

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DOLUSAVAK PLAKA BOŞLUKLARI BOYUNCA AKIM VE TÜRBÜLANS  
KARAKTERİSTİĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammed Fatih ÖZÜN**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı**

**TEMMUZ 2024**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DOLUSAVAK PLAKA BOŞLUKLARI BOYUNCA AKIM VE TÜRBÜLANS  
KARAKTERİSTİĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammed Fatih ÖZÜN  
(501211506)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR**

**TEMMUZ 2024**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**FLOW AND TURBULENT CHARACTERISTIC OVER SPILLWAYS SLAB  
GAPS**



**M.Sc. THESIS**

**Muhammed Fatih ÖZÜN  
(501211506)**

**Department of Civil Engineering**

**Hydraulics and Water Resources Engineering Programme**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR**

**JULY 2024**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501211506 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Muhammed Fatih ÖZÜN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DOLUSAVAK PLAKA BOŞLUKLARI BOYUNCA AKIM VE TÜRBÜLANS KARAKTERİSTİĞİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı:** **Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri:** **Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Melih KOŞUCU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi R. İlayda Tan KESGİN** .....  
Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 24 Mayıs 2024  
**Savunma Tarihi** : 19 Temmuz 2024



## ÖNSÖZ

Prof. Dr. Şevket Çokgör'ün değerli rehberliğinde hidrolik ve su kaynakları mühendisliğini titiz bir şekilde araştırmaya başladığım bu sayfalarda anlatılan yolculuk, İstanbul Teknik Üniversitesi'ndeki akademik arayışında önemli bir kilometre taşı temsil etmektedir. Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Yüksek Lisans derecesi için bir gereklilik olarak üstlenilen bu araştırma, dolu savaklardaki plaka boşlukları boyunca akım ve türbülans karakteristiklerini derinlemesine incelemektedir. Bu çalışma boyunca Prof. Dr. Şevket Çokgör'ün sağladığı paha biçilmez destek ve mentorluğu için kendisini büyük bir minnettarlık ve saygıyla anıyorum.

Parçacık görüntülü hız ölçüm (PIV) cihazının kullanımı ve analizi konularında teknik uzmanlığını esirgemeyen, bu araştırmanın yürütülmesinde ve başarısında etkili olan Araştırma Görevlisi Sinan Eruçar'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin katkıları, araştırmalarımızın derinliğini ve genişliğini önemli ölçüde zenginleştirerek hidrolik olaylara ilişkin bilgilerin önünü açmıştır.

Bu sonuca ulaşmamı sağlayan yolculuğu düşünürken, laboratuvarında akım ve türbülans karakteristiklerini ve dolu savak yapılarındaki plakalar arası boşluğun yapının stabilitesine olan etkilerini anlamaya çalıştığım sayısız saati hatırlıyorum. Bu tez, akademik çabalarımızın temelini oluşturan işbirlikçi ruhun ve durmak bilmeyen bilgi arayışının bir kanıtıdır.

Bu tezi sunarken, hidrolik mühendisliği alanına anlamlı bir katkıda bulunmayı, daha fazla araştırma ve yeniliğe bilgi ve ilham veren içgörüler sunmayı amaçlıyorum. Burada sunulan bulguların, savak tasarımı ve inşaat uygulamalarında sürekli keşif ve ilerleme için bir katalizör görevi görmesini içtenlikle umuyorum.

Bu çalışmanın entelektüel sorgulamanın bir işareti ve etrafımızdaki dünyayı anlamamızı şekillendirmede akademik arayışın dönüştürücü gücünün bir kanıtı olarak hizmet etmesini temenni ediyorum.

Temmuz 2024

Muhammed Fatih Özün  
(Çevre Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xxi</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Araştırmanın Geçmişi ve Bağlamı .....	1
1.2 Zorlukların Belirlenmesi: Problem ve Sorular .....	3
1.3 Amaç ve Önem .....	3
1.4 Kapsam ve Sınırlamalar .....	5
1.5 Metodolojiye Genel Bakış .....	6
<b>2. LİTERATÜR</b> .....	<b>7</b>
2.1 Türbülans: Temel Bilgiler .....	7
2.2 Kararlı ve Kararlı Olmayan Akım: Hidrolik Yapılardaki Öneminin Araştırılması .....	8
2.2.1 Kararlı akım .....	8
2.2.2 Kararlı olmayan akım .....	8
2.2.3 Hidrolik yapılarda önemi .....	9
2.3 Verimlilik ve Türbülans Arasındaki Bağlantı .....	9
2.3.1 Hidrolik yapılarda verimlilik .....	10
2.3.2 Türbülansın verimlilik üzerindeki etkisi .....	10
2.3.3 Optimum verimlilik için türbülansı dengeleme .....	10
2.3.4 Plaka tabanlı yapıların rolü .....	10
2.3.5 Verimlilik değerlendirmesi için gelişmiş teknikler .....	10
2.4 Önceki Çalışmalara Genel Bakış: Hız Dalgalanmaları .....	11
2.5 PIV Uygulamaları: Akım Karakteristiklerinin İncelenmesi .....	13
2.5.1 Hidrolik mühendisliğinde uygulama .....	13
2.5.2 Türbülans yapılarının görselleştirilmesi .....	14
2.5.3 Hız gradyanlarının sayısallaştırılması .....	14
2.5.4 Sınır katmanlarının değerlendirilmesi .....	14
2.5.5 Vorteks oluşumunun analizi .....	14
2.5.6 Boşluk değişimlerinin akım dinamikleri üzerindeki etkisi .....	14
<b>3. METODOLOJİ</b> .....	<b>15</b>
3.1 Deney Düzenegi .....	15
3.2 PIVlab Yazılımı .....	18
3.3 Veri Toplama Süreci .....	19
3.3.1 Görüntü yükleme ve hazırlama .....	20

3.3.2 Görüntü ön işleme .....	20
3.3.3 PIV ayarları .....	21
3.3.4 Kalibrasyon ve işlem sonrası.....	22
3.4 Analitik Araçlar: Veri Analiz Teknikleri .....	23
3.4.1 Veri organizasyonu ve zaman serisi oluşturma.....	24
3.4.2 Analiz ve RMS hesaplaması .....	25
3.4.3 Zamansal ortalama hız .....	26
3.4.4 Froude sayısı .....	27
3.4.4.1 Hız hesabı.....	27
3.4.4.1.1 Debi hesabı.....	27
3.4.5 Kayma gerilmesi hızı hesabı .....	28
<b>4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>29</b>
4.1 Bulgular .....	29
4.1.1 Nehir rejimine ait grafikler.....	30
4.1.2 Sel rejimine ait grafikler.....	38
4.1.3 Nehir ve Sel rejimi karşılaştırması .....	45
4.1.4 Genel çıktılar .....	47
4.2 Sweep ve Ejection (Süpürme ve Fırlatma).....	48
4.2.1 Deneysel gözlemler .....	48
4.2.2 Sonuçların analizi .....	49
4.2.3 Yorumlama ve tartışma .....	52
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>53</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>55</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>149</b>

## **KISALTMALAR**

<b>PIV</b>	: Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü (Particle Image Velocimetry – PIV)
<b>RMS</b>	: Kök Ortalama Kare
<b>FFT</b>	: Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>CFD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>MATLAB</b>	: Matris Laboratuvarı
<b>ADV</b>	: Akustik Doppler Hız Ölçüm (Acoustic Doppler Velocimetry– ADV)
<b>LDA</b>	: Lazer Doppler Hız Ölçümü (Laser Doppler Anemometry – LDA)



## SEMBOLLER

$u_i$ and $v_i$	: Anlık hızlar
$\bar{u}$ and $\bar{v}$	: Ortalama hızlar
$u'$ and $v'$	: Hız dalgalanmaları
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$Q$	: Debi
$V$	: Hız
$A$	: Alan
$C_d$	: Debi katsayısı
$h$	: Savak yükü
$\rho$	: Akışkan yoğunluğu
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$\theta$	: Savak açısı
$P$	: Savak kretinin kanal tabanından yüksekliği
$h$	: Su yüksekliği
$u_*$	: Kayma gerilmesi hızı
$Fr$	: Froude sayısı
$y$	: Hız vektörünün tabandan mesafesi
$\nu_t$	: Eddy vizkozitesi



## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Test Matrisi..... 29





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Keban barajı, 1974. ....	1
Şekil 1.2 : Oroville barajı, 2017.....	2
Şekil 1.3 : Kaldırmaya bağlı ilk hasar.....	4
Şekil 1.4 : Akışın devam etmesi ile plakalar hasar görür veya kaybolur.....	4
Şekil 1.5 : Plaka altının oyulması.....	4
Şekil 1.6 : Yapısal çökme.....	4
Şekil 3.1 : Laboratuvar kanalı. ....	16
Şekil 3.2 : Parçacık görüntülü hız ölçümü (PIV). ....	16
Şekil 3.3 : Pleksiglas plakalar.....	17
Şekil 3.4 : Su seviyesi ölçümü için milimetre. ....	17
Şekil 3.5 : Savak yükü ölçümü için milimetre. ....	18
Şekil 3.6 : Maskeleme.....	20
Şekil 3.7 : Görüntü ön işleme. ....	21
Şekil 3.8 : PIV ayarları. ....	21
Şekil 3.9 : Kalibrasyon ve işlem öncesi hız vektörleri.....	22
Şekil 3.10 : Kalibrasyon.....	22
Şekil 3.11 : Post-processing (İşlem sonrası). ....	23
Şekil 3.12 : Kalibrasyon ve işlem sonrası hız vektörleri. ....	23
Şekil 3.13 : Örnek taban yakınında u hızı bileşenleri. ....	24
Şekil 3.14 : Örnek taban yakınında v hızı bileşenleri. ....	24
Şekil 3.15 : Örnek çizilen kesitler. ....	25
Şekil 3.16 : Örnek $u_{37}$ çalkantı bileşeni ve RMS değeri. ....	26
Şekil 3.17 : Üçgen savak şematığı. [1].....	27
Şekil 4.1 : 2D kanal şematığı. ....	29
Şekil 4.2 : 7. deney hız vektörleri. ....	31
Şekil 4.3 : $u_{ort}$ grafiği (A kesiti).....	31
Şekil 4.4 : $v_{ort}$ grafiği (A kesiti).....	32
Şekil 4.5 : $u'_{RMS}$ grafiği (A kesiti). ....	32
Şekil 4.6 : $v'_{RMS}$ grafiği (A kesiti).....	32
Şekil 4.7 : $(u'v')_{ort}$ grafiği (A kesiti). ....	33
Şekil 4.8 : $u'_{RMS}$ sonuçları karşılaştırılması (A kesiti). ....	33
Şekil 4.9 : $v'_{RMS}$ sonuçları karşılaştırılması (A kesiti). ....	34
Şekil 4.10 : Eddy viskozitesi sonuçları karşılaştırılması (A kesiti). ....	34
Şekil 4.11 : 7. Deneye ait ortalama akım hızları (A, C, G kesitleri). ....	35
Şekil 4.12 : 7. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, G kesitleri). ....	36
Şekil 4.13 : 7. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, G kesitleri). ....	37
Şekil 4.14 : 13. Deney hız vektörleri. ....	38
Şekil 4.15 : $u_{ort}$ grafiği (A kesiti).....	38
Şekil 4.16 : $v_{ort}$ grafiği (A kesiti).....	39
Şekil 4.17 : $u'_{RMS}$ grafiği (A kesiti). ....	39

Şekil 4.18 : $v'_{RMS}$ grafiği (A kesiti).....	39
Şekil 4.19 : $(u'v')_{ort}$ grafiği (A kesiti). ....	40
Şekil 4.20 : $u'_{RMS}$ sonuçları karşılaştırılması (A kesiti). ....	40
Şekil 4.21 : $v'_{RMS}$ sonuçlarının karşılaştırılması (A kesiti). ....	41
Şekil 4.22 : Eddy viskozitesi sonuçlarının karşılaştırılması (A kesiti).....	41
Şekil 4.23 : 13. Deneye ait ortalama akım hızları (A, C, F kesitleri). ....	42
Şekil 4.24 : 13. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, F kesitleri).....	43
Şekil 4.25 : 13. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, F kesitleri).....	44
Şekil 4.26 : 2. Deney (Fr: 0,57; 2 mm; A kesiti).....	45
Şekil 4.27 : 7. Deney (Fr: 0,68; 3 mm; A kesiti).....	45
Şekil 4.28 : 9. Deney (Fr: 0,66; 4 mm; A kesiti).....	45
Şekil 4.29 : 11. Deney (Fr: 1,17; 2 mm; A kesiti).....	46
Şekil 4.30 : 13. Deney (Fr:1,43; 3 mm; A kesiti).....	46
Şekil 4.31 : 15. Deney (Fr:2,16; 4 mm; A kesiti).....	46
Şekil 4.32 : 7. deneye ait 3 mm'lik boşluk içinde gözlemlenen hız vektörleri....	49
Şekil 4.33 : 7. Deney v hızlarına ait sweep ve ejection grafikleri. ....	50
Şekil 4.34 : 13. deneye ait 3 mm'lik boşluk içinde gözlemlenen hız vektörleri..	51
Şekil 4.35 : 13. Deney v hızlarına ait sweep ve ejection grafikleri. ....	52
Şekil A.1 : 1. Deney hız vektörleri.....	58
Şekil A.2 : 1. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	58
Şekil A.3 : 1. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	59
Şekil A.4 : 1. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).....	60
Şekil A.5 : 1. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).....	61
Şekil A.6 : 1. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	62
Şekil A.7 : 1. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	63
Şekil A.8 : 2. Deney hız vektörleri.....	64
Şekil A.9 : 2. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	64
Şekil A.10 : 2. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	65
Şekil A.11 : 2. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).....	66
Şekil A.12 : 2. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).....	67
Şekil A.13 : 2. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	68
Şekil A.14 : 2. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	69
Şekil A.15 : 3. Deney hız vektörleri.....	70
Şekil A.16 : 3. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	70
Şekil A.17 : 3. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	71
Şekil A.18 : 3. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).....	72
Şekil A.19 : 3. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).....	73
Şekil A.20 : 3. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	74
Şekil A.21 : 3. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	75
Şekil A.22 : 4. Deney hız vektörleri.....	76
Şekil A.23 : 4. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	76
Şekil A.24 : 4. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	77
Şekil A.25 : 4. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).....	78
Şekil A.26 : 4. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).....	79
Şekil A.27 : 4. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	80
Şekil A.28 : 4. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). ....	81
Şekil A.29 : 5. Deney hız vektörleri.....	82
Şekil A.30 : 5. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	82
Şekil A.31 : 5. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	83
Şekil A.32 : 5. Deney boşluk içi türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	84

Şekil A.33 : 5. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). .....	85
Şekil A.34 : 5. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	86
Şekil A.35 : 5. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	87
Şekil A.36 : 6. Deney hız vektörleri. ....	88
Şekil A.37 : 6. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti). .....	88
Şekil A.38 : 6. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	89
Şekil A.39 : 6. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti). .....	90
Şekil A.40 : 6. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	91
Şekil A.41 : 6. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	92
Şekil A.42 : 6. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	93
Şekil A.43 : 7. Deney hız vektörleri. ....	94
Şekil A.44 : 7. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti). .....	94
Şekil A.45 : 7. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	95
Şekil A.46 : 7. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti). .....	96
Şekil A.47 : 7. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	97
Şekil A.48 : 7. Deney türbülans bileşenleri (G kesiti). ....	98
Şekil A.49 : 7. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (G kesiti). ....	99
Şekil A.50 : 8. Deney hız vektörleri. ....	100
Şekil A.51 : 8. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti). .....	100
Şekil A.52 : 8. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	101
Şekil A.53 : 8. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti). .....	102
Şekil A.54 : 8. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	103
Şekil A.55 : 8. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	104
Şekil A.56 : 8. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri. ....	105
Şekil A.57 : 9. Deney hız vektörleri. ....	106
Şekil A.58 : 9. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti). .....	106
Şekil A.59 : 9. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	107
Şekil A.60 : 9. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti). .....	108
Şekil A.61 : 9. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	109
Şekil A.62 : 9. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	110
Şekil A.63 : 9. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	111
Şekil A.64 : 10. Deney hız vektörleri. ....	112
Şekil A.65 : 10. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	112
Şekil A.66 : 10. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	113
Şekil A.67 : 10. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	114
Şekil A.68 : 10. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	115
Şekil A.69 : 10. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	116
Şekil A.70 : 10. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	117
Şekil A.71 : 11. Deney hız vektörleri. ....	118
Şekil A.72 : 11. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	118
Şekil A.73 : 11. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	119
Şekil A.74 : 11. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	120
Şekil A.75 : 11. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	121
Şekil A.76 : 11. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	122
Şekil A.77 : 11. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti). .....	123
Şekil A.78 : 12. Deney hız vektörleri. ....	124
Şekil A.79 : 12. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	124
Şekil A.80 : 12. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti). ....	125
Şekil A.81 : 12. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	126
Şekil A.82 : 12. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti). ....	127

Şekil A.83 : 12. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).....	128
Şekil A.84 : 12. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).....	129
Şekil A.85 : 13. Deney hız vektörleri.....	130
Şekil A.86 : 13. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	130
Şekil A.87 : 13. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	131
Şekil A.88 : 13. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).....	132
Şekil A.89 : 13. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).....	133
Şekil A.90 : 13. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).....	134
Şekil A.91 : 13. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).....	135
Şekil A.92 : 14. Deney hız vektörleri.....	136
Şekil A.93 : 14. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	136
Şekil A.94 : 14. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	137
Şekil A.95 : 14. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).....	138
Şekil A.96 : 14. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).....	139
Şekil A.97 : 14. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).....	140
Şekil A.98 : 14. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).....	141
Şekil A.99 : 15. Deney hız vektörleri.....	142
Şekil A.100 : 15. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).....	142
Şekil A.101 : 15. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).....	143
Şekil A.102 : 15. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).....	144
Şekil A.103 : 15. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).....	145
Şekil A.104 : 15. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).....	146
Şekil A.105 : 15. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).....	147

## DOLUSAVAK PLAKA BOŞLUKLARI ÜZERİNDEKİ AKIM VE TÜRBÜLANS KARAKTERİSTİĞİ

### ÖZET

Bu çalışma, akım özelliklerini, özellikle de boşluklu düz tabana yakın türbülans özelliklerini kapsamaktadır. Dolu savaklar ve düşüm havuzları gibi su yapıları, doğaları gereği yüksek akım koşulları altında çalışırlar. Bu yapılar, taşkına bağlı olarak yüksek deşarjları mansaba güvenli bir şekilde göndermek için tasarlanmıştır. Geçmişte bu tür yapılarda bazı yapısal arızalar gözlemlenmiştir. Dickinson Barajı'nda 1954'te, Big Sandy Barajı'nda 1983'te, Keban Barajı'nda 1974'te, Malpaso Barajı'nda 1973'te (Meksika), Bhakra Barajı'nda 1967'de (Hindistan), Bratsk, Boutcharinsk, Pavlovsk, Krasnoirsk and Sayano - Sushenskoe Barajlarında 1975'te (Sovyet Birliği), Tarbela Barajı'nda 1979'da (Pakistan) ve son olarak Oroville Barajı'nda 2017'de meydana gelen dolu savak şutu arızaları, şut beton plakalarının hidrolik kaldırmasından kaynaklanmıştır. Örneğin, Malpaso Barajı'ndaki düşü havuzunu (100x50x26 m) korumak için koyulan beton tabakaların (12x12x2 m) 3000 m<sup>3</sup>/s'lik deşarj sonunda tamamının gittiği (10.000 m<sup>3</sup>'lük beton) ve tabanın oturduğu ana kayanın da 6 m oyulduğu görülmüştür. Hidrolik jacking, yukarı kaldırma kuvvetleri tabakanın ağırlığını, ankrajların kapasitesini ve plakanın üstündeki su basıncını aştığında meydana gelir. Bu dolu savakların inşası sırasında, düşüm havuzlarının beton tabanı belirli boyutlardaki plakalarla değiştirilmiş ve plakaların yukarı kaldırma kuvvetlerine karşı stabilitesi kendi ağırlıkları ve gerektiğinde ankrajlarla sağlanmıştır. Gözlemler, bu tür yapıların arızalarının plakaların birleşme kısımlarından (plakalar arasındaki boşluk) başladığını göstermektedir. Göçük mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve fiziksel temelli bir modelin geliştirilmesi, dolu savakların, sediment baypas tünellerinin ve tabaka göçüğüne eğilimli diğer hidrolik yapıların güvenli tasarımı ve sürdürülebilir kullanımı için kilit öneme sahiptir. Düşüm havuzları ve dalma havuzlarında kaya bloklarının veya beton plakaların yukarı kalkması üzerine yapılan çok sayıda çalışmaya rağmen, dolu savak şutlarında yükselme üzerine çok az çalışma yapılmıştır. Türbülanslı akım ile plakalar ve bağlantılar etrafındaki dinamik basınç dalgalanmalarının yüksek sel rejimi akımlarda plakanın yukarı kalkmasına neden olacak şekilde nasıl etkileşime girdiği konusunda hala bilgi eksikliği bulunmaktadır. Sunulan çalışma, sistematik bir laboratuvar araştırması yürüterek bu araştırma boşluklarını doldurmayı amaçlamaktadır.

Bu nedenle, laboratuvarında tabana yakın devir daim kanalında ayrıntılı hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sunulan makalenin ana araştırması, ana akım (kanaldaki akım) ve levhalar arasındaki boşluktaki akımın etkileşimidir. Deneyler, 12x0.5x0.5 m boyutlarındaki laboratuvar kanalında, 10 mm pleksiglas tabanın gerçek tabanla değiştirildiği ve farklı boşlukların bırakıldığı, aynı seviyede tutulan memba ve mansap levhaları arasındaki boşluğun simüle edildiği bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Savak kapağı, akımı kritik üstü akım koşullarının yanı sıra kritik altı akım rejimleri boyunca zorlamak için yukarı yönde değiştirilmiştir. Deşarj ölçümleri dik açılı v-çentikli savak kullanılarak yapılmış, su derinliği nokta ölçerlerle belirlenmiştir. Hız ölçümleri 2D parçacık görüntülü hız ölçümü (Particle Image Velocimetry – PIV) kullanılarak oluşturulmuş, türbülans yoğunlukları ve türbülans kayma gerilmesi değerleri bu hız

ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir. Kritik altı ve kritik üstü akım koşulları için çeşitli Froude sayısı ölçümleri incelenmiştir.

DeneySEL sonuçlar, plakalar arasındaki boşluk üzerindeki akımın kararlı olmadığını ve plakalar arasındaki boşluk genişlediğinde, boşluktaki akım-ana akım etkileşiminin önemli hale geldiğini göstermiştir. Boşlukta vorteks oluşmuş ve plakalar arasında emilmiş ve mansap plakalarının memba kenarı üzerinde belirsiz akış koşulları oluşmuştur.



## **FLOW AND TURBULENT CHARACTERISTIC OVER SPILLWAYS SLAB**

### **SUMMARY**

This study covers flow characteristics, mainly turbulence properties near the smooth bottom with a gap. The water structures such as spillways, stilling basins work under the high flow conditions by their nature. These structures design for submit high discharges based on flood, through the downstream safely. There were some structural failures observed these type of structures in the past. The failures of spillway chutes at Dickinson Dam in 1954, Big Sandy Dam in 1983, Keban Dam's spillway 1974, Malpas Dam in 1973 (Mexico), Bhakra Dam in 1967 (India), Bratsk, Boutcharninsk, Pavlovsk, The spillway chute failures at Krasnoiarsk and Sayano - Sushenskoe Dams in 1975 (Soviet Union), Tarbela Dam in 1979 (Pakistan) and recently at Oroville Dam in 2017 had caused by hydraulic jacking of the chute concrete slabs. The historical context of hydraulic infrastructure failures underscores the critical need for advancements in structural design and risk mitigation strategies. Instances such as the catastrophic failures at Dickinson Dam, Big Sandy Dam, and Oroville Dam serve as poignant reminders of the devastating consequences of hydraulic infrastructure failure. These incidents not only result in immense economic losses but also pose significant threats to public safety and environmental integrity. For example, it was observed that the concrete layers (12x12x2 m) put in place to protect the drop pool (100x50x26 m) at the Malpas Dam were completely gone (10,000 m<sup>3</sup> of concrete) at the end of the 3000 m<sup>3</sup>/s discharge, and the bedrock on which the base sits was gouged by 6 m. Hydraulic jacking occurs when the uplift forces exceed the weight of the slab, the capacity of the anchors, and the water pressure on the top of the slab. During the construction of this spillways, stilling basins concrete bottom was replaced with certain size of the slabs and slabs stability against uplift forces provided by their own weigh and anchors if necessary. Observations show that failures of this type of structures start with the junction parts (the gap between the slabs) of the slabs. A better understanding of the failure mechanism and the development of a physically based model is key for the safe design and sustainable use of spillways, sediment bypass tunnels and other hydraulic structures prone to slab failure. Understanding the underlying mechanisms of structural vulnerabilities, particularly in the context of hydraulic jacking and slab uplift, is paramount for enhancing the resilience and longevity of water control structures. By elucidating the intricacies of flow dynamics and turbulence effects near slab junctions, this research endeavors to fortify the foundations of hydraulic engineering practices and instill greater confidence in the reliability of water infrastructure systems worldwide.

Despite the large number of studies on the uplift of rock blocks or concrete slabs in stilling basins and plunge pools, there have been very few studies of uplift in spillway chutes. There is still a lack of knowledge of how turbulent flow and dynamic pressure fluctuations around slabs and joints interact to cause slab uplift in highly supercritical flows. The presented study aims to fill these research gaps by conducting a systematic laboratory investigation.

Therefore, laboratory detailed velocity measurements achieved in the laboratory recirculating flume near the bottom. The main investigation of the presented paper interaction of main flow (flow in the flume) and fluid in the gap between slabs. Experiments were achieved in the 12x0.5x0.5 m laboratory flume, 10 mm plexiglass bottom replaced on the actual bottom with different gaps which simulated gap between slabs upstream and downstream slabs kept as same level. The sluice gate was replaced upstream for forcing the flow through the supercritical flow conditions as well as subcritical flow regimes. Discharge measurements were made by using right angle v-notch weir, water depth determined by point gauges. Velocity measurements were generated by using 2D particle image velocimeter (PIV), turbulent intensities and turbulence shear stress values determined by using these velocity measurements. Various Froude number measurements for sub and supercritical flow conditions were studied.

Furthermore, the integration of advanced measurement techniques, such as Particle Image Velocimetry (PIV), underscores a paradigm shift towards precision engineering and data-driven decision-making in hydraulic research. PIV offers insights into flow behaviors and turbulence characteristics within complex hydraulic systems, transcending traditional limitations associated with conventional measurement methods. With a high-speed camera, PIV determines velocities by tracking the movement of particles in the water over successive frames. Leveraging the capabilities of PIV, this study ventures into uncharted territories of flow dynamics near slab gaps, unraveling the interplay between main flow and flow of gap between slabs. Through meticulous experimentation and rigorous analysis, this research aims to chart a course towards sustainable hydraulic infrastructure development, where empirical evidence and theoretical frameworks converge to foster innovation and resilience in the face of evolving hydraulic challenges.

The study's findings provide crucial insights into the mechanics of hydraulic jacking and slab uplift, emphasizing the importance of precise design and maintenance of hydraulic structures. The experimental observations reveal that the instability of flow over gaps between slabs is significantly influenced by the width of these gaps. As the gap widens, the interaction between the main flow and the fluid in the gap becomes increasingly critical, leading to the formation of vortices. These vortices can exacerbate the uplift forces acting on the slabs, compromising their stability and increasing the risk of structural failure. The turbulence intensities and shear stress values measured using Particle Image Velocimetry (PIV) highlight the complex flow dynamics at play, underscoring the need for a nuanced understanding of these interactions to enhance the safety and durability of hydraulic structures.

Moreover, at low Froude numbers, the turbulence components in the vertical direction are smaller compared to a flat bottom, while the horizontal turbulence components ( $u$ ) remain dominant. Conversely, at higher Froude numbers, which correspond to flood regimes, the turbulence components become more pronounced, with increased vertical turbulence leading to higher shear stress. These findings underscore the necessity of considering both the gap-induced vortex dynamics and the flow regime when designing and assessing the stability of hydraulic structures.

Finally, the implications of these findings extend beyond the immediate context of spillway chutes and stilling basins. The insights gained from this study can inform the design and assessment of various hydraulic infrastructures, such as sediment bypass tunnels and water conveyance systems, where similar flow conditions and structural vulnerabilities may exist. By bridging the gap between empirical data and theoretical models, this research contributes to the development of more robust design guidelines

and risk mitigation strategies. As the global climate continues to evolve, bringing more frequent and intense hydrological events, the importance of resilient and reliable hydraulic infrastructure cannot be overstated. This study not only advances the scientific understanding of flow dynamics and turbulence effects but also provides a solid foundation for future research and practical applications in the field of hydraulic engineering.





## 1. GİRİŞ

### 1.1 Araştırmanın Geçmişi ve Bağlamı

Hidrolik mühendisliği, su kaynaklarının yönetilmesinde ve su akışının çevredeki ortamlar üzerindeki etkisinin azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Hidrolik yapıların temel bileşenleri olan savaklar, kontrollü su akışını kolaylaştırır, taşkınları önler ve su kaynaklarının verimli kullanılmasına katkıda bulunur. Geleneksel olarak, savak tabanları katı plakalar olarak inşa edilir ve yapısal bütünlük ve değişen hidrolik koşullara uyarlanabilirlik açısından zorluklar ortaya çıkarır. Savak tabanlarının plaka olarak dökülmesiyle ilgili karmaşıklıklar, alternatif inşaat yöntemlerinin araştırılmasını gerektirmektedir. Açık kanal akışlarındaki türbülans etkilerini anlamak, esnek ve verimli su kontrol yapıları tasarlamak için esastır. Ayrıca, savak yapımında yenilikçi çözümlere duyulan ihtiyaç, tek tek plakaların yapı taşı olarak kullanıldığı dolu savak yapılarının dinamiklerinin araştırılmasına yoğun bir ilgi duyulmasına yol açmıştır. Bu araştırma, türbülans etkileri ve dolu savak yapılarının yapısal stabilitesi arasındaki etkileşime ilişkin mevcut bilgi eksikliklerini gidermeyi amaçlamaktadır.

Geçmişte bu tür yapılarda bazı yapısal arızalar gözlemlenmiştir. Dickinson Barajı'nda 1954'te, Big Sandy Barajı'nda 1983'te, Keban Barajı'nda 1974'te (Şekil 1.1) ve son olarak Oroville Barajı'nda 2017'de (Şekil 1.2) meydana gelen dolu savak şutu arızaları, şut beton plakalarının hidrolik olarak yerinden oynamasından kaynaklanmıştır. Hidrolik kaldırma, yukarı kaldırma kuvvetleri plakanın ağırlığını, ankrajların kapasitesini ve plakanın üstündeki su basıncını aştığında meydana gelir.



Şekil 1.1 : Keban barajı, 1974.



**Şekil 1.2 : Oroville barajı, 2017.**

Dolu savak plaka boşlukları boyunca türbülans ve akım karakteristiklerinin araştırılması, sürdürülebilir ve uyarlanabilir su kontrol yapılarına duyulan acil ihtiyaç nedeniyle özellikle önem arz etmektedir. Mevcut savak yapım yöntemleri zorluklarla karşılaştığından, bu çalışma plakaların kullanımıyla ilgili avantajları, dezavantajları ve incelikleri keşfetmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın bağlamı, kanal içindeki hız ve türbülans dağılımı modellerinin ve plakalar arasındaki boşlukların türbülans dinamikleri üzerindeki etkisinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak tanıyan PIV tekniklerinin yenilikçi kullanımı ile tanımlanmaktadır. Araştırma, savak tasarımının bu özel yönünü inceleyerek, teorik çerçevelerin ötesine geçen ve hidrolik mühendisliği projelerindeki pratik uygulamaları bilgilendiren içgörülere katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca çalışma, Nezu'nun açık kanal akışlarında türbülans üzerine temel çalışmalarından ilham alarak, yerleşik ilkeler üzerine inşa etmek ve alanı ileriye taşımak için önceki araştırmalarla bütünleşmektedir. Nihayetinde bu araştırmanın bulguları, hidrolik mühendisliği alanında sürdürülebilir çözümler sunarak savak tasarımı ve inşasının geleceğini şekillendirmeye hazırlanmaktadır.

## 1.2 Zorlukların Belirlenmesi: Problem ve Sorular

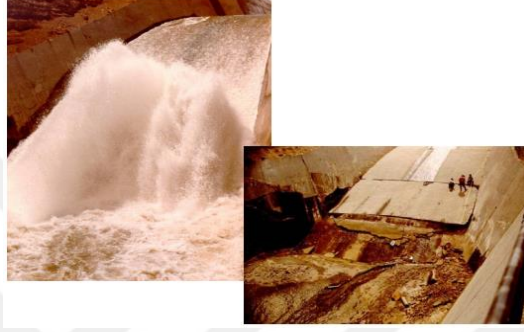
Araştırma, türbülans etkileri arasındaki etkileşimin yeterince araştırılmadığı plaka tabanlı dolu savak yapıları hakkındaki bilgi birikimimizdeki kritik bir boşluğu ele almaktadır. Savak yapılarının plakalar halinde dökülmesine yönelik geleneksel yaklaşım zorluklarla karşılaşmakta ve tek tek plakalara geçiş, özellikle boşluk boyutlarındaki değişikliklerden etkilenen yapısal davranışla ilgili belirsizlikler getirmektedir. Genel sorun, plaka tabanlı dolu savak yapısının doğasında var olan karmaşıklıkların anlaşılması ihtiyacına odaklanmaktadır. Araştırma soruları, boşluk değişimlerinin yapı içindeki hız dağılımı modelleri ve türbülans etkileri üzerindeki etkisini sistematik olarak araştırmak, kapak açıklıklarındaki değişikliklerin yapısal tepki ve türbülans dinamikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek, yapısal bütünlük için boşluk boyutlarının optimum konfigürasyonunu belirlemek ve gelişmiş PIV tekniklerinin ve MATLAB analizinin etkili kullanımını araştırmak için formüle edilmiştir. Çalışma, bu soruları ele alarak, hidrolik mühendisliği bağlamında savak tasarımı ve inşaat yöntemlerinin optimizasyonu için hayati öneme sahip içgörülere katkıda bulunmayı ve nehir ve taşkın rejimi yönetimi için çıkarımlar yapmayı amaçlamaktadır.

## 1.3 Amaç ve Önem

Bu araştırmanın amacı, ana akım (kanaldaki akım) ile levhalar arasındaki boşluktaki akımın etkileşimidir. Tipik olarak, plakalardaki hidrodinamik yükselmeden kaynaklanan hasar, çıkıntılar veya dökülmelerin meydana geldiği derzlerde başlar (Şekil 1.3). Bu çıkıntılar üzerindeki dolu savak akışları temele su girmesine neden olabilir ve bu da temel malzemesinin yükselmesi veya erozyonu nedeniyle yapısal hasara yol açabilir. Bu sorun devam ederse, tamamen çökme ve şut plakalarının kaldırılması söz konusu olabilir (şekil 1.4). Bu sorun genellikle şut ve alt drenaj sistemlerinin yaşlanma veya yanlış tasarım nedeniyle kötü durumda olabileceği yapılar için daha büyük bir endişe kaynağıdır ve eklem/çatlak akışı şut temelinin erozyonuna ve altının oyulmasına (şekil 1.5) ve şut plakasının yapısal olarak çökmesine (şekil 1.6) yol açabileceğinden özellikle toprak üzerine kurulan şutlar için kritik öneme sahiptir (Frizell,2007).



**Şekil 1.3 :** Kaldırmaya bağlı ilk hasar.



**Şekil 1.4 :** Akışın devam etmesi ile plakalar hasar görür veya kaybolur.



**Şekil 1.5 :** Plaka altının oyulması.



**Şekil 1.6 :** Yapısal çökme.

Gözlemler, bu tür yapıların arızalarının plakaların birleşme kısımlarından (plakalar arasındaki boşluk) başladığını göstermektedir. Mekanizmanın daha iyi anlaşılması ve fiziksel temelli bir modelin geliştirilmesi, dolu savakların, sediment baypas tünellerinin ve plaka başarısızlığına eğilimli diğer hidrolik yapıların güvenli tasarımı ve sürdürülebilir kullanımı için kilit öneme sahiptir.

Gelişmiş PIV teknikleri ve MATLAB analizi kullanan çalışma, plakalar arası boşluklar etrafındaki hız dağılım modellerini kapsamlı bir şekilde araştırmayı amaçlamaktadır. Plakalar arasında değişen boşluk boyutlarının dahil edilmesi ve su derinliğini ayarlamak için kapak açıklıklarının değiştirilmesi, sistemin çeşitli hidrolik koşullar altındaki davranışının incelikli bir şekilde araştırılmasına katkıda bulunur. Bu araştırma sadece teorik kavramları pratik uygulamalarla birleştirmekle kalmıyor, aynı zamanda savak tasarımı ve yapımının optimizasyonuna katkıda bulunarak tasarım sürecinde karar verme sürecini bilgilendirebilecek içgörüler sunuyor. Önemi, hidrolik mühendisliği metodolojilerindeki potansiyel gelişmelere kadar uzanmakta, akışkan dinamiklerini incelemek için modern tekniklerin kullanımını sergilemekte ve plaka tabanlı dolu savakları değişen hidrolik koşullara uyarlamak için pratik çözümler sunarak nehir ve sel rejimi yönetimi için doğrudan etkileri vardır. Genel olarak bu çalışma, hidrolik mühendisliğinde hem teorik anlayışın hem de pratik uygulamaların ilerletilmesi açısından büyük önem taşımaktadır

#### **1.4 Kapsam ve Sınırlamalar**

Bu çalışma, türbülans etkileri arasındaki etkileşime odaklanarak plaka tabanlı savak yapılarının dinamiklerini incelemektedir. Araştırma, özellikle savak yapımında kullanılan ayrı ayrı plakalara odaklanarak, değişen hidrolik koşullara yanıt olarak yapısal davranışın incelikli bir şekilde anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Kontrollü bir laboratuvar ortamında gelişmiş PIV tekniklerini kullanan çalışma, plakalar arasındaki hız dağılımını analiz etmektedir. Araştırma, plakalar arasındaki boşluk boyutlarını değiştirerek, türbülans kaynaklı plaka yer değiştirme riskini en aza indirirken yapısal bütünlüğü sağlayan en uygun konfigürasyonu araştırmaktadır. Çalışmanın ampirik niteliği, gerçek dünya senaryolarına uygulanabilirliğini artırarak savak tasarımı ve inşasında yeniliği teşvik etmektedir.

Bu araştırma plaka tabanlı savak yapılarına ilişkin kavrayışımızı geliştirirken, bazı sınırlamaların da kabul edilmesi gerekmektedir. Deneyler kontrollü bir laboratuvar

ortamında gerçekleştirilmiş olsa da gerçek dünyadaki hidrolik koşulların karmaşıklığını tam olarak yansıtmayabilir. Modelin doğasında bulunan basitleştirmeler ve varsayımlar, özellikle doğal akım dinamikleri bağlamında, bulguların saha uygulamalarına doğrudan aktarılabilirliğini etkileyebilir. Çalışma öncelikle düz yatakta gerçekleştirilmektedir. Deneyler hem sel hem de nehir rejimi dikkate alınarak tek fazda yapılmıştır ancak sonuçların çok fazlı akım veya farklı su kalitesi koşullarını içeren senaryolara genelleştirilebilirliği sınırlı olabilir. Malzeme özellikleri ve yapım yöntemlerindeki değişkenlik, dış faktörlerin ve sınır koşullarının kontrolündeki zorluklarla birlikte, çalışmanın bulgularını yorumlarken ve uygularken dikkate alınması gereken bazı belirsizlikler ortaya çıkarmaktadır. Kabul edilen bu sınırlamalar, çalışma için şeffaf bir çerçeve sağlayarak gelecekteki araştırmalar ve pratik uygulamalar için bir temel oluşturmaktadır.

### **1.5 Metodolojiye Genel Bakış**

Metodoloji, özellikle Nezu'nun açık kanal akımlarında türbülans üzerine yaptığı ufuk açıcı çalışmasından yararlanarak, hidrolik mühendisliği, türbülans dinamikleri ve savak yapımı ile ilgili yerleşik teorilere dayanan kapsamlı bir literatür taraması yoluyla sağlam bir teorik temel ile başlayan ikili bir yaklaşımı kapsamaktadır. Ampirik aşamaya geçildiğinde, çalışma, ayrı plakalar ve gelişmiş PIV tekniklerini kullanan plaka tabanlı savak yapılarına odaklanmakta olup laboratuvar detaylı hız ölçümleri, tabana yakın laboratuvar devridaim kanalında gerçekleştirilmiştir. Deneysel kurulumda, akım dinamikleri üzerindeki etkilerini anlamak için plakalar arasındaki çeşitli boşluk aralıkları sistematik olarak incelenmekte ve su derinliğini değiştirmek için kapak açıklıkları ayarlanmaktadır. Toplanan PIV verileri MATLAB ile titiz bir analize tabi tutularak hassasiyet ve yorumlanabilirlik katmıştır. Bu birleşik teorik-deneysel metodoloji, türbülans etkilerinin bütüncül bir şekilde araştırılmasını sağlayarak nehir ve sel rejimlerinde savak tasarımı ve inşası için bilgiler sunmaktadır.

## 2. LİTERATÜR

### 2.1 Türbülans: Temel Bilgiler

Akışkanlar dinamiğinde karmaşık ve dinamik bir olgu olan türbülans, düzensiz ve kaotik akım hareketi ile karakterize edilir. Akışkanın düzgün, öngörülebilir katmanlar halinde hareket ettiği laminer akımın aksine, türbülanslı akım rastgele hareketleri, vortekslerin ve anaförlerin oluşumunu ve enerjinin üç boyutlu, düzensiz modeller aracılığıyla dağılmasını içerir. Türbülansın kökenleri, akım ortamındaki düzensizlikler, hızdaki değişiklikler ve engellerin varlığı gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir. Laminer akımdan türbülanslı akıma geçiş, Reynolds sayısından etkilenir ve akım içindeki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere göre göreceli önemini vurgular. Araştırmamızın ayrılmaz bir parçası olan hidrolik mühendisliğinde türbülansı anlamak çok önemlidir. Türbülanslı akım basınç dağılımını, hız profillerini ve enerji dağılımını önemli ölçüde etkiler; bunların hepsi savaklar gibi hidrolik yapıların tasarımında ve verimliliğinde kritik unsurlardır. Bu kavrayış, PIV tekniklerinin kullanımının plaka yapısı içindeki türbülanslı akımların karmaşık özelliklerini inceleme ve anlama ihtiyacıyla uyumlu olduğu plaka tabanlı savak yapılarına yönelik araştırmamız için temeldir.

Türbülans çalışmaları, 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanan önemli katkılarla zengin bir tarihsel geçmişe sahiptir. Osborne Reynolds'un bu dönemde laminer akımdan türbülanslı akıma geçişi araştıran ve Reynolds sayısını ortaya koyan çığır açıcı deneyleri, türbülansın temel anlayışını oluşturmuştur (Reynolds,1883). 20. yüzyılın ortalarında Theodore von Kármán ve meslektaşları, türbülanslı akımların yapısını inceleyerek ve enerji kaskatı gibi kavramları ortaya atarak bu alanı daha da ilerletmiştir. Özellikle, Iehisa Nezu'nun 20. yüzyılın ikinci yarısındaki çalışmaları, açık kanallardaki türbülansın anlaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuş ve hidrolik mühendisliği gibi alanlar için bilgiler sağlamıştır (Nezu,1993). Tarihsel ilerleme, bilim insanlarının ve mühendislerin süregelen merakını yansıtmakta ve türbülansı anlamaya yönelik sürekli arayışın altını çizerek, çalışmayı dinamik ve çok ölçekli bir fenomen olarak şekillendirmektedir. Plaka tabanlı savak yapıları üzerine yaptığımız

araştırmalarda, bu tarihsel bağlamın farkına varmak akışkanlar dinamiğinde türbülansın önemini artırmakta ve bu karmaşık olgunun anlaşılmasında çığır açan kişilerin kalıcı mirasını vurgulamaktadır.

Türbülans ile ilgili temel bilgiler teze giriş niteliği taşımakta ve türbülansın plaka tabanlı savak yapılarının akım dinamiklerini, stabilitesini ve verimliliğini nasıl etkilediğinin araştırılması için zemin hazırlamaktadır. Bu bölüm, teorik ilkeler, tarihsel bağlam ve pratik uygunluğun bir kombinasyonu yoluyla okuyucunun ilgisini çekmeyi ve onları hidrolik yapılar içindeki akım dinamiklerinin karmaşık dünyasına ayrıntılı bir yolculuğa hazırlamayı amaçlamaktadır.

## **2.2 Kararlı ve Kararlı Olmayan Akım: Hidrolik Yapılardaki Önemini Araştırılması**

Hidrolik mühendisliğinde, akımın özelliklerini anlamak önemlidir. Buna ek olarak kararlı ve kararlı olmayan akım sınıflandırması, hidrolik yapıların tasarlanması ve analiz edilmesinde çok önemli bir rol oynar.

### **2.2.1 Kararlı akım**

Kararlı akım, bir akışkanın herhangi bir noktasındaki hız ve diğer akım parametrelerinin zaman içinde sabit kaldığı bir durumu ifade eder. Bu akım türü, akım koşullarının değişmediği senaryolarda yaygındır ve analiz için basitleştirilmiş bir model sağlar. Savaklar gibi hidrolik yapılarda, uzun vadeli operasyonel senaryolar için tasarım yapılırken genellikle sabit akım koşulları varsayılır. Kararlı akım varsayımı hesaplamaları basitleştirir ve kütle ve enerjinin korunumu gibi ilkelerin daha kolay bir Şekilde uygulanmasına olanak tanır.

### **2.2.2 Kararlı olmayan akım**

Kararlı olmayan akım, zaman içinde hız ve akım parametrelerindeki değişimleri içerir. Bu dinamik akım durumu, taşkın olayları veya su seviyelerindeki ani değişiklikler gibi akım koşullarının değiştiği senaryolarda yaygındır. Kararlı olmayan akım analizi, hidrolik yapıların geçici koşulları hesaba katması ve değişen koşullara tepkilerini değerlendirmesi için çok önemlidir. Savaklar bağlamında, kararlı olmayan akımı anlamak, yapının farklı hidrolik senaryolar altında nasıl davranacağını tahmin etmek

için gereklidir ve mühendislerin taşkın esnekliği ve operasyonel stabilite gibi faktörleri değerlendirmelerine yardımcı olur.

### **2.2.3 Hidrolik yapılarda önemi**

Kararlı ve kararlı olmayan akım değerlendirmeleri arasındaki seçim, bir hidrolik yapının belirli özelliklerine ve amacına bağlıdır. Kararlı akım varsayımları istikrarlı, uzun vadeli koşullar için uygundur, hesaplamaları ve tasarım süreçlerini basitleştirir. Bununla birlikte, hidrolik yapıların gerçek dünya senaryolarında, özellikle de taşkınlar veya su seviyelerindeki ani değişiklikler gibi olaylar sırasında dayanıklılıklarını ve etkinliklerini sağlamak için kararlı olmayan akım koşulları altında da değerlendirilmesi gerekir. Kararlı ve kararlı olmayan akım analizinin dengelenmesi, kapsamlı hidrolik yapı tasarımı için çok önemlidir ve plaka tabanlı savak yapılarına ilişkin araştırmamız, çeşitli akım koşullarında performanslarının sağlam bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için her iki yönü de dikkate almaktadır.

Kararlı ve kararlı olmayan akımın öneminin araştırılmasına yapılan vurgu, bu fenomenlerin gerçek dünya senaryolarında hidrolik yapıların stabilitesini, dayanıklılığını ve verimliliğini doğrudan nasıl etkilediğini çözüme taahhüdünün altını çizmektedir.

Gerçek dünya uygulamaları ve vaka çalışmaları, anlatımı kararlı ve kararlı olmayan akım arasındaki ayrımın hidrolik mühendisliği zorluklarında çok önemli olduğu kanıtlanmış somut örneklerle zenginleştirerek araştırmaya sorunsuz bir şekilde entegre edilmiştir. Bu pratik temel, açıklanan teorik kavramlar ile somut senaryolar arasında köprü kurmayı ve bu araştırmanın alanla doğrudan ilgisini göstermeyi amaçlamaktadır.

### **2.3 Verimlilik ve Türbülans Arasındaki Bağlantı**

Hidrolik yapılarda verimlilik ve türbülans arasındaki ilişki karmaşıktır ve tasarım ve performansı optimize etmek için çok önemlidir. Bu bağlantıyı anlamak, özellikle dolu savaklar gibi yapıların verimliliğini artırmak isteyen mühendisler için ayrıca önem arz etmektedir.

### **2.3.1 Hidrolik yapılarda verimlilik**

Hidrolik yapılarda verimlilik, enerji kayıplarını en aza indirirken ve kontrollü akımı en üst düzeye çıkarırken yapının amacına ulaşma kabiliyetini ifade eder. Savaklar söz konusu olduğunda verimlilik, su seviyelerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, taşkınların önlenmesi ve suyun kontrollü bir şekilde serbest bırakılmasının sağlanması için çok önemlidir.

### **2.3.2 Türbülansın verimlilik üzerindeki etkisi**

Türbülans, hidrolik yapıların verimliliğini önemli ölçüde etkileyebilir. Bir miktar türbülans kaçınılmaz olsa da aşırı türbülans enerji dağılımına, direncin artmasına ve potansiyel yapısal hasara yol açabilir. Suyun kontrollü salınımının esas olduğu savaklarda türbülansı anlamak ve yönetmek kritik önem taşır. Aşırı türbülans enerji kayıplarına yol açarak yapının su akımını kontrol etme verimliliğini azaltabilir ve potansiyel olarak stabilitesini tehlikeye atabilir.

### **2.3.3 Optimum verimlilik için türbülansı dengeleme**

Türbülans ve verimlilik arasında optimum bir denge sağlamak hidrolik mühendisliğinde önemli bir husustur. İyi yönetildiğinde orta dereceli türbülans, sedimentlerin etkili bir şekilde karışmasına ve dağılmasına katkıda bulunarak yapının verimliliğini etkileyebilecek sedimentasyon gibi sorunları önleyebilir. Bununla birlikte, savağın mansabı gibi kritik alanlarda türbülansın en aza indirilmesi, kontrol ve verimliliğin sürdürülmesi için çok önemlidir.

### **2.3.4 Plaka tabanlı yapıların rolü**

Plaka tabanlı savak yapılarında, verimlilik ve türbülans arasındaki bağlantı daha da ayrıntılı hale gelir. Tek tek plakaların tasarımı ve düzenlenmesi, yapı içindeki akım modellerini ve türbülansı etkileyebilir. Plaka konfigürasyonlarının, aralıklarının ve yönelimlerinin dikkatle değerlendirilmesi, verimliliği tehlikeye atabilecek aşırı türbülansı azaltırken bu tarz yapıların avantajlarından yararlanmak için gereklidir.

### **2.3.5 Verimlilik değerlendirmesi için gelişmiş teknikler**

Verimlilik ve türbülans arasındaki bağlantıyı kapsamlı bir şekilde anlamak için, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonları ve Parçacık Görüntülü Hız Ölçümleri dahil olmak üzere deneysel çalışmalar gibi gelişmiş teknikler kullanılabilir.

Bu teknikler akım şekilleri, türbülans seviyeleri ve enerji dağılımına ilişkin ayrıntılı bilgiler sağlayarak mühendislerin savak tasarımlarını maksimum verimlilik için optimize etmelerine yardımcı olur.

#### 2.4 Önceki Çalışmalara Genel Bakış: Hız Dalgalanmaları

- Osborne Reynolds (1883): Reynolds, "An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels" adlı çalışmasında, laminar akımdan türbülanslı akıma geçişin anlaşılması için zemin hazırlamış ve tarihsel türbülans araştırmalarında önemli bir noktaya işaret etmiştir.
- Sumer, B. M. and Oguz, B. (1978): Particle Motions Near the Bottom in Turbulent Flow in an Open Channel adlı bu çalışma, türbülanslı akım koşulları altında açık bir kanalın yatağına yakın parçacık hareketlerinin dinamiklerini araştırmaktadır. Parçacık yörüngelerini etkileyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine odaklanarak parçacıklar ve türbülanslı eddyler arasındaki karmaşık etkileşimleri vurgulamaktadır. Çalışmanın bulguları, açık kanal akımlarında sediment taşıma süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.
- Chao-Lin Chiu (1989): Chao-Lin Chiu'nun 1989 yılında yayımlanan "Velocity Distribution in Open Channel Flow" adlı makalesi, açık kanallar için akışkan dinamiği alanında çığır açan bir çalışmadır. Çalışma, açık kanal akımlarında hız dağılımını tanımlayan ve maksimum hızın yerini içeren denklemleri ortaya koymaktadır. Metodoloji, olasılıksal bir yaklaşımı, entropi ilkelerini ve geometrik teknikleri birleştirerek karmaşık açık kanal davranışlarını simüle etmek için kapsamlı bir model sağlamaktadır.
- Willi H. Hager (1992): "Energy Dissipators and Hydraulic Jump" hidrolik mühendisliği alanında kapsamlı bir referanstır. Kitap, hidrolik sıçramalara vurgu yaparak enerji dağıtıcıların tasarımını, analizini ve uygulamasını kapsamaktadır. İçerik, çeşitli dağıtıcı türlerini ve bunların etkinliğini araştırarak açık kanal akımında enerji dağıtma ilkelerinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

- Iehisa Nezu ve Nakagawa (1993): Nezu'nun etkili çalışması "Turbulence in Open Channel Flows", hidrolik mühendisliğinde açık kanal akımlarıyla ilgili türbülans çalışmalarında bir köşe taşıdır. Nezu'nun araştırmaları türbülans yapılarının, sınır katmanlarının ve akım özelliklerinin anlaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuş ve sonraki araştırmalar için zemin hazırlamıştır.
- Cokgor, Albayrak ve Yegen (2008): "The Spatial Inhomogeneity of Turbulence Over Large Relative Random Roughnesses in Open Channel Flow" başlıklı çalışma, pürüzlü bir yüzey üzerindeki türbülans özelliklerini araştırmaktadır. Ölçümler üç bileşenli ADV ve iki bileşenli LDA cihazları ile elde edilmiştir. Ortalama dikey hızlar, kök ortalama kare (RMS) dağılımları ve ortalama dikey momentum akıları dahil olmak üzere dikey hız bileşeniyle ilişkili türbülans istatistikleri vurgulanmıştır. Araştırma aynı zamanda bu tür yüzeyler üzerindeki açık kanal akımında türbülansın karmaşık dinamiklerini anlamının önemini vurgulamaktadır.
- Westerweel, Elsinga, Adrian (2013): "Particle Image Velocimetry for Complex and Turbulent Flows" adlı çalışma, PIV teknikleri, uygulamaları ve zorlukları hakkında kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Hem karmaşık hem de türbülanslı akımlarda PIV'i anlamak için temel bir çalışma olarak kabul edilir.
- Wahl L. T., Frizell W. K. ve Falvey T. H. (2019): "Uplift Pressures below Spillway Chute Slabs at Unvented Open Offset Joints" başlıklı doküman, 2017 Oroville Barajı'nın yıkılmasıyla ortaya çıkan endişeleri vurgulayarak beton dolu savak şutlarının hidrolik kaldırma potansiyelini araştırmaktadır. Araştırma, şut hızı, bağlantı geometrisi ve ortaya çıkan yükselme basınçları arasındaki ilişkiyi vurgulamakta ve bunları hem sınır tabaka hızına hem de kanal ortalama hızına göre boyutsuz terimlerle sunmaktadır. Çalışma, geçmiş deneysel verileri yeniden analiz etmekte ve yükselme basınçlarının daha küçük boşluk genişlikleri ve daha büyük dikey uzaklıklarla arttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, derzlerden geçen akımın etkisini daha iyi anlamak için ek araştırmalar yapılması gerektiğini belirtmektedir.
- Frizell W. K. (2007): "Uplift and Crack Flow Resulting from High Velocity Discharges over Open Offset Joints" dokümanı, dolu savak şutlarındaki farklı derz geometrileri üzerinde yüksek hızlı su akımlarının yükselme basınçları ve

akım hızları üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Çalışma, çeşitli bağlantı konfigürasyonlarını ve hızlarını test ederek, hidrolik yapıların güvenliğini ve bakımını artırmayı amaçlayan risk değerlendirmelerini ve tasarım kılavuzlarını iyileştirmek için veri sağlamaktadır.

- Tony L. Wahl, Bryan J. Heiner (2024): “Effects of Joint and Crack Geometry on Hydraulic Jacking in Lined and Unlined Spillways” başlıklı çalışma, farklı bağlantı ve çatlak geometrilerinin dolusavak şutlarındaki hidrolik jacking oluşumunu nasıl etkilediğini incelemektedir. Çalışmada pahlı (eğik), yuvarlatılmış, eğimli ve eğri kenarlar gibi çeşitli konfigürasyonların yanı sıra ofsetleri düzeltmek için kullanılan eğimli ve kabartma yuvalar da değerlendirilmektedir. Laboratuvar deneyleri, pah kırma ve yuvarlatma kenarlarının etkili ofset yüksekliğini azaltarak yükselmeyi azalttığını, akıştan uzaktaki eğimlerin ise yükselme basınçlarını azalttığını göstermektedir.

Bu alışmalar toplu olarak hız dalgalanmaları, türbülans ve bunların hidrolik yapılar üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve savak yapılarındaki plakalar arasında oluşabilecek boşlukta meydana gelebilecek bilgi eksikliğinin araştırılması da dahil olmak üzere daha ileri araştırmalar için bir temel oluşurmaktadır.

## **2.5 PIV Uygulamaları: Akım Karakteristiklerinin İncelenmesi**

PIV, akım özelliklerini görselleştirmek ve ölçmek için hidrolik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir deneysel tekniktir. Bu bölüm, akım dinamiklerinin çeşitli yönlerini araştırmak için PIV'nin nasıl kullanıldığını ve hidrolik yapılardaki akışkanların davranışına ilişkin bilgiler sağladığını incelemektedir.

### **2.5.1 Hidrolik mühendisliğinde uygulama**

PIV, ayrıntılı hız alanlarını müdahaleci olmayan bir şekilde yakalama kabiliyeti nedeniyle hidrolik mühendisliğinde önem kazanmıştır. Akışkanın partiküllerle tohumlanmasını ve hareketlerini izlemek için görüntülerin yakalanmasını içerir, araştırmacıların hız vektörleri elde etmesine ve karmaşık akım modellerini görselleştirmesine olanak tanır.

### **2.5.2 Türbülans yapılarının görselleştirilmesi**

PIV'nin önemli bir uygulaması, hidrolik sistemlerdeki türbülans yapılarının görselleştirilmesi ve analizidir. PIV, parçacık hareketini izleyerek türbülanslı akımların karmaşık ayrıntılarını aydınlatılabilir ve araştırmacıların türbülansın nasıl geliştiğini, evrimleştiğini ve savaklar gibi hidrolik yapılarla nasıl etkileşime girdiğini anlamalarına yardımcı olur.

### **2.5.3 Hız gradyanlarının sayısallaştırılması**

PIV, hız gradyanlarının ölçülmesini sağlayarak akım hızının bir hidrolik yapı içinde mekânsal olarak nasıl değiştiği hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Bu özellik, yüksek kayma ve türbülans alanlarının değerlendirilmesi için çok önemlidir ve istenmeyen akım özelliklerini en aza indirmek için tasarım sürecine rehberlik eder.

### **2.5.4 Sınır katmanlarının değerlendirilmesi**

Bu teknik, özellikle savak plakaları gibi katı yapıların çevresinde sınır katmanlarının incelenmesinde değerlidir. PIV, araştırmacıların sınırların yakınındaki hız profillerini incelemesine olanak tanıyarak akışkanın yüzeylerle nasıl etkileşime girdiğini anlamaya ve yapısal bütünlük için potansiyel endişe alanlarını belirlemeye yardımcı olur.

### **2.5.5 Vorteks oluşumunun analizi**

PIV, hidrolik yapıların ardından oluşabilecek vorteksleri yakalayabilme özelliğine sahiptir. Bu özellik, vortekslerin savakların stabilitesi ve verimliliği üzerindeki potansiyel etkisini değerlendirmek için gereklidir ve olumsuz etkileri azaltmak için savak tasarımının optimizasyonuna yardımcı olur.

### **2.5.6 Boşluk değişimlerinin akım dinamikleri üzerindeki etkisi**

Plaka tabanlı savak yapılarında PIV, tek tek plakalar arasındaki boşluk değişimlerinin akım dinamikleri üzerindeki etkisini araştırmak için uygulanabilir. Bu teknik, boşluk boyutlarındaki değişikliklerin akım modellerini nasıl etkilediğinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak yapısal bütünlük ve hidrolik verimlilik için en uygun konfigürasyona ışık tutar.

### **3. METODOLOJİ**

Bu bölümde, dolu savak yapılarında türbülans dinamikleri ve akım özelliklerinin araştırılmasında kullanılan deneysel kurulum, veri toplama süreci ve analitik teknikler açıklanmaktadır. Deney düzeneği, kontrollü akım koşulları altında hassas hız ölçümlerine olanak tanıyan gelişmiş PIV teknolojisi ile donatılmış bir hidrolik kanalı kapsamaktadır.

Metodoloji, sistematik bir yaklaşımla, boşluk boyutu, akım dinamikleri ve türbülans özellikleri arasındaki etkileşimin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamayı ve böylece gelişmiş verimlilik ve güvenilirlik için hidrolik yapıların tasarımı ve işletimi hakkında bilgi vermeyi amaçlamaktadır.

#### **3.1 Deney Düzeneği**

Deney düzeneği, hidrolik kanal içindeki akım parametrelerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini ve ölçülmesini kolaylaştırmak için titizlikle hazırlanmıştır.

Boyutları 50 cm genişlik, 12 m uzunluk ve 50 cm derinlik olan yatay kanal (Şekil 3.1), plaka tabanlı savak yapılarıyla ilgili çeşitli akım koşullarını simüle etmek için geniş bir alan sağlarken son teknoloji ürünü bir PIV sistemi ile donatılan düzenek, hız dağılımlarını olağanüstü doğrulukla yakalamak için akışkan parçacıklarının yüksek çözünürlüklü görüntülenmesini sağlamıştır. (Şekil 3.2)



**Şekil 3.1** : Laboratuvar kanalı.



**Şekil 3.2** : Parçacık görüntülü hız ölçümü (PIV).

Plakalar arasındaki boşluğu değiştirebilmek için, biri silikon yapıştırıcı kullanılarak kanalın tabanına yapıştırılan ve diğeri cam macunu kullanılarak kolayca değiştirilebilen ve 2, 3 ve 4 mm'lik boşluk ayarlamalarına izin veren iki pleksiglas plaka kullanılmıştır. (Şekil 3.3) Ayrıca, sel rejimi ve değişen su seviyeleri elde edebilmek için bir adet 50x50 cm boyutlarında pleksiglas plaka kapak görevi görecektir şekilde kanal üzerine monte edilmiştir. (Şekil 3.3)



**Şekil 3.3 : Pleksiglas plakalar.**

Ek olarak, deney düzeneği akım ölçüm kabiliyetini artırmak için yardımcı araçlar içermektedir. Kanalın üzerine yerleştirilen milimetre (Şekil 3.4), manuel su seviyesi göstergesi olarak görev yaparak kanal içindeki su seviyelerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlamıştır. Bu milimetre, su seviyesi değişikliklerinin hassas bir şekilde ölçülmesine olanak tanıyacak şekilde stratejik olarak konumlandırılmış ve akım koşullarının doğru bir şekilde karakterize edilmesini sağlamıştır.



**Şekil 3.4 : Su seviyesi ölçümü için milimetre.**

Ayrıca, debiyi hesaplayabilmek için savak yükü ölçümü gerçekleştirilmiştir; Su seviyesi ölçümü için kullanılan milimetrenin bir benzeri kanalın sonunda yer alan ve dengeleme havuzuna monte edilmiş bir kutu içerisinde yer almaktadır. Bu mekanizma,

pompa her çalıştırıldığında su alacak şekilde dizayn edilmiştir. Savak yükünü belirlemek için, pompa kanalın içine dökülmesine izin verilmeyecek ancak havuzu tamamen dolduracak şekilde çalıştırılmıştır. Havuz tamamen dolduğunda cetvelin uç noktası suyun en üst seviyesine temas edecek şekilde ayarlanıp değer okunmuş ve bu referans noktası olarak not edilmiştir. Ardından pompa gücü istenen seviyeye ayarlanarak suyun kanala akmasına izin verilmiştir. Belirli bir süre beklenip stabil hale geldikten sonra, aynı şekilde cetvelin uç noktası suyun en üst seviyesine temas edecek şekilde ayarlanıp okuma gerçekleştirilmiştir ve okumalar arasındaki fark savak yükünü vermiştir. Elde edilen savak yükü üçgen savak formülünde kullanılarak debi elde edilmiştir.



**Şekil 3.5 :** Savak yükü ölçümü için milimetre.

Bu ölçümler, su seviyesi verileriyle birlikte debinin hesaplanmasını kolaylaştırmış ve deney düzeneğinin hidrolik özelliklerine ilişkin kapsamlı bilgiler sağlamıştır. PIV sistemi gibi gelişmiş cihazlarla tamamlanan bu manuel ölçümler, plaka tabanlı savak yapılarında sağlam deneyler yapılmasını ve akım dinamiklerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesini kolaylaştırmıştır.

### **3.2 PIVlab Yazılımı**

Yüksek hızlı kameraya sahip olan PIV, birbirini takip eden kareler boyunca su içindeki parçacıkların hareketini izleyerek hızları belirler.

PIV tarafından yakalanan hız verilerinin analizi, gelişmiş PIVlab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PIV analizi için özel olarak geliştirilen bu çok yönlü yazılım, deneysel verilerin işlenmesi ve yorumlanması için kapsamlı bir araç paketi sağlamıştır.

Çekilen görüntülerin PIVlab'e aktarılmasının ardından yazılım, akım alanı içindeki tek tek partiküllerin tanımlanmasını ve izlenmesini kolaylaştırarak hız vektörlerinin hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamaktadır. PIVlab'de uygulanan gelişmiş algoritmalar, ardışık görüntü kareleri arasında parçacık yer değiştirmesinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayarak yüksek oranda çözümlenmiş hız alanları elde edilmesini sağlamaktadır.

Ayrıca PIVlab, hız verilerinden yapaylıkları gidermek için filtreleme teknikleri de dahil olmak üzere bir dizi işlem sonrası yetenek sunarak sonuçların doğruluğunu artırırken ek olarak, yazılım hız vektör alanlarının ve akım çizgisi çizimlerinin görselleştirilmesini sağlayarak akım modellerinin ve türbülans yapılarının nitel analizine yardımcı olmaktadır.

Ayrıca, deney düzeneği, veri toplama sırasında dış müdahaleyi en aza indirecek şekilde kurulmuştur. Deneyler, ortam ışığının PIV ölçümleri üzerindeki etkilerini azaltmak için gün batımından sonra düşük ışık koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu, optimum görüntü kalitesini sağlamış ve potansiyel hata kaynaklarını en aza indirerek akım dinamiklerinin daha doğru analiz edilmesine olanak tanımıştır.

Standart işlemlere ek olarak, analiz sürecini deneysel çalışmanın özel gereksinimlerine göre uyarlamak için PIVlab içinde özel komut dosyaları ve eklentiler kullanılmıştır. Bu özelleştirmeler, veri işlemenin verimliliğini ve doğruluğunu artırarak plaka tabanlı savak yapıları içindeki akım özelliklerinin daha derinlemesine incelenmesini sağlamıştır.

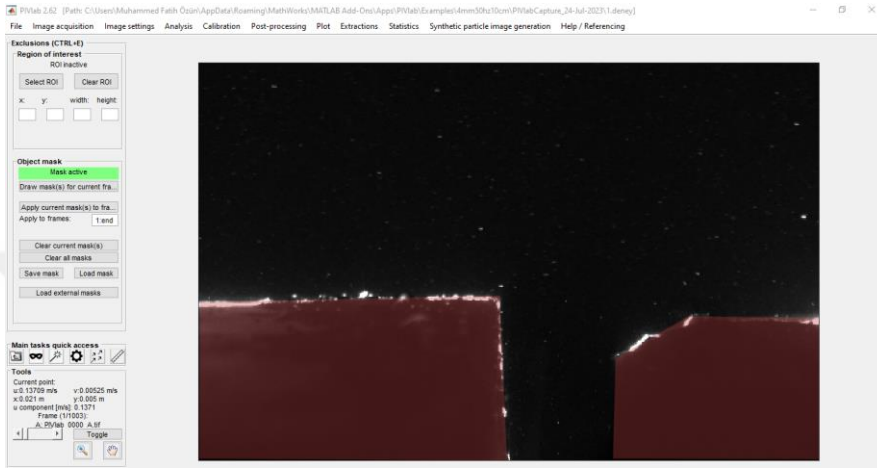
Genel olarak, PIVlab yazılımının deneysel iş akışına entegrasyonu, akım davranışı ve türbülans dinamikleri hakkında içgörülerin elde edilmesini kolaylaştırmış ve incelenen sistemdeki hidrolik süreçlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmuştur.

