

13576

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

ENGEL ETRAFINDAKİ LAMİNER VE TÜRBÜLANSLI AKIŞLARIN
SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Mak. Yük. Müh. Ertan BAYDAR

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Doktor"

Ünvanının Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25.3.1991

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 14.5.1991

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Hüseyin Ş. ONUR

Jüri Üyesi : Prof.Dr. Tuncay YILMAZ

Jüri Üyesi : Doç.Dr. Teoman AYHAN

Enstitü Müdürü : Doç.Dr. Temel SAVAŞKAN

MART 1991

TRABZON

Ö N S Ö Z

Bu çalışmada, iki ve üç boyutlu engeller etrafındaki laminar ve türbülanslı akış alanları, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Çalışmanın konusunun seçilmesini ve başlatılmasını sağlayan hocam sayın Prof.Dr.Mehmet UYSAL'a; konunun teorik olarak da ele alınmasını, ilgi, yol gösterici ve özverili yaklaşımlarıyla çalışmanın tamamlanmasını sağlayan danışman hocam sayın Doç.Dr.Hüseyin Ş. ONUR'a; çalışmaya maddi destekte bulunan K.T.Ü. Araştırma Fonu yöneticilerine ve deney düzeneklerinin kurulmasında yardımlarını esirgemeyen K.T.Ü. Makina Müh. Bölümü teknisyenlerine ve K.T.Ü. Fotoğraf Atelyesi çalışanlarına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SEMBOLLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Atmosferik Sınır Tabaka Akışı.....	3
2.2 Engel Etrafında Türbülanslı Akış.....	5
2.3 Kanal İçinde Engel Etrafında Laminer Akış.....	8
BÖLÜM 3	
ATMOSFERİK SINIR TABAKA	10
3.1 Atmosferik Sınır Tabakanın Özellikleri.....	10
3.2. Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesi.....	15
3.3 Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesinde Kullanılan Yöntem.....	18
Bölüm 4	
DENEY DÜZENEKLERİ.....	20
4.1 Duvar Hüzmesi Akışı Düzenegi.....	20
4.2 Tünel Akışı Düzenegi.....	23
4.3 Laminer Kanal Akışı Düzenegi.....	27
BÖLÜM 5	
SAYISAL ÇÖZÜM PROGRAMI.....	30
BÖLÜM 6	
DENEYSEL SONUÇLAR	40
6.1 Duvar Hüzmesi Akışı.....	40
6.2 Tünel Akışı.....	50
6.3 Laminer Kanal Akışı.....	70
6.4 Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	86

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	92
7.1 Sonuçlar.....	92
7.2 öneriler.....	94
KAYNAKLAR.....	96
EK.....	101
ÖZGEÇMİŞ	115



SEMBOLLER

A,B	Kızgın tel kalibrasyon sabitleri
C	Sonlu fark denlemindeki taşınım katsayısı
D	Kanal çapı
E	Kızgın telli anemometre çıkış gerilimi
F	Kuvvet
H	Engel yüksekliği
L	Engel uzunluğu
R	Kızgın telli anemometre direnci
Re	Reynolds sayısı
Ro	Rossby sayısı
S	Kaynak terimi
U	Hız
W	Engel genişliği
a	Diskretizasyon denklemindeki katsayı
d	Kızgın tel çapı
h	Kanal yüksekliği
l	Kızgın tel uzunluğu
m	Kütle
p	Basınç
u	Yatay doğrultudaki hız bileşeni
$\sqrt{u^2}$	Yatay doğrultuda türbülans hızı
v	Düşey doğrultudaki hız bileşeni
x	Yatay uzunluk
y	Düşey uzunluk
Γ	Sonlu fark denklemindeki yayılım katsayısı
α	Relaksasyon faktörü
δ	Sınır tabaka yüksekliği
ϵ	Relaksasyon faktörü
θ	Kızgın tel normal ve akış hızı arasındaki açı
k	Kızgın tel parametresi
μ	Dinamik viskozite

v	Kinematik viskozite
ρ	Yoğunluk
\emptyset	Genel bağımlı değişken

Indisler

P, E, W, S, N	Ağ düğüm noktaları
T	Tutunma
c	Coriolis
e, w, s, n	Kontrol hacmi yüzeyleri
eff	Effektif
k	Kanal
max	Maksimum
o	Serbest

Üsler

n	Kalibrasyon
$*$	Tahmini
β	Arazi tipi

ÖZET

Sınır tabaka içindeki cisimler etrafındaki akış alanı akış ayrılmasından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu sınır tabaka ayrılması olayı; sınır tabaka karakteristikleri üzerinde yüzey pürüzlülüğünün etkisi, yapılar üzerindeki rüzgar yükleri, uçak ve roketlerin hareketlerindeki sınırlamalar, nükleer güç ve sanayi merkezlerinden yayılan atıkların çevreye etkisi gibi çeşitli uygulamalarda büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, engel etrafındaki laminer ve türbülanslı akışlar incelenmiştir. Duvar hüzmesi ve tünel akışında, bariyer eliptik girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları kombinasyonu kullanılarak, atmosferik sınır tabakanın benzeşimi gerçekleştirilmiştir. Bu sınır tabaka içine yerleştirilen iki boyutlu engeller etrafında, ortalama hız ve türbülans çalkantılarının aksenal yöndeki bileşeni ölçülmüştür. Ters akış bölgelerinin uzunlukları, akış görüntülemesi ile belirlenmiştir.

Bir kanal içine yerleştirilen iki boyutlu bir engel etrafındaki laminer akış, deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, engel etrafındaki hız alanı ölçümlerinde kızgın telli anemometre kullanılmıştır. Hareket denklemleri, sonlu farklar tekniği kullanılarak, geliştirilen bir bilgisayar programı ile çözülmüştür. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmış ve iyi bir uyum sağladıkları görülmüştür.

SUMMARY

The flow around obstacles in a boundary layer is dominated by flow separation. This event has a great deal of importance in large number of applications such as the effects of surface roughness on characteristics of boundary layer, wind loads on structures, limitations on actions of airplane and missiles, and dispersion of pollutants downwind of conventional or nuclear power plants.

In this study, laminar and turbulent flow around obstacles has been investigated. The turbulent atmospheric boundary layer has been simulated using combination of barrier, elliptic vortex generators, and elements of roughness in a wall jet and in a tunnel flow. The mean velocity profiles and the axial component of the turbulent fluctuations has been measured around two-dimensional obstacles inserted in this simulated boundary layer. The length of the reversing flow regions has been determined with flow visualization.

Laminar flow around a two-dimensional obstacle placed in a channel has been studied both experimentally and theoretically. In the experimental study, hot-wire anemometry has been used to measure the velocity field around the obstacle. A computer programme has been developed using finite difference technique for solving the governing equations. The experimental and numerical results are compared and good agreement has been shown.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çevre kirliliği günümüz dünyasının, güncel ve sağlıklı bir şekilde çözülmesi gereken, önemli sorunları arasında yer almaktadır. Hızlı kentleşme ile birlikte, sanayi bölgelerinin şehir merkezleri içinde kalması ve rüzgar akışını etkileyen düzensiz yapılaşmalar, hava kirliliğinin artmasında etken bir rol oynamaktadır. Bir fabrika bacası veya bir sanayi bölgeden yayılan duman ve zehirli atıklar, çevrede bulunan binaları ve dolayısıyla insanları etkilemektedir. Bu konuların araştırılmasında, rüzgar-çevre ilişkisinin etki derecesinin akışkanlar mekaniği açısından incelenmesi gerekmektedir.

Dünya yüzeyi üzerinde, rüzgar hareketlerinin sonucu olarak, yüksekliği ortalama rüzgar hızına ve arazinin pürüzlülük yapısına göre değişen bir kayma tabakası yer almaktadır. Düzlem levha üzerindeki türbülanslı sınır tabaka akışına benzeyen bu tabakaya, atmosferik sınır tabaka adı verilmektedir. Dünya yüzeyi üzerinde bulunan bütün yapılar etrafındaki rüzgar hareketleri, bu tabaka içinde gerçekleşmektedir.

Bir cisim türbülanslı bir sınır tabaka içine konulduğunda, aerodinamiği kontrol eden etkin parametre, cismin geometrisi olmaktadır. Bu nedenle, farklı geometriye sahip yapıların göstereceği davranışlar da farklı olacaktır. Binaların önünde sınır tabaka akışı ve yerin etkileşimi ile negatif hız gradyantleri oluşmakta ve akış ayrılması sonucunda ters akış bölgeleri meydana gelmektedir. Dünya üzerinde bulunan yapıların çoğu keskin kenarlardan oluşmakta ve bu kenarlarda ortaya çıkan yüksek basınç gradyantleri akış ayrılmasına neden olmaktadır. Akış ayrılması sonucunda binanın arka tarafında zıt yönlü akışların meydana geldiği bölge, iz bölgesi olarak da

anılmaktadır. Binadan belirli bir uzaklıktan sonra akış tekrar tutunmaktadır. Bir yapıya yaklaşan sınır tabaka akışının özelliği, türbülans şiddeti ve cismin geometrisi, tutunma uzunluğunu etkileyen faktörler arasında yer almaktadır.

Isıtma ve havalandırma sistemlerinin giriş ve çıkışları, ayrılmış akış bölgelerinden olumsuz yönde etkilenmektedir. Özellikle duman ve atık parçacıklar iz bölgelerine girerek, ters akışlarla binaların içine taşınmakta ve dolayısıyla insanları etkilemektedir. Bu nedenle, bu tip etkilerin değerlendirilebilmesi ve kalıcı çözümlerin ortaya konulabilmesi için binalar etrafındaki akış alanının bilinmesi gerekmektedir.

Bu akış tipinin anlaşılması amacıyla sayısal hesaplamalar, gerçek akış ölçümleri ve laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır. Laboratuvar çalışmaları, rüzgar tünellerinde atmosferik sınır tabaka akışının simule edilerek, çeşitli ölçüm yöntemleri ile model ölçeğinde yapılan deneylerle gerçekleştirilmektedir. Teorik çalışmalarda, eliptik denklem grupları için geliştirilen sayısal yöntemlerin oldukça genel olması nedeniyle, değişik matematiksel modeller kullanılarak bilgisayarlar yardımıyla akış alanları hesaplanmaktadır. Genellikle ortalama akış hızı, türbülans şiddeti ölçümleri ve tutunma uzunluğunun belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar, sayısal çözümler için kurulan matematiksel modellerin geçerliliği açısından oldukça büyük önem taşımaktadırlar.

BÖLÜM 2

KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Atmosferik Sınır Tabaka Akışı

Atmosferik sınır tabaka akışının yapısına yönelik ilk çalışmalar, 1900 lü yılların başına dayanmaktadır. Tennekes [1] bu akış tipini tanıttığı bir rapor hazırlamıştır. Panofsky [2], sınır tabakanın ilk 150 m si ile ilgili çalışmalar yapmıştır. 1880-1972 periyodunu kapsayan detaylı bir araştırma Counihan [3] tarafından yapılmıştır.

Bir kısım araştırmacılar, atmosferik sınır tabakanın rüzgar tünellerinde modellenmesi konusunda çalışmışlardır. Lloyd [4], 1.35 m uzunluğunda çalışma bölgesi olan kapalı devre bir rüzgar tüneline simülasyon çalışması yapmıştır. Ağ aralıkları, çalışma bölgesi tabanına doğru gittikçe sıklaşan bir ızgara kullanmıştır. Izgara çubukları üzerine, türbülans üretici küçük bloklar yerleştirmiştir. Izgaradan sonra tünel döşemesini pürüzlendirerek 1.5 m kalınlığında bir sınır tabaka üretmiştir. Armitt ve Counihan [5], çalışma bölgesi boyutları 4.5x1.5x11 m olan rüzgar tünellerinde bariyer, girdap üreticisi ve pürüzlülük elemanları kombinasyonu ile 1.2 m yüksekliğinde bir sınır tabaka geliştirmişlerdir. Arya ve Plate [6], 1.8x1.8 m kesitinde ve 25 m uzunluğundaki meteorolojik bir rüzgar tüneline çalışmışlardır. Tünel döşemesinin yarısından sonraki bölümünü, ısıtma amacıyla alüminyum levha ile kaplamışlardır. Deneyler sırasında sıcaklığı, tünel döşemesinde 4°C dan çevre ortamında 50°C a kadar değiştirerek 0.7 m civarında bir sınır tabaka yüksekliği elde etmişlerdir.

Atmosferik sınır tabaka akışının rüzgar tünellerinde modellenmesinde, geçerliliği kabul edilmiş ve yaygın şekilde

kullanılan bir yöntem, Counihan [7] tarafından geliştirilmiştir. Bariyer, eliptik tipte girdap üreticiler ve prizmatik küçük bloklardan oluşan pürüzlülük elemanları kombinasyonunun kullanıldığı yöntemin en büyük avantajı, kısa çalışma bölgesi tünellerde modelleme çalışması yapılmasına olanak sağlamış olmasıdır. Counihan [8], kendi yöntemine göre geliştirdiği sınır tabakayı, doğal olarak gelişmiş sınır tabaka ve gerçek yapı verileri ile karşılaştırmıştır. Cockrell ve Lee [9], çalışma bölgesi uzunluğu 14 m olan rüzgar tünellerinde, atmosferik sınır tabaka akışını simüle etmek için, ızgara ve üçgen prizma şeklinde akış karıştırıcılar kullanmışlardır. Maul [10], eğrisel bir ızgara kullanarak lineer bir hız profili üretmeye çalışmıştır. Ortalama hız ve türbülans büyüklükleri için laboratuvar ve atmosferik akışlar arasındaki benzeşim ile ilgili kriterler, Cermak ve Arya [11] tarafından incelenmiştir. Pasquill [12], ortalama rüzgar hızının yükseklikle değişimi ve türbülans çalkantılarının istatistiksel özellikleri için yarı amirik bağıntılar vermiştir. Businger ve diğ. [13], atmosferik sınır tabakada hız profili ve akıllarla ilgili karakteristikleri belirlemek amacıyla gerçek yapı ölçümleri yapmışlardır. Türbülans kinetik enerji bilançosu ve sıcaklık değişimi üzerine, gerçek yapı ölçümü ile ilgili diğer bir çalışma, Wyngaard ve Cote [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Counihan [15], pürüzlülük elemanlarının yoğunluk ve yüksekliğinin modellemedeki etkilerini incelemiştir.

Modellemede pasif aygıtlar yerine aktif aygıtların kullanılmasına yönelik çalışmalar, Schon ve Mery [16] tarafından gerçekleştirilmiştir. Deney bölgesi uzunluğu 10 m olan rüzgar tünellerinde, akış yönüne dik doğrultuda hava enjeksiyonu vererek, sınır tabaka kalınlığını arttırmaya çalışmışlardır. Cermak [17], 29 m uzunluğunda bir rüzgar tüneli kullanarak, 0.9 m yüksekliğinde doğal olarak gelişmiş bir sınır tabaka üretmiştir. Atmosferik sınır tabaka akışının modellenmesinde pasif aygıtların kullanıldığı bir başka çalışma Sundaram ve diğ. [18] tarafından yapılmıştır. Kısa çalışma bölgesi rüzgar tünellerinde bariyer, üçgen prizmatik girdap üreticiler ve piramit şeklinde pürüzlülük elemanları ile birlikte, 0.3 m

yükseklikte bir sınır tabaka oluşturmuşlardır. Tennekes [19], nötral atmosferik sınır tabakadaki logaritmik rüzgar profilinin yapısını incelemiştir. Counihan [20], kırsal kesim ve şehir merkezlerinde oluşan atmosferik sınır tabaka akışı hız profilleri arasındaki değişiklikleri incelemiş ve modellemede kullanılan bariyer yüksekliğinin değişiminin, hız profillerine etkisini araştırmıştır. Cook [21], çalışma bölgesi uzunluğu 6.5 m olan rüzgar tüneline ızgara, bariyer ve fincanlardan oluşan pürüzlülük elemanları kullanarak, 0.5 m yüksekliğinde bir sınır tabaka üretmiştir. Aktif aygıtlı diğer bir modelleme tekniği de, Nagip ve diğ. [22] tarafından geliştirilmiştir. Akışa karşı yönelmiş hava hüzmeleri ve pürüzlülük elemanları olarak ahşap blokları kullanmışlardır. Bu yöntemle, 3 m uzunluğundaki tünel çalışma bölgesinde hüme sayısını değiştirerek, 0.3 ile 0.43 m aralığında sınır tabaka yükseklikleri elde etmişlerdir. Cook [23], deney bölgesi uzunluğu 14 m olan tünelde ızgara, bariyer, ahşap bloklar ve çakıl taşlarından oluşan pürüzlülük elemanları ile 0.75 m yüksekliğinde bir sınır tabaka oluşturmuşlardır.

2.2.Engel Etrafında Türbülanslı Akış

Leutheusser ve Baines [24], bir taban plakası üzerine yerleştirdikleri keskin kenarlı, üç boyutlu modeller etrafındaki akışı incelemiştir. $\beta=0.135$ lik üs kanununa göre geliştirdikleri hız profili ile, 10 m uzunluğundaki rüzgar tünellerinde 0.18 m kalınlığında bir sınır tabaka üretmişlerdir. Reynolds sayısının 2×10^4 ile 8×10^4 değerleri arasında değişik şekil oranlarındaki kübik engeller için akışın tutunma uzunluklarını belirlemişlerdir. Bu tip cisimlerde, Reynolds sayısının her zaman önemli bir parametre olmadığını; pürüzlülüğün ve sınır tabaka kalınlığı ile engel yüksekliği arasındaki oranın daha önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Counihan ve diğ. [25], atmosferik bir sınır tabaka akışı geliştirerek, yüzeye bağlı iki boyutlu, kare kesitli engel arkasındaki iz bölgesini incelemiştir. 0.618×0.185 m kesitli rüzgar tünellerinde bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük

elemanları kombinasyonu ile geliştirdikleri 152 mm kalınlığındaki sınır tabaka içine 19 mm lik kare kesitli bir model yerleştirmişlerdir. Kızgın tel probu engelin arka tarafında sabit tutup, engeli hareket ettirerek ortalama hız ve türbülans ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Akış görüntüleme deneylerinden, akış ayrılmasının engelin ön kenarlarından başladığını ve tutunma uzunluğunun engel yüksekliğinin 6 katı civarında olduğunu ifade etmişlerdir. Türbülans şiddetinin en büyük değerlerinin, engelin üst kısmında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Engel etrafındaki akış alanı ile ilgili diğer bir deneysel çalışma, Castro ve Robins [26] tarafından yapılmıştır. Uniform ve simüle edilmiş atmosferik sınır tabaka akışı olmak üzere, iki ayrı akış tipinde kübik engeller etrafındaki akışı incelemişlerdir. Engel arkasındaki iz bölgesinde ölçümler yaparak, sınır tabaka yüksekliği ve küp yüksekliği arasındaki oranın, akışın tutunması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Gauld ve Sykes [27], prizmatik engeller üzerinde yapmış oldukları çalışmada; gelen akışın türbülans şiddetinin yüksek olmasının, model arkasındaki iz bölgesini kısalttığını belirtmişlerdir. Castro [28], simüle edilmiş atmosferik bir sınır tabaka akışında iki boyutlu, kare kesitli engeller etrafındaki akışı incelemiştir. Sınır tabaka kalınlığına göre engel yüksekliğinin azalması ile kayma tabakasının aşağı doğru hareket ettiğini ve gelen akışın türbülans şiddetinin artması ile tutunma uzunluğunun kısaldığını ifade etmiştir. Değişik şekil oranlarında iki boyutlu, kare kesitli engeller etrafında, akış görüntüleme yöntemi ile, tutunma uzunluklarının belirlenmesine yönelik bir çalışma Bergeles ve Athanassiadis [29] tarafından yapılmıştır. L engel uzunluğu ve H engel yüksekliği olmak üzere; engelin ön kenarlarından ayrılan akışın engel üzerinde tutunabilmesi için, $L > 4H$ olması gerektiğini açıklamışlardır. Engel uzunluğu ve tutunma uzunluğu arasında, oldukça lineer bir bağıntının bulunduğunu belirtmişlerdir. Laneville ve Yong [30], W engel genişliği olmak üzere, değişik L/W oranları için deneyler yapmışlardır. Engel kesitinin, engel etrafındaki girdap dağılımını ve ayrılma kabarcığının

gelişmesini kontrol eden önemli bir parametre olduğunu ifade etmişlerdir.

Üç boyutlu engeller etrafındaki akışta, engel şekil oranının etkileri ile ilgili bir başka çalışma, Gowda ve diğ. [31] tarafından yapılmıştır. L/W oranının 0.5 olduğu durumda, engel arkasındaki tutunma uzunluğunun en büyük değere ulaştığını açıklamışlardır. Fackrell [32], farklı şekil oranlarındaki engeller için, akış tutunma uzunluklarını incelemiştir. Counihan [7] tarafından geliştirilen simülasyon yöntemini kullanarak, oluşturduğu atmosferik sınır tabaka akışında, yüzey akışı görüntüleme çalışmaları yapmıştır. Keskin kenarlı dikdörtgen kesitli engellerde, tutunma uzunluğunun Reynolds sayısından bağımsız olduğunu ifade etmiştir. Engelin ön kenarından ayrılan akışın, $L/H > 1.5$ değerlerinde engelin üzerinde tutunduğunu ve ön akışın türbülans şiddetinin artmasının, engel üzerinde tutunma ihtimalini arttırdığını belirtmiştir. Peterka ve diğ. [33], iki boyutlu engeller arkasındaki ayrılma kabarcığının kapalı olduğunu ve bundan dolayı bu bölgede türbülans difüzyonunun önem kazandığını vurgulamışlardır. Üç boyutlu engellerde ayrılma bölgesinde konveksiyonun etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Yeung ve Kot [34], iki denklemlilik türbülans modeli (k- ϵ) ile engel geometrisine bağlı koordinat sistemi kullanarak, iki boyutlu değişik geometriye sahip engeller etrafındaki akışı incelemiştir. Ön akış şartlarını nötral, stabil atmosferik sınır tabaka akışını simüle edecek şekilde oluşturmuşlardır. Reynolds sayısının 1×10^5 değeri için iki farklı katsayı grubu ile, 1/0.75 lik şekil oranında, dikdörtgen kesitli engel için 4 ve 7 cisim yüksekliğinde tutunma uzunlukları elde etmişlerdir. Yarı dairesel kesitli engel için tutunma uzunluğunu, engel yarıçapının 6 katı olarak hesaplamışlardır. Tutunma uzunlukları ile ilgili değerlerin, tahmin ettiklerinden daha kısa olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun, kullandıkları nümerik yöntemin hassasiyetsizliğinden ve iki denklemlilik modelin teorik açıdan zayıflığından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

2.3.Kanal İçinde Engel Etrafında Laminer Akış

Bu konuda ilk araştırmalar, Greenspan [35] ve Friedman [36] tarafından yapılmıştır. Kanal içinde sürekli, sıkıştırılmaz bir sıvının kare kesitli, iki boyutlu bir engel etrafındaki akışını nümerik olarak incelemişlerdir. Kanal girişinde parabolik bir hız dağılımı ve akış boyunca sabit bir basınç alanı ile sınır şartlarını oluşturmuşlardır. Girdap-akış fonksiyonu yaklaşımı ile sonlu farklar yöntemini kullanarak, ağ büyüklüğünün çözüm üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Friedman [36], engelin ön tarafında girdabın büyüklüğünün $10 < Re < 50$ arasında minimum bir değere eriştiğini ve daha büyük Reynolds sayıları ile monoton olarak arttığını belirtmiştir. $Re=500$ için engelin arka tarafında, engel yüksekliğinin iki katı civarında bir ters akış bölgesi uzunluğu elde etmiştir.

Hughes ve diğ. [37], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, kanal içinde kare kesitli, iki boyutlu bir engel etrafındaki akışı nümerik olarak incelemişlerdir. Kanal girişinde üniform bir hız dağılımı vererek, engelin üzerinden gelişen akış alanını hesaplamışlardır. Galerkin ve ileri doğru fark (upwind) şekillerinin çözüm üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Galerkin yöntemi ile $Re=200$ için engelin önünde hız çalkantılarının meydana geldiğini belirtmişlerdir. İleriye doğru fark şekli ile elde ettikleri çözümde, engel önündeki hız çalkantılarının ortadan kalktığını ve engelin arkasındaki girdap uzunluğunun kısaldığını ifade etmişlerdir. Leone ve Gresho [4] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, aynı tip problem için akış alanını hesaplamışlardır. Engelin 2.5 katı yüksekliğinde olan kanal girişinde, üniform ve parabolik hız dağılımı olmak üzere, iki farklı giriş şartı kullanmışlardır. Parabolik hız profilinin, üniform hız profilinden daha iyi çözümler verdiğini ve engelin ön kenarından kaynaklanan tekilliği önlediğini belirtmişlerdir. Kanal yüksekliği ve ortalama giriş hızı ile tanımladıkları Reynolds sayısının 200 değeri için, engel yüksekliğinin 6.75 katı civarında bir tutunma uzunluğu hesaplamışlardır.

Engel etrafındaki laminer akışla ilgili bir diğer çalışma, Yang ve Atluri [39] tarafından yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, problemi zaman bağımsız ve zaman bağımlı olmak üzere, iki farklı akış durumu için çözmüşlerdir. Kanal yüksekliğini 1 birim, kanal girişinden itibaren 1.2 birim uzaklığa yerleştirdikleri iki boyutlu kare kesitli engelin yüksekliğini 0.4 birim olarak almışlardır. Kanal uzunluğu için, girişten itibaren 4 ve 6 birim olacak şekilde iki farklı değer kullanmışlardır. Reynolds sayısını, kanal yüksekliği ve giriş hızı ile oluşturmuşlardır. Girişte üniform bir hız profili vererek, çıkışta türev sınır şartını uygulamışlardır. $Re=85$ için engel yüksekliğinin 3.3 katı; $Re=200$ için 5.6 katı civarında tutunma uzunlukları elde etmişlerdir.

Laval ve Quartapelle [40], sonlu elemanlar yöntemi ile engel etrafındaki laminer kanal akışını çözmüşlerdir. Kanal girişinde üniform bir hız dağılımı vererek $Re=200$ için, engel yüksekliğinin 5 katı uzunluğunda bir ters akış bölgesi bulmuşlardır.

BÖLÜM 3

ATMOSFERİK SINIR TABAKA

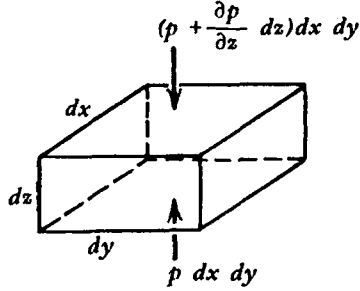
3.1. Atmosferik Sınır Tabakanın Özellikleri

Rüzgar veya havanın dünya yüzeyine göre hareketi, güneşten gelen değişken ısı enerjisinin dünya atmosferini etkilemesi ile oluşmaktadır. Daha genel anlamda bu hareket, eş yükselti noktaları arasındaki basınç farkları ile meydana gelmektedir. Bu basınç farkları zaman ve konum açısından, atmosferde oluşan termodinamik ve mekanik olayları beraberinde getirmektedir. Dünya yüzeyi üzerindeki hava hareketi, yüzeyden itibaren 1 km mertebesinde bir yüksekliğe erişen, sürtünme etkili bir tabakayı oluşturmaktadır. Bu tabakaya, atmosferik sınır tabaka adı verilmektedir. Bu tabakanın kalınlığı, hafif rüzgarlı bulutsuz gecelerde 30-40 m den, yazın güneşli günlerde öğleden sonraları 2 km ye kadar değişebilmektedir. Bu kalınlık değişimi öncelikle, düşey doğrultudaki ısı transferi etkileri ile meydana gelmektedir. Yukarı yöndeki ısı transferi, sınır tabakadaki türbülansın şiddetine katkıda bulunmakta ve sınır tabaka kalınlığının artmasına yardım etmektedir. Bunun tersine, aşağı yöndeki ısı transferi, sınır tabakadaki türbülansı azaltma etkisi göstermektedir. Isı transferinin ihmal edilebildiği oldukça ender durumlarda sınır tabakanın kalınlığı; rüzgarın hızına, dünyanın dönme hızının yerel bir ölçüsü olan Coriolis parametresine ve arazinin yüzey pürüzlülüğüne bağlı olmaktadır [1].

Elemanter bir hava kütlelerinin hareketi; m kütle, a ivme ve ΣF elemanter hava kütlelerine etki eden kuvvetlerin toplamı olmak üzere,

$$\Sigma F = ma$$

$$(3.1)$$



Şekil-3.1: Elemanter bir hava kütesine etkiyen düşey doğrultudaki basınç kuvvetleri

şeklindeki, Newton'un ikinci kanunu ile belirlenmektedir.

Şekil-3.1 de görüldüğü gibi, sonsuz küçük bir $dx dy dz$ hacmi göz önüne alındığında, hacim elemanının alt ve üst yüzeyine etkiyen ortalama basınçlar p ve $p + (\partial p / \partial z)$ dir. Sadece basınç kuvvetlerinin olduğu durumda, $dx dy dz$ hacmine etkiyen düşey doğrultudaki kuvvet, $-(\partial p / \partial z) dx dy dz$ veya birim hacim için $-\partial p / \partial z$ olacaktır. Birim hacme x ve y doğrultularında etkiyen kuvvetler sırasıyla, $-\partial p / \partial x$ ve $-\partial p / \partial y$ ile ifade edilecektir. Bu kuvvetlerin bileşkesine, yatay basınç gradyenti adı verilmekte ve $-\partial p / \partial n$ ile gösterilmektedir. Burada n , sabit basıncın etkili olduğu yatay düzlem normalini göstermektedir. Yatay doğrultudaki basınç gradyenti, havanın yatay hareketini başlatan kuvvet olmaktadır. Yatay doğrultudaki basınç gradyenti tarafından birim kütleyle etkiyen kuvvet $(1/\rho) \partial p / \partial n$ olmakta ve basınç gradyent kuvveti olarak anılmaktadır. Basınç gradyent kuvvetinin etkisinde kalan hava, yüksek basınçlı bölgelerden, alçak basınçlı bölgelere hareket etmektedir.

Basınç gradyent kuvvetinin dışında, dünyanın dönme hareketinden ileri gelen, Coriolis kuvveti olarak adlandırılan bir sapma kuvveti de atmosferik sınır tabaka içinde etkili olmaktadır. Dış kuvvet etkisinde bulunmayan bir parçacık

doğrusal bir yörüngede hareket edecektir. Ancak, dönmekte olan dünya üzerindeki bir gözlemciye göre, parçacık eğrisel bir yörünge çizecektir. Dünyanın dönmesine göre, parçacık hareketinin doğrusal bir yörüngeden sapması,

$$F_C = 2m(U \times \omega) \quad (3.2)$$

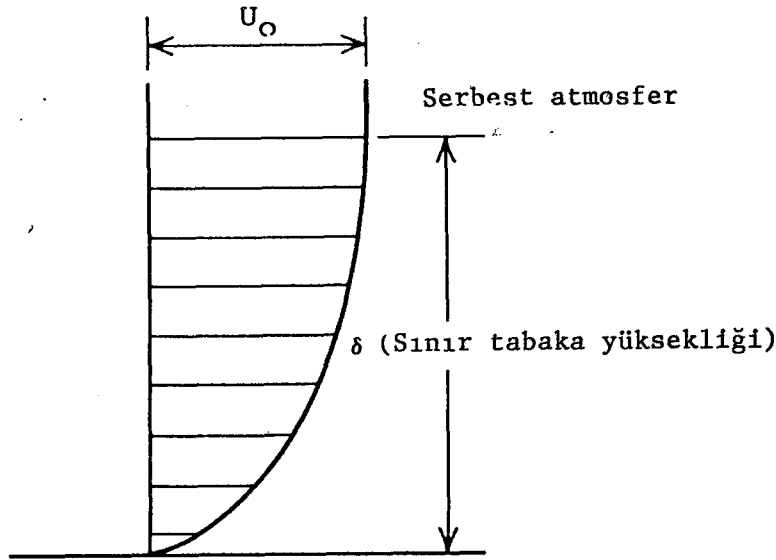
şeklinde ifade edilen, Coriolis kuvveti olarak adlandırılan, zahiri bir kuvvete dayandırılmaktadır. Bu bağıntıda m , parçacığın kütlesi; ω , dünyanın açısal hız vektörü ve U , dünya ile dönen bir koordinat sistemine göre parçacığın hızıdır. Coriolis kuvveti (F_C), ω ve U nın oluşturduğu düzleme diktir. ϕ , göz önüne alınan noktanın enlem açısı olmak üzere, Coriolis parametresi,

$$f_C = 2\omega \sin\phi \quad (3.3)$$

olarak tanımlanmakta ve Coriolis kuvveti de

$$F_C = mf_C U \quad (3.4)$$

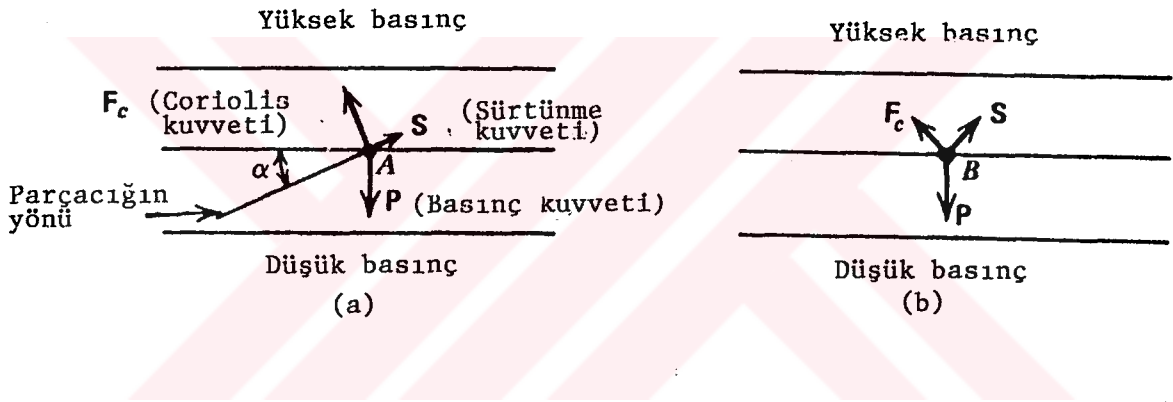
şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil-3.2: Atmosferik sınır tabaka

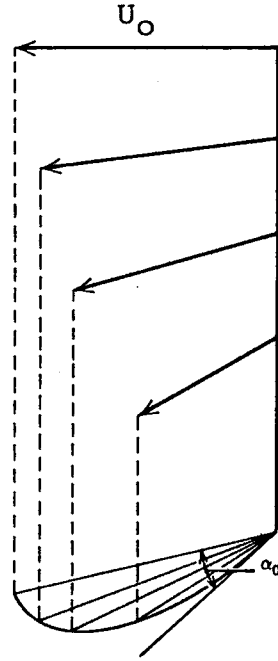
Yeterince büyük yüksekliklerde, sürtünmenin rüzgar üzerindeki etkisi ihmal edildiğinde; havanın dünya yüzeyine göre hareketi basınç gradyenti, Coriolis kuvveti ve merkezkaç kuvveti arasındaki denge durumu ile belirlenmektedir.

Dünya yüzeyi tarafından, hareket halindeki hava üzerine, akışı engelleyici yatay bir direnç kuvveti etki etmektedir. Bu kuvvetin akış üzerindeki etkisi, yükseklikle birlikte azalmaktadır. Sürtünme kuvvetinin etkisinin ihmal edilebildiği δ yüksekliği, atmosferik sınır tabaka olarak bilinmektedir. Bu δ kalınlığının üst kısmına da serbest atmosfer adı verilmektedir (Şekil-3.2).



Şekil-3.3: Atmosferik sınır tabakada kuvvetlerin dengesi

Şekil-3.3 de görüleceği gibi, sınır tabaka içinde yatay olarak hareket eden, A ve B parçacıkları üzerine etkiyen kuvvetlerin dengesi göz önüne alınsın. A parçacığı B den daha yüksek bir seviyede ise, bu parçacığa ait hız ve Coriolis kuvveti, B parçacığınıninkinden daha büyük olacaktır. Rüzgar yönü ve izobar eğrileri arasındaki α açısı, hızlı parçacık için daha küçük değerler alacaktır. α açısı, sınır tabakanın üst sınırında sıfır olacak ve yer yakınında maksimum bir α_0 değerine erişecektir. Kuzey yarımkürede, sınır tabakadaki rüzgar hızı, Şekil-3.4 deki gibi bir spiralle gösterilebilecektir [41].



Şekil-3.4: Atmosferik sınır tabakada rüzgar hız spirali

Atmosferik sınır tabakanın mm seviyesindeki kısmında moleküler özellikler, sıcaklık ve diğer skalaların yapısına önemli ölçüde etki etmektedirler. Aerodinamik olarak pürüzsüz yüzeyler, yalnızca hafif rüzgarlı su yüzeyleri olarak göz önüne alınmaktadır. Moleküler sınır tabakanın üzerinde yüzey tabakası yer almaktadır. Gerilme ve diğer akıların düşey doğrultudaki değişimlerinin ihmal edilebildiği ve rüzgar yönünün esasen sabit olduğu bu bölge, yaklaşık 30 m yüksekliğindedir. Bu tabakada dünyanın dönme etkisi değil, ısıl tabakalaşma önem taşımaktadır. Yüzey tabakasının üzerinde, ısıl tabakalaşma ile birlikte dünyanın dönme hareketinin etkili olduğu ve çoğunlukla "Ekman tabakası" olarak adlandırılan bölge yer almaktadır. Bu tabakanın 150 m lik kısmında, rüzgarın yükseklikle yön değiştirme etkisi genellikle ihmal edilmektedir [2].

