE türbülans kapatma modelleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış, su yüzü profili ve batmış hidrolik sıçrama uzunluğunun modellenmesinde RNG türbülans modelinin diğer türbülans modellerine göre deneysel bulgulara daha yakın sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.

### 3. DENEY DÜZENEGİ VE YÖNTEM

#### 3.1. Deney Düzenegi

Bu çalışmada ele alınan açık kanal akımları laboratuvar ortamında iki farklı debi durumunda deneysel olarak modellenmiş ve LDA tekniği yardımıyla akım hızları ölçülmüştür. Deneyler Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'ndaki kapalı çevrim olarak çalışan, Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülen cam duvarlı dikdörtgen kesitli açık kanal düzeneginde gerçekleştirilmiştir. Kanal düzenegi 0.2 m genişlik, 0.2 m derinlik ve 2.4 m uzunluğunda olup pürüzsüz cam yüzeylere sahiptir. Şekil 3.1'de görülen deney düzenegi altındaki hazne, su ile doldurulduktan sonra bu haznedeki su bir pompa yardımı ile kanala gönderilmektedir. Kanala gönderilen suyun girişteki hazneden çalkantısız bir şekilde kanala geçişini sağlamak üzere giriş haznesinin bulunduğu bölgede akım düzenleyici filtreler kullanılmıştır. Kanala pompalanan su, düzenleyici filtrelerden geçtikten sonra kanal sonunda bulunan 0.04 m yükseklikteki keskin kenarlı savaktan kanal sonundaki hazneye savaklanmaktadır. Savaklanarak hazneye gelen su pompa ile çevrim şeklinde tekrar kanal giriş haznesine gönderilmektedir. Mevcut deney koşullarında kanalda elde edilen akımlar, akım profili çok yavaş değişen (M1 türü su yüzü profiline sahip), kritik altı, uniform olmayan serbest yüzeyli akım özelliklerine sahiptir. Akım boyunca hız ölçümleri yüksekliği ayarlanabilir, kanal boyunca hareket edebilen bir düzeneg'e sabitlenmiş LDA tekniğini kullanan bir cihaz yardımıyla yapılmıştır. Tekerlekli düzeneg'e sabitlenmiş bu cihaz sayesinde kanalın başlangıcından itibaren on iki farklı kesitte ve farklı su yüksekliklerinde hız ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.1. Deneysel tesisin mansap tarafındaki görünümü

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de deneysel çalışmaların yürütüldüğü laboratuvardaki açık kanal modeli ve su çevrim sistemi görülmektedir.



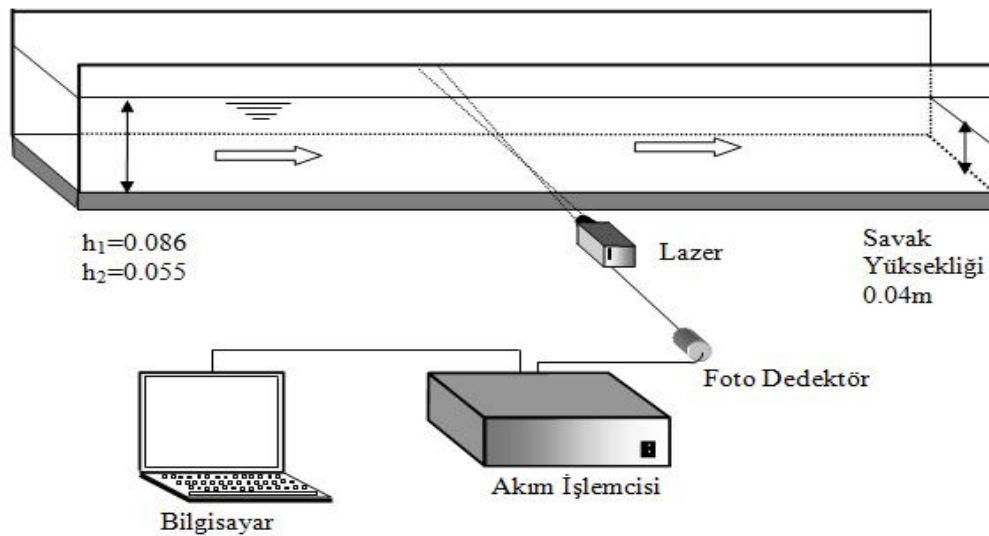
Şekil 3.2. Deneysel tesisin memba tarafındaki görünümü

Deneyler iki farklı debi durumunda gerçekleştirilmiş olup akımın profili kanal sonunda bulunan keskin kenarlı bir savak ile ayarlanmıştır. Deney 1 durumunda akımın giriş su yüksekliği 0.086 m' den başlayarak kanal sonunda 0.097 m yüksekliğe kadar çıkarken, Deney 2'de akımın giriş su yüksekliği 0.055 m'den başlayarak 0.067 m yüksekliğe kadar çıkmaktadır. Deney durumlarında akımda ölçülen debi, kanal başlangıcındaki su yüksekliği, ortalama hız ve Froude sayısı gibi karakteristik değerler Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelgedeki Q akım debisini, h kanal başlangıcındaki su yüksekliğini, V akım boyunca görülen ortalama hızı, Fr ise akıma ait Froude sayılarını belirtmektedir.

Çizelge 3.1. Kanaldaki deney koşulları

	Q (m <sup>3</sup> /s)	h (m)	V (m/s)	Fr
Deney 1	0.00711	0.086	0.41756	0.4546
Deney 2	0.00249	0.055	0.22642	0.3082

Kanal boyunca hız ölçümleri, Şekil 3.3'de şematik olarak gösterilen Lazer Doppler Anenometresi ile gerçekleştirilmiştir. Şekilde  $h_1$  Deney 1 durumunda,  $h_2$  Deney 2 durumunda kanal girişinde ölçülen su yüksekliklerini göstermektedir. Her iki deney durumunda da kanal sonundaki savağın yüksekliği 0.04 m olarak belirlenmiştir.

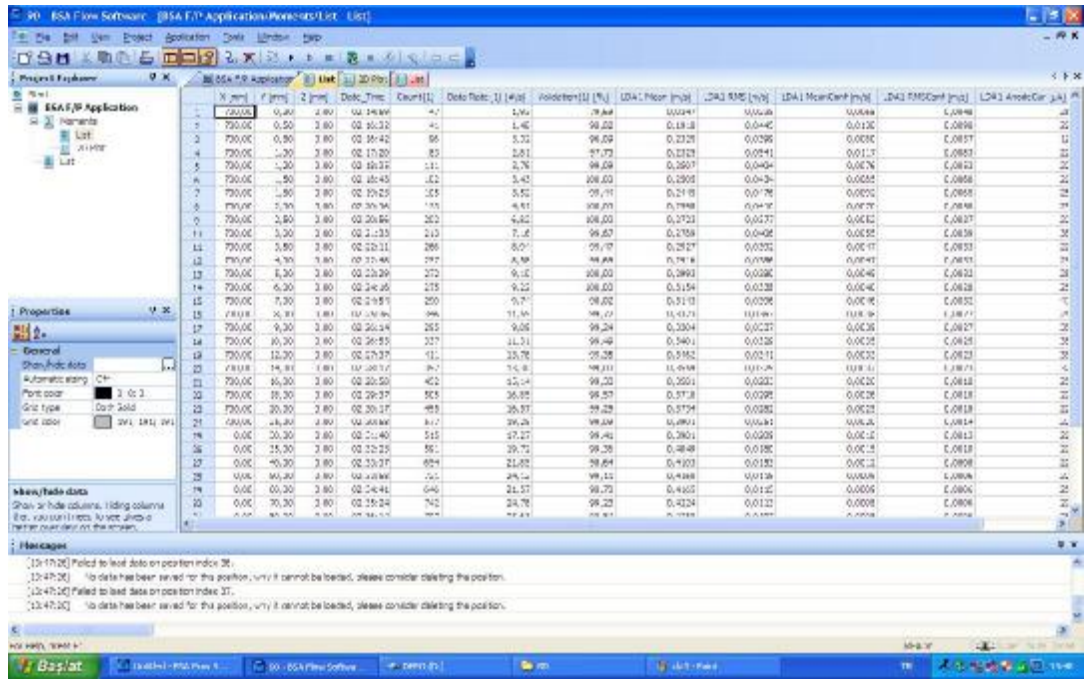


Şekil 3.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve LDA yerleşimi

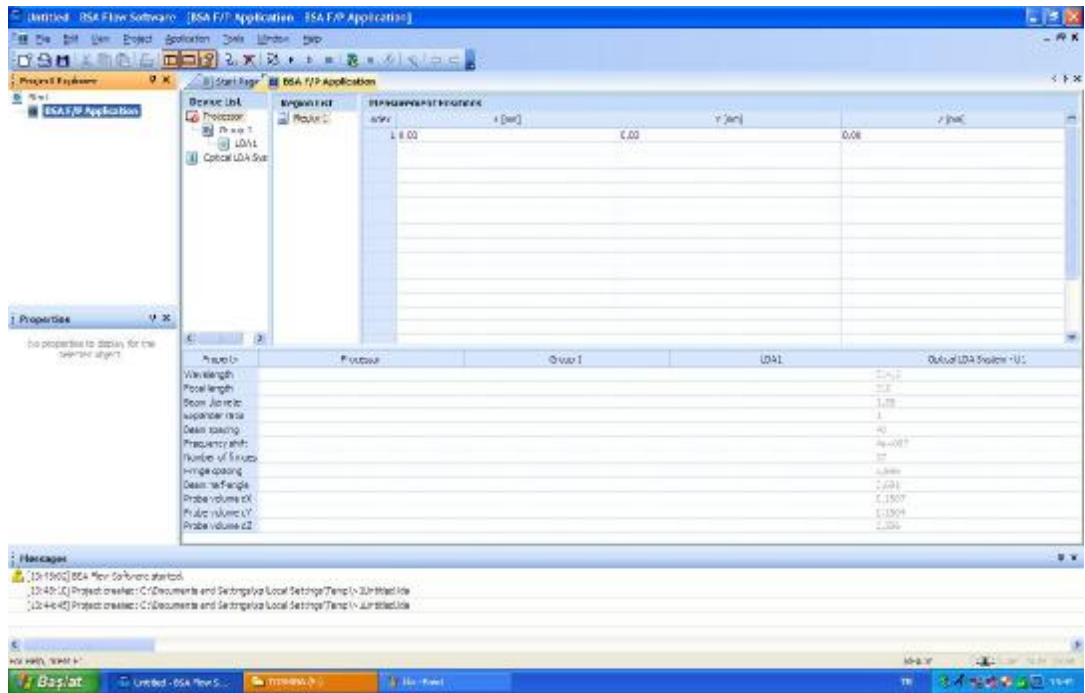
### 3.2. Lazer Doppler Anemometresi İle Akım Hızının Ölçülmesi

Deneyel olarak bir akımdaki anlık hızların değişimini ölçmek için yaygın olarak LDA, PIV, Kızgın Tel, Kızgın Film gibi teknikler kullanılmaktadır. Kızgın tel, kızgın film gibi ölçüm teknikleri, akım içerisine bir ölçüm ucu daldırılmasını gerektirdiği için akımı rahatsız etme etkisi vardır. LDA ve PIV tekniklerini kullanan aletlerde ise akımın rahatsız edilmesi söz konusu değildir. LDA tekniğini kullanan cihazlar akımı bir lazer ışığı yardımıyla ölçtüğü için bu cihazlar ile yapılan ölçümler dış faktörlerden oldukça az etkilenmektedir. Bu sayede daha hassas ölçümler yapılmaktadır. LDA tekniğini kullanan cihazların bir noktada ölçüm yapıyor olması, bazı karmaşık akımlarda akım özelliklerinin belirlenmesinde yetersizliklere yol açabilse de özellikle katı sınıra yakın bölgeler gibi noktasal hızların daha hassas ölçülmesi gereken yerlerde bu teknik, diğer tekniklere göre daha üstün bir performans göstermektedir. LDA farklı dalga boyutundaki lazer demetlerinin akıma gönderilip geri alınması prensibine dayanan bir tekniktir. Akıma gönderilen lazer ışınları sayesinde akımda herhangi bir rahatsızlık oluşturulmadan akımdaki hızlar anlık olarak ölçülebilmektedir.

Bu tez kapsamında akımdaki anlık hızların belirlenmesi için LDA tekniği ile çalışan bir cihaz kullanılmıştır. Çalışma esnasında dikdörtgen bir kanaldaki açık kanal akımının anlık akım hızları, kanal eksenine boyunca Dantec® LDA 62N04 bir boyutlu akımölçer kullanılarak ölçülmüştür. Lazer dalga uzunluğu 660 nm, lazer demetleri arasındaki mesafe 60 mm ve ölçülebilen hız sapınçları 0.7 µm/s den 4.6 mm/s' ye kadar değişebilmektedir. LDA sisteminde, foto detektör ile birlikte BSA F30 (62N60) tipi akım işlemcisi kullanılmıştır. Ayrıca anlık ölçülen hızların prosesi, analizi ve grafiksel olarak işlenmesi Dantec LDA sistemi içinde yer alan BSA-Flow yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. LDA içerisinde bulunan foto detektör tarafından ölçülen bilgiler BSA Flow yazılımına gönderilerek Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki gibi bilgisayar ekranında anlık olarak görüntülenebilmektedir. Bu ekranda ölçülen parçacık sayısı, ölçülen anlık hızların ortalama hız değerleri ve hız profilleri anlık olarak görülebilmekte, ölçüm sonuçları aynı program içerisinde arşivlenebilmektedir.



Şekil 3.4. BSA Flow Software yazılımının ekran görüntüsü

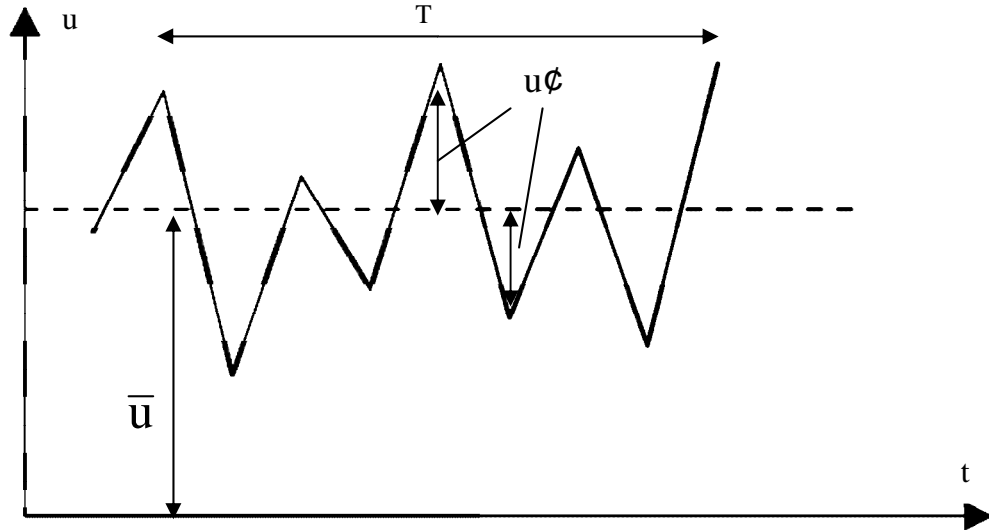


Şekil 3.5. BSA Flow Software yazılımının ekran görüntüsü



Çalışma boyunca LDA hız ölçüm cihazı, deney süresince üç doğrultu boyunca hareket edebilen tekerlekli ve ölçüm sırasında hareketsiz hale getirilen bir sisteme entegre edilmiştir. Bu sistem sayesinde iki farklı debi durumu için 2.4 m uzunluğundaki kanal boyunca 12 farklı kesitte ve her kesitte de 25'den fazla farklı noktada ölçüm yapma imkanı bulunmuştur.

LDA ile laboratuvar ortamında yapılan ölçümlerde noktasal ortalama hız değerleri, belirli bir T süresinde o noktada ölçülen tüm anlık hız değerlerinin ortalamasının alınması ile elde edilmektedir. Burada T integrasyon zamanı olup bu çalışmada 60 s olarak seçilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Türbülanslı akımda zamansal ortalama hızın tespiti

Şekil 3.6'daki  $\bar{u}$  ortalama akım hızını ve  $u\phi$  hız sapıncını ifade etmektedir. Zaman ortalama hız büyüklükleri, anlık hız ölçümlerinin düzenlenmesi sonrasında elde edilmektedir. Ayrıca anlık hız değerleri ölçüldüğü için hız sapıncı ve buna bağlı türbülans şiddeti değerleri de elde edilebilmektedir.

Anlık akım hızı  $u$ , ortalama akım hızı  $\bar{u}$  ve hız sapıncı  $u\phi$  arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$u = \bar{u} + u\phi \quad (3.1.)$$

Zamansal ortalama hız:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u \quad (3.2.)$$

ve Hız Sapınçlarının Kareler Ortalamasının Karekökü ( $u_{\text{rms}}$ )

$$u_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u - \bar{u})^2} \quad (3.3.)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada N, T süresi içerisindeki anlık hız numunesi sayısıdır.



## 4. TEMEL DENKLEMLER VE TÜRBÜLANS MODELLERİ

### 4.1. TEMEL DENKLEMLER

Herhangi bir akımdaki türbülansın ifade edilmesi ve çözümünün yapılabilmesi için bazı denklemler kullanılmaktadır. Türbülanslı akımı idare eden temel denklemler kütle ve momentumun korunumu denklemleridir. Bu denklemlerin çıkarılışı aşağıda kısaca özetlenmektedir.

#### 4.1.1. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Süreklilik Denklemi

Sıkışmayan, türbülanslı akımda  $u = \bar{u} + u'$ ,  $v = \bar{v} + v'$  ve  $w = \bar{w} + w'$  anlık hız bileşenleri,  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$  süreklilik denkleminde yerine yazılıp bir  $\Delta t$  zaman aralığı için zamansal ortalaması alınabilir. Bu durumda örneğin; denklemin birinci terimi aşağıdaki değere indirgenir:

$$\overline{\frac{\partial (u + u')}{\partial x}} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \frac{\partial (u + u')}{\partial x} dt = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} (u + u') dt \right) = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (4.1.)$$

buna göre, türbülanslı akım için süreklilik denklemi ortalama değerler cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad \text{veya} \quad \text{div } \bar{V} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2.)$$

Sıkışmayan türbülanslı akımda anlık hız bileşenlerinin  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$  süreklilik denkleminde yerlerine yazılıp elde edilecek denklemden (4.2) denkleminin

çıkarılmasıyla kalan terimlerden hız sapınçlarının da süreklilik denklemini sağladığı görülecektir.

#### 4.1.2. Sıkışmayan Türbülanslı, Newtonian Akışkan Akımında Hareket Denklemleri (Reynolds Denklemleri)

Burada, Navier-Stokes denklemlerinin zamansal ortalamaları alınarak, sıkışmayan, türbülanslı, Newtonian akışkan akımına uyarlaması yapılacaktır. Örnek olarak Navier-Stokes denkleminin x bileşenini ele alalım:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (4.3.)$$

Denklemden anlık hız bileşenleri olarak  $u = \bar{u} + u'$ ,  $v = \bar{v} + v'$ ,  $w = \bar{w} + w'$  ve  $p = \bar{p} + p'$  yazılırsa:

$$\begin{aligned} & \rho(\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial x} + \rho(\bar{v} + v') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial y} + \rho(\bar{w} + w') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial z} + \rho \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial t} \\ & = \rho X - \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x} + \mu \nabla^2 (\bar{u} + u') \end{aligned} \quad (4.4.)$$

denklemin elde edilir. Bu denklemin zamansal ortalaması için örneğin, birinci terimin zamansal ortalaması alınır:

$$\overline{\rho(\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial x}} = \rho \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \bar{u}' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} + \rho u' \frac{\partial u'}{\partial x} \quad (4.5.)$$

Denklemin elde edilir. (4.5) denkleminin ikinci ve üçüncü terimlerinin zamansal ortalamaları  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$  ve  $u'$  nin zamansal ortalamaları sıfır olduğundan, sıfırdır. Böylece

(4.4) denklemindeki terimlerin zamansal ortalamaları aşağıdaki gibi bulunur:

$$\overline{\rho(\bar{u} + u\phi)} \frac{\partial(\bar{u} + u\phi)}{\partial x} = \overline{\rho\bar{u}} \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \overline{\rho u' \frac{\partial u'}{\partial x}} \quad (4.6.)$$

$$\overline{\rho(\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{u} + u\phi)}{\partial y}} = \overline{\rho\bar{v}} \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \overline{\rho v' \frac{\partial u'}{\partial y}} \quad (4.7.)$$

$$\overline{\rho(\bar{w} + w\phi) \frac{\partial(\bar{u} + u\phi)}{\partial z}} = \overline{\rho\bar{w}} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} + \overline{\rho w' \frac{\partial u'}{\partial z}} \quad (4.8.)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{p} + p\phi) = \frac{\partial\bar{p}}{\partial x} \quad (4.9.)$$

$$\overline{\mu\tilde{N}^2(\bar{u} + u\phi)} = \mu\tilde{N}^2\bar{u} \quad (4.10.)$$

Bu değerler (4.4) denkleminde yerine yazılırsa, sıkışmayan, türbülanslı, Newtonian akışkan akımında Reynolds hareket denkleminin x bileşeni elde edilir:

$$\rho\bar{c}_p \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} = \rho X - \frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu\tilde{N}^2\bar{u} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{\rho u' \phi} + r v \phi \frac{\partial u'}{\partial y} + \rho w \phi \frac{\partial u'}{\partial z} \quad (4.11.)$$

Bu sayede Reynolds hareket denkleminin x, y, z doğrultularındaki bileşenleri sırasıyla aşağıdaki şekilde olur:

$$\begin{aligned} \rho\bar{c}_p \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} = \rho X - \frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu\tilde{N}^2\bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho\bar{u}'^2) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho\bar{u}'v') + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho\bar{u}'w') \end{aligned} \quad (4.11.a.)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = \rho Y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \tilde{N}^2 \bar{w} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{v'w'}) \quad (4.11.b.)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \rho Z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \tilde{N}^2 \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'^2}) \quad (4.11.c.)$$

veya vektör-tansör notasyonu ile:

