

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI ÇATI TİPLERİ VE EĞİMLERİNDEKİ BİNALAR ÜZERİNDE RÜZGAR  
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ**

**Mak. Yük. Müh. Yücel ÖZMEN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nce  
“Doktor”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19.06.2006  
Tezin Savunma Tarihi : 14.07.2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ertan BAYDAR  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Tahir YAVUZ  
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. M. Reşat SÜMERKAN  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ahmet ÜNAL  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. H. Şinasi ONUR**

*Baydar*  
*Yavuz*  
*Sümerkan*  
*Ünal*  
*Onur*

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT**

**Trabzon 2006**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, rüzgar tüneline atmosferik sınır tabakanın modellenmesi ile oluşturulmuş akış alanına yerleştirilen, değişik tipteki çatı modellerinin aerodinamiğine yönelik deneysel verilerin elde edilmesi ve aynı geometriler için bir paket program ile sayısal çözümlerin sağlanması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın her aşamasında yol gösterici ve özverili yaklaşımlarıyla desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Ertan BAYDAR'a, tez izleme jürimde bulunan ve tezin şekillendirilmesinde katkı sağlayan sayın Prof. Dr. Tahir YAVUZ'a ve sayın Yrd. Doç. Dr. M. Reşat SÜMERKAN'a, çalışmanın her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım sayın Yrd. Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez savunma jürisinde görev alan ve değerli görüş ve önerilerinden yararlandığım sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a ve sayın Prof. Dr. H. Şinasi ONUR'a teşekkür ederim.

Bu çalışma, von Karman Institute for Fluid Dynamics'de ve KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarı'nda hazır bulunan rüzgar tünellerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya katkılarından dolayı von Karman Institute'e, KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Bu çalışmayı 2002.112.003.6 numaralı proje kapsamında destekleyen KTÜ Araştırma Fonu Saymanlığına teşekkür ederim.

Çalışmamın en yoğun dönemlerinde anlayışlı yaklaşımlarıyla bana destek olan moral veren eşime çok teşekkür ederim.

Uzun ve yorucu geçen çalışma boyunca her zaman yanımda olan ve maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan aileme ve arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

Yücel ÖZMEN

Trabzon 2006

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
RESİMLER DİZİNİ.....	XVII
TABLolar DİZİNİ.....	XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	3
1.2.1. Amaç.....	3
1.2.2. Kapsam.....	4
1.3. Çalışmanın Bilimsel Önemi.....	5
1.4. Literatür Araştırması.....	6
1.4.1. Atmosferik Sınır Tabaka Akışı.....	6
1.4.2. Gerçek Yapı Ölçümleri.....	9
1.4.3. Rüzgar Tüneli Deneyleri.....	10
1.4.3.1. Akış Ayrılması.....	10
1.4.3.2. Basınç Ölçümleri.....	11
1.4.3.3. Pik Basınçlar.....	12
1.4.3.4. Rüzgar Açılırları.....	13
1.4.3.5. Korkuluklar.....	14
1.4.3.6. Saçaklar.....	15
1.4.3.7. Bitişik Binalar.....	15
1.4.3.8. Kıрма ve Beşik Çatılar.....	16
1.4.3.9. Standartlar ve Karşılaştırma.....	16
1.4.3.10. Sayısal Çalışmalar.....	16
1.5. Rüzgar ve Türbülans.....	18

1.6.	Atmosferik Sınır Tabaka.....	21
1.6.1.	Atmosferik Sınır Tabakanın Özellikleri.....	21
1.6.2.	Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesi.....	25
1.6.3.	Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesinde Kullanılan Yöntem.....	27
1.7.	Yapılar Üzerinde Rüzgar Etkileri.....	28
1.7.1.	Alçak Binalar Üzerinde Rüzgar Etkileri.....	30
1.7.1.1.	Akış Yapısı.....	34
1.7.1.2.	Konik Girdaplar.....	36
1.7.2.	Mühendislik Yaklaşımı ve Binaların Performansı.....	37
1.7.3.	Bina Kodları.....	39
1.7.4.	Geleneksel Çatı Tipleri.....	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	45
2.1.	Deneysel Çalışma.....	45
2.1.1.	Deney Düzenekleri.....	45
2.1.1.1.	Hız Ölçümleri İçin Rüzgar Tüneli.....	46
2.1.1.2.	Basınç Ölçümleri İçin Rüzgar Tüneli.....	48
2.1.2.	Bina Modelleri.....	51
2.1.3.	Rüzgar Açılımları.....	54
2.1.4.	Ölçme Sistemleri.....	54
2.1.4.1.	Hız Ölçümü.....	54
2.1.4.2.	Basınç Ölçümü.....	57
2.2.	Sayısal Çalışma.....	59
2.2.1.	Hareket Denklemleri.....	59
2.2.2.	Türbülans Modelleri.....	60
2.2.2.1.	Realizable k- $\epsilon$ Model.....	60
2.2.2.2.	Standard k- $\omega$ Model.....	61
2.2.3.	Çözüm Yöntemi.....	62
2.2.3.1.	Başlangıç ve Sınır Şartları.....	62
2.2.3.2.	Ağ Yapısı.....	66
2.2.3.3.	Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması.....	68
3.	BULGULAR.....	74



3.1.	Referans Sınır Tabaka Karakteristikleri.....	74
3.2.	Akış Görüntülemesi.....	77
3.3.	Modeller Etrafındaki Akış Alanında Hız Ölçümleri.....	83
3.4.	İki Nokta Arasında Kros Korelasyon.....	93
3.5.	Model Yüzeylerinde Basınç Ölçümleri.....	98
3.5.1.	Saçaksız Modeller.....	98
3.5.1.1.	Düz Çatılı Model.....	98
3.5.1.2.	15° Eğimli Beşik Çatılı Model.....	102
3.5.1.3.	30° Eğimli Beşik Çatılı Model.....	107
3.5.1.4.	45° Eğimli Beşik Çatılı Model.....	112
3.5.2.	Saçaklı Modeller.....	119
3.5.2.1.	45° Eğimli Normal Saçaklı Beşik Çatılı Model.....	119
3.5.2.2.	45° Eğimli Yelkırın Saçaklı Beşik Çatılı Model.....	124
3.5.3.	45° Eğimli Kıрма Çatılı Model.....	129
3.5.4.	Spoilerli Model.....	132
3.5.4.1.	1 mm Spoiler Açıklıklı Model.....	132
3.5.4.2.	3 mm Spoiler Açıklıklı Model.....	135
3.5.4.3.	5 mm Spoiler Açıklıklı Model.....	136
4.	İRDELEME.....	138
4.1.	Deneysel Sonuçlar.....	138
4.1.1.	Ortalama Hız ve Türbülans Ölçümleri.....	138
4.1.2.	Korelasyon Ölçümleri.....	139
4.1.3.	Basınç Ölçümleri.....	140
4.1.3.1.	Reynolds Sayısının Etkisi.....	140
4.1.3.2.	Çatı Eğiminin Etkisi.....	141
4.1.3.3.	Çatı Tipinin Etkisi.....	147
4.1.3.4.	Saçak Tipinin Etkisi.....	147
4.1.3.5.	Rüzgar Açısının Etkisi.....	150
4.1.3.6.	Spoiler Benzeri Elemanların Etkisi.....	152
4.2.	Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	154
4.2.1.	Hız Dağılımları.....	154

4.2.2.	Basınç Dağılımları.....	159
5.	SONUÇLAR.....	163
6.	ÖNERİLER.....	166
7.	KAYNAKLAR.....	167
8.	EKLER.....	177
	ÖZGEÇMİŞ.....	191

## ÖZET

Bu çalışmada, binaları hasara uğratabilen rüzgar yüklerinin araştırılması amacıyla, değişik tipte ve değişik çatı eğimlerine sahip bina modelleri etrafındaki akış alanları deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmı rüzgar tüneline modellenen atmosferik sınır tabaka akışında gerçekleştirilmiştir. Bu akışın modellenmesinde bariyer, eliptik girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları kombinasyonu kullanılmış ve 15 m/s'lik serbest akış hızında, 150 mm yüksekliğinde bir sınır tabaka oluşturularak, 0°, 15°, 30° ve 45° çatı eğimindeki bina modelleri etrafındaki akış alanlarında akış görüntüleme, hız ve yüzey basıncı ölçümleri yapılmıştır. Akış görüntüleme, yağ ve parafin buharı teknikleri kullanılmıştır. Çatı üzerinde yoğun olmak üzere, kızgın tel anemometre sistemi ile akışın ortalama ve çalkantı hızları ölçülerek hız dağılımları elde edilmiş, referans sınır tabakadaki hız çalkantıları ile çatı üzerindeki hız çalkantıları arasındaki korelasyon araştırılmış ve ters akış bölgeleri dışında % 50 oranında korelasyon bulunmuştur. Yüzey basınçlarının ortalama ve çalkantı değerlerinin ölçümleri, değişik çatı geometrileri, farklı saçak tipleri ve farklı rüzgar yönlerine göre daha ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çatı yüzeylerinde ölçülen ortalama ve çalkantı basınç dağılımlarına göre, kritik çatı eğimi 15°, kritik rüzgar geliş açısı ise 45° olarak belirlenmiştir. Çatı yüzeylerinde basıncın negatif pik değerler aldığı bölgelere yerleştirilen spoiler benzeri elemanların, bu bölgelerde meydana gelen emme yükünü % 50 ye varan bir oranda azalttığı görülmüştür.

Çalışmanın teorik kısmında, FLUENT paket programı ile akış alanlarının iki boyutlu sayısal çözümleri elde edilmiş, sayısal çalışmada kullanılan türbülans modellerinin performansları değerlendirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında; Realizable k-ε modelin, hız alanlarının hesaplanmasında; Standard k-ω modelin ise, yüzey basınçlarının hesaplanmasında birbirlerine göre biraz daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Atmosferik Sınır Tabaka, Akış Ayrılması, Çatılar, Saçaklar, Emme Yüğü, Basınç Katsayısı, Türbülans Modeli

## SUMMARY

### **Experimental and Theoretical Investigation of the Wind Effects on Buildings with Different Roof Types and Slopes**

In this study, flow fields around roof models, which are in different types and slopes have been investigated experimentally and theoretically in order to search the wind loads that can damage the buildings.

The experimental part of the study was carried out in an atmospheric boundary layer that is modeled in the wind tunnel. Atmospheric boundary layer was simulated with combination of barrier, elliptic vortex generators and elements of roughness and at 15 m/s wind velocity, a 150 mm height boundary layer is formed and flow visualization, velocity and surface pressure measurements are done at the flow fields around building models which have four different roof slopes as 0°, 15°, 30° and 45°. For flow visualization oil and paraffin vapour techniques were used. Then, mean velocity and turbulence components on the roof models were measured with hot-wire anemometry system. The correlation between atmospheric turbulence and wind-induced turbulence was investigated and a correlation was obtained around % 50 level except for reverse flow region. For various roof geometries, eaves types and wind direction the mean and fluctuating surface pressures were measured in more detail. According to mean and fluctuating surface pressure measurements on the roof models, the critical roof slope and wind direction were found as 15° and 45° respectively. It is observed that, the spoiler elements placed at the critical negative peak pressure regions on the models have decreased suction effect on those regions up to % 50 level.

In the theoretical part of the study, 2D numerical solutions in flow fields were obtained using FLUENT commercial package. In the numerical studies, the performances of turbulence models were evaluated and when compared with experimental data, it was seen that Realizable k- $\epsilon$  at the prediction of velocity fields and Standard k- $\omega$  model at the prediction of surface pressures have more precise results.

**Key Words:** Atmospheric Boundary Layer, Flow Separation, Roofs, Eaves, Suction Loads, Pressure Coefficient, Turbulence Model

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Rüzgar - hız spektrumu.....	19
Şekil 1.2. Elemanter bir hava kütesine etkileyen düşey doğrultudaki basınç kuvvetleri.....	22
Şekil 1.3. Geostrophic denge (Kuzey yarımküre).....	23
Şekil 1.4. Atmosferik sınır tabaka.....	24
Şekil 1.5. Farklı yüzey pürüzlülükleri için sınır tabaka kalınlıkları.....	24
Şekil 1.6. Eliptik girdap üreticisi.....	28
Şekil 1.7. Tipik bir bina modeli etrafında oluşan girdap tipleri.....	31
Şekil 1.8. Yerel rüzgar etkileri.....	33
Şekil 1.9. İç basınç değişimleri.....	33
Şekil 1.10. Alçak bir bina etrafındaki akış.....	34
Şekil 1.11. Farklı giriş profilleri için düz çatı üzerindeki akış.....	35
Şekil 1.12. Bir küt cisim etrafındaki akış yapısı.....	36
Şekil 1.13. Bina köşesinde oluşan konik girdap akışı.....	37
Şekil 1.14. Beşik çatılı bir bina yüzeylerindeki basınç bölgeleri.....	40
Şekil 1.15. TS498'e göre eğik çatılı yapılarda rüzgar yükü etkileri.....	41
Şekil 1.16. Değişik çatı tipleri.....	43
Şekil 1.17. Çatılarda basınç dağılımını etkileyen tasarımlar a) Korkuluk, b) Sundurma, c) Yelkılan saçak (Sürmene - Trabzon).....	43
Şekil 2.1. Hız ölçümlerinde kullanılan L2B rüzgar tünelinin şematik gösterimi...	46
Şekil 2.2. L2B rüzgar tünelinin çalışma bölgesi.....	48
Şekil 2.3. Basınç ölçümlerinde kullanılan rüzgar tünelinin şematik gösterimi.....	49
Şekil 2.4. Basınç ölçümlerinde kullanılan rüzgar tünelinin çalışma bölgesi.....	51
Şekil 2.5. Hız ölçümlerinde kullanılan modeller.....	51
Şekil 2.6. Basınç ölçümlerinde kullanılan modeller.....	52
Şekil 2.7. Model yüzeylerine açılan basınç ölçüm deliklerinin konumları a) $\alpha = 0^\circ$ eğimli düz çatı, b) $\alpha = 15^\circ$ eğimli beşik çatı, c) $\alpha = 30^\circ$ eğimli beşik çatı, d) $\alpha = 45^\circ$ eğimli beşik çatı, e) $\alpha = 45^\circ$ eğimli normal saçaklı beşik çatı, f) $\alpha = 45^\circ$ eğimli yelkılan saçaklı beşik çatı, g) $\alpha = 45^\circ$ eğimli kırma çatı, h) $\alpha = 15^\circ$ eğimli büyük beşik çatı, i) $\alpha = 15^\circ$ eğimli spoilerli beşik çatı .....	52

Şekil 2.8.	Ortalama hız ve türbülans ölçümleri için rüzgar açıları.....	54
Şekil 2.9.	Ortalama ve çalkantı basınç ölçümleri için rüzgar açıları.....	54
Şekil 2.10.	Hız ölçme sistemi.....	55
Şekil 2.11.	Çatı modelleri üzerinde hız ölçüm planı.....	56
Şekil 2.12.	Basınç ölçme sistemi.....	57
Şekil 2.13.	Scanning valf kullanımının ve ölçüm süresinin basınç dağılımına etkisi a) Scanning valf etkisi b) Ölçüm süresi etkisi.....	59
Şekil 2.14.	Akış alanı geometrisi.....	63
Şekil 2.15.	Kentsel arazi şartları için oluşturulmuş giriş profilleri a) ortalama hız b) türbülans kinetik enerji c) yutulma d) özgül yutulma.....	63
Şekil 2.16.	Açık kırsal arazi şartları için oluşturulmuş giriş profilleri a) ortalama hız b) türbülans kinetik enerji c) yutulma d) özgül yutulma.....	64
Şekil 2.17.	Ağ noktaları arasındaki yaklaşımların çözüm üzerindeki etkisi a) ortalama hız b) türbülans kinetik enerji.....	65
Şekil 2.18.	Artıkların iterasyon sayısı ile değişimi.....	66
Şekil 2.19.	Ağ tipinin çözüm üzerindeki etkisi a) ortalama hız b) türbülans kinetik enerji.....	67
Şekil 2.20.	Ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi a) ortalama hız b) türbülans kinetik enerji.....	67
Şekil 2.21.	Farklı çatı eğimleri ve farklı saçak tipleri için iki boyutlu ağ düzenleri (a) $\alpha = 0^\circ$ , (b) $\alpha = 15^\circ$ , (c) $\alpha = 30^\circ$ , (d) $\alpha = 45^\circ$ , (e) Normal saçak, (f) Yelkıransaçak.....	68
Şekil 2.22.	Model önünde ve arkasında k- $\epsilon$ modelin farklı türleri için hesaplanmış ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri a) model önünde ortalama hız b) model önünde türbülans kinetik enerji c) model arkasında ortalama hız d) model arkasında türbülans kinetik enerji.....	69
Şekil 2.23.	k- $\epsilon$ türbülans modelinin farklı tipleri ile hesaplanmış yüzey basınç dağılımları.....	70
Şekil 2.24.	Duvar yaklaşımlarının çözüm üzerindeki etkisi a) ortalama hız b) türbülans kinetik enerji.....	71
Şekil 2.25.	Katı duvarlar boyunca $y^+$ nın değişimi.....	71
Şekil 2.26.	$0^\circ$ , $15^\circ$ , $30^\circ$ ve $45^\circ$ çatı eğimli binalar etrafındaki akış alanları a-d) Realizable k- $\epsilon$ türbülans modeli e-h) Standard k- $\omega$ türbülans modeli	72
Şekil 2.27.	Normal ve yelkırır saçak tipleri için akış alanları a-b) Realizable k- $\epsilon$ türbülans modeli c-d) Standard k- $\omega$ türbülans modeli.....	73

Şekil 3.1.	Doğal olarak gelişmiş sınır tabaka hız profilleri (a) ortalama (b) türbülans.....	74
Şekil 3.2.	Referans atmosferik sınır tabaka ortalama hız profili.....	75
Şekil 3.3.	Referans atmosferik sınır tabaka türbülans hız profili.....	75
Şekil 3.4 :	Doğal olarak gelişmiş sınır tabaka hız profilleri (a) ortalama (b) türbülans.....	76
Şekil 3.5.	Tünel akışında referans ortalama hız profili.....	76
Şekil 3.6.	Tünel akışında referans türbülans hız profili.....	77
Şekil 3.7.	Akış alanı geometrisi.....	83
Şekil-3.8.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri.....	84
Şekil 3.9.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri.....	85
Şekil 3.10	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri.....	87
Şekil 3.11.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri.....	88
Şekil 3.12.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri.....	89
Şekil 3.13.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri.....	89
Şekil 3.14.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri.....	90
Şekil 3.15.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri.....	90
Şekil 3.16.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için çatı sırt ve kenarları boyunca ortalama ve türbülans hız profilleri.....	91
Şekil 3.17.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için çatı sırt ve kenarları boyunca ortalama ve türbülans hız profilleri.....	92
Şekil 3.18.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için çatı sırt ve kenarları boyunca ortalama ve türbülans hız profilleri.....	92
Şekil3.19.	Aynı hız sinyalleri için korelasyon değişimi.....	94
Şekil 3.20.	Farklı hız sinyalleri için korelasyon değişimi.....	94
Şekil 3.21.	Pik değeri gösteren korelasyon değişimi.....	95
Şekil 3.22.	$\theta = 90^\circ$ lik rüzgar geliş açısında değişik çatı eğimlerinde düşey yönde korelasyon katsayısı değişimleri a) $\alpha = 0^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ , c) $\alpha = 30^\circ$ , d) $\alpha = 45^\circ$ .....	96

Şekil 3.23.	$\theta = 90^\circ$ lik rüzgar geliş açısında değişik çatı eğimlerinde yatay yönde korelasyon katsayısı değişimleri a) $\alpha = 0^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ , c) $\alpha = 30^\circ$ , d) $\alpha = 45^\circ$ .....	97
Şekil 3.24.	$y/H=2$ de ölçülen korelasyon katsayılarının akış yönünde değişimi.....	97
Şekil 3.25.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri.....	98
Şekil 3.26.	$\alpha = 0^\circ$ eğimli modelin çatı köşesi çatı ön orta kenarındaki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı ön orta kenarı.....	99
Şekil 3.27.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	101
Şekil 3.28.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ için çatı yüzeyindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	101
Şekil 3.29.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	101
Şekil 3.30.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ için çatı yüzeyindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	102
Şekil 3.31.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	102
Şekil 3.32.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri.....	103
Şekil 3.33.	$\alpha = 15^\circ$ eğimli beşik çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı sırtı köşesi.....	103
Şekil 3.34.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	105
Şekil 3.35.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	106
Şekil 3.36.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	106
Şekil 3.37.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	106
Şekil 3.38.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	107
Şekil 3.39.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri.....	107
Şekil 3.40.	$\alpha = 30^\circ$ eğimli beşik çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı sırtı köşesi.....	108



Şekil 3.41.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	110
Şekil 3.42.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	110
Şekil 3.43.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	111
Şekil 3.44.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	111
Şekil 3.45.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	111
Şekil 3.46.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri.....	112
Şekil 3.47.	$\alpha = 45^\circ$ eğimli beşik çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı sırtı köşesi.....	113
Şekil 3.48.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	115
Şekil 3.49.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 15^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	116
Şekil 3.50.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	116
Şekil 3.51.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	117
Şekil 3.52.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	117
Şekil 3.53.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 75^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	118
Şekil 3.54.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı .....	118
Şekil 3.55.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için normal saçaklı bina çatı modelinde orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri .....	119
Şekil 3.56.	$\alpha = 45^\circ$ eğimli normal saçaklı beşik çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı sırtı köşesi.....	120
Şekil 3.57.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için normal saçaklı model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı ....	122
Şekil 3.58.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ için normal saçaklı çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	122
Şekil 3.59.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ için normal saçaklı model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	123

Şekil 3.60.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ için normal saçaklı çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	123
Şekil 3.61.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için normal saçaklı model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	124
Şekil 3.62.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için yelkiran saçaklı model orta eksenini boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi .....	124
Şekil 3.63.	$\alpha = 45^\circ$ eğimli yelkiran saçaklı beşik çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı sırtı köşesi.....	125
Şekil 3.64.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ için yelkiran saçaklı model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	127
Şekil 3.65.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ için yelkiran saçaklı çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	127
Şekil 3.66.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ için yelkiran saçaklı model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	128
Şekil 3.67.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ için yelkiran saçaklı çatı yüzeylerinde eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	128
Şekil 3.68.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için yelkiran saçaklı model yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı.....	129
Şekil 3.69.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için kırma çatılı model orta eksenini boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri.....	129
Şekil 3.70.	$\alpha = 45^\circ$ eğimli kırma çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı sırtı köşesi.....	130
Şekil 3.71.	$\alpha = 45^\circ$ eğimli kırma çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi b) Çatı sırtı köşesi.....	131
Şekil 3.72.	$\alpha = 15^\circ$ eğimli çatının köşesindeki yerel basıncın rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı..	132
Şekil 3.73.	$\alpha = 15^\circ$ eğimli çatının sırt köşesindeki yerel basıncın rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı..	133
Şekil 3.74.	$\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında $\alpha = 15^\circ$ eğimli çatının yüzeyindeki eş basınç alanları a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı.....	135
Şekil 3.75.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında $\alpha = 15^\circ$ eğimli çatının yüzeyindeki eş basınç alanları a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı.....	135
Şekil 3.76.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için 3 mm spoiler açıklıklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama b) Minimum .....	136
Şekil 3.77.	$\alpha = 15^\circ$ eğimli 5 mm spoiler açıklıklı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) çatı köşesi, b) çatı sırtı köşesi.....	136