Atmosferik sınır tabaka akışında, ortalama hız dağılımı

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^\beta \quad (3.5)$$

şeklindeki üs kanununun ile ifade edilmektedir. u , yerden y yüksekliğindeki ortalama hız; U_0 , sınır tabaka kalınlığı dışındaki serbest akış hızı; δ , sınır tabaka kalınlığıdır. β üssü, arazinin pürüzlülük yapısına bağlı olarak, 0.1 ile 0.4 değerleri arasında değişim göstermektedir (Tablo-3.1).

Ortalama hız profili için kullanılan diğer bir ifade,

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{z_0} \quad (3.6)$$

şeklindeki logaritmik kanun olmaktadır [41]. Bu bağıntıda; u , yerden y yüksekliğindeki ortalama hız; U_* , duvar kayma gerilmesinden hesaplanan sürtünme hızı; z_0 , ortalama pürüzlülük yüksekliğini gösteren pürüzlülük uzunluğu ve $\kappa=0.4$ (von Karman sabiti) dir.

Tablo-3.1: Arazi tipi ile ilgili değerler [42]

Arazi tipi	β	Pürüzlülük uzun. z_0 (m)	Sınır tabaka ka. δ (m)
açık deniz, buz, tundra	0.11	0.001	250
küçük ve seyrek ağaçlı bölgeler	0.15	0.03	300
küçük kasabalar, bol ağaçlı bölgeler	0.25	0.03	400
yüksek binalar, kent ve sanayi bölgeleri	0.36	3	500

3.2. Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesi

Atmosferik sınır tabaka akışı, düzlem levha üzerinde türbülanslı bir sınır tabakadaki akışa benzemektedir. Aerodinamik pürüzlülük, atmosferik sınır tabakanın laboratuvarında modellenmesinde önemli parametrelerden birisi olmaktadır. Yüzeğe yakın laminer bir alt tabakanın olmadığı durumda, pürüzlü bir yüzey üzerindeki akış için, tam aerodinamik pürüzlülük

söz konusu olmaktadır. Bu tip akışlarda, yüzeye yakın bölgelerde moleküler viskozitenin etkileri ihmal edilebilmektedir. Yüzey üzerindeki pürüzlülük elemanlarının yükseklikleri, laminar alt tabakanın yüksekliğinden daha büyük ise, tam aerodinamik pürüzlü akışlar meydana gelmektedir. Pratik açıdan dünyanın yüzeyi, aerodinamik pürüzlülük göstermektedir. Aerodinamik olarak pürüzlü bir yüzey üzerinde türbülanslı bir sınır tabakadaki akış, tamamen yüzeydeki engellerin geometrisine bağlı olmaktadır. Tekil bir engele yakın olmayan bölgeler için akış, istatistiksel olarak, pürüzlülük yüksekliğinin dağılımı ile belirlenmektedir.

Atmosferik sınır tabaka akışı ile düzlem levha üzerindeki türbülanslı sınır tabaka akışı, iki açıdan farklılık göstermektedir. Birincisi, doğal rüzgarda ortalama akışın yönü genellikle yükseklikle değişirken; düz levha üzerindeki sınır tabakada böyle değişimler olmamaktadır. İkinci ana fark, sıcaklık gradyentinin kararlı ve kararsız olma durumuna bağlı olarak, potansiyel sıcaklık gradyentleri sonucu oluşan, havanın kaldırma etkilerinin türbülans şiddetinde değişiklikler meydana getirebilmesidir. Doğal sınır tabakalarda türbülans üretiminin çoğu, yere yakın bölgelerde meydana gelmektedir. Bunun bir kısmı yutulurken, bir kısmı da difüzyonla üst bölgelere iletilmektedir. Suni olarak geliştirilen bir sınır tabakada, türbülans enerjisinin üst bölgelere transferi için bir mekanizma bulunmuyor ise; enerji transferi işlemi oldukça yavaş bir şekilde gerçekleşeceğinden, sınır tabakanın bu bölgelerinde türbülans şiddeti çok düşük değerler alacaktır. Bu nedenle, enerji transferi işlemini hızlandırmak için, akışa bir karışım etkisinin verilmesi gerekmektedir [5].

Atmosferik sınır tabaka akışının rüzgar tünellerinde modellenmesi konusunda Hunt ve Fernholz [44], birçok araştırmacının görüşlerini bir rapor halinde toplamış ve modelleme çalışmalarına ait verileri tablolar halinde yayınlamışlardır.

Laboratuvar çalışmalarında, akışın yükseklikle yön değiştirme etkisi ihmal edilmektedir. Bu duruma nötral atmosfer

adı verilmektedir. Atmosferik sınır tabaka akışının simülasyonunda kullanılan rüzgar tünelleri, genellikle üç sınıfta toplanmaktadır:

a) Çalışma bölgesi uzunluğu 30 m ye kadar ulaşabilen ve ve sınır tabakanın düz bir yüzey üzerinde doğal olarak geliştiği uzun rüzgar tünelleri

b) Çalışma bölgesi başlangıcına yerleştirilen bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanlarından oluşan pasif aygıtlarla, sınır tabakanın suni olarak geliştirildiği kısa rüzgar tünelleri

c) Çalışma bölgesi içine yerleştirilen, hüzme ve mekanik araçlardan oluşan, aktif aygıtlarla sınır tabakanın suni olarak geliştirildiği kısa rüzgar tünelleri

Pratikte sınır tabakanın doğal olarak geliştiği yeterince uzun çalışma bölgesi olan rüzgar tünelleri, laboratuvar alanlarının yetersiz ve bunun yanısıra ticari olmaması nedeni ile pek yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenle, atmosferik sınır tabaka akışı simülasyon çalışmaları genellikle, aktif veya pasif aygıtlarla donatılmış kısa çalışma bölgesi rüzgar tünellerinde yapılmaktadır.

Atmosferik sınır tabakanın rüzgar tüneline modellemesinde; U akış hızı, L karakteristik uzunluk ve ν , kinematik viskozite olmak üzere,

$$Re = \frac{UxL}{\nu} \quad (3.7)$$

olarak tanımlanan Reynolds sayısının benzeşimi sağlanamamaktadır. Bu durum, gerçek yapıda ve modelde akışkan olarak kullanılan havanın kinematik viskozitesinin aynı olmasından ($\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) kaynaklanmaktadır. Atmosferik sınır tabakada etkili olan Coriolis kuvvetleri, modellemede dengelenemeyerek ihmal edildiğinden; $U(y)$, y yüksekliğindeki hız; f_c , Coriolis parametresi olmak üzere,

$$Ro = \frac{U(y)}{yxf_c} \quad (3.8)$$

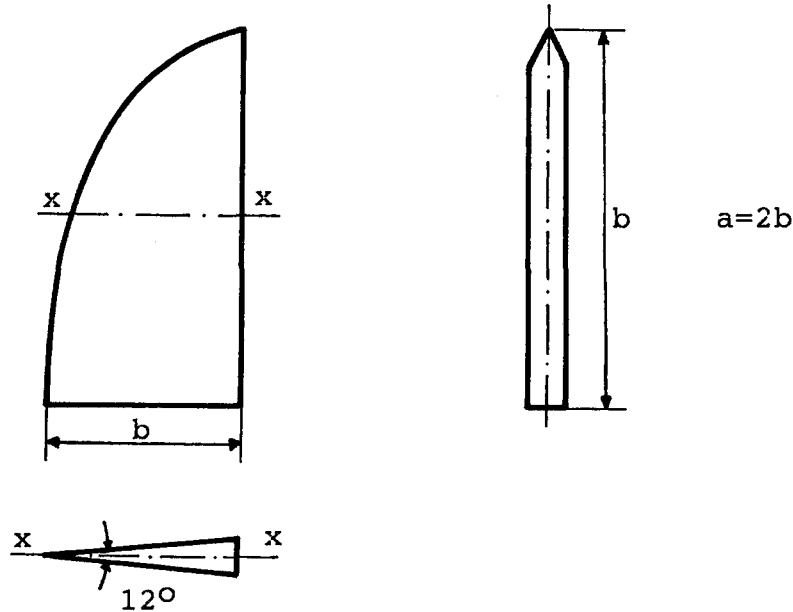
şeklinde tanımlanan Rossby sayısının benzeşimi de sağlanamamaktadır [41].

3.3. Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesinde Kullanılan Yöntem

Bu çalışmada, bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları kombinasyonundan oluşan pasif aygıtlarla, kısa çalışma bölgesi bir rüzgar tüneli kullanılarak, atmosferik sınır tabaka akışı suni olarak geliştirilmiştir. Bu modelleme yönteminin Counihan [7] tarafından geliştirilmiş şekli, simülasyon çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Pasif aygıtlı kombinasyonda bariyer, sınır tabakanın alt bölgesi için bir başlangıç hız kaybı oluşturulmasını sağlamaktadır. Bariyer yüksekliğinin artması, akışın türbülans derecesini arttırıcı yönde etki etmektedir. Kullanılan simülasyon yönteminde bariyer yüksekliği, geliştirilmek istenen sınır tabaka kalınlığının 1/6 sı olacak şekilde önerilmektedir.

Doğal olarak gelişmiş türbülanslı bir sınır tabakadaki akışta, sınır tabakanın iç ve dış bölgelerinde büyük ölçekli girdaplar oluşmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ile yer seviyesinde



Şekil-3.5: Eliptik girdap üreticisi

üretilen yüksek şiddetteki türbülansın, sınır tabakanın dış bölgesine doğru yayılması gerekmektedir. Atmosferik sınır tabaka akışının suni olarak geliştirilmesinde kullanılan girdap üreticiler, büyük ölçekli ve zıt yönlü girdapların oluşmasını sağlamakta ve sınır tabakanın dış bölgesi için gerekli olan türbülansı oluşturmaktadır. Bu sayede, yer seviyesinde en büyük değerde olan türbülans, girdap üreticilerin tepesi civarında sifıra doğru yaklaşmaktadır. Şekil-3.5 de görülen eliptik girdap üreticilerin yüksekliği, geliştirilmek istenen sınır tabaka yüksekliğine eşit olarak alınmaktadır.

Küçük ahşap bloklar, taş parçacıkları, kum vb. parçacıklardan oluşan pürüzlülük elemanları, yer seviyesindeki türbülans şiddetinin arttırılmasını sağlamakta ve simüle edilecek arazi yapısını karakterize etmektedir.



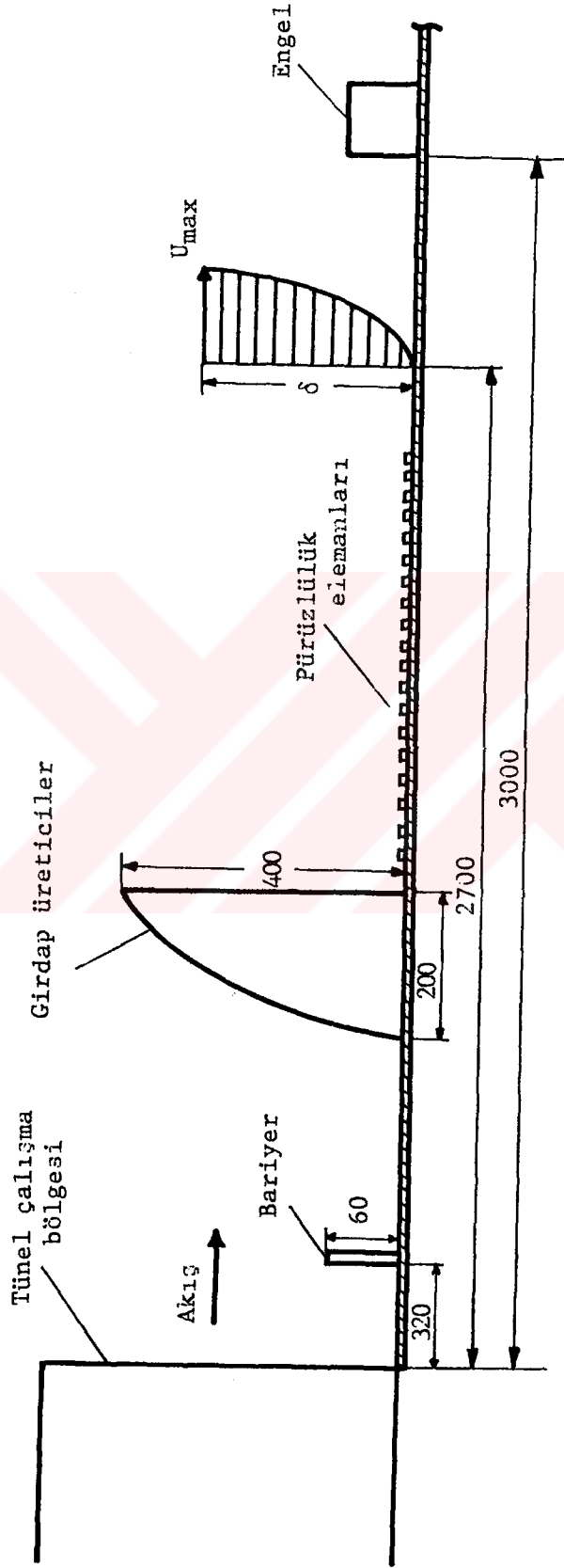
BÖLÜM 4

DENEY DÜZENEKLERİ

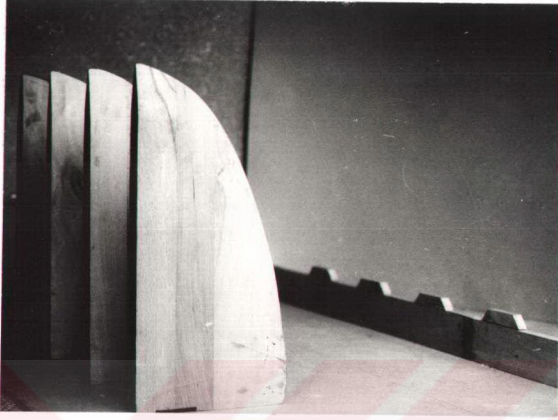
Engel etrafındaki laminer ve türbülanslı akışla ilgili deneysel çalışmalar için, K.T.Ü. Makina Müh. Bölümü Termodinamik ve Akışkanlar Mekaniği laboratuvarlarında üç ayrı tipte deney düzenekleri kurulmuştur.

4.1. Duvar Hüzmesi Akışı Düzenegi

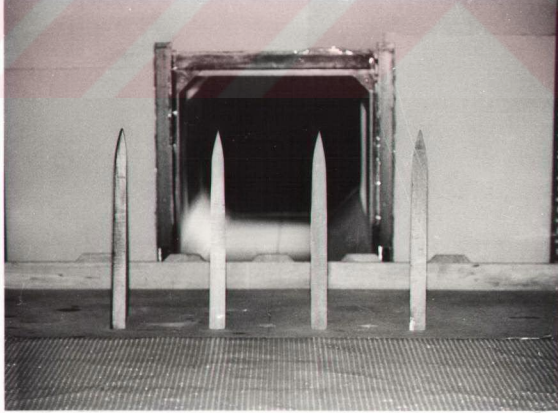
Bu akışı oluşturmak için; açık devreli, üfleme tipinde, sesaltı bir rüzgar tünelinin hüzmesinden yararlanılmıştır. 22 kW lık bir A.C. motoru ile çalıştırılan tünelin deney bölgesi 457x457 mm kesitinde ve 1150 mm uzunluğundadır. Şekil-4.1 de görülen düzenek için, tünel çalışma bölgesi çıkışına 4 m uzunluğunda 1.35 m genişliğinde bir düzlem levha eklenmiştir. Counihan'ın [7] yöntemine göre geliştirilmek istenen atmosferik sınır tabaka akışı için; bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları hüzme başlangıcından itibaren levha üzerine yerleştirilmişlerdir. Duvar hüzmesi akışında, 400 mm kalınlığında atmosferik bir sınır tabakanın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sınır tabaka kalınlığının 1/6 sı olacak şekilde, 60 mm yüksekliğindeki bariyer, hüzme çıkışından itibaren 320 mm ye yerleştirilmiştir. Bariyerin üzerine 17 mm yüksekliğinde parçaların ilave edilmesi ile Resim-4.1 de görülen, kale suru şeklinde bir yapı elde edilmiştir. Bariyerden sonra yerleştirilen dört adet eliptik girdap üreticisinin ön ucu ile bariyer arasında 550 mm lik bir uzaklık bulunmaktadır. Ahşaptan imal edilen girdap üreticilerinin yükseklikleri, geliştirilmek istenen sınır tabakanın yüksekliğine eşit olacak



Şekil-4.1: Duvar hüzmesi akışı deney düzeneyi.



Resim-4.1: Duvar hüzmesi akışında bariyer ve girdap üreticiler



Resim-4.2: Duvar hüzmesi akışında bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları

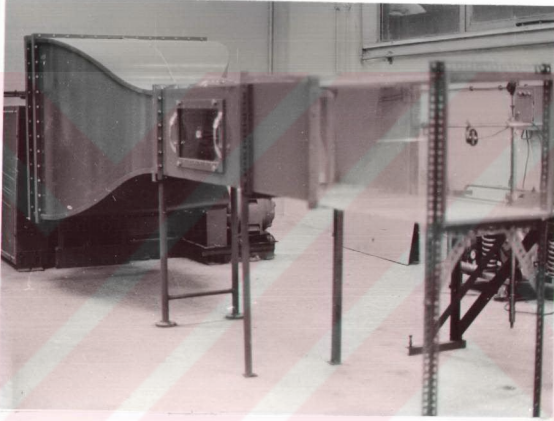
şekilde 400 mm, uzunlukları 200 mm ve genişlikleri 40 mm olarak alınmıştır. Resim-4.1 ve 4.2 de görülen eliptik girdap üreticiler, yüksekliklerinin yarısına eşit olacak şekilde 200 mm aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Pürüzlülük elemanı olarak önce ahşap bloklar denenmiş, ancak hava kabarcıklı naylon örtü ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Girdap üreticilerden hemen sonra, Resim-4.2 de görülen, 5 mm pürüzlülük yüksekliği bulunan hava kabarcıklı naylon örtü ile 1500 mm uzunluğunda bir pürüzlülük bölgesi oluşturulmuştur.

Bu akış tipinde, $\beta=0.2$ lik üs kanununa uygun atmosferik sınır tabaka hız profili geliştirilmiştir. Sınır tabaka içine yerleştirilen 100 mm lik kare kesitli, iki boyutlu bir engel etrafında ortalama hız ve türbülans hızları ölçülmüştür. Bu çalışmada, H engel yüksekliği olmak üzere, $\delta/H=2.7$ oranında gerçekleşmiştir. Hız ve türbülans ölçümlerinde, T.S.I. Model 1050 sabit sıcaklık anemometresi, T.S.I. Model 1051 monitör ve güç kaynağı modülü, T.S.I. Model 1076 True rms voltmetre ve Thurbly Model 1905a dijital multimetre cihazları kullanılmıştır. Ölçümler T.S.I. Model 1210-20 standart kızgın film proba yapılmıştır. Düşey doğrultuda 0.2 mm hassasiyetle ilerleme sağlayan bir vidalı mekanizma imal edilerek, probun üç doğrultuda hareket edebilmesi sağlanmıştır. Probon kendi eksenini etrafında dönme hareketi, vidalı mekanizmaya takılan, 0.2° dönme hassasiyeti sağlayan T.S.I. Model 10142-1 kayıcı mekanizma ile gerçekleştirilmiştir. Kızgın telli anemometrenin ölçüm ilkesi, kızgın tel kalibrasyonları ve anemometre çıkış sinyallerinin değerlendirilmesi EK kısmında verilmiştir.

4.2. Tünel Akışı Düzenegi

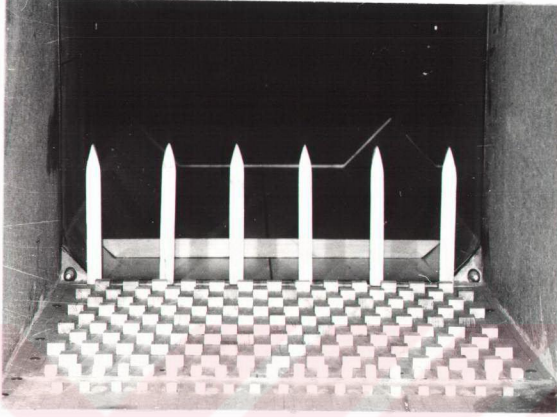
Duvar hüzmeleri akışında iki boyutlu, kare kesitli engel etrafında yapılan ölçümlerden elde edilen verilerin, daha iyi değerlendirilebilmesi ve sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla, tünel içi çalışma planlanmıştır. Bu nedenle, rüzgar tünelinin 457x457 mm kesitli 1150 mm uzunluğundaki çalışma bölgesine 2000 mm lik bir ek yapılarak, deney bölgesi uzunluğu 3150 mm ye yükseltilmiştir. Resim-4.3 de görülen düzenegin,

çalışma bölgesinde 33 m/s ye kadar akış hızları elde edilebilmektedir. İmalatçı firma Plint and Partners LTD tarafından yapılan araştırmada, çalışma bölgesi orta ekseninde kızgın telli anemometre ile ortalama akış yönünde %0.5 lik bir türbülans şiddetinin ölçüldüğü belirtilmektedir. Tünel orta ekseninde ortalama akış yönünde, T.S.I. Model 1210-20 kızgın film prob kullanılarak %0.46 lık bir türbülans şiddeti ölçülmüştür.



Resim-4.3: Tünel akışı deney düzeneği

Tünel içi akışta 150 mm kalınlığında atmosferik bir sınır tabakanın geliştirilmesine karar verilmiştir. Atmosferik sınır tabakanın tünel içinde modellenmesi, yine Counihan'ın [7] yöntemi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için, deney bölgesi başlangıcından itibaren 1030 mm uzaklıkta 20 mm yüksekliğinde bir bariyer yerleştirilmiştir. Bariyerdan 125 mm sonra, aralarında 75 mm uzaklık bulunan; 150 mm yüksekliğinde, 75 mm uzunluğunda ve 10 mm genişliğinde 6 adet eliptik girdap üreticisi konulmuştur. Resim-4.4 de görülen bu düzenlemede, girdap üreticilerinden sonra 500 mm lik bir mesafede,

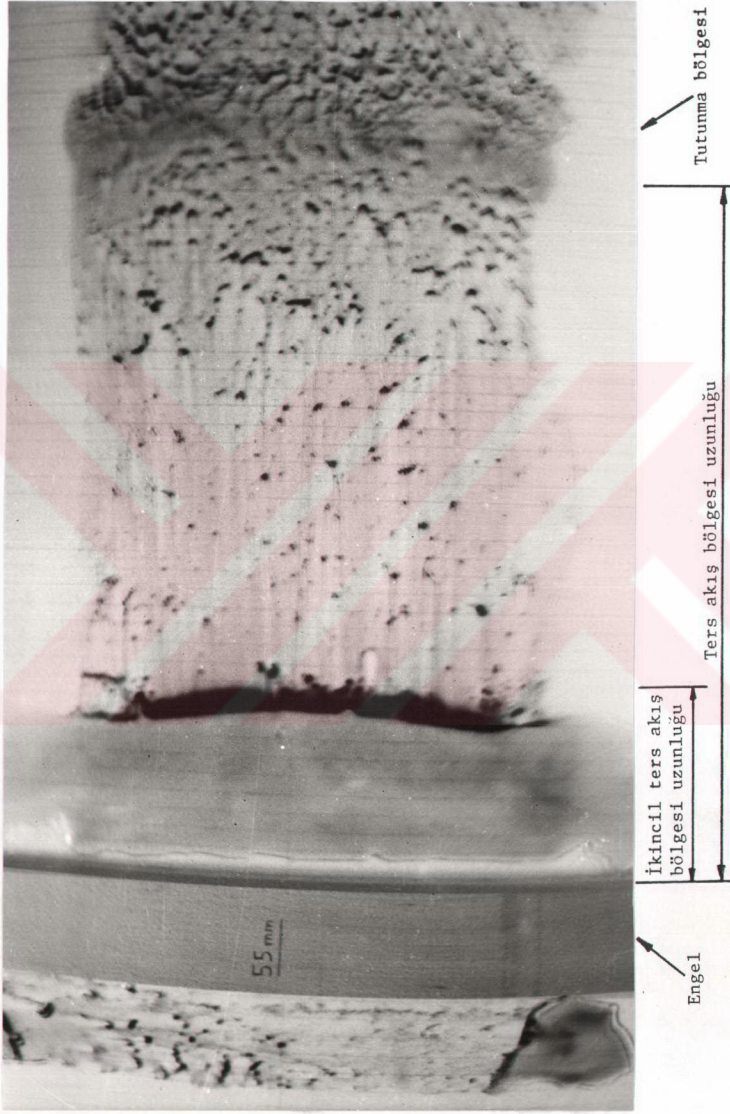


Resim-4.4: Tünel akışında bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları

15x15x10 mm boyutlarındaki ahşap bloklar ardışık bir düzende yerleştirilerek, pürüzlülük bölgesi oluşturulmuştur. Pürüzlülük elemanlarının alan yoğunluğu %12 olarak gerçekleştirilmiştir. Bu değer, yapılan diğer çalışmalarda %11-20 olarak verilmektedir [15,21].

Tünel içi akışta, $\beta=0.2$ lik üs kanununa uygun olarak, 150 mm yüksekliğinde atmosferik sınır tabaka akışı elde edilmiş ve serbest akış hızı 8.3 m/s olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada da, duvar hüzmeleri akışındaki $\delta/H=2.7$ oranı esas alınmıştır. Bu amaçla, 55 mm lik kare kesitli, iki boyutlu ahşap bir engel etrafında kızgın telli anemometre ile ortalama hız ve türbülans ölçümleri yapılmıştır.

Tünel içinde geliştirilen atmosferik sınır tabaka akışında, hız ve türbülans ölçümlerinden önce, engel etrafında akışın ayrılma ve tutunma bölgelerini belirlemek amacıyla, yağ filmi tekniği kullanılarak yüzey akışı görüntüleme çalışması yapılmıştır. Bu konuda yapılan bir çalışmada, %90 yağ ve %10 çinko oksit tozu karışımı kullanılmıştır [45]. Slikon yağı ve fırınlanmış titanyumdioksit tozu ile su, petrol ve



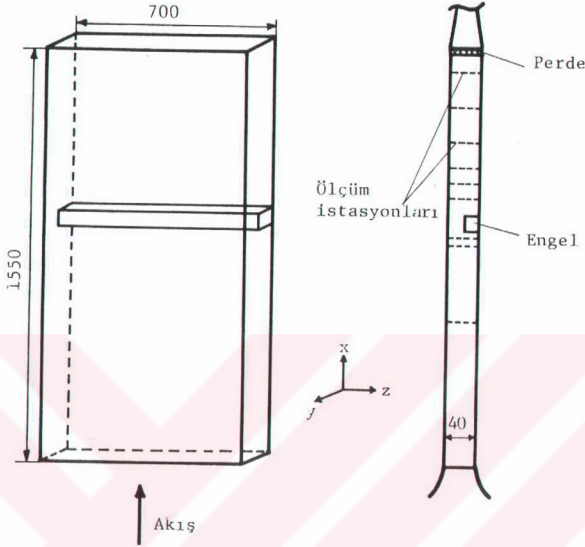
Resim-4.5: Tipik bir akış görüntüleme fotoğrafı

deterjanlı titanyumdioksit tozundan oluşan karışımlar da yüzey akışı görüntüleme çalışmalarında uygulanmıştır [30,31].

Akış görüntüleme çalışmasında, Atlı [46] tarafından uygulanan yöntem esas alınmıştır. Buna göre, beyaz bir zemin üzerinde yapılacak görüntüleme çalışmalarında; yağ genellikle karbon ile, siyah zemin kullanıldığında alüminyum peroksitle karıştırılmaktadır. Çalışmanın beyaz bir zemin üzerinde yapılması düşünüldüğünden, 10 numara motor yağı karbonla karıştırılarak siyah renkte bir karışım elde edilmiştir. Tünel döşemesine beyaz renkte, ölçeklendirilmiş bir kağıt ve bunun üzerine de 2 mm kalınlığında cam yerleştirilmiştir. Bu döşeme üzerine konulan modellerin ön ve arkasına, hazırlanan karışım ince bir tabaka halinde sürülmüştür. 150 mm kalınlığındaki atmosferik sınır tabaka içine yerleştirilen, uzunlukları ve yükseklikleri değişen iki boyutlu engeller ile, farklı şekil oranlarında üç boyutlu engeller için yüzey akışı görüntüleme tekniği kullanılmış ve fotoğraflar çekilmiştir. Resim-4.5 de, 55 mm yüksekliğinde, kare kesitli, iki boyutlu engel için çekilen tipik bir akış gözlenmesi fotoğrafı verilmiştir. Fotoğrafta engelin ön ve arkasında meydana gelen ters akış bölgeleri, yağ içinde bulunan tortu ve kabarcıkların oluşturduğu izlerden kolayca görülebilmektedir. Koyu renkli ve zıt yönlü izlerin sınırladığı bölgeler, akışın tutunduğu bölgeleri göstermektedir.

4.3.Laminer Kanal Akışı Düzenegi

Engel etrafındaki laminer akışın nümerik çözümlerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla, deneysel bir çalışmanın yapılması planlanmıştır. Deney düzeneginin kurulmasında, K.T.Ü. Makina Müh. Bölümü Klima laboratuvarında bulunan, çok düşük hızlarda çalışabilen klima cihazının vantilatöründen yararlanılmıştır. Radyal tipteki vantilatör, 0.166 kW lık ve hızı ayarlanabilen bir A.C. motoru ile çalıştırılmaktadır. Klima cihazının emme ağzına geçiş boruları takılarak, dairesel kesitten dikdörtgen kesite geçilmiştir. Şekil-4.2 de görülen düzeneğe deney bölgesi, 40 mmx700 mm kesitinde ve 1550 mm



Şekil-4.2: Laminer kanal akışı deney düzeneği

uzunluğunda pleksi-glass malzemeden yapılmıştır. Akışın deney bölgesine düzgün ve tedirgin olamayacak bir şekilde girmesini sağlamak amacıyla, giriş ağzı dışa doğru bükülmüştür. Ayrıca deney bölgesinin çıkışına, akışkanın kanal kesitini doldurmasını sağlamak amacıyla, direnç oluşturan bir perde yerleştirilmiştir. Deney bölgesinin şekil oranı 1/17.5 olarak gerçekleştirilmiştir. Bu oran, Armaly ve diğ. [47] tarafından yapılan çalışmadaki 1/18 lik şekil oranına çok yakın olup, akışın iki boyutluluğunun sağlanması için yeterli olmaktadır. Düzenegin emme tipinde olması da laminer akış şartlarının sağlanmasında avantaj teşkil etmektedir.

Düzenek önce, deney bölgesinde yatay bir akış oluşturacak şekilde kurulmuştur. Bu konumda, doğal ve zorlanmış taşınım, birbirine dik doğrultuda etki etmektedir. Kızgın film

probun, EK kısmında da verilen, düşük hızlardaki kalibrasyonu, doğal ve zorlanmış taşınım aynı doğrultuda ve aynı yönde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Doğal ve zorlanmış taşınımın aynı yönde olduğu akış durumunda, yapılacak kalibrasyonda, hızdaki belirsizlik en aza indirgenmektedir [48]. Bu nedenle, düzeneğin deney bölgesi düşey konumda bir akış oluşturacak şekilde değiştirilerek, doğal ve zorlanmış taşınımın aynı yönde etkimesi sağlanmıştır.

Ölçümler, ortalama akış hızı ve deney bölgesinin hidrolik çapı ile oluşturulan, Reynolds sayısının 200,400 ve 800 değerlerinde yapılmıştır. Giriş hız profili ölçümleri, deney bölgesi başlangıcından 1000 mm lik bir uzaklıkta yapılmıştır. Deney bölgesine yerleştirilen 20x20 mm lik kare kesitli, iki boyutlu engel etrafında ortalama akış yönündeki hız ölçülmüştür. Deney bölgesinin orta ekseninde yapılan hız ölçümleri, T.S.I.Model 1240-20 standart X-probu ile gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 5

SAYISAL ÇÖZÜM PROGRAMI

Viskoz akış problemlerinin çözümünde kullanılan Navier-Stokes denklemleri, ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemlerdir. Çok sınırlı uygulamalar dışında, bu denklemlerin tam çözümleri elde edilememektedir. Bu nedenle, çeşitli akış problemleri için, sayısal yöntemler ile yaklaşık çözümler bulunabilmektedir. Türbülanslı akışların çözümünde kullanılan türbülans modelleri de, yeterli hassasiyeti sağlayamamaktadır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan bilgisayar programı; laminer akışa uygulanarak, çeşitli akış problemleri çözülmüştür.

Sıkıştırılamayan bir akışkanın iki boyutlu, laminer, sürekli hareketi,

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5.1)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5.2)$$

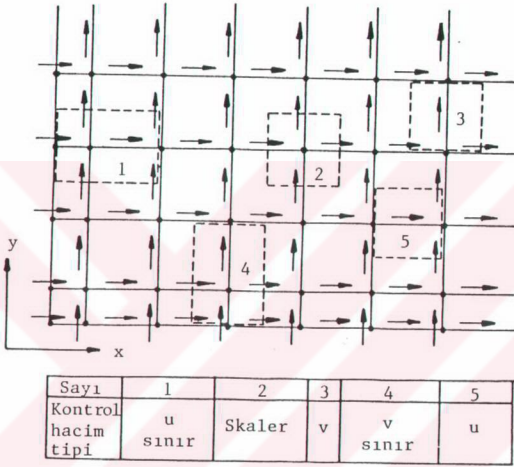
şeklindeki, Navier-Stokes denklemleri ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) = 0 \quad (5.3)$$

süreklilik denklemidir. Momentum denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \theta) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \theta) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = S \theta \quad (5.4)$$

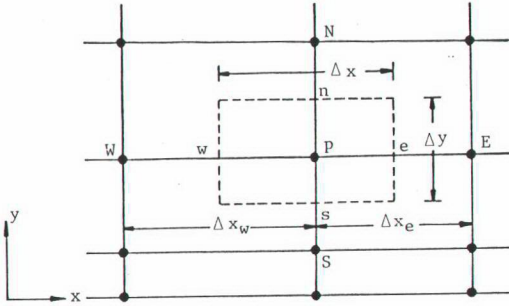
şeklinde genel bir formda yazılabilir. Denklemin sol tarafındaki ilk iki terim taşınımı, son iki terim yayınımlı ifade etmektedir. ϕ , hız bileşenlerini gösteren genel bağımlı değişken olmaktadır. Γ_ϕ , her bir ϕ değişkeni için yayınımlı katsayısını göstermektedir. S_ϕ , taşınım ve yayınımlı cinsinden ifade edilemeyen terimleri içermektedir.



Şekil-5.1: Kontrol hacmi tanımı

Bu denklem, göz önüne alınan fiziksel integrasyon alanını oluşturan ve Şekil-5.1 de görülen sonlu fark kontrol hacimleri boyunca integral alınmak suretiyle, sonlu fark denklemi olarak ifade edilmektedir. İlgili akış alanını oluşturan ağ içinde, Şekil-5.2 de görülen, tipik bir kontrol hacmi üzerinden (5.4) denklemi integre edilmektedir. Her bir terime düğüm noktalarında (P, E, W, S, N), ϕ nin ayrık değerleri ile yaklaşılmaktadır. Kontrol hacmi üzerinden kaynak teriminin ortalama değeri

$$\int_V S_\phi dV = S_P \phi_P + S_u \quad (5.5)$$



Şekil-5.2: Skaler bir değişken için kontrol hacmi

şeklinde lineer bir bağıntı ile ifade edilmektedir. C'ler taşınım terimlerini göstermek üzere,

$$m_{net} = |C_W - C_E + C_S - C_N| \quad (5.6)$$

şeklinde tanımlanmakta ve süreklilik hatası olarak adlandırılmaktadır.

$$S_p = -m_{net} \quad (5.7)$$

$$S_u = m_{net} \theta_p + A_e (P_p - P_e) \quad (5.8)$$

olarak ifade edilmektedir.

Kontrol hacmi için diskretizasyon denklemi,

$$a_p \theta_p = a_w \theta_w + a_e \theta_e + a_s \theta_s + a_n \theta_n + S_u \quad (5.9)$$

veya

$$a_p \theta_p = \sum a_{nb} \theta_{nb} + S_u \quad (5.10)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. a_p katsayısı,

$$a_p = a_w + a_e + a_s + a_n - S_p \Delta V \quad (5.11)$$

eşitliği ile verilmektedir. Yukarıdaki ifadelerde a'lar taşınım ve yayınımla ilgili ana katsayıları göstermektedir. Sonlu fark ağ alanındaki her bir kontrol hacmi için, benzer denklemler uygulanmaktadır [49].

(5.10) denkleminin lineer bir formda görünmesine karşın; denklemdeki katsayılar, \emptyset ile gösterilen bağımlı değişkenlerin bir veya daha fazlasının çözümüne bağlı olmaktadır. Katsayıların iterasyondan iterasyona değişmesi sonucu, \emptyset değerlerinde büyük değişimler meydana gelmektedir. Bu durum \emptyset için çözümün çok yavaş yakınsamasına veya ıraksamasına neden olmaktadır. Patankar [49], (5.10) denkleminde relaksasyon faktörü α ile

$$\frac{a_p}{\alpha} \emptyset_p = \Sigma a_{nb} \emptyset_{nb} + S_u + \frac{1-\alpha}{\alpha} a_p \emptyset_p^o \quad (5.12)$$

şeklinde bir ifade oluşturmaktadır. \emptyset_p^o , bir önceki iterasyon adımı \emptyset_p nin değeri olmaktadır. (5.10) denklemi, basınç terimini içerecek şekilde, u-momentumu için,

$$a_{up} = \Sigma a_{nb} u_{nb} + S_1 + A_e (p_p + p_E) \quad (5.13)$$

olarak yazılabilmektedir. S_1 , basınç terimi dışındaki kaynak terimlerini; A_e , kontrol hacminin E noktasındaki yüzey alanını göstermektedir. Tahmini bir basınç dağılımı p^* için, u momentum denklemlerinin çözümü ile elde edilen u^* hızlarının (5.13) denklemini sağlaması gerekmektedir:

$$a_{up}^* = \Sigma a_{nb}^* u_{nb}^* + S_1 + A_e (p_p^* - p_E^*) \quad (5.14)$$

Düzeltilmiş basınç dağılımından elde edilen u hızları, süreklilik şartını sağlayacaktır. $p' = p - p^*$ ile tahmini basınç dağılımının, $u' = u - u^*$ ile u hızlarının düzeltilmesi gerekmektedir. p' ve u' arasındaki bağıntı, (5.13) denkleminin (5.14) denkleminin çıkarılması ile elde edilmektedir:

$$a_p u_p' = \Sigma a_{nb} u_{nb}' + A_e (p_p' - p_E') \quad (5.15)$$

p basıncı ve u hızı için,

$$p = p^* + p' \quad (5.16)$$

$$u = u^* + u' \quad (5.17)$$

eşitlikleri geçerli olmaktadır.