### **3.3 Veri Toplama Süreci**

Veri toplama süreci, Matlab'daki PIVlab yazılımını kullanarak PIV kamera tarafından yakalanan görüntüleri analiz etmek için bir dizi adımı içermektedir. Her adım, hız ölçümlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için dikkatle yürütülmüştür.

### 3.3.1 Görüntü yükleme ve hazırlama

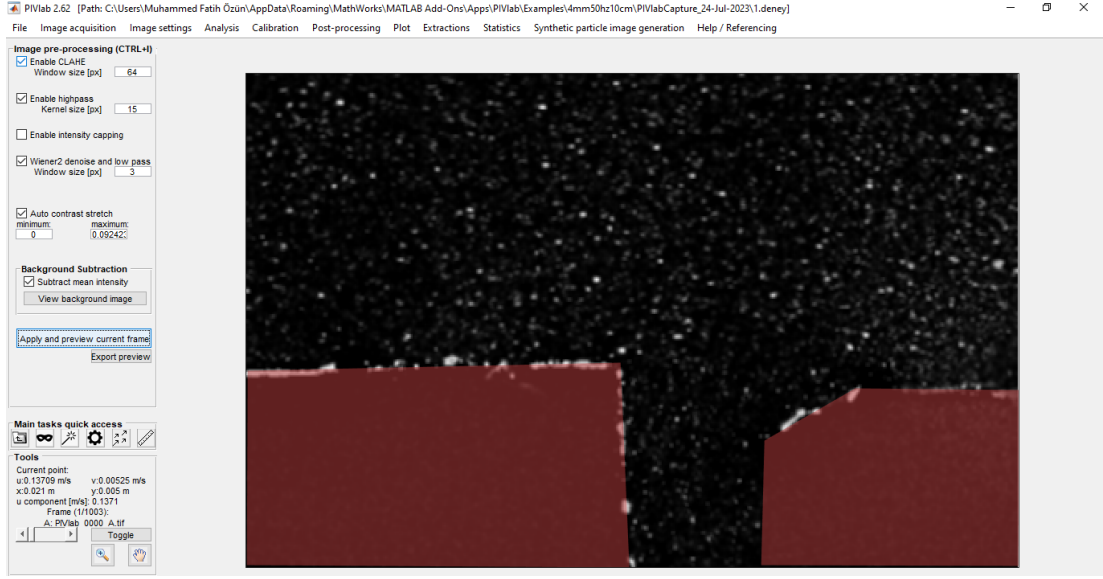
İlk adım, PIV kamera tarafından yakalanan görüntülerin her bir boşluk açıklığı için ayrı ayrı PIVlab yazılımına yüklenmesidir. Bu görüntüler analiz için yazılıma aktarılıp, doğru analizi kolaylaştırmak için, her görüntüdeki su yüzeyini tanımlamak üzere bir maske çizilmiş ve hız hesaplaması sırasında yalnızca ilgili alanların dikkate alınması sağlanmıştır. (Şekil 3.6)



Şekil 3.6 : Maskeleme.

### 3.3.2 Görüntü ön işleme

Analiz öncesinde görüntüler, kalitelerini artırmak ve hız ölçümlerinin doğruluğunu iyileştirmek için ön işleme adımlarından geçirilmiştir. Kontrast Sınırlı Adaptif Histogram Eşitleme (CLAHE), yüksek geçişli filtreleme, otomatik kontrast germe ve arka plan çıkarma dahil olmak üzere çeşitli teknikler uygulanmıştır. CLAHE görüntü kontrastını artırırken, yüksek geçişli filtreleme düşük frekanslı gürültüyü ortadan kaldırmıştır. Otomatik kontrast germe, görüntü kontrast seviyelerini ayarlar ve arka plan çıkarma statik bileşenleri ortadan kaldırarak görüntüleri sonraki analizler için optimize etmektedir.



Şekil 3.7 : Görüntü ön işleme.

### 3.3.3 PIV ayarları

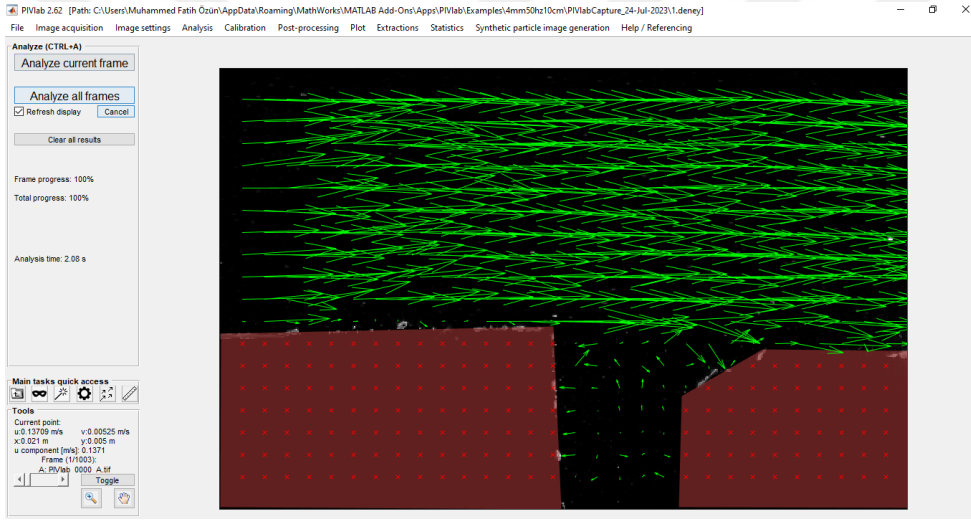
PIVlab yazılımı, görüntüleri analiz etmek ve 2D'deki hız bileşenlerini belirlemek için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) algoritmasını kullanmaktadır. Bu algoritma, görüntü çiftleri arasındaki piksel yoğunluk dağılımlarını karşılaştırmış ve hız vektörleri oluşturmak için piksel yer değiştirmelerini hesaplamıştır. Analiz, gürültü ve diğer faktörlerin neden olduğu hataları en aza indirmek için aşırı ve standart korelasyon sağlamlığı ayarları arasında ayarlama yapılarak FFT algoritmasının üç geçişiyle gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, hız ölçümlerini daha da iyileştirmek için alt piksel tahmincisi olarak bir Gauss 2x3-nokta algoritması kullanılmıştır.



Şekil 3.8 : PIV ayarları.

### 3.3.4 Kalibrasyon ve işlem sonrası

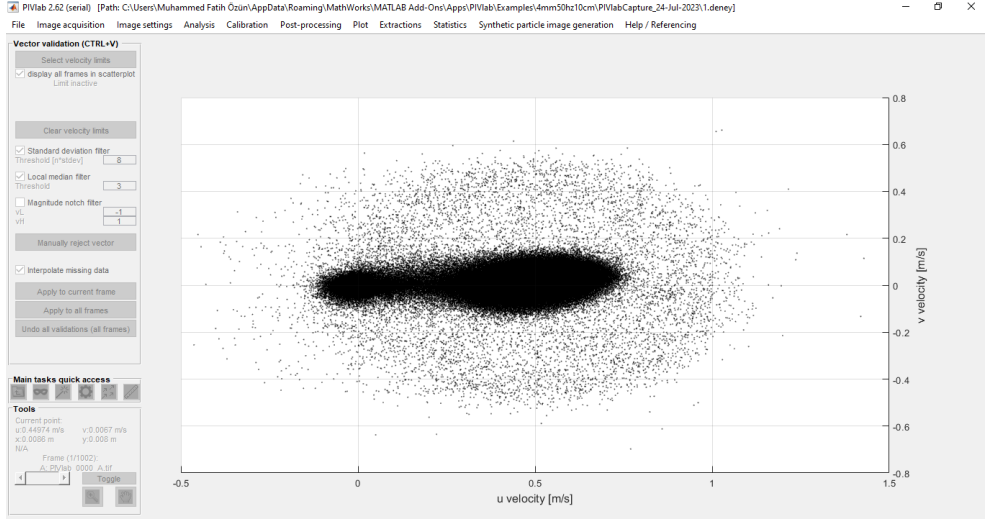
Görüntü analizinin ardından, hız ölçümlerinin doğruluğunu sağlamak için bir kalibrasyon adımı gerçekleştirilmiştir. Bir kalibrasyon görüntüsü yüklenmiş ve PIV sistemi tarafından sağlanan gerçek mesafe ve zaman adımının girilmesine izin veren bir referans uzunluk seçilmiştir. (Şekil 3.10) Bu kalibrasyonlar, hız değerlerinin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak için analiz edilen verilere uygulanmıştır. Daha sonra, sonuçları iyileştirmek ve doğruluğu artırmak için hız sınırlarının belirlenmesi de dahil olmak üzere verilere işlem sonrası adımlar uygulanmıştır. (Şekil 3.11) Son olarak, işlenen veriler daha fazla analiz için MATLAB çalışma alanına aktarılıp, ilgili değerleri çıkarmak ve kapsamlı veri analizi ve yorumlaması için Excel'e aktarmak üzere uygun kodlar yazılmıştır.



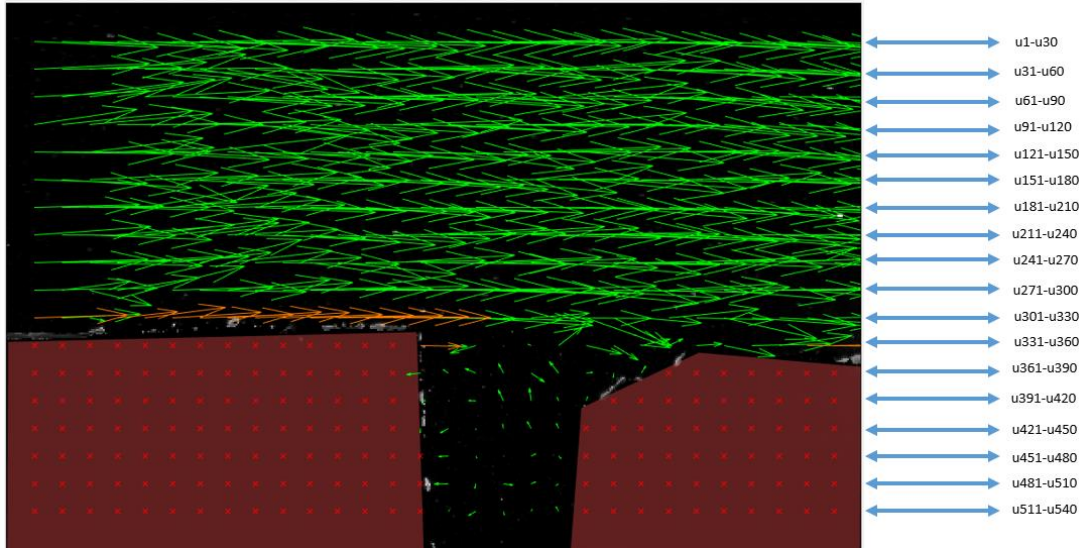
Şekil 3.9 : Kalibrasyon ve işlem öncesi hız vektörleri.



Şekil 3.10 : Kalibrasyon.



Şekil 3.11 : Post-processing (İşlem sonrası).



Şekil 3.12 : Kalibrasyon ve işlem sonrası hız vektörleri.

Görüntü yükleme ve hazırlamadan kalibrasyon ve son işlemeye kadar veri toplama sürecinin her adımını titizlikle yürüten çalışma, PIV ölçümlerinden elde edilen hız verilerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamıştır. Bu veriler, akım dinamiklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunarak daha fazla analiz ve yorumlama için temel oluşturmuştur.

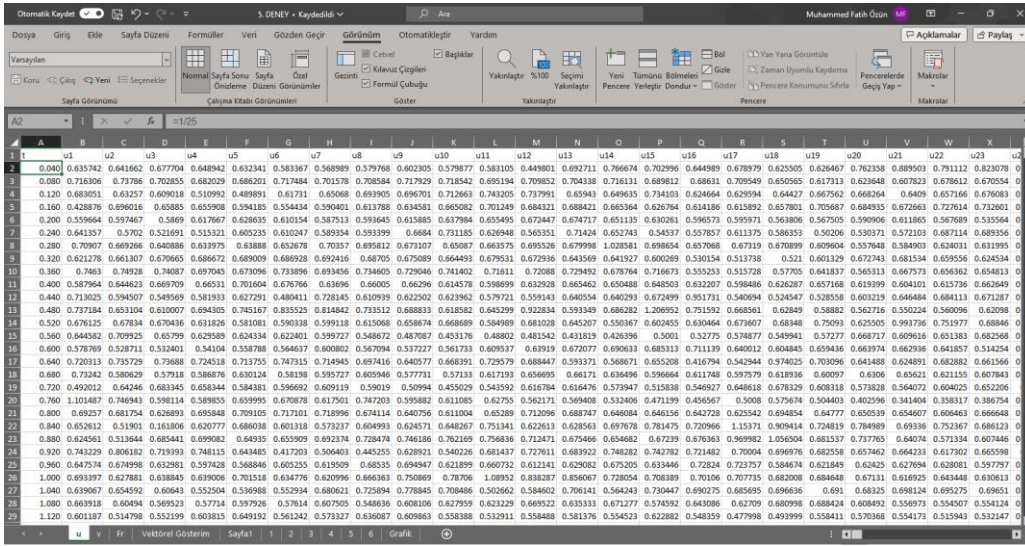
### 3.4 Analitik Araçlar: Veri Analiz Teknikleri

Çalışmanın analitik aşaması, PIV ölçümlerinden elde edilen hız bileşenlerine gelişmiş veri analizi tekniklerinin uygulanmasını içeriyordu. Özel kodlardan ve Excel'den

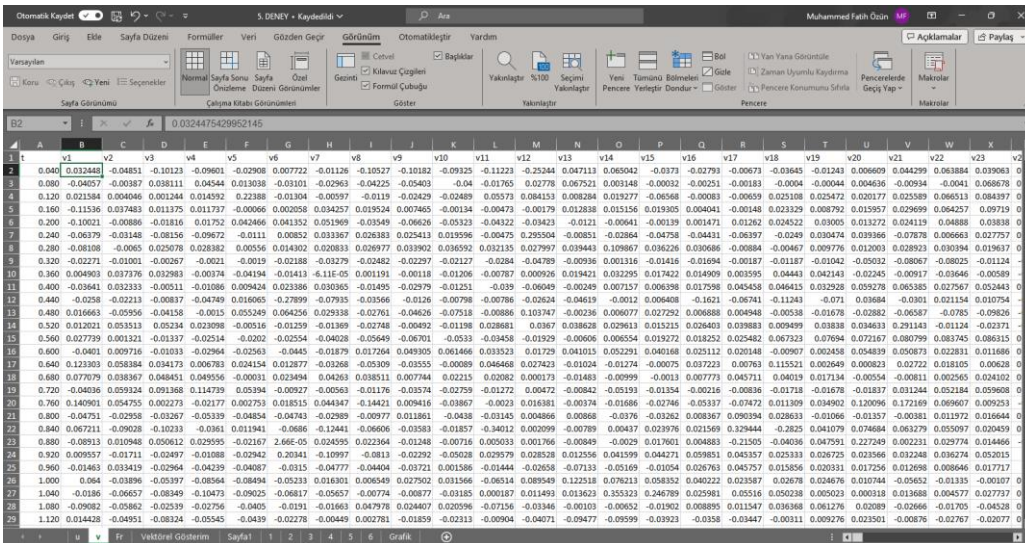
yararlanılarak hız verileri işlenmiş ve özelliklerine ilişkin anlamlı bilgiler elde etmek için analiz edilmiştir.

### 3.4.1 Veri organizasyonu ve zaman serisi oluşturma

MATLAB çalışma alanına aktarıldıktan sonra, hız bileşenleri (Şekil 3.13 ve 3.14) özel kod kullanılarak matrisler halinde düzenlendi ve daha sonra daha fazla analiz için Excel'e aktarıldı. Excel'de, hız bileşenleri 0 saniyeden başlayarak ve PIV çerçevelerinin frekansına karşılık gelen sabit bir değerle artarak zaman serileri halinde düzenlenmiştir. ( $1/15 \text{ Hz} = 0.067 \text{ frekans}$ ,  $1/25 \text{ Hz} = 0.04 \text{ frekans}$  ve  $1/50 \text{ Hz} = 0.02 \text{ frekans}$ ) Bu işlem, farklı boşluk açıklıklarına karşılık gelen PIV çerçevelerindeki belirli noktalar için hız-zaman serilerinin oluşturulmasını kolaylaştırmıştır.



Şekil 3.13 : Örnek taban yakınında u hızı bileşenleri.



Şekil 3.14 : Örnek taban yakınında v hızı bileşenleri.

### 3.4.2 Analiz ve RMS hesaplaması

Akım alanındaki hız dalgalanmalarını değerlendirmek için, hız vektörlerini içeren PIV görüntüleri boyunca dikey kesitler indirilmiştir. (Şekil 3.15) Bu kesitler, boşluğun hem içindeki hem de dışındaki hız vektörlerini içerecek şekilde stratejik olarak konumlandırılmış ve akım bölgesinin kapsamlı bir şekilde kapsanması sağlanmıştır. Kesit içerisinde yer alan her bir  $u$  ve  $v$  hızı için RMS değerleri, Naudascher'in anlık hız bileşenlerini ve bunların dalgalanmalarını dikkate alan formülü kullanılarak bağımsız olarak hesaplanmıştır. Bu analiz, akım alanındaki hız dalgalanmalarının ve türbülansın yoğunluğu hakkında bilgiler sağlamıştır.

$u_i$  ve  $v_i$ : Anlık Hız

$\bar{u}$  ve  $\bar{v}$ : Hızların Ortalama Değerleri

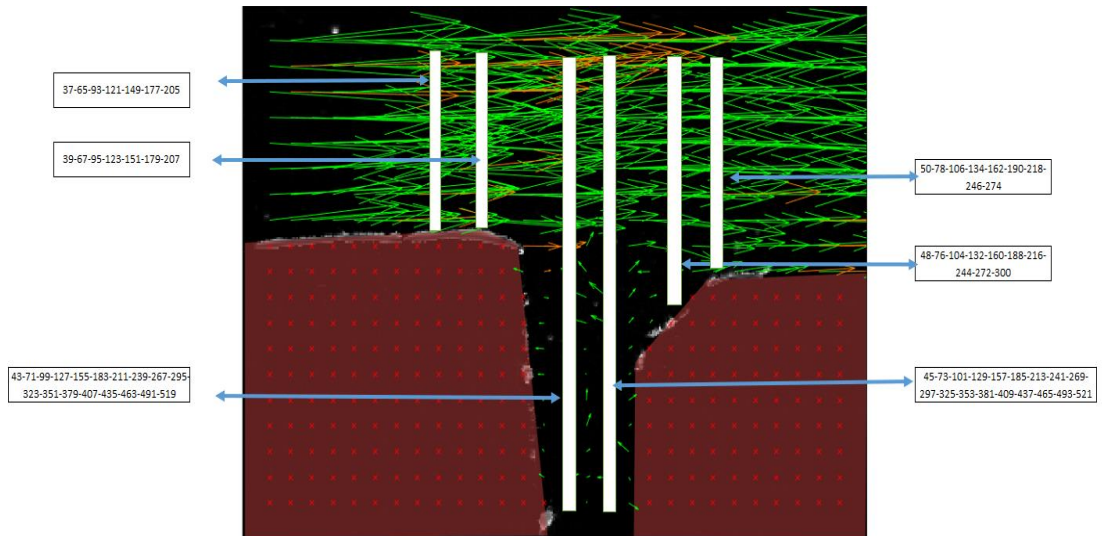
$u'$  ve  $v'$ : Çalkantı Bileşenleri

$$u' = \bar{u} - u_i \quad (3.1)$$

$$u'_{RMS} = \sqrt{u'^2} \quad (3.2)$$

$$v' = \bar{v} - v_i \quad (3.3)$$

$$v'_{RMS} = \sqrt{v'^2} \quad (3.4)$$



Şekil 3.15 : Örnek çizilen kesitler.

t	$u_{37}$	$\bar{u}$ m/s	$u'$	$u'^2$	$\sqrt{\overline{u'^2}}$ m/s
0.040	0.56367	0.621931	0.05826	0.003394	0.097742248
0.080	0.63935		-0.01741	0.000303	
0.120	0.59998		0.02195	0.000482	
0.160	0.66306		-0.04113	0.001691	
0.200	0.57906		0.04287	0.001838	
0.240	0.60372		0.01821	0.000332	
0.280	0.67327		-0.05134	0.002636	
0.320	0.69633		-0.07440	0.005535	
0.360	0.71033		-0.08840	0.007814	
0.400	0.66053		-0.03860	0.00149	
0.440	0.59354		0.02839	0.000806	
0.480	0.51776		0.10417	0.010851	
0.520	0.67203		-0.05010	0.00251	
0.560	0.50805		0.11388	0.012969	
0.600	0.57173		0.05020	0.00252	
0.640	0.63567		-0.01374	0.000189	
0.680	0.59985		0.02208	0.000487	
0.720	0.53977		0.08216	0.00675	
0.760	0.54925		0.07268	0.005283	
0.800	0.61284		0.00909	8.26E-05	
0.840	0.65771		-0.03578	0.00128	
0.880	0.71554		-0.09361	0.008763	
0.920	0.65540		-0.03347	0.001121	
0.960	0.63039		-0.00846	7.15E-05	
1.000	0.68682		-0.06489	0.004211	
1.040	0.68858		-0.06665	0.004443	
1.080	0.55651		0.06542	0.00428	
1.120	0.58262		0.03931	0.001546	

Şekil 3.16 : Örnek  $u_{37}$  çalkantı bileşeni ve RMS değeri.

### 3.4.3 Zamansal ortalama hız

Ortalama akım davranışını karakterize etmek için zamansal ortalama hız bileşenleri, ( $\langle \bar{u}' \rangle$ ,  $\langle \bar{v}' \rangle$ ) hesaplanmıştır. Zamansal ortalama, akım analizinde temel bir tekniktir ve kararlı durum akım koşullarının bir temsilini sağlar. Anlık hız dalgalanmalarının zaman içinde ortalamasının alınmasıyla elde edilen zamansal ortalama hız, baskın akım modellerini yansıtır ve teorik tahminler veya ampirik modellerle karşılaştırma yapılmasını sağlar. Ayrıca, farklı yönlerdeki hız dalgalanmaları arasındaki etkileşimi anlamak için hız dalgalanmalarının çarpımı ( $\langle \bar{u}'v' \rangle$ ) analiz edilmiştir. Bu parametreler, türbülansın mekânsal dağılımı ve incelenen sistemdeki akım dinamikleri üzerindeki etkisi hakkında bilgi sağlamıştır.

### 3.4.4 Froude sayısı

Akım rejimini karakterize etmek için kullanılan boyutsuz bir parametre olan Froude (Fr) sayısı, akımın hidrolik davranışını değerlendirmek için hesaplanmıştır. Fr sayısı, akım hızının yerçekimi ivmesinin karekökünün akım derinliği ile çarpımına oranı olarak tanımlanır.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (3.5)$$

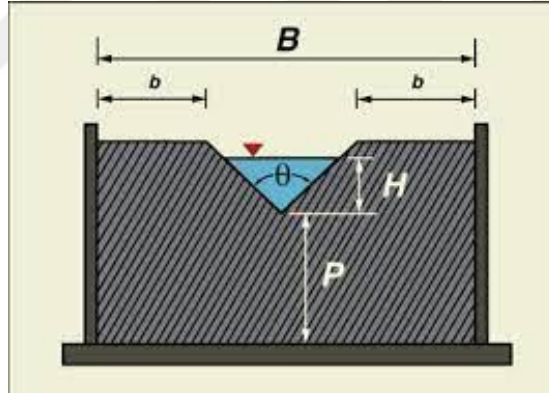
#### 3.4.4.1 Hız hesabı

Akım hızı, debi ve kanalın bilinen kesit alanından (Kanal genişliği x Su seviyesi) bulunmaktadır.

$$Q = V * A \quad (3.6)$$

##### 3.4.4.1.1 Debi hesabı

Bu çalışmada debi (Q), debi, savak geometrisi ve su seviyesi arasındaki ilişkiyi hesaba katan hidrolikteki üçgen savak formülü kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3.17 : Üçgen savak şematığı. [1]

$$Q = \frac{8}{15} * C_d * \sqrt{2g} * \tan \frac{\theta}{2} * h^{5/2} \quad (3.7)$$

*Q*: Debi ( $m^3/sn$ )

*θ*: Savak Açısı ( $90^\circ$ )

*h*: Savak yükü (m)

*C<sub>d</sub>*: Debi Katsayısı (boyutsuz)

Debiyi elde etmek için ilk olarak savaktan geçen akımın verimliliğini temsil eden boyutsuz bir parametre olan debi katsayısı hesaplanmıştır. Debi katsayısı için aşağıdaki formüller kullanılmış olup çıkan değerlerin ortalaması alınarak her bir deney için tek değer kabulü yapılmıştır. (P=46,75 cm)

$$\text{Thomson (1858)} : C_d = 0.593 \quad (3.8)$$

$$\text{Strickland (1910)} : C_d = 0.566 + \frac{0.0157}{\sqrt{h}} \quad (3.9)$$

$$\text{King (1954)} : C_d = \frac{0.589}{h^{0.03}} \quad (3.10)$$

$$\text{Govinda and Muralidhar (1963 – 64)} : C_d = 0.5619 + 0.000652 * P \quad (3.11)$$

Bu analitik teknikler kullanılarak, çalışma plaka tabanlı savak yapılarındaki akım dinamikleri ve türbülans özellikleri hakkında kapsamlı bir anlayış kazanmıştır. Bu analizden elde edilen bilgiler, karmaşık hidrolik süreçlerin aydınlatılmasına katkıda bulunmuş ve hidrolik yapıların tasarımı ve optimizasyonu için bilgiler sağlamıştır.

### 3.4.5 Kayma gerilmesi hızı hesabı

Kayma hızı, akışkanlar mekaniğinde, özellikle açık kanal akımları ve sınır tabaka çalışmaları bağlamında temel bir parametredir. Akışkan parçacıklarının, akımın uyguladığı kayma gerilimi nedeniyle nehir veya kanal yatağı gibi katı bir sınır boyunca hareket ettiği hızı temsil eder.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{\frac{-\rho * \overline{u' * v'}}{\rho}} = \sqrt{\overline{u' * v'}} \quad (3.12)$$

$u_*$ : kayma hızıdır,

$\tau$ : sınır üzerinde akım tarafından uygulanan kayma gerilmesidir,

$\rho$ : akışkanın yoğunluğudur.

Kayma hızı, yatak kayma gerilmesi, sınır tabaka kalınlığı ve sediment taşıma oranları gibi çeşitli hidrolik parametrelerin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Hidrolik mühendisliğinde kanalların, nehirlerin ve kıyı yapılarının analizi ve tasarımı için ve ayrıca tortu taşınımı ve erozyonla ilgili çevresel çalışmalarda sıklıkla kullanılır. Kayma hızını anlamak, akım davranışını tahmin etmek ve hidrolik sistemlerin stabilitesini ve performansını değerlendirmek için gereklidir.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

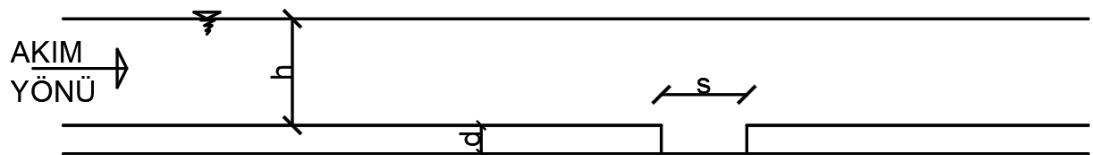
### 4.1 Bulgular

Çizelge 4.1 : Test Matrisi

Deney Numarası	Akım Rejimi	Fr	s (mm)	h (cm)	s/d	s/h	V (m/sn)	Q (m <sup>3</sup> /sn)	q (m <sup>3</sup> /sn-m)
1	Nehir	0,70	2	5,40	0,2	0,037	0,507	0,014	0,028
2	Nehir	0,57	2	12,00	0,2	0,017	0,623	0,037	0,074
3	Nehir	0,70	2	3,00	0,2	0,067	0,381	0,006	0,012
4	Nehir	0,18	2	7,50	0,2	0,027	0,152	0,006	0,012
5	Nehir	0,71	3	6,30	0,3	0,048	0,559	0,018	0,036
6	Nehir	0,67	3	11,40	0,3	0,026	0,705	0,040	0,080
7	Nehir	0,68	3	3,10	0,3	0,097	0,377	0,006	0,012
8	Nehir	0,70	4	6,20	0,4	0,065	0,544	0,017	0,034
9	Nehir	0,66	4	9,50	0,4	0,042	0,640	0,030	0,060
10	Nehir	0,65	4	11,20	0,4	0,036	0,682	0,038	0,076
11	Sel	1,17	2	4,90	0,2	0,041	0,814	0,020	0,040
12	Sel	1,17	2	4,90	0,2	0,041	0,814	0,020	0,040
13	Sel	1,43	3	3,30	0,3	0,091	0,816	0,013	0,026
14	Sel	2,16	3	2,70	0,3	0,111	1,111	0,015	0,030
15	Sel	2,16	4	2,70	0,4	0,148	1,111	0,015	0,030

Bu tabloda yer alan;

- q: Birim genişlik debisini,
- V: Kesitsel ortalama hızı,
- s: Boşluk aralığı,
- h: su yüksekliğini,
- d: Plak kalınlığını ifade etmektedir.



Şekil 4.1 : 2D kanal şematığı.

Bu yüksek lisans tezi, plaka tabanlı savak yapılarında türbülans etkileri ve yapısal stabilite arasındaki karmaşık etkileşimin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına ışık tutmaktadır. Titiz incelemeler ve PIV gibi gelişmiş ölçüm teknikleri sayesinde bu araştırma, bu hidrolik sistemleri yöneten karmaşık dinamikler hakkında bilgiler sağlamıştır.

Tez, plaka tabanlı savak yapılarında plakalar arasındaki boşluk boyunca hız dağılımının kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Plakalar arasındaki boşluk etrafındaki hız dağılımının incelenmesi, plaka tabanlı savak yapılarının akım dinamiklerinin ve yapısal stabilitesinin anlaşılmasında büyük önem taşımaktadır. Boşluk bölgesi, akım koşullarının serbest yüzey akımından sınırlı akıma geçtiği, karmaşık hız gradyanlarına ve türbülans yoğunluklarına yol açan kritik bir arayüz görevi görür. Bu bölgedeki hız profillerini karakterize ederek, akım davranışı, sınır tabaka gelişimi ve akışkan partikülleri ile savak yüzeyleri arasındaki etkileşim hakkında önemli bilgiler elde ediyoruz. Bu deneylerin, yüzey özelliklerinin akım dinamikleri ve türbülans modelleri üzerindeki etkisini vurgulayan pürüzlü bir yatak yerine pürüzsüz bir yatak koşulları altında gerçekleştirildiğini vurgulamak önemlidir. Boşluk etrafındaki hız dağılımının inceliklerini anlamak, akım verimliliğini artırmak ve türbülans kaynaklı kararsızlık riskini en aza indirmek için boşluk geometrisi ve boşluk gibi savak tasarım parametrelerini optimize etmek için gereklidir. Deneyler ve analizler sayesinde, bu hidrolik sistemleri yöneten karmaşık akım dinamikleri hakkında önemli bilgiler edinilmiştir.

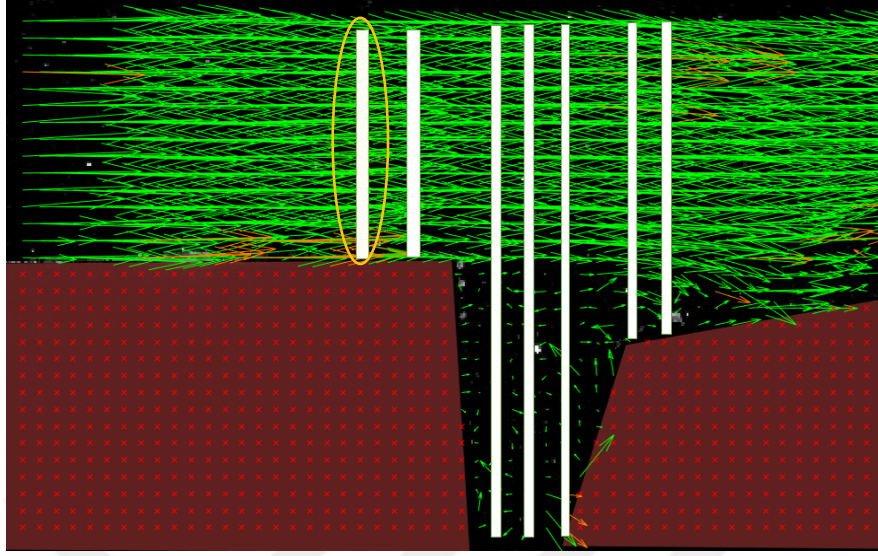
Tezin merkezinde, plaka tabanlı savak yapılarının stabilitesi ve performansı üzerindeki türbülans etkilerinin araştırılması yer almaktadır. Son teknoloji PIV ölçümlerinin kullanıldığı çalışmada, plakalar arasındaki boşluk boyunca hız dağılımı modelleri incelenmektedir. Araştırma, bu boşlukların hız modelleri ve dolayısıyla savağın genel yapısal bütünlüğü üzerindeki etkisini tespit etmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, Kök Ortalama Kare (RMS) türbülans değerlerinin analizi, akım davranışını ve bunun savak stabilitesi üzerindeki etkilerini anlamak için gerekli olan türbülans dinamikleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

#### **4.1.1 Nehir rejimine ait grafikler**

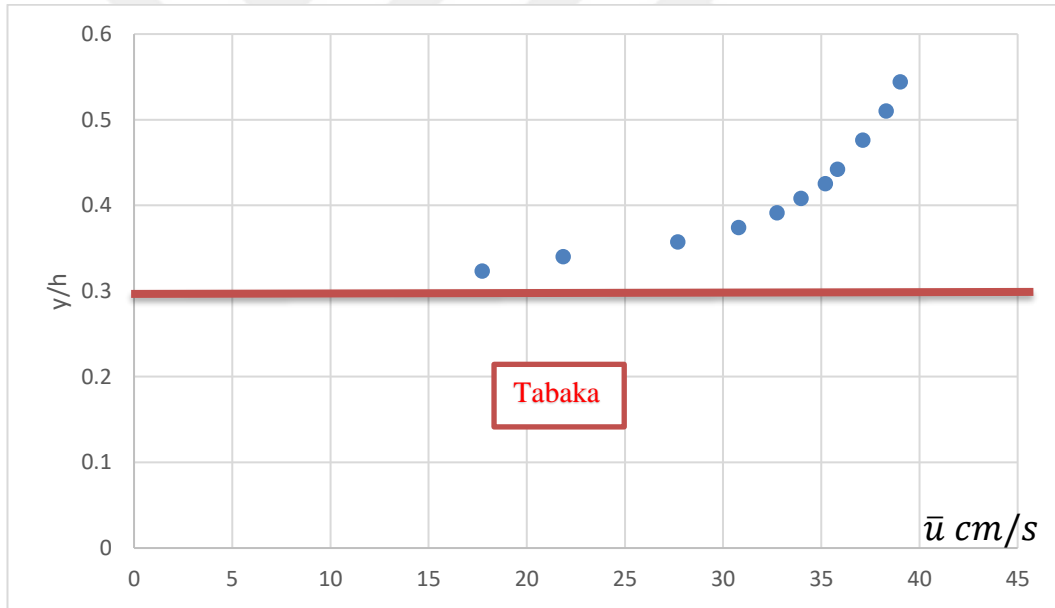
Nehir rejimine ait aşağıda belirtilen grafiklerde boşluk aralığı ( $s$ ) 3 mm ve Froude sayısı ( $Fr$ ) 0.683 olan 7. Deney örnekleme olarak kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılan grafiklerdeki mavi veri noktaları yapılan laboratuvar deney sonuçlarına karşılık

gelirken, turuncu veri noktaları Nezu ve Nakagawa'ya ait deney bulgularını temsil etmektedir.

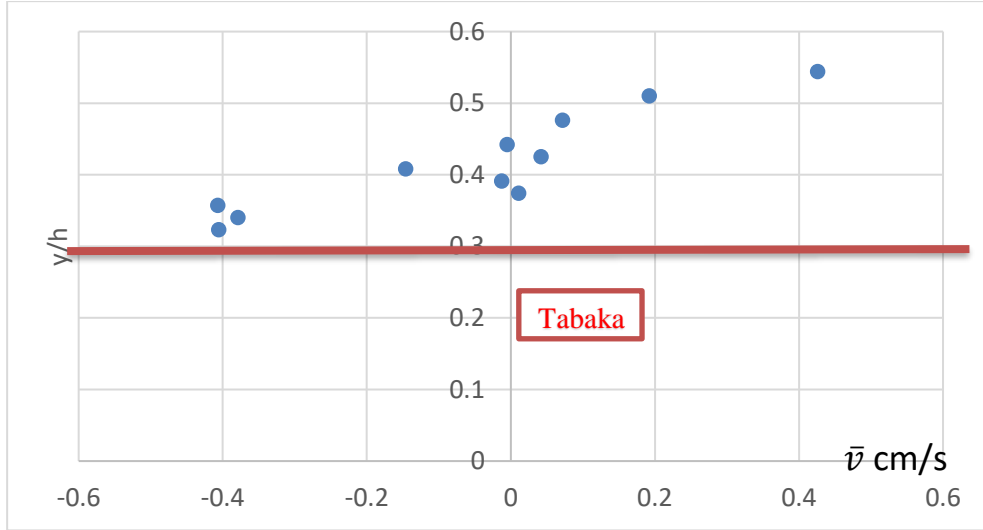
A



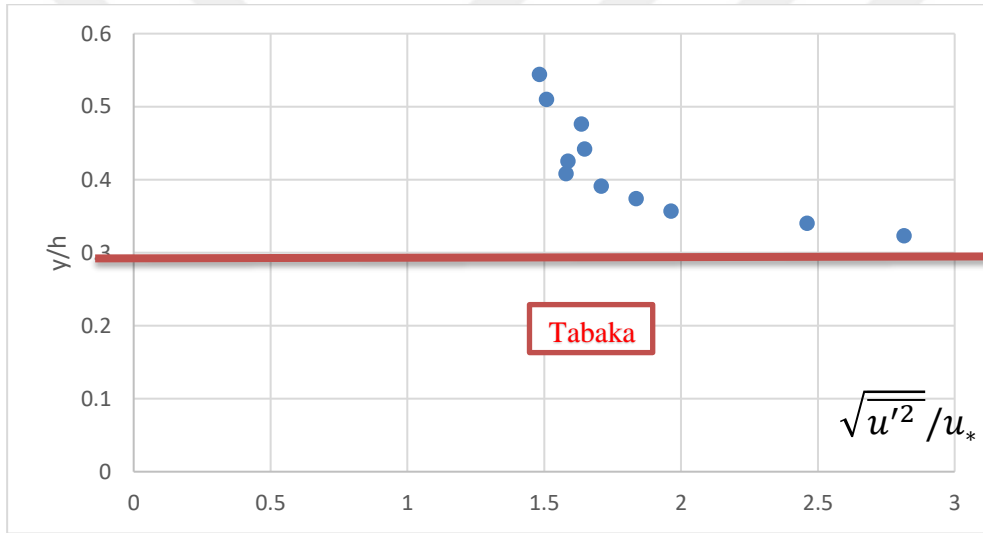
Şekil 4.2 : 7. deney hız vektörleri.



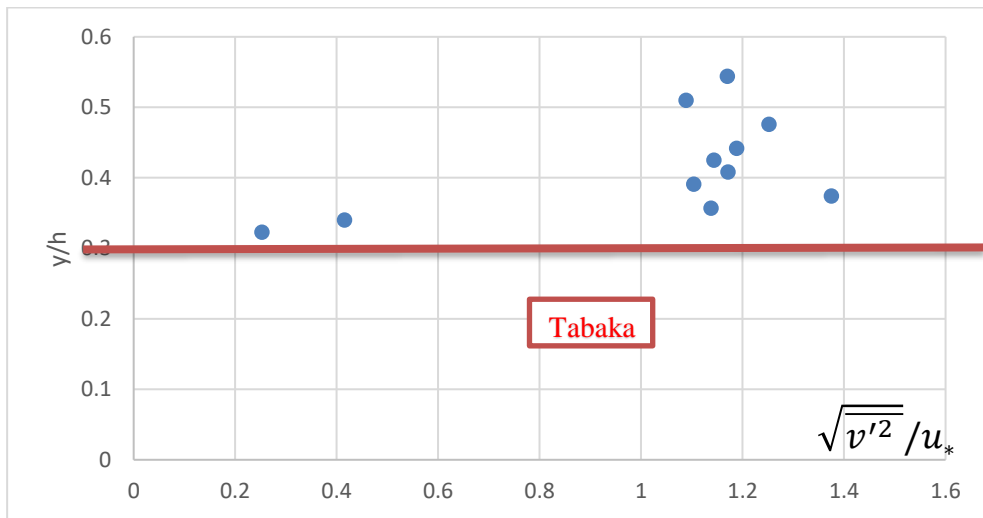
Şekil 4.3 :  $u_{ort}$  grafiği (A kesiti).



Şekil 4.4 :  $v_{ort}$  grafiği (A kesiti).



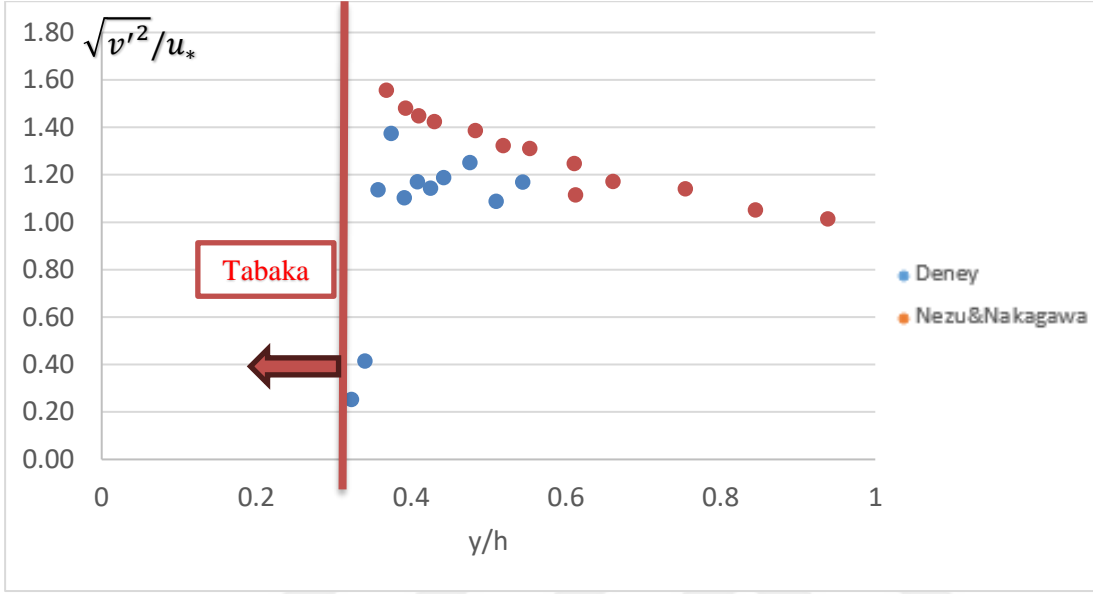
Şekil 4.5 :  $u'_{RMS}$  grafiği (A kesiti).



Şekil 4.6 :  $v'_{RMS}$  grafiği (A kesiti).

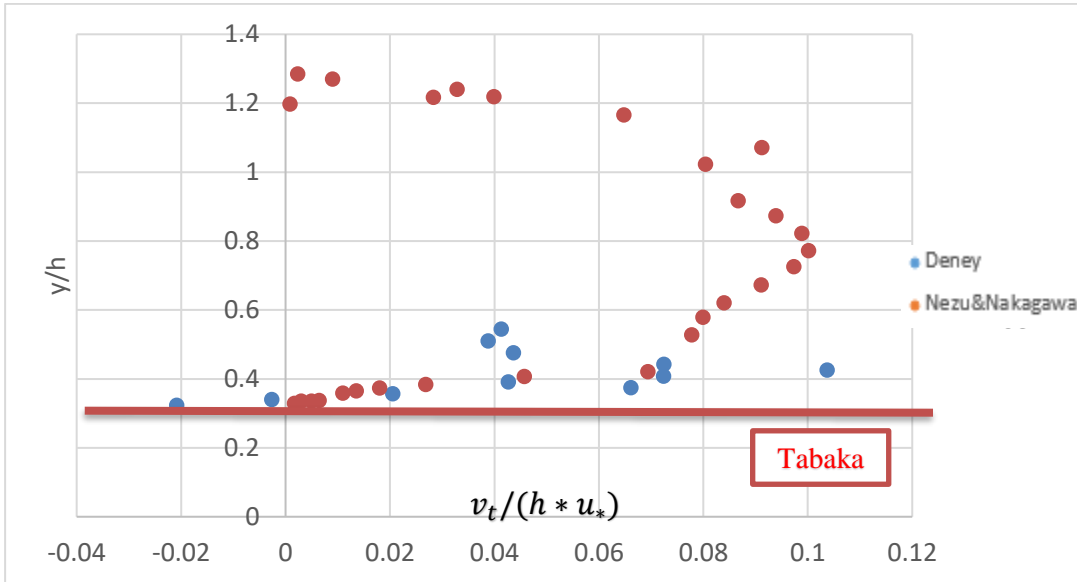


Dikey yöndeki hız profillerinin dikkate alınması, plakanın yer değiştirme riskini en aza indirmek için gereken optimum açıklığın belirlenmesinde çok önemlidir. Hız dağılımlarını ve türbülans etkilerini kapsamlı bir şekilde inceleyen bu araştırma, güvenliği ve uzun vadeli performansı artırmaya odaklanarak savak tasarımı ve inşasında bilinçli karar verme için zemin hazırlamaktadır.



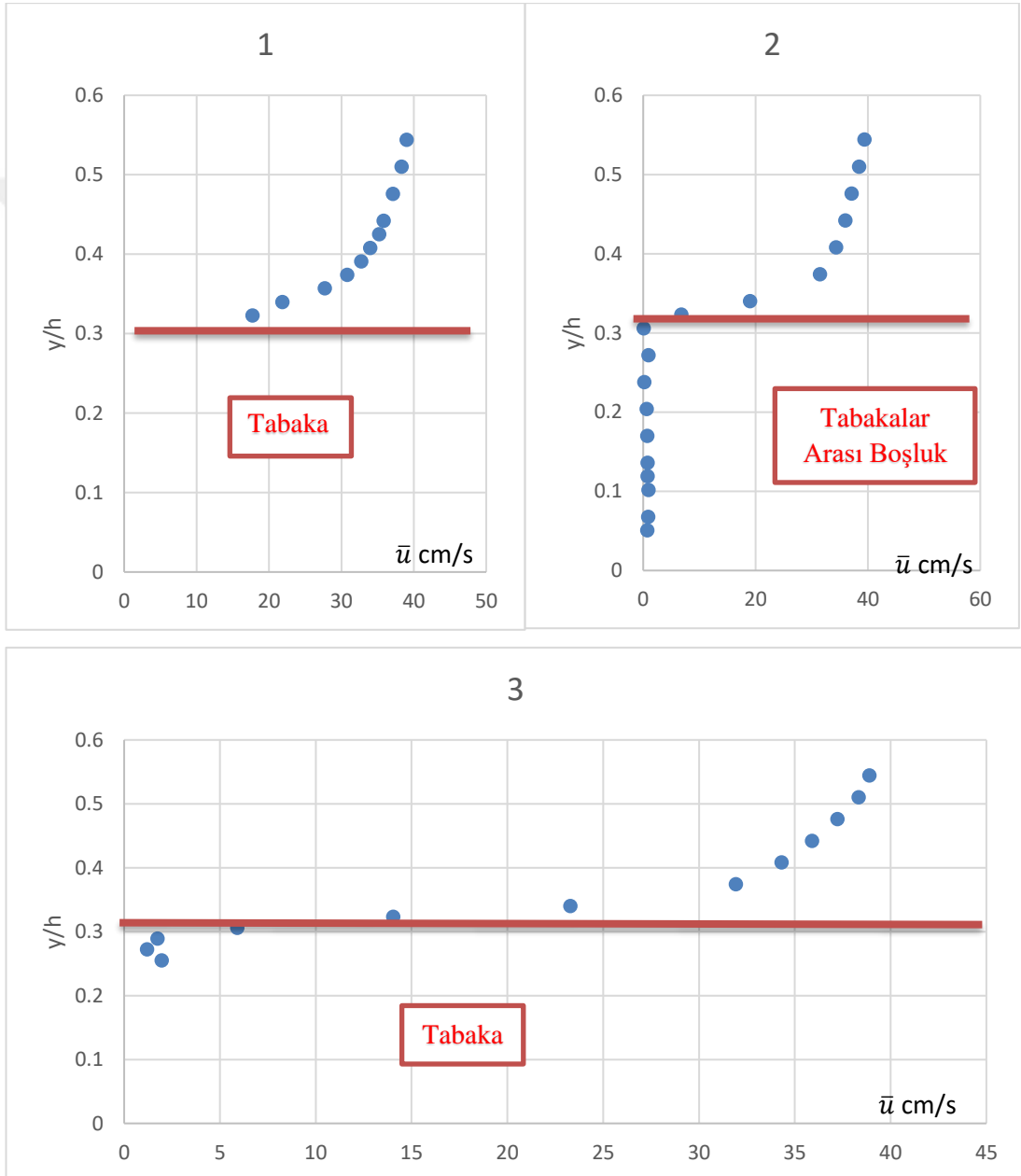
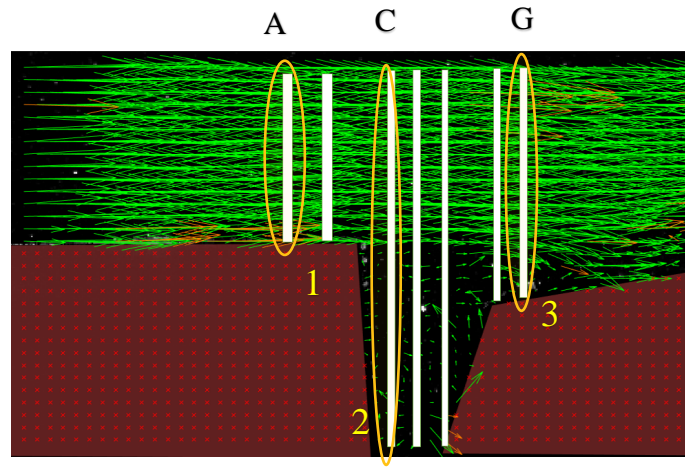
Şekil 4.9 :  $v'_{RMS}$  sonuçları karşılaştırılması (A kesiti).

Turuncu veriler,  $w'$  türbülans bileşenine ait kritik altı ile kritik üstü akımlar arasında değişen Froude sayıları ( $Fr=0.46-3.12$ ) için geçerlidir. (Nezu ve Nakagawa, 1993)

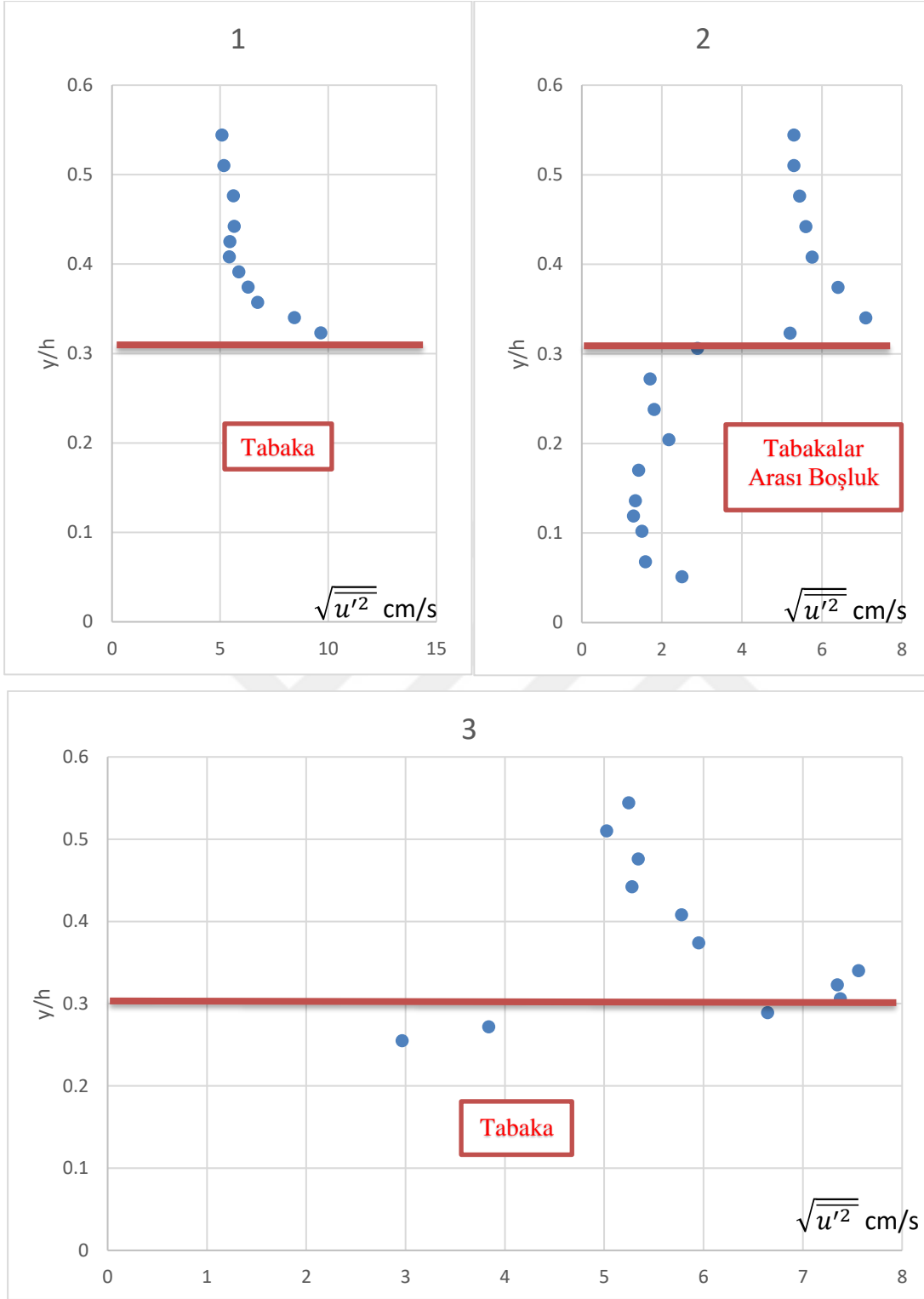


Şekil 4.10 : Eddy viskozitesi sonuçları karşılaştırılması (A kesiti).

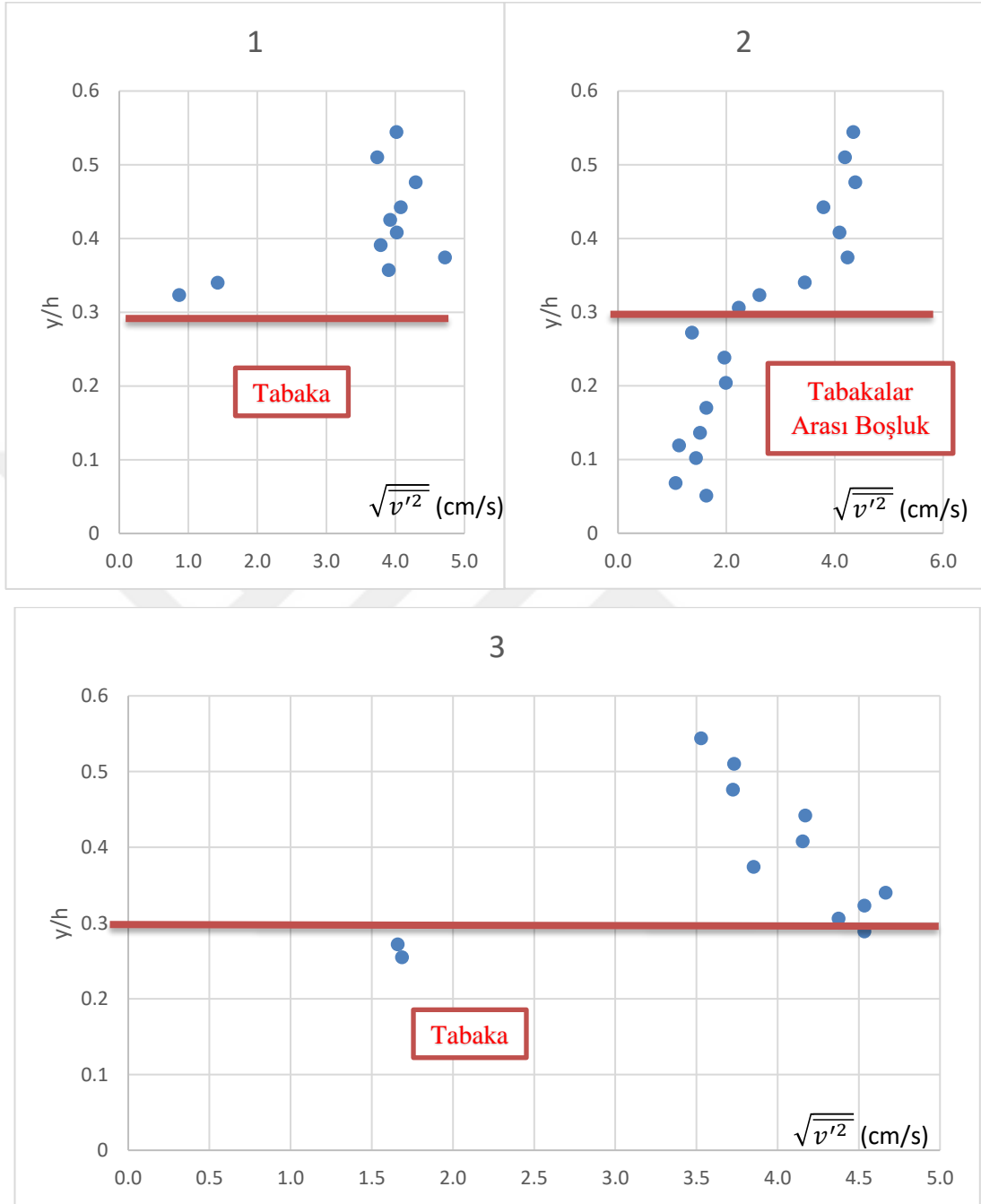
Turuncu veriler, açık kanal verileri ile kapalı kanal verilerini karşılaştıran eddy viskozitesi dağılımını ifade etmektedir. (Nezu ve Nakagawa, 1993)



Şekil 4.11 : 7. Deneye ait ortalama akım hızları (A, C, G kesitleri).



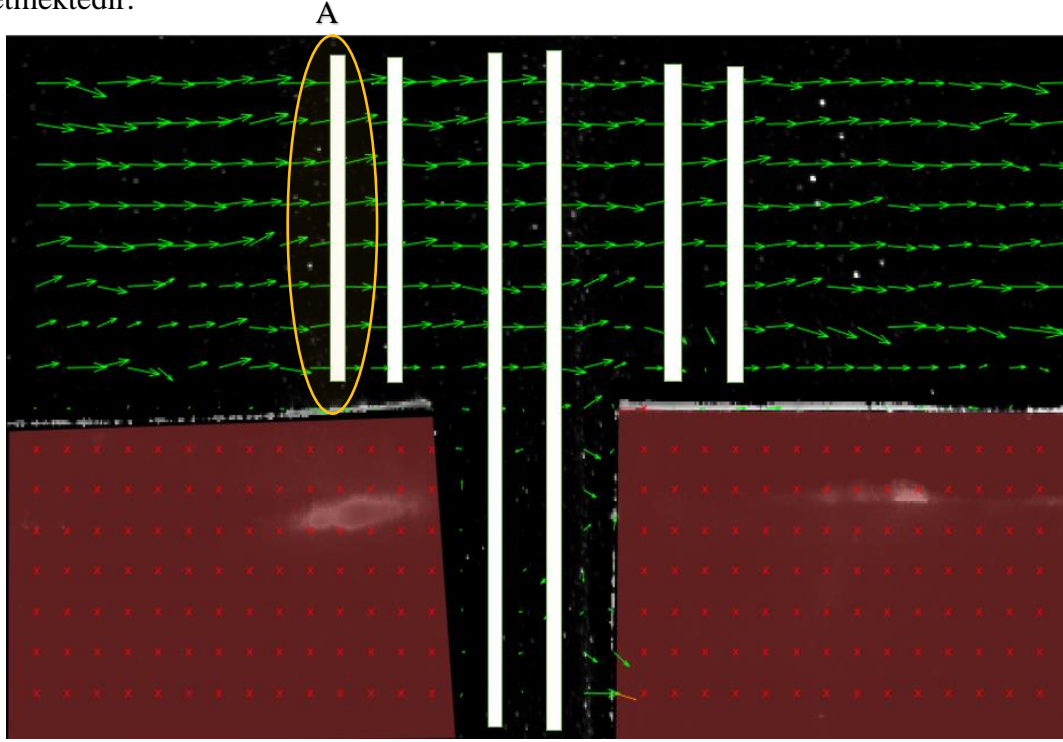
Şekil 4.12 : 7. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, G kesitleri).



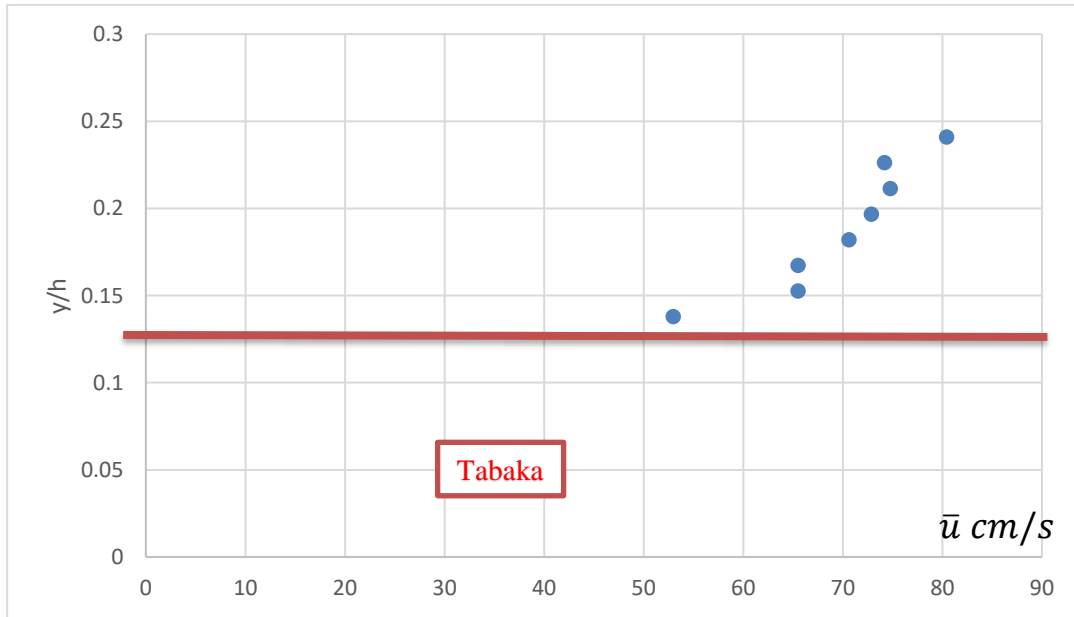
Şekil 4.13 : 7. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, G kesitleri).

#### 4.1.2 Sel rejimine ait grafikler

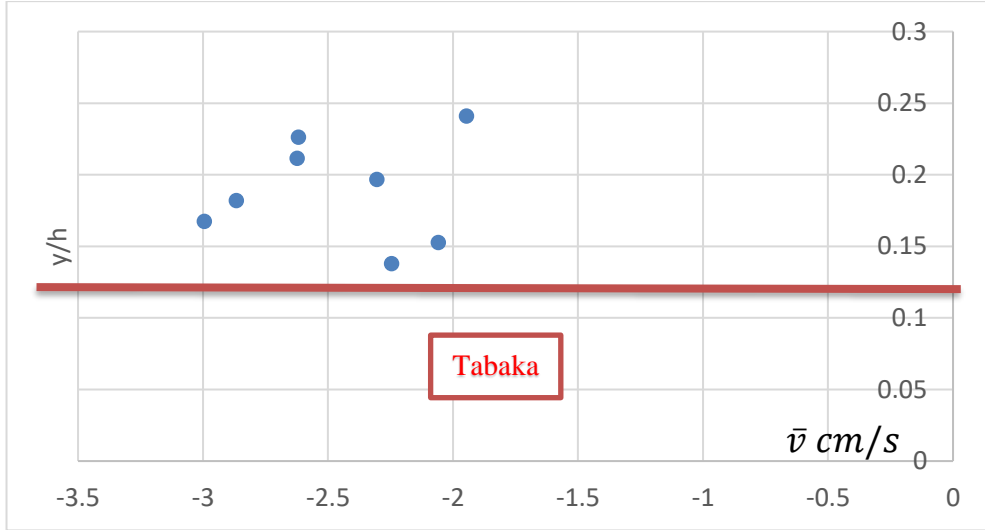
Sel rejimine ait aşağıda belirtilen grafiklerde boşluk aralığı (s) 3 mm ve Froude sayısı (Fr) 1.434 olan 13. Deney örnekleme olarak kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılan grafiklerdeki mavi veri noktaları yapılan laboratuvar deney sonuçlarına karşılık gelirken, turuncu veri noktaları Nezu ve Nakagawa'ya ait deney bulgularını temsil etmektedir.



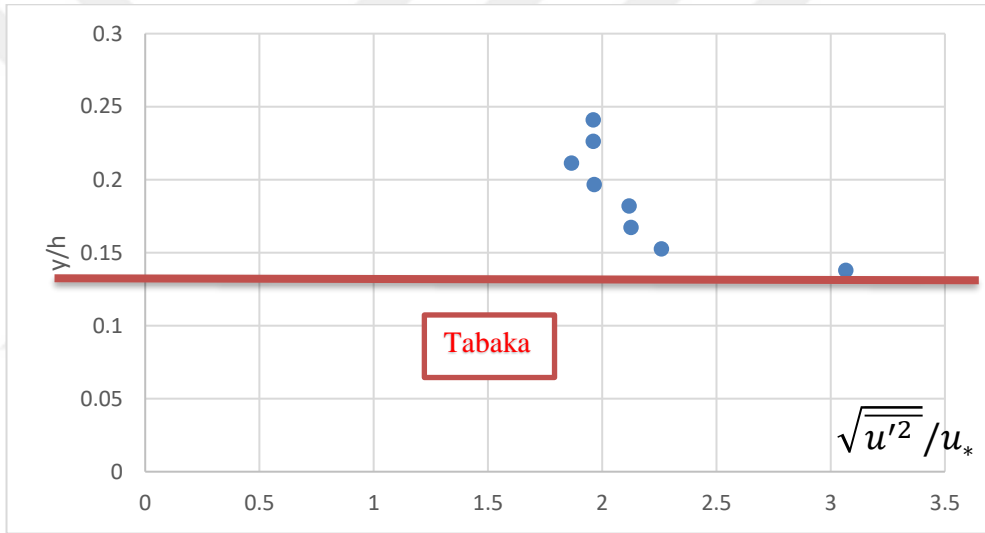
Şekil 4.14 : 13. Deney hız vektörleri.



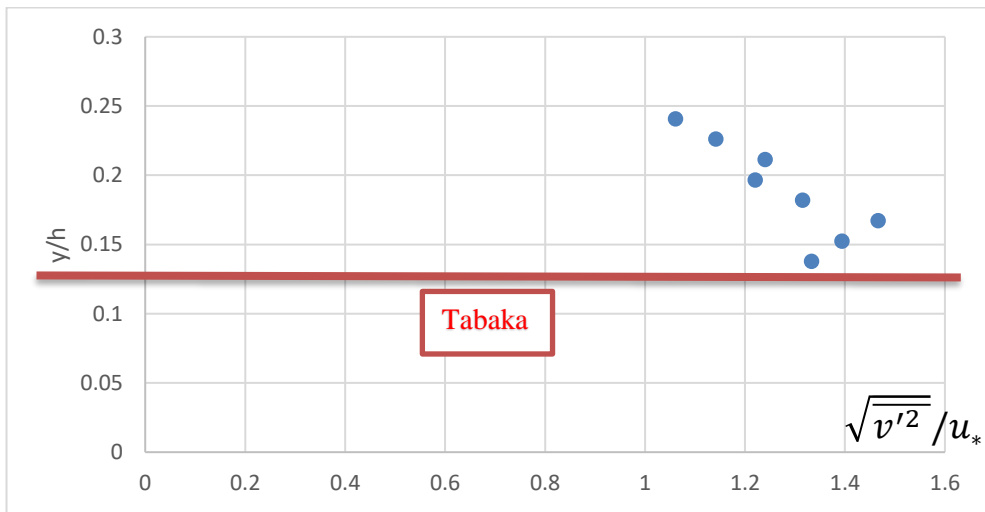
Şekil 4.15 :  $u_{ort}$  grafiği (A kesiti).