Şekil 3.78.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için 5 mm spoiler açıklıklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama b) Minimum.....	137
Şekil 4.1.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için orta eksen boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayılarının değişimi.....	140
Şekil 4.2.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında farklı çatı eğimleri için model orta eksenleri boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri a) Ortalama b) Minimum .....	142
Şekil 4.3.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında düz çatılı bina modelinin orta eksenini boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri.....	143
Şekil 4.4.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında $15^\circ$ eğimli beşik çatılı modelin orta eksenini boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri....	144
Şekil 4.5.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında $30^\circ$ eğimli beşik çatılı modelin orta eksenini boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri....	144
Şekil 4.6.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında $45^\circ$ eğimli beşik çatılı modelin orta eksenini boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri....	145
Şekil 4.7.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında $45^\circ$ eğimli beşik ve kırma çatılı bina modellerinin orta eksenleri boyunca ortalama ve minimum basınç katsayısı değişimleri.....	147
Şekil 4.8.	$\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında saçaksız, normal saçaklı ve yelkırın saçaklı $45^\circ$ eğimli beşik çatılı modellerinin yüzeylerinde ölçülen ortalama ve minimum basıncın orta eksen boyunca değişimi ...	148
Şekil 4.9.	$\alpha = 45^\circ$ eğimli saçaksız, normal saçaklı ve yelkırın saçaklı beşik çatılı modellerin çatı köşesindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) ortalama b) minimum .....	149
Şekil 4.10.	$\alpha = 45^\circ$ eğimli saçaksız, normal saçaklı ve yelkırın saçaklı beşik çatılı modellerin çatı sırt köşesindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) ortalama b) minimum .....	150
Şekil 4.11.	$\theta = 15^\circ$ rüzgar geliş açısında çatı köşesindeki minimum pik basıncın çatı eğimine göre değişimi.....	151
Şekil 4.12.	Çatı eğimi ve rüzgar yönüne göre çatı sırt köşesindeki minimum pik basınçlar.....	151
Şekil 4.13.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için farklı spoiler açıklıklarında orta eksen boyunca basınç katsayısı değişimi a) ortalama b) minimum .....	153
Şekil 4.14.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta eksenini boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$ ---- Standard k- $\omega$ .....	155
Şekil 4.15.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta eksenini boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$ ---- Standard k- $\omega$ .....	156

Şekil 4.16.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta ekseni boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$ ---- Standard k- $\omega$ .....	157
Şekil 4.17.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta ekseni boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$ ---- Standard k- $\omega$ .....	158
Şekil 4.18.	$\alpha = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta ekseni boyunca ortalama basınç katsayısının değişimi o deneysel, — Realizable k- $\epsilon$ model, ---- Standard k- $\omega$ model.....	159
Şekil 4.19.	$\alpha = 15^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta ekseni boyunca ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel, — Realizable k- $\epsilon$ model ---- Standard k- $\omega$ model.....	160
Şekil 4.20.	$\alpha = 30^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta ekseni boyunca ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$ model ---- Standard k- $\omega$ model.....	160
Şekil 4.21.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için model orta ekseni boyunca ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel, — Realizable k- $\epsilon$ model ---- Standard k- $\omega$ model .....	161
Şekil 4.22.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için normal saçaklı bina modelinin orta ekseni boyunca ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$ model ---- Standard k- $\omega$ model.....	162
Şekil 4.23.	$\alpha = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ için yelkiran saçaklı bina modelinin orta ekseni boyunca ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$ model ---- Standard k- $\omega$ model.....	162
Şekil E.1.	Kızgın tel problemler a) Model 1210, b) Model 211.....	177
Şekil E.2.	T.S.I. Model 1211 kızgın tel proba ait kalibrasyon eğrisi.....	179
Şekil E.3.	Setra 239 model basınç ölçerinin kalibrasyon eğrisi.....	180
Şekil E.4.	Ters akış bölgesinde anemometre hız çıkışı.....	181
Şekil E.5.	Basınç ölçümlerinin tekrarlanabilirliği .....	188

## RESİMLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Resim 2.1. L2B rüzgar tünelinin genel görünüşü.....	47
Resim 2.2. Atmosferik sınır tabaka geliştirilmesinde kullanılan pasif aygıtlar.....	47
Resim 2.3. Rüzgar tünelinin genel görünüşü.....	49
Resim 2.4. Tünel akışında bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları.....	50
Resim 2.5. Korelasyon için kullanılan kızgın tel problemlerin konumu.....	56
Resim 2.6. Setra 239 Model basınç ölçer ve scanning valfler.....	58
Resim 3.1. $\theta = 90^\circ$ lik rüzgar geliş açısında yağ tekniği ile elde edilen yüzey akışı fotoğrafları a) $\alpha = 0^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ , c) $\alpha = 30^\circ$ , d) $\alpha = 45^\circ$ .....	79
Resim 3.2. $\theta = 0^\circ$ lik rüzgar geliş açısında yağ tekniği ile elde edilen yüzey akışı fotoğrafları a) $\alpha = 0^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ , c) $\alpha = 30^\circ$ , d) $\alpha = 45^\circ$ .....	80
Resim 3.3. $\theta = 90^\circ$ lik rüzgar geliş açısında değişik çatı eğimlerinde parafin buharı ile elde edilen akış görüntüleri a) $\alpha = 0^\circ$ , b) $\alpha = 15^\circ$ , c) $\alpha = 30^\circ$ , d) $\alpha = 45^\circ$ .....	81
Resim 3.4. $\theta = 90^\circ$ lik rüzgar geliş açısında $45^\circ$ çatı eğimli model etrafındaki akış alanının zamana bağlı görüntüleri.....	82

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Beaufort ölçeğindeki rüzgar hızları.....	20
Tablo 1.2. Arazi tipi ile ilgili değerler.....	25
Tablo 1.3. 30° eğimli beşik çatı için değişik ülke kodlarına göre ortalama basınç katsayıları.....	41
Tablo 1.4. TS 498 – yüksekliğe bağlı rüzgar hızı ve emme değerleri.....	42
Tablo 4.1. Mevcut çalışmanın ülke kodlarına göre karşılaştırılması.....	146
Tablo 4.2. Farklı çatı eğimlerindeki bina modelleri yüzeylerinde alan-ortalama basınç katsayıları.....	146

## SEMBOLLER DİZİNİ

A, B	Kızgın tel kalibrasyon sabitleri
C <sub>p</sub>	Yüzey basınç katsayısı,
C <sub>port</sub>	Ortalama yüzey basınç katsayısı
C <sub>prms</sub>	RMS yüzey basınç katsayısı
C <sub>pmax</sub>	Maksimum yüzey basınç katsayısı
C <sub>pmin</sub>	Minimum yüzey basınç katsayısı
E	Kızgın telli anemometre çıkış gerilimi
F	Kuvvet
H	Model yüksekliği
K	von Karman sabiti
L	Model genişliği
P	Yüzey basıncı
$P_s$	Atmosfer basıncı
R	Korelasyon katsayısı
Re	Reynolds sayısı
Ro	Rossby sayısı
S	Kaynak terimi
U	Ortalama hız
$U_\infty$	Serbest akış hızı
W	Model genişliği
a	İvme
k	Türbülans kinetik enerji
m	Kütle
t	Zaman
u	Yatay doğrultudaki hız bileşeni
$\sqrt{u^2}$	Yatay doğrultuda türbülans hızı
v	Düşey doğrultuda hız bileşeni
x	Yatay koordinat
y	Düşey koordinat
$\delta$	Sınır tabaka kalınlığı
$\alpha$	Çatı eğimi
$\theta$	Rüzgar geliş açısı
$\beta$	Arazi tipi
$\varepsilon$	Yutulma
$\omega$	Özgül yutulma
$\mu$	Dinamik viskozite
$\nu$	Kinematik viskozite
$\rho$	Yogunluk
TTU	Texas Tech University
SSB	Silsoe Structure Building
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Havanın dünya yüzeyine göre hareketi, rüzgar olarak adlandırılmaktadır. Güneş hava hareketinde etkili olan birincil enerji kaynağıdır. Atmosfer tarafından büyük ölçüde geçirilen güneş ışınımı yeryüzü tarafından soğurulur. Işınımın yer yüzeyinin değişik bölgelerine farklı açılarda gelmesi, havanın deniz ve karasal bölgeler üzerinde farklı şekilde ısınmasına yol açmaktadır. Bu durum, düzensiz sıcaklık dağılımları oluşturmakta ve büyük ölçekli hava hareketlerini başlatan yüksek ve alçak basınç sistemlerini meydana getirmektedir. Bu iki sistem arasındaki basınç farkı da rüzgarın oluşmasına neden olmaktadır. Tropiklerin dışında, rüzgarların çoğunluğu, doğudan batıya hareket eden ve güney yarım kürede saat yönünde, kuzey yarım kürede ise saat yönünün tersinde bir sirkülasyona sahip büyük ölçekli düşük basınçlı sistemler (siklonlar) vasıtasıyla ekvator dan kutuplara doğru olan ısı transferi ile ilgilidir. Dünyanın dönmesi doğu-batı hareketini üretirken ve sirkülasyonun yönünü belirlerken, sıcaklık farkları kuzey-güney akışını meydana getirmektedir [1].

Yeryüzü üzerindeki rüzgar hareketleri, bir yüzey üzerindeki sınır tabaka akışına benzer şekilde, atmosferik sınır tabaka içinde gerçekleşmektedir. Dünyadaki bütün yapılar, kalınlığı 1 kilometreye kadar değişebilen, bu atmosferik sınır tabaka içinde yer almaktadır. Atmosferik sınır tabakanın alt kısmında rüzgarın hız ve türbülans değerlerinin önemli değişimler göstermesi, binaların tasarım ve yapım aşamalarında dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Rüzgar mühendisliği, sınır tabaka kavramı, rüzgar hız dağılımı üzerindeki zemin etkileri ve yapıları etkileyen rüzgar kuvvetleri ile ilgilenmektedir. Rüzgar yükleri ile ilgili yaklaşımların geliştirilmesinde, meteoroloji ve uzay mühendisliği gibi diğer alanlardan da yararlanılmaktadır. Geçen yarım yüzyılda yapısal tasarımlarda rüzgar yüklerinin etkilerine yönelik önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bu süreçte, geleneksel modellere göre, iklim, meteoroloji, aerodinamik, yapı mekaniği ve dinamiği ile ilgili gerçekçi ve basit kavramlar oluşturulmuştur.

Rüzgarın yeryüzünde meydana getirdiği etkiler oldukça önemlidir. Bitkilerin döllenmesinde, havadaki nem ve kirliliğin azaltılmasında olumlu etkiler oluşturan rüzgar;



kum fırtınaları, toprakların erozyona uğraması, yapıların ve yerleşim bölgelerinin hasar görmesi gibi olumsuzluklara da neden olabilmektedir. Özellikle, sıcaklık ve nem miktarının fazla olması nedeniyle, dünyanın tropik okyanus alanları kuvvetli fırtına alanlarıdır. Tropikal fırtınalar kuvvetli siklonlardır ve bir alçak basınç alanı etrafında saat yönünün tersine dönen ve maksimum rüzgar hızları 70 m/s' ye kadar çıkan çok kuvvetli rüzgarların bulunduğu hava olaylarıdır. Tropik fırtınaların dünyada toplam görülme sıklığı yılda 100 civarındadır. Bu fırtınaların etki alanlarına göre şiddetleri ve ülkelere göre isimlendirilmeleri farklıdır. Kuzey Atlantik Okyanusunda olanlara kasırga (hurricane), Pasifik Okyanusunun Çin yakınlarında olanlarına tayfun (typhoon), Hint okyanusunda olanlara da siklon (cyclone, tornado) denilmektedir. Ancak şiddet ve sayı bakımından en fazla Hint Okyanusundan kaynaklanan fırtınalar etkilidir. Etki süreleri kara içlerinde birkaç haftaya kadar çıkabilmektedir. Bu sebeple her yıl bu tropik fırtınalar etkili oldukları alanlarda çok büyük maddi zararlara ve çok sayıda can kayıplarına sebep olmaktadır.

Orta enlem kuşağında (30-60 kuzey enlemleri) bulunan Türkiye'de, tropik alanlarda (30S-0-30N enlemleri) oluşan çok güçlü tropik fırtınalar (siklonlar) görülmemektedir. Ancak, ülkemizde ekstra-tropik fırtına denilen tropik alanların dışında ara sıra görülen fırtınalar özellikle kışın daha etkili olmaktadır. Bu fırtınalarda rüzgar hızı 30 m/s civarına kadar çıkabilmekte, özellikle kış ve bahar aylarında, güneyli hava akımları kuvvetli fırtınalara neden olmaktadır. Akdeniz üzerinden geçerken nem kazanan Afrika'nın sıcak ve kuru havası, güneyden ülkemize girerek kuzeye doğru ilerlerken kuzeyin soğuk havası da güneye inmeye çalıştığı için kuvvetli fırtınalar ve yağışlar meydana gelebilmektedir. Fırtınalar güney ve güney batı kıyılarımızda ilk etapta etkili olurken, kara içlerine sokuldukça cephe sistemlerinin şiddetleri azalmaktadır. Türkiye'de fırtınalar daha çok binaların çatılarının hasar görmesine ve uçmasına neden olmaktadır. Dünyada ve ülkemizde meydana gelen fırtına tipi hava olayları, kaçınılmaz olarak bundan sonra da görülmeye devam edecek ve iklim değişiklikleri sonucu görülme sıklıkları daha da artabilecektir. Rüzgar etkilerinden mümkün olduğunca az zarar görmek için, meteorolojik verilerin sürekli göz önünde bulundurulması ve yapıların tasarım ve inşasında ilgili standart ve kodlara uyulması büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde, bilim ve teknolojideki gelişmelere paralel olarak, rüzgarın yapılar üzerindeki etkileri önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Dünya üzerinde çoğunlukla inşa edilen konut, ticari ve diğer amaçlar için kullanılan yapılar alçak binalar olarak sınıflandırılırlar. Yapımları kolay ve maliyetleri düşük olan müstakil evler, moteller,

okullar, ticari ve fabrika binaları, depolar, alışveriş merkezleri gibi yapılar bu sınıf kapsamındadırlar. Aşırı emniyet kriterlerine göre tasarlanıp, ileri teknoloji ve malzeme kullanılarak inşa edilen yüksek yapılar kuvvetli rüzgarlara karşı daha iyi bir performans gösterirken, daha basit yapılan alçak yapılar rüzgar kaynaklı hasarlara daha çok maruz kalmaktadır. Yapılan araştırmalar alçak binaların en çok dış cephe ve özellikle çatılarının hasara uğradığını göstermiştir. Rüzgara dirençli bina bileşenleri oluşturmak ekonomik kayıplarda önemli bir azalma sağlayacaktır. Bölgelerin etkin rüzgarlarının ve arazi yapılarının farklı olmasının yanı sıra, geleneksel yapı türleri ve mimarilerinin de farklı olması, bu alandaki çalışmaların sayısını sürekli arttırmaktadır.

Rüzgarın bina yüzeyleri üzerinde oluşturduğu basınç alanları; sürekli ve süreksiz yükler oluşturmaktadır. Rüzgar basıncı çalkantı karakteristikleri, ortalama rüzgar hızının şiddeti ve doğrultusu, türbülans derecesi, arazi şartları, çevre, bina geometrisi ve yüzey pürüzlülüğü gibi birçok özelliğe bağlıdır. Rüzgar hareketinin karmaşık bir yapıda olması nedeniyle, bu konuda kesin bir matematiksel yaklaşım geliştirmede güçlüklerle karşılaşmaktadır. Ancak, bu konuda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, akış alanı hakkında iyi bir fikir verebilmektedir. Binalar üzerindeki rüzgar etkilerinin deneysel olarak araştırılmasında, gerçek-yapı ölçümleri ve rüzgar tüneli benzeşim çalışmaları yapılmaktadır. Gerçek ölçekli araştırmaların zaman alıcı, zahmetli ve pahalı olmasından ötürü, rüzgar tüneli model deneyleri, rüzgar yüklerinin değerlendirilmesinde önemli rol oynamakta ve ilgili rüzgar standartları ile kodların oluşturulmasına ve geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu konuda yapılan sayısal çalışmalar ise, karmaşık bina geometrileri etrafındaki akış alanlarının hesaplanmasına ve türbülans modellerinin hassasiyetlerinin denenmesine imkan sağlamaktadır.

## **1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı**

### **1.2.1. Amaç**

Rüzgarın bina çatıları üzerinde meydana getirdiği etkiler, bina çatı geometrileri ile yakından ilgilidir. Bu nedenle, binaların çatı geometrilerindeki farklılık rüzgar-çatı etkileşiminin de farklı olmasına yol açmaktadır. Rüzgarların çatılar üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin değerlendirilebilmesi ve kalıcı çözümlerin ortaya koyulabilmesi

için, değişik tipteki çatılar etrafındaki akış alanlarının ayrıntılı bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Rüzgar kaynaklı hasar raporlarına göre, düz ve beşik tipi çatıları olan alçak binalar rüzgar hasarlarına daha çok maruz kalmaktadır. Bu durum, bu tip çatılara sahip konut, sanayi ve ticari amaçlı binalar etrafındaki akış alanlarının son zamanlarda yaygın bir şekilde incelenmesine yol açmaktadır. Literatürde çatıların aerodinamiğine yönelik araştırmaların çoğu basınç dağılımları ile ilgili olup, akış alanı ile ilgili kapsamlı çalışmalar az sayıdadır.

Bu çalışmada, hız ve basınç dağılımlarının ortalama ve çalkantı değerlerinin ölçülmesi, akış gözlenmesi ve sayısal çözümle birlikte bütünlük oluşturacak şekilde, değişik tipteki ve değişik eğimlerdeki çatı modelleri etrafındaki akışın deneysel ve teorik olarak kapsamlı araştırılması planlanmıştır. Çalışma kapsamında, rüzgar karakteristikleri ile çatılar üzerindeki basınç dağılımı arasında bir korelasyonun oluşturulması, basıncın pik değerleri ile ters akış bölgeleri arasındaki ilişkinin incelenmesi, uygulamada karşılaşılan olumsuzlukların önlenmesine yönelik uygun çatı geometrilerinin belirlenmesi, sayısal yöntemlerin yeterlilik ve hassasiyetinin denenmesinde kullanılacak deneysel veri sağlanması ve binalar üzerindeki rüzgar yüklerinin değerlendirilmesi ile ilgili standartlar ve kodlar için önerilerin yapılması amaçlanmıştır.

### **1.2.2. Kapsam**

Bu çalışma kapsamında, öncelikle rüzgar tüneline atmosferik sınır tabaka benzeşimi için deneyler yapılmıştır.  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimlerine sahip bina modelleri etrafındaki akış alanları hakkında ön bilgiye sahip olmak için yağ ve parafin buharı teknikleri kullanılarak akış görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Akış görüntüleme sonuçlarına göre, çatı üzerinde yoğun olmak üzere, kızgın tel anemometre sistemi ile akışın ortalama ve çalkantı hızları ölçülerek hız dağılımları elde edilmiş ve referans sınır tabakadaki hız çalkantıları ile çatı üzerindeki hız çalkantıları arasındaki korelasyon araştırılmıştır. Yüzey basıncının ortalama ve çalkantı değerlerinin ölçümleri, değişik çatı geometrileri ve rüzgar yönüne göre daha ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çatı yüzeylerinde basıncın negatif pik değerler aldığı kritik bölgelere yerleştirilen spoiler benzeri elemanların, bu bölgelerde meydana gelen emme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tezin sayısal çalışma ile ilgili kısmında, akışkanlar mekaniği ile ilgili problemlerde yaygın

olarak kullanılan FLUENT paket programı ile akış alanlarının iki boyutlu sayısal çözümleri elde edilmiştir.

Bu çalışma, altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, tez konusu ile ilgili literatür, rüzgar ve türbülans ilişkisi, atmosferik sınır tabaka ve modellenmesi ile binalar üzerinde rüzgar etkileri konularını kapsayan genel bilgilerden oluşmuştur. Tez kapsamında yapılan çalışmaların yer aldığı ikinci bölümde, kurulan deney düzenekleri, kullanılan modeller, ölçme cihazları ve ölçüm yöntemleri ile sayısal yöntemden bahsedilmiştir. Ölçümlerden elde edilen bulgular, üçüncü bölümde sunulmuştur. Dördüncü bölümde elde edilen bulguların irdelemesi yapılmış ve sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde, çalışmanın pratik sonuçlarına yer verilmiş ve son bölümde, ileriye yönelik önerilerde bulunulmuştur.

### **1.3. Çalışmanın Bilimsel Önemi**

Rüzgar olarak adlandırılan hava hareketi, canlı yaşamını olduğu kadar yer yüzeyindeki yapıları da etkilemektedir. Konut, fabrika gibi düşey ya da yatay doğrultuda yapılandırılmış binaların çatıları, geleneksel çeşitlilikle değişik geometrilerde oluşturulmaktadır. Atmosferik şartların değişkenliği nedeniyle bina çatıları üzerinde meydana gelen basınç değişiklikleri sonucunda, aerodinamik yönden uygun olmayan bina çatıları hasar görebilmekte ve hatta uçabilmektedir. Rüzgarın bina ile etkileşimi sonucu meydana gelen girdapların yayılması ile oluşacak titreşimler de gürültü ve hasara neden olabilmektedir. Ayrıca, bina çatılarındaki bacalardan dış ortama bırakılan, duman ve benzeri gaz halindeki atıkların atmosferde dağılımı, çatı geometrilerinden ve bina yerleşim düzenlerinden etkilenerek hava kirliliği açısından olumsuzluklar meydana getirebilmektedir. Son zamanlarda deneysel ve sayısal yöntemlerde sağlanan gelişmelere paralel olarak artan araştırmalar sayesinde, binalar üzerindeki akış alanları hakkında daha detaylı ve hassas bilgiler elde edilebilmektedir.

Alçak binalar üzerinde rüzgarın oluşturduğu basınç alanlarını incelemek için, atmosferik sınır tabakanın geliştirildiği rüzgar tünelleri uzun süreden beri kullanılmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların çoğu, üniform arazi tipinde oluşturulmuş sınır tabaka içerisine yerleştirilmiş tekli ve diziler şeklinde düz, beşik veya kırma tipinde çatı modelleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Düz, beşik ve tek eğimli çatılara sahip binalar üzerinde oluşan basınç alanları son zamanlarda yaygın bir şekilde incelenmektedir. Uzun beşik çatılı

binalar üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda, basınç dağılıminın çoğunlukla çatı eğimine bağlı olduğu ortaya koyulmuştur. Çatıların kenar ve köşelerinde rüzgarın oluşturduğu pik basınçların yoğunluğunun azaltılmasına yönelik uygun tasarımların oluşturulmasında, çatılar üzerindeki akış alanı hakkındaki mevcut bilgiyi arttırıcı çalışmaların yapılması önem taşımaktadır. Rüzgar tüneli deneylerinden elde edilen sonuçlar, analitik ve sayısal yöntemlerin yetersiz kaldığı kompleks geometriler üzerindeki rüzgar yüklerinin belirlenmesinde ve ilgili paket programlarda kullanılan sayısal yöntemlerin dayandığı teori ve yaklaşımların doğruluk ve hassasiyetinin denenmesinde büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, binalarla ilgili rüzgar standartları ve pratik kodların, iklimsel koşullardaki değişimlere göre düzeltilmesine ve yenilenmesine de katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmanın konusu ile ilgili literatür incelendiğinde, değişik çatı geometrilerine sahip bina modelleri üzerinde ortalama ve çalkantı basınçlarının kapsamlı bir şekilde ölçüldüğu, hız alanına yönelik çalışmaların ise oldukça az sayıda olduğu görölmektedir. Farklı çatı eğimlerindeki bina modelleri etrafındaki akış alanlarında; ortalama hız ve türbülans hız profillerinin ölçülmesinin, referans sınır tabakadaki ve çatı üzerindeki hız çalkantıları arasındaki korelasyonun araştırılmasının, literatürde yer alan geleneksel saçak tiplerinin yanı sıra yelkırın saçak tipinin de incelenmesinin ve çatı yüzeylerine yerleştirilen spoiler benzeri elemanların emme yükü üzerindeki etkilerinin belirlenmesinin, bu çalışmaya orijinal bir nitelik kazandıracadığı ve bu alanda çalışacaklar için önemli yararlar oluşturacadığı düşünölmektedir.