Patankar ve Spalding [50] tarafından geliştirilen SIMPLE yönteminde, (5.15) denklemindeki $\Sigma a_{nb} u_{nb}'$ terimi ihmal edilmektedir. (5.15) ve (5.17) denklemlerinden

$$u_p = u_p^* + d_e (p_p' - p_E') \quad (5.18a)$$

eşitliği elde edilmekte ve,

$$d_e = \frac{A_e}{a_p} \quad (5.18b)$$

olarak tanımlanmaktadır. Momentum denklemlerindeki relaxasyon için $\alpha \approx 0.5$; basınç doğrultman denklemindeki relaxasyon için,

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (5.19)$$

ifadesi ile $\alpha_p \approx 0.8$ değeri önerilmektedir [49].

Hazırlanan bilgisayar programında, Patankar [49] tarafından geliştirilen hybrid yaklaşım ve iteratif çözücü olarak da, Doormall ve Raithby [51] tarafından önerilen ve SIMPLEC olarak adlandırılan yöntem kullanılmıştır. SIMPLEC yönteminde, SIMPLE yönteminden farklı olarak, basınç için relaxasyon işlemi yapılmamaktadır. Momentum denklemlerinde ise,

$$\epsilon = \alpha / (1 - \alpha) \quad (5.20)$$

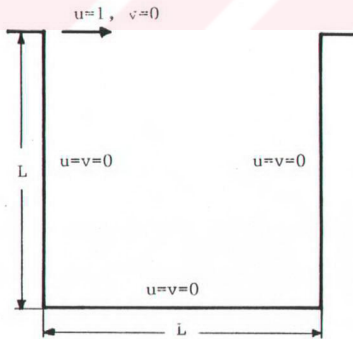
olarak tanımlanan relaksasyon parametresi kullanılmaktadır. Bu ifadede α , SIMPLE yöntemindeki relaksasyon parametresidir. ϵ için, 4 ile 10 arasındaki değerler önerilmektedir. (5.15) denklemindeki tüm hız değişimleri aynı mertebededir. SIMPLE yönteminde $\Sigma_{nb}u'_{nb}$ teriminin ihmal edilmesi, denklemin yapısında bir uyumsuzluk meydana getirmektedir. (5.11) denkleminin (5.15) denkleminde yerine konduğunda, denklemin sol tarafında $\Sigma_{nb}u_p$ ifadesi yer almaktadır. $\Sigma_{nb}u_p$ teriminin (5.15) denkleminin her iki tarafından çıkarılması ile

$$(\alpha_p - \Sigma_{nb})u'_p = \Sigma_{nb}(u'_{nb} - u'_p) + A_e(p'_p - p'_E) \quad (5.21)$$

ifadesi elde edilmektedir. Bu denkleminde ise, $\Sigma_{nb}(u'_{nb} - u'_p)$ terimi ihmal edilmekte ve

$$d_e = \frac{A_e}{\alpha_p - \Sigma_{nb}} \quad (5.22)$$

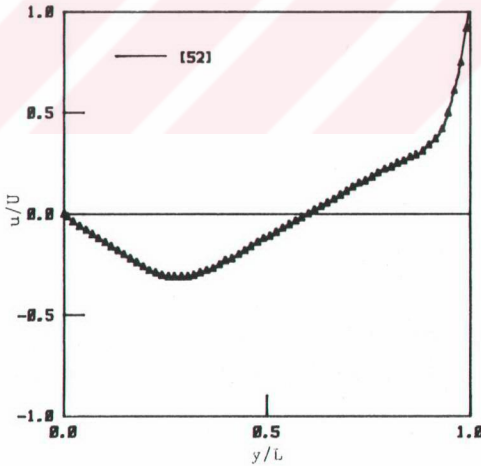
olarak tanımlanmaktadır [51].



Şekil-5.3: Oyuk akışı geometrisi

SIMPLEC yönteminde, basınç doğrultman denkleminin çözümünde, artıkların azaltılması için bir yakınsama kriterinin kullanılmasının gerektiği belirtilmektedir. Hazırlanan bilgisayar programında, momentum denklemleri dışında, basınç doğrultman denklemi için herhangi bir relaksasyon parametresi kullanılmamıştır.

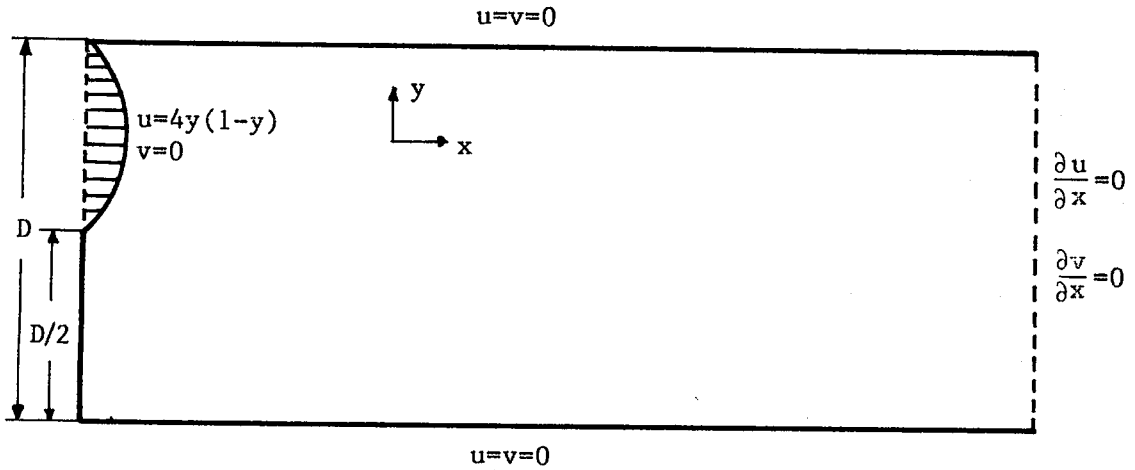
Bilgisayar programının doğruluğunun test edilmesi amacıyla önce, Şekil-5.3 de geometrisi verilen, tipik oyuk akışı problemi ele alınmıştır. Bu problem için, Sivaloganathan ve Shaw [52], 66x66 lık düzgün ağ ile SIMPLE yöntemini kullanarak, değişik Reynolds sayılarında çözümler bulmuşlardır. Aynı geometri ve aynı ağ sayısı ile oyuk akışı, SIMPLEC yöntemi ile çözülmüştür. Şekil-5.4 de, $Re=400$ için, oyugun orta eksenindeki yatay hız profilleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Grafikten, her iki çözümün de tamamen aynı olduğu görülmektedir. Bu duruma göre, hazırlanan bilgisayar programının doğru ve yeterli hassasiyette çalıştığı sonucuna varılmıştır.



Şekil-5.4: $Re=400$ için oyuk orta ekseninde yatay hız profili

İterasyon sayısı açısından karşılaştırma yapmak için, oyuk akışı problemi SIMPLE ve SIMPLEC yöntemleri ile ayrı ayrı çözülmüştür. Normalize edilmemiş artıkların 1×10^{-3} den küçük olması koşulu ile, $Re=400$ için 66×66 lık düzgün ağ kullanılarak, SIMPLE yönteminde 750 iterasyonda çözüm bulunurken; SIMPLEC yönteminde $\epsilon=5$ için, iterasyon sayısı 271 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç, SIMPLEC yönteminin SIMPLE yönteminden çok daha ekonomik olduğunu göstermektedir.

İkinci test problemi olarak, step arkasındaki akış göz önüne alınmıştır. Bu konuda, Armaly ve diğ. [47], deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Şekil-5.5 de geometrisi verilen, $1/2$ lik genişleme oranına sahip kanalda, Reynolds sayısının 70 ile 8000 değerleri arasında, iki boyutlu laminer, geçiş ve türbülanslı akış alanlarını incelemişlerdir. Çalışmalarının deneysel kısmında yer alan hız ölçümlerini laser-Doppler anemometresi ile gerçekleştirmişlerdir. Laminer akışla ilgili sayısal çalışmalarında, giriş şartı olarak, deneylerden elde ettikleri parabolige yakın bir hız dağılımı kullanmışlardır. Kanal duvarlarında, hız bileşenlerinin sıfır olma şartını ve kanal çıkışında türev sınır şartı vermişlerdir. TEACH programından yararlanarak, sonlu farklar yöntemi ile sayısal çözümler elde etmişlerdir. Hesap alanını, 45×45

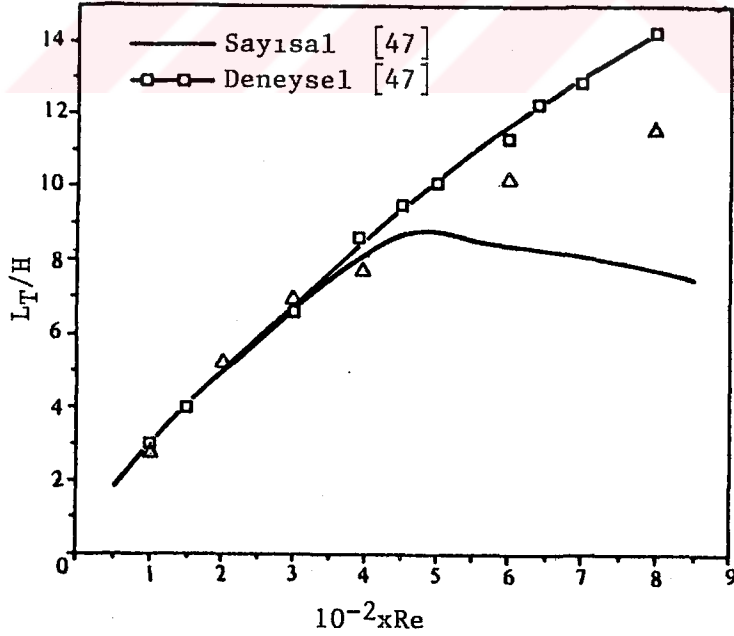


Şekil-5.5: Step akışı geometrisi

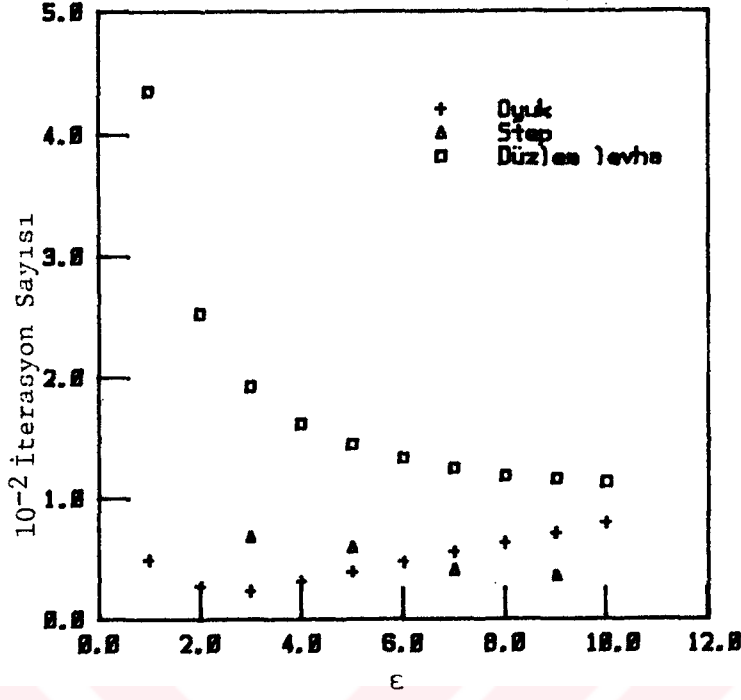
lik her iki doğrultuda daralan genişleyen ağılardan oluşturmuşlardır. Çözüm yakınsama kriteri olarak, normalize edilmiş artıkların 10^{-4} den küçük olması şartı kullanmışlardır.

Yukarıda bahsedilen çalışmadaki geometri ve sınır şartları kullanılarak; Reynolds sayısının 100,200,400 ve 800 değerleri için nümerik çözümler elde edilmiştir. Çözüm yakınsama kriteri olarak, mutlak artıkların 10^{-3} den küçük olması şartı alınmıştır. Akışın tutunma uzunluğunun Reynolds sayısına göre değişimi ile ilgili olarak, elde edilen sonuçların karşılaştırması Şekil-5.6 da verilmektedir. Grafikte L_T , tutunma uzunluğunu; H step yüksekliğini göstermektedir. Bulunan çözümlerin, Armaly ve diğ. [47] nin sayısal çözümlerinden daha iyi olduğu ve deneysel değerlerine oldukça yaklaştığı görülmektedir.

Çalışmada kullanılan SIMPLEC yönteminde, relaksasyon faktörü ϵ nun çözüm üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, değişik akış tiplerini kapsayan bir araştırma yapılmıştır.



Şekil-5.6: Step akışında tutunma uzunlukları



Şekil-5.7: İterasyon sayısının relaksasyon faktörü ϵ ile değişimi

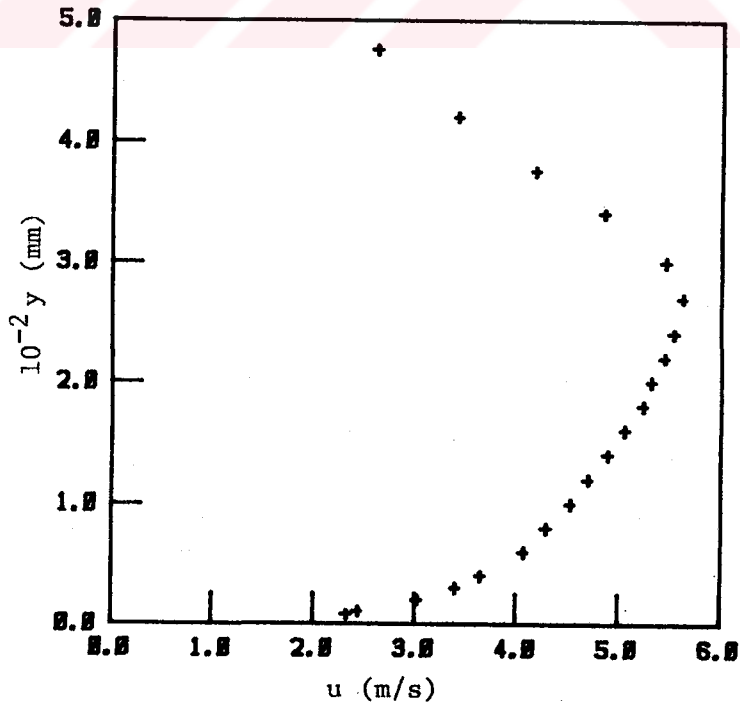
Bunun için oyuk, düzlem levha akış ve step akışı göz önüne alınmıştır. Şekil-5.7 de bu akış alanlarının hesaplanmasında, relaksasyon faktörü ϵ nun çözüm için gerekli iterasyon sayısı ile değişimi verilmiştir. Bu çalışmalarda da yakınsama kriteri 10^{-3} olarak alınmıştır. Oyuk akışında $\epsilon=3$ de minimum bir bilgisayar zamanı elde edilirken; düzlem levha ve step akışında, bunun $\epsilon=9$ civarında gerçekleştiği grafikten görülmektedir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR

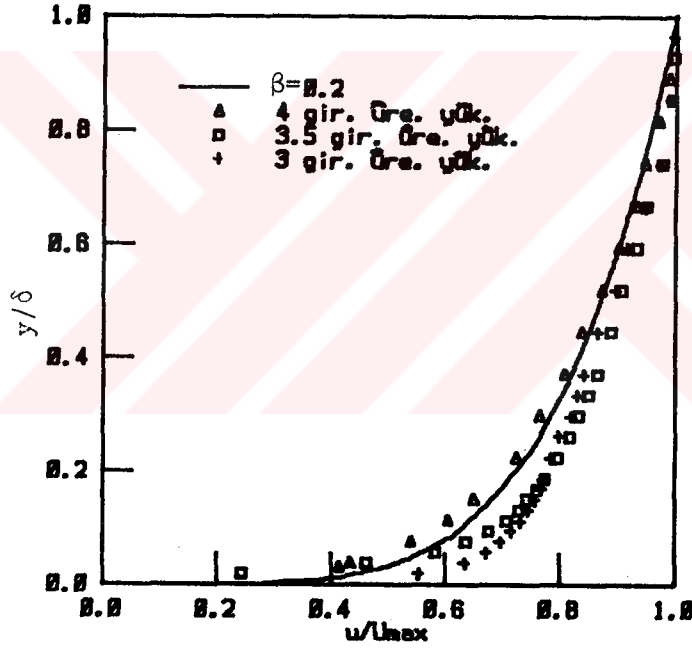
6.1. Duvar Hüzmesi Akışı

Çalışmada ilk grup deneyler, rüzgar tünelinin çalışma bölgesi çıkışına yerleştirilen düzlem bir levha ile oluşturulan, duvar hüzmesi tipi akışta yapılmıştır. Ölçümler sonucunda hüzmenin, 457x457 mm kesitindeki çalışma bölgesi çıkışından itibaren, 2700 mm lik bir uzaklıkta, hüzme eksenı boyunca yanıl olarak 600 mm açıldığı görülmüştür. Bu akış tipinde sınır tabaka kalınlığı olarak, şekil-6.1 de görülen, tipik hüzme hız profiline en büyük hızın meydana geldiği yükseklik alınmıştır.



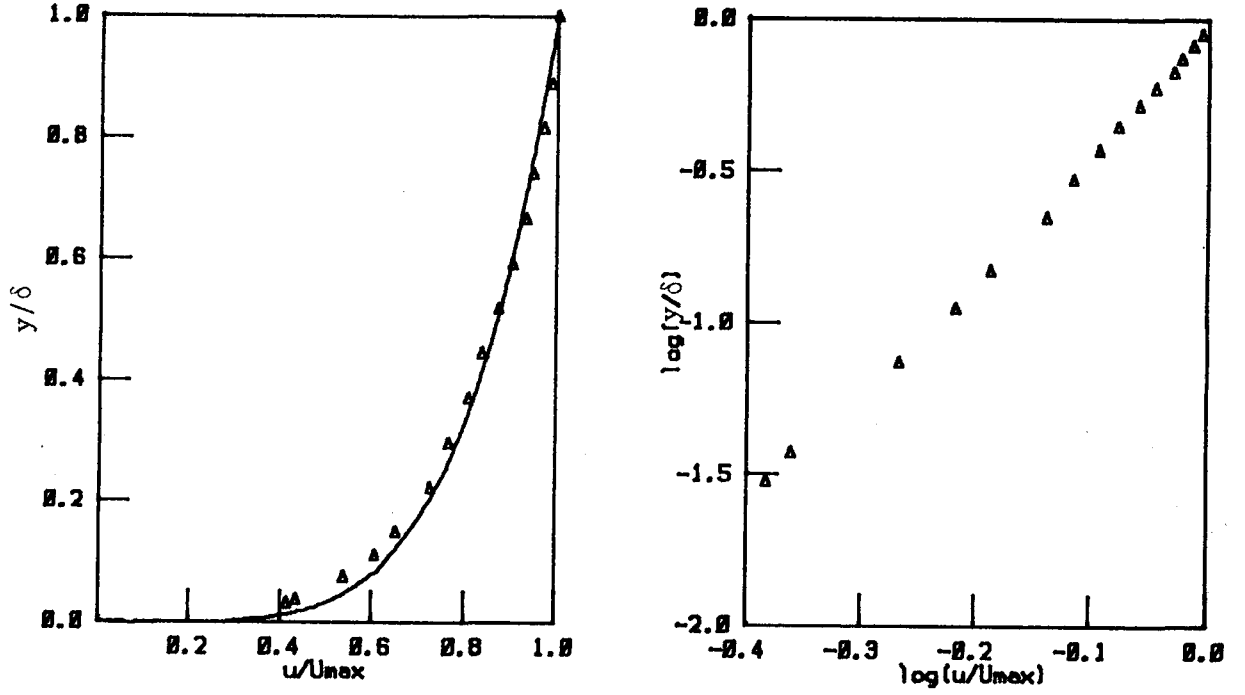
Şekil-6.1: Tipik duvar hüzmesi hız profili

Hüzme çıkışından itibaren $x=2700$ mm de doğal olarak gelişen sınır tabakada, maksimum hızın 7.8 m/s değerinde sınır tabaka kalınlığı 104 mm olarak ölçülmüştür. Sınır tabaka kalınlığının arttırılması amaçlandığından; Counihan'ın [7] yöntemi kullanılarak, benzeşim çalışması yapılmıştır. $\beta=0.2$ lik üs kanunu hız profiline uygun olarak, 400 mm yüksekliğinde bir sınır tabakanın geliştirilmesi düşünülmüş ve eliptik girdap üreticilerin yüksekliği 400 mm olarak alınmıştır. Girdap üreticilerden sonra, girdap üretici yüksekliğinin $3, 3.5, 4$ katı uzaklıklarda ölçülen ortalama hız profilleri Şekil-6.2 de verilmiştir. Girdap üretici yüksekliğinin 4 katı uzaklıkta ölçülen profilin, $\beta=0.2$ ye göre çizilen profil ile daha iyi uyum sağladığı görülmektedir.



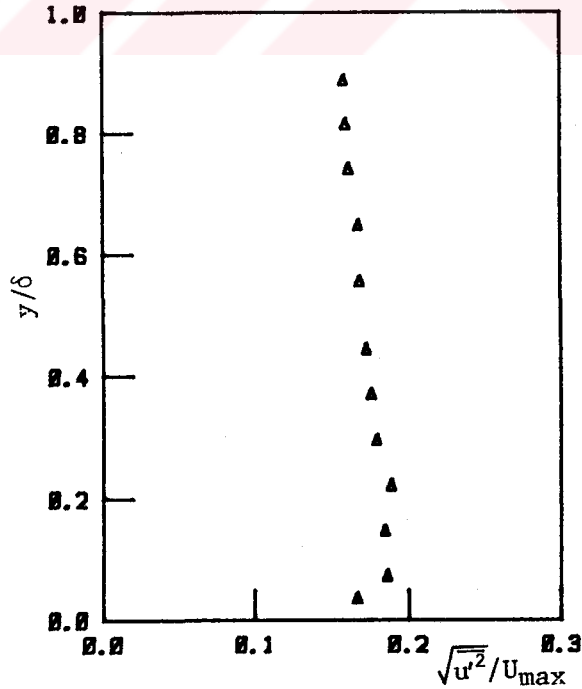
Şekil-6.2: Duvar hüzmesinde geliştirilen hız profilleri

Maksimum hızın gerçekleştiği noktanın yüksekliği olarak tanımlanan ve 400 mm olarak düşünülen sınır tabaka kalınlığı, 400 mm yüksekliğinde girdap üreticilerinin kullanılmasına karşın, bu değere erişilemeyip 270 mm olarak elde edilmiştir. Bu yükseklikte maksimum hız 5.6 m/s olarak gerçekleşmiştir. Engel etrafındaki ölçümlerde, giriş şartı olarak kullanılan ortalama hız profili Şekil-6.3 de verilmektedir.



Şekil-6.3: Duvar hüzmesi akışında referans ortalama hız profili

Hüzme çıkışından sonra $x=2700$ de referans sınır tabakada ortalama akış yönünde ölçülen türbülans hızı, Şekil-6.4 de görülmektedir. Hüzme akışının bir özelliği olarak, türbülans hızı sınır tabakanın tepesinde sıfıra doğru gitmeyip, belirli bir değer almaktadır.

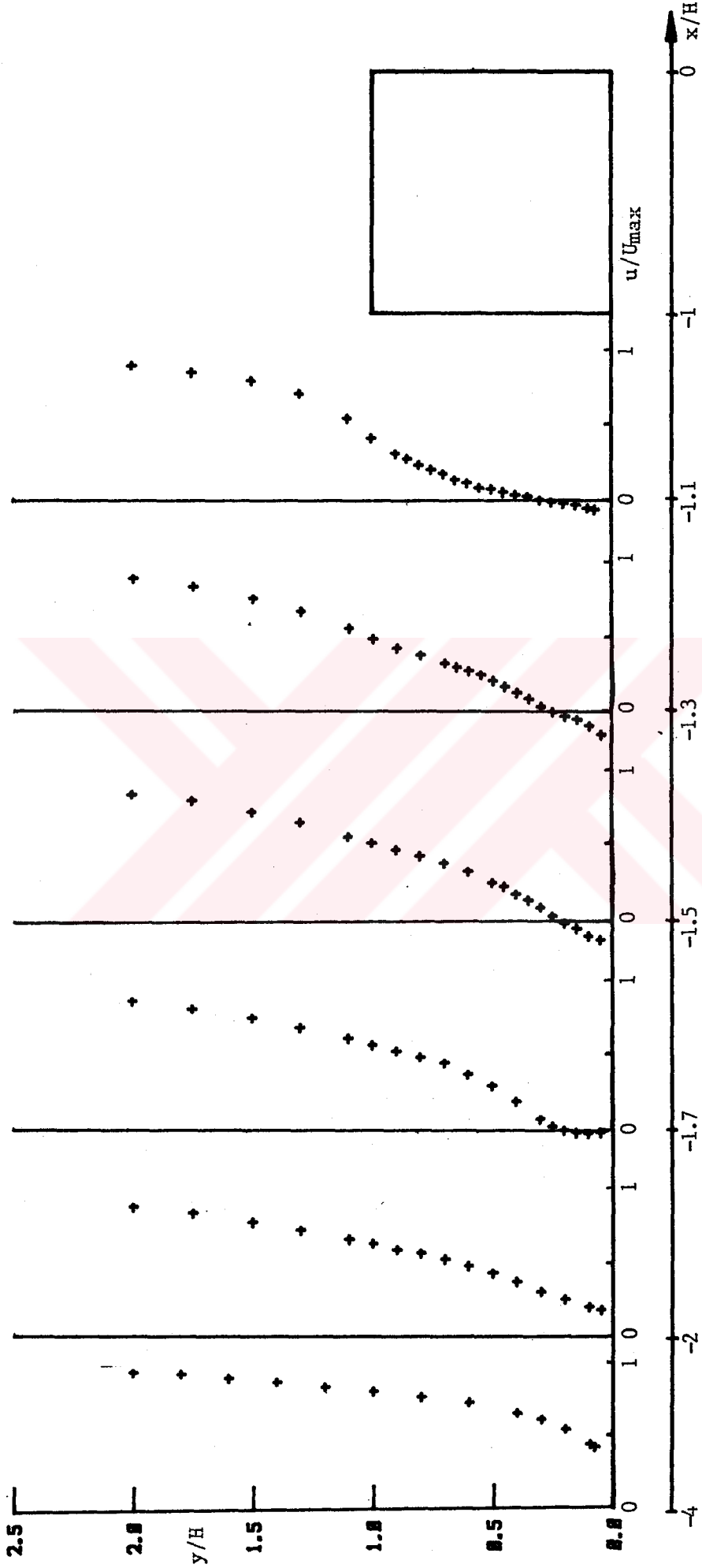


Şekil-6.4: Duvar hüzmesi akışında referans türbülans profili

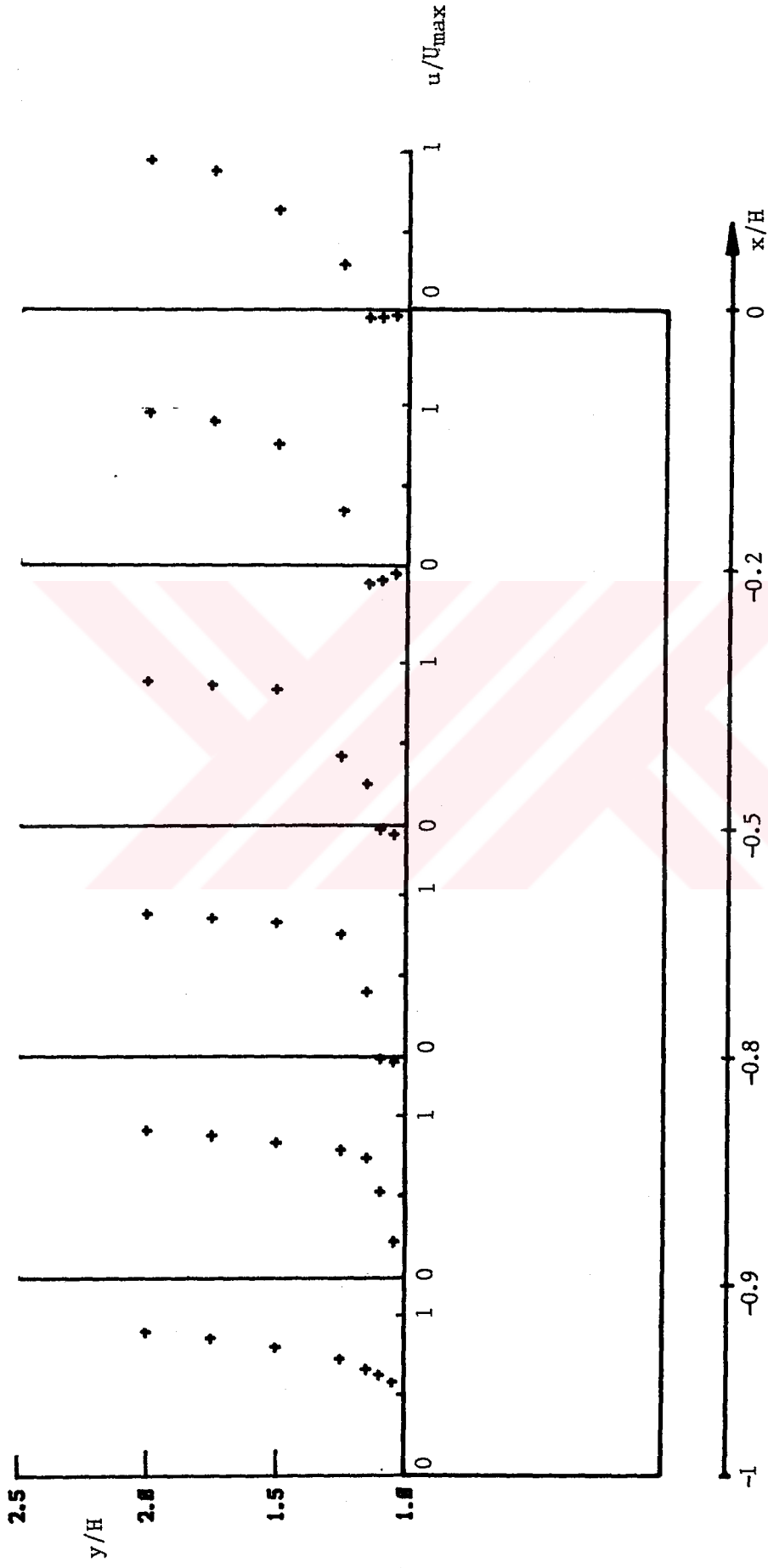
Duvar hüzmesi akışında geliştirilen sınır tabaka içine yerleştirilen, 100 mm lik kare kesitli, iki boyutlu engel etrafında akış boyunca ortalama hız ve türbülans ölçümleri yapılmıştır. Referans sınır tabakadaki maksimum hız ve engel yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı 3.73×10^4 olarak gerçekleşmiştir. Engel, giriş hız profilinin geliştirildiği noktadan itibaren, engel yüksekliğinin 3 katına eşit olacak şekilde 300 mm lik bir uzaklığa yerleştirilmiştir. Ölçümler hüzmeye ek-seni boyunca, yerden itibaren 200 mm lik bir yükseklik içinde; engelin önünde, üstünde ve arkasında olmak üzere çeşitli istasyonlarda gerçekleştirilmiştir. Ortalama hız için elde edilen sonuçlar, engelin önü, üstü ve arkası olmak üzere üç bölgeye ayrılmış ve Şekil-6.5a,b,c de verilmiştir.

Şekil-6.5a da, engelin önündeki akış alanı ile ilgili, değişik x uzaklıklarındaki ortalama hız profilleri görülmektedir. Engeline yaklaştıkça, engel seviyesindeki hız değerlerindeki azalma nedeniyle hız profili keskinleşmektedir. Engel yüksekliğinin yaklaşık 0.8 katı bir uzaklıkta akış ayrılmakta ve ters akışlar nedeniyle, engelin önünde bir girdap oluşmaktadır. Şekil-6.5b de, engelin üst kısmında ölçülen ortalama hız profilleri verilmiştir. İki boyutlu, kare kesitli engelin ön kenarından ayrılan akışın, engelin üst yüzeyine tutunmadığı görülmektedir. Ölçümler sonucunda, engelin üst kısmındaki ters akış bölgesinin, H engel yüksekliği olmak üzere, $0.2H$ lık bir yüksekliğe eriştiği bulunmuştur. Engelin arka kısmında ölçülen ortalama hız profilleri, Şekil-6.5c de verilmektedir. $x/H=2$ de yapılan ölçümde, hız değerlerinin engel yüksekliği seviyesine doğru hızla azalarak, $0.75H$ lık bir yükseklikten sonra negatif işaretli değerler aldığı görülmektedir. Akışın tutunması, engelden sonra yaklaşık $6.5H$ lık bir uzaklıkta gerçekleşmektedir. Tünel döşemesinden itibaren $2H$ yüksekliğinde ölçülen hızlar, özellikle engelden sonra gittikçe azalan değerler göstermektedir. Bu durum, hüzmeye akış boyunca genişlemesinden kaynaklanmaktadır.