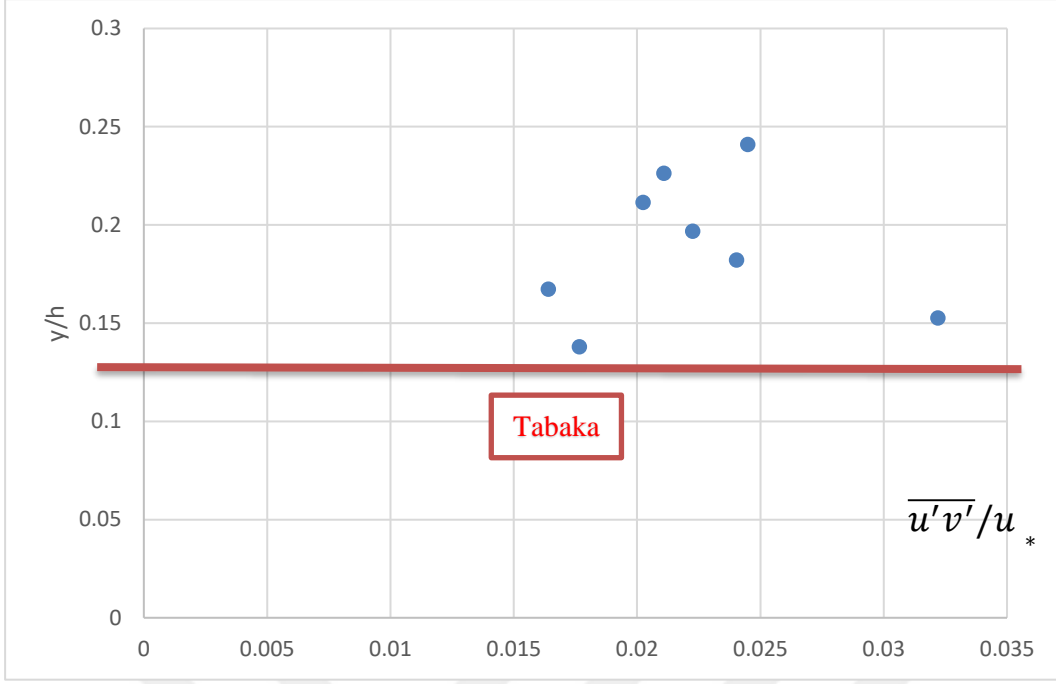
Şekil 4.16 : vort grafiği (A kesiti).



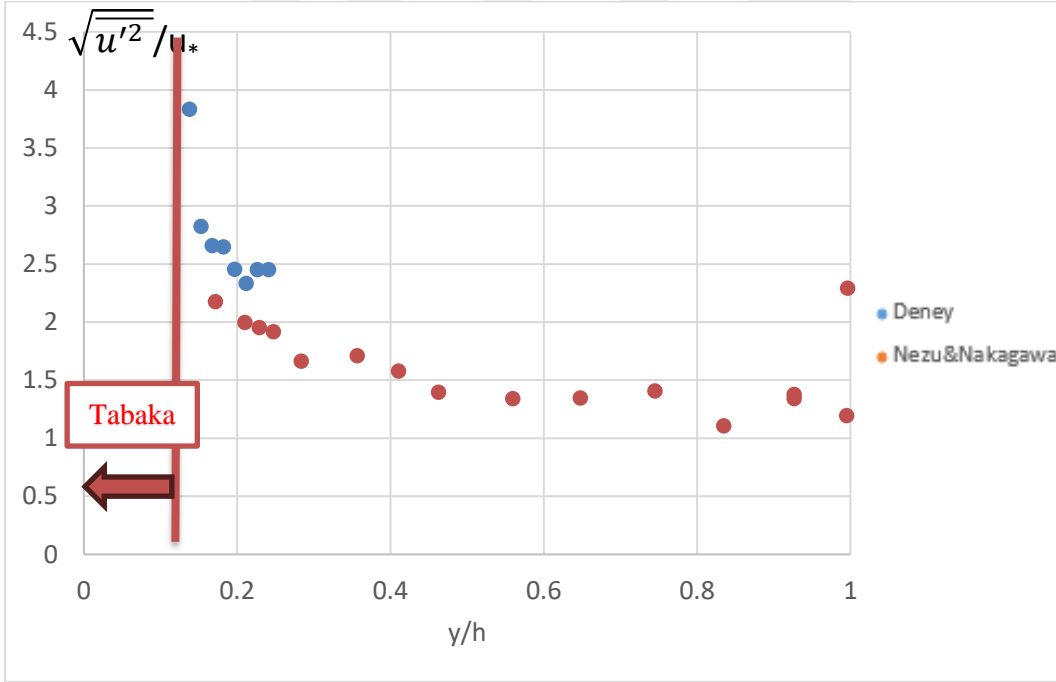
Şekil 4.17 :  $u'$ <sub>RMS</sub> grafiği (A kesiti).



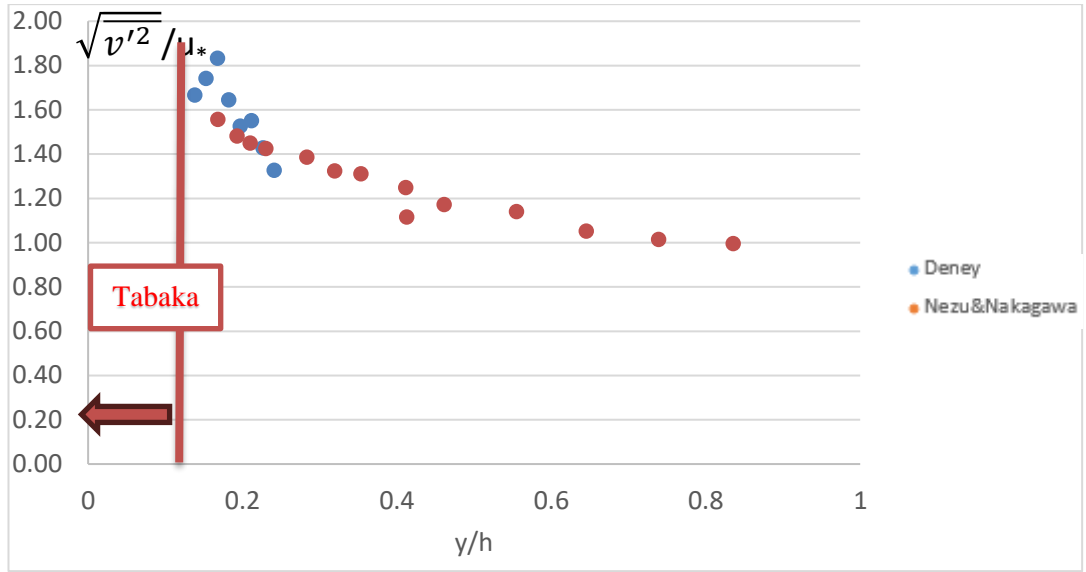
Şekil 4.18 :  $v'$ <sub>RMS</sub> grafiği (A kesiti).



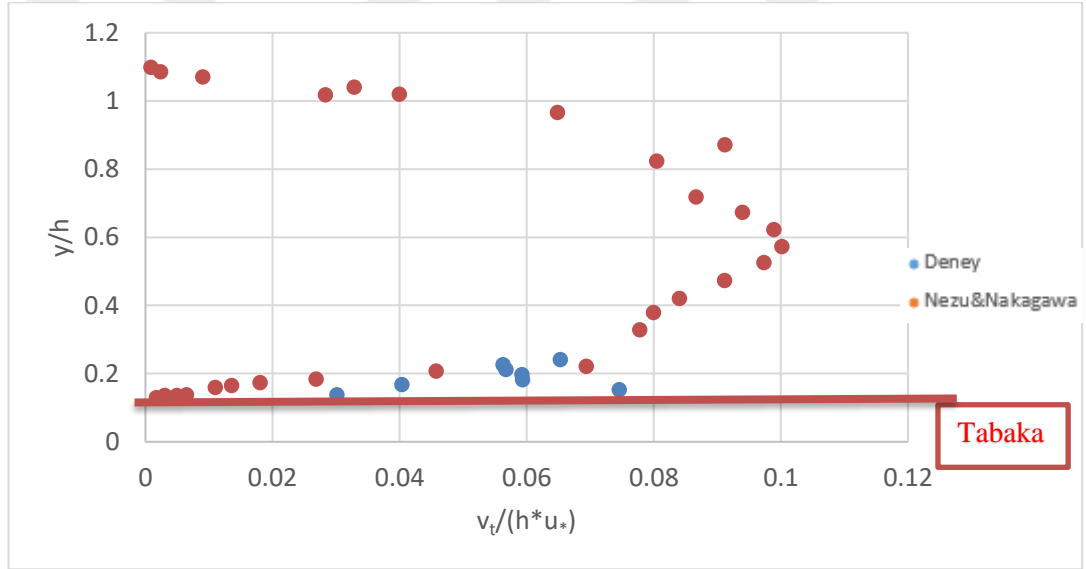
Şekil 4.19 :  $(u'v')_{\text{ort}}$  grafiği (A kesiti).



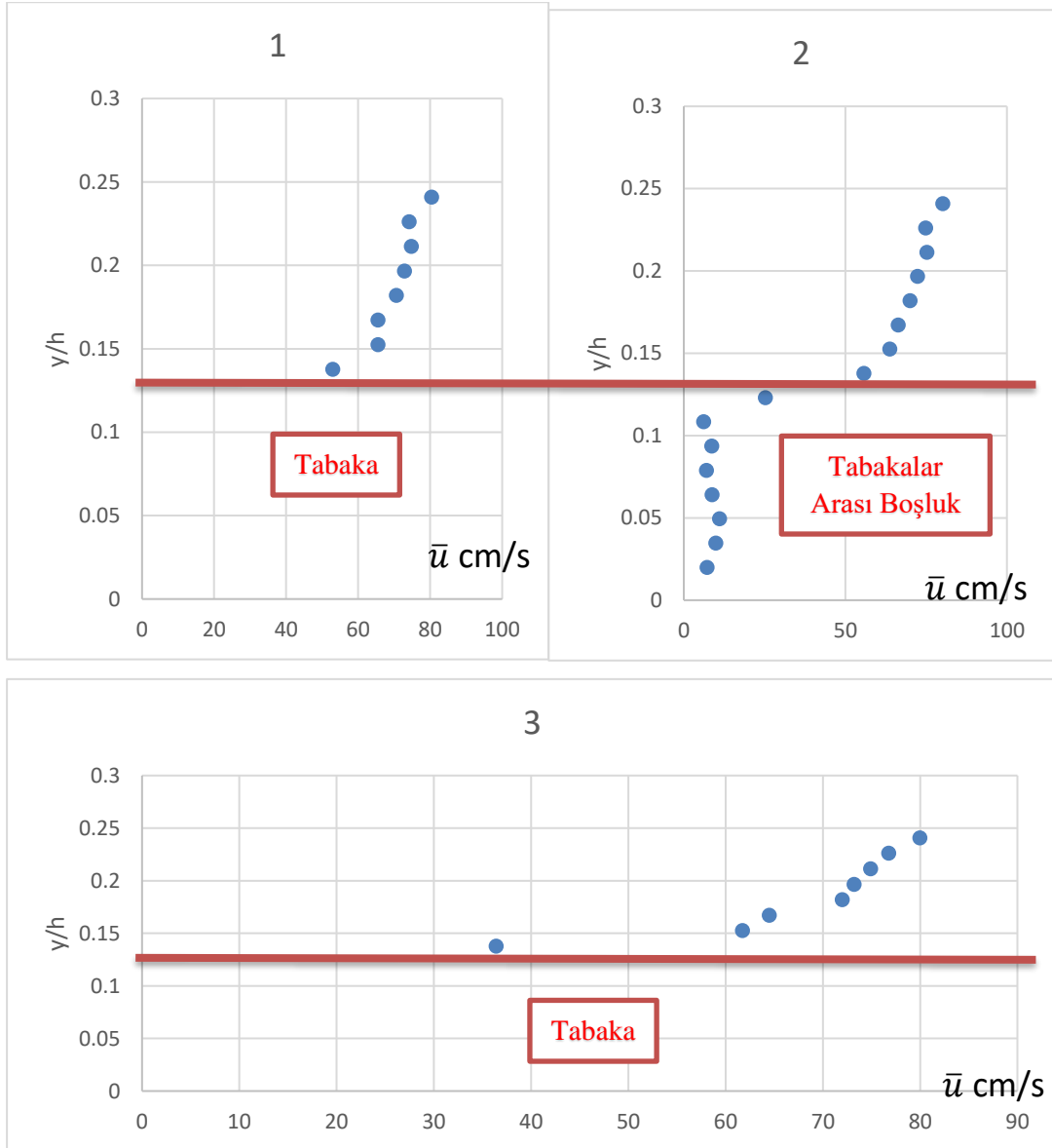
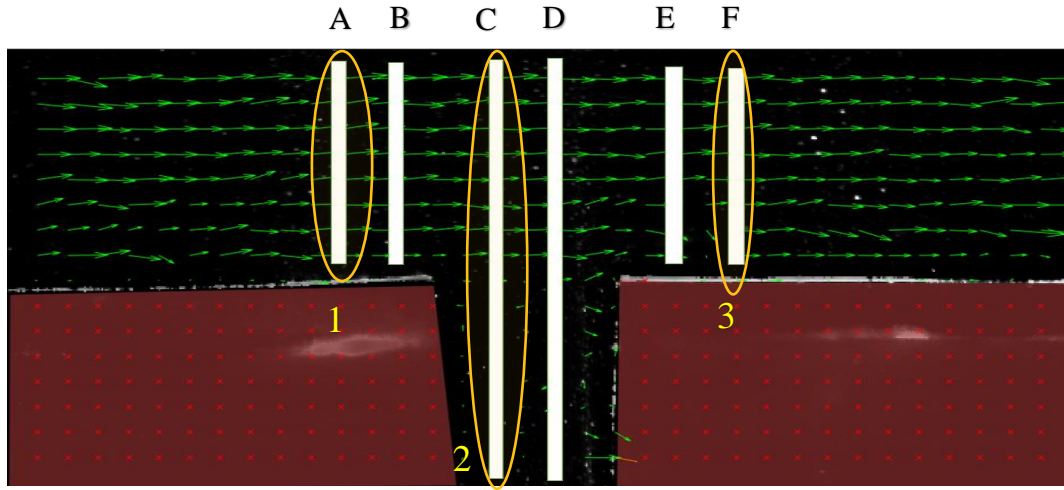
Şekil 4.20 :  $u'_{\text{RMS}}$  sonuçları karşılaştırılması (A kesiti).



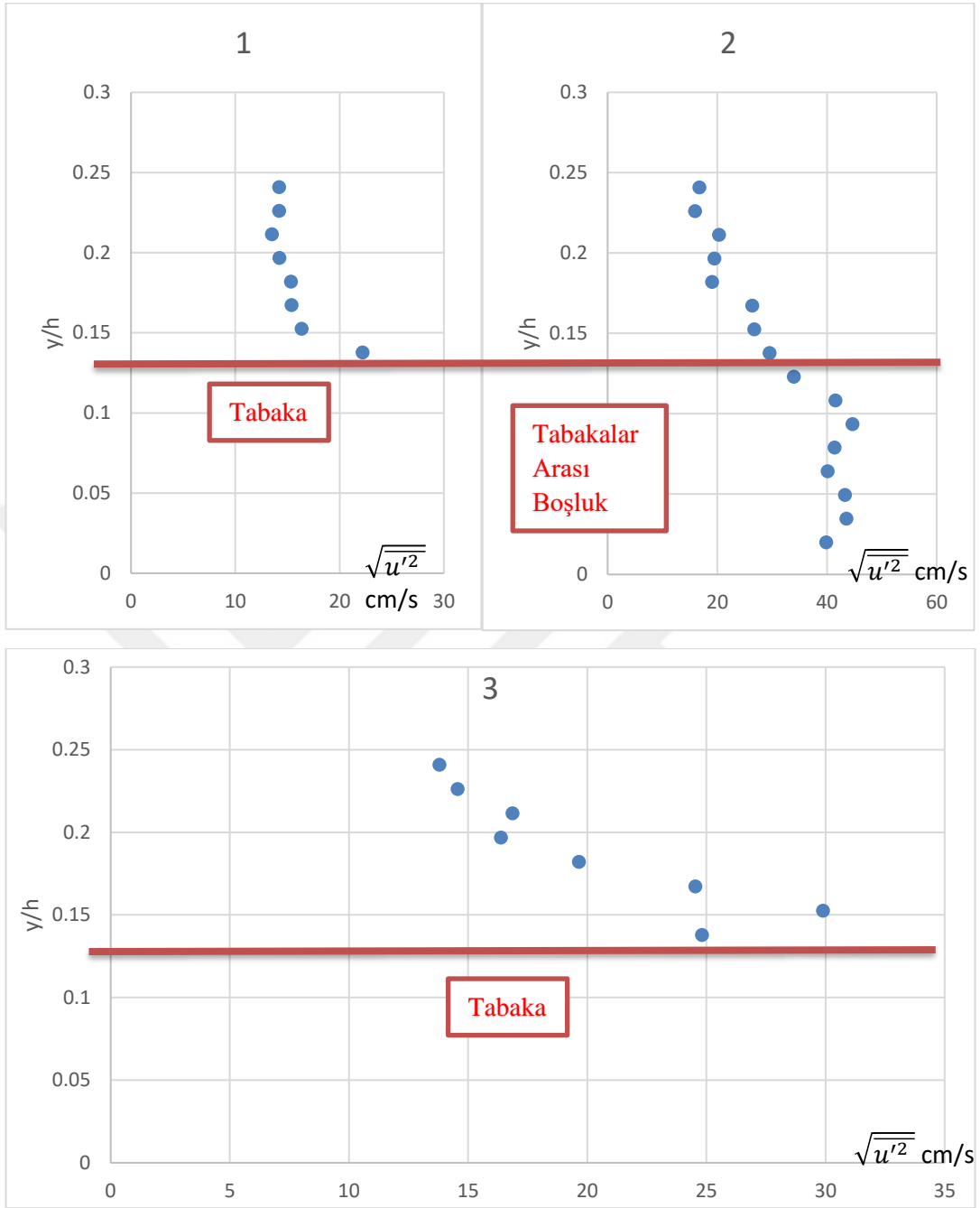
Şekil 4.21 :  $v'_RMS$  sonuçlarının karşılaştırılması (A kesiti).



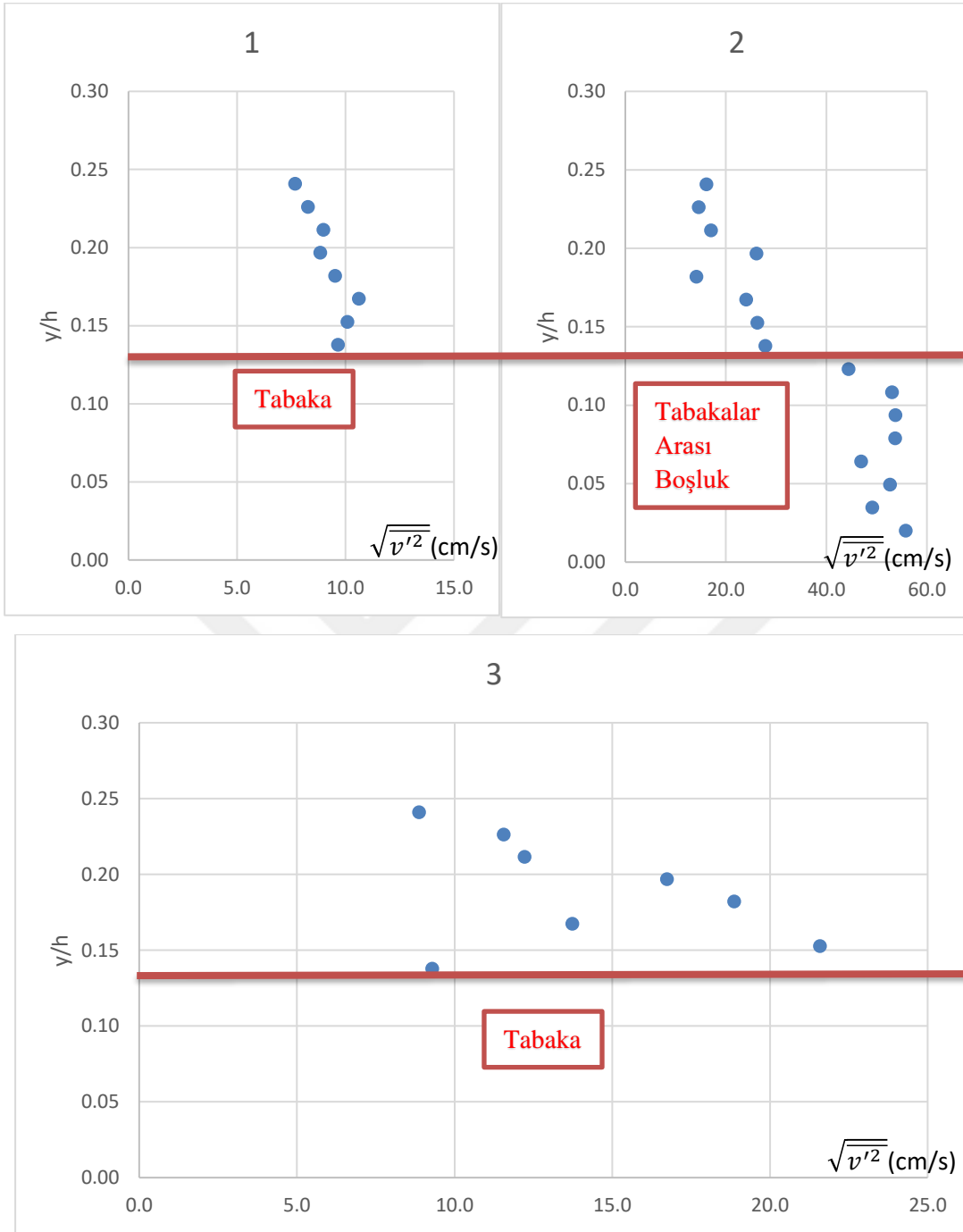
Şekil 4.22 : Eddy viskozitesi sonuçlarının karşılaştırılması (A kesiti).



Şekil 4.23 : 13. Deneye ait ortalama akım hızları (A, C, F kesitleri).

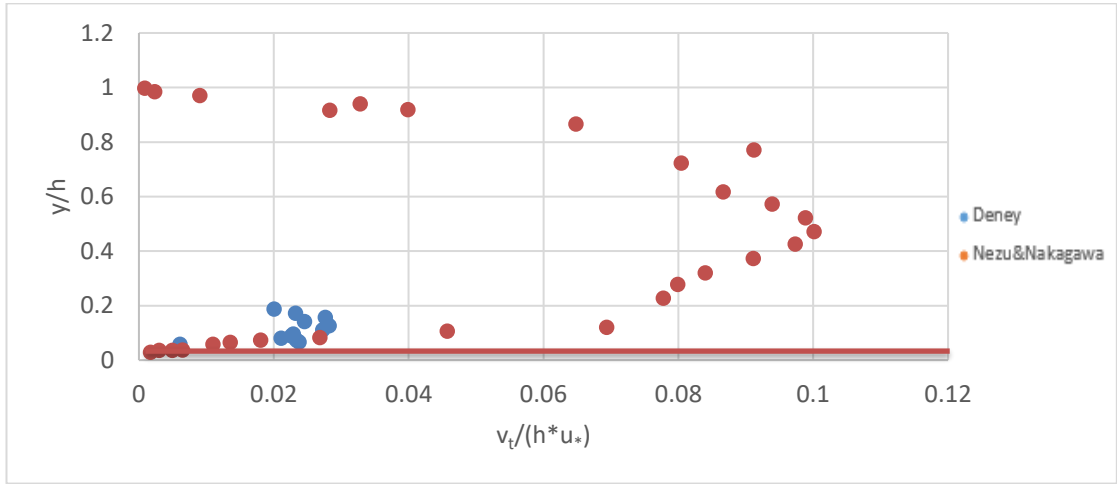


Şekil 4.24 : 13. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, F kesitleri).

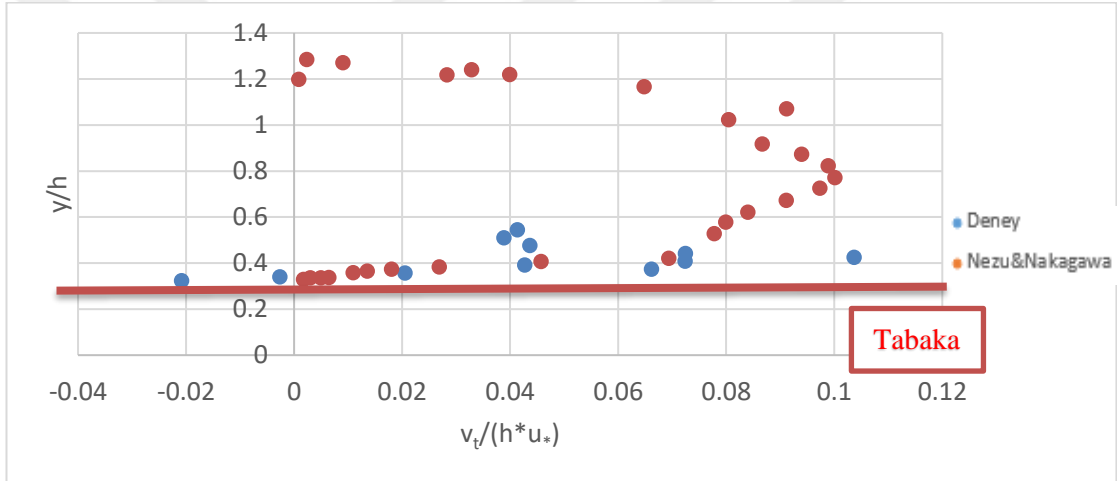


Şekil 4.25 : 13. Deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (A, C, F kesitleri).

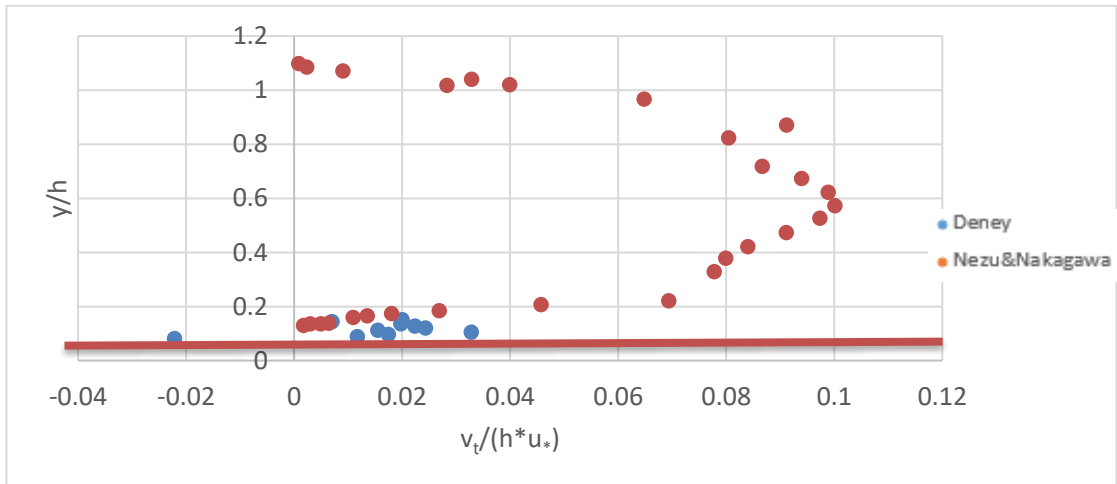
### 4.1.3 Nehir ve Sel rejimi karşılaştırması



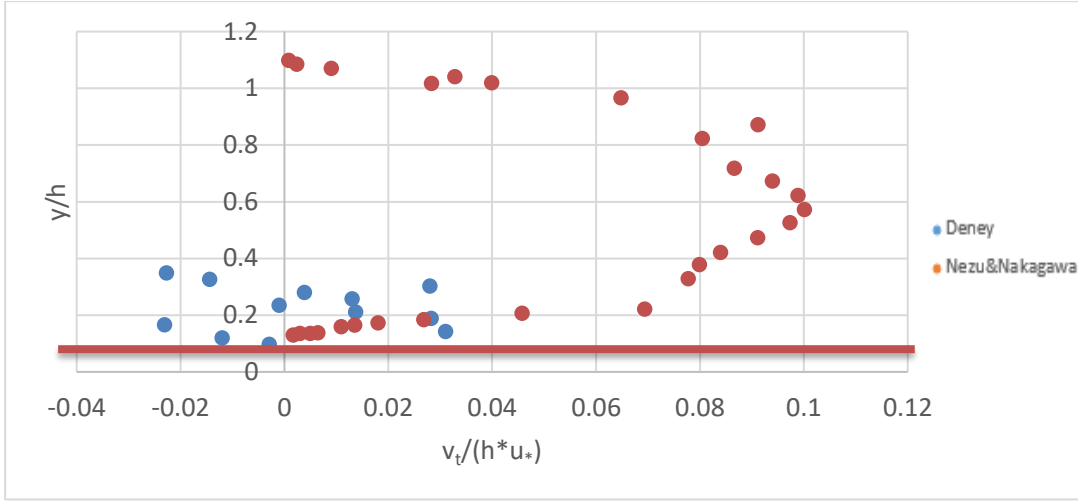
Şekil 4.26 : 2. Deney (Fr: 0,57; 2 mm; A kesiti).



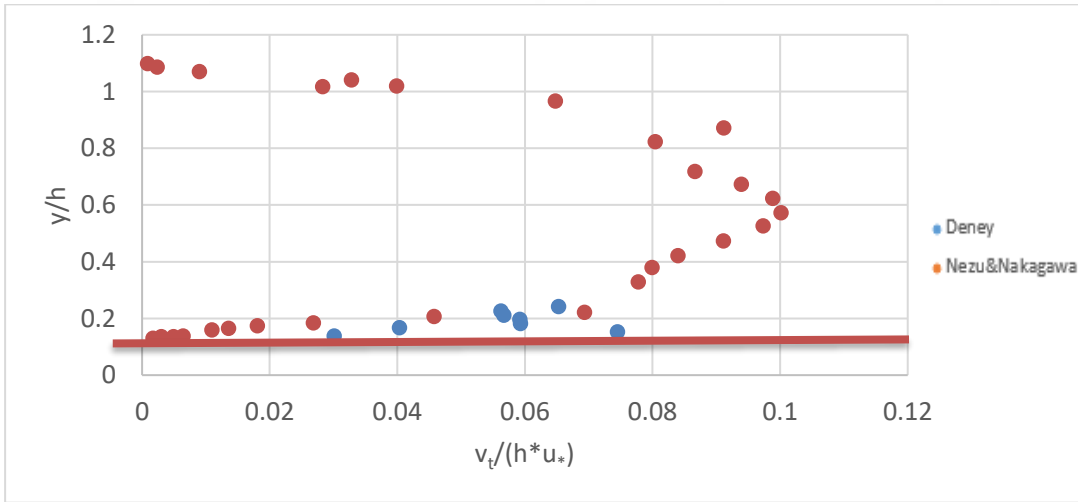
Şekil 4.27 : 7. Deney (Fr: 0,68; 3 mm; A kesiti).



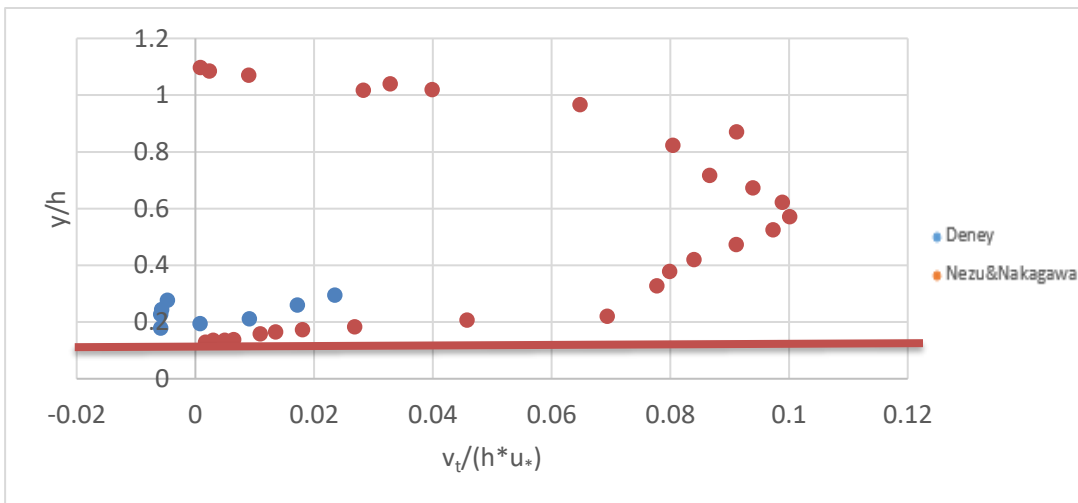
Şekil 4.28 : 9. Deney (Fr: 0,66; 4 mm; A kesiti).



Şekil 4.29 : 11. Deney (Fr: 1,17; 2 mm; A kesiti).



Şekil 4.30 : 13. Deney (Fr:1,43; 3 mm; A kesiti).



Şekil 4.31 : 15. Deney (Fr:2,16; 4 mm; A kesiti).

#### 4.1.4 Genel çıktılar

Bu çalışma, Nezu'nun açık kanal akımlarında türbülans konusundaki çalışmasının önemli katkılarını kabul etmekte ve hidrolik mühendisliğinde bilgi ve yeniliği ilerletmek için yerleşik akademik araştırmalar üzerine inşa etmenin önemini vurgulamaktadır. Teorik ilkeleri ampirik verilerle bütünleştiren bu çalışma, karmaşık hidrolik sistemlerin ortaya çıkardığı çok yönlü zorlukların ele alınmasında disiplinler arası iş birliğinin gücünü örneklemektedir.

Şekil 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31'deki grafikler akım özelliklerinin sınır tabaka içinde nasıl değiştiğinin ve türbülansın genel akım dinamiklerini nasıl etkilediğinin anlaşılmasını sağlamak için çizilmiştir. Bulgularımız özellikle akım dinamikleri içerisinde farklı olguları ortaya çıkarmıştır. Plakalar arasındaki boşluktan fark edilebilir bir vorteks ortaya çıktığı deney sonuçlarında gözlemlenmiş olup, bu vorteks, akım hızı ( $u$ ) üzerinde bir engelin aşılmasına benzer şekilde yavaşlatıcı bir etki yarattığı çizilen grafiklerde görülmektedir. Sonuç olarak, hızların düz, kesintisiz bir tabandakilere kıyasla daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, vorteksin ötesine geçildiğinde, yeniden canlanan bir akım ortaya çıkmış ve niceliksel olarak yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bunların yanında minimum hızlarla karakterize edilen nehir rejiminde, akım hızı üzerinde gözlemlenen etkilerin daha az olduğunu belirtmek gerekir. Bu durum, özellikle düşük akım hızlarıyla karakterize edilen ortamlarda, akım dinamiklerinin savak performansı üzerindeki incelikli etkisinin altını çizmektedir.

Laboratuvar deneylerinin başarıyla tamamlanması, Nezu'nun açık kanal akımlarındaki türbülans dinamikleri üzerine öncü çalışmasıyla oldukça karşılaştırılabilir sonuçlar vermiştir. Özellikle hem nehir hem de sel rejimi için yapılan deneylerimiz alt kritikten üst kritik akım rejimlerine ( $Fr = 0.46-3.12$ ) kadar uzanan Froude sayıları için tutarlı diyebileceğimiz hız dalgalanmaları ( $u'$  ve  $w'$ ) göstermiştir. (Şekil 4.3, 4.4, 4.15, 4.16) Ancak, geleneksel kayma gerilimi dağılım modellerinden belirli bir sapma ortaya çıktığı da ayrıca belirtilmelidir. Tipik olarak, düz (sürekli) bir taban konfigürasyonunda türbülans, toplam kayma gerilmesinin yaklaşık %85'ine katkıda bulunur ve kalan %15'lik kısım viskoz alt tabakanın etkisine atfedilir. Bununla birlikte, plakalar arasında boşluk içeren deneylerimiz, bu dağılımda önemli bir değişiklik olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yaklaşık olarak, kayma geriliminin %20-30'unun viskoz

alt tabakadan kaynaklandığı ve beklenen değerlere kıyasla önemli bir artışa işaret ettiği bulunmuştur. Bu sapma, plaka boşlukları gibi geometrik düzensizliklerin kayma gerilimi dinamikleri üzerindeki derin etkisinin altını çizmektedir. Kısaca, boşluğun varlığı kayma gerilimi dağılımı üzerinde minimum %10'luk ek bir etki yarattığı söylenebilir. Bu bulgular, geometrik konfigürasyonlar ile akım dinamikleri arasındaki karmaşık etkileşimin altını çizmekte ve hidrolik sistem tasarımı ve analizinde bu tür faktörlerin hesaba katılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Deneyisel sonuçlarımız ile Nezu'nun bulguları arasındaki uyum, metodolojimizin güvenilirliğini daha da doğrulamakta ve hidrolik sistemlerdeki türbülans dinamiklerini yöneten temel ilkeleri güçlendirmektedir. Laboratuvar deneyleri ve yerleşik teorik modeller arasında bir korelasyon kurarak, bulgularımızı gerçek dünya senaryolarına güvenle yansıtabilir ve plaka tabanlı savak yapılarının tasarımı ve yönetimi hakkında bilgi verebiliriz. Deneyisel verilerin teorik tahminlerle yakınsaması yalnızca akım dinamikleri anlayışımızı geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda savak performansını optimize etmek ve yapısal bütünlüğü sağlamak isteyen mühendisler ve uygulayıcılar için bir rehberlik sağlar. İleriye dönük olarak, devam eden araştırma çabaları deneyisel tekniklerin iyileştirilmesine, araştırma kapsamının ek akım parametrelerini içerecek şekilde genişletilmesine ve plakalar arasındaki boşluk etrafındaki hız dağılımının karmaşıklığını daha da çözmek için hesaplamalı modellemedeki ilerlemelerden yararlanmaya odaklanmalıdır.

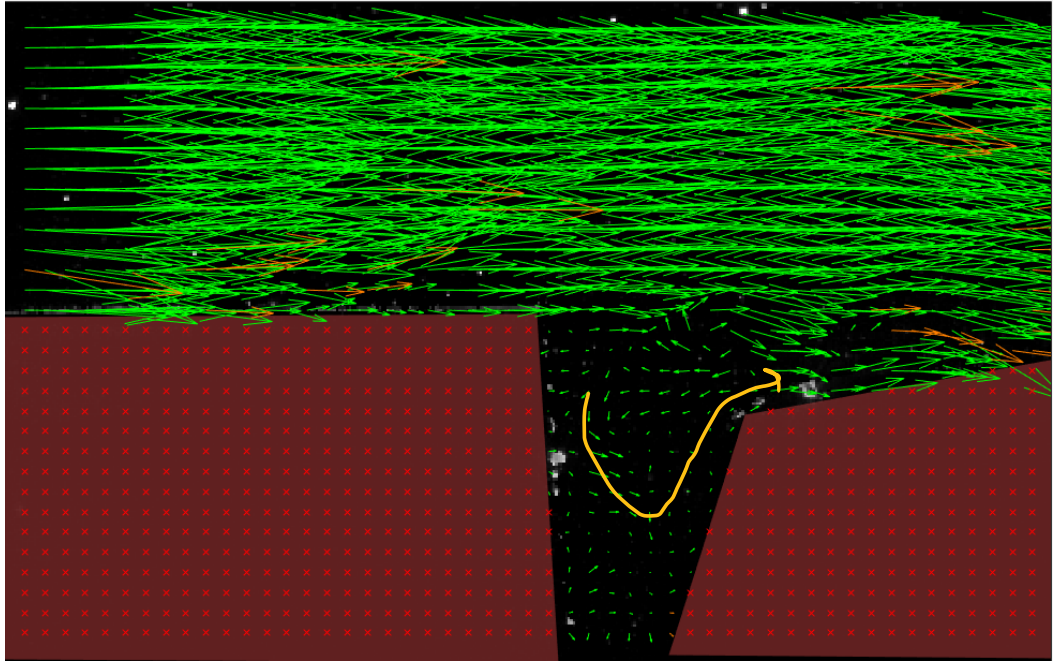
## **4.2 Sweep ve Ejection (Süpürme ve Fırlatma)**

### **4.2.1 Deneyisel gözlemler**

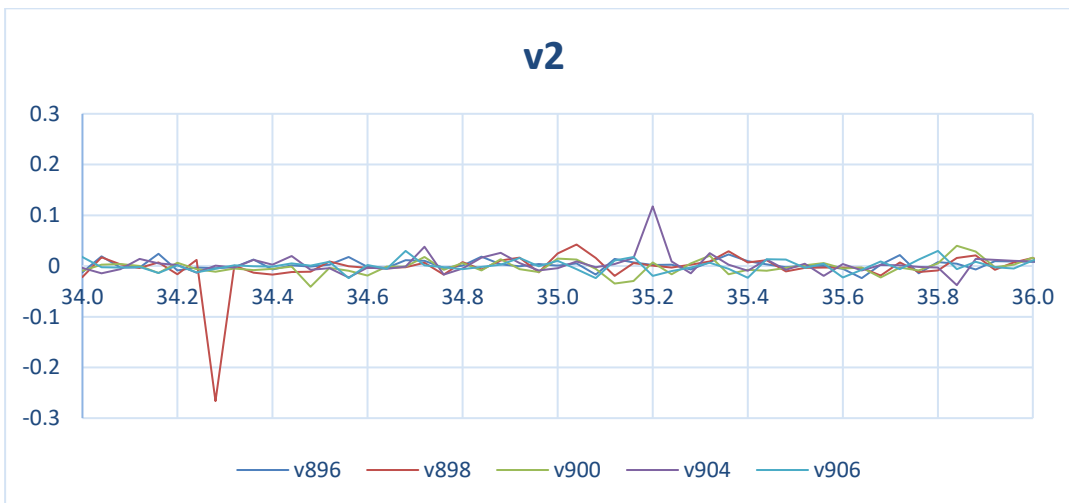
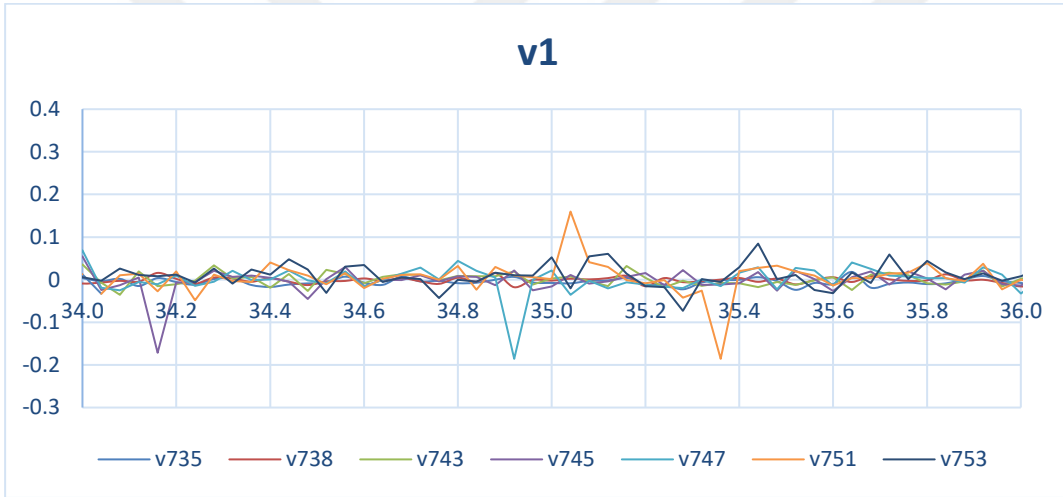
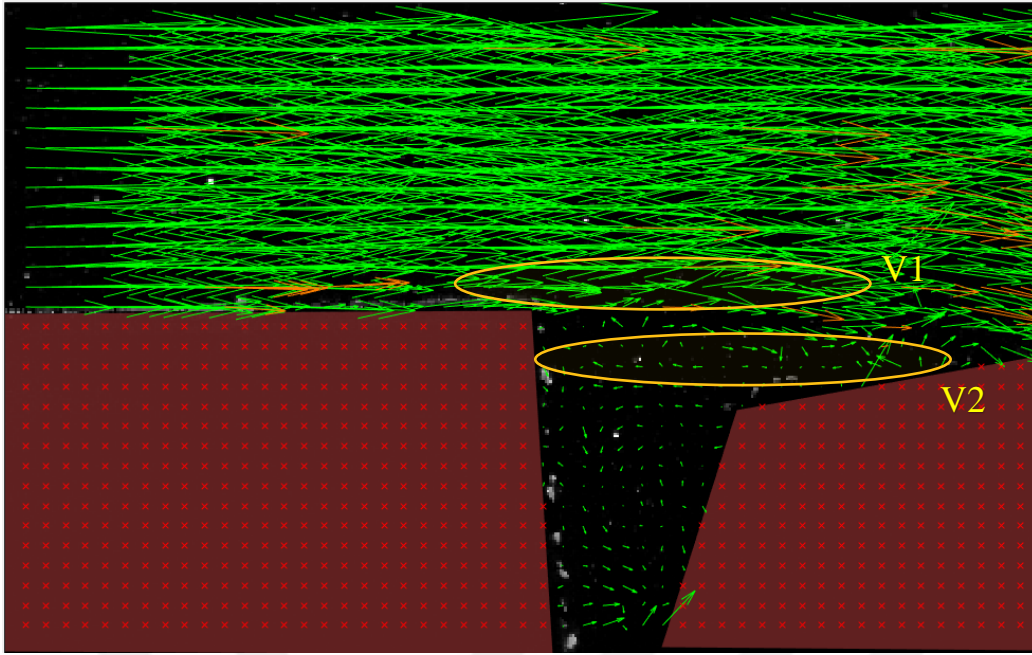
Çalışmanın deneyisel aşaması sırasında, PIV gibi gelişmiş ölçüm teknikleri kullanılarak süpürme ve fırlatma olayları dikkatle gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Bu olaylar, savak plakalarının yüzeyi boyunca akışkan partiküllerinin sürüklenmesi ve atılması ile karakterize edilen farklı akım modelleri olarak ortaya çıkmıştır. Deney düzeneği, süpürme ve fırlatma olaylarının hassas bir şekilde tanımlanmasına ve analiz edilmesine olanak tanıyarak hidrolik sistem içindeki oluşumları ve davranışları hakkında bilgiler sağlamıştır

#### 4.2.2 Sonuçların analizi

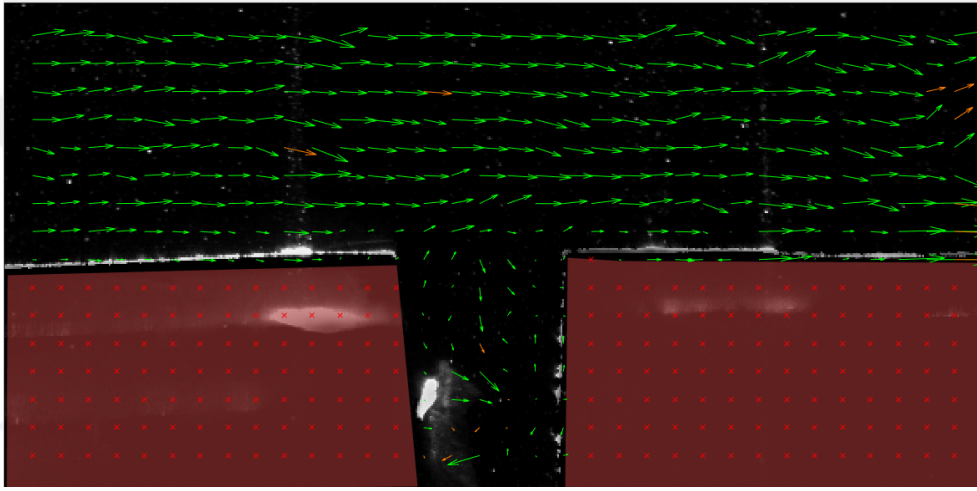
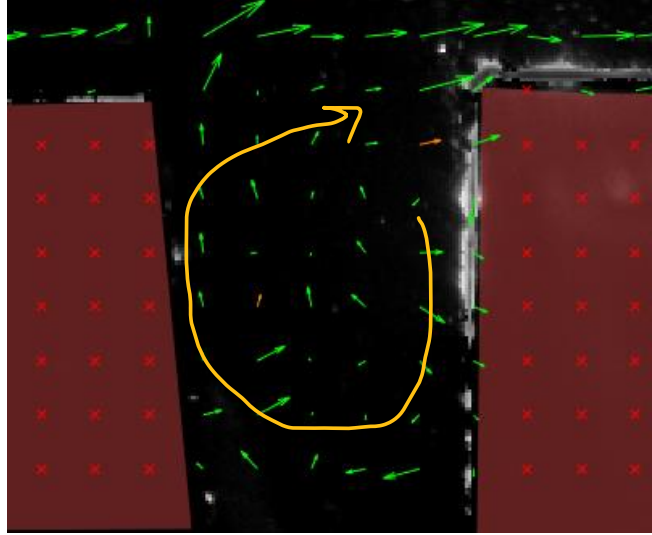
Deneysel verilerin analizi, savak plakalarının yzeyi boyunca, özellikle de yksek trbvlans yoğunluğu olan bglelerde aralıklı olarak sypirme ve fırlatma olaylarının meydana geldiğini ortaya koymuştur. Sypirme olayları akışkan partikullerinin yzey boyunca hızlı hareketiyle karakterize edilirken, fırlatma olayları akışkanın lokalize bglelerden dışarı atılmasını içermektedir. Bu olayların uzamsal dağılımı ve zamansal dinamikleri, akım koşullarına ve savak yapısının geometrik ozelliklerine bağlı olarak değişmiş ve diğer akım ozellikleriyle karmaşık etkileşimlerini vurgulamıştır.



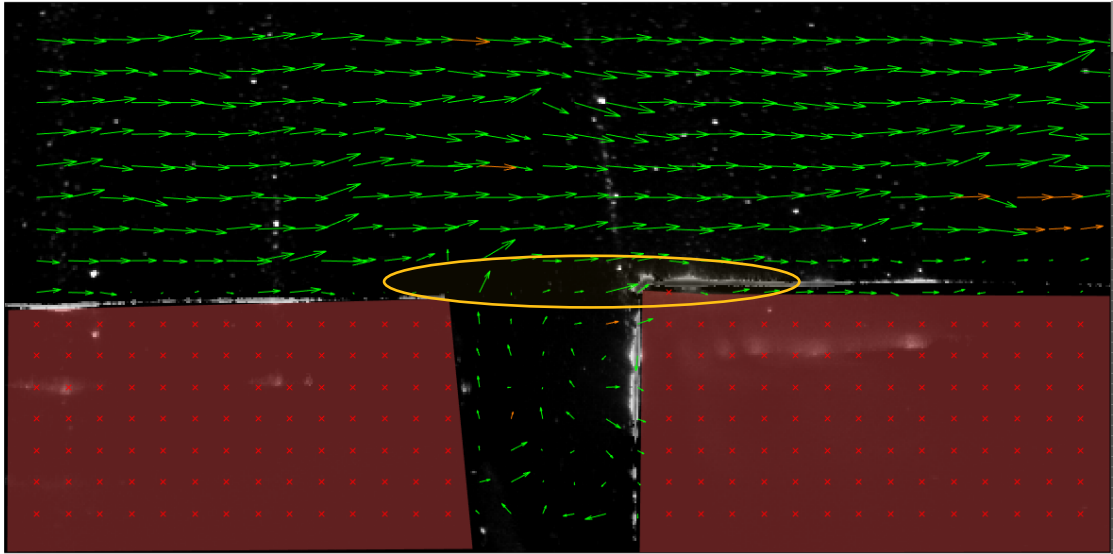
şekil 4.32 : 7. deneye ait 3 mm'lik boşluk içinde gzlmlenen hız vektörleri.

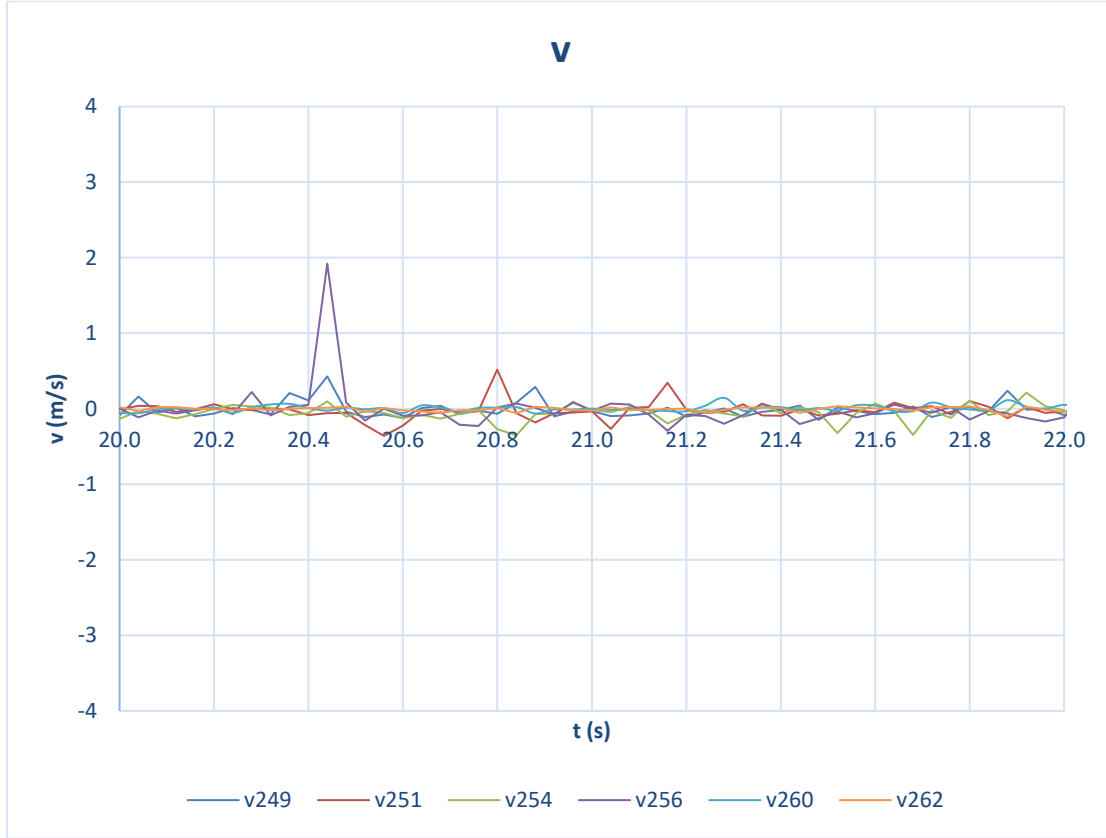


Şekil 4.33 : 7. Deney v hızlarına ait sweep ve ejection grafikleri.



Şekil 4.34 : 13. deneye ait 3 mm'lik boşluk içinde gözlemlenen hız vektörleri.





Şekil 4.35 : 13. Deney v hızlarına ait sweep ve ejection grafikleri.

#### 4.2.3 Yorumlama ve tartışma

Süpürme ve fırlatma olaylarının gözlemlenmesi, plaka tabanlı savak yapılarının stabilitesi ve performansı açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır. Bu fenomenler akım alanı içerisinde momentum ve enerjinin yeniden dağılımına katkıda bulunarak hız dağılımını ve savak plakalarına etki eden kesme kuvvetlerini potansiyel olarak etkilemektedir. Ayrıca, süpürme ve fırlatma olaylarıyla ilişkili akışkan partiküllerinin sürüklenmesi ve dışarı atılması türbülans etkilerini şiddetlendirebilir ve zaman içinde savak yüzeylerinin aşınmasına katkıda bulunabilir. Bu olayların altında yatan mekanizmaların anlaşılması, sağlam tasarım stratejilerinin geliştirilmesi ve savak bütünlüğüne yönelik potansiyel risklerin azaltılması için gereklidir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçlara göre, tabaka arasında bir boşluk olduğunda akışkan ile ana akım arasında bir etkileşim meydana gelmektedir. Boşluk açıldıkça etkileşim artarken kapandıkça etkileşim azalmaktadır. Etkileşim ise “tabaka arasındaki açıklıkta vorteks oluşuyor, vorteks ana akıma doğru emiliyor, ana akım taban yakınındaki kararlı yapısını bozuyor” şeklinde ifade edilebilir.

Tabakanın yukarısında hızlar büyük olduğu ve arada oluşan boşlukta vorteks oluştuğu görülmektedir. Bunlarında mansaptaki tabaka üzerinde dinamik etkilere neden olabileceği görülmüştür. Bu etkilerin en önemlisi, oluşan vorteks çıktığında diğer akışkan vorteks yerine geçip plakada/tabakada hasarlar meydana getirmesidir.

Düşük Froude sayılarında çıkışlar, engeller olduğu için düşey doğrultudaki çalkantı bileşenleri düz tabana göre daha küçük olurken yatay doğrultudaki çalkantı bileşenleri (u) aynı kalmaktadır. Çünkü u dominant hale gelmektedir.

Yüksek Froude sayılarında ise (Sel Rejimi) arttıkça düz tabana daha yakın değerler görülmekte olup sel rejimi artmaya başladığında çalkantı bileşenleri dominant hale gelmektedir. Düşey doğrultudaki çalkantı bileşeni arttıkça kayma gerilmesi de artmaktadır.

Ana akım ile boşluk içindeki akım arasındaki etkileşim bulunmaya çalışılmıştır. Sonuçta mansap tarafında bir çevrim oluştuğu, zaman zaman yukarı doğru hızlandığı, aynı zamanda memba tarafında bir kararsızlık yarattığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu birleşim noktalarındaki akışkanın yaratacağı etkinin minimize edilmesi için gereken önlemler alınmalıdır. Bu önlemler; tabakalar arasındaki boşluğun çok küçük olması, tabakalar arasındaki boşluğun kapatılması veya plaka düzleminin eşit seviyede olacak şekilde inşa edilmesidir.

Deneysel sonuçlara baktığımızda kayma gerilmesi mansapta daha da artmaktadır. Çalkantı bileşenleri mansapta daha fazla iken membada daha düşüktür.

İleriye dönük öneriler olarak, yapılan akım ölçümleri basınç ölçümleri ile karşılaştırılmalıdır. Sadece akım veya sadece basınç ölçerek değil akımın etkisinin belirlenmesi için akım ve basıncın senkronize ölçülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, böyle bir yapı yapılacaksa yani yüksek hızlara ve yüksek Fr sayılarına maruz kalacaksa, o zaman bunların günümüzün teknolojileri ile (PIV, basınçölçer gibi) laboratuvarında incelenmesi gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- Aksoy, S., S. Ethem babaoglu** (1979). Cavitation damage at the discharge channels of Keban Dam. 13th ICOLD Congress, New Delhi. 111(50), 369-379
- Chiu, L. C., ASCE, M.** (1989). Velocity Distribution in Open Channel Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(5)
- Cokgor, S., Albayrak, I., Yegen, B.** (2008). The Spatial Inhomogeneity of Turbulence Over Large Relative Random Roughnesses in Open Channel Flow. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 35(4), 299-317. doi: 10.1615/InterJFluidMechRes.v35.i4.10.
- Duckstein L., Plate J. E.** (1985). Engineering Reliability and Risk in Water Resources. NATO Advanced Study Institute, 87-95
- Fiorotto, V., & Rinaldo, A.** (1992). Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 30(4), 499-520.
- Frizell, W.K.** (2007). Uplift and Crack Flow Resulting from High Velocity Discharges Over Open Offset Joints-Laboratory Studies, (Report No. DSO-07-07). Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center
- Hager, H.W.** (1992). Energy Dissipators and Hydraulic Jump, CA: Kluwer Academic
- Kirkgöz, S.** (1989). Turbulent Velocity Profiles for Smooth and Rough Open Channel Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(11): 1543-1561
- Martins R.** (1989), Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling, Kluwer Academic Publishers, 143-189
- Nezu, I., & Nakagawa, H.** (1993). Turbulence in Open-Channel Flows, CA: A.A. Balkema
- Nezu, I.** (1977) Turbulence Structures in Open-Channel Flows, PhD Thesis. Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Nezu, I., Rodi, W., ASCE, M.** (1986). Open-Channel Flow Measurements With A Laser Doppler Anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(5): 335-355
- Sumer, B. M. and Oguz, B.** (1978). Particle Motions Near the Bottom in Turbulent Flow in an Open Channel, *J. Fluid Mech.*, 86, 109–127.
- Sumer, B. M. and Deigaard, R.** (1981). Particle Motions Near the Bottom in Turbulent Flow in an Open Channel – Part 2, *J. Fluid Mech.*, 109, 311–337.
- Senturk, F.** (1976) Comparison of the results obtained in nature and on the scale model of Keban Dam. Internal Report in Turkish, 051, Ankara.

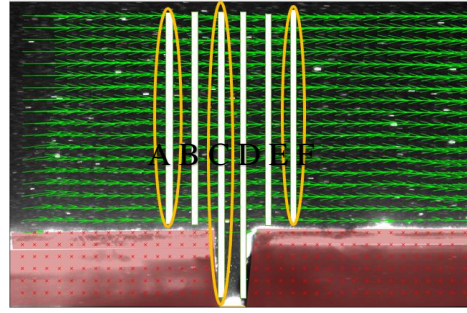
- Song, T. C., & Graf, W. H.** (1996). Velocity and turbulence distribution in unsteady open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(3), 141-154.
- Wahl, T. L.** (2021). Uplift Pressure and Flow through Open Offset Joints in Spillway Chutes, (Report No. ST-2021-19170-01 / DSO-2021-08). Denver, Colorado: Hydraulic Investigations & Laboratory Services Group
- Wahl, T. L., Frizell W.K., Falvey T. H.;** (2019). Uplift Pressures below Spillway Chute Slabs at Unvented Open Offset Joints, *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(11). doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001637
- Wahl, T. L., and Heiner, B.J.** (2024). Effects of Joint and Crack Geometry on Hydraulic Jacking in Lined and Unlined Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(5): 04024030
- Wahl, T. L., and Heiner, B.J.** (2024). Laboratory Measurements of Hydraulic Jacking Uplift Pressure at Offset Joints and Cracks, *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(4): 04024016
- Wahl, T. L., and Heiner, B.J.** (2024). Discharge through Open Offset Joints and Cracks in Spillway Chutes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(5): 04024032
- Westerweel, J., Elsinga, G., Adrian, J. R.** (2013). Particle Image Velocimetry for Complex and Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 45(1), 409-436. DOI:10.1146/annurev-fluid-120710-101204
- Url-1** <<https://images.app.goo.gl/tDXihwT2FS3foqN16>>, erişim tarihi 21.02.2024.

## **EKLER**

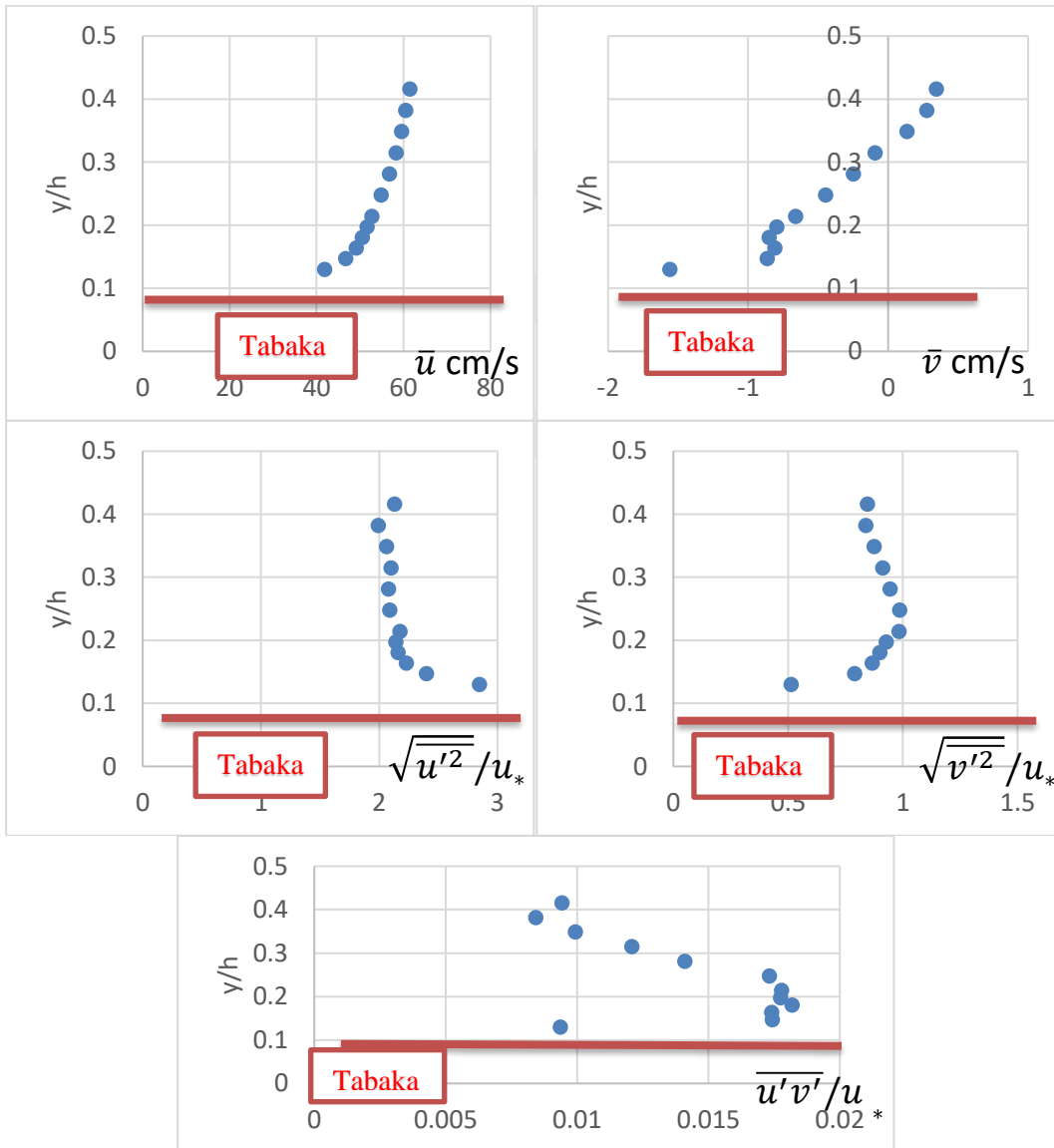
**EK A:** Elde edilen veriler ve analiz sonuçlarının sunulduğu Şekil ve grafikler

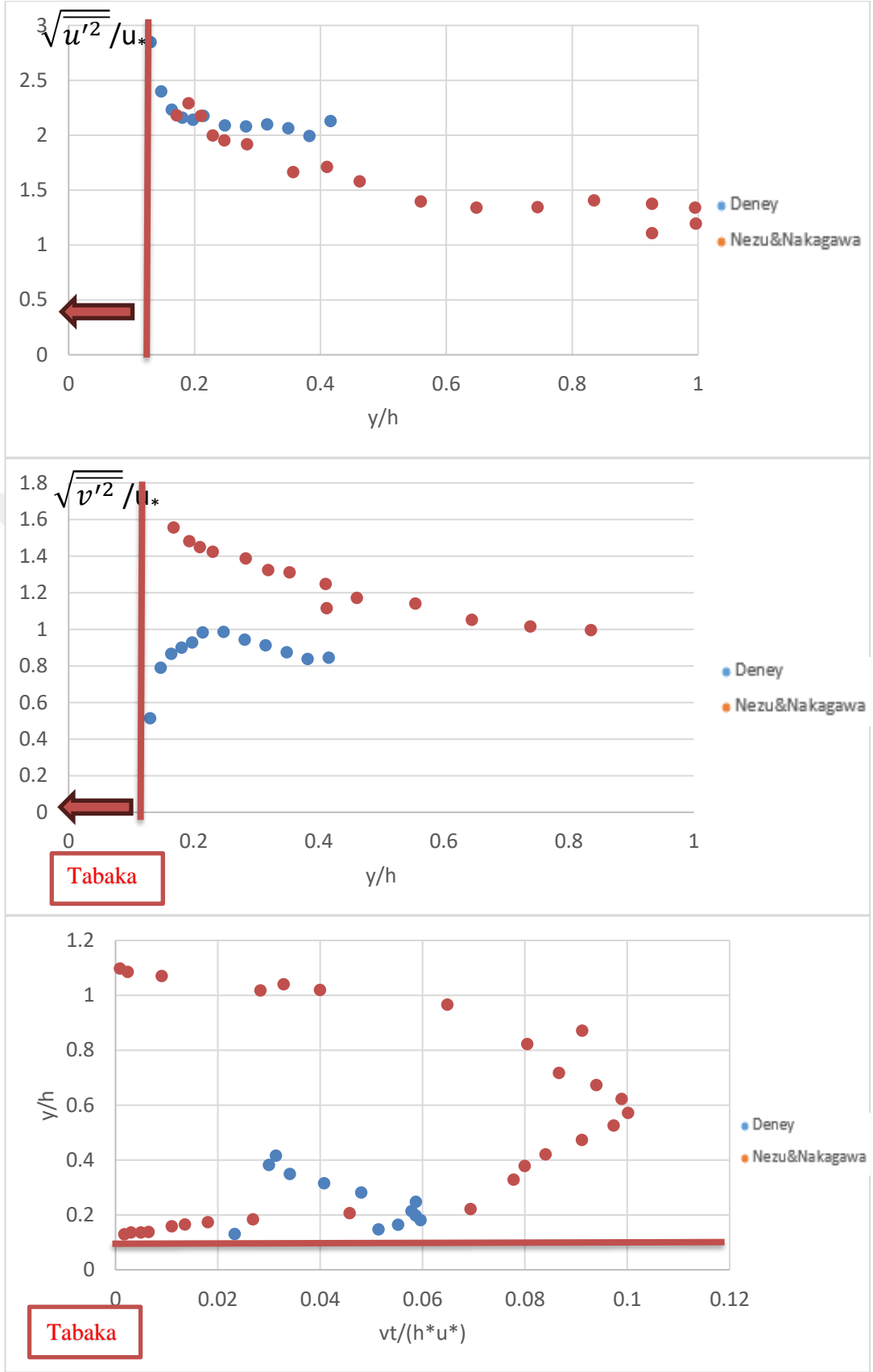


EK A

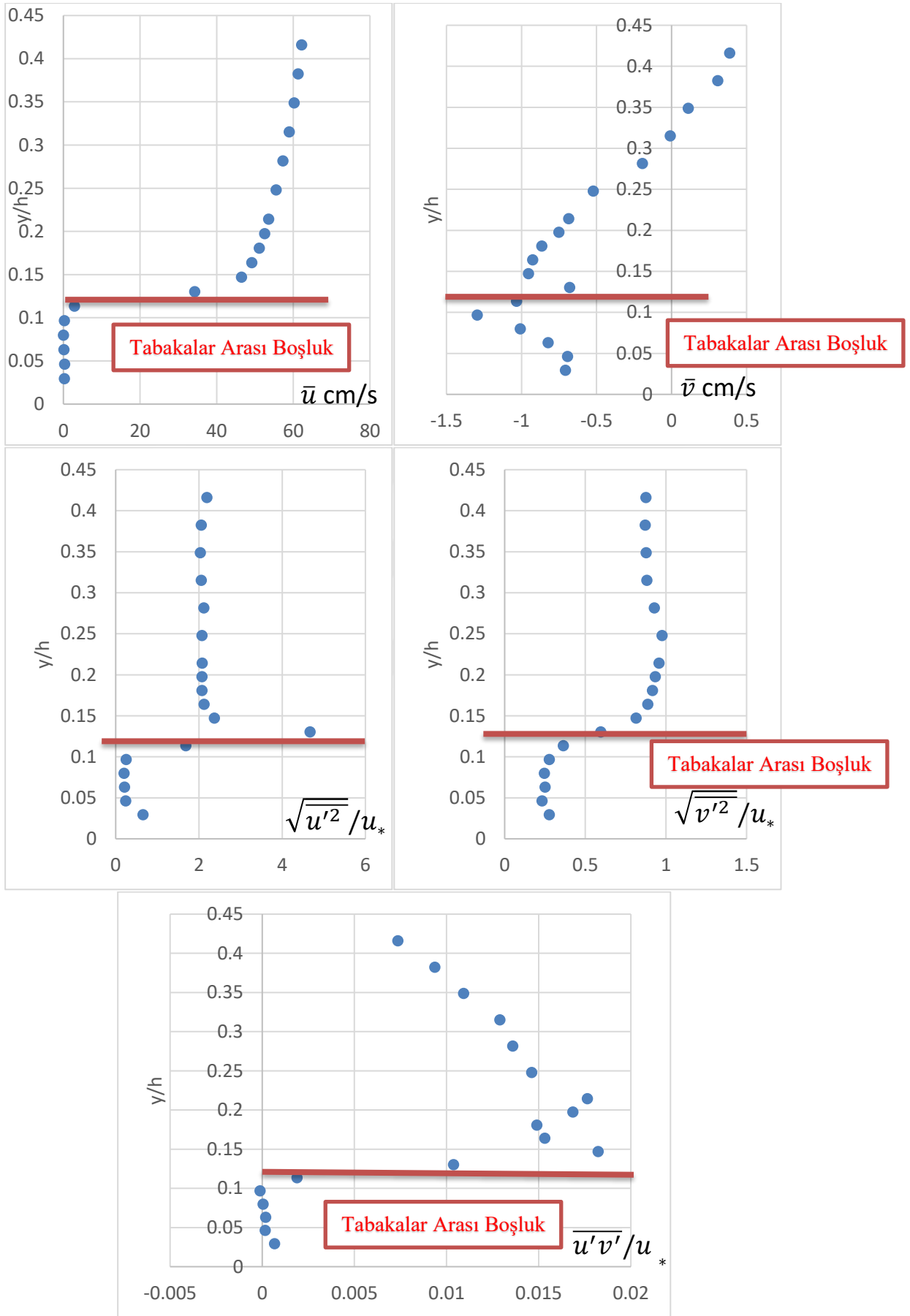


Şekil A.1 : 1. Deney hız vektörleri.