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \mathbf{K} - \tilde{N} \bar{p} + \mu \tilde{N}^2 \mathbf{V} + \hat{\mathbf{e}}_i \cdot \tilde{N} \cdot \tau_{ij} \hat{\mathbf{e}}_j \quad (4.12.)$$

veya indis notasyonu ile:

$$\rho u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \rho X_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial t'_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.13.)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu denklemler, türbülanslı akım için Reynolds (1895) hareket denklemleri veya Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier Stokes – RANS) denklemleri olarak anılır. Bu ifadeler Navier Stokes denklemlerine ilave olarak Reynolds gerilmeleri olarak bilinen türbülans (çalkantı) gerilmelerini içermektedir. Türbülans (çalkantı) gerilmeleri tansörü aşağıdaki gibidir:

$$t'_{ij} = \begin{matrix} \hat{\mathbf{e}}_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \hat{\mathbf{e}}_y & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \hat{\mathbf{e}}_z & \tau_{zx} & \sigma_z \end{matrix} \hat{\mathbf{e}}_j = \begin{matrix} \hat{\mathbf{e}}_x & -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{u'w'} \\ \hat{\mathbf{e}}_y & -\rho \overline{v'u'} & -\rho \overline{v'w'} \\ \hat{\mathbf{e}}_z & -\rho \overline{w'u'} & -\rho \overline{w'v'} \end{matrix} \hat{\mathbf{e}}_j \quad (4.14.)$$

Newtonian akışkan akımında gerilme tansörü aşağıdaki gibidir:

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu \text{div} \mathbf{V} \delta_{ij} \quad (4.15.)$$

(4.15) bünye denklemi, denklem (4.14)'deki türbülans gerilme tansörünün eklenmesi ile türbülanslı akımda gerilme tansörü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$t_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu \text{div} \mathbf{V} \delta_{ij} + t_{ij} \quad (4.16.)$$

veya açık olarak

$$\begin{aligned} \tau_{ij} = & \begin{matrix} \hat{e}_1 & \bar{p} & 0 & 0 & \hat{u} \\ \hat{e}_2 & 0 & -\bar{p} & 0 & \hat{u} \\ \hat{e}_3 & 0 & 0 & -\bar{p} & \hat{u} \end{matrix} \\ & + 2\mu \begin{matrix} \hat{e}_1 & \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} & \hat{u} \\ \hat{e}_2 & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} & \hat{u} \\ \hat{e}_3 & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} & \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} & \hat{u} \end{matrix} \\ & - \frac{2}{3}\mu \text{div} \mathbf{V} \delta_{ij} + \rho \begin{matrix} \hat{e}_1 & -\overline{u^2} & -\overline{uv} & -\overline{uw} & \hat{u} \\ \hat{e}_2 & -\overline{uv} & -\overline{v^2} & -\overline{vw} & \hat{u} \\ \hat{e}_3 & -\overline{uw} & -\overline{vw} & -\overline{w^2} & \hat{u} \end{matrix} \end{aligned} \quad (4.17.)$$

ortalama hızlar viskoz gerilmeler

ortalama türbülans gerilmeleri

(4.16) bünye denkleminin (4.3) hareket denkleminde kullanılmasıyla, örneğin, sıkışan türbülanslı, Newtonien akışkan akımında Reynolds denkleminin x bileşeni aşağıdaki gibi düzenlenebilir:



$$\begin{aligned} \rho \frac{d\bar{u}}{dt} = & \rho X + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \bar{V} - \rho \overline{u^2} \\ & + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \overline{uv} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \rho \overline{uw} \end{aligned} \quad (4.18.)$$

veya

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\bar{u}}{dt} = & \rho X - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \operatorname{div} \bar{V}) + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{uv}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{uw}) \end{aligned} \quad (4.19.)$$

veya

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\bar{u}}{dt} = & \rho X - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \tilde{N}^2 \bar{u} + \mu \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \bar{V} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \bar{V} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{uv}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{uw}) \end{aligned} \quad (4.20.)$$

Sonuç olarak, sıkışan Newtonien akışkan akımında Reynolds denkleminin x bileşeni:

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\bar{u}}{dx} = & \rho X - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \tilde{N}^2 \bar{u} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \bar{V} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u^2}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{uv}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{uw}) \end{aligned} \quad (4.21.)$$

şeklinde elde edilir. (4.21) denklemini sıkışmayan Newtonian akışkan akımı için yazılmak istenirse,  $\operatorname{div} \bar{V} = 0$  yazılır ve çalkantı gerilmelerini de içeren Reynolds denkleminin x, y ve z bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} = \rho X - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \tilde{N}^2 \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{uv}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{uw}) \quad (4.22.a.)$$

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = \rho Y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \tilde{N}^2 \bar{v} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{v'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{v'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{v'w'}) \quad (4.22.b.)$$

$$\rho \frac{d\bar{w}}{dt} = \rho Z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \tilde{N}^2 \bar{w} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{w'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{w'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'w'}) \quad (4.22.c.)$$

#### 4.2. Türbülans Modelleri

Reynolds denklemlerinde, üç boyutlu akımda hız bileşenleri u, v, w ve basınç bileşeni, p olmak üzere 4 adet bileşen bulunmaktadır. Ayrıca 6 adet türbülans gerilmesiyle birlikte toplam 10 adet bilinmeyene karşılık süreklilik denklemi ile birlikte 4 adet denklem olacağından Reynolds denklemlerinin çözümü olmayacaktır. Bu durum denklemlerde kapanma problemi (closure problem) olarak adlandırılır. Reynolds gerilmelerinin neden olduğu bu durum türbülans modelleri yardımıyla, denklem (4.16)'daki  $\tau_{ij}$  türbülans kayma gerilmelerinin hesaplanması ile çözülür ve denklemin kapatılması sağlanır.

Türbülanslı akımda kütle ve momentumun korunumunu idare eden diferansiyel denklemler kartezyen tensör notasyonunda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.23.)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.24.)$$

Denklem (4.23) ve (4.24)'de  $u_i$  hız bileşenlerini, p basıncı,  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $\rho g_i$  yerçekiminden dolayı oluşan kütleli kuvveti, t zamanı,  $\tau_{ij}$  ise türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir.

Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımına göre aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (4.25.)$$

Denklem (4.25)'de  $\overline{u_i u_j}$  ve  $\overline{u_j u_i}$  yatay ve düşey türbülans hız sapınçlarını,  $\mu_t$  türbülans viskozitesini belirtirken  $\delta_{ij}$  ise Kronecker delta olarak adlandırılır. Denklem sağı tarafında bulunan ikinci terim, sıkışmayan akımlar için normal gerilme toplamının her zaman türbülans kinetik enerjisine eşit olabilmelerini sağlamak amacıyla bulunmaktadır (Eğer  $i=j$  ise  $\delta_{ij}=1$ ).

Türbülanslı akım problemlerinde kapatma probleminin üstesinden gelmek için farklı türbülans modelleri kullanılmaktadır. Yukarıda elde edilen (4.25) denklemi türbülans modelleri yardımıyla çözümlenerek, denklem sistemi kapatılmış olur. Bu çalışmada k- $\epsilon$  türbülans modelleri kapsamındaki kapatma modellerinden SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan türbülans modelleriyle ilgili özet bilgiler aşağıda sunulmaktadır.

“k- $\epsilon$ ” türbülans modellerinde, türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı (disipasyonu) ( $\epsilon$ ) için olmak üzere iki adet taşınım denklemi Navier-Stokes denklemlerine ilave olarak çözümlenmektedir.  $\epsilon$ ' un taşınım denklemi Navier-Stokes denklemleri ile elde edilebilir (Davidson, 2005). Fakat bu denklemler pek çok bilinmeyen içermesinin yanı sıra son derece de karışıktır. Bu sebeple ‘ $\epsilon$ ’ taşınım denklemi türbülans modellerinde kullanılmak üzere bazı varsayımlar ve kabullerle yeniden düzenlenerek sadeleştirilmiş ve ‘k’ taşınım denklemine çok benzer bir şekilde kullanılmıştır. k- $\epsilon$  türbülans modellerinde türbülans viskozitesi  $\mu_t$ ,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.26.)$$

formülü ile ifade edilmektedir. Bu formülde  $C_\mu$ , türbülans modeli sabitidir. k- $\epsilon$  türbülans modellerinden SKE, RNG ve RKE türbülans modellerine ait özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

#### 4.2.1. Standard k-ε Türbülans Modeli (SKE)

İki denklemlili türbülans modellerinden yaygın olarak kullanılan ve bir çok akım probleminde oldukça uygun sonuçlar veren yarı ampirik bir türbülans modelidir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı (ε) için yazılan iki adet taşınım denkleminin çözümü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Kaldırma kuvvetleri etkisi ihmal edildiğinde, bu taşınım denklemleri k ve ε için sırası ile aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(rku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - r\varepsilon \quad (4.27.)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(r\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} r \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4.28.)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{değişim miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{konveksiyonla} \\ \text{taşınımı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{difüzyonla} \\ \text{taşınımı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{üretim} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{kayıp} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\}$$

Denklemlerde r akışkan yoğunluğunu u<sub>i</sub> hız bileşenlerini göstermektedir. Denklemlerdeki Γ<sub>ε</sub> ve Γ<sub>k</sub> terimleri difüzyivite terimleri olarak adlandırılır. Difüzyivite terimleri,

$$\Gamma_\varepsilon = \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad \text{ve} \quad \Gamma_k = \frac{\mu}{\sigma_k} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (4.29.)$$

Şeklinde ifade edilirken hız gradyanından kaynaklanan türbülans kinetik enerjisinin üretimini ifade eden terim,

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.30.)$$

olup, türbülans viskozitesi ( $\mu_t$ ), türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı ( $\epsilon$ ) cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mu_t = r C_m \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.31.)$$

Bu modelde, deneysel sabitler:  $R=0$ ,  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $k$  ve  $\epsilon$  için türbülans Prandtl sayıları  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$  tür (Launder ve Spalding, 1972). Bu değerler (4.28) denkleminde yerlerine yazılırsa denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (r \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + 1.44 \frac{\epsilon}{k} G_k - 1.92 r \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4.32.)$$

#### 4.2.2. Renormalization Group k-ε Türbülans Modeli (RNG)

RNG k-ε türbülans modeli iki denklemlilik bir model olup Yakhot ve Orszag (1986) tarafından düşünülmüş ve yine Yakhot ve ark. (1992) tarafından geliştirilmiştir. Navier-Stokes denklemlerinden renormalization group teorisi kullanılarak elde edildiği için ismini de buradan almıştır. Bu modelde de  $k$  ve  $\epsilon$  için daha önce Standard k-ε başlığı altında verilen taşınım denklemleri kullanılabilir. İlave olarak ilgili denklemlere birkaç terim gelir ve denklemlerdeki sabitlerin değerleri farklıdır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (r k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (r k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - r \epsilon \quad (4.27.)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\rho}{\sigma} \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\rho}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (4.28.)$$

RNG k-ε türbülans modelinde daha önce (4.29) eşitliğinde bulunan difüzyivite terimleri aşağıdaki gibi olur:

$$\Gamma_\epsilon = \alpha_\epsilon \mu_\epsilon, \quad \Gamma_k = \alpha_k \mu_k \quad (4.33.)$$

Denklem (4.33)'de  $\alpha_k$  ve  $\alpha_\epsilon$  parametreleri k ve ε için efektif Prandtl sayılarının tersini göstermekte olup, RNG teorisinden analitik olarak türetilen,

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu}{\mu_\epsilon} \quad (4.34.)$$

İfadesi ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde  $\alpha_0 = 1$  dir. Yüksek Reynolds sayılarında

$$\left( \frac{\mu}{\mu_\epsilon} \right) \alpha_k = \alpha_\epsilon @ 1.393 \text{ olmaktadır.}$$

Akışkanın viskozitesi ile türbülans viskozitesinin toplamı olan efektif viskozite ise:

$$\mu_\epsilon = \mu + \mu_t \quad (4.35.)$$

şeklinde ifade edilip aşağıdaki adi diferansiyel denklemin çözümünden elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho}{\sigma} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\rho}{\sigma} k u_j \right) = 1.72 \frac{\rho}{\sqrt{\epsilon \mu}} \frac{\mu_\epsilon / \mu}{\sqrt{(\mu_\epsilon / \mu)^3 - 1 + C_v}} d(\mu_\epsilon / \mu) \quad (4.36.)$$

Bu denklem ile düşük Re (Reynolds) sayısı etkileri hesaba katılmaktadır. RNG modelinin, SKE modeline göre en büyük farkı, 'ε' denklemine ilave olarak gelen R

terimidir. Bu ilave terim yüksek kayma oranları ve akım çizgisi eğriliklerinin hesaba katılmasını sağlar. Bu terim,

$$R = \frac{C_{\mu} \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (4.37.)$$

denklemleri ile ifade edilir. Bu ifade denklem (4.28)'de yerine konduğunda 'ε' için taşınım denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\rho}{C_{\varepsilon}} \Gamma_{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \frac{C_{\mu} \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (4.38.)$$

şeklini alır. Bu denklemde η değeri türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranının fonksiyonu olup;

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (4.39.)$$

formülüne sahiptir. Burada,

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (4.40.)$$

ve

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.41.)$$

şeklinde ifade edilir. Kayma oranının kuvvetli olduğu (yüksek η) durumlarında kayıp artmakta, bu da türbülans viskozitesini ve 'k' değerini azaltmakta yani akımdan daha az enerji çekilmesine yol açmaktadır. Böylece türbülans olan bölgelerde elde edilen

değerler deneysel sonuçlara daha yakın çıkmaktadır. Bu modelde kullanılan sabitler  $C_{1\varepsilon}=1.42$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.68$ ,  $C_v=100$ ,  $\eta_0=4.38$ ,  $\beta=0.012$ ,  $C_\mu=0.0845$  dir.

Yüksek Reynolds sayılarına ve yukarıdaki sabitlerin değerlerine göre (4.38) denklemi güncellenirse aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \quad (4.38.a.)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \varepsilon \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + 1.42 \frac{\varepsilon}{k} G_k - 1.68 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \frac{0.0845 \rho \cdot \eta^3 (1 - \eta/4.38) \varepsilon^2}{1 + 0.012 \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

#### 4.2.3. Realizable k-ε Türbülans Modeli (RKE)

SKE türbülans modeli başlığı altında denklem (4.31)'deki türbülans viskozitesi formülünde bulunan  $C_\mu$  sabitinin değeri sınır tabakası altındaki bölgede elde edilmiş olup, gerçekte bu sabit farklı akış bölgelerinde değişim göstermektedir. Buna göre, türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranının fonksiyonu olan  $\eta$  değeri;  $\eta = S \frac{k}{\varepsilon} > 3.7$  olduğunda, normal gerilme negatif olabilmekte ve hatta Reynolds gerilmelerinde Schwarz eşitsizliği ihlal edilebilmektedir (Shih ve ark., 1995). RKE modelinde bu problemlerin önüne geçebilmek için SKE ve RNG modellerinde sabit olan  $C_\mu$  katsayısı RKE türbülans modelinde denklemle ifade edilen bir form almaktadır. Buna göre,

$$C_\mu = \frac{1}{A_o + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (4.42.)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Denklem (4.42)'de bulunan terimler,

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (4.43.)$$



$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad , \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (4.44.)$$

$$A_s = \sqrt{6}\cos\varphi \quad , \quad \varphi = \frac{1}{3}\arccos(\sqrt{6}W) \quad (4.45.)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{ik}S_{jk}}{\tilde{S}^3} \quad (4.46.)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (4.47.)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\tilde{\Omega}_{ij}$ ,  $\omega_k$  açısal hızıyla dönmekte olan bir referans sistemine göre ortalama dönme miktarı ve  $S_{ij}$  ise şekil değiştirme hızı tansörüdür. RKE modelinde, SKE modelinden farklı olarak yeni bir türbülans kinetik enerjisi kaybı oranı ( $\epsilon$ ) denkleminde geliştirilmiştir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho e u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial e}{\partial x_j} \right) + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial e}{\partial x_j} \right) + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (4.48.)$$

Burada,

$$C_1 = \max \left( 0.43, \frac{S \frac{k}{\epsilon}}{S \frac{k}{\epsilon} + 5 \frac{\nu}{\epsilon}} \right) \quad ; \quad (4.49.)$$

şeklinde ifade edilirken  $C_2 = 1.9$  sabit değerini almaktadır. RKE k- $\epsilon$  modelinde  $\epsilon$ 'un oluşumu ve kaybı fonksiyona bağlanmıştır. Yüksek Reynolds sayısına sahip ve tamamen türbülanslı akım problemlerinde RKE k- $\epsilon$  modelinin geliştirilmiş biçimi iyi sonuçlar vermektedir.

## 5. SAYISAL ÇÖZÜM

### 5.1. Sonlu Hacimler Yöntemi

Herhangi bir akım probleminde akışın fiziksel özellikleri Navier-Stokes denklemleri ile matematiksel olarak ifade edilebilir. Fakat bu denklemlerin sayısal olarak çözümü için bir takım kabuller gerekmektedir. Bilgisayarlar bu denklemleri mevcut halleri ile çözemezler bu nedenle akım içeren mühendislik uygulamalarının sayısal olarak çözümünde RANS denklemlerinin veya genel skaler taşınım denkleminin sayısal olarak çözülebilir cebrik denklemlere dönüştürülebilmesi için ayrıklaştırma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıklaştırma işlemi, denklemlerin bilgisayarların anlayacağı forma dönüştürülmesi işidir. Ayrıklaştırma, sayısal yöntemlerle yapılır. Sayısal yöntemlerle denklemlerin ayrıklaştırılması, hesaplama bölgesinin ayrık hacimlerden, ayrık elemanlardan veya ayrık noktalardan belirlmesine göre sonlu hacimler, sonlu elemanlar ya da sonlu farklar yöntemleri ile gerçekleştirilir (Hoffmann ve Chiang, 2000; Ferziger ve Peric, 2002). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği örneklerinin çözümünde en yaygın olarak kullanılan metot Sonlu Hacimler Yöntemidir.

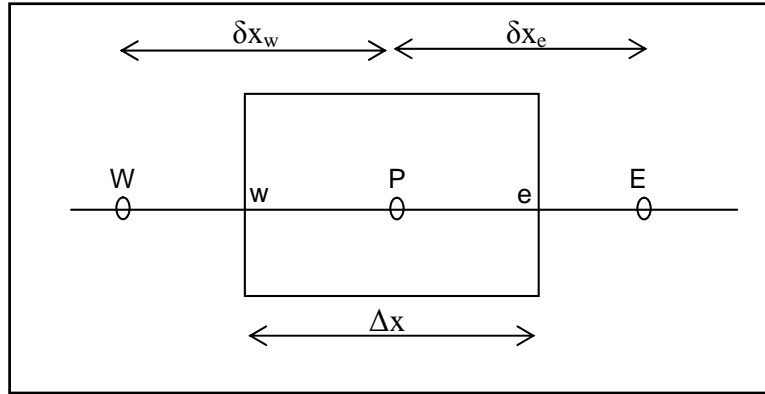
Sonlu hacim ayrıklaştırması yöntemi akışkan akımını modelleyen taşınım denklemlerinin sonlu bir hacim boyunca düzenlenmesi prensibine dayanır. Akımın herhangi bir  $\varphi$  taşınım özelliğinin konveksiyon ve difüzyon taşınım denklemini kartezyen tansör notasyonunda:

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j \varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\rho \Gamma}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S \quad (5.1.)$$

şeklinde ifade edilebilir (Johnson, 1998). Burada;  $u_j$  üç ayrı yöndeki hızları,  $\varphi$  akımın herhangi bir taşınım özelliğini,  $\Gamma$  difüzyon katsayısını ve  $S$  kaynak terimini belirtmektedir. Denklem bir boyutlu olarak yazılırsa:

$$\rho \frac{d(U\phi)}{dt} = \frac{d}{dx} \left( \frac{\rho}{\Gamma} \frac{d\phi}{dx} \right) + S \quad (5.2.)$$

Bu denklem, şekil 5.1’de görülen kontrol hacmi boyunca integre edilirse, giriş ve çıkış yüzeylerinin birim değerinde olduğu kabul edilerek ( $A_e=A_w=1$ ):



Şekil 5.1. Örnek kontrol hacmi

$$\int_w^e \frac{d}{dx} (U\phi) dx = \int_w^e \frac{d}{dx} \left( \frac{\rho}{\Gamma} \frac{d\phi}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx \quad (5.3.)$$

şeklinde bir denklem elde edilir. Denklemin sol tarafının integrali alınırsa:

$$\int_w^e \frac{d}{dx} (U\phi) dx = (\rho\phi U)_e - (\rho\phi U)_w \quad (5.4.)$$

denklemini elde edilir. (5.3) denkleminin sağ tarafının integrali alınıp kaynak terimi bağımlı değişkenin fonksiyonu olarak lineer hale getirilirse,

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left( \frac{\rho}{\Gamma} \frac{d\phi}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx = \frac{\rho}{\Gamma} \frac{d\phi}{dx} \Big|_e - \frac{\rho}{\Gamma} \frac{d\phi}{dx} \Big|_w + S_U + S_P \phi_P \quad (5.5.)$$

denklemini elde edilir. İntegralleri alınan değerler (5.3) denkleminde yerlerine yazılırsa,

$$(\rho\rho U_{\phi_e}) - (\rho\rho U_{\phi_w}) = \frac{\partial}{\partial t} \frac{d\phi}{dx} \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{d\phi}{dx} \frac{\partial}{\partial x} + S_U + S_P \phi_P \quad (5.6.)$$

denklemini elde edilir. Burada  $S_U$  kaynak teriminden gelen sabit sayıyı ve  $S_P$  sabit sayıdan gelen bağımlı değişkenin katsayısını göstermektedir. Difüzyon terimlerinin genel olarak merkezi farklar ile interpolasyonu yapılmaktadır. (Versteeg ve Malalasekera, 1995). (5.1) denkleminde merkezi farklar kullanılacak olursa denklemin ilk bileşeni,

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{d\phi}{dx} \frac{\partial}{\partial x} = \Gamma \frac{\partial}{\partial t} \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} \frac{\partial}{\partial x} \quad (5.7.)$$

şeklini alır. Hesaplamalı analizlerde sıkça kullanılmakta olan “ikinci derece ileriye doğru” interpolasyon şeması ele alınıp (Davidson, 2005),  $\delta x_e = \delta x_w = \delta x$  kabulü yapılırsa,

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_P - \frac{1}{2} \phi_W + O((\Delta x)^2) \quad (5.8.)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2} \phi_W - \frac{1}{2} \phi_{WW} + O((\Delta x)^2) \quad (5.9.)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerle yüzeylerdeki  $\phi$  değerleri belirlenebilir. Ancak,  $\phi$  değerleri katsayılarının ağ örgüsü aralıkları olan,  $\delta x$  'lerin eşit olmadığı durumda farklı değerler alacaktır. Yüzeylerdeki  $\phi$  değerleri denklem (5.6) ve denklem (5.7)'de yerlerine yazılacak olursa;

$$(\rho\rho U_e \frac{\partial}{\partial t} \frac{\phi_P}{\delta x} - \frac{1}{2} \phi_W \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x}) - (\rho\rho U_w \frac{\partial}{\partial t} \frac{\phi_W}{\delta x} - \frac{1}{2} \phi_{WW} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x}) = \frac{\Gamma}{\delta x} (\phi_E - 2\phi_P + \phi_W) + S_U + S_P \phi_P \quad (5.10.)$$

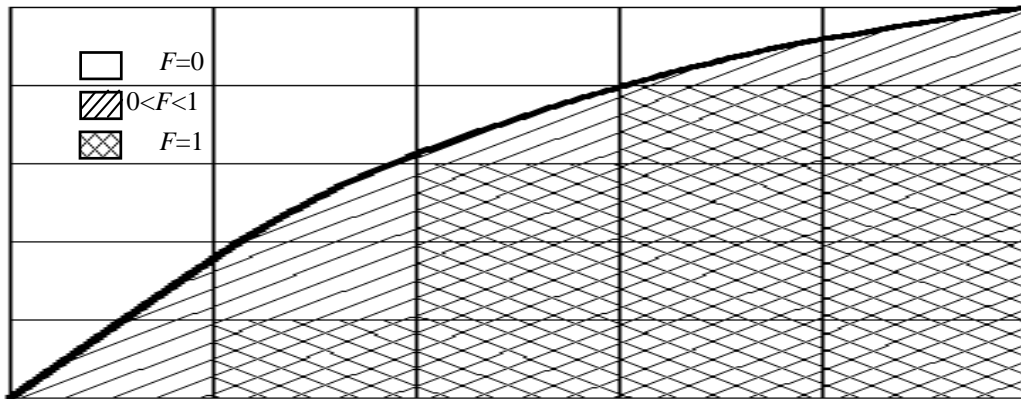
Denklemler bulunur. Böylece;

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E - a_{WW} \phi_{WW} + S_U = \sum_{km} \dot{a}_{km} \phi_{km} + S_U \quad (5.11.)$$

şeklinde lineer bir denklem sistemi elde edilir. Burada 'km' indisi P hacmine komşu hacimleri göstermektedir.

