

**YÜKSEK BİNALAR ETRAFINDAKİ AKIŞIN SAYISAL VE DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**SEFA YILMAZTÜRK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2011**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Anabilim Dalı Başkanı

Sefa YILMAZTÜRK tarafından hazırlanan YÜKSEK BİNALAR ETRAFINDAKİ AKIŞIN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Yrd. Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Prof. Dr. Ünver Kaynak, TOBB ETÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol, TOBB ETÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Özgür Kurç, ODTÜ

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

*Sefa YILMAZTÜRK*

<b>Üniversitesi</b>	<b>: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi</b>
<b>Enstitü</b>	<b>: Fen Bilimleri</b>
<b>Anabilim Dalı</b>	<b>: Makine Mühendisliği</b>
<b>Tez Danışmanı</b>	<b>: Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL</b>
<b>Tez Türü ve Tarihi</b>	<b>: Yüksek Lisans – 2011</b>

**Sefa YILMAZTÜRK**

## **YÜKSEK BİNALAR ETRAFINDAKİ AKIŞIN SAYISAL VE DENEYSSEL İNCELENMESİ**

### **ÖZET**

Küt bir cisme etkiyen dış akış, cismin arkasında karmaşık, zamana göre değişen, girdaplı ve türbülanslı bir davranış sergiler. Cismin şekline ve akışın hızına ve yönüne göre cismin yüzeylerinde basınç farklılıkları oluşur. Bu tez çalışmasında yüksek binalar etrafındaki akış sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapısal olmayan çözüm ağları kullanılarak ve Reynolds-Ortalama Navier-Stokes denklemleri çözülerek daimi durum Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları yapılmıştır. Öncelikle, test ve doğrulama durumu olarak seçilen yerde duran tek bir küp etrafındaki akışın HAD simülasyonları farklı çözüm ağları, farklı türbülans modelleri ve farklı sınır şartları kullanılarak yapılmış ve literatürde yer alan diğer deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra, bu simülasyonlarda iyi sonuç veren türbülans modeli ve sınır şartlarını seçilerek yüksek bir bina modeli etrafındaki akış incelenmiştir. Üç farklı atmosferik sınır tabaka hız profili kullanılarak (Boş tünel ve B ve C kategorilerinde atmosferik sınır tabakalar sağlamak için kullanılan pürüzlülük elemanları olan tünel) ve iki farklı rüzgar açılarında ( $0^\circ$  ve  $30^\circ$ ), 20 cm x 15 cm x 50 cm ölçülerine sahip yüksek bir bina modeli etrafındaki akışın HAD simülasyonları yapılmıştır. Ayrıca, aynı koşullar için, Ankara Rüzgâr Tüneli'nde, bu tez kapsamında imal edilen yüksek bina modeli ile deneyler yapılmıştır. Bina modelinin ön, üst, arka ve yan yüzeylerine yerleştirilen basınç problemleri ile ortalama yüzey basınçların ölçümleri ve bina arkasında iz bölgesi içerisinde sıcak tel kullanarak hız profili ölçümleri yapılmıştır. Yapılan HAD simülasyon sonuçları deneylerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda farklılıklar olmasına rağmen deneylerle benzer eğilimler göstermiştir. Son olarak, karmaşık şekilli ve gerçek binaların ve bina gruplarının etrafındaki akışa örnek olarak TOBB ETÜ Kampüs Binaları ve TOBB ETÜ Konuk Öğrenci Evi Binaları için benzer şekilde HAD simülasyonları yapılmış ve tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Yüksek Bina Etrafındaki Akış, Atmosferik Sınır Tabaka, Rüzgar Tüneli Deneyleri

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Asst. Prof. Nilay Sezer Uzol  
**Degree Award and Date** : M.Sc. – 2011

**Sefa YILMAZTÜRK**

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW FIELD  
AROUND HIGH-RISE BUILDINGS**

**ABSTRACT**

The external flow around a bluff body shows a complex, time-dependent, vortical and turbulent behavior. According to the shape of the object and the wind speed and direction, pressure differences occur on the surfaces of the body. In this thesis study, flow around high-rise buildings are investigated numerically and experimentally. Steady-state Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are performed by using unstructured grids and by solving Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. First, CFD simulations of flow around a wall-mounted cube are performed as a validation test case by using different grids, different turbulence models and different boundary conditions and the results are compared with the other experimental and numerical studies in the literature. Then, by choosing the turbulence model and boundary conditions which give the best results in these simulations, the flow around a high-rise building model is investigated. CFD simulations around a 20 cm x 15 cm x 50 cm high rise building model are performed for three different inlet velocity profiles (empty tunnel and tunnel with the roughness elements used to have atmospheric boundary layers for B and C exposure categories) and for two different wind angles (0° and 30°). In addition, for the same conditions, the experiments are performed in the Ankara Wind Tunnel for the high-rise building model that was built during this study. The mean surface pressure measurements by using pressure taps located on the front, top, rear and side surfaces of the building model and the velocity measurements by using hot-wire velocimetry in the wake of the building model are done. The computational results are compared with the experiments. Although there are differences in the results obtained, similar trends are obtained with the experiments. Finally, as examples for flows around complex shaped real buildings and building groups, the CFD simulations for the TOBB ETU Campus Buildings and TOBB ETU Student Guest House Buildings are performed and discussed.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics (CFD), Flow Field Around High-Rise Building, Atmospheric Boundary Layer, Wind Tunnel Experiments

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bilgisinden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, yanında çalıőmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol'a teşekkür ederim.

Ankara Rüzgar Tüneli'nde deneylerin yapılabilmesi için verdikleri izin ve destekten ötürü TÜBİTAK – SAGE'ye ve yardımları için orada çalıőan teknisyen ve mühendislerle teşekkür ederim. Bu deneyler sırasında bana yardımcı olan ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Oğuz Uzol ve ODTÜ İnőaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Özgür Kurç'a teşekkür ederim.

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesinin bana sağladığı burs ve imkanlar için teşekkür ederim.

ODTÜ yüksek lisans öğrencileri Bayram Mercan, Yashar Ostovan ve Iman Ashtiani'ye; Birlikte çalıőmaktan zevk aldığım arkadaşlarım Akın Paksoy'a, Fatih Aktürk'e, Büryan Apaçoğlu'na ve Bengi Kayıőoęlu'na teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan aileme ve dostlarıma çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	4
1.1.1 Deneysel Çalışmalar	8
1.1.2 Küp Etrafında Akış için Sayısal Çalışmalar	11
1.1.3 Bina Etrafında Akış için Sayısal Çalışmalar	17
1.2. Tezin Amacı ve Konusu	24
2. SAYISAL YÖNTEMLER	25
2.1. Navier-Stokes Denklemleri	24
2.2. Konumda Ayırıklaştırma	27
2.3. Zamanda Ayırıklaştırma	29
2.4. Zamanda İlerleme Yöntemi	29
2.4.1. Açık Yöntem için CFL sayısı	30
2.4.2. Kapalı Yöntem için CFL sayısı	30
2.5. Türbülans Modelleri	31
2.5.1. Spalart-Allmaras Türbülans Modeli	32
2.5.2. Standart $k - \varepsilon$ Türbülans Modeli	33
2.5.3. RNG $k - \varepsilon$ Türbülans Modeli	34

2.5.4. Realizable $k - \varepsilon$ Türbülans Modeli	35
2.5.5. Standart $k - \omega$ Türbülans Modeli	35
2.5.6. SST $k - \omega$ Türbülans Modeli	36
2.6. Sınır Koşulları	37
2.6.1. Sıkıştırılabilir Akış Koşulları	37
2.6.2. Sıkıştırılmaz Akış Koşulları	37
2.6.3. Duvar Koşulları	37
2.7. Ard-İşleme	38
2.8. Hesaplama Kaynakları	38
3. KÜP ETRAFINDAKİ AKIŞIN İNCELENMESİ	39
3.1. Çözüm Ağı ve HAD Simülasyonlarının Özellikleri	39
3.2. HAD Simülasyonlarının Sonuçları	46
4. YÜKSEK BİNA MODELİ ETRAFINDAKİ AKIŞIN İNCELENMESİ	62
4.1. Deneysel Çalışma	67
4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları	71
4.3. Sonuçlar	75
5. KOMPLEKS GEOMETRİLİ VE ÇOKLU BİNALAR ETRAFINDA AKIŞ SİMÜLASYONLARI	85
5.1. TOBB ETÜ Kampüs Binaları Etrafında Akış Simülasyonları	85
5.2. TOBB ETÜ Konuk Öğrenci Evi Binaları Etrafında Akış Simülasyonları	89
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	93
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	104



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 1.1	Literatürdeki Deneysel Çalışmalar	5
Çizelge 1.2	Küp için Literatürdeki HAD Simülasyonları	6
Çizelge 1.3	Bina için Literatürdeki HAD Simülasyonları	7
Çizelge 2.1	Bilgisayar Özellikleri	38
Çizelge 2.2	Hesaplama Zamanı	38
Çizelge 3.1.	Çözüm Ağı Özellikleri	41
Çizelge 3.2	Türbülans Modellerinin Karşılaştırması (Ayrılma ve Birleşme Noktaları)	51
Çizelge 4.1.	B ve C Kategorilerindeki Sınır Tabaka Hız Profili Parametreleri	64
Çizelge 4.2.	Yüzey Pürüzlülük Elemanlarının Özellikleri [20]	66
Çizelge 4.3.	Test Koşullarının Fiziksel Özellikleri	68
Çizelge 4.4.	Çözüm Ağının Özellikleri	72
Çizelge 5.1.	Kampüs Binaları Çözüm Ağı Özellikleri	87
Çizelge 5.2.	Konuk Öğrenci Evi Binaları Çözüm Ağı Özellikleri	89

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1	Yüksek Bina Örnekleri	2
Şekil 1.2	Bina Etrafında Akış [3]	3
Şekil 1.3.	Burj Dubai Bina Modelinin Rüzgar Tünelinde Deneyi, (RWDI, Kanada) [4]	4
Şekil 2.1.	Kütle Akışı [76]	25
Şekil 3.1.	Küp Simülasyonu için Hesaplama Alanı	40
Şekil 3.2.	Çözüm Ağının Yandan ve Önden Görünüşü, a) Çözüm Ağı I, b) Çözüm Ağı II, c) Çözüm Ağı III	42
Şekil 3.3.	Çözüm Ağının Yandan ve Önden Görünüşü, a) Çözüm Ağı IV, b) Çözüm Ağı V, c) Çözüm Ağı VI	43
Şekil 3.4.	Küpün Ön Yüzeyinde Ortalama Basınç Dağılımı: a) Farklı Sayıda Hücreye Sahip Yapısal Olmayan Çözüm Ağları ile Elde Edilen ve b) En Sık Yapısal Olmayan Çözüm Ağı ve Yapısal Çözüm Ağı ile Edilen Çözümlerin Karşılaştırılması	44
Şekil 3.5.	Ön, Üst ve Arka Yüzeylerde Ortalama Basınç Katsayısı Dağılımı (Sıkıştırılabilir ve Sıkıştırılamaz Akış Durumları için Çözümlerin Karşılaştırılması)	45
Şekil 3.6.	Yakınsama Grafiği (Çözüm Ağı V)	46
Şekil 3.7.	Girdabın Merkezinden Alınan Nokta Üzerindeki Hızın Zamanla Değişimi	46
Şekil 3.8	Küp Etrafındaki Akışın Karakteristik Özellikleri	47
Şekil 3.9.	Merkezden Geçen Yatay ve Dikey Düzlemler Üzerindeki Basınç Konturları ve Akış Çizgileri	48

Şekil 3.10	Küp Etrafındaki 3-Boyutlu Akışın Hız Büyüklüğü ile Renklendirilmiş Akış Kurdelaları (ribbon) ile Görünümü	49
Şekil 3.11	Farklı Bölgelerdeki Hız Profilleri	50
Şekil 3.12.	Farklı Türbülans Modelleri ile Hız Profilleri @ $y = 0$ ve $x = L$ (Küp Önünde)	51
Şekil 3.13.	Farklı Türbülans Modelleri ile Hız Profilleri @ $y = 0$ ve a) $x/L = 0.5$ ve b) $x/L = 1$ (Küp Üstünde)	52
Şekil 3.14.	Farklı Türbülans Modelleri ile Hız Profilleri @ $y = 0$ ve a) $x/L = 3$ ve (b) $x/L = 4$ (Küp Arkasında İz Bölgesinde)	53
Şekil 3.15.	Merkezden Geçen Dikey Düzlemler Üzerindeki Basınç Konturları ve Akış Çizgileri a) $R.k - \varepsilon$ , b) $STD k - \varepsilon$ , c) $RNG$ d) $STD k - \omega$ , e) $SST$ , f)	54
Şekil 3.16.	Literatürden Sonuçlar: a) DNS [40], b) Deney [8]	55
Şekil 3.17	Basınç Katsayısı Dağılımı (Dikey düzlemdeki A, B, C çizgileri üzerinde)	56
Şekil 3.18	Basınç Katsayısı Dağılımı (Yatay düzlemdeki D, A, B, C çizgileri üzerinde)	56
Şekil 3.19	DeneySEL Türbülans Kinetik Enerjisi Konturları (Murakami ve Mochida [8])	57
Şekil 3.20	Farklı Türbülans Modelleri ile Türbülans Kinetik Enerjisi Konturları: a) $R.k - \varepsilon$ , b) $STD k - \varepsilon$ , c) $RNG$ , d) $STD k - \omega$ , e) $SST$	58
Şekil 3.21	Küp Etrafındaki Akış DNS Çözümleri: $x$ -Yönündeki Girdap Şiddeti Konturları (Yakhot [40])	59
Şekil 3.22	Farklı Türbülans Modelleri ile Girdap Şiddeti Konturları ( $x$ -yönünde): a) $R.k - \varepsilon$ , b) $STD k - \varepsilon$ , c) $RNG$ , d) $STD k - \omega$ , e) $SST$	60
Şekil 3.23	Toplam Girdap Şiddeti Eş YüzeYleri	61
Şekil 4.1.	ASCE 7-05 Standartlarına Göre Kategorilerin Özellikleri [20]	63
Şekil 4.2.	B ve C Kategorilerine Göre Atmosferik Sınır Tabaka Hız Profilleri	64

Şekil 4.3.	TUBİTAK SAGE Ankara Rüzgar Tüneli	65
Şekil 4.4.	Pürüzlülük Elemanları, a) C tipi Sınır Tabaka ve b) B Tipi Sınır Tabaka	66
Şekil 4.5.	Sınır Tabaka İçinde Yüksek Bina Modeli, a) Boş Tünel, b) C tipi ve c) B Tipi	67
Şekil 4.6.	Yüksek Bina Modelinin a) 0° ve b) 30° Rüzgar Açısı için Görünümleri	68
Şekil 4.7.	Yüksek Bina Modeli Üzerindeki Basınç Delikleri	69
Şekil 4.8.	Bina Modeli Simülasyonu için Hesaplama Alanı	71
Şekil 4.9.	Çözüm Ağı, a) Üstten Görünüm, b) Yandan Görünüm	72
Şekil 4.10.	Yakınsama Grafiği	74
Şekil 4.11.	Kontrol Noktasında Zamana Göre Hız Değişimi	74
Şekil 4.12.	0° Rüzgar Açısında Akış Çizgileri ve Basınç Konturları	76
Şekil 4.13.	30° Rüzgar Açısında Akış Çizgileri ve Basınç Konturları	77
Şekil 4.14.	0° Rüzgar Açısı için Basınç Katsayısı Dağılımları	78
Şekil 4.15.	30° Rüzgar Açısı için Basınç Katsayısı Dağılımları	79
Şekil 4.16.	Ön ve Arka Hız Profillerinin Yeri ile Bina Arkasında Seçilmiş Kontrol Noktasının Yeri	80
Şekil 4.17.	Binanın 0.1 cm Önünde B Tipi Sınır Tabaka Hız Profilleri	81
Şekil 4.18.	Binanın 0.1 cm Önünde C Tipi Sınır Tabaka Hız Profilleri	81
Şekil 4.19.	Boş Tünel için Bina Modeli Arkasındaki Hız Profilleri	83
Şekil 4.20.	0° Rüzgar Açısında B ve C Tipi Sınır Tabakalar için Bina Arkasındaki Hız Profilleri	83
Şekil 4.21.	30° Rüzgar Açısında B ve C Tipi Sınır Tabakalar için Bina Arkasındaki Hız Profilleri	84
Şekil 5.1.	Ana Bina Fotoğrafı (I. Bina)	85

Şekil 5.2.	Sosyal Tesisler Bina Fotoğrafi (II. Bina)	86
Şekil 5.3.	TEPAV Binası Fotoğrafi (III. Bina)	86
Şekil 5.4.	Kampüs Binaları için Çözüm Ağı	87
Şekil 5.5.	Kampüs Binalarının Yüzeylerindeki Basınç Konturları	88
Şekil 5.6.	Kampüs Binalarının Etrafında Akım Çizgileri ve Hız Konturları	88
Şekil 5.7.	Konuk Öğrenci Evi Binalarının Görünümü	89
Şekil 5.8.	Konuk Öğrenci Evi Binaları için Çözüm Ağı	90
Şekil 5.9.	Konuk Öğrenci Evi Binası Üzerindeki Çözüm Ağının Detaylı Görünümü	90
Şekil 5.10.	Konuk Öğrenci Evi Binalarının Yüzeylerindeki Basınç Konturları	91
Şekil 5.11.	Konuk Öğrenci Evi Binaları Etrafında Akım Çizgileri ve Hız Konturları	91

## KISALTMALAR

### Kısaltmalar Açıklama

ABL	Atmosferik Sınır Tabaka (Atmospherical Boundary Layer)
DES	Ayrılmış Girdap Simülasyonu (Detached Eddy Simulation)
DNS	Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation)
POD	Dikgen Ayrıştırma Metodu (Proper Orthogonal Decomposition)
RANS	Reynolds-Ortalımalı Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)
RNG	Renormalizasyon Grubu (Renormalization Group)
RSM	Reynolds Gerilmeleri Modellemesi (Reynolds Stress Modeling)
RWDI	Rowan Williams Davies and Irwin Inc.
SANAE IV	Ulusal Güney Afrika Antartika Keşif Gezisi (South African National Antarctic Expedition)
S-A	Spalart-Allmaras
SST	Shear Stress Transport (Kesme Gerilmesi Taşınımı)
URANS	Zamana-bağlı Reynolds-Ortalımalı Navier-Stokes (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

## SEMBOL LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\vec{A}$	Yüzey alanının vektörü
$C_p$	Basınç katsayısı
$C_{b2}$	Türbülans sabiti
$D$	Kenar Uzunluğu
$D_w$	Yitim denklemine eklenmiş terim
$F$	Kuvvet
$G_k$	Kinetik enerjiden kaynaklı türbülans üretimi
$G_v$	Türbülans üretimi
$H$	Yükseklik
$k$	Türbülans kinetik enerjisi
$P$	Basınç
$R$	Yitim denklemine eklenmiş terim
$Re$	Reynolds sayısı
$S$	Kaynak terimi
$t$	Zaman
$t^*$	Boyutsuz zaman
$U$	Akış hızı
$u$	Üfleme hızı
$u'$	Hızdan sapma değeri
$u_T$	Duvara yakın bölgedeki kesme hızı
$\tilde{\nu}$	Türbülans kinematik viskozitesi
$\vec{U}$	Hız vektörü
$Y_M$	Salınım
$Y_v$	Türbülans yıkımı
$\Gamma$	Difüzyon katsayısı
$\Delta s$	Yer değiştirme büyüklüğü
$\Delta t$	Zaman adımı büyüklüğü
$\mu$	Dinamik viskozite
$\mu_t$	Türbülans dinamik viskozitesi
$\rho$	Yoğunluk
$\bar{\tau}$	Gerilim tensörü

$\omega$	Türbölans yitimi hızı
$\sigma_{\bar{v}}$	Türbölans sabiti
$\phi$	Hücre merkez değeri



## 1. GİRİŞ

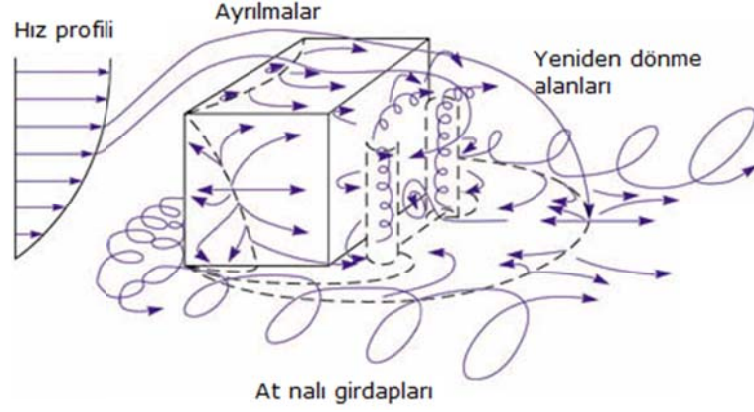
Rüzgar mühendisliği uygulamalarında yüksek binaların tasarımı ve analizleri bu yüksek binalar etrafındaki akışın etkilerinin incelenmesini de gerektirmektedir. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi atmosferik sınır tabaka içerisinde yüksek rüzgar hızlarına maruz kalan veya karmaşık kentsel arazinin içerisinde yerleştirilmiş olan bu karmaşık yapıdaki yüksek binaların etrafındaki akışın karakteristiğini ve üzerindeki aerodinamik kuvvetleri tahmin etmek oldukça zordur. Yüksek binalar yüksek rüzgar hızı koşullarında karmaşık akışlara ve bu akışın etkilerinden dolayı zamana bağlı kuvvet ve momentlere maruz kalmaktadır [1]. Türkiye'deki yüksek binaların sayısı hızla artmaktadır. Tasarım aşamasında akış etkilerinin yaratacağı kuvvet ve momentlerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gereklidir. Bunun yanında binaların birbirine göre konumlarının ve birbirleri arasındaki yol ve yaya alanlarının tanımlanması gibi konularda ve hava kirliliği, zehirli gazların dağılımı, yangın yayılımı, patlamalar gibi alternatif konulara da faydası olacaktır. Yüksek bina gibi küt cisimler etrafında akışı anlayabilmek ve doğru çözebilmek için bir küp veya dikdörtgen cisim etrafında akışı bir test durumu olarak incelemek yararlı olmaktadır. Geometri oldukça basit gözükse de akış alanı türbülanslı ve girdaplı yapılar içermektedir. Bu basit geometrilerin incelenmesi ayrılmalar, yeniden bağlanmalar gibi karmaşık akış karakteristiklerinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Çoklu bina konfigürasyonu etrafında akışı incelemeyen önce tek bir bina etrafındaki akışı inceleyerek öncelikle akışın nasıl bir davranış sergileyeceği anlaşılmalıdır. Bina etrafında akış olgusunu anlamak zor değildir; fakat sayısal açıdan bakıldığında atmosferik sınır tabaka ile etkileşim içerisine girdiğinde, binanın büyüklüğüne, şekline, binaların dizilimine göre bina etrafında akışın binaya yarattığı etkileri hesaplamak ve anlamak zorlaşmaktadır [1]. Atmosferik sınır tabaka ve atmosferik türbülans altında kalan binaya gelen rüzgarın yönü ve ani olarak şiddeti değiştiğinde de akışın karakteristiği değişmektedir.



Şekil 1.1 Yüksek Bina Örnekleri

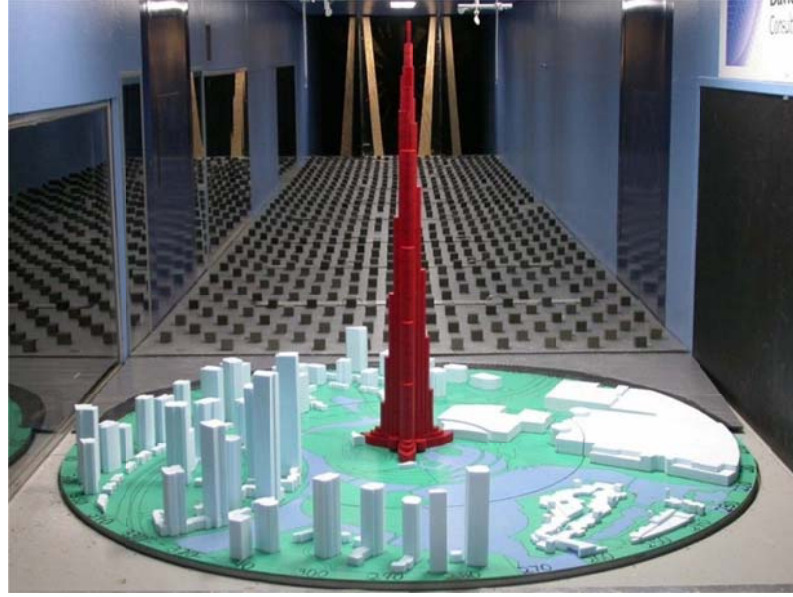
Küt bir cisme etkiyen dış akış, cismin arkasında karmaşık ve zamana göre değişen bir davranış sergiler. Akışın çarptığı bölgelerde cismin şekline ve akışın hızına göre basınç farklılıkları yaratır. Farklı Re sayısına sahip türbülanslı sınır tabaka içerisinde yer alan küt cisimler etrafındaki akışın karakteristiği benzerdir [2]. Rüzgar gelen ön yüzeyde pozitif basınç alanları oluşurken üst, yan ve arka yüzeylerde negatif basınç alanları oluşmaktadır [2]. Bu farklılıklar Şekil 1.2’de görüldüğü gibi ayrılmalara, yeniden bağlanmalara, türbülanslı ve girdaplı akışa ve akım çizgilerinin zamanla değişmesine neden olmaktadır [2]. Küt cisme, veya bu çalışmada ele alınan küp veya binaya, yaklaşan akış yavaşlamakta ve binaya çarptıktan sonra yanlardan hızını arttırarak geçmektedir. Bu durum akışın dengesiz yön değişiminin büyüklüğü ve mukavemetine göre binanın ön alt köşesinde bir girdabın oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca binanın önünde yere yakın yerde kopan akış yanlara ve arkaya doğru uzanarak alt nalı şeklinde girdaplar oluşturur. Binanın üst köşesinden kopan akış ve at nalı girdapları bina arkasındaki iz bölgesinin oldukça karmaşık olmasına sebep olmaktadır. Yalnızca iki boyutlu akışta bina üst köşesinden ayrılan akış binanın üst yüzeyinin belirli bir noktasında yeniden bağlanma hareketi yapabilir. Üç boyutlu akışta ise ayrılmanın başlayıp yeniden bağlanmanın bittiği sabit bir bölge bulunmamaktadır. Bunu sebebi binanın üst köşelerinde yığılmış olan girdaplar zamana bağlı olarak akışı bozmakta ve bina arkasında oluşan yeniden dönmeleri de

etkilemektedir. Bu yeniden dönmelerin bozulup tekrar oluşması ise zamanla olmaktadır ve bu durum akışın üç boyutlu, zamana bağlı ve karmaşık olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.2 Bina Etrafında Akış [3]

Rüzgârın yüksek binalara olan etkilerini incelemek üzere bu tür problemlerin çözümü için rüzgâr tüneli testleri yapılmaktadır (Şekil 1.3). Rüzgâr tüneli testleri hiç şüphesiz çok faydalı ve çoğu durumun incelenmesi için pratikte uygulanabilecek tek yöntem olma özelliğine sahiptir. Buna rağmen rüzgâr tünelinde rüzgârın etki ettiği tüm çevrede atmosferik sınır tabaka akışlarını birebir gerçeği ile doğru bir şekilde oluşturmak zordur hatta oluşturulamayabilir. Sayısal rüzgâr mühendisliğinde bu sınırlandırmaların üstesinden gelebilmek için sayısal yöntemler uygulanmaktadır. Bilgisayar gücünün artması ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları mümkün olabilmektedir. Bu tür karmaşık akış problemlerinin üç boyutlu ve zamana bağlı çözülmesi gerekmektedir. Kullanılan bu sayısal yöntemler ne kadar geliştirilebilirse, ileride sayısal modellemede, küt cisimler ve doğal ortamlardaki rüzgâr etkilerinin incelenmesinde, simülasyonlarının yapılmasında, bu yöntemler temel bir araç haline gelecektir.



Şekil 1.3 Burj Khalifa Bina Modelinin Rüzgar Tüneli Deneyi (RWDI, Kanada) [4]

### 1.1. Literatür Araştırması

Literatürde küp, bina modelleri ve bina grup modelleri etrafında akış için birçok deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Çizelge 1.1’de literatürdeki deneysel çalışmaların bir özeti gösterilmiştir. Bu çizelgede farklı Re aralıklarında saha testleri ve belli bir ölçeklendirmeye sahip bina modellerinin rüzgar tüneline deneyleri sunulmuştur.

Çizelge 1.2’de küp etrafında akışı sayısal olarak inceleyen çalışmalar özetlenmektedir. HAD ile yapılan bu çalışmalarda farklı türbülans modelleri kullanılarak akış karakteristikleri incelenmiştir. Bilgisayar gücünün artması ile LES ve zamana bağımlı çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır.

Çizelge 1.3’de ise bina modelleri ve bina grupları etrafında akışı sayısal olarak inceleyen çalışmalar özetlenmektedir. HAD ile yapılan bu çalışmalarda yine farklı türbülans modelleri kullanılarak farklı büyüklükteki bina modelleri etrafında akış karakteristikleri incelenmiştir.

Çizelge 1.1 Literatürdeki Deneysel Çalışmalar

YIL	ÇALIŞMA	TAM ÖLÇEK	ÖLÇEK	Re
1963	Baines [5]	-	-	$1 \times 10^5$
1977	Castro ve Robins [6]	60 m	1:300	$1 \times 10^5$
1982	Hunt [7]	-	-	$1 \times 10^5$
1988	Murakami ve Mochida [8]	55 m	1:400	$1 \times 10^5$
1997	Marwood ve Wood [9]	0.2 m	-	-
1998	Olscher ve Niemann [10]	-	-	-
2002	Richards ve Hoxey [11]	6 m	-	-
2003	Nakamura vd [12]	0.33 m	-	$33 \times 10^3$
2004	Beyers [13]	2 m	-	-
2005	Gomes vd [14]	0.3 m	-	$2 \times 10^5$
2005	Tulapurkara vd [15]	-	-	-
2006	Richards vd [16]	6 m	-	-
2007	Richards ve Hoxey [17]	6 m	1:40	-
2007	Richards ve Hoxey [18]	6 m	-	-
2008	Maruyama vd [19]	2.4 m	-	-
2009	Shojaee vd [20]	-	-	-
2010	Köse ve Dick [21]	0.3 m	-	-

Çizelge 1.2 Küp için Literatürdeki HAD Simülasyonları

YIL	ÇALIŞMA	KÜP	MODEL	Re
1988	Murakami ve Mochida [8]	H:H:H	$k-e$	-
1997	Tsuchiya vd [22]	H:H:H	$k-e$	-
1997	Tominaga vd [23]	0.2 m	LES	$5.7 \times 10^3$
1997	Thomas ve William [24]	H:H:H	LES	-
1997	He ve Song [25]	0.2 m	$k-e$ DSM LES	$8.4 \times 10^4$
1997	Lakehal ve Rodi [26]	H:H:H	$k-e$	$4 \times 10^4$
1997	Scanlon [27]	H:H:H	$k-e$	-
1997	Lee ve Bienkiewicz [28]	H:H:H	LES	$4 \times 10^4$
1997	Rodi [29]	H:H:H	LES	$4 \times 10^4$
1997	Shah ve Ferziger [30]	H:H:H	LES	$4 \times 10^4$
1999	Thomas ve Williams [31]	H:H:H	LES	$1 \times 10^4$
2000	Haj vd [32]	H:H:H	LES DNS	-
2002	Niceno vd [33]	H:H:H	LES	-
2002	Alfonso vd [34]	H:H:H	LES	$4 \times 10^4$
2002	Schmidt ve Thiele [35]	H:H:H	LES DNS	$1.3 \times 10^4$
2003	Iccarino vd [36]	H:H:H	LES	-
2003	Cheng vd [37]	H:H:H	$k-e$ LES	-
2004	Richards ve Hoxey [38]	H:H:H		-
2004	Gao ve Chow [39]	H:H:H	$k-e$	-
2005	Gomez vd [14]	0.3 m	RNG	$2 \times 10^5$
2006	Richards vd [16]			
2006	Yakhov vd [40]	H:H:H	DNS	-
2006	Saha [41]	H:H:H		200-300
2007	Hargreaves ve Wright [42]	H:H:H	$k-e$	-
2008	Hemida vd [43]	H:H:H	LES	-
2008	Ono ve Kataoka [44]	H:H:H	LES	-
2008	He vd [45]	H:H:H	LES	$2 \times 10^4$
2008	Paik [46]	H:H:H	SA DES	-
2010	Köse ve Dick [21]	0.3 m	LES	-

Çizelge 1.3 Bina için Literatürdeki HAD Simülasyonları

YIL	ÇALIŞMA	BİNA	MODEL	Re
1990	Başkaran [47]	30 x 30 x 60 m	$k-e$	-
1993	Zhang [48]	-	$k-e$	-
1997	He ve Song [49]	-	LES	$1.2 \times 10^6$
1997	Richardson vd [50]	6 m	$k-e$	-
1997	Michel vd [51]	40 m	$k-e$	-
1997	Li ve Stathopoulos [52]	-	$k-e$	-
1997	Sarkar vd [53]	-	-	-
1997	Selvam [54]	-	LES	-
1999	Kim ve Boysan [55]	-	$k-e$ RNG LES	-
1999	Meroney vd [56]	7H:15H:4H 10H:20H:5H 10H:20H:6H	$k-e$ RNG RSM	-
2002	Nozawa ve Tamura [57]	-	LES	-
2002	Kim [58]	-	LES	$22 \times 10^3$ $20-2 \times 10^6$
2003	Chang ve Meroney [59]	9.2 x 13.8 x 4 m	$k-e$	-
2004	Bekele [60]	9.2 x 13.8 x 4 m	LES	-
2004	Tutar ve Oğuz [61]	20 x 20 x 20 m 20 x 20 x 20 m 20 x 40 x 20 m	$k-\varepsilon$ RNG LES	$7 \times 10^4$ $79 \times 10^4$ $3.6 \times 10^6$
2004	Paik vd [62]	-	$k-\varepsilon$ DES	$1 \times 10^5$
2005	Chung [63]	9.2 x 13.8 x 4 m	LES	-
2007	Blocken vd [64]	40 x 20 x 20 m	$k-\varepsilon$	-
2007	Kasperski [65]	-	-	-
2008	Omidyeganeh [66]	-	LES	-
2008	Sohankar [67]	2H:2H:H	LES	-
2008	Blocken vd [68]	-	$k-\varepsilon$	-
2008	Caracoglia vd [69]	-	-	-
2008	El-Okda vd [70]	-	LES	-
2008	Rokugou vd [71]	-	LES	-
2008	Tominaga vd [72]	1:1:2	$k-\varepsilon$ LES	-
2008	Sengupta vd [73]	0.229 m	LES	-
2008	Tamura vd [74]	-	-	-
2008	Tamura vd [75]	200 x 200 x 100 m	-	-

### 1.1.1 Deneysel Çalışmalar

Baines [5] bir küpün yüzeyindeki basınçları ve akış alanındaki hız dağılımlarını inceleyerek rüzgar yüklerine etkisini ve akış çizgilerini elde eden deneysel bir çalışma yapmıştır.