## **1.4. Literatür Araştırması**

### **1.4.1. Atmosferik Sınır Tabaka Akışı**

Atmosferik sınır tabaka akışının yapısına yönelik ilk çalışmalar, 1900'lü yılların başına dayanmaktadır. 1880–1972 periyodunda bu konu ile ilgili çalışmaları özetleyen bir araştırma, Counihan [2] tarafından yapılmıştır. Tennekes [3,4] bu akış tipini tanıtıcı bir rapor hazırlamış ve nötral atmosferik sınır tabakadaki logaritmik rüzgar profilinin yapısını incelemiştir. Sınır tabakanın ilk 150 metresi ile ilgili çalışmalar Panofsky [5] tarafından

yapılmıştır. Pasquill [6], ortalama rüzgar hızının yükseklikle değişimi ve türbülans çalkantılarının istatistiksel özellikleri için yarı amirik bağıntılar önermiştir.

Bir kısım araştırmacılar, atmosferik sınır tabakanın rüzgar tünellerinde modellenmesi konusunda çalışmışlardır. Sınır tabaka, doğal ve yapay olarak, farklı yöntemlerle geliştirilebilmektedir. Cermak [7], 29 m uzunluğunda bir rüzgar tüneli kullanarak, 0.9 m yüksekliğinde doğal olarak gelişmiş bir sınır tabaka üretmiştir. Lloyd [8], çalışma bölgesi uzunluğu 1.35 m olan kapalı devre bir rüzgar tüneline atmosferik sınır tabakanın benzeşimi üzerine çalışmıştır. Ağ aralıkları çalışma bölgesi tabanına doğru gittikçe sıklaşan bir ızgaranın çubukları üzerine, türbülans üretici küçük bloklar yerleştirmiş ve ızgaradan sonra tünel döşemesini pürüzlendirerek 1.5 m kalınlığında bir sınır tabaka üretmiştir. Armitt ve Counihan [9], çalışma bölgesi boyutları 4.5x1.5x11 m olan rüzgar tünellerinde bariyer, girdap üreticisi ve pürüzlülük elemanları kombinasyonu ile 1.2 m yüksekliğinde bir sınır tabaka geliştirmişlerdir. Arya ve Plate [10], 1.8x1.8 m kesitinde ve 25 m uzunluğundaki meteorolojik bir rüzgar tünelinin döşemesini ısıtarak 0.7 m civarında bir sınır tabaka yüksekliği elde etmişlerdir.

Atmosferik sınır tabaka akışının rüzgar tünellerinde modellenmesinde, geçerliliği kabul edilmiş ve yaygın şekilde kullanılan bir yöntem, Counihan [11] tarafından geliştirilmiştir. Bariyer, eliptik tipte girdap üreticiler ve prizmatik küçük bloklardan oluşan pürüzlülük elemanları kombinasyonunun kullanıldığı yöntemin en büyük yararı, kısa çalışma bölgesi tünellerde modelleme çalışması yapılmasına olanak sağlamış olmasıdır. Cockrell ve Lee [12], çalışma bölgesi uzunluğu 14 m olan rüzgar tünellerinde, atmosferik sınır tabaka akışını simule etmek için, ızgara ve üçgen prizma şeklinde akış karıştırıcılar kullanmışlardır. Maull [13], eğrisel bir ızgara kullanarak lineer bir hız profili üretmeye çalışmıştır. Ortalama hız ve türbülans büyüklükleri için laboratuvar ve atmosferik akışlar arasındaki benzeşim ile ilgili kriterler, Cermak ve Arya [14] tarafından incelenmiştir. Counihan [15], pürüzlülük elemanlarının yoğunluk ve yüksekliğinin modellemedeki etkilerini incelemiştir. Atmosferik sınır tabaka akışının modellenmesinde pasif aygıtların kullanıldığı bir başka çalışma Sundaram ve diğ. [16] tarafından yapılmıştır. Kısa çalışma bölgesi rüzgar tünellerinde bariyer, üçgen prizmatik girdap üreticiler ve piramit şeklinde pürüzlülük elemanları ile, 0.3 m yükseklikte bir sınır tabaka oluşturmuşlardır. Counihan [17], kırsal kesim ve şehir merkezlerinde oluşan atmosferik sınır tabaka akışı hız profilleri arasındaki değişiklikleri incelemiş ve modellemede kullanılan bariyer yüksekliğinin değişiminin hız profillerine etkisini araştırmıştır. Cook [18], deney bölgesi uzunluğu 14

metre olan tünelde ızgara, bariyer, ahşap bloklar ve çakıl taşlarından oluşan pürüzlülük elemanları ile 0.75 m yüksekliğinde bir sınır tabaka oluşturmuştur.

Modellemede pasif aygıtlar yerine aktif aygıtların kullanılmasına yönelik Schon ve Mery [19] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deney bölgesi uzunluğu 10 m olan rüzgar tünellerinde, akış yönüne dik doğrultuda hava enjeksiyonu vererek, sınır tabaka kalınlığının artırılmasına çalışılmıştır. Aktif aygıtlı diğer bir modelleme tekniği de, Nagip ve diğ. [20] tarafından geliştirilmiştir. Akışa karşı yönlenmiş hava hüzmeleri ve pürüzlülük elemanları olarak ahşap blokları kullanmışlar ve 3 m uzunluğundaki tünel çalışma bölgesinde hüme sayısını değiştirerek, 0.3 ile 0.43 m aralığında sınır tabaka yükseklikleri elde etmişlerdir. Atmosferik sınır tabakanın rüzgar tünellerinde modellenmesinde, benzeşimdeki rasgelelik göz ardı edilmekte ve arazi şartları geometrik olarak modellenememektedir. Fang ve Sill [21], rasgele pürüzlülük ve üniform pürüzlülük alanlarını rüzgar tüneline test etmişlerdir. Farklı düzenlemeler için, sınır tabakalar içerisine yerleştirilmiş modeller üzerindeki basınçları ölçerek, rasgele pürüzlülük ve üniform pürüzlülük modelleri arasında önemli farklar olduğunu belirlemişlerdir. Wittwer ve Möller [22], Counihan ve Standen yöntemlerini kullanarak atmosferik sınır tabakayı rüzgar tüneline benzeştirdikleri bir çalışmada, önce Counihan yöntemini kullanarak eliptik girdap üretici, bariyer ve pürüzlülük elemanlarından oluşan bir düzenleme yapmışlar, daha sonra ise girdap üreticiler yerine piramit kullanarak farklı bir düzenlemeyi Standen yöntemine göre gerçekleştirmişlerdir. Iyengar ve Farell [23], kırsal arazi şartları için atmosferik sınır tabaka benzeşiminde piramit, bariyer ve pürüzlülük elemanları kullanmışlardır. 1.7 m genişliğinde, 1.8 m yüksekliğinde ve 16 m uzunluğundaki tünel çalışma bölgesinde, bariyer ve girdap üreticilerden sonra, 12 m lik bir mesafede, 28 mm lik ahşap küp bloklarla pürüzlülük bölgesi oluşturmuşlardır. Bortoli ve diğ. [24], 2.4 m genişlikte, 1.8 m yükseklikte ve 22.4 uzunlukta çalışma bölgesine sahip rüzgar tüneline dört farklı arazi tipi için atmosferik sınır tabaka benzeşimini gerçekleştirmişlerdir. Bariyer, eliptik girdap üretici, piramit ve pürüzlülük elemanlarından oluşan kombinasyonla 1.3 m yüksekliğinde sınır tabaka kalınlığı elde etmişlerdir. Parker ve Kinnersley [25], türbülanslı sınır tabaka akışını, rüzgar tüneli çalışma bölgesinin alt kısmında 1:1000 ölçekli olarak elde etmişlerdir. Çalışma bölgesi başlangıcına yerleştirdikleri türbülans üretici ızgaraların 1 m ilerisine üçgen piramitlerden 5 adet koymuşlar ve piramitlerden sonra 2.35 m lik mesafede pürüzlülük elemanları kullanarak 0.8 m yüksekliğinde bir sınır tabaka oluşturmuşlardır.

### 1.4.2. Gerçek Yapı Ölçümleri

Gerçek yapılar üzerindeki rüzgar etkilerinin belirlenebilmesi için, birçok ülkede gerçek ölçekli test binaları inşa edilmiştir. Bu binalar üzerinde yapılan kapsamlı ölçümler, rüzgar tüneli deneylerinin ve nümerik çalışmaların yönlendirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Businger ve diğ. [26], atmosferik sınır tabakada hız profili ve akışlarla ilgili karakteristikleri belirlemek amacıyla gerçek yapı ölçümleri yapmışlardır. Türbülans kinetik enerji bilançosu ve sıcaklık değişimi üzerine, gerçek yapı ölçümü ile ilgili diğer bir çalışma, Wyngaard ve Cote [27], tarafından gerçekleştirilmiştir.

Gerçek yapılar üzerindeki ölçümler, hız ve basınç üzerine yoğunlaşmıştır. Eaton ve diğ. [28], Aylesbury test binasının çatı eğimini  $5^\circ$  ile  $45^\circ$  arasında değiştirerek, farklı rüzgar açıları için, bina yüzeyleri üzerindeki basınç dağılımlarını belirlemişler ve pik değerlerin rüzgar tüneli sonuçlarıyla uyumlu olduğunu bulmuşlardır. Alçak binalar üzerindeki rüzgar etkisini incelemek için gerçek yapıda basınç ölçümü yapan Hoxey ve Moran [29], bir çok standardın rüzgar yüklerinin tahmininde yetersiz kaldığını ortaya koymuşlardır. Düz çatılı gerçek bir yapıda, bina köşeleri üzerindeki rüzgar basınçlarının ölçüldüğü ve sonuçların rüzgar tüneli verileriyle karşılaştırıldığı bir çalışmada, çatı köşelerindeki ortalama basınç katsayılarının en kritik değerlerinin açılı rüzgar doğrultuları için gerçekleştiği belirlenmiştir [30]. Robertson [31], bir test binası üzerinde farklı saçak tiplerinde gerçek ölçekli basınç ölçümleri yaparak, modern eğrisel saçakların geleneksel keskin saçaklara göre rüzgar yükleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Texas Tech University (TTU) test binası üzerinde, farklı rüzgar açıları için gerçek ölçekli basınç ölçümleri Levitan ve diğ. [32]; akış gözleme çalışmaları ve hız ölçümleri Sarkar ve diğ. [33] tarafından gerçekleştirilmiştir. Peterka ve diğ. [34] tarafından yapılan çalışmada, gerçek ölçekli bir test binasının çatısı üzerinde ölçülen basınçlar sınır tabaka rüzgar tüneli sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Stathopoulos ve diğ. [35], 3.3 m yüksekliğindeki alçak bir test binası çatısının kenarlarına yerleştirilen farklı yüksekliklere sahip korkulukların, basınç alanı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.  $L$ , bina uzunluğunu;  $h$ , korkuluk yüksekliğini göstermek üzere, çatı üzerindeki emme etkisindeki önemli artışların  $0.01 < h/L < 0.02$  aralığında meydana geldiğini göstermişlerdir. Banks ve diğ. [36], alçak bina çatıları üzerindeki rüzgar etkisini belirlemek için, rüzgar tüneline ve gerçek yapıda basınç ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. En büyük ortalama ve negatif değerlerin, açılı rüzgar doğrultularında ve delta kanat



tipindeki konik girdapların bulunduğu bölgelerde oluştuğunu belirlemişlerdir. Wu ve diğ. [37], konik girdaplarla ilişkili kritik emme etkilerini anlamak üzere TTU test binası üzerinde gerçek ölçekli deneyler yapmışlardır. Anlık olarak ölçülen basınç verileri ve akış gözleme çalışmalarından, konik girdaplar ile çatı köşelerindeki kritik emme basınçlarının ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

### 1.4.3. Rüzgar Tüneli Deneyleri

Alçak bina çatıları üzerindeki rüzgar yüklerinin belirlenmesine yönelik rüzgar tüneli çalışmaları, 1960'ların ortalarından itibaren başlamış ve benzeşim tekniklerinin gelişmesiyle günümüzde yaygınlaşmıştır. Üç boyutlu küt cisimler etrafındaki akış alanını anlamaya yönelik deneylerle, gelen akışın karakteristiklerinin model üzerindeki basınç dağılımına olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Laminer ve türbülanslı akış şartlarında, yüzeye bağlı bir küp etrafındaki akış alanının incelenmesine yönelik deneysel bir çalışma, Castro ve Robins [38] tarafından yapılmıştır. Akış alanındaki ters akış bölgelerinde ortalama hız, türbülans ve yüzey basınçlarını ölçmüşlerdir. Sockel ve Taucher [39], rüzgar tüneline türbülanslı sınır tabaka içerisine yerleştirdikleri prizmatik düz çatı modelleri üzerindeki rüzgar etkilerini basınç katsayıları cinsinden belirlemişlerdir. Fackrell [40], prizmatik cisimler üzerindeki akış davranışını ve ayrılmış akış bölgelerinin yapısını incelemiştir. H, L, W, sırasıyla cisim yüksekliğini, uzunluğunu ve genişliğini göstermek üzere, birincil ters akış bölgesi uzunluğunun artan W/H ile arttığını ve azalan L/H ile azaldığını bulmuştur. Üst ön kenardan ayrılan akışın cismin üzerinde tekrar tutunmasının, ters akış bölgesi uzunluğundan etkilendiğini belirlemiştir.

#### 1.4.3.1. Akış Ayrılması

Letchford ve Ginger [41], 1:100 ölçekli model çalışmasıyla, düz çatılar üzerindeki ortalama basınç dağılımlarını, kentsel arazi şartlarına göre modellenmiş bir atmosferik sınır tabakadaki rüzgar tüneli ölçümlerinden elde etmişlerdir. Belli bir çatı eğimi ve rüzgar açısı aralığı için gerçekleştirdikleri yerel ve alan ortalamalı ölçümler sonucunda, en kritik yüklerin akış ayrılmasının olduğu bölgelerde oluştuğunu bulmuşlardır. Değişik eğim açalarına sahip bir dizi çatı modeli üzerinde akış ayrılmasını ve girdap oluşum

mekanizmasını incelemek üzere Ginger ve Letchford [42] tarafından yapılan bir çalışmada, akış ayrılması ve girdap oluşumunun büyük piklere sahip çatı yüklerinden kaynaklandığı ortaya konulmuştur. Ginger ve Letchford [43], kentsel arazi şartlarında rüzgar tüneline modelledikleri atmosferik sınır tabaka içerisine 1:100 ölçekli düz çatılı bir model yerleştirerek, çalkantı basınç dağılımlarını belirlemişlerdir. Belli bir aralıktaki çatı eğimi ve rüzgar açısı için gerçekleştirdikleri yerel ve alan ortalamalı basınç ölçümlerinden, en kritik rüzgar yüklerinin ayrılmış akış bölgelerinde oluştuğunu bulmuşlardır. Ginger ve Letchford [44], 1:100 ölçekli çatı modelleri üzerinde yerel ve alan ortalamalı basınçları rüzgar tüneli ölçümleriyle belirledikleri çalışmalarında, kritik ortalama ve minimum emme basınçlarının akışı ayıran kayma tabakasının altında oluştuğunu belirlemişlerdir. Richardson ve Surry [45], zirai binalar üzerinde gerçek ölçekli ve 1:100 model ölçekli deneylerden elde ettikleri ortalama, çalkantı, maksimum ve minimum basınç katsayıları arasında iyi bir uyum olduğunu bulmuşlardır. Ayrılma ve tekrar tutunmanın meydana geldiği rüzgar tarafındaki çatı yüzeylerinde ise, model ölçekli sonuçların emme etkisi açısından gerçek ölçekli sonuçlardan farklı olduğunu belirtmişlerdir.

#### 1.4.3.2. Basınç Ölçümleri

Binalar etrafındaki akışların incelenmesine yönelik çalışmalarda ilgi, basınç ölçümleri üzerine odaklanmıştır. Alçak binalar üzerindeki rüzgar basınçları ile ilgili bir literatür çalışması, Uematsu ve Isyumov [46] tarafından sunulmuştur. Davenport ve Surry [47], alçak bina çatıları üzerindeki basınç dağılımlarını inceleyerek, ortalama ve minimum basınç katsayılarının düz arazilerde, pürüzlü arazilerden daha küçük olduğunu göstermişlerdir. Çatı üzerindeki ortalama basınçların, rüzgarın çatı sırtına açılı gelmesi durumunda çatı sırtına dik veya paralel gelme duruma göre daha kritik olduğunu ortaya koymuşlardır. Kumar ve Stathopoulos [48], iki farklı arazi tipi için sınır tabaka içine yerleştirilmiş alçak bina modelleri üzerindeki basınçları ölçerek, rüzgar basınç spektrasını belirlemişler ve farklı arazi şartlarında spektranın değiştiğini görmüşlerdir. Stathopoulos [49], üç farklı çatı eğim açısı için ortalama ve çalkantı basınç ölçümleri gerçekleştirdiği çalışmada, düz çatı köşe ve kenarlarında gözlediği kuvvetli emme etkilerinin 22.5° eğimli çatıda hafiflediğini ve 45° eğimli çatıda ise kaybolduğu belirlemiştir. Çatı rüzgar yüklerinin bölgesel karakteristiklerini inceleyerek, çatı yüklerinin çatı eğim açısının bir fonksiyonu olduğunu ifade etmiştir. Stathopoulos [50], düz çatı ve dört farklı eğim açısına sahip beşik

çatı modellerini incelediği bir başka çalışmada, eğim açısı değıştikçe çatı basınç dağılımlarında farklar oluştuğunu, çatı sırtında akış ayrılmasının meydana geldiğini ve çatı eğiminin bir fonksiyonu olarak basınç değışikliklerinin akış ayrılmasıyla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Stathopoulos ve Mohammadian [51], tek eğimli bina çatıları üzerindeki rüzgar basınç yüklerini, açık arazi tipine göre modellenmiş atmosferik sınır tabaka akışında deneysel olarak belirlemişlerdir. Yükseklik, genişlik ve çatı eğimi gibi geometrik parametreleri, çeşitli rüzgar açıları için deneyerek, yerel ve alan ortalamalı basınç değerlerini elde etmişlerdir. Farklı boyutlardaki benzer modeller üzerinde de ölçüm yaparak model ölçeğinin etkisini incelemişlerdir. Kind [52], düz çatılara sahip alçak binalar için, farklı araştırmacılar tarafından yayınlanan emme verileri arasında bazı tutarsızlıklar olduğunu belirlemiştir. Bazı araştırmacıların, çatı kenarlarına basınç delikleri açamamaları nedeniyle gerçek kritik emme etkilerini yakalayamadıklarını öne sürmüştür. Kind ve diğ. [53], düz çatılar üzerindeki rüzgar hızlarının belirlenmesi için bir korelasyon sunmuşlardır. 9x9 m lik test bölgesine sahip rüzgar tüneline 1:10 ölçekli model testlerinden elde ettikleri deneysel verileri esas alarak belirledikleri korelasyonda, bina şekli, korkuluk yüksekliğı gibi etkileri de dikkate almışlardır. Kind [54], rüzgar tüneline gerçekleştirdiğı bir çalışmada, en kritik emme değerlerinin alçak, orta ve yüksek bina durumları için çoğunlukla aynı olduğunu ve çatı kenarlarına çok yakın küçük bölgeler üzerinde oluştuğunu belirlemiştir.

Cheung ve Melbourne [55], gözenekli yüzeylerin, iç hacme geçen hava basıncını dengeleme eğiliminde olmaları nedeniyle, gözenekli bir çatı üzerindeki rüzgar yüklerinin normal çatı üzerindeki yüklerden daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Zirai binalar etrafındaki akış alanı ile ilgili rüzgar tüneli deneylerinden elde edilen iç ve dış basınç dağılım verilerinin, Silsoe Structure Building (SSB) üzerinde ölçülmüş gerçek yapı sonuçlarıyla karşılaştırılması, Savory ve diğ. [56] tarafından yapılmıştır. Cermak [57], alçak binalar üzerindeki iç ve dış rüzgar basıncı ilişkisini incelemiş ve iç ve dış basınç çalkantılarının birleşik etkisinin binalar üzerinde önemli kritik yükler oluşturduğunu bulmuştur.

### 1.4.3.3. Pik Basınçlar

Saathoff ve Melbourne [58], çatılar üzerindeki pik basınç mekanizmasını inceleyerek, akışın türbülans derecesindeki artışın pik değerleri arttırdığını bulmuşlar ve rüzgar

türbülansındaki farklılıkların, çatı üzerindeki basınç katsayılarında değişiklik meydana getirdiğini belirlemişlerdir. Beste ve Cermak [59], Uematsu ve diğ. [60], çatı üzerindeki rüzgar yüklerinin dinamik etkilerini iki farklı sınır tabaka için çeşitli rüzgar açılarında ölçmüşlerdir. Türbülans şiddeti, rüzgar yönü ve bina geometrisi gibi parametrelerin etkisini de inceledikleri çalışmada, pik yük faktörü (gust loading factor) için bir ampirik bağıntı sunmuşlardır. Ginger ve diğ. [61], tipik bir alçak bina çatısı üzerindeki ortalama ve pik basınç dağılımlarını, 1:50 ölçekli rüzgar tüneli model çalışması ile belirlemişlerdir. En kritik rüzgar yüklerinin rüzgar tarafındaki çatı kenarına yakın bölgede oluştuğunu bulmuşlardır.

#### 1.4.3.4. Rüzgar Açıları

Bienkiewicz ve Sun [62], sınır tabaka rüzgar tüneline TTU test binasının 1:25 geometrik ölçekli modeli üzerindeki rüzgar yüklerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirdikleri çalışmada, rüzgar tarafındaki çatı köşe bölgelerindeki basınç dağılımı üzerine odaklanmışlardır. Rüzgar açısını ve çatı korkuluk yüksekliğini belli bir aralık için dikkate aldıkları çalışmada, yüzey akış şekillerini görüntüleyerek basınç değerleriyle karşılaştırmışlardır. En kritik negatif ortalama ve minimum basınç katsayılarını köşe bölgelerde 235° lik rüzgar açısı için bulmuşlardır. Kanda ve Maruta [63], beşik çatıya sahip uzun alçak binalar üzerindeki ortalama ve pik rüzgar basınç karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bina tasarım değerlerine karar vermek için, 0° lik rüzgar açısının geçerli olmadığını, ortalama ve pik basınçların kritik negatif değerlerinin 45° lik rüzgar açısında çatı arka yüzeyinde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Kawai ve Nishimura [64], üniform ve türbülanslı akış şartlarında düz bir çatı modeli üzerindeki rüzgar tüneli çalışmalarında, en büyük emme çalkantılarının açılı rüzgar doğrultularında rüzgar tarafındaki çatı köşesi yakınında konik girdaplar nedeniyle oluştuğunu belirlemişlerdir. Case ve Isyumov [65], eşit yükseklik ve genişliğe sahip farklı uzunluktaki beşik çatılı üç alçak bina modelini, 1:100 ölçekli olarak sınır tabaka rüzgar tüneline test etmişlerdir. Farklı rüzgar açıları ve farklı arazi şartları için anlık yüzey basınçlarını ölçerek, kentsel arazi koşullarında rüzgar yüklerinin açık kırsal arazi koşullarına göre daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ham ve Bienkiewicz [66], sınır tabaka rüzgar tüneline TTU test binasının 1:50 geometrik ölçekli modeli üzerindeki rüzgar basınçlarını değişik rüzgar açıları için belirlemişlerdir. Düşük türbülanslı akış şartlarında, akış parametrelerini

belirleyerek, model ve gerçek yapı üzerindeki yerel basınç katsayıları arasında kritik köşe bölgeleri de dahil olmak üzere iyi bir uyum bulmuşlardır.