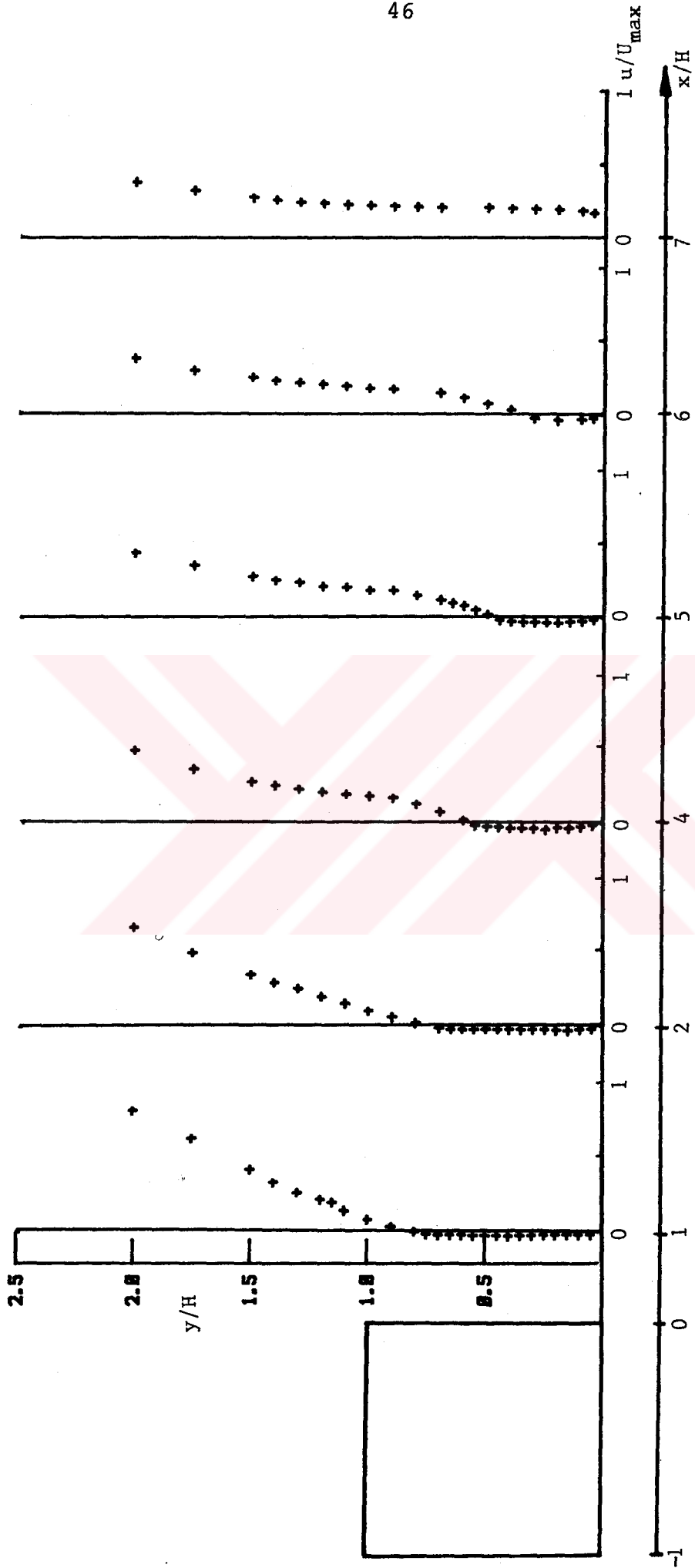
Şekil-6.6 da, duvar hüzmesi akışında iki boyutlu, kare kesitli engel etrafında ortalama akış yönünde ölçülen türbülans hızları verilmiştir. Profillerde görülen önemli özellik,



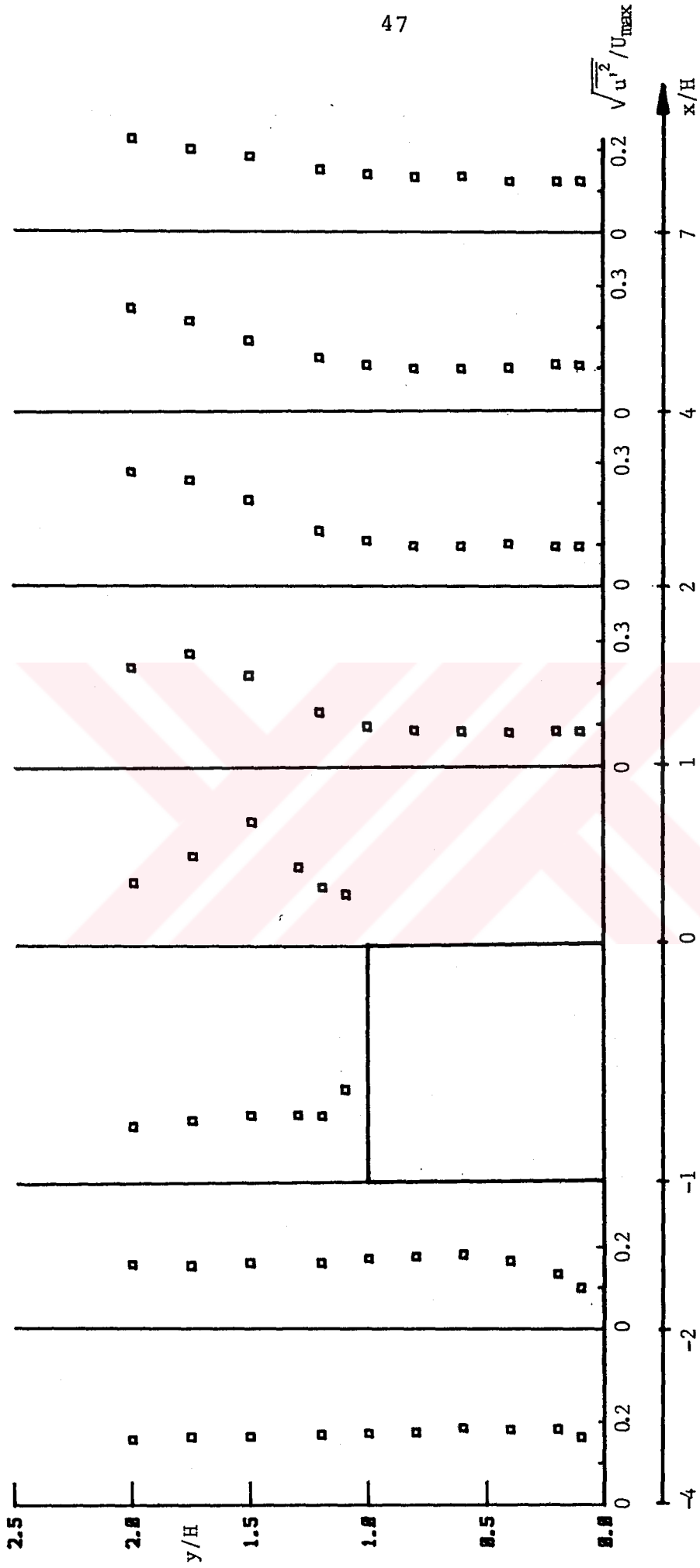
Şekil-6.5a: Duvar hüzmesi akışında engelin önünde deneysel ortalama hız profilleri



Şekil-6.5b: Duvar hüzmesi akışında engelin üstünde deneysel ortalama hız profilleri



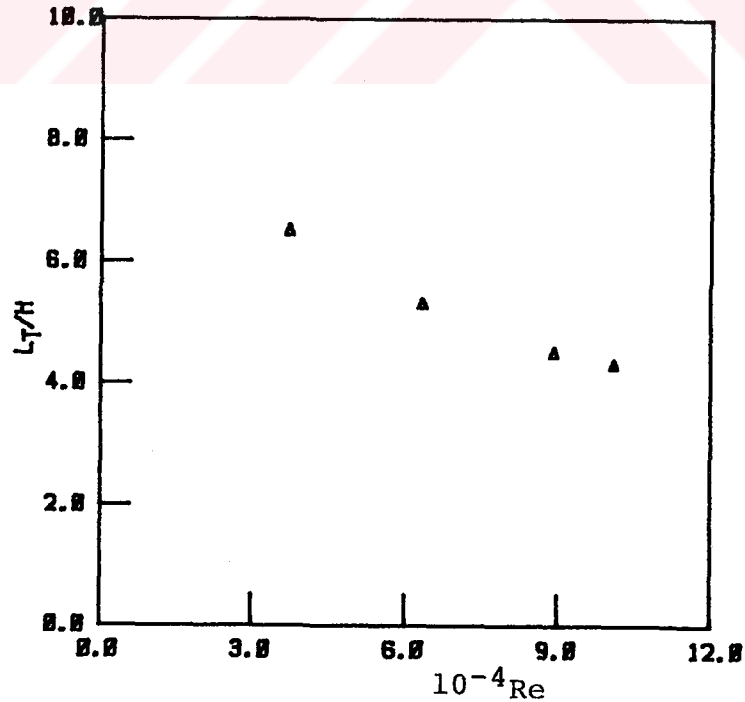
Şekil-6.5c: Duvar hüzmesi akışında engelin arkasında deneysel ortalama hız profilleri



Şekil-6.6: Duvar hüzmesi akışında engel etrafında deneysel türbülans hız profilleri

türbülans hızlarının sınır tabakanın üst bölgelerinde sıfıra doğru yaklaşmayıp, belirli bir değer almasıdır. Engelin önünde $3H$ lık uzaklıkta, referans sınır tabakada en yüksek türbülans şiddeti ($\sqrt{u'^2}/U_{\max}$), 0.186 olarak ölçülmüştür. Engele yaklaştıkça, türbülans şiddetinin arttığı görülmektedir. Engelin üst bölgesinin ön kenarında türbülans şiddeti, cidar yakınındaki bölgede artarken; arka kenarında yaklaşık $0.5H$ lık bir yükseklikte, 0.3 gibi maksimum bir değere ulaşmaktadır. Serbet akış ve ters akış bölgeleri arasında kalan ve karışım tabakası olarak adlandırılan bu bölgede, türbülans hızları maksimum değerlere ulaşmaktadır. Engelin arka tarafındaki ters akış bölgesinde, karışım tabakasının aksine, türbülans hızları düşük değerler almaktadır.

Duvar hüzmesi akışına yerleştirilen engel etrafında, ters akış bölgelerinin uzunluklarını belirlemek amacıyla, akış görüntüleme çalışması yapılmıştır. Püskül yöntemi kullanılarak, değişik şekil oranlarındaki engeller için, ayrılmış akışın tutunma uzunlukları ile ilgili değerler elde edilmiştir. Şekil-6.7 de, 100 mm lik kare kesitli, iki boyutlu engel için, tünel hızının değiştirilmesi ile oluşturulan çeşitli



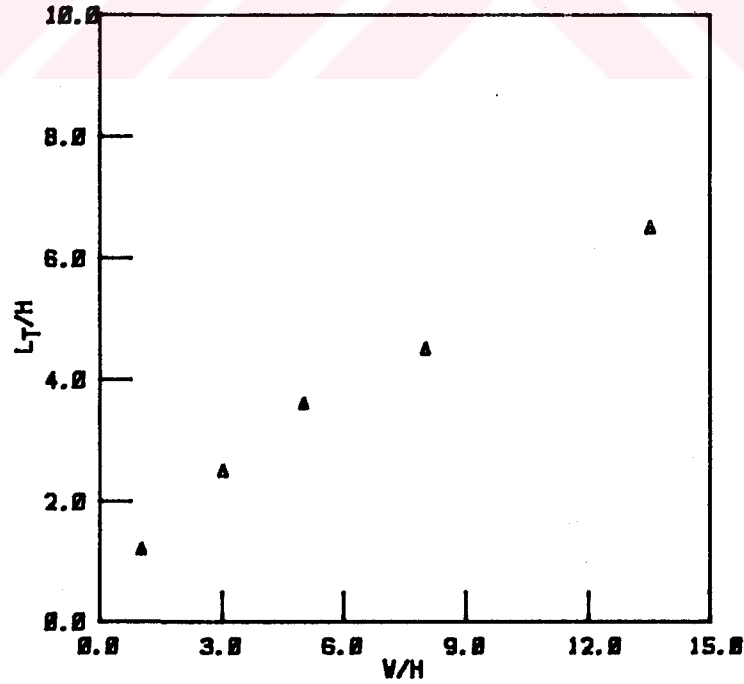
Şekil-6.7: Duvar hüzmesi akışında tutunma uzunluğunun Reynolds sayısı ile değişimi

Tablo-6.1: Duvar hüzmesi akışında değişik Reynolds sayılarında-
daki türbülans şiddeti değerleri

Reynolds sayısı	37300	63427	89174	101216
Türbülans şiddeti (%)	15	20	23	25

Reynolds sayılarında, engelin arkasındaki tutunma uzunluğunun değişimi verilmektedir. Tutunma uzunluğunun, artan Reynolds sayıları ile kısaldığı görülmektedir. Tablo-6.1 de, farklı Re sayılarında, referans sınır tabakada maksimum hızın gerçekleştiği yükseklikte ölçülen türbülans şiddeti değerleri verilmektedir. Artan Re sayıları ile tutunma uzunluğunun kısalması, ön akış türbülans şiddetinin artmasından ileri gelmektedir. W engel genişliği olmak üzere, engelin arkasındaki bölgede, tutunma uzunluğunun W/H ile değişimi Şekil-6.8 de verilmektedir. Engel uzunluğu $L=H$ olmak üzere, engel genişliği arttıkça, tutunma uzunluğunun arttığı görülmektedir.

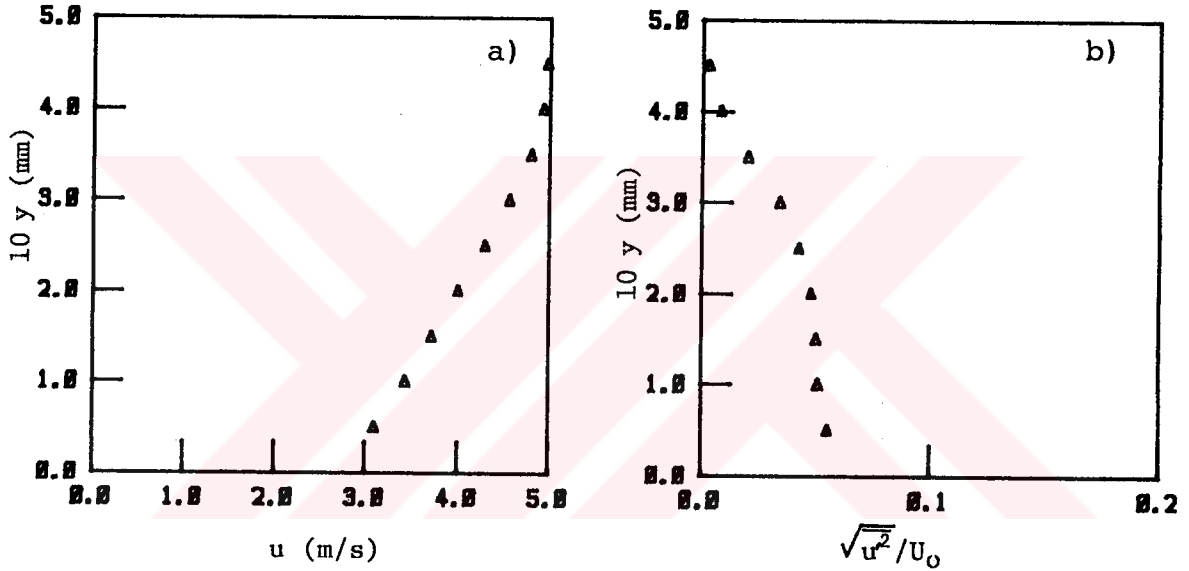
Akış görüntüleme çalışmasından, engelin önündeki ters akış bölgesinin uzunluğu, tüm W/H oranları için $0.8H$ olarak bulunmuştur.



Şekil-6.8: Duvar hüzmesi akışında tutunma uzunluğunun engel genişliği ile değişimi

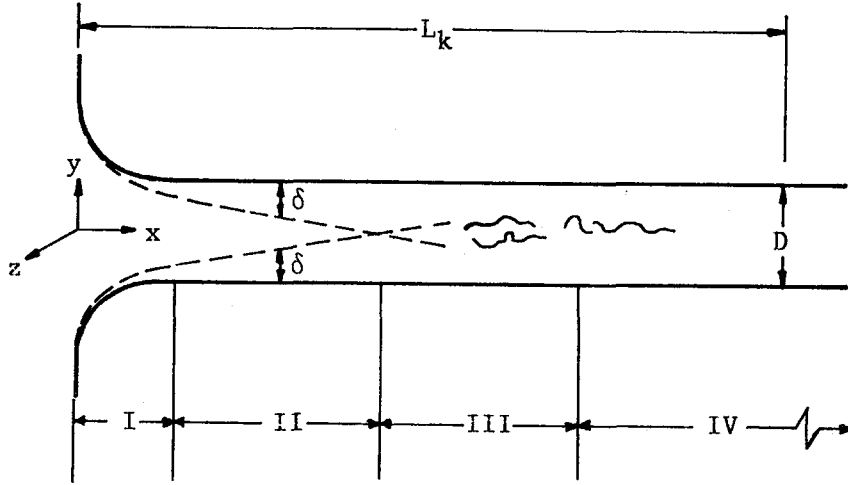
6.2. Tünel Akışı

Tünel içinde yapılan bu çalışmada, atmosferik sınır tabaka akışının simülasyonundan önce, doğal olarak gelişen sınır tabaka göz önüne alınmıştır. Tünel duvarları boyunca gelişen sınır tabakanın mertebesi belirlenerek, engel etrafındaki akışta meydana getireceği etkiler araştırılmıştır. Tünel çalışma bölgesi başlangıcından itibaren 1900 mm de, duvar sınır tabaka kalınlığı 45 mm olarak gerçekleşmiş olup, ortalama hız ve türbülans profilleri Şekil-6.9 da verilmiştir.



Şekil-6.9: Doğal olarak gelişen akış profilleri
a) Ortalama hız b) Türbülans

Çalışma bölgesi çapı ve serbest akış hızına bağlı Re sayısı 2.5×10^5 mertebesinde, Şekil-6.10 da görülen, bir kanal akışında dört bölgenin mevcut olduğu ifade edilmektedir. (I) bölgesinde, kanal çapı D den çok küçük bir uzaklıkta, duvar sınır tabakaları çok ince olmakta ve viskoz olmayan göbek bölgesindeki akışı etkilememektedir. (II) bölgesinde, ortalama akış hızı ve D ye bağlı Reynolds sayısı $10^4 - 10^6$ mertebesinde, $10D$ uzaklığı kapsayan bu bölgede de, viskoz olmayan bir göbek bölgesi mevcuttur. Yer değiştirme kalınlığı δ^* nın, yaklaşık olarak $D/10$ mertebesinde olduğu bu bölgeye, yer değiştirme etkileşim bölgesi denilmektedir. (III) bölgesinde,

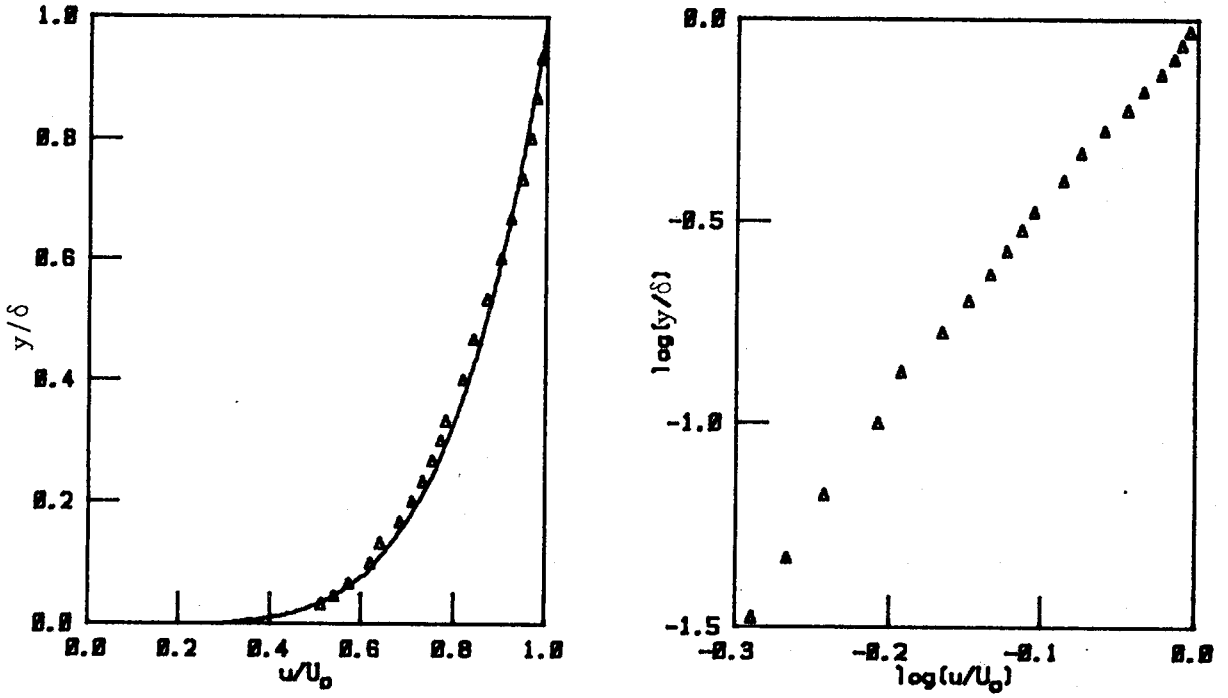


Şekil-6.10: Bir kanal akışında etkileşim bölgeleri

duvar sınır tabakaları birleşerek viskoz bir göbek bölgesi meydana getirmekte ve (IV) bölgesinde ise tam gelişmiş bir akış oluşmaktadır [53].

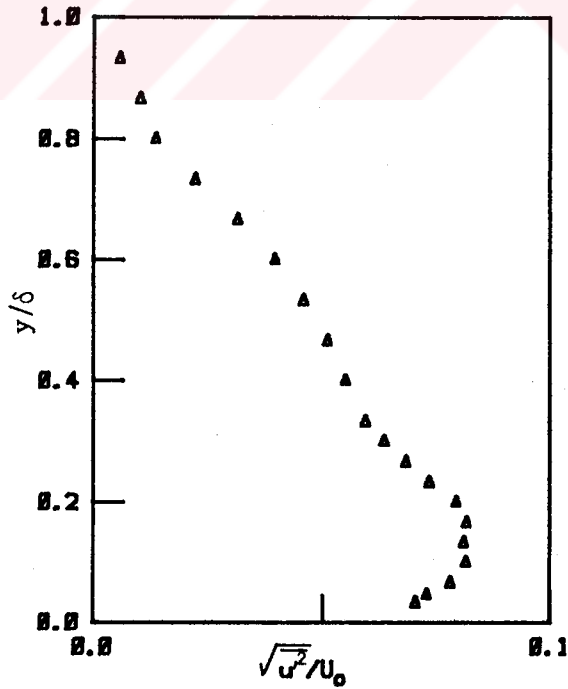
Çalışmanın yapıldığı rüzgar tüneline, (II) bölgesi, $10D=4.5$ m lik bir uzunluğu kapsamaktadır. 3150 mm uzunluğunda olan deney bölgesinde, 1900 mm deki duvar sınır tabaka kalınlığı 45 mm olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlardan, çalışmanın hem Reynolds sayısı açısından hem de kritik uzunluk açısından (II) bölgesi sınırları içinde yapıldığı ve duvar sınır tabakalarının etkileşimi dışında kalındığı ortaya çıkmaktadır.

Atmosferik sınır tabaka içinde engel etrafındaki akış alanını incelemek amacıyla, tünel içinde atmosferik bir sınır tabaka akışı geliştirilmiştir. Counihan'ın [7] yöntemine göre, girdap üreticilerden sonra girdap üreticilerin yüksekliğinin 5 katı bir uzaklıkta geliştirilen sınır tabaka akışında ortalama hız profili Şekil-6.11 de verilmektedir. Simülasyon çalışmasında, $\beta=0.2$ lik üs kanunu esas alınarak, 150 mm kalınlığında bir sınır tabaka elde edilmiştir. Serbest akış hızı 8.3 m/s olarak gerçekleşmiştir. Ortalama hız için elde edilen profil, $\beta=0.2$ için çizilen teorik eğri ile oldukça iyi bir uyum sağlamaktadır.

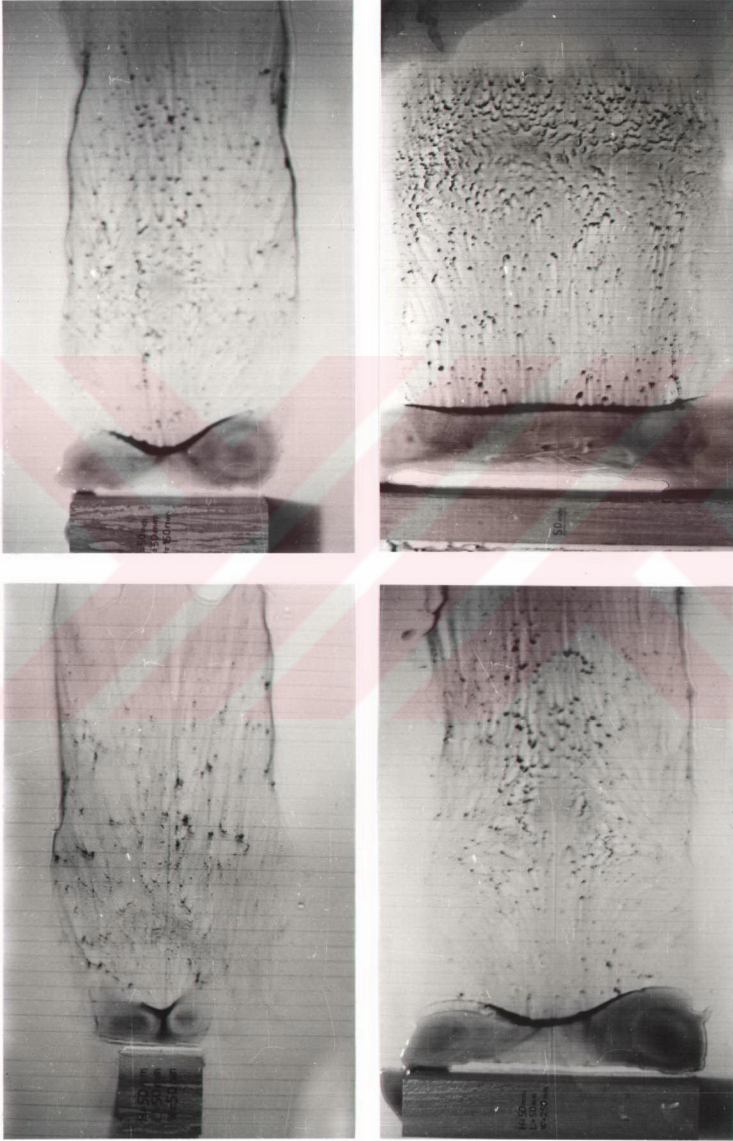


Şekil-6.11: Tünel akışında referans ortalama hız profili

Şekil-6.12 de, geliştirilen atmosferik sınır tabaka akışında, ortalama akış yönünde ölçülen türbülans şiddeti değerleri görülmektedir.

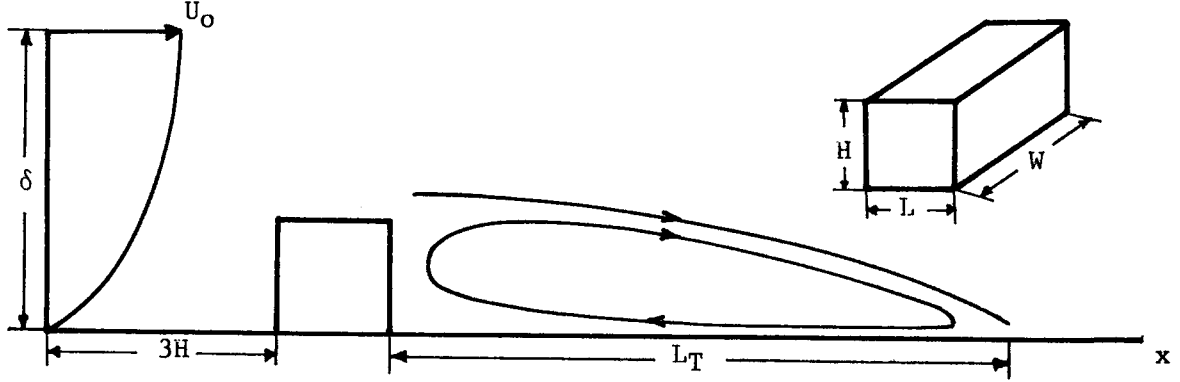


Şekil-6.12: Tünel akışında, referans türbülans hız profili



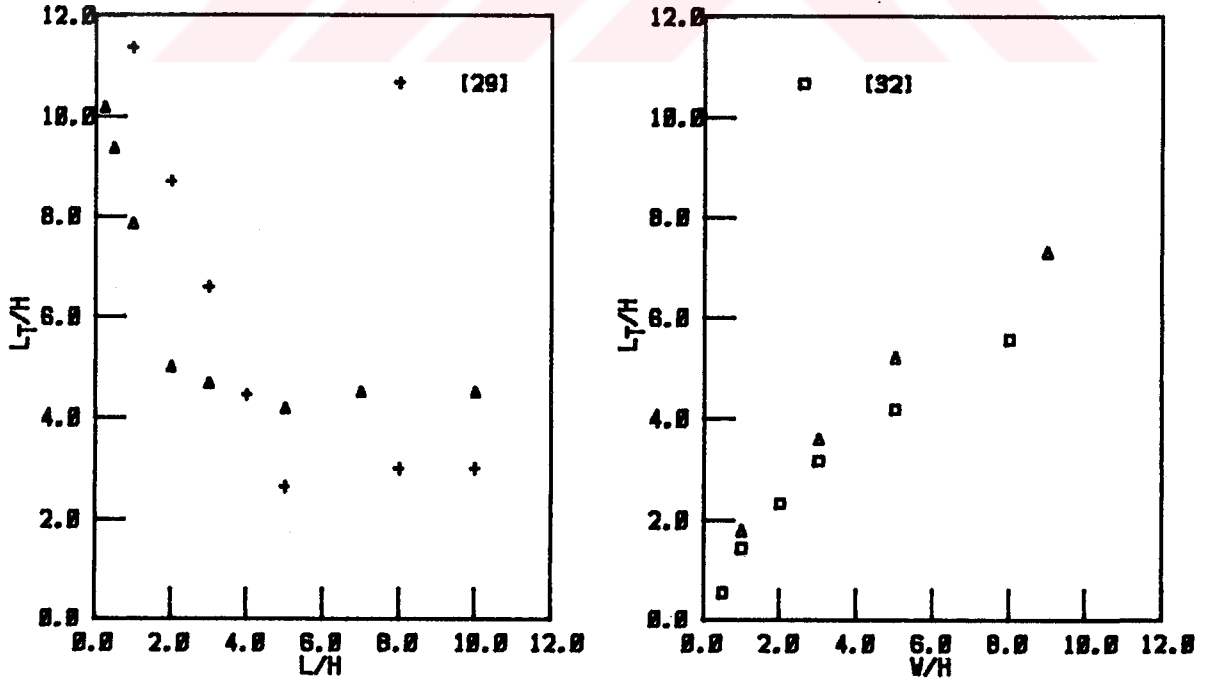
Resim-6.1: İki ve üç boyutlu engeller etrafındaki akış

Engel etrafındaki akışta, kızgın film ölçümlerinden önce, tutunma uzunluklarını belirlemek için yüzey akışı görüntüleme çalışmaları yapılmış ve fotoğraflar çekilmiştir. Resim-6.1 de, iki boyutlu ve şekil oranları değişen üç boyutlu engeller etrafındaki yüzey akışı ile ilgili fotoğraflar görülmektedir.



Şekil-6.13: Akış alanı geometrisi

Akış alanının geometrisi Şekil-6.13 de tanımlanmıştır. $H=30$ mm olmak üzere, tutunma uzunluğunun L/H ile değişimi Şekil-6.14 de verilmektedir. Bu çalışmada, engel yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı 1.62×10^4 ve $\delta/H=5$ dir. Tutunma uzunluğunun $L/H=2$ değerine kadar lineer olarak değiştiği ve $L/H=7$



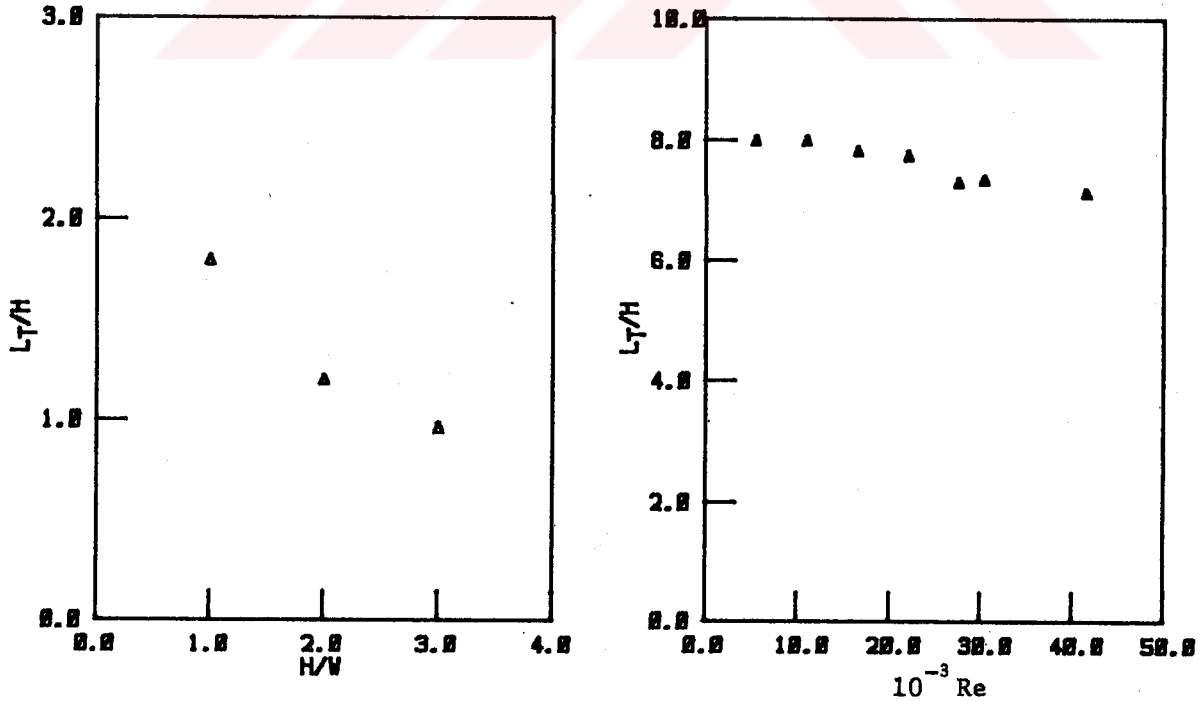
Şekil-6.14: Tutunma uzunluğunun engel uzunluğu ile değişimi

Şekil-6.15: Tutunma uzunluğunun engel genişliği ile değişimi

den sonra sabit kaldığı görülmektedir. Engelin ön kenarlarından ayrılan akış, $L/H > 4$ değerinden sonra, engelin üstünde tutunarak yeni bir sınır tabaka oluşturmaktadır. Bundan sonra, bir step arkasındaki akış karakterini göstermekte ve tutunma uzunluğu, engel uzunluğundan bağımsız olmaktadır. Bergeles ve Athanassiadis [29] tarafından yapılan benzer çalışma aynı grafikte verilmiştir. δ/H oranının 0.48 olduğu bu çalışmada bulunan genel karakteri ile iyi bir uyum sağlandığı görülmektedir.

Şekil-6.15 de, $\delta/H=3$ olmak üzere 50 mm yüksekliğindeki engel için, tutunma uzunluğu L_T nin W/H ile değişimi verilmektedir. Engel genişliği arttıkça, engelin arkasındaki ters akış bölgesinin uzunluğu artmaktadır. $\delta/H=6.6$ olmak üzere, Fackrell [32] tarafından yapılan akış görüntüleme çalışmasının sonuçları da aynı grafikte verilmiştir. Her iki çalışmanın sonuçlarında da aynı eğilimin olduğu görülmektedir.

$L=W=50$ mm olmak üzere, $\delta/H=1,2,3$ değerleri için, üç boyutlu engeller arkasındaki akışın tutunma uzunluğunun W/H ile değişimi, Şekil-6.16 da verilmiştir. Engelin genişliği ve uzunluğu sabit kalmak üzere, yüksekliğinin artması ile tutunma uzunluğunun kısaldığı görülmektedir.

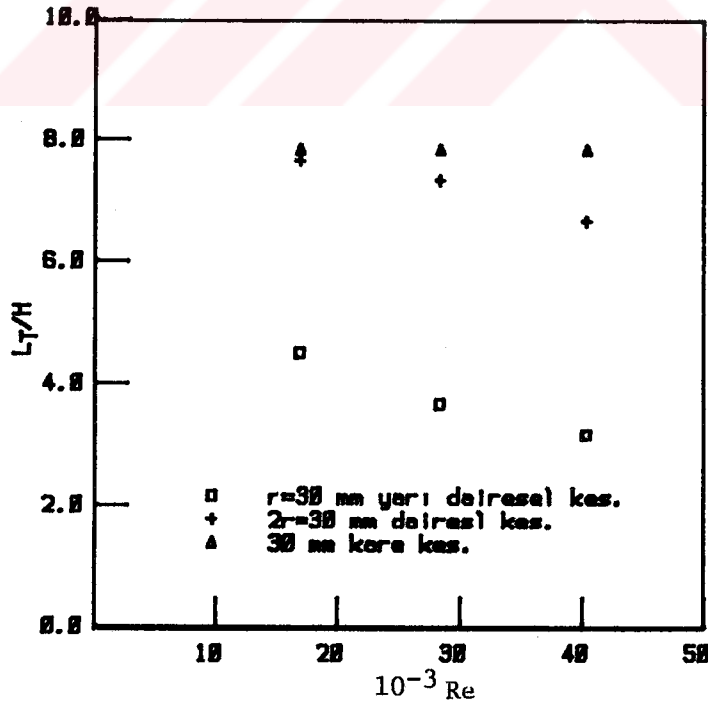


Şekil-6.16: Tutunma uzunluğunun engel yüksekliği ile değişimi

Şekil-6.17: Tutunma uzunluğunun Reynolds sayısı ile değişimi

Şekil-6.17 de, $H=10,20,30,40,50,55,75$ mm lik kare kesitli ve iki boyutlu engeller için; tutunma uzunluğunun, engel yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı ile değişimi verilmektedir. δ/H oranının azalmasıyla veya Reynolds sayısının artması ile, tutunma uzunluklarında oldukça küçük azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Engele yaklaşan akışın türbülans seviyesinin artması, engel arkasındaki ayrılmış akışın daha erken tutunmasına neden olmaktadır [27,28]. δ/H oranının artmasının, gelen akışın türbülans seviyesini arttıracak ve tutunma uzunluğunu kısaltacağı göz önüne alındığında; iki boyutlu, keskin kenarlı engellerde tutunma uzunluğunun Reynolds sayısından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır. İki boyutlu tek bir engel için serbest akış hızı değiştirilerek, yapılan bir çalışmada da aynı sonucun bulunduğu ifade edilmektedir [32].

Akış görüntüleme çalışmasında, keskin kenarlı olmayan engeller için de, tutunma uzunluğunun Reynolds sayısı ile ilişkisi araştırılmıştır. Engel boyutları sabit tutulmak suretiyle; Reynolds sayısı, serbest akış hızına bağlı olarak değiştirilmiştir. r , yarıçapı göstermek üzere; $2r=30$ mm lik daire kesitli, $r=30$ mm lik yarı dairesel kesitli ve $H=30$ mm lik



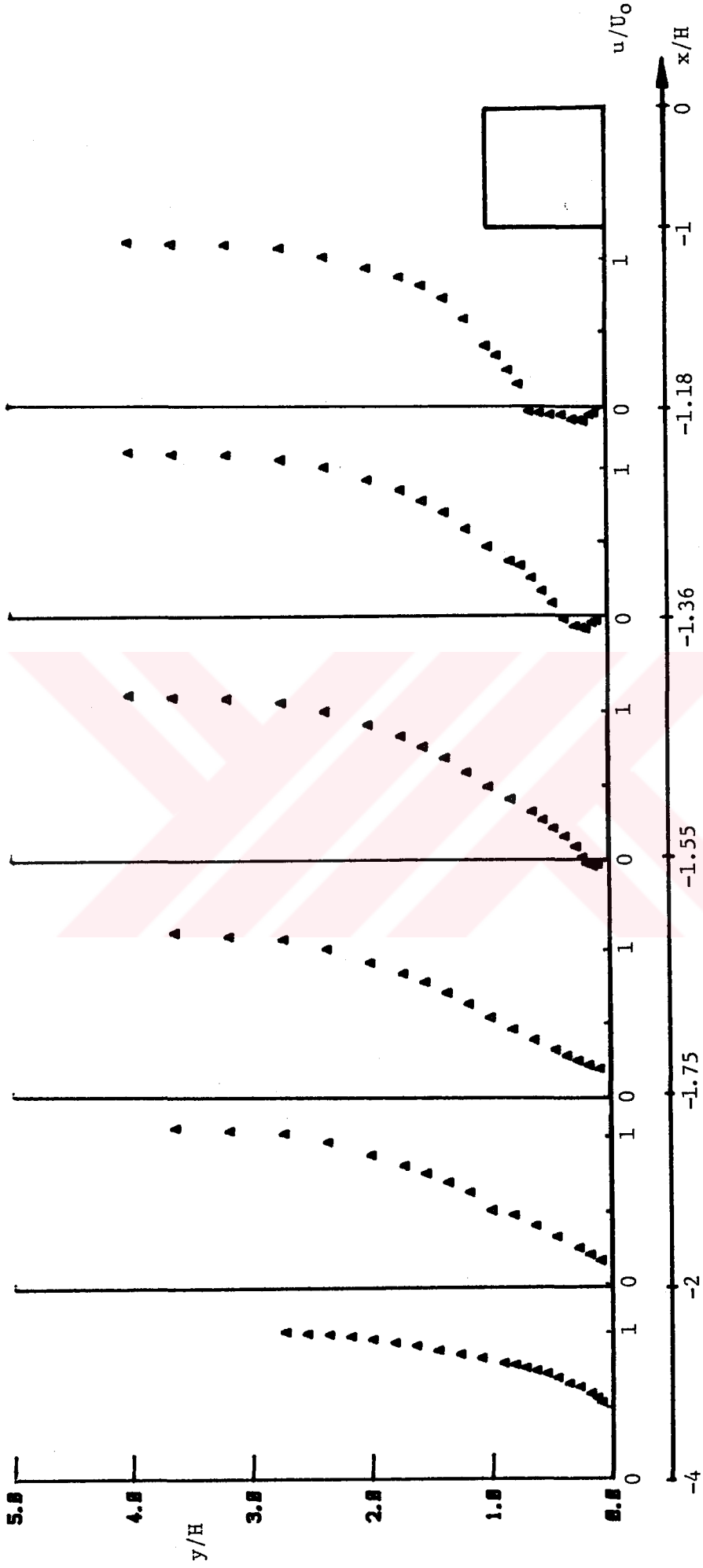
Şekil-6.18: Kare, dairesel ve yarı dairesel kesitli engellerde tutunma uzunluğunun Reynolds sayısı ile değişimi

kare kesitli engeller kullanılmıştır. Tutunma uzunluklarının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil-6.18 de verilmiştir. Keskin kenarlı engelde, tutunma uzunluğu Reynolds sayısından bağımsız iken; keskin kenarlı olmayan engellerde, Reynolds sayısına bağımlı olduğu ve Reynolds sayısının artması ile kısaldığı görülmektedir. Aynı Reynolds sayılarında, yarı dairesel kesitli engel için akışın tutunması, kare ve dairesel kesitli engellere göre daha küçük değerlerde gerçekleşmektedir.