Castro ve Robins [6] yere yerleştirilmiş bir küp üzerine düzgün bir hız dağılımı ile gelen akışın etkilerini ve küp yüzeylerindeki basınçların dağılımını incelemek üzere deneysel bir çalışma yapmıştır.

Hunt [7] farklı ölçeklerde kübik bina modelleri etrafında akışı incelemek için rüzgar tüneline yüzey basınçlarının ölçümlerini yapmıştır.

Murakami ve Mochida [8] yaptığı çalışmada bir küp modeli etrafında akışı incelemek üzere rüzgar tüneline deney yapmış ve  $k - \varepsilon$  türbülans modeli kullanarak üç boyutlu simülasyon ile karşılaştırmıştır.

Marwood ve Wood [9], Oxford Üniversitesindeki 4 m x 2 m kesitli rüzgar tüneline anlık basınç ve hız ölçümleri yaparak, üst yüzeydeki girdapların pozisyonlarının belirlenmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu girdapların görülmesi için “Quasi-Steady” metodu kullanılmıştır. Bu teorinin temel prensibi, rüzgarın farklı yönlerde ani olarak şiddetli esmesi sonucu ortalama hızın değişkenlik göstermesini incelemesidir.

Olscher ve Niemann [10] rüzgar tünellerinde ölçümlerin doğru alınabilmesi kapsamında farklı koşullarda yere yerleştirilmiş bir küp etrafında akış için testler yapmıştır.

Richards ve Hoxey [11] 6 m’lik küp üzerinde farklı iki pozisyonda akışın hızlarını ölçebilmek için dört tane ultrasonik anemometreler kullanmıştır. Bu çalışmanın



sonucunda küpün yan yüzeylerindeki akışın karakteristiğinin zamana bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Nakamura vd [12] akışın geldiği yöne göre 45° açıyla yerleştirilmiş olan bir küpün etrafındaki akışın karakteristiğini ve ısı transferini deneysel bir çalışma yaparak incelemiştir.  $Re = 4.2 \times 10^3$  ve  $3.3 \times 10^4$  için yapılan bu çalışmanın sonucunda yeniden bağlanmaların, ayrılmaların olduğu bölgelerde yüksek ısı transferi ve düşük basınçların oluştuğu gözlemlenmiştir.

Beyers vd [13] üç boyutlu bir küp etrafında kar birikintilerinin etkisini incelemek üzere  $k - \varepsilon$  türbülans modelini kullanarak kar yüzünden meydana gelecek değişimler için momentum denklemlerine ek parametreler ekleyerek simülasyonlar yapmış ve Antartika'daki SANAE IV projesindeki deneysel çalışma ile karşılaştırmıştır. Bu çalışma çığ ve erozyon olaylarının simülasyonu için ön bir çalışma niteliğinde olmuştur.

Gomez vd [14] 1:100 ölçekli küp, L ve U şekilli modeller üzerinde rüzgar basınçlarını deneysel ve sayısal olarak ölçmüş ve hesaplanmıştır. L ve U şekilli modellerde tek blok modellinden farklı duvar basınç dağılımları gözlenmiştir. PHOENICS CFD programı ve RNG türbülans modeli kullanılmıştır.

Tulapulkara vd [15] rüzgar tüneli içerisine farklı mesafelerde ard arda dizilmiş küplerin arkasındaki iz bölgesinde üç ekseninde hız profillerini ölçmüştür. Küplerin aralarındaki mesafelere göre birbirlerine etkilerini incelemeyi ve yapılacak olan simülasyon çalışmalarına veri sağlamayı amaçlamıştır.

Richards vd [16] rüzgar tüneline yerleştirilen bir küpü, rüzgar yönünde ısıtarak termal etkileri incelemiştir. ATREUS projesi kapsamında mikro ölçekteki sayısal modeller kullanılarak yapılan simülasyonlar enerji verimliliğinin araştırılmasına yardımcı olmak için yapılmıştır. Elde edilen hız profilleri küp arkasındaki sıcaklık dağılımını oldukça etkilemiştir. Sıcaklık dağılımında ani bir değişim gözlenmiştir.

Richards vd [17] açık alanda 6m'lik bir küp üzerine yerleştirilmiş basınç noktalarından alınacak ölçümlerle dört farklı rüzgar açısında anlık ve ortalama basınçları ölçmüştür.

Richards vd [18] Auckland üniversitesindeki 6 m'lik Silsoe küpünün 1:40 ölçekli modeli ile rüzgar tüneline türbülans şiddetlerinin, basınç katsayılarının hangi frekanslarda değiştiğini incelemek üzere deneyler yapmıştır.

Maruyama vd'nin [19] yaptığı çalışmada açık alanda bir küpün üzerine yerleştirilmiş basınç ölçerler yardımıyla ve hız için anemometreler yardımıyla türbülanslı akışın karakteristiği incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda D yüksekliğindeki bir küpten 0.9 D yatay mesafe uzaklıkta basınç ve akış karakteristiklerinin güçlü korelasyonlara sahip olduğu görülmüştür.

Shojaee vd [20] Ankara Rüzgar Tüneli'nde atmosferik sınır tabaka (ABL) karakteristiğini elde edebilmek için rüzgar tünelinin girişine koyulmak üzere pürüzlülük elemanlarının tasarımını ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarını yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda deney yapılmadan önce tünelin çalışma zamanı ve gereken harcamalar için ön bilgi elde edilmiş; pürüzlülük elemanları üretilmiş ve ileriki çalışmalarında yapılmış ve yayınlanma aşamasındadır. Bu çalışmada bazı sonuçları kullanılmıştır.

Köse ve Dick [21] kübik bir bina modeli etrafında akışı incelemek için deneysel ve sayısal bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada LES,  $k-\varepsilon$  ve  $k-w$  türbülans modelleri kullanarak elde edilen hız profilleri ve yüzey basınçlarının karşılaştırmasını yapmıştır.

### 1.1.1 Küp Etrafında Akış için Sayısal Çalışmalar

Tsuchiya vd'nin [22] yaptığı çalışmada küp etrafındaki akışın karakteristiği incelenirken küpün üst yüzeyinde meydana gelen ayrılmaların türbülans kinetik enerjisine etkisi incelenmiş, meydana gelen hataları düzeltebilmek için  $k-e$  türbülans modeli geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda, geliştirilen modellerde küp yüzeyindeki basınçlar standart modellere göre deneylerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuç vermiştir.

Tominaga vd'nin [23] küp etrafında zaman ortalamalı gazların yayınımlarını,  $L = 0.2$  m ve  $Re = 5.7 \times 10^3$  için, LES türbülans modeli kullanılarak hibrit ağ tekniği ile incelemiştir. Farklı hücre tipleri kullanan hibrit ağ ile tek tip hücreli ağlara kıyasla daha iyi sonuç elde edileceği görülmüştür. Sayısal metodlarda, zamanda ilerleme için zaman adımı  $1 \times 10^{-3}$  seçilmiş, taşınım terimlerinde ikinci mertebe Adams-Bashforth yöntemi, yayınımlar terimlerinde de Crank-Nicolson yöntemi kullanılmıştır.

$45^\circ$ 'lik açıyla yerleştirilmiş olan bir küpün simülasyonu için paralel bilgisayarda çözdürmek üzere Thomas ve William [24] LES modeli kullanarak bir kod yazmıştır. Bu kodda sonlu elemanlar yöntemi ve Poisson çözücü kullanılmaktadır. Bu çalışmada LES modeli ile zamana bağlı akışın karakteristiğinin görülmesi önemli ölçüde sağlanmıştır.

200 mm'lik bir küp etrafındaki akışı, He ve Song [25]  $Re = 8.4 \times 10^4$  için farklı türbülans modelleri kullanarak ( $k-\varepsilon$ , DSM, LES) incelemiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmalar yapmışlardır. DSM ve  $k-\varepsilon$  için  $50 \times 49 \times 28$  nokta sayılı ağ yapısı, LES için  $63 \times 49 \times 34$  büyüklükte ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ yapısı için küpün kenarı etrafındaki noktalar arasındaki en küçük mesafe  $1/24$  olarak ayarlanmıştır. Taşınım parametreleri QUICK yöntemi ile, diğer parametreler ikinci mertebeden merkezi fark yöntemi ile çözülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda LES modeli, ortalama hız dağılımı, ortalama basınç ve türbülans kinetik enerjisi deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında iyi sonuçlar vermiştir.  $k-\varepsilon$  türbülans modeli deneysel

sonuçlardan oldukça farklı sonuçlar vermiştir. DSM ise küpün üst yüzeyinde meydana gelen yeniden bağlanmaları yakalayamamaktadır.

Lakehal ve Rodi [26] üç boyutlu bir küp etrafında zamandan bağımsız akışı Kato-Launder  $k-\varepsilon$  türbülans modeli ile  $Re = 4 \times 10^4$  için incelemiştir. İki farklı ağ yapısı kullanılmıştır.  $110 \times 32 \times 32$  nokta sayısına sahip ve duvara yakın bölgeler daha sık olacak şekilde  $142 \times 84 \times 64$  nokta sayısına sahip ağ yapıları seçilmiştir. Sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemleri FAST-3D bilgisayar kodu ile SIMPLE yöntemi ve ikinci mertebeden farklarla çözülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda, geometrinin basit olmasına rağmen akışın oldukça karışık olduğu, zamana bağlı ayrılma alanlarının olduğu, değişik tip girdapların olduğu ve negatif basınç değişimlerinin meydana geldiği görülmüştür.

Bir küp etrafında akışı ve kirletici gazların ayrılmasını incelemek üzere Scanlon [27] atmosferik hız profili ile  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanarak yaptığı çözümleri deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, genel akış karakteristiği ve hız alanları yakalanmış olsa da  $k-\varepsilon$  türbülans modelinden kaynaklı hatalar meydana gelmiştir.

Bir kare etrafında akışın karakteristiğini incelemek üzere Lee ve Bienkiewicz [28] LES türbülans modeli kullanarak simülasyonlar yapmıştır.  $Re = 4 \times 10^4$  için, 1100 ve 1708 eleman sayılarına sahip iki farklı çözüm ağı duvara yakın bölgelerde sık olacak şekilde kullanılarak, zaman adımı 0.002 seçilip 40,000 zaman adımında ilerleyerek akış çözülmüştür.

Rodi [29]  $Re = 22 \times 10^3$  için bir kare silindir ve  $Re = 4 \times 10^4$  için üç boyutlu bir küp etrafındaki akışın LES ve RANS hesaplamalarını karşılaştırmıştır. RANS kodlarında kapalı (implicit) yöntem uygulanırken, LES'de açık (explicit) yöntem uygulanmıştır. Bunun dışında LES modelinde, zaman için Euler, Runga-Kutta, Leap Frog ve Crank-Nicholson ve taşınım terimleri için QUICK ve üçüncü mertebe upwind yöntemi kullanılmıştır.

LES türbülans modeli ile bir küp etrafında akışın hareketlerini incelemek üzere Shah ve Ferziger [30]  $Re = 4 \times 10^4$  için  $192 \times 64 \times 96$  nokta sayısına sahip çözüm ağı kullanmıştır. LES türbülans modeli ile küt cisimler üzerindeki kuvvetlerin zamana bağlı olarak salınımlarının görülmesini sağlamıştır.

Yere yerleştirilmiş olan bir küp etrafındaki akışın karakteristiğinin incelenmek için Thomas ve Williams [31] LES türbülans modeli kullanmıştır.  $Re=1 \times 10^4$ 'de ortalama akım çizgileri, çatı basınçları, ortalama ve dalgalanan hız ve basınç alanları ve zamana bağlı akışın akış görüntüleme yöntemiyle görüntülenmesi incelenmiştir.  $362 \times 226 \times 96$  hücre sayısına sahip çözüm ağı ile yazar tarafından yazılmış olan C/C++ kodu 64 işlemci Cray-T3E bilgisayarında çözdürülmüştür.

Hajj vd [32] sayısal rüzgar problemlerinin çözümünde LES ve DNS türbülans modellerinin kullanılması için geometrinin çok sıkı bir ağ yapısına sahip olması ve uzun süren sayısal hesaplamalar gerektirdiğini göstermiştir. Bu çalışmada lineer olmayan türbülans modeli kullanılarak, deneysel sonuçlarla ve lineer modellerle karşılaştırılması yapıldığında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Niceno vd [33] yere yerleştirilmiş küpler etrafındaki ısı transferinin incelenmesi için LES türbülans modeli kullanmıştır. 4,250,000 hücreli yapısal olmayan çözüm ağı ile Delft Üniversitesindeki CrayT3E paralel bilgisayarlarda hesaplamalar yapılmıştır. Küp yüzeylerindeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde ön yüzeydeki sıcaklık dağılımı diğer yüzeylere oranla %24 daha yüksek, arka yüzeydeki sıcaklık dağılımı ise diğer yüzeylere oranla %23 daha düşük çıkmıştır. Bu değişikliklerin sebebi de küp etrafında oluşan at nalı şeklindeki girdapların uzun süreli etkilerinden dolayı kaynaklandığını açıklanmıştır.

Alfonsi vd [34]  $Re = 4 \times 10^4$  için kübik bir cisim etrafındaki akışın zamana bağlı sıkıştırılmaz RANS ve LES hesaplamaları yapmıştır. Elde edilen çözümlere POD uygulaması yapılarak daha kısa sürede sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bunun için 604,000 hücreli hibrid bir ağ yapısı kullanılmış olup zaman adımı  $4 \times 10^{-2}$  seçilmiştir.

Schmidt ve Thiele [35]  $Re = 1.3 \times 10^4$  olduğu bir durum için bir küp etrafındaki akışı incelemek üzere LES ve DES türbülans modelleri kullanmıştır. Bu modeller daha önceki çalışmalarda denenmiş RANS metotlarıyla karşılaştırılmıştır. Akış çözücü için ELAN3D programı kullanılmış olup, CRAY T3E-900 bilgisayarlarda paralel çözülmüştür. 800,000 ve 1,200,000 yapısal ağ yapısına sahip iki çözüm ağı kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda DES RANS'a göre daha iyi sonuçlar göstermektedir. Zamana bağlı durumu daha iyi çözebilmek için DES modeli kullanılırken daha sık ve daha iyi bir çözüm ağı yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Üç boyutlu endüstriyel uygulamalar için daha uygun olan DES modelinin ne kadar çözüm ağı geliştirilirse o kadar iyi sonuç vereceği anlatılmıştır.

Iaccarino vd [36] yere yerleştirilmiş olan bir küp etrafındaki akışı zamana bağlı RANS ile çözerek LES ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. FLUENT 5.5 programı kullanılarak, basınç terimleri için SIMPLE algoritması, diğer terimler için ise ikinci mertebe geri farklar yöntemi ile duvara yakın bölgeler sık olacak şekilde 500,000 hücreli yapısal ağ ile hesaplamalar yapılmıştır. Zaman adımını 0.05 s seçerek, kuvvet katsayıları yakınsayana kadar çözüme devam etmiştir. Bu çalışmanın sonucunda küp etrafındaki akışın zamana bağlı olarak çözülmesi gerektiği ve küpün iki yanında periyodik kavisli girdapların oluştuğu görülmüştür.

Cheng vd [37] LES ve  $k-\varepsilon$  türbülans modellerini kullanarak hesaplama alanı içerisinde farklı küp konfigürasyonlarında akışı inceleyip türbülans modellerinin karşılaştırılmasını yapmıştır. LES modeli için üç farklı model (SGS, DMT, LDM), RANS denklemlerinin çözümü için STREAM kodu kullanılmıştır.  $48 \times 48 \times 48$  nokta LES için,  $81 \times 60 \times 47$  nokta RANS için kullanılmış ve LES modelinde 4,000 ve 12,000 zaman adımlı çözümlere ulaşılmıştır.

Richards ve Hoxey [38] küp üzerindeki en yüksek pozitif veya negatif basınçları belirlemek amacı ile ortalama basınç katsayısını kullanıp (Quasi-Steady) Silsoe 6 m'lik küp için alınmış verilerle karşılaştırma yapmıştır.

Gao ve Chow [39]  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanarak farklı hız profillerinde ve farklı duvar koşullarında keskin köşelerde meydana gelen ayrılmaların doğru hesaplanması ve küp üstündeki türbülans kinetik enerjisinin hesaplanması için simülasyonlar yapmış ve deneylerle karşılaştırmıştır. Bu simülasyonlar PHOENICS CFD programı kullanılarak yapılmıştır.

Yakhot vd [40]  $Re = 5610$  için yere yerleştirilmiş bir küp etrafındaki akışın karakteristiğinin incelenmesi için DNS türbülans modeli kullanmıştır ve zaman ortalamalı türbülans kinetik enerjisini, girdap şiddeti dağılımını ve yüzey basınçlarını deneyle karşılaştırmıştır.

Saha [41] yaptığı çalışmada üç boyutlu bir küp etrafındaki akışın karakteristiğini ve ısı transferini incelemek üzere zamana bağlı RANS denklemleri kullanarak sayısal simülasyonlar yapmıştır. Bu çalışmada  $Re$  sayısının değişmesi ile birlikte akışın karakteristiğinin de nasıl değiştiği irdelenmiştir.  $Re = 200$  olduğunda akış zamandan bağımsız ve simetrik bir akış halinde akmaktadır.  $Re = 218$ 'den  $250$ 'e kadar olan bölgede  $x-z$  düzleminde (yatay) akış simetrisini korurken,  $x-y$  düzleminde (dikey) akış asimetric olmaktadır.  $Re = 270$  olduğunda zamanla değişen hareketler yapmaya başlamaktadır.  $Re = 290$  olduğunda akış periyodikleşmektedir.

Hargreaves ve Wright [42]  $k-\varepsilon$  türbülans modeli ile atmosferik sınır tabakayı en iyi ve doğru şekilde elde edebilmek için farklı CFD programları (FLUENT, CFX) ile hesaplamalar yapmış ve türbülans kinetik enerjisi ve hız profilleri incelemiştir. Yapılan karşılaştırma sonucu türbülans kinetik enerji değerlerinde farklılıklar meydana gelmiştir.

Hermida vd [43] ısıtılmış bir küp etrafında bulunan girdap üreticiler sayesinde ısı transferinin hesaplanması için LES türbülans modeli kullanılarak simülasyon yapmıştır. Akış çözücü olarak FLUENT kullanılmış olup çözüm ağının oluşturulması için ICEM-CFD programı kullanılmıştır. Girdap üreticisi olmadan ağ yapısı 400,000 noktadan oluşmaktadır. Girdap üreticiler eklendiği zaman 900,000 noktaya çıkmaktadır. Çözüm için zaman adımı 0.00015 s ve CFL sayısı 1.0'den küçük alınmıştır.

Ono ve Kataoka [44] yaptığı çalışmada bir küpün üst yüzeyindeki zamana bağlı olarak değişen girdapları görebilmek için LES türbülans modeli kullanarak simülasyon yapmıştır. Analizler süper bilgisayar SX61 NEC'de yapılmıştır. Farklı Re sayısında, farklı büyüklükte ağ yapısı kullanılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

He vd [45] çalışmasında  $Re = 2 \times 10^4$  için bir küp etrafında akışı incelemek üzere LES türbülans modeli kullanarak simülasyon yapmış ve aynı koşullar altında deneysel sonuçlarla karşılaştırmalar yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda ortalama ve dalgalanan basınç katsayıları incelenmiştir.

Paik vd'nin [46] art arda dizilmiş iki küp arasındaki akışı incelemek üzere URANS Spalart-Allmaras modeli ve DES türbülans modelleri kullanmıştır. Bu simülasyonlar iki farklı küp mesafeleri için yapılmıştır. Çözüm ağları 0.82 milyon ve 2.1 milyon noktadan oluşmaktadır ve tüm duvarlardaki  $y^+ < 1.0$ 'dir. Zaman adımı 0.0025 s ve 0.02 s seçilmiş ve 400 ve 800 zaman adımı için hesaplama yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda URANS ve standart DES modelleri yeniden dönmeleri ve akış için anahtar parametreleri yakalamamış fakat sık ağ ile yapılmış olan DES-LR modeli daha iyi sonuçlar vermiştir.



### 1.1.2 Bina Etrafında Akış için Sayısal ve Deneysel Çalışmalar

Baskaran [47] çalışmasında bir bina etrafında (30 m x 30 m x 60 m) farklı rüzgar açılarında  $k - \varepsilon$  türbülans modeli ile geliştirilen bir kod kullanılarak basınçları ve hız dağılımlarını incelemiştir. (40 x 40 x 32) ağ noktasına sahip olan çözüm ağı kullanılarak yapılan simülasyonların sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında akışın temel karakteristiği anlaşılmış olup deneysel sonuçlara yakın çıkmıştır. Daha iyi çözümler elde edebilmek için daha yüksek doğruluk mertebesinin kullanılabileceği önerilmiştir.

Zhang [48] tek bir bina etrafında akışın incelenmesi için dört farklı durum için  $k - \varepsilon$  türbülans modeli kullanmıştır. Bu durumlar giriş için düzgün bir hız profili ve yüksek türbülanslı hız profilinin verilmesinden oluşmaktadır. Deneysel çalışmayla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda akışın karakteristiği anlaşılmış ve yeniden bağlanmaların hangi bölgelerde görüldüğü anlatılmıştır.

He ve Song [49] Texas Tech. Univ. binasının etrafında iki farklı rüzgar açılarında (215° ve 225°) gelen akışı incelemek üzere LES (SGS) modeli kullanarak üç boyutlu simülasyon yapmıştır. Bu simülasyon için farklı ağ yapıları kullanılarak zamana bağlı durumda basınç değişimleri görülmek istenmiştir. Üç farklı ağ yapısı kullanılmıştır. Kaba ağ yapısı için üst yüzeyde (39 x 27) nokta kullanılmıştır. Orta seviyedeki ağ yapısı için bir öncekinin iki katı kullanılmıştır. En yoğun ağ yapısında üst yüzeyde (153 x 105) nokta kullanılmış olup toplam nokta sayısı  $1.2 \times 10^6$  olmuştur. Bu çalışmanın sonucunda ağ yapısı iyileştirildikçe sonuçların deneysel çalışmalara yaklaştığı görülmüştür.

Richardson [50] Silsoe Binasının açık alanda yapılan deneysel sonuçlarını birbirinden bağımsız olarak yapılan iki rüzgar tüneli deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın önemi açık alanda gerçekleşen koşulların aynısını rüzgar tünelinin içerisinde oluşturabilmenin zorluğunu göstermesidir. Çalışmanın

sonucunda incelenmiş olan basınç katsayılarına bakıldığında arka bölgelerde bazı farklılıklar görülmüştür.

Michel vd'nin [51] yaptığı çalışmada 40 m'lik kübik bir bina arkasındaki girdapları incelemek üzere 4. mertebe doğrulukta sonlu elemanlar yöntemini  $k - \varepsilon$  türbülans modeli ve geliştirilmiş  $k - \varepsilon$  türbülans modeli ile kullanmıştır. 4. mertebe doğrulukta sonlu elemanlar kodu (FEAT) zamandan bağımsız Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için kullanılmıştır. Bu simülasyonun sonucunda kübik binanın arkasında devamlı dönen girdabın şiddeti belirlenmiştir.

Li [52] bir bina etrafında akışı incelenmek için  $k - \varepsilon$  türbülans modeli kullanarak ve iki farklı kaynak kullanılarak atmosferik koşullar oluşturmaya çalışmıştır. Zamandan bağımsız çözüm, gerekli olan yakınsama sağlandıktan sonra yapılan zamana bağlı çözümler ile elde edilmiş ve büyük farklılıklar gözlenmemiştir. Zamanda ilerleme için 0.0002 s ve zaman adımı 10,000 olarak seçilmiştir.

Sarkar vd [53] yaptığı çalışmada üç farklı akış görüntüleme tekniği kullanılarak gerçek ölçekte Texas Tech. Univ. binası etrafında akışı incelemiştir. Bu tekniklerde, duman püskürtme tekniği akışın dinamiğinin incelenmesi için demet-ağ metodu ve kanat-ağ metodu yöntemleriyle de tek düzlem üzerinde akış incelenmiştir. Kanat-ağ metodu en verimli metot olduğu, dönmeleri, yeniden bağlanmaları göstermiş ve zamanda bağımlı bir problem olduğunun anlaşılmasını sağlamıştır. Duman püskürtme tekniği ile de ayrılmalar oldukça iyi gözlenmiştir

Selvam [54] çalışmasında ortalama ve maksimum basınç katsayılarını incelemek üzere Texas Tech. Univ. binası etrafında akışı farklı sınır koşulları kullanarak LES türbülans modeli ile çözmüştür. (43 x 35 x 20) nokta sayısına sahip çözüm ağı ile çözüm artıklar 0.01 değerinin altına düşene kadar devam edilmiştir.. Zaman adımı 0.1 s alınmış olup yakınsama durumuna Sun-Sparcstation 20 bilgisayarlarda 75 zaman adımı ile 45dk hesaplama zamanında ulaşılmıştır.

Kim vd'nin [55] çalışmasında Hesaplama Akışkanlar Dinamiği ile doğru sonuçlar elde edilebilmek için hexahedral ağ yapısı kullanarak farklı türbülans modelleri ile hesaplamalar yapmış ve yüzey basınçlarını incelemiştir.

Meroney vd'nin [56] yaptığı çalışmada FLUENT ve FLUENT/UNS programı kullanılarak ve farklı türbülans modelleri, standart  $k-\varepsilon$ , RNG ve RSM, kullanılarak, farklı boyutlardaki bina modellerinin simülasyonları yapılmıştır. Yapısal olmayan çözüm ağları kullanılmıştır. Pentium Pro 400 MHz PC Microsoft NT 4.0 işletim sistemli bir bilgisayarlarda hesaplamalar yapılmıştır. RSM modelinin diğer modellerden daha gerçekçi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Nozawa ve Tamura [57] türbülanslı akış altında bir bina etrafında üç farklı durum için akış incelemiştir. Bu durumlar düzgün yüzey ve pürüzlü yüzeyler altında farklı türbülans şiddetlerindedir (%8, %14, %26). Bu çalışmanın amacı farklı türbülans şiddetlerinde basınç katsayılarının dağılımını incelemektir. Çalışmada LES türbülans modeli kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda farklı türbülans şiddetlerinde çok büyük farklılıkların görülmediği gözlemlenmiştir.

Kim [58] LES türbülans modeli kullanılarak kare prizma etrafında akışın karakteristiğini incelemek üzere  $Re = 22 \times 10^3$ 'de Smagorinsky katsayısı 0.1 ile 0.5 arasında en iyi çözümün hangi durumda olduğunu incelemiştir. Bunun yanında küt cisimler etrafındaki akışın Reynolds sayısına bağlı olarak değişmesinden dolayı bu kare prizma için  $Re = 20 - 2 \times 10^6$  arasındaki değişimleri incelenmiştir. Bunun sonucunda LES türbülans modeli kullanıldığında akım çizgilerine, dönmelere, kinetik enerjilere ve konturlara bakılıp deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında LES türbülans modelinin arka bölgelerdeki girdapları yakalamasıyla birlikte iyi sonuç verdiğine karar verilmiştir.

Chang ve Meroney [59] yaptığı çalışmada alçak binada meydana gelen ayrılmaların çevre elemanlarının etkisiyle nasıl değiştiğini incelemek üzere rüzgar tüneline deneyler ve FLUENT programı ile HAD simülasyonları yapmıştır. Bu çalışmanın

sonucunda çevredeki elemanların basınç katsayılarını önemli ölçüde düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır.

Bekele [60] üç farklı rüzgar açısında LES türbülans modeli ile Texas Tech. Univ. binası etrafında akışın karakteristiğini incelemiştir. LES türbülans modelinin, zamana bağlı olarak elde edilen çözümler için oldukça iyi bir türbülans modeli olduğu anlaşılmıştır. 90° rüzgar açısında silindirik girdapların oluştuğu ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında benzer olduğu görülmüştür. 45° rüzgar açısında geometriden kaynaklı basınçların simetrik çıkmadığı görülmüştür. 60° rüzgar açısında, farklı türbülans şiddetlerinde (1:100 ve 1:10) ortalama basınç dağılımlarında farklılıklar gözlenmezken en yüksek basınçta farklılıklar görülmüştür.

Tutar ve Oğuz [61] tek bir bina etrafında, iki bina etrafında ve çoklu bina etrafındaki akışın karakteristiği incelenmek üzere standart  $k-\varepsilon$ , RNG ve LES türbülans modellerini karşılaştırmıştır. RANS denklemleri zamandan bağımsız çözümlenirken, LES de ise zaman adımı 0.005 s seçilmiştir. Yakınsama kriteri tüm simülasyonlar için 0.001 alınmıştır. Her bina modelinde farklı çözüm ağı yapılmıştır. Tek bina için (39 x 36 x 21), (63 x 49 x 34), (63 x 49 x 60) ve (75 x 65 x 70) noktalı ağ yapıları, iki bina için (55 x 44 x 32) ve (70 x 65 x 53), çoklu bina için (63 x 56 x 40) ve (100 x 90 x 75) nokta sayılı ağlar kullanılmıştır. Bina konfigürasyonlarındaki değişiklik doğrudan bina etrafındaki akış hızını değiştirmiştir.

Paik vd'nin [62] yaptığı çalışmada üç boyutlu kompleks geometrileri, sıkıştırılabilir akışta, zamana bağlı olarak incelemek için URANS ve DES türbülans modelleri kullanılmış olup, bu sonuçlar laboratuvar ortamında akış görüntüleme teknikleriyle yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Üç farklı durum incelenmiştir: kanal içine yerleştirilmiş dört dikdörtgenel parça etrafında akış; kanal içinde köşeye yerleştirilmiş dikdörtgen etrafında akış; ve keskin dikdörtgenel eğime sahip kanal etrafında akış incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda geometrilerin ve akışın karmaşıklığına rağmen URANS denklemleriyle bile deneysel sonuçlara yakın değerlerin elde edilmesi sağlanmıştır.

Chung [63] LES türbülans modeli ile yapılan simülasyonlar için gerekli olan maliyet ve zamanı azaltmak için uygulanan hibrid TL/LES türbülans modelinin sonuçlarını görmek üzere Texas Tech. Univ. binası etrafındaki akışın karakteristiğini incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda zaman ve maliyetin azaltıldığı ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında çok iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir.

Blocken vd'nin [64] yaptığı çalışmada birbirine paralel şekilde yerleştirilmiş olan binalar etrafındaki akışı incelemek ve farklı duvar koşullarının etkilerini görmek için  $k - \varepsilon$  türbülans modeli ile simülasyonlar yapılmıştır. Çözüm ağında binalar etrafı yapısal, geri kalan hesaplama alanı için yapısal olmayan çözüm ağı kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda binalar arasındaki mesafe arttıkça akış tek bir bina etrafındaki gibi hareket ederken, birbirlerine yaklaştıkça karmaşık hareketler yapmaktadır.

Kasperski [65] binaların fırtınalara karşı doğru eksenlere göre yerleştirilmesini incelemek için farklı rüzgar açılarına göre ve farklı oryantasyonlara göre basınç katsayılarını kendi kodlarını kullanarak elde etmiştir.