#### 1.4.3.5. Korkuluklar

Blessmann [67], türbülanslı kayma akışında ve üniform akışta, çatı modelleri üzerindeki rüzgar türbülansı ve korkuluk yüksekliği etkisini incelemek için basınç ölçümleri gerçekleştirmiştir. Rüzgar geliş açısını  $15^\circ$  lik artımlarla değiştirerek modeller üzerindeki basınç katsayılarını hesaplamış ve giriş türbülans karakteristiklerinin sonuçları büyük oranda etkilediğini belirlemiştir. Korkuluklu ve korkuluksuz alçak bina çatıları üzerindeki rüzgar yüklerine yönelik deneysel bir çalışma, Stathopoulos [68] tarafından yapılmıştır. Korkuluk ilavesinin, emme etkisinin pik değerlerini arttırdığını göstermiştir. Holmes [69], akış ayrılması olayını inceleyerek türbülans karakteristiklerinin çatı rüzgar yükleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir. Bachlin ve diğ. [70], düz çatılar üzerindeki maksimum basıncın sadece bina şekline ve gelen akışın tipine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Kramer ve Gerhart [71], rüzgar tüneline gerçekleştirdikleri çalışmada, çatı köşelerindeki yerel emme basınçlarının diğer çatı bölgelerindekinden daha küçük olduğunu ve düz çatılardaki emme basınçlarının da beşik çatılardakinden daha küçük olduğunu belirlemişlerdir. Düz çatılar üzerindeki rüzgar yüklerinin belirlenmesi ve korkuluk etkilerinin araştırılmasına yönelik kapsamlı bir model çalışması Lythe ve Surry [72] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çatı üzerindeki yük dağılımının çatı kenarı ve köşelerinde, çatı iç bölgelerine göre daha kritik olduğunu bulmuşlardır. Stathopoulos ve Baskaran [73, 74], açık kırsal arazi ve kentsel arazi şartlarında korkuluklu ve korkuluksuz düz çatılar üzerindeki rüzgar etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Geometrik parametre olarak bina yüksekliğini ve korkuluk yüksekliğini dikkate alarak çeşitli rüzgar açıları için yerel ve alan ortalamalı basınçları ölçmüşlerdir. Korkulukların genellikle çatı kenarlarındaki kritik emme etkisini azalttığını, çatı iç bölgelerindeki emme etkisini ise arttırdığını ortaya koymuşlardır. Baskaran ve Stathopoulos [75], düz çatılar üzerindeki korkuluk konfigürasyonlarının rüzgar kaynaklı emmeler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ticari binalarda rastlanan bilbord gibi korkulukların, çatı kenar ve köşelerinde daha kritik ortalama ve minimum emmeler oluşturduğunu göstermişlerdir. Kare ve Lu [76], kare kesitli bir bina çatısı üzerindeki ortalama ve çalkantı basınç dağılımlarını belirlemişlerdir. Açık kırsal arazi ve kentsel arazi şartlarında, iki farklı

yükseklikte korkuluk duvarı kullanarak yaptıkları ölçümlerde, korkulukların ortalama, rms ve pik basınç dağılımlarını etkilediğini belirlemişlerdir.

#### **1.4.3.6. Saçaklar**

Stathopoulos ve Luchian [77], 18.5° ve 45° çatı eğimlerine sahip beşik çatılı bina saçakları üzerindeki rüzgar etkisini deneysel olarak inceledikleri çalışmada, 18.5° çatı eğiminde daha kritik emme değerlerinin oluştuğunu belirlemişlerdir. Robertson [78], endüstriyel bir binada rüzgar basınçları açısından saçak etkisini incelediği çalışmasında, geleneksel keskin hatlara sahip saçaklarla modern eğrisel saçakları, rüzgar yükü etkileri açısından karşılaştırmıştır. Modern eğrisel saçakların, rüzgar tarafındaki saçak kısmında olumlu, çatı sırtında ise olumsuz etkiler gösterdiğini belirlemiştir. Yaptığı akış gözleme çalışmaları ve türbülans şiddeti ölçümleriyle, iki farklı saçak düzenlemesiyle oluşan akış alanları arasında farklar olduğunu göstermiştir. Savory ve diğ. [79], SSB üzerindeki rüzgar yüklerini belirledikleri çalışmalarında, saçak geometrisini, model ölçeğini ve giriş akış şartlarını değiştirerek bu parametrelerin rüzgar yükü üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Stathopoulos ve Luchian [77], yüksek çatı eğimine sahip beşik çatılı bina saçakları üzerindeki rüzgar etkisini deneysel olarak inceledikleri çalışmada, saçak yüzey bölgelerinin daha kritik emmelere maruz kaldığını belirlemişlerdir. Saçak ve duvar yüzeylerinde ölçtükleri basınçları karşılaştırmışlar ve saçak altındaki bazı pozitif pik bölgeler hariç, iyi bir uyum bulmuşlardır. Eğrisel saçakların çatı üzerindeki yük dağılımını değiştirdiğini belirten, gerçek-yapı ve rüzgar tüneli ölçümlerine dayanan bir çalışma, Richardson ve diğ. [80] tarafından yapılmıştır. Hoxey ve diğ. [81], eğrisel saçakların geleneksel keskin saçaklara göre akışın çatı üzerinde tutunmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

#### **1.4.3.7. Bitişik Binalar**

Davenport ve diğ. [82], binalar üzerindeki rüzgar yükleri ile ilgili çatı geometrisi, arazi tipi ve bina düzenlerinin etkisini belirlemek amacıyla, ortalama ve çalkantı basınçlarını ölçmüşlerdir. Bitişik düzendeki yapılarda, çatı üzerindeki negatif pik basınçların daha kritik olduğunu belirlemişlerdir. Surry ve Lin [83], girdap kaynaklı kritik çatı emmelerinin

alçak binaların çatı köşeleri yakınında oluştuğunu bulmuşlardır. Kritik emmelerin çatı köşe geometrilerindeki küçük değişikliklere ve çevre binaların varlığına duyarlılığını da araştırdıkları çalışmalarında, çevre binaların varlığının genellikle çatı üzerindeki emme etkilerini azalttığını belirlemişlerdir.

#### **1.4.3.8. Kıрма ve Beşik Çatılar**

Meecham ve diğ. [84], kırsal ve kentsel arazi şartlarında, kıрма ve beşik çatılar üzerindeki rüzgar basınç dağılımlarını belirlemek üzere rüzgar tüneli deneyleri yapmışlardır. Ortalama ve çalkantı basıncı ölçümlerinden, yerel negatif basınçlar açısından aynı geometri ve aynı rüzgar hızında kıрма çatıların beşik çatılardan %50 daha avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Xu ve Reardon [85], 15°, 20°, ve 30° çatı eğimlerindeki üç kıрма çatılı bina modeli üzerindeki basınç dağılımlarını ölçerek, beşik çatı sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Ortalama ve pik basınç ölçümlerinden, çatı eğiminin basınç dağılımını etkilediğini bulmuşlardır.

#### **1.4.3.9. Standartlar ve Karşılaştırma**

Stathopoulos ve Luchian [86], farklı yüksekliklere sahip düz bina çatıları üzerindeki basınç ölçümlerini rüzgar standartları ve pratik kodlarla karşılaştırarak, standartların bazı düzeltmelere ihtiyacı olduğu sonucuna varmışlardır. Barnard ve Driviere [87], Aylesbury test binasının modeli üzerindeki hız alanlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, hız değişiminin basınç değişiminden daha küçük olduğunu, hız ve basınç arasında tutarlı bir korelasyon olmadığını belirlemişlerdir. Ölçüm sonuçlarının, British Standard Code ile hesaplanan değerlerden daha küçük olduğunu bulmuşlardır.

#### **1.4.3.10. Sayısal Çalışmalar**

Yapılar etrafındaki akışlarla ilgili sayısal çalışmalar, rüzgar mühendisliğinde önemli yer tutmaktadır. Gerçek yapı ve laboratuvar ölçümlerinin zahmetli olması ve karmaşık geometrilerin getirdiği zorluklar, sayısal çalışmaları yaygınlaştırmaktadır. Türbülanslı akışlarla ilgili olarak farklı hesaplama yöntemleri ve türbülans modelleri geliştirilmiştir.

Değişik geometrili binalar etrafındaki akış alanlarının hesaplanmasında, k-ε, Large Eddy Simulation (LES) ve Direct Numerical Simulation (DNS) gibi değişik türbülans modelleri kullanılmaktadır. Standart k-ε türbülans modeli, bilinen bazı eksikliklerine rağmen atmosferik akışların ve hava kirliliğinin modellenmesinde genellikle tercih edilmektedir. Daha ileri yöntemler olan Large Eddy Simulation (LES) ve Direct Numerical Simulation (DNS) modelleri, uzun hesaplama zamanı gerektirdiklerinden, rüzgar mühendisliği problemlerine uygulamaları az sayıdadır. Son zamanlarda, standart k-ε türbülans modelindeki eksikliklerin üstesinden gelmek için farklı yaklaşımlar içeren iki denklemlilikli türbülans modelleri önerilmiştir. Ancak, bu yaklaşımlardan hiç biri, akış alanının tüm bölgeleri için doğru sonuçlar vermemektedir.

Bu konudaki araştırmaların çoğu, farklı türbülans modellerinin performanslarının denenmesine yöneliktir. Stathopoulos ve Zhou [88], k-ε türbülans modelini kullanarak, düz çatılı alçak ve yüksek iki bina modeli üzerinde kenar ve köşe bölgelerdeki basınç katsayılarını farklı rüzgar açılarındaki hesaplamışlar ve sayısal sonuçların rüzgar tüneli verileriyle uyumlu olduğunu bulmuşlardır. Binalar içerisindeki rüzgar hareketlerinin değişik çatı tipleri için nümerik incelemesi Kindangen ve diğ. [89] tarafından yapılmıştır. Çatı tipinin, akış şeklini ve özellikle hız büyüklüklerini doğrudan etkilediğini görmüşlerdir. Kawamoto [90], binalar üzerindeki rüzgar yüklerinin tahmininde, daha etkin türbülans modellerinin geliştirilmesini amaçlamıştır. k-ε-Φ şeklinde iki farklı türbülans modelini kullandığı çalışmada, standart k-ε model sonuçlarına göre basınç katsayıları açısından önemli bir iyileşme bulmuştur. Lakehal [91], Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) denklemlerini kullanarak bina modelleri üzerindeki akış alanını sayısal olarak incelemiştir. Modeller üzerinde hesapladığı basınç dağılımlarını rüzgar tüneli sonuçlarıyla karşılaştırarak, basınç dağılımlarının türbülans şiddetinden ve yüzey pürüzlülüğünden etkilendiğini belirlemiştir. Flowe ve Kumar [92], k-ε türbülans modeli ile çeşitli bina şekilleri etrafındaki akış alanlarını FLUENT paket programı ile 3 boyutlu olarak çözmüşlerdir. Bina genişlik-yükseklik oranını değiştirerek, akış alanındaki ters akış bölgesi uzunluğunun bina boyutlarının bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir. Ehrhard ve Moussiopoulos [93], farklı akış alanları için, lineer olmayan yeni bir türbülans modelini kullandıkları çalışmalarında, girdap viskozitesi yaklaşımını esas alan mevcut modellere göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Oliveira ve Younis [94], saçaklı ticari bir bina üzerindeki rüzgar etkilerini sayısal olarak incelemiştir. İki boyutlu çözümlerden, bina arka duvarında ve çatı üzerindeki



emme basınçlarını gerçek-yapı değerlerinden oldukça farklı bulmuşlardır. Easom [95], binalar etrafındaki türbülanslı akışın nümerik çözümü için denediği farklı türbülans modelleri ile ilgili doğruluk ve kararlılık analizi yapmıştır. Bu alanda kullanılan türbülans modelleri için önerilerde bulunmuş ve iyileştirilmiş türbülans modellerinin küt cisimler etrafındaki akış alanları için daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Tutar ve Oğuz [96], farklı rüzgar açıları için, iki paralel bina modeli etrafındaki türbülanslı akış alanını sonlu hacim yaklaşımıyla, farklı geometrik düzenlemeler için hesaplamışlardır. RNG sub-grid scale modeli kullanarak gerçekleştirdikleri çözümlerde, diğer türbülans modellerinden daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Lien ve diğ. [97], türbülanslı sınır tabaka içerisinde bulunan iki boyutlu bir dizi dikdörtgen model etrafındaki akış alanını sayısal olarak hesaplamışlardır. Akış yönündeki ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profillerini rüzgar tüneli deneyleriyle karşılaştırarak, kullandıkları dört farklı türbülans modeli arasında en iyi performansı doğrusal olmayan (non-linear)  $k-\epsilon$  modelinin gösterdiğini bulmuşlardır. Gao ve Chew [98], bir küp etrafındaki akış alanının sayısal olarak hesaplanmasında standart  $k-\epsilon$  türbülans modelini kullanarak, ters akış bölgeleri ile türbülans kinetik enerji arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır.

### 1.5. Rüzgar ve Türbülans

Güneş, rüzgar olarak adlandırılan hava hareketinde etkili olan birincil enerji kaynağıdır. Güneş ışınlarının yer yüzeyinin değişik bölgelerine farklı açılarda gelmesi nedeniyle atmosferdeki ısınma da farklı olmaktadır. Bu durum bazı bölgelerde yüksek, bazı bölgelerde alçak basınç sistemlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Bu iki merkez arasındaki basınç farkı rüzgarı meydana getirmektedir. Rüzgar hızının, yönü ve şiddeti sürekli olarak değişmektedir. Genel anlamda rastgele olan bu değişimlerin periyotları ve genlikleri salınımlar şeklindedir. Rüzgar hızının doğrultu, yön ve şiddetindeki kısa süreli değişimler türbülans durumunu göstermektedir. Arazi yapısındaki doğal ve yapay engebeler, rüzgarın türbülans derecesini artırıcı yönde etki yapmaktadırlar.

Denizlerde rüzgar kuvvetini ölçme ve sınıflandırmaya yönelik ilk ölçek 1806 yılında Sir Francis Beaufort tarafından tasarlanmıştır. Beaufort ölçeği, esas olarak deniz durumu veya dalga şartlarına bağlı olarak rüzgarın şiddeti için bir ampirik ölçüdür. Tam olarak Beaufort rüzgar kuvvet ölçeği olarak adlandırılır. 0-12 aralığını kapsayan bu ölçekteki sayılara karşılık gelen rüzgar hızları, 1923 yılında G.C. Simpson tarafından belirlenmiştir.

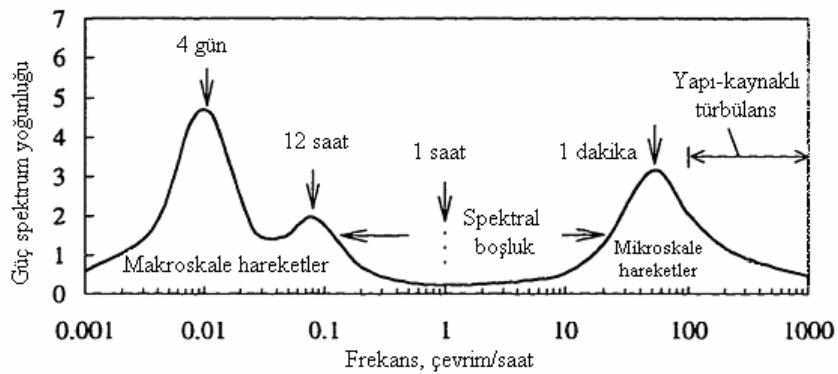
B, Beaufort kuvvet sayısını göstermek üzere, Tablo 1.1’de verilen Beaufort ölçeğindeki rüzgar hızları,

$$U = 0.837 \cdot B^{3/2} \quad [m/s] \quad (1.1)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır [99,100].

Meteorolojistler, atmosferik hareketi büyük, orta ve küçük ölçekli olarak üç gruba ayırmışlardır. Büyük ölçekli (macroscale) hareketler, hava durumu haritalarında da gösterildiği gibi, oldukça geniş bölgelerde etkili olurlar. Orta ölçekli (mesoscale) hareketler, vadi rüzgarları ve bora tipi rüzgarları kapsayan 10-500 km arasındaki yatay mesafelerde oluşmaktadır. Küçük ölçekli (microscale) hareketler ise bölgesel olup, rüzgar akışının türbülansı ile ilgilidir. Küçük ölçekli hareketlerde hızın üç bileşeni de aynı büyüklük mertebesindedir. Daha büyük ölçekli hareketlerde ise, hızın düşey bileşenleri, yatay bileşenlerinden çok daha küçüktür [101].

Issac Van der Hoven [102], tarafından oluşturulan ve geniş ölçüde benimsenen rüzgar-hız spektrumu, basitleştirilmiş bir durumda Şekil 1.1’de görülmektedir. Spektrumla ilgili grafik, frekans aralığındaki değişimin, eğrinin altındaki alana eşit olduğunu gösterecek şekilde oluşturulmuştur. Spektrumda biri 4 günlük, diğeri 1 dakikalık periyotlarda meydana gelen iki baskın pik görülmektedir. İlk pik (synoptik pik), hava haritalarında da gösterildiği gibi, ilerlemekte olan basınç sistemlerinin neden olduğu hız çalkantılarından kaynaklanırken; türbülans piki olarak da adlandırılan sonraki pik türbülans ve taşınım kaynaklı küçük ölçekli hareketlerle ilgilidir.



Şekil 1.1. Rüzgar – hız spektrumu [101]

Tablo 1.1. Beaufort ölçeğindeki rüzgar hızları [99]

Beaufort sayısı (kuvvet)	Rüzgar hızı		Rüzgar adı	Dalga yüksekliği [m]	Karasal etkiler	
	[km/h]	[m/s]				
0	0	0-0.2	Sakin	0	Hava sakin. Duman düşey olarak yükselir.	
1	1-6	0.3-1.5	Esinti	0.1	Dumanda rüzgarın hareketi görülür.	
2	7-11	1.6-3.3	Hafif meltem	0.2	Rüzgar yüzde hissedilir. Yapraklar hışıldar.	
3	12-19	3.4-5.4	Tatlı meltem	0.6	Bayraklar dalgalanır. Dal ve yapraklar sabit hızla hareket eder.	
4	20-29	5.5-7.9	Orta meltem	1	Toz, yaprak ve kağıtlar havalanır. Ağaçların küçük dalları sallanır.	
5	30-39	8.0-10.7	Serin meltem	2	Rüzgarın gücü yüzde ve vücutta hissedilir. Küçük ağaçlar sallanır.	
6	40-50	10.8-13.8	Kuvvetli meltem	3	Rüzgar uğultusu duyulur. Yürümek ve şemsiye kullanmak zorlaşır.	
7	51-62	13.9-17.1	Fırtınamsı rüzgar	4	Ağaçlar sallanır. Yürürken denge bozulur.	
8	63-75	17.2-20.7	Fırtına	5.5	Ağaçların dalları kırılır. Arabalar savrulur.	
9	76-87	20.8-24.4	Kuvvetli fırtına	7	Yapılarda hafif hasarlar görülebilir.	
10	88-102	24.5-28.4	Tam fırtına	9	Ağaçlar kökünden sökülür. Yapılarda önemli hasarlar oluşur.	
11	103-117	28.5-32.6	Çok şiddetli fırtına	11.5	Yapılarda büyük hasarlar meydana gelir.	
12	>117	>32.7	Kasırğa	14+	Yapılarda ağır ve yaygın hasarlar meydana gelir.	

Synoptik pik, 1000 km'lik yatay mesafelerde, rüzgar ve sıcaklığın büyük ölçekli yatay değişimleri ile bağlantılı kararsızlıklarla üretilirken; türbülans piki, birkaç 100 metrelik mesafelerde, rüzgar hızının ve sıcaklığının düşey doğrultudaki değişimlerinden doğan kararsızlıklar nedeniyle oluşmaktadır. Spektrumda pikler arasında, saatte 0.1 ile 10 aralığında değişen bir frekansta dikkate değer geniş bir açıklık mevcuttur. Bu spektral boşluk, analizde farklı zaman ve mekan ölçeklerindeki atmosferik hareketleri ayırmayı mümkün kılmaktadır. Daha büyük ölçekli süreçleri küçük ölçeklilerden ayırmak için, 1 saatlik ortalama alınmasının uygun olacağı önerilmektedir. Mühendislik uygulamaları için daha kısa periyotlar kullanılmaktadır [100]. Rüzgarın hızında ve yönünde meydana gelen küçük ölçekli çalkantılar, bina aerodinamiği açısından önemlidir. 15 dakikalık bir kayıt süresi, küçük ölçekli hareketlerde önemli frekans değerlerini yakalayabilecek şekilde yeterlidir.

## **1.6. Atmosferik Sınır Tabaka**

### **1.6.1. Atmosferik Sınır Tabakanın Özellikleri**

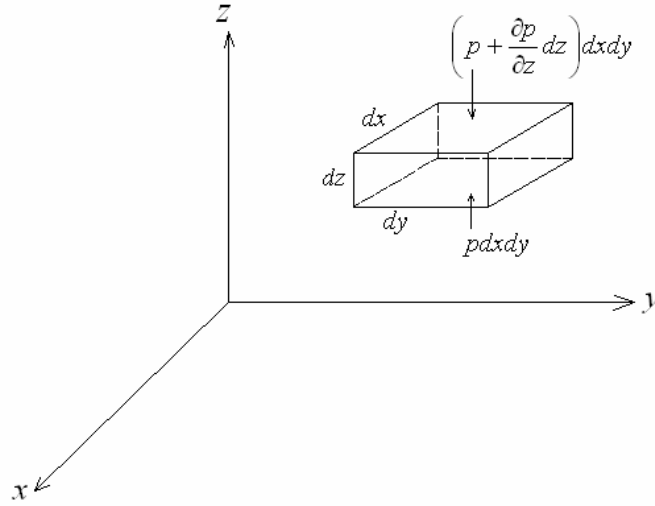
Rüzgar, dünya yüzeyi üzerinde belli bir yükseklikte ısı değişiklikleri sonucu eş yükselti noktaları arasındaki basınç farkları ile oluşan, büyük ölçekli serbest hava hareketleridir. Tropik iklimin hakim olduğu sıcak bölgelerde, belli bir yükseklikte sıcak hava tabakası oluşurken, bir üst katmanda soğuk hava tabakası bulunmaktadır. Soğuk tabakadaki basınç sıcak tabakadaki basınçtan daha düşük olmakta ve hava yüksek basınç bölgesinden düşük basınç bölgesine akarken, atmosferdeki mekanik ve termodinamik olayların oluşmasına neden olmaktadır. Dünya yüzeyi üzerindeki hava hareketi, atmosferik sınır tabaka adı verilen, sürtünme etkilerinin hakim olduğu bir tabakayı oluşturmaktadır. Bu tabakanın kalınlığı, rüzgar yoğunluğuna, arazi pürüzlülüğüne ve enlem açısına bağlı olarak birkaç yüz metreden birkaç kilometreye kadar değişebilmektedir. Sınır tabaka içerisindeki rüzgar hızı yükseklikle artmakta ve sınır tabakanın üst sınırındaki serbest akış hız değerine ulaşmaktadır. Bu kalınlık değişimi öncelikle, düşey doğrultudaki ısı transferi ile meydana gelmektedir. Yukarı yöndeki ısı transferi, sınır tabakadaki türbülansın şiddetine katkıda bulunmakta ve sınır tabaka kalınlığının artmasına yardım etmektedir. Aşağı yöndeki ısı transferi ise, sınır tabakadaki türbülansı azaltma etkisi göstermektedir. Sınır tabakanın üst

kısımında, yüzey etkilerinin ihmal edildiği serbest atmosfer bölgesinde, rüzgar eş basınç alanları boyunca yaklaşık serbest akış hızında esmektedir

Elemanter bir hava kütesinin hareketi;  $m$  kütle,  $a$  ivme ve  $\sum F$  de elemanter hava kütesine etki eden kuvvetlerin toplamı olmak üzere,

$$\sum F = ma \quad (1.2)$$

şeklindeki, Newton'un ikinci kanunu ile belirlenmektedir. Bu kuvvetleri ve hava hareketi üzerindeki etkilerini göstermek için, Şekil 1.2'deki gibi  $dx, dy, dz$  boyutlarında sonsuz küçük bir eleman göz önüne alınabilir. Alt ve üst yüzeylere etki eden ortalama basınçlar, sırasıyla  $p$  ve  $p + (\partial p / \partial z) dz$  dir. Sadece basınç kuvvetleri dikkate alındığında,  $dx dy dz$  hacmi üzerinde etkili düşey doğrultudaki net kuvvet,  $-(\partial p / \partial z) dx dy dz$  olacaktır. Bu şekilde,  $x$  ve  $y$  doğrultularında, birim hacme etkiyen net kuvvetler sırasıyla,  $-\partial p / \partial x$  ve  $-\partial p / \partial y$  olmaktadır.