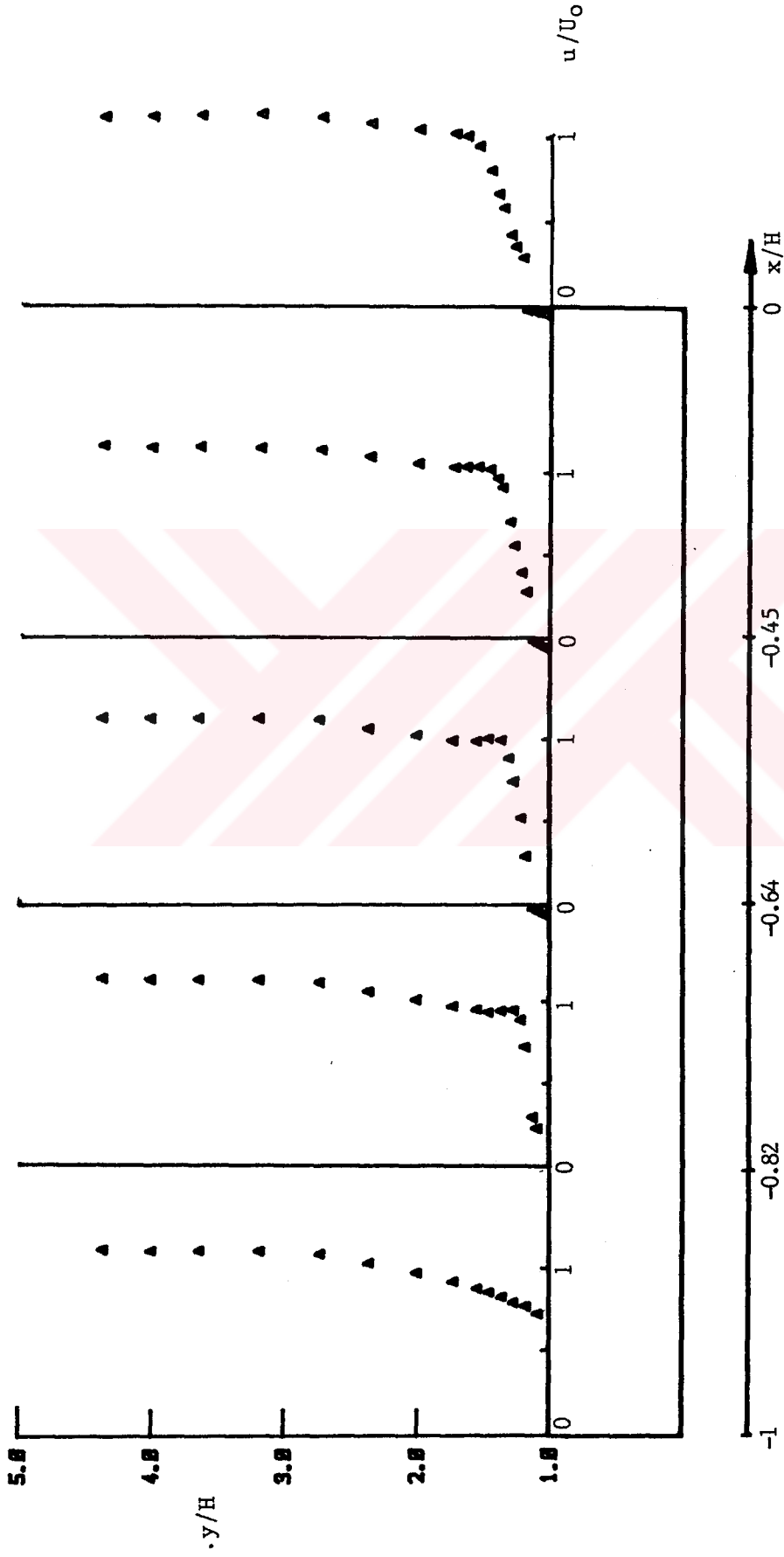
Şekil-6.19a,b ve c de, $\delta/H=2.73$ olmak üzere, $H=55$ mm lik kare kesitli, iki boyutlu engel etrafındaki akışta; kızgın film ölçümleri sonucunda elde edilen ortalama hız profilleri verilmektedir. Şekil-6.19a da, engelin önündeki akış bölgesi görülmektedir. Engele yaklaştıkça, hız profilinin engel yüksekliği seviyesine kadar olan kısmında, hız kaybı artmaktadır. Sınır tabakanın, engelin önünde yaklaşık $0.55H$ lık bir uzaklıkta ayrılması ile bir ters akış bölgesi meydana gelmektedir. Engelin akış içinde yalnızca ters akış bölgesi meydana getirmediği, sınır tabaka kalınlığını arttırdığı da şekilden görülmektedir.

Engelin üst bölgesinde ölçülen ortalama hız profilleri, Şekil-6.19b de verilmektedir. Sınır tabakanın daha da kalınlaştığı bu bölgede, engelin ön kenarında engel yüksekliği seviyesindeki hız değerlerinde artma meydana gelmektedir. Hız profillerinden, engelin ön kenarlarından ayrılan akışın, engelin üst yüzeyinde tutunmadığı anlaşılmaktadır. Yapılan bir çalışmada, engelin ön kenarından ayrılan sınır tabakanın, engelin üstünde tutunması için, kritik uzunluğun $L/H=1.5$ olması gerektiği belirtilmektedir [32]. Bu şekil oranında da, tutunmanın sürekli olmadığı ifade edilmektedir. Akış görüntüleme çalışmalarında, iki boyutlu modellerle elde edilen sonuçlara göre (Şekil-6.14), akışın engelin üstünde tutunabilmesi için, $L/H>4$ olması gerektiği bulunmuştur.

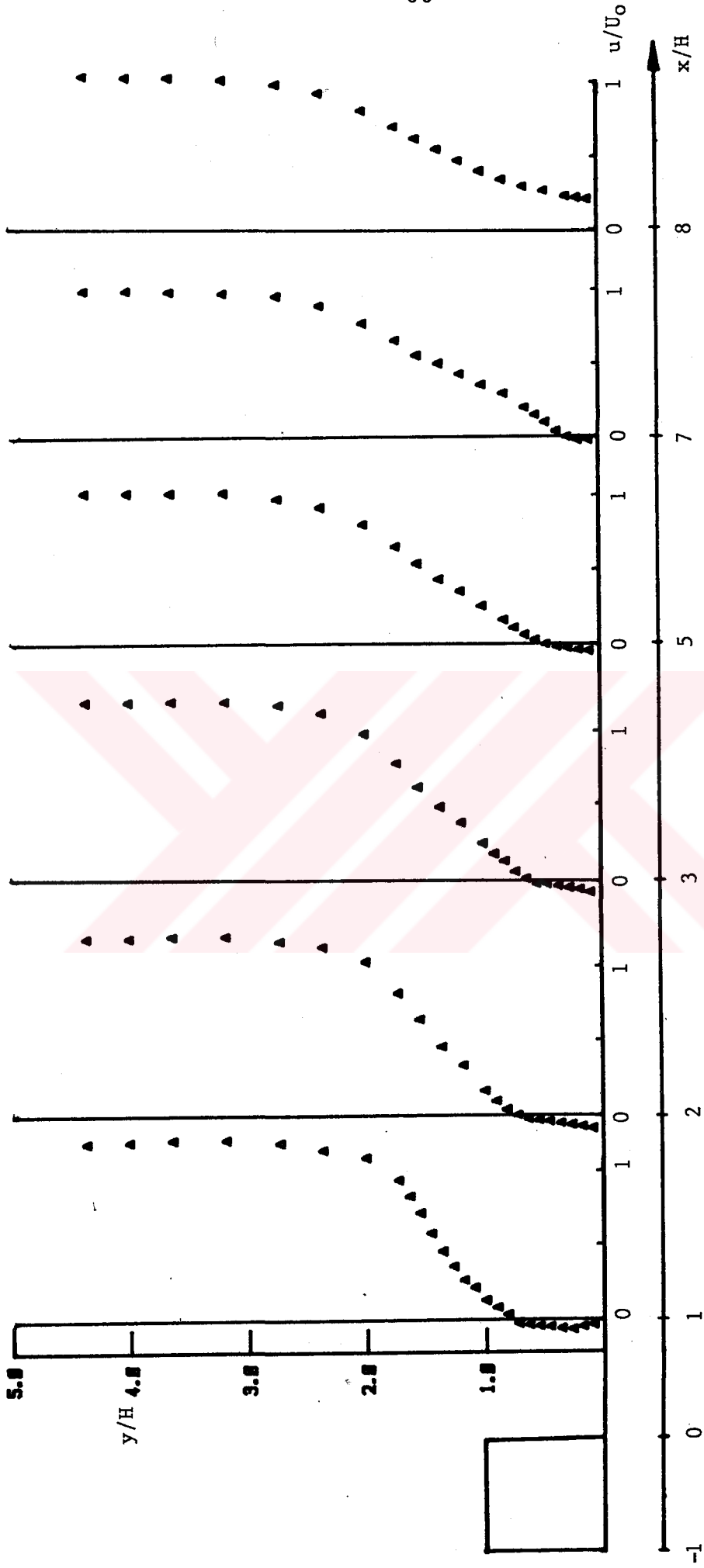
Şekil-6.19c de, engelin arkasında, ana akış yönünde ölçülen ortalama hız profilleri verilmektedir. Kızgın film ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, yüzey akışı görüntüleme deneylerinden elde edilen verilerle genel olarak uyumaktadır.



Şekil-6.19a: Tünel akışında engelin önünde deneysel ortalama hız profilleri



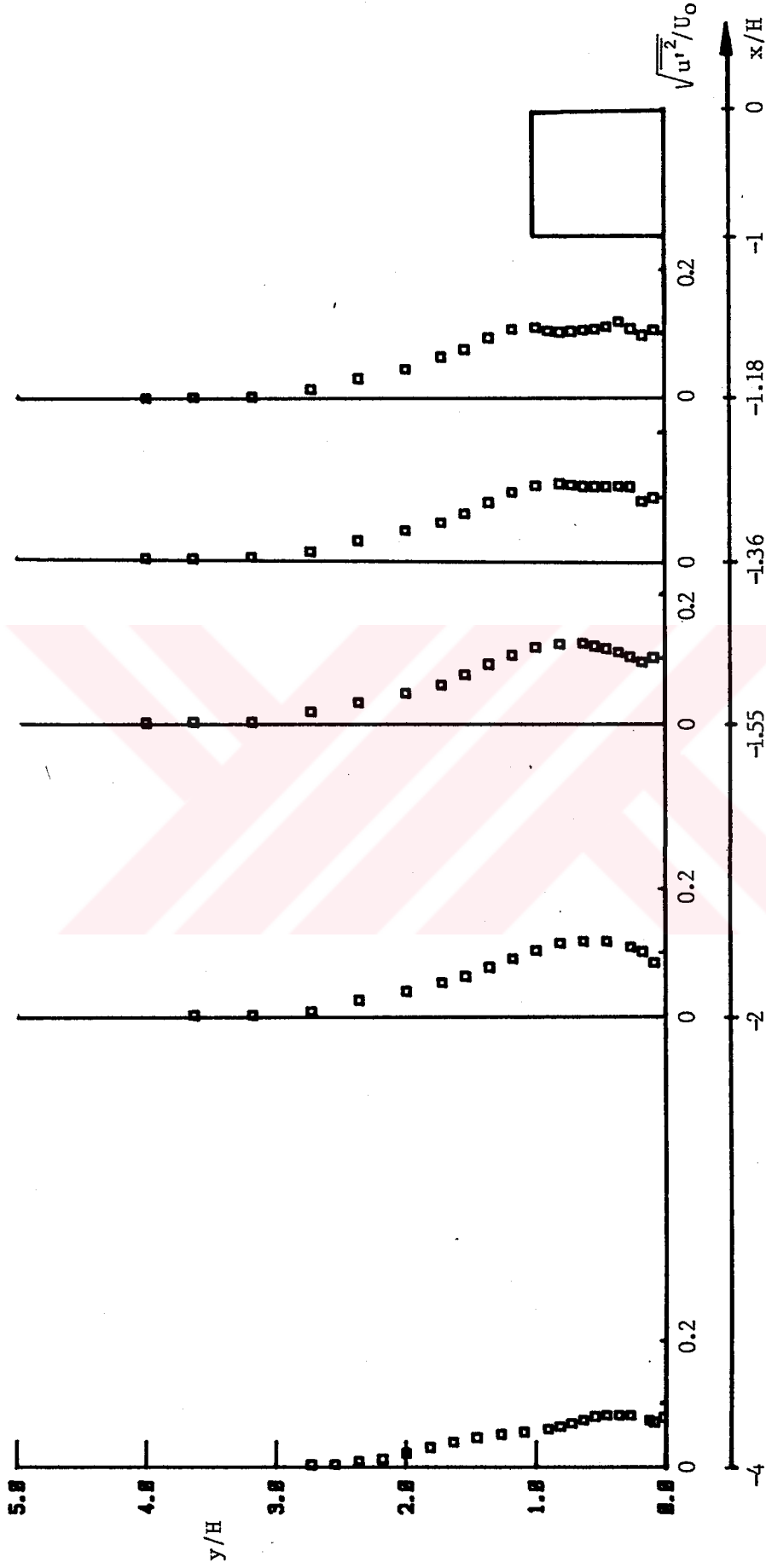
Şekil-6.19b: Tünel akışında engelin üstünde deneysel ortalama hız profilleri



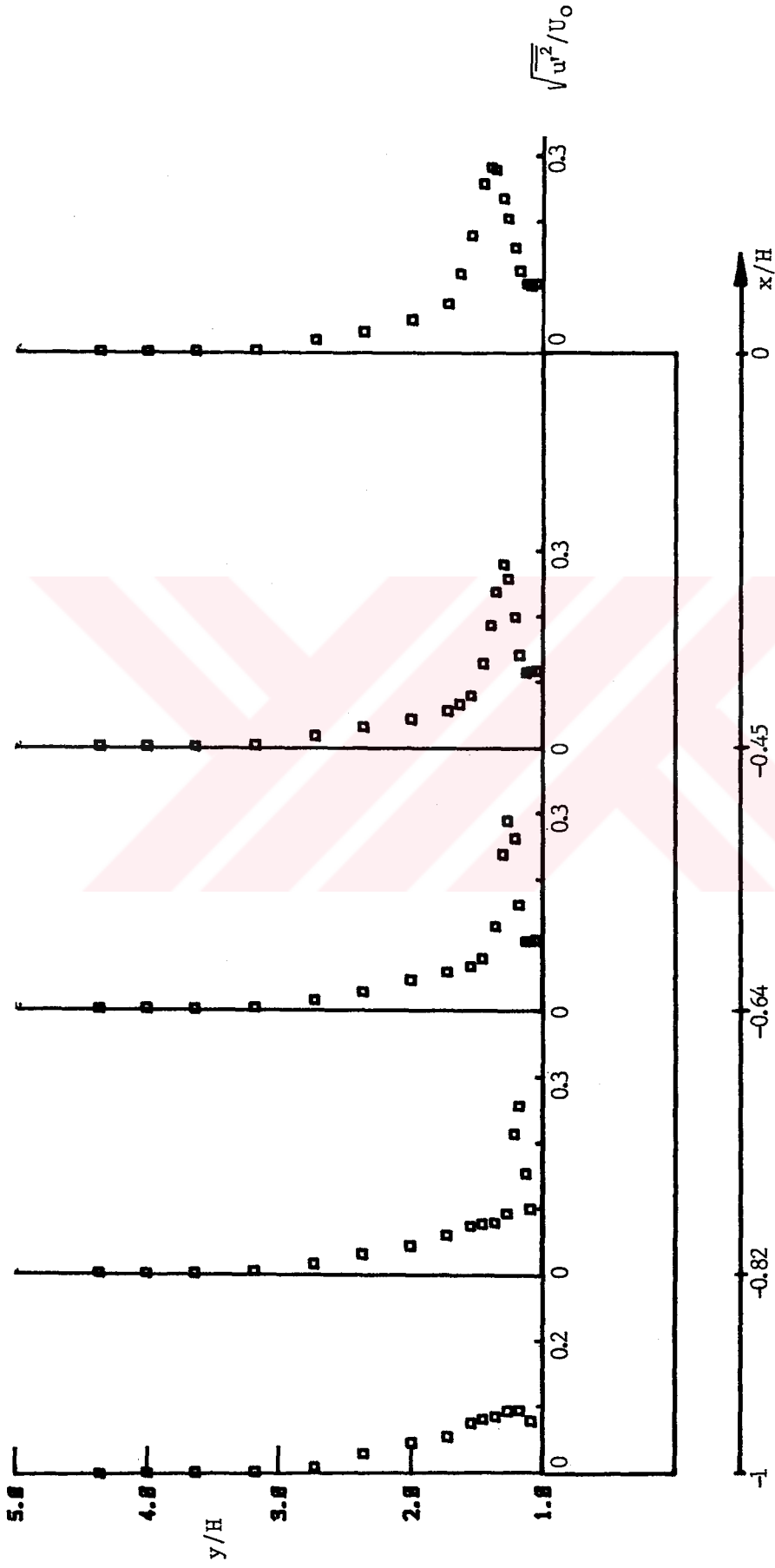
Şekil-6.19c: Tünel akışında engelin arkasında deneysel ortalama hız profilleri

Engelin arkasındaki ters akış bölgesinde ortalama hız profilleri, referans sınır tabaka profilinden oldukça farklı formdadırlar. Ortalama hız profillerinin negatif işaretli kısmı, engelden itibaren ters akış bölgesi boyunca gittikçe küçülmektedir. Akışın tutunması $7.3H$ civarında gerçekleşmektedir. Akış görüntüleme çalışmalarından; tutunmanın bir noktada olmayıp, bir bölgede meydana geldiği gözlenmiştir. Sürekli olmayan bu tutunma bölgesinin uzunluğunun yaklaşık olarak $1H$ olduğu bulunmuştur. İki boyutlu bir levha için, yapılan bir çalışmada, sürekli olmayan bu tutunma bölgesi uzunluğunun $2H$ civarında bulunduğu belirtilmektedir [46].

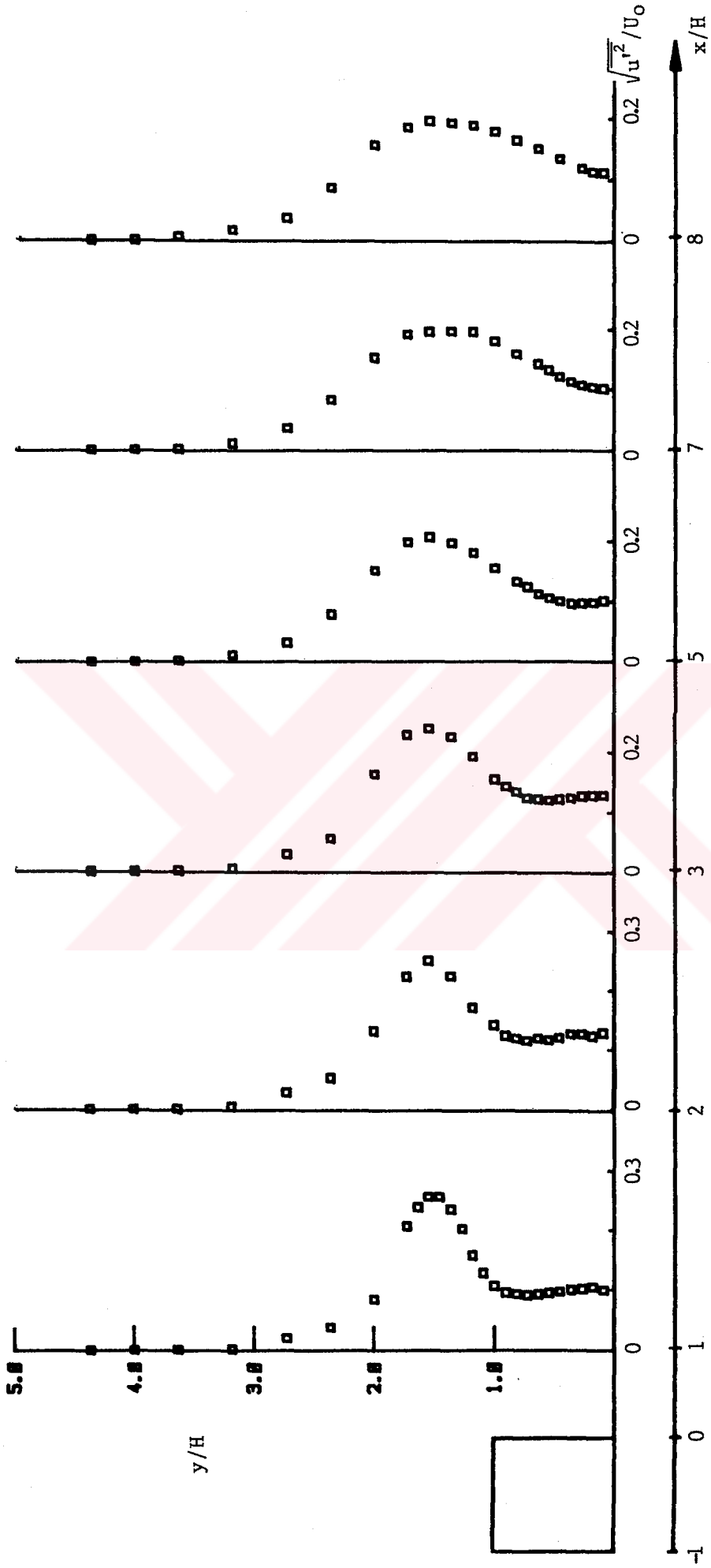
Şekil-6.20a,b ve c de, engel etrafında ortalama akış yönünde ölçülen türbülans hız profilleri verilmektedir. Engelin ön tarafındaki istasyonlarda ölçülen türbülans hızlarının, referans sınır tabaka ile aynı formda olduğu Şekil-6.20a dan görülmektedir. Referans sınır tabakada türbülans hızları civar yakınında en büyük değere ulaşırken; engele yaklaştıkça maksimum değerler, engel yüksekliği seviyesinde meydana gelmektedir. Şekil-6.20b de, engelin üstünde ölçülen türbülans hız profilleri görülmektedir. Tüm akış alanı boyunca en büyük türbülans hızı, engelin arka kenarı yakınında ölçülmüştür. Serbest akış hızına göre, referans sınır tabakada türbülans hızının maksimum değeri 0.082 iken; bu bölgede 0.3 gibi büyük bir değere ulaşmaktadır. Engelin arkasında türbülans hız profillerinin, referans sınır tabaka profilinden oldukça farklı formda olduğu Şekil-6.20c den görülmektedir. Bu sonuca göre, akış boyunca uzaklıklarda engelin etkisi, ortalama hızdan çok türbülans üzerinde hissedilmektedir. Engelin arkasında türbülans hızlarının maksimum değerleri, serbest akış ve ters akış bölgeleri arasında kalan karışım bölgesinde meydana gelmektedir. Ters akış bölgesi içinde ise daha küçük değerler almaktadır.



Şekil-6.20a: Tünel akışında engelin önünde deneysel türbülans hız profilleri



Şekil-6.20b: Tünel akışında engelin üstünde deneysel türbülans hız profilleri

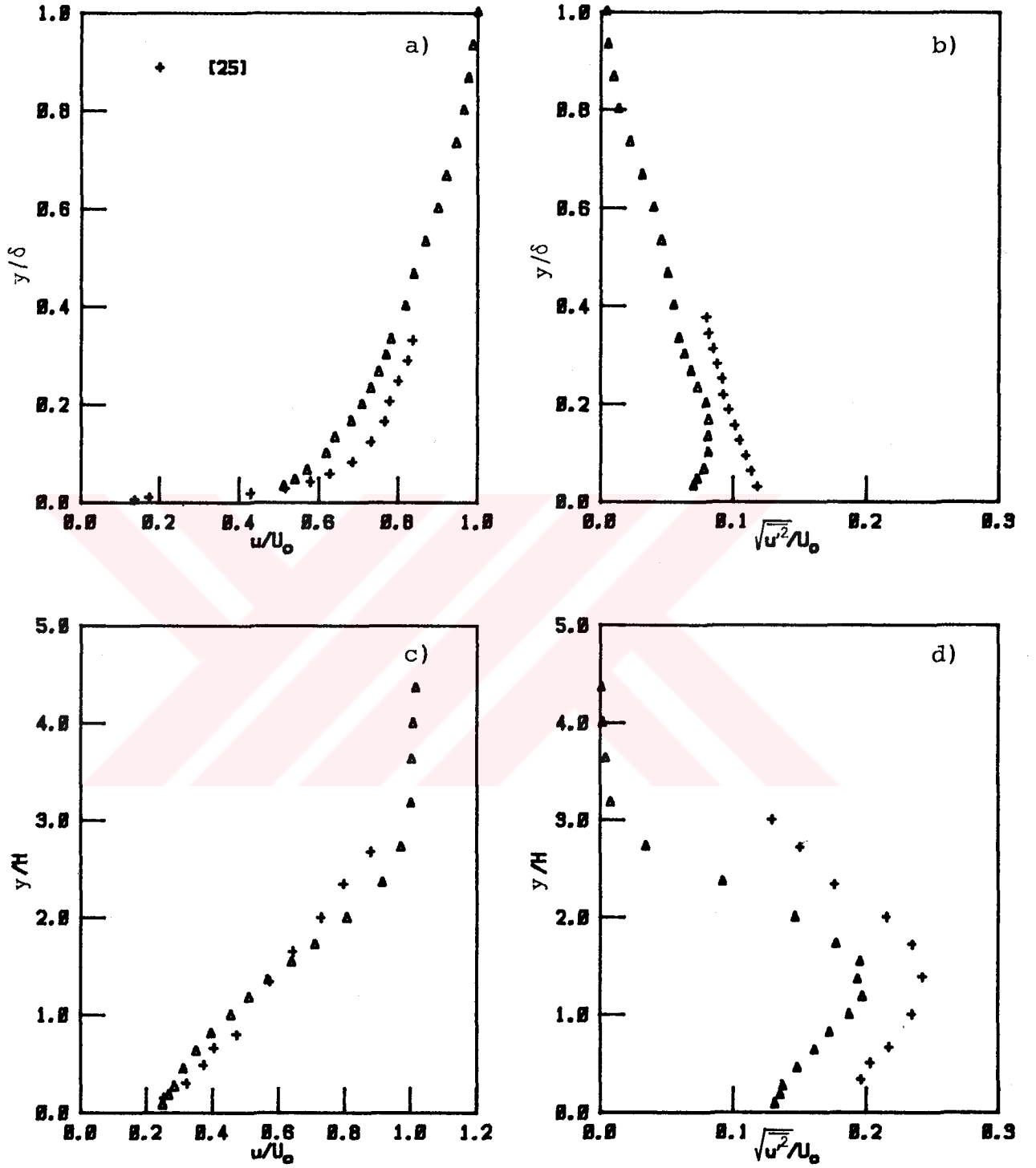


Şekil-6.20c: Tünel akışında engelin arkasında deneysel türbülans hız profilleri

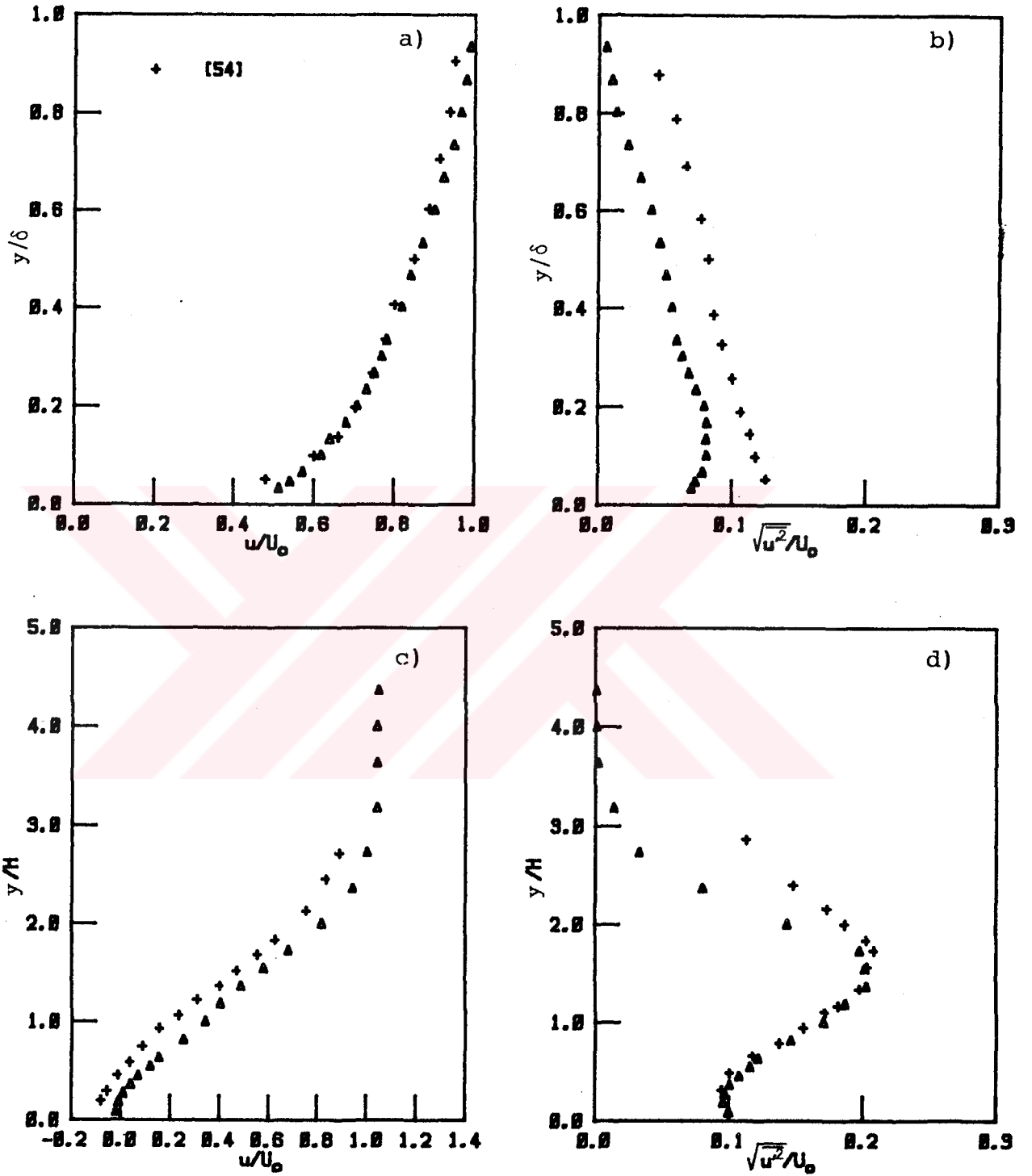
Counihan ve diğ. [25], 152 mm kalınlığında atmosferik bir sınır tabaka geliştirerek; $\delta/H=8$ olacak şekilde, 19 mm yüksekliğinde kare kesitli, iki boyutlu engel etrafındaki akışta deneyler yapmışlardır. Akış tutunmasının engelden sonra, engel yüksekliğinin 6 katı bir uzaklıkta meydana geldiğini belirtmişler ve ters akış bölgesi dışında ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, sunulan çalışma ile karşılaştırmalı olarak Şekil-6.21 de verilmektedir. Şekil-6.21a,b de referans ortalama hız ve türbülans profilleri; Şekil-6.21c,d de ise $x/H=8.84$ deki ortalama hız ve türbülans profilleri yer almaktadır. $x/H=8.84$ deki ortalama hız profilleri oldukça uyumlu iken; türbülans profilleri, aynı eğilimi taşımasına karşın, farklılık göstermektedir. Bu durum, her iki çalışmanın giriş şartlarının ortalama hız ve türbülans profilleri açısından farklılığından, akış alanı geometrilerinin aynı olmamasından ve türbülansın kontrol edilemeyen bir parametre olmasından kaynaklanmaktadır.

Castro ve Cheun [54], 300 mm kalınlığında atmosferik sınır tabaka akışı geliştirerek, $\delta/H=5$ oranında iki boyutlu, dikdörtgen kesitli bir engelin iz bölgesinde ölçümler yapmışlardır. Şekil-6.22a,b de, referans sınır tabaka hız ve türbülans profilleri; Şekil-6.22c,d de iz bölgesinde $x=6H$ da ölçülen ortalama hız ve türbülans profilleri, sunulan çalışma ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Atmosferik sınır tabaka akışının aynı yöntemle geliştirildiği her iki çalışmada, referans sınır tabaka ortalama hız profillerinin $\beta=0.2$ üs kanununu sağladığı; ancak referans sınır tabaka türbülans profillerinde %4 civarında bir farklılık olduğu görülmektedir. Buna karşın, iz bölgesindeki ölçümlerde, aynı eğilimi taşıyan ortalama hız profillerinin birbirine yakın olduğu ve türbülans profillerinin ise, büyük ölçüde çakıştığı anlaşılmaktadır.