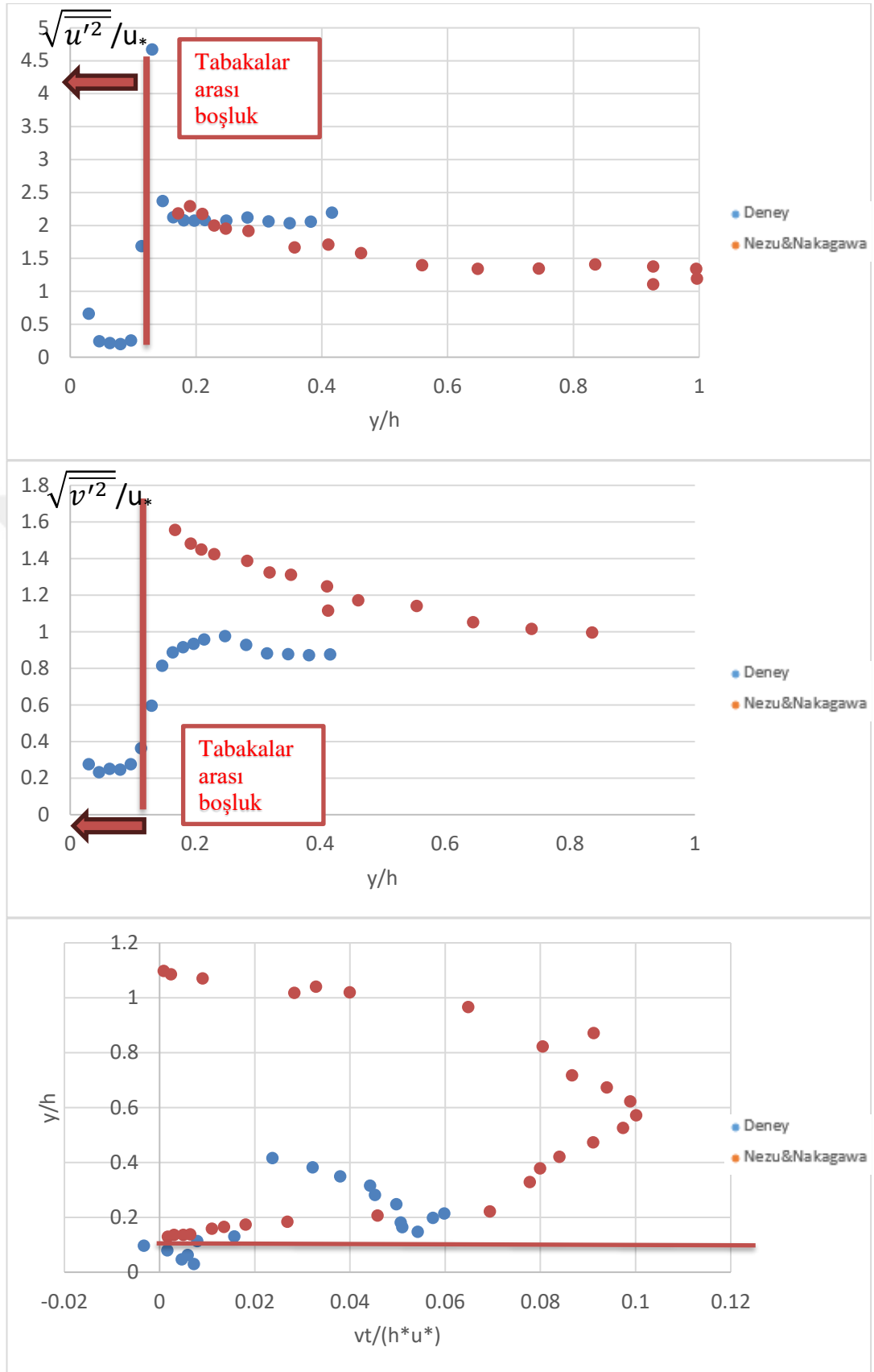




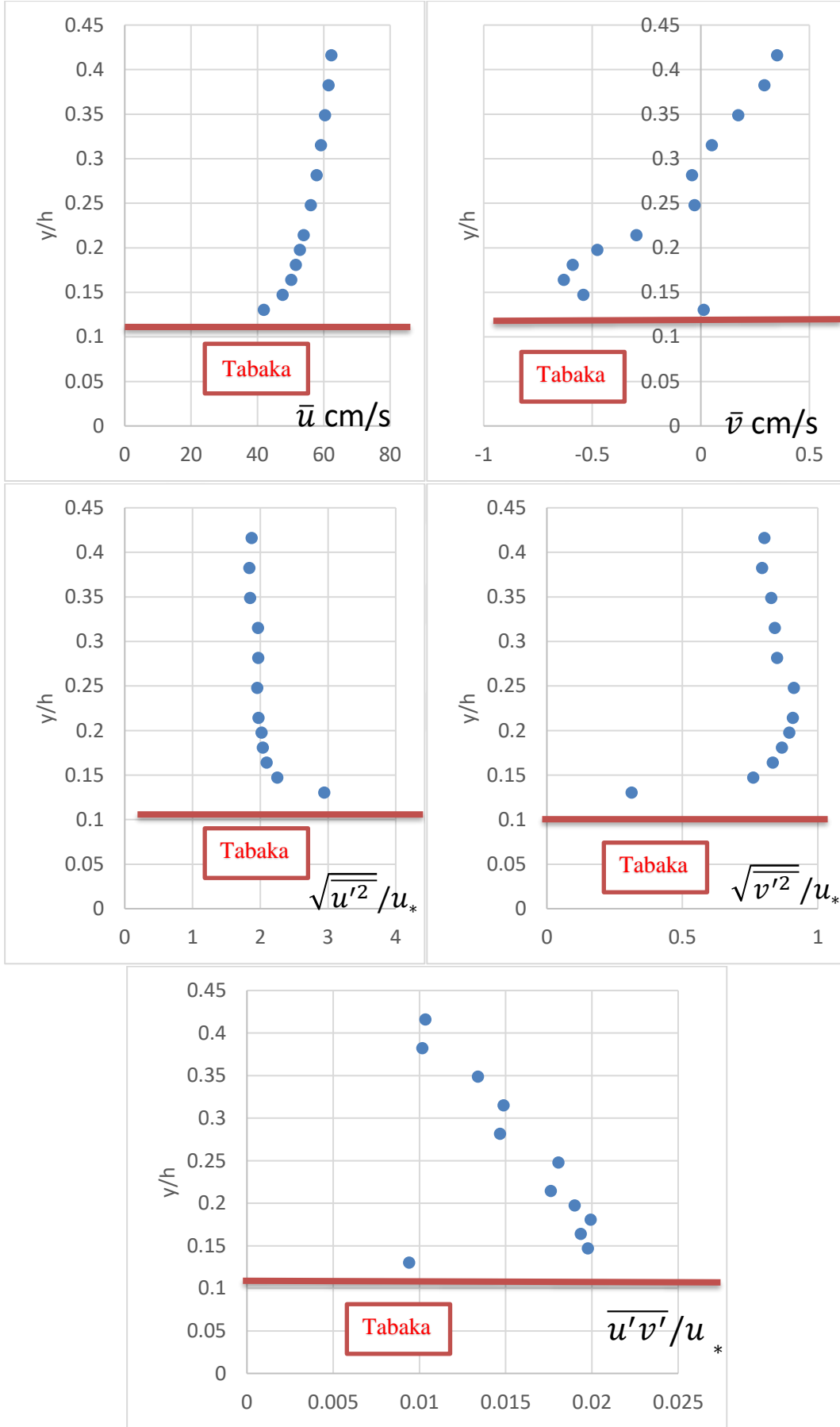
Şekil A.3 : 1. Deneysel karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



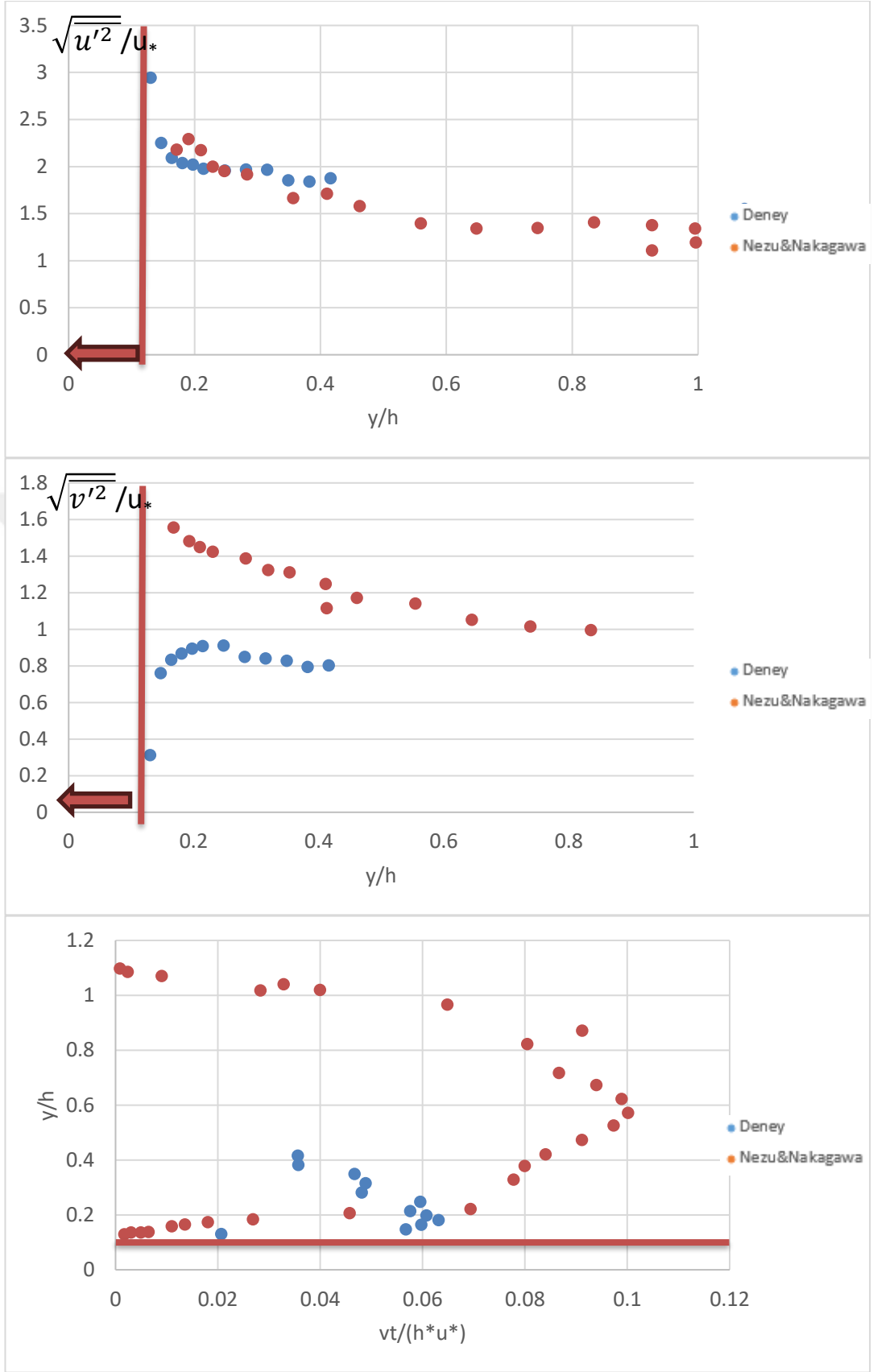
Şekil A.4 : 1. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



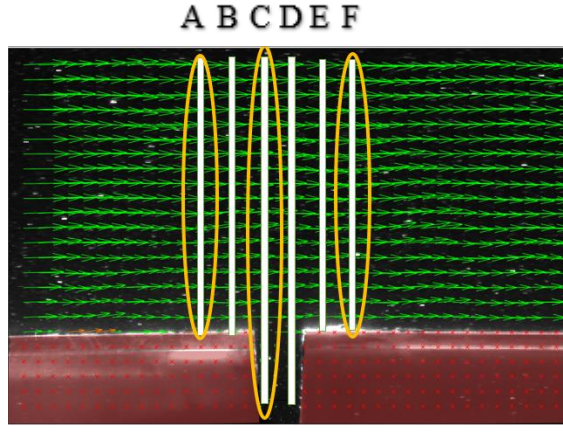
Şekil A.5 : 1. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



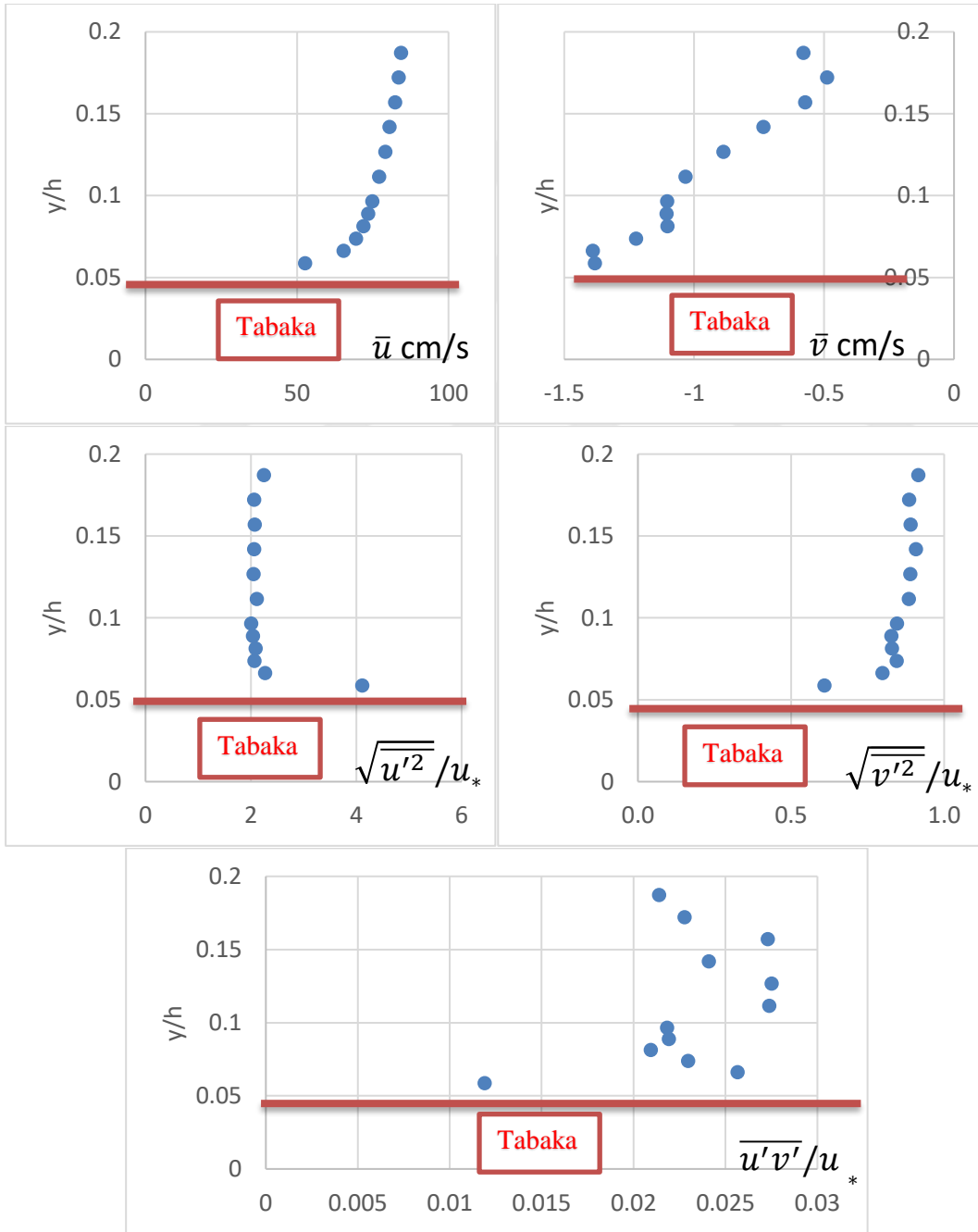
Şekil A.6 : 1. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).



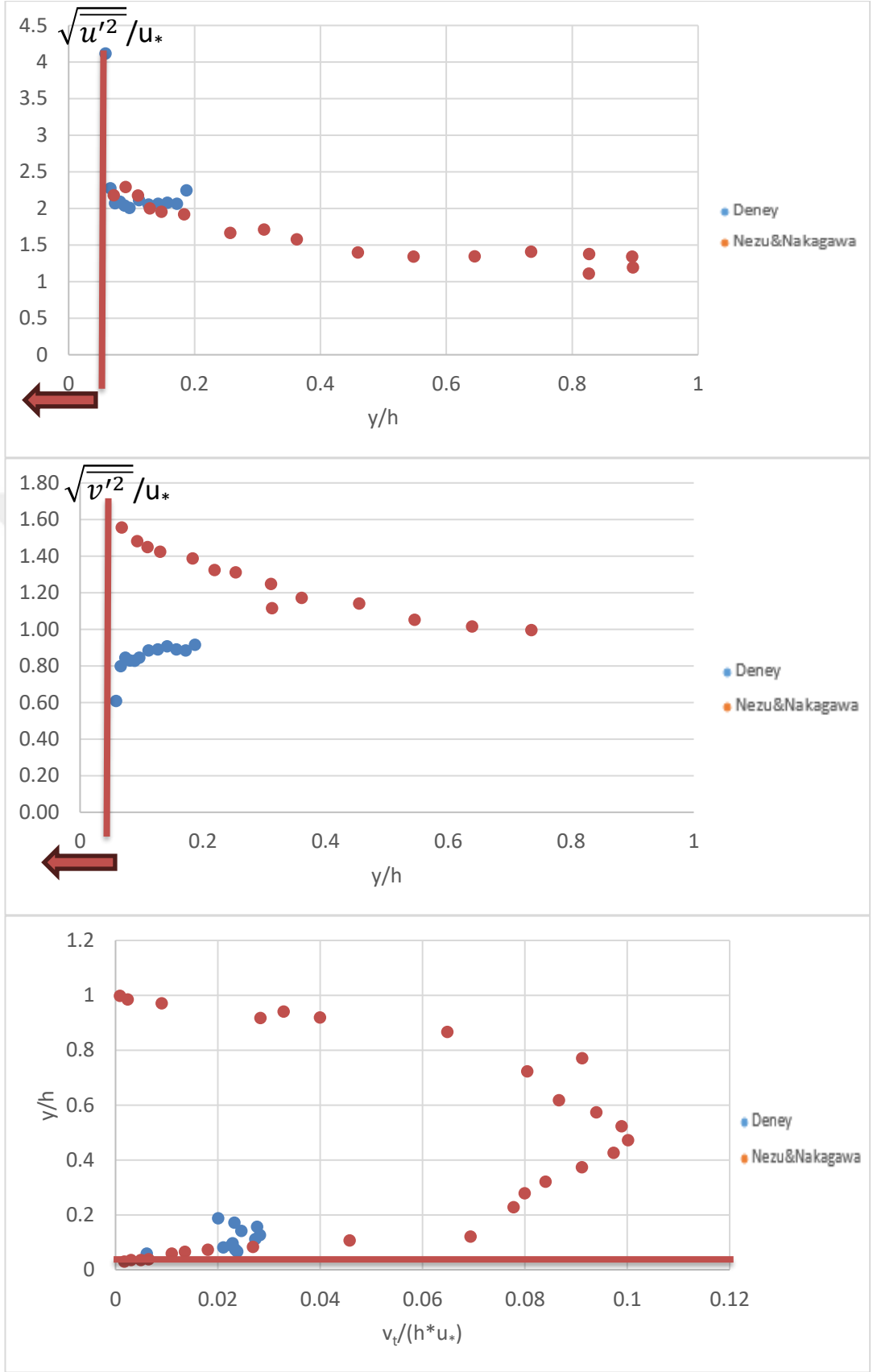
Şekil A.7 : 1. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



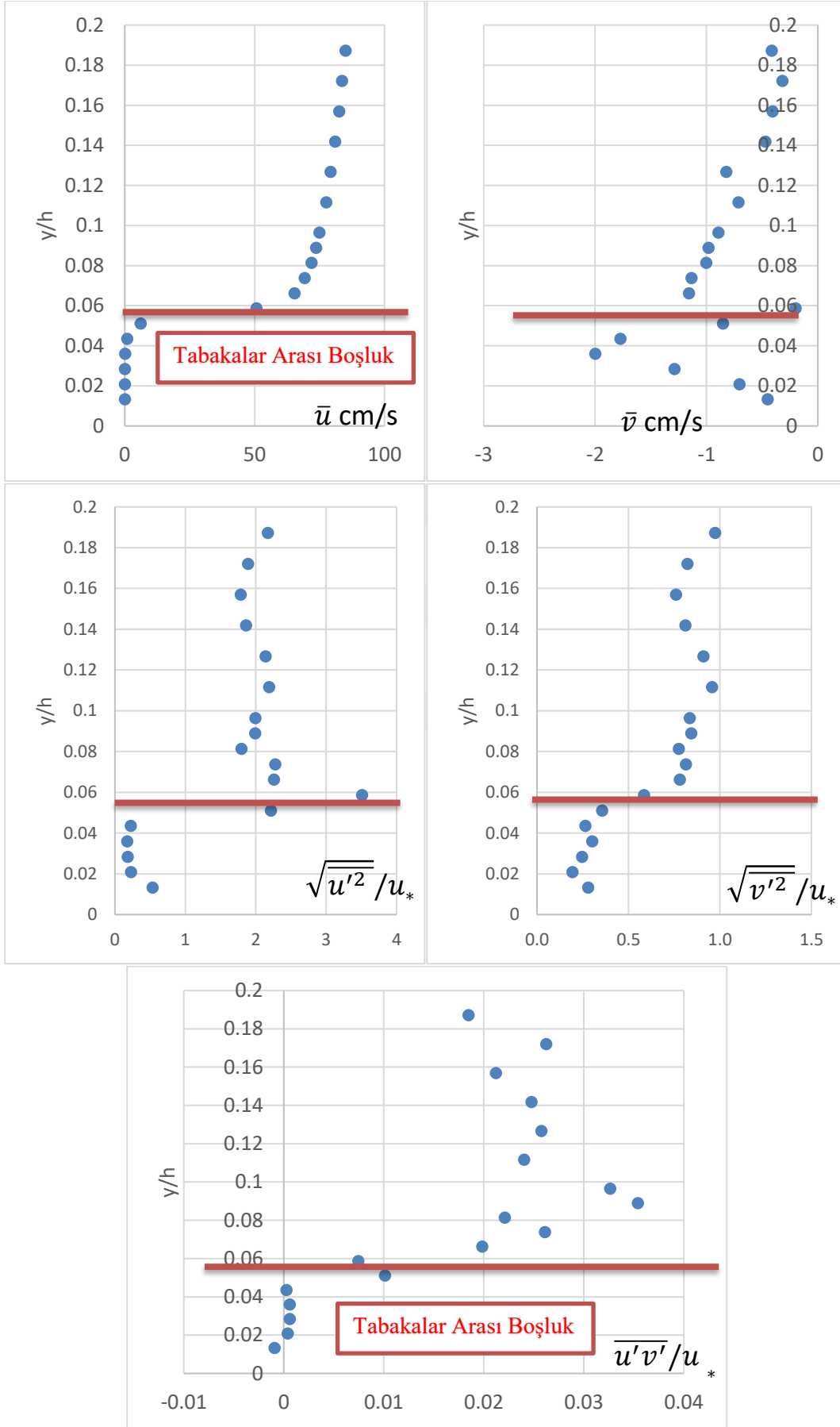
Şekil A.8 : 2. Deney hız vektörleri.



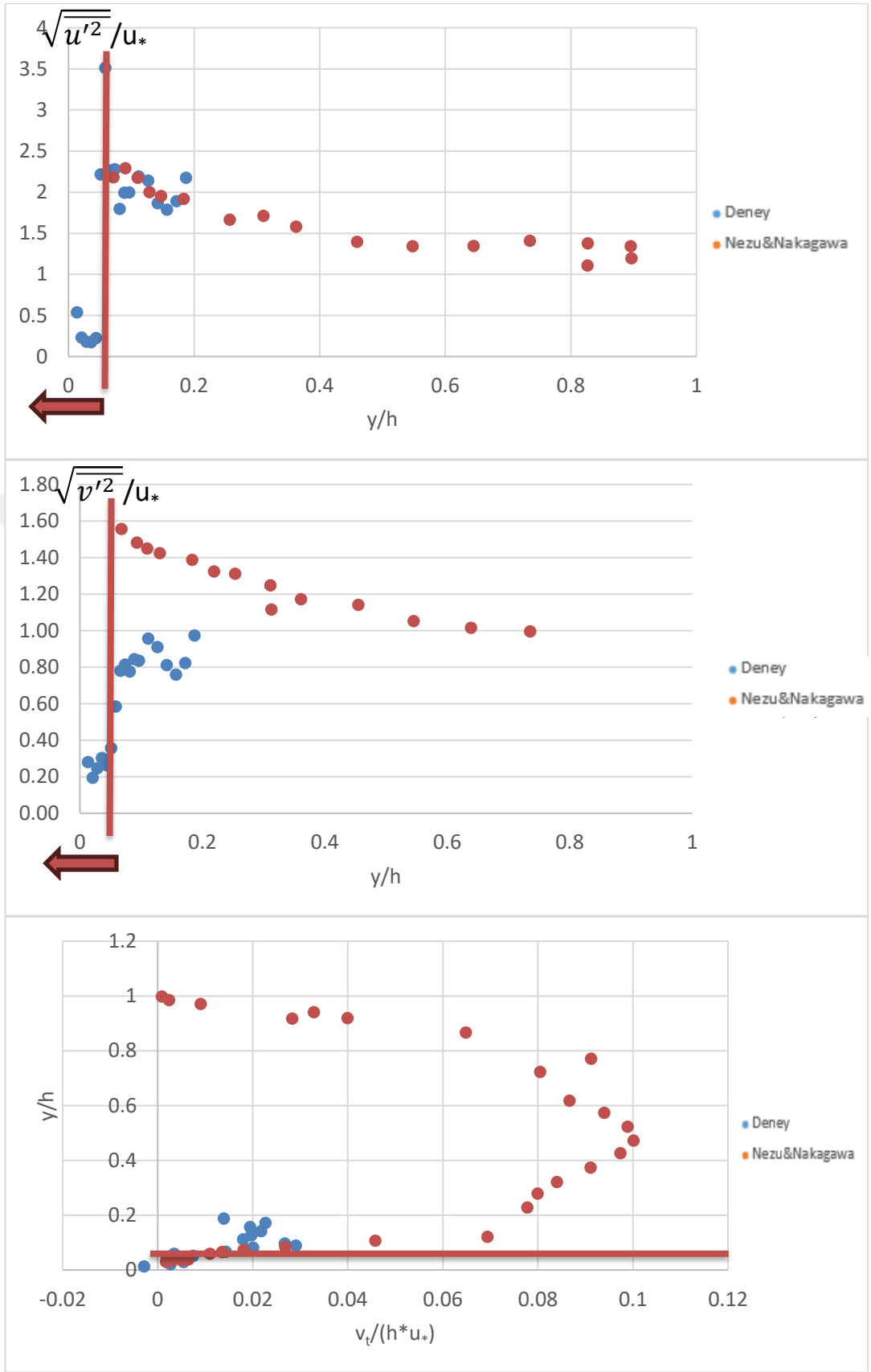
Şekil A.9 : 2. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



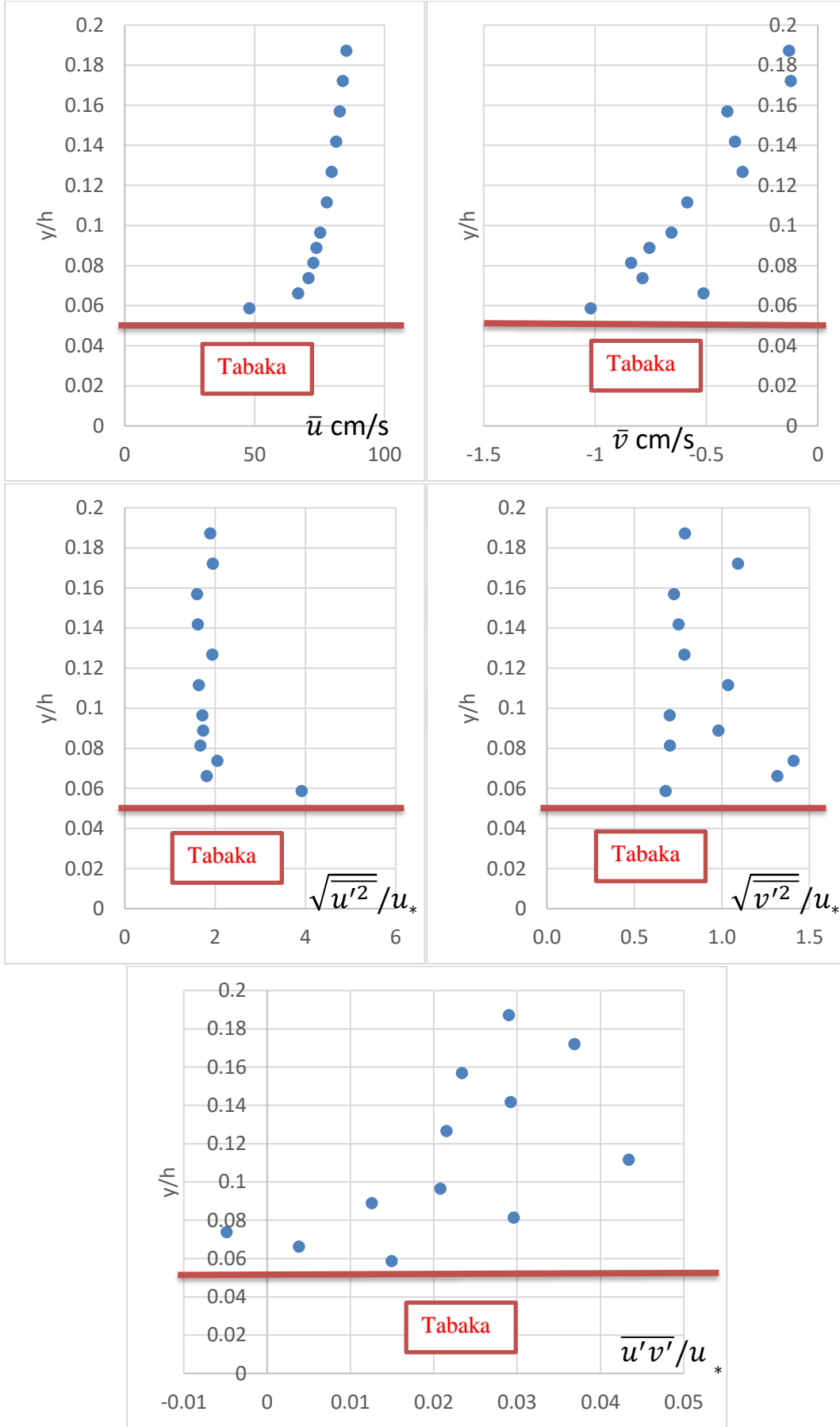
Şekil A.10 : 2. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



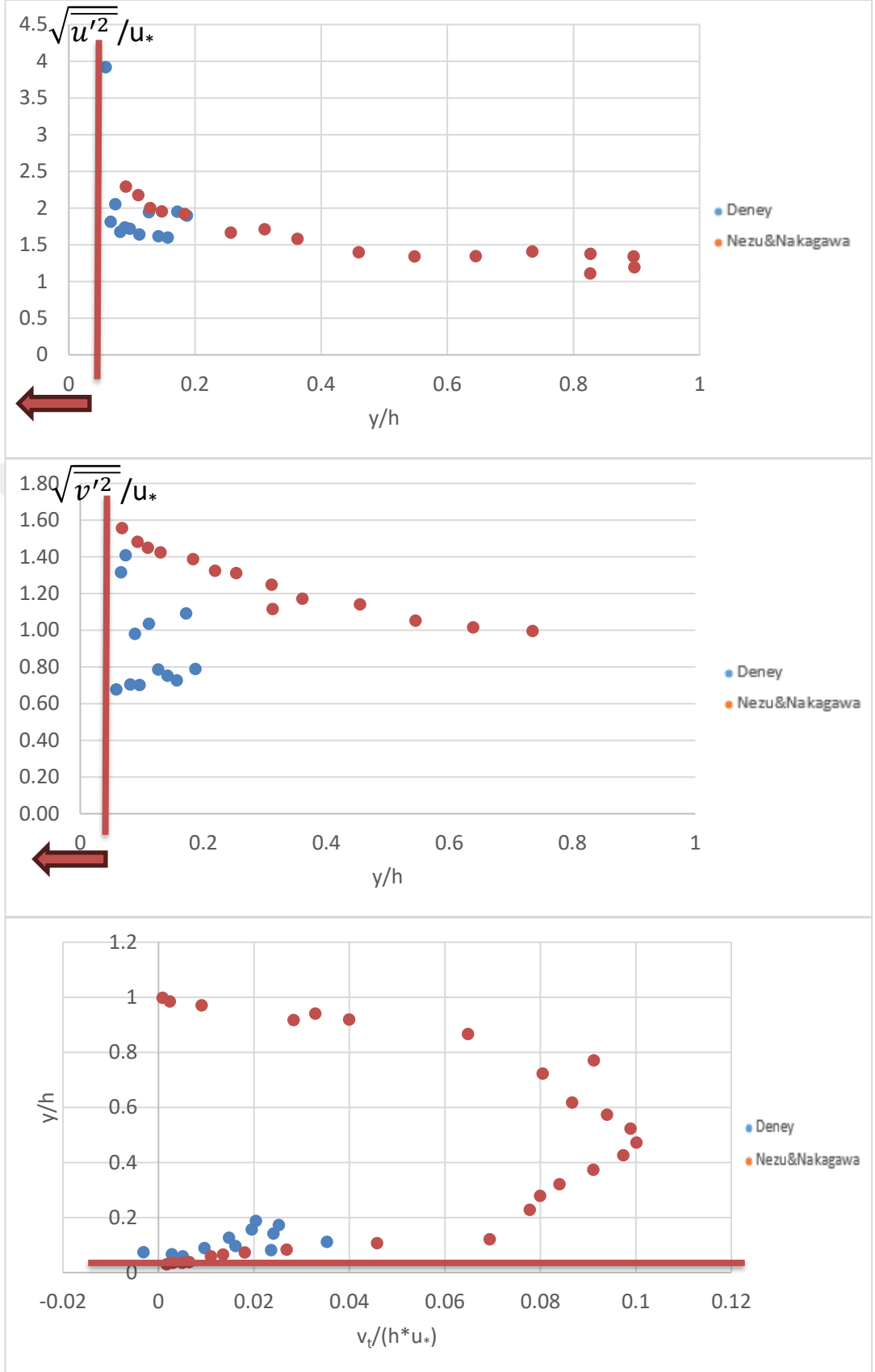
Şekil A.11 : 2. Denei türbülans bileşenleri (C kesiti).



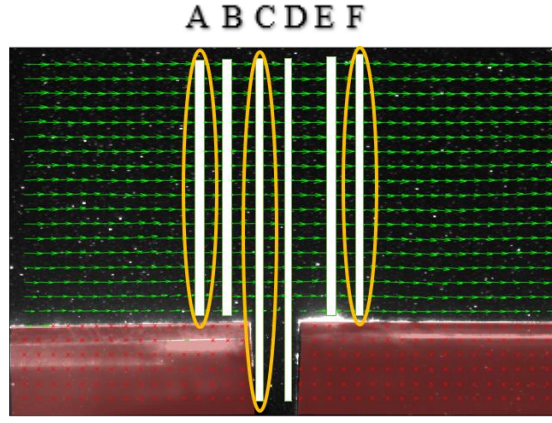
Şekil A.12 : 2. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



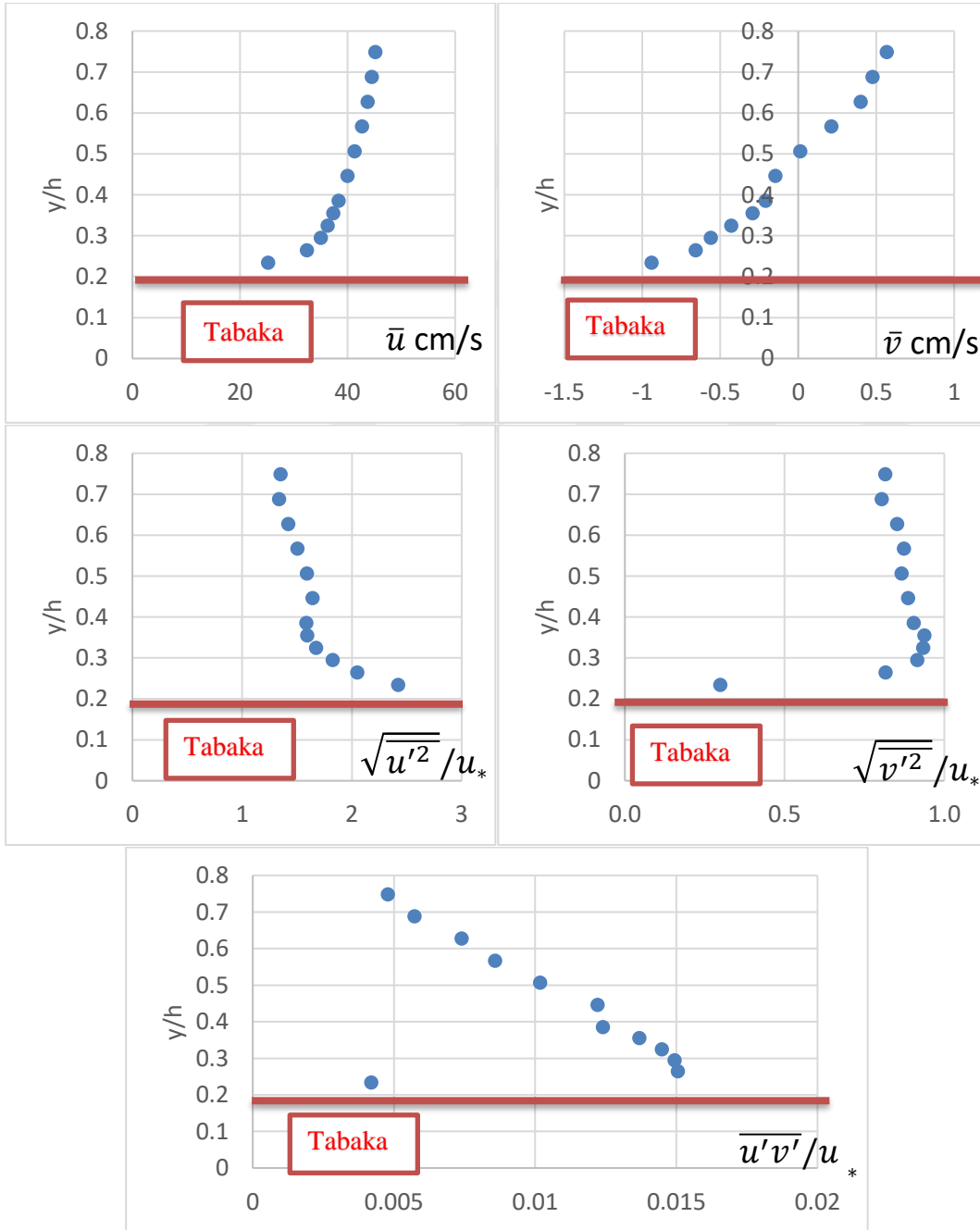
Şekil A.13 : 2. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).



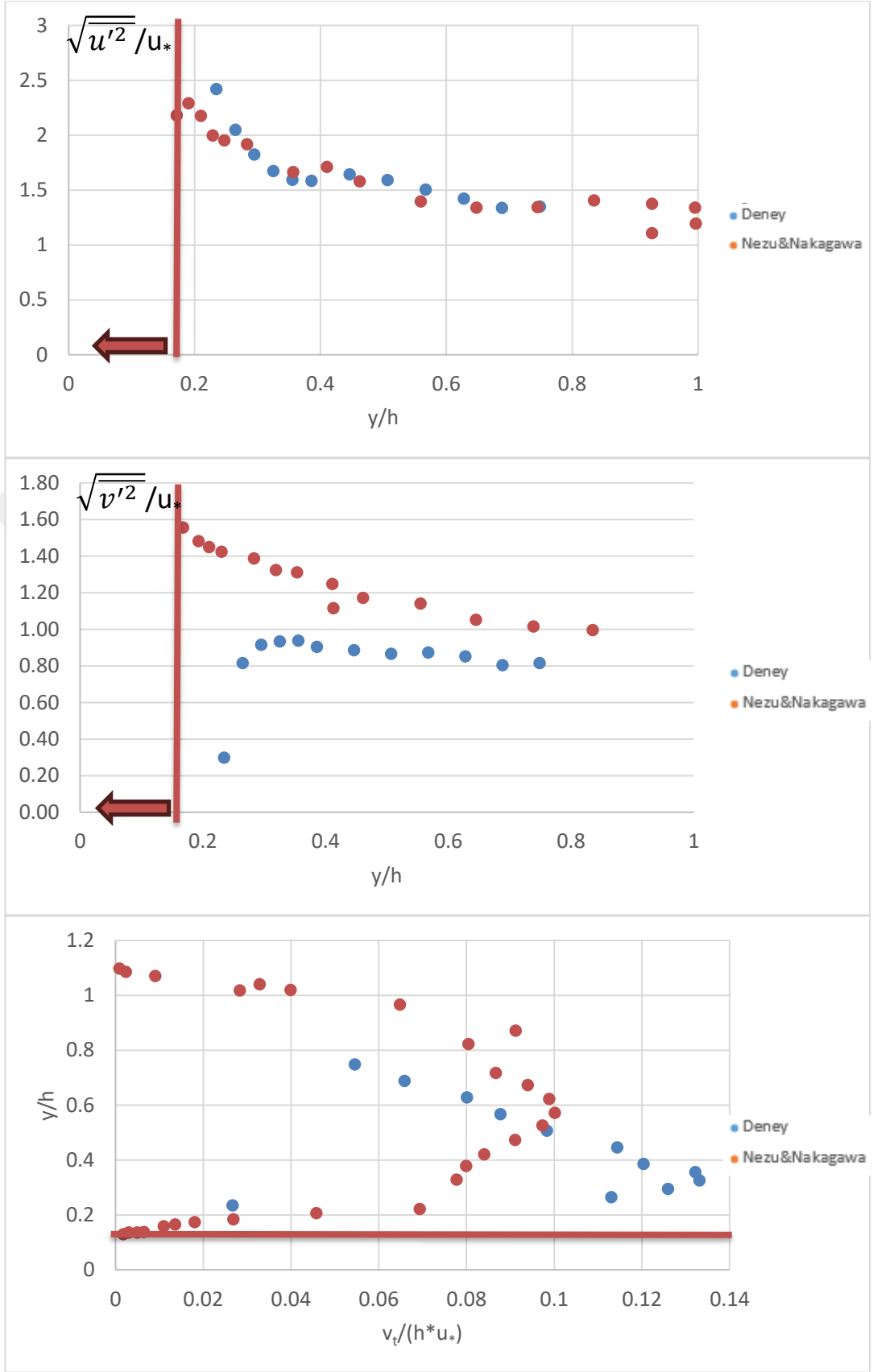
Şekil A.14 : 2. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



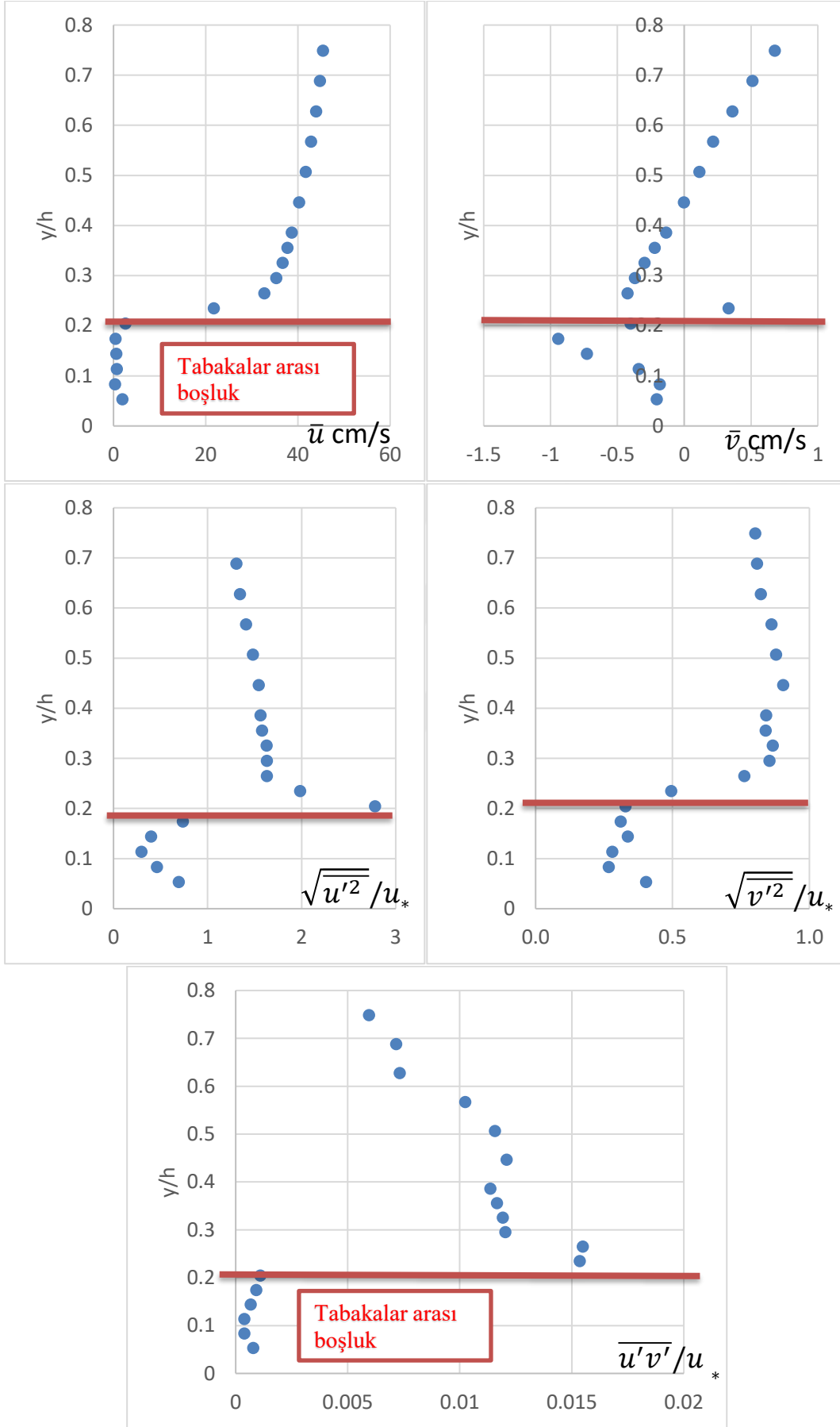
Şekil A.15 : 3. Deney hız vektörleri.



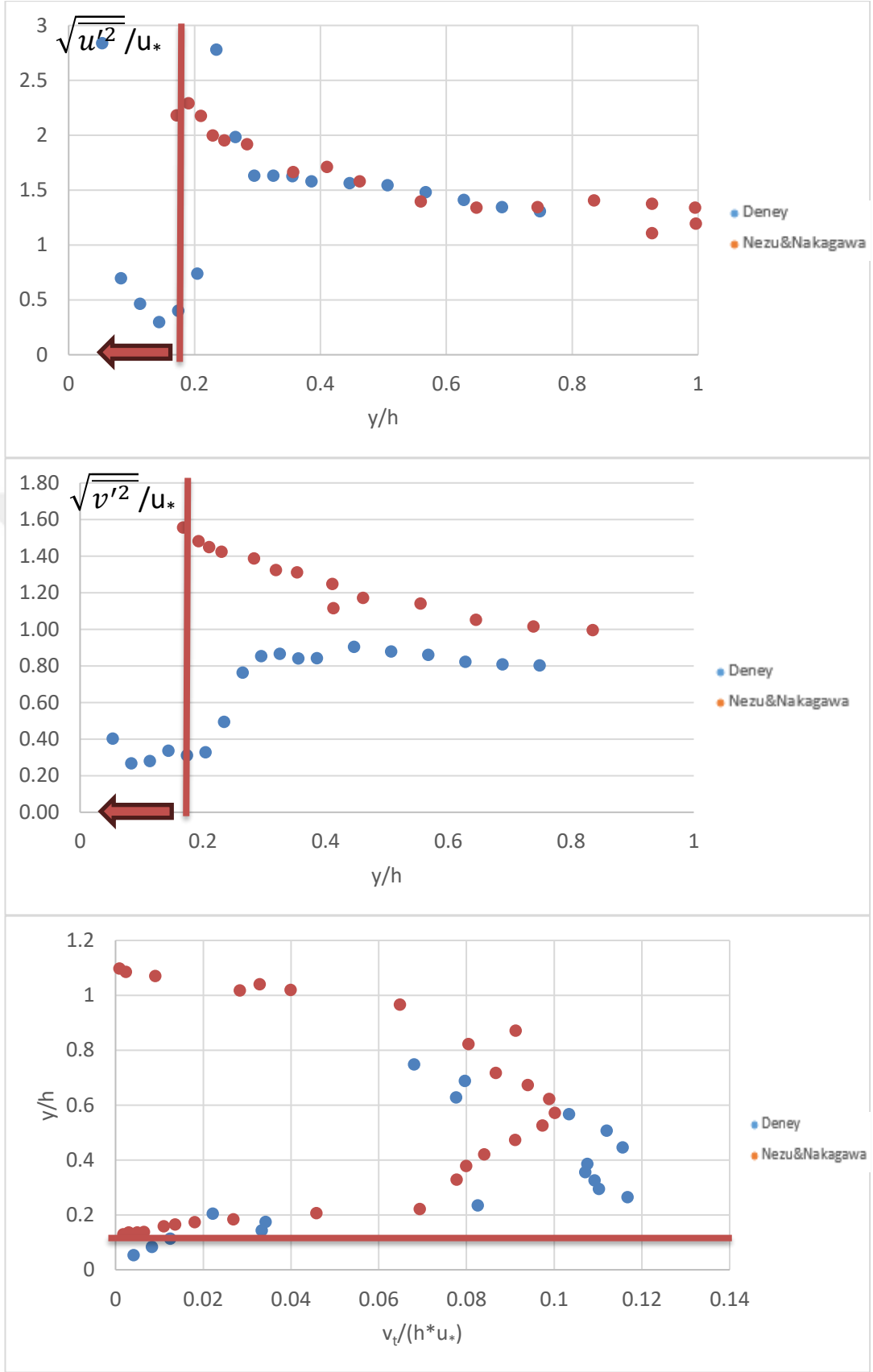
Şekil A.16 : 3. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



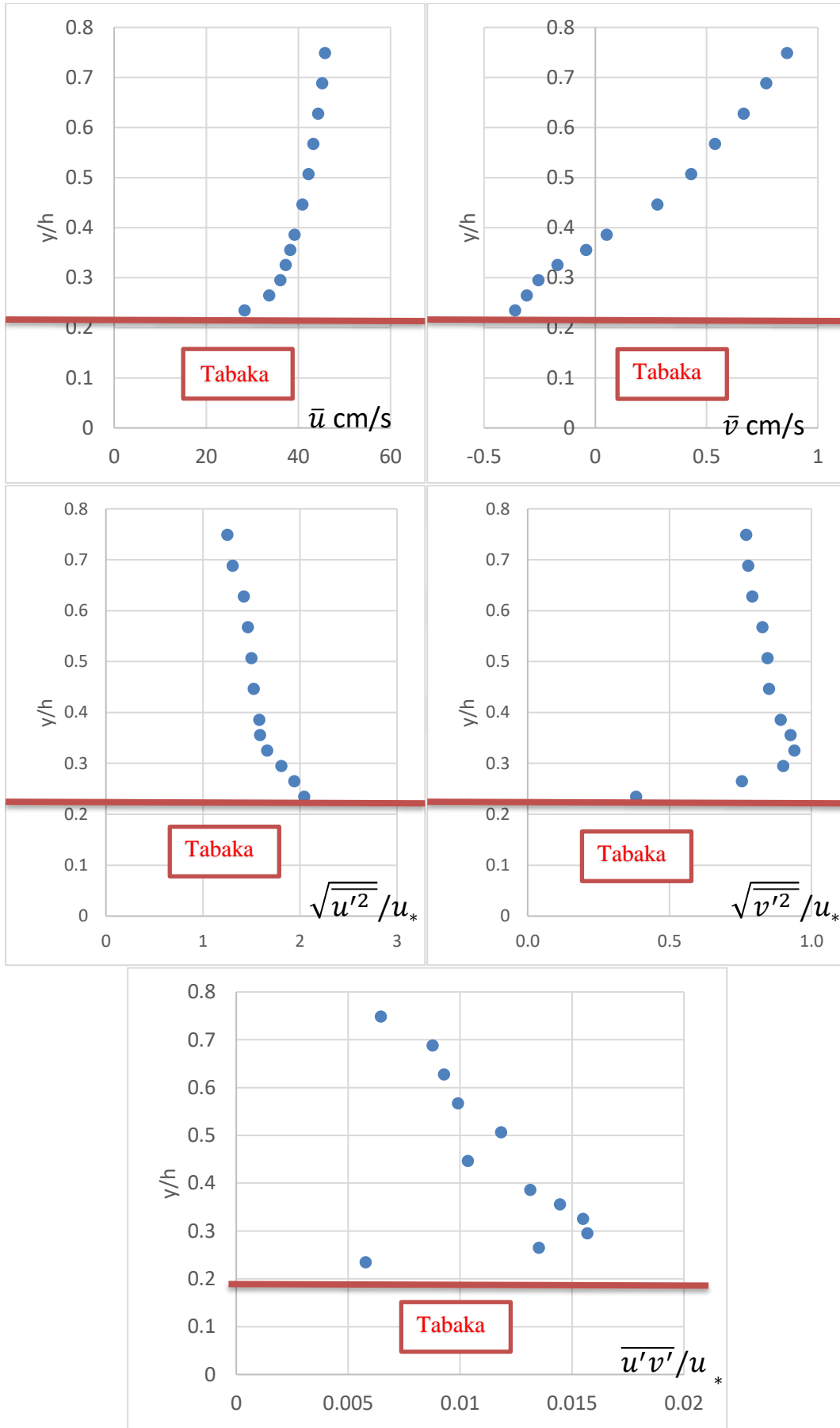
Şekil A.17 : 3. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



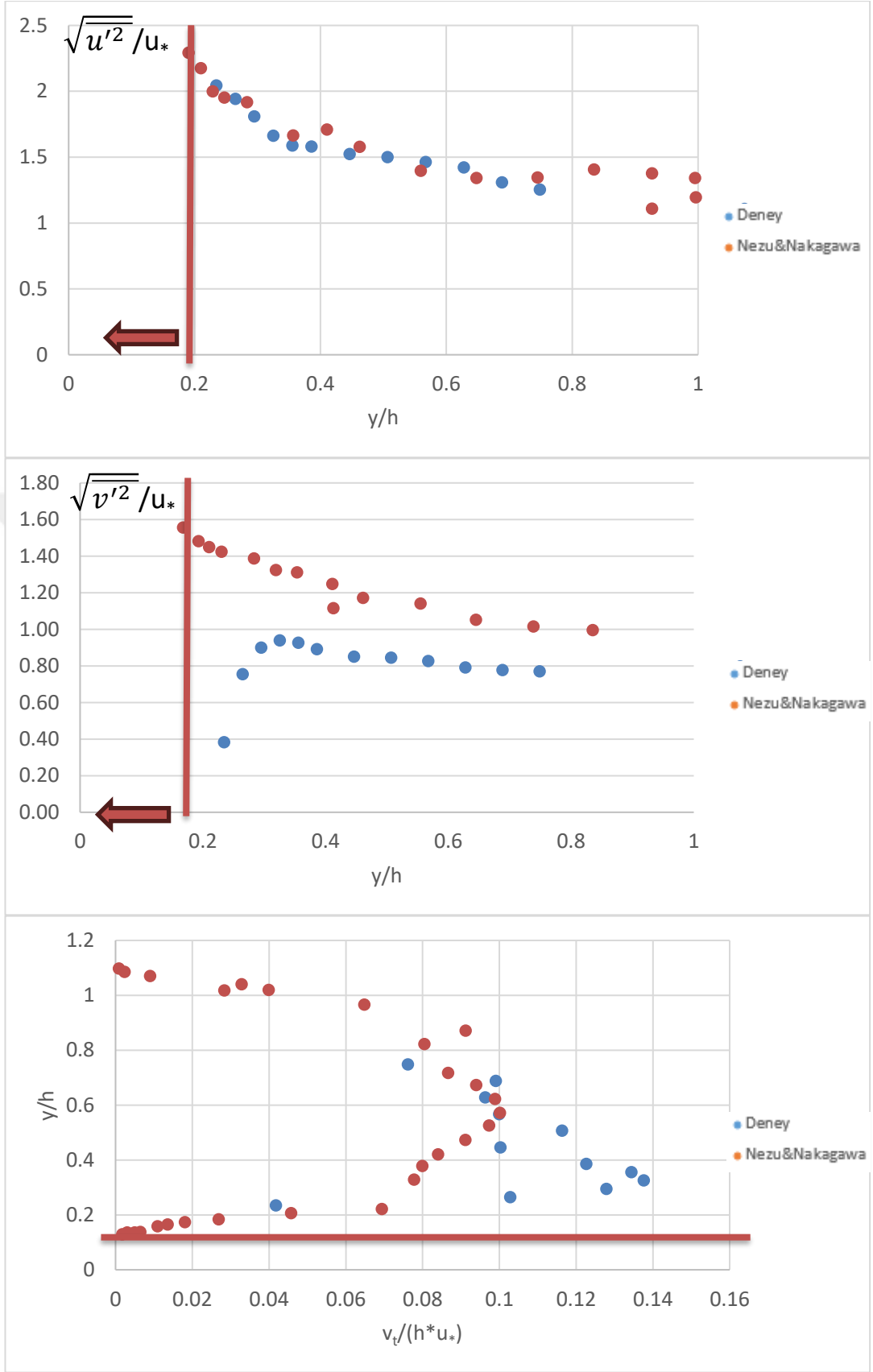
Şekil A.18 : 3. Denei türbülans bileşenleri (C kesiti).



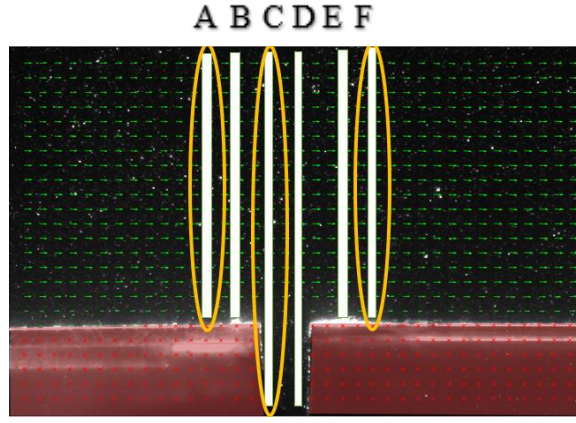
Şekil A.19 : 3. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



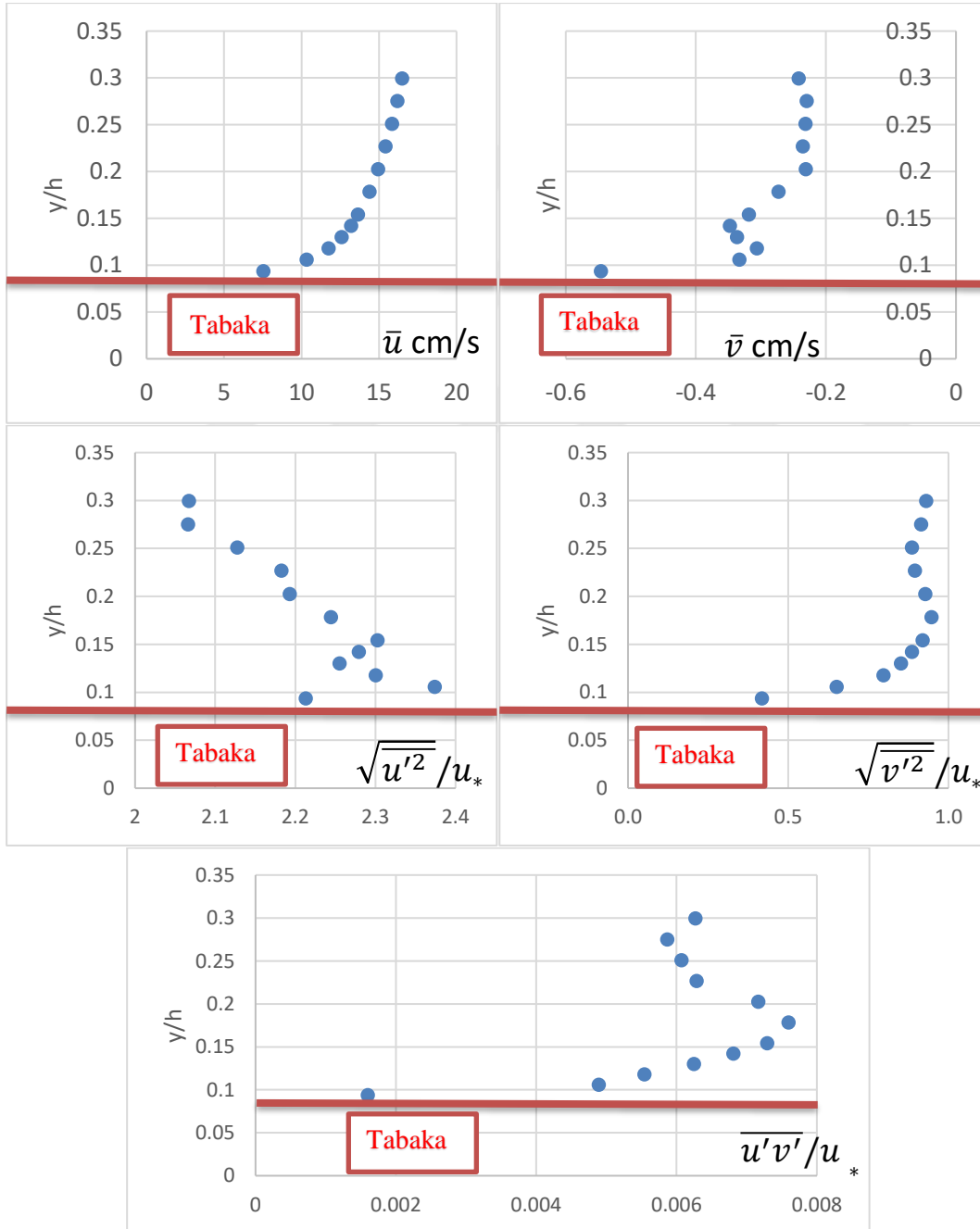
Şekil A.20 : 3. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).