## 5.2. Akışkan Hacimleri Yöntemi ile Serbest Yüzeyin Bulunması

Su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi için yazılımlarda Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid- VOF) kullanılmaktadır (Hirt ve Nichols, 1981). VOF yöntemi ile hücrelerin boş olduğu, tam veya kısmen suyla dolu olup olmadığı belirlenir. Bu yöntemde hesaplama alanı üzerinde bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. Bu yöntemde hücre tamamen akışkan ile dolu ise  $F=1$  değerini, tamamen boş ise  $F=0$  değerini ve kısmen dolu ise hücrede kapladığı yüzde değerini alır.



Şekil 5.2. Hesaplama ağında eleman doluluk oranı

Eğer serbest yüzey bir eğime sahip ise herhangi bir hücredeki yüzeyin yerini belirlemek için o hücreyi çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma oluşturulur. VOF yöntemi ile serbest yüzeyin izlenmesi üç aşamadan oluşur. Öncelikle serbest yüzeyin yeri bulunur. İkinci olarak bulunan yüzey, su ve hava arasında keskin bir

arakesit olarak belirlenir. Son olarak ise belirlenen arakesite sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır. Akışkan hacmi fonksiyonu  $F$ 'nin değişimi aşağıdaki diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (5.12)$$

### 5.3. Ağ Yakınsama İndeksi (GCI)

Sayısal bulguların doğruluk derecesi olayın çözümlenmesinde kullanılan ağların ayrıklaştırma aralıklarına bağlıdır. Sayısal çözümlerde tasarlanan ağ yapısının uygunluğunu ve yeterliliğini irdelemek, hata oranı tespit etmek için Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index - GCI) testi kullanılmıştır. GCI yöntemi, türbülans modeli çözümlerinin sayısal ayrıklaştırmalardaki hassasiyetlerini belirlemek için ilk olarak Roache (1994), tarafından önerilmiştir. Ayrıca çözüm ağı yakınsaması ve belirsizliğinin tahmini için en az üç farklı yoğunlukta ağ yapısı gerektiği yine Roache (1998) tarafından bildirilmiştir. Ayrıca bu yöntem ASME (American Society of Mechanical Engineering) tarafından da önerilmiştir (Çelik ve ark., 2008). Bu yöntemin temeli farklı yoğunlukta ağ yapılarından elde edilen sayısal çözümleri karşılaştıran genelleştirilmiş Richardson Ekstrapolasyonuna dayanmaktadır. Sayısal çözümlerin kabul edilebilir değerlere yakınsaması ve bulgulardaki belirsizliğin tespit edilebilmesi için kaba, orta ve ince olmak üzere üç farklı yoğunlukta hesaplama ağı kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamındaki sayısal çözümlerde ince ağ yapısından elde edilen sayısal bulguların daha iyi olacağı beklendiğinden, sadece  $GCI_{ince}$  değerinin hesaplanmasının yeterli olacağı kanaatine varılmıştır.

Aşağıda  $GCI_{ince}$  değerinin hesabında kullanılan formüller verilmiştir:

$$d_3 < d_2 < d_1 \quad (5.13.)$$

$$e_{12} = u_1 - u_2, \quad e_{23} = u_2 - u_3, \quad r_{12} = \frac{d_1}{d_2}, \quad r_{23} = \frac{d_2}{d_3} \quad (5.14.)$$

$$P = \frac{1}{\ln(r_{23})} \ln \left( \frac{r_{23}^P - 1}{r_{12}^P - 1} \right) \frac{e_{12}}{e_{23}} \quad (5.15.)$$

$$E_{23} = \frac{u_3 - u_2}{u_3} \quad (5.16.)$$

$$GCI_{23}^{ince} = \frac{1.25 |E_{23}|}{r_{23}^P - 1} \quad (5.17.)$$

Denklem 5.14'de bulunan,

- $u_1$ :  $d_1$  aralığıyla tanımlanan kaba hassasiyetli ağ ile elde edilen hız değeri,
- $u_2$ :  $d_2$  aralığıyla tanımlanan orta hassasiyetli ağ ile elde edilen hız değeri,
- $u_3$ :  $d_3$  aralığıyla tanımlanan hassas (ince) ağ ile elde edilen hız değeri,
- P: doğruluk mertebesidir.

Roache (1994)'e göre  $r_{23}, r_{12} \geq 1.10$  olmalıdır. Ayrıca üç veya daha fazla ağ yapısı için güvenlik faktörü, Roache (1997) tarafından 1.25 olarak önerilmektedir.

Denklem 5.17 de ifade edilen  $GCI_{23}^{ince}$  değerinin % 2'den düşük olması durumunda sayısal analizler sonucunda elde edilen bulguların ağ yapısından bağımsızlaştığı kanaatine varılır.

## 6. AÇIK KANAL AKIMININ HAD İLE MODELLENMESİ

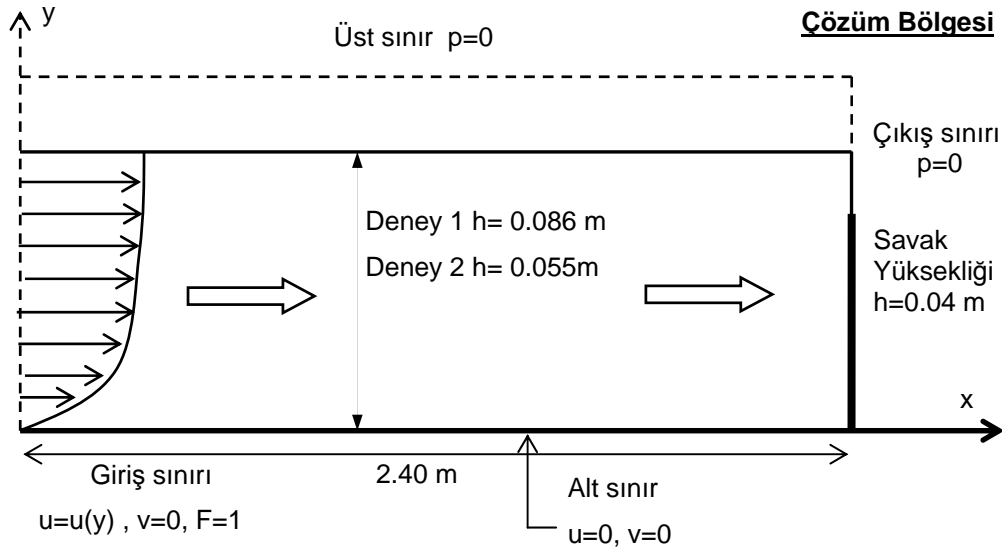
Hesaplama Akışkanlar Dinamiği, akışkanlar mekaniği problemlerinin analizi ve çözülmesi için sayısal yöntem ve algoritmaların kullanıldığı bir akışkanlar mekaniği bilimi dalıdır. Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan hesap zorlukları Hesaplama Akışkanlar Dinamiği kavramının ortaya çıkmasında çok büyük bir etken olmuştur. Temel olarak HAD yöntemleri ile sıvı ve gazların katı yüzeyler ile etkileşimleri bilgisayar yardımı ile simüle edilir. HAD yöntemleri sayesinde ciddi zaman tasarrufları sağlanmış ve olayla ilgili değişik varyasyonlar türetilmesinin önü açılmıştır. Son yıllarda mühendislik uygulamalarındaki teknolojik gelişmelere paralel olarak HAD yöntemlerinde de yeni yazılımlar geliştirilmiş ve geliştirmelere paralel olarak mühendislik uygulamalarının analiz ve tasarımında büyük kolaylıklar sağlanmıştır. İnşaat Mühendisliği alanında su ile etkileşim halindeki birçok yapının tasarımında HAD yazılımları günümüzde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. HAD yazılımları yardımıyla yapılan sayısal modellemeler sonucunda akımların analizi daha hızlı ve ucuz bir şekilde, değişik çözümler denenerek yapılabilmektedir. Bununla birlikte HAD yazılımları günümüzde oldukça gelişmiş olsa da yapılan analizlerin deneysel sonuçlarla birlikte yorumlanması gerekliliği halen geçerliliğini korumaktadır. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği yazılımları kapsamında STAR CFD, Flotran, Fluent v.b. birçok ticari paket program geliştirilmiştir. Bu çalışmada temel denklemlerin sayısal olarak çözümünde ANSYS 14.5 Fluent yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

### 6.1. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları

Sayısal çözümde kullanılan dikdörtgen kesitli açık kanal akımında çözüm bölgesinin geometrisi ve boyutları Şekil 6.1'de görülmektedir. Çözüm bölgesinin sol alt köşesi hesap koordinatları için orijin olarak seçilmiştir. Çözüm bölgesinin üst sınırı, memba su seviyesinin biraz üstü, alt sınırı ise kanal tabanı kabul edilmiştir. Alt sınırda sıfır-hız duvar sınır şartı,  $u = v = 0$  kabulü yapılmıştır. İki farklı deney



durumu için de yapılan sayısal çözümlerde, giriş sınır şartı olarak her iki durumda da deneysel olarak ölçülen hız profilleri kullanılmış, kanal sonundaki serbest dökülme kesiti olan çıkış sınırında ve çözüm bölgesinin üst sınırında, basınç şartı  $p=0$  değeri kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Sayısal hesaplama bölgesi ve sınır şartları

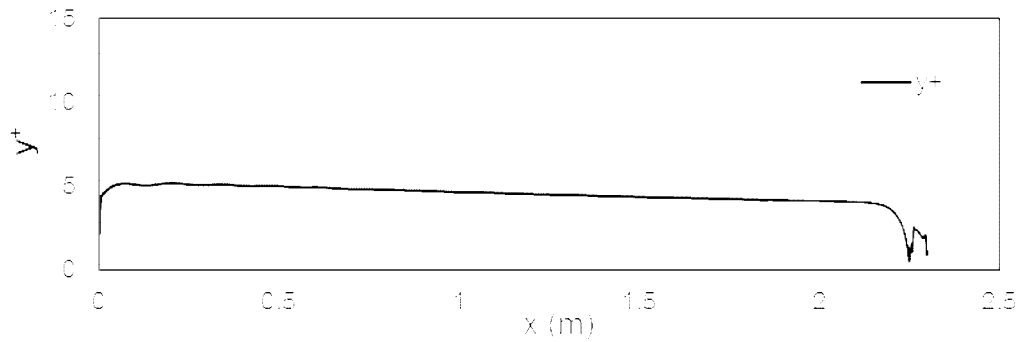
Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak, çözüm bölgesinin giriş sınırında VOF yöntemindeki doluluk oranı  $F=1$  alınmıştır.

## 6.2. Cidar Bölgesinin Modellenmesi

Ansys-Fluent, cidar bölgesini modellemek için duvar fonksiyonu ve iki tabakalı bölge modeli seçeneklerini sunmaktadır. Bu çalışmada, cidara yakın bölgenin çözünürlüğü, yüksek yoğunluklu (ince) ağ ile çözümlenen iki tabakalı bölge modeli olarak ele alınmıştır. Kırkgöz ve Ardıçlıoğlu (1997),  $y^+ (= u_* y / \nu)$  değerinin 10'dan küçük olması halinde hız dağılımının, viskoz alt tabakadaki lineer dağılıma uyduğunu rapor etmişlerdir. Burada  $u_*$  kayma hızı,  $y$  katı sınırdan itibaren düşey mesafe ve  $\nu$  ise kinematik viskoziteyi göstermektedir. Bu kriter göz önünde bulundurularak bu çalışma kapsamında, duvara yakın elemanların,  $y^+ \leq 10$  olacak şekilde boyutsuz cidar mesafesi değerlerine sahip olmalarına dikkat edilmiştir. Şekil

6.2’de Deney 1 durumunda RKE türbülans modeli kullanılarak elde edilen  $y^+$  değerlerinin kanal boyunca değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi akım boyunca hesaplanan  $y^+$  değerinin 5’in altında kalmasıyla cidar yakınındaki ağ elemanının viskoz alt tabaka içinde gömülü olduğu anlaşılmaktadır.

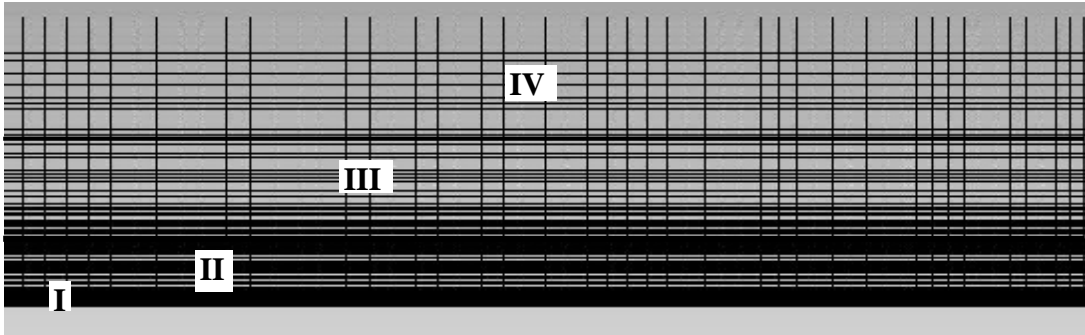
Bu durumda, cidar yakınındaki ağ elemanının tabana dik doğrultudaki boyutu yeterli inceliğe sahip olmaktadır.



Şekil 6.2. Deney 1 durumu için RKE türbülans modeli ile elde edilen  $y^+$  değerinin kanal boyunca değişimi

### 6.3. Sonlu Hacimler Hesaplama Ağı

HAD uygulamalarında, hesaplama ağı tasarımı sayısal bulgular için önemli ölçüde etkili olmaktadır. Bu çalışmadaki probleme uygun hesaplama ağının oluşturulmasında, önceki çalışmalarda edinilen deneyimlere bağlı olarak, katı sınıra doğru ağ geometrisinde sıklaştırmalar yapılmıştır. Akımın karakteri göz önüne alınarak, Şekil 6.1’de verilen sayısal hesaplama bölgesi, Şekil 6.3’de görüldüğü gibi, 4 alt bölgeye ayrılmış, her bir alt bölgede eleman sayısı yaklaşık olarak %25-50 arasında değişen oranlarda arttırılarak, lineer dörtgen elemanlardan oluşan 3 farklı yoğunluğa sahip ağ yapısı elde edilmiştir. Buna göre I. Bölgede (katı sınır yakınında) ağ sıklığı oldukça yoğunken yukarıya doğru olan bölgelerde ağ sıklığı azaltılmıştır.



Şekil 6.3. Sayısal modelin hesaplama ağındaki kullanılan alt bölgeler

Sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı yoğunluktaki ağ tasarımı için düzenlenen eleman sayıları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Çizelgeye göre örnek olarak kaba ağ yoğunluğuna sahip ağda 1. alt bölge yatayda 250, düşeyde 30 hücreden oluşmaktadır. Çizelgede belirtilen farklı yoğunluktaki üçlü ağ, ağ yakınsama indeksi için esas alınmıştır.

Çizelge 6.1. Üç farklı yoğunluktaki ağlar için bölgelerdeki eleman sayıları

Bölge	Kaba	Orta	İnce
I	30x250	45x375	60x500
II	8x250	12x375	15x500
III	10x250	15x375	20x500
IV	20x250	30x375	40x500

#### 6.4. Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) Uygulaması

Sayısal çözüm alanındaki hesaplama ağ yapısının yeterli sıklıkta olup olmadığı kontrol etmek ve ağ yapısından bağımsız sayısal çözümler elde etmek amacıyla ele alınan üçlü ağ sistemindeki ince ağ yapısındaki sıklaştırmanın uygunluğu, Ağ yakınsama indeksi (Grid Convergence Index -GCI) yöntemiyle test edilmiştir. Çalışmada, ağ yapısına bağlı sayısal hesaplama hatalarının istenen bir sınırın altında kalıp kalmadığını belirlemek için, akım hızları için GCI değerleri belirlenmiştir.

Beş farklı kesit ( $x=0.35, 0.70, 1.10, 1.50$  ve  $1.90m$ ) için Deney 1'deki, akım hızları kullanılarak denklem 5.13-5.17'deki formüller kullanılarak elde edilmiş olan

GCI sonuçları Çizelge 6.2-6.6'da verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde, en yüksek GCI değerlerinin  $x=0.35$ ,  $0.70$  ve  $1.90$  m kesitlerinde su yüzüne yakın bölgelerde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca kanal başında katı sınıra yakın olan bölgelerde elde edilen GCI değerinin kanal sonunda aynı noktalarda elde edilen değerlerden nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna neden olarak, deneylerde oluşan akım profil türünün, uniform olmayan yavaş değişen M1 profili olması ve akım su yüksekliğinin artmasına bağlı olarak akım hızının düşmesi gösterilebilir. Akım hızı düşerken ağ yapısının aynı kalması nedeniyle, en yüksek hız değerine sahip olan kanal başındaki kesitlerde GCI değerleri beklendiği gibi daha yüksek, akım hızının düşük olduğu kanal sonundaki kesitlerde ise daha düşük değerler elde edilmiştir.