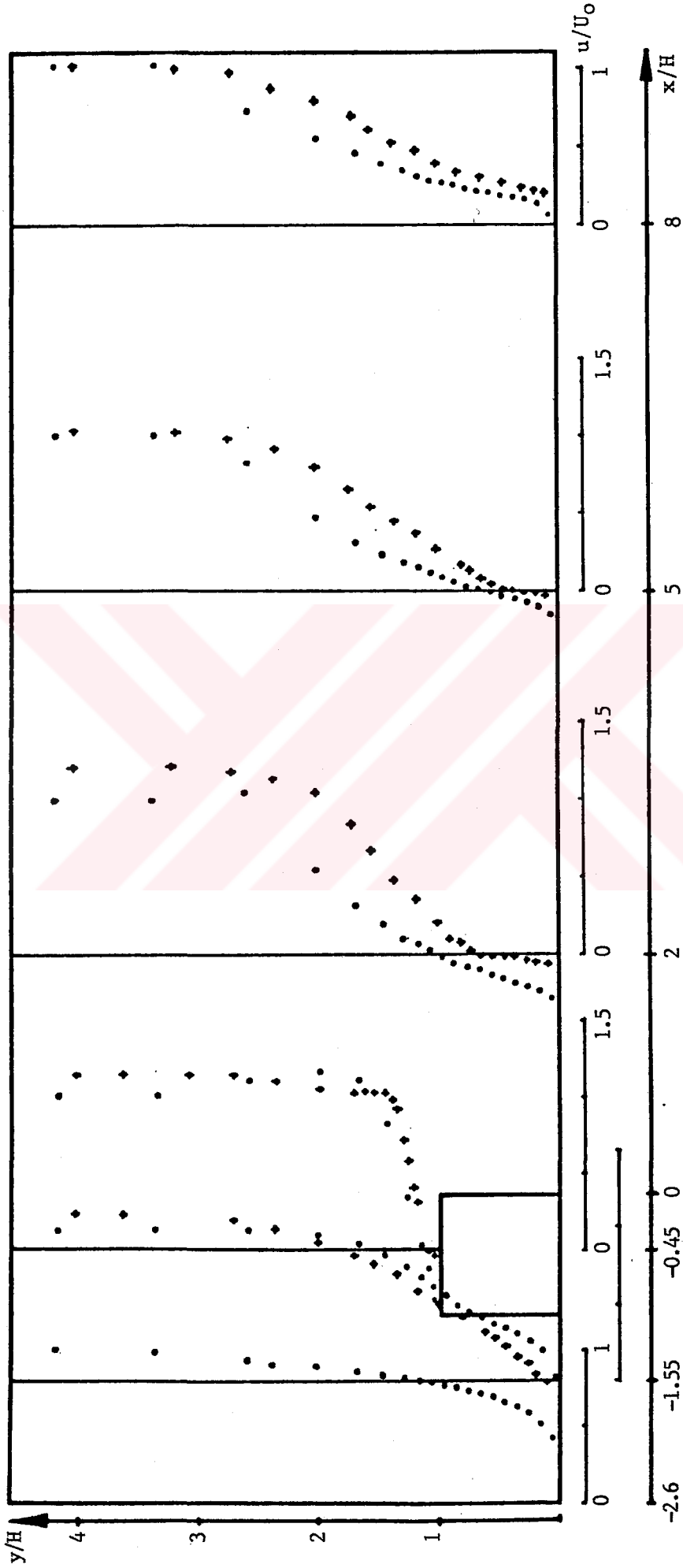
Kare kesitli, iki boyutlu engeller etrafındaki türbülanslı akışın sayısal çözümü ile ilgili bir başka araştırma, K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü'nde, B. Çuhadaroğlu tarafından doktora tez çalışması olarak yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında hazırlanan bilgisayar programında, sonlu farklar çözüm yöntemi ile birlikte MAC algoritması ve $(k-\epsilon)$ türbülans



Şekil-6.21: Ortalama hız ve türbülans profilleri
a) Giriş ortalama hız, b) Giriş türbülans,
c) $x/H=8.84$ deki ortalama hız,
d) $x/H=8.84$ deki türbülans



Şekil-6.22: Ortalama hız ve türbülans profilleri
 a) Giriş ortalama hız, b) Giriş türbülans,
 c) $x/H=6$ daki ortalama hız,
 d) $x/H=6$ daki türbülans



Şekil-6.23: Engel etrafındaki türbülanslı akışta boyutsuz ortalama hız profilleri.
 (•: B.Çuhadaroğlu, sayısal; +: Sunulan çalışma, deneysel)

modeli kullanılmaktadır. Bu program, sunulan çalışmadaki deney giriş şartları ve akış geometrisi verilerek çalıştırılmıştır. Şekil-6.23 de, iki boyutlu, kare kesitli engel etrafındaki türbülanslı akışta ortalama hız profilleri ; sunulan çalışmanın deneysel ve B. Çuhadaroğlu'nun sayısal sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Sayısal çözümde, engelin arkasındaki ters akış bölgesinin uzunluğu, $7H$ olarak bulunmuştur. Bu değer, $7.3H$ olarak bulunan deneysel sonuçla büyük ölçüde uyumaktadır. Ortalama hız profilleri açısından bakıldığında; özellikle engelin üst bölgesindeki sayısal ve deneysel profillerin büyük ölçüde çakıştığı görülmektedir. Engelin ön ve arka tarafında, deneysel profillerdeki hız değerleri, sayısal profillerdekine göre daha büyük olmaktadır. Teorik ve deneysel çalışmalarda, genelde bu tip farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Sayısal çözüm için kullanılan türbülans modelinin, ters akış bölgelerinde yeterli olmaması ve bu bölgelerde yapılan ölçümlerde iyi bir hassasiyet sağlanamaması, bu farklılıkların oluşmasında etkili olmaktadır. Ancak, her iki çalışmada elde edilen hız profillerinin de aynı eğilimi taşıdıkları ve tutunma uzunluğu açısından iyi bir uyum sağladıkları görülmektedir.

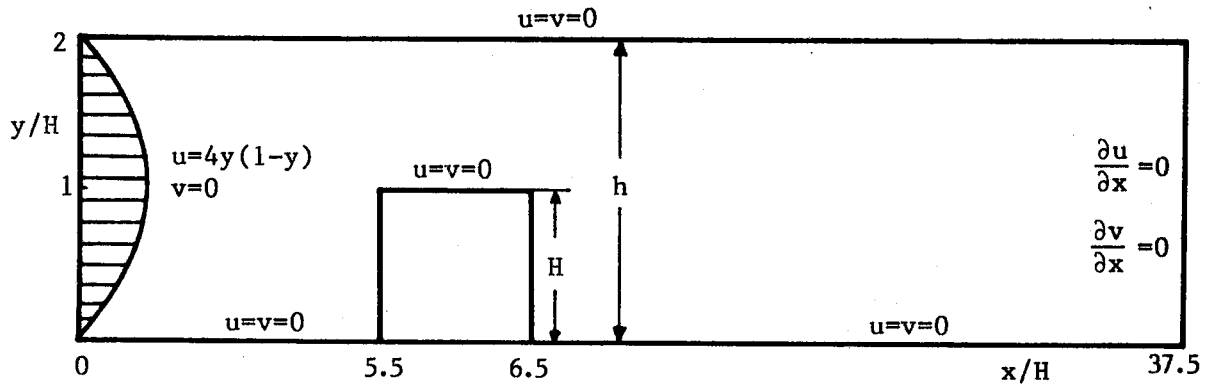
6.3.Laminer Kanal Akışı

İki boyutlu, kare kesitli engel etrafındaki sürekli, laminar kanal akışı için hazırlanan bilgisayar programı, Ultra 80386 P.C. de çalıştırılarak sayısal çözümler elde edilmiştir. Şekil-6.24 de geometrisi verilen akış alanının hesaplanmasında, sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişimi, hybrid yaklaşımına göre düzenlenmiştir. İteratif çözücü olarak, Doormall ve Raithby [51] tarafından geliştirilen SIMPLEX algoritması esas alınmıştır. Momentum denklemlerinde kullanılan relaksasyon faktörü, $\epsilon=9$ olarak seçilmiştir. Basınç doğrultman denklemi için relaksasyon işlemi yapılmamıştır. Normalize edilmemiş artıkların, 5×10^{-3} den küçük olma şartı, çözüm yakınsama kriteri olarak alınmıştır.

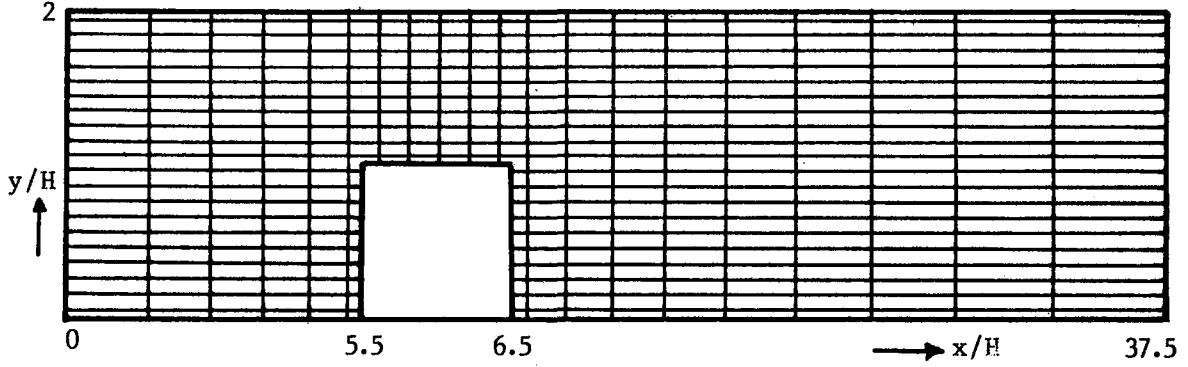
Kanal girişinde,

$$u = 4y(1-y) \quad (6.1)$$

bağıntısı ile verilen parabolik hız dağılımı ve $v=0$, giriş şartı olarak alınmıştır. Kanal duvarlarında ve engel cidarlarında, $u=0$ ve $v=0$ verilmiştir. Kanal çıkışında ise, u ve v hızları için türev sınır şartı kullanılmıştır.



Şekil-6.24: Akış alanı geometrisi



Şekil-6.25: Sonlu fark ağı düzeni

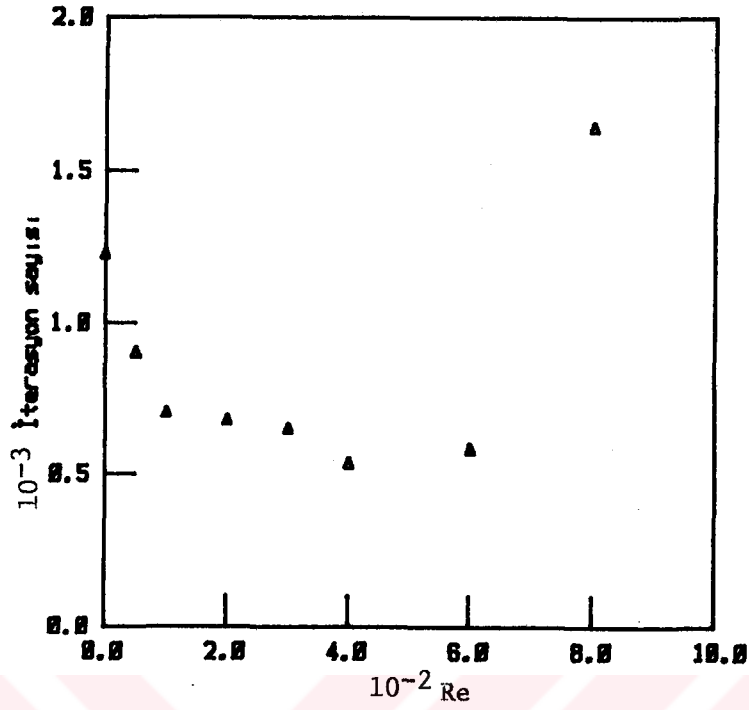
Şekil-6.25 de görülen hesap alanı, dikey doğrultuda düzgün ağlardan; yatay doğrultuda, daralan genişleyen ağlardan oluşmuştur. Yatay doğrultuda, engelin bulunduğu bölgeye düzgün ağlar yerleştirilmiştir. Engelin önündeki bölge kanal girişine doğru, arkasındaki bölge de kanal çıkışına doğru 1.1 lik artımlarla genişletilmiştir. Hız gradyentlerinin büyük olduğu tahmin edilen bölgelere, fazla sayıda ağ noktası yerleştirmeyi amaçlayan bu düzenleme ile, 105x82 lik bir ağ yapısı oluşturulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan Reynolds sayısı,

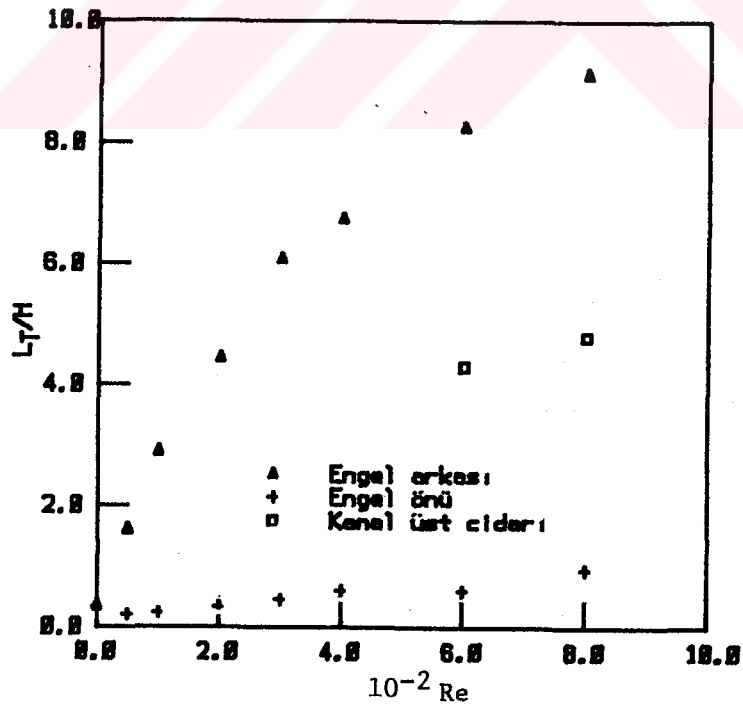
$$Re = \frac{UxD}{\nu} \quad (6.2)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bağlantıda, laminer akış durumunda ortalama giriş hızına karşılık gelen U , maksimum giriş hızının $2/3$ katı olmaktadır. Kanalın hidrolik çapını ifade eden D , kanal yüksekliğinin iki katına eşit olarak alınmıştır. ν , kinematik viskoziteyi göstermektedir. Reynolds sayısının 1,50, 100,200,300,400,600 ve 800 değerleri için sayısal çözümler elde edilmiştir.

Şekil-6.26 da, iki boyutlu, kare kesitli engel etrafındaki laminer kanal akışında, bilgisayar zamanı açısından, iterasyon sayısının Reynolds sayısı ile değişimi verilmektedir.



Şekil-6.26: İki boyutlu, kare kesitli engel için iterasyon sayısının Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil-6.27: İki boyutlu, kare kesitli engel için ters akış bölgesi uzunluklarının Reynolds sayısı ile değişimi

Reynolds sayısının 100 ile 600 değerleri arasında, çözümler için gerekli bilgisayar zamanı en aza inerken; $Re > 600$ den sonra artmaya başlamaktadır. Bu durum, laminer akış bölgesinden geçiş akış sınırına doğru yaklaşılmasından kaynaklanmaktadır.

İki boyutlu, kare kesitli engelin önünde ve arkasındaki bölgede, sınır tabakanın ayrılması sonucunda oluşan ters akış bölgesi uzunluğunun Reynolds sayısı ile değişimi, Şekil-6.27 de verilmiştir. Engelin üst cidarında akış ayrılması tespit edilmemiştir. Engelin önünde ters akış bölgesinin uzunluğu, Reynolds sayısı ile artmakta ve $Re=800$ değerinde, engel yüksekliği seviyesine erişmektedir. Engelin arkasındaki ayrılmış bölgenin uzunluğu, Reynolds sayısı ile artmaktadır. $Re=600$ ve 800 de kanalın üst cidarında akış ayrılması meydana gelmektedir. Kanal girişinden itibaren $x=14H$ da başlayan ters akış bölgesinin uzunluğu, $4.9H$ olarak gerçekleşmiştir. 600 den küçük Reynolds sayılarında, kanalın üst cidarında akış ayrılması görülmemiştir.

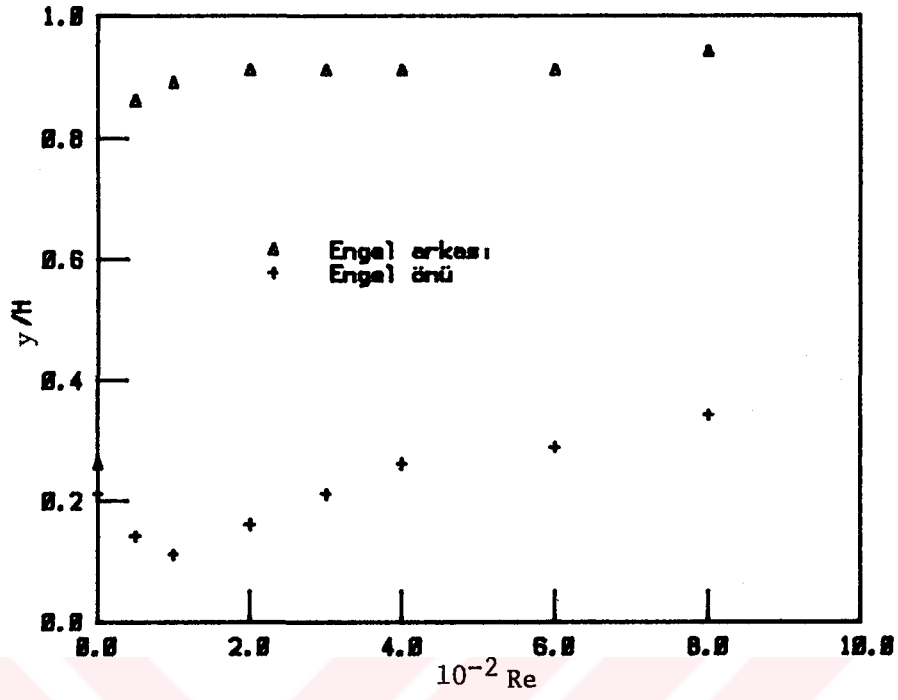
Tablo-6.2 de, literatürde yer alan çalışmalarla ilgili tutunma uzunlukları, karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu çalışmalarda, kanal uzunluğunun $15H$ gibi kısa bir değerde tutulması nedeniyle, engelin arkasındaki ters akış bölgesinin kanal çıkışına kadar uzadığı görülmektedir. Bu kısa kanal uzunluğu, bir anlamda çözümü zorlayıcı bir özellik göstermekte ve sonuçların hassasiyetini etkilemektedir. Bu durum göz önüne alınarak, kanal çıkışındaki şartların iç bölgelerdeki çözüm üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak için, kanal uzunluğu $37.5H$ gibi büyük bir değerde tutulmuştur. $h/H=2.5$ olmak üzere, kanal girişinde parabolik ve üniform hız dağılımları verilerek, nümerik çözümler bulunmuştur. Bu iki farklı giriş şartında da, engelin arkasındaki ters akış bölgesi uzunlukları için, $4.04H$ olarak aynı değer elde edilmiştir. Parabolik hız dağılımı ile, üniform hız dağılımından %25 daha az zamanda çözüme ulaşılmıştır. h/H oranı arttıkça, engelin arkasındaki ters akış bölgesi uzunluğunun kısaldığı görülmüştür.

Tablo-6.2: $Re=200$ için tutunma uzunlukları

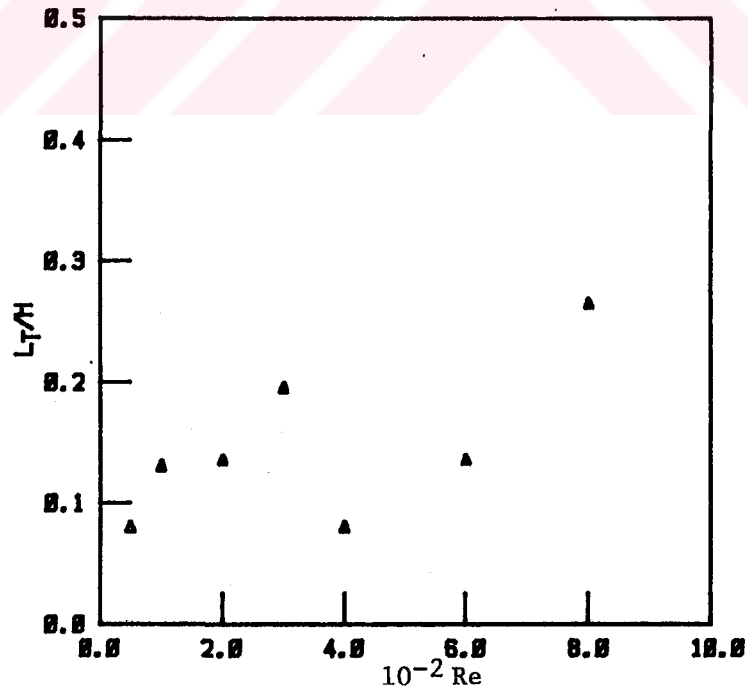
	Giriş hızı	h/H	L_k/H	L_T/H
Hughes ve diğ. [37]	Üniform	2.5	10	5.3
Leone ve Gresho [38]	Parabolik	2.5	15	6.75
Yang ve Atluri [39]	Üniform	2.5	15	5.6
Laval ve Quartapelle [40]	Üniform	2.5	15	5
Sunulan çalışma	Parabolik	2.5	55.8	4.04
Sunulan çalışma	Üniform	2.5	55.8	4.04
Sunulan çalışma	Parabolik	2	37.5	4.46

Şekil-6.28 de, engelin ön ve arkasında meydana gelen ters akış bölgelerinin yüksekliğinin, Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Engelin ön tarafında $Re=100$ de, ters akış bölgesi yüksekliği engel yüksekliğinin 0.1 katı civarında bir minimuma inerken; $Re=800$ de 0.34 gibi bir değere yükselmektedir. Engelin arkasında, ters akış bölgesi yüksekliği $Re=100$ değerine kadar sürekli artan bir görünüm oluşturmakta ve bu değerden sonra hemen hemen sabit kalmaktadır. $Re=800$ değerinde biraz daha artarak, engel yüksekliğinin 0.94 katı bir yüksekliğe erişmektedir.

Şekil-6.29 da, engelin önünde ve arkasında meydana gelen ve ana akış yönünde dönen, ikincil girdapların Reynolds sayısı ile değişimi verilmektedir. Engelin ön tarafında, sadece $Re=800$ de ikincil girdap tespit edilmiştir. Bu girdap, $0.015H$ yüksekliğinde ve $0.075H$ uzunluğunda gerçekleşmiştir. Engelin arkasında, Reynolds sayısının 300 e kadar olan değerlerinde, engel yüksekliğinin 0.2 katı civarına kadar artan ikincil girdap uzunlukları elde edilmiştir. Reynolds sayısının 400 değerinde, $0.08H$ olarak bir minimuma inmekte ve $Re > 400$ için tekrar artmaktadır.



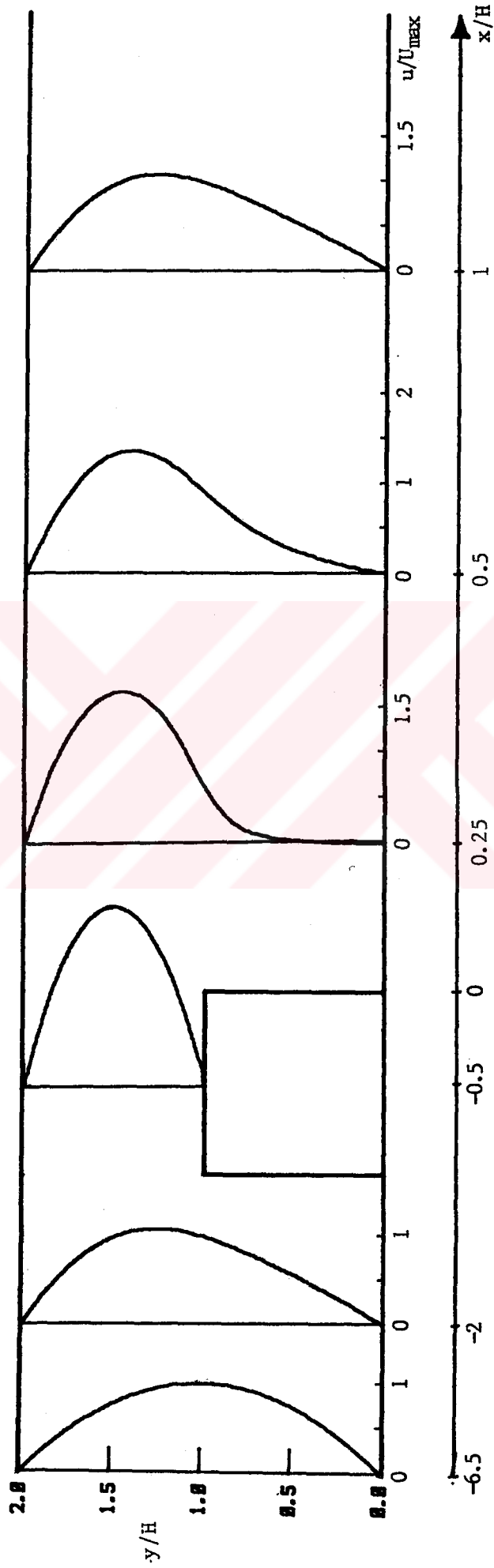
Şekil-6.28: İki boyutlu, kare kesitli engel için ters akış bölgesi yüksekliklerinin Reynolds sayısı ile değişimi



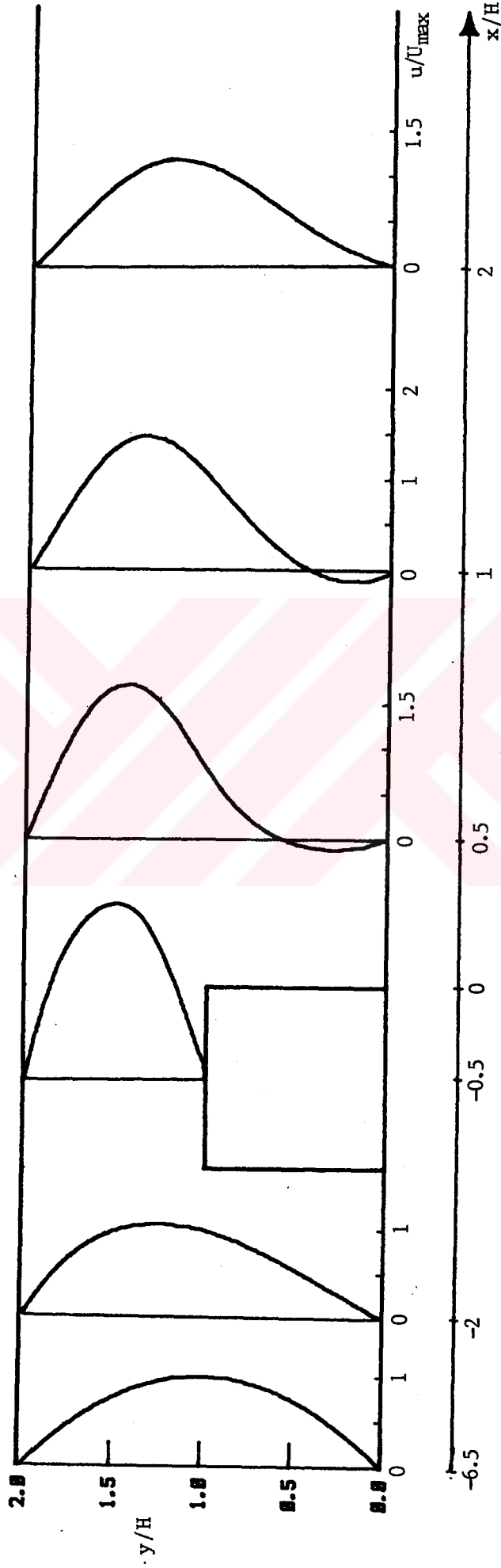
Şekil-6.29: İki boyutlu, kare kesitli engel için ikincil ters akış bölgesi uzunluklarının Reynolds sayısı ile değişimi

Şekil-6.30,31,32,33,34,35,36,37 de, Reynolds sayısının 1, 50,100,200,300,400,600 ve 800 değerleri için ana akış yönünde, değişik istasyonlarda sayısal çözümle bulunan hız profilleri verilmektedir. Engelin üstündeki bölgede hızın şiddeti, maksimum giriş hızının iki katına kadar yaklaşmaktadır. Ters akış bölgelerinde, engel yakınındaki negatif hızlar daha düşük değerde iken; tutunma bölgesine yaklaştıkça büyük değerler almaktadırlar.

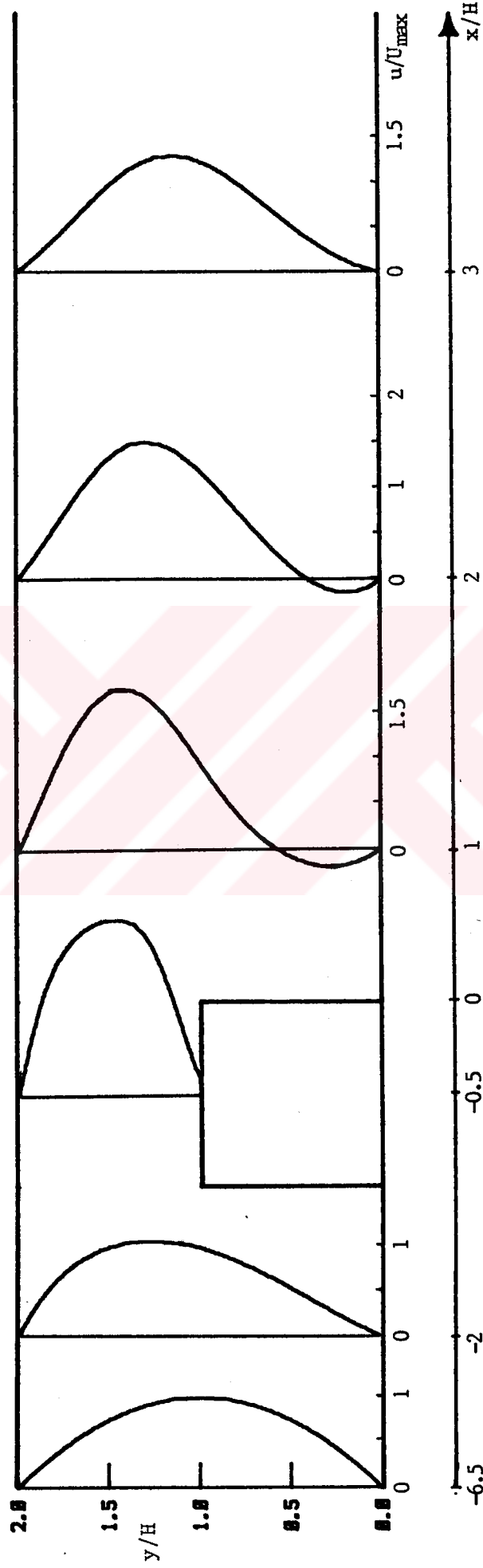




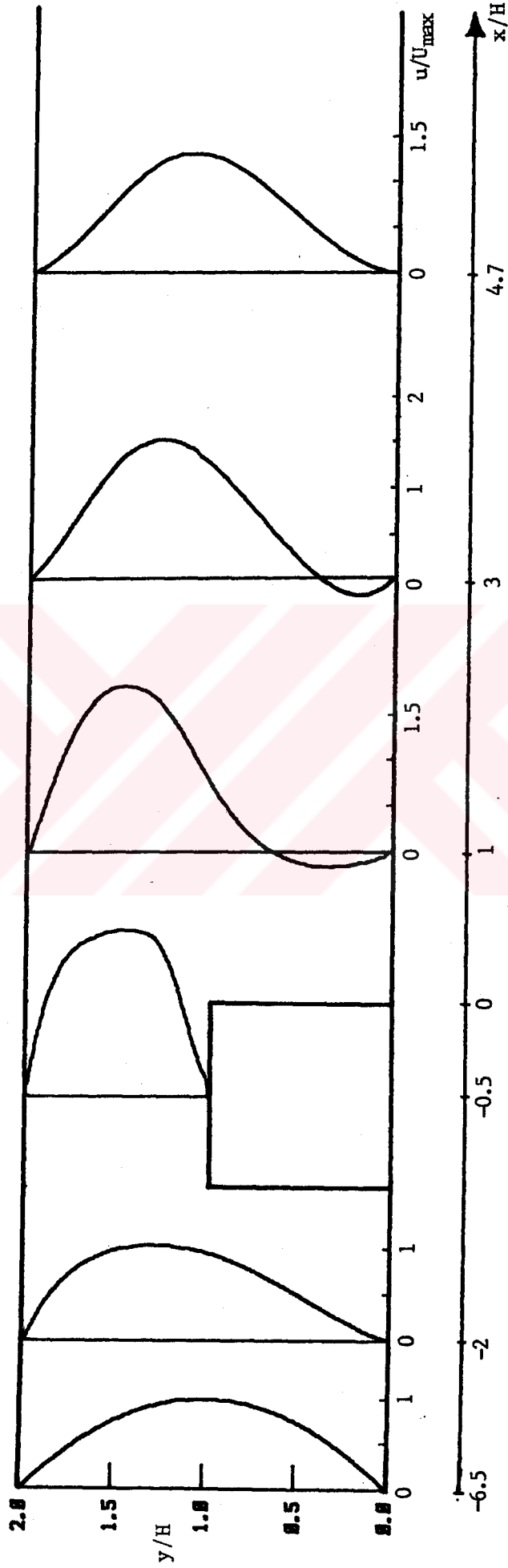
Şekil-6.30: $Re=1$ için sayısal hız profilleri



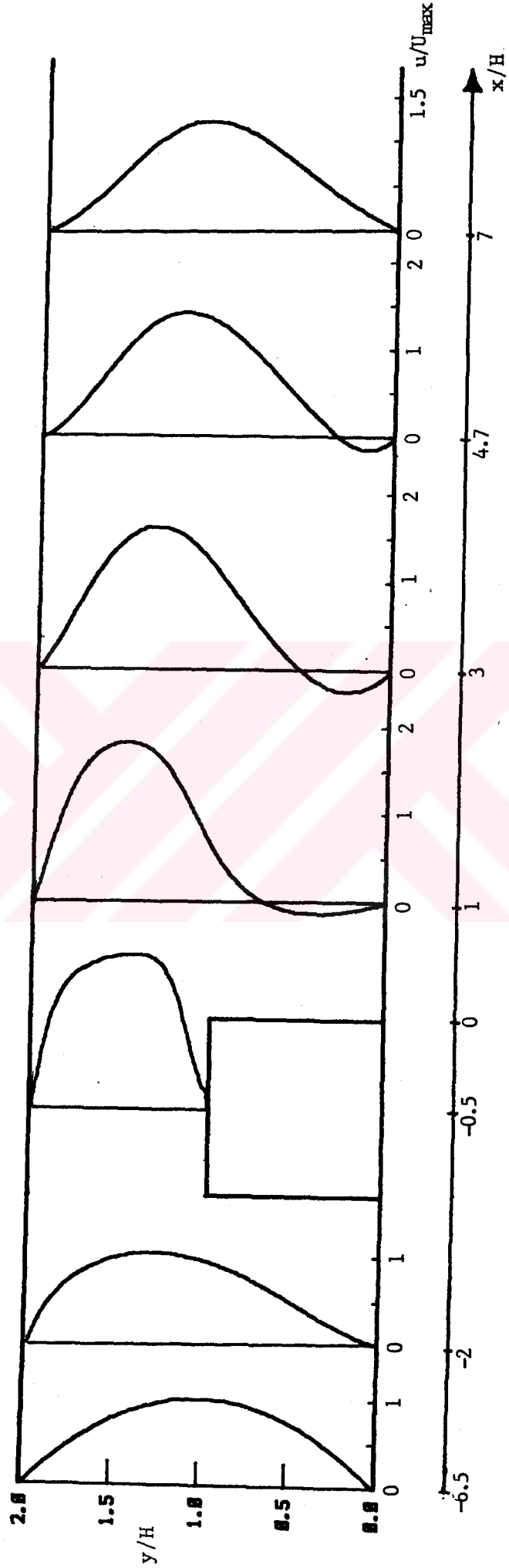
Şekil-6.31: $Re=50$ için sayısal hız profilleri



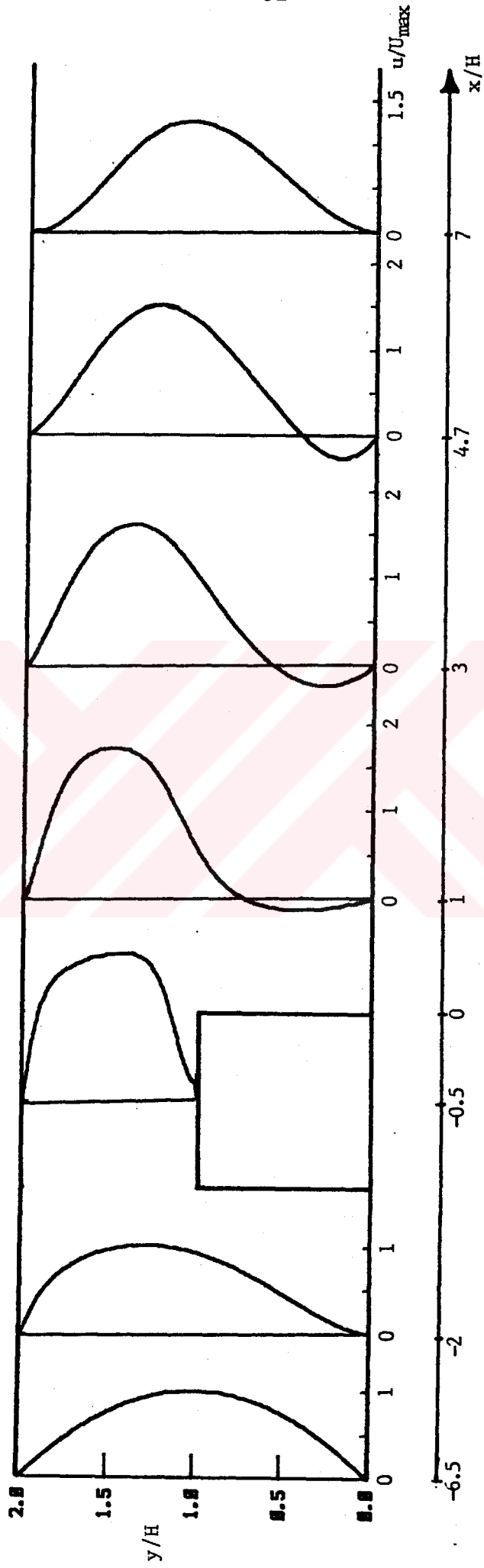
Şekil-6.32: $Re=100$ için sayısal hız profilleri



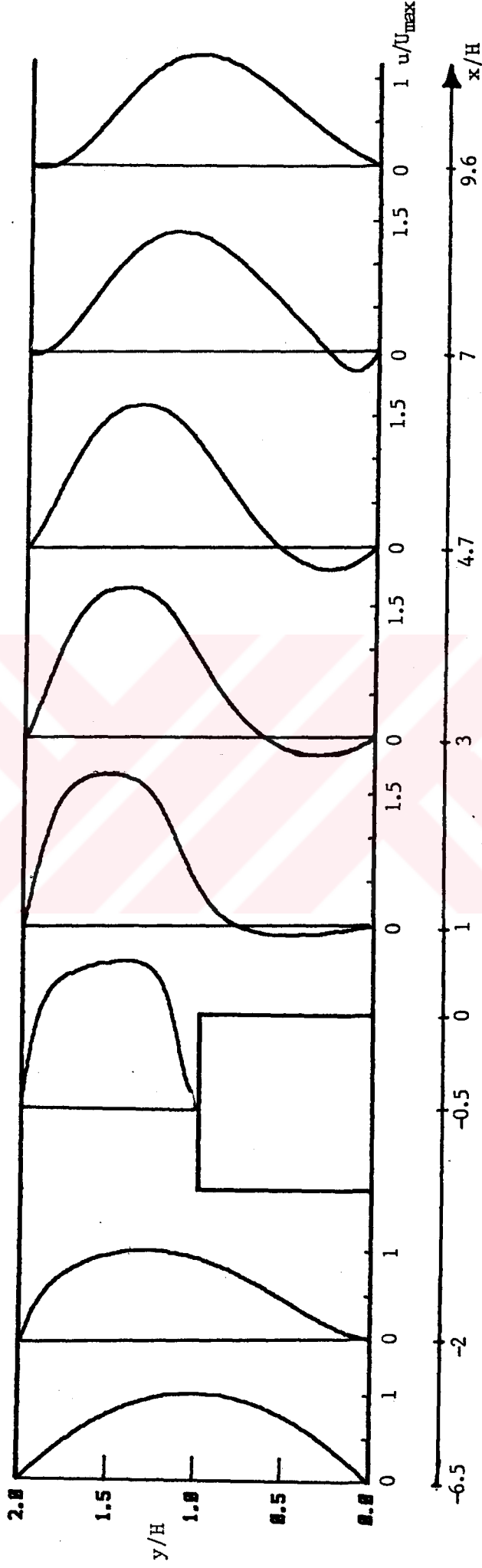
Şekil-6.33: $Re=200$ için sayısal hız profilleri