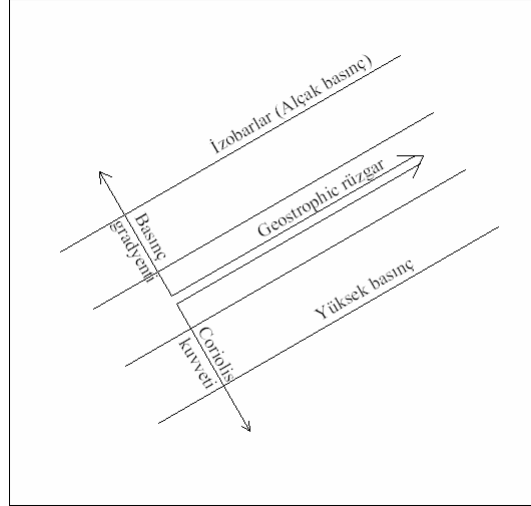


Şekil 1.2. Elemanter bir hava kütesine etkiyen düşey doğrultudaki basınç kuvvetleri

Bu kuvvetlerin bileşkesi yatay basınç gradyanı olarak adlandırılmakta ve  $-\partial p / \partial n$  ile gösterilmektedir. Burada  $n$ , sabit basıncın etkili olduğu yatay düzlem normalini göstermektedir. Yatay basınç gradyanı, havanın yatay hareketini başlatan kuvvet olmaktadır. Yatay doğrultudaki basınç gradyanı tarafından birim kütleye etkiyen net

kuvvet,  $(1/\rho)\partial p/\partial n$  olmakta ve basınç gradyan kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Basınç gradyan kuvvetine maruz kalan hava, yüksek basınçlı bölgelerden düşük basınçlı bölgelere hareket etmektedir [103].

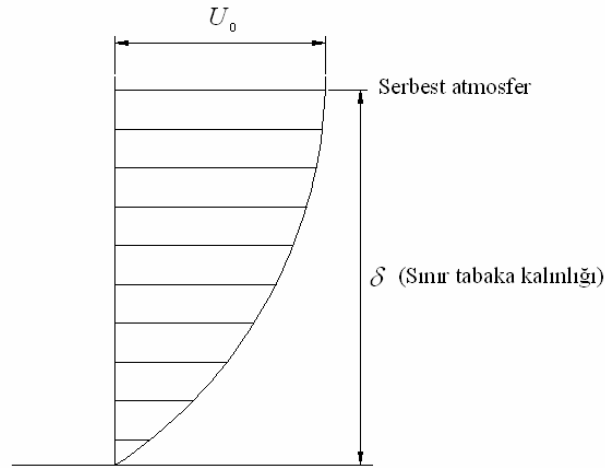
Basınç gradyan kuvvetinin dışında, dünyanın dönme hareketinden ileri gelen, Coriolis kuvveti olarak adlandırılan bir saptırma kuvveti de atmosferik sınır tabaka içinde etkili olmaktadır. Dünyanın açısal hızı ile orantılı olan bu kuvvet, hava parçacıklarını, kuzey yarımkürede hareket doğrultusunun sağına, güney yarımkürede ise hareket doğrultusunun soluna taşımaktadır. Hava hareketi, kararlı duruma ulaştığı zaman, Coriolis kuvveti, basınç gradyent kuvveti ile dengelenmekte ve Şekil 1.3'de görüldüğü gibi, hareket, eş basınç çizgileri boyunca Geostrophic rüzgar halini almaktadır [104].



Şekil 1.3. Geostrophic denge (Kuzey yarımküre) [104]

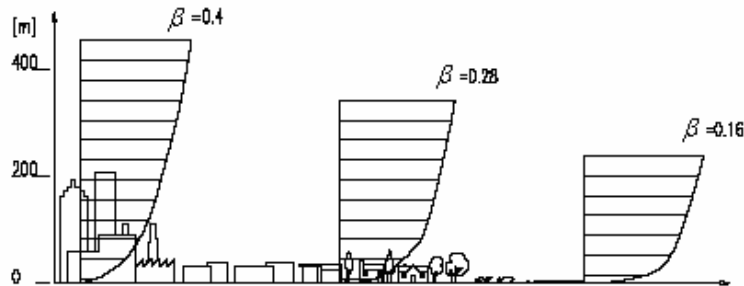
Dünya yüzeyi tarafından, hareket halindeki hava üzerine, akışı engelleyici yatay bir direnç kuvveti etki etmektedir. Bu kuvvetin akış üzerindeki etkisi, yükseklikle birlikte azalmaktadır. Sürtünme kuvvetlerinin etkisinin ihmal edilebildiği, atmosferik sınır tabaka üst kısmına da serbest atmosfer adı verilmektedir (Şekil 1.4). Atmosferik sınır tabakanın milimetreler seviyesindeki kısmında moleküler özellikler, sıcaklık ve diğer ölçütlerin (skalaların) yapısına önemli ölçüde etki etmektedirler. Aerodinamik olarak pürüzsüz yüzeyler, yalnızca hafif rüzgarlı su yüzeyleri olarak göz önüne alınmaktadır. Moleküler sınır tabakanın üzerinde yüzey tabakası yer almaktadır. Gerilme ve diğer akışların düşey doğrultudaki değişimlerinin ihmal edilebildiği ve rüzgar yönünün sabit olduğu bu bölge, yaklaşık 30 m yüksekliğindedir. Bu tabakada dünyanın dönme etkisi yerine, ısı

tabakalaşma önem taşımaktadır. Yüzey tabakasının üzerinde, ısı tabakalaşma ile birlikte dünyanın dönme hareketinin etkili olduğu ve çoğunlukla “Ekman tabakası” olarak adlandırılan bölge yer almaktadır. Bu tabakanın 150 m lik kısmında, rüzgarın yükseklikle yön değiştirme etkisi genellikle ihmal edilmektedir [5].



Şekil 1.4. Atmosferik sınır tabaka

Atmosferik sınır tabaka içinde, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık ve diğer özelliklerin etkileri doğrudan türbülanslı karışım mekanizmasını etkilemektedir. Atmosferdeki ısı şartları ve topolojinin oluşturduğu karmaşık etkiler nedeniyle tam olarak tanımlanamayan sınır tabaka, karmaşık etkiler basitleştirilerek nötral atmosfer şartlarında incelenmektedir. Atmosferik sınır tabakanın kararlı yüksekliği 100 m civarındadır. Ancak, bazen 10 m ile 500 m hatta daha fazla bir yüksekliğe kadar değişim göstermektedir. Bu değişim üzerinde güneş ışınımı şartları, rüzgar yoğunluğu ve zemin özellikleri etkili olmaktadır. Sınır tabaka karakteristiklerini etkileyen önemli faktörlerden biri yüzey pürüzlülüğüdür. Şekil 1.5'te, farklı yüzey pürüzlülüklerinin sınır tabaka kalınlığı üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 1.5. Farklı yüzey pürüzlülükleri için sınır tabaka kalınlıkları [105].

Atmosferik sınır tabaka akışında, ortalama hız dağılımı

$$\frac{u}{U_0} = \left( \frac{y}{\delta} \right)^\beta \quad (1.3)$$

şeklindeki üs kanunu ile ifade edilmektedir.  $u$ , yerden  $y$  yüksekliğindeki ortalama hız;  $U_0$ , sınır tabaka kalınlığı dışındaki serbest akış hızı;  $\delta$ , sınır tabaka kalınlığıdır. Tablo 1.2’de görüldüğü gibi,  $\beta$  üssü arazinin pürüzlülük yapısına bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 1.2. Arazi tipi ile ilgili değerler [1]

Arazi tipi	$\beta$	Pürüzlülük uzunluğu $z_0$ (m)	Sınır tabaka kalınlığı $\delta$ (m)
açık deniz, buz, tundra	0.11	0.001	250
küçük ve seyrek ağaçlı bölgeler	0.15	0.03	300
küçük kasabalar, bol ağaçlı bölgeler	0.25	0.03	400
yüksek binalar, kent ve sanayi bölgeleri	0.36	3	500

Ortalama hız profili için kullanılan diğer bir ifade,

$$\frac{u}{U^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{z_0} \quad (1.4)$$

şeklindeki logaritmik hız kanunudur. Bu bağıntıda;  $u$ , yerden  $y$  yüksekliğindeki ortalama hız;  $U^*$ , duvar kayma gerilmesinden hesaplanan sürtünme hızı;  $z_0$ , ortalama pürüzlülük yüksekliğini gösteren pürüzlülük uzunluğu ve  $\kappa = 0.4$ , von Karman sabitidir [103].

### 1.6.2. Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesi

Atmosferik sınır tabaka akışı, düzlem levha üzerinde türbülanslı sınır tabakadaki akışa benzemektedir. Aerodinamik pürüzlülük, atmosferik sınır tabakanın laboratuarda



modellenmesinde önemli parametrelerden birisi olmaktadır. Tam aerodinamik pürüzlülüğün söz konusu olduğu akışlarda, yüzeye yakın bölgelerde moleküler viskozitenin etkileri ihmal edilebilmektedir. Yüzey üzerindeki pürüzlülük elemanlarının yükseklikleri laminar alt tabakanın yüksekliğinden daha büyük ise, tam aerodinamik pürüzlü akışlar meydana gelmektedir. Pratik açıdan dünyanın yüzeyi, aerodinamik pürüzlülük göstermektedir. Aerodinamik olarak pürüzlü bir yüzey üzerinde türbülanslı bir sınır tabakadaki akış, tamamen yüzeydeki engellerin geometrisine bağlı olmaktadır. Tekil bir engele bağlı olmayan bölgeler için akış, istatistiksel olarak pürüzlülük yüksekliğinin dağılımına göre değerlendirilmektedir.

Atmosferik sınır tabaka akışı ile düzlem levha üzerindeki türbülanslı sınır tabaka akışı, iki açıdan farklılık göstermektedir. Birincisi, doğal rüzgarda ortalama akışın yönü genellikle yükseklikle değişirken, düz levha üzerindeki sınır tabakada böyle değişimler olmamaktadır. İkinci ana fark, sıcaklık gradyentinin kararlı ve kararsız olma durumuna bağlı olarak, potansiyel sıcaklık gradyentleri sonucu oluşan havanın kaldırma etkilerinin, türbülans şiddetinde değişiklikler meydana getirebilmesidir. Doğal sınır tabakalarda türbülans üretiminin çoğu, yere yakın bölgelerde meydana gelmektedir. Bunun bir kısmı yutulurken, bir kısmı da difüzyonla üst bölgelere iletilmektedir. Yapay olarak geliştirilen bir sınır tabakada, türbülans enerjisini üst bölgelere transfer edecek bir mekanizma yoksa, enerji transferi işlemi oldukça yavaş bir şekilde gerçekleşeceğinden, sınır tabakanın bu bölgelerinde türbülans şiddeti çok düşük değerler alacaktır. Bu nedenle, enerji transferi işlemini hızlandırmak için, akışa bir karışım etkisinin verilmesi gerekmektedir [9].

Atmosferik sınır tabaka akışının rüzgar tünellerinde modellenmesi çalışmalarında, akışın yükseklikle yön değiştirme etkisi ihmal edilmektedir. Bu duruma nötral atmosfer adı verilmektedir. Atmosferik sınır tabaka akışının simülasyonunda kullanılan rüzgar tünelleri, genellikle üç sınıfta toplanmaktadır:

- a) Çalışma bölgesi uzunluğu 30 m'ye kadar ulaşabilen ve sınır tabakanın düz bir yüzey üzerinde doğal olarak geliştiği uzun rüzgar tünelleri
- b) Çalışma bölgesi başlangıcına yerleştirilen bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanlarından oluşan pasif aygıtlarla, sınır tabakanın yapay olarak geliştirildiği kısa rüzgar tünelleri
- c) Çalışma bölgesi içine yerleştirilen, hüzme ve mekanik araçlardan oluşan, aktif aygıtlarla sınır tabakanın yapay olarak geliştirildiği kısa rüzgar tünelleri

Pratikte sınır tabakanın doğal olarak geliştirildiği yeterince uzun çalışma bölgesi olan rüzgar tünelleri, laboratuvar alanlarının yetersiz ve bunun yanı sıra ticari olmaması nedeniyle pek yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenle, atmosferik sınır tabaka akışı simülasyon çalışmaları genellikle, aktif veya pasif aygıtlarla donatılmış kısa çalışma bölgesi rüzgar tünellerinde yapılmaktadır [106].

Atmosferik sınır tabakanın rüzgar tüneline modellenmesinde;  $U$ , akış hızı,  $L$ , karakteristik uzunluk ve  $\nu$ , kinematik viskozite olmak üzere,

$$Re = \frac{U \times L}{\nu} \quad (1.5)$$

olarak tanımlanan Reynolds sayısının benzeşimi sağlanamamaktadır. Bu durum, gerçek yapıda ve modelde akışkan olarak kullanılan havanın kinematik viskozitesinin aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Atmosferik sınır tabakada etkili olan Coriolis kuvvetleri, modellemede dengelenemeyerek ihmal edildiğinden,  $U(y)$ ,  $y$  yüksekliğindeki hız ve  $f_c$ , Coriolis parametresi olmak üzere,

$$Ro = \frac{U(y)}{y \times f_c} \quad (1.6)$$

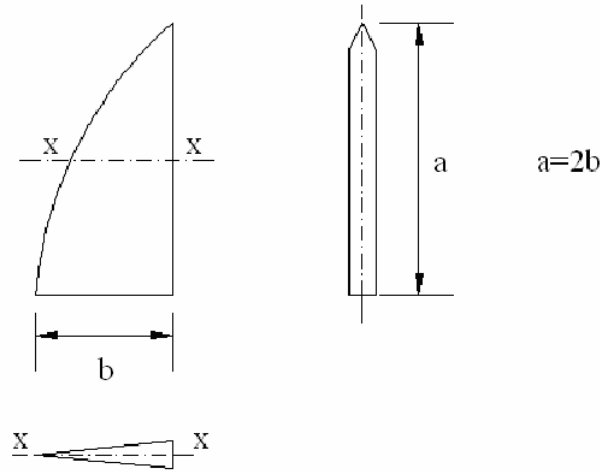
şeklinde tanımlanan Rossby sayısının benzeşimi de sağlanamamaktadır [103].

### 1.6.3. Atmosferik Sınır Tabakanın Modellenmesinde Kullanılan Yöntem

Bu çalışmada bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları kombinasyonundan oluşan pasif aygıtlarla, kısa çalışma bölgesi bir rüzgar tüneli kullanılarak, atmosferik sınır tabaka akışı yapay olarak geliştirilmiştir. Bu modelleme yönteminin Counihan [11] tarafından gerçekleştirilmiş şekli, simülasyon çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Pasif aygıtlı kombinasyonda bariyer, sınır tabakanın alt bölgesi için bir başlangıç hız kaybı oluşturulmasını sağlamaktadır. Bariyer yüksekliğinin artması, akışın türbülans derecesini arttırıcı yönde etki etmektedir. Kullanılan simülasyon yönteminde bariyer

yüksekliği, geliştirilmek istenen sınır tabaka kalınlığının 1/6'sı olacak şekilde önerilmektedir. Doğal olarak gelişmiş türbülanslı bir sınır tabakadaki akışta, sınır tabakanın iç ve dış bölgelerinde büyük ölçekli girdaplar oluşmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ile yer seviyesinde üretilen yüksek şiddetteki türbülansın, sınır tabakanın dış bölgesine doğru yayılması gerekmektedir. Atmosferik sınır tabaka akışının suni olarak geliştirilmesinde kullanılan girdap üreticiler, büyük ölçekli ve zıt yönlü girdapların oluşmasını sağlamakta ve sınır tabakanın üst bölgesi için gerekli olan türbülansı oluşturmaktadır. Bu sayede, yer seviyesinde en büyük değerde olan türbülans, girdap üreticilerin tepesi civarında sifıra doğru yaklaşmaktadır. Şekil 1.6'da görülen eliptik girdap üreticilerin yüksekliği, geliştirilmek istenen sınır tabaka yüksekliğine eşit olarak alınmaktadır.



Şekil 1.6. Eliptik girdap üreticisi

Küçük ahşap bloklar, taş parçacıkları, kum vb. parçacıklardan oluşan pürüzlülük elemanları, yer seviyesindeki türbülans şiddetinin artırılmasını sağlamakta ve simüle edilecek arazi yapısını karakterize etmektedir [106].

### 1.7. Yapılar Üzerinde Rüzgar Etkileri

Yapıların tasarımında rüzgarın statik ve dinamik etkilerinin göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir. Önceleri, yapılar üzerinde rüzgarın sadece statik etkilerinin olduğu düşünülmekteydi. 1950'li yıllardan itibaren araştırmalar rüzgarın

dinamik etkilerine doğru yoğunlaştırıldı. Yapılan kapsamlı rüzgar tüneli çalışmaları sonrasında bir yapı üzerinde rüzgarın dinamik etkilerinin de olduğu ve rüzgar kaynaklı olumsuzlukların esasen dinamik etkiler nedeniyle oluştuğu anlaşılmıştır. Büyük fırtınalarda çatıların uçması önceleri rüzgarın bası etkisine bağlanıyordu. Ancak, gerçek sebebin rüzgarın çatılar üzerinde meydana getirdiği emme etkisi olduğu fark edilmiştir.

Statik etkiler, rüzgar tarafından yapının dış yüzeyinde oluşturulan basınç (basma ve çekme etkisinde), sürüklenme ve kaldırma kuvveti ile momentlerdir. Bu etkiler rüzgar hızının karesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle yapının bulunduğu bölgedeki rüzgar hızının uzun yıllar boyunca gözlenen en büyük değerlerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bu veriler ışığında, statik etkilerden doğabilecek zararlar küçük boyutta olup, önlenebilmektedirler.

Dinamik etkiler, özellikle yüksek binalar, asma köprüler, enerji nakil hatları, anten direkleri, kuleler ve petrol platformları gibi yapılar için büyük önem taşımaktadır. Rüzgarın doğası olan bu etkiler, rüzgar hızının en büyük değerinden daha çok, hızın şiddet ve yönündeki yerel ve zamana bağlı değişimlerin frekans ve genliğine bağlı olmaktadır. Bunun sonucu, yapılar rüzgar doğrultusunda ve buna dik doğrultuda titreşimlere maruz kalmaktadırlar. Rüzgar doğrultusundaki titreşimler, hızdaki azalma ve artmalarla ilgilidir. Yapının doğal frekansı ile aerodinamik kuvvetlerin frekansının çakışması durumunda, rezonansa giren yapı, titreşimlerin genliğinin büyümesiyle hasar görebilmekte veya yıkıma uğrayabilmektedir. Ancak, yapı elemanlarının bu titreşimleri söndürecek şekilde iç çalışmaları ve kısa periyotlar içinde rüzgar hızındaki değişimlerin az olması, rezonans olayını önleyebilmektedir. Yüksek bir yapı için tehlikeli olan titreşimler, rüzgar doğrultusuna dik olan titreşimlerdir. Bu titreşimler, yapı etrafından geçen rüzgarın yapı arkasında oluşturduğu iz bölgesi ve beraberindeki girdaplardan kaynaklanmaktadır [107].

Rüzgar, yeryüzünde hem ortalama yüklere hem de çalkantı yüklerine sahiptir. Bir yapının yüzeyi üzerindeki aşırı yükler, rüzgarın türbülansı ile ilişki olan basınç çalkantılarından kaynaklanmaktadır. Bina yüzeyleri üzerinde oluşan basınç çalkantıları ile ilgili olarak, genellikle rüzgar tüneli benzeşimi ya da gerçek yapı ölçümleri şeklinde yapılan araştırmalar, basıncın ortalama, çalkantı ve pik değerleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Rüzgar standartları ve pratik bina kodlarının oluşturulmasında ve geliştirilmesinde, çalkantı basınçları ve pik değerleri büyük öneme sahip parametrelerdir. Rüzgar basıncı çalkantı karakteristikleri ortalama rüzgar hızı ve yönü, arazi şartları, çevre ve yapı

geometrisi gibi bir çok özelliğe bağlıdır. Bina modelleri üzerindeki yüzey basınçları, boyutsuz katsayılar şeklinde değerlendirilmektedir.

Boyutsuz ortalama basınç katsayısı,

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{P} - P_s}{\rho U^2 / 2} \quad (1.7)$$

çalkantı basınç katsayısı (rms)

$$\tilde{C}_p = \frac{\tilde{P} - P_s}{\rho U^2 / 2} \quad (1.8)$$

maksimum pik basınç katsayısı,

$$\hat{C}_p = \frac{\hat{P} - P_s}{\rho U^2 / 2} \quad (1.9)$$

ve minimum pik basınç katsayısı,

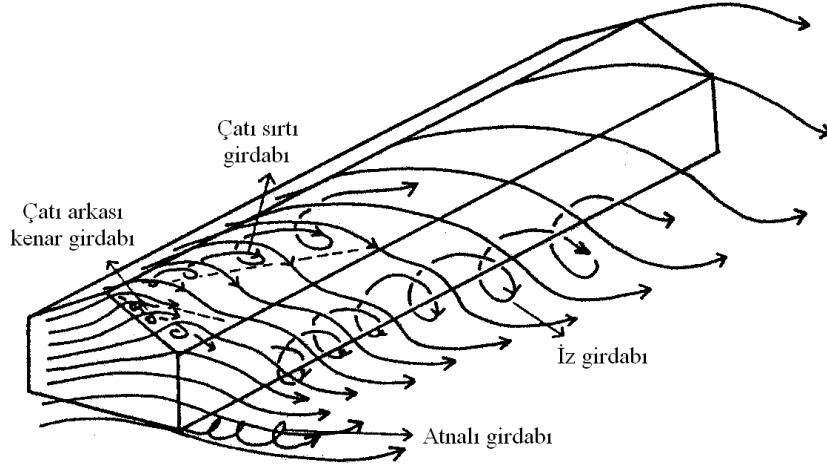
$$\check{C}_p = \frac{\check{P} - P_s}{\rho U^2 / 2} \quad (1.10)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntılarda;  $\bar{P}$  yerel ortalama yüzey basıncını,  $\tilde{P}$  yüzey basıncının çalkantı bileşenini,  $\hat{P}$  maksimum pik basıncı,  $\check{P}$  minimum pik basıncı ve  $P_s$ , atmosferik basıncı ifade etmektedir.