Çizelge 6.2.  $x=0.35$  m kesiti için GCI değerleri

h(mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>3</sub> (mm)	Hızlar (m/s)			GCI <sub>ince</sub> (%)
				u <sub>1</sub> (m/s)	u <sub>2</sub> (m/s)	u <sub>3</sub> (m/s)	
11	1,1721	0,7796	0,5910	0,3717	0,3711	0,3708	-0,9667
22	1,4534	0,9568	0,7216	0,4029	0,4016	0,4015	-0,5402
33	1,7181	1,1378	0,8506	0,4203	0,4185	0,4182	-0,4005
44	1,5753	1,1108	0,8853	0,4337	0,4310	0,4302	-0,5094
55	2,1393	1,4284	1,0721	0,4461	0,4418	0,4399	-1,0133
66	2,9112	1,9226	1,4355	0,4599	0,4522	0,4484	-0,6753
77	3,6678	2,4625	1,8531	0,4737	0,4623	0,4558	1,8103

Çizelge 6.3.  $x=0.70$  m kesiti için GCI değerleri

h(mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>3</sub> (mm)	Hızlar (m/s)			GCI <sub>ince</sub> (%)
				u <sub>1</sub> (m/s)	u <sub>2</sub> (m/s)	u <sub>3</sub> (m/s)	
11	1,1721	0,7796	0,5910	0,3717	0,3712	0,3708	-1,0860
22	1,4534	0,9568	0,7216	0,4029	0,4016	0,4015	0,0052
33	1,7181	1,1378	0,8506	0,4203	0,4185	0,4182	0,0232
44	1,5753	1,1108	0,8853	0,4337	0,4310	0,4302	0,2714
55	2,1393	1,4284	1,0721	0,4461	0,4418	0,4399	1,0787
66	2,9112	1,9226	1,4355	0,4599	0,4522	0,4484	1,0977
77	3,6678	2,4625	1,8531	0,4737	0,4623	0,4578	1,9668

Çizelge 6.4.  $x=1.10$  m kesiti için GCI değerleri

h(mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>3</sub> (mm)	Hızlar (m/s)			GCI <sub>ince</sub> (%)
				u <sub>1</sub> (m/s)	u <sub>2</sub> (m/s)	u <sub>3</sub> (m/s)	
11	1,1721	0,7796	0,5910	0,3548	0,3537	0,3535	0,0839
22	1,4534	0,9568	0,7216	0,3886	0,3883	0,3875	-0,3795
33	1,7181	1,1378	0,8506	0,4076	0,4075	0,4067	-0,2781
44	1,5753	1,1108	0,8853	0,4214	0,4212	0,4206	-0,2415
55	2,1393	1,4284	1,0721	0,4330	0,4327	0,4320	-0,3252
66	2,9112	1,9226	1,4355	0,4442	0,4434	0,4425	-0,8177
77	3,6678	2,4625	1,8531	0,4549	0,4541	0,4527	-0,6986

Çizelge 6.5.  $x=1.50$  m kesiti için GCI değerleri

h(mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>3</sub> (mm)	Hızlar (m/s)			GCI <sub>ince</sub> (%)
				u <sub>1</sub> (m/s)	u <sub>2</sub> (m/s)	u <sub>3</sub> (m/s)	
11	1,1721	0,7796	0,5910	0,3379	0,3385	0,3394	-0,6879
22	1,4534	0,9568	0,7216	0,3740	0,3749	0,3769	-0,8683
33	1,7181	1,1378	0,8506	0,3955	0,3951	0,3941	-0,4787
44	1,5753	1,1108	0,8853	0,4100	0,4099	0,4088	-0,3676
55	2,1393	1,4284	1,0721	0,4215	0,4214	0,4205	0,3163
66	2,9112	1,9226	1,4355	0,4320	0,4316	0,4309	-0,4083
77	3,6678	2,4625	1,8531	0,4428	0,4412	0,4405	0,2741

Çizelge 6.6.  $x=1.90$  m kesiti için GCI değerleri

h(mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>3</sub> (mm)	Hızlar (m/s)			GCI <sub>ince</sub> (%)
				u <sub>1</sub> (m/s)	u <sub>2</sub> (m/s)	u <sub>3</sub> (m/s)	
11	1,1721	0,7796	0,5910	0,3249	0,3250	0,3259	-0,3850
22	1,4534	0,9568	0,7216	0,3620	0,3617	0,3600	-0,6861
33	1,7181	1,1378	0,8506	0,3851	0,3844	0,3820	-1,0532
44	1,5753	1,1108	1,8853	0,3994	0,3989	0,3971	-0,7433
55	2,1393	1,4284	1,0721	0,4104	0,4100	0,4080	-0,7367
66	2,9112	1,9126	1,4355	0,4221	0,4205	0,4183	-1,5297
77	3,6678	2,4625	1,8531	0,4311	0,4295	0,4275	-1,5267

Yukarıdaki çizelgelerde gösterilen, beş farklı kesitte ve her kesitte yedi farklı yükseklikte elde edilen  $GCI_{ince}$  değerleri incelendiğinde farklı yoğunluktaki ağlar kullanılarak hesaplanan  $GCI_{ince}$  değerlerinin kabul edilebilir bir sınır olan % 2 değerinden küçük olması sebebiyle ince ağ sistemiyle yapılan sayısal çözümlerin ağ yapısından bağımsızlaştığı kanaatine varılmış olup sayısal analizler ince ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sayısal modellemede kullanılan hesap ağının sıklığı zaman adımını doğrudan etkileyen bir unsurdur. Çalışmada kullanılacak ağ yapısının ince ağ yapısı seçilmesi nedeniyle kullanılan türbülans modellerinde zaman adımı  $\Delta t=0.001$  s seçilmiştir. Kanal tabanındaki katı sınıra yakın akım bölgesinin modellenmesinde iki tabakalı çözümü esas alan ve genişletilmiş iki tabakalı duvar-yakını modellemesi olarak anılan yöntem kullanılmıştır (Chen ve Patel, 1988). Seçilen  $\Delta t$  değeri Denklem 6.1' de ifade edilen Courant Number (Cn) formülünde yerine konulduğunda, 0.01 ile 1.3 arasında değişen değerler elde edilmiştir.

$$Cn = \frac{\Delta t}{\Delta x_{ağ} / V_{akım}} \quad (6.1)$$

Burada,  $\Delta t$  zaman adımı olan 0.001 s değerini,  $\Delta x_{ağ}$  x doğrultusundaki ağ boyutunu (m),  $V_{akım}$  ise hücredeki akım hızını (m/s) ifade etmektedir. 'Cn' değeri öngörülen sınır değer olan 2 değerinden düşük olduğu için zaman adımının hesap sonuçlarına etkisinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde (%2) olduğu sonucuna varılmıştır (Ansys, 2012).

Bir problemde kullanılan hesaplama ağının yapısı olayın sayısal olarak analiz edilmesi için gereken süreyi doğrudan etkilemektedir. Ağ sıkılaştırmalarının artmasına paralel olarak sayısal çözüm için gerekli olan süre de artacaktır. Bu çalışmadaki zaman adımı ve ağ yapısına bağlı olarak Quad Core 2.6 GHZ işlemcili 4GB RAM özelliklerine sahip bir bilgisayar ile 40 s süreli çözüm elde etmek için, yaklaşık 13 saatlik bir hesaplama süresi gerekmektedir.



## 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 7.1 Hesaplanan Hız Profillerinin Deneylerle Karşılaştırılması

Sayısal olarak modellenerek analiz edilen herhangi bir akımda, kullanılan türbülans modeline göre farklı çözüm bulguları elde edilmektedir. Bu sebeple akımın en iyi şekilde analiz edilmesi için sayısal analizde kullanılacak türbülans modelinin tespiti önemlidir. Bu sebeple birkaç farklı türbülans modeli kullanılarak elde edilen çözüm bulguları karşılaştırılarak akım özelliklerini en iyi tespit eden türbülans modeli belirlemeye çalışılmaktadır. Çalışmada k- $\epsilon$  tabanlı üç farklı türbülans modeli kullanılmış, kullanılan türbülans modellerinin akımı idare eden denklemleri çözmedeki başarı dereceleri, *Ortalama Karesel Hata* (OKH) ve *Ortalama Mutlak Göreceli Hata* (OMGH) sonuçları temel alınarak değerlendirilmiştir. Aşağıda OKH ve OMGH değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formüller verilmiştir.

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\bar{u}_d - \bar{u}_h)^2 \quad (7.1.)$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{\bar{u}_d - \bar{u}_h}{\bar{u}_d} \right| \times 100 \quad (7.2.)$$

Denklem 7.1 ve 7.2'deki,  $\bar{u}_d$  ve  $\bar{u}_h$  sırasıyla deneysel ve hesaplanan zamansal ortalama hız değerlerini, N ise kesit derinliğindeki noktasal ölçüm sayısını göstermektedir. Çizelge (7.1) ve Çizelge (7.2)'de Deney 1 ve Deney 2 debi durumları için, kanalın farklı kesitlerinde, SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri için hesaplanan OKH ve OMGH değerleri verilmiştir.



Çizelge 7.1. Deney 1 durumunda SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH değerleri

DENEY 1						
Kesit Yerleri (m)	SKE		RNG		RKE	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
<b>0.10</b>	1.5000 <sup>(2)</sup>	7.4377 <sup>(2)</sup>	2.8000 <sup>(3)</sup>	11.3633 <sup>(3)</sup>	<b>0.9930<sup>(1)</sup></b>	<b>6.1069<sup>(1)</sup></b>
<b>0.20</b>	1.3000 <sup>(3)</sup>	7.1734 <sup>(3)</sup>	1.1000 <sup>(2)</sup>	6.4307 <sup>(2)</sup>	<b>0.9890<sup>(1)</sup></b>	<b>6.1001<sup>(1)</sup></b>
<b>0.35</b>	0.8960 <sup>(2)</sup>	6.5641 <sup>(3)</sup>	0.9760 <sup>(3)</sup>	6.5199 <sup>(2)</sup>	<b>0.7120<sup>(1)</sup></b>	<b>5.9934<sup>(1)</sup></b>
<b>0.50</b>	0.8430 <sup>(2)</sup>	6.5350 <sup>(2)</sup>	1.1000 <sup>(3)</sup>	7.1168 <sup>(3)</sup>	<b>0.7110<sup>(1)</sup></b>	<b>6.1131<sup>(1)</sup></b>
<b>0.70</b>	0.3320 <sup>(3)</sup>	4.3481 <sup>(3)</sup>	<b>0.2430<sup>(1)</sup></b>	<b>3.4961<sup>(1)</sup></b>	0.2470 <sup>(2)</sup>	3.6621 <sup>(2)</sup>
<b>0.90</b>	0.4200 <sup>(3)</sup>	5.1754 <sup>(3)</sup>	0.4010 <sup>(2)</sup>	4.8807 <sup>(2)</sup>	<b>0.3740<sup>(1)</sup></b>	<b>4.8743<sup>(1)</sup></b>
<b>1.10</b>	0.5360 <sup>(3)</sup>	5.8693 <sup>(3)</sup>	0.5300 <sup>(2)</sup>	5.5863 <sup>(2)</sup>	<b>0.4930<sup>(1)</sup></b>	<b>5.4595<sup>(1)</sup></b>
<b>1.30</b>	0.2680 <sup>(2)</sup>	4.0260 <sup>(3)</sup>	0.2820 <sup>(3)</sup>	3.8848 <sup>(2)</sup>	<b>0.2520<sup>(1)</sup></b>	<b>3.7953<sup>(1)</sup></b>
<b>1.50</b>	0.3570 <sup>(3)</sup>	5.0120 <sup>(3)</sup>	<b>0.3030<sup>(1)</sup></b>	<b>4.2167<sup>(1)</sup></b>	0.3280 <sup>(2)</sup>	4.6338 <sup>(2)</sup>
<b>1.70</b>	0.3980 <sup>(3)</sup>	5.3940 <sup>(3)</sup>	<b>0.3300<sup>(1)</sup></b>	<b>4.6973<sup>(1)</sup></b>	0.3760 <sup>(2)</sup>	5.0882 <sup>(2)</sup>
<b>1.90</b>	0.3620 <sup>(3)</sup>	4.8827 <sup>(3)</sup>	<b>0.2270<sup>(1)</sup></b>	<b>3.6930<sup>(1)</sup></b>	0.2980 <sup>(2)</sup>	4.4125 <sup>(2)</sup>
<b>2.10</b>	0.2390 <sup>(3)</sup>	3.8724 <sup>(3)</sup>	<b>0.1960<sup>(1)</sup></b>	<b>3.0258<sup>(1)</sup></b>	0.2350 <sup>(2)</sup>	3.4213 <sup>(2)</sup>
<b>Ortalama</b>	0.6209 <sup>(2)</sup>	5.5242 <sup>(2)</sup>	0.7073 <sup>(3)</sup>	5.3845 <sup>(3)</sup>	<b>0.5007<sup>(1)</sup></b>	<b>4.9965<sup>(1)</sup></b>

Çizelge 7.1’de görülen Deney 1 durumu için OKH ve OMGH değerleri incelendiğinde ele alınan üç modelin de birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Çizelgedeki değerlere göre  $x=0.10, 0.20, 0.35, 0.50, 0.90, 1.10$  ve  $1.30$  m kesitlerinde RKE türbülans modeli,  $x=0.70, 1.50, 1.70, 1.90$  ve  $2.10$  m kesitlerinde ise RNG türbülans modeli en başarılı türbülans kapatma modeli olmaktadır. Başarı sıralamaları incelendiğinde ise,  $x=0.20, 0.90$  ve  $1.10$  m kesitlerinde RKE, RNG, SKE,  $x=0.70, 1.50, 1.70, 1.90, 2.10$  m kesitlerinde RNG, RKE, SKE,  $x=0.10, 0.35, 0.50$  ve  $1.30$  m kesitlerinde ise RKE, SKE ve RNG şeklinde bir başarı sıralaması oluşmuştur. Deney 1 için tüm kanal boyunca hesaplanan ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı model RKE türbülans modeli olurken, başarı sıralaması RKE, RNG ve SKE şeklinde olmuştur.

Çizelge 7.2. Deney 2 durumunda SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH değerleri

DENEY 2						
Kesit Yerleri (m)	SKE		RNG		RKE	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
<b>0.10</b>	0.2930 <sup>(3)</sup>	5.3295 <sup>(3)</sup>	<b>0.1680<sup>(1)</sup></b>	<b>4.6816<sup>(1)</sup></b>	0.2330 <sup>(2)</sup>	4.9205 <sup>(2)</sup>
<b>0.20</b>	0.2650 <sup>(3)</sup>	5.4697 <sup>(3)</sup>	<b>0.1420<sup>(1)</sup></b>	<b>4.3281<sup>(1)</sup></b>	0.1590 <sup>(2)</sup>	4.3323 <sup>(2)</sup>
<b>0.35</b>	0.1590 <sup>(3)</sup>	4.8126 <sup>(3)</sup>	0.1250 <sup>(2)</sup>	4.3876 <sup>(2)</sup>	<b>0.0964<sup>(1)</sup></b>	<b>3.6766<sup>(1)</sup></b>
<b>0.50</b>	0.0839 <sup>(3)</sup>	4.1229 <sup>(3)</sup>	0.0609 <sup>(2)</sup>	3.4376 <sup>(2)</sup>	<b>0.0486<sup>(1)</sup></b>	<b>2.9329<sup>(1)</sup></b>
<b>0.70</b>	0.0945 <sup>(3)</sup>	4.5799 <sup>(3)</sup>	0.0866 <sup>(2)</sup>	3.8026 <sup>(2)</sup>	<b>0.0598<sup>(1)</sup></b>	<b>3.3092<sup>(1)</sup></b>
<b>0.90</b>	0.1410 <sup>(3)</sup>	5.1713 <sup>(3)</sup>	<b>0.0350<sup>(1)</sup></b>	<b>2.6471<sup>(1)</sup></b>	0.0628 <sup>(2)</sup>	3.3397 <sup>(2)</sup>
<b>1.10</b>	0.1169 <sup>(3)</sup>	4.8379 <sup>(3)</sup>	0.1160 <sup>(2)</sup>	4.6843 <sup>(2)</sup>	<b>0.0544<sup>(1)</sup></b>	<b>2.6330<sup>(1)</sup></b>
<b>1.30</b>	0.2490 <sup>(3)</sup>	7.0392 <sup>(3)</sup>	<b>0.1010<sup>(1)</sup></b>	<b>4.6347<sup>(1)</sup></b>	0.1070 <sup>(2)</sup>	5.2760 <sup>(2)</sup>
<b>1.50</b>	0.1340 <sup>(3)</sup>	5.5590 <sup>(3)</sup>	0.1299 <sup>(2)</sup>	5.2732 <sup>(2)</sup>	<b>0.0488<sup>(1)</sup></b>	<b>2.8951<sup>(1)</sup></b>
<b>1.70</b>	0.1686 <sup>(3)</sup>	6.6680 <sup>(3)</sup>	0.1254 <sup>(2)</sup>	5.0926 <sup>(2)</sup>	<b>0.0565<sup>(1)</sup></b>	<b>3.5064<sup>(1)</sup></b>
<b>1.90</b>	0.0974 <sup>(2)</sup>	4.9576 <sup>(2)</sup>	0.1520 <sup>(3)</sup>	6.4174 <sup>(3)</sup>	<b>0.0463<sup>(1)</sup></b>	<b>2.1412<sup>(1)</sup></b>
<b>2.10</b>	0.0799 <sup>(2)</sup>	4.7076 <sup>(2)</sup>	0.1660 <sup>(3)</sup>	7.1905 <sup>(3)</sup>	<b>0.0319<sup>(1)</sup></b>	<b>2.9006<sup>(1)</sup></b>
<b>Ortalama</b>	0.1569 <sup>(3)</sup>	5.2713 <sup>(3)</sup>	0.1173 <sup>(2)</sup>	4.7686 <sup>(2)</sup>	<b>0.0837<sup>(1)</sup></b>	<b>3.4348<sup>(1)</sup></b>

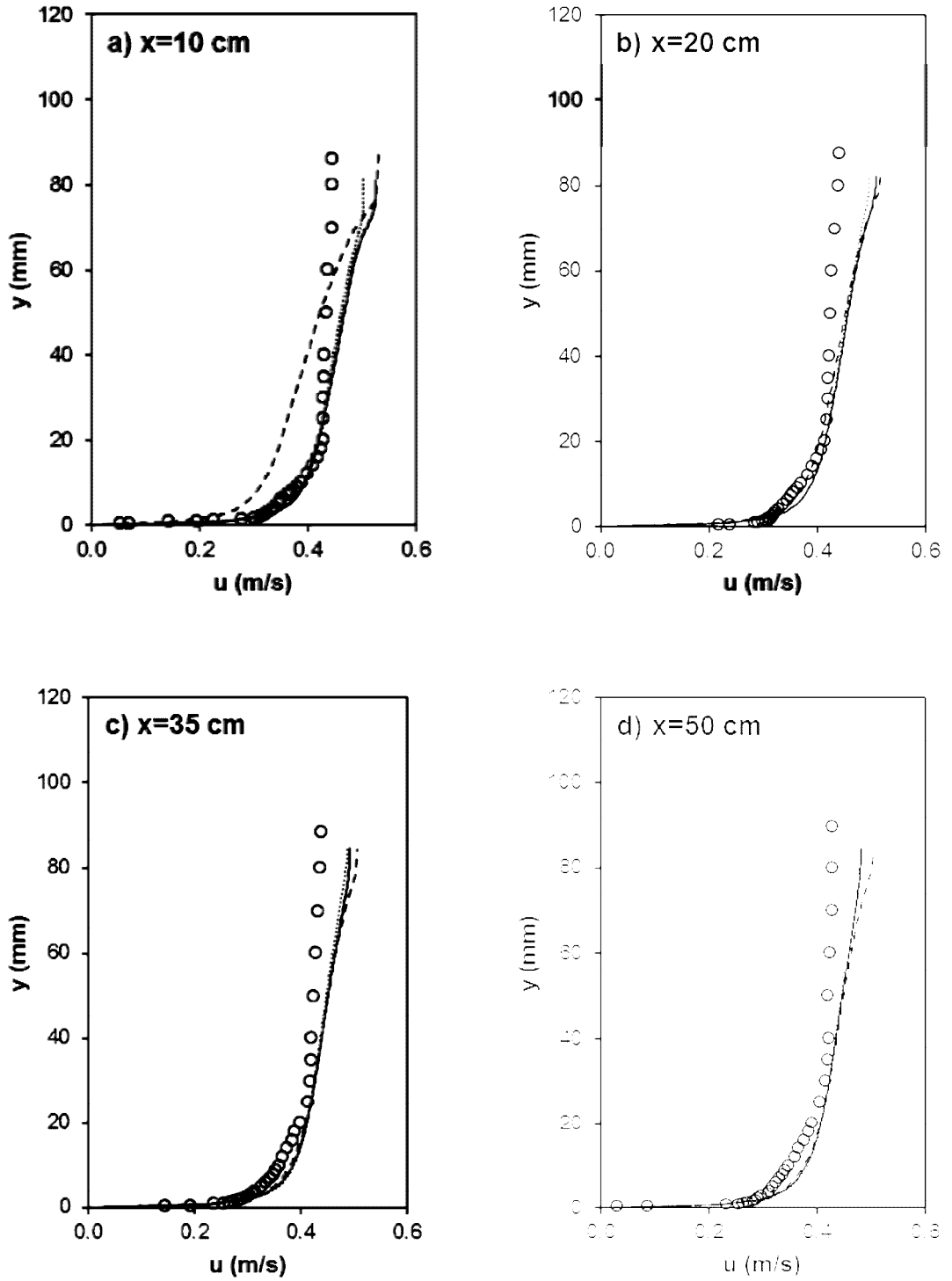
Çizelge 7.2 de görülen Deney 2 durumu için OKH ve OMGH değerleri incelendiğinde ele alınan üç modelin de Deney 1 durumundaki gibi birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.  $x=0.10$ ,  $0.20$ ,  $0.90$  ve  $1.30$  m kesitlerinde RNG türbülans modeli,  $x=0.35$ ,  $0.50$ ,  $0.70$ ,  $1.10$ ,  $1.50$ ,  $1.70$ ,  $1.90$  ve  $2.10$  m kesitlerinde RKE türbülans modeli en başarılı türbülans kapatma modeli olarak belirlenmiştir. Başarı sıralamaları ise  $x=0.10$ ,  $0.20$ ,  $0.90$  ve  $1.30$  m kesitlerinde RNG, RKE, SKE,  $x=0.35$ ,  $0.50$ ,  $0.70$ ,  $1.10$ ,  $1.50$  ve  $1.70$  m kesitlerinde RKE, RNG, SKE,  $1.90$  ve  $2.10$  m kesitlerinde ise RKE, SKE, RNG şeklinde gerçekleşmiştir. Deney 2 için kanal boyunca hesaplanan ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı model RKE ve RNG olurken, bu modelleri SKE türbülans modeli takip etmiştir.