Omidyeganeh [66] Laminar akış ve LES hesaplamaları yapmış ve deneylerle karşılaştırmıştır. Laminar akış sonucunda elde edilen veriler türbülanslı akışa sahip deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada sonuçlara bakıldığında her iki akışta da ön yüzeylerde girdapların oluştuğu görülmüştür. LES ve deneysel sonuçlardaki türbülanslı akışta görülen bina arkasındaki girdaplar laminar akışa oranla farklılıklar göstermiştir. Üst yüzeylerde laminar akışta yeniden bağlanmalar görülmemiştir.

Sohankar [67]  $2H \times 2H \times H$  ölçülerine sahip alçak bir bina etrafındaki akışı incelemek üzere LES türbülans modeli kullanmıştır. Üç farklı giriş hızı için bina etrafında akışı incelemiştir. Çözüm için ikinci mertebe doğruluk kullanılmıştır. Rüzgarın çarptığı üst kenarlardaki sayısal kararsızlığı önlemek için üçüncü mertebe upwind yöntemi kullanılmıştır. Zamanda ise ikinci mertebe doğrulukta açık Adams-Bashforth yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda farklı türbülans şiddetleri için basınç katsayısı dağılımı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Blockenvd'nin [68] yaptığı çalışmada farklı bina modelleri etrafında zamandan bağımsız RANS denklemlerini kullanarak gazların yayılımını incelemek ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmak üzere  $k - \varepsilon$  türbülans modelini kullanmıştır.

Caracogliavd'nin [69] yaptığı çalışmada binalar etrafındaki rüzgârın çevreye ve yayalara olan etkilerini inceleyebilmek için temel HAD uygulamaları için yapılacak olan simülasyonlarda nelere dikkat edilmesi ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada hesaplama alanı ve çevre elemanlarının ana modele göre ölçülerinin belirlenmesi, bu durumlara uygun çözüm ağının geliştirilmesi, doğru sınır şartlarının atanması, çözüm algoritmaları ve yakınsama parametreleri konusunda teknikler anlatılmıştır.

El-Okdavid [70] yere yerleştirilmiş olan bir prizma etrafında akışı incelemek üzere iki farklı giriş koşulu kullanarak LES türbülans modeli ile simülasyonlar yapmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Bunun için yüksek mertebeli sonlu farklar metodları kullanılmıştır. Üçüncü ve beşinci mertebeli açık yöntemler yapay yitimlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum problemin çözümünde hatalara sebep olmaktadır. Bunu önlemek için geliştirilmiş olan CUD-II-5 beşinci mertebeli merkezi olmayan karışık yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde iki serbest parametre bulunmaktadır ( $S = 2/\sqrt{3}$ ,  $S_1/S = 0.75$ ). Girişe düzgün hızla giren akışın incelendiği durumda çözüm ağı (161 x 81 x 101) nokta sayılı, türbülanslı girişte çözüm ağı (181 x 81 x 101) nokta sayılı olarak kullanılmıştır. CFL sayısı 1 seçilerek zaman adımı 0.00118 s alınmıştır ve 200 zaman birimi için hesaplama yapılmıştır.

Rokugouvd'nin [71] dikdörtgen silindir etrafındaki akışta ayrılmalar, yeniden bağlanmaların oluştuğunu ve bu karakteristiklerin D/H oranına bağlı olarak değişmediğini göstermek amacıyla farklı D/H oranlarına göre akışın karakteristiği ve sesin yayılma etkisini incelemiştir. Ses etkisi için Strouhal sayısı önemlidir. D/H oranının 2.5 ve 3.0 olduğu durumlarda ses yayılımında kesilmelerin meydana geldiği

görülmüştür. Simülasyonlar için LES yöntemi ve taşınım terimleri için QUICK yöntemi, diğer terimler için ikinci merteye merkezi farklar kullanılmıştır.

Tominaga [72] yaptığı çalışmada 1:1:2 ölçekli yüksek bina etrafında akışı incelemek için çeşitli  $k-\varepsilon$  modelleri ve LES türbülans modeli kullanmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmalar hız dağılımı, türbülans kinetik enerjisi, için yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda Durbin k-e modeli ve LES iyi sonuçlar vermiştir.

Sengupta vd [73] şiddetli bir fırtına anında binalar etrafında zamana bağlı olarak değişen rüzgar yüklerinin incelenmesi için LES türbülans modeli ile simülasyonlar yapmıştır. Bu simülasyonlar laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen maksimum yükler ve momentler ASCE 7-05 standartları ile karşılaştırılmıştır.

Tamura vd [74] bina üzerindeki rüzgar yüklerini HAD kullanarak nasıl incelenmesi gerektiği ile ilgili yollar göstermiş ve bu yükleri incelemiştir. Bunun için önce LES ve RANS denklemlerini kullanarak akış karakteristikleri incelenmiş ve basınçlar elde edilmiştir. Rüzgar yüklerini elde edebilmek için önce RANS denklemlerinden elde edilen ortalama basınçlar “gust katsayısı” ile çarpılıp ortalama rüzgar yükleri bulunmuştur. İkinci olarak LES ile elde edilmiş olan dalgalanma basınçları kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Son olarak akış-yapı etkileşim analizleri yapılmıştır.

Tamura vd [75] rüzgâr yüklerini elde edebilmek için bina modelleri üzerinde deneysel çalışma yapmıştır. Bu çalışmada dalgalanan basınçlar ölçülmüş ve tüm bina yüzeylerinde integralleri alınmış ve rüzgar yükleri elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda farklı ölçeklerdeki binalar için rüzgar yükleri ve maksimum normal gerilmeler incelenmiştir.

## 1.2 Tezin Amacı ve Konusu

Bu tez çalışmasının amacı yüksek binalar etrafındaki akışın sayısal ve deneysel olarak incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle test ve doğrulama durumu olarak seçilen yerde duran tek bir küp etrafındaki akışın HAD simülasyonları farklı çözüm ağları, farklı türbülans modelleri ve farklı sınır şartları kullanılarak yapılmış ve literatürde yer alan deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Yapısal olmayan ağlar kullanılarak daimi durum RANS hesaplamaları yapılmıştır. Bu simülasyonlarda iyi sonuç veren türbülans modelleri ve sınır şartları seçilerek yüksek bir bina modeli etrafındaki akışı incelemek üzere kullanılmıştır. Yüksek bina modeli için yapılan HAD simülasyonlarının sonuçları, bu tez kapsamında imal edilen ve Ankara Rüzgar Tüneli'nde deneyleri yapılan aynı özelliklerdeki yüksek bina modeli deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Ankara Rüzgar Tüneli'ndeki deneyler, bina atmosferik sınır tabaka içerisinde kalacak şekilde, üç farklı hız profilleri ile (boş tünel ve B ve C kategorilerinde atmosferik sınır tabaka profilleri) ve iki farklı rüzgar açılarında ( $0^\circ$  ve  $30^\circ$ ) yapılmıştır. Yüksek bina modelinin ön, üst, arka ve yan yüzeyleri üzerine yerleştirilen basınç problemleri ile yüzey basınç ölçümleri alınmıştır. Ayrıca, yüksek bina modelinin iz bölgesindeki bir konumda sıcak tel anemometresi ile hız profili ölçümleri yapılmıştır. Son olarak, karmaşık şekilli ve gerçek binaların ve bina gruplarının etrafındaki akışa örnek olarak TOBB ETÜ Kampüs Binaları ve TOBB ETÜ Konuk Öğrenci Evi Binalarının benzer şekilde HAD simülasyonları yapılmıştır.

Bu tezde, İkinci Bölüm'de, kullanılan sayısal yöntemler ve türbülans modelleri ile ilgili teorik bilgiler verilmiştir. Üçüncü Bölüm'de küp etrafındaki akış için yapılan HAD simülasyonları anlatılmaktadır. Dördüncü Bölüm'de ilk önce seçilen bina modeli için yapılan deneylerin detayları ve kullanılan atmosferik sınır tabaka modelleri anlatılmakta, daha sonra yapılan HAD simülasyonları ve deneylerle karşılaştırmaları gösterilmektedir. Beşinci Bölüm'de örnek olarak ele alınan kompleks şekilli bina gruplarının HAD simülasyonları anlatılmaktadır. Son Bölüm'de ise sonuç ve değerlendirmeler ve gelecek çalışmalar için öneriler anlatılmaktadır.

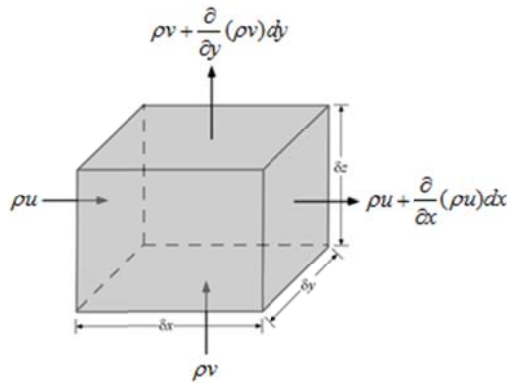


## 2. SAYISAL YÖNTEMLER

Bu çalışmada küp ve bina üzerindeki akışın analizi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan FLUENT 6.2 programı [76] kullanılmıştır. Modellenmek istenen akışın özelliklerine uygun olacak şekilde, bu programın içerisinde yer alan Navier-Stokes denklemleri (süreklilik, momentum, enerji), çözüm algoritmaları ve sınır koşulları seçilmiştir. Yapılan çalışmalar sırasında FLUENT 6.2 programının kuramsal bilgi dökümanında yer alan bilgilerden yararlanılarak, kullanılan sayısal yöntemler modellenmek istenen akışın özelliklerine uygun olarak seçilmiştir [76].

### 2.1 Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri, akışkanın kontrol hacimdeki kütle (süreklilik), momentum ve enerjinin korunumunu denklemleridir. Şekil 2.1’de kartezyen koordinat sistemi içerisinde bulunan, dx genişliğine, dy derinliğine ve dz yüksekliğine sahip bir kontrol hacmindeki kütle akışını diferansiyel süreklilik denklemi ile göstermektedir [76].



Şekil 2.1 Kütle Akışı [76]

Diferansiyel süreklilik denklemi kontrol hacimdeki kütle korunumu prensibinden yola çıkılarak diferansiyel olarak kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Benzer şekilde, sıkıştırılamaz akış için momentum ve enerjinin korunumu denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x \\ & \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y \\ & \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_z \\ & \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( k + \frac{cp\mu}{Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial x} + u_i \tau_{ij} \right] \\ & \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Burada  $u$ ,  $v$ ,  $w$  sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönündeki hızları,  $\rho$  yoğunluğu,  $P$  basıncı,  $F$  kontrol hacimdeki akışkana etkiyen dış kuvveti,  $E$  toplam enerjii ve  $\tau_{ij}$  viskoz kuvvetleri ve  $k$  termal iletkenliği göstermektedir.

Navier-Stokes denklemlerinin sayısal çözülebilmesi üç yaklaşımla mümkün olabilmektedir: DNS, LES ve RANS. Türbülans modellerinin kullanımı gereken Reynolds-Ortalımalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [76]:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\
&= -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.3)
\end{aligned}$$

Denklem 2.11'deki  $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$  terimi Reynolds gerilmesi olarak isimlendirilir. Burada  $u'_i$  ve  $u'_j$ , sırasıyla  $x$ -yönündeki ve  $y$ -yönündeki hızın bu yönlerdeki ortalama hız değerlerinden anlık sapma miktarlarıdır. Türbülanslı akışın karmaşıklığından dolayı bu değerlerin hesaplandığı analitik bir yöntem mevcut değildir. Bu nedenle  $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$  terimi hesaplanırken ortalama hızdan sapma değerleri bazı yaklaşımlar kullanılarak hesaplanır. Türbülans modelleri bu değerlerin hesaplanabilmesi için geliştirilmiştir.

## 2.2 Konumda Ayrıklaştırma

FLUENT 6.2 programı sonlu hacimler yaklaşımını kullanarak cebirsel denklemlerin sayısal olarak çözülebilmesine imkân tanımaktadır. Integral formatındaki akış denklemleri sonlu hacimler metodu ile ayrıklaştırılmıştır. Sonlu hacim ağ yapısı üzerindeki her noktanın etrafını saran küçük hacimler şekilde tanımlanmaktadır. Sonlu hacimler metodunda kısmi diferansiyel denklemin içerisinde yer alan terimleri yüzey integrallerine dönüşmektedir. Daha sonra bu terimler her sonlu hacmin yüzeyinde akı olarak hesaplanmaktadır. Hacme giren akı ile komşu bir hacmi terk eden akı aynı olduğu için bu yöntem kararlı bir yöntemdir ve korunum yasalarını doğal olarak sağlamaktadır [76].

Zamana bağlı, integral formattaki akış denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}
\underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{kontrol hacimdeki zamana göre değişim}} + \underbrace{\int \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A}}_{\text{hücre yüzeylerinden taşınımıyla giren ve çıkan miktar}} = \underbrace{\int \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A}}_{\text{hücre yüzeylerinden difüzyonla geçen miktar}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{kontrol hacimde üretilen miktar}} \quad (2.4)
\end{aligned}$$

Burada  $\rho$  yoğunluğu,  $\vec{v}$  hız vektörünü,  $\vec{A}$  yüzey alanı vektörünü,  $\Gamma_\phi$   $\phi$ 'nin difüzyon katsayısını,  $S_\phi$  ise birim hacimde üretilen  $\phi$  miktarını göstermektedir. Bu denklem her bir kontrol hacmi, hücre veya hesaplama alanına uygulanmaktadır. Akış denkleminin ayrıklaştırılmış hali aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{yüzey}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{yüzey}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (2.5)$$

Burada,  $N_{yüzey}$  hücreyi sınırlayan yüzey sayısını,  $\phi_f$  yüzey boyunca taşınan  $\phi$  miktarını,  $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$  yüzeyden geçen kütle akısını,  $\vec{A}_f$  alan vektörünü,  $V$  hücrenin hacmini göstermektedir. FLUENT 6.2 programı bu şekilde ayrıklaştırılmış akış denklemlerini çözerek simülasyon sonuçlarını elde etmektedir [76].

Bu çalışmada yapılan çözümler için ikinci mertebe upwind yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde hücre merkezli Taylor serisi açılımı kullanılarak hücrelerin yüzeylerindeki değerler aşağıdaki ifade ile bulunmaktadır:

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \vec{s} \quad (2.6)$$

Burada  $\phi$  hücre merkezli değeri,  $\nabla \phi$  hücre merkezli gradyanı ve  $\vec{s}$  'de hücrelerin merkezleri arasındaki yer değiştirme vektörünü göstermektedir. Bu formül her bir hücre içindeki hücre merkezli gradyanların belirlenmesi durumunda kullanılabilir. Bu gradyan aşağıda ayrıklaşmış hali kullanılarak elde edilir [76].

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{yüzeyler}} \phi_f \vec{A} \quad (2.7)$$

### 2.3 Zamanda Ayırıklaştırma

Zamana bağılı simülasyonlarda tüm denklemler hem konumda hem de zamanda ayırıklaştırılması gerekmektedir [76]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (2.8)$$

FLUENT 6.2 programı zamanda ayırıklaştırma için geri-farklar yöntemini kullanmaktadır. Aşağıda birinci ve ikinci dereeden ayırıklaştırma yöntemi görülmektedir.

- Birinci dereceden ayırıklaştırma yöntemi:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = f(\phi^{n+1}) \quad (2.9)$$

- İkinci dereceden ayırıklaştırma yöntemi:

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = f(\phi^{n+1}) \quad (2.10)$$

### 2.4 Zamanda İlerleme Yöntemi

Bir sayısal simülasyonun yakınsamasını ve doğruluğunu sağlamak için uygun bir zaman adımının seçilmesi gerekmektedir. Bunu yapabilmek için Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sayısının hesaplanması gerekmektedir. Doğrusal kararlılık teorisi uygun görülebilir aralıkta CFL seçilmesini sağlar ve FLUENT 6.2 programı da seçilen CFL sayısına göre zaman adımını aşağıdaki formül ile belirler CFL sayısını büyük seçilmesi yakınsama hızının artması anlamına gelmektedir [76].

$$CFL = \Delta t \max \left[ \frac{|u|}{\Delta x} + \frac{|v|}{\Delta y} + \frac{|w|}{\Delta z} \right] \quad (2.11)$$

Kararlılık limitleri açık (belirtik) explicit) ve kapalı (örtük) (implicit) yöntemler arasında oldukça büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin yukarıda bahsedilen CFL sayısının geniş aralığı açık yöntemler için kullanılamamaktadır. Daha detaylı açıklama sonraki bölümlerde yapılmıştır.

#### **2.4.1 Açık Yöntem için CFL Sayısı**

Açık (Belirtik) yöntem kullanılarak yapılan analizlerde CFL sayısı en fazla 1.0 olacak şekilde seçilmelidir. Analizlerde iraksama görülüyorsa veya yakınsama değerlerinde hızlı artışlar oluşuyorsa CFL sayısının küçültülmesi gerekmektedir. Böyle durumlarda CFL sayısı 0.1 ile 0.5 arasındaki değerlere kadar indirilebilir. Salınımlarda kararlılık sağlanırsa CFL sayısı tekrar arttırılabilir [76].

#### **2.4.2 Kapalı Yöntem için CFL Sayısı**

Doğrusal kararlılık teorisine göre belirtik yöntemde kullanılan kapalı (örtük) bir yöntem olan Gauss-Siedel yöntemi oldukça kararlıdır. Analizler için ilk atanan CFL değeri 5,0'tir. Bu değer problemin karmaşıklığına göre 10, 50, 100 hatta daha fazla değerler alabilir. Belirtik yöntemde bazı durumlarda CFL sayısını kendisi azaltabilmekte fakat daha sonra tekrar eski haline gelebilmektedir [76].

## 2.5 Türbülans Modelleri

Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlerine oranının bir ölçüsü olduğu için, akışın karakteristiğinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan birçok deneylerde de görülmüştür ki Reynolds sayısı kritik değerinin altında ise akış düzgün olarak akmakta (laminar), bu kritik değerinin üzerine çıktığında bazı anlarda akış hareketinde değişimler gözlenmekte ve kritik değerden artık uzaklaştıktan sonra ise oldukça karmaşık hareketler görülmektedir.

Duvara çok yakın bölgelerde türbülans yapısı kesme gerilimlerinin etkisi altında engellenmiş olur; fakat burada viskoziteden kaynaklı olarak akış, sınırlara bu sefer dik olarak çarpmaya başlar. Bu çarpmalar akışın karmaşık bir hal almasına, ortalama hız ve belirli zaman aralıklarında dalgalanmalar yapan hız bileşenlerinin ani olarak değişmesine neden olmaktadır. Bu kesme gerilimleri ne kadar büyükse türbülansın büyüklüğü de o kadar fazla olmaktadır. Çoğu akışlar katı sınır tabakaları içerdiği için türbülans, akışın incelendiği geometriye bağlıdır. Bu sebeple türbülansı yakalamak için çok iyi ve doğru hesaplamalar yapılmalıdır [76].

Çoğu rüzgâr mühendisliği problemleri yüksek Reynolds sayısına sahiptir ve bunun bir sonucu olarak da rüzgâr ve rüzgar yükleri türbülanslıdır. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği'nde bu problemleri çözebilmek için çok sayıda türbülans modelleri kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanı ve en bilineni standart k-ε modelidir. Bu model basit ve zamandan bağımsız problemlerin çözümünde başarılıdır. Fakat karmaşık akışlar ve zamana bağlı değişen akışlar için içine girdiği zaman doğruluğu azalmaktadır. Özellikle binanın rüzgar yüklerine karşı direncini veya bina benzeri küt cisim problemlerini çözerken zamana bağlı türbülans modelleri tercih edilmelidir. Bu bölüm içerisinde türbülans modelleri genel bir bakış altında incelenmiştir.

### 2.5.1 Spalart-Allmaras Türbülans Modeli

Spalart-Allmaras türbülans modeli diğer türbülans modellerine göre daha basit bir türbülans modelidir [76]. Spalart-Allmaras modelinde türbülans viskozitesini modellemek için tek bir denklem çözülür. Duvara yakın yerlerde sık ağ yapısı, diğer bölgelerde büyük ağ yapısı kullanılmaktadır. İki boyutlu kanat veya roket problemleri için oldukça iyi sonuçlar vermektedir [76].

Spalart-Allmaras modelinde sınır tabaka dışındaki türbülans kinematik viskozitesini aşağıdaki denklemi kullanarak hesaplar:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{v}u_i) \\ & = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12'de  $\tilde{v}$  türbülans kinematik viskozitesini,  $G_v$  türbülans üretimini,  $Y_v$  türbülans yıkımını,  $\sigma_{\tilde{v}}$  ve  $C_{b2}$  ise sabitleri göstermektedir.  $S_{\tilde{v}}$  ise kullanıcı tarafından tanımlanan türbülans kaynağı terimidir.

$G_v$  türbülans üretimini ve  $Y_v$  türbülans yıkımını elde eden formüller aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} G_v & = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{v} \\ Y_v & = C_{w1} \rho f_w \left( \frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$



### 2.5.2 Standart $k - \varepsilon$ Türbülans Modeli

İki denklem kullanan diğer modeller arasındaki en sade türbülans modeli olan standart  $k - \varepsilon$  modeli türbülanslı hızı ve türbülans şiddetini bağımsız olarak belirlenmesine izin vermektedir [76]. Endüstriyel akışlarda ve ısı transferi analizlerinde oldukça yaygın kullanımı ve model denklemleri deneysel çalışmaların sonucunda elde edilmiştir [76].

Türbülans modelindeki  $k$  (türbülans kinetik enerjisi) ve  $\varepsilon$  (türbülans kaybı, “yitim”) aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.15)$$

Denklem 2.14 ve 2.15’te  $G_k$  türbülans kinetik enerjisinin ortalama hız gradyanlarından ötürü üretimini,  $G_b$  türbülans kinetik enerjisinin itme gücünden ötürü üretimini ve  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülans içerisindeki genişleme salınımlarının dağılımını gösteren terimlerdir.

### 2.5.3 RNG $k - \varepsilon$ Türbülans Modeli

RNG modeli de standart  $k - \varepsilon$  türbülans modeline benzer şekilde iki denklem kullanmaktadır [76]. Bu modelin diğerlerinden farklı aşağıda sıralanmıştır:

- Kayıp ( $\varepsilon$ ) denkleminde doğruluğu önemli derecede arttıran ek bir terim bulundurmaktadır.
- Türbülanslı çevrintilerin (eddy) daha doğru çözülmesini sağlamaktadır.
- Türbülanslı Prandl sayısı'nı elde etmek için analitik bir formül kullanmaktadır. (Pr\_t)
- Düşük Re sayısı etkilerini görmek üzere viskoziteyi hesaplamak için analitik formül kullanmaktadır.

Türbülans modelindeki  $k$  (türbülans kinetik enerjisi) ve  $\varepsilon$  (türbülans kaybı, "yitim") aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\
& = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\
& = \frac{\partial}{\partial x_j}[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Kayıp denklemine eklenmiş olan R terimi aşağıdaki denklemde gösterilmiştir:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \tag{2.17}$$

Yukarıdaki denklemde  $\eta < \eta_0$  (düşük gerilme durumu) olması durumunda bu türbülans modeli gerilimli akışlar için çok iyi sonuçlar vermeyebilmektedir; fakat  $\eta > \eta_0$  olduğunda gerilimli akışlarda daha düşük türbülanslı viskoziteye neden olduğundan daha doğru sonuçlar elde edilmektedir [76].

#### 2.5.4 Realizable $k - \varepsilon$ Türbülans Modeli

Bu türbülans modelinde iki denklem çözülmektedir [76]. Bu türbülans modelinin diğer  $k - \varepsilon$  türbülans modellerinden farkı, yeni bir viskozite formülü ile türbülans viskozite terimini de kullanması ve ortalama dönme salınımlarını hesaplayan dinamik denklem temelli yeni bir yitim denklemi kullanmasıdır:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j}[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.18)$$

#### 2.5.5 Standart $k - \omega$ Türbülans Modeli

Bu türbülans modelindeki  $k$  (türbülans kinetik enerjisi) ve  $\omega$  (yitim oranı) aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir [76]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (2.19)$$

Denklem 2.19'da  $G_k$  türbülans kinetik enerjisinin ortalama hız gradyanlarından ötürü üretimini,  $G_\omega$  yitim oranının üretimi,  $\Gamma_k$  ve  $\Gamma_\omega$  yayılma etkisini ve  $Y_k$  ile  $Y_\omega$  yitim etkilerini gösteren terimlerdir. Bu model sıkıştırılabilir akış, düşük Reynolds sayılı akışlar ve duvarla sınırlı akışların çözümünde uygundur [76].

### 2.5.6 SST $k - \omega$ Türbülans Modeli

Bu türbülans modelindeki  $k$  (türbülans kinetik enerjisi) ve  $\varepsilon$  (kayıplar) aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir [76]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_k\end{aligned}\quad (2.20)$$

Kayıp denklemine eklenmiş olan  $D_\omega$  terimi aşağıdaki denklemde gösterilmiştir:

$$D_\omega = 2(1 - F_1)\rho\sigma_{w,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\quad (2.21)$$

Bu türbülans modeli iki denklem çözmektedir. Standart modelden farkı, duvara yakın bölgelerde Wilcox modelini, duvardan uzakta kalan bölümleri  $k - \varepsilon$  modeli ile çözmektedir. Burada  $\varepsilon$  terimleri  $\omega$  terimlerine dönüşürken  $D_\omega$  terimi çapraz yayılma değişim terimi olarak eklenmektedir.

### 2.6 Sınır Koşulları

Bu çalışmada öncelikle doğrulama için yapılan küp analizlerinde sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akış incelenerek hangi durumda daha iyi sonuçlar vereceği literatürde yer alan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışı çözebilmek için FLUENT programında farklı sınır koşulları girilmesi gerekmektedir. Bu bölümde bu koşulların özellikleri anlatılacaktır.

### **2.6.1 Sıkıştırılabilir Akış Koşulları**

Sıkıştırılabilir akışlı HAD simülasyonlarında taban ve küp yüzeyleri dışındaki tüm bölgeler (giriş, çıkış, hesaplama alanı) için “far-field” koşulu kullanılmıştır. Bu koşulda akış sonsuzdan gelerek istenilen Mach sayısında giriş bölgesinden girmektedir. Bu koşulda ayrıca türbülans şiddeti ve uzunluk ölçeği de girilmektedir.

### **2.6.2 Sıkıştırılamaz Akış Koşulları**

Giriş koşulunda akış hızının yönü ve büyüklüğü tanımlanmaktadır. Türbülanslı akışlarda hıza ek olarak girişteki türbülans şiddeti ve uzunluk ölçeği belirtilmelidir. Çıkış koşulunda “Outflow” sınır koşulu kullanılmıştır. Bu koşul akışın çıkış hızı veya basıncı ile ilgili detaylı bilgiler bilinmiyorsa kullanılan bir sınır koşuludur.

Hesaplama alanındaki yan yüzeyler için simetri koşulu uygulanmıştır. Simetri koşulunda, simetri yüzeyinde tüm değişkenlerin akısı sıfır kabul edilir. Diğer bir deyişle, akışa ait tüm özelliklerin gradyanı simetri yüzeyinde sıfır kabul edilir.

### **2.6.3 Duvar Koşulları**

Duvar sınır koşulunda ise küp ve bina yüzeylerindeki kayma hızı tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan simülasyonlarda bu yüzeylerde akış hızının sıfır olduğu kabul edilmektedir.

Hesaplama alanının üst yüzeyinde sıfır kayma gerilimi, “zero shear stress”, koşulu seçilmiştir. Bu koşulda bu hesaplamala alanı yüzeyinde kesme gerilimleri olmamakta ve akış sınırlardan akmaktadır.

Her iki tip akış için de çözüm ağının tabanı kaymazlık duvar, “no-slip wall”, koşulu olarak belirlenmiştir. Bu koşulda yerin hız profiline etkisini ve yer ile küp etkisindeki akışın yapacağı davranışın incelenmesi amaçlanmaktadır.

## 2.7 Ard-İşleme

Ard-işleme için FLUENT ve Tecplot 360 programları kullanılmıştır. Bunun dışında Geometrilerin oluşumu için CATIA programı kullanılmış olup bu geometrilerin çözdürülmesi için oluşturulan çözüm ağı yapıları GAMBIT programı ile hazırlanmıştır.

## 2.8 Hesaplama Kaynakları

HAD simülasyonları için kullanılan bilgisayarlar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. HAD simülasyonları sırasında tek işlemci ile hesaplama yapılmıştır. Çizelge 2.2’de  $k - \varepsilon$  türbülans modelinin kullanıldığı analizlerde geçen hesaplama zamanı ile ilgili bilgi verilmiştir. Daimi durum RANS simülasyonlarında yakınsama sağlanana kadar iterasyon yapılmıştır.

Çizelge 2.1 Bilgisayar Özellikleri

İŞLEMCI	CPU	BELLEK
8 x Sun Fire X2200 M2 Server AMD Opteron	1.8 GHz	2 GB
Intel Core 2 Quad	2.4 GHz	2 GB
Intel Core 2 Duo	2.2 GHz	2 GB

Çizelge 2.2 Hesaplama Zamanı

İŞLEMCI	İTERASYON	ZAMAN
8 x Sun Fire X2200 M2 Server AMD Opteron	100	30 dk
Intel Core 2 Quad	100	30 dk
Intel Core 2 Duo	100	35 dk

### 3. KÜP ETRAFINDAKİ AKIŞIN İNCELENMESİ

Bu bölümde, doğrulama için bir küp etrafında akışın HAD simülasyonları anlatılmaktadır. Farklı ağ yapılarında, farklı sayısal yöntemler ve farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar literatürde yer alan deneysel ve DNS sonuçları ile karşılaştırılmaktadır.

#### 3.1 Çözüm Ağı ve HAD Simülasyonlarının Özellikleri

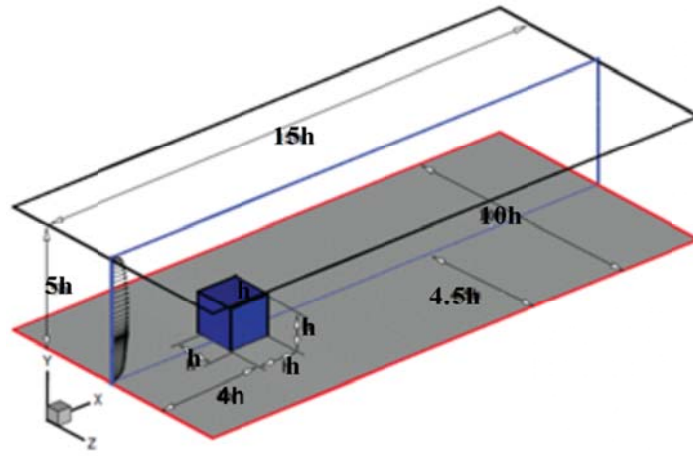
Bu çalışmadaki HAD simülasyonları için sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akış durumunun problemin çözümüne etkileri incelenmiştir. Her iki durumunda Re sayısı  $2 \times 10^5$  olacak şekilde elde edilen sonuçlar literatürde yer alan deneysel ve DNS sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Havanın akışının modellendiği bu HAD simülasyonlarında  $Re = 2 \times 10^5$  olarak seçilmiştir. Bu koşullarda  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $\mu = 1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ ,  $P_\infty = 101 \text{ kPa}$  olacak şekilde sınır ve başlangıç koşulları belirlenmiştir. Yapılan çözümlerde, hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamaz akış durumunda kullanılan sınır şartları daha önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde uygulanmıştır.

HAD simülasyonlarına başlamadan önce simülasyonu yapılacak olan geometri ve geometrinin içinde bulunduğu alan için çözüm ağı yapısının oluşturulması gerekmektedir. Problemin çözümü için yeterli olan düğüm sayısının belirlenmesi için öncelikle çözüm ağı çalışması yapılmalıdır. Bu çözüm ağı çalışmasında çözüm ağı sayısı artırılarak sonucun artık değişip değişmediğine bakılmış ve değişmediği andaki düğüm sayısı kullanılarak analizler yapılmaya başlanmıştır. Oluşturulan ağ ile HAD analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Çözüm ağı yapısını oluşturmak için ilk aşamada, küp ve hesaplama alanını içeren geometri GAMBIT programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan geometride

küp hesaplama alanının girişinin merkezinden  $D$  kadar uzaklıktaki bölgeye yerleştirilmiştir. Küpün bir kenar uzunluğu ( $D$ ) 30 cm'dir. Hesaplama alanı ise  $x$ -yönünde  $15D$ ,  $y$ -yönünde  $5D$  ve  $z$ -yönünde  $10D$  olacak şekilde  $15D \times 10D \times 5D$  boyutlarında oluşturulmuştur. Hesaplama alanı kısımlara ayrılıp isimlendirilerek, akışkanın hesaplama alanına giriş, çıkış, ve duvar yerleri tanımlanmıştır ve hesaplama alanının görüntüsü Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Küp Simülasyonu için Hesaplama Alanı

Hesaplama alanı yüzeyleri öncelikle üçgen elemanlardan oluşturulmuştur. Özellikle küp yüzeyleri oldukça küçük elemanlardan oluşmuş olup hesaplama alanda uygun nokta sayısı kullanılarak dört yüzeyle elemanlarla yapısal olmayan çözüm ağı oluşturulmuştur. Yer etkisi de önemli olduğu için hesaplama alanının alt yüzeyi diğer dış yüzeylere oranla daha sık ağ yapısıyla örülmüştür. Daha sonra en uygun yapısal olmayan çözüm ağının seçiminden sonra altı yüzeyle kare elemanlardan oluşturulan yapısal bir çözüm ağı arasında ne kadar fark olup olmadığını görmek üzere iki farklı ağ ile hesaplamalar ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmanın sonuçları ilerideki bölümlerde anlatılmaktadır.