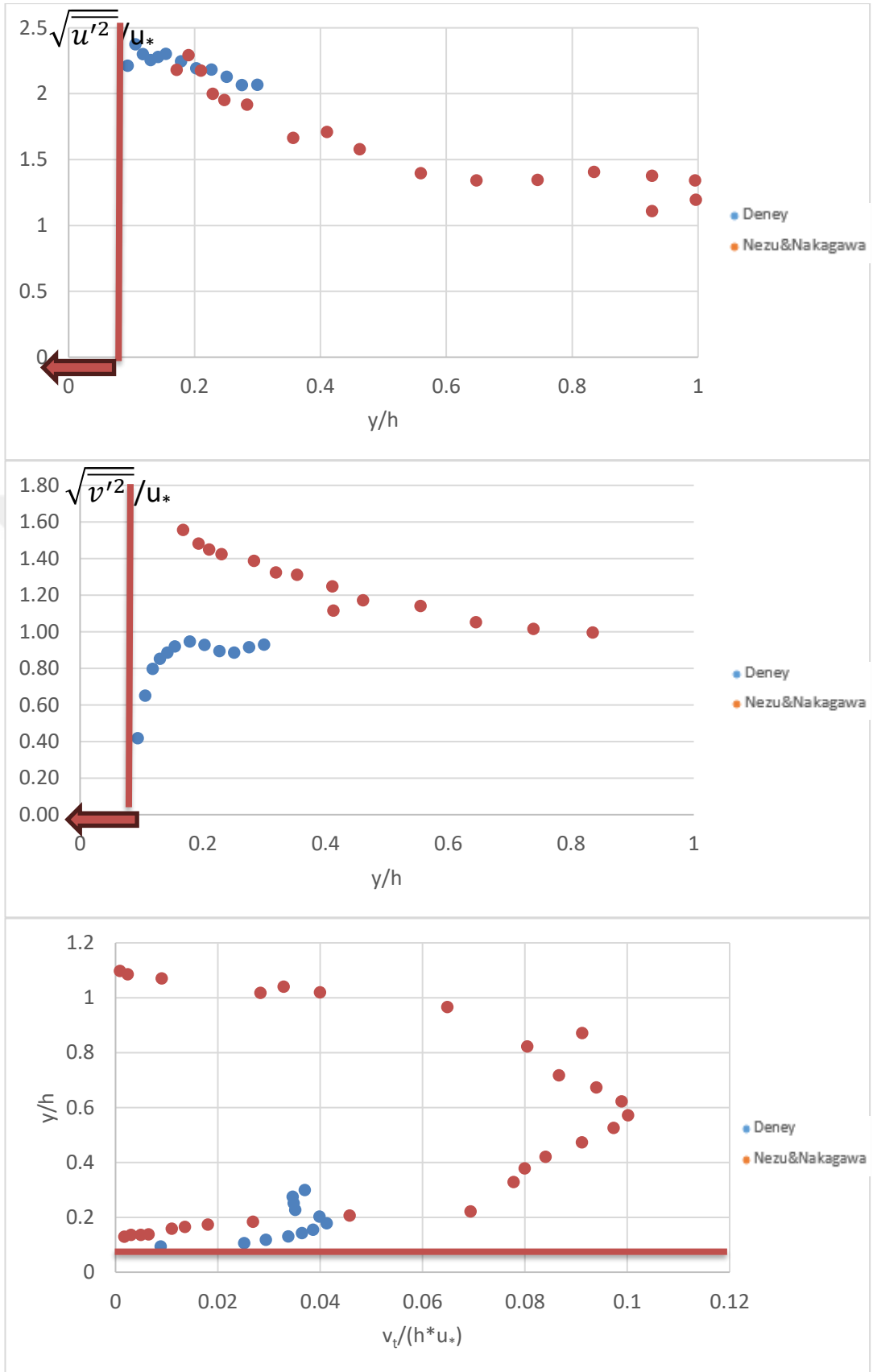
Şekil A.21 : 3. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



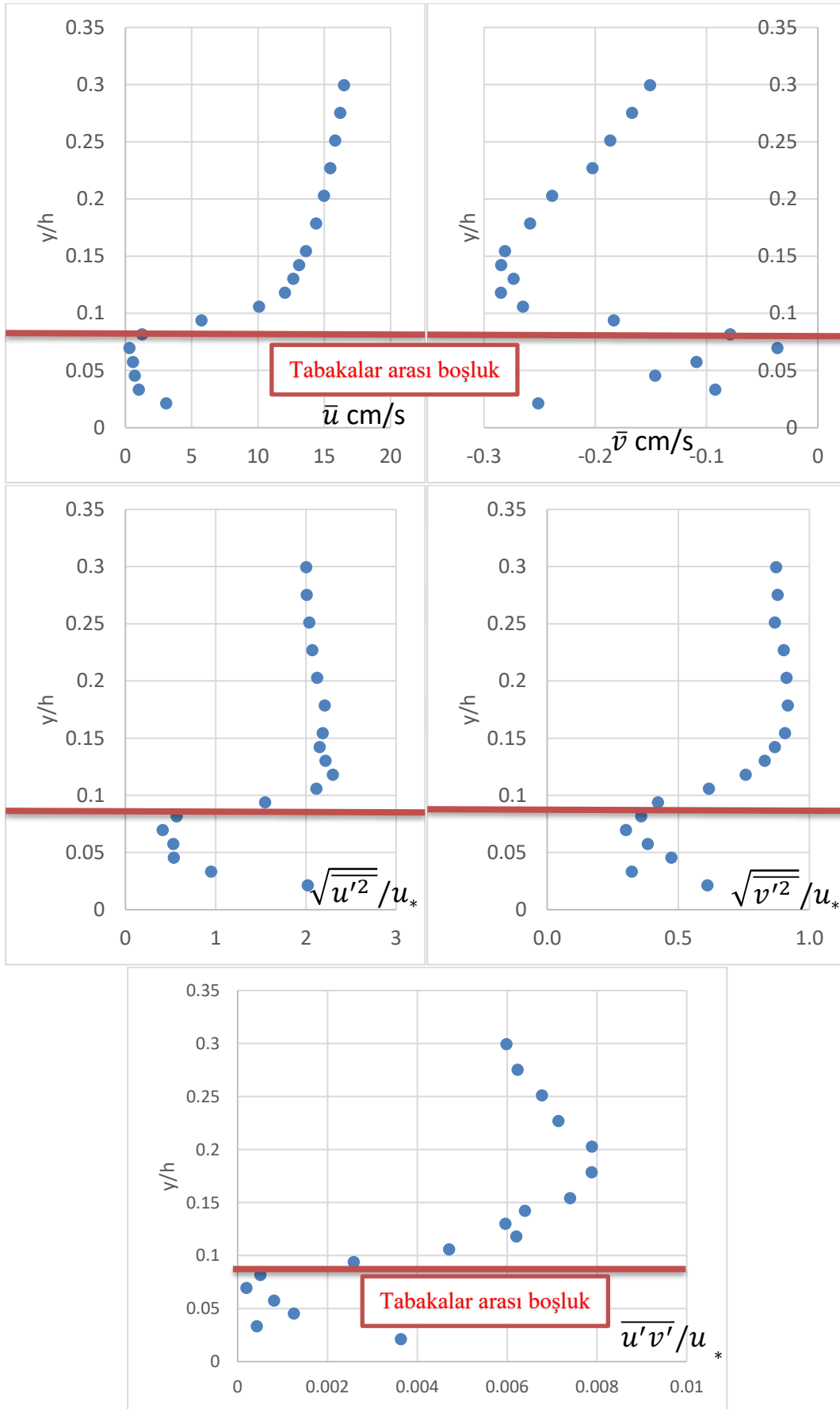
Şekil A.22 : 4. Deney hız vektörleri.



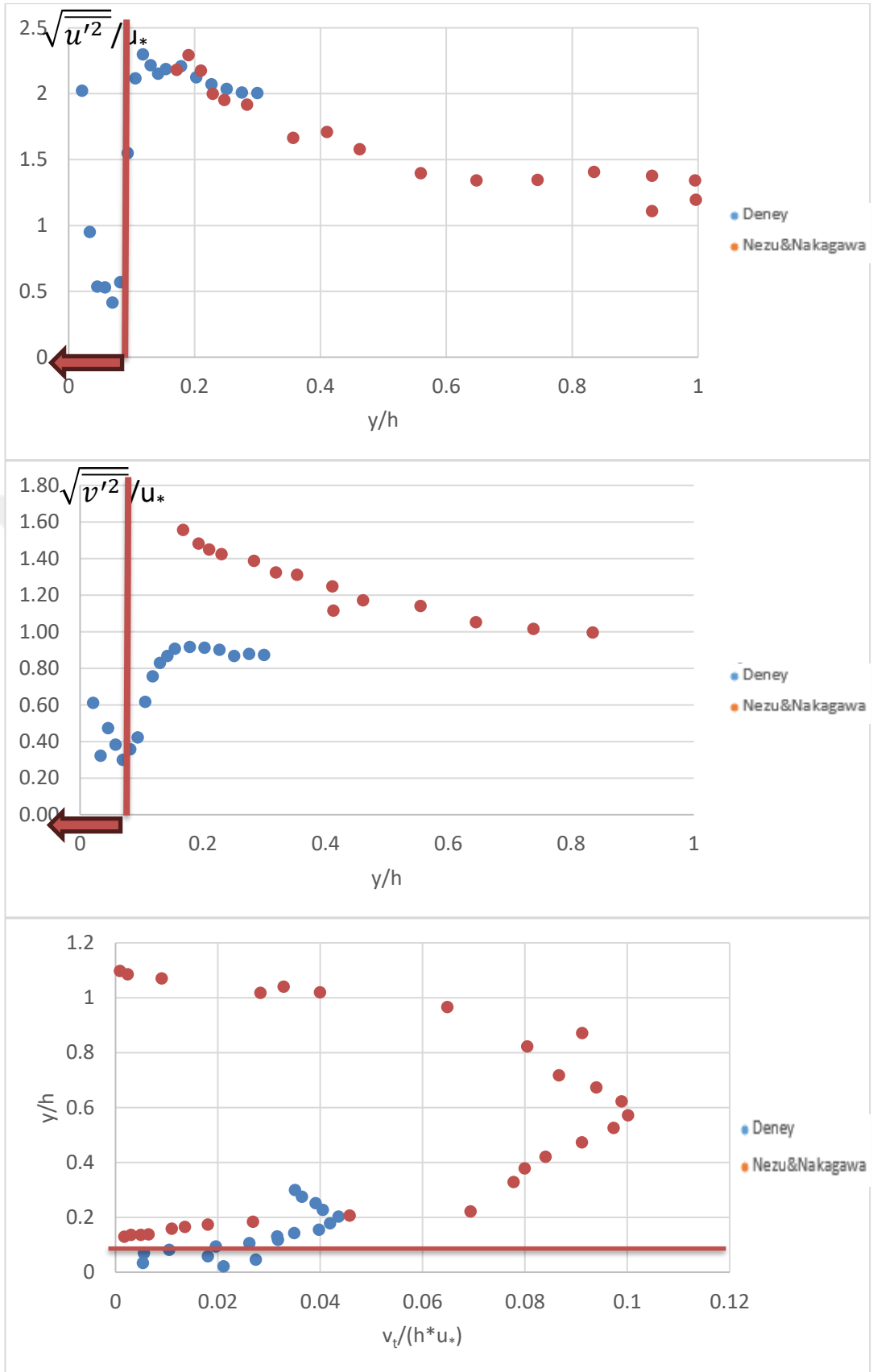
Şekil A.23 : 4. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



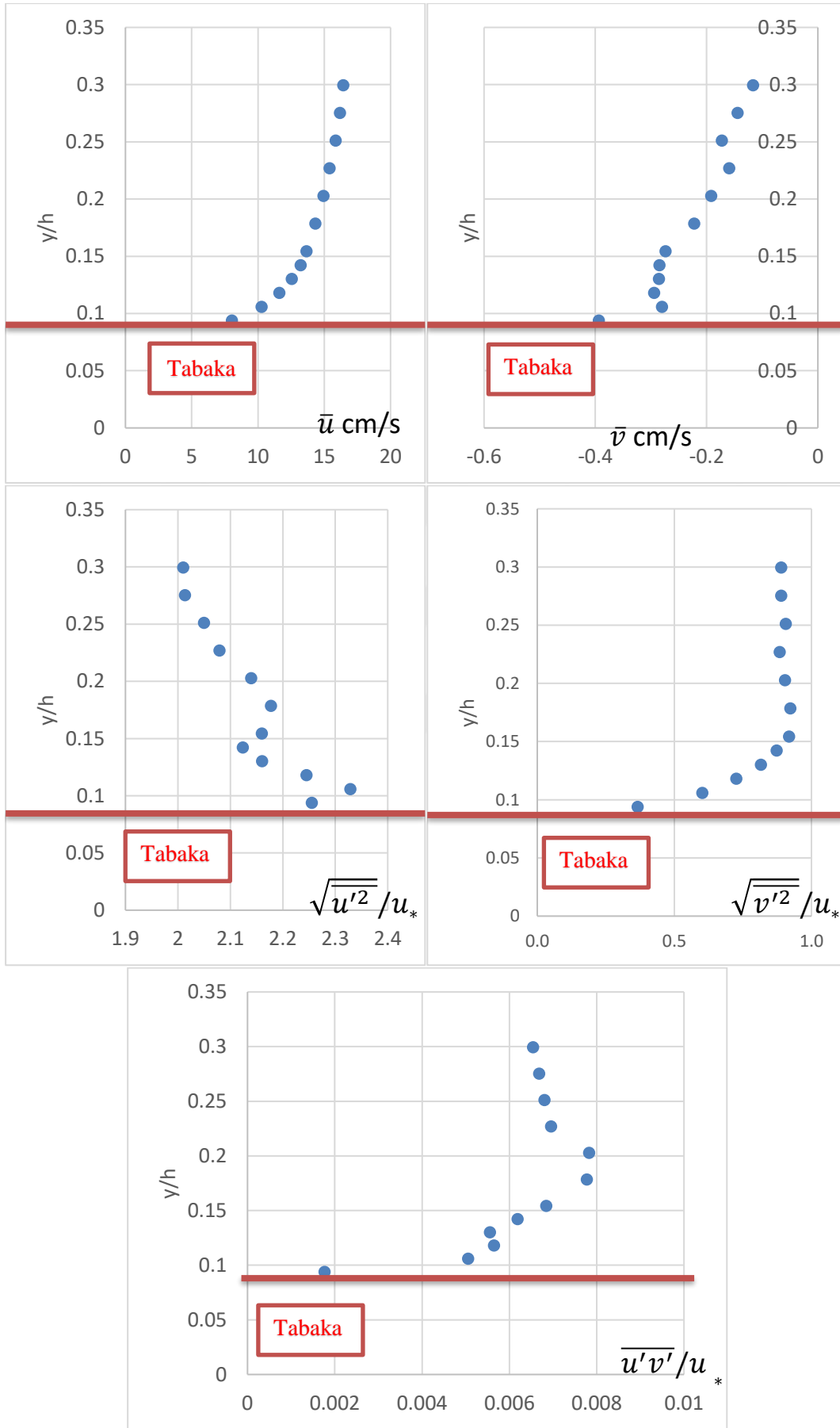
Şekil A.24 : 4. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



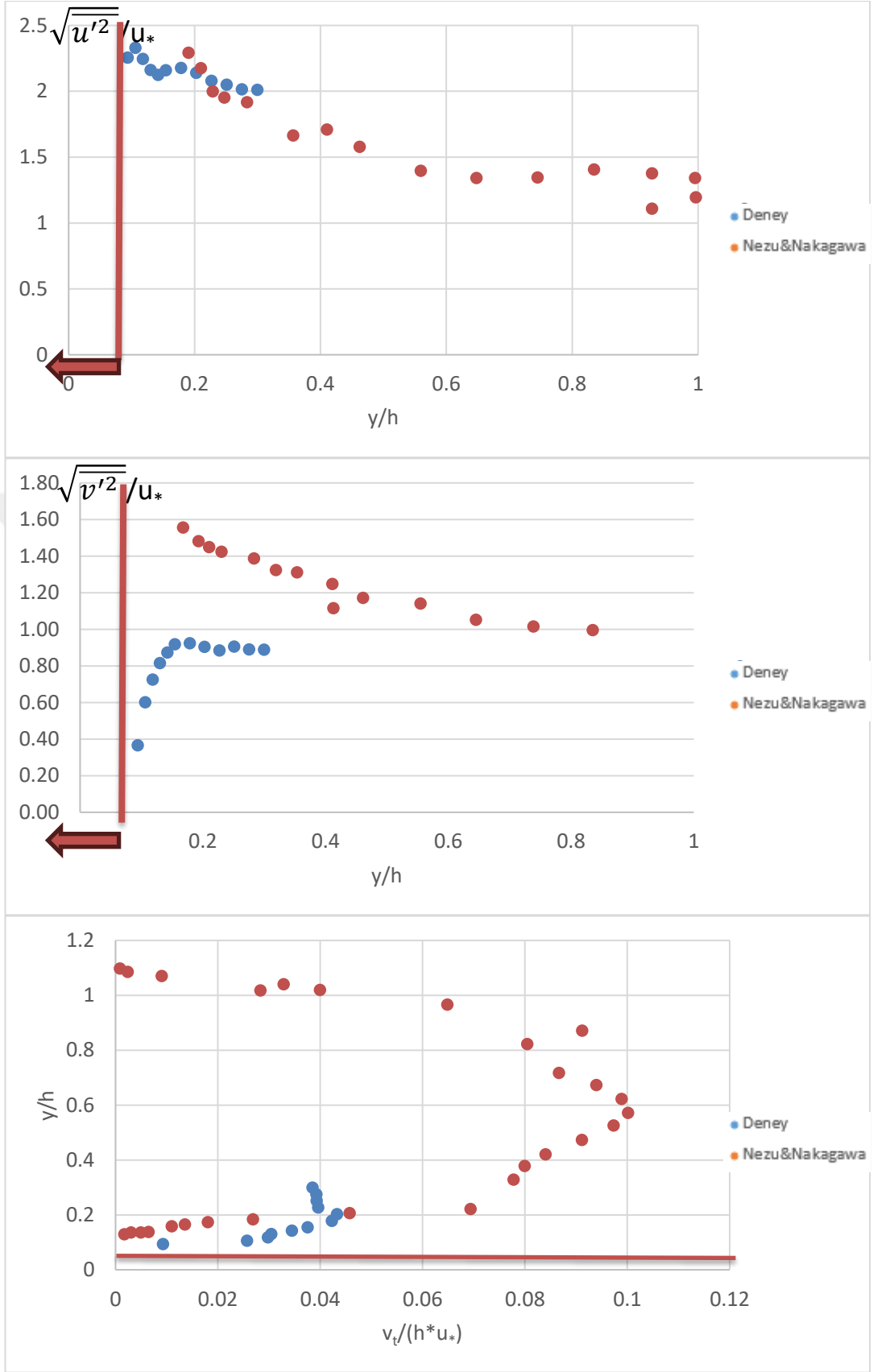
Şekil A.25 : 4. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.26 : 4. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).

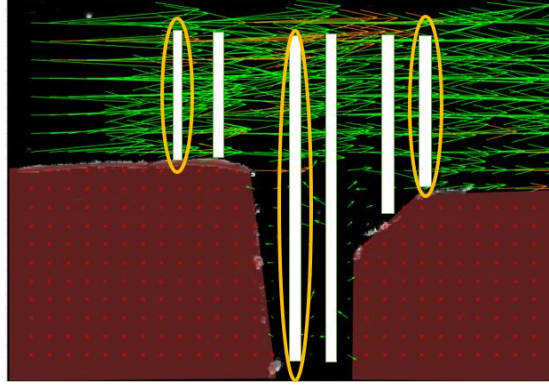


Şekil A.27 : 4. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).

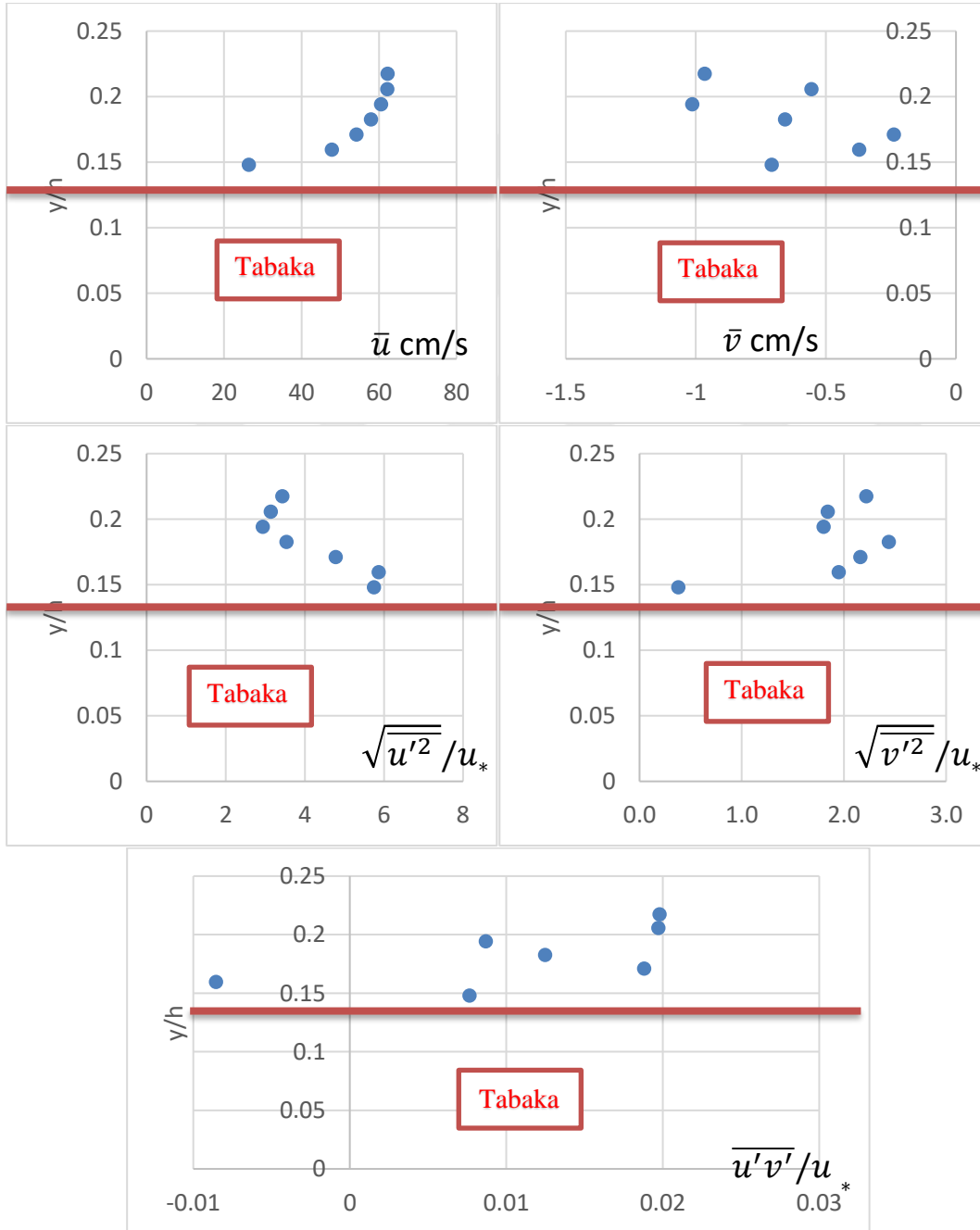


Şekil A.28 : 4. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).

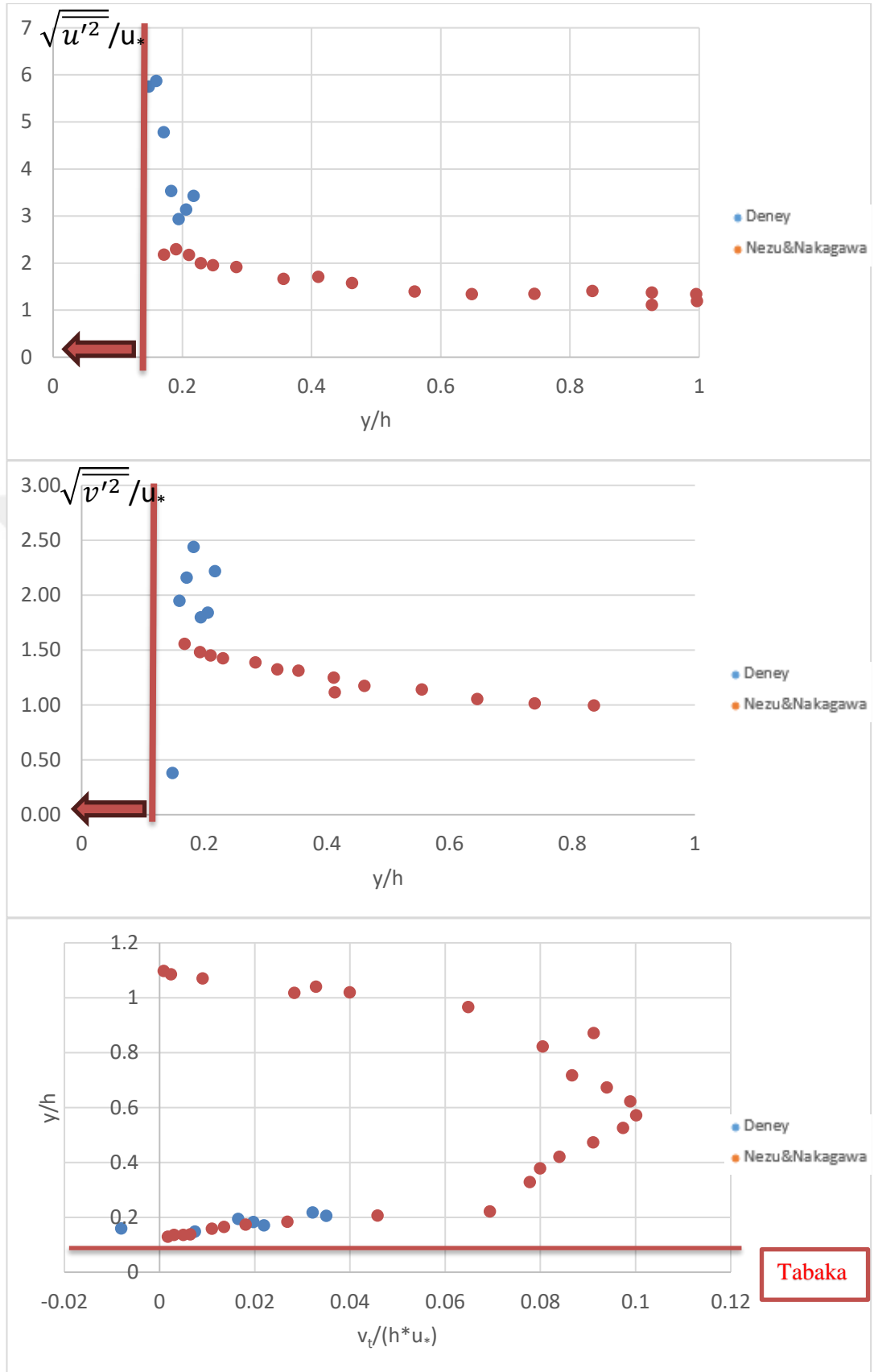
A B C D E F



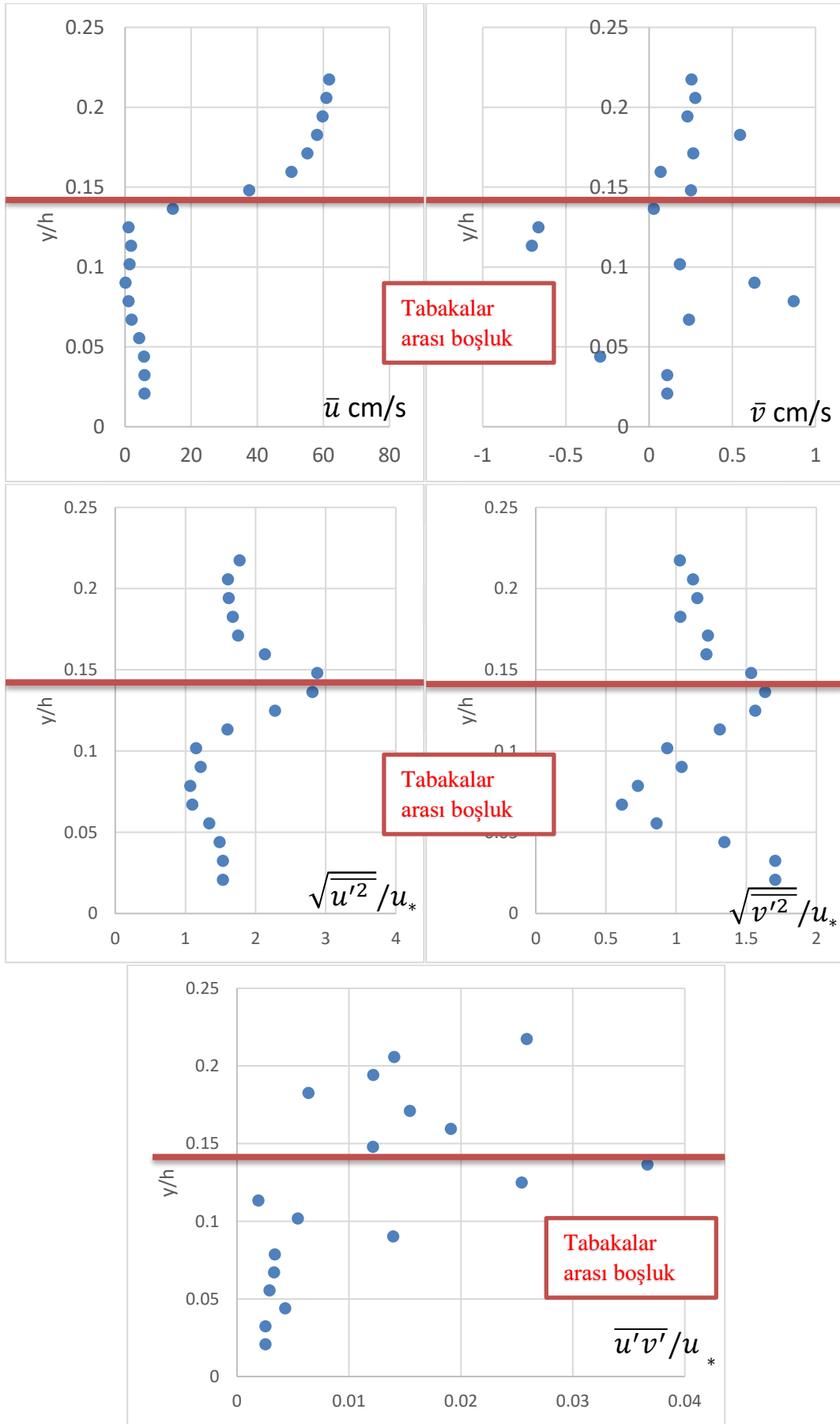
Şekil A.29 : 5. Deney hız vektörleri.



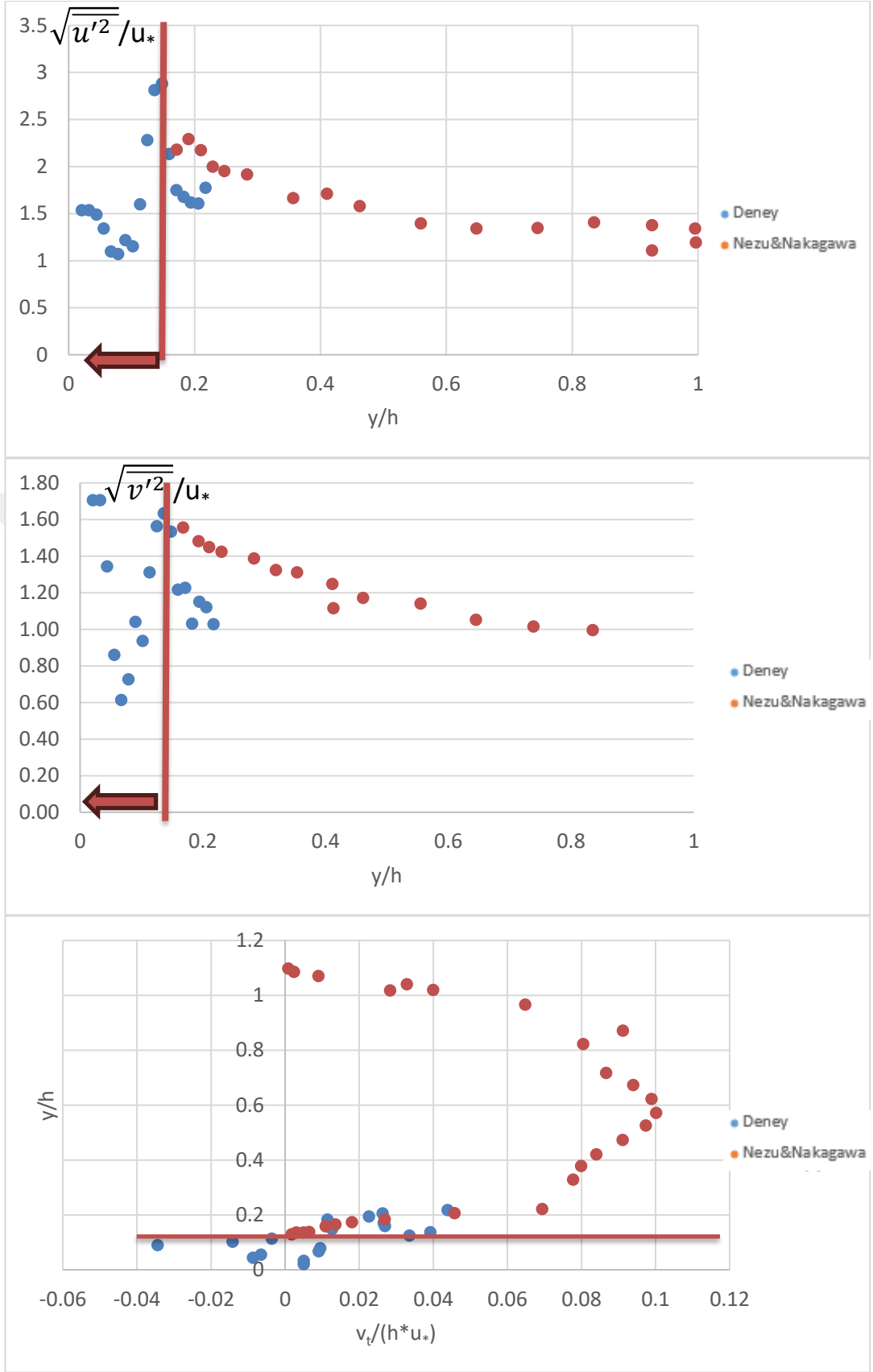
Şekil A.30 : 5. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



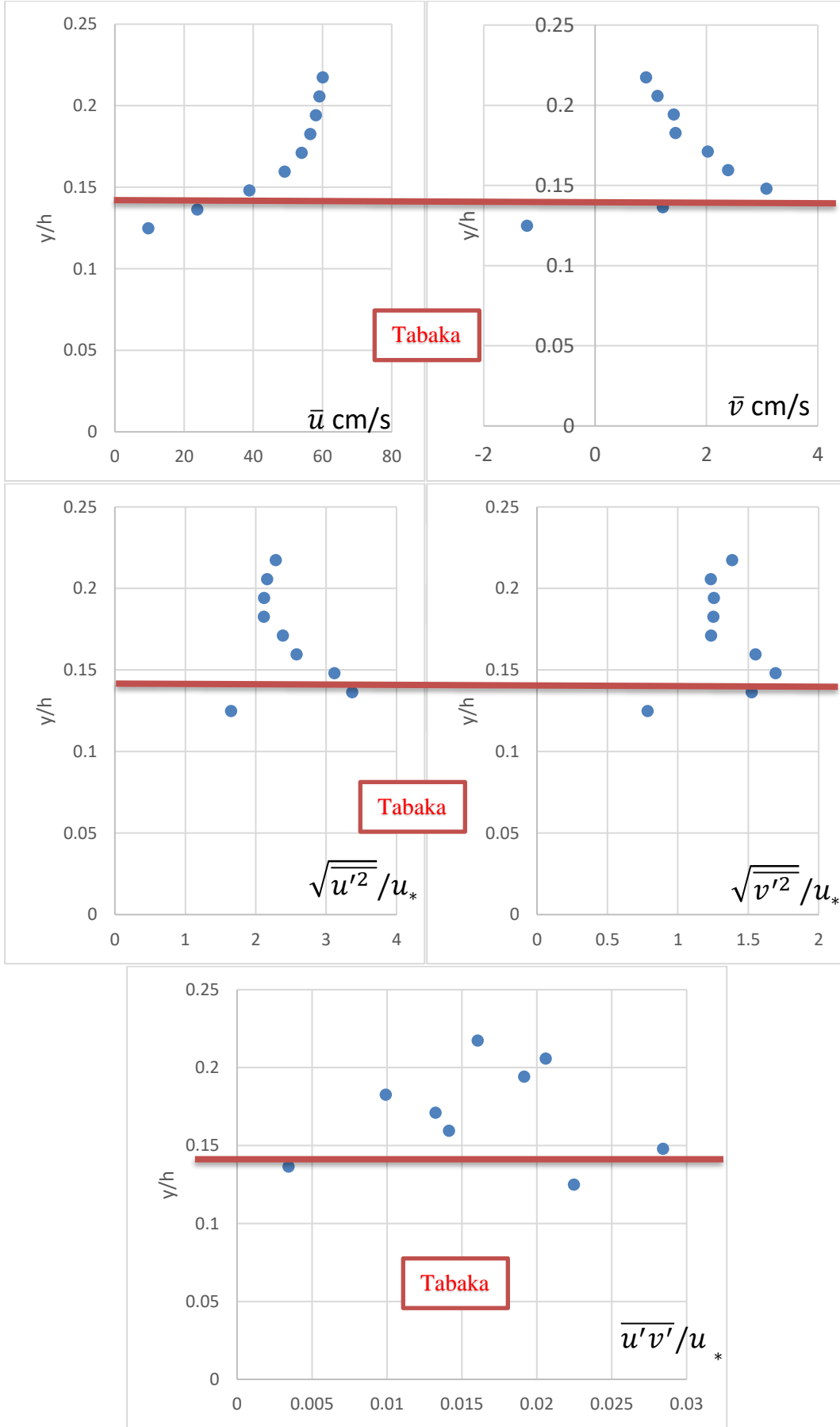
Şekil A.31 : 5. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



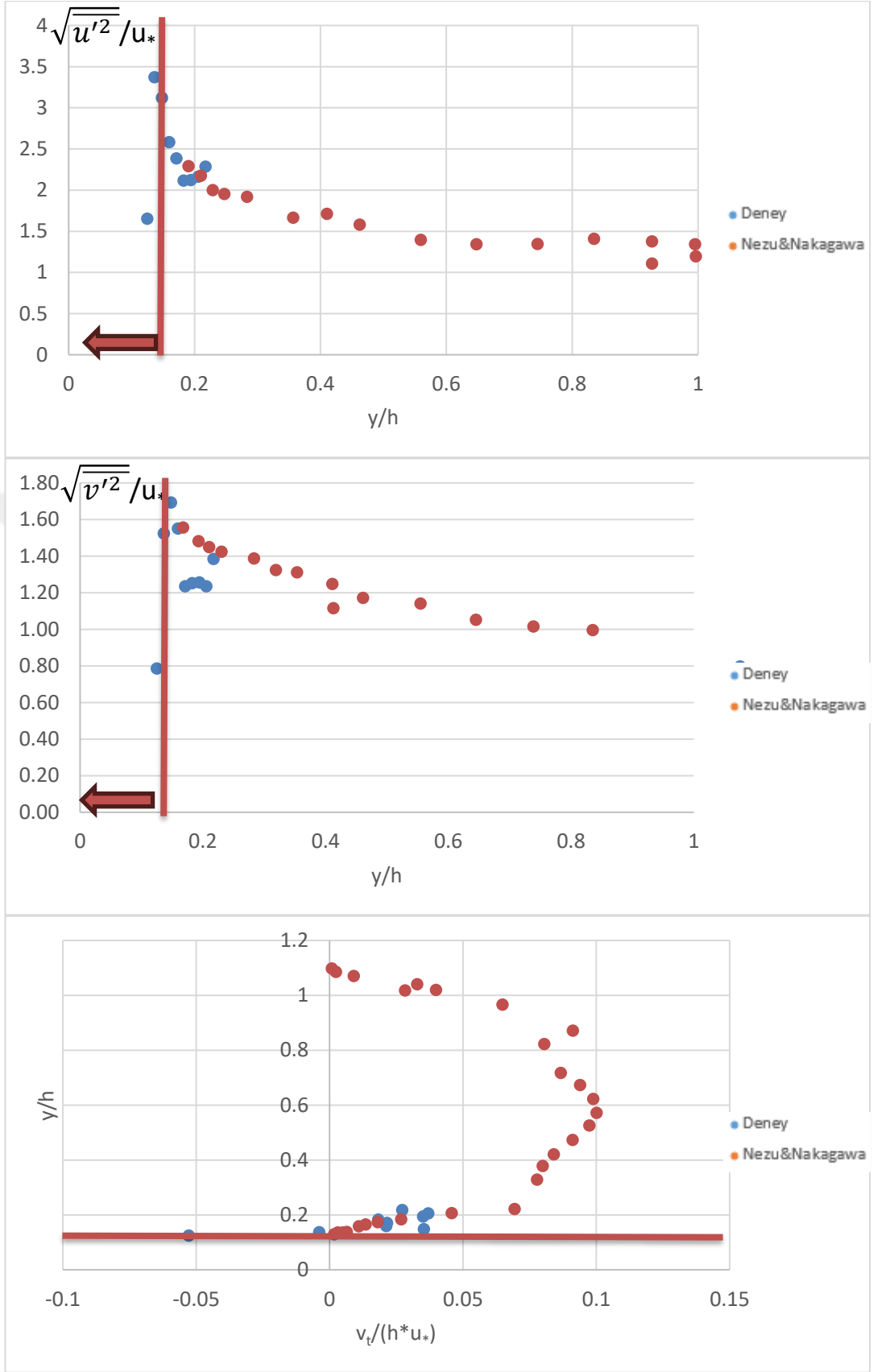
Şekil A.32 : 5. Deneysel boşluk içi türbülans bileşenleri (C kesiti).



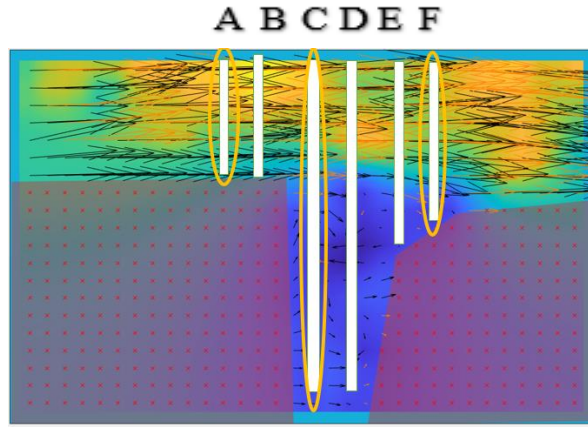
Şekil A.33 : 5. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



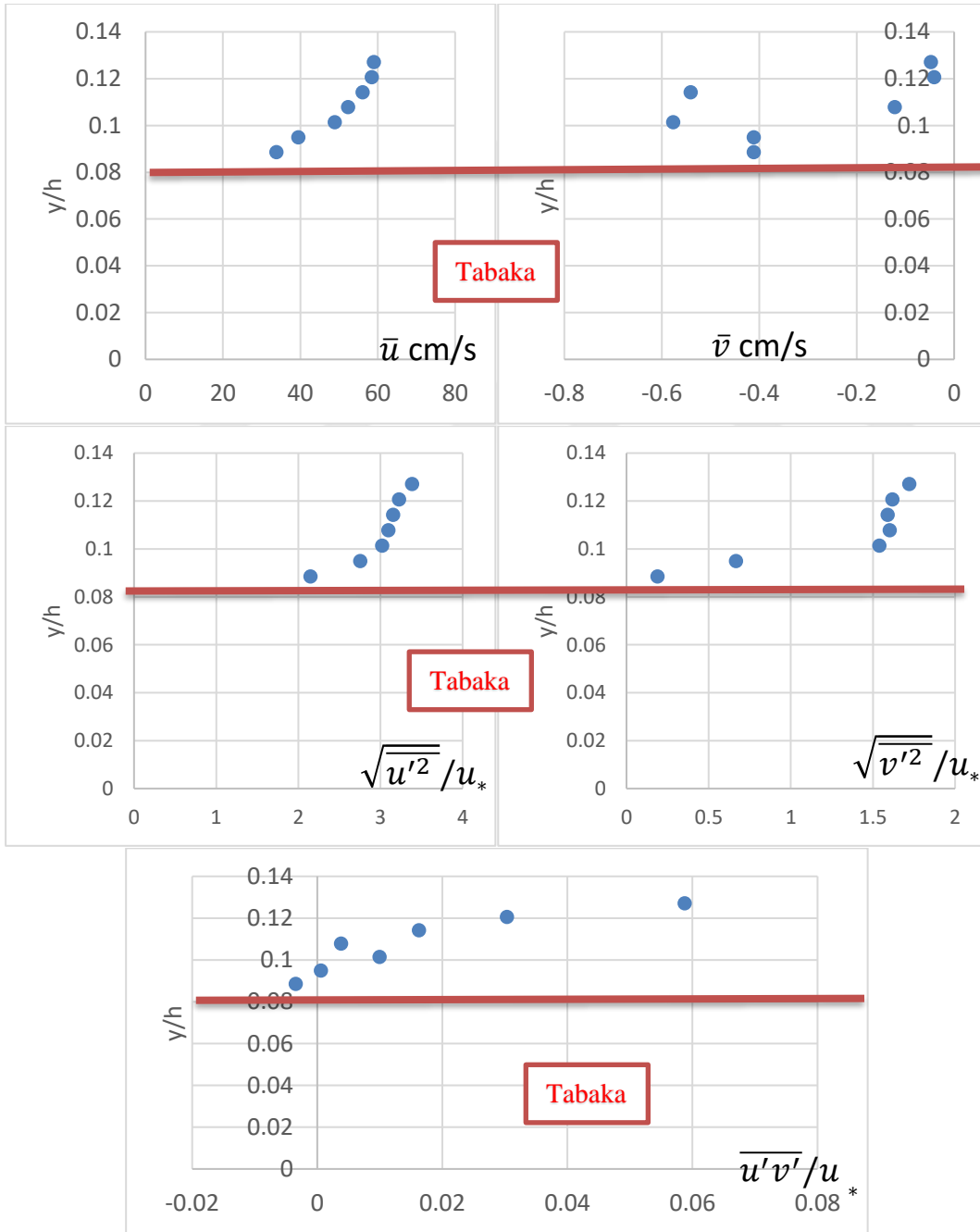
Şekil A.34 : 5. Denei türbülans bileşenleri (F kesiti).



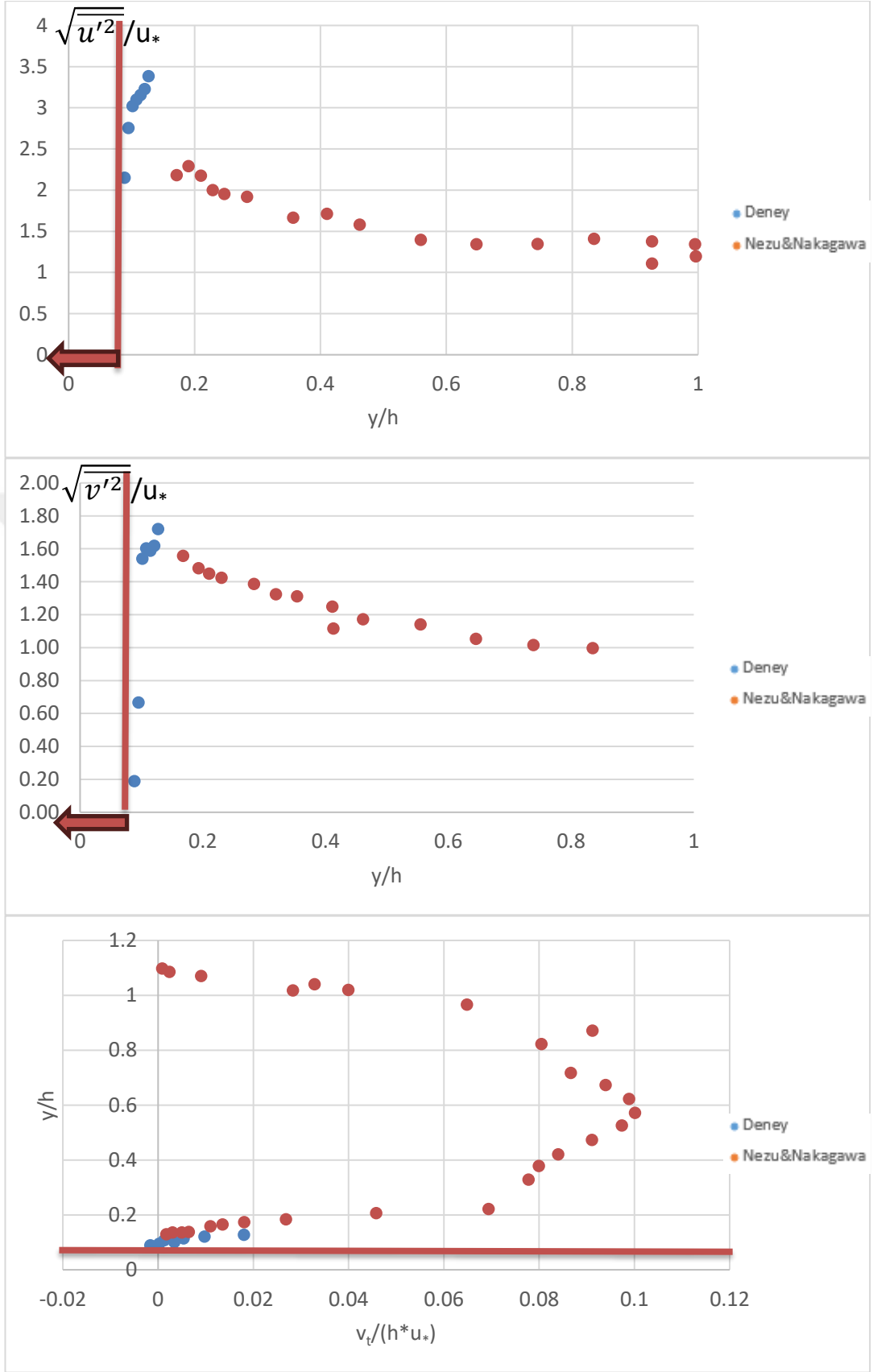
Şekil A.35 : 5. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



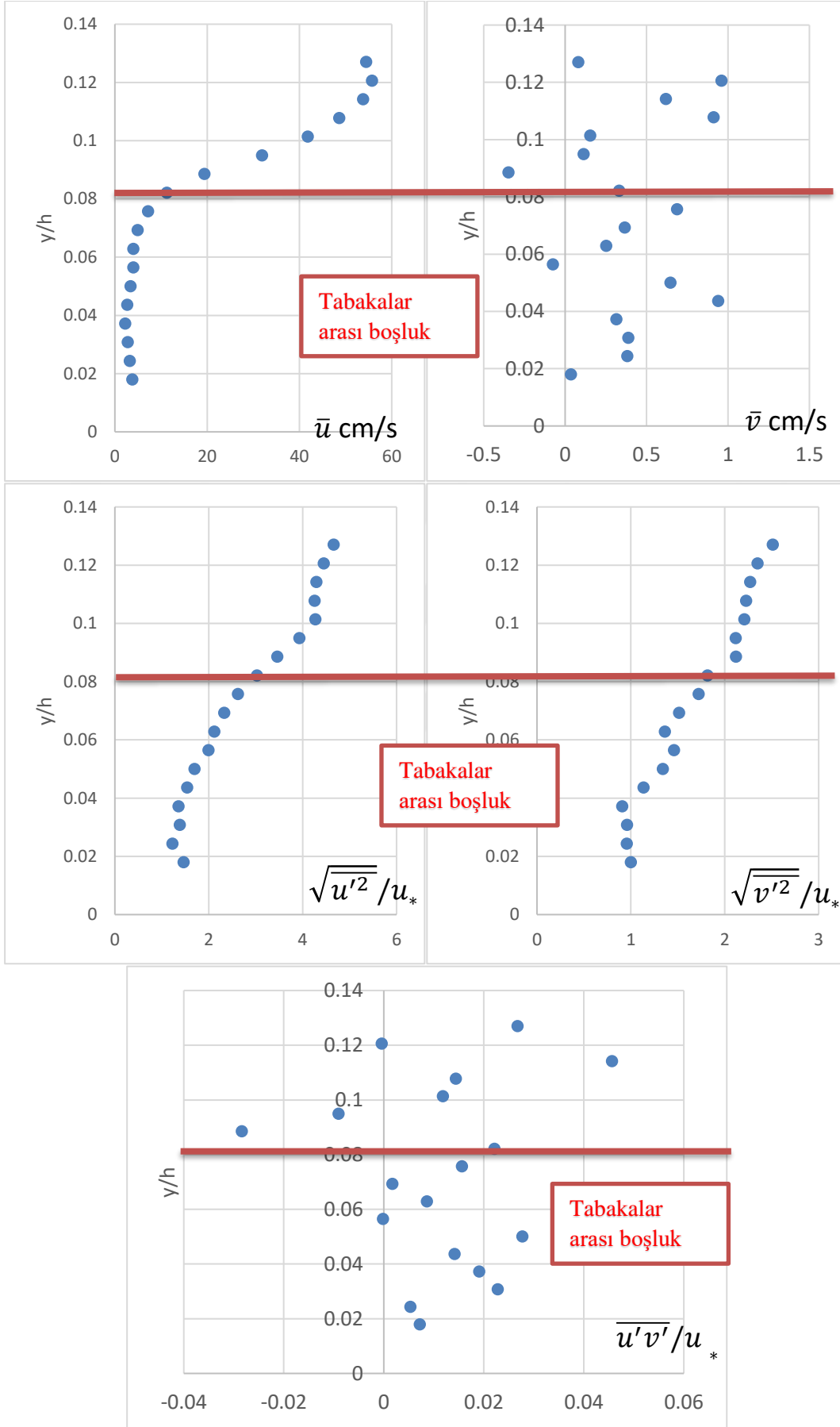
Şekil A.36 : 6. Deney hız vektörleri.



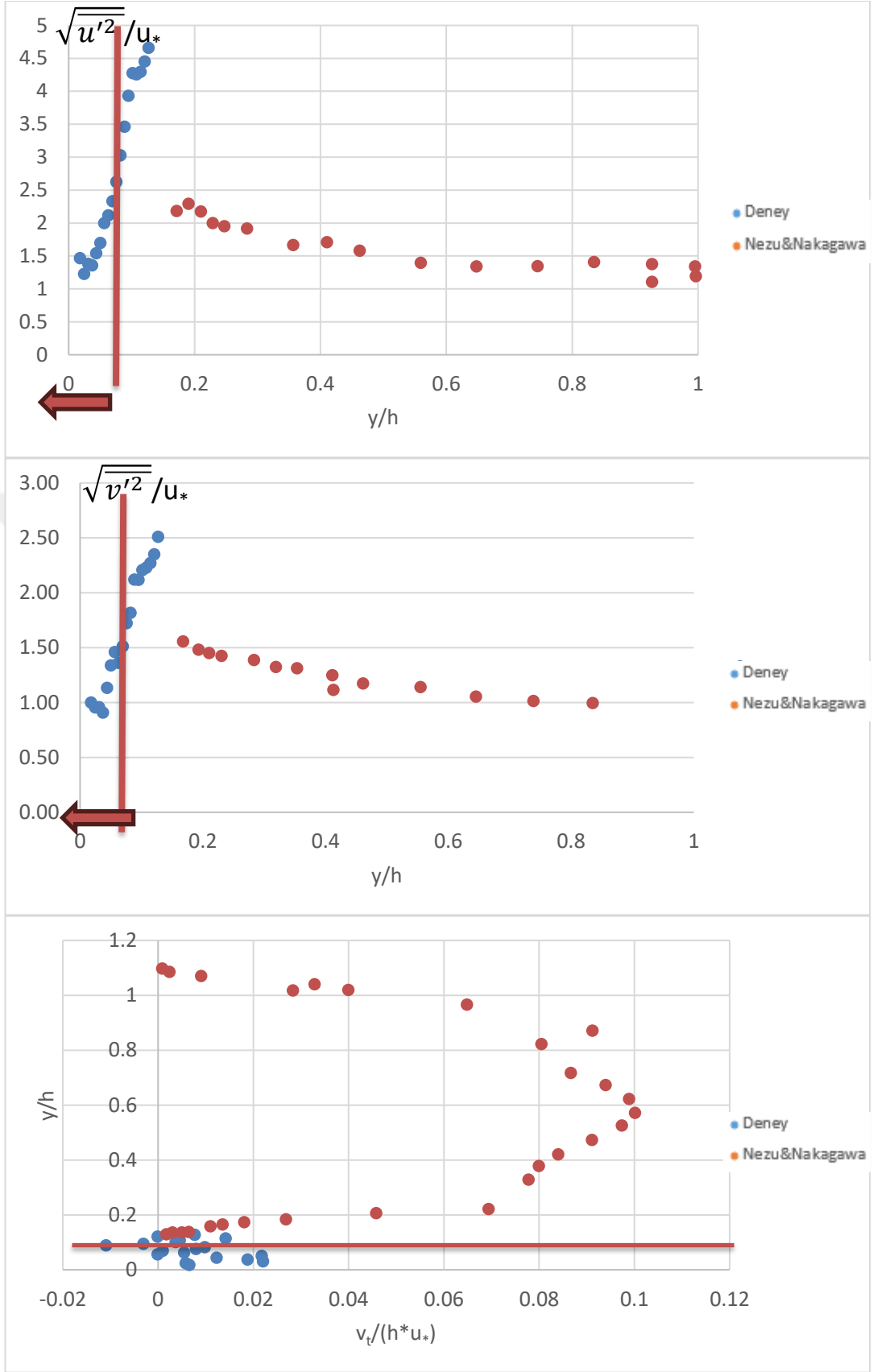
Şekil A.37 : 6. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



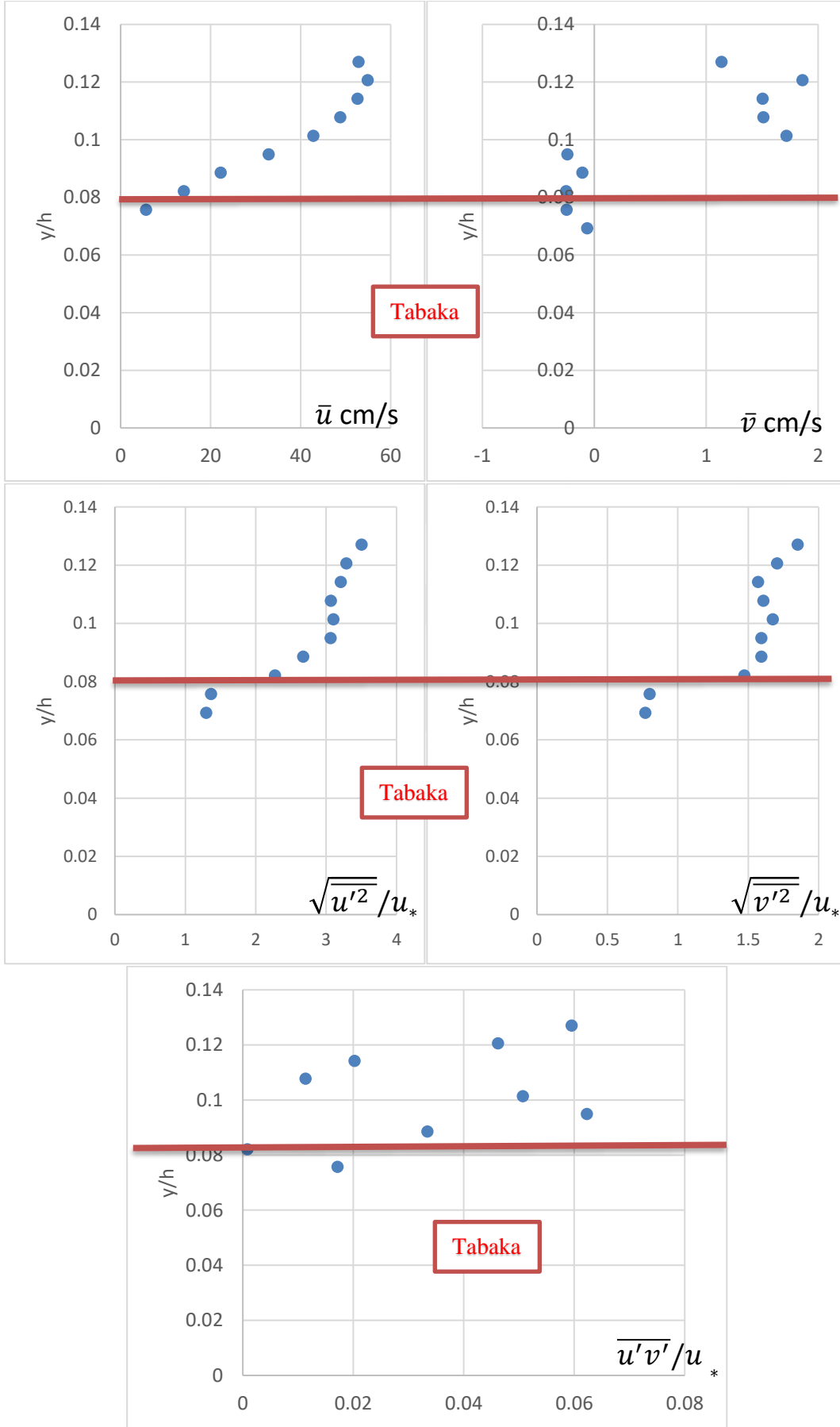
Şekil A.38 : 6. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



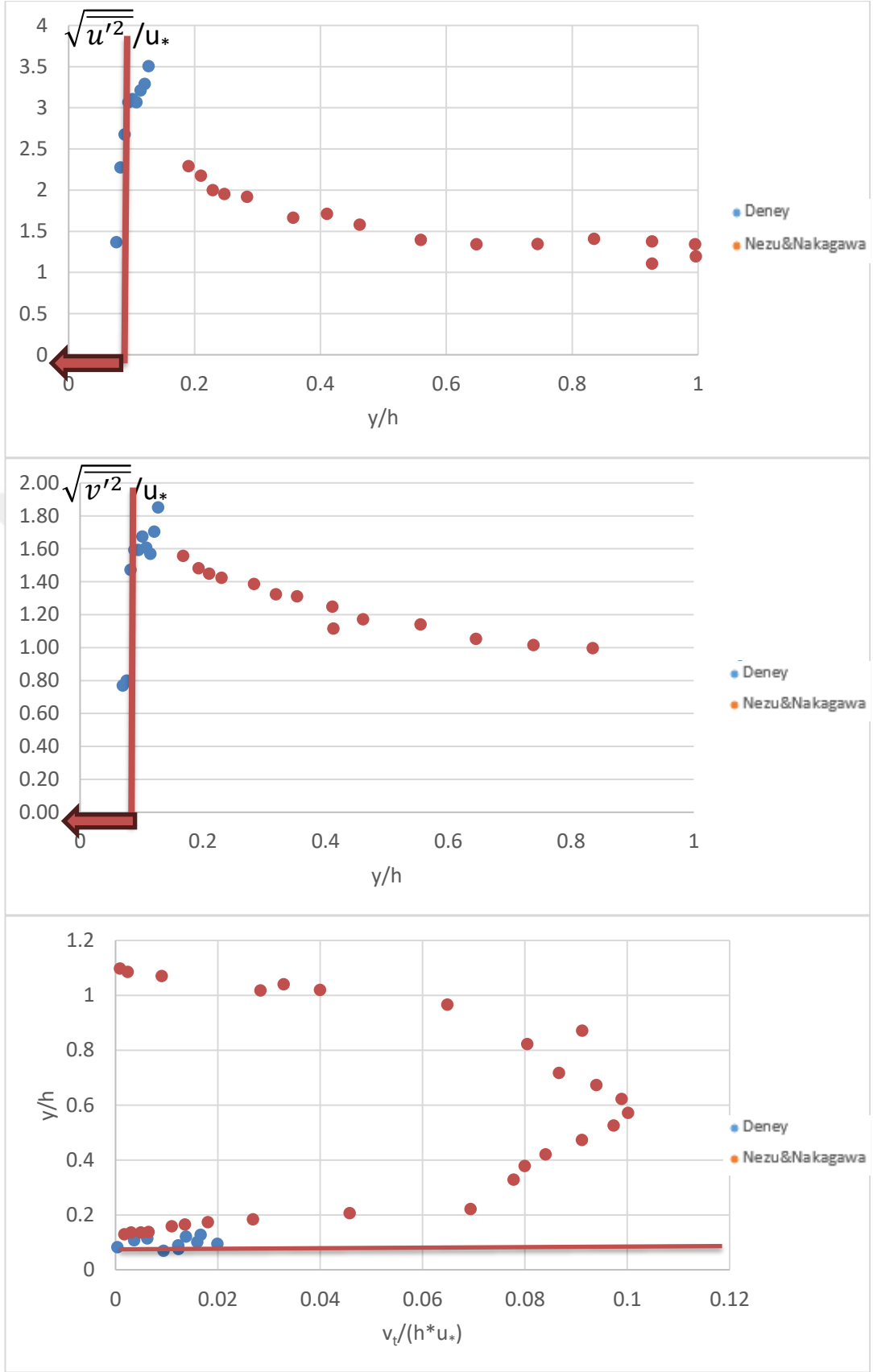
Şekil A.39 : 6. Denei türbülans bileşenleri (C kesiti).



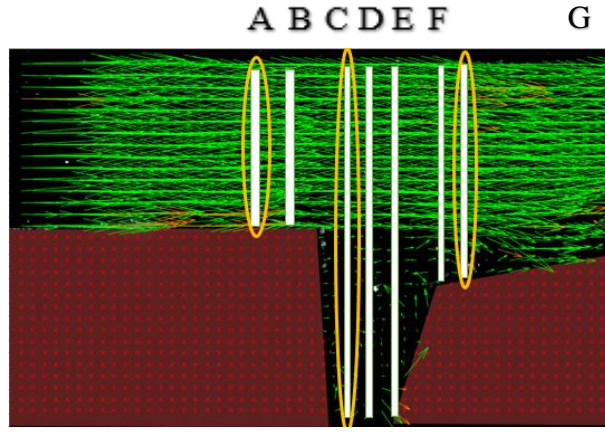
Şekil A.40 : 6. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



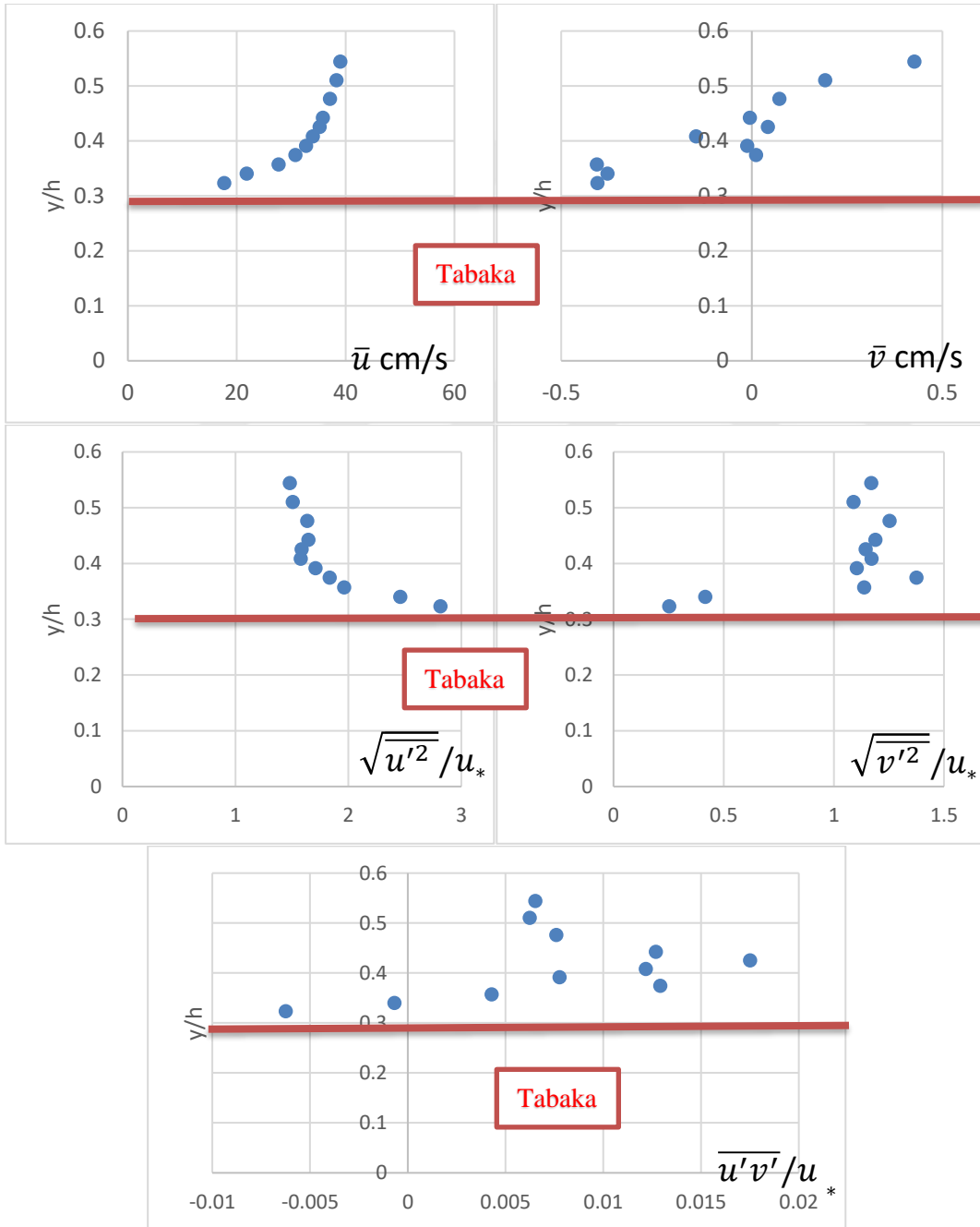
Şekil A.41 : 6. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).