Deney 1 ve Deney 2 için sayısal ve deneysel hızlardan elde edilen OKH ve OMGH değerleri ele alındığında, değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu, RKE türbülans modelinin her iki debi durumunda da en başarılı türbülans modeli olduğu anlaşılmaktadır. Yine her iki deney durumunda da incelenen akım türünün tipik bir

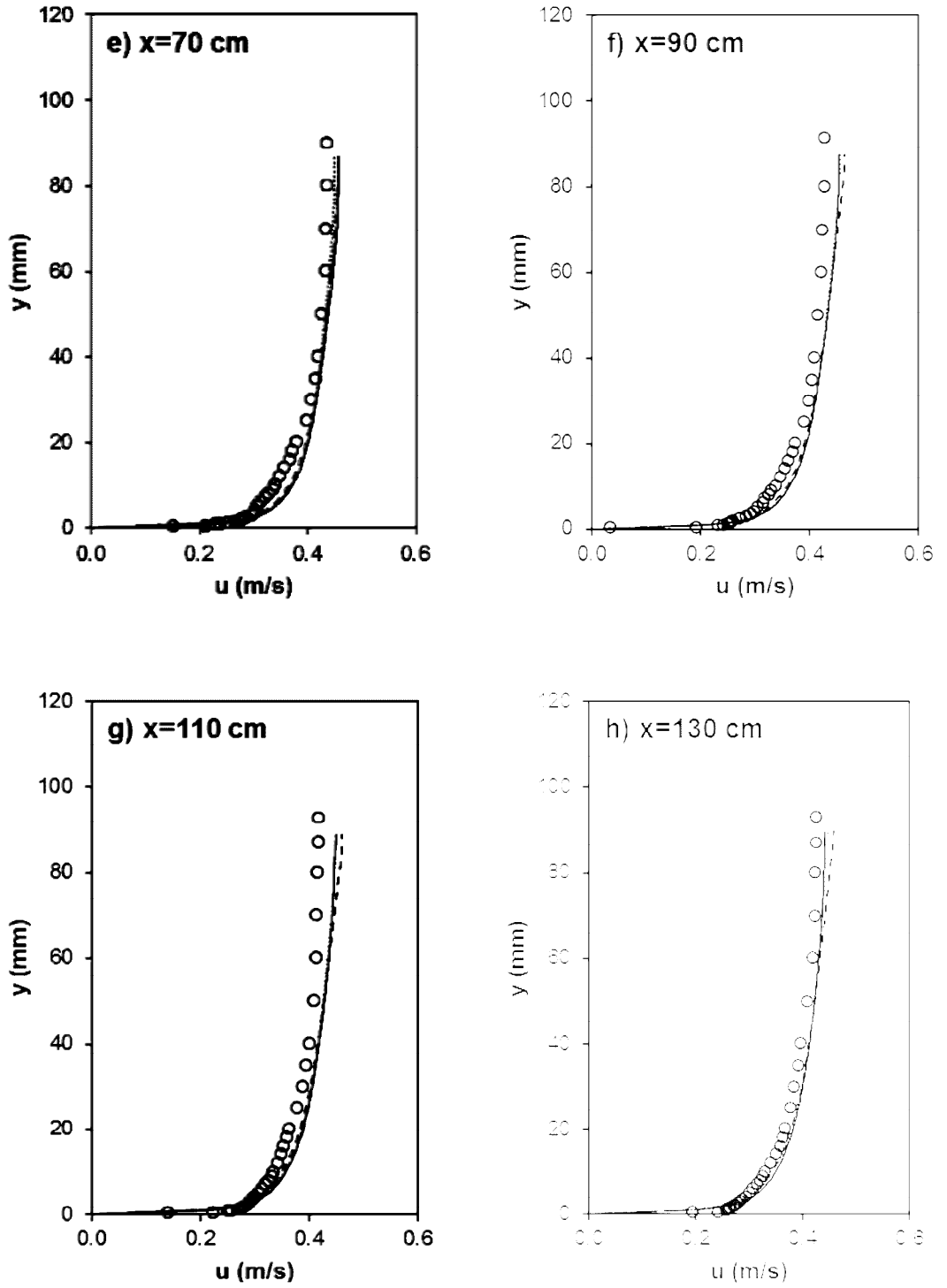
kritik altı açık kanal akım modeli olması, ani şekil değişimlerinin olmaması ve akım hızlarının oldukça düşük olması nedeniyle ele alınan türbülans modellerinin birbirlerine yakın bulgular vermesi beklenen bir sonuç olmuştur.

Aşağıdaki şekillerde akım boyunca deneysel ve sayısal olarak elde edilen hız değerleri her kesit için birarada verilmiş, grafiklerden deneysel bulgulara hangi türbülans modelinin daha yakın sonuçlar verdiği yorumlanmıştır.

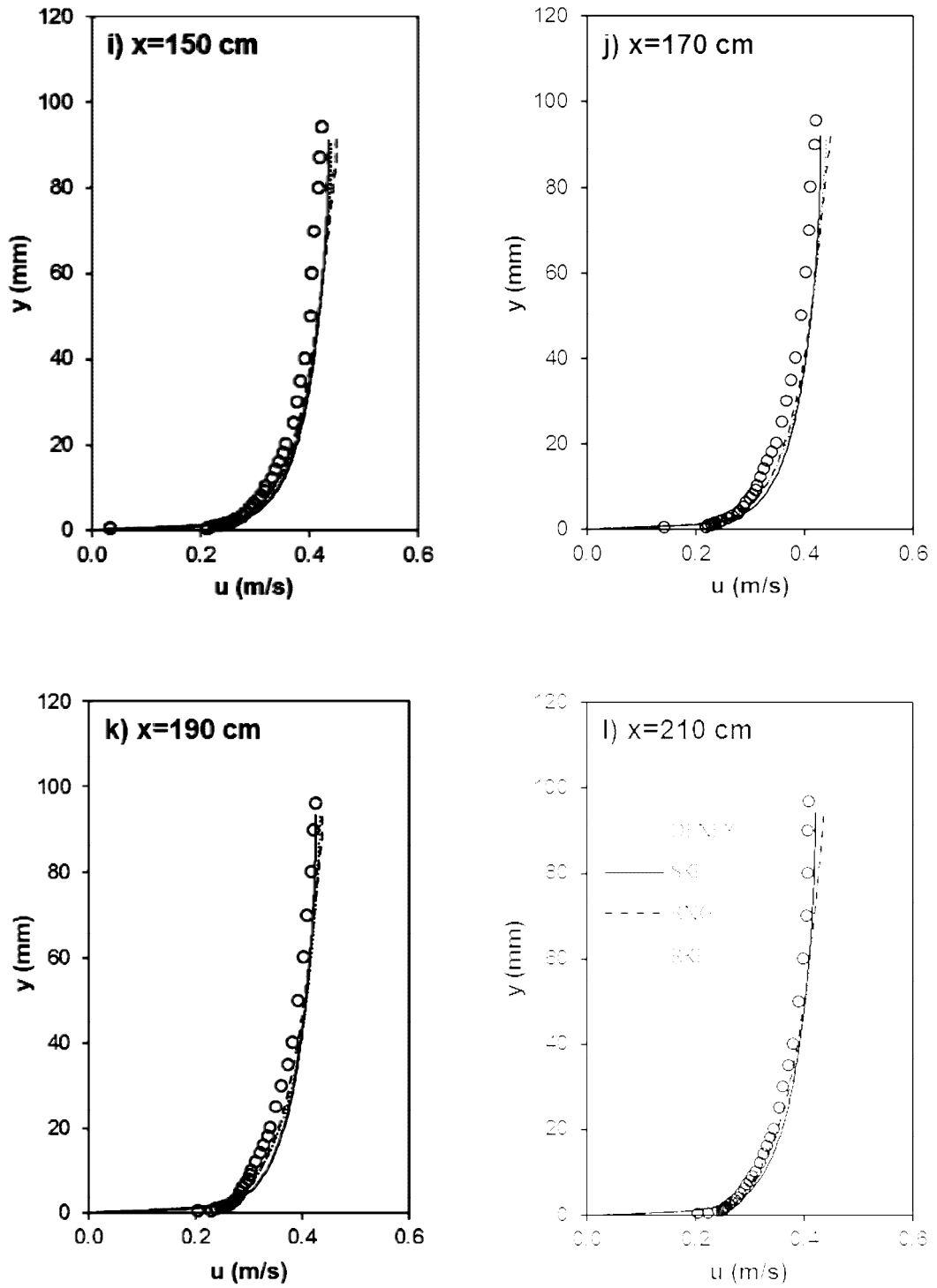
Şekil 7.1’de Deney 1 durumu için, kanalın farklı kesitlerinde ölçülen yatay hız profilleri ve üç farklı türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal bulgulara ait hız profilleri verilmiştir. Şekildeki grafiklere göre  $x=10$  cm kesitinde RKE ve SKE’nin RNG modele göre daha iyi sonuç verdiği,  $x=20, 35, 50, 70, 90, 110$  ve  $130$  cm kesitlerinde ise üç modelin de birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca özellikle  $70, 90, 110$  ve  $130$  cm kesitlerinde sayısal bulguların deneysel ölçümlere daha çok yaklaştığı görülmektedir. Kanalın sonuna doğru  $x=150, 170, 190$  ve  $210$  cm kesitlerinde ise, türbülans modellerinden elde edilen bulgular deneylere yakın olup RKE ve RNG türbülans modellerinin katı sınıra yakın olan bölgeyi modellemede SKE türbülans modelinden daha başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 7.1. Deney 1 durumu için kanalın farklı kesitlerinde deneysel ve sayısal hız profilleri



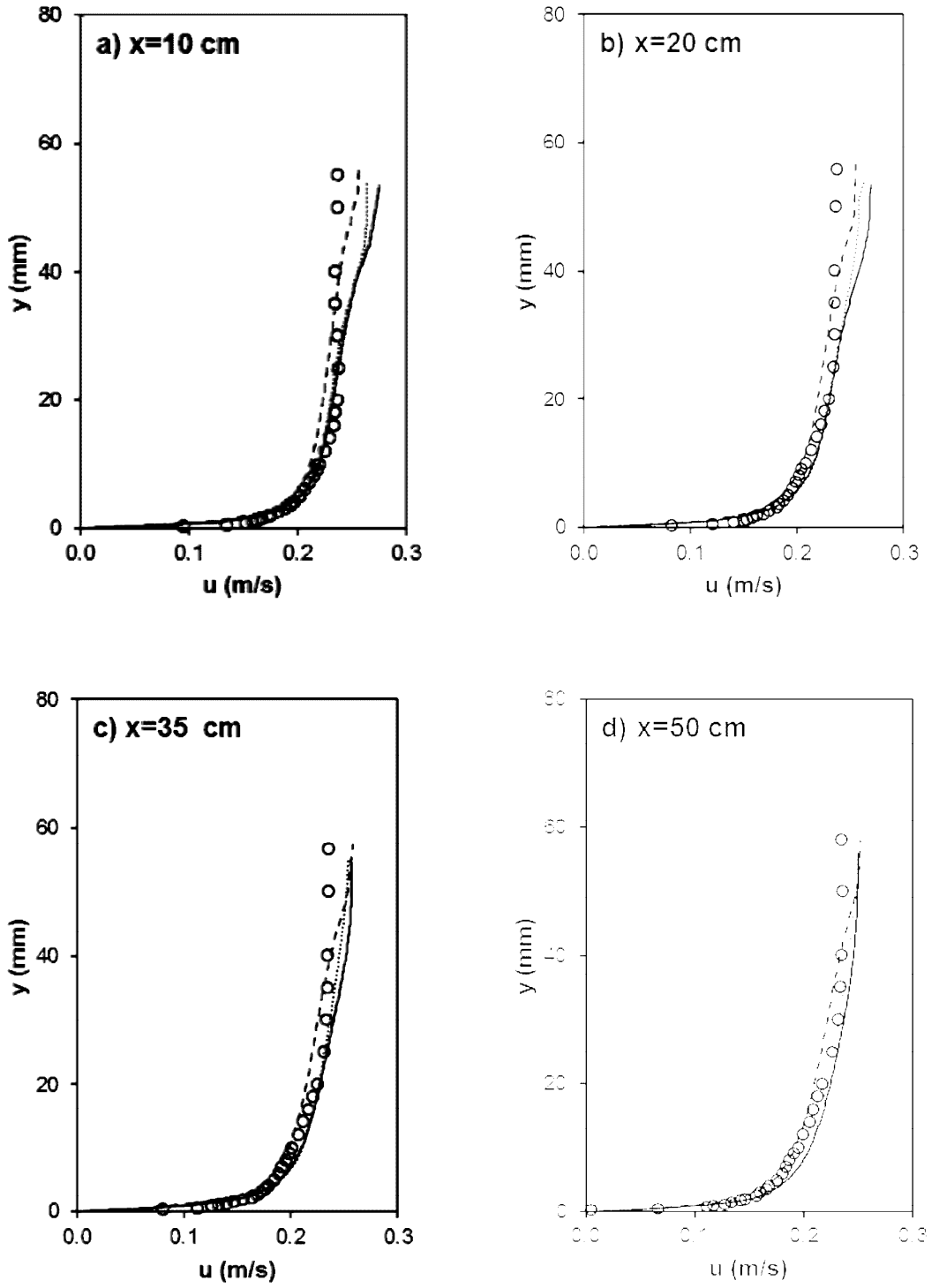
Şekil 7.1. (Devam)



Şekil 7.1. (Devam)

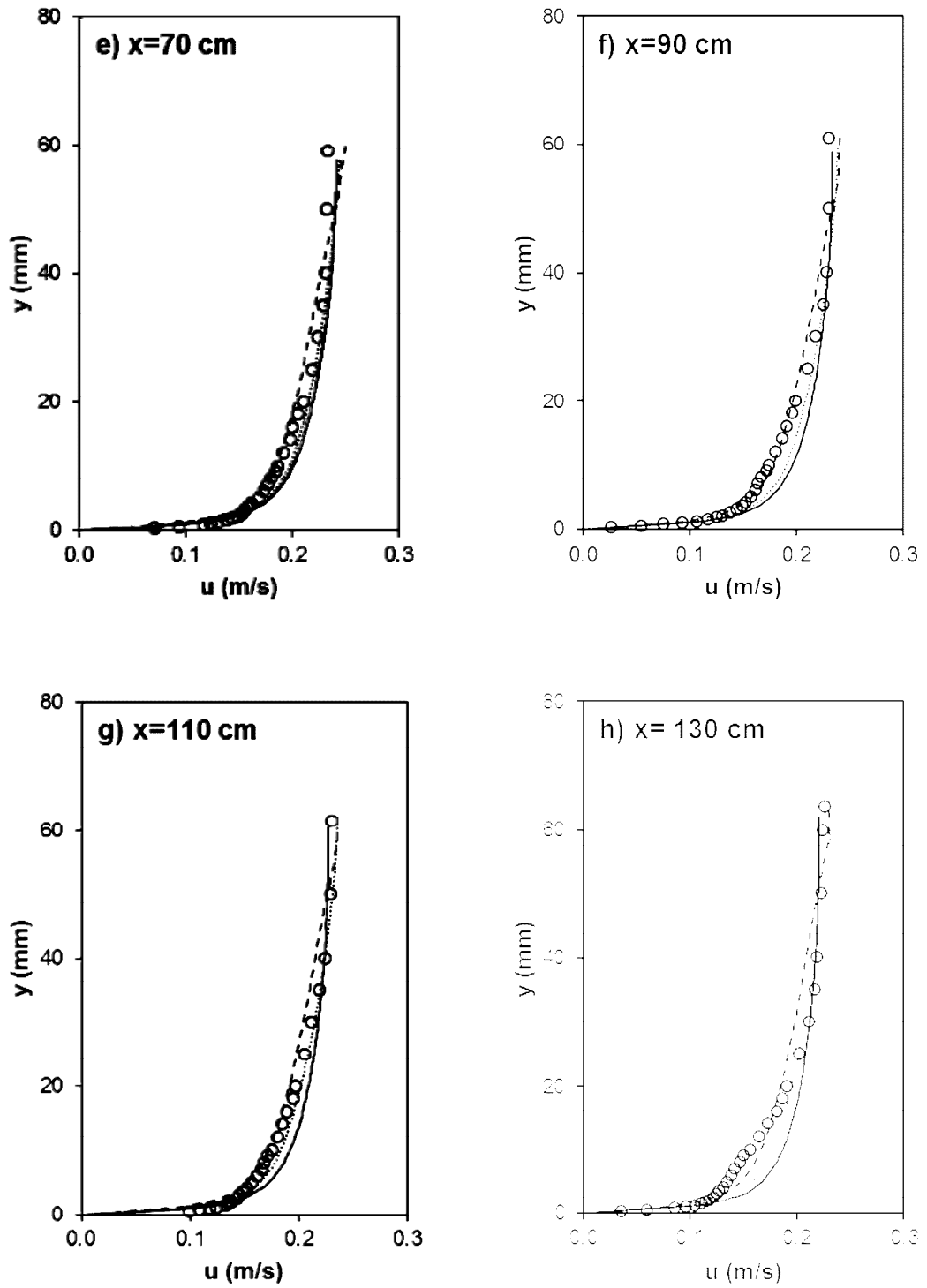
Şekil 7.2 de ise Deney 2 durumunda, kanalın farklı kesitlerinde ölçülen yatay hız profilleri ve üç farklı türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal bulgulara ait grafikler verilmiştir. Daha düşük debiye sahip Deney 2 durumunda üç türbülans modeli de tüm kesitlerde farklı davranışlar sergilemektedir.  $x=35, 50, 70, 90, 130$  ve  $170$  cm kesitlerinde katı sınıra yakın bölgeyi modellemede RNG; katı sınırdan uzaklaşılan yerlerde ise RKE türbülans modeli deneysel bulgulara yaklaşımda diğer modellere göre daha başarılı olmuştur.  $x=110, 150, 190$  ve  $210$  cm kesitlerinde ise RKE neredeyse tüm kesit boyunca deneysel bulgular ile aynı sonucu vermiştir.

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'deki grafikler bir bütün olarak incelendiğinde ise SKE modelinin kanalın başlangıç kesitlerinde RNG ve RKE modellerine paralel sonuçlar verdiği, ancak akım geliştikçe bu başarısının azaldığı, Şekil 7.1' deki Deney 1 durumunda RKE ve RNG modellerinin birbirlerine benzer sonuçlar verdiği ancak akımın gelişmesi ile birlikte aralarında az da olsa farkların meydana geldiği anlaşılmaktadır. Deney 2 durumunda ise kanalın başlangıçtaki birkaç kesitinde tüm modellerde deneysel bulgulardan uzaklaşma var gibi görünse de diğer kesitlerde model bulgularının deneylerle uyumlu olduğu görülmektedir. Deney 1 durumuna benzer şekilde Deney 2 durumunda da RKE ve RNG modellerinin birbirlerine daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Genel olarak her iki deney durumu için de RKE modelinin Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verilen OKH ve OMGH değerlerine paralel şekilde deneysel bulgulara daha çok yaklaştığı görülmektedir.

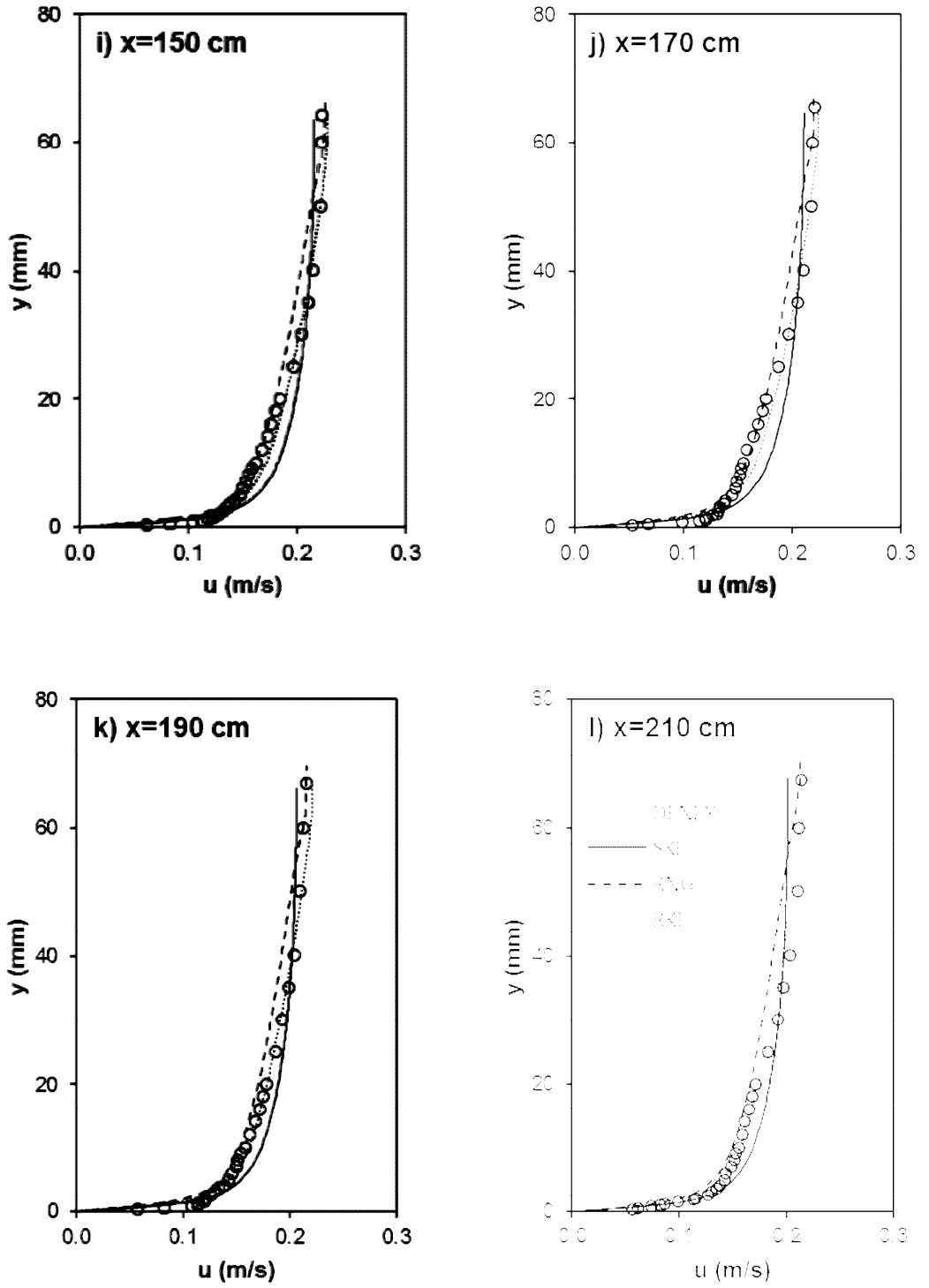


Şekil 7.2. Deney 2 durumu için kanalın farklı kesitlerinde deneysel ve sayısal hız profilleri





Şekil 7.2. (Devam)



Şekil 7.2. (Devam)