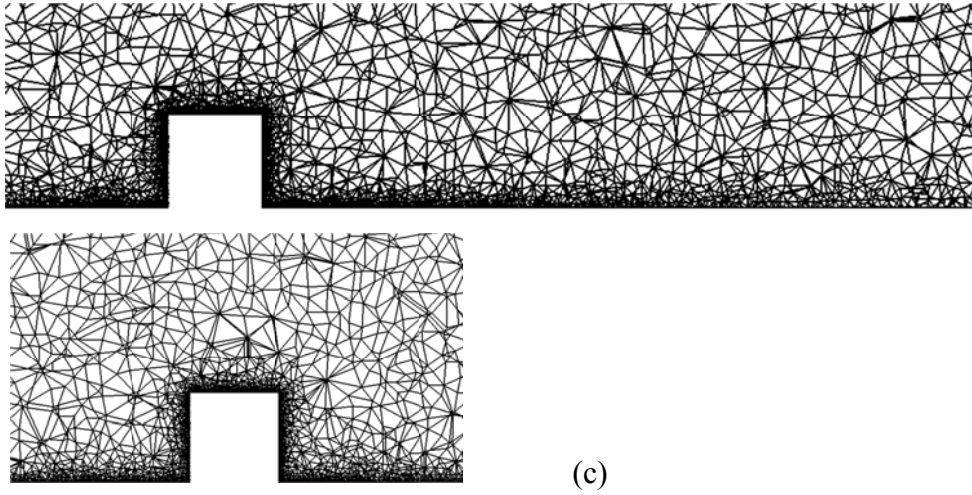
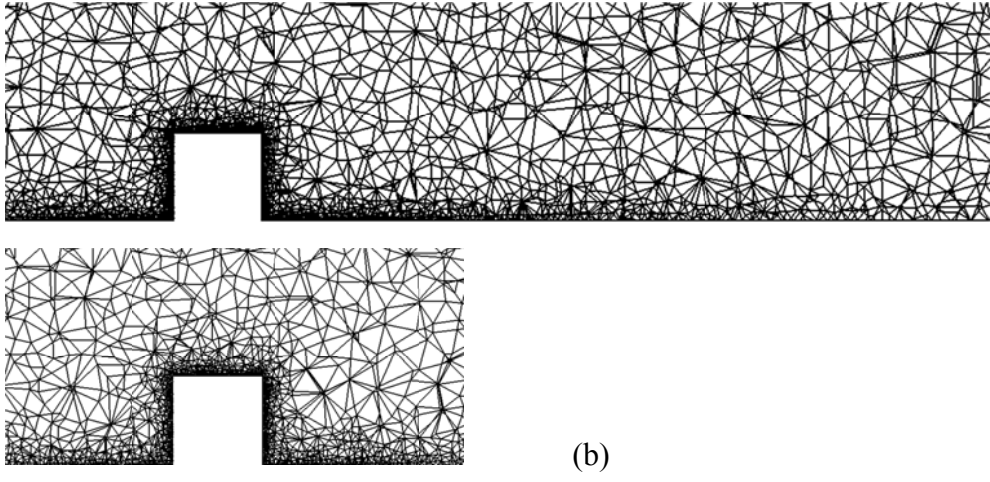
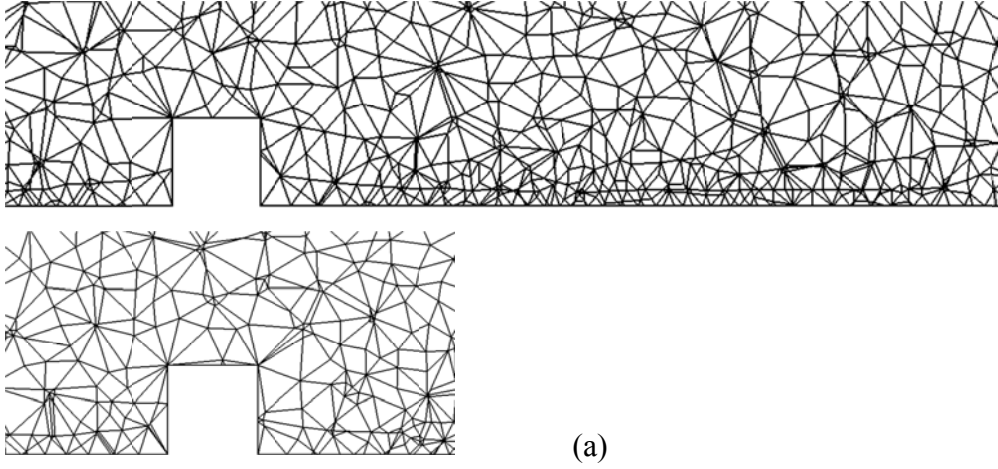
Çözüm ağları küp etrafında sık olacak şekilde oluşturulmuştur. Bunun için altı farklı hücre sayısına sahip çözüm ağı kullanılmıştır. Bu çözüm ağlarından beşi yapısal olmayan, bir tanesi de yapısal ağlardır. Bu çözüm ağlarıyla ilgili detaylı bilgileri



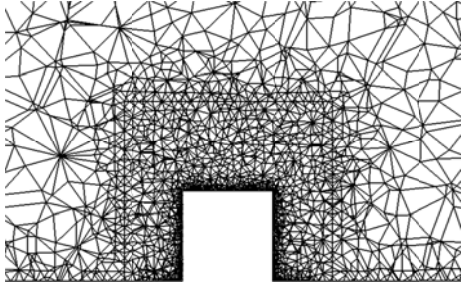
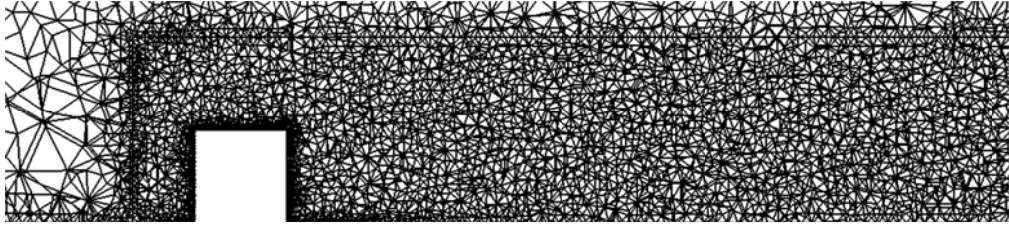
Çizelge 3.1’de belirtilmiştir. Bu hazırlanmış olan altı farklı çözüm ağının önden ve yandan alınan birer düzlem üzerindeki izdüşümleri Şekil 3.2 ve 3.3’de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Çözüm Ağı Özellikleri

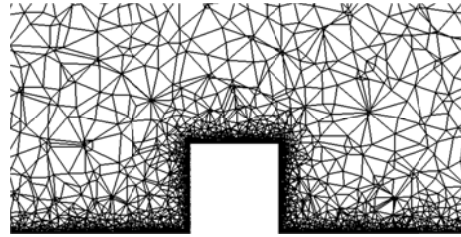
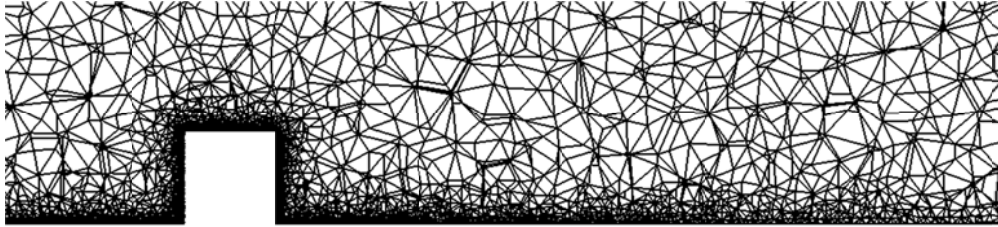
<b>Çözüm Ağı</b>	<b>Hücre Sayısı</b>	<b>Yüzey Sayısı</b>	<b>Düğüm Sayısı</b>
<b>I</b>	108 283	227 320	23 649
<b>II</b>	513 324	1 066 535	106 206
<b>III</b>	1 092 246	2 275 124	229 029
<b>IV</b>	2 045 674	4 163 455	411 987
<b>V</b>	2 114 559	4 416 623	449 824
<b>VI</b>	2 017 488	5 978 192	202 8785



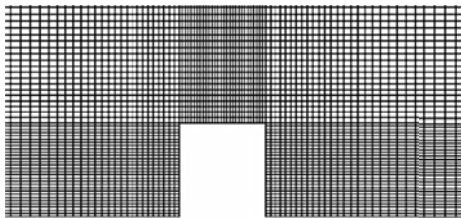
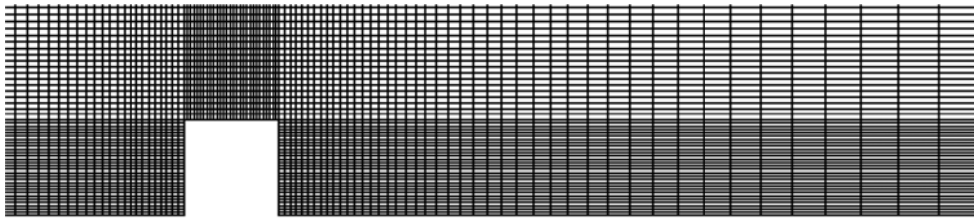
Şekil 3.2 Çözüm Ağının Yandan ve Önden Görünüşü, a) Çözüm Ağı I, b) Çözüm Ağı II, c) Çözüm Ağı III



(a)

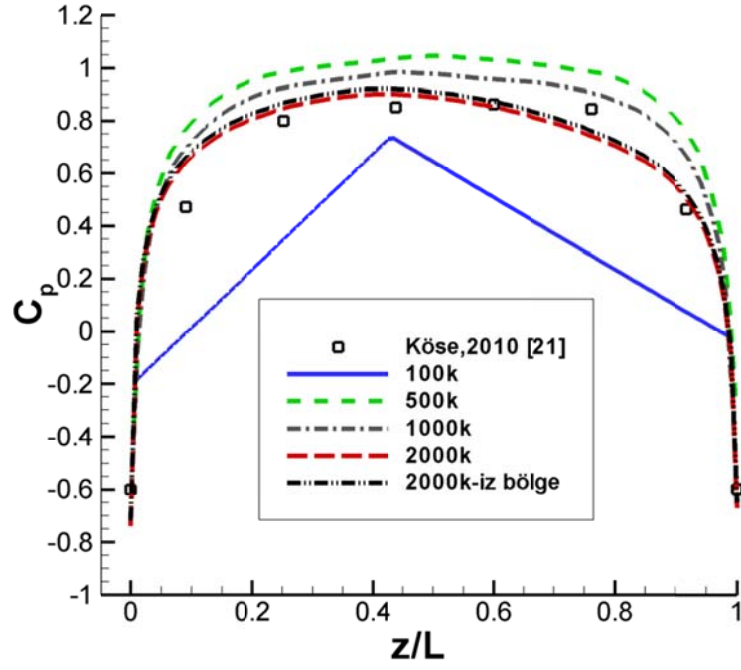


(b)

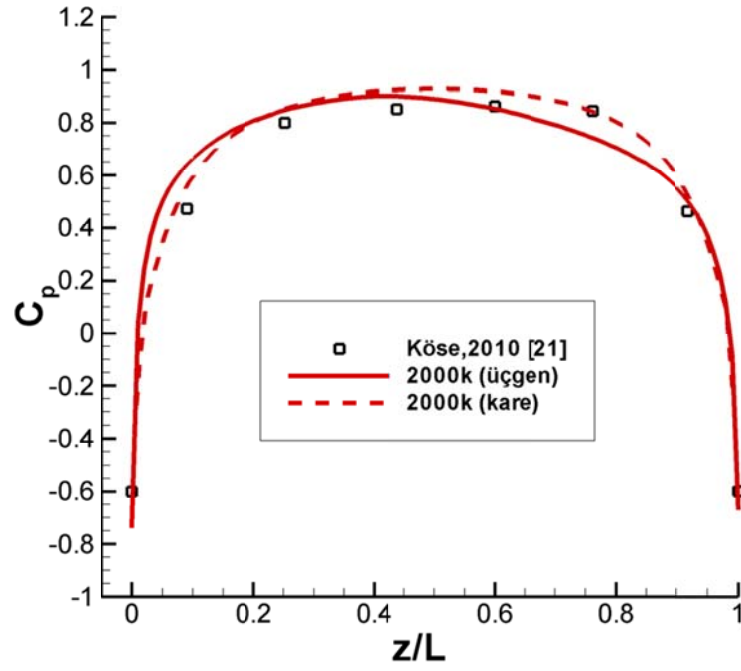


(c)

Şekil 3.3 Çözüm Ağının Yandan ve Önden Görünüşü, a) Çözüm Ağı IV, b) Çözüm Ağı V, c) Çözüm Ağı VI



(a)

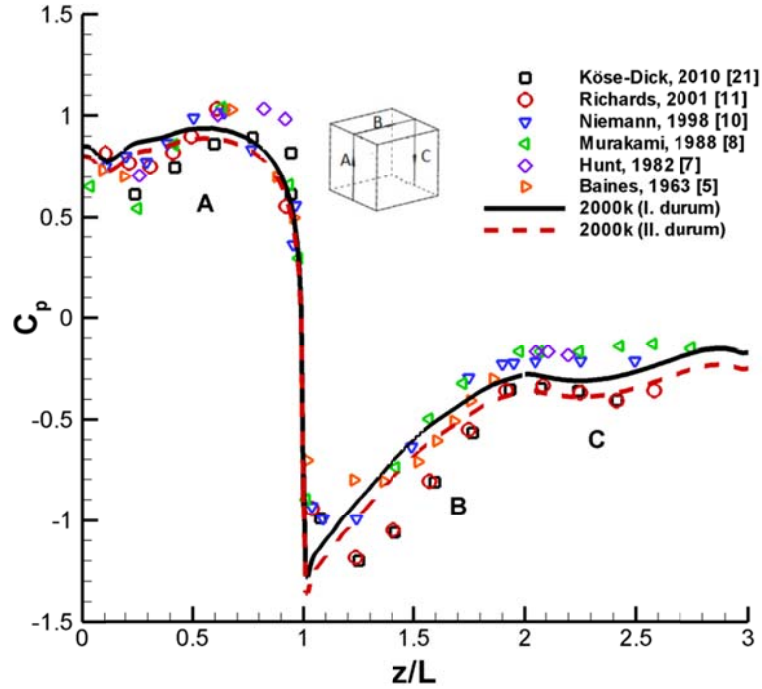


(b)

Şekil 3.4 Küpün Ön Yüzeyinde Ortalama Basınç Dağılımı: a) Farklı Sayıda Hücreye Sahip Yapısal Olmayan Çözüm Ağları ile Elde Edilen ve b) En Sık Yapısal Olmayan Çözüm Ağı ve Yapısal Çözüm Ağı ile Edilen Çözümlerin Karşılaştırılması

Bölüm 2’de bahsedildiği gibi problemin çözümünde farklı sınır koşullarının etkileri  $k - \varepsilon$  türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir. Sıkıştırılabilir (I. durum) ve Sıkıştırılmaz (II.durum) akış durumlarına uygun sınır koşulları ile çözümlerin küp yüzeylerindeki basınç katsayısı ( $C_p$ ) Şekil 3.4’de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sıkıştırılabilir akış için sınır koşulları, girişte, çıkışta, hesaplama alanının üst ve yan yüzeylerinde “pressure farfield” koşulu kullanılmıştır. Sıkıştırılmayan akış için ise girişte “inlet”, çıkışta ve hesaplama alanının üst ve yan yüzeylerinde “outflow” koşulları kullanılmıştır. Her iki koşul için de küp ve alt yüzeyde duvar sınır koşulu seçilmiştir.

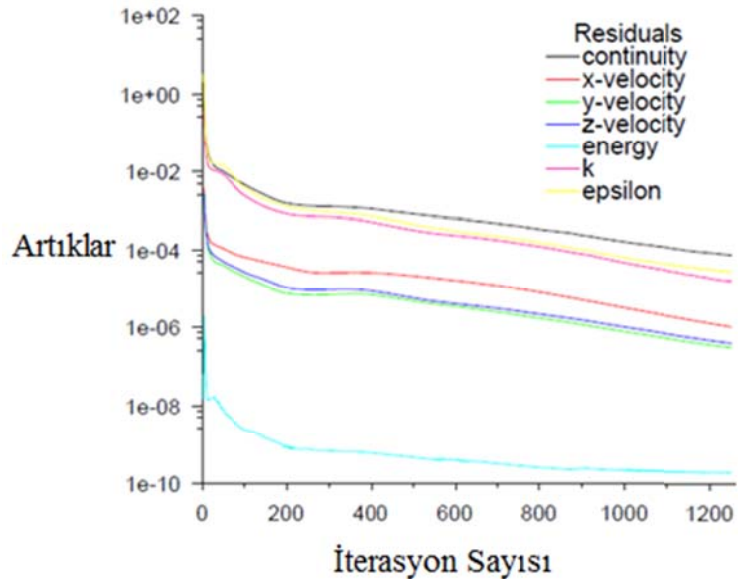
Küp yüzeylerindeki  $C_p$  dağılımları incelendiğinde her iki sınır koşulu için sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüş ve bundan sonraki çalışmalarda sıkıştırılmaz akış durumu ve uygun sınır koşulları kullanılmıştır.



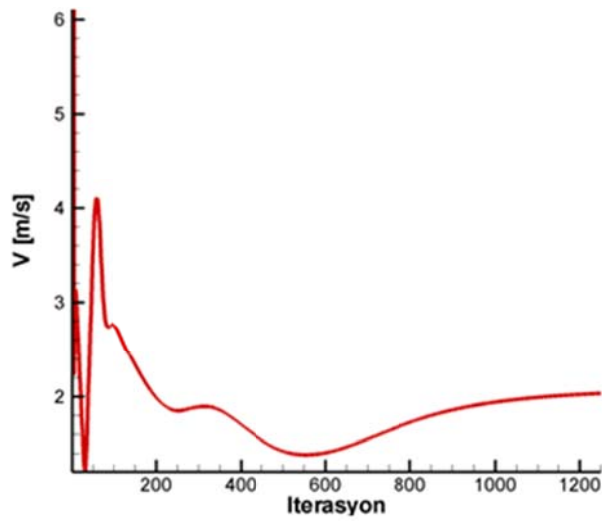
Şekil 3.5 Ön, Üst ve Arka Yüzeylerde Ortalama Basınç Katsayısı Dağılımı (Sıkıştırılabilir ve Sıkıştırılmaz Akış Durumları için Çözümlerin Karşılaştırılması)

### 3.2 HAD Simülasyonlarının Sonuçları

Çözüm Ağı V için simülasyonlar 1250 iterasyon sonucunda yakınsamaya başlamıştır (Şekil 3.6). Küp iz bölgesinde yeniden dönüş alanlarını oluşturan girdabın merkezinden alınan nokta üzerindeki hızın zamana göre değişimi Şekil 3.7'da görülmektedir.

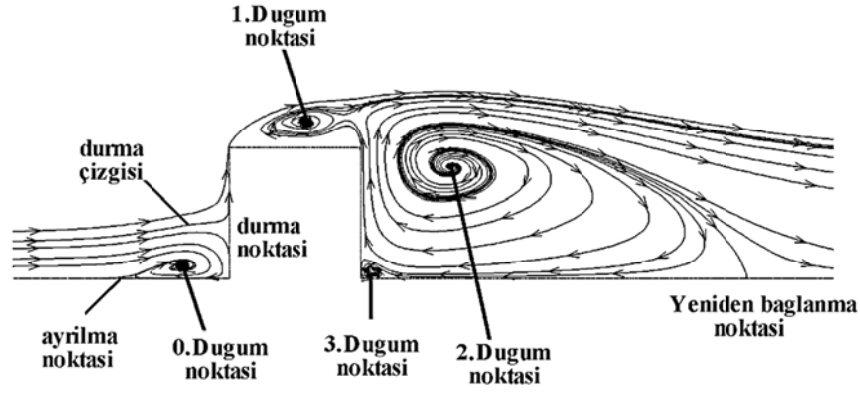


Şekil 3.6 Yakınsama Grafiği (Çözüm Ağı V)

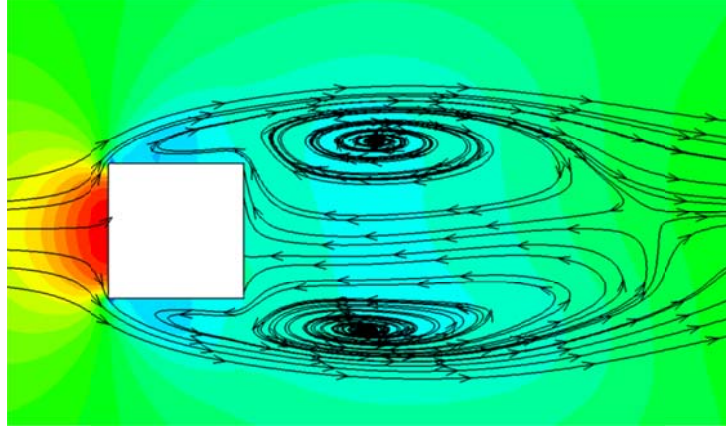
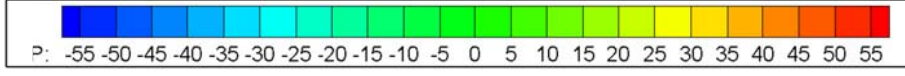


Şekil 3.7 Girdabın Merkezinden Alınan Nokta Üzerindeki Hızın Zamanla Değişimi

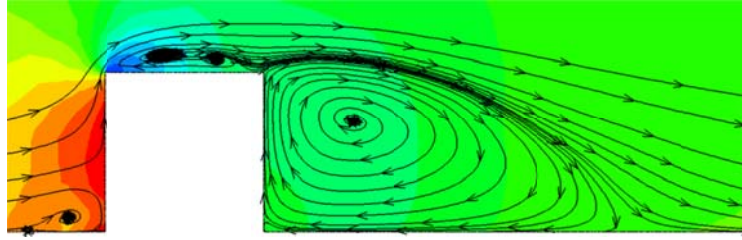
Bölüm 1’de akışın hareketlerinin anlatıldığı ve literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında yüksek Reynolds sayısında ( $Re$ ) yani türbülanslı akışlarda küp ve bina gibi benzer geometrili yapılar etrafında akışın karakteristiği oldukça karmaşıktır. Şekil 3.8’de küp etrafında akışın karakteristik özellikleri şematik olarak gösterilmiş ve Şekil 3.9’da simülasyon sonuçları önden ve yandan alınan kesitlerle gösterilmiştir. Küpün rüzgar gelen ön yüzeyinin önünde ön ayrılma bölgesi, ayrılma noktası ve 0. düğüm noktası, bulunmaktadır. Bu yüzey üzerinde akışın hızının sıfır olduğu bir nokta bulunmaktadır. Bu nokta durma noktası olarak adlandırılmaktadır. Bu noktada basınç en yüksektir. Küpe çarptıktan sonra kopan akış üst yüzeyden ayrılır ve daha sonra küp arkasında yeniden bağlanma noktasında tekrar birleşmektedir. Şekil 3.8’de gösterildiği gibi 1. Düğüm noktası bu ayrılmalara sebep olan girdabın merkezini, 2. Düğüm noktası ise küp arkasındaki yeniden dönme alanının merkezini göstermektedir. Küpün arka yüzeyi ve yerin kesiştiği köşede ise 3. Düğüm noktası gözlemlenebilir.



Şekil 3.8 Küp Etrafındaki Akışın Karakteristik Özellikleri



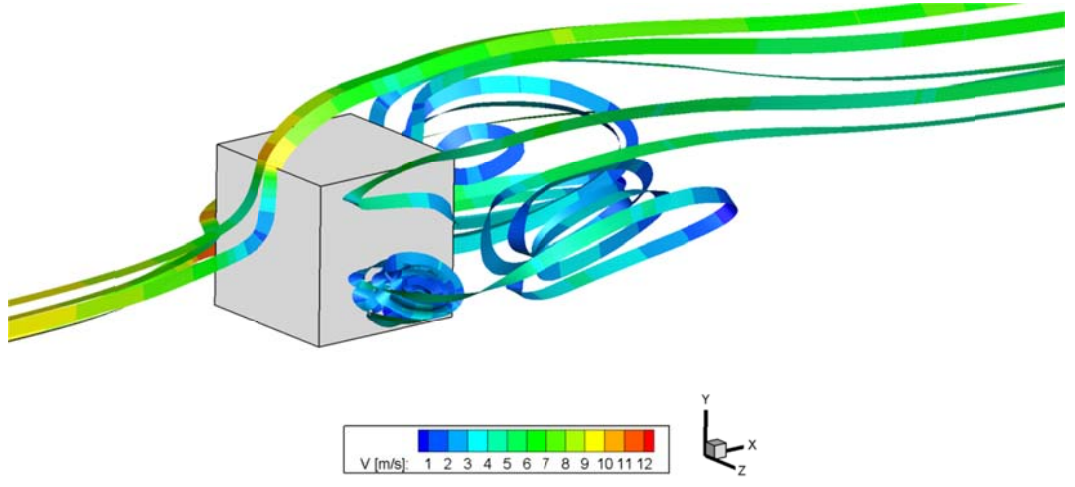
(a) Üstten Görünüş



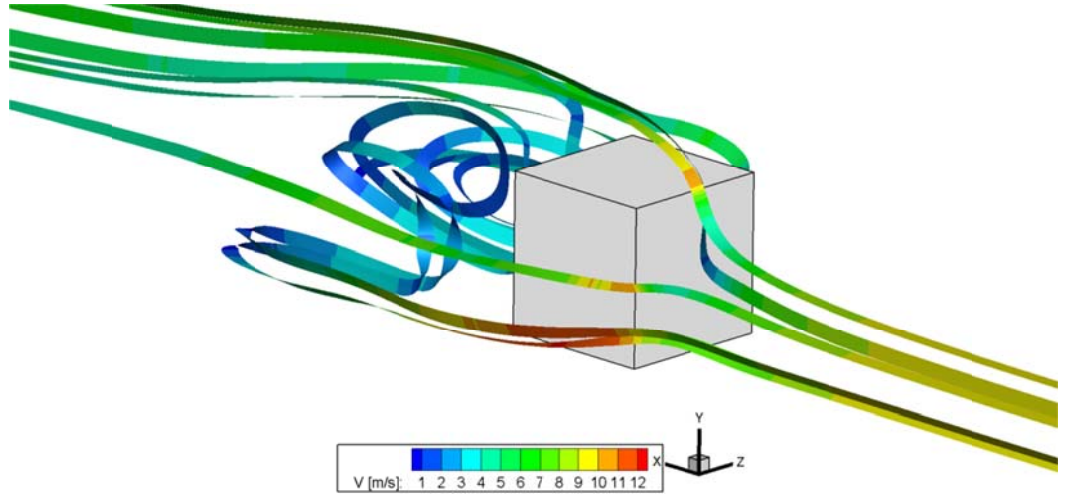
(b) Yandan Görünüş

Şekil 3.9 Merkezden Geçen Yatay ve Dikey Düzlemler Üzerindeki Basınç Konturları ve Akış Çizgileri





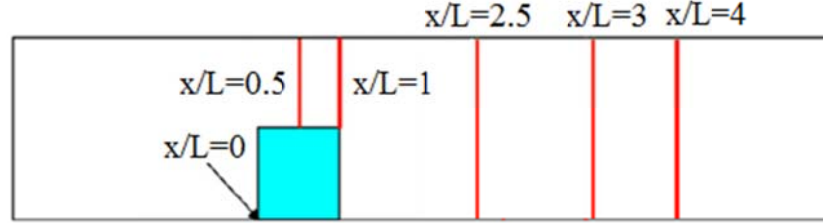
(a)



(b)

Şekil 3.10 Küp Etrafındaki 3-Boyutlu Akışın Hız Büyüklüğü ile Renklendirilmiş Akış Kurdelaları (ribbon) ile Görünümü

Şekil 3.11’de gösterilen küpe yakın yerlerde, üstünde ve arkasındaki iz bölgesinde çeşitli istasyonlarda, RANS simülasyonları ile elde edilen hız profilleri Şekil 3.12, 3.13 ve 3.14’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.11 Farklı Bölgelerdeki Hız Profilleri

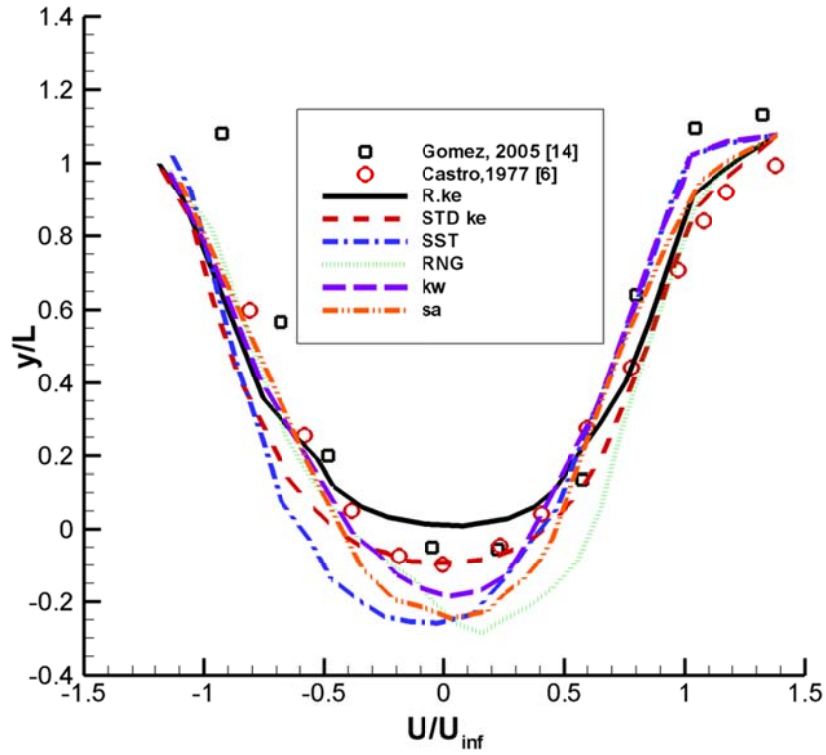
Hız profillerine bakıldığında deneysel çalışma ile uyumluluk gösterirken değerlerde farklılıklar bulunmakta, bu türbülans modelleri veya kullanılan çözüm ağının yeterli gelmemesinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak RANS analizlerine bakıldığında küp üzerindeki ayrılmalar doğru yakalanamamakta ve küp arkasındaki ayrılma bölgelerinin uzunluğu olduğundan fazla hesaplanmaktadır.

Şekil 3.15 ve 3.16’da farklı türbülans modelleri ile yapılan simülasyon sonuçlarında akış çizgilerinin nasıl değiştiği Murakami ve Mochida [8] ve Yakhot vd’nin [40] yaptığı deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu şekilde ayrılma bölgesi, ayrılmanın gerçekleştiği kısım ve bina arkasında akışın yeniden bağlandığı yerler gösterilmiştir.