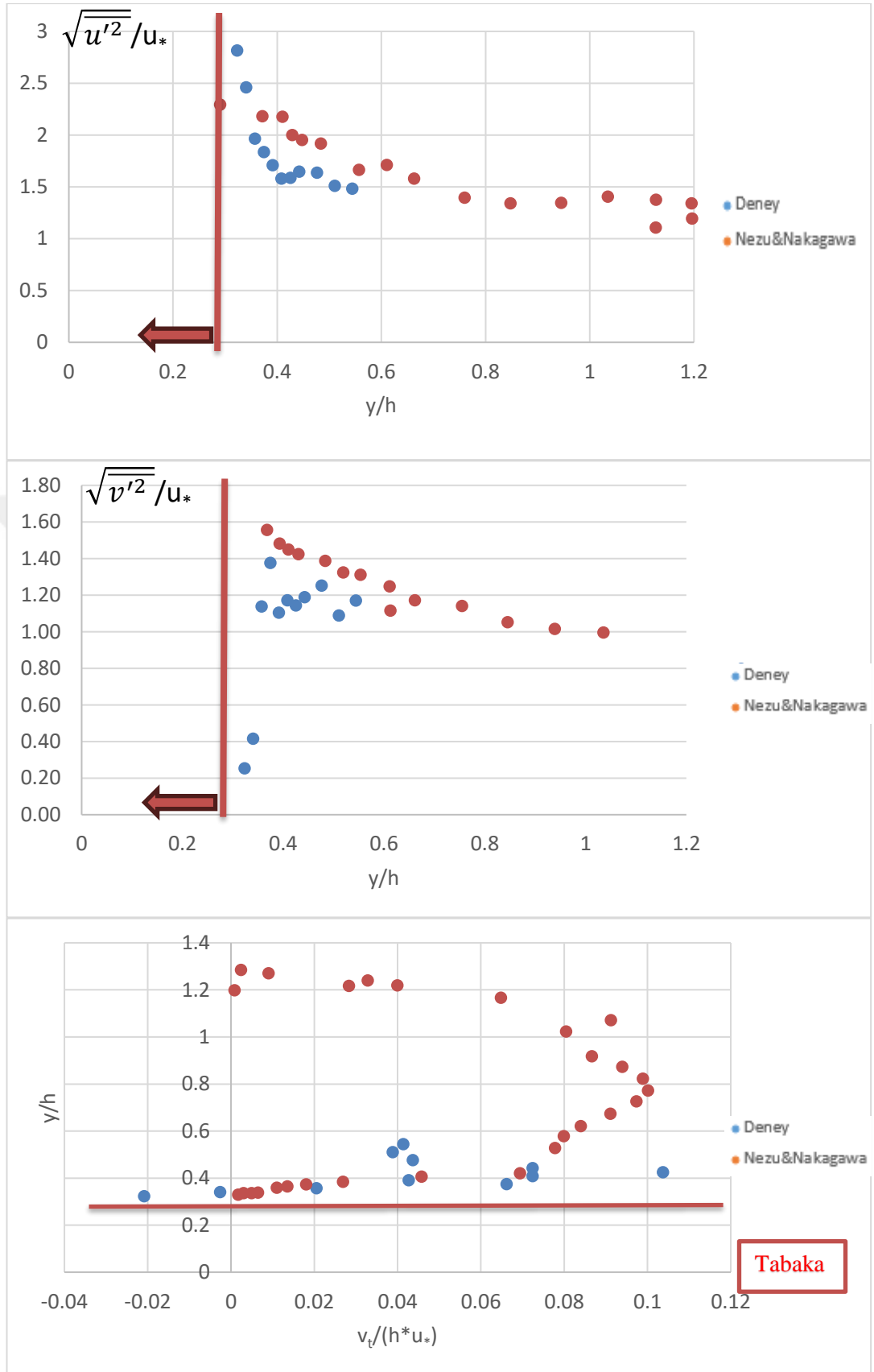
Şekil A.42 : 6. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



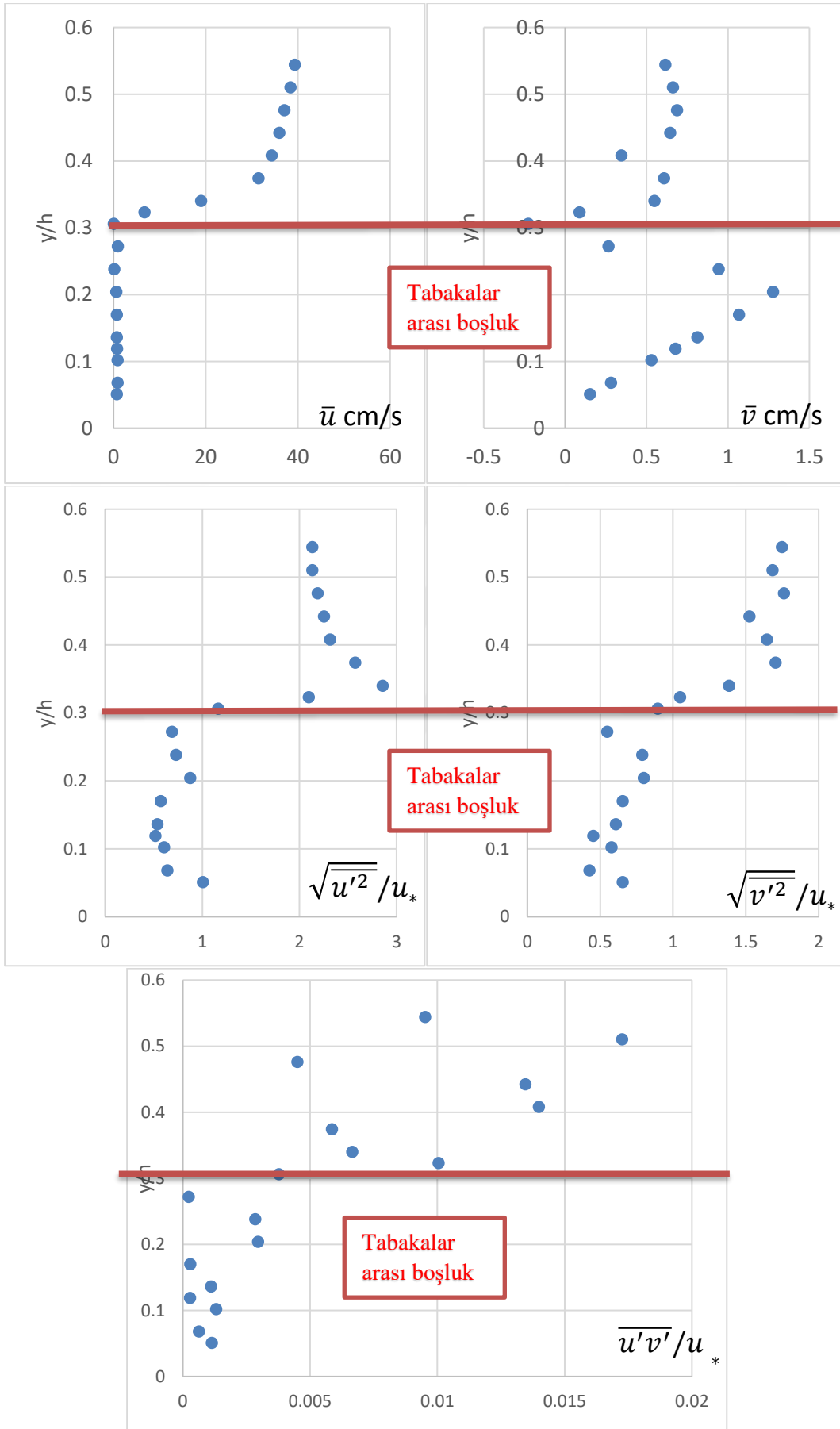
Şekil A.43 : 7. Deney hız vektörleri.



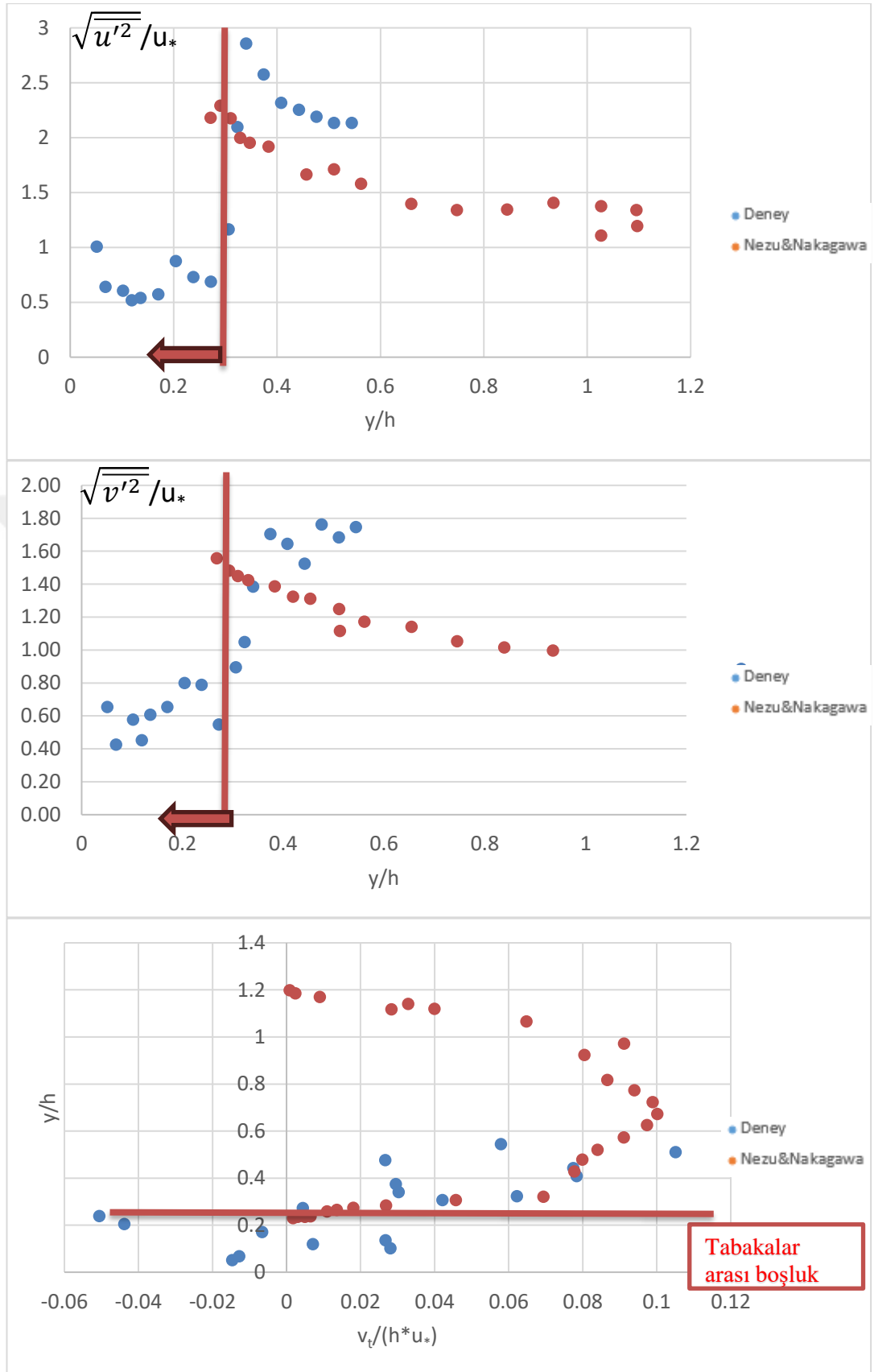
Şekil A.44 : 7. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



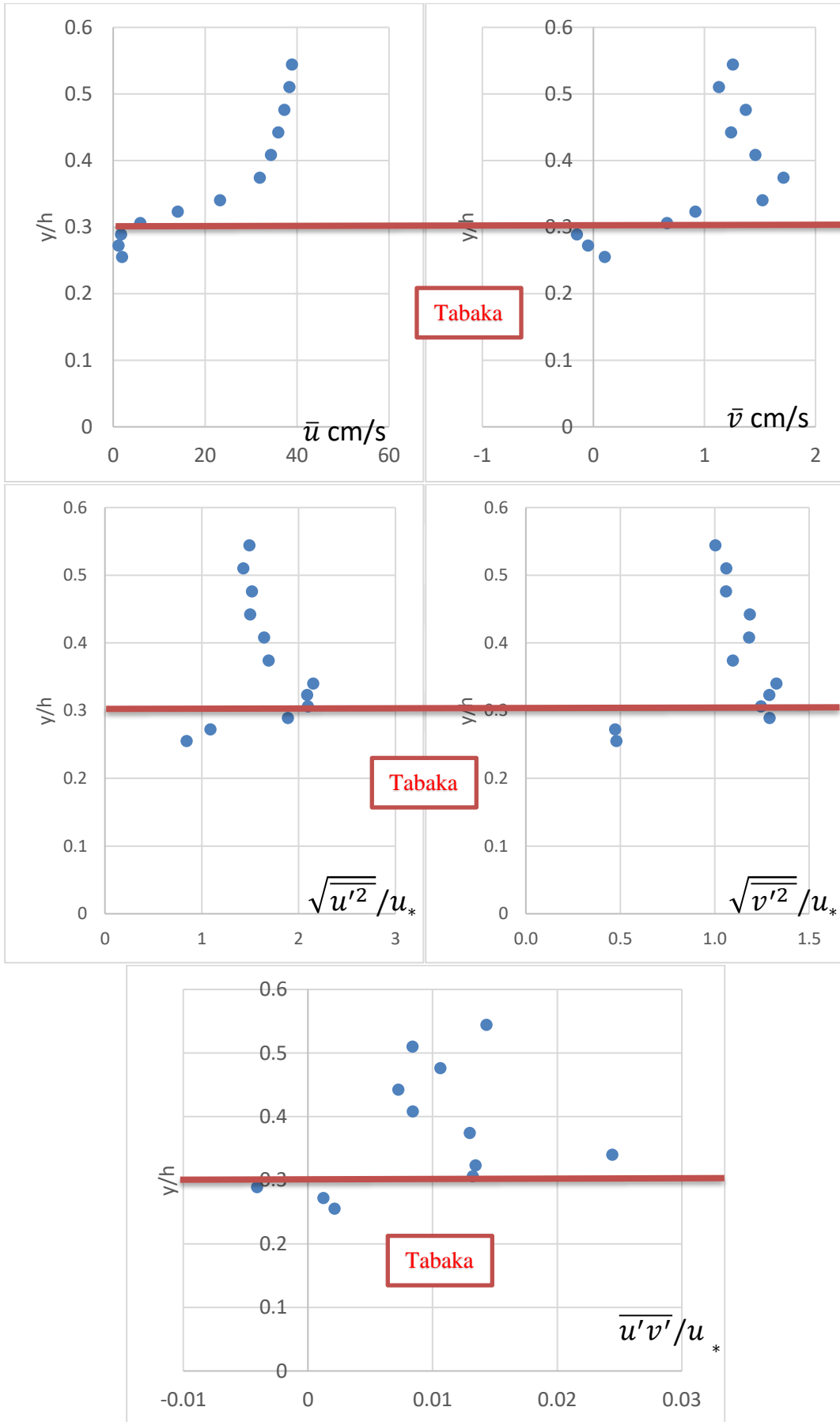
Şekil A.45 : 7. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



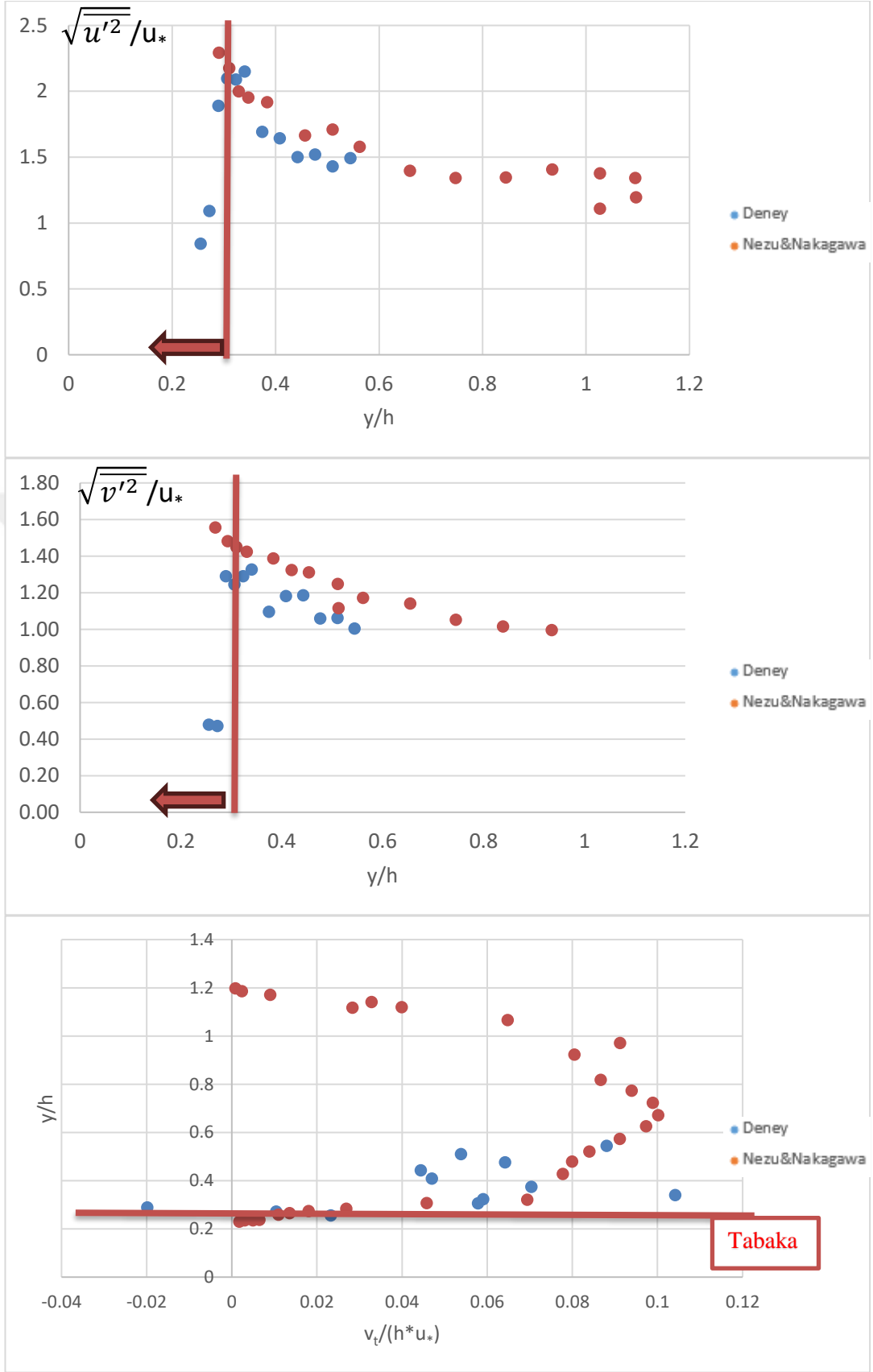
Şekil A.46 : 7. Deneysel türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.47 : 7. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).

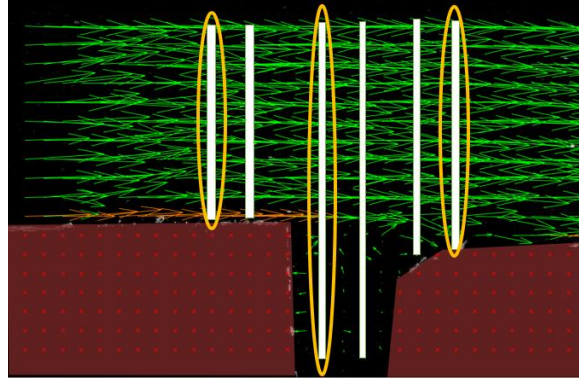


Şekil A.48 : 7. Deneysel türbülans bileşenleri (G kesiti).

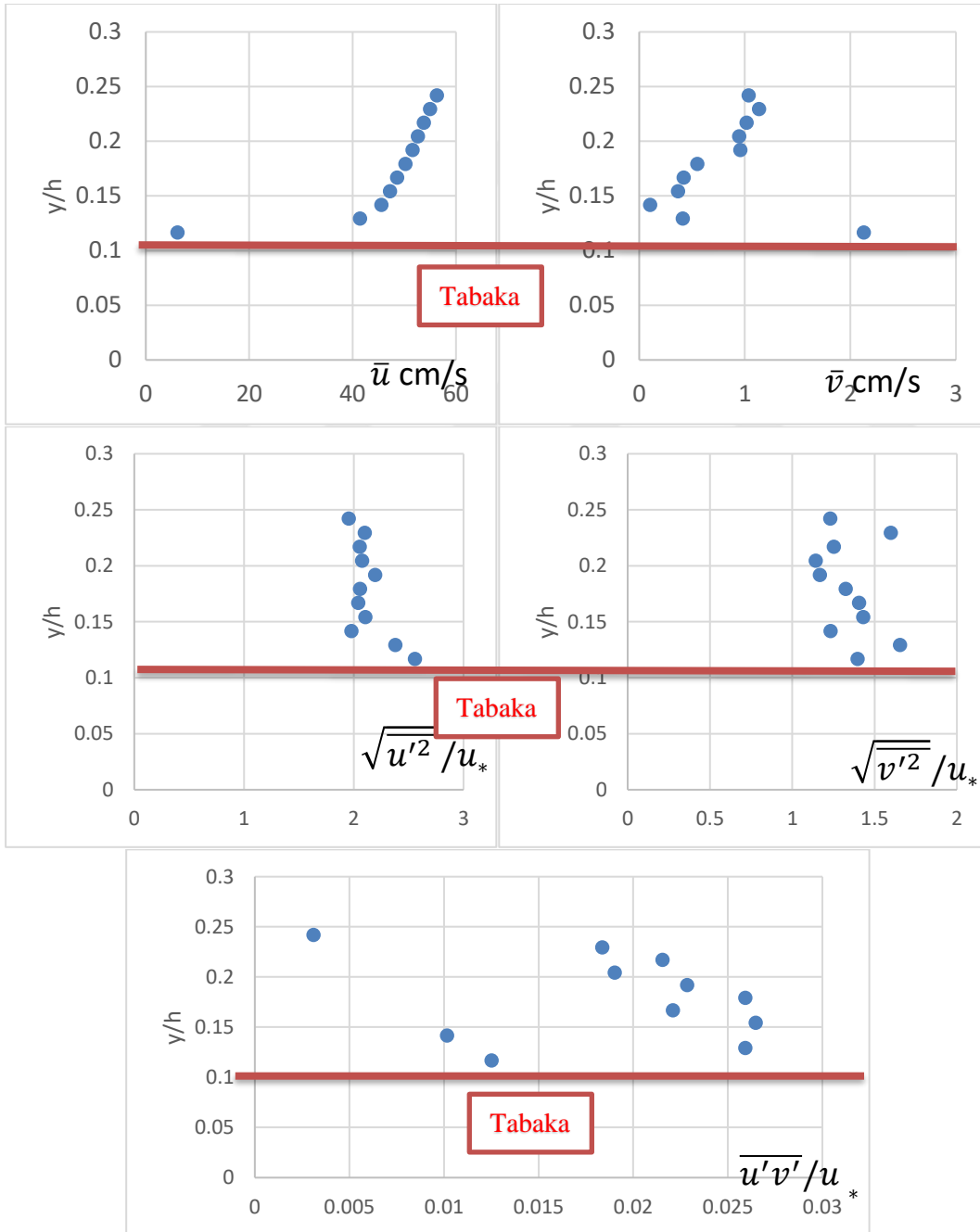


Şekil A.49 : 7. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (G kesiti).

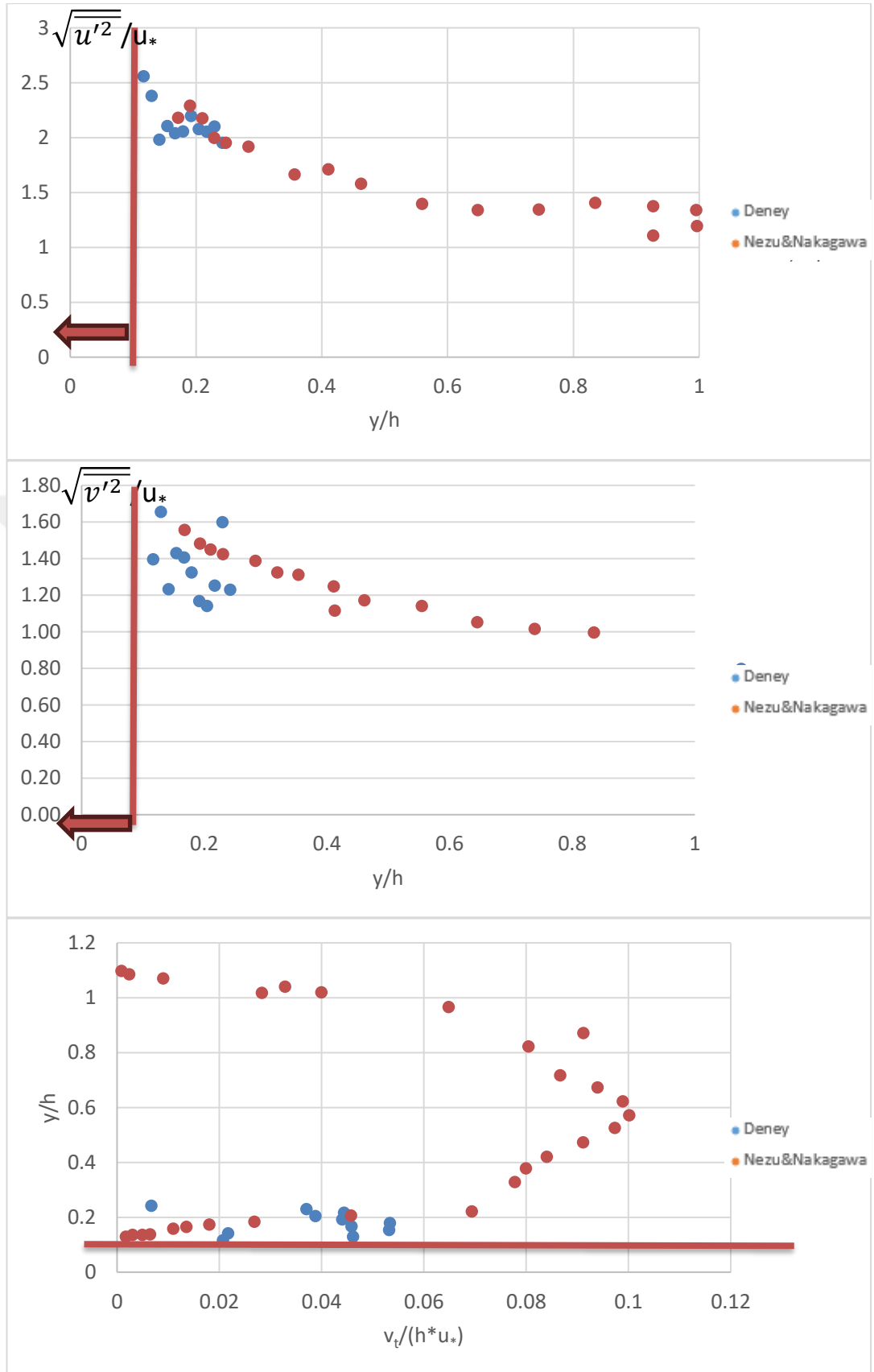
A B C D E F



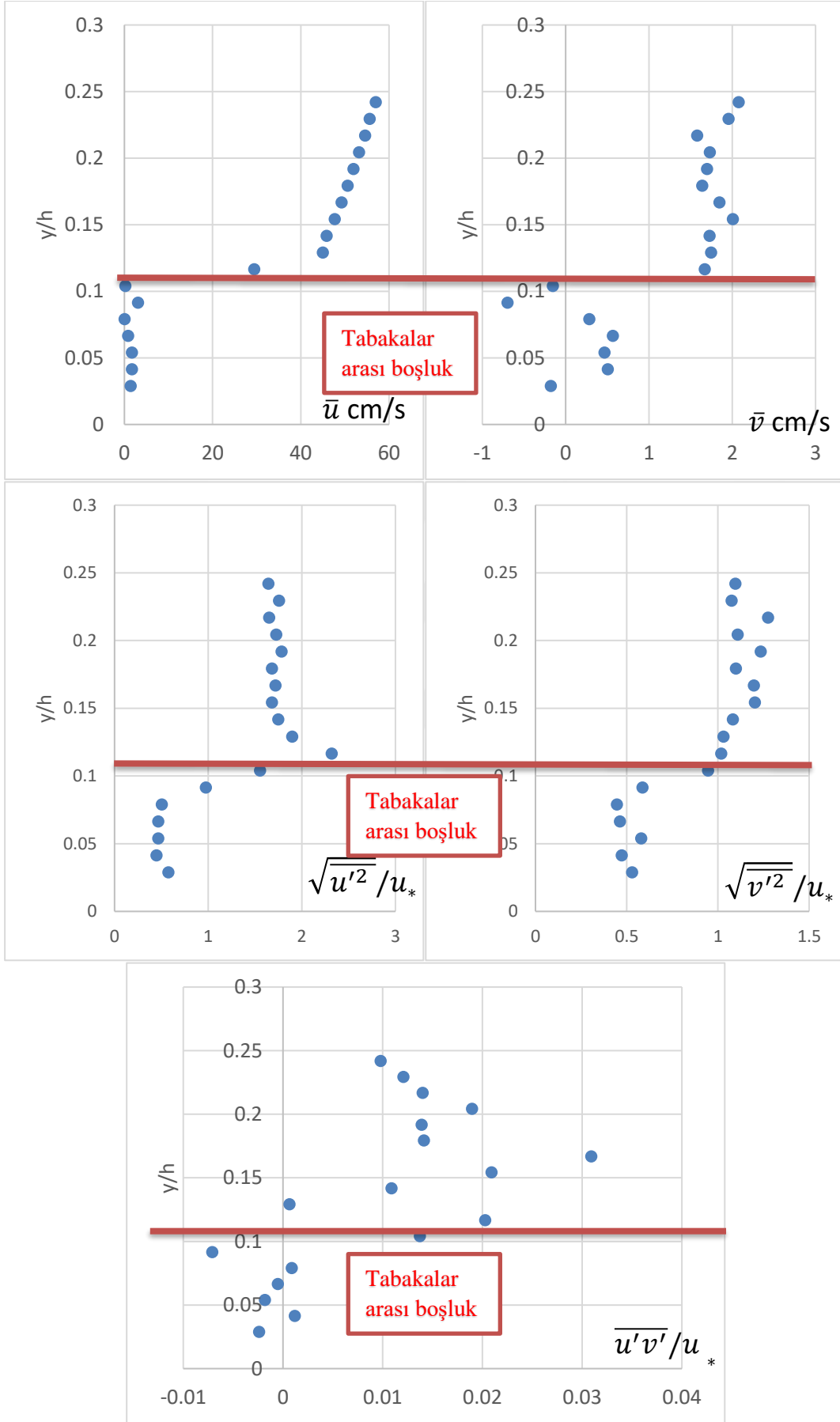
Şekil A.50 : 8. Deneysel hız vektörleri.



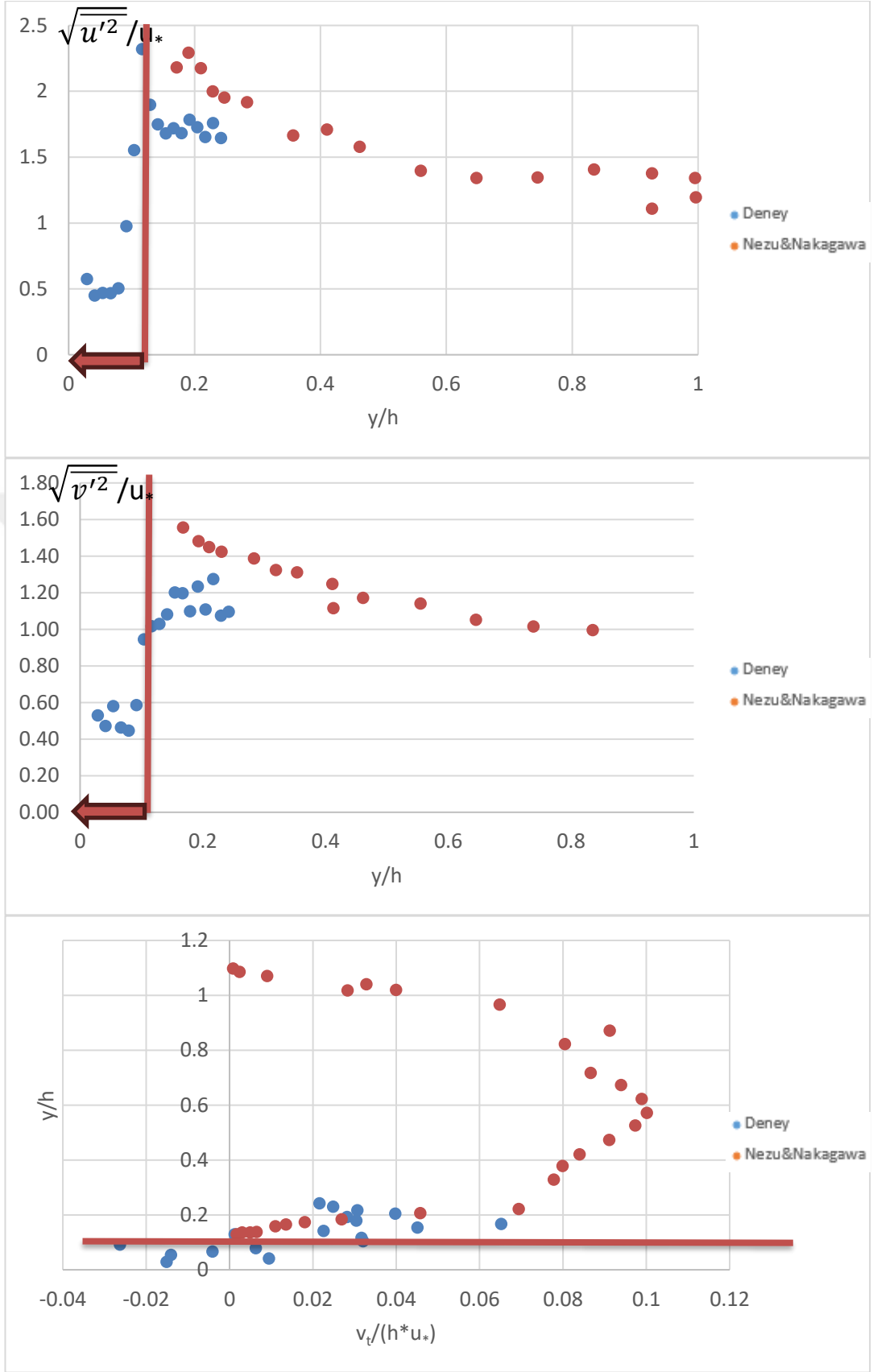
Şekil A.51 : 8. Deneysel türbülans bileşenleri (A kesiti).



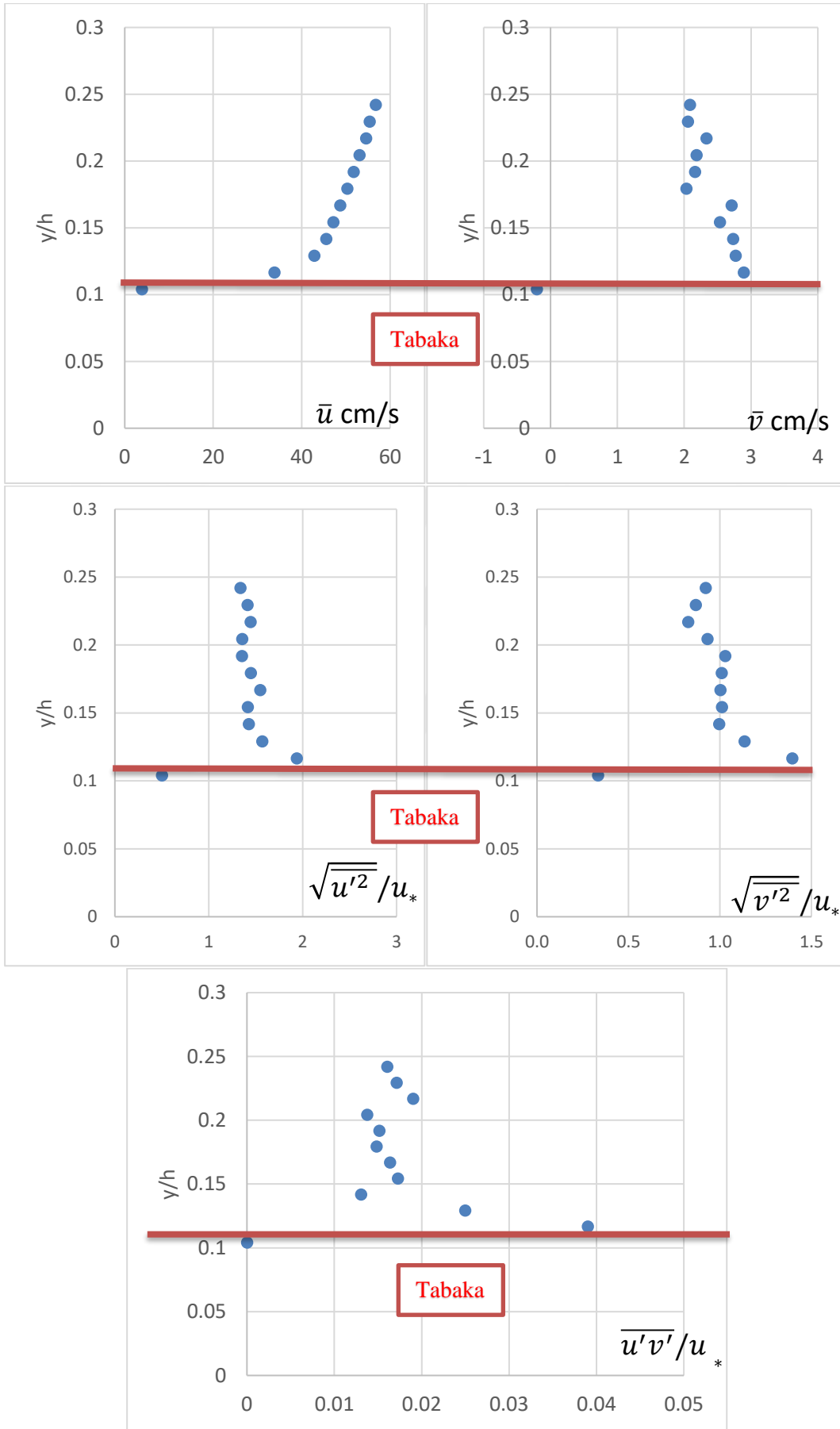
Şekil A.52 : 8. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



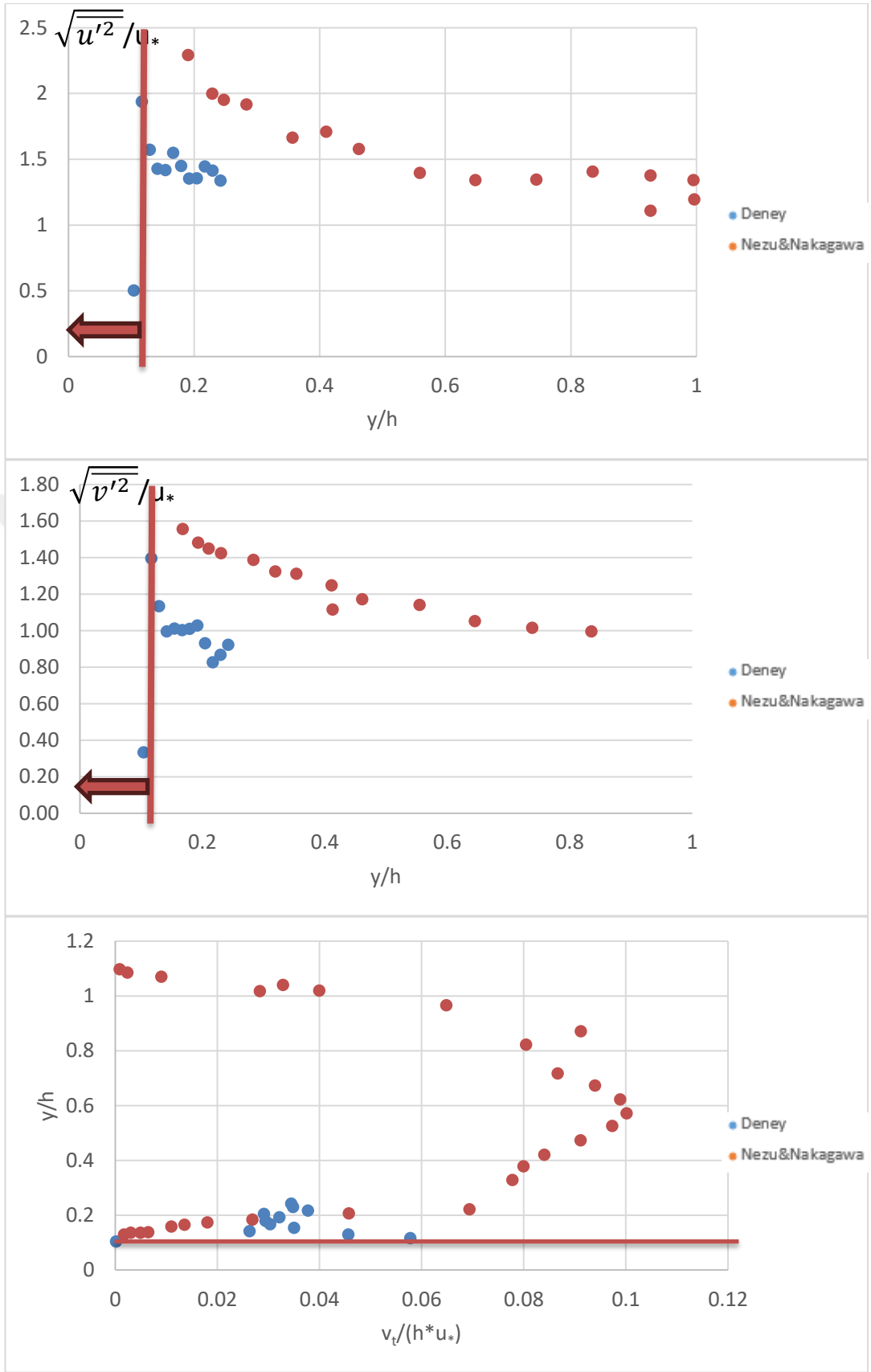
Şekil A.53 : 8. Deneysel türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.54 : 8. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).

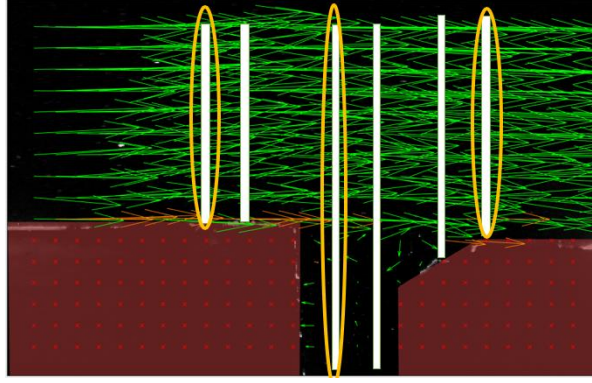


Şekil A.55 : 8. Deneysel türbülans bileşenleri (F kesiti).

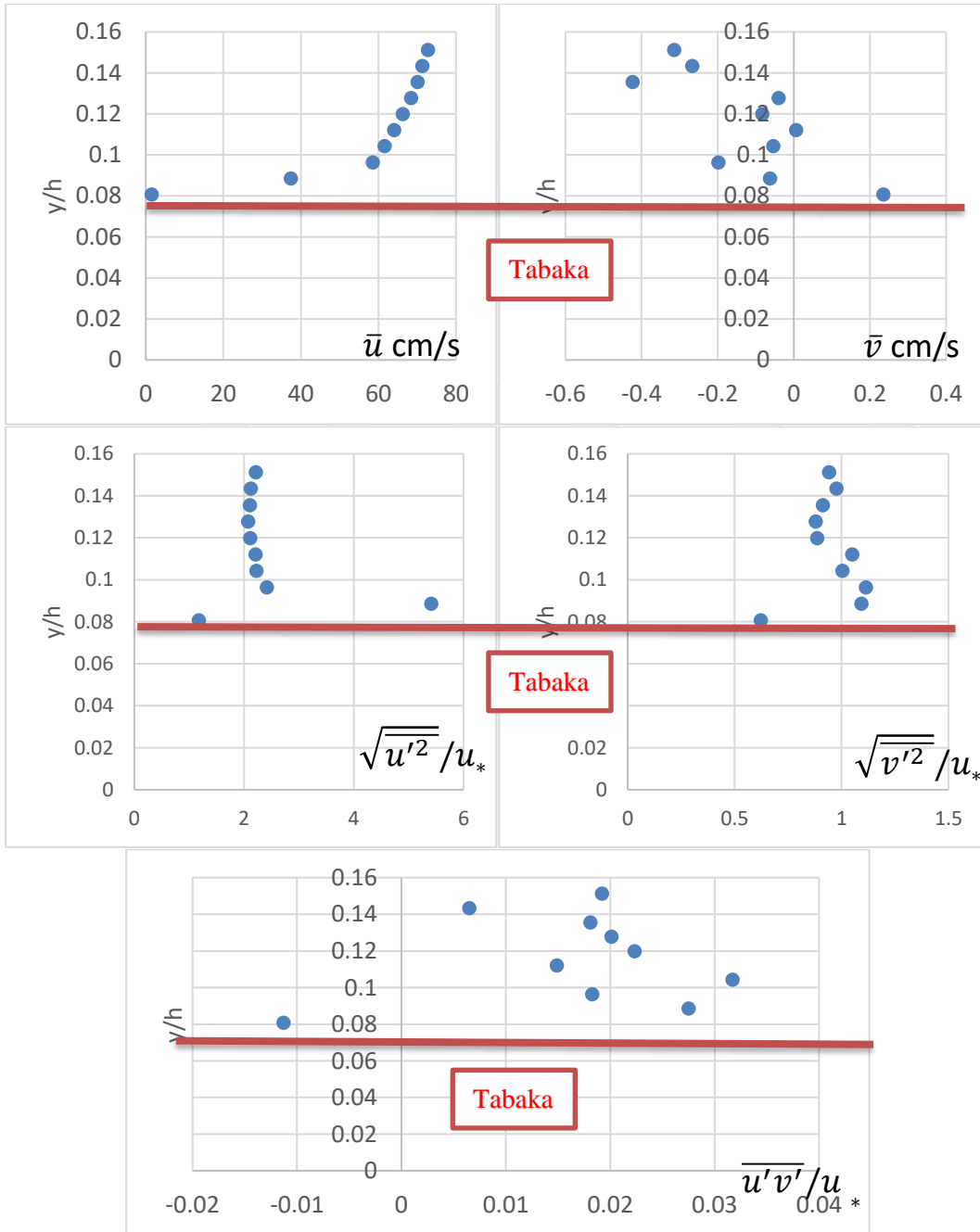


Şekil A.56 : 8. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri.

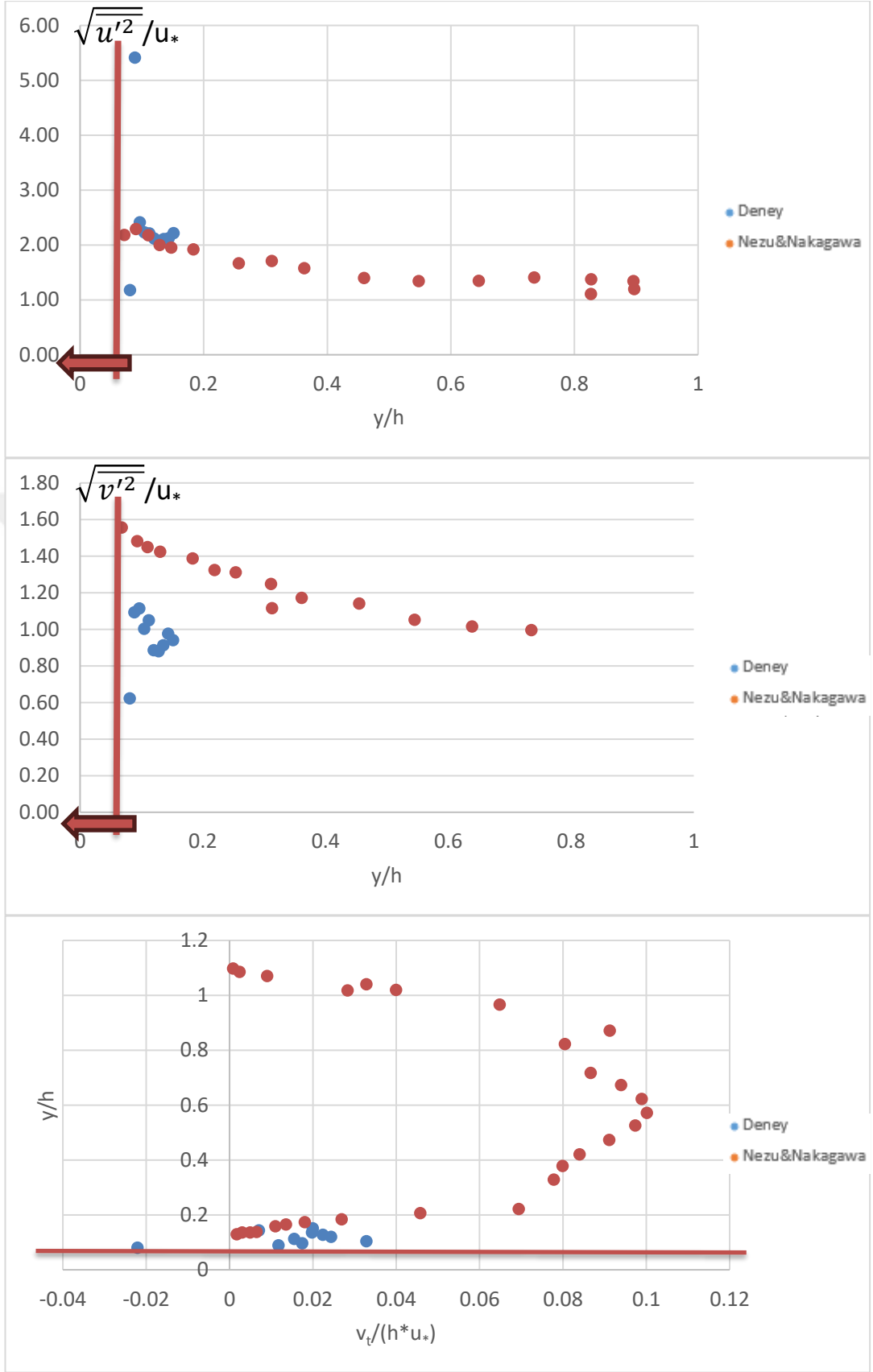
A B C D E F



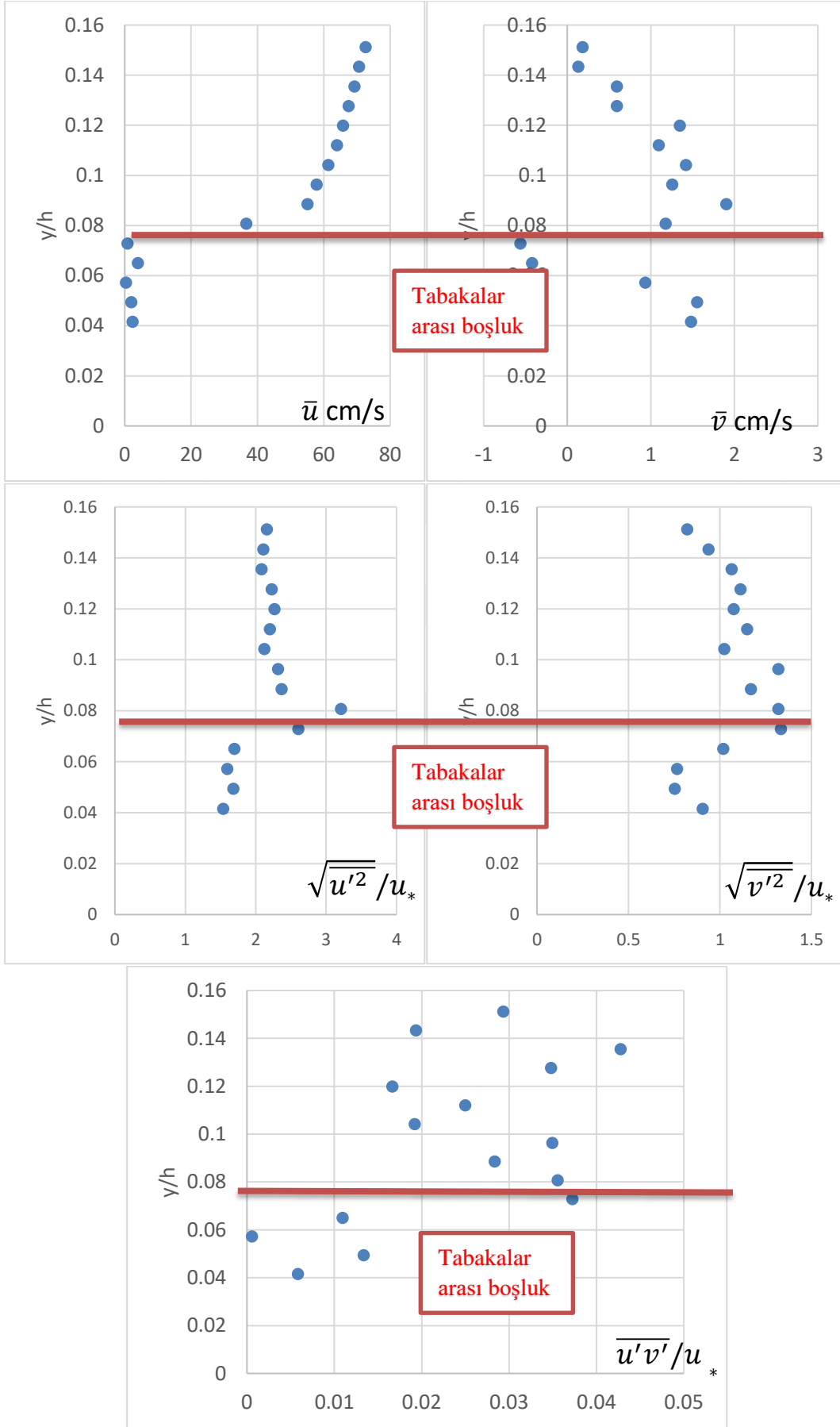
Şekil A.57 : 9. Deney hız vektörleri.



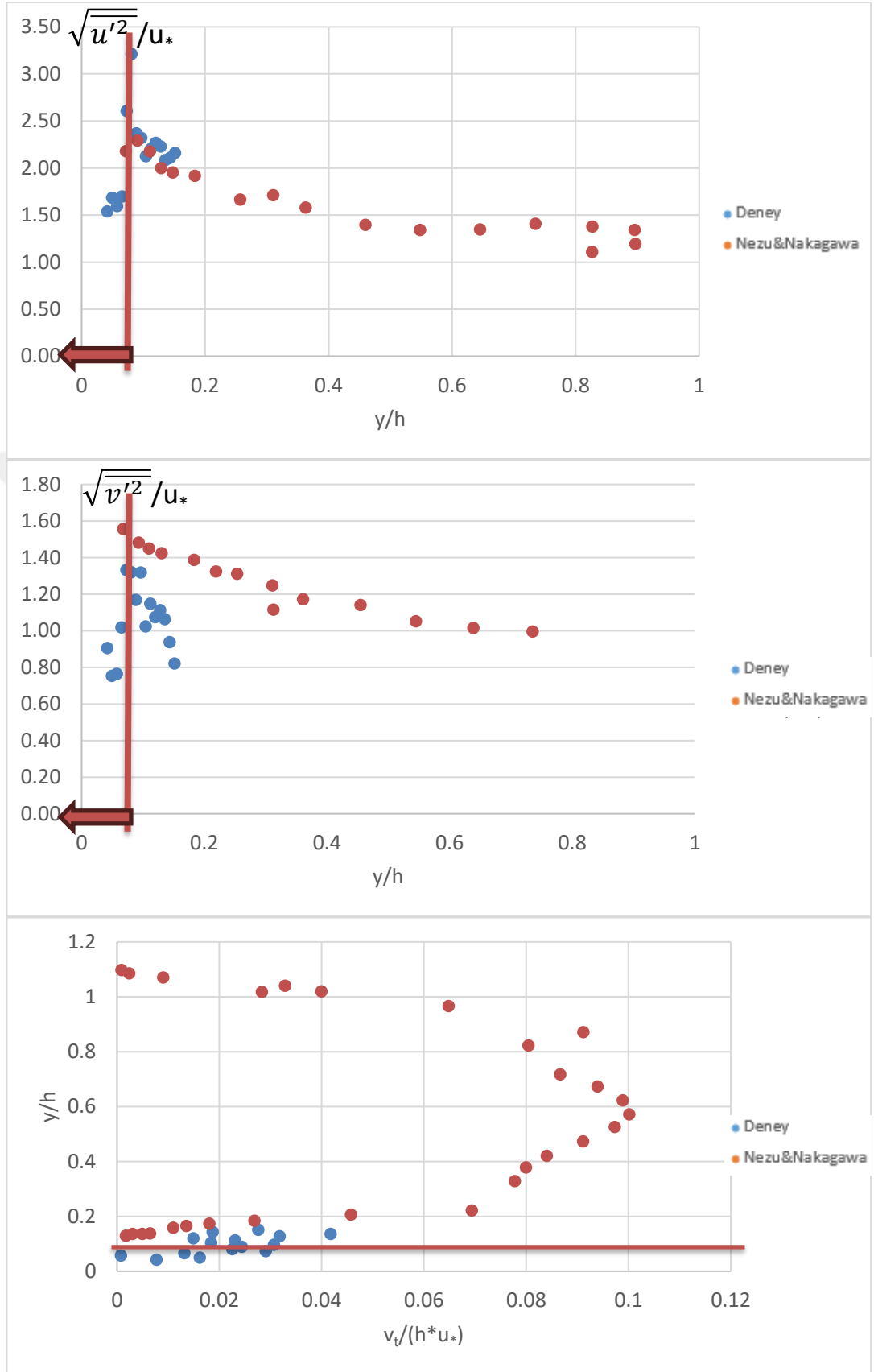
Şekil A.58 : 9. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



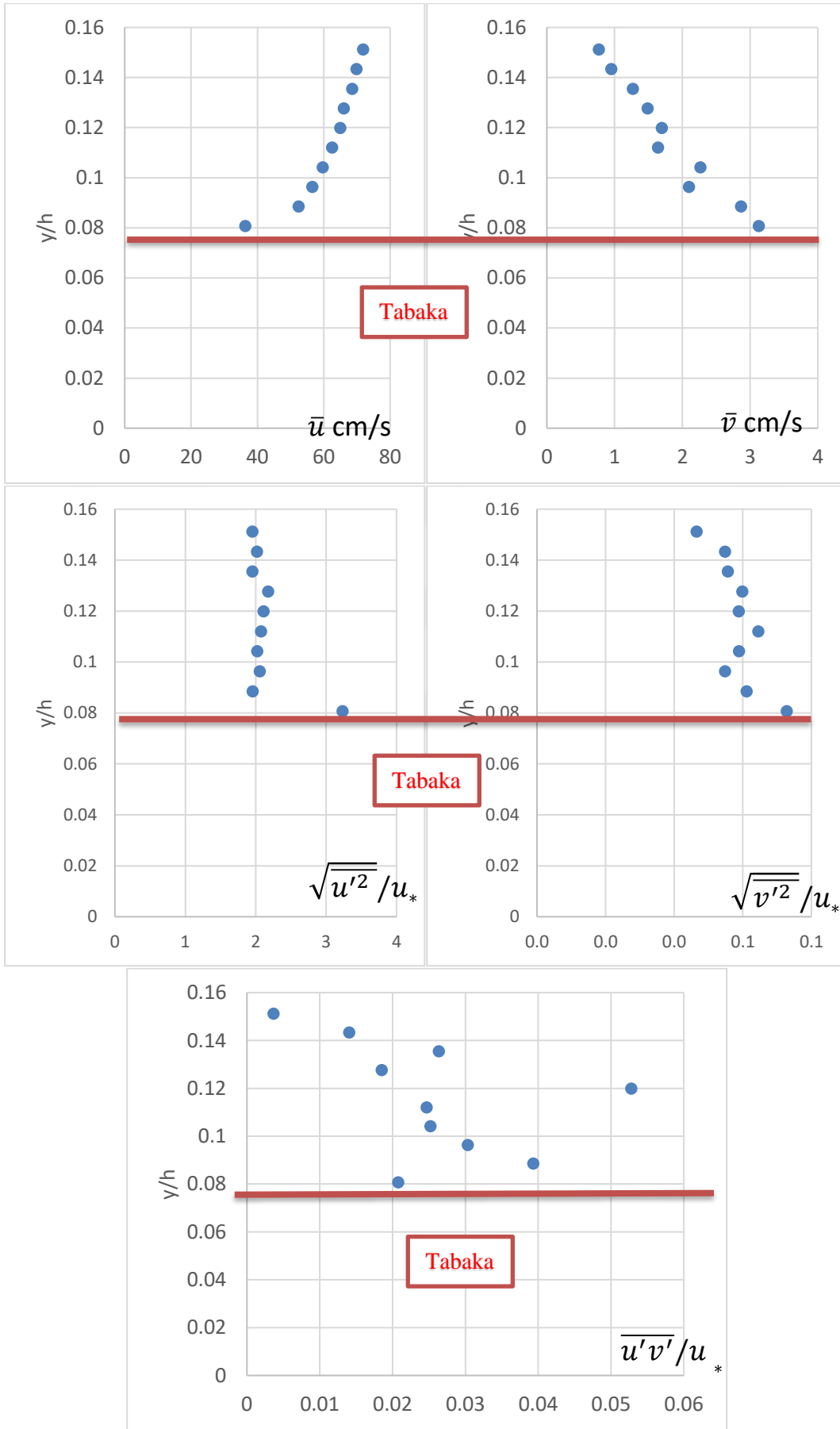
Şekil A.59 : 9. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



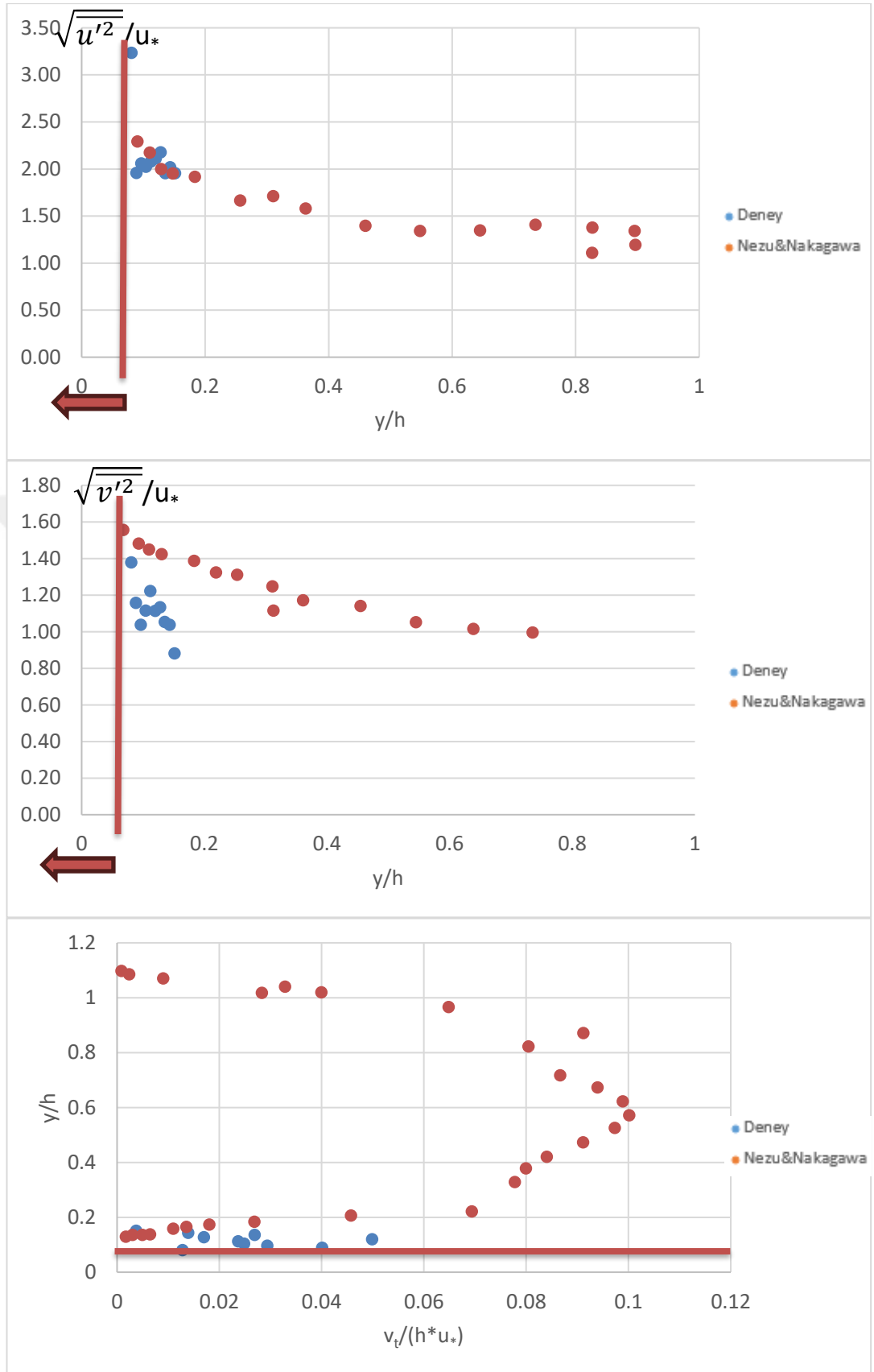
Şekil A.60 : 9. Deneysel türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.61 : 9. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).

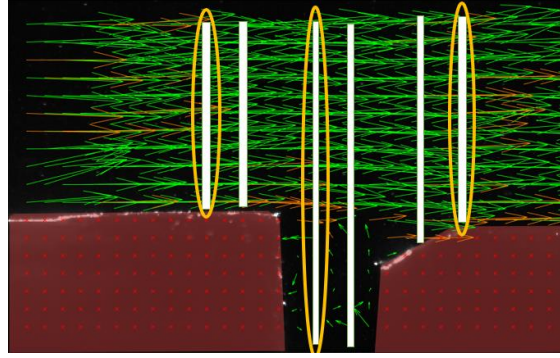


Şekil A.62 : 9. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).

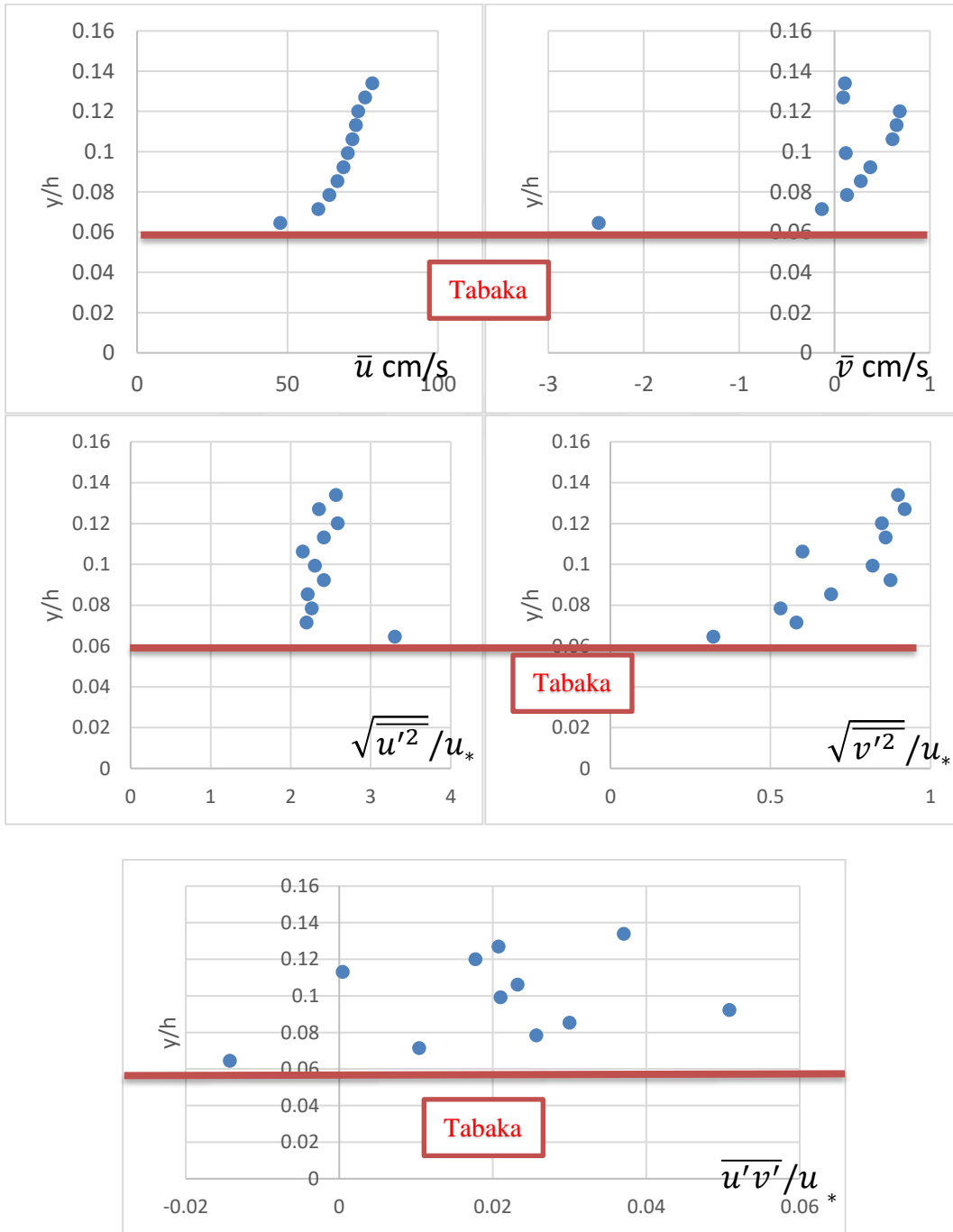


Şekil A.63 : 9. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).