## 7.2. Deneysel Hızların Türbülans Özellikleri

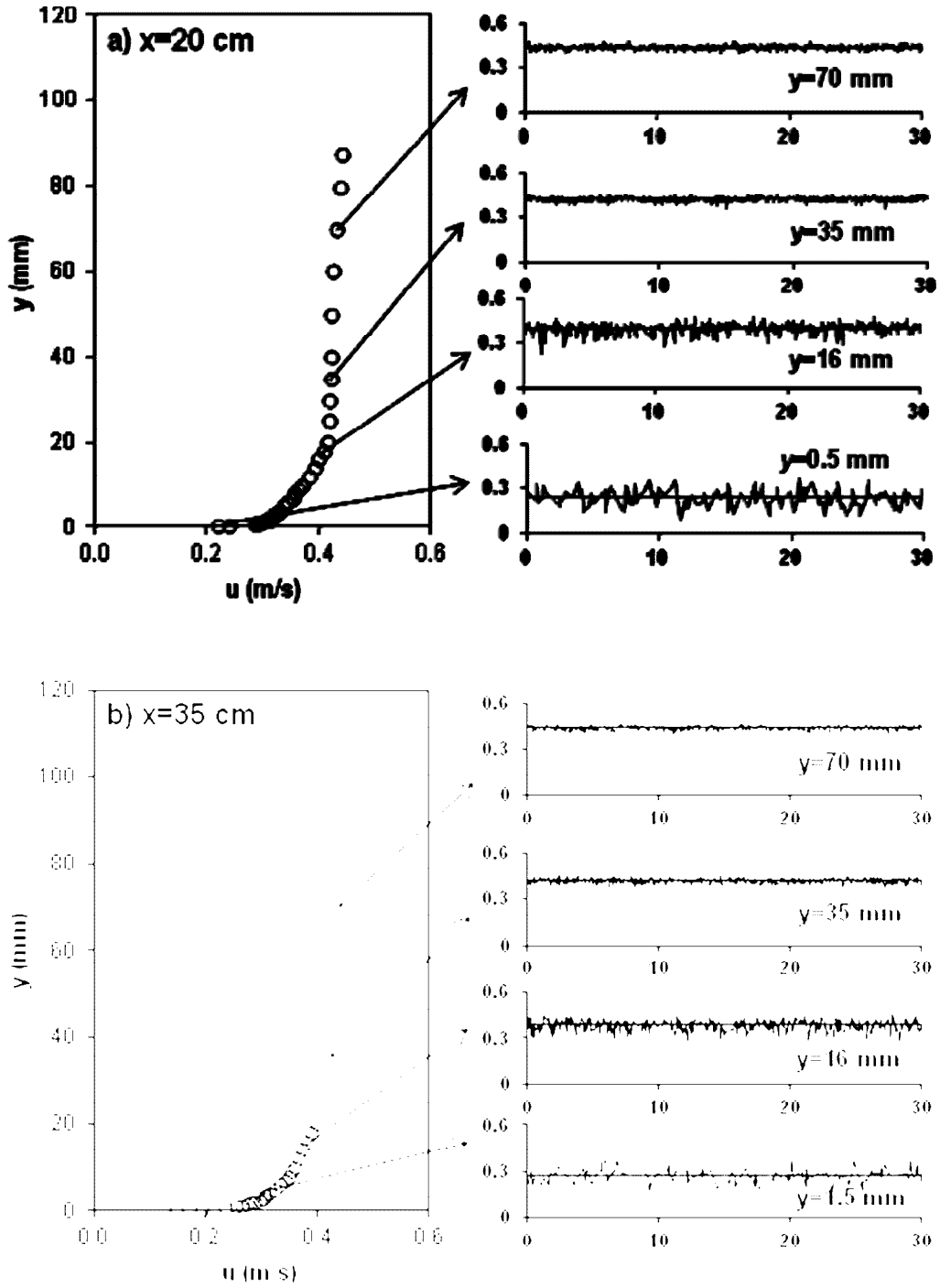
Çalışma boyunca deneysel ölçümler LDA tekniğini kullanan lazer ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümlerin yapılması sırasında herhangi bir yükseklikte çok sayıda anlık hız ölçülmekte ve ölçülen bu hızların ortalaması alınarak o noktada ölçülen hız, farklı yüksekliklerde yapılan ölçümler sonrasında ise deneysel hız profilleri elde edilmektedir. Aşağıda iki farklı deney durumu için anlık hızların zamana göre değişimleri (zaman serileri) Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te verilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere anlık hızların ölçüm ve kayıt süresi 30 s olarak seçilmiştir. Grafiklerin her birinde o kesite ait deneysel hız profilleri ve kesit boyunca belirtilen noktalardaki anlık hızların zamansal değişimi gösterilmiştir.

Türbülanslı akım içindeki bir noktada yatay doğrultuda hızın zamanla değişimi ölçülürse bir ortalama etrafında devamlı salındığı görülmektedir. Anlık hızların zamana bağlı değişimlerini gösteren grafiklerde türbülans şiddeti, grafiklerdeki bu salınmalara, genliklere (hız sapıncıları) göre belirlenmektedir. Bir akımda hız sapıncılarının kareler ortalamasının karekökü türbülans şiddeti hakkında fikir verebilir. Buna göre genliklerin yüksek olduğu yani hız sapıncılarının büyük olduğu durumlarda türbülans şiddetinin büyük, tersi durumda ise türbülans şiddetinin küçük olduğu anlaşılmaktadır. Bu grafiklerde ortalama çizgisi üzerindeki salınımsız (hız sapıncılarının görülmediği) bölgeler viskozitenin hakim olduğu bölgeleri ifade etmektedir. Salınımsız bölgeler akımın aralıklarla laminar akım özelliği gösterdiğini ifade etmektedir.

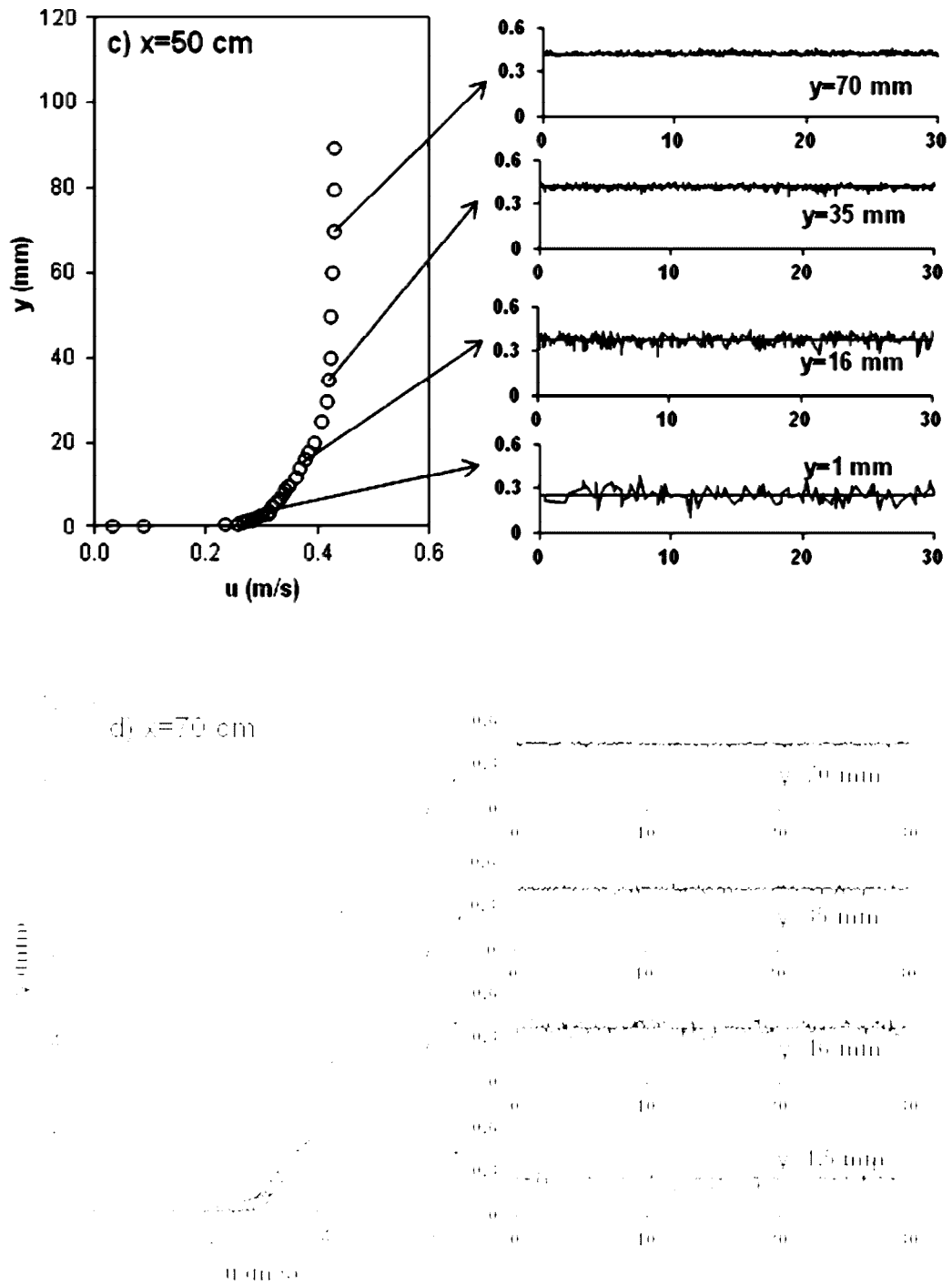
Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'teki grafikler incelendiğinde her iki deney durumu için de katı sınıra yakın bir noktadan su yüzüne doğru anlık hız sapıncılarının nispeten küçüldüğü, dolayısıyla türbülans şiddetinin düştüğü, katı sınıra belli ölçüde yakın bölgelerde ise türbülans şiddetinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekillerde her iki durum için verilen grafiklerdeki hız sapıncılarının değişimi karşılaştırılırsa, Şekil 7.3'teki (Deney 1) grafiklerde görülen türbülans şiddetlerinin Şekil 7.4'teki (Deney 2) grafiklerde görülen türbülans şiddetlerinden az da olsa daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki durumdaki grafiklerde viskoz alt tabaka ile

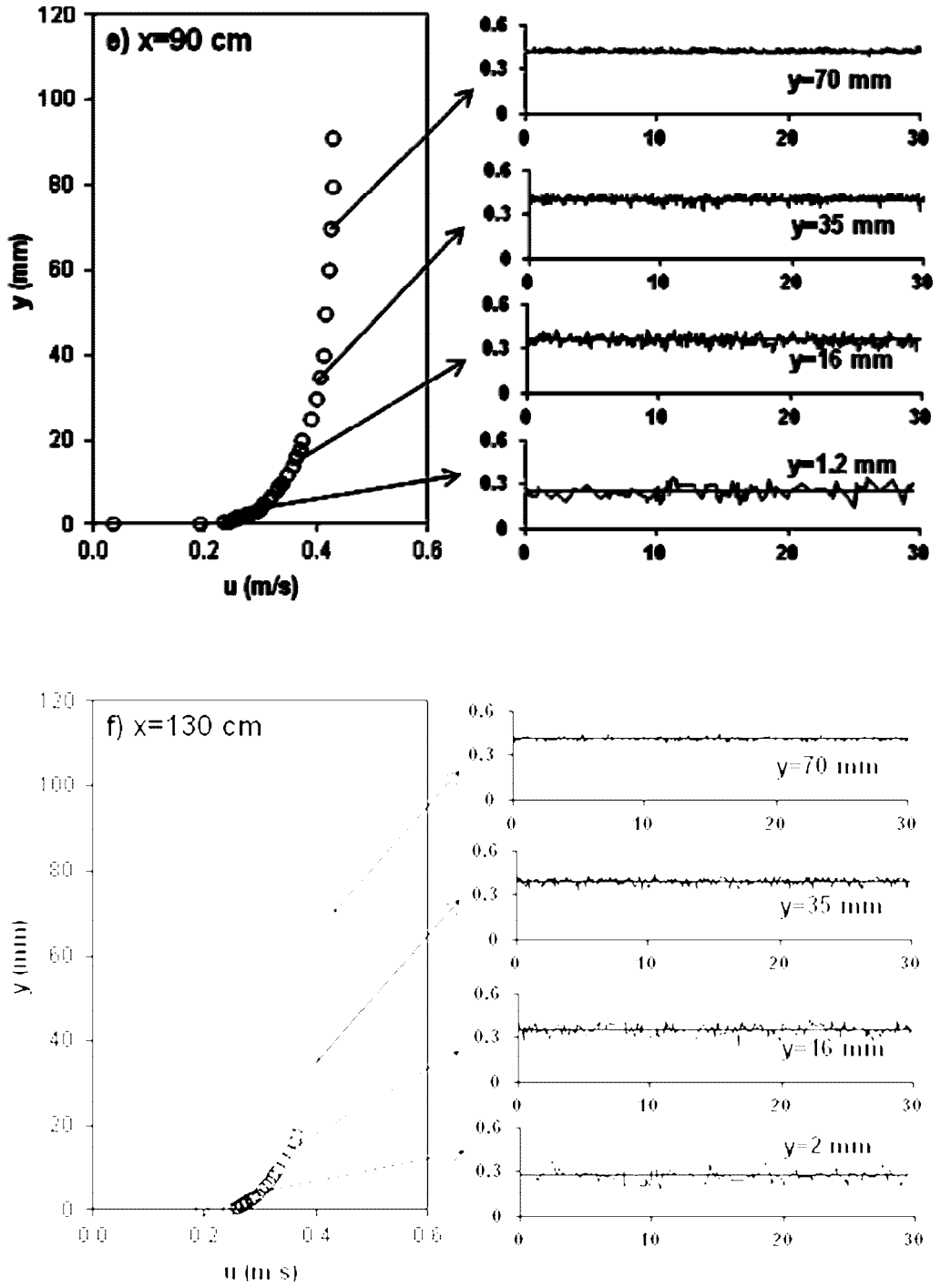
türbülanslı bölge arasındaki geçiş bölgesinde türbülans ve moleküler viskozite kuvvetleri beraber etkili olurken, su yüzüne doğru türbülansın hakim olduğu bölgeler görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi ortalama çizgisi üzerindeki salınımsız bölgelerde ise laminar akım karakteristiklerinden bahsedilebilir.



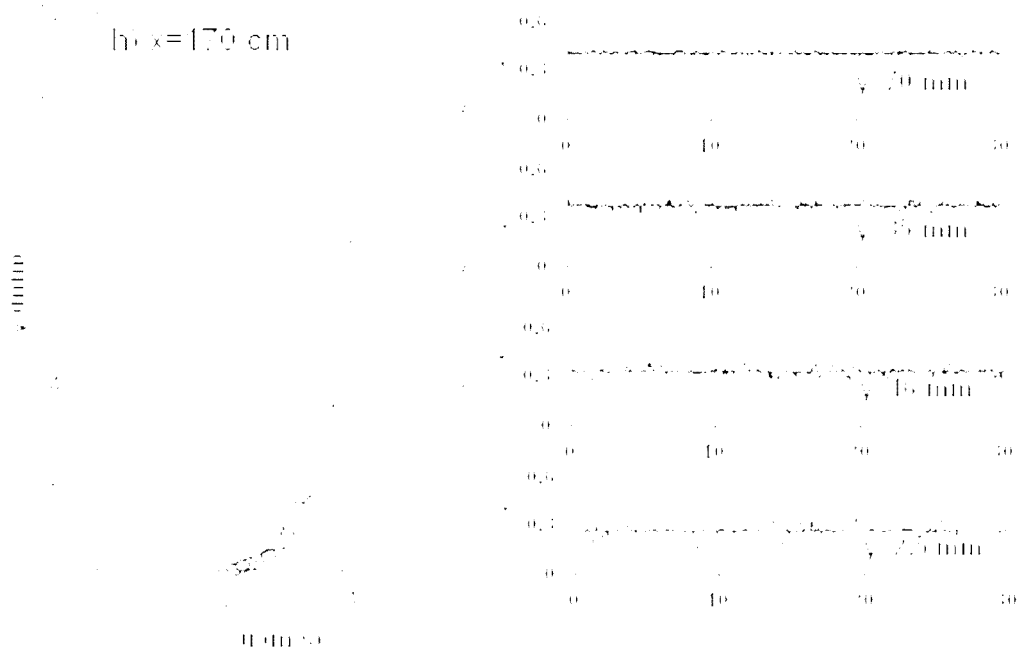
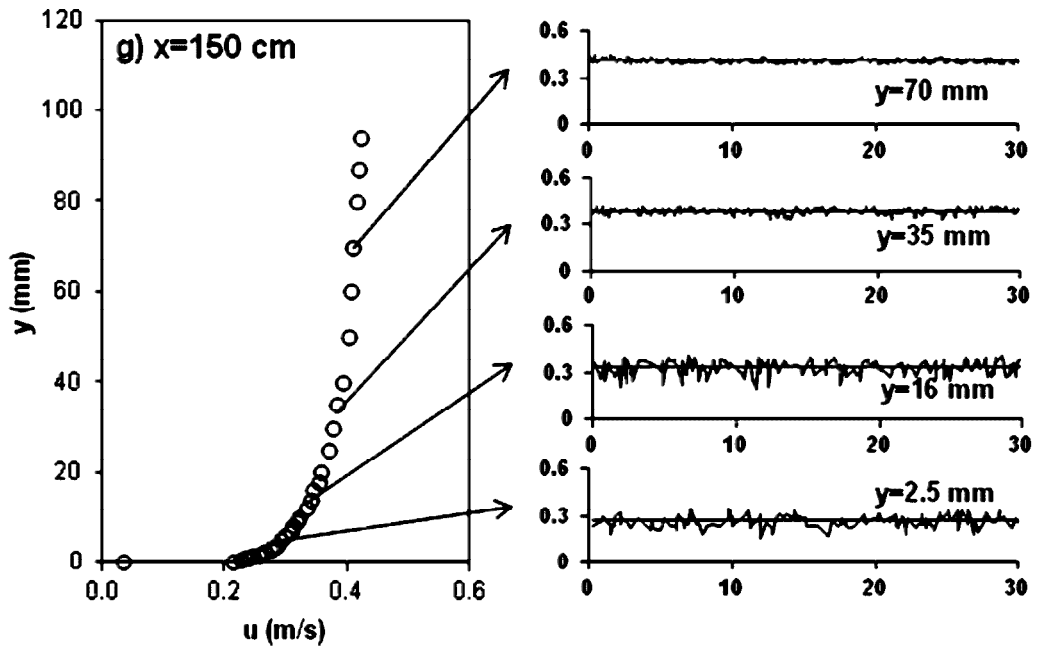
Şekil 7.3. Deney 1 durumu için kanalın farklı kesitlerindeki deneysel hız profilleri ile anlık hız değerlerinin zamansal değişimleri



Şekil 7.3. (Devam)

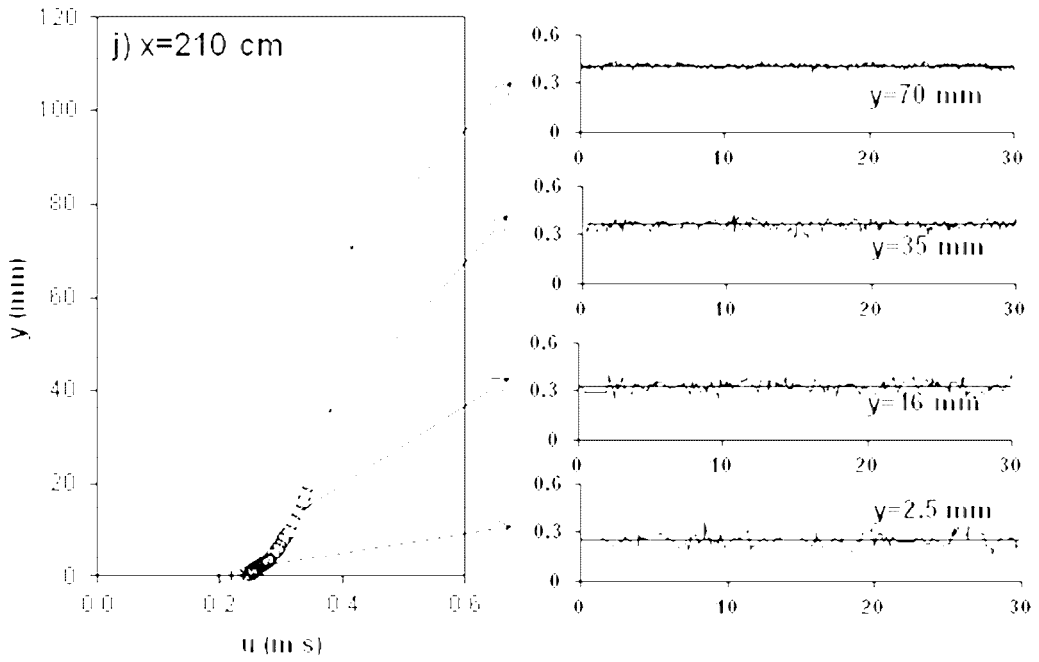
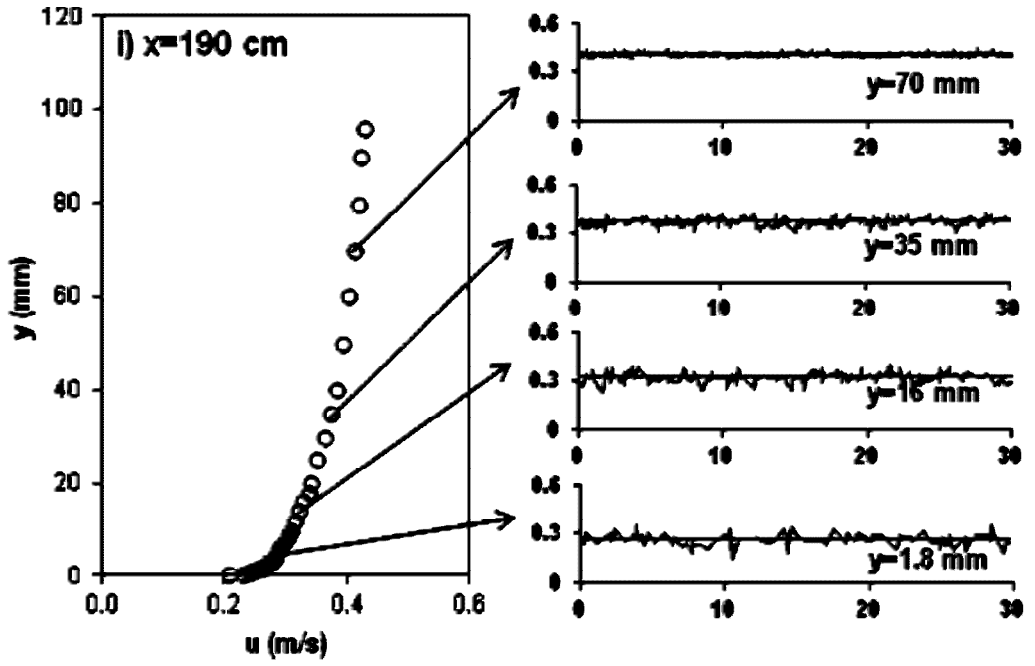