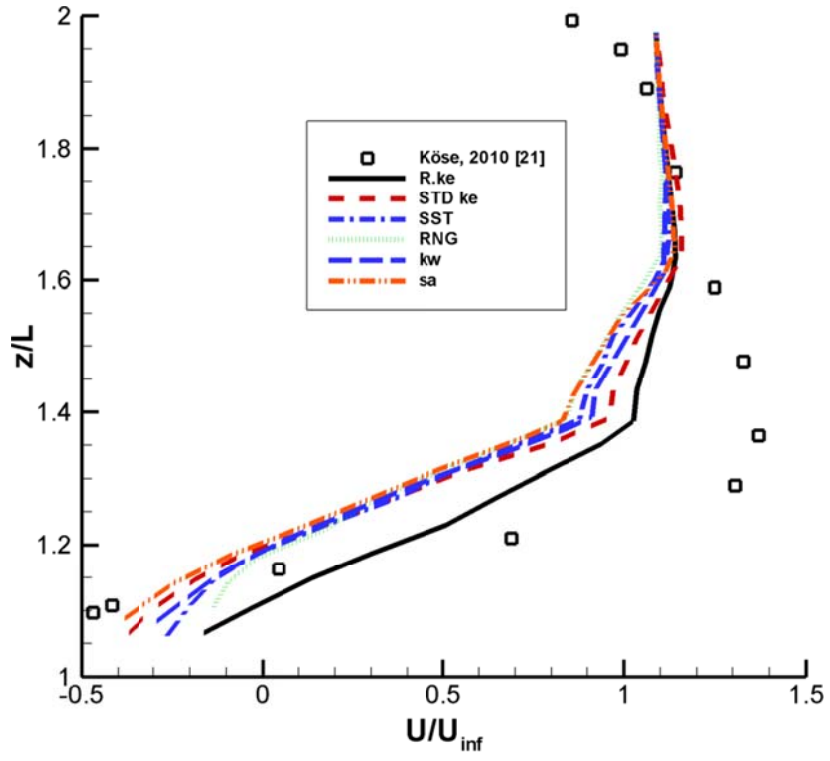
$X_{F_1}$  ön ayrılma bölgesinin uzunluğunu,  $X_{F_2}$  durma noktasını ve  $X_R$  yeniden bağlanma uzunluklarını anlatmaktadır. Bu mesafelerin karşılaştırmaları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Türbülans Modellerinin Karşılaştırması (Ayrılma ve Birleşme Noktaları)

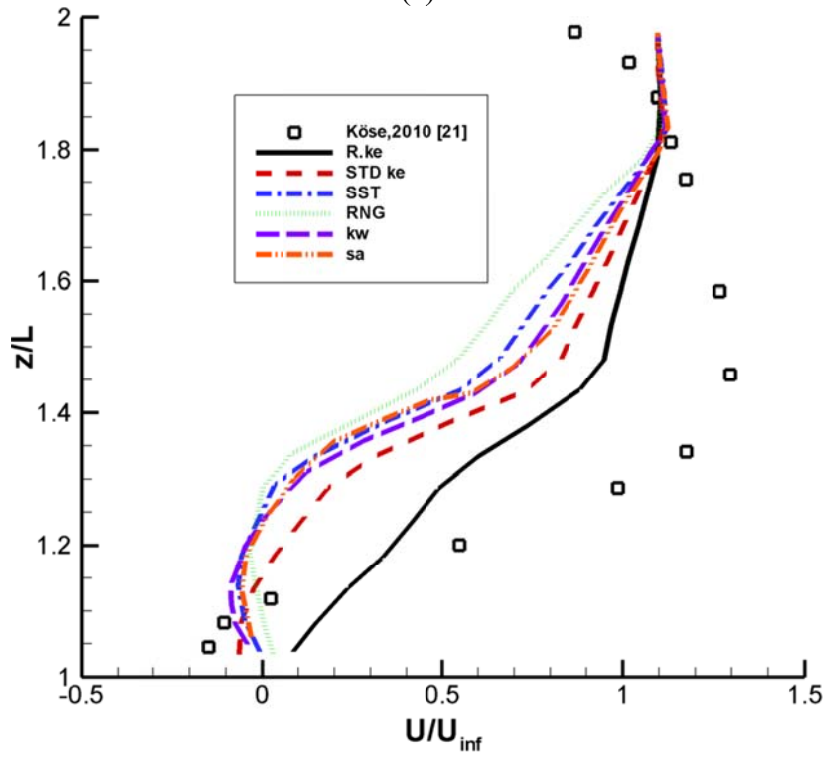
Türbülans Modeli	$X_{F_1}$	$X_{F_2}$	$X_R$
$R.k - \varepsilon$	0.387 m	0.124 m	0.722 m
$STD k - \varepsilon$	0.376 m	0.112 m	0.731 m
$RNG$	0.326 m	0.126 m	0.89 m
$STD k - \omega$	0.495 m	0.132 m	0.753 m
$SST$	0.307 m	0.136 m	0.871 m
$SA$	0.475 m	0.115 m	0.742 m
$DNS$	0.4 m	0.2 m	0.65 m
$Deney$	0.4 m	0.2 m	0.65 m



Şekil 3.12 Farklı Türbülans Modelleri ile Hız Profilleri @  $y = 0$  ve  $x = L$  (Küp Önünde)

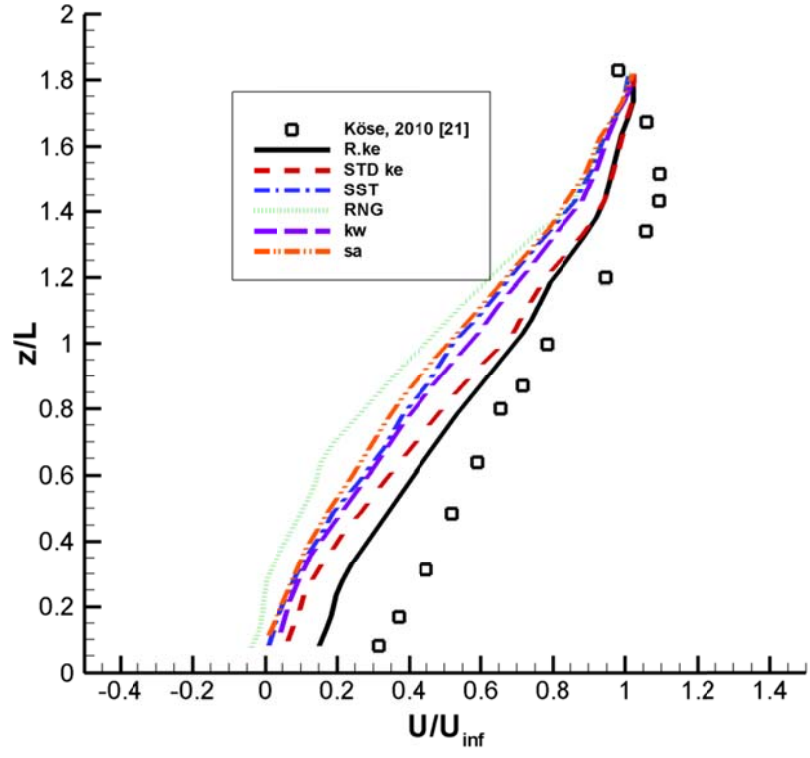


(a)

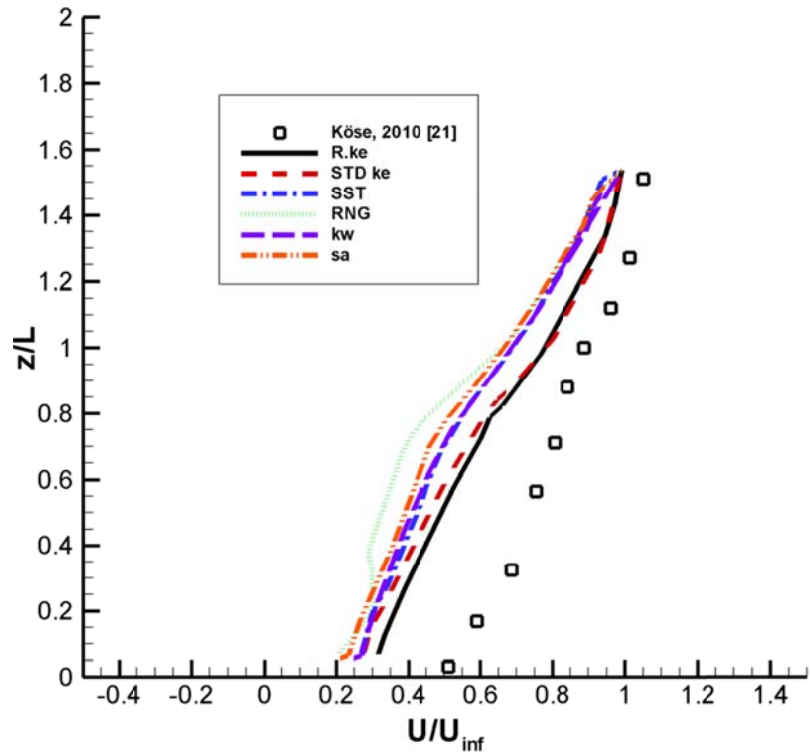


(b)

Şekil 3.13 Farklı Türbülans Modelleri ile Hız Profilleri @  $y = 0$  ve  
a)  $x/L = 0.5$  ve b)  $x/L = 1$  (Küp Üstünde)

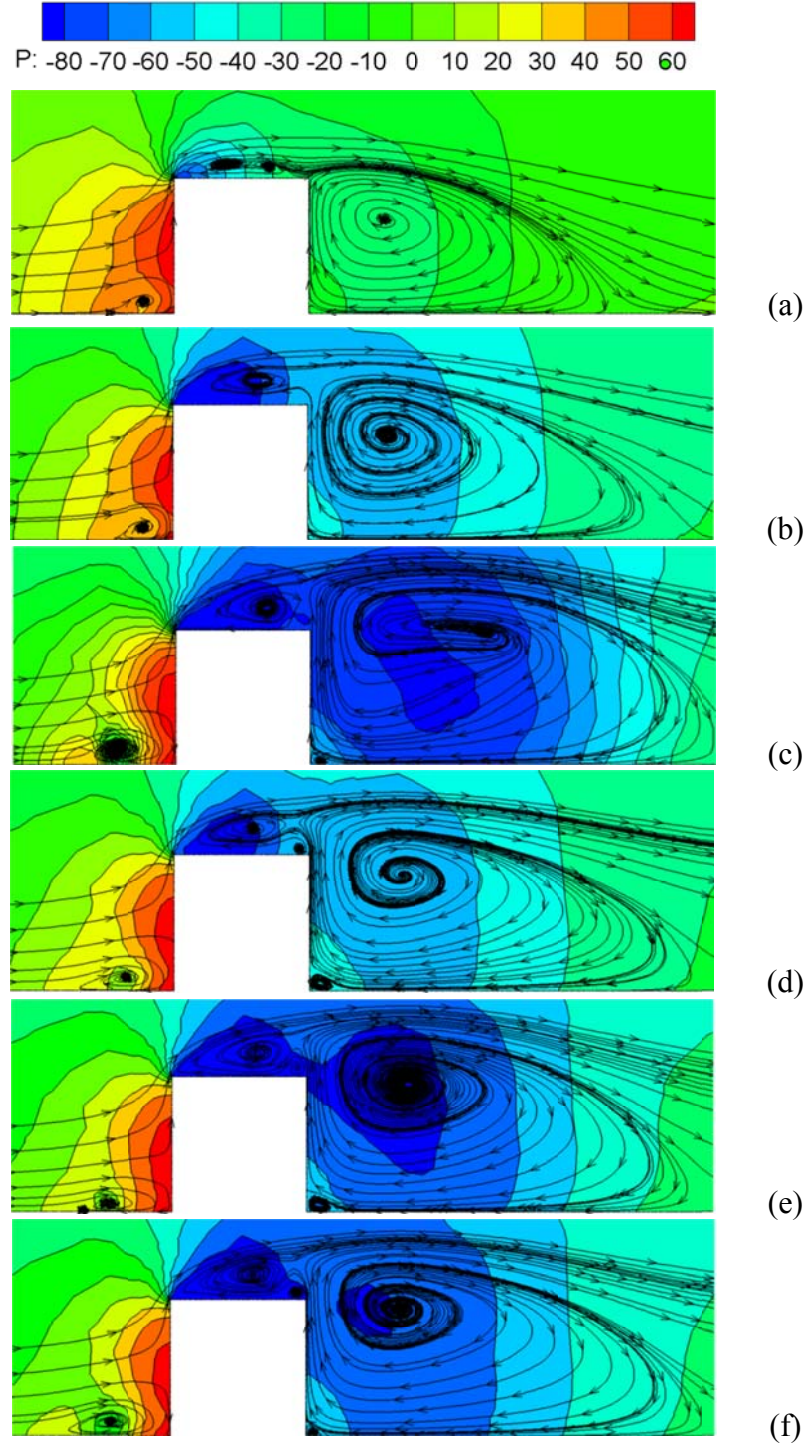


(a)

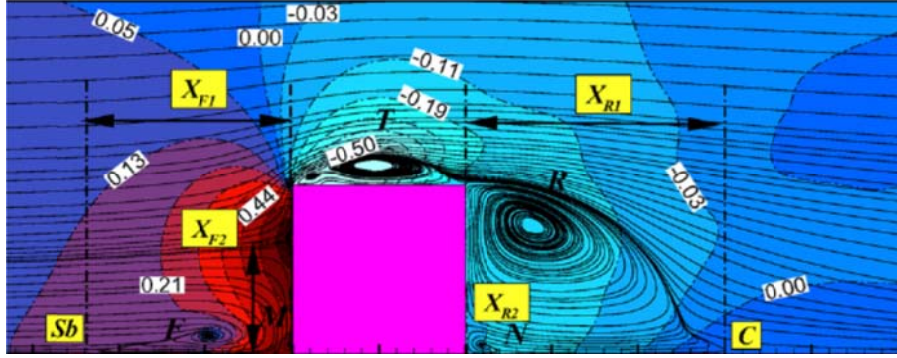


(b)

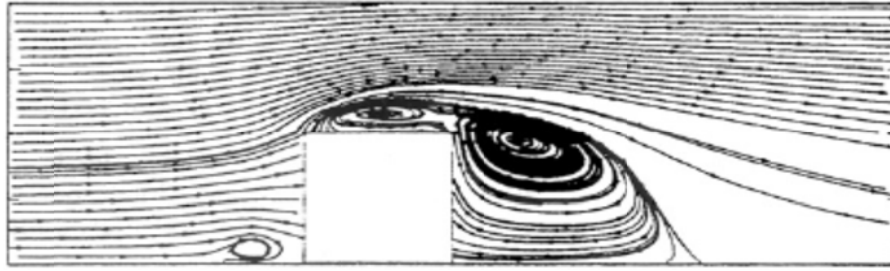
Şekil 3.14 Farklı Türbülans Modelleri ile Hız Profilleri @  $y = 0$  ve  
a)  $x/L = 3$  ve (b)  $x/L = 4$  (Küp Arkasında İz Bölgesinde)



Şekil 3.15 Merkezden geçen dikey düzlemde basınç konturları ve akış çizgileri  
a)  $R.k - \varepsilon$ , b)  $STD k - \varepsilon$ , c)  $RNG$ , d)  $STD k - \omega$ , e)  $SST$ , f)  $SA$



(a)



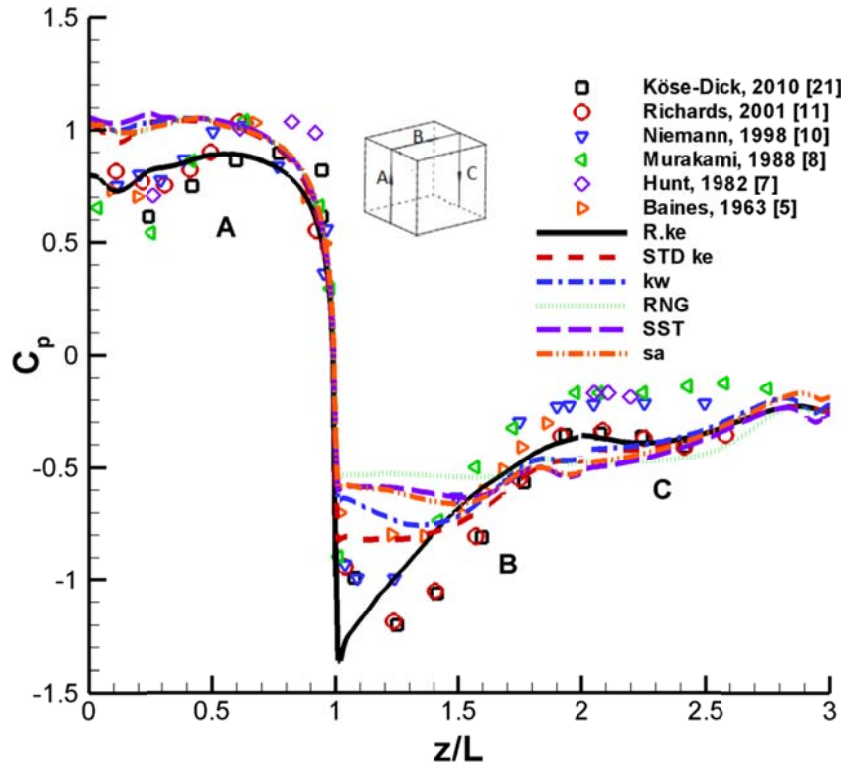
(b)

Şekil 3.16 Literatürden sonuçlar: a) DNS [40], b) Deney [8]

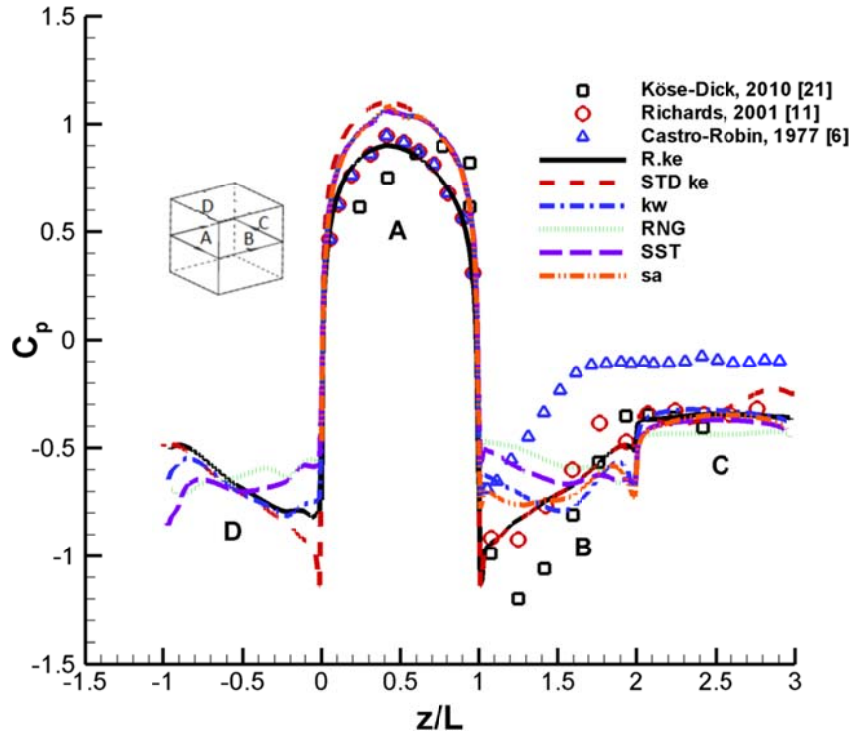
Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de farklı türbülans modelleri ile farklı deneysel sonuçların basınç katsayısı ( $C_p$ ) dağılımlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Basınç katsayısı aşağıdaki formül ile elde edilmektedir:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2} \quad (3.1)$$

Burada  $P$  istenilen bir noktadaki basınç değerini,  $P_\infty$  serbest akış basıncını,  $\rho_\infty$  serbest akış yoğunluğunu ve  $U_\infty$  serbest akış hızını göstermektedir.



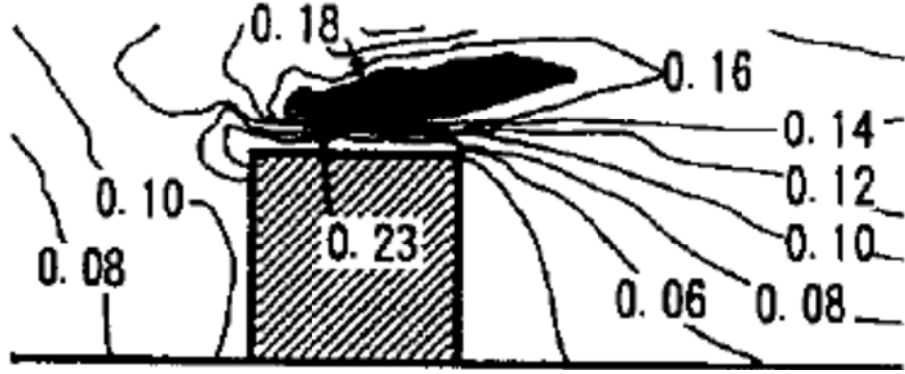
Şekil 3.17 Basınç Katsayısı Dağılımı (Dikey düzlemdeki A, B, C çizgileri üzerinde)



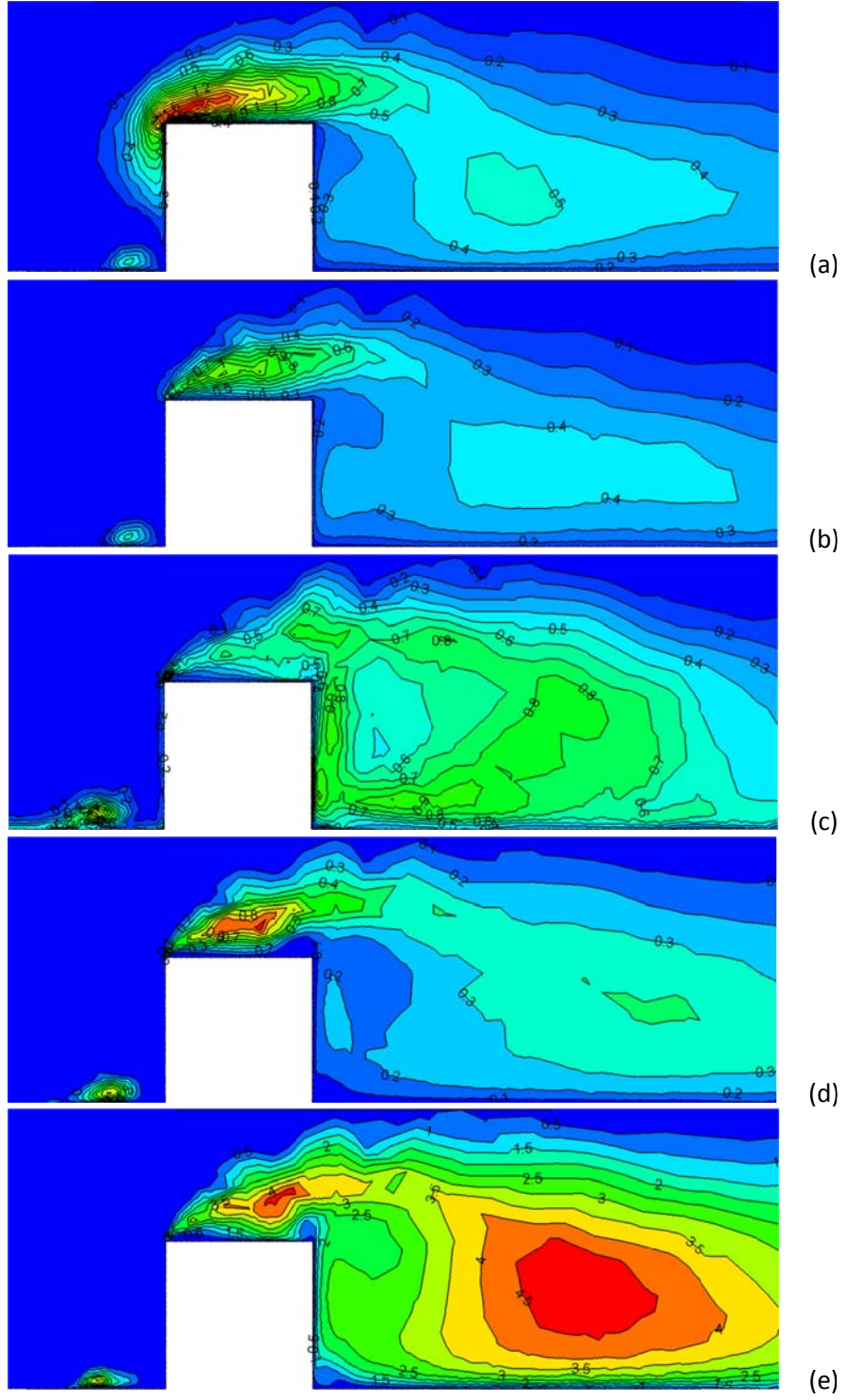
Şekil 3.18 Basınç Katsayısı Dağılımı (Yatay düzlemdeki D, A, B, C çizgileri üzerinde)



Yandan bakıldığında küp merkezinden geçen dikey düzlemdeki türbülans kinetik enerjisi dağılımları Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de gösterilmektedir. Şekil 3.19 Murakami ve Mochida [8] deneysel sonuçlarını göstermektedir. Şekil 3.20 ise bu çalışmada yapılan HAD simülasyonları sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlara bakıldığında  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  sonuçlarının deneysel sonuçlarla kabul edilebilir bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Diğer modellerde k değerleri doğru çözülemediğinden küpün çatı bölgesinde (üst yüzeyi) oluşan ters akış ile küpün arkasında oluşan yeniden bağlanmalar daha kısa mesafede olmaktadır (Çizelge 3.2).

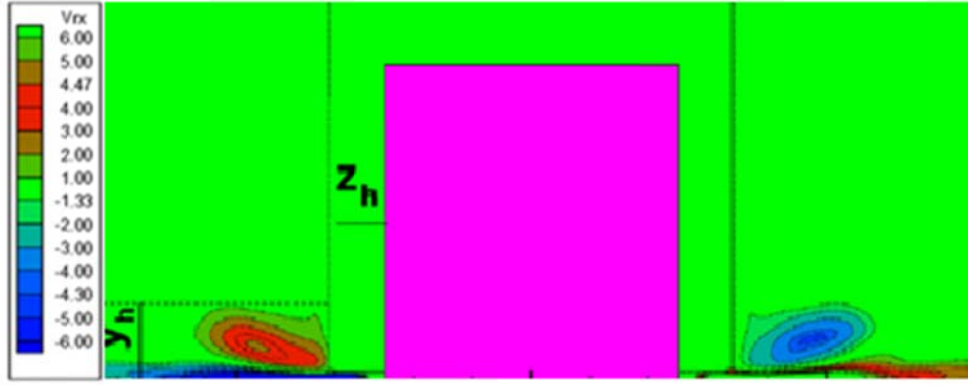


Şekil 3.19 Deneysel Türbülans Kinetik Enerjisi Konturları (Murakami ve Mochida [8])

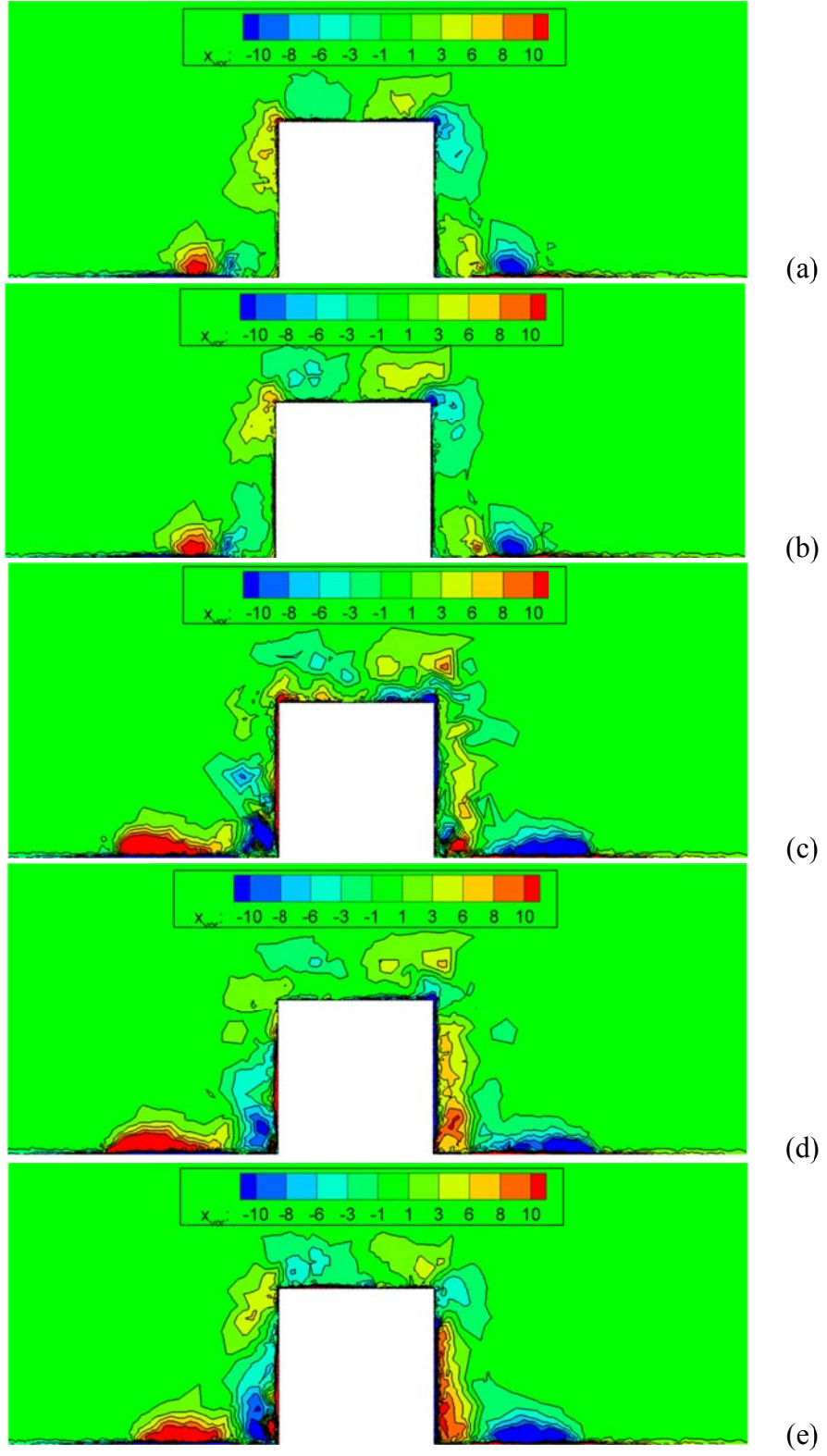


Şekil 3.20 Farklı Türbülans Modelleri ile Türbülans Kinetik Enerjisi Konturları:  
a)  $R.k-\varepsilon$ , b)  $STD k-\varepsilon$ , c)  $RNG$ , d)  $STD k-\omega$ , e)  $SST$

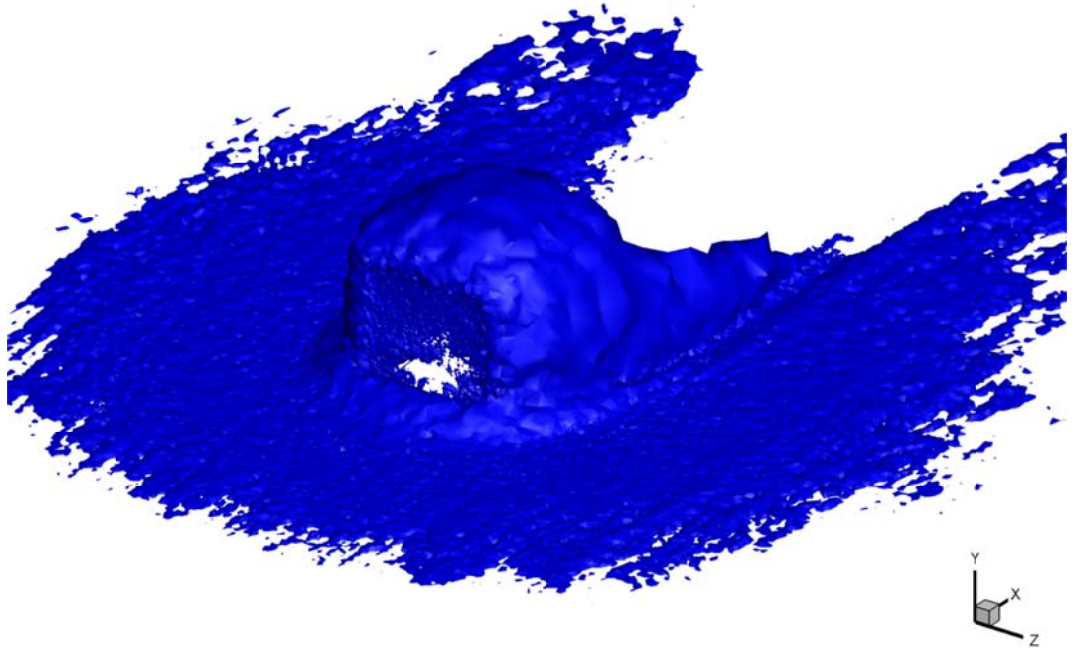
Önden bakıldığında küp merkezinden geçen dikey düzlemdeki  $x$  yönündeki girdap şiddeti değerleri Şekil 3.21 ve 3.22’de gösterilmektedir. Şekil 3.21’de Yakhot vd’nin [40] yaptığı DNS çalışması sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.22’de gösterilen HAD sonuçları ile DNS sonuçları ile karşılaştırılabilir. Bu şekillerde görülen girdaplar küpün ön yüzlerinden yan yüzlerine doğru geçen akışın oluşturduğu at nalı girdaplarının görüntüsüdür. Şekil 3.23’de toplam girdap şiddeti eş yüzeyleri gösterilmektedir ve oluşan at nalı girdapları gözlenebilmektedir.