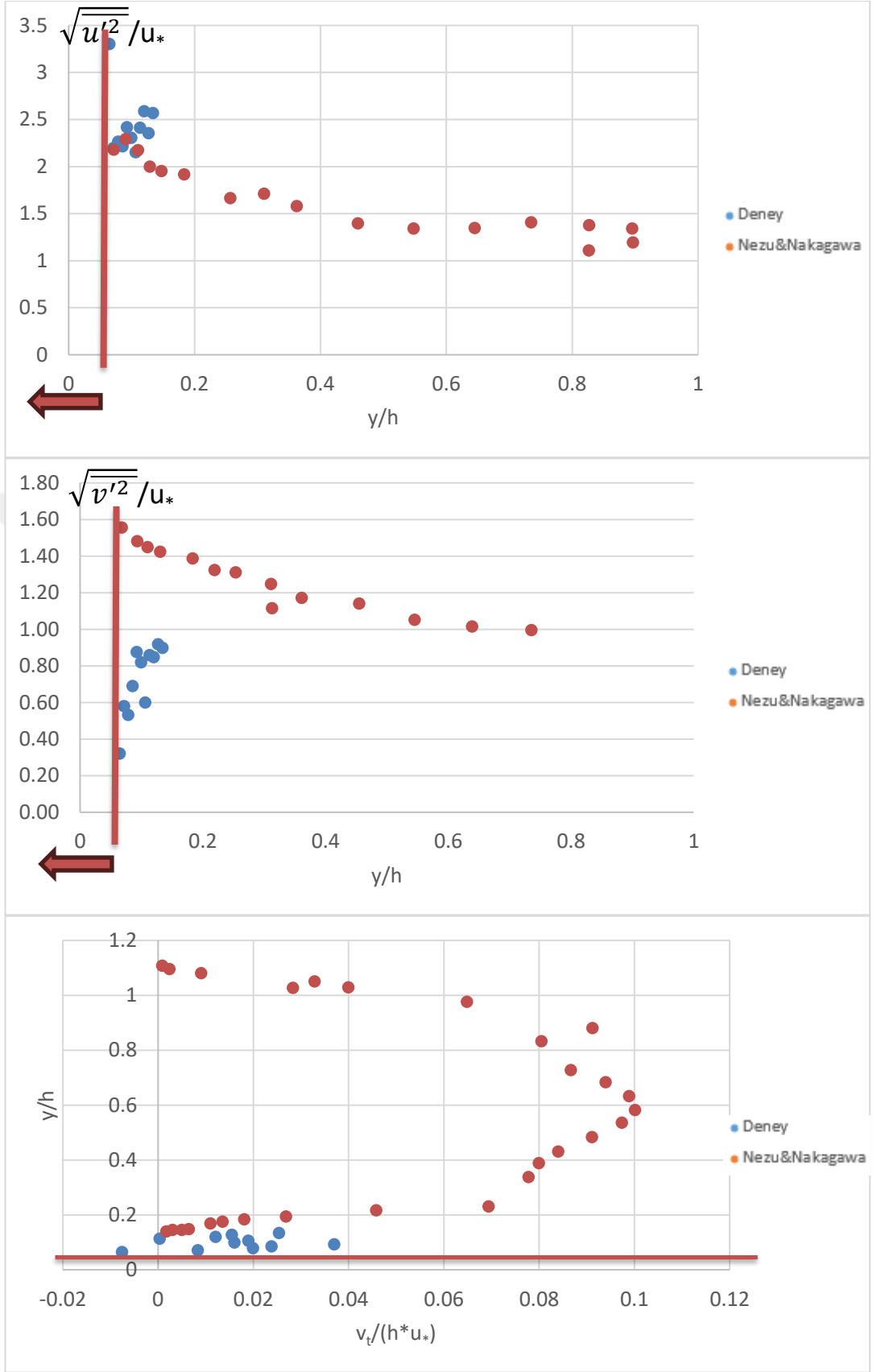
A B C D E F



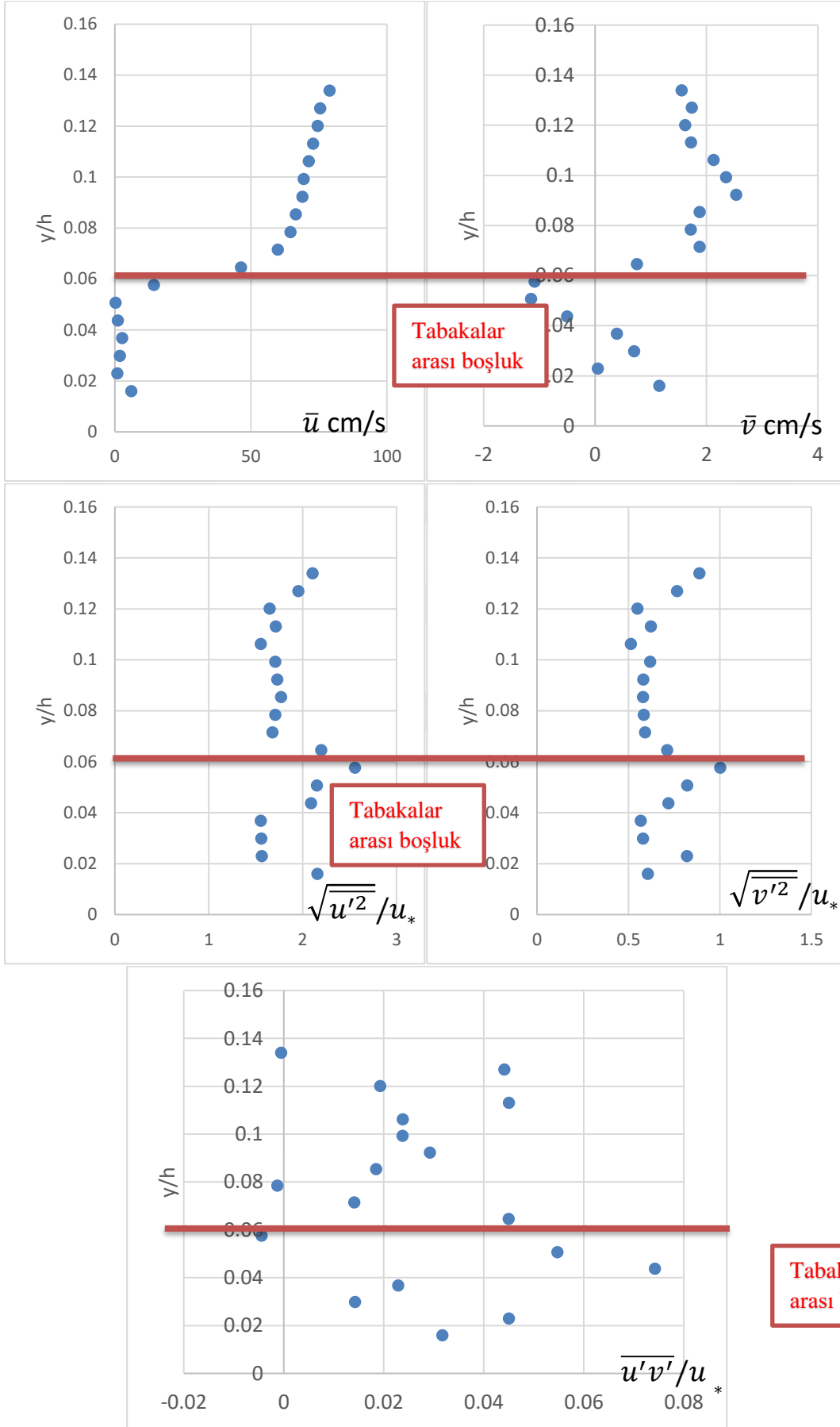
Şekil A.64 : 10. Deney hız vektörleri.



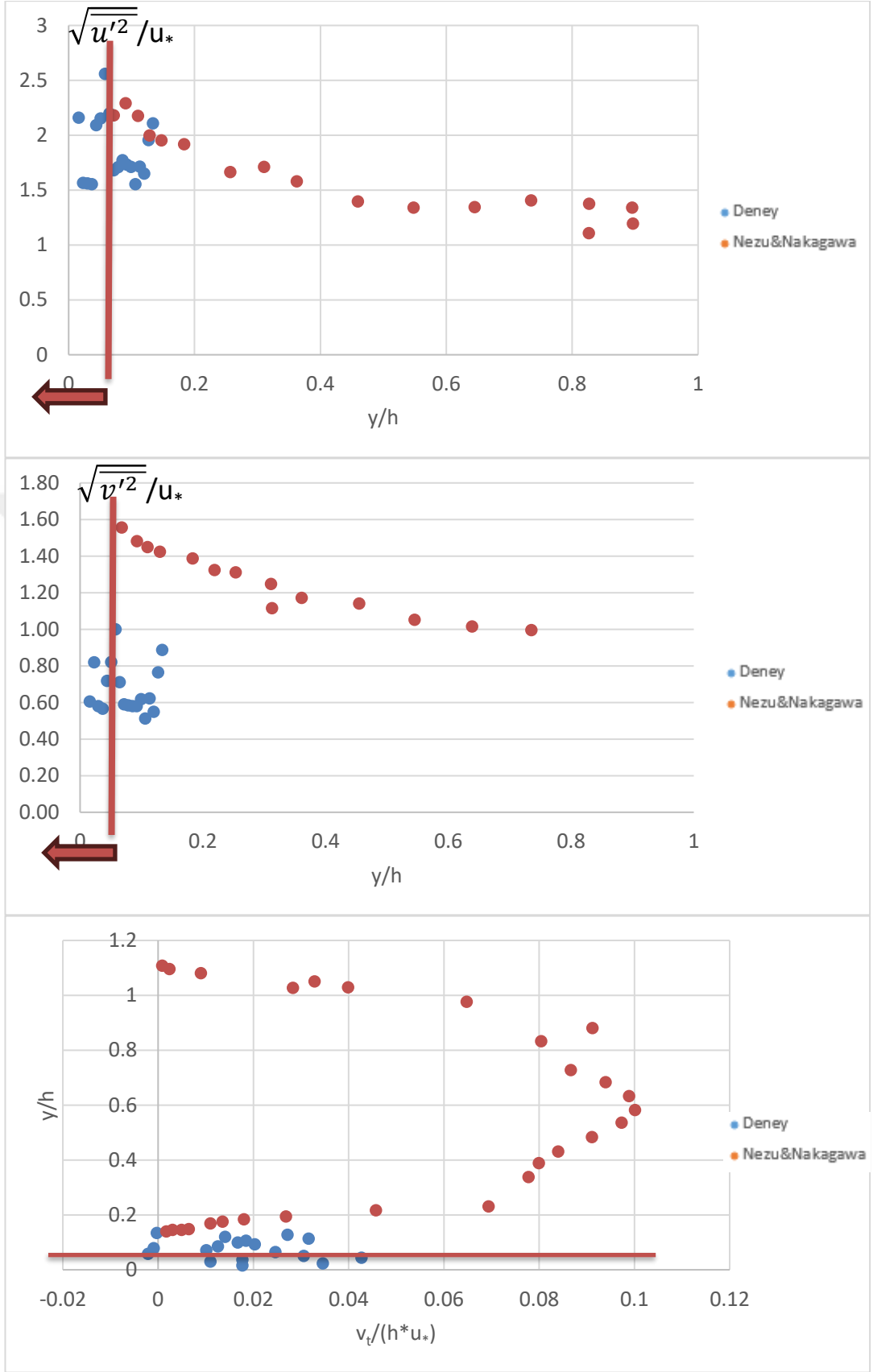
Şekil A.65 : 10. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



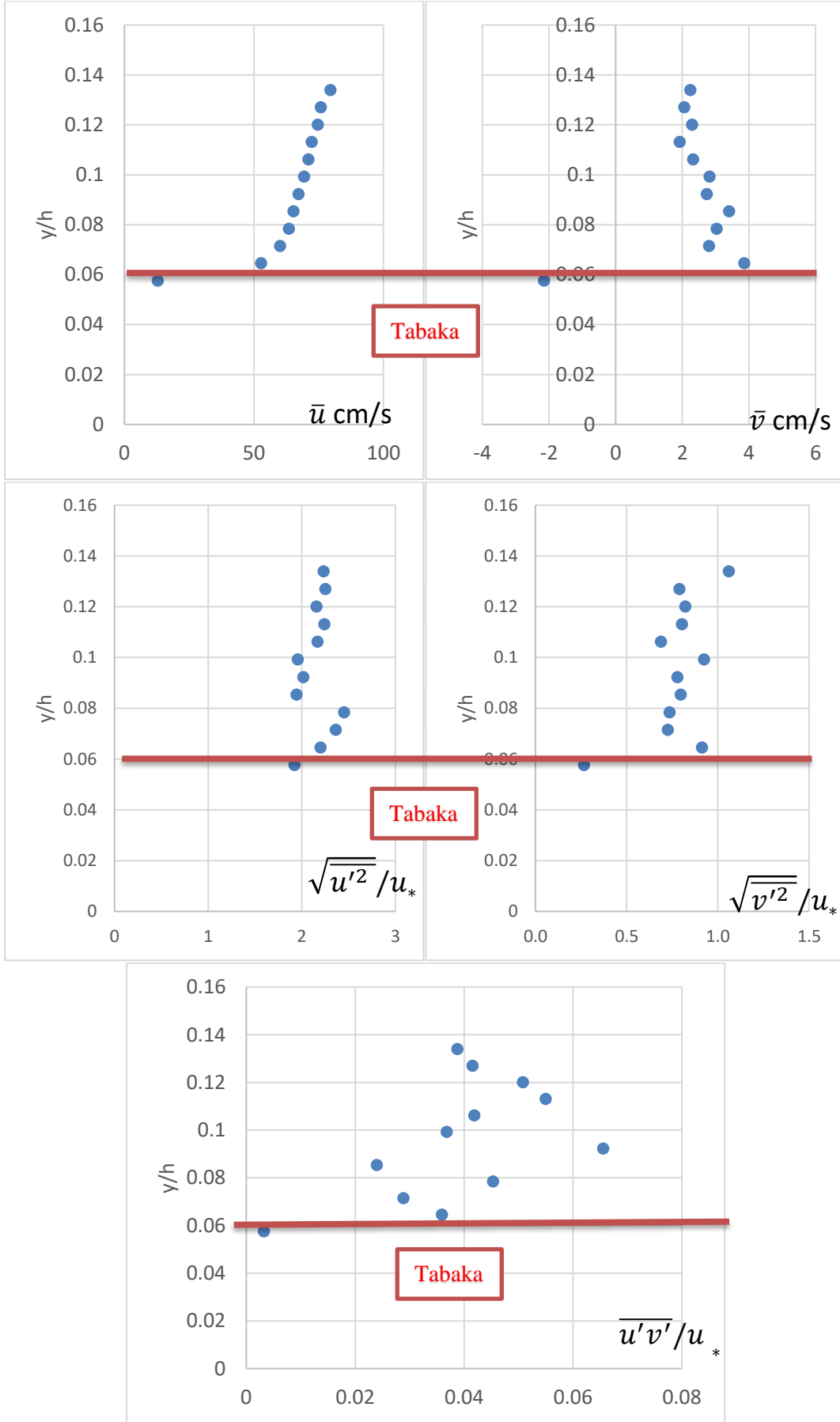
Şekil A.66 : 10. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



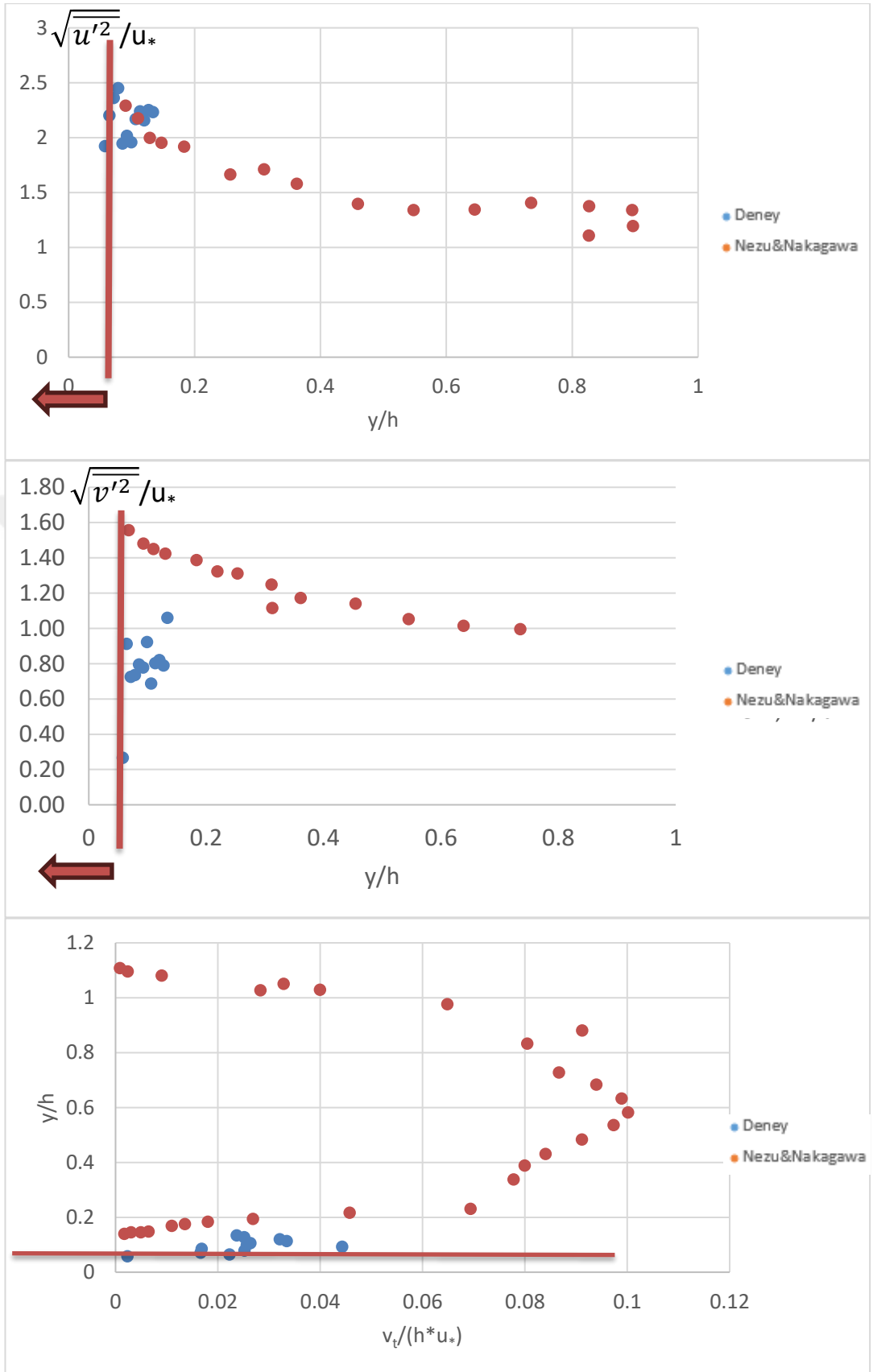
Şekil A.67 : 10. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



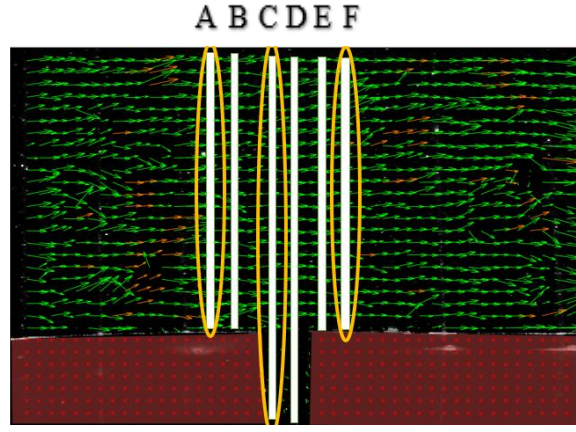
Şekil A.68 : 10. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



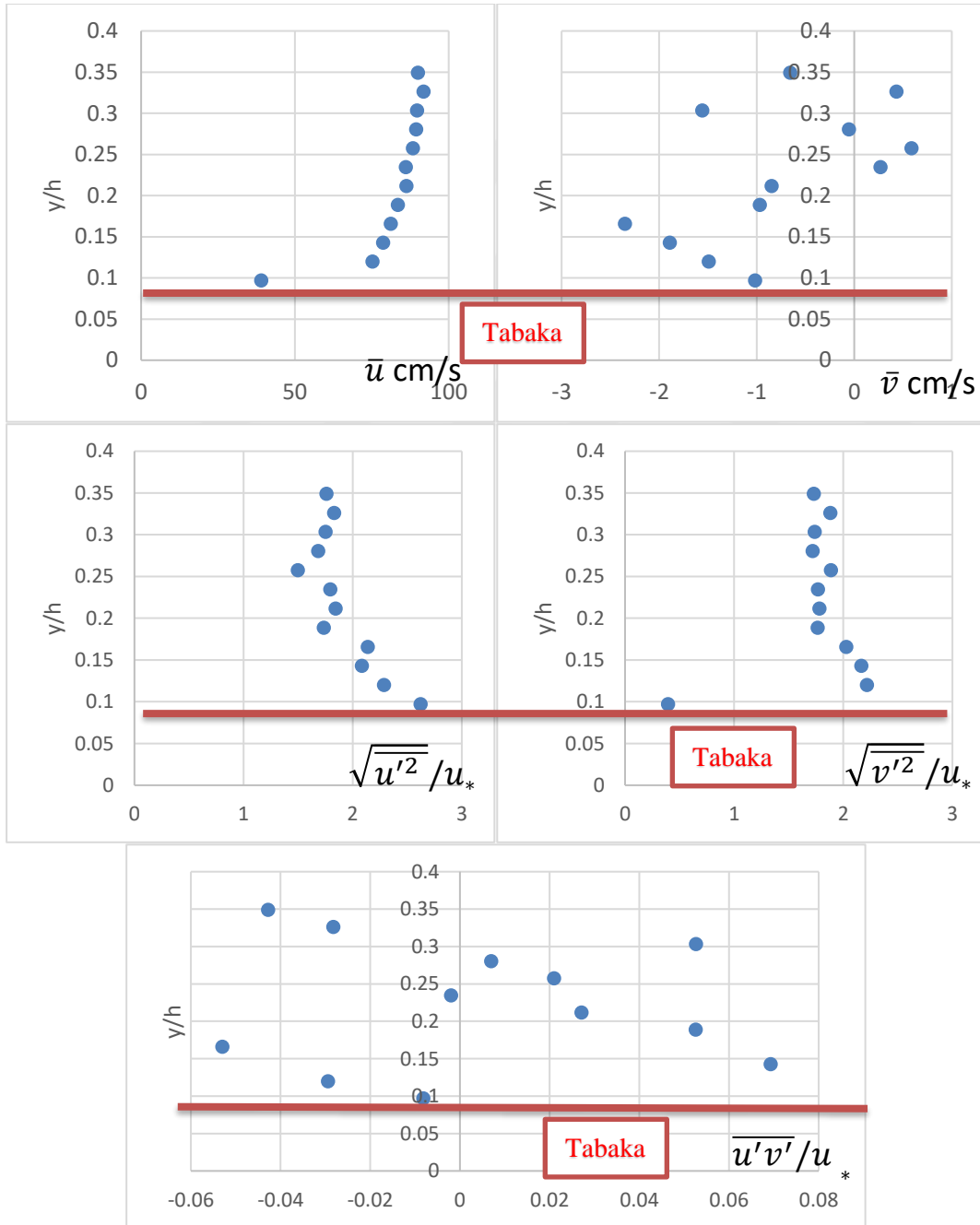
Şekil A.69 : 10. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).



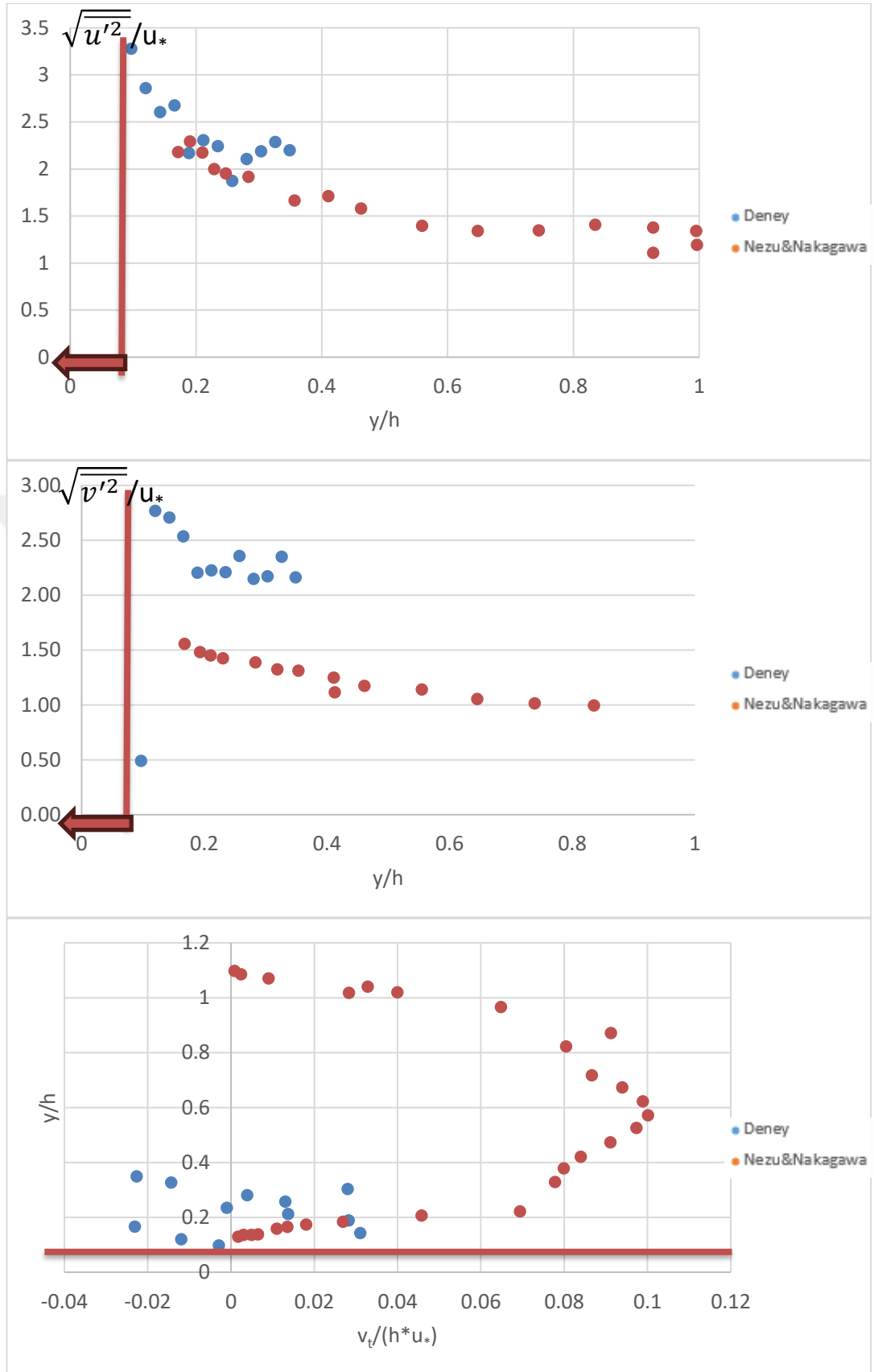
Şekil A.70 : 10. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



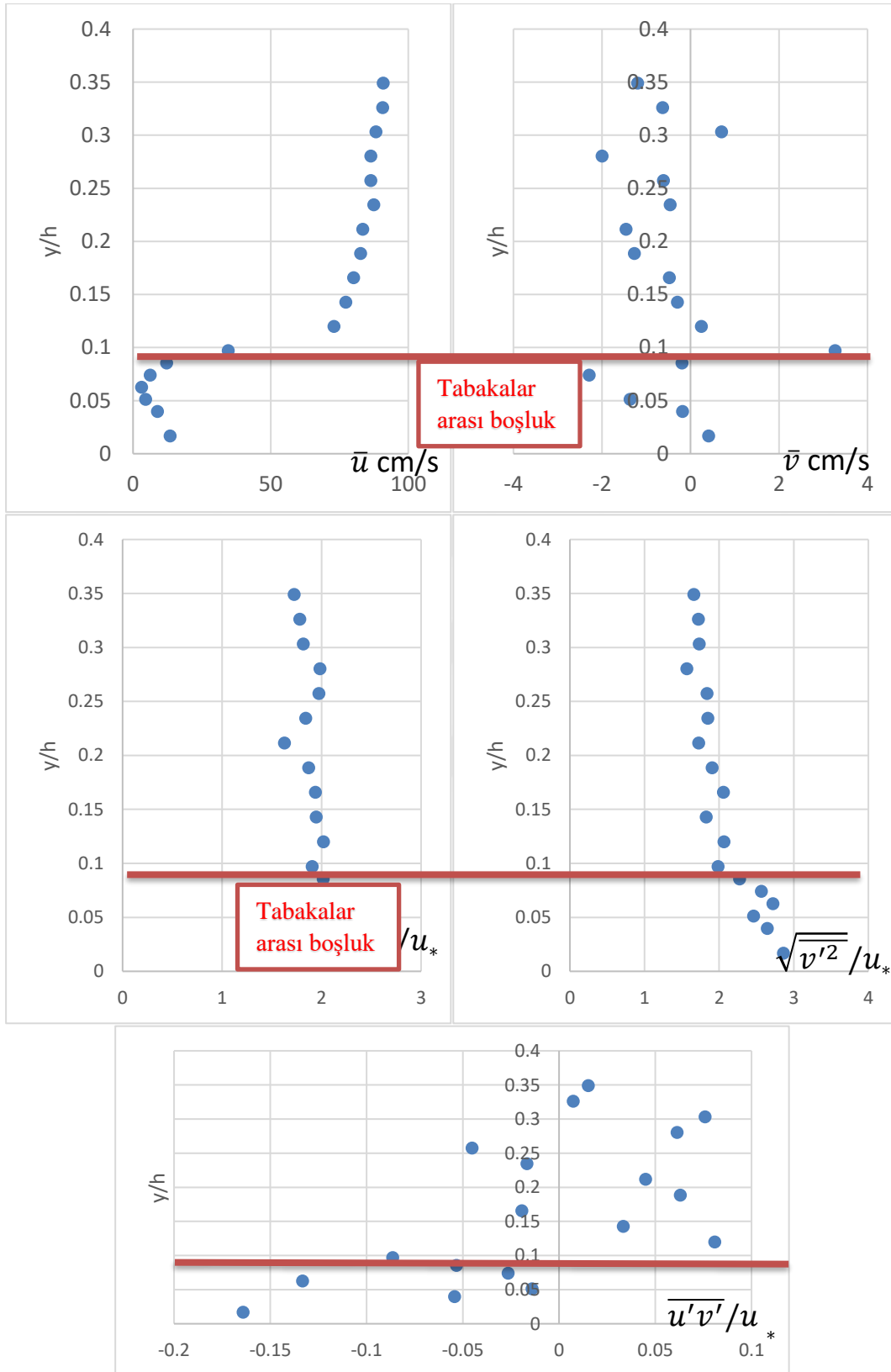
Şekil A.71 : 11. Deney hız vektörleri.



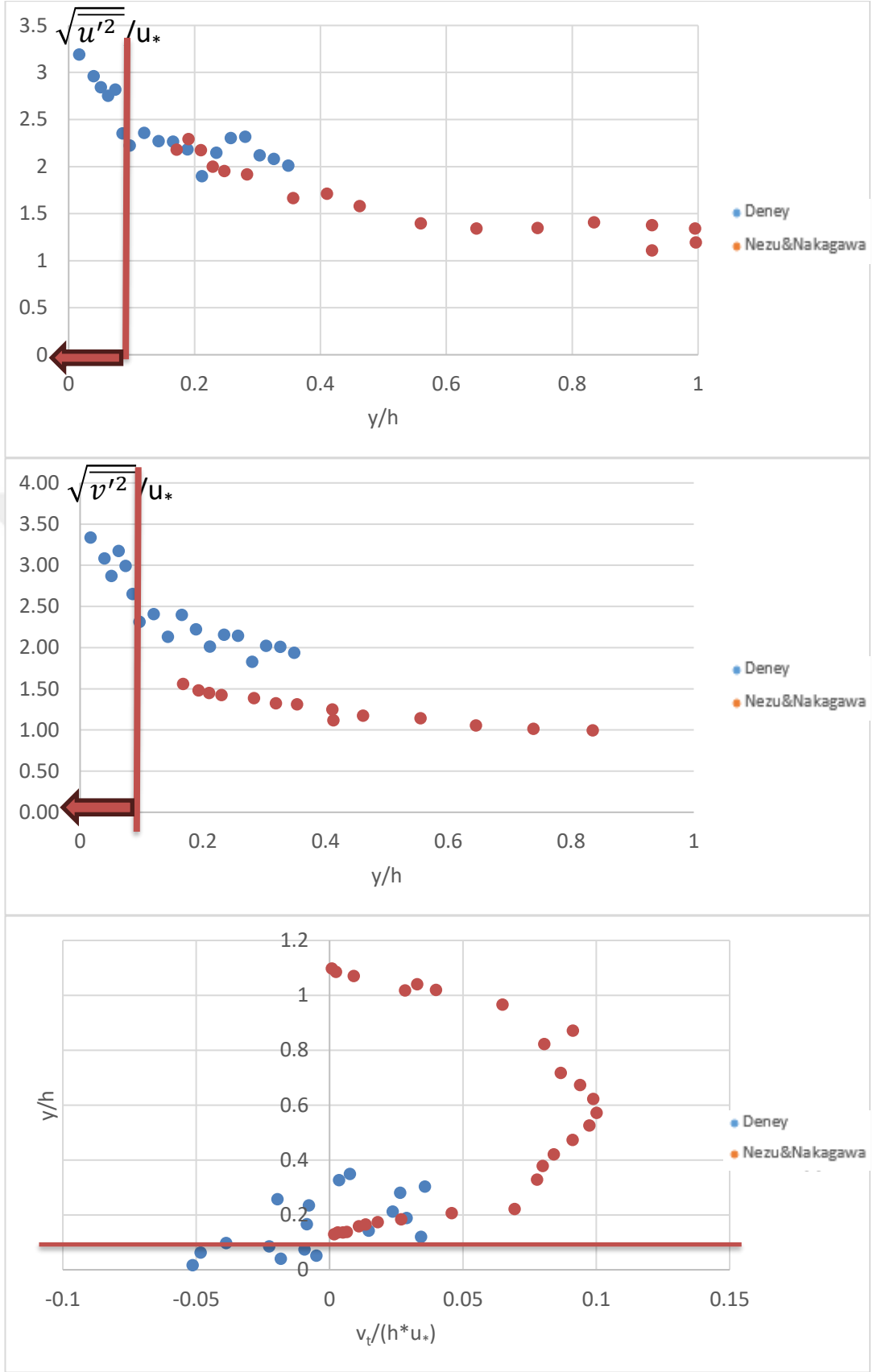
Şekil A.72 : 11. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



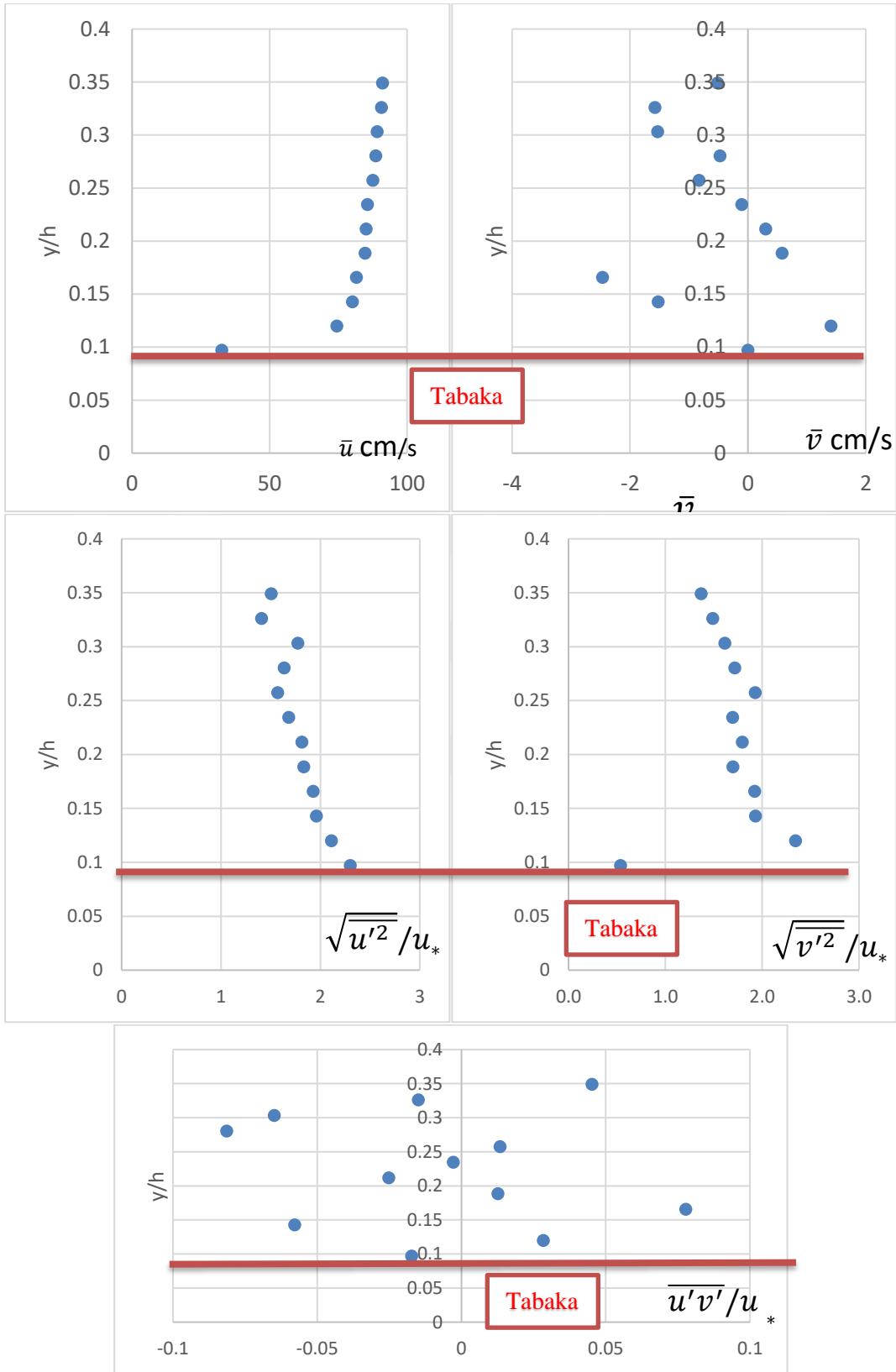
Şekil A.73 : 11. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



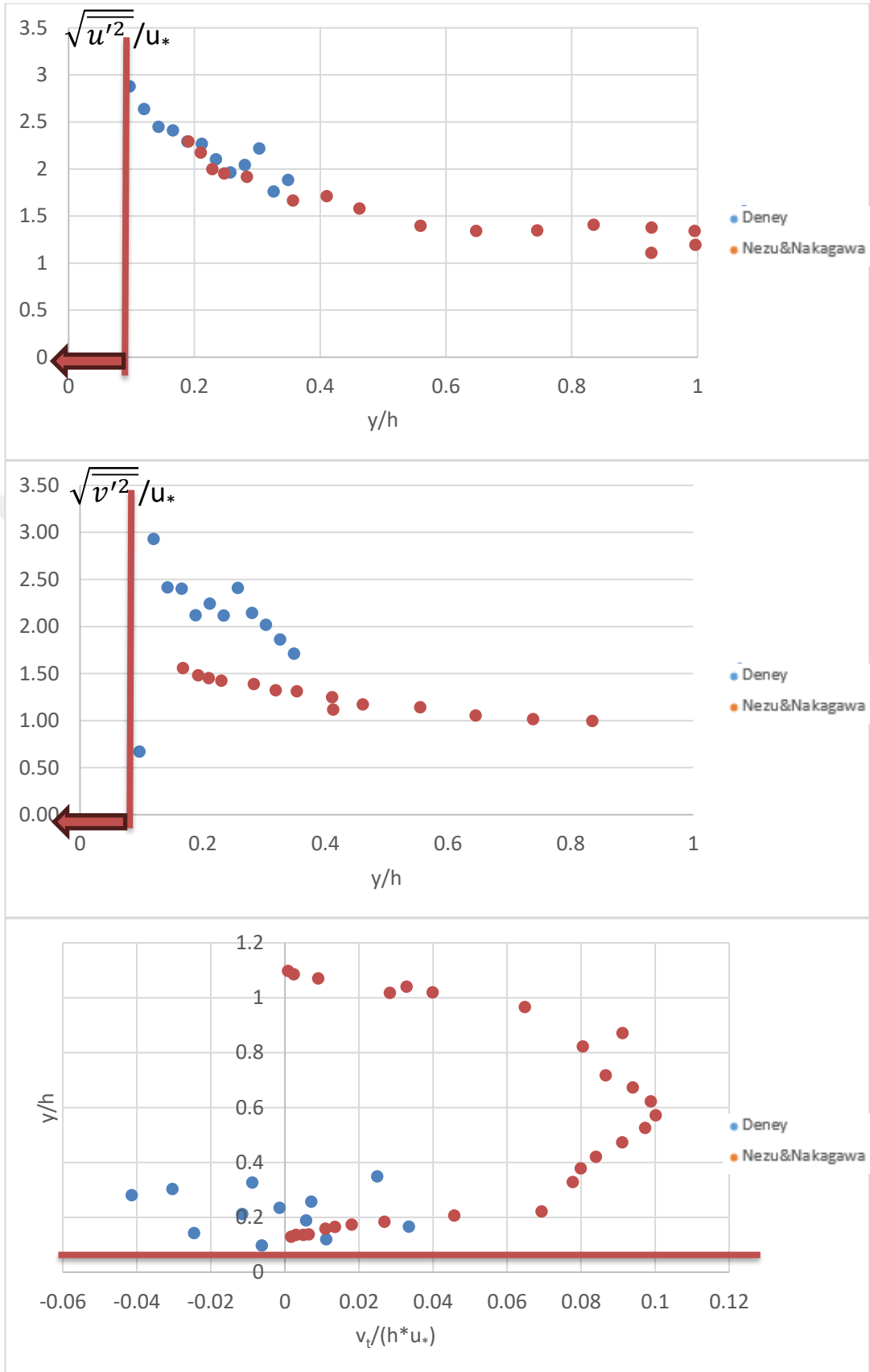
Şekil A.74 : 11. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.75 : 11. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).

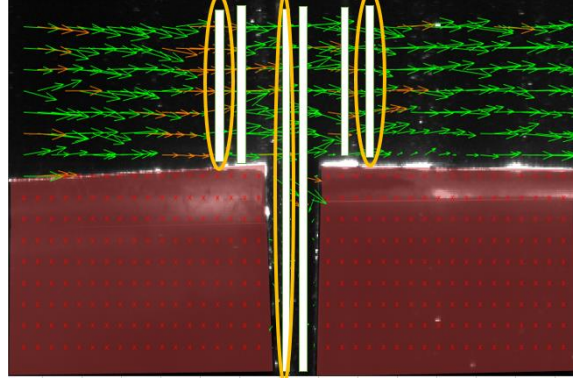


Şekil A.76 : 11. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).

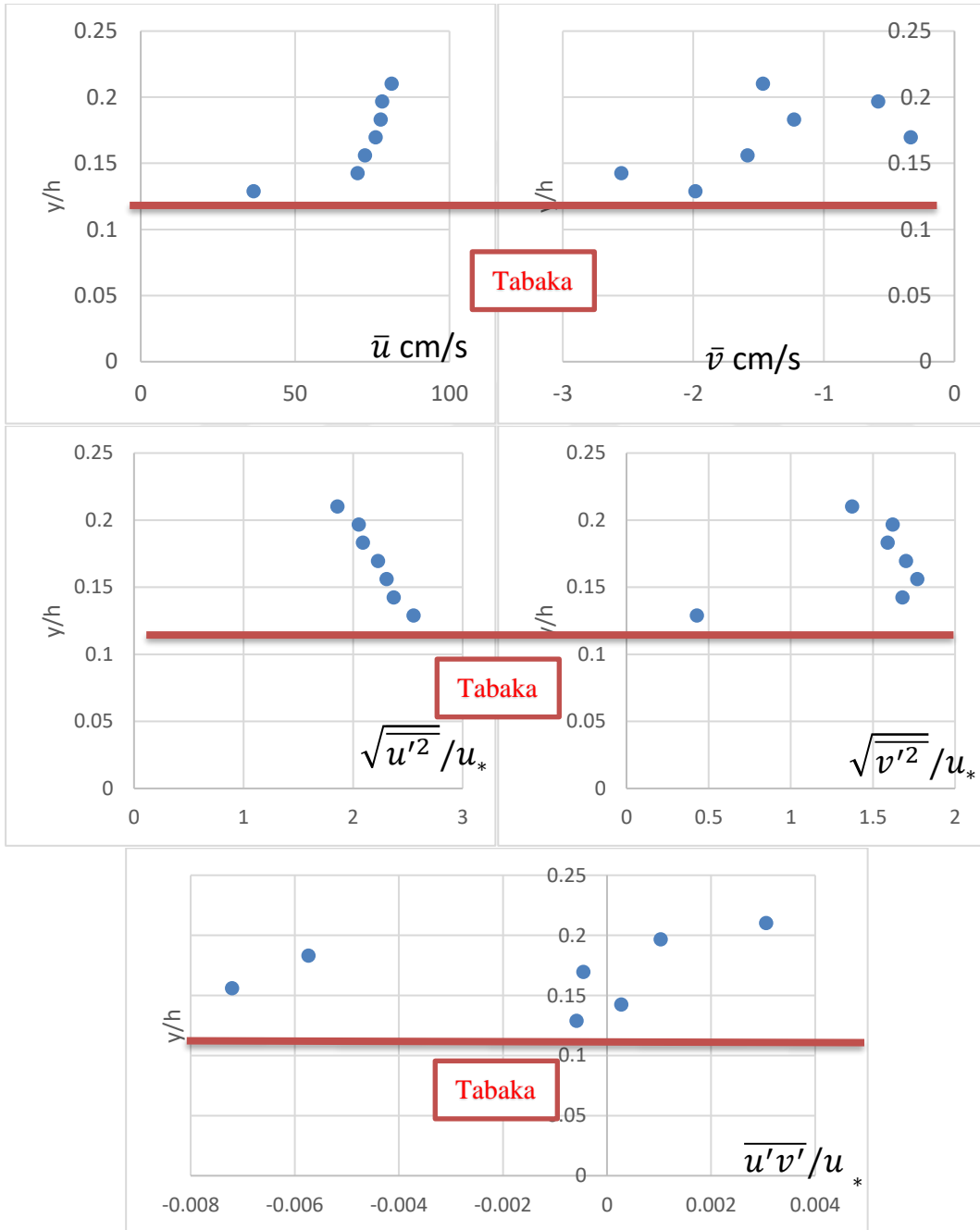


Şekil A.77 : 11. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).

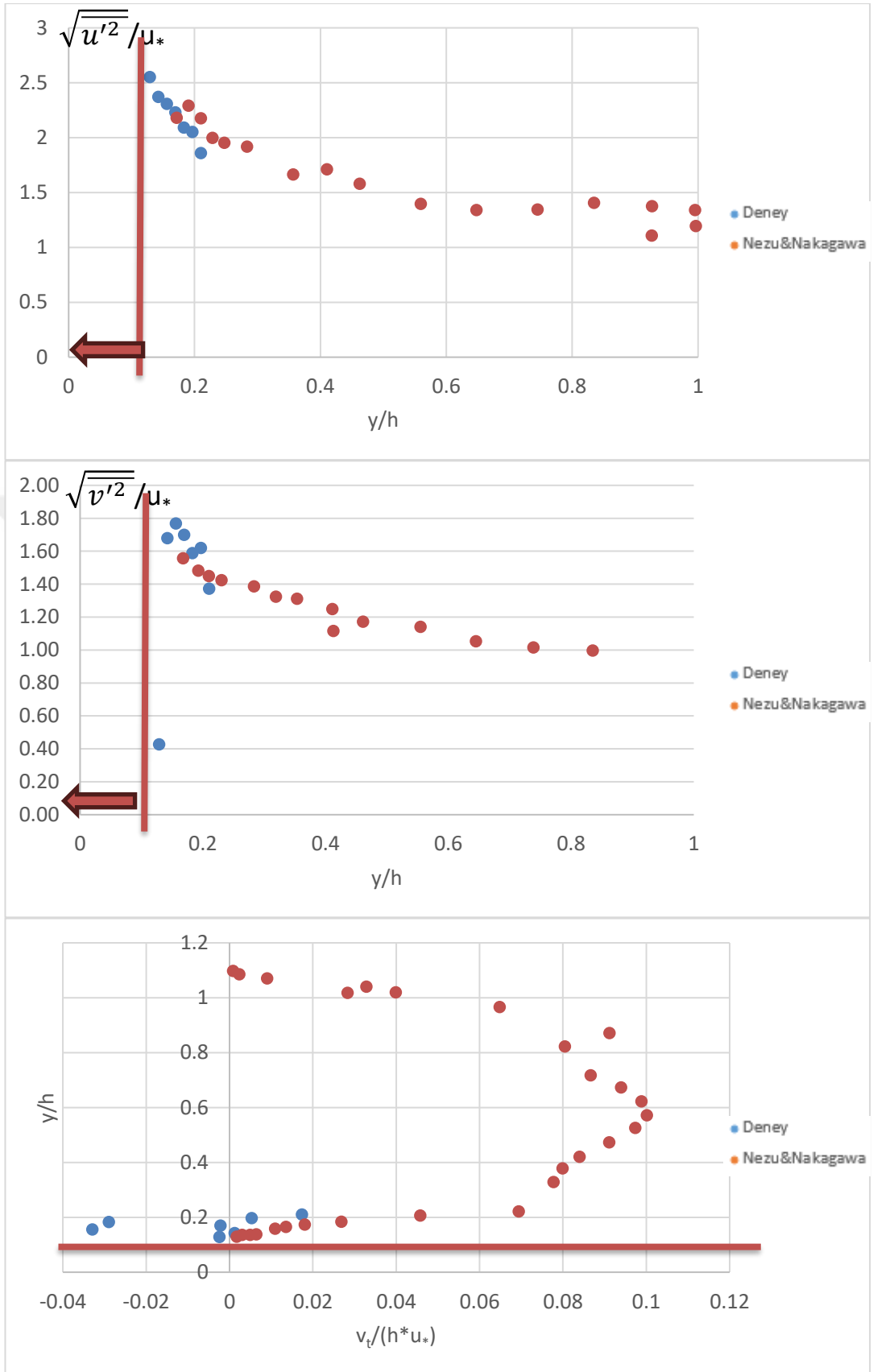
A B C D E F



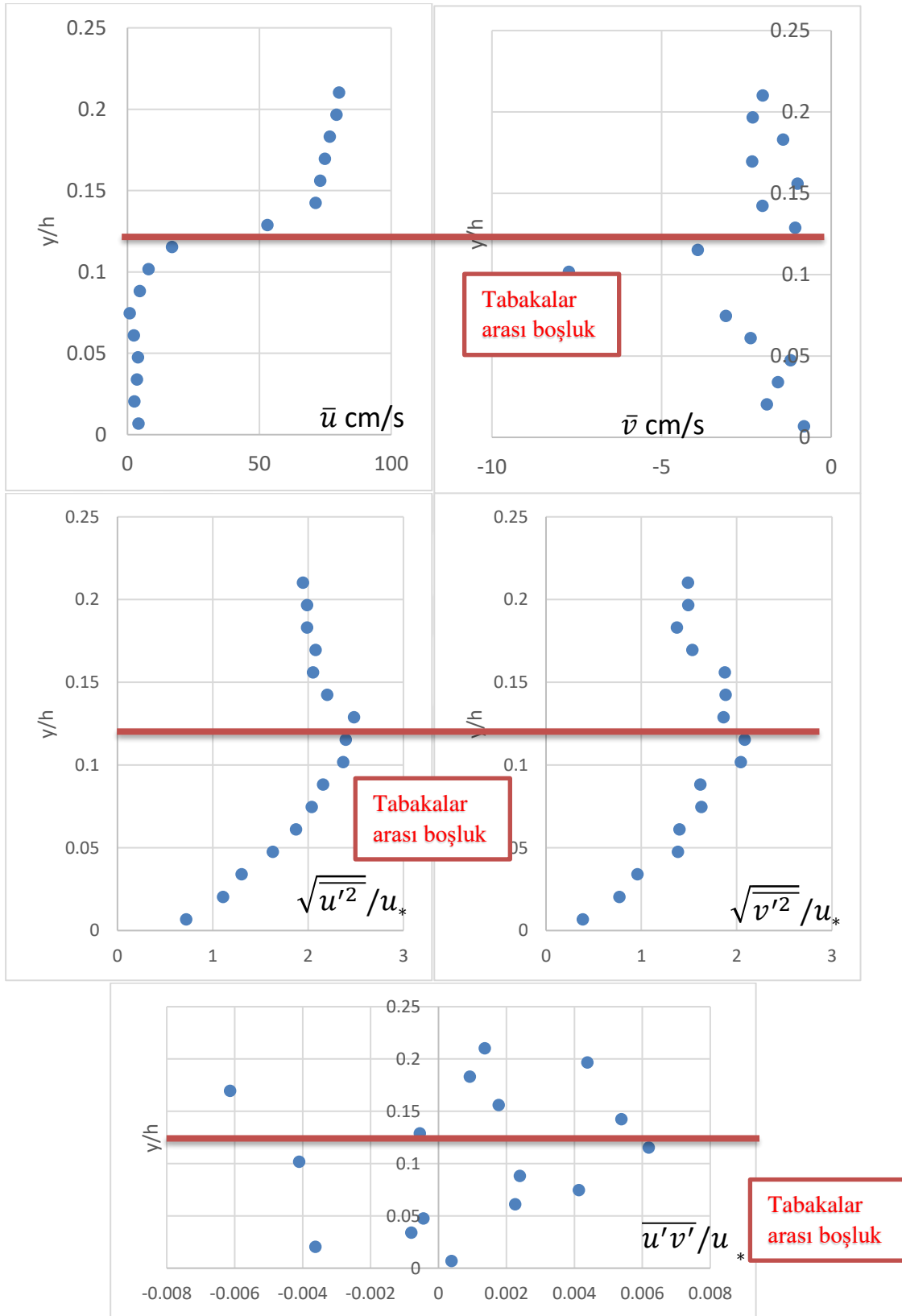
Şekil A.78 : 12. Deney hız vektörleri.



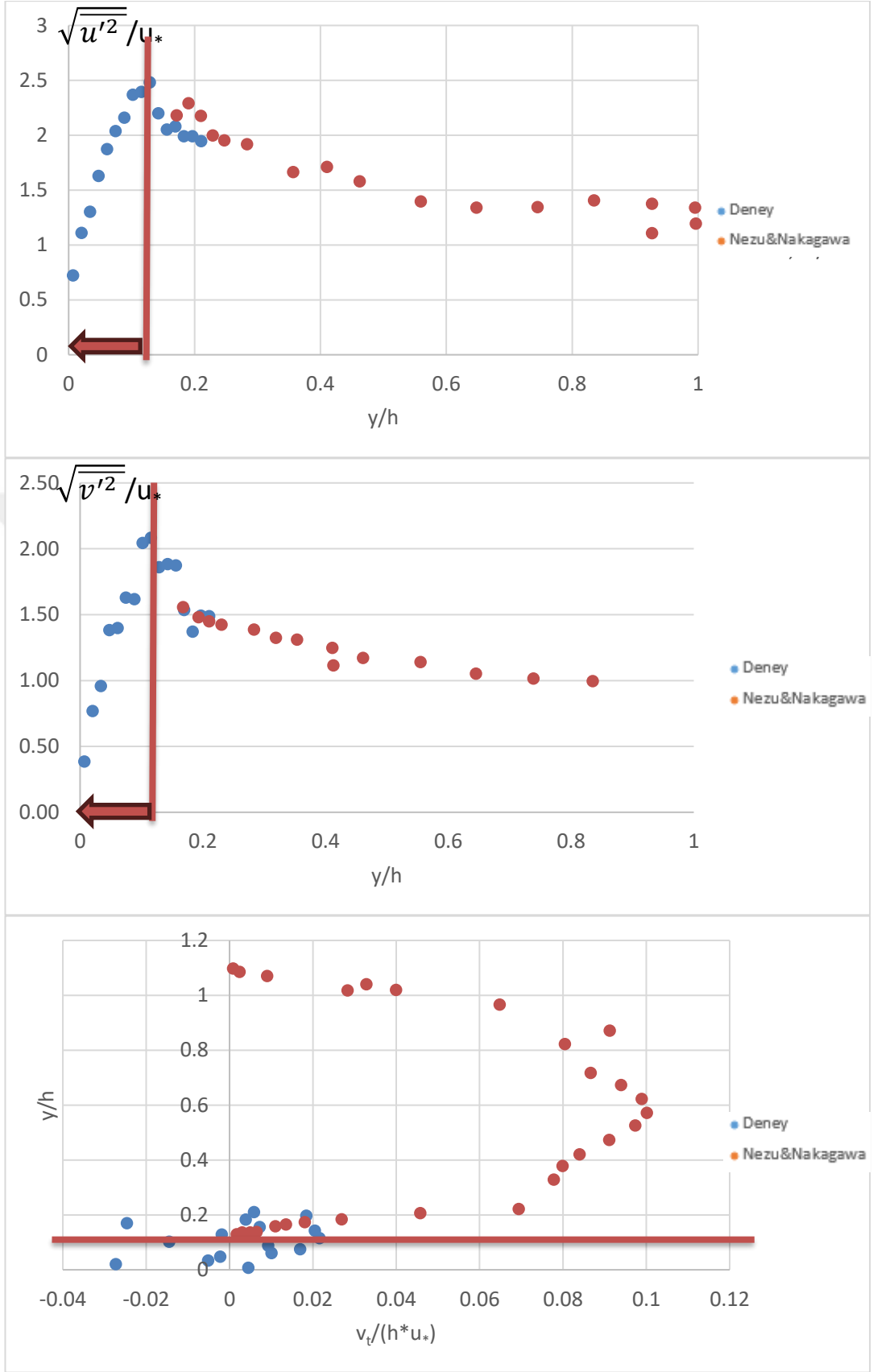
Şekil A.79 : 12. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



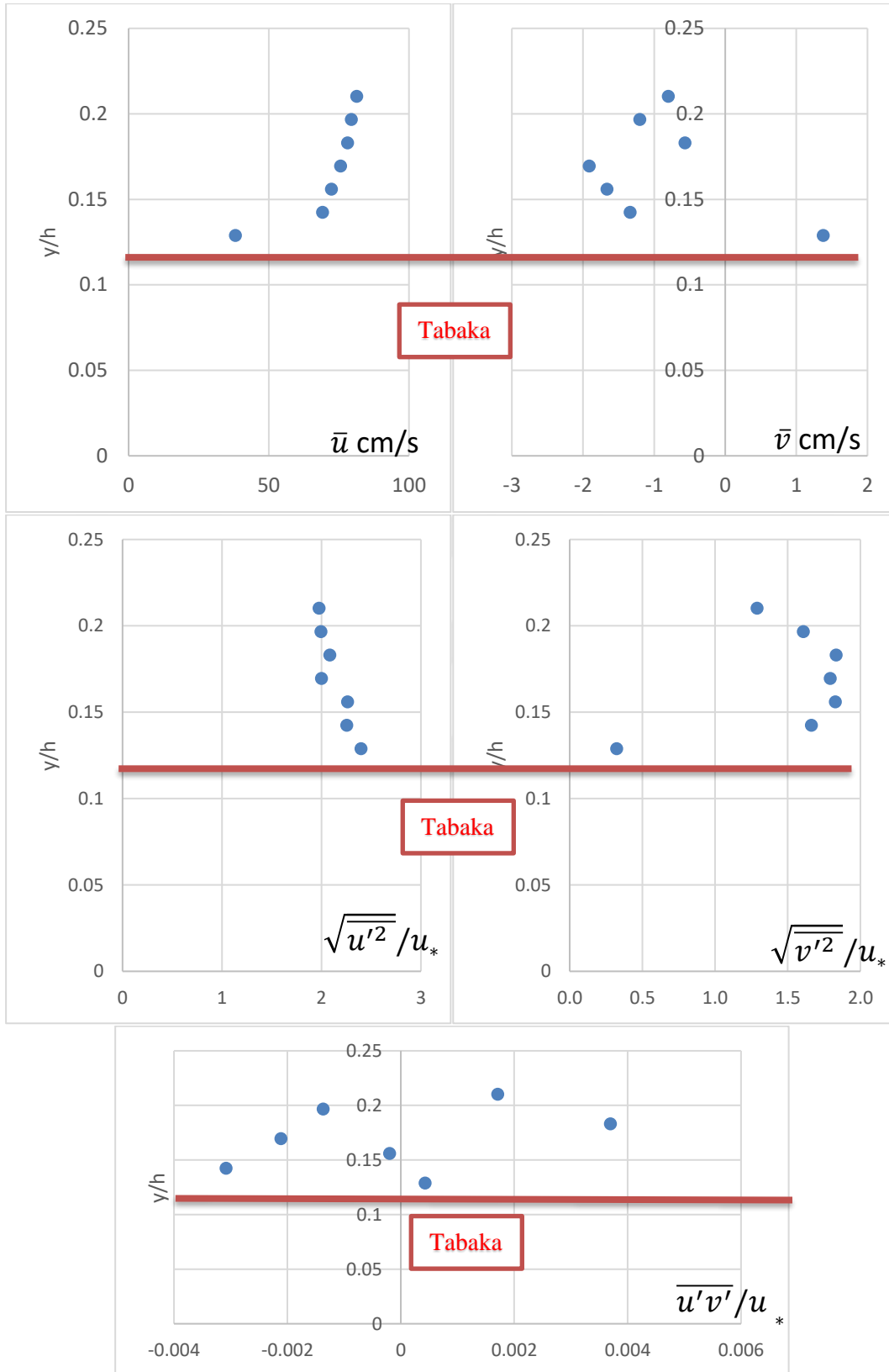
Şekil A.80 : 12. Deneysel karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



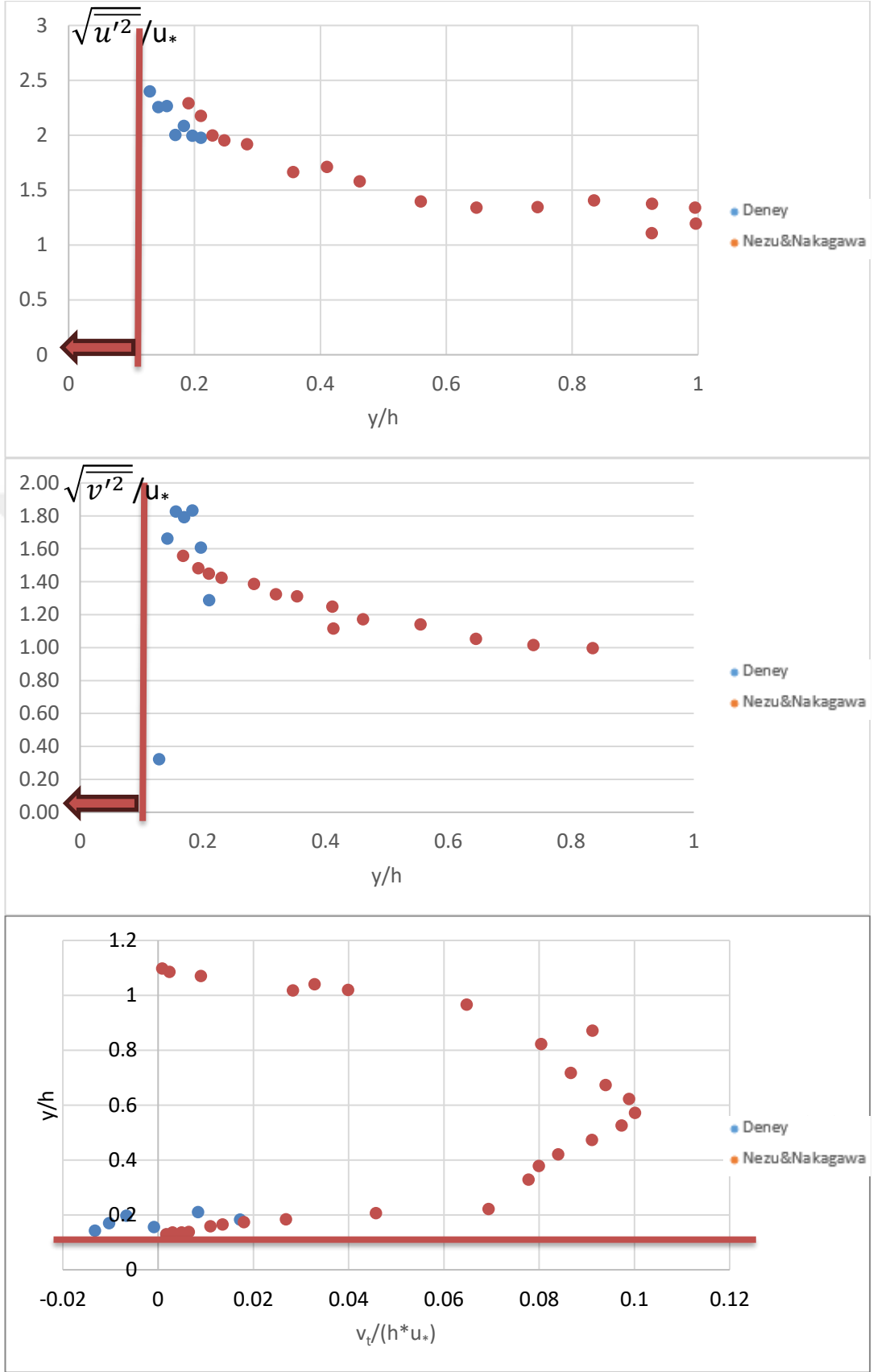
Şekil A.81 : 12. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



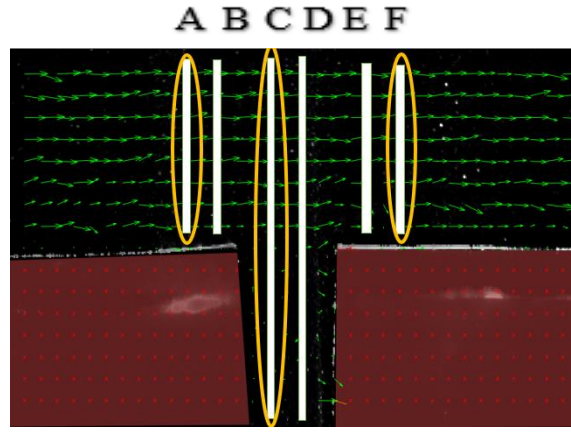
Şekil A.82 : 12. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



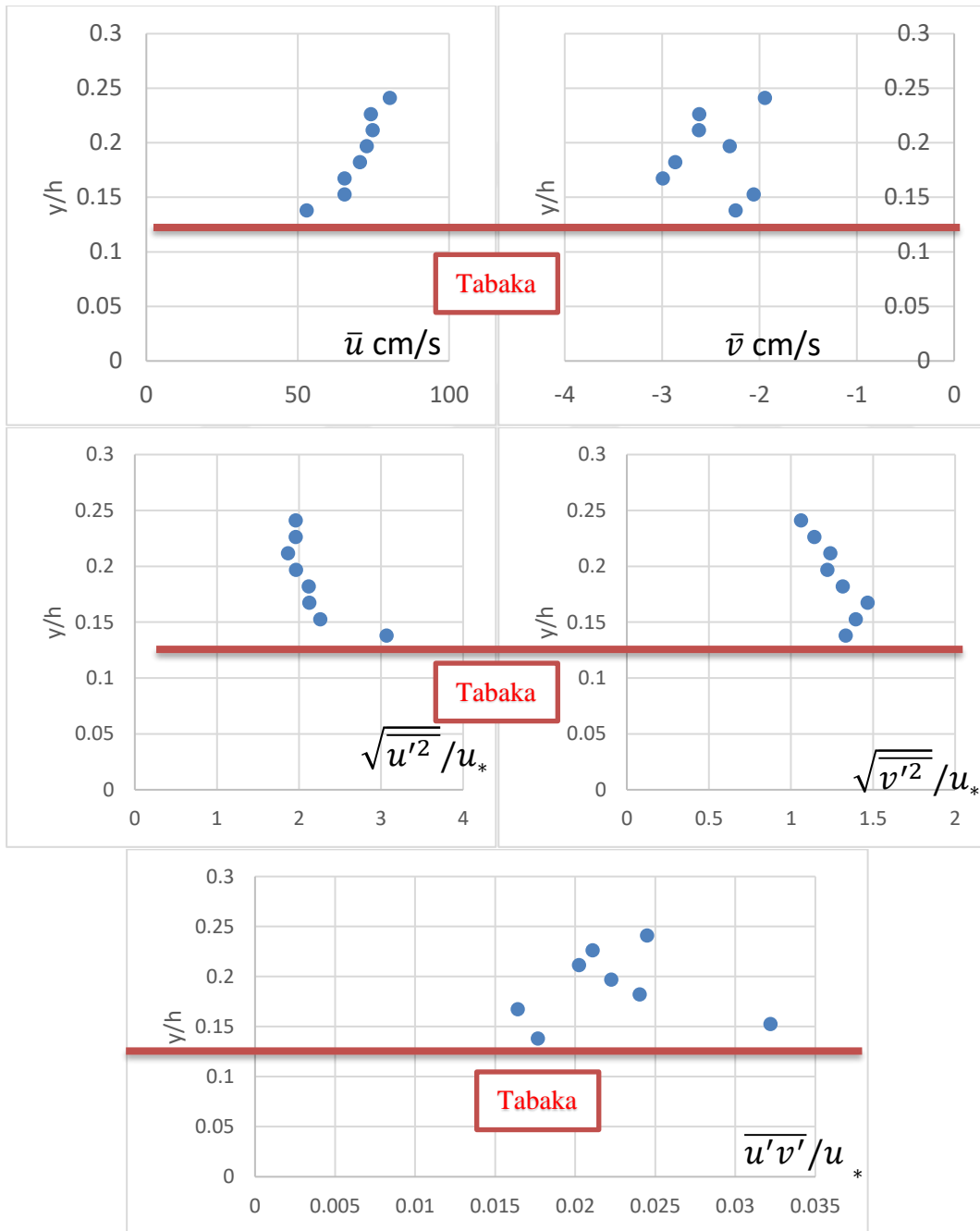
Şekil A.83 : 12. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).