Şekil 7.3. (Devam)

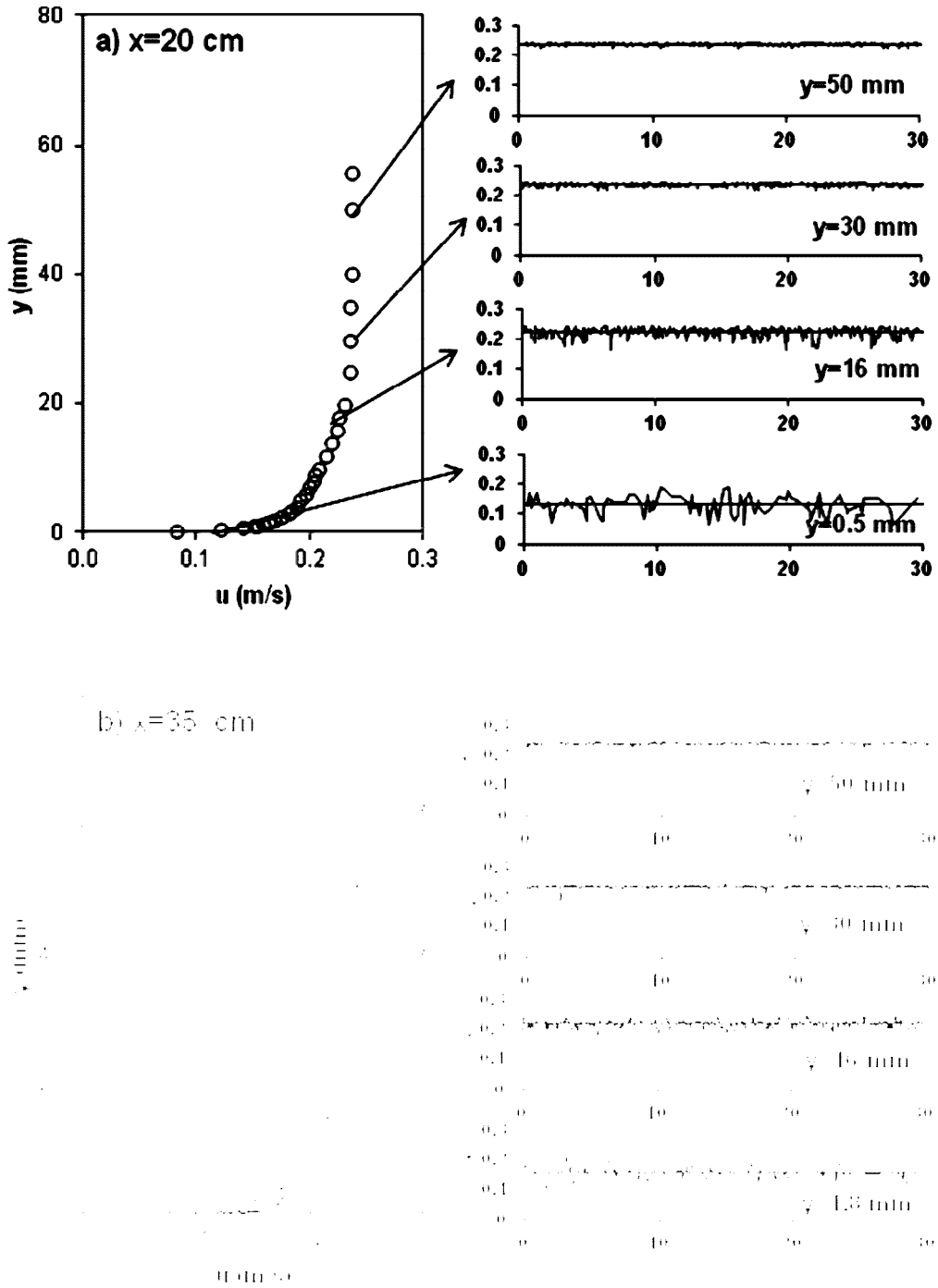


Şekil 7.3. (Devam)

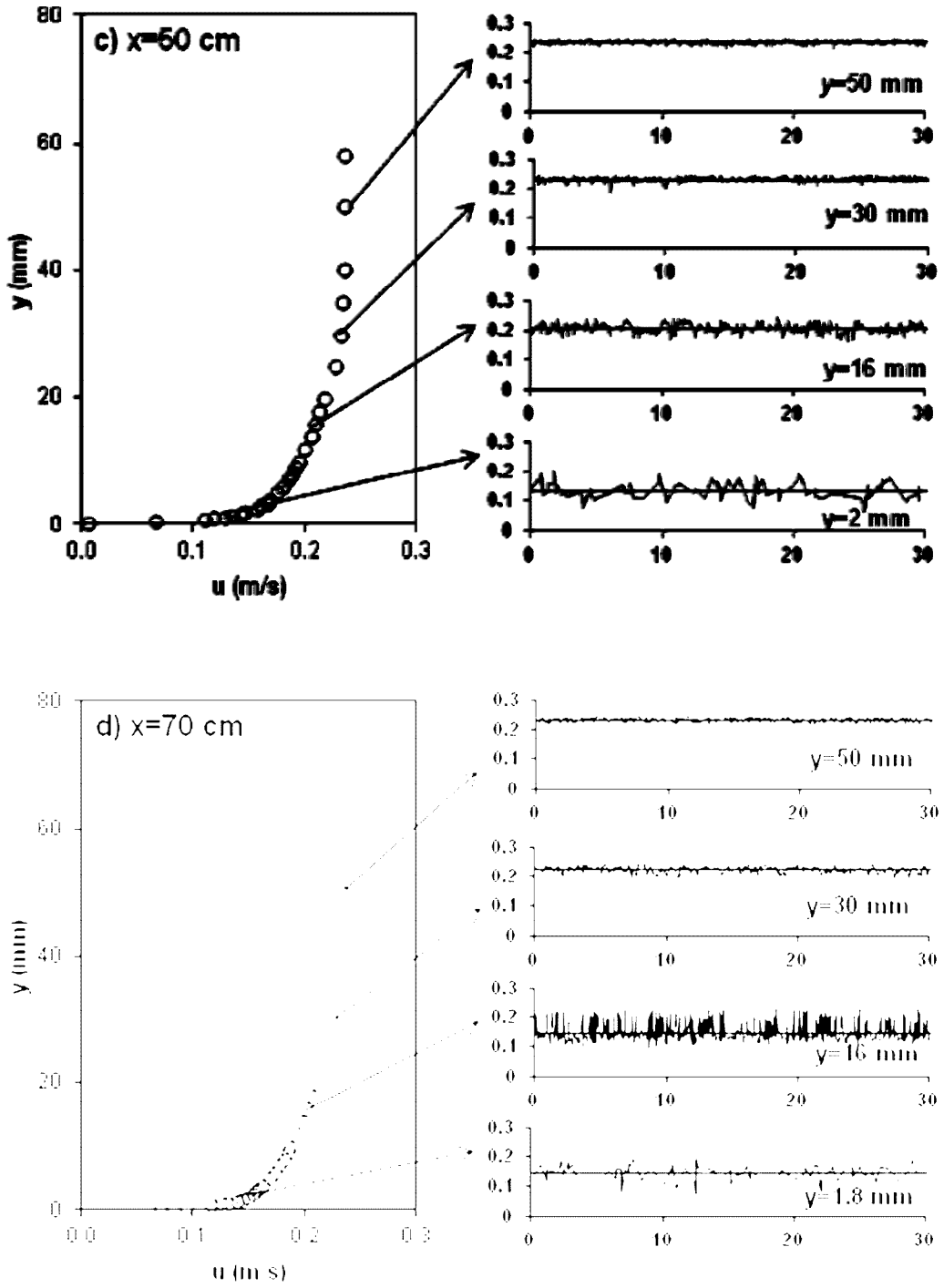




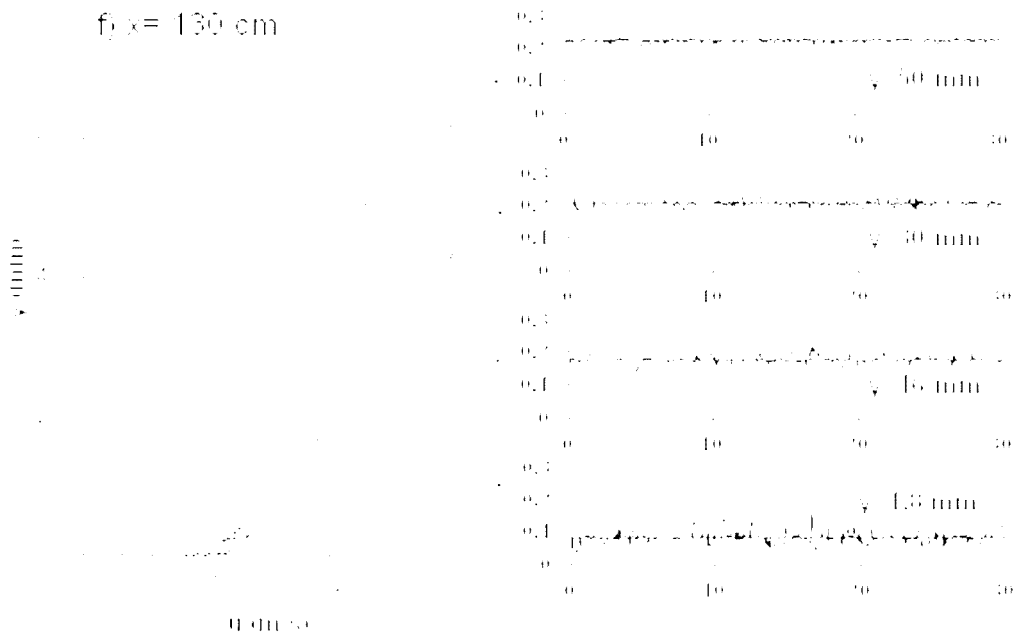
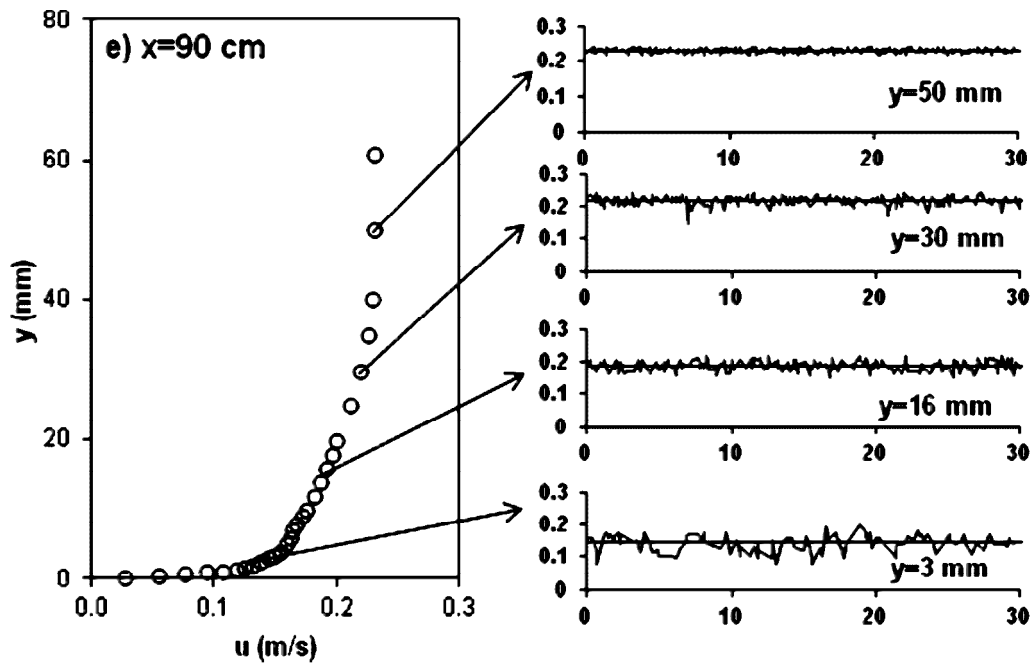
Şekil 7.3. (Devam)



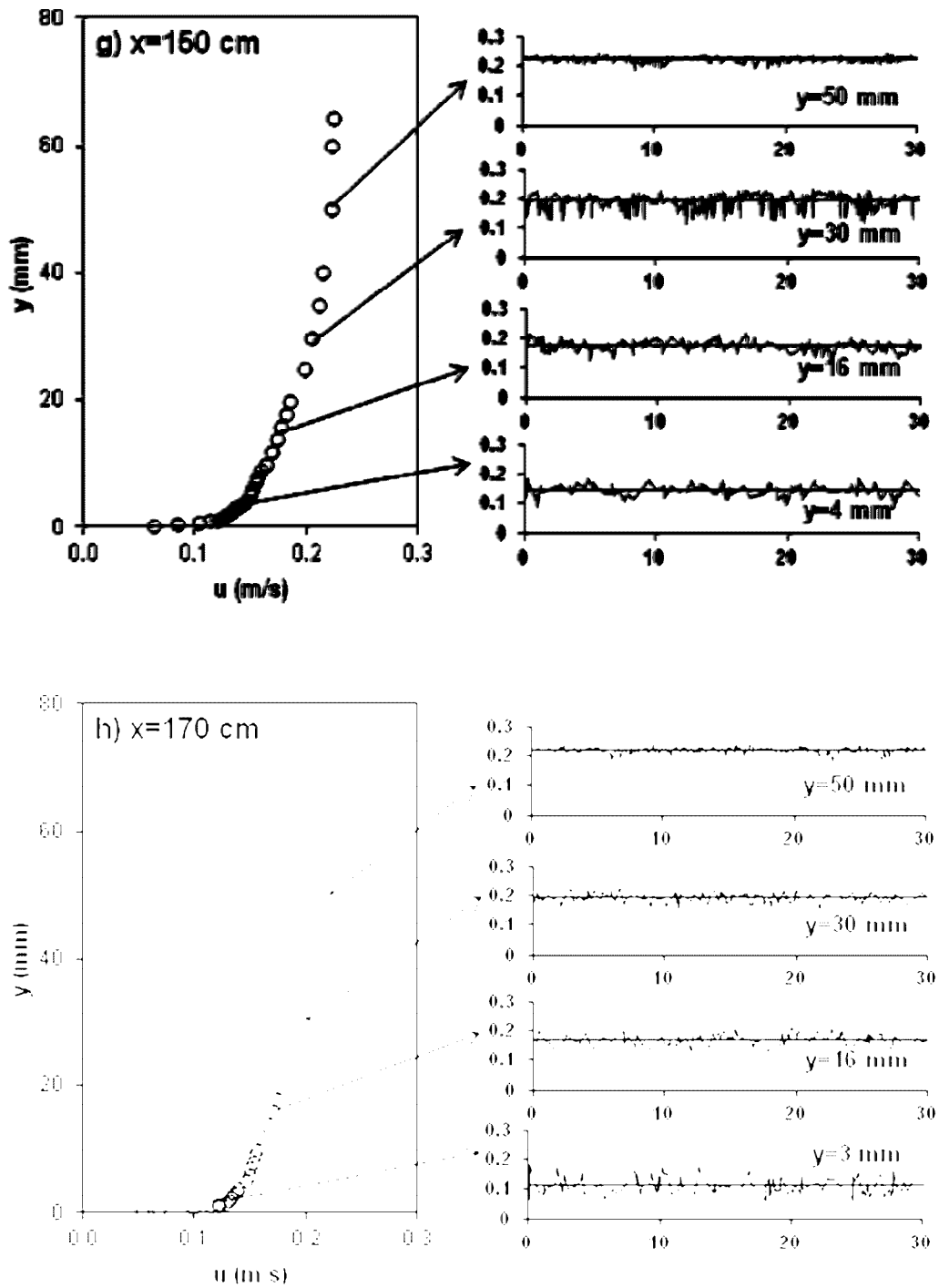
Şekil 7.4. Deney 2 durumu için kanalın farklı kesitlerindeki deneysel hız profilleri ile anlık hız değerlerinin zamansal değişimleri



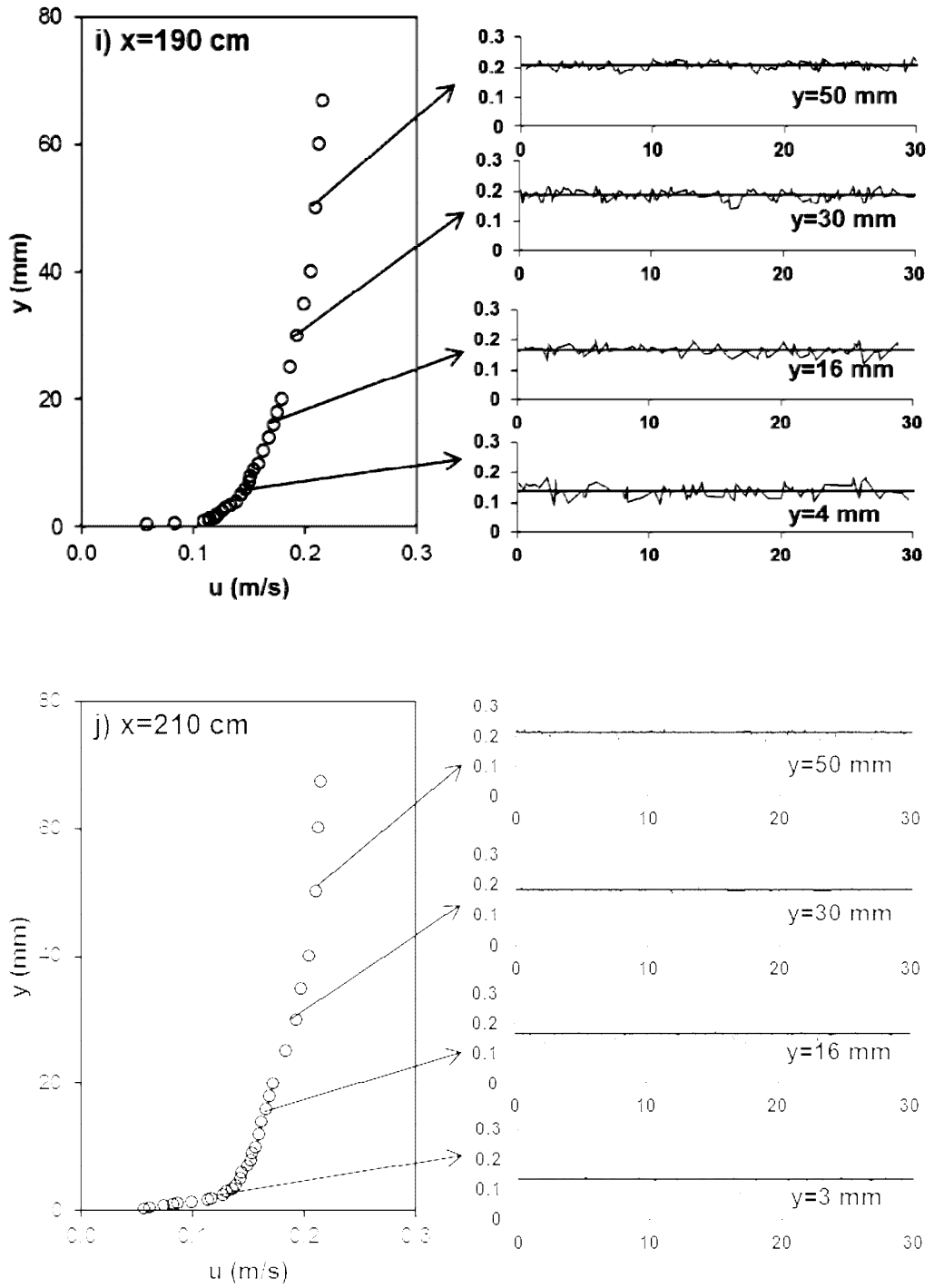
Şekil 7.4. (Devam)



Şekil 7.4. (Devam)



Şekil 7.4. (Devam)



Şekil 7.4. (Devam)

### 7.3. Hız Dağılımının Modellenmesi

Viskoz akışlarda akışkanın viskozitesinden dolayı katı yüzeyde bir yapışma yani akım hızının sıfır olması görülür. Akım hızının sıfırdan serbest akım hızına ulaştığı bir tabaka bulunmaktadır. Bu tabakaya sınır tabakası adı verilmektedir. Sınır tabakasının türbülanslı iç bölgesinde hız dağılımı için von Karman-Prandtl tarafından verilen ve duvar kanunu (*law of the wall*) olarak bilinen logaritmik hız dağılım ifadesi kullanılmaktadır. Bu ifade aşağıdaki gibi elde edilebilir. Viskoz alt tabaka ile türbülanslı iç bölge ara kesitinde, yani  $y=\delta_v$  için, akım hızı (7.3) ve (7.4) denklemlerinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\bar{u}}{v_*} = \frac{\rho\sqrt{t_0/r}}{\mu} y = \frac{v_* y}{n} \quad (7.3.)$$

$$\frac{\bar{u}_{\text{mak}} - \bar{u}}{v_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{h} \quad (7.4.)$$

$$\frac{\bar{u}_{vt}}{v_*} = \frac{v_* \delta_v}{n} \quad \text{ve} \quad \frac{\bar{u}_{vt}}{v_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\delta_v}{\delta} + \frac{\bar{u}_{\text{mak}}}{v_*} \quad (7.5.)$$

bu iki değer eşitlenirse,

$$\frac{v_* \delta_v}{n} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\delta_v}{\delta} + \frac{\bar{u}_{\text{mak}}}{v_*} \quad \text{buradan} \quad \frac{\bar{u}_{\text{mak}}}{v_*} = \frac{v_* \delta_v}{n} - \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\delta_v}{\delta} \quad (7.6.)$$

Değeri (7.5) denkleminde yerine yazılırsa:

$$\frac{\bar{u}}{v_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\delta} - \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\delta_v}{\delta} + \frac{v_* \delta_v}{n} \quad \text{veya,} \quad \frac{\bar{u}}{v_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\delta_v} + \frac{v_* \delta_v}{n} \quad (7.7.)$$

Burada ,  $\frac{1}{k} = A$  sayılarak sağ taraftaki ikinci terim logaritma terimi ile birleştirilirse:

$$\frac{\bar{u}}{v_*} = A \ln \frac{y}{\delta_v} \frac{v_* \delta_v}{n} + B \text{ veya, } \frac{\bar{u}}{v_*} = A \ln \frac{v_* y}{n} + B \quad (7.8.)$$

şeklinde logaritmik duvar kanunu olarak bilinen hız dağılım ifadesi elde edilir. Denklemdeki B yüzey pürüzlülüğüne bağlı bir sabittir.

Nikuradse (1933)'nin cilalı boru deneylerinde  $A = 2.5$  , von-Karman sabiti  $\kappa = 0.4$ ,  $B = 5.5$  değerleri elde edilmiştir, buna göre logaritmik hız dağılımı:

$$\frac{\bar{u}}{v_*} = 2.5 \ln \frac{v_* y}{n} + 5.5 \quad (7.9.)$$

şeklinde dir. Daha sonra çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde, bu sabitler için  $A = 2.43 - 2.5$  ve  $B = 4.7 - 7$  aralıklarında değişen değerler bulunmuştur.

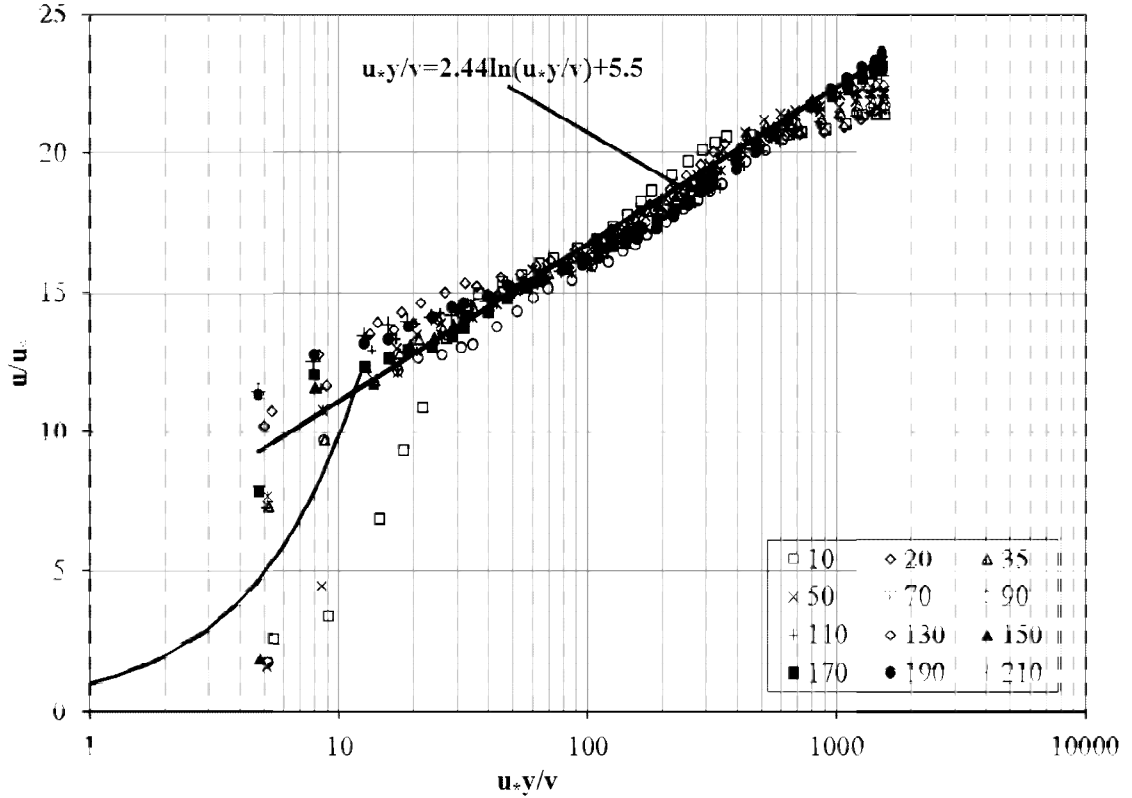
Kırkgöz (1989) tarafından pürüzsüz tabanlı açık kanal akımlarında yapılan laboratuvar deneylerinde  $\kappa = 0.41$  bulunmuş ve (Reynolds sayısına bağlı olarak)  $50 - 80 \leq v_* y / \nu \leq 200 - 600$  ve  $0.14 - 0.05 \leq y / \delta \leq 0.6 - 0.5$  koşulları için logaritmik hız dağılımı aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\frac{\bar{u}}{v_*} = 2.44 \ln \frac{v_* y}{n} + 5.5 \quad (7.10.)$$

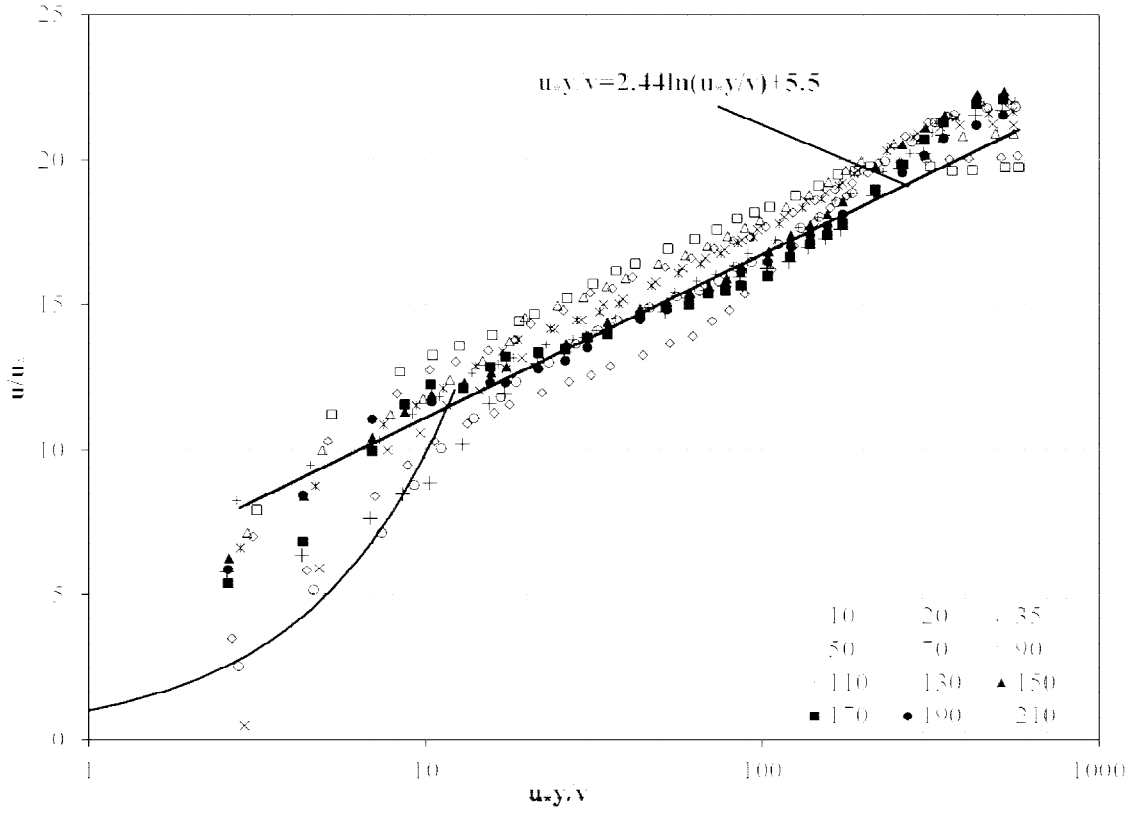
Aşağıda şekil 7.5 ve şekil 7.6'da büyük (deney1) ve küçük (deney2) debi durumları için açık kanal akımı boyunca  $x=0.10, 0.20, 0.35, 0.50, 0.70, 0.90, 1.10, 1.30, 1.50, 1.70, 1.90, 2.10$ m kesitlerinde ölçülen akım hızlarının logaritmik olarak dağılımı gösterilmiştir. Gelişmekte olan akım bölgesinde ölçülmüş olan deneysel bulguların her iki debi durumu için de sınır tabakasının türbülanslı iç bölgesinde von Karman-Prandtl tarafından verilen ve duvar kanunu (*law of the wall*) olarak bilinen



logaritmik hız dağılımıyla uyumlu sonuçlar verdikleri gözlemlenmiştir. Doğrusal hız dağılımı bölgesinde yani  $u_*y/\nu \leq 10$  için az sayıda da olsa lazer ile bazı ölçümler gerçekleştirilmiş ve dağılımlarda gösterilmiştir. Şekillerde, viskoz alt tabaka hız alanında beklenen karakter değişikliği açıkça görülebilmektedir.



Şekil 7.5. Deney 1 durumu için Logaritmik Duvar Kanunu dağılımı



Şekil 7.6. Deney 2 durumu için Logaritmik Duvar Kanunu dağılımı



## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında dikdörtgen bir kanaldaki yavaş değişen (M1 tipi su yüzü profiline sahip), kritik altı uniform olmayan açık kanal akımı iki farklı debi durumu için deneysel olarak modellenerek LDA tekniği kullanan bir lazer yardımıyla ölçülmüş ve aynı koşullardaki akımlar Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemleri kullanılarak sayısal olarak da analiz edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen bulgular sayısal analizler sonucunda elde edilen bulguların doğrulanmasında kullanılmıştır.

Öncelikli olarak laboratuvarında iki farklı debi durumu için akım modellenerek LDA tekniği kullanan bir lazer ile hız alanı ölçülmüş elde edilen veriler bilgisayarda muhafaza edilmiştir. Ardından sayısal analizlere geçilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen bir parametre olan uygun ağ yapısının tasarlanmasının ardından tasarlanan ağ yapılarının uygunluğu Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index –GCI) testi ile test edilerek ağ yapısından bağımsız bir çözüm elde edebilmek için gerekli ağ yapısı düzenlenmiştir. Sayısal analizlerde, akımı idare eden temel denklemlerin çözümünde k- $\epsilon$  grubundaki türbülans modellerinden Standard k- $\epsilon$  (SKE), Renormalization Group k- $\epsilon$  (RNG) ve Relizable k- $\epsilon$  (RKE) türbülans modelleri kullanılmış, serbest su yüzünün profili Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid-VOF) ile hesaplanmıştır. İki farklı debi durumunda sayısal olarak elde edilen akım bulguları daha önce laboratuvar ortamında elde edilerek muhafaza edilmiş olan deneysel bulgularla karşılaştırılarak kullanılan türbülans modellerinin akımın modellenmesindeki başarıları araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ise aşağıda özetlenmiştir.

1. SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri ve VOF yöntemi kullanılarak sayısal olarak hesaplanan bulgular ve deneysel bulgular karşılaştırıldığında üç türbülans modelinin de deneysel bulgulara yakın sonuçlar verdiği görülmüş ve çalışmaya konu olan akım türünün sayısal çözümünde başarılı bir şekilde kullanılabilecekleri anlaşılmıştır.

2. Deney 1 durumu için deneysel ve sayısal olarak elde edilen hız profilleri karşılaştırıldığında, deneysel bulgulara yaklaşımda RKE ve RNG modelleri kanal başlangıcında birbirlerine yakın sonuçlar verirken akımın gelişmesiyle birlikte az da olsa arada farklılıklar olduğu fakat katı sınıra yakın bölgelerde bu modellerin SKE modelinden daha başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca ortalama OKH ve ortalama OMGH değerleri temel ölçüt alınarak yapılan değerlendirme sonucunda ise RKE modeli en iyi sonucu verirken, diğer iki modelden SKE modeli, RNG modelinden daha başarılı olmuştur.
3. Deney 2 durumu için deneysel ve sayısal olarak elde edilen hız profilleri karşılaştırıldığında kanal başlangıcındaki kesitlerde türbülans model bulgularının deneysel bulgulardan uzaklaştığı fakat ilerleyen kesitlerde her üç modelinde deneysel bulgulara yaklaştığı görülmüştür. Deney 2 durumunda katı sınıra yakın bölgeyi modellemede RNG; katı sınırdan uzaklaşılan yerlerde ise RKE türbülans modeli deneysel bulgulara yaklaşımda diğer modellere göre daha başarılı olmuştur. Ortalama OKH ve ortalama OMGH değerleri temel ölçüt alınarak yapılan değerlendirme sonucunda ise yine RKE modeli en iyi sonucu verirken, Deney 2 durumda RNG modeli SKE modelden daha başarılı sonuçlar vermiştir.
4. Deney 1 ve Deney 2 durumlarında elde edilen deneysel ve sayısal hız profillerinin karşılaştırılması sonucunda her iki deney durumu içinde kanal başlangıcından uzaklaştıkça SKE modelin diğer modellere göre az da olsa deneysel bulgulardan uzaklaştığı görülmektedir. Her iki deney durumunda da en iyi sayısal bulgular RKE türbülans modeli kullanılarak yapılan çözümlerden elde edilmiştir.
5. Sayısal olarak elde edilen anlık hızların zamana göre değişimleri incelendiğinde, her iki deney durumunda da incelenen akım türünün tipik bir kritik altı açık kanal akım modeli olması, ani şekil değişimlerinin olmaması ve akım hızlarının oldukça düşük olması nedeniyle türbülans şiddetlerinin birbirlerine yakın değerlerde olduğu, ancak Deney 1 durumundaki türbülans şiddetlerinin Deney 2 durumundaki türbülans

şiddetlerinden çok az daha büyük olduğu görülmüştür. Her iki deney durumu için de katı sınıra yakın bir noktadan su yüzüne doğru anlık hız sapınçlarının nispeten küçüldüğü, dolayısıyla türbülans şiddetinin düştüğü, katı sınıra belli ölçüde yakın bölgelerde ise türbülans şiddetinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Her iki deney durumu için de katı sınıra yakın bölgelerde türbülans ve viskozite etkileri birlikte görülürken, su yüzüne doğru daha kararlı türbülanslı bir akım yapısı görülmüştür.

6. Her iki deney durumu için de doğrusal hız dağılımının  $u \cdot y/n \approx 10$  bölgesinde ölçümler gerçekleştirilmiş, ayrıca kanal boyunca ölçülen deneysel hız profillerinin logaritmik hız dağılımı ile uyumlu olduğu görülmüştür.



## **KAYNAKLAR**

- AKÖZ, M. S., ÖNER, A. A., KIRKGÖZ, M. S., 2007. Tabana Yakın Bir Silindir Etrafındaki Akımın Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(2) ss. 85-98
- AKÖZ, M. S., KIRKGÖZ, M. S., ÖNER, A. A., 2009. Experimental and Numerical Modeling of a Sluice Gate Flow. Journal of Hydraulic Research Vol. 47. No.2. pp. 167-176
- ANSYS INC., (2012). Ansys Fluent Theory Guide. Ansys Inc.
- ALFRINK, B. J., VAN RIJN, L. C., 1983. Two Equation Turbulence Model for Flow In Trenches. J. Hydraul. Eng, 109. pp. 941-958.
- BAL, H., 2011. Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- BERG, J. R., ORMISTON, S. J., SOLIMAN, H. M., 2006. Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet. International Communications in Heat and Mass Transfer, 33. pp. 552–563
- ÇELİK, I. B., GHIA, U., ROACHE, P. J. ve FREITAS, C. J., 2008. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 1307.
- CHATILA, J., TABBARA, M., 2004. Computational Modeling of Flow Over An Ogee Spillway. J. Chatila. M. Tabbara / Computers and Structures, 82. pp. 1805–1812
- CHEN, H.C. ve PATEL, V.C., 1988. Near-Wall Turbulence Models for Complex Flows Including Separation. Aiaa Journal. 26(6): 641-648.
- CHEN, Q., DAI, G., LIU, H., 2002. Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Owerflow. Journal of Hydraulic Engineering, pp. 685-688



- CROOKSTON, B. M., PAXSON, G. S., SAVAGE, B. M., 2012. Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs For High Headwater Ratios. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto, Portugal.
- DAVIDSON, L., 2005. Numerical Methods for Turbulent Flow. MTF071 Lecture Notes. Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- FERZIGER, J. H. ve PERIC, M., 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer, New York, USA.
- GAO, Y., CHOW, W. K., 2005. Numerical Studies on Air Flow Around A Cube. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93. pp. 115–135.
- GÜMÜŞ, V., AKÖZ, M. S., ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N. G., KIRKGÖZ, M. S., 2012. Experimental and Numerical Modeling of Free Hydraulic Jump Downstream of a Gate. 10th Congress of Advances in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- GÜMÜŞ, V., ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N. G., AKÖZ, M. S., KIRKGÖZ, M. S., 2012. Tambur Kapak Mansabında Oluşan Batmış Hidrolik Sıçramanın Sayısal Analizi. International Construction Congress, Isparta
- GÜMÜŞ, V., AKÖZ, M. S., KIRKGÖZ, M. S., 2013. Kapak Mansabında Batmış Hidrolik Sıçramanın Deneysel ve Sayısal Modellenmesi. Teknik Dergi, 24(2). 6379-6397.
- HIRT, C. W., ve NICHOLS, B. D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phys., 39. 201–225.
- HOFFMANN, K. A. ve CHIANG, S. T., 2000. Computational Fluid dynamics for Engineers Volume 1-2-3. Engineering Education System Publication, Kansan, USA.
- JOHNSON, R. W., 1998. The Handbook of Fluid Dynamics, Springer, USA.
- KIRKGÖZ, M. S., 1989. Turbulent Velocity Profiles for Smooth and Rough Open Channel Flow. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 11511. 1543-1561.
- KIRKGÖZ, M. S. ve ARDIÇLIOĞLU, M., 1997. Velocity profiles of developing and developed open channel flow. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 12312. 1099-1105.

- KIRKGÖZ, M. S., AKÖZ, M. S. ve ÖNER, A. A., 2009. Numerical Modeling of Flow Over A Chute Spillway. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 47. No.6
- KIRKGÖZ, M. S., ÖNER, A. A. ve AKÖZ, M. S., 2009. Numerical modeling of interaction of a current with a circular cylinder near a rigid bed. M.S. Kirkgoz et al. / *Advances in Engineering Software* 40. pp. 1191–1199
- KIRKGÖZ, M. S., AKÖZ, M. S., GÜMÜS, V. ve ÖNER, A. A., 2011. Kapak Kontrollü Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel ve Sayısal Modellenmesi. V.Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, İstanbul.
- KIRKGÖZ, M. S., GÜMÜS, V., SOYDAN, N. G., ŞİMŞEK, O. ve AKÖZ, M. S., 2012. Experimental and Numerical Modelling of Flow over a Gate-Controlled Semi-Cylinder Weir. 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey
- LAUNDER, B. E. ve SPALDING, D. B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England.
- MONTES, J. S., 1997. Irrotational Flow and Real Fluid Effects Under Planar Sluice Gates. *J.Hydraul. Eng.*, 123. pp. 219-232.
- NIKURADSE, J., 1933. Strömungsgesetze in Rauhen Röhren, *Forsch. Geb. Ing. Wes.* Heft 361.
- ÖNER, A. A., KIRKGÖZ, M. S. ve AKÖZ, M.S., 2007. Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel ve Sayısal Yöntemle İncelenmesi. III. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, İZMİR.
- ÖZBEK, T., 2009. Açık Kanal Akımlarının Hidroliği ve Hidrolik Yapılar. Teknik Yayınevi, Ankara.
- QU, J., RAMAMURTHY, A. S., TADAYON, R. ve CHEN, Z. 2009. Numerical Simulation of Sharp-Crested Weir Flows. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.36
- RAMAMURTHY, A. S., QU, J. ve VO, D., 2006. VOF Model for Simulation of a Free Overfall in Trapezoidal Channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132. pp. 425-428.

- ROACHE, P. J., 1994. Perspective - a Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme*, 1163. 405-413.
- ROACHE, P. J., 1997. Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 29. 123-160.
- ROACHE, P. J., 1998. Verification of Codes and Calculations. *Aiaa Journal*, 365. 696-702.
- SARKER, M. A. ve RHODES, D.G. 2004. Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15. pp. 215–219
- SHIH, T. W., LIOU, W. W., SHABBIR, A., YANG, Z. ve ZHU, J. 1995. A new k- $\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation. *Computers and Fluids*, 24(3). 227–238.
- SOYDAN, N. G., 2013. Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel ve Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- ŞİMŞEK, O., 2011. Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel ve Teorik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- VERSTEEG, H. K. ve MALALASEKERA, W., 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Harlow, England.
- YAKHOT, V. ve ORSZAG, S. A., 1986. Renormalization group analysis of turbulence I. basic theory. *Journal of Scientific Computing*. 1(1). pp. 3-51.
- YAKHOT, V., ORSZAG, S. A., THANGAM, S., GATSKI, T. B., ve SPEZIALE, C. G., 1992. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A.*, Vol. 4. No. 7. pp 1510-1520

## **ÖZGEÇMİŞ**

13/01/1987 tarihinde Gaziantep'in İslahiye ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Konya'da, orta ve lise öğrenimini Gaziantep'te tamamladı. 2005 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. 2011 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2011 yılında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2012 yılında Adana İller Bankası A.Ş' ye geçiş yaptı. Halen burada Teknik Uzman Yardımcısı İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.