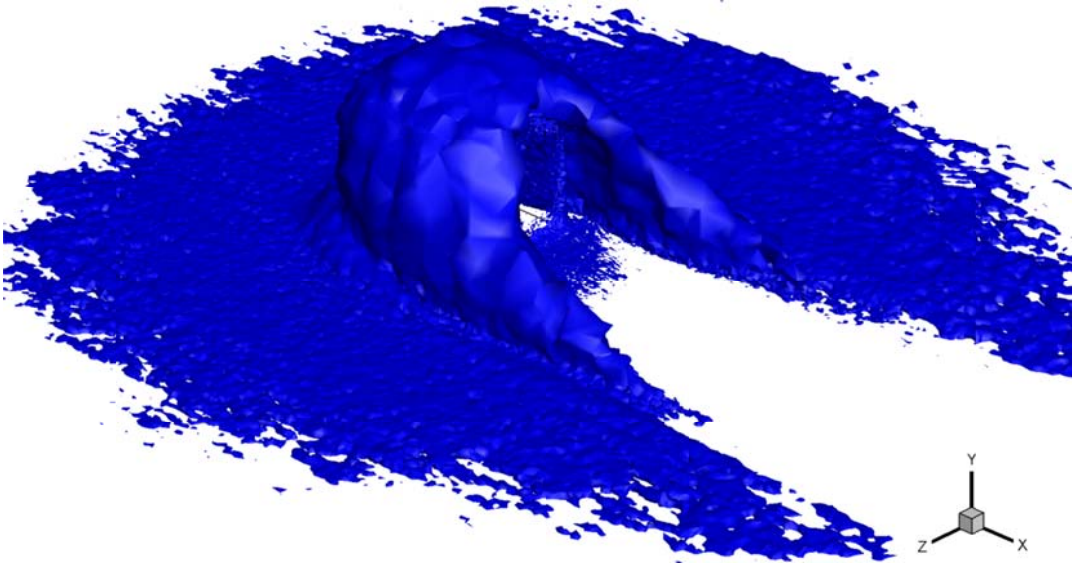
Şekil 3.21 Küp Etrafındaki Akış DNS Çözümleri:  $x$ -yönündeki girdap şiddeti konturları (Yakhot vd [40])



Şekil 3.22 Farklı Türbülans Modelleri ile Girdap Şiddeti Konturları (x-yönünde):  
a)  $R.k-\varepsilon$  , b)  $STD k-\varepsilon$  , c)  $RNG$  , d)  $STD k-\omega$  , e)  $SST$



(a)



(b)

Şekil 3.23 Toplam Girdap Şiddeti Eş Yüzeyleri

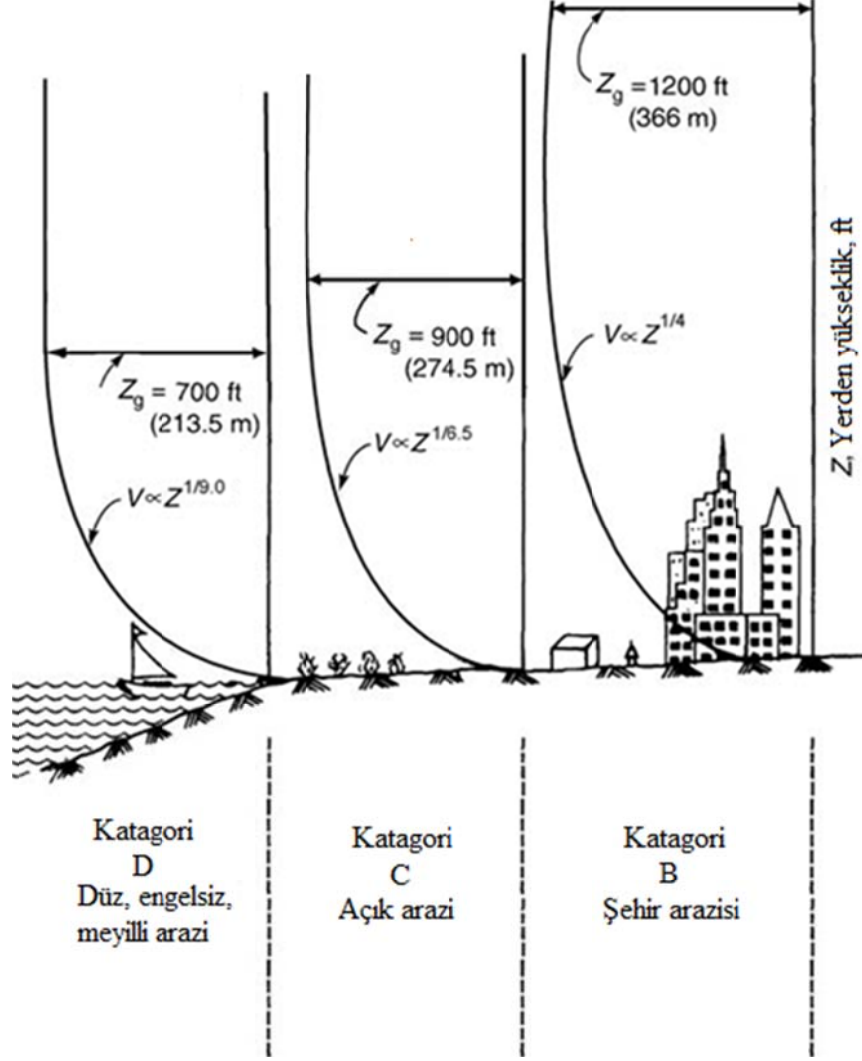
#### 4. YÜKSEK BİNA MODELİ ETRAFINDAKİ AKIŞIN İNCELENMESİ

Atmosferik sınır tabakada rüzgar hızı profili coğrafi özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve çeşitli çevresel engellerden dolayı değişmektedir. Yeryüzünde yerin etkisinden dolayı hız bozulurken yukarılara çıkıldıkça belli bir tabakadan sonra hız sabit bir şekilde yoluna devam etmektedir. Bu sınır tabakanın yüksekliği açık arazilerde 200 m'ye kadar çıkarken, kentsel arazilerde 1000 m'ye ulaşabilmektedir. Ayrıca atmosferik türbülansdan dolayı atmosferik sınır tabaka içerisinde kalan bölümde hız salınımları yapmakta ve bölgenin türbülanslı bir hale gelmesine neden olmaktadır.

Rüzgarın binalar üzerindeki etkilerini incelemek üzere yapılan rüzgar tüneli testlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için atmosferik sınır tabakanın iyi bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Atmosferik sınır tabakanın oluşumu için rüzgar tünelinin test alanının uzunluğu 15-20 m civarlarında olmalıdır. Bu tüneller sınır tabaka tünelleri olarak adlandırılmaktadır. Küçük test alanına sahip bir rüzgar tüneline de atmosferik sınır tabakanın elde edilmesi mümkündür. Sınır tabakanın elde edilebilmesi için belirli hesaplamalarla test alanının içerisine yüzey pürüzlülük elemanları olarak tanımlanan kafesler, bariyerler, helisler ve küpler konulmaktadır.

Bu tez çalışmasında seçilen yüksek bina modeli için hem deneysel çalışmalar hem de HAD simülasyonları yapılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada, Shojaee vd [43] tarafından Ankara Rüzgar Tüneli için tasarlanan ve kullanılan Atmosferik Sınır Tabaka modelleri kullanılmıştır. Atmosferik sınır tabaka tasarım parametrelerinin belirlenmesi için ASCE'nin (Amerikan Society of Civil Engineers) koyduğu ASCE 7-05 standartları kullanılmıştır. Bu standartlara göre yer etkilerinin özelliklerine göre atmosferik sınır tabakalar B, C ve D olmak üzere üç farklı kategoride sınıflandırılmaktadır. B kategorisi çoğunlukla toplu konutlardan oluşan ve bina yüksekliğinden 20 kat daha fazla yüksekliğe kadar çıkabilen rüzgar profillerinin görüldüğü kentsel arazilerde kullanılmaktadır. D kategorisi engelsiz, düz arazilerde görülen hız profilleri kullanılmaktadır. D kategorisi, fazla sürtünmeyle karşılaşmadığından hız profili B kategorisine oranla daha yükseklere kadar çıkabilen

bir kategoridir. C kategorisi ise B ve D kategorilerinin kullanılmadığı durumlarda örneğin açık arazilerde kullanılmaktadır. Bu kategorilere göre Şekil 4.1’de profillerin nasıl oluştuğu gösterilmektedir.



Şekil 4.1 ASCE 7-05 Standartlarına Göre Kategorilerin Özellikleri [43]

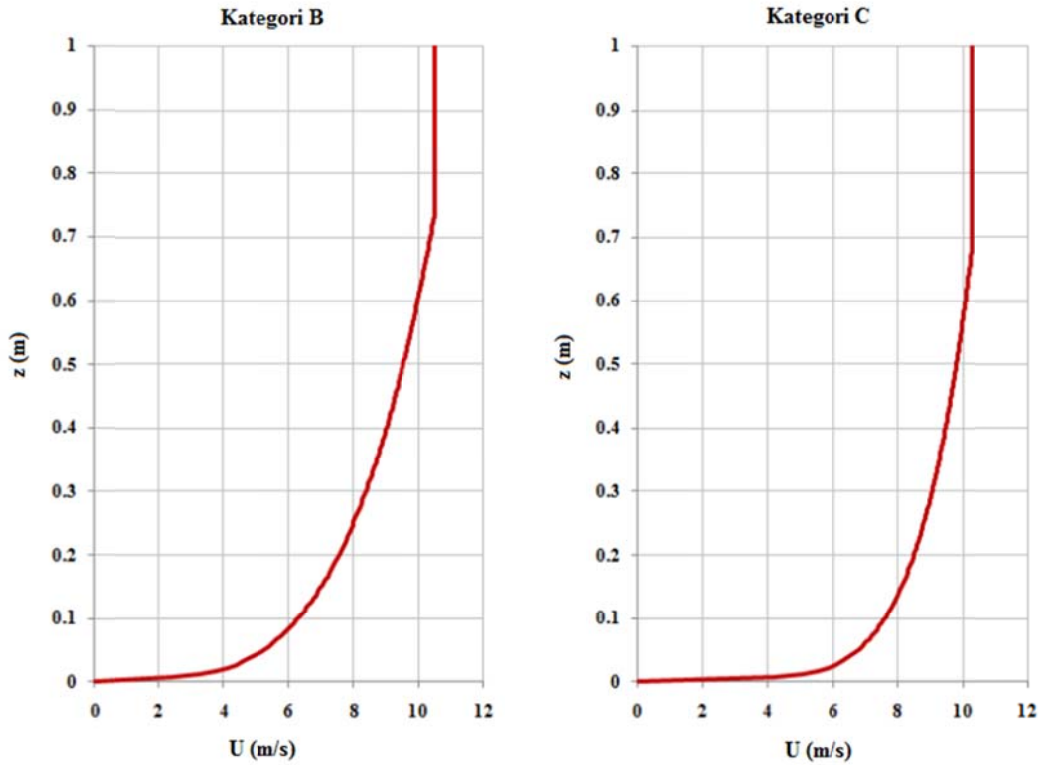
Rüzgar hızı profilleri aşağıdaki güç yasası denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\frac{U}{U_{\infty}} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^{\alpha} \quad (4.1)$$

Bu denklemde  $U$  belirli bir  $z$  yüksekliğindeki rüzgar hızını;  $U_{\infty}$  atmosferik sınır tabakanın en üst sınırına ulaştıktan sonraki rüzgar hızını,  $z$  hız profilinin yerden ulaştığı yüksekliği,  $\delta$  atmosferik sınır tabakanın yüksekliğini ve  $\alpha$  kategoriye bağlı olarak değişen sabiti göstermektedir. Deneyde kullanılan ASCE 7-05'in belirlediği parametreleri gösteren tablo Çizelge 4.1'de gösterilmektedir. Hız profillerinin şekilleri de Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 B ve C Kategorilerindeki Sınır Tabaka Hız Profili Parametreleri

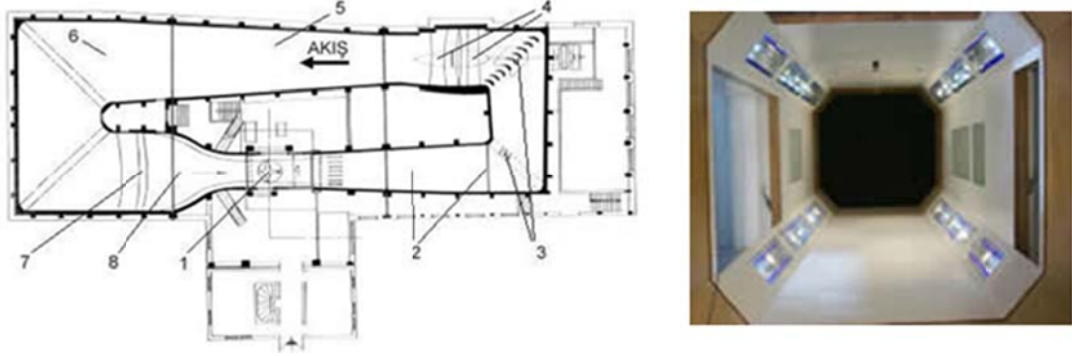
Kategori	$\alpha$	$\delta_{gerçek} (m)$
B	1/4.0	365.76
C	1/6.5	274.32



Şekil 4.2 B ve C Kategorilerine Göre Atmosferik Sınır Tabaka Hız Profilleri



ASCE 7-05 standartları tarafından belirlenen ve Şekil 4.2’de gösterilen hız profillerinin Ankara Rüzgar Tüneli testlerinde elde edilebilmesi için yüzey pürüzlülük elemanlarının kullanılması gerekmektedir. Şekil 4.3’de gösterildiği gibi Ankara Rüzgar Tüneli 3 m genişliğe, 2.44 m yüksekliğe ve 6 m uzunluğuna sahiptir.

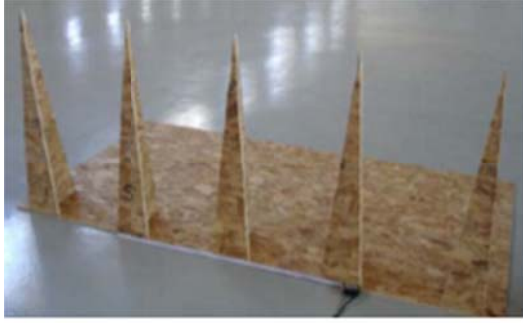


Şekil 4.3 TUBİTAK SAGE Ankara Rüzgar Tüneli

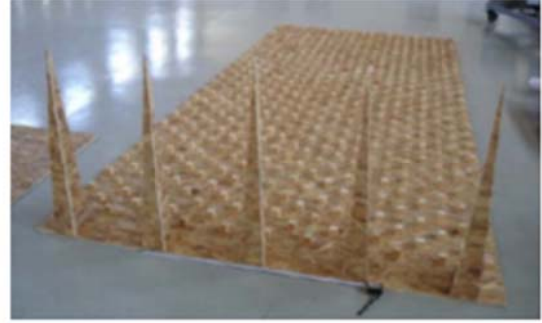
Yüzey pürüzlülüğünü sağlayan bu elemanların tasarımı Shojaee vd [20]’ün yaptığı çalışmada detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Kullanılacak olan kategoriye göre atmosferik sınır tabaka kalınlığını ve kategori sabitini ( $\alpha$ ) kullanarak elemanların tasarımı için gerekli olan diğer parametreler hesaplanmaktadır. Bu parametreler yere yerleştirilen küplerin kenar uzunluğu ( $k$ ) ve kullanılan dikey elemanların sayısı, genişliği ( $b$ ) ve yüksekliği ( $h$ ) gibi değerlerdir. Shojaee’nin yaptığı çalışmanın sonuçları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.4’de Ankara Rüzgar Tüneli’nde deneyler sırasında kullanılmış olan sınır tabakanın oluşumun sağlayan elemanlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Yüzey Pürüzlülük Elemanlarının Özellikleri [20]

Parametreler	B Kategorisi	Kategori C
$\delta_{gerçek} (m)$	365.76	274.32
Ölçek	1/500	1/400
$\delta_{ünel} (m)$	0.731	0.686
$\alpha$	1/4.0	1/6.5
$k(m)$	0.033	~ 0
$b(m)$	0.904	0.885
$h(m)$	0.158	0.107



(a)



(b)

Şekil 4.4 a) C tipi ve b) B Tipi Pürüzlülük Elemanları

#### 4.1 Deneysel Çalışma

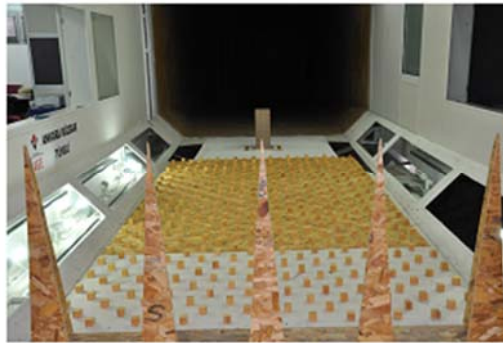
Bu tez çalışmasında Ankara Rüzgar Tünelinde seçilen bina modeli ile deneyler yapılmıştır. Bu model Shojaee vd'nin [20] kullandığı model ile aynı ölçülerde olup üzerine basınç problemleri yerleştirilecek şekilde delikler açılarak tahtadan üretilmiştir. Öncelikle boş tünel içerisine yerleştirilmiş olan yüksek bina modeli ile deneyler yapılmıştır. Daha sonra iki farklı rüzgar açısında ( $0^\circ$  ve  $30^\circ$ ), Shojaee vd'nin [20] kullandığı B ve C tipi sınır tabakalar için deneyler yapılmıştır. Şekil 4.5'de boş tünelde, B ve C tipi sınır tabakalar içinde bina modelleri gösterilmiştir. Şekil 4.6'da  $0^\circ$  ve  $30^\circ$  rüzgar açıları için tünele yerleştirilmiş olan yüksek bina modelinin konumu gösterilmiştir.



a) Boş Tünel



b) C Tipi Sınır Tabaka



c) B Tipi Sınır Tabaka

Şekil 4.5 Sınır Tabaka içinde Yüksek Bina Modeli a) Boş Tünel, b) C tipi Sınır Tabaka ve c) B Tipi Sınır Tabaka



a) 0° Görünümü

b) 30° Görünümü

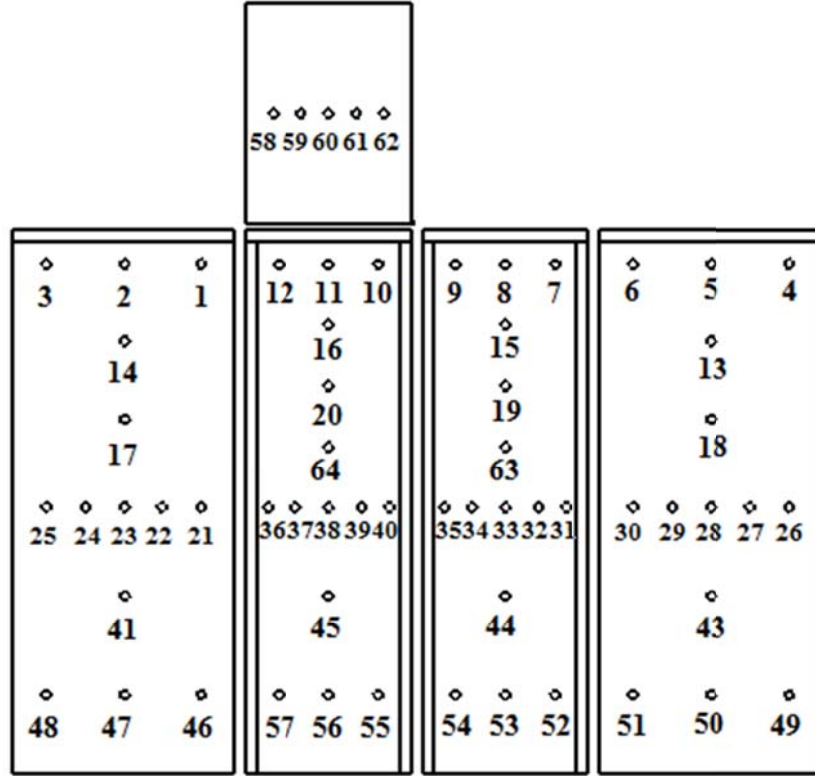
Şekil 4.6 Yüksek Bina Modelinin a) 0° ve b) 30° Rüzgar Açısı için Görünümleri

Çizelge 4.3’de deney koşullarının fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.3 test alanına giren rüzgarın hızını,  $U$ , basıncını,  $P$ , ve sıcaklığını,  $T$ , göstermektedir. Deneyle sırasında yüzey basınç ölçümleri ve bina modeli arkasında iz bölgesinde hız ölçümleri yapılmıştır.

Deneylede yüzey basınç ölçümleri toplam 64 kanallı basınç ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Bina üzerine açılan deliklere basınç problemleri hazırlanarak yerleştirilmiştir ve bu deliklerin hangi kanala denk geldiği Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Test Koşullarının Fiziksel Özellikleri

Koşu #	$U$ (m/s)	$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$P_{atm}$ (psi)	$T_{atm}$ (°K)
1	10.04	1.79E-05	1.11	13.33	287.44
2	10.02	1.79E-05	1.11	13.32	287.56
3	9.99	1.79E-05	1.11	13.32	287.57
4	10.02	1.79E-05	1.11	13.31	287.61
5	9.96	1.79E-05	1.11	13.31	287.51



Şekil 4.7 Yüksek Bina Modeli Üzerindeki Basınç Delikleri

Deneyle sırasında her bir kanaldan 1000 Hz frekans ile ölçüm alınmaktadır. Ancak testler sırasında genel ortalama almak amacıyla basınç ölçümü, kanal sıralamasına göre taranmaktadır. Öncelikle birinci kanaldan 0.06 saniye boyunca 60 veri toplanmakta ve daha sonra ikinci kanala geçilmektedir. İkinci kanal tarandıktan sonra bir sonrakine geçilmekte ve bu şekilde 64 kanal tamamlanana kadar ölçümlere devam edilmektedir. Daha sonra 64 kanal için bu döngü 10 kere tekrar edilmektedir. Toplamda her bir kanaldan 600 veri alınmaktadır. Her bir kanal için alınan bu 600 veri 60'lı veri setleri olarak alınmıştır ve her 60 veri arasında belli bir zaman aralığı vardır. Her bir kanal için alınan 600 verinin 10 set halinde ayrı zaman dilimlerinde alındığı unutulmamalıdır.

Bina arkasındaki iz bölgesindeki bir nokta dikey bir çizgi boyunca yapılan hız ölçümleri için sıcak telli hız ölçer kullanılmıştır. Shojaee vd'nin [20] diğer

çalışmalarında yapıldığı gibi sıcak telli akış hızı ölçer sistemi referans basınç problemleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Test matrisindeki koşullarda her koşul için 75 noktada ölçüm yapılmıştır. 5 kHz örnekleme hızında 4 saniye boyunca her noktada 20000 veri alınmıştır. Noktalar arası mesafe 1 cm'dir. Bu veriler voltaj olarak alınmış olup aşağıdaki denklem kullanılarak hız olarak değiştirilmiştir.

$$V_{hız} = 256.9067 - (625.6138 * volt^2) - (269.048 * volt^3) + (44.91582 * volt^4) \quad (4.3)$$

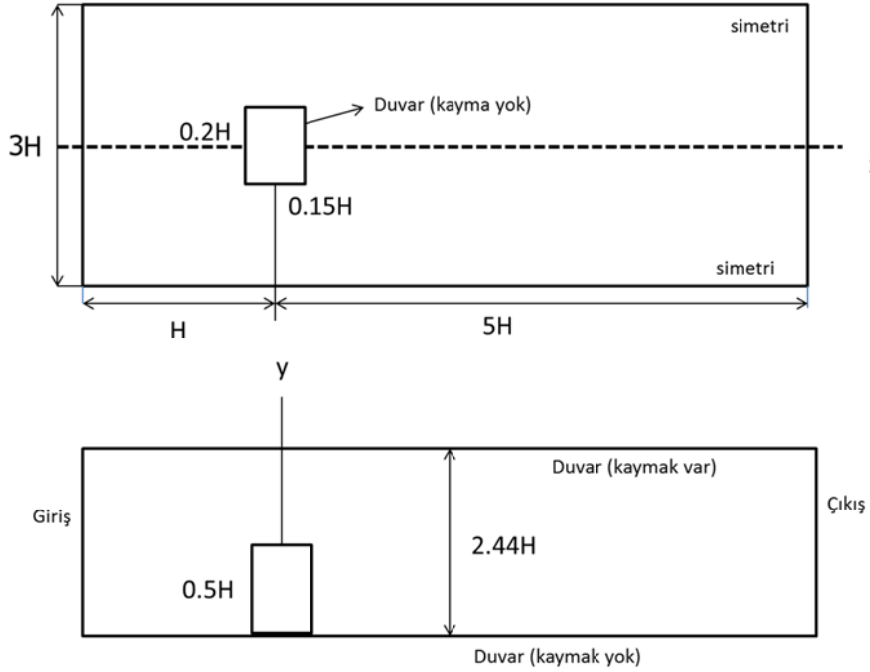
Bu hız verilerinin ortalaması alınarak her nokta için tek bir hız değeri hesaplanmış, ve bina arkasındaki iz bölgesinde ortalama hız profilleri elde edilmiştir.

Yüzey basınç dağılımı ve iz bölgesi hız profili ölçümlerinin sonuçları aşağıdaki HAD simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak verilmektedir.

## 4.2 Hesalamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları

Deneyle yapılan aynı yüksek bina modeli etrafındaki akış için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonları 10 m/s serbest akış hızı için ve aynı deney koşulları için ( $Re = 2 \times 10^5$ ) yapılmış ve elde edilen sonuçlar Ankara Rüzgâr Tüneli'nden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

HAD simülasyonlarına başlamadan önce simülasyonu yapılacak olan geometri ve geometrinin içinde bulunduğu hesaplama alanı için çözüm ağı oluşturulmuştur. Çözüm ağını oluşturmak için ilk aşamada, bina modeli ve hesaplama alanını içeren geometri GAMBIT programı kullanılarak oluşturulmuştur. 20 cm x 15 cm x 50 cm ölçülerine sahip olan bina modeli bina hesaplama alanının girişinden  $H = 1$  m kadar uzaklıktaki bölgeye yerleştirilmiştir. Hesaplama alanı Ankara Rüzgâr Tüneli'nin ölçüleri ile aynı olacak şekilde 3.44 m genişliğe, 2.44 m yüksekliğe ve 6 m uzunluğa sahiptir. Hesaplama alanının görüntüsü ve küp simülasyonlarına benzer şekilde kullanılan sınır koşulları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

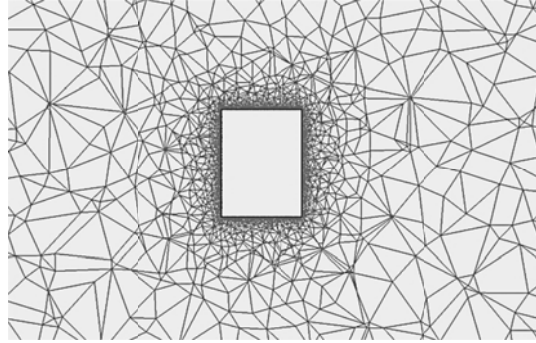


Şekil 4.8 Hesaplama Alanı

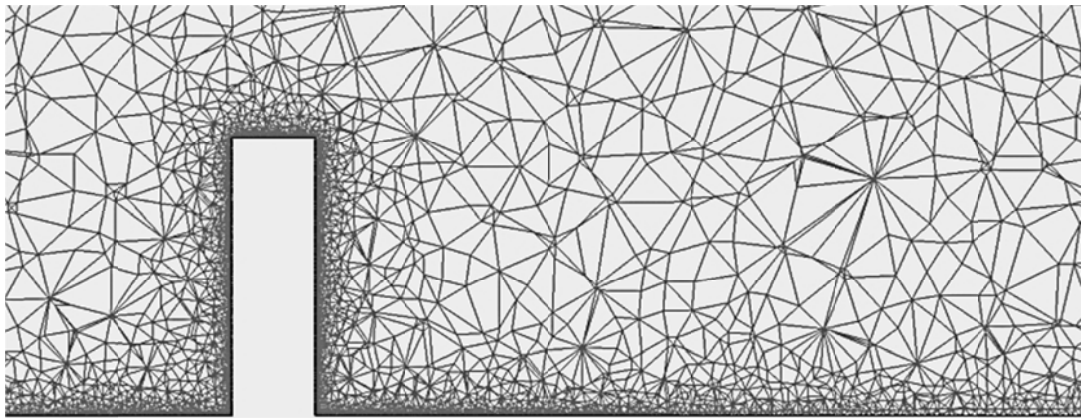
Problemin çözümü için yapısal olmayan ağ yapısı kullanılmıştır. Özellikle bina yüzeyleri oldukça küçük elemanlardan oluşmuş olup, hesaplama alanında, kullanılan bilgisayar kapasitesine uygun nokta sayısı olacak şekilde, dört yüzeyle elemanlar kullanılmıştır. Bu çözüm ağının özellikleri Çizelge 4.4’de belirtilmiştir. Bu hazırlanmış olan çözüm ağının, ortasından alınan yatay bir düzlem üzerindeki iz düşümü ve bina yüzeyleri ile taban üzerindeki üçgen elemanlarının dağılımı Şekil 4.9 görülmektedir.

Çizelge 4.4 Çözüm Ağının Özellikleri

Çözüm Ağı	Hücre sayısı	Yüzey sayısı	Nokta sayısı
I	2 155 283	4 489 192	451 928



(a)



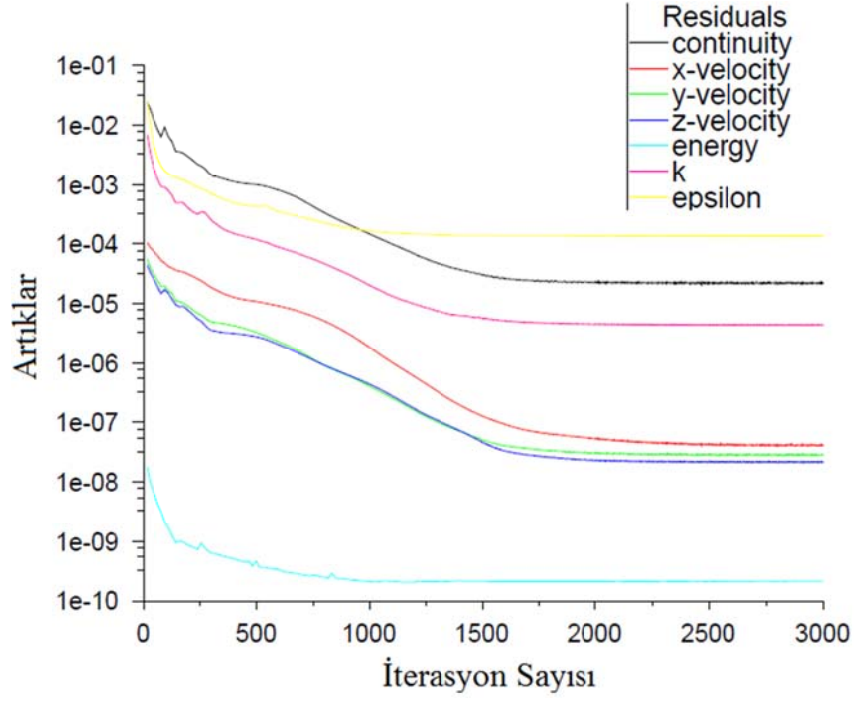
(b)

Şekil 4.9 Çözüm Ağı a) Üstten Görünüm, b) Yandan Görünüm

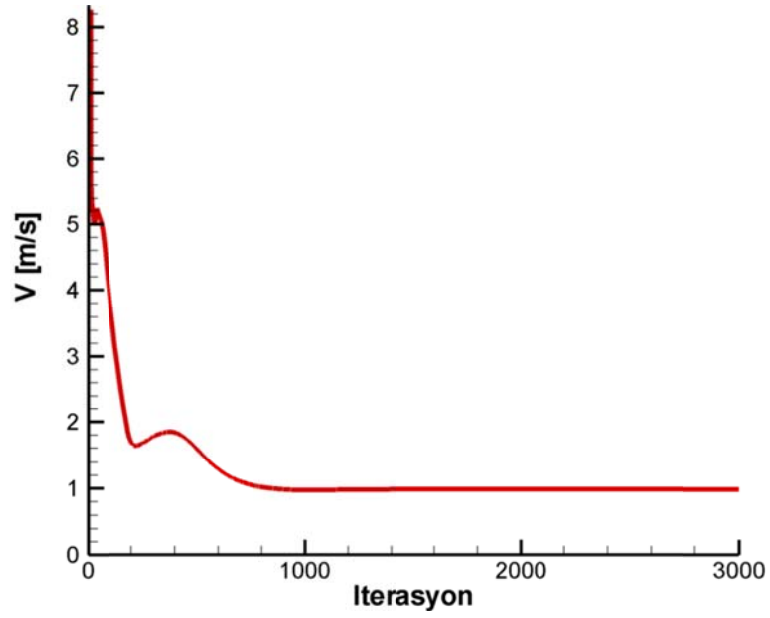


Çözüm ağı hazırlandıktan sonra,  $k - \varepsilon$  ve  $k - \omega$  türbülans modelleri kullanılarak HAD simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlarda  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $\mu = 1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ , ve  $P = 101 \text{ kPa}$  olarak tanımlanmıştır.

3000 iterasyon sonucundaki yakınsama grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Binanın 1.5 cm arkasında seçilmiş bir noktadaki zamana göre hız değişimi ise Şekil 4.11'de görülmektedir. Yapılan RANS simülasyonları sonucu daimi durumda sonuçlar elde edilmiş ve analizleri yapılmıştır. Yüzey basınç dağılımları ile birlikte akışın üç boyutlu görüntüleri ve binanın önünde ve arkasında alınan birer doğru boyunca hız dağılımları (hız profilleri) incelenmiştir.



Şekil 4.10 Yakınsama Grafiği

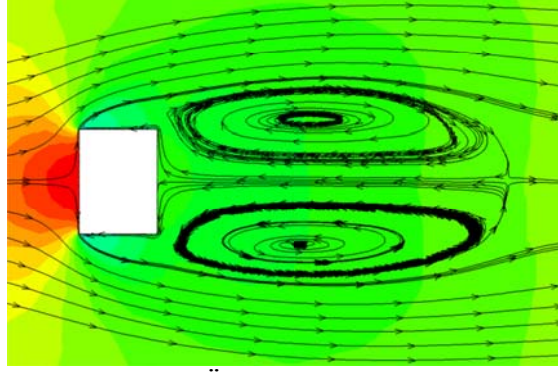
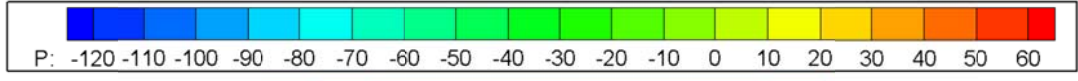


Şekil 4.11 Kontrol Noktasında Zamana Göre Hız Değişimi

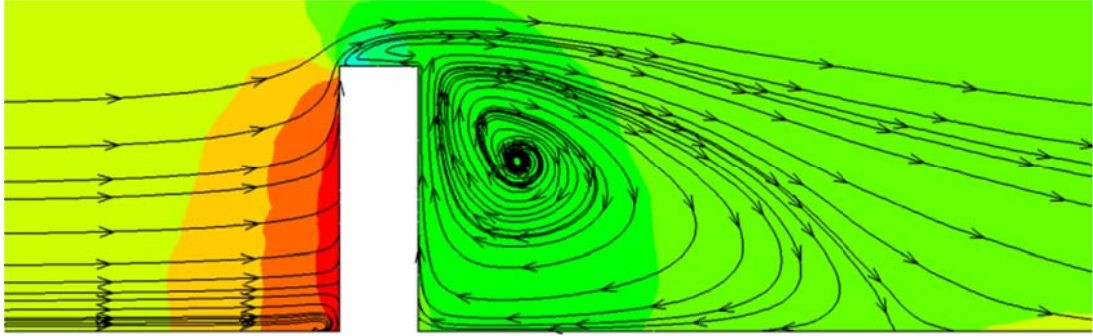
### 4.3 Sonuçlar

İki farklı açıda gelen rüzgar için HAD simülasyonları yapılmıştır. 0° ve 30° rüzgar açıları için elde edilen sonuçların bina etrafındaki akış çizgileri ve basınç konturları Şekil 4.12 ve 4.13’de gösterilmektedir. Bina merkezinden geçen yatay düzlemde (üstten görünüş) ve dikey düzlemdeki (yandan görünüş) akış çizgileri ile ayrılma bölgeleri girdaplı iz bölgesi gözlenmektedir. 3-boyutlu görüntülerde, yerel basınç eğrileri ile renklendirilmiş akış kurdelaları görülmektedir. Gelen rüzgarın açısı değiştiği zaman 3-boyutlu akış karakteristik özellikleri de değişmektedir, .

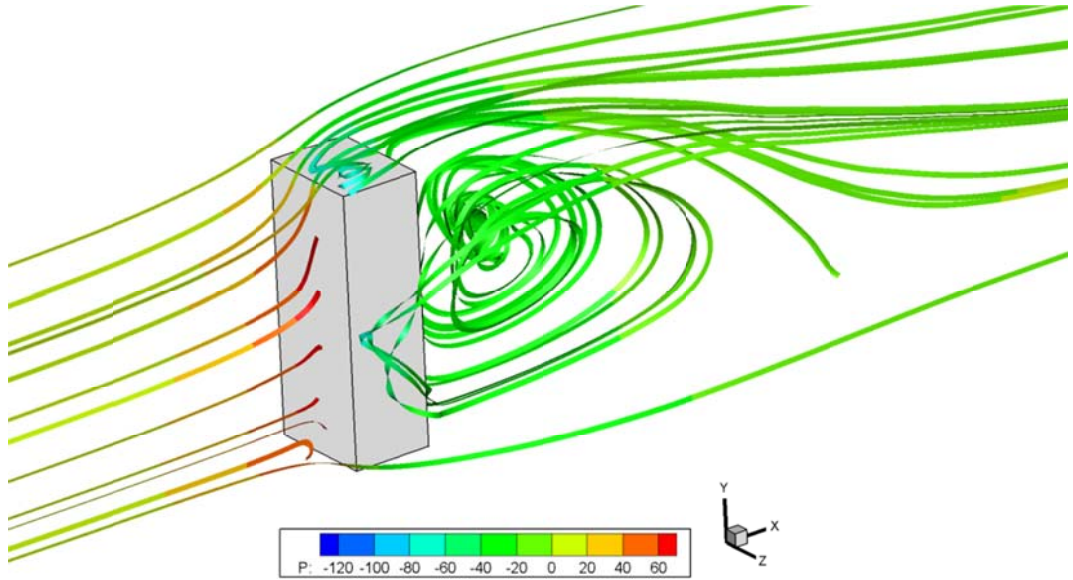
0° ve 30° rüzgar açıları için yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilen basınç dağılımları Şekil 4.14 ve 4.15’de Ankara Rüzgar Tüneli’nde yapılan deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Basınç katsayısı dağılımlarına bakıldığında, en yüksek basınçlar boş tünel için yapılan çalışmalarda görülmektedir. Bunu, C tipi sınır tabaka ve daha sonra B tipi sınır tabaka ile elde edilen sonuçlar takip etmektedir. Bunun sebebi özellikle B tipi sınır tabakadaki sürtünmeye neden olan parametrelerin fazla olmasıdır. Sonuçlarda gözlenen farklılıklar yapısal olmayan ağ yapısı kullanıldığından sınır tabakanın iyi bir şekilde yakalanamamasından kaynaklanmaktadır.



a) Üstten Görünüş

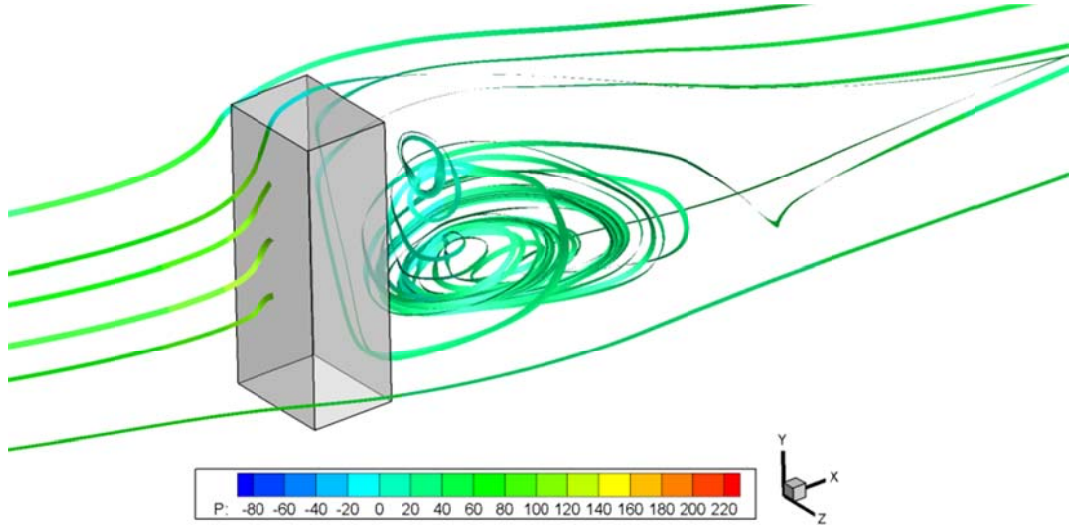
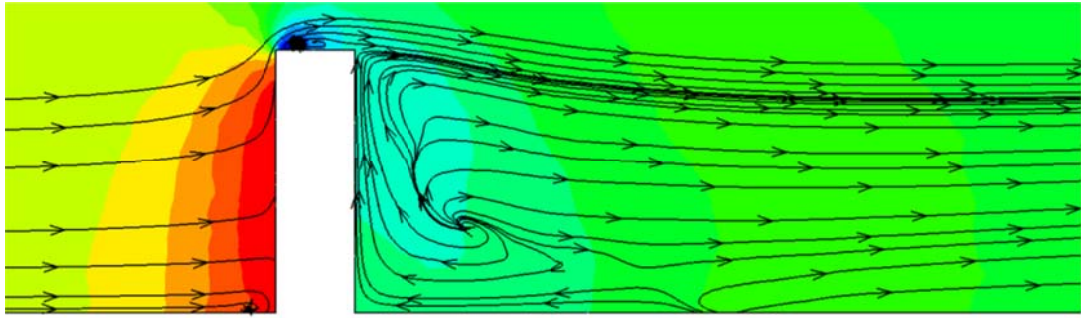
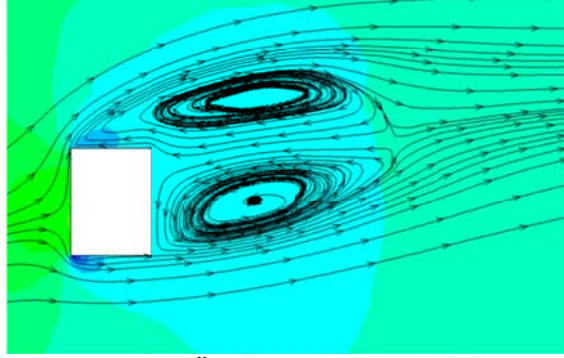
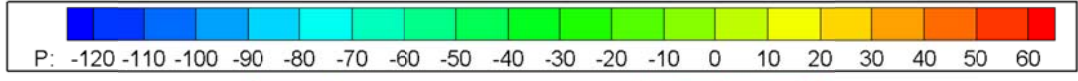


b) Yandan Görünüş

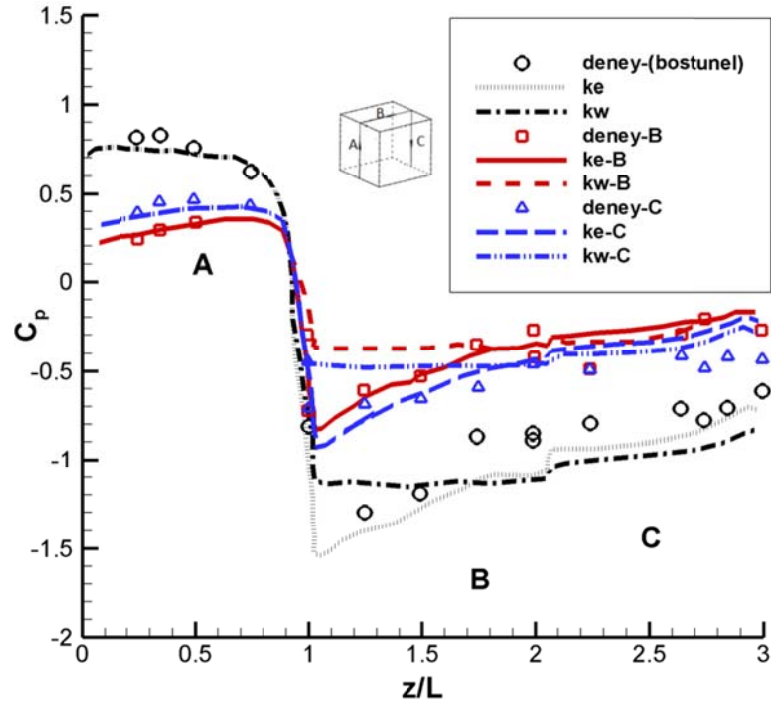


(c) 3-Boyutlu Görünüş

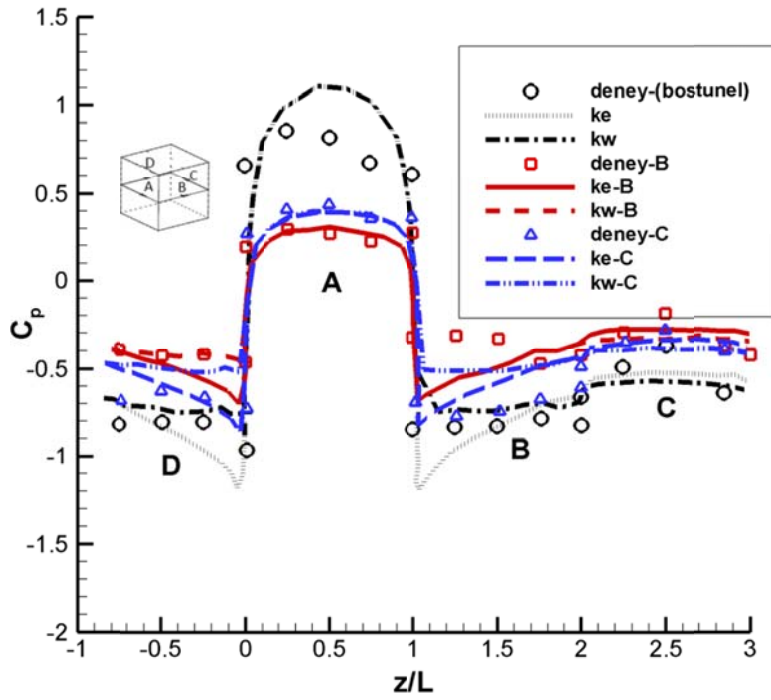
Şekil 4.12  $0^\circ$  Rüzgar Açısında Akış Çizgileri ve Basınç Konturları



Şekil 4.13 30° Rüzgar Açısında Akış Çizgileri ve Basınç Konturları

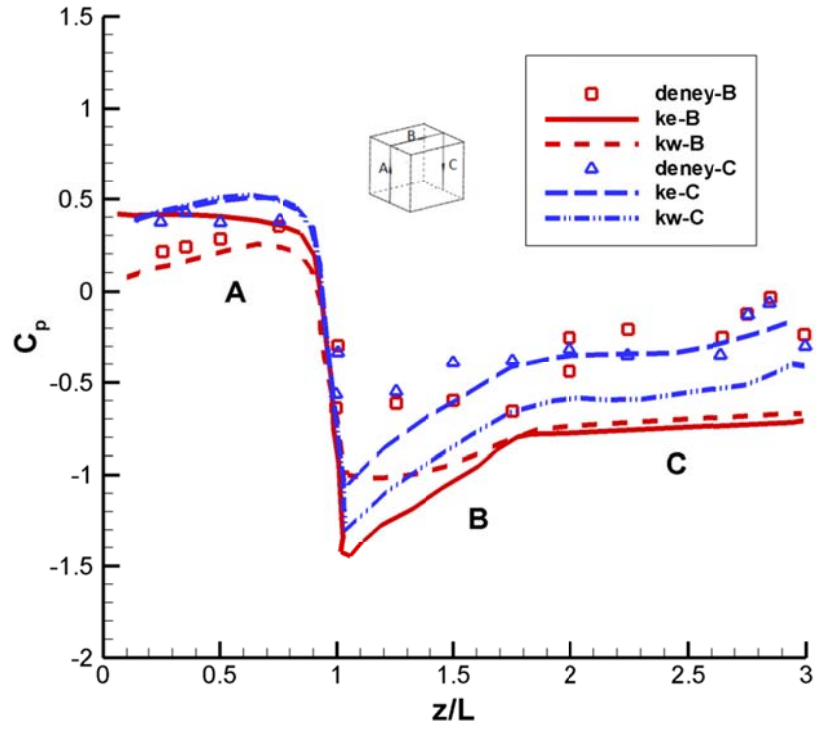


(a)

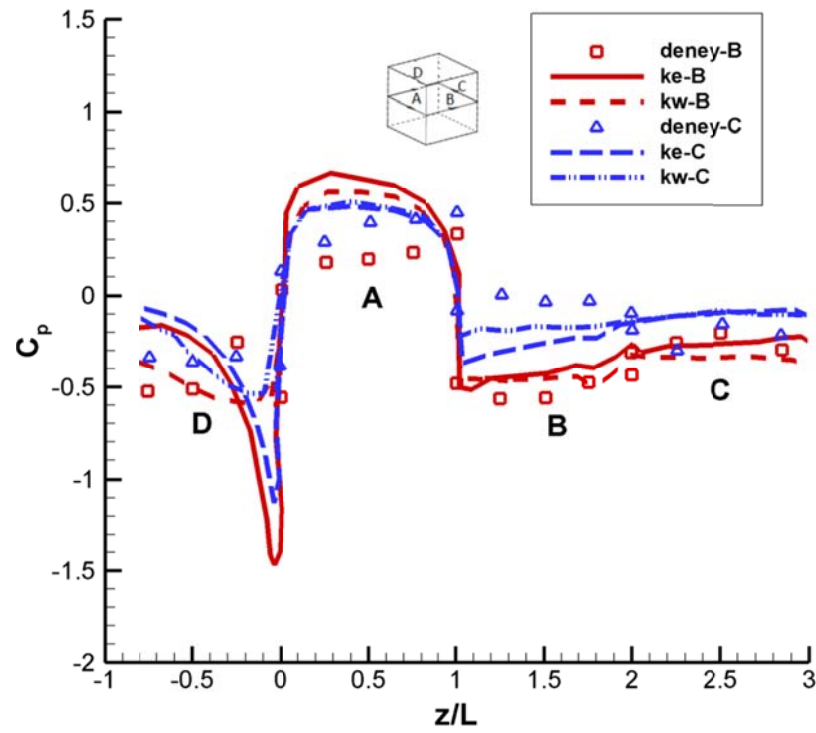


(b)

Şekil 4.14  $0^\circ$  Rüzgar Açısı için Basınç Katsayısı Dağılımları



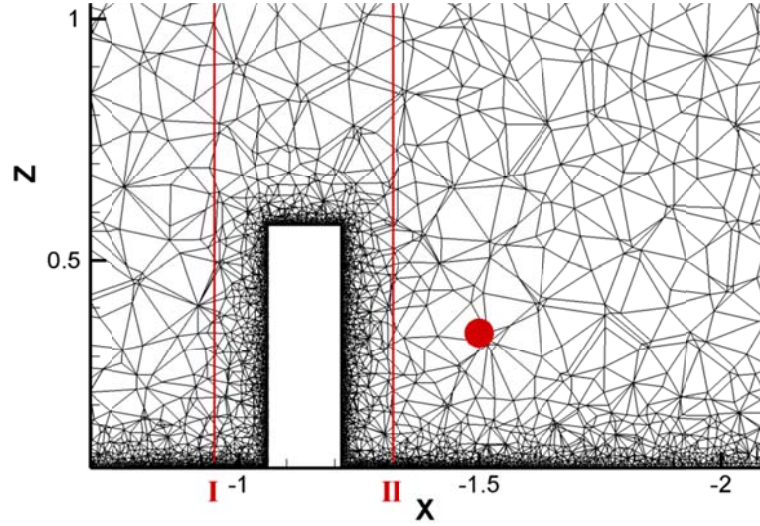
(a)



(b)

Şekil 4.15  $30^\circ$  Rüzgar Açısı için Basınç Katsayısı Dağılımları

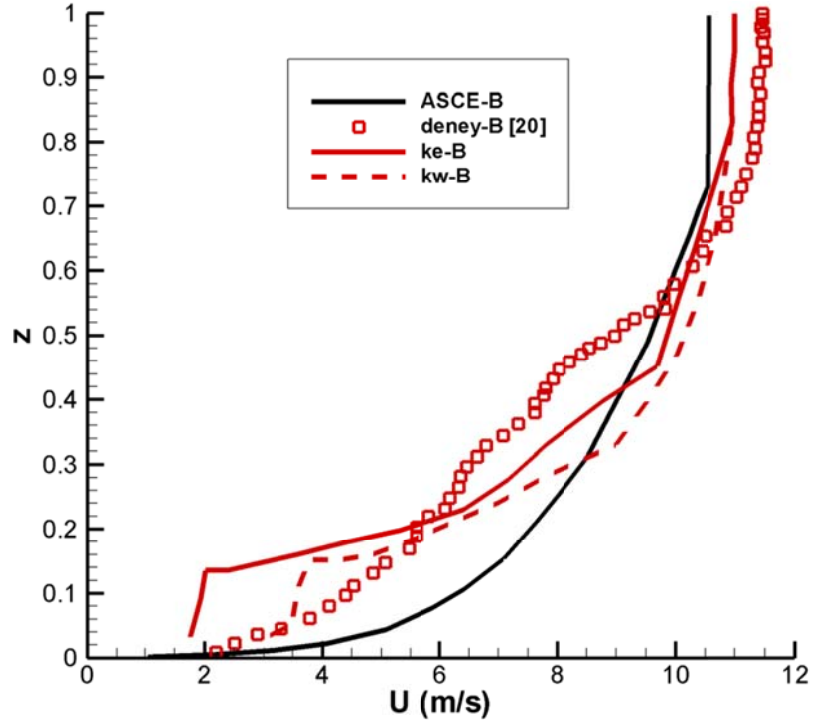
İki farklı açıda gelen rüzgar için yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilen hız profilleri ise aşağıdaki şekillerde incelenmektedir. Şekil 4.16’de gösterilen binanın 0.1 cm önünde ve 0.12 cm arkasında alınan birer doğru boyunca hız profilleri incelenmiştir.



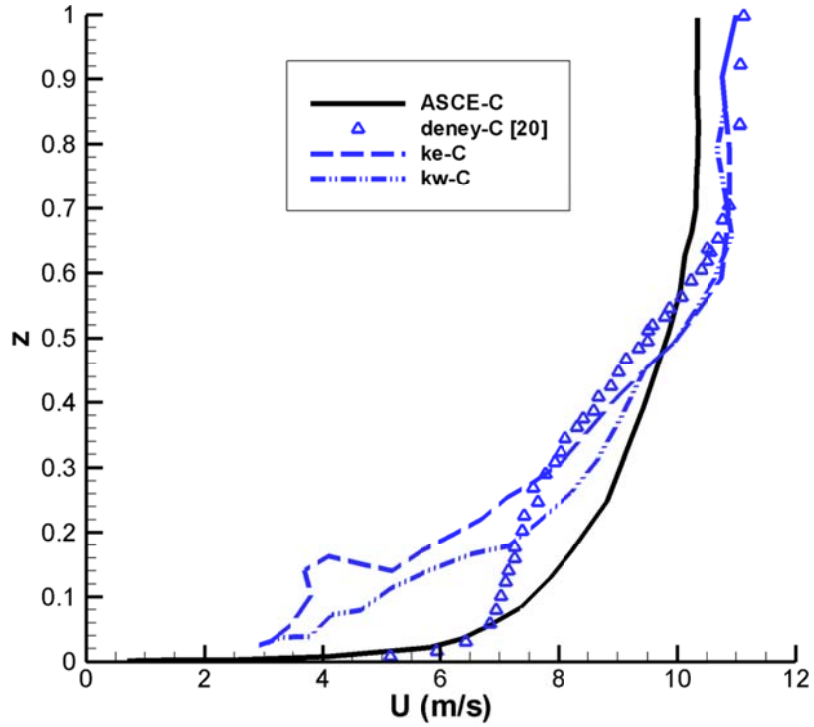
Şekil 4.16 Ön ve Arka Hız Profillerinin Yeri ile Bina Arkasında Seçilmiş Kontrol Noktasının Yeri

Yapılan HAD simülasyonları sonucunda yüksek bina modelinin 0.1 cm önünde oluşan hız profillerine bakıldığında, B tipi sınır tabaka için (Şekil 4.17) hızlar 0.73 m’de sabit değere ulaşmaktadır. C tipi sınır tabakada ise (Şekil 4.18) hızlar 0.68 m’de sabit hıza ulaşmaktadır. Hesaplanan hız profilleri Shojaee vd’nin [20] ve ASCE-B ve ASCE-C standard profilleri ile karşılaştırılmıştır. Profilin oluşumundaki farklılıklar akış binaya yaklaşırken oluşan sayısal hatalardan kaynaklanmaktadır ve bunun sebebi kullanılan türbülans modelleri ve çözüm ağı yapısı olabilir. Ancak, deneylere benzer uyumlu bir profil elde edilmektedir. Yine de bu farklılıklar bina üzerindeki basınç dağılımlarını ve arkasında iz bölgesindeki akış karakteristiklerini etkilemektedir.



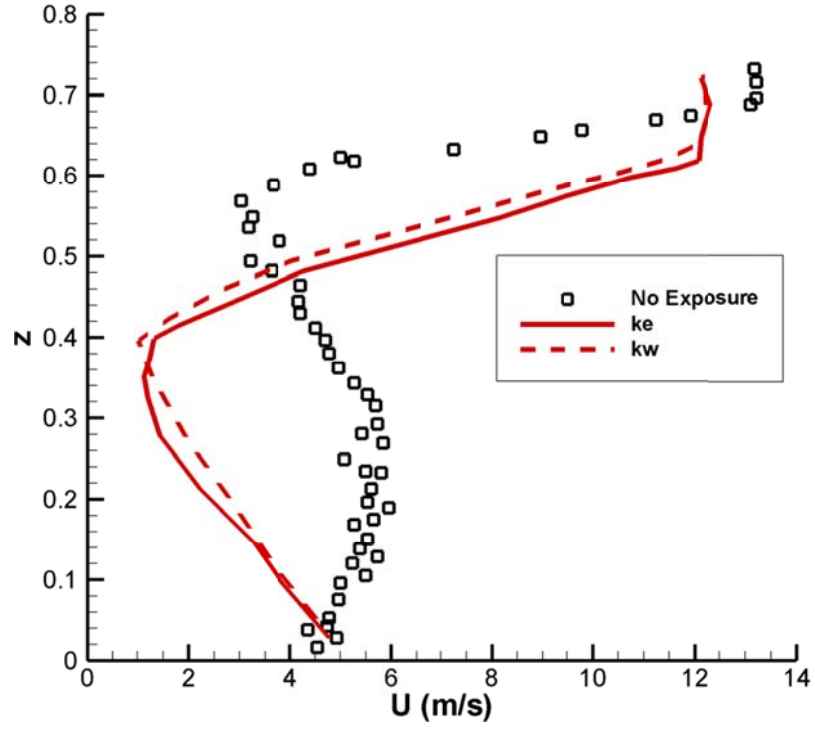


Şekil 4.17 Binanın 0.1 cm Önünde B Tipi Sınır Tabaka Hız Profilleri (Deney-B; Shojaee [20])

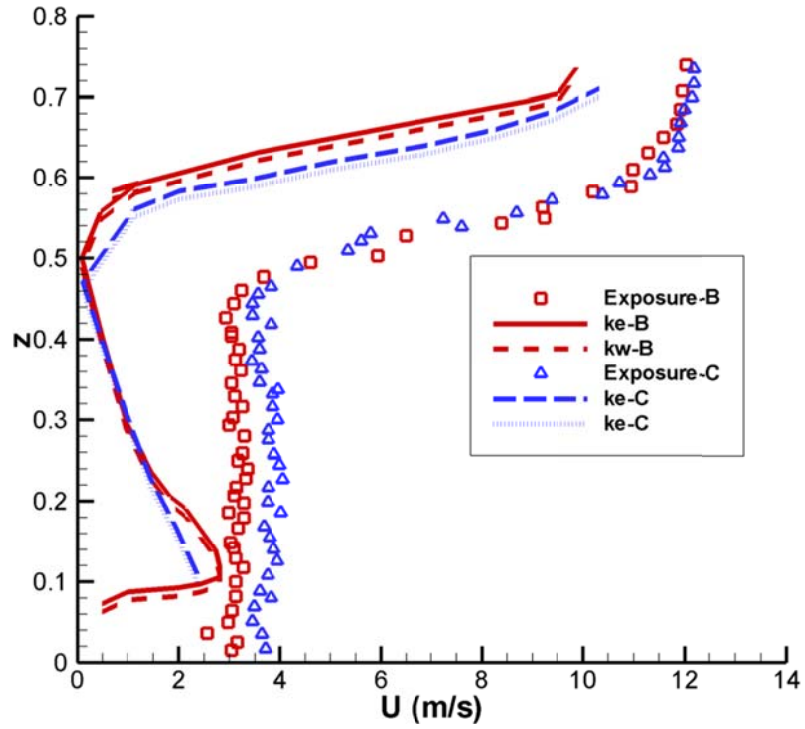


Şekil 4.18 Binanın 0.1 cm Önünde C Tipi Sınır Tabaka Hız Profilleri (Deney-C; Shojaee [20])

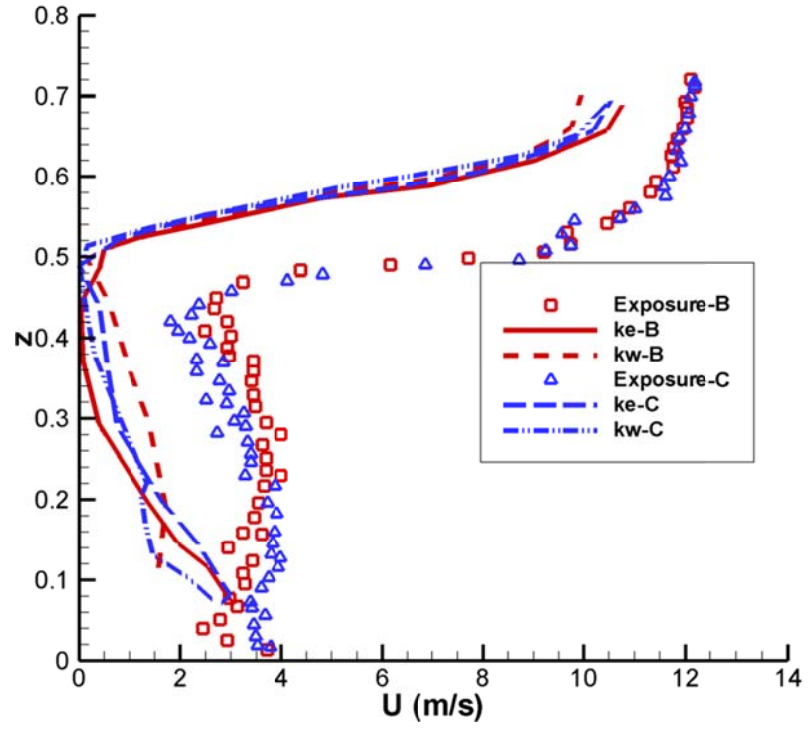
B ve C kategorilerindeki sınır tabaka modelleri kullanılarak ve bu modeller kullanılmadan (boş tünel için) yapılan HAD simülasyonlarının sonuçları ve deneysel ölçümler Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21’de gösterilerek karşılaştırılmıştır. Bu şekillerde, bina arkasında iz bölgesindeki akışın toplam hız profilleri ile ortalama hız ölçümleri karşılaştırılmıştır. Toplam hız değerini gösteren bu dağılımlara bakıldığında, farklı türbülans modelleri ile elde edilen hız dağılımlarının birbirine benzer olduğu görülmektedir, ancak değerlerde farklılıklar vardır. Hız dağılımlarına bakıldığında deneylerin kendi içerisinde tutarlı olduğu, sayısal çözümlerin de kendi içerisinde tutarlı olduğunu görülmektedir. Sayısal analizlerin deneysel sonuçlardan farklı olmasının sebebinin akışın binaya çarptıktan sonra bina arkasındaki iz bölgesine gelene kadar, bina yüzeyleri ve iz bölgesi yeterince sık ağ yapısına sahip olmadığı için, hata oranının artmasına neden olduğu sanılmaktadır.



Şekil 4.19 Boş Tünel için Bina Modeli Arkasındaki Hız Profilleri



Şekil 4.20 0° Rüzgar Açısında B ve C Tipi Sınır Tabakalar için Bina Arkasındaki Hız Profilleri



Şekil 4.21 30° Rüzgar Açısında B ve C Tipi Sınır Tabakalar için Bina Arkasındaki Hız Profilleri

## 5. KOMPLEKS GEOMETRİLİ VE ÇOKLU BİNALAR ETRAFINDA AKIŞ SİMÜLASYONLARI

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere küp ve bina gibi küt cisimler etrafındaki akış oldukça üç boyutlu ve kompleks akışlardır. Karmaşık geometrilere sahip gerçek binaların ve çoklu bina gruplarının etrafında akışların incelenmesi de bu tür binaların tasarım aşamasında önem kazanmaktadır. Bu tür bina akış simülasyonları ve deneyleri de anlatıldığı gibi yapılabilir. Bu tür simülasyonlarda yapısal olmayan çözüm ağı kullanmak zorunlu olacağı gibi gerekli hesaplama gücü ve deney planlama zamanı da önem kazanmaktadır. Bu bölümde birebir ölçülerde TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Kampusu ve Konuk Öğrenci Evi bina konfigürasyonları kullanılarak yapılan örnek HAD simülasyonları anlatılmaktadır.