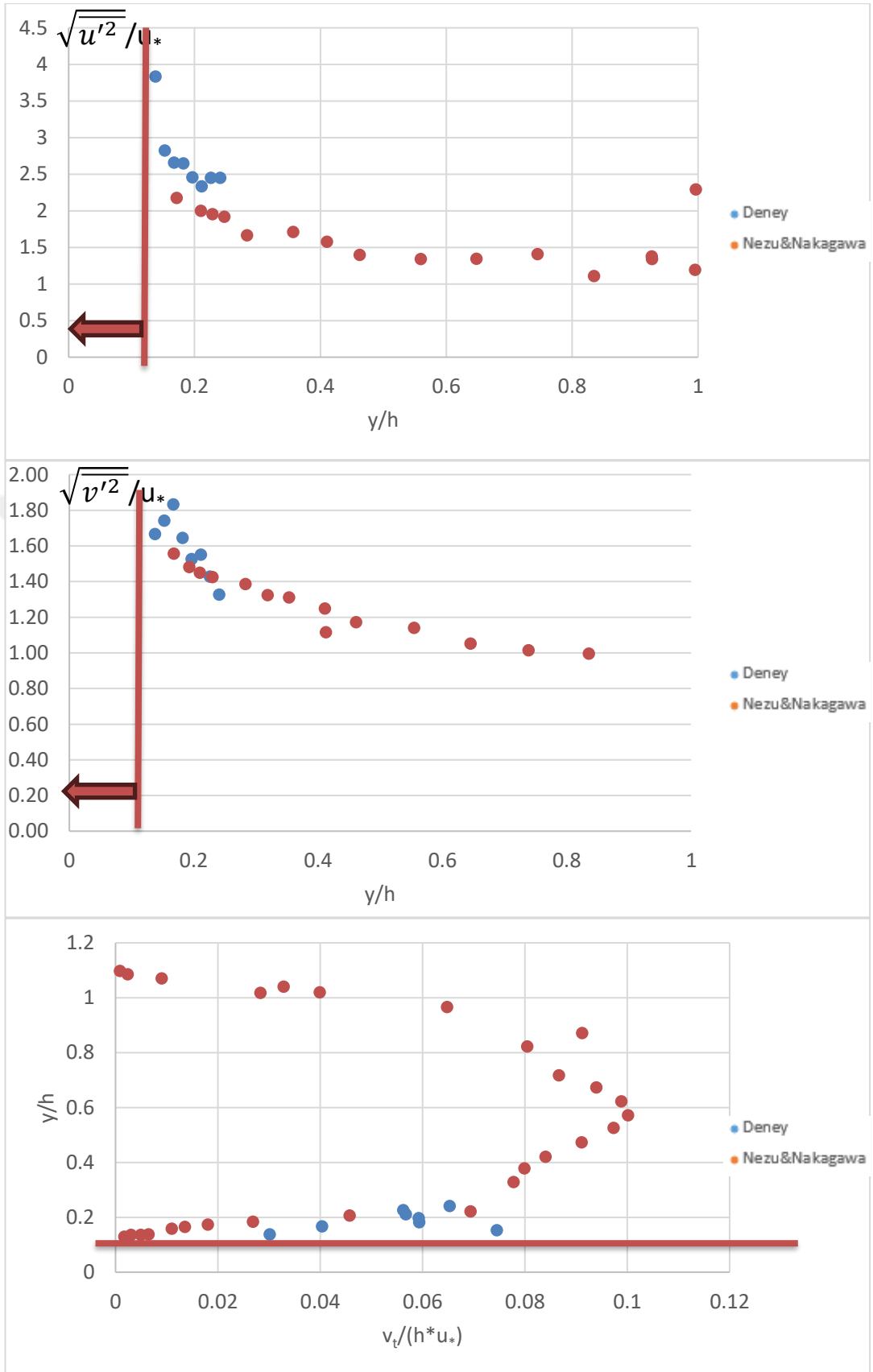
Şekil A.84 : 12. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



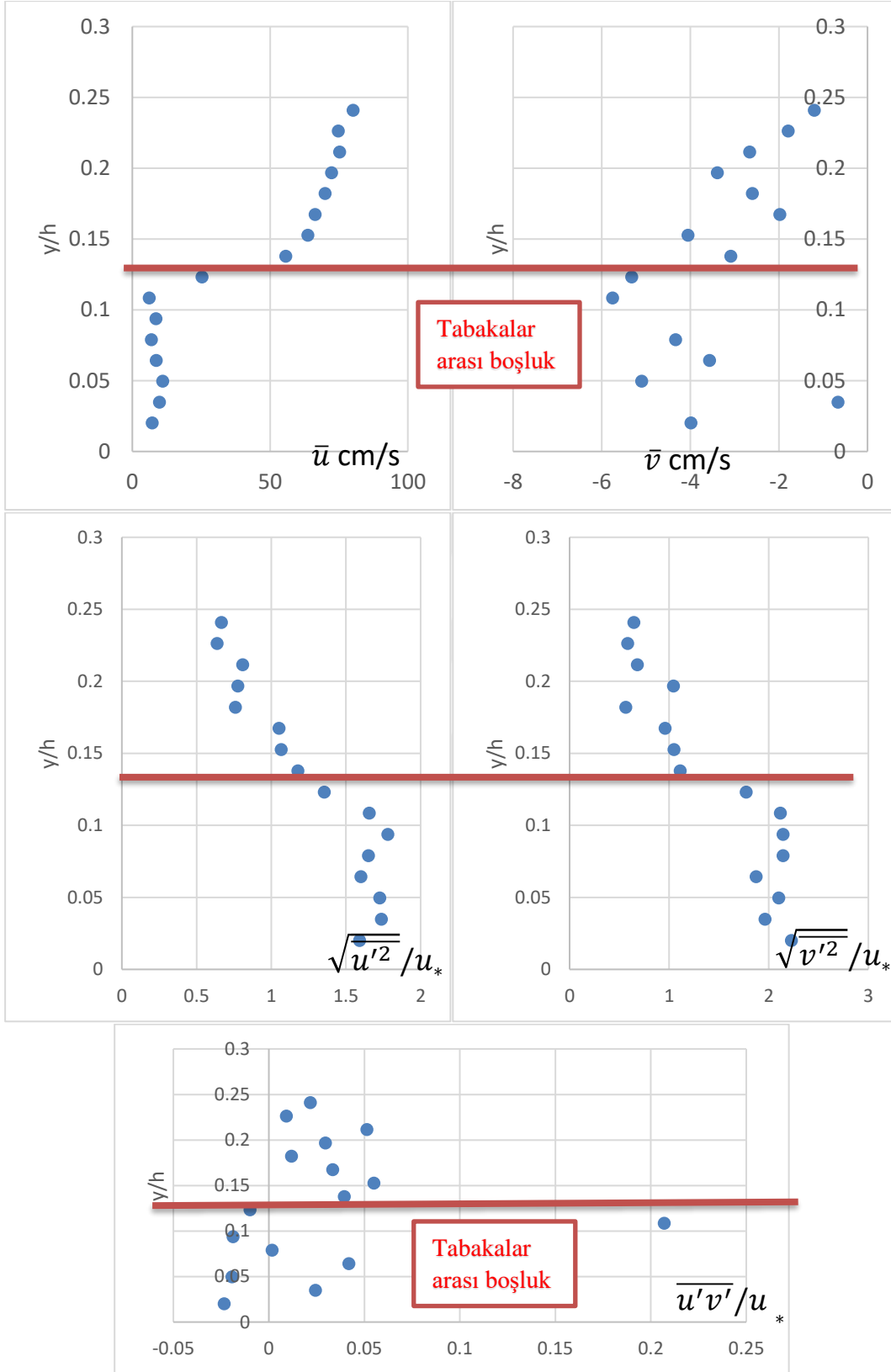
Şekil A.85 : 13. Deney hız vektörleri.



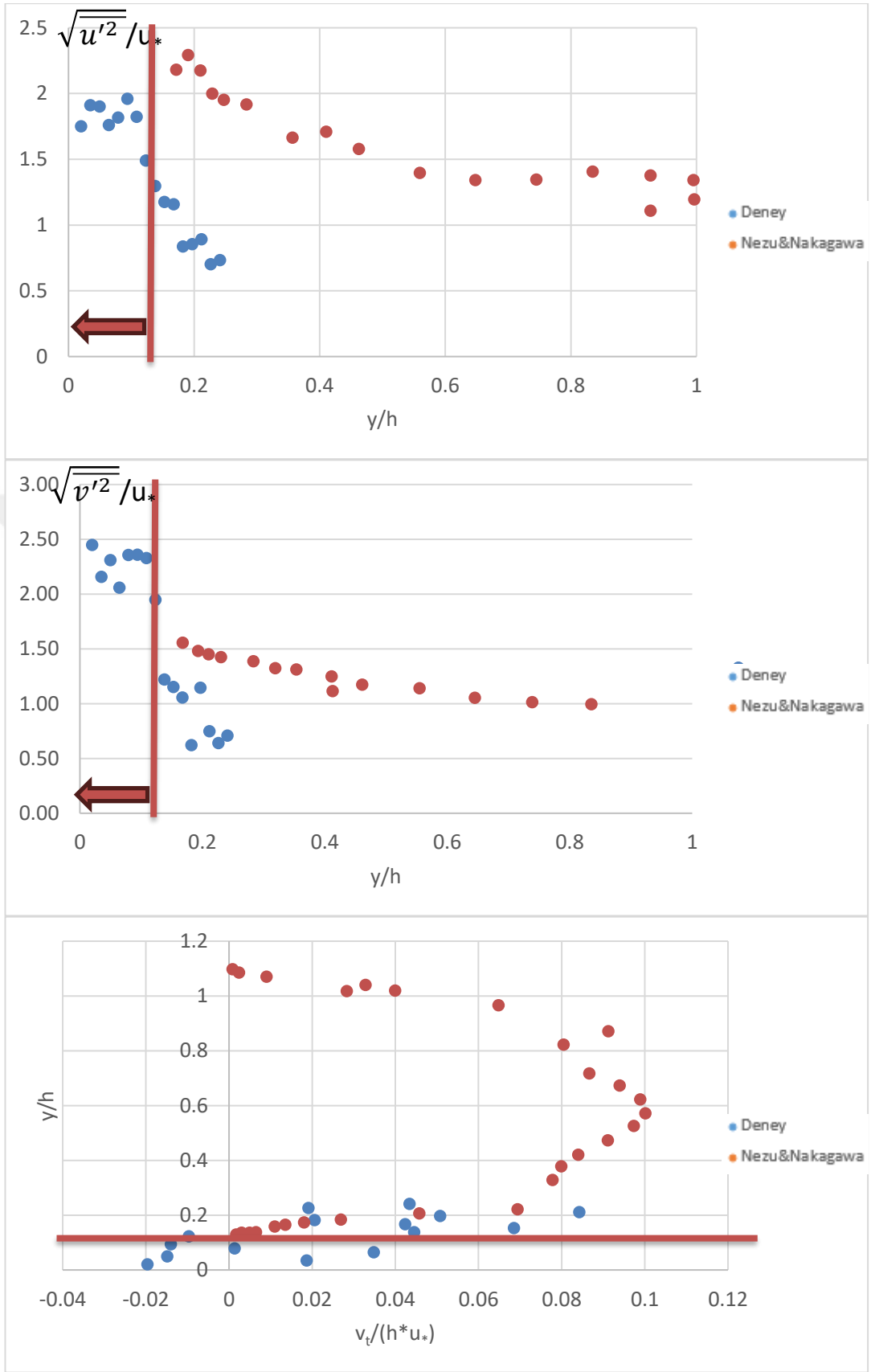
Şekil A.86 : 13. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



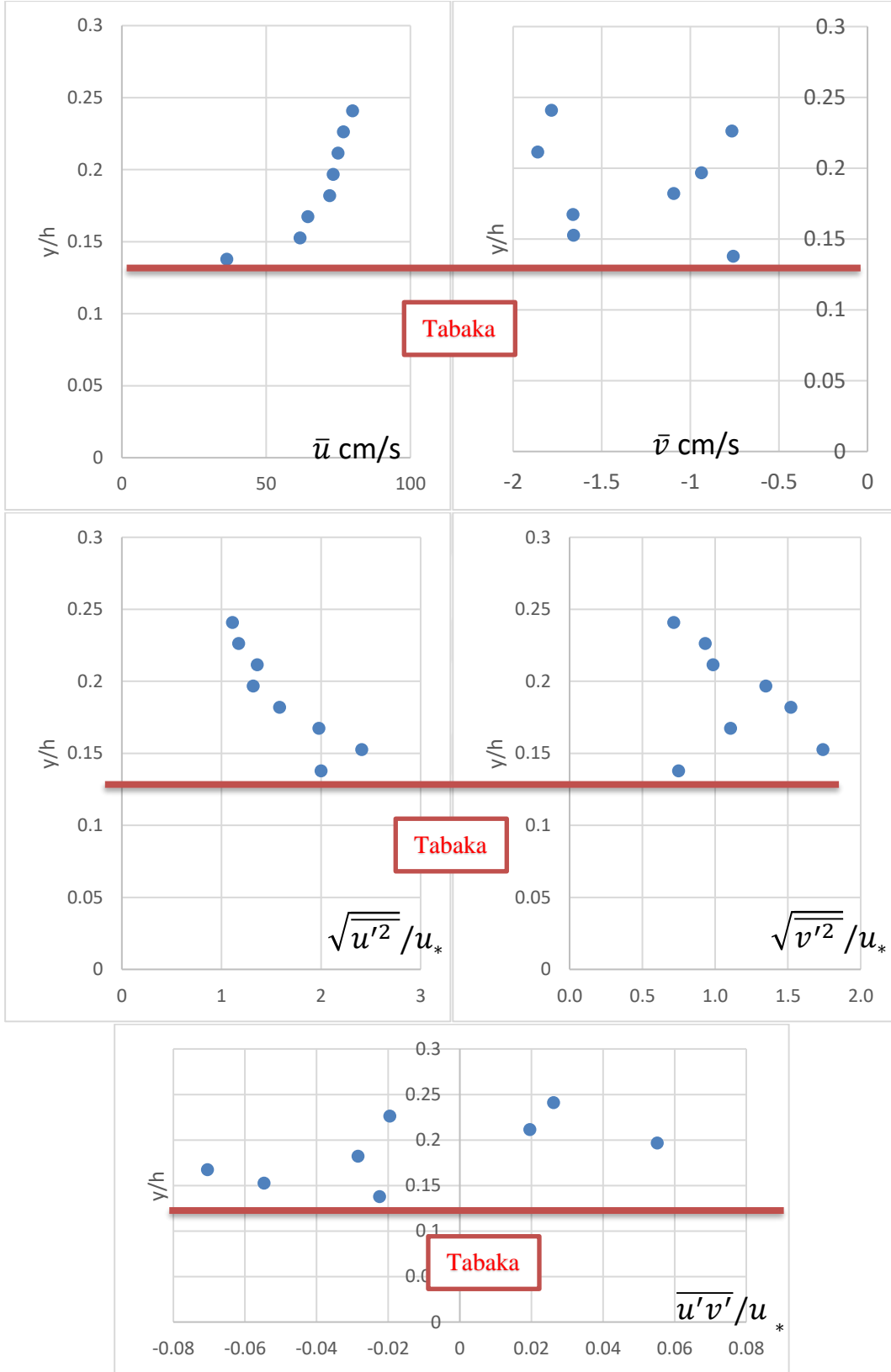
Şekil A.87 : 13. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



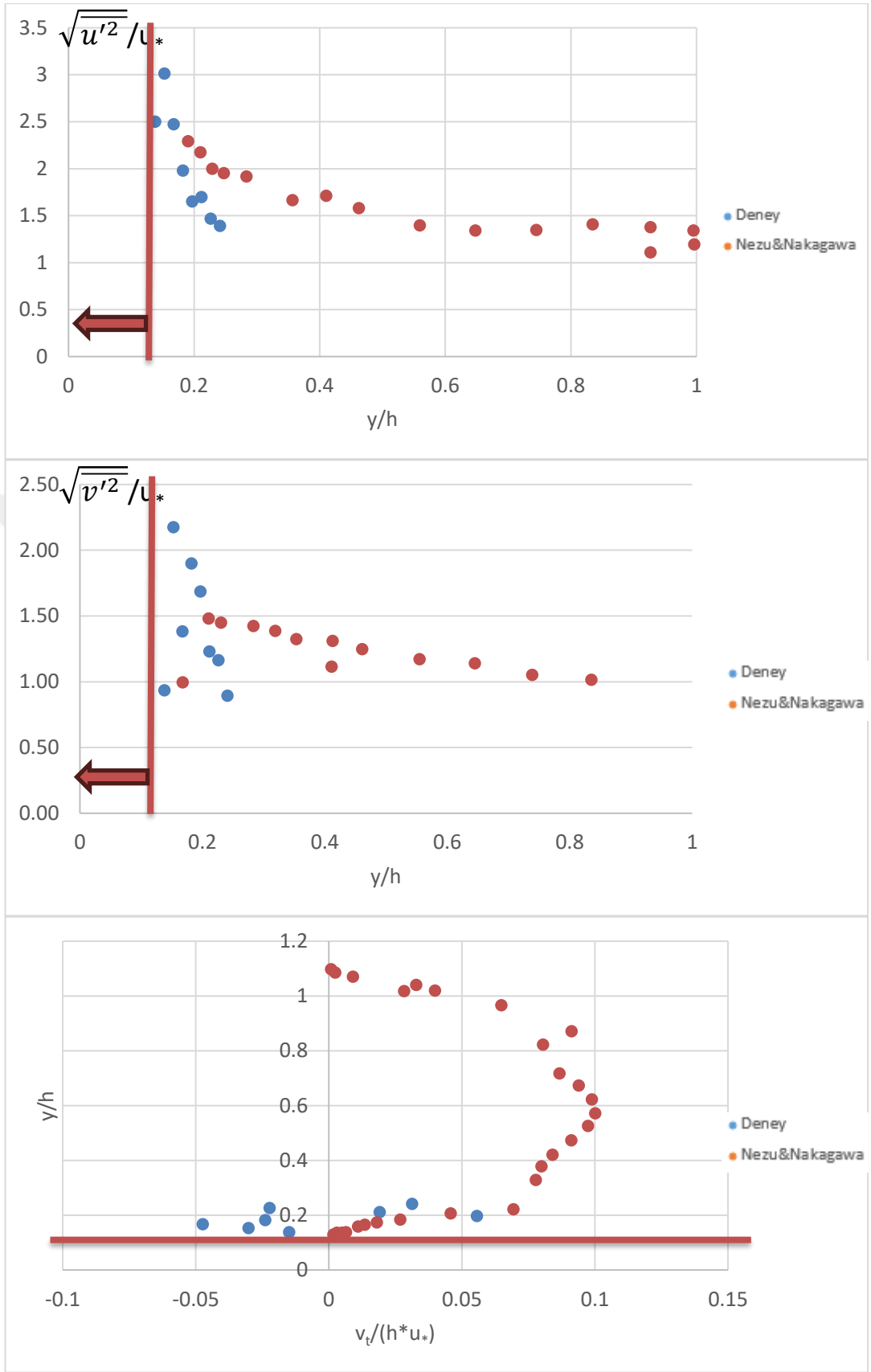
Şekil A.88 : 13. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.89 : 13. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).

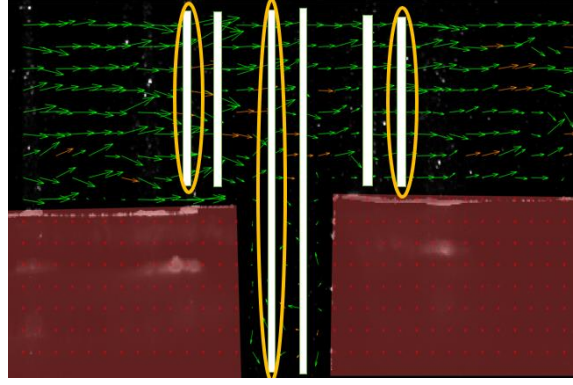


Şekil A.90 : 13. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).

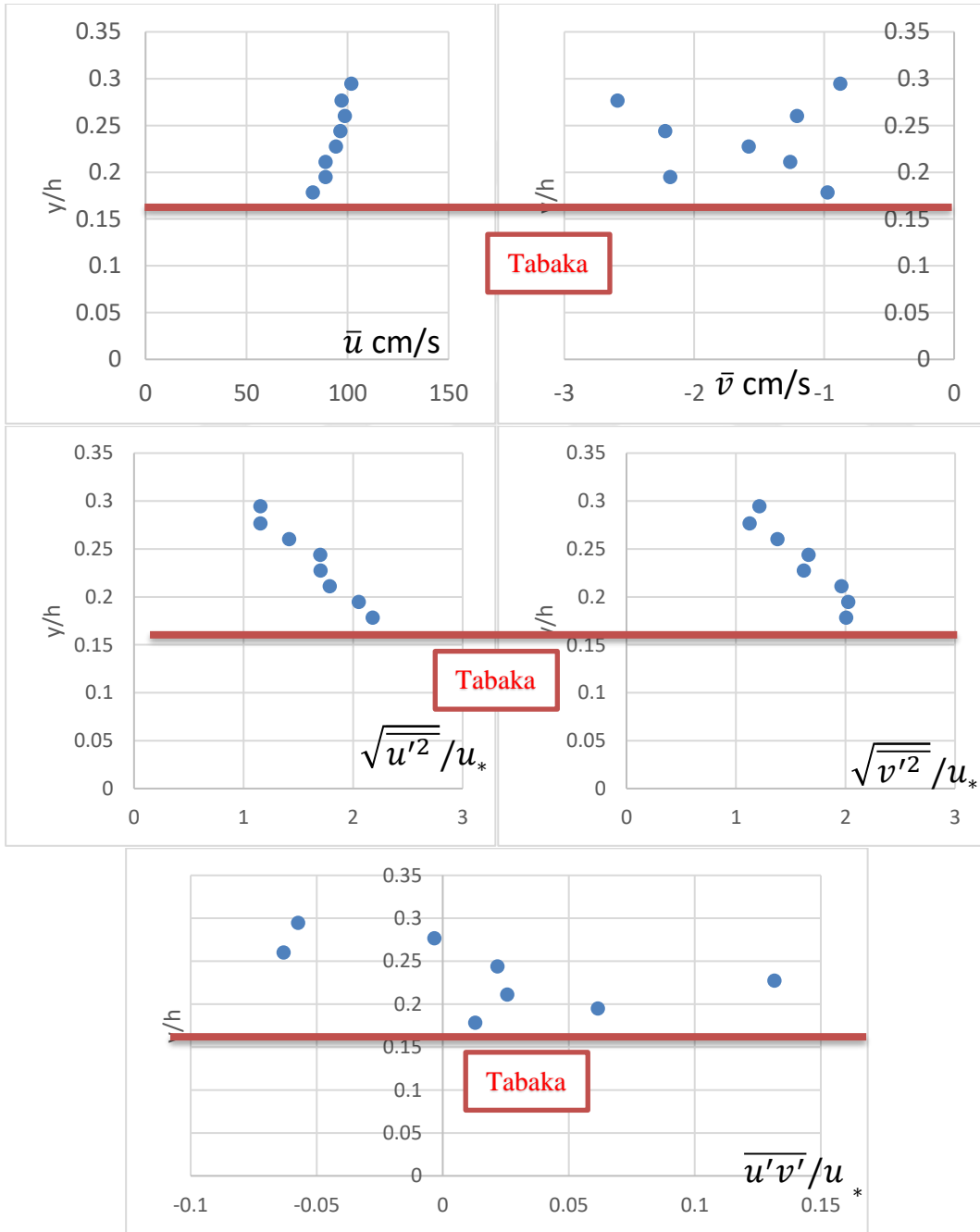


Şekil A.91 : 13. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).

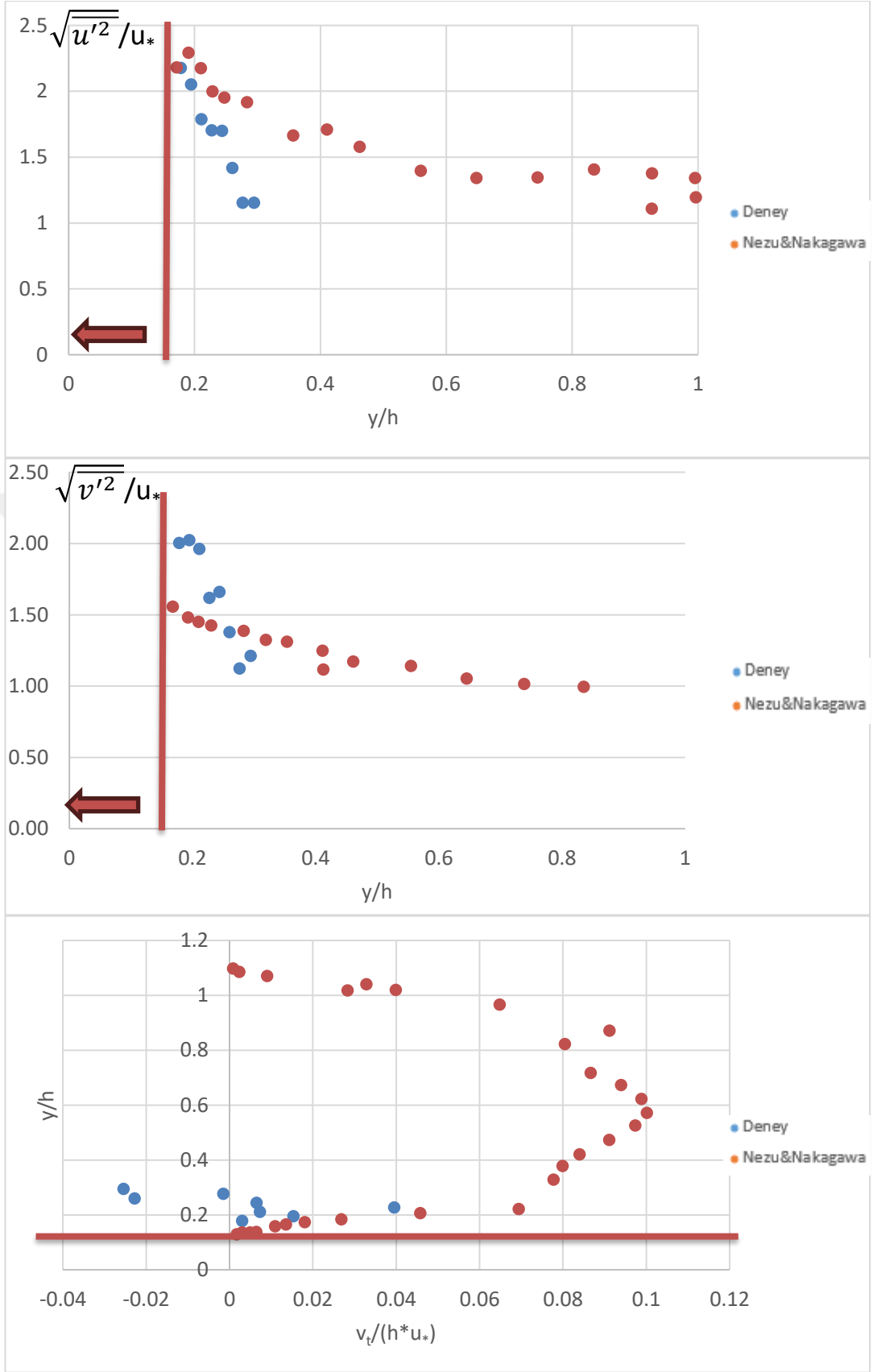
A B C D E F



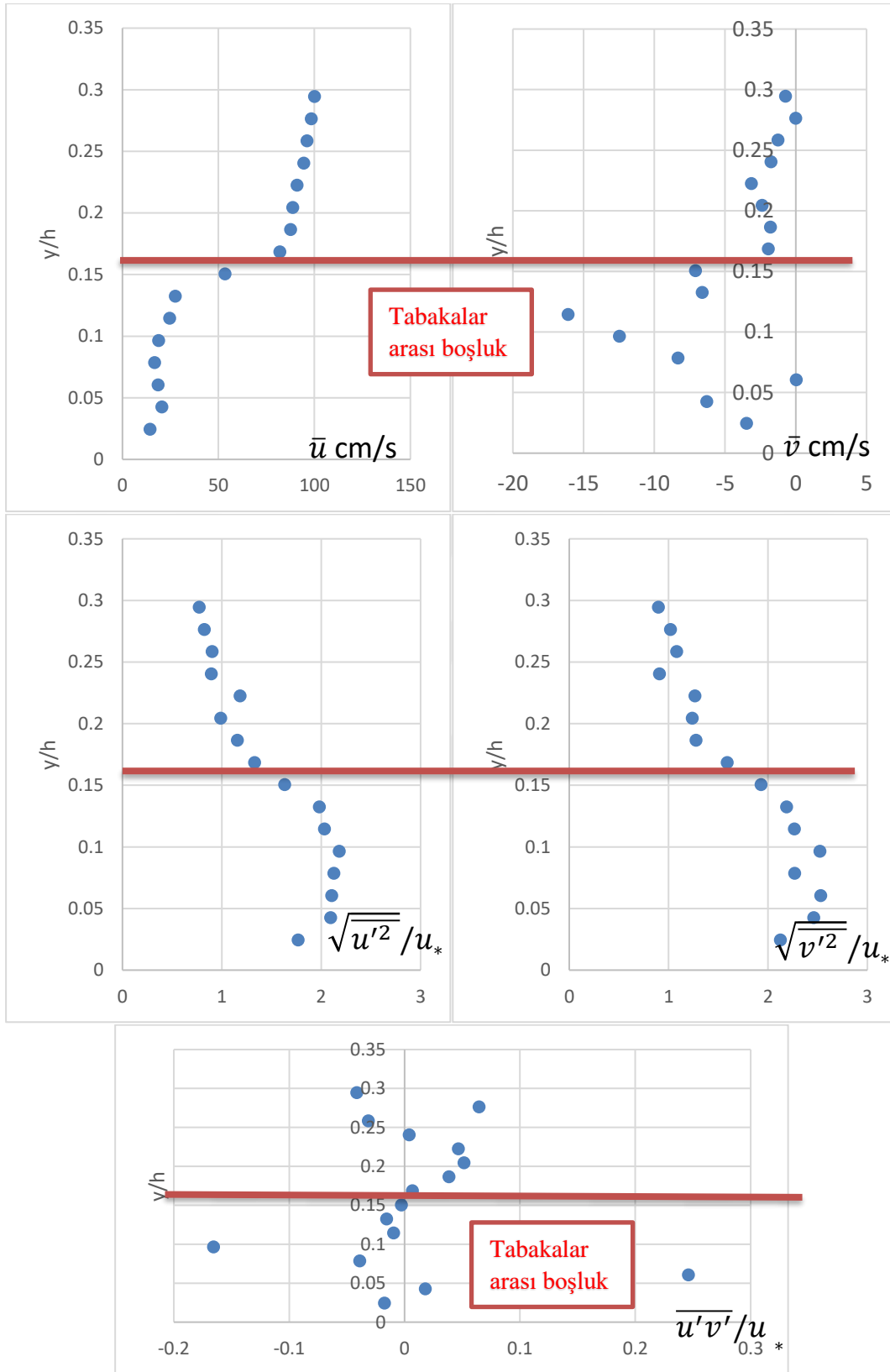
Şekil A.92 : 14. Deney hız vektörleri.



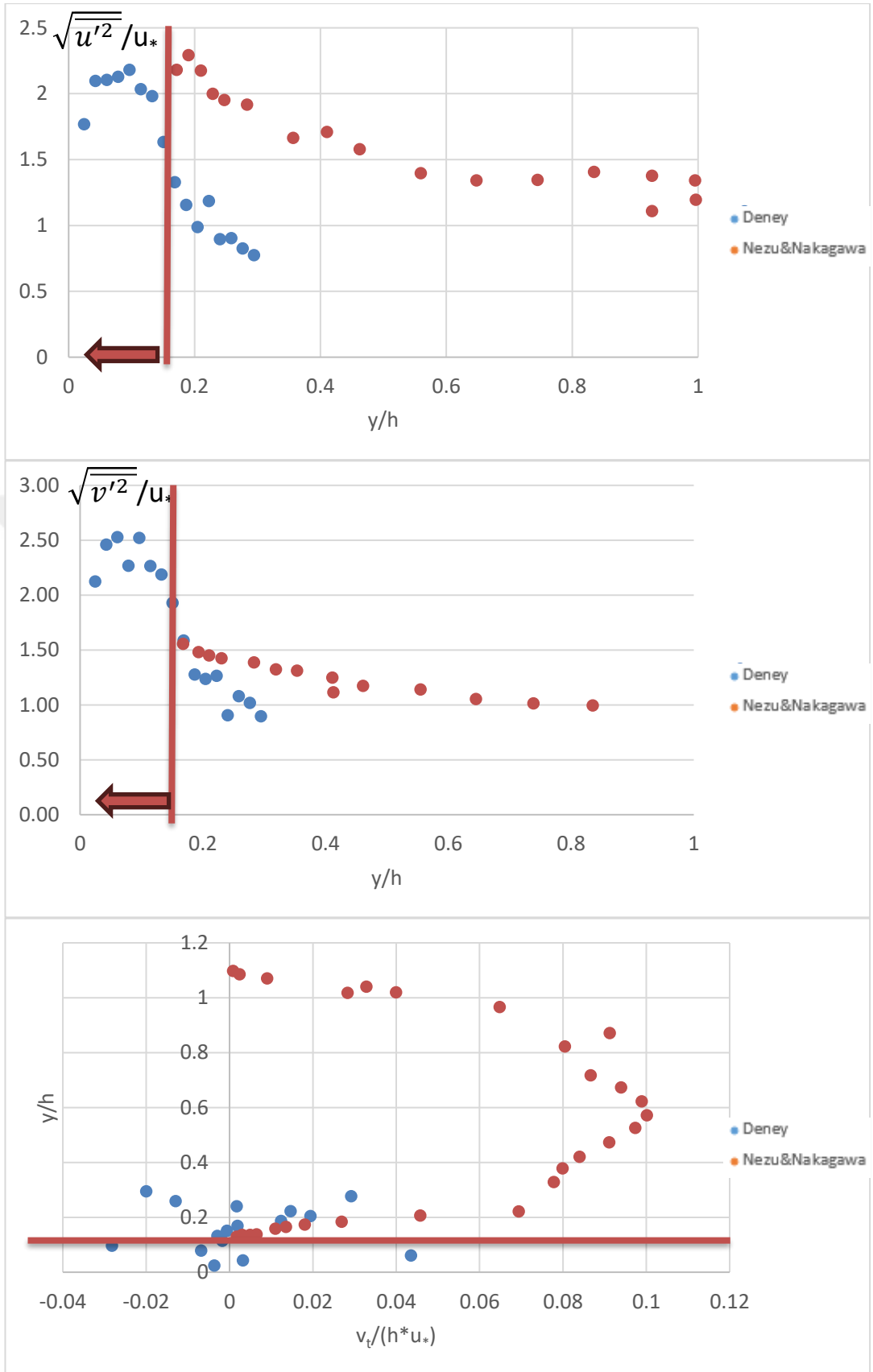
Şekil A.93 : 14. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



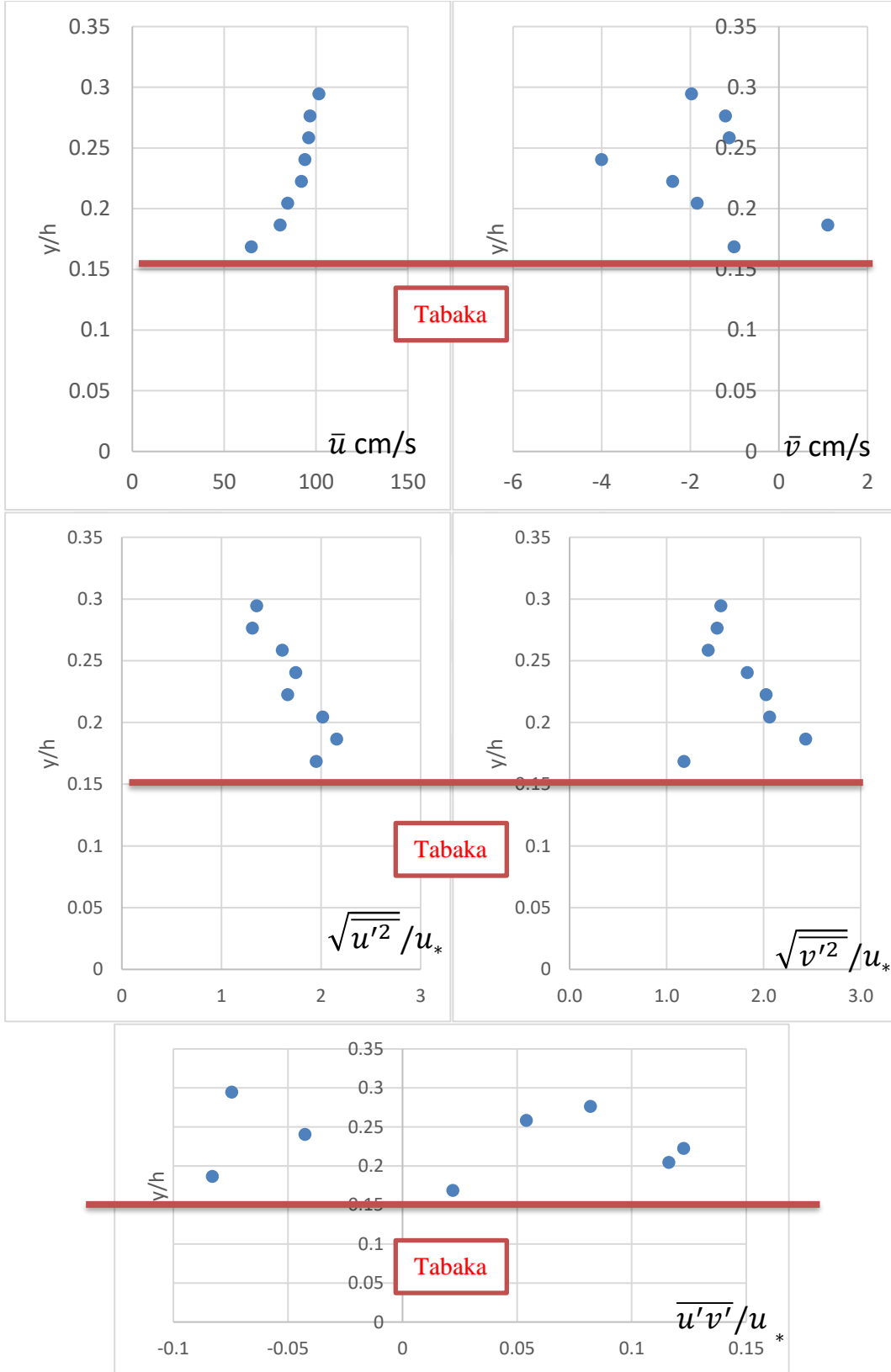
Şekil A.94 : 14. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



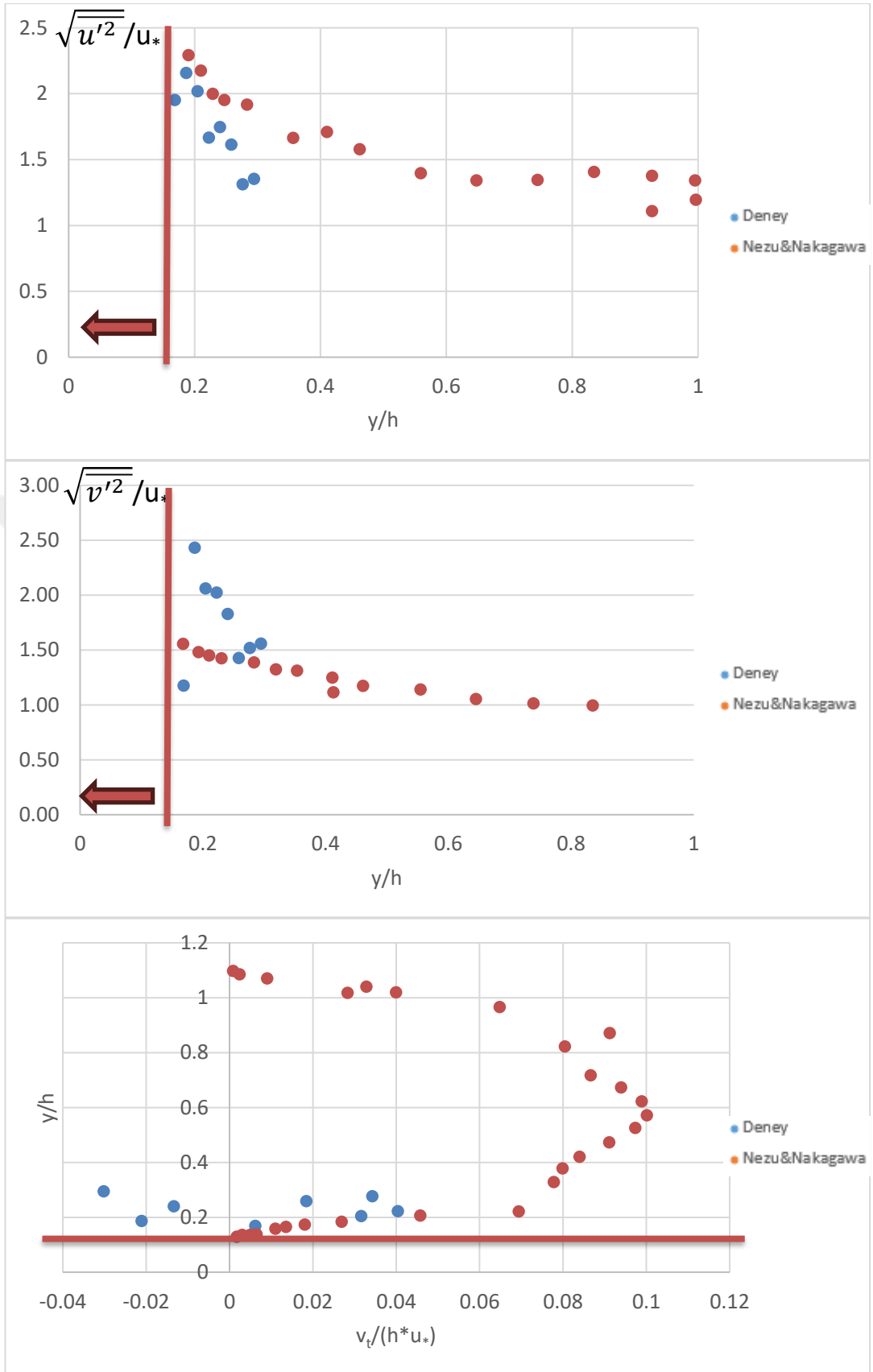
Şekil A.95 : 14. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.96 : 14. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).

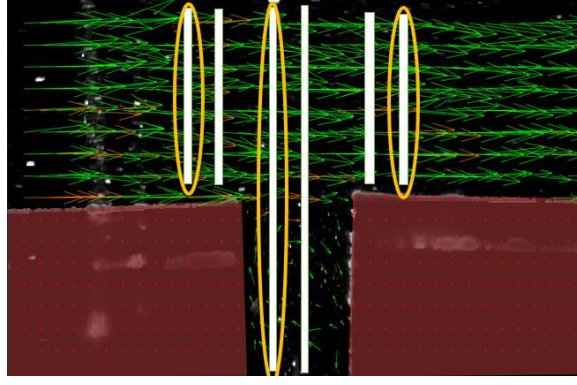


Şekil A.97 : 14. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).

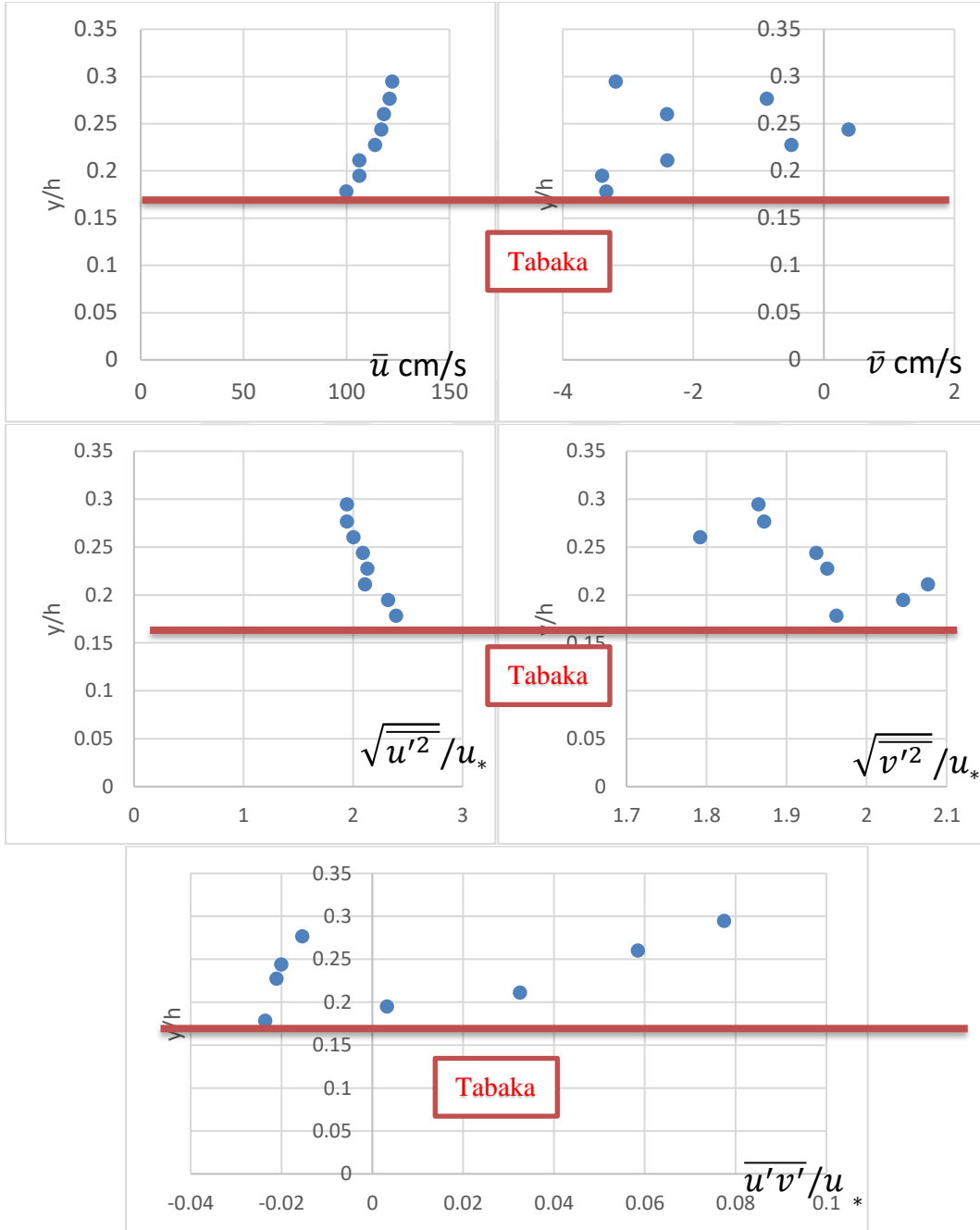


Şekil A.98 : 14. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).

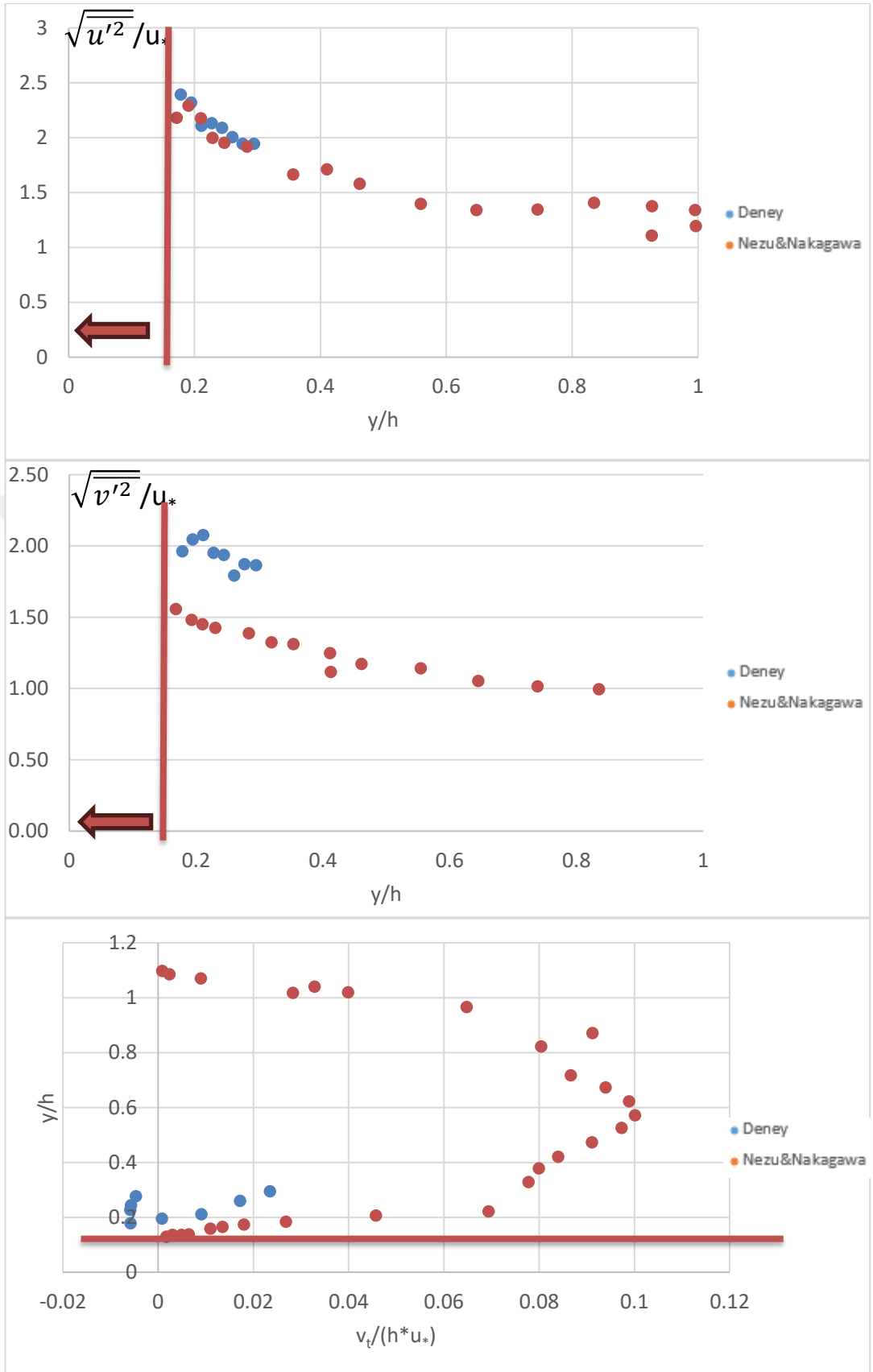
A B C D E F



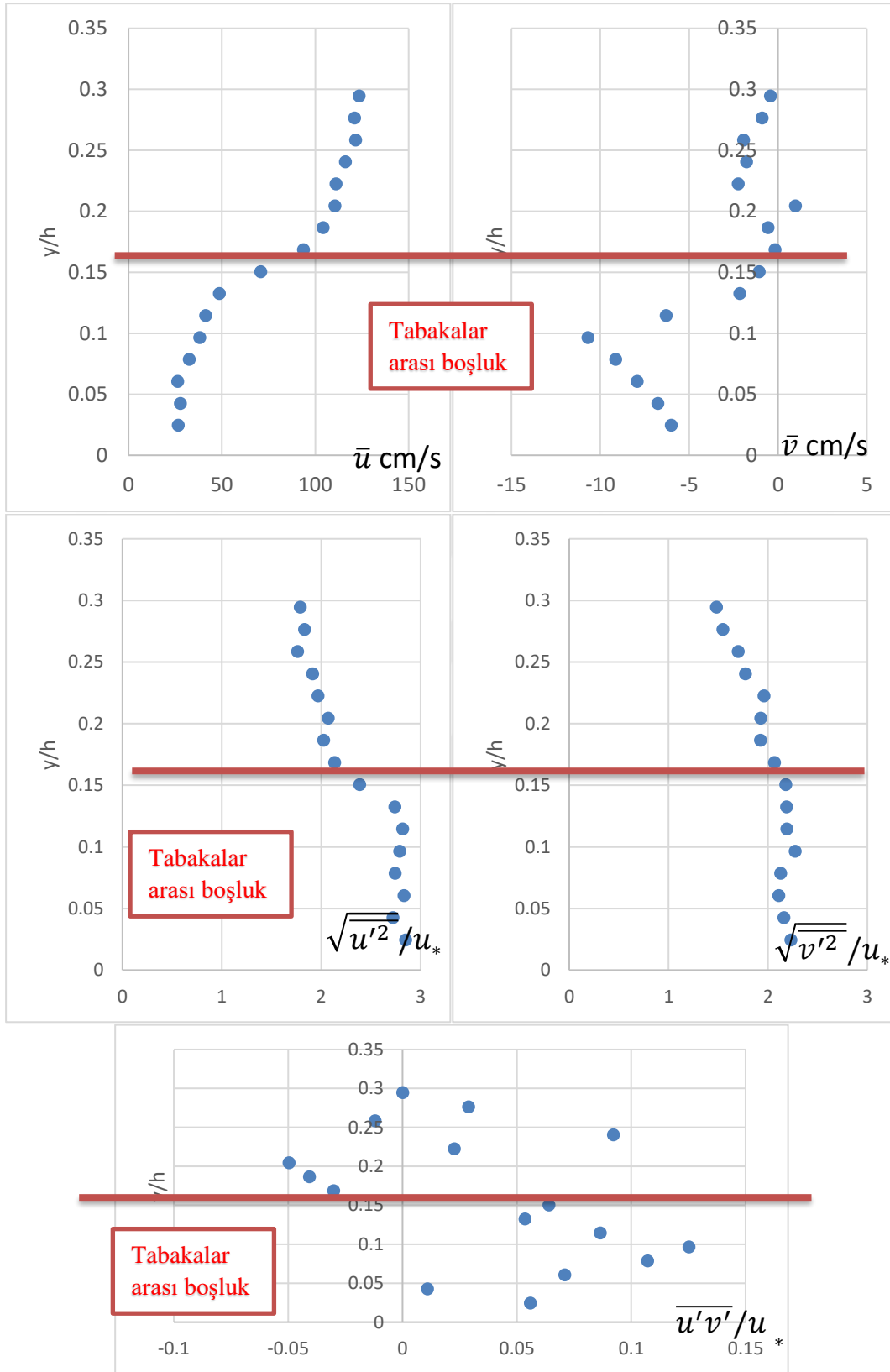
Şekil A.99 : 15. Deney hız vektörleri.



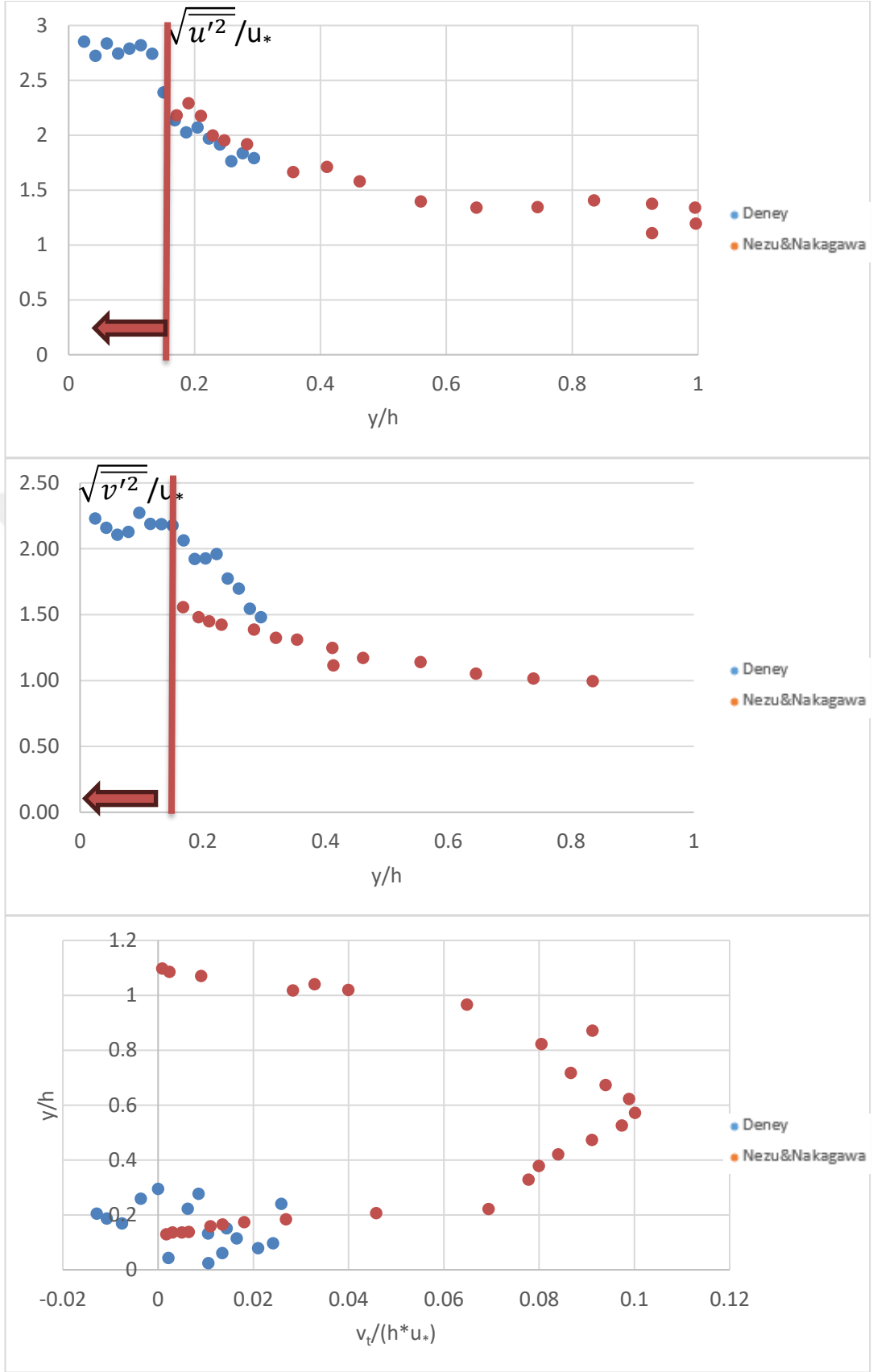
Şekil A.100 : 15. Deney türbülans bileşenleri (A kesiti).



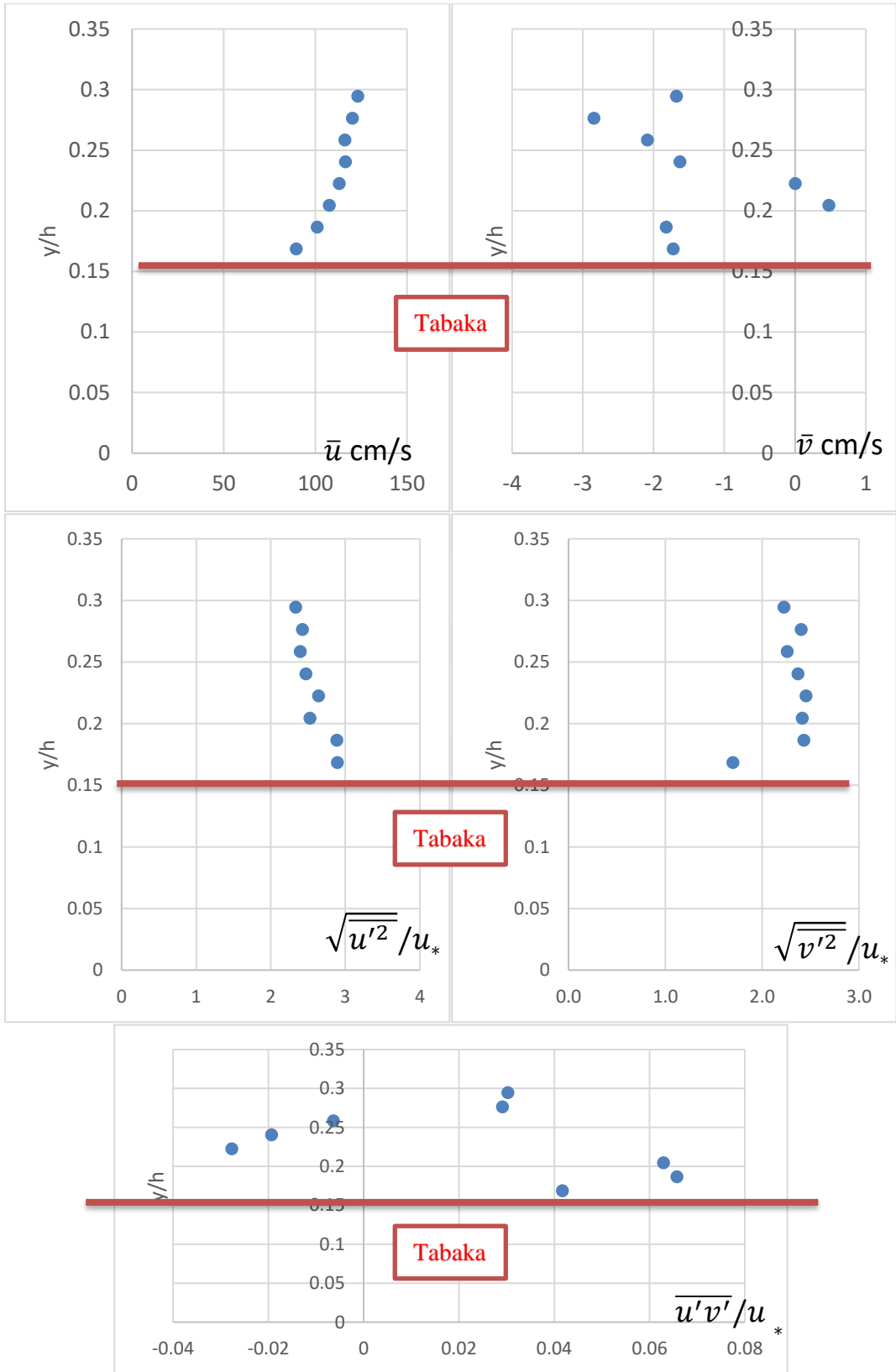
Şekil A.101 : 15. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (A kesiti).



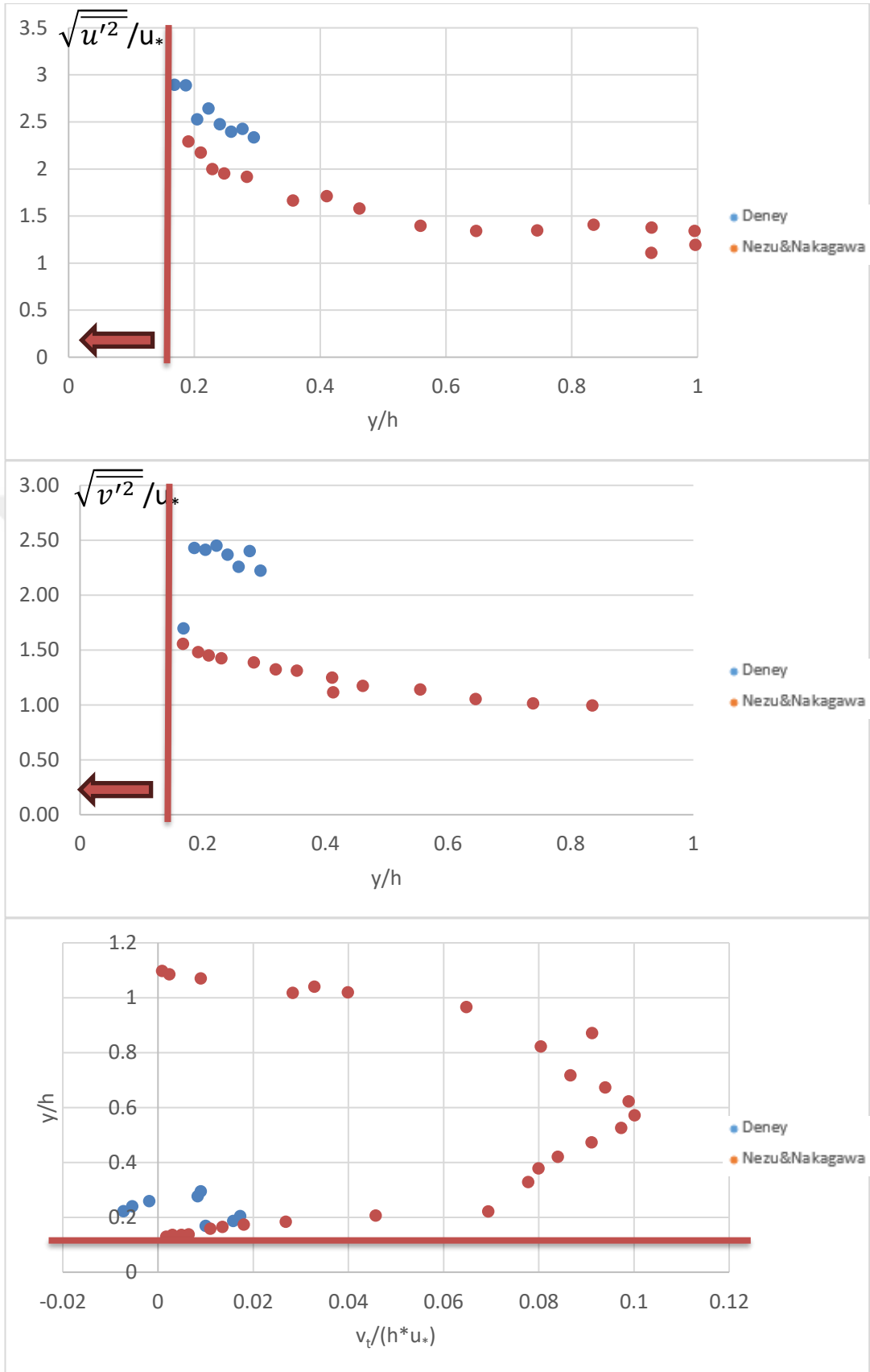
Şekil A.102 : 15. Deney türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.103 : 15. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (C kesiti).



Şekil A.104 : 15. Deney türbülans bileşenleri (F kesiti).



Şekil A.105 : 15. Deney karşılaştırmalı türbülans bileşenleri (F kesiti).



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Muhammed Fatih Özün

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2024, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği