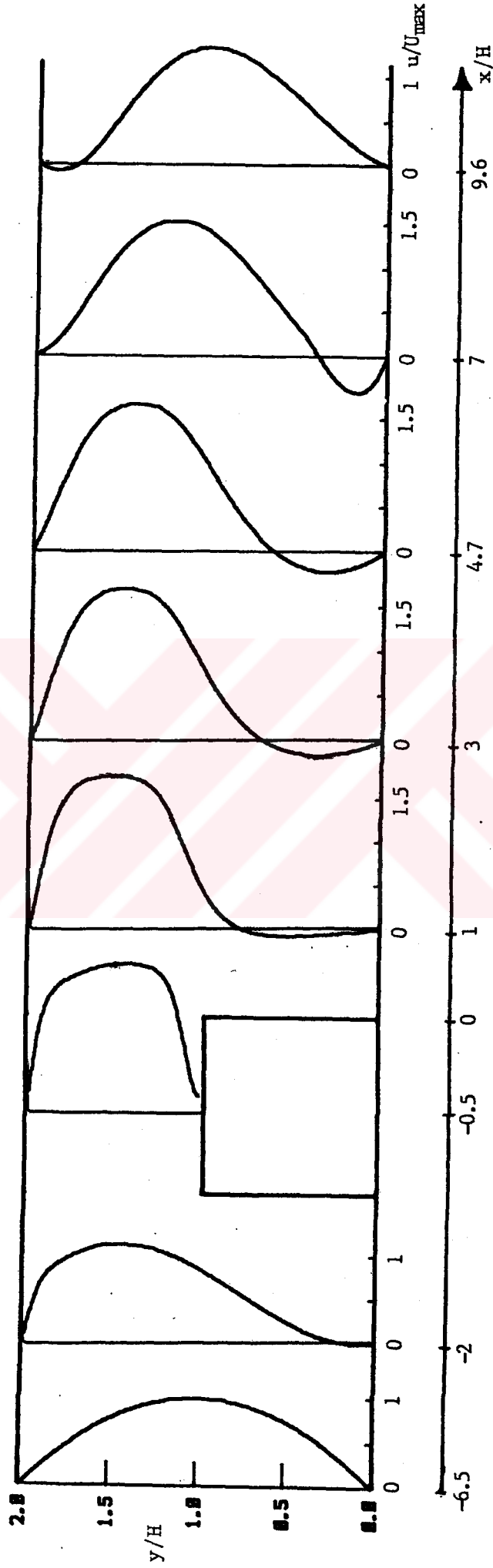
Şekil-6.34: $Re=300$ için sayısal hız profilleri



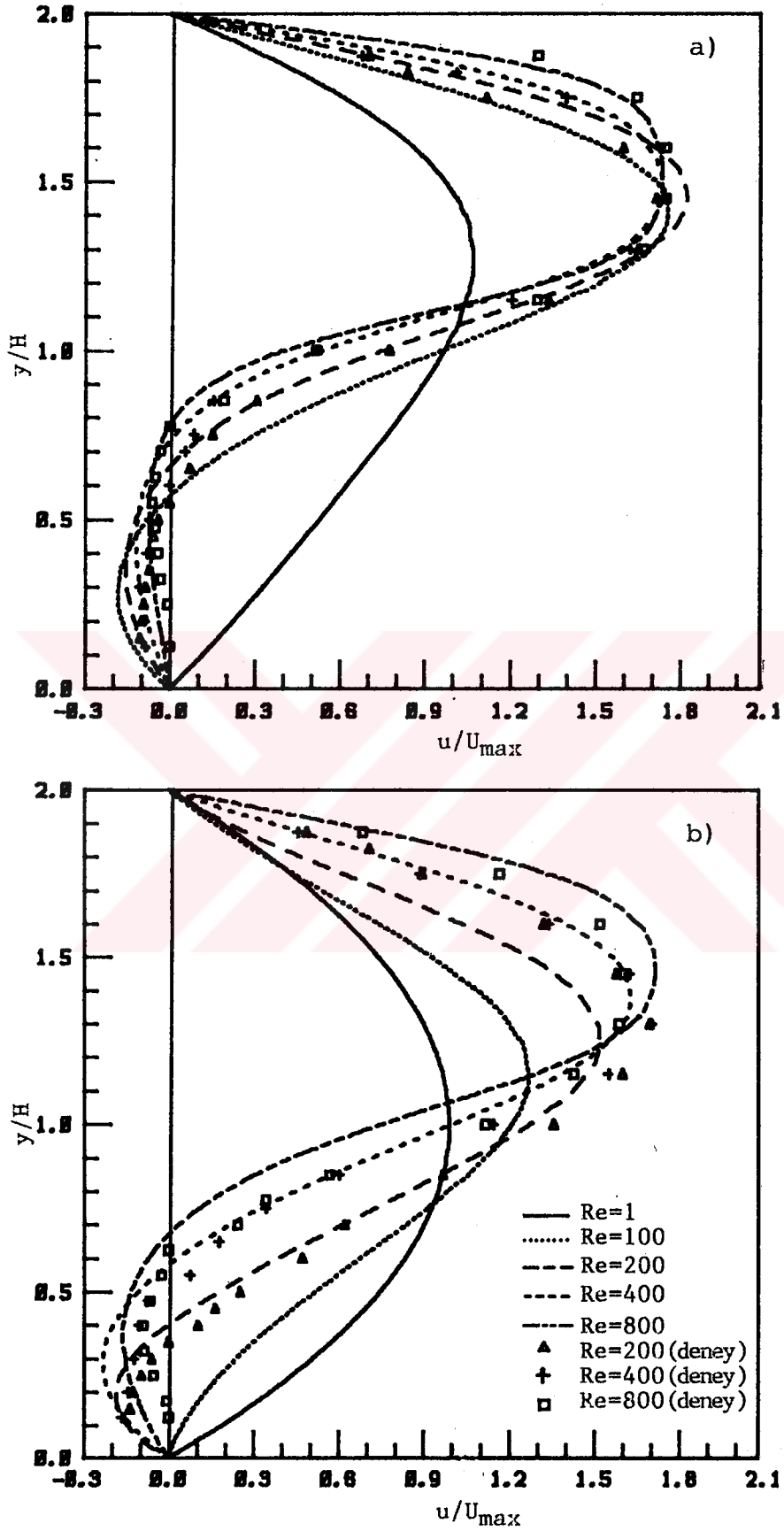
Şekil-6.35: $Re=400$ için sayısal hız profilleri



Şekil-6.36: $Re=600$ için sayısal hız profilleri



Şekil-6.37: $Re=800$ için sayısal hız profilleri



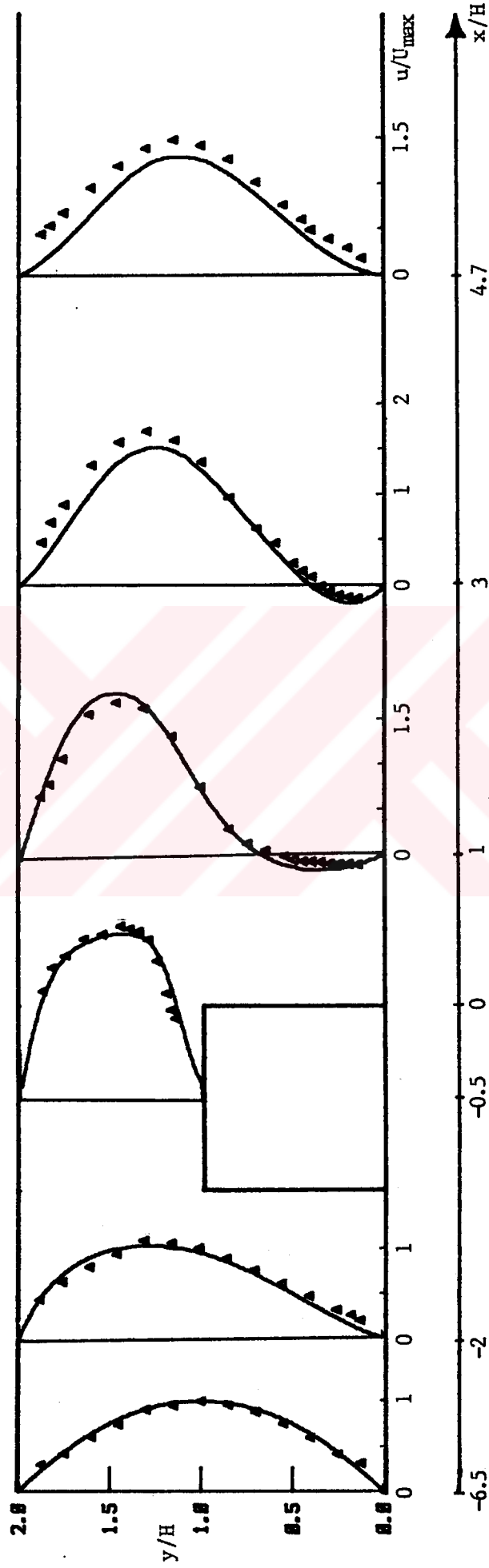
Şekil-6.38: Değişik Reynolds sayılarında hız profilleri
a) $x/H=1$, b) $x/H=3$

Şekil-6.38 de, engelin arkasında 1H ve 3H lık uzaklıklarda, hız profillerinin Reynolds sayısı ile değişimi verilmektedir. $Re=1$ için, bu istasyonlarda ters akış bölgesi bulunmamaktadır. Reynolds sayısının artması ile, hızın şiddetinin arttığı ve hız maksimumunun yukarı doğru ötelendiği görülmektedir. Ayrıca, $Re=200,400$ ve 800 için yapılan deneylerin sonuçları da aynı grafikte verilmiştir.

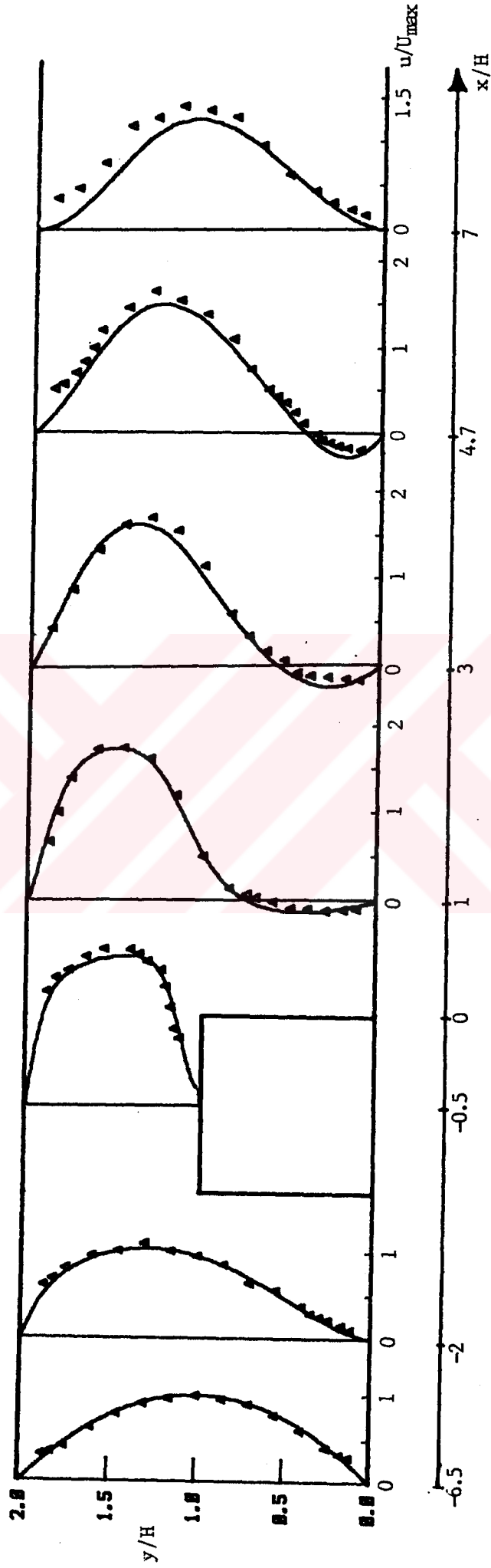
6.4.Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Kanal içinde, iki boyutlu engel etrafındaki laminer akışın sayısal çözümlerinin karşılaştırılması amacıyla, deneyler yapılmıştır. Sayısal çözümdeki akış alanı geometrisinde, laminer akış şartlarını sağlayacak bir deney düzeneği kurulmuştur. Deneyler, Reynolds sayısının $200,400$ ve 800 değerlerinde yapılmıştır. Kanal girişinden itibaren 1000 mm de, gelişmiş laminer akış hız profili elde edilmiştir. Bu noktadan itibaren, $5.5H$ lık bir mesafeye iki boyutlu, kare kesitli engel yerleştirilmiştir. Sayısal çözüme karşılık gelecek şekilde, engelin önünde $1H$ ve $0.5H$ da; engelin üstünde orta ekseninde ve arkasında $1H,3H,4.7H,7H$ ve $9.6H$ lık mesafelerde ölçümler yapılmıştır. Kanal orta ekseninde, kesit boyunca ana akış yönündeki hız bileşeni ölçülmüştür.

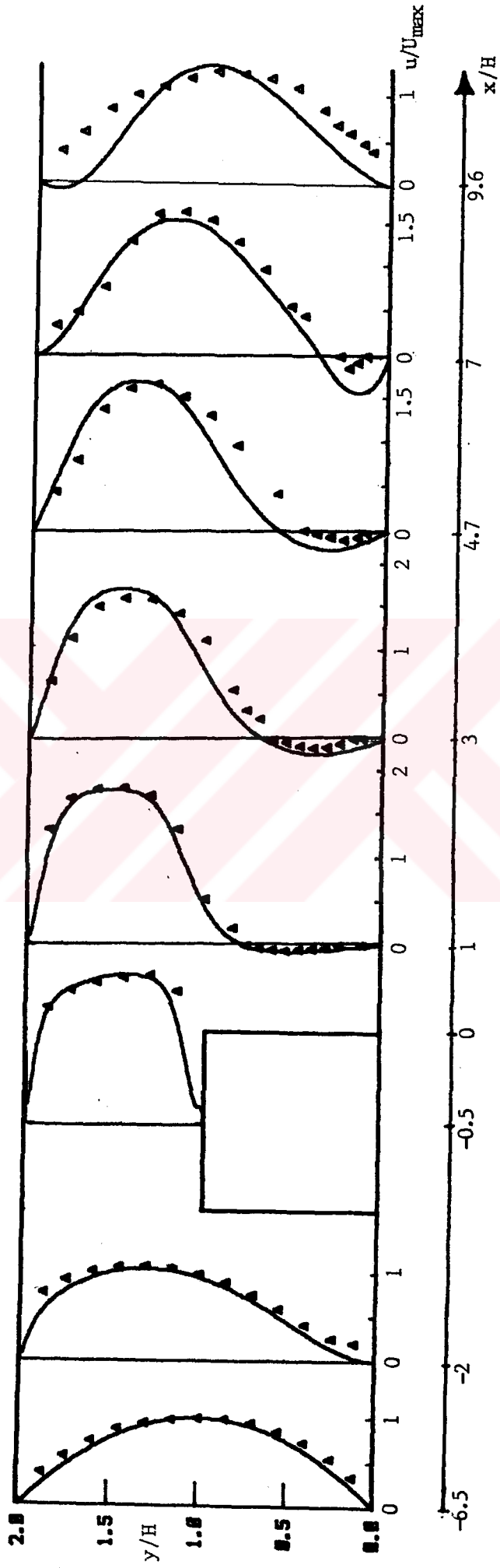
Değişik Reynolds sayılarında, çeşitli istasyonlarda deneysel ve sayısal olarak bulunan hız profilleri, Şekil-6.39, 40 ve 41 de verilmektedir. Şekil-6.39 da, $Re=200$ için bulunan sonuçlar görülmektedir. Deneyde elde edilen gelişmiş laminer akış hız profili, sayısal çözümde verilen giriş hız profilini iyi bir şekilde sağlamaktadır. Engelin önünde, üstünde ve arkasında $1H$ lık uzaklıkta ölçülen hız dağılımları, sayısal çözümle iyi bir uyum göstermektedir. Engel arkasında akış boyunca $3H$ lık uzaklıktan sonra, sayısal ve deneysel hız profillerinde farklılıklar oluşmaktadır. Bu bölgelerde, deneysel hız profilleri, sayısal profillerden daha büyük değerlerde gerçekleşmektedir. Ters akış bölgelerinde ise, bunun aksine deneysel değerler daha küçük olmaktadır. Sayısal çözümden, $Re=200$ için akış tutunmasının, engelden sonra $4.5H$ da



Şekil-6.39: $Re=200$ için hız profilleri
 (- sayısal, \blacktriangle deneysel)



Sekil-6.40: $Re=400$ için hız profilleri
(- sayısal, \blacktriangle deneysel)



Şekil-6.41: $Re=800$ için hız profilleri
(- sayısal, Δ deneysel)

meydana geldiği bulunmuştur. Özellikle tutunma bölgesi yakınında oluşan akış kararsızlığı, sayısal ve deneysel sonuçlara etki ederek, farklılıkların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Şekil-6.40 da, $Re=400$ için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen hız profiliyle, sayısal çözümde verilen hız profiline göre iyi bir uyum sağlanmıştır. Engelin önünde $1H$ lık uzaklıkta deneysel, değerler, sayısal değerlere yakın olarak gerçekleşmiştir. Engelin üstünde orta bölgede ölçülen hızlar, sayısal değerlerden daha büyük olmaktadır. Engelin arkasında $4.7H$ lık uzaklığa kadar, deneysel değerler sayısal değerlerle iyi bir uyum göstermektedir. $4.7H$ ve $7H$ uzaklıklarındaki profiller için, bir uyumsuzluk söz konusu olmaktadır. Sayısal çözümden, $Re=400$ için akışın tutunma uzunluğu, $6.75H$ olarak bulunmuştur. $Re=200$ de olduğu gibi, akışın tutunma bölgesi yakınındaki deneysel ve sayısal hız profillerinde farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

$Re=800$ için bulunan sonuçlar, Şekil-6.41 de verilmektedir. Bu Reynolds sayısı için deneysel olarak elde edilen giriş hız profili, $Re=200$ ve $Re=400$ ün aksine, sayısal giriş profili ile daha az uyumlu olmaktadır. Engelin ön tarafında $1H$ lık mesafede ölçülen hız profilinde, özellikle cidar yakınındaki hızlarda, sayısal çözüme göre büyük değerler elde edilmiştir. Engelin üst bölgesinde ve arka tarafında $1H$ lık uzaklıktaki hız profillerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Engelin arkasında $3H$ lık mesafeden sonra, deneysel ve sayısal hız profillerinde genel bir uyumsuzluk başlamaktadır. Ters akış bölgelerinde ölçülen hız değerlerinin, sayısal değerlere göre daha küçük olduğu görülmektedir. $9.6H$ lık uzaklıkta oldukça büyük farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Sayısal çözümlerden, $9.6H$ lık uzaklıkta kanal üst cidarında akış ayrılmasının olduğu görülmekte ve engel arkasındaki akışın $9.16H$ da tutunduğu anlaşılmaktadır. Ayrılmış akış bölgelerinin meydana getireceği kararsızlıktan dolayı, $Re=200$ ve 400 de olduğu gibi, tutunma ve kanal üst cidar ayrılma bölgeleri yakınında deneysel ve sayısal çözümlerin iyi bir uyum içinde olmadıkları görülmektedir.

Bir kanal içindeki laminer akışta, tutunma uzunluğu Reynolds sayısı ile artmaktadır. Engel arkasındaki akış, tutunma bölgesine doğru kararsız bir yapı göstermektedir. Yüksek Reynolds sayılarında, kanal üst cidarında meydana gelen akış ayrılmaları, bu kararsızlığı arttırıcı bir etki yapmaktadır. Tutunma noktası civarında, kayma gerilmesi sıfır ve hızlar çok küçük olduğundan, yakınsamış çözümlerde bile, tutunma uzunluğunda küçük sapmaların meydana geldiği, sayısal çözümlerden görülmektedir. Bu sapmalar, prensip olarak, bu bölgelerde çok ince ağ noktalarının kullanılmasıyla, ortadan kaldırılabilir düzeyde olmaktadır. Ancak, pratikte çok gerekli olmadığından, bu tür bir işlem yapılmamıştır. Tutunma noktaları civarında oluşan akış kararsızlığının, kızgın tele etkileyen efektif soğutma hızını arttırması nedeniyle, deneysel değerler, sayısal değerlerden daha büyük olmaktadır. Ayrıca, 3 cm/s nin altındaki hızlarda, kızgın telin özelliğinden dolayı, %25 oranında bir hata meydana gelmektedir. Buna karşın, tutunma noktasına yakın bölgeler dışında kalan istasyonlarda, sayısal ve deneysel sonuçların genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1.Sonuçlar

Atmosferik sınır tabaka simülasyonu, duvar hüzmesi ve tünel akışı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sınır tabaka içine yerleştirilen, iki ve üç boyutlu engeller etrafında ortalama hız ve türbülans ölçümleri yapılmış ve akış gözlenmesi ile ters akış bölgelerinin uzunlukları belirlenmiştir.

Sınır tabaka kalınlığının engel yüksekliğine oranının 2.7 ve engel yüksekliğine bağlı Reynolds sayısının 3.73×10^4 olduğu duvar hüzmesi akışında, $L/H=1$ olan iki boyutlu, kare kesitli engel için:

- Engelin ön tarafında, engel yüksekliğinin 0.8 katı uzunluğunda,
- Engelin arka tarafında, engel yüksekliğinin 6.5 katı uzunluğunda

ters akış bölgeleri bulunmuştur. Engelin ön kenarından ayrılan akış, engelin üst cidarına tutunmamaktadır. Referans sınır tabakadaki maksimum akış hızı, akış boyunca azalarak, başlangıçtaki değerinin 0.38 katına inmektedir. Duvar hüzmesi akışında ölçülen türbülans hızları, sınır tabakanın üst bölgesinde sifıra doğru yaklaşmayıp, belirli bir değer almaktadırlar. Referans sınır tabakada maksimum türbülans hızı, maksimum ortalama hızın 0.186 katı iken; engelin üst tarafında 0.3 katı bir değere erişmektedir. Duvar hüzmesi akışında engel genişliği arttıkça, engelin arkasındaki ters akış bölgesi uzunluğu artmaktadır. İki boyutlu, kare kesitli ve keskin kenarlı engel arkasındaki ters akış bölgesi uzunluğu, ön akış türbülans seviyesinin artması ile azalmaktadır. Duvar hüzmesi

akışı içinde bulunan, keskin kenarlı engeller arkasında oluşan ters akış bölgesi uzunluğu, Reynolds sayısından bağımsız olmaktadır (Bölüm-6.1).

Tünel içinde geliştirilen atmosferik sınır tabaka akışında, $\delta/H=2.73$ ve $L/H=1$ olan iki boyutlu, kare kesitli engel etrafında ortalama hız ve türbülans ölçümleri yapılmıştır. Engel yüksekliğine bağlı Reynolds sayısının 3.04×10^4 bu çalışmada:

- Engelin ön tarafında, engel yüksekliğinin 0.55 katı uzunluğunda,
- Engelin arka tarafında, engel yüksekliğinin 7.3 katı uzunluğunda,

ters akış bölgeleri bulunmuştur. Engelin ön kenarından ayrılan akışın, engelin üst cidarına tutunmadığı görülmüştür. Tutunmanın gerçekleşmesi için, $L/H > 4$ olması gerektiği bulunmuştur. Referans sınır tabakada maksimum türbülans hızı, serbest akış hızının 0.082 katı iken; engelin üstündeki bölgede 0.3 değerine ulaşmaktadır. Engel yüksekliği arttıkça, engel arkasındaki ters akış bölgesi uzunluğu artmaktadır. Üç boyutlu engellerde H/W oranı arttıkça, tutunma uzunluğunun kısaldığı görülmüştür. Engele yaklaşan akışın türbülans derecesinin artması, akışın daha kısa mesafede tutunmasına neden olmaktadır. Tünel içinde geliştirilen atmosferik sınır tabaka akışında, keskin kenarlı engeller için, tutunma uzunluğunun Reynolds sayısından bağımsız olduğu görülmüştür. Ancak, dairesel kesitli engellerde, tutunma uzunluğu Reynolds sayısına bağımlı olmakta ve Reynolds sayısının artması ile tutunma uzunluğu azalmaktadır (Bölüm-6.2).

Duvar hüzmesi akışı ile tünel akışı birbirinden farklılıklar göstermektedir. Referans sınır tabakadaki maksimum hız, duvar hüzmesi akışta akış boyunca azalırken; tünel akışında tutunmadan sonra başlangıçtaki değerine erişmektedir. Duvar hüzmesi akışında maksimum hızın olduğu bölgede türbülans hızları, belirli bir değer alırken; tünel akışında serbest akış bölgesinde sifıra doğru yaklaşmaktadır.

Kanal içinde kare kesitli, iki boyutlu engel etrafındaki laminer akış için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Sayısal çözüm için hazırlanan bilgisayar programında, iteratif çözücü olarak kullanılan SIMPLEC yönteminin, SIMPLE yönteminden çok daha ekonomik olduğu görülmüştür. $Re=400$ için 66×66 lık düzgün ağı ile oyuk akışında çözüm zamanı, SIMPLE yöntemine göre 2.8 kat oranında azalmıştır. Kanal uzunluğunun büyük tutulmasının, doğru ve hassas çözümler elde edilmesinde önemli etkisi olduğu görülmüştür. Kanal girişinde, parabolik ve üniform olmak üzere, farklı hız dağılımları verilerek, sayısal çözümler elde edilmiştir. Parabolik hız dağılımı ile üniform hız dağılımına göre, %25 daha kısa zamanda çözüme varılmıştır. Kanal yüksekliğinin engel yüksekliğine oranının 2.5 olduğu durumda, engel arkasındaki tutunma uzunluğunun parabolik ve üniform hız giriş şartından etkilenmediği görülmüştür. Engel yüksekliği sabit tutulmak üzere kanal yüksekliği arttıkça, engel arkasındaki ters akış bölgesi uzunluğu kısalmaktadır. Engelin arkasındaki ters akış bölgesinin uzunluğu, Reynolds sayısına bağımlı olarak artmaktadır. Engelin ön tarafında da, Reynolds sayısı ile artan ters akış bölgeleri meydana gelmektedir. Engelin arka tarafında, çözüm yapılan bütün Reynolds sayılarında ikincil girdaplar meydana gelirken; engelin ön tarafında sadece $Re=800$ de görülmüştür. Reynolds sayısının 600 değerinden sonra, kanalın üst cidarında da akış ayrılması gözlenmiştir (Bölüm-6.3).

7.2.Öneriler

Engel etrafındaki akış alanının araştırılmasında, kurulan teoriler ve matematiksel modellerin geçerlilik kazanması ve geliştirilmesi, büyük ölçüde deneysel çalışmalara bağlı olmaktadır. Deneysel çalışmaların sonuçlarının doğruluğu da, gerçek problemin laboratuvarında mümkün olduğunca iyi bir şekilde modellenebilmesinden ve kullanılan ölçüm yöntemlerinin hassasiyetinden etkilenmektedir. Ortalama hız ölçümlerinde laser Doppler anemometresinin; türbülans ölçümlerinde ise, kızgın telli anemometrenin kullanılması deneysel sonuçların hassasiyeti açısından büyük önem taşıyacaktır. Hız ölçümlerinden önce yapılacak akış görüntüleme çalışmaları ile, akış

alanı hakkında önemli bilgiler sağlanacaktır. Değişik geometrik yapıdaki engeller etrafındaki akış alanlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi de, konunun bütünleşmesi yönünden yararlı olacaktır.

Çevre kirliliği açısından, binalar ve sanayi bölgelerinden çıkan atık gazların, yerleşim merkezlerine yapabileceği etkiler göz önüne alınmalıdır. Bu amaçla, atık gazlarla yayılan parçacıkların konsantrasyonunun ve yerel rüzgar durumunun birlikte değerlendirilebileceği modelleme çalışmalarının yapılması yararlı olacaktır. Yerleşim ve sanayi merkezlerinin kurulmasında, çevre sağlığı göz önünde bulundurularak; mimari düzenlemelerin akışkanlar mekaniği ile bütünleşmesi sağlanmalıdır.

Bu tip problemlerin çözümü amacıyla geliştirilen ve engel etrafındaki laminer akışa uygulanarak, yapılan deneylerle uyumlu sonuçlar veren bilgisayar programı; uygun bir türbülans modeli ile tamamlanarak, türbülanslı akış alanlarının çözümü için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Tennekes, H., The Atmospheric Boundary Layer, Physics Today, 27 (1974) 52-63.
2. Panofsky, H.A., The Atmospheric Boundary Layer below 150 Meters, Ann. Rev. Fluid Mech., 6 (1974) 147-177.
3. Counihan, J., Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972, Atmos. Environ., 9 (1975) 871-905.
4. Lloyd, A., The Generation of Shear Flow in a Wind Tunnel, Quart. J. Roy. Met. Soc., 93 (1967) 79-96.
5. Armit, J. ve Counihan, J., The Simulation of the Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atmos. Environ., 2 (1968) 49-71.
6. Arya, S.P.S. ve Plate, E., Modelling of the Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer, J. Atmos. Sci., 26 (1969) 656-665.
7. Counihan, J., An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atmos. Environ. 3 (1969) 197-214.
8. Counihan, J., A Method of Simulating a Neutral Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel, AGARD Conference Proc., 48 (1970) 14.1-14.13.
9. Cockrell, J. ve Lee B.E., Methods and Consequence of Atmospheric Boundary Layer Simulation, AGARD Conference Proc., 48 (1970) 13.1-13.14.
10. Maull, D.J., The Wake Characteristics of a Bluff Body in a Shear Flow, AGARD Conference Proceedings, 48 (1970) 16.1-16.13.
11. Cermak, J.F. ve Arya, S.P.S., Problems of Atmospheric Shear Flows and their Laboratory Simulation, AGARD Conference Proc., 48 (1970) 12.1-12.16.
12. Pasquill, F., Wind Structure in the Atmospheric Boundary Layer: Effect of Buildings on the Local Wind, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 269A (1971) 439-456.
13. Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Bradley, E.F., Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci., 28 (1971) 181-189.

14. Wyngaard, J.C. ve Cote, O.R., The Budgets of Turbulent Kinetic Energy and Temperature Variance in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci., 28 (1971) 190-201.
15. Counihan, J., Wind Tunnel Determination of the Roughness Length as a Function of the Fetch and the Roughness Density of Three-Dimensional Roughness Elements, Atmos. Environ., 5 (1971) 637-642.
16. Schon, J.P. ve Mery, P., A Preliminary Study of the Simulation of Neutral Atmospheric Boundary Layer Using Air Injection in a Tunnel, Atmos. Environ., 5 (1971) 299-311.
17. Cermak, J.F., Laboratory Simulation of the Atmospheric Boundary Layer, AIAA J., 9 (1971) 1746-1754.
18. Sundaram, T.R., Ludwig, G.R. ve Skinner, G.T., Modelling of the Turbulence Structure of the Atmospheric Surface Layer, AIAA J., 10 (1972) 743-750.
19. Tennekes, H., The Logarithmic Wind Profile, J. Atmos. Sci., 30 (1973) 234-238.
20. Counihan, J., Simulation of an Adiabatic Urban Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atmos. Environ., 7 (1973) 673-689.
21. Cook, N.J., On Simulating the Lower Third of the Urban Adiabatic Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atmos. Environ., 7 (1973) 691-705.
22. Nagip, H.M., Morkovin, M.V., Yung, J.T. ve Tan-atichat, J., On Modelling of Atmospheric Surface Layers by the Counter Jet Technique, AIAA J., 14 (1976) 185-190.
23. Cook, N.J., Wind-Tunnel Simulation of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier and Mixing Device Methods, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 3 (1978) 157-176.
24. Leutheusser, H.J. ve Baines, W.D., Similitude Problems in Building Aerodynamics, Proc. ASCE HY3, 93 (1967) 35-49.
25. Counihan, J., Hunt, J.C.R. ve Jackson, P.S., Wakes Behind Two Dimensional Surface in Turbulent Boundary Layers, J. Fluid Mech., 64 (1974) 529-563.
26. Castro, I.P. ve Robins, A.G., The Flow around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, J. Fluid Mech., 79 (1977) 307-335.
27. Gauld, B.J.B., ve Sykes, D.M., The Sensitivity of Architectural Models to Turbulence in an Air Flow, Proc. Instn. Civil Engrs., 65 (1978) 189-197.

28. Castro, I.P., Measurements in Shear Layers Separating from Surface-Mounted Bluff Bodies, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 7 (1981) 253-272.
29. Bergeles, G. ve Athanassiadis, N., The Flow a Surface-Mounted Obstacle, ASME J. Fluids Eng., 105 (1983) 461-463.
30. Laneville, A. ve Yong, L.Z., Mean Flow Around Two Dimensional Rectangular Cylinders and Their Interpretation, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 14 (1983) 387-398.
31. Gowda, B.H.L., Gerhardt, H.J. ve Kramer, C., Surface Flow Field Around Three Dimensional Bluff Bodies, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 11 (1983) 405-420.
32. Fackrell, J.E., Parameters Characterising Dispersion in the Near Wake of Buildings, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 16 (1984) 97-118.
33. Peterka, J.A., Meroney, R.N. ve Kothari, K.M., Wind Flow Patterns about Buildings, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 21 (1985) 21-38.
34. Yeung, P.K. ve Kot, S.C., Computation of Turbulent Flows past Arbitrary Two Dimensional Surface Mounted Obstructions, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 18 (1985) 177-190.
35. Greenspan, D., Numerical Studies of Steady, Incompressible Flow in a Channel with a Step, J. of Engineering Math., 3 (1969) 21-28.
36. Friedman, M., Laminar Flow in a Channel with a Step, J. of Engineering Math., 6 (1972) 285-290.
37. Hughes, T.C.R., Liu, W.K. ve Brooks, A., Finite Element Analysis of Incompressible Viscous Flows by Penalty Function Formulation, J. Comput. Phys., 30 (1979) 1-60.
38. Leone, J.M. ve Gresho, P.M., Finite Element Simulations of Steady, Two Dimensional, Viscous Incompressible Flow over a Step, J. Comput. Phys., 41 (1981) 167-191.
39. Yang, C.T. ve Atluri, S.N., An 'Assumed Deviatoric Stress Pressure Velocity' Mixed Finite Element Method for Unsteady, Convective, Incompressible Viscous Flow: Part II: Computational Studies, Int. J. Numer. Methods Fluids, 4 (1984) 43-69.
40. Laval, H. ve Quartapelle, L., A Fractional Step Taylor-Galerkin Method for Unsteady Incompressible Flows, Int. J. Numer. Methods Fluids, 11 (1990) 501-513.
41. Simiu, E. ve Scanlan, R.H., Wind Effects on Structures, John Wiley and Sons, 1978.

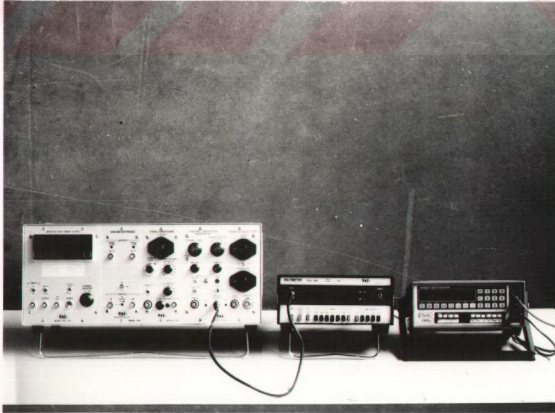
42. Aynsley, R.M., Melbourne, W. ve Vickery, B.J., Architectural Aerodynamics, Applied Science Publishers LTD, London, 1977.
43. Schlichting, H., Boundary Layer Theory, Seventh Edition, McGraw-Hill Book Com., New York, 1979.
44. Hunt, J.C.R. ve Fernholz, H., Wind Tunnel Simulation of the Atmospheric Boundary Layer: A Report on Euromech 50, J. Fluid Mech., 70 (1975) 543-559.
45. Hunt, J.C.R., Abell, C.J., Peterka, J.A. ve Woo, H., Kinematical Studies of the Flows Around Free or Surface Mounted Obstacles; Applying Topology to Flow Visualization, J. Fluid Mech., 86 (1978) 179-200.
46. Atlı, V., Subsonic Flow over a Two-Dimensional Obstacle Immersed in a Turbulent Boundary Layer on a Flat Surface, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 31 (1988) 225-239.
47. Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F. ve Schönung, B., Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow, J. Fluid Mech., 127 (1983) 623-632.
48. T.S.I. Incorporated, Measurements in Low Velocity Gases, Technical Bulletin, TB-14.
49. Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D.C., 1980.
50. Patankar, S.V. ve Spalding, D.B., A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three Dimensional Parabolic Flows, Int. J. Heat Mass Transfer, 15 (1972) 1787-1806.
51. Doormaal, J.P. ve Raithby, G.D., Enhancements of the Simple Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, Numer. Heat Transfer, 7 (1984) 147-163.
52. Sivaloganathan, S. ve Shaw, G.J., A Multigrid Method for Recirculating Flows, Int. J. Numer. Methods Fluids, 8 (1988) 417-440.
53. Johnston, J.P., Turbulence: Internal Flow, Ed. P. Bradshaw, Springer-Verlag, Berlin, 1976.
54. Castro, I.P. ve Cheun, B.S., The Measurements of Reynolds Stresses with a Pulsed-Wire Anemometer, J. Fluid Mech., 118 (1982) 41-58.
55. T.S.I. Incorporated, Hot Film and Hot Wire Anemometry Theory and Application, Technical Bulletin, TB-5.

56. T.S.I. Incorporated, Fitting Calibration Curves to Hot Wire and Hot Film Anemometer Data, Technical Bulletin, TB-10.
57. Hinze, J.O., Turbulence, Second Edition, Mc Graw Hill Book Co., New York, 1975.
58. Webster, C.A.G., A Note on the Sensitivity to Yaw of a Hot Wire Anemometer, J. Fluid Mech., 13 (1962) 307-312.
59. Friehe, C.A. ve Schwarz, W.H., Deviations from the Cosine Law for Yawed Cylindrical Anemometer Sensors, ASME J. of Applied Mech., 35E (1968) 655-662.
60. Jorgenson, F.E., Directional Sensivity of Wire and Fibre Film Probes, DISA Information, 11 (1971) 31-37.
61. Lawson, R.E.J. ve Britter, R.E., A Note the Measurements of Transverse Velocity Fluctuations with Heated Cylindrical Sensors at Small Velocities, J. Phys E: Sci. Instrum, 16 (1983) 563-567.
62. Raman, A., Krishnan, V.S. ve Roy, R.P., Directional Sensitivity of Cylindrical Hot-Film Velocity Sensors, ASME J. of Applied Mech., 52 (1985) 199-202.
63. T.S.I. Incorporated, Model 1125/1125R-1 Calibrator/Probe Rotator, Instruction Manuel, St. Paul, 1987.

EK

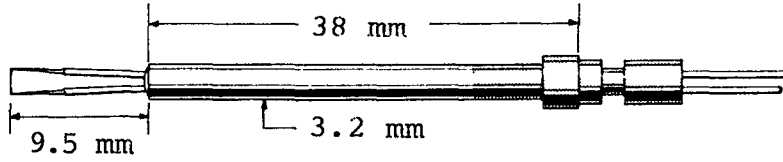
A.Kızgın Telli Anemometrenin Kalibrasyonu

Deneylerde, Resim-A.1 de görülen, T.S.I. Model 1050 sabit sıcaklık anemometresi, T.S.I. Model 1051 monitör ve güç kaynağı modülü, T.S.I. Model 1076 true rms voltmetre ve Thurlby Model 1905a dijital multimetre cihazları kullanılmıştır. Düşey doğrultuda 0.2 mm hassasiyetle ilerleme sağlayan bir vidalı mekanizma imal edilerek, probun üç doğrultuda hareket edebilmesi sağlanmıştır. Probu kendi eksenini etrafında dönme hareketi, vidalı mekanizmaya takılan, 0.2° dönme hassasiyeti sağlayan T.S.I. Model 10142-1 kaydırıcı düzenek ile gerçekleştirilmiştir.



Resim-A.1: Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları

Ortalama hız ve türbülans ölçümlerinde, T.S.I. Model 1210-20, 1211-20 ve 1240-20 kızgın film problar kullanılmıştır. Bu problar tungsten tel üzerine alüminyum kaplama olarak imal edilmiştir. Şekil-A.1 de, T.S.I. Model 1210-20 standart tipik kızgın film prob görülmektedir.



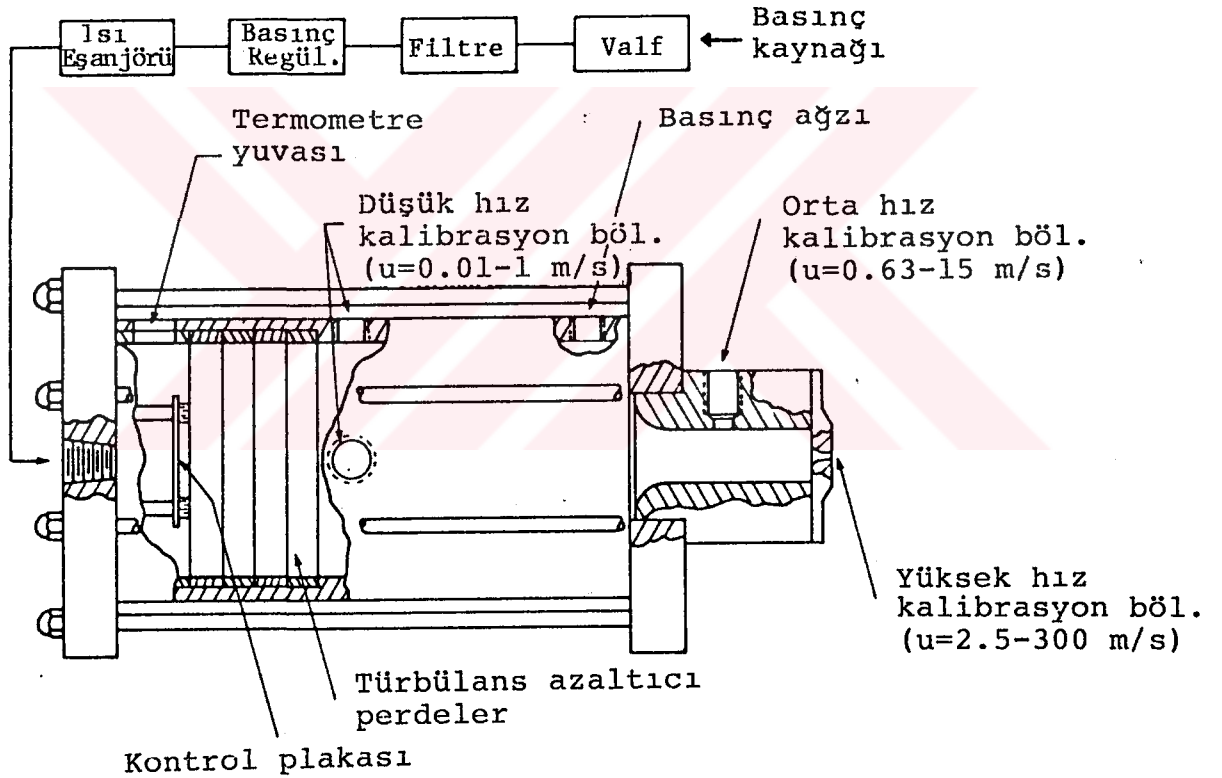
Şekil-A.1: Tipik kızgın film prob

Anemometrenin ölçüm birimi, ısıtılan ve yüksek bir sıcaklıkta kontrol edilen küçük bir dirençtir. Akış içindeki probun duyar ucunda harcanan elektrik enerjisi, akışkanın duyar ucu soğutmasının bir ölçüsüdür. Duyar uç üzerinden geçen akışkanın soğutma etkisi, akışkanın hızı ile duyar uç ve akışkan arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır.

Kalibrasyon işlemi, Şekil-A.2 de görülen, T.S.I. Model 1125 kalibrasyon cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz, 0.01 m/s ile 300 m/s aralığındaki hızlar için kullanılabilir. Prob ekseninin ortalama akışa dik ve akış doğrultusunda olması durumuna göre de, kalibrasyonun düzeltilmesine imkan sağlamaktadır. Anemometre köprü gerilimi E ile akış hızı U arasındaki bağıntı,

$$\frac{E^2 R}{(R+R_3)^2} = \left[A + B(\rho U)^{1/n} \right] (t_s - t_e) \quad (A.1)$$

olarak verilmektedir [55]. Bu bağıntıdaki A, B ve n sabitleri, akışkan ile duyar uç tipine bağlı olmakta ve ısı iletimi, viskozite ve Prandtl sayısı etkilerini de içermektedir. R, duyar ucun direnci ve R_3 , anemometre köprü devresinde değeri bilinen bir dirençtir. t_s ve t_e sırasıyla, duyar uç ve çevre sıcaklıklarıdır. Hava için 250°C , duyar ucun ideal çalışma sıcaklık değeri olarak verilmektedir. Hız ölçümlerinde en yüksek hassasiyet, akışkan ve duyar uç arasındaki sıcaklık farkının büyük olduğu durumda elde edilmektedir.



Şekil-A.2: T.S.I. Model 1125 kalibrasyon cihazı

T.S.I. tarafından yayınlanan teknik bültende kalibrasyon için,

$$E^2 = A + B(\rho U)^n \quad (\text{A.2})$$

şeklindeki bağıntısının kullanılabileceği ifade edilmektedir [56]. Buradaki U hızı, duyar uca etkiyen toplam anlık etkin soğutma hızıdır. Eğer sabit yoğunluklu bir akış söz konusu ise, bağıntı

$$E^2 = A + BU^n \quad (\text{A.3})$$

şeklini almaktadır. Hız ve gerilime ait değer çiftlerine göre A, B ve n sabitlerinin belirlenmesi ile kalibrasyon eğrisi çıkarılmaktadır. Kalibrasyon işleminde genellikle, n=0.5 olarak alınmaktadır. İki kalibrasyon noktası alınarak A ve B için

$$A = \frac{E_2^2 - \left(\frac{\rho_2 U_2}{\rho_1 U_1} \right)^{1/2} E_1^2}{1 - \left(\frac{\rho_2 U_2}{\rho_1 U_1} \right)} \quad (\text{A.4a})$$

$$B = \frac{E_1^2 - E_2^2}{\left(\rho_1 U_1 \right)^{1/2} \left[1 - \left(\frac{\rho_2 U_2}{\rho_1 U_1} \right)^{1/2} \right]} \quad (\text{A.4b})$$

ifadeleri elde edilmektedir. 0.5 değeri ile genelleştirilen n üssü, 0.4 ile 0.6 aralığında değer alabilmektedir.

Diğer bir kalibrasyon işlemi, U=0 alınarak A sabitinin bulunmasıdır. Bu durumda,

$$A = (E^2)_{U=0} = E_0^2 \quad (\text{A.5})$$

olmaktadır. Hız ve gerilime ait iki değer çifti alınarak B ve n için,

$$B = \frac{(E_2^2 - E_0^2)^{a/a-1}}{(E_1^2 - E_0^2)^{a/a-1}} \quad (\text{A.6a})$$

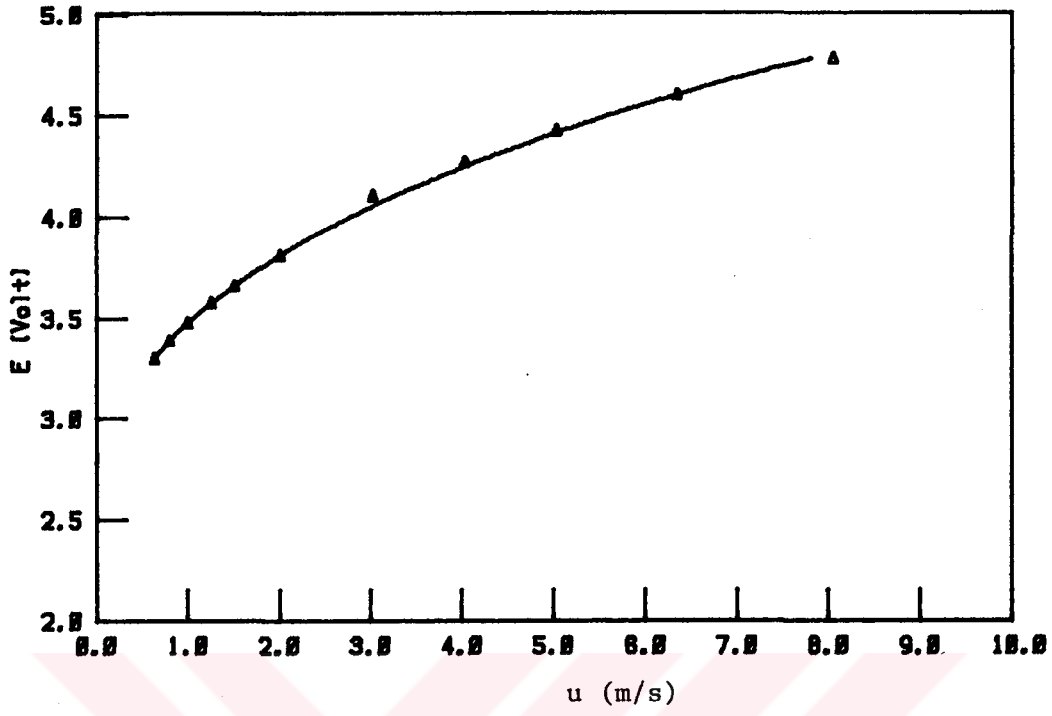
$$n = \frac{\ln\left(\frac{E_2^2 - E_0^2}{E_1^2 - E_0^2}\right)}{\ln\left(\frac{\rho_2 U_2}{\rho_1 U_1}\right)} \quad (\text{A.6b})$$

$$a = \frac{\ln(\rho_1 U_1)}{\ln(\rho_2 U_2)} \quad (\text{A.6c})$$

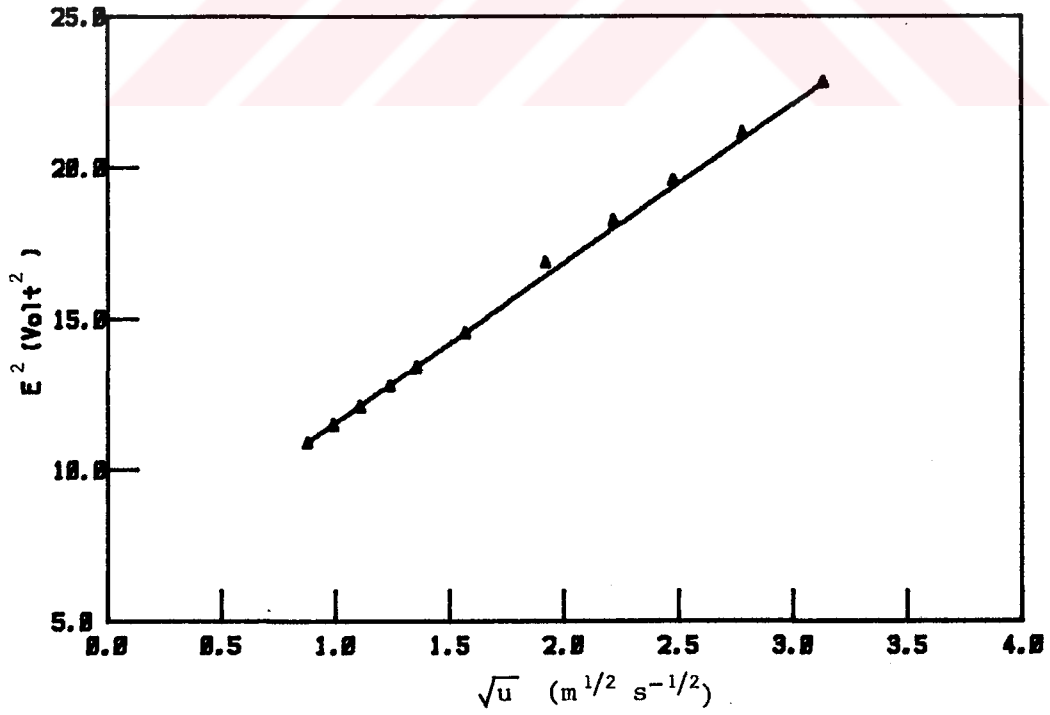
ifadeleri verilmektedir.

Şekil-A.3 de görülen, anemometre köprü çıkış gerilimi ve akış hızına göre çizilen kalibrasyon eğrisi lineer olmamaktadır. Kalibrasyon eğrisinden görüleceği gibi, düşük hızlarda daha büyük hassasiyet elde edilirken; yüksek hızlara doğru bu hassasiyet azalmaktadır. Bu kalibrasyon eğrisi, ölçümlerin geniş bir hız aralığında değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Şekil-A.4 de görüldüğü gibi, köprü çıkış geriliminin karesi ve akış hızının karekökü ile elde edilen kalibrasyon eğrisi lineer olmaktadır. Çok sayıda kalibrasyon noktası alındığında, lineer eğrinin hassasiyeti büyük ölçüde artmakta ve anemometre çıkış geriliminin hıza dönüştürülmesinde lineer olmayan eğriye göre kolaylık sağlamaktadır.

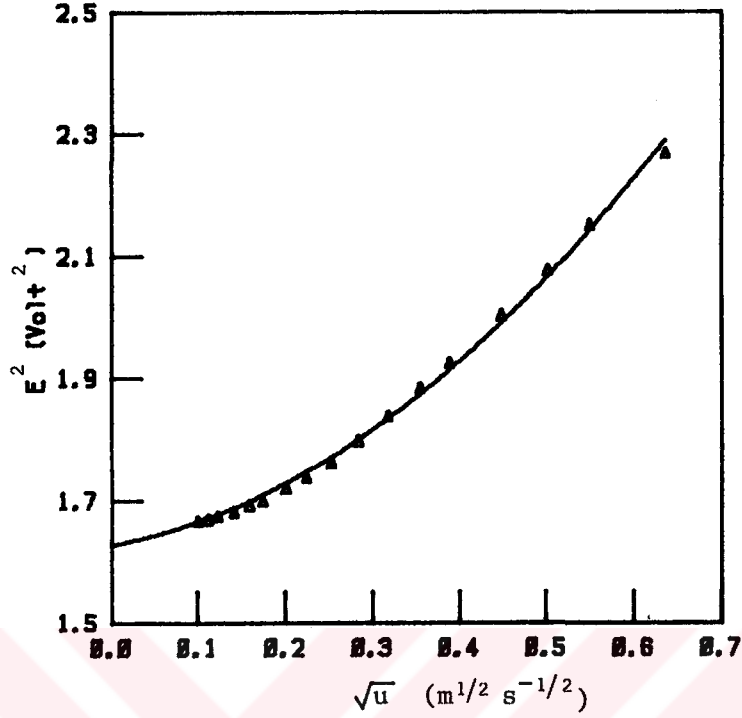
Laminer akış için yapılan deneylerde, oldukça düşük hızlarda çalışılmıştır. Bu deneylerde, T.S.I. Model 1240-20 kızgın film prob kullanılmıştır. Doğal konveksiyon ile zorunlu konveksiyonun aynı yönde etki ettiği durumda, 0.01 m/s ile 0.5 m/s aralığındaki hızlar için bulunan kalibrasyon eğrisi Şekil-A.5 de verilmektedir. E^2 ve \sqrt{U} ya göre çizilen bu eğri, Şekil-A.4 deki gibi lineer olmayıp, parabolik bir formdadır.



Şekil-A.3: Kızgın tel kalibrasyon eğrisi



Şekil-A.4: Kızgın tel lineerleştirilmiş kalibrasyon eğrisi



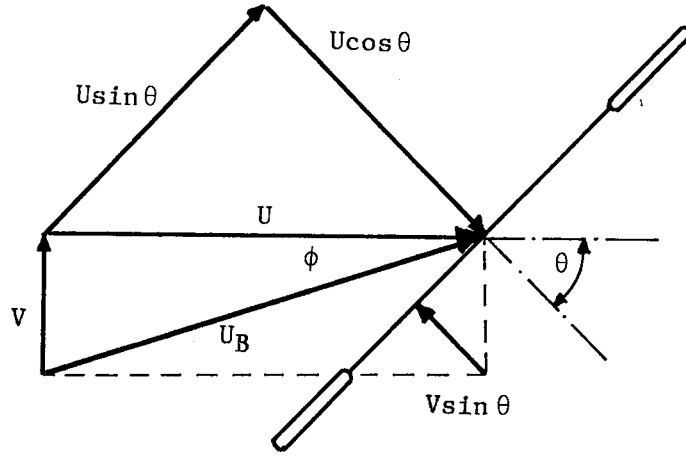
Şekil-A.5: Düşük hızlarda kalibrasyon eğrisi

B.Kızgın Tel ile Hız Ölçüm Prensibi

Bir kızgın tel veya film probun akış yönüne olan hassasiyeti, tele dik hız bileşeni ile verilmektedir. Şekil-B.1 de görüldüğü gibi, serbest akış hızının tel eksenine dik bileşenin büyüklüğü ile elde edilen efektif soğutma hızı, cosinüs kanunu olarak da adlandırılan,

$$U_{\text{eff}}^2(\theta) = U_0^2(\cos^2\theta + k^2\sin^2\theta) \quad (\text{B.1})$$

şeklindeki bir bağıntı ile verilmektedir. U_0 , serbest akış hızının büyüklüğü; θ , ortalama akış hızı ve tel normali arasındaki açıdır. Yukarıdaki bağıntıda, $k^2\sin^2\theta$ terimi, cosinüs kanunundan sapma olarak tanımlanmaktadır [57].



Şekil-B.1: Kızgın tele etkiyen hız bileşenleri

(B.1) bağıntısı, hız bileşenleri cinsinden yeniden düzenlendiğinde,

$$U_{\text{eff}}^2 = (U \cos \theta - V \sin \theta)^2 + k^2 (U \sin \theta + V \cos \theta)^2 \quad (\text{B.2a})$$

$$\theta = 0^\circ \text{ için, } U_{\text{eff}}^2 = U^2 + k^2 V^2 \quad (\text{B.2b})$$

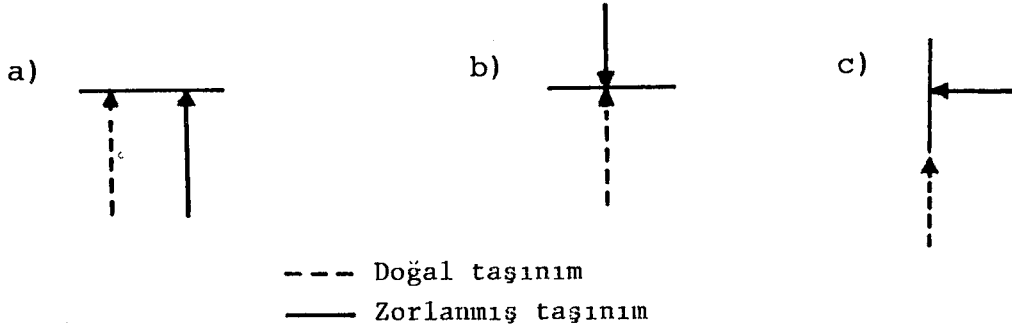
$$\theta = 90^\circ \text{ için, } V_{\text{eff}}^2 = V^2 + k^2 U^2 \quad (\text{B.2c})$$

ifadeleri elde edilmektedir. İki boyutlu akışlarda, yukarıdaki eşitlikler yardımıyla ortalama hızın yatay ve dikey bileşenleri bulunabilmektedir.

Cosinüs kanunundan sapmayı ifade eden ve deneysel olarak belirlenen k parametresi, doğal taşınımın etkilerini içermekte ve ortalama akış yönünün değiştiği durumlarda önemli bir rol oynamaktadır. Kızgın tel problemleri ile düşük hızları ölçmede ana problem, doğal ve zorlanmış taşınım arasındaki etkileşim olmaktadır.

Şekil-B.2 de şematik olarak gösterilen bu etkileşim, iki farklı durumda olmaktadır [48]:

- a) Zorlanmış taşınım ile aynı yönde doğal taşınım
- b) Zorlanmış taşınım ile ters yönde doğal taşınım



Şekil-B.2: Kızgın telde taşınım etkileri

Bundan başka, kızgın tele dik yönde zorlanmış taşınım ile tel eksenini yönünde doğal taşınım olmak üzere, üçüncü bir durum daha meydana gelmektedir. Daima yukarı doğru olan doğal taşınım için tel katsayısı, sıcaklık farkına bağlı olmaktadır. Tel sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki fark küçük ise, doğal taşınımın etkisi de küçük olmaktadır. k parametresi ayrıca, kızgın tel veya filmin uzunluk ve çap oranlarına, akış hızının büyüklüğüne göre de değişim göstermektedir. Literatürde, l tel uzunluğu, d tel çapı olmak üzere; $l/d \approx 200$ olan kızgın tel problemler için, $5 \text{ m/s} < U < 30 \text{ m/s}$ hız aralığında k nin 0.1 ile 0.3 değerleri arasında değiştiği verilmektedir [58,59]. $l/d \approx 18$ oranında silindirik kızgın film problemler için, $11.6 \text{ m/s} < U < 31 \text{ m/s}$ hız aralığında $k \approx 0.3-0.4$ olarak ifade edilmektedir [60]. Diğer bir çalışmada, 5 m/s civarındaki hızlarda, $l/d=20$ olan kızgın film problemler için, 0.35 lik bir değer verilmektedir [61]. $l/d=19$ olan alüminyum kaplı kızgın film için 0.21 ; $l/d=18$ lik kuartz kaplı film için 0.3 değerleri de önerilmektedir [62].

Deneylerde kullanılan $l/d=20$ olan T.S.I. Model 1210-20 standart, alüminyum kaplı kızgın film probun k parametresinin belirlenmesi amacıyla, film normali ve akış doğrultusu arasındaki açının 0° ve 90° olduğu konumlarda hız ölçümleri yapılmıştır.

Ortalama akış hızının 8 m/s ye kadar olan değerleri için (B.1) bağıntısından,

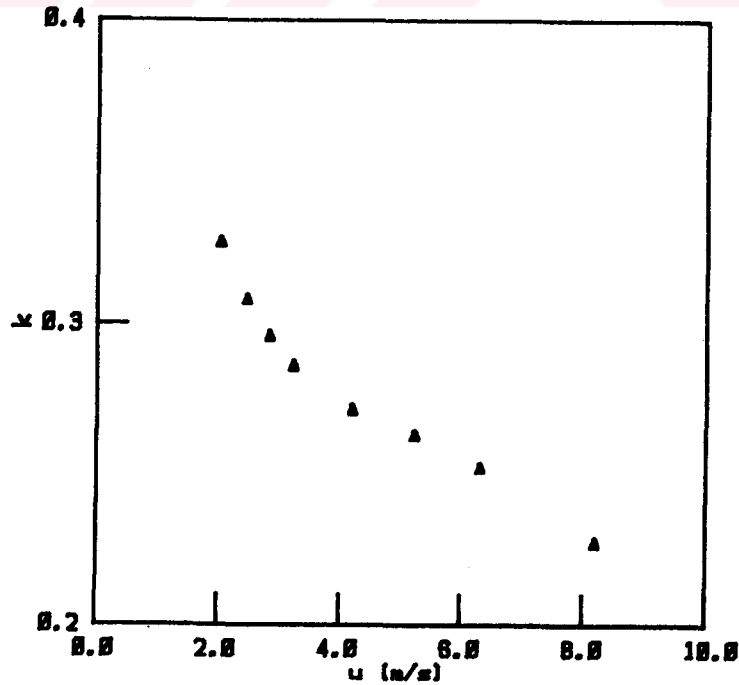
$$\theta=0^\circ \text{ için } (U_{\text{eff}}^2)_0=(U^2)_0$$

$$\theta=90^\circ \text{ için } (U_{\text{eff}}^2)_{90}=k^2(U^2)_0$$

olarak bulunan eşitliklerde k parametresi için,

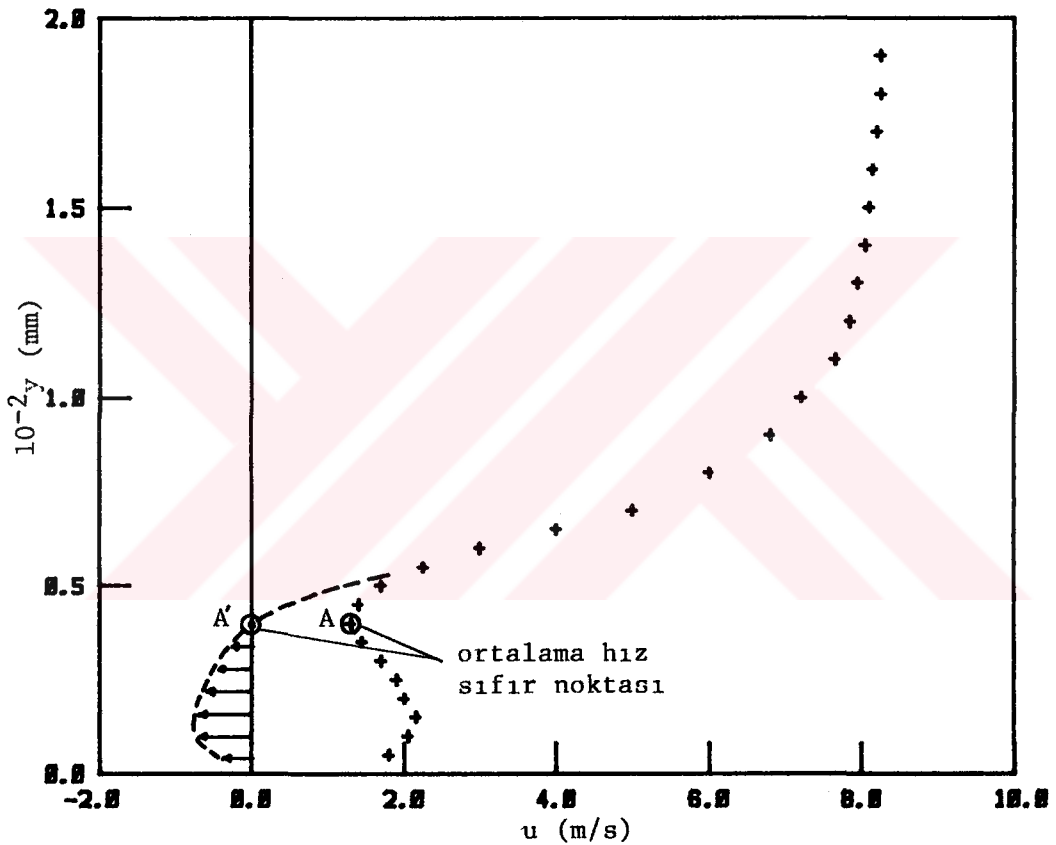
$$k = \frac{(U_{\text{eff}}^2)_{90}}{(U^2)_0} \quad (\text{B.3})$$

ifadesi elde edilmiştir. k parametresinin akış hızı ile değişimi şekil-B.3 de verilmektedir. Düşük hızlarda, k'nın 0.33'lük bir değerden, hız arttıkça azalarak 0.22 civarında bir sabite gittiği grafikten görülmektedir. Çalışmada k için sabit tek bir değer kullanmak yerine, bu değişim göz önüne alınarak, ölçüm sonuçlarının daha hassasiyetle değerlendirilmesi sağlanmıştır.



Şekil-B.3: k parametresinin akış hızı ile değişimi

Kızgın telli bir anemometrenin çıkışı, akış yönünü göstermemekte ve daima pozitif olmaktadır. Girdaplı bölgedeki ters akışlar, ortalama hız için anemometrenin çıkışında önce, bu bölgedeki türbülansın da yüksek olması nedeniyle, artmaya başlayan değerler ve sonra cidara yaklaşıldıkça azalan değerler olarak açıklanmaktadır. Başka bir deyişle, girdaplı bölgede, ortalama hız sıfır noktası için anemometrenin ortalama hız çıkışı, sıfır yerine pozitif bir değer göstermektedir.



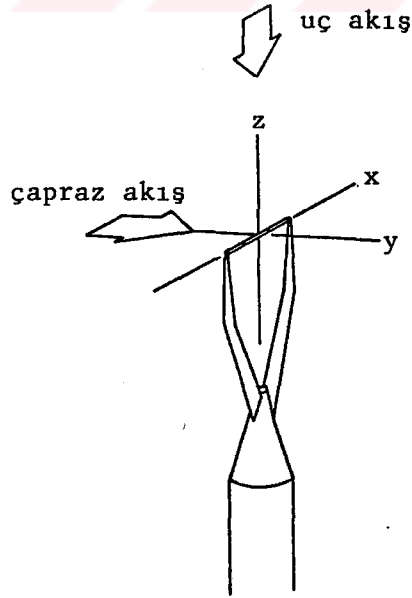
Şekil-B.4: Ters akış bölgesinde anemometre hız çıkışı

Şekil-B.4 de görülen ve Atlı [46] tarafından uygulanan yöntemde, ortalama hızın minimumdan geçtiği A noktası, ortalama hız sıfır noktasına karşılık gelmektedir. A noktası ve cidar arasındaki noktalarda, anemometrenin ortalama hız çıkışı da girdaplı bölgedeki ters akışı ifade etmektedir. Bu nedenle, bu noktalardaki ortalama hız değerlerinin negatif

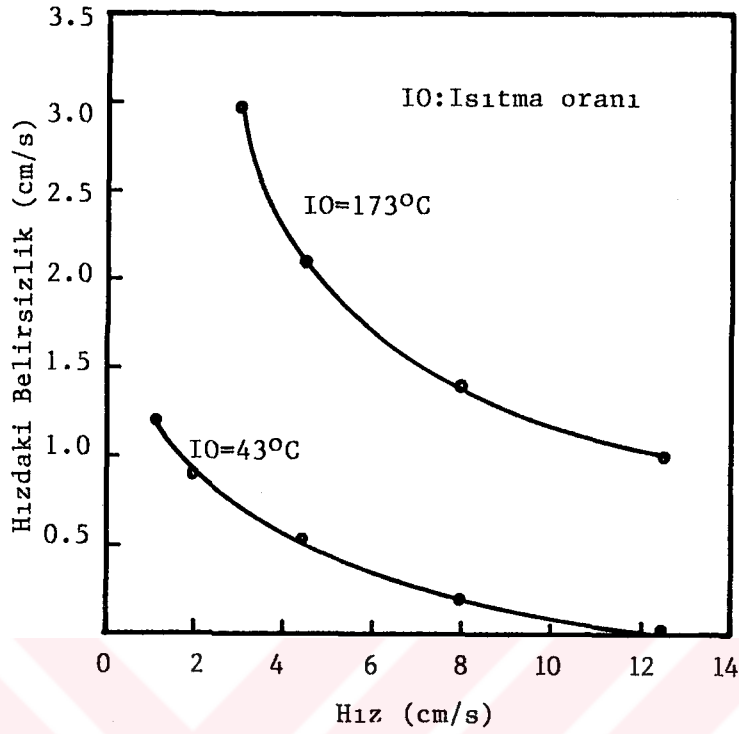
olarak dikkate alınması ve hız profillerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Çalışmada, ters akış bölgelerinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen ortalama hız profilleri, bu yöntemle göre düzeltilmiştir.

C.Hata Analizi

Kalibrasyon sırasında, kızgın tel probun kalibrasyon cihazının orta hız hücresine yeterince hassas yerleştirilememesinden kaynaklanan konum hataları meydana gelmektedir. Bu tip bir hata, 8 m/s lik bir hızda %2.4 mertebesinde olmaktadır. Düşük hız hücresinde yapılan kalibrasyonda ise, probun konumu açısından bir hata meydana gelmemektedir. Şekil-C.1 de görülen akış yönlerine göre; uç akış konumunda kalibre edilen bir prob çapraz akış konumunda kullanıldığında, 10 m/s lik hızda %11.3 civarında bir hata meydana gelmektedir [63]. Deneyler sırasında kızgın tel probun çapraz akış konumunda kullanılacağı dikkate alınarak; kalibrasyonun çapraz akış konumunda yapılması ile bu tip bir hata ortadan kaldırılmıştır.



Şekil-C.1: Kızgın tel probta akış yönleri



Şekil-C.2: Farklı ısıtma oranlarında hız belirsizliği [48]

Düşük hızlardaki ölçümlerde ana problem, doğal ve zorlanmış taşınım arasındaki etkileşim olmaktadır. Şekil-B.3 de gösterilen akış konumlarına göre, bu etkileşimin derecesi değişmektedir. Doğal ve zorlanmış taşınımın aynı yönde etki ettiği durumda, birkaç cm/s nin altındaki hızlar için hatasız okumalar yapılabilmektedir. Doğal ve zorlanmış taşınımın birbirine dik olduğu durumda, 1.3 m/s nin altındaki okumalar belirsiz olmaktadır. Doğal ve zorlanmış taşınımın birbirine zıt yönde etki ettiği konumda ise, 6 cm/s nin altındaki hız okumaları şüpheli hale gelmektedir. Kızgın tel ısıtma oranı da, düşük hız ölçümlerinde önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Kızgın tel çalışma sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark, ısıtma oranı olarak ifade edilmektedir. Şekil-C.2 de, iki farklı ısıtma oranında meydana gelen hız belirsizlikleri verilmektedir. 173°C lik yüksek ısıtma oranında, 3 cm/s lik bir hız ± 3 cm/s lik bir belirsizlikle okunabilirken; 13 cm/s de bu belirsizlik, ± 1 cm/s mertebesinde olmaktadır. 43°C lik

düşük ısıtma oranında, 3 cm/s lik hız ± 0.75 cm/s lik bir hata ile okunabilirken; 13 cm/s de belirsizlik meydana gelmemektedir [48].

Düşük hızlarda yapılan ölçümlerde, yukarıda belirtilen durumlar dikkate alınmıştır. Deney düzeneği, doğal ve zorlanmış taşınım aynı yönde etki edecek şekilde kurulmuş ve kızgın telin kalibrasyonu bu konumda yapılmıştır. Çalışmada 42.7°C olarak gerçekleşen kızgın tel ısıtma oranı ile yukarıda açıklanan hata sınırları içinde kalınmıştır.

Ö Z G E Ç M İ Ş

1958 yılında Trabzon'da doğdu. 1975 yılında Trabzon Lisesini bitirdi. 1979-1980 güz döneminde K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümün'den mezun oldu. 1981 yılında aynı bölümde, Mekanik Ana Bilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak girdi. 1982-1983 öğretim döneminde Yüksek Lisans eğitimine başladı. Mart 1984'de Makina Yüksek Mühendis ünvanını aldı. 1985 yılında Doktora çalışmasına başladı ve Nisan 1986'da Doktora yeterlilik sınavına girdi. Halen K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olup, evli ve bir çocuk babasıdır.