### 5.1 TOBB ETÜ Kampüs Binaları Etrafında Akış Simülasyonları

TOBB ETÜ Kampüsü, ana bina (I.bina), sosyal tesisler (II.bina) ve TEPAV (III.bina) olmak üzere üç binadan oluşmaktadır. Bu binaların birbirlerine göre konumları Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Ana Bina Fotoğrafi (I. Bina)



Şekil 5.2 Sosyal Tesis Bina Fotoğrafi (II. Bina)

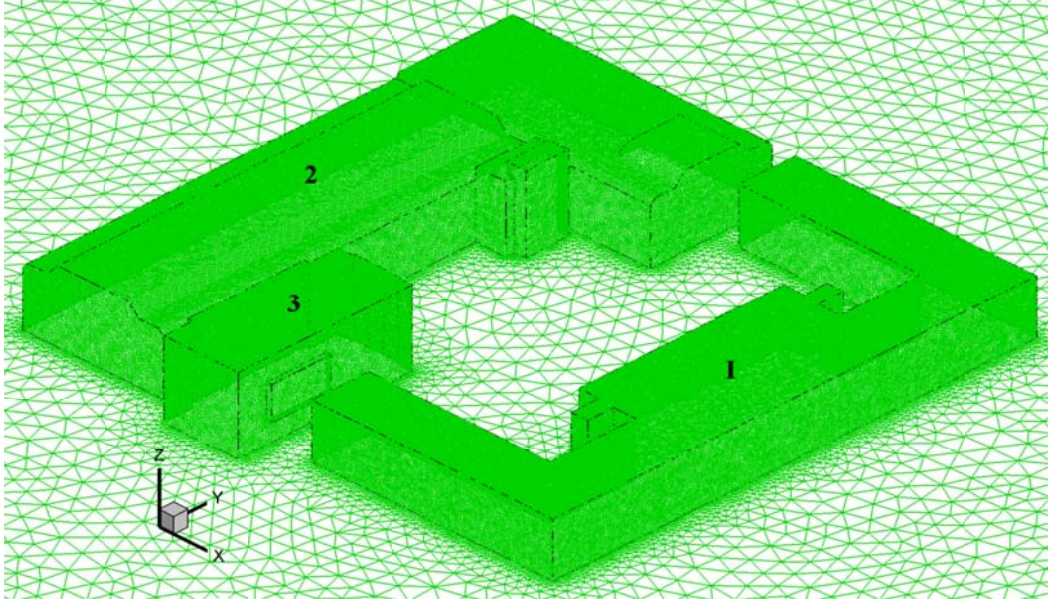


Şekil 5.3 TEPAV Binası Fotoğrafi (III. Bina)

Yapısal olmayan çözüm ağı bu üç bina etrafında sık olacak şekilde tamamı dört yüzeyle (tetrahedral) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Çözüm ağının detaylı bilgileri Çizelge 5.1’de verilmiş olup binalar ve yer üzerindeki uçgenlerden oluşan çözüm ağlarının binalar üzerindeki dağılımı Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

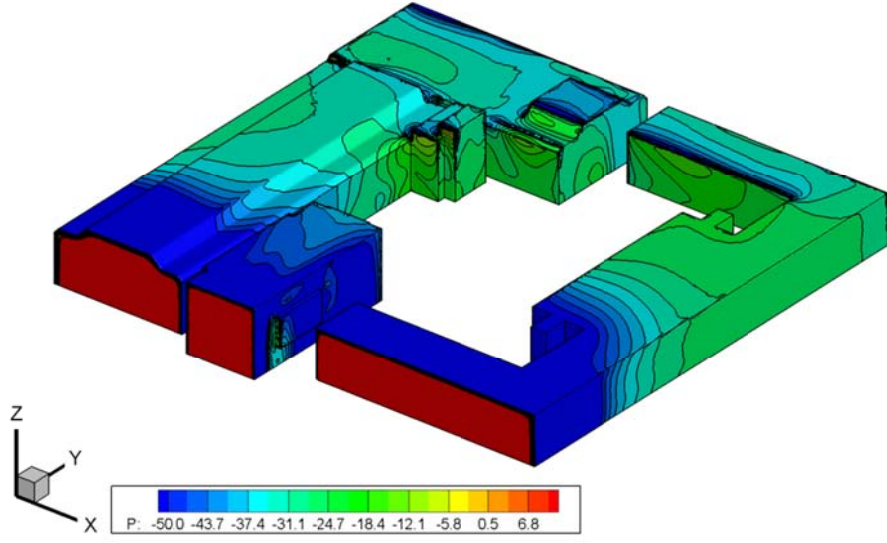
Çizelge 5.1 Kampüs Binaları Çözüm Ağı Özellikleri

Çözüm Ağı	Hücre sayısı	Yüzey sayısı	Nokta sayısı
I	2 222 862	4 630 619	452 170

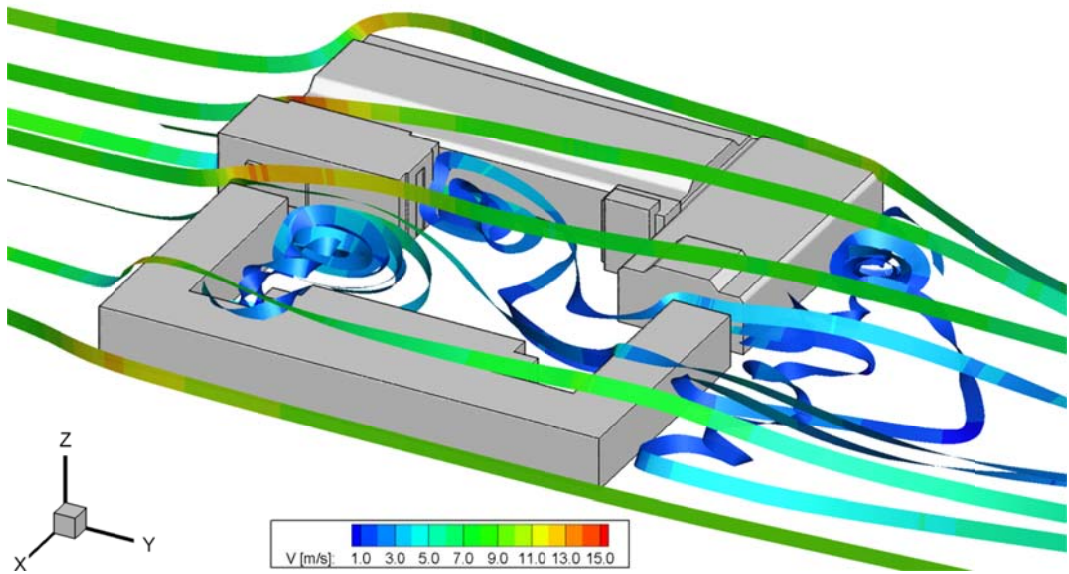


Şekil 5.4 Kampüs Binaları için Çözüm Ağı

HAD analizi için diğer bölümlerdeki karşılaştırmalarda en iyi sonucu veren k-e türbülans modeli kullanılmıştır. Sıkıştırılamaz koşullar altında olacak şekilde hesaplama alanın ön, üst ve yan yüzeylerine giriş koşulları tanımlanmış olup arka yüzeyine çıkış koşulları tanımlanmıştır. Bina yüzeylerindeki basınçlar ve binalar etrafında akım çizgileri sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da belirtilmiştir.



Şekil 5.5 Kampüs Bina Yüzeylerindeki Basınç Konturları



Şekil 5.6 Kampüs Binalarının Etrafında Akım Çizgileri ve Hız Konturları



## 5.2 TOBB ETÜ Konuk Öğrenci Evi Etrafında Akış Simülasyonları

TOBB ETÜ Konuk Öğrenci Evi toplamda dört binadan oluşmaktadır. İki bina aralarında geçiş sağlanacak şekilde birbirlerine bağlı ve birbirlerine dik olacak şekilde Şekil 5.7’de görüldüğü gibi konumlandırılmıştır.

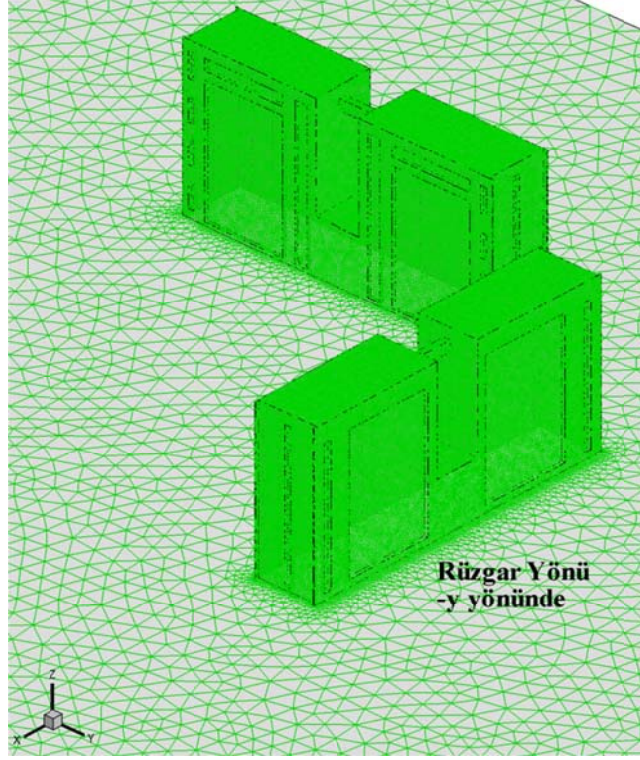


Şekil 5.7 Konuk Öğrenci Evi Binalarının Görünümü

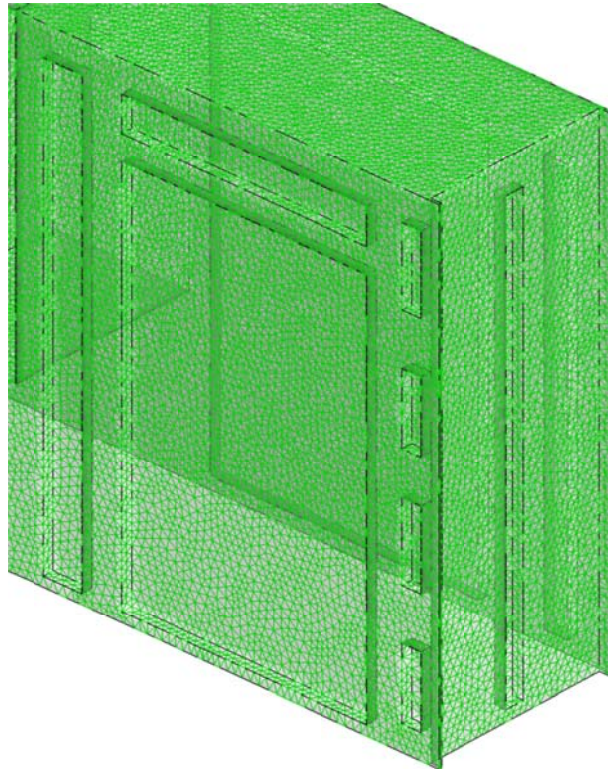
Çözüm ağı bu dört bina etrafında yoğun olacak şekilde tamamı tamamı dört yüzeyle (tetrahedral) elemanlardan oluşturulmuştur. Çözüm ağının detaylı bilgileri Çizelge 5.2’de verilmiş olup çözüm ağının binalar üzerindeki ve bina üzerinde detaylı dağılımı Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Konuk Öğrenci Evi Binaları Çözüm Ağı Özellikleri

Çözüm Ağı	Hücre sayısı	Yüzey sayısı	Nokta sayısı
I	2 324 862	4 732 519	453 670

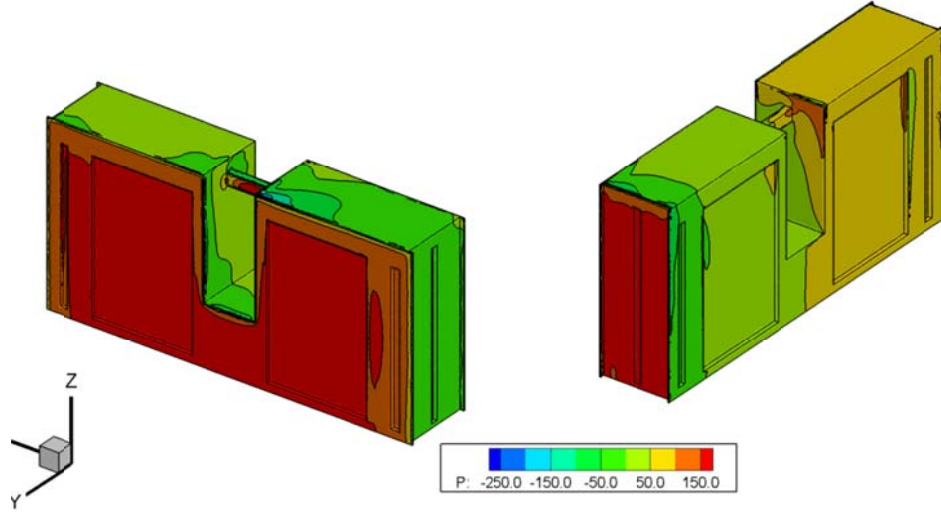


Şekil 5.8 Konuk Öğrenci Evi Binaları için Çözüm Ağı

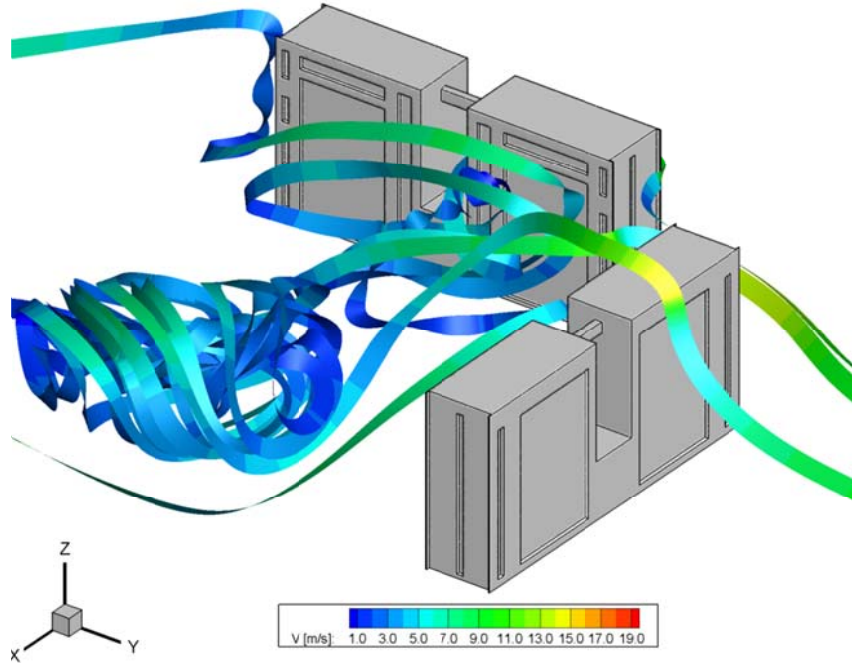


Şekil 5.9 Konuk Öğrenci Evi Binası Üzerindeki Çözüm Ağının Detaylı Görünümü

HAD analizi için yine daha önceki test simülasyonlarında en iyi sonucu veren  $k - \epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Sıkıştırılmaz koşullar altında olacak şekilde hesaplama alanın ön, üst ve yan yüzeylerine giriş koşulları tanımlanmış olup arka yüzeyine çıkış koşulları tanımlanmıştır. Bina yüzeylerindeki basınçlar ve binalar etrafında akım çizgileri sırasıyla Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de belirtilmiştir.



Şekil 5.10 Konuk Öğrenci Evi Bina Yüzeylerindeki Basınç Konturları



Şekil 5.11 Konuk Öğrenci Evi Bina Etrafında Akım Çizgileri ve Hız Konturları

Sınırlı hesaplama kaynakları ve zamandan dolayı, sadece örnek HAD analizleri yapılabilmektedir. Yeterince sık olmayan ağ yapısı kullanılarak sonuçlar elde edilmiş ve karmaşık geometrili çoklu binalar etrafında akışın daha önce detaylı simülasyonları anlatılan basit bina modeline kıyasla daha da karmaşık olduğu gözlenmiştir. Gelecekte, yeni binaların tasarım aşamalarında bu tür kompleks ve çoklu bina modellerinin detaylı HAD simülasyonları yapılabileceği gibi, benzer şekilde Ankara Rüzgar Tüneli'nde deneyler yapılarak doğrulamaları da yapılabilir. Binaların bulunduğu bölgedeki ortalama rüzgar hızı ve yönüne göre simülasyonlar yapılabilir, bina üzerinde basınç dağılımı ve binaya etkiyen kuvvetler tasarım aşamasında değerlendirilebileceği gibi binalar etrafında akış alanları da insanların rahat yaşam alanları için önemli olacak ve incelenebilecektir.

## 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, küt cisimler etrafındaki akışlar, özellikle yüksek binalar etrafındaki akışlar deneysel ve sayılar olarak incelenmiştir. Küp etrafındaki akış bir doğrulama/test durumu olarak ele alınmış ve HAD simülasyonları yapılmıştır. Farklı türbülans modelleri ve farklı sınır şartları uygulanarak elde edilen sonuçlar literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Küp etrafındaki akış için hız profilleri, yüzey basınç katsayıları, akış karakteristik özellikleri, türbülans kinetik enerjisi ve girdap şiddeti dağılımları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Reynolds sayısının yüksek olduğu durumlarda ve türbülanslı sınır tabaka içerisinde yer alan küt cisimler etrafındaki akışların önemli özelliklerinin benzer olduğu görülmüştür. Rüzgârın cisme dik gelen yüzeyinde pozitif basınç bölgeleri oluşurken; üst, yan ve arka yüzeylerde negatif basınç bölgeleri oluşmuştur. Bu bölgelerdeki basınç farklılıkları, ayrılmaları, yeniden bağlanmaları oluşturmaktadır; türbülanslı ve karmaşık iz bölgelerinin oluşmasına yol açmaktadır. Küt cismin çatısına (üst yüzeyi) gelen akışın yeterince türbülanslı olmamasından kaynaklı yeniden dönme alanları oluşmuş ve bu küt cismin üst kenarından akış kopma hareketini gerçekleştirmiştir. Bu çatıdan kopan akış cisim arkasında oluşan yeniden dönme bölgesine etki etmiştir. Hem küp hem bina modelinin ön yüzeyinde yere yakın bölgede tek bir girdabın oluştuğu gözlemlenmiştir.

Küp simülasyonlarında, ön ayrılma bölgesi literatürle karşılaştırıldığında küp önünde 0.4 m mesafesine kadar uzandığı görülmüştür. Farklı türbülans modelleri ile elde edilen sonuçlar arasındaki farklılığın ön yüzeyde oluşan küçük girdabın şiddetinden kaynaklı olabileceği anlaşılmıştır. Ön durma noktasının, küp modelinin ön yüzeyinin tabanından 0.2 m mesafe yukarısında oluştuğu görülmüştür. Yeniden bağlanma noktası, türbülans modelleri ve deneysel sonuçlarla biraz farklılık göstermiş olup 0.5 m ve 0.75 m aralıklarında gözlemlenmiştir.

Girdap şiddeti konturlarına bakıldığında küpün yan yüzeylerinde meydana gelen at nalı girdaplarının yakalandığı görülmektedir. Akış karmaşık olduğundan ve zamanla değiştiğinden zamana bağlı simülasyonların yapılması da önemlidir; ancak daha sık çözüm ağı ve hesaplama zamanı gerektirdiğinden ve yeterli hesaplama gücü olmadığından bu çalışma sırasında yapılmamıştır.

Yüksek bina modeli etrafındaki akış için ise farklı türbülans modelleriyle beraber farklı atmosferik sınır tabaka koşullarında iki ayrı rüzgar açısı için ( $0^\circ$  ve  $30^\circ$ ) HAD simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, aynı model için Ankara Rüzgar Tüneli'nde yapılan deneylerde elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Rüzgar tünellerinde gerçek ölçeğe yakın yüksek bina modellerinin testlerinin yapılması da doğrulama çalışmaları için gerekmektedir. Daha uzun test alanına sahip veya pürüzlülük elemanları ile atmosferik sınır tabaka elde edilebilen tünellerde yüksek bina modeli ve çoklu bina gruplarının etrafındaki akış alanları ve birbirlerine olan etkileri incelenebilir..

Yüksek bina modeli simülasyonlarında ve rüzgar açısının  $0^\circ$  olduğu durum için yapılan analizler deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında ön yüzeylerde yakın sonuçlar gösterirken türbülanslı akışın olduğu özellikle arka yüzeylerde farklılıklar göstermiştir. Bu durum rüzgar açısı değiştiğinde daha da artmıştır. Bunun sebebi simülasyonlar için hazırlanan hesaplama alanının büyüklüğünün yetersiz kalması ve hesaplama alanının çıkışında kullanılan sınır koşullarından dolayı kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir.

Tüm HAD simülasyonları için yapısal olmayan çözüm ağı kullanılmıştır. Karmaşık geometrili ve çoklu binalar etrafındaki karmaşık akışlara örnek olarak TOBB ETÜ Kampüs binaları ve Konuk Öğrenci Evi binalarının HAD simülasyonları yapılmıştır. Böyle karmaşık geometrili binalar için yapısal olmayan çözüm ağlarının kullanılması ağ yapımının daha kolay olmasını sağlamıştır.

Yere yerleştirilmiş olan bir küt cismin arkasındaki bölgede daimi bir akış bulunmamaktadır. Yalnızca iki boyutlu akışta bina kenarından ayrılan akım çizgisi binanın üst yüzeyinin belirli bir noktasında yeniden bağlanma hareketi yapabilir. Üç boyutlu akışta ise ayrılmanın başlayıp yeniden bağlanmanın bittiği sabit bir bölge bulunmamaktadır. Bunu sebebi binanın üst köşelerinde oluşan girdaplar devamlı akışı bozmakta ve bina arkasında oluşan yeniden dönmeleri de etkilemektedir. Bu yeniden dönmelerin bozulup tekrar oluşması periyodik değişen bir iz bölgesi oluşturmakta ve bu durum üç boyutlu problemin zamana bağlı olarak çözümlenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu yüzden bu problem zamana bağlı olarak çözümlenmesi rüzgâr yüklerinin zamanla nasıl değiştiğini incelemek ve özellikle yüksek binalara etki eden kuvvetlerin etkisini incelemek için çok önem taşımaktadır. İleriki çalışmalarda, zamana bağlı HAD simülasyonları, LES simülasyonları yapılarak, belirli bir alanda bulunan farklı geometrilere sahip binaların birbirilerine olan etkileri incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Holmes J., Wind Loading Structures, USA, Taylor & Francis, 2007.
- [2] Mertens S., Wind Energy in Built Environment, United-Kingdom, Multi-Science, 2006.
- [3] <http://san.hufs.ac.kr/~gwlee/session5/microflow.html>, Erişim Tarihi: Ağustos 2011.
- [4] <http://dubai-tower.blogspot.com/2008/01/sustainable-energy-modelling-for-high.html>, Erişim Tarihi: Ağustos 2011.
- [5] Baines, W.D., Effects of velocity distribution on wind loads and flow patterns on buildings, Proceedings Symp. No. 16 Wind Effects on Buildings and Structures, NPL, UK, 1963.
- [6] Castro, I.P. ve Robins, A.G., The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams, J. Fluid Mech. 79, 307–335, 1977.
- [7] Hunt, A., Wind-tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10, 2, 137-163, Ağustos, 1982,
- [8] Murakami, S. ve Mochida, A., 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k- e model, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 31, 283–303, 1988.
- [9] Marwood, R. ve Wood, C.J., Conical vortex movement and its effect on roof pressures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 589-595, 1997.
- [10] Olscher, N.H. ve Niemann, H.J., Towards quality assurance for wind tunnel tests: a comparative testing program of the windtechnologische gesellschaft, J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn., 15, 74–76, 1998.
- [11] Richards, P.J ve Hoxey, R.P., Unsteady flow on the sides of a 6m cube, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, 1855-1866, 2002.
- [12] Nakamura, H., Igarashi, T. ve Sutsui, T., Local heat transfer around a wall-mounted cube at 45\_ to flow in a turbulent boundary layer, International Journal of Heat and Fluid Flow, 24, 807-815, 2003.



- [13] Beyers, J.H.M., Sundsbø, P.A. ve Harms, T.M., Numerical simulation of three-dimensional,transient snow drifting around a cube, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 725-747, 2004.
- [14] Gomes, M.G., Rodrigues, A.M. ve Mendes, P., Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 741-756, 2005.
- [15] Tulapurkara, E.G., Gowda, B.H.L. ve Chaukar, J.S., Mean velocity field around prismatic bodies in tandem arrangement, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 777-796, 2005.
- [16] Richards, K., Schatzmann, M. ve Leitl, B., Wind tunnel experiments modelling the thermal effects within the vicinity of a single block building with leeward wall heating, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94, 621-636, 2006.
- [17] Richards, P.J. ve Hoxey, R.P., Wind loads on the roof of a 6m cube, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 984–993, 2007.
- [18] Richards, P.J., Hoxey, R.P., Connell, B.D. ve Lander, D.P., Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.*, 95, 1384–1399, 2007.
- [19] Maruyama, T., Taniguchi, T., Okazak, M. ve Taniike, Y., Field experiment measuring the approaching flows and pressures on a 2.4m cube, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.*, 96, 1084–1091, 2008.
- [20] Shojaee, S.M.N., Kayısoğlu, B., Uzol, O. ve Kurç, Ö., Design and analysis of passive devices for atmospheric boundary layer simulation in a short aeronautical wind tunnel, 5. Ankara International Aerospace Conference, 015, 2009.
- [21] Köse, D.A. ve Dick, E., Prediction of the pressure distribution on a cubical building with implicit LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98, 628-649, Kasım, 2010.
- [22] Tsuchiya, M., Murakami, S., Mochida, A., Kondo, K. ve Ishida, Y., Development of a new  $k - \varepsilon$  model for flow and pressure fields around bluff body, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 169-180, 1997.

- [23] Tominaga, Y., Murakami, S. ve Mochida, A., A CFD prediction of gaseous diffusion around a cubic model using a dynamic mixed SGS model based on composite grid technique, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 827-841, 1997.
- [24] Thomas, T.G. ve Williams, J.J.R, Development of a parallel code to simulate skewed flow over a bluff body, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 155-167, 1997.
- [25] He, J. ve Song, C.C.S., A numerical study of wind flow around the TTU building and the roof corner vortex, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 547-558, 1997.
- [26] Lakehal, D. ve Rodi, W., Calculation of the flow past a surface-mounted cube with two-layer turbulence models, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 65-78, 1997.
- [27] Scanlon, T.J., A numerical analysis of flow and dispersion around a cube, University of Strathclyde, Scotland., 1997
- [28] Lee, S. ve Bienkiewicz, B., Large-eddy simulation of wind effects on bluff bodies using the finite element method, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 601-609, 1997.
- [29] Rodi, W., Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 69-71, 55-75, 1997.
- [30] Shah, K.B. ve Ferziger, J.H., A fluid mechanics view of wind engineering: Large eddy simulation of flow past a cubic obstacle, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 211-224, 1997.
- [31] Thomas, T.G. ve Williams, J.J.R, Simulation of skewed turbulent flow past a surface mounted cube, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, 347-360, 1999.
- [32] Hajj, M.R., Tieleman, H.W. ve Tian, L.T., Wind tunnel simulation of time variations of turbulence and effects on pressure on surface-mounted prisms, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 88, 197-212, 2000.

- [33] Niceno, B., Dronkers, A.D.T. ve Hanjali, K., Turbulent heat transfer from a multi-layered wall-mounted cube matrix: a large eddy simulation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23, 173- 185, 2002.
- [34] Alfonsi, G., Restano, C. ve Primavera, L., Coherent structures of the flow around a surface-mounted cubic obstacle in turbulent channel flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98, 495-511, 2002.
- [35] Schmidt, S. ve Thiele, F., Comparison of numerical methods applied to the flow over wall-mounted cubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22, 330-339, 2002.
- [36] Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P.A. ve Behnia, M., Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 147-156, 2003.
- [37] Cheng, Y., Lien, F.S., Yee, E. ve Sinclair, R., A comparison of large Eddy simulations with a standard k–e Reynolds-averaged Navier–Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 1301-1328, 2003.
- [38] Richards, P.J ve Hoxey, R.P., Quasi-steady theory and point pressures on a cubic building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 1173-1190, 2004.
- [39] Gao, Y. ve Chow, W.K., Numerical studies on air flow around a cube, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 115-135, 2004.
- [40] Yakhot, A., Liu, H. ve Nikitin, N., Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27, 994–1009, 2006.
- [41] Saha, A.K., Three-dimensional numerical study of flow and heat transfer from a cube placed in a uniform flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26, 80–94, 2006.

- [42] Hargreaves, D.M. ve Wright, N.G., On the use of the  $k-\varepsilon$  model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 355–369, 2007.
- [43] Hemida, H., Spehr, F. ve Krajnovic, S., Local heat transfer enhancement around a matrix of wall-mounted cubes using passive flow control: Large-eddy simulations, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29, 1258–1267, 2008.
- [44] Ono, Y. ve Kataoka, T.H., LES analysis of unsteady characteristics of conical vortex on a flat roof, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 2007–2018, 2008.
- [45] He, C.L., Thomas, T.G. ve Castro, I.P., Flow around a cube in a turbulent boundary layer: LES and experiment, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97, 2005-2010, 2008.
- [46] Paik, J., Sotiropoulos, F. ve Agel, F.P., Detached eddy simulation of flow around two wall-mounted cubes in tandem, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 286–305, 2009.
- [47] Baskaran, A., 1990, Computer simulation of 3D Turbulent wind effects on buildings, *Doktora Tezi*, Concordia Universitesi, Canada.
- [48] Zhang, Y., 1993, Numerical simulation of flow and dispersion around buildings, *Doktora Tezi*, North Carolina State Universitesi, USA.
- [49] He, J. ve Song, C.C.S., A numerical study of wind flow around the TTU building, and the roof corner vortex, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 547-558, 1997.
- [50] Richardson, G.M., Hoxey, R.P., Robertson, A.P. ve Short, J.L., The Silsoe Structures Building: Comparisons of pressures measured at full scale and in two wind tunnels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 72, 187-197, 1997.
- [51] Michel, A., Brzoska, D. ve Stock, B., Lamb, Determination of plume capture by the building wake, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 902-922, 1997.

- [52] Li, Y. ve Stathopoulos, T., Numerical evaluation of wind-induced dispersion of pollutants around a building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 757-767, 1997.
- [53] Sarkar, P.P., Zhao, Z. ve Mehta, K.C., Flow visualization and measurement on the roof of the Texas Tech building *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 69-71, 595-606, 1997.
- [54] Selvam, R.P., Computation of pressures on Texas Tech University building using large eddy simulation *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68, 647-657, 1997.
- [55] Kim, R.P. ve Boysan, F., Application of CFD to environmental flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 81, 145-158, 1999.
- [56] Meroney, R.N., Leidl, B.M., Rafailidis, S. ve Schatzmann, M., Wind-tunnel and numerical modeling of low and dispersion about several building shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, 333-345, 1999.
- [57] Nozawa, K. ve Tamura, T., Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1151–1162, 2002.
- [58] Kim, J., 2002, LES of the turbulent flow around a square prism, *Doktora Tezi*, Western Ontario Universitesi, Canada.
- [59] Chang, C.H. ve Meroney, R.N., The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 1039–1050, 2003.
- [60] Bekele, S.A., 2004, Numerical and physical investigation of roof corner vortex Dynamics, *Doktora Tezi*, Western Ontario Universitesi, Canada.
- [61] Tutar, M. ve Oğuz, G., Computational Modeling of Wind Flow Around a Group of Buildings, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 18, 651–670, 2004.
- [62] Paik, J., Ge, Li. ve Sotiropoulos, F., Toward the simulation of complex 3D shear flows using unsteady statistical turbulence models, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25, 513–527, 2004.

- [63] Chung, J., 2005, Numeric prediction of turbulent flow and aerodynamic loading on bluff bodies, *Doktora Tezi*, Colorado State Üniversitesi, USA.
- [64] Blocken, B., Carmeliet, J. ve Stathopoulos, T., CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 941–962, 2007.
- [65] Kasperski, M., Design wind loads for a low-rise building taking into account directional effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1125–1144, 2007.
- [66] Omidyeganeh, M., 2008, LES of air flow and pollution dispersion around buildings, *Doktora Tezi*, Calgary Üniversitesi, Alberta.
- [67] Sohankar, A., Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders: Side ratio effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 640–655, 2008.
- [68] Blocken, B., Stathopoulos, T., Saathoff, P. ve Wang, X., Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: Comparisons between models and experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1817–1831, 2008.
- [69] Caracoglia, L., Sangree, R.H., Jones, N.P. ve Schafer, B.W., Interpretation of full-scale strain data from wind pressures on a low-rise structure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 2363–2382, 2008.
- [70] El-Okda, Y.M., Ragab, S.A. ve Hajj, M.R., Large-eddy simulation of flow over a surface-mounted prism using a high-order finite-difference scheme, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 900–912, 2008.
- [71] Rokugou, A., Kiwata, T., Okajima, A., Kimura, S. ve Yamamoto, H., Numerical analysis of aerodynamic sound radiated from rectangular cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 2203–2216, 2008.

- [72] Tominaga, Y., Mochida, A., Murakami, S. ve Sawaki, S., Comparison of various revised  $k-\varepsilon$  models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 389–411, 2008.
- [73] Sengupta, A., Haan, F.L., Sarkar, P.P. ve Balaramudu, V., Transient loads on buildings in microburst and tornado winds, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 2173–2187, 2008.
- [74] Tamura, T., Nozawab, K. ve Kondo, K., AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1974–1984, 2008.
- [75] Tamura, Y., Kikuchi, H. ve Hibi, K., Peak normal stresses and effects of wind direction on wind load combinations for medium-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 1043–1057, 2008.
- [76] FLUENT 6.2, User Guide, Ocak, 2005.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZTÜRK, Sefa  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 06.11.1986 Ankara  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (505) 482 70 70  
e-mail : syilmazturk@etu.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2008

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-2010	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2008-2009	TAI Tusaş Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Ortak Eğitim
2007-2008	TAI Tusaş Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Ortak Eğitim
2006-2007	Müsan Üretim Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Ortak Eğitim

### Yabancı Dil

İngilizce - Almanca

### Yayınlar

- I. Yılmaztürk, S. ve Uzol, Sezer, N., Investigation of Flow Field Around A High-Rise Building Model in Atmospheric Boundary Layer, AIAC – 094, 6<sup>th</sup> AIAC Aerospace Conference, Ankara, Turkey, 14-16 Eylül, 2011.