### 1.7.1. Alçak Binalar Üzerinde Rüzgar Etkileri

Bir binaya yaklaşan rüzgar, binanın üzerinden ve etrafından geçmek durumundadır. Bu nedenle rüzgar yönünü değiştirir ve saçaklar, çatı sırtları, duvar köşeleri gibi binanın ön kenarlarından ivmelenirken, bu elemanlar üzerinde çekme kuvveti etkisine neden olacak

akış ayrılması ve girdap oluşumuna ortam sağlar. Şekil 1.7’de görüldüğü gibi, binaların arka taraflarında meydana gelen dört tip girdap vardır. Bunlar, çatı sırtından ayrılmış akışın ürettiği çatı sırtı girdabı, çatı kalkını üzerinden ayrılan akışın ürettiği çatı arkası kenar girdabı, arka yan kenarların oluşturduğu at nalı girdap ve arka duvar boyunca meydana gelen iz bölgesi girdabıdır. Girdaplar, meydana geldikleri bölgede, basıncın negatif değerler almasına ve emme etkisinin oluşmasına neden olurlar.



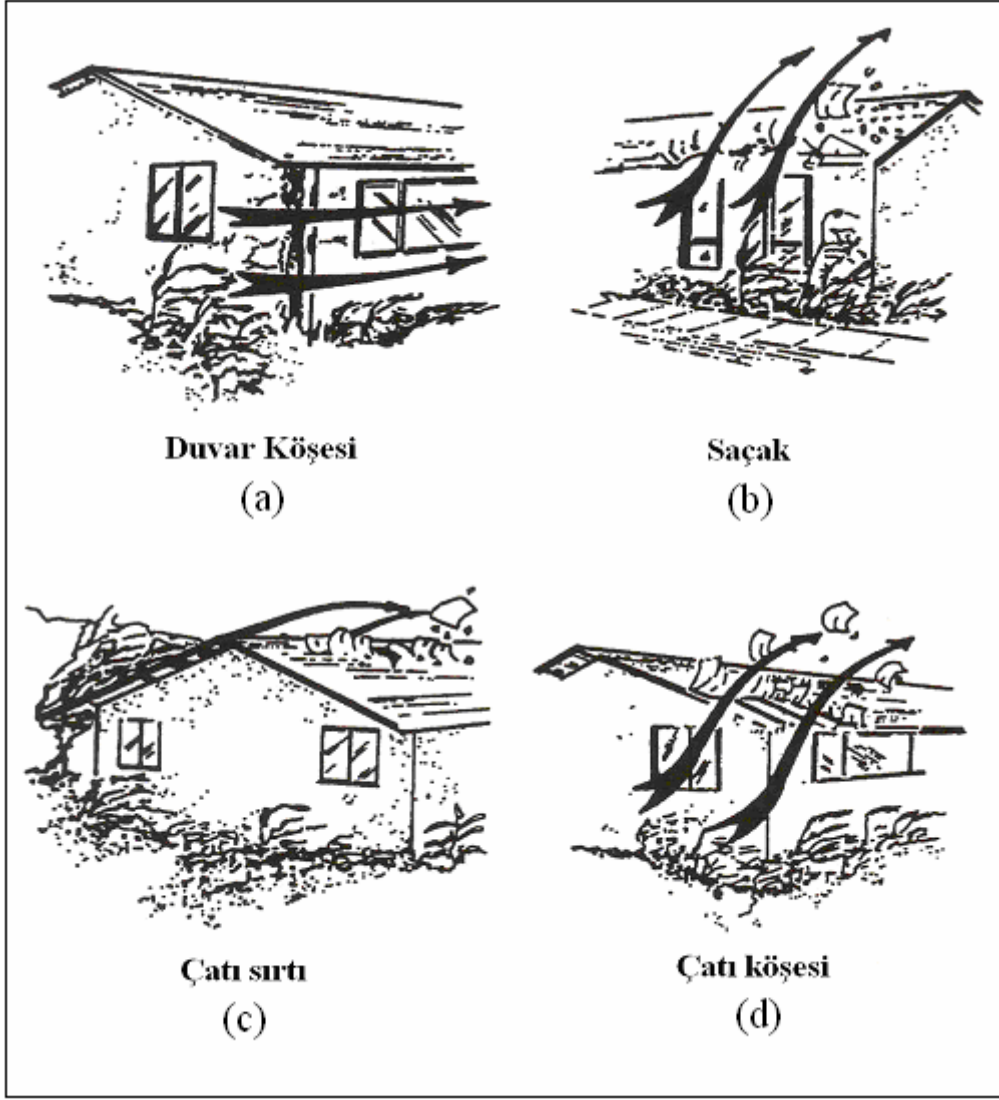
Şekil 1.7. Tipik bir bina etrafında oluşan girdap tipleri [108]

Rüzgar nedeniyle binalar üzerinde oluşan aerodinamik basınçlar etkisinde binalar hasar görebilmektedirler. Binanın rüzgara karşı duvarları pozitif etkili basınçlara maruz kalırken, negatif etki yapan basınçlar binanın duvarları ve çatısı üzerinde çekme etkisi oluştururlar. Hava parçacıkları binanın keskin köşelerinden geçerken, akış ayrılması nedeniyle, duvar kenarları, saçaklar, çatının sırt ve köşelerinde yüksek derecede yerel negatif etkili basınçlar meydana gelmektedir. Bu yerel etkiler, gelen rüzgara göre, binanın yerleşimi ve geometrisi ile çok yakından ilgilidir. Farklı rüzgar açılarında, binanın değişik elemanları kritik yükler altında kalabilmektedir. Rüzgarın bu tip yerel etkileri, Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Bu yerel basınçlar, çatıyı ve kaplama malzemelerini yerinden oynatmaya çalışmakta ve duvar ile çatı arasındaki bağlantıların kopmasına neden olmaktadır. Alçak binalarla ilgili rüzgar hasar raporlarına göre, çatılar üzerinde ciddi hasarlar oluşmaktadır. Çatı üzerindeki basınç alanı, büyük ölçüde çatı eğimine bağlıdır.  $30^\circ$ ’den daha büyük eğimler için çatının rüzgar tarafındaki yüzeyi üzerinde basınçlar genellikle pozitiftir.  $30^\circ$ ’den daha az eğimler için bu yüzey emme etkisine maruz kalmaktadır. Emme etkisi yaklaşık  $10^\circ$  de en büyük değere

erişmektedir. Şiddetli rüzgarlarda, çatının hatta tüm binanın ağırlığını karşılayacak değerlere erişen bu emme etkisi, çatıyı kaldırabilmekte ve binayı devirebilmektedir.

Düz ya da az eğimli çatılarda, çatı sırtına dik doğrultuda gelen rüzgar, önündeki saçaklarda ve çatı sırtında yüksek emme etkileri oluşturmaktadır. Eğik gelen rüzgar genellikle ön çatı köşesinde istenilmeyen kaldırma kuvvetlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Çatı sırtına paralel gelen rüzgar, çatı kenarı ve çatı yan duvarları üzerinde oldukça büyük yükler oluşturabilir. Değişik rüzgar yönlerinin birçoğunda, binanın dört duvar köşesinin ikisi aşırı yüklenme altındadır. Bir binayı çevreleyen duvarların dış yüzeyleri üzerine etkiyen dış basınçların yanı sıra, binanın tasarımı ve yapı bileşenlerinin mevcut hava geçirgenliği nedeniyle, iç basınç da çoğu zaman statik basınçtan farklıdır. İç basınç, binayı çevreleyen duvarlar üzerindeki yüklemeyi olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Rüzgar tarafındaki açık kısımlar genellikle bina içindeki basınçta bir artışa neden olurlar. Bu basınç artışı çatı, arka duvar ve yan duvarlar üzerindeki çekme etkisindeki basınçlara katkı yaparak, bu yapı bileşenleri üzerindeki kuvvetlerin artmasına neden olacaktır.

Bunun aksine, yan veya arka duvarlardaki açıklıklar iç basınçta bir azalmaya neden olmaktadır. Böyle bir basınç düşüşü, rüzgar tarafındaki duvarlar üzerindeki basma etkili basınçların etkisini artıracaktır. Buna karşın, iç basınçtaki bu azalma, çatının dış yüzeyleri üzerine etkiyen çekme kuvvetlerinin etkisini azaltacaktır. Bina bütünlüğünü kaybettiği zaman yerel bir bileşendeki hasar, Şekil 1.9'da resmedildiği gibi, bütün binanın yıkılmasına sebep olabilecektir [110]. Ayrıca, binanın genişliği iç ve dış yüzeyler üzerindeki basınç dağılımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Farklı yükseklikteki bitişik binaların varlığı, yan duvarlar üzerindeki emme etkilerini arttırmakta fakat, rüzgar tarafındaki ön duvar, çatı ve arka duvar üzerindeki basınçlar diğer binaların yakınlığı nedeniyle değişmemektedir [104].



Şekil 1.8. Yerel rüzgar etkileri [109]

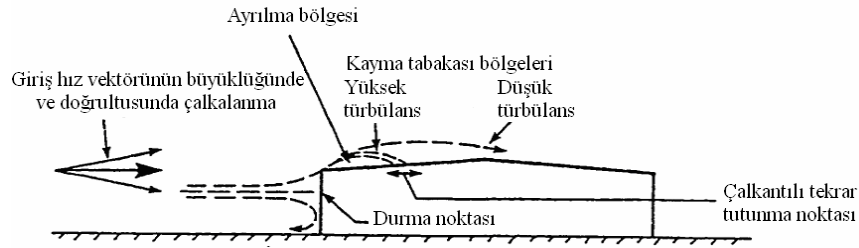


Şekil 1.9. İç basınç değişimleri [110]



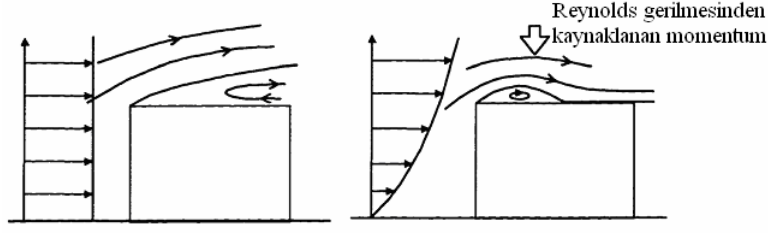
### 1.7.1.1. Akış Yapısı

Bir binanın çatı ve duvarlarının keskin kenarlarına doğru gelen akışta serbest bir kayma tabakası oluşur ve bu tabaka ile bina yüzeyi arasında ayrılma bölgeleri meydana gelir (Şekil1.10). Bu ayrılma bölgeleri, rüzgar tarafındaki kenarlarda büyük çekme etkileri üreten düşük basınçlı geniş alanlara yayılırlar ve akışın cisim üzerinde tekrar tutunup tutunmamasına bağlı olarak çatının bir kısmını veya tümünü kaplayabilirler. Akışın tutunması, ayrılma bölgesini sınırlayan kayma tabakasının şeklinden ve büyük ölçüde, gelen akışın türbülans karakteristikleri ile çatı eğiminden etkilenmektedir. Bu nedenle akışın çatı üzerinde tekrar tutunma yeri hassas bir şekilde belirlenemeyip, çalkantılı bir tutunma noktasından veya tutunma bölgesinden bahsedilebilir.



Şekil 1.10. Alçak bir bina etrafındaki akış [111]

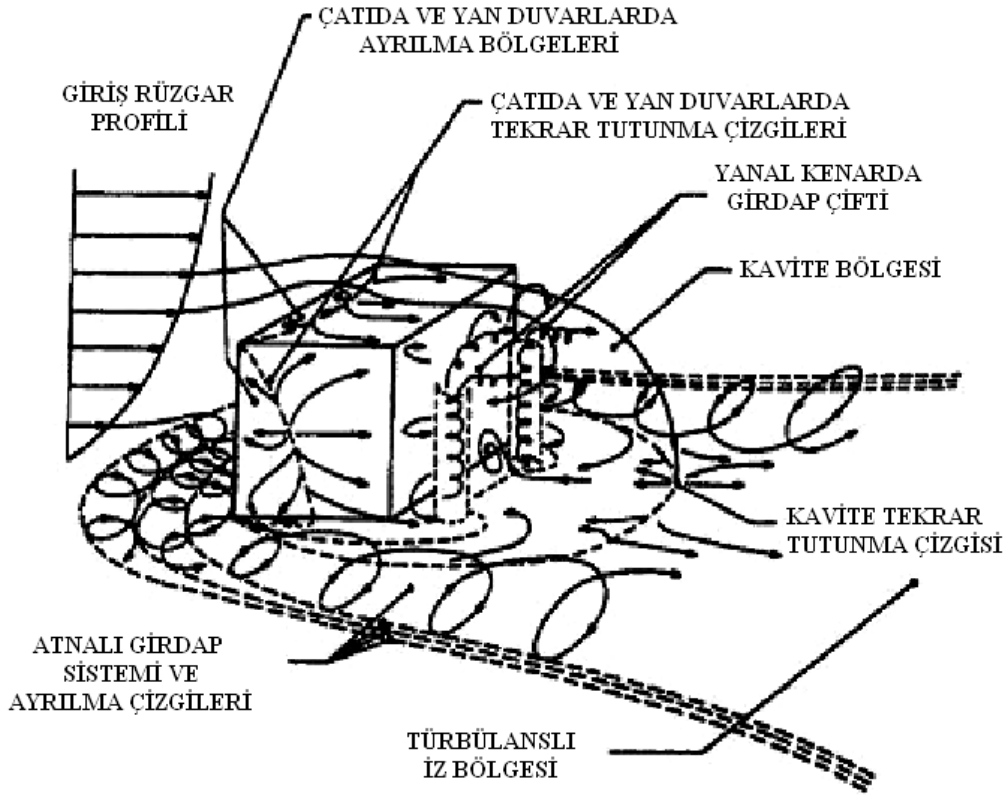
Düz çatılı bir binaya yaklaşan rüzgarın, Şekil 1.11’de görüldüğü gibi, üniform ya da sınır tabaka tipinde bir akış olması durumuna göre, çatı üzerindeki akış alanı ve basınç dağılımı farklılık göstermektedir [112]. Üniform akış tipinde rüzgar, binanın ön üst kenarından itibaren çatı üzerine doğru yükselir. Ön kenarlardan ayrılan akış çatı üzerinde tekrar tutunmamaktadır. Sınır tabaka tipi akış durumunda ise, rüzgar binanın 2/3 yüksekliğinden itibaren çatı üzerinden yükselir. Ortalama hız profilinden dolayı yer değiştirmiş akış daha yüksek kinetik enerjiye sahiptir ve ayrılmış akış çizgileri yüzeye daha yakındır. Bu durumda, ayrılma sınırı boyunca kayma tabakasındaki girdaplar ve ayrılmış akışı aşağı doğru harekete yönelten Reynolds gerilmeleri, çatı üzerinde çok daha erken bir tutunmayı sağlarlar.



Şekil 1.11. Farklı giriş profilleri için düz çatı üzerindeki akış [113]

Keskin kenarlı prizmalar etrafındaki akış, dairesel silindir şeklindeki diğer küt cisimler etrafındaki akıştan açıkça farklılık gösterir. Keskin kenarlı geometri farklı ayrılma noktaları oluşturmaktadır. Küt cisimler üzerindeki sabit ayrılma noktaları, basınç dağılımlarının Reynolds sayısının bir fonksiyonu olmadığını göstermektedir. Bu özellik, Şekil 1.12’de görülen küt cisim etrafındaki akışın belli karakteristiklerini ön plana çıkarmaktadır.

Türbülanslı sınır tabaka akışı içerisinde bulunan bir cisim etrafında, farklı özelliklerde akış bölgeleri meydana gelmektedir. Bunlar ayrılma, tutunma, durma, ters akış ve girdaplı akış bölgeleridir. Gelen akış cismin varlığından etkilenmekte, hızını ve doğrultusunu değiştirerek cismin etrafından ve üzerinden geçmeye çalışmaktadır. Akışın öncelikle çarptığı cismin ön yüzeyindeki basınçlar, çevre basıncından daha yüksek olmaktadır. Cismin rüzgar tarafındaki alt kenarında oluşan at nalı girdaplar, cismin yanlarından geçerek arkasına doğru hareket ederler. Cismin arkasında gözlenebilen bu yapının genişliği, gelen akışın türbülans şiddetiyle ilişkili olmaktadır. Türbülans şiddeti arttıkça, bu yapı daha hızlı bir şekilde dağılmaktadır. Prizmatik cismin arka duvarının kenarlarında sıralanmış cismin genişliğinin %30’u çapında ikili bir girdap yapısı oluşmaktadır. Cismin arkasında oluşan kavite bölgesi, düşük hızlara ve yüksek türbülans şiddetine sahip bir ters akış bölgesidir. Kavite bölgesinden sonra oluşan ve ayrılmış tabakaların yöneldiği iz bölgesi, akış boyunca yayılan düşük basınçlı, türbülanslı bir ters akış bölgesidir. İz bölgesinin durumu ve şekli, çatı ve yan duvarlar üzerinde akışın tutunup tutunmamasına bağlı olarak değişecektir. Buna karşın, uzunlukları yüksekliklerinden daha fazla olan alçak binaların çoğu için genellikle, akışın tutunması bina yüzeyi üzerinde olmaktadır [113].

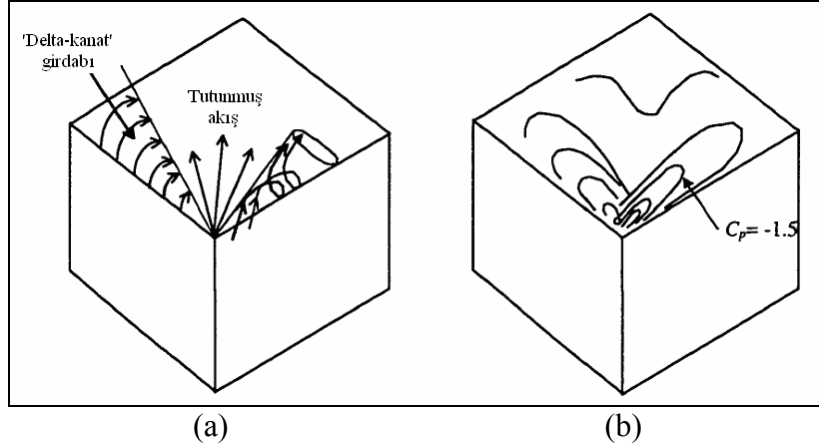


Şekil 1.12. Bir küt cisim etrafındaki akış yapısı [114]

### 1.7.1.2. Konik Girdaplar

Rüzgar çoğu kez bina duvarlarına açılı bir şekilde gelmektedir. Bina kenarları boyunca ayrılan akış, Şekil 1.13a'da görüldüğü gibi, akış boyunca konik bir girdap çifti oluşturacak şekilde hızlanan bir sirkülasyona girmektedir. Bu girdaplar akış boyunca belirli noktalarda bozulurlar. Alçak bir binanın rüzgar tarafındaki çatı köşesinde oluşan konik girdaplar, ortalama bir geliş açısında, bir delta-kanat üzerindeki girdaba oldukça benzemektedirler. Her bir girdabın merkezi, yüksek negatif basınç bölgesidir. Girdaplar düz çatının alt köşesi üzerinde, Şekil 1.13b'de görüldüğü gibi, iki negatif basınç alanı meydana getirirler. Gelen rüzgarın türbülansıyla doğrudan ilgili olan bu girdaplar, çatılar üzerinde büyük kaldırma etkisine sebep olmaktadır [112]. Konik girdaplar üç boyutlu olup büyük ölçüde kararlı yapıya sahiptirler ve içindeki akışkan parçacıkları helisel bir yörüngede hareket ederler. Rüzgar tarafındaki çatı köşelerinde oluşan yüksek çekme kuvvetinin (emme) büyüklüğü veya eşdeğer anlamda girdabın şiddeti, rüzgar açısıyla büyük ölçüde değişmektedir. Buna karşın, çekme kuvveti (emme) etkisindeki bölgelerin yeri rüzgar açısıyla çok fazla

değişmemektedir. Yüksek çekme kuvveti etkisinin çatı köşelerine doğru artmaya devam edip etmeyeceği ile ilgili somut bilgi, gerçek yapılar üzerinde yapılabilecek ölçümlerle elde edilebilir.



Şekil 1.13. Bina köşesinde oluşan konik girdap akışı [112]

### 1.7.2. Mühendislik Yaklaşımı ve Binaların Performansı

Yapılar genellikle buldukları çevre şartlarından etkilenmektedirler. Uygulanan tasarımın rüzgar yükleri karşısında başarılı ya da başarısız olduğunun tek gerçek göstergesi, kuvvetli rüzgarlar karşısında binanın gösterdiği performanstır. Genellikle bir bina üzerindeki rüzgar yükü etkileri bir kaç faktörle yönetilmektedir. Bunlar, rüzgar karakteristikleri, arazi ve topoloji özellikleri, bina geometrisi ve rüzgar geliş açısıdır. Binanın dış cephesinde bulunabilecek farklı bölümler, değişken rüzgar yüklerine maruz kalabilmekte ve komşu binaların varlığı da rüzgar yüklerini değiştirebilmektedirler. Bu nedenle, binaların yanı sıra şehir planlama çalışmalarında da rüzgar etkilerinin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Fırtınalara maruz kalan yapıların performansı, tasarımında ve yapım aşamalarında ortaya koyulan mühendislik yaklaşımları ile yakından ilgilidir. Binalar, mühendislik yaklaşımlarına göre dört kategoride sınıflandırmaktadır. Bunlar tam mühendislik, ön mühendislik, marjinal mühendislik ve mühendislik dışı yaklaşımlar şeklindedir [110].

Tam mühendislik yaklaşımının uygulandığı binalar, genellikle kaliteyi garanti etmekte ve şiddetli rüzgarlarda iyi performans göstermektedirler. Ön mühendislik yaklaşımı ile yapılan yapılar genellikle tip projeler şeklinde planlanmaktadır. Bu binalar optimum

ekonomiyi sağlayacak şekilde tüm bileşenler için eşit yükleme durumuna göre tasarlandığından, kuvvetli rüzgarlar karşısında yeterli performans gösterememekte ve nispeten düşük rüzgar hızlarında da hasara uğrayabilmektedirler.

Hasar araştırmalarında, en büyük hasarların marjinal mühendislik yaklaşımı ile inşa edilen binalarda olduğu ifade edilmektedir. Bu grubu oluşturan ticari ve endüstriyel binalar, bazı apartmanlar, çelik kafesli yapılar, ahşap ve betonarme binaların kuvvetli rüzgarlara karşı dayanımları yetersiz kalmaktadır. Tek veya çok katlı konut ve ticari amaçlı binaların çoğunda, mühendislik yaklaşımı neredeyse hiç dikkate alınmamaktadır. Çoğunlukla ahşap yapıların çatılarının kritik bölümlerinin rüzgara karşı çok az direnç göstermesi, yapı bütünlüğünün bozulmasına sebep olmaktadır.

Uzun yıllardan beri rüzgar kaynaklı bina hasarları üzerine yapılan gözlemler ve elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır [110] :

- Yapılar esas olarak kritik bina bileşenleri üzerinde etkili olan rüzgar kaynaklı kuvvetler nedeniyle hasara uğramaktadır.
- Mühendislik açısından uygun olmayan binalar düşük rüzgar hızlarında da hasara uğrayabilmektedir.
- Küçük bir mühendislik yaklaşımı bile, yapıların performansında olumlu yönde büyük farklar oluşturmaktadır.
- Bina geometrisi ve binanın baskın rüzgar yönüne göre konumu, rüzgar direnci açısından önemli faktörlerdir.
- Taşınabilir evler, kafes çatılı evler, güçlendirilmiş taş evler gibi yapı tiplerinin rüzgar dirençleri zayıftır.

Aşağıdaki nedenlerden bir veya daha fazlası, rüzgar kaynaklı bina hasarlarına yol açabilmektedir [115] :

- Bina tasarımında dikkate alınandan daha yüksek rüzgar hızları, kullanılan emniyet faktörlerini aşan yükler oluşturabilir.
- Tasarım ve yapıdaki yetersizlik, binada zayıf bağlantılar oluşturmaktadır.
- Standart ve kodlardaki eksiklikler yetersiz bina tasarımlarının yapılmasına neden olmaktadır.
- Rüzgar yükü etkilerini anlama ve değerlendirmedeki eksiklik, uygun olmayan yapıların inşasına sebep olmaktadır.

1970 yılında meydana gelen kasırgada Lubbock şehir merkezinin dörtte biri çok büyük ölçüde etkilenmiş, ticari, endüstriyel ve konut amaçlı kullanılan binalar önemli ölçüde hasara uğramışlardır. Hasar araştırmalarında, hasarın asıl kısmının çatının tümünde, yapı bileşenlerinde, çatı kaplamalarındaki kayıplar ve çelik esaslı endüstriyel binaların çökmesi şeklinde olduğu görülmüştür.

### 1.7.3. Bina Kodları

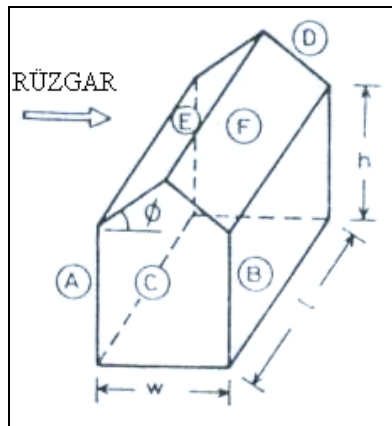
Rüzgar kaynaklı hasarlara karşı uygun ve etkili bir yapısal tasarımın, rüzgar yüklerinin doğru tanımlanmasına dayanacağı açıktır. Rüzgar etkilerini tahmin etmede tasarımcıya yol gösteren standartlar ve kodlar, basınç veya kuvvetlerle ilişkili rüzgar yüklerini açıklarlar. Binalar üzerindeki rüzgar etkilerine yönelik bilgilerin artması ve teknolojik gelişmelerin mühendislik uygulamalarında kullanılması ile yapıların rüzgara karşı gösterdikleri direnç iyileşmekte ve böylece kuvvetli rüzgarların oluşturabileceği hasarlar azalmaktadır. Genelde, binalar ve diğer yapılar üzerindeki rüzgar yükü etkilerini belirlemek için iki yaklaşım kabul edilmektedir. Bunlardan biri, alçak ve orta yükseklikli binalar ile kaplamalı tasarımı kapsayan ve rüzgar yükü uygulamalarının çoğunda kullanımı uygun olan yapıların oldukça rijit olduğu ve eşdeğer statik yüklerle değerlendirilebileceği şeklindeki yaklaşımdır. Diğer yaklaşım, rüzgar kaynaklı titreşimlerden etkilenebilecek binalar ve yapılar durumunda uygulanmaktadır. Bu tip yapılar için, rüzgar yüklerini belirlemede özel rüzgar tüneli deneyleri ve diğer deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Standartlar ve kodlarda çoğunlukla, binaların farklı yapısal elemanları için boyutsuz basınç katsayıları ve değişik yapılar için kuvvet katsayıları da yer almaktadır. Bu katsayılar bölge özelindeki rüzgar verileri ve tasarım rüzgar yüklerini belirlemek için arazi karakteristikleri ile birlikte kullanılırlar. Çoğu durumda, katsayılar atmosferik sınır tabakanın benzeşimi yapılan rüzgar tüneli deneylerinden elde edilirler.

Mühendislik kurallarına uygun ve oldukça emniyetli yapılan yüksek binalarda, kuvvetli fırtınalara karşı başarılar sağlanmıştır. Ancak, alçak binalar için hala geliştirilmesi gereken durumlar bulunmaktadır. Yapısal yıkıma neden olabilecek bina bileşeni hasarlarının meydana geldiği alçak binalarda, kısa periyotlu pik basınçlar oldukça önemlidir. Çatıların kenar ve köşeleri pik basınçlardan çok fazla etkilenirler. Bu bölgelerdeki basınçları azaltmada, uygun tasarım ve geliştirmelerin yapılabilmesi için basınç mekanizmasının anlaşılması önemlidir. Binalar ve diğer yapılar üzerinde rüzgar kaynaklı kuvvetleri anlama

konusundaki eksikliklerin giderilmesi ve iklimsel sınır değerlerdeki değişimlere göre kodların tasarım ve inşaa uygulamaları için etkin bir şekilde güçlendirilmesi, hasarların azalmasını ve ekonomik kayıpların en aza indirilmesini sağlayacaktır.

Dünyadaki ülkeler, etkin rüzgarlarına ve arazi yapılarına göre standartlar ve kodlar geliştirmişlerdir. AS 1170.2, Avustralya’da; NBCC, Kanada’da; ASCE7-95, Amerika’da rüzgar için kullanılan bina kodlarıdır. Amerika Birleşik Devletleri’nde eyalet ve şehirlere yönelik 5000 civarında kod bulunmaktadır. Bunların çoğu “Uniform Building Codes”, “The Standard Building Codes” ve “Basic Building Codes” gibi model kodlara dayanmaktadır. 1980’lerin ortasından itibaren tüm model kodlar için, ANSI Standart A.58.1-1982 kodu kabul edilmiştir. ASCE7-88 kodu, tüm çatı üzeri için bir ortalama basınç katsayısı öngörmekte, çatı sırt ve saçaklarında pik basınç değerlerini kullanmaktadır. Tekil binalar için oluşturulan kodlar, ikili ve daha fazla bina düzenleri durumunda büyük farklar göstermektedirler. Bu durum, önerilen kodların büyük ölçüde emniyetsiz ve ekonomik olmadığını göstermiştir. Bir binaya yakın diğer binaların etkisinin de değerlendirilmesi, daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır.

Bilinen bir probleme yönelik olarak rüzgar tünellerinde yapılan benzer çalışmaların sonuçları arasında da farklılıklar bulunabilmektedir. 30° eğimli beşik çatılı bir binanın yüzeylerindeki ortalama basınç katsayılarının, değişik ülkelerin kodlarına göre karşılaştırması Tablo 1.3’de verilmektedir. Beşik çatılı binanın yüzeyleri Şekil 1.14’de görüldüğü gibi harflerle gösterilmektedir.

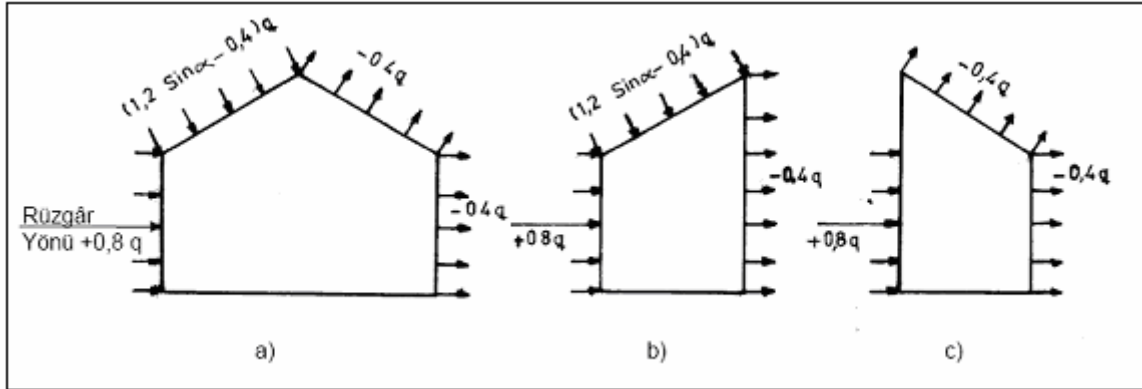


Şekil 1.14. Beşik çatılı bir bina yüzeylerindeki basınç bölgeleri [116]

Tablo 1.3. Değişik ülke kodlarına göre ortalama basınç katsayıları [116]

Ülke	A	B	C	D	E	F
Hindistan	0.7	-0.25	-0.60	-0.60	0.00	-0.40
Avustralya	0.80	-0.25	-0.60	-0.60	-0.20	-0.70
Kanada	0.70	-0.50	-0.70	-0.70	-0.56	-0.50
Çekoslovakya	0.80	-0.60	-0.60	-0.60	0.00	-0.40
Japonya	0.80	-0.40	-	-	0.15	-0.50
Yeni Zelanda	0.90	-0.50	-0.70	-0.70	-0.50	-0.70
Portekiz	0.80	-0.50	-0.70	-0.70	-0.10	-0.50
Romanya	0.80	-0.40	-0.40	-0.40	0.20	-0.40
İsveç	0.80	-0.40	-0.40	-0.40	0.20	-0.40
İngiltere	0.70	-0.25	-0.60	-0.60	0.20	-0.40
Uruguay	0.80	-0.40	-0.40	0.40	-0.20	-0.40
Rusya	0.80	-0.60	-0.60	-0.60	0.00	-0.40

Ülkemizde binalar üzerindeki rüzgar yükleri ile ilgili olan TS 498 standardı [117], Türk Standartları Enstitüsü tarafından oluşturulmuştur. Bu standartta, Şekil 1.15’de görülen, yapının geometrisine bağlı olan rüzgar yükünün hesaplanmasında, basınç, emme ve sürtünme etkileri birlikte değerlendirilmektedir.



Şekil 1.15. TS498’e göre eğik çatılı yapılarda rüzgar yükü etkileri [117]

Rüzgar yükü bileşkesinin büyüklüğü, aerodinamik yük katsayısı ( $C_f$ ), emme (hız basıncı,  $q$ ) ve etkilenen yüzey alanı ( $A$ ) olmak üzere,

$$W = C_f q A \quad [\text{kN}] \quad (1.11)$$



bağıntısı ile verilmektedir. Yapı geometrisine ve rüzgarın esme yönüne bağlı olan aerodinamik yük katsayısı ( $C_f$ ), rüzgar tüneli deneylerinden elde edilmektedir. Yapı üst yüzeyine etki eden rüzgar basıncı ( $w$ ),

$$w = C_p q \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.12)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Emme katsayısı ( $C_p$ ), dikkate alınan yüzey için değişik esme yönlerine bağlı olarak belirlenmektedir.  $U$ , rüzgar hızını göstermek üzere emme (hız basıncı),

$$q = \frac{\rho V^2}{2} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.13)$$

bağıntısı ile ifade edilmekte ve hava yoğunluğu  $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$  alınarak,

$$q = \frac{V^2}{1600} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1.14)$$

olarak verilmektedir. Yüksekliğe bağlı olarak rüzgar hızı ve emme değerleri Tablo 1.4'de görülmektedir.

Tablo 1.4. (TS 498) [117]

Zeminden yükseklik [m]	Rüzgar hızı [m/s]	Emme [ $\text{kN/m}^2$ ]
0-8	28	0.5
9-20	36	0.8
21-100	42	1.1
>100	46	1.3

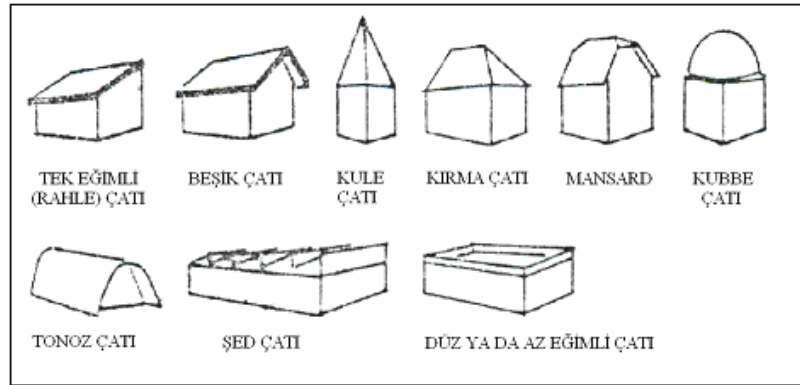
#### 1.7.4. Geleneksel Çatı Tipleri

Çatı, bir yapının son katta bitişini sağlayan ve şekillendiren yapı elemanıdır. Yapının üst kısmından atmosfer etkilerine karşı korunması amacıyla yapılan çatılar, dış şekillerine, eğimlerine, konstrüksiyonlarına, örtü malzemesine, çatı malzemesine ve ısı yalıtımının uygulama şekillerine göre sınıflandırılabilirler.

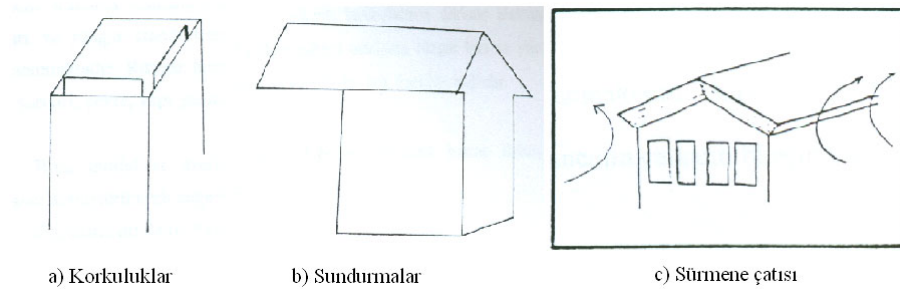
Çatı üst yüzeyinin bir yatay düzlemlle kesişmesi ile ortaya çıkan açı, çatı eğimi olarak tanımlanmaktadır. Eğim, üzerinde yürünen çatılarda % 1.5'i aşmamalıdır. Mimari tercihe göre tasarlanan, üzerinde yürünmeyen az eğimli çatılarda ise, en çok %5 olarak alınmalıdır. Ancak, kar yağışının yoğun ve uzun süreli olduğu bölgelerde, kar yükünün fazla olması nedeniyle düşük eğimler tercih edilmemektedir.

Az eğimli çatıların üzeri, yürüme, oturma gibi eylemlere uygun biçimde tasarlanabilmektedir. Bu amaçla yapılan düz çatılarda, koruma tabakası aşınmaya ve darbelere dayanıklı olmalıdır.

Eğimli çatılar, ahşaptan, çelikten ve eğimli dökülebilen betonarmeden yapılabilir. Üzerine gelen yükleri ve kendi ağırlığını ana taşıyıcı bölümüne aktaran çatıların konstrüksiyonunda genellikle ahşap kullanılmaktadır. Çelik çatılar ise, atölye, fabrika, depo, toplantı salonları gibi, büyük açıklık gerektiren yapılarda tercih edilmektedir. Üzerine ayrıca bir taşıyıcı çatı konstrüksiyonu gerektirmeyen, betonarme sistemin eğimli olarak yapılması ile eğimli betonarme çatılar elde edilmektedir. Şekil 1.16'da değişik çatı tipleri görülmektedir.



Şekil 1.16. Değişik çatı tipleri [118]



Şekil 1.17. Çatılarda basınç dağılımını etkileyen tasarımlar [118]  
a) Korkuluk, b) Sundurma, c) Yelkiran saçak

Bina çatılarında bulunabilecek, Şekil 1.17 a ve b’de şematik olarak gösterilen, korkuluk ve sundurma gibi kısımlar basınç dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir. Korkuluklar aşırı kaldırma etkisi yaparak akışın çatı yüzeyine tekrar tutunmasını önlerler. Sundurmalı çatılarda, sundurmanın alt yüzeyindeki bası etkisi ve sundurmanın üst yüzeyindeki emme etkisi sundurmanın yukarıya doğru kalkmasına neden olacaktır.

Rüzgar ile çatı arasındaki etkileşimin özellikle çatı kenarlarındaki etkisini azaltmak amacı ile çatı saçaklarına değişik şekiller verilmektedir. Şekil 1.17c’de Sürmene çevresinde geliştirilmiş yelkiran saçak biçimi görülmektedir. Bu sayede, saçığın alt ve üstünde oluşacak olan zıt gradyanlı basınç dağılımlarının birlikte oluşturacağı etkinin azalacağı düşünülebilir.

Çatı hasarları, çoğunlukla çatı köşeleri, çatı sırtı ve çatı saçaklarında meydana gelmektedir. En büyük çatı hasarı, beşik tipi çatı sistemlerinde çatı sırtında ve beşik uçlarında, düz çatı sistemlerinde ise çatı köşelerinde meydana gelmektedir. Akış ayrılması sonucu kuvvetli girdapların meydana geldiği çatı kritik bölümlerinde pik basınçların oluşum mekanizması tam olarak anlaşılmamıştır.

Rüzgarın bina çatıları üzerinde, çatı eğimine ve tipine göre farklı etkiler gösterdiğinin bilinmesi, değişik çatı geometrileri üzerindeki basınç alanlarının incelenmesine yönelik çok sayıda çalışmanın yapılmasına yol açmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak incelendiğinde, çoğunlukla çatılar üzerinde pik basınç mekanizmasının anlaşılmasına yönelik oldukları görülmektedir. Çalışmalardan elde edilen sonuçların, bina çatılarının tasarımında oldukça faydalı katkılar sağladığı bilinmekle birlikte, literatürde, çatı köşelerinde, çatı sırtında ve çatı saçaklarında meydana gelen kritik emme etkilerinin azaltılmasına yönelik uygulamalara ulaşılabildiği kadarıyla rastlanmamaktadır. Bu durum, bu bölgelerdeki emme etkilerinin azaltılmasını hedefleyen çalışmalara olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu çalışmada, değişik çatı geometrileri üzerindeki basınç alanlarının belirlenmesinin yanı sıra, kritik emme etkilerini azaltmaya yönelik yeni tasarımlara da yer verilmiş ve bu sayede literatüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır. Buna yönelik olarak çalışma kapsamında yapılanlar bir sonraki bölümde detaylı olarak sunulmuştur.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deneysel Çalışma

#### 2.1.1. Deney Düzenekleri

Alçak bina modelleri üzerindeki rüzgar etkilerinin belirlenmesine yönelik rüzgar tüneli deneyleri genellikle, 8-30 m/s lik serbest akış hızı aralığında yapılmaktadır. Blackmore [119], Savory ve diğ. [120], Ginger ve Letchford [44], Xu ve Reardon [86], 10 m/s'lik; Stathopoulos ve diğ. [121], Stathopoulos ve Luchian [87], Wiik ve Hansen [122], Uematsu ve Isyumov [46], 13 m/s'lik; Stathopoulos [68], Kawai ve Nishimura [64], 15 m/s'lik; Kind [52], Sitheeq ve diğ. [123], 20 m/s'lik serbest akış hızlarında ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Stathopoulos [124], tipik rüzgar tüneli deneylerinde sınır tabakanın üst kısmındaki akış hızının, 10 ile 30 m/s aralığında değiştiğini ifade etmiştir.

Farklı çatı eğimlerindeki bina modelleri etrafındaki türbülanslı akışla ilgili bu çalışmada kullanılan, biri Belçika "von Karman Institute for Fluid Dynamics"de ve diğeri KTÜ Makina Müh. Bölümünde bulunan iki ayrı rüzgar tünelindeki deneyler 15 m/s'lik serbest akış hızında yapılmıştır. Hız ve basınç ölçümlerinden önce, bina modelleri etrafındaki akış alanları hakkında ön bilgi edinebilmek için, yağ ve parafin buharı teknikleri kullanılarak, akış görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

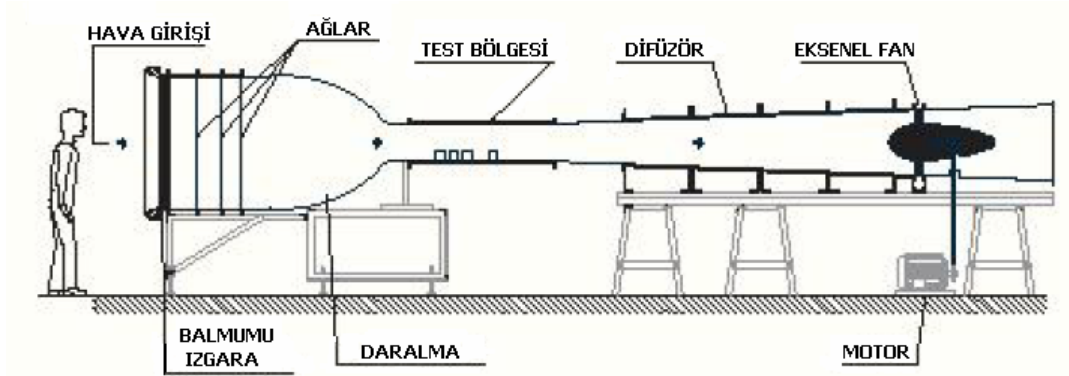
Yüzey akışının görüntülenmesinde kullanılan yağ tekniği çalışmasında, ondine yağı, petrol, talk tozu ve titanyum tozundan oluşan beyaz renkli karışım, model yüzeylerine bir film tabakası oluşturacak şekilde sürülmüştür. Daha sonra, 15 m/s'lik hızdaki akışa maruz bırakılan modellerin üzerindeki yağ tabakasındaki değişimler izlenmiştir. Yaklaşık 20 dakikalık süre sonunda, akışın model yüzeylerindeki yağ üzerinde oluşturduğu izlerde artık bir değişimin olmadığı görülmüş ve fotoğraflar çekilmiştir.

Modeller etrafındaki akış alanının düşey düzlemdeki görüntüsünü elde etmek için kullanılan parafin buharı tekniğinde; rüzgar tüneli test bölgesinde modellerin önünde düşey olarak yerleştirilmiş, 0.2 mm kalınlığında bir direnç telinin üst kısımdan verilen parafinin tel boyunca sürekli akışı sağlanmıştır. Tel, DC akım uygulanarak Joule etkisi ile ısıtılmış

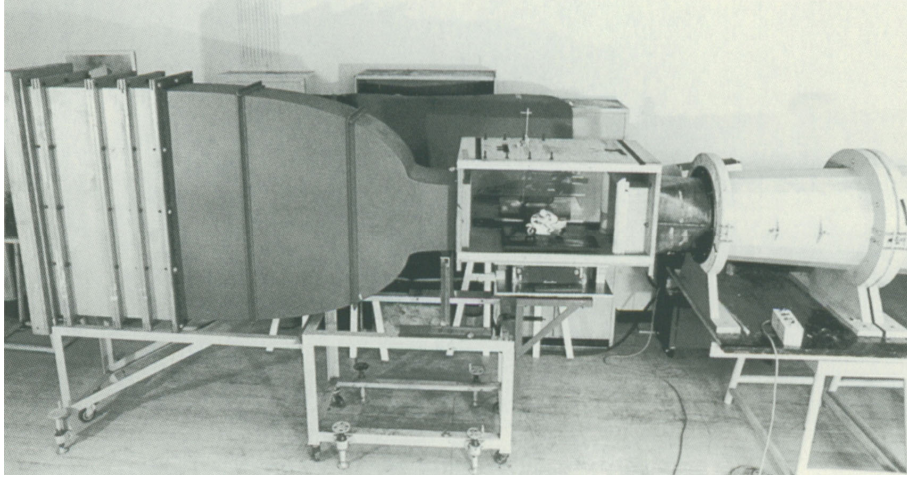
ve üzerindeki parafinin buharlaşması sonucu oluşan ve ana akışla birlikte hareket eden beyaz renkli buharın, akış alanında oluşturduğu görüntüler bir video kamera tarafından kaydedilmiştir. Düşük akış hızlarında uygulanabilen bu teknikte, 3 m/s'lik akış hızlarında çalışılmıştır.

### 2.1.1.1. Hız Ölçümleri İçin Rüzgar Tüneli

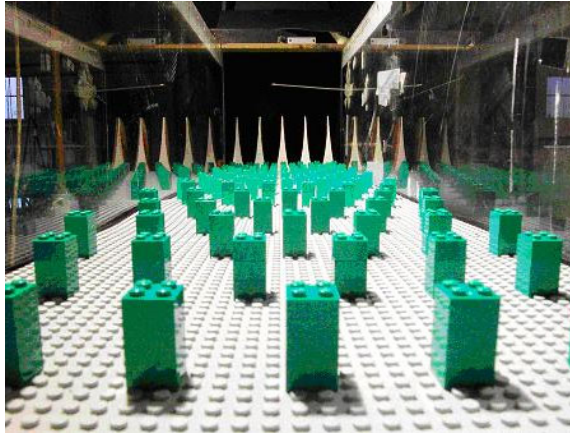
Ortalama hız ve türbülans ölçümleri, “von Karman Institute” de bulunan L2B rüzgar tünelinde gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlı, açık devreli, emme tipinde olan tünelde hava girişinde bal peteği şeklindeki akış yönlendirici elemanlar ve ağlar bulunmaktadır. 4.4 kW'lık bir DC motor ile çalıştırılan ve maksimum 35 m/s'lik hız elde edilebilen tünelin çalışma bölgesi, 350x350 mm kesitinde ve 2000 mm uzunluğundadır. Şekil 2.1'de şematik olarak görülen rüzgar tüneline hava girişi, dairesel difüzörün sonundaki aksenal fan ile sağlanmaktadır. Rüzgar tünelinin test bölgesinin yeniden düzenlenerek, atmosferik sınır tabakanın geliştirilmesine olanak sağlayacak şekilde uzatılmış hali Resim 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Hız ölçümlerinde kullanılan L2B rüzgar tünelinin şematik gösterimi

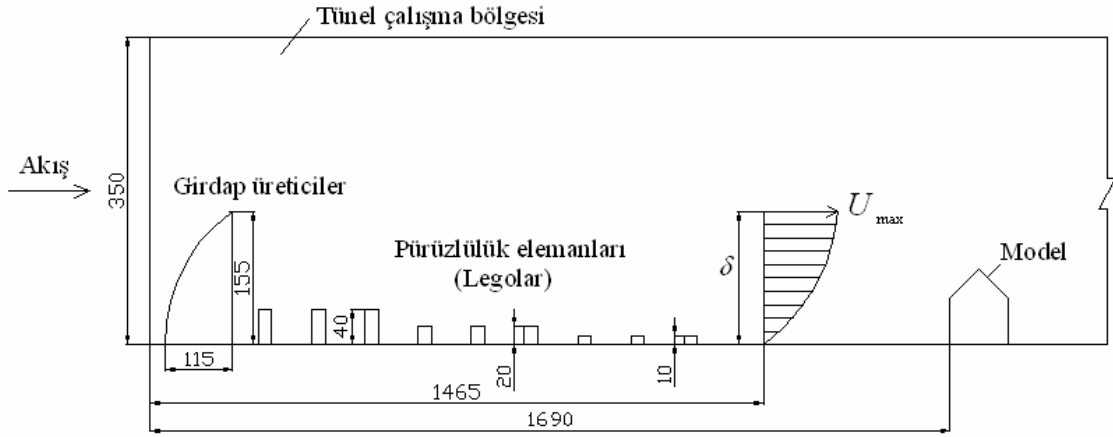


Resim 2.1. L2B rüzgar tünelinin genel görünüşü



Resim 2.2. Atmosferik sınır tabaka geliştirilmesinde kullanılan pasif aygıtlar

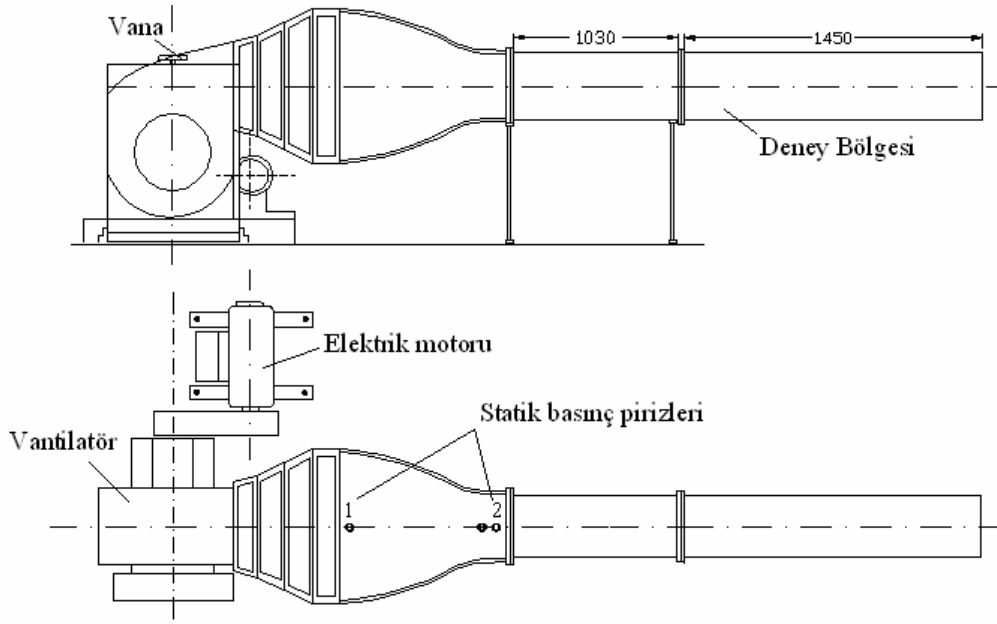
Tünel test bölgesinde, 150 mm kalınlığında atmosferik bir sınır tabakanın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Counian [11] yöntemine göre, Resim 2.2’de görülen eliptik girdap üreticiler ve legolar kombinasyonundan oluşan pasif aygıtlarla istenilen sınır tabaka yüksekliği elde edilmiştir. Şekil 2.2’de gösterilen tünel çalışma bölgesinin başlangıcına, 155 mm yüksekliğinde 115 mm uzunluğunda 5 adet Counian girdap üreticisi konulmuştur. Girdap üreticilerden sonra 1150 mm’lik bir mesafede, farklı yüksekliğe sahip legolar ardışık bir düzende yerleştirilerek, pürüzlülük bölgesi oluşturulmuştur. 15 m/s’lik serbest akış hızında 150 mm yüksekliğinde sınır tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Serbest akış türbülans şiddeti % 1 civarında oluşmuştur.



Şekil 2.2. L2B rüzgar tünelinin çalışma bölgesi

### 2.1.1.2. Basınç Ölçümleri İçin Rüzgar Tüneli

Basınç ölçümlerinde, KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarında mevcut bulunan soğuk hava üflemlisi, açık devreli rüzgar tüneli test bölgesi yeniden inşa edilerek kullanılmıştır. Şekil 2.3'de şematik olarak gösterilen, 6:1'lik daralma oranındaki rüzgar tüneline hava, 18.5 kW gücündeki bir elektrik motorunun tahrik ettiği vantilatör tarafından gönderilmektedir. 33 m/s'ye kadar akış hızlarının elde edilebildiği tünelin orijinal çalışma bölgesi, 457x457 mm kesitinde ve 1150 mm uzunluğundadır. Tünel eksenini boyunca sabit statik basıncın oluşturulması amacıyla, çalışma bölgesinin yan duvarları  $0.3^\circ$  açıyla birbirinden uzaklaşacak şekilde yerleştirilmiştir. İmalatçı firma Plint and Partners Ltd. tarafından, çalışma bölgesi orta ekseninde ortalama akış yönündeki türbülans şiddeti, % 0.5 olarak verilmektedir. Bu çalışmada, tünel orta ekseninde ortalama akış yönünde, TSI Model 1201 kızgın film prob ile %0.55 lik bir türbülans şiddeti ölçülmüştür.



Şekil 2.3. Basınç ölçümlerinde kullanılan rüzgar tünelinin şematik gösterimi

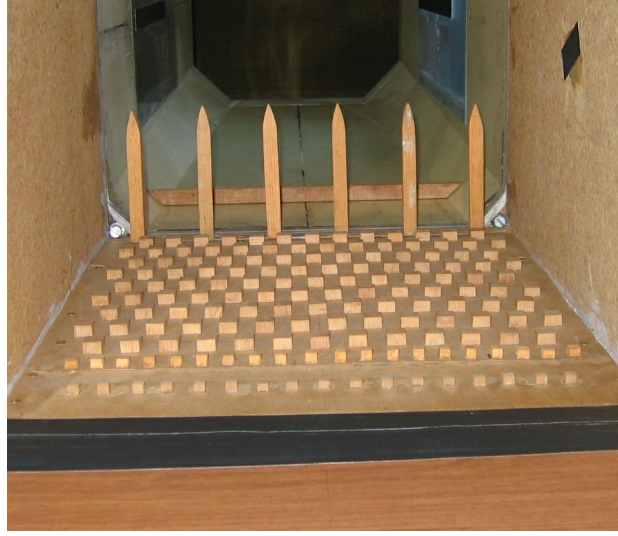


Resim 2.3. Rüzgar tünelinin genel görünüşü

Rüzgar tünelinin orijinal test bölgesine, girdap üreticilerin ve pürüzlülük elemanlarının yerleştirildiği 600 mm'lik ahşaptan yapılmış ara bölüm ile modellerin konumlandırıldığı ve ölçümlerin yapıldığı 850 mm'lik pleksiglas malzemeden yapılmış bölüm ilave edilmiştir. 1450 mm'lik bir ilave ile 2600 mm uzunluğa getirilen çalışma bölgesi, Resim 2.3'de görülmektedir. Bu tünelin çalışma bölgesinde 150 mm kalınlığında atmosferik bir sınır tabakanın geliştirilmesinde de Counihan [11] yöntemi kullanılmıştır. Bunun için, deney bölgesi başlangıcından itibaren 1030 mm uzaklıkta 20 mm yüksekliğinde bir bariyer

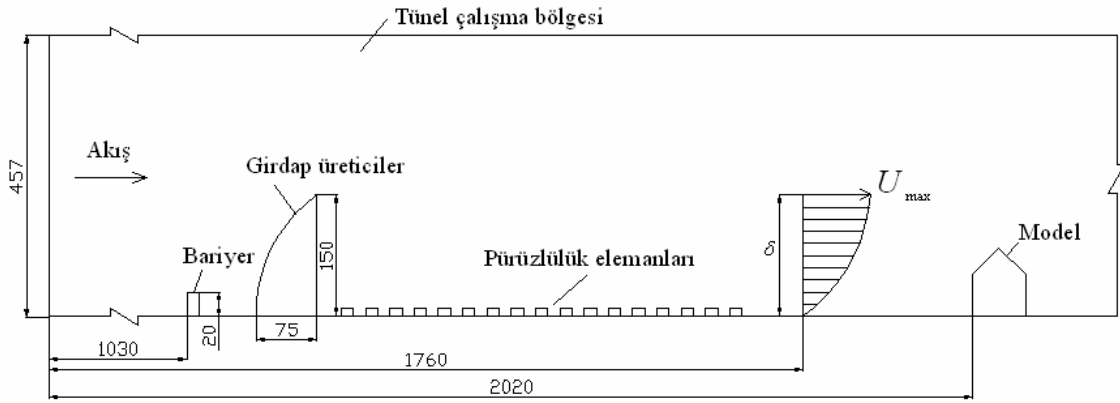


yerleştirilmiştir. Bariyerden 125 mm sonra, aralarında 75 mm uzaklık bulunan, 15 mm yüksekliğinde, 75 mm uzunluğunda ve 10 mm genişliğinde 6 adet eliptik girdap üreticisi konulmuştur. Resim 2.4’de görülen düzenlemede, girdap üreticilerinden sonra 500 mm lik bir mesafede, 15x15x10 mm boyutlarındaki ahşap bloklar ardışık bir düzende yerleştirilerek pürüzlülük bölgesi oluşturulmuştur. Pürüzlülük elemanlarının alan yoğunluğu %12 olarak gerçekleştirilmiştir. Bu değer, yapılan diğer çalışmalarda %11-20 olarak verilmektedir [15].



Resim 2.4. Tünel akışında bariyer, girdap üreticiler ve pürüzlülük elemanları

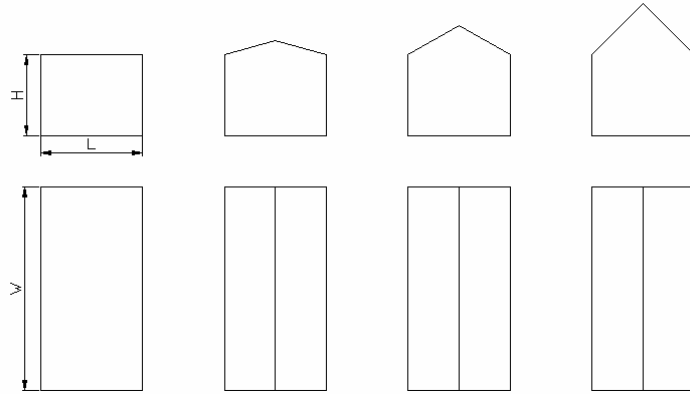
Çalışma bölgesi boyunca yerleştirilen bariyer, girdap üretici ve pürüzlülük elemanları kombinasyonu ile geliştirilen atmosferik sınır tabakanın şematik resmi Şekil 2.4’te görülmektedir. 15 m/s’lik serbest akış hızında, referans sınır tabaka hız profilini oluşturmak amacıyla, hız ölçümleri yapılmıştır. Tünel çalışma bölgesi başlangıcından itibaren 1760 mm’de açık kırsal arazi şartları için  $\beta=0.2$  üs kanununa uygun olarak, 150 mm yüksekliğinde atmosferik sınır tabaka akışı elde edilmiştir.



Şekil 2.4. Basınç ölçümlerinde kullanılan rüzgar tünelinin çalışma bölgesi

### 2.1.2. Bina Modelleri

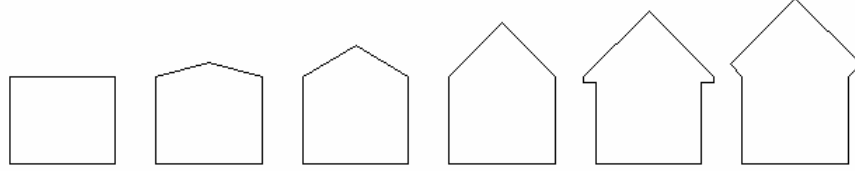
Ortalama hız ve türbülans ölçümlerinde kullanılan ve çatı eğimleri,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  olan dört beşik çatılı bina modeli Şekil 2.5’de verilmiştir. Model boyutları,  $H=40$  mm yükseklik,  $L=50$  mm uzunluk ve  $W=100$  mm genişlik şeklindedir.



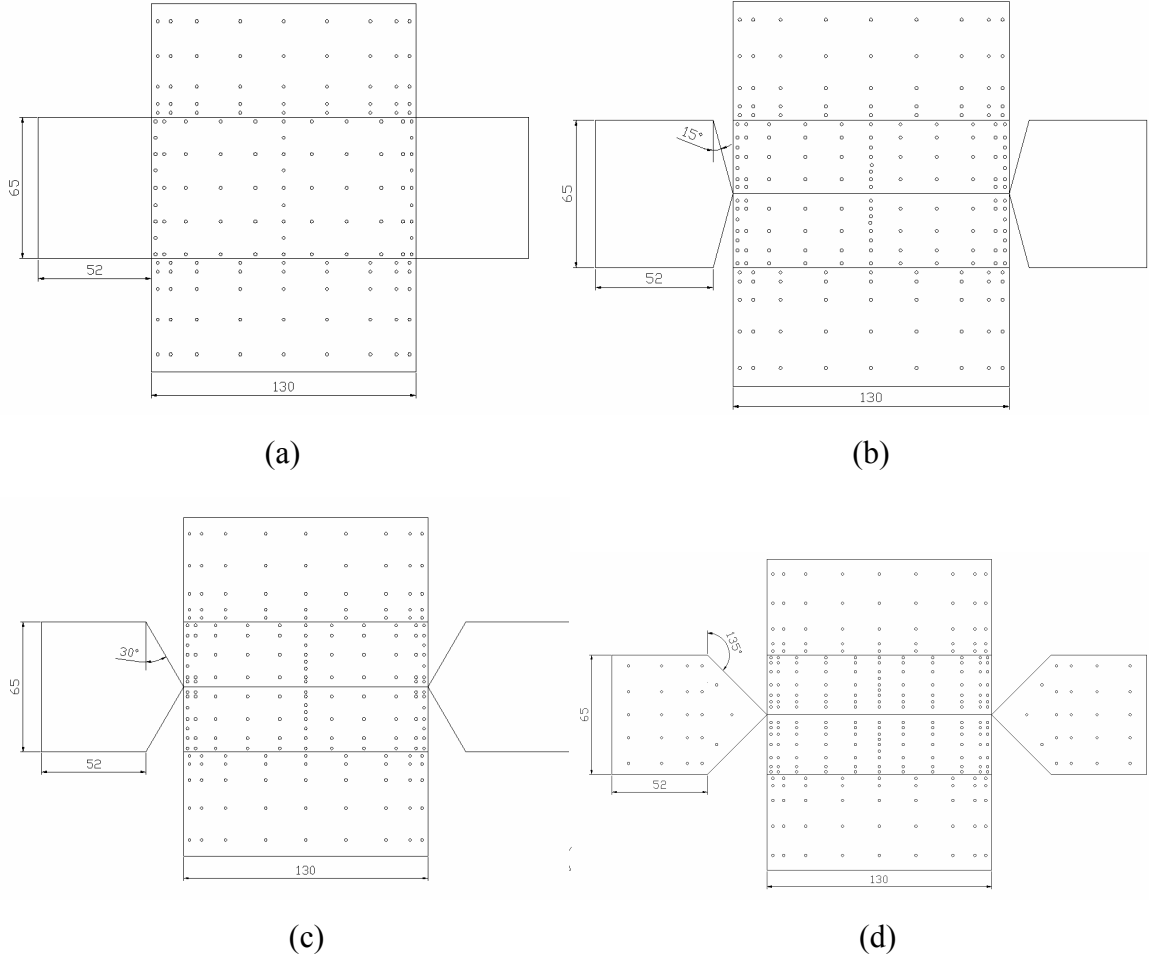
Şekil 2.5. Hız ölçümlerinde kullanılan modeller

Basınç ölçümlerinde kullanılan modeller, Şekil 2.6’da verilmektedir. Model boyutları  $H=52$  mm yükseklik,  $L=65$  mm uzunluk,  $W=130$  mm genişlik şeklindedir. Çalışmada kullanılan rüzgar tünellerinin çalışma bölgesi kesitlerinin farklılığı nedeniyle, hız ölçümünde kullanılan modellerle aynı blokaj oranını sağlamak için basınç ölçümünde kullanılan modellerin boyutları % 30 oranında artırılmıştır. Blokaj etkisini görmek ve daha fazla basınç deliği yerleştirmek amacıyla, boyutları % 50 oranında artırılmış  $15^\circ$  çatı eğimli

başka bir model de oluşturulmuştur. Bu model, çatı üstüne yerleştirilen elemanların, basınç alanına etkisini incelemede kullanılmıştır. Modellerin yüzeylerine 1 mm çaplı delikler açılarak basınç ölçüm prizleri yerleştirilmiştir. Özellikle çatı köşeleri, çatı sırtı ve saçaklar gibi kritik bölgelerde ölçüm noktaları yoğunlaştırılmıştır. Kullanılan modellerin yüzeylerine açılan basınç deliklerinin konumları Şekil 2.7’de verilmiştir.

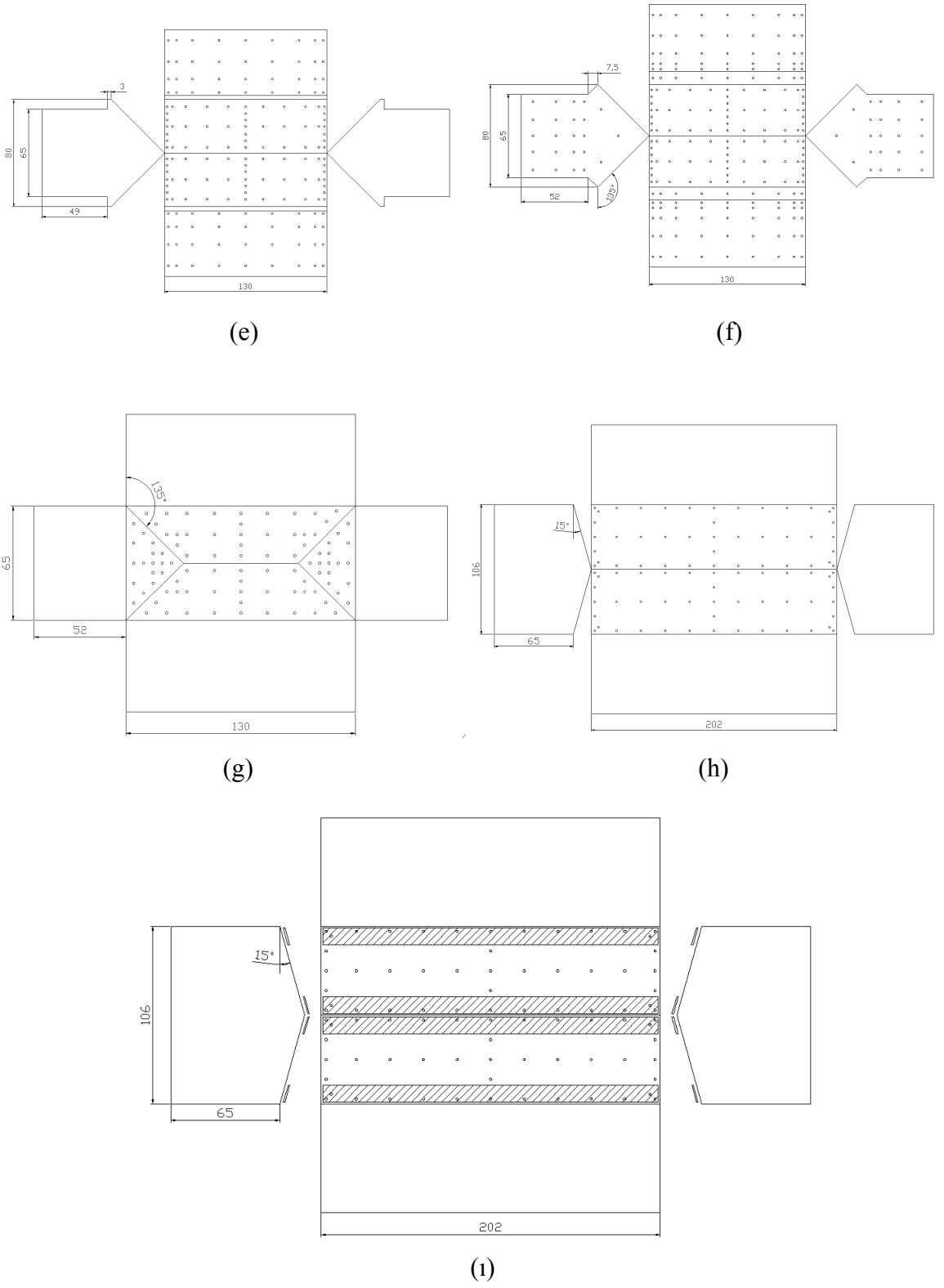


Şekil 2.6. Basınç ölçümünde kullanılan modeller



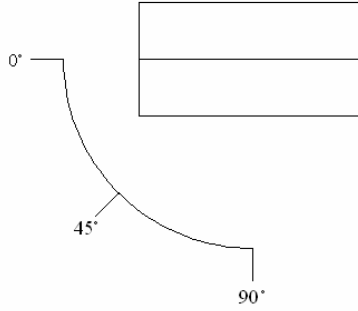
Şekil 2.7. Model yüzeylerine açılan basınç ölçüm deliklerinin konumları  
a)  $\alpha = 0^\circ$  eğimli düz çatı, b)  $\alpha = 15^\circ$  eğimli beşik çatı, c)  $\alpha = 30^\circ$  eğimli beşik çatı d)  $\alpha = 45^\circ$  eğimli beşik çatı, e)  $\alpha = 45^\circ$  eğimli normal saçaklı beşik çatı, f)  $\alpha = 45^\circ$  eğimli yelkıranlı saçaklı beşik çatı, g)  $\alpha = 45^\circ$  eğimli kırma çatı, h)  $\alpha = 15^\circ$  eğimli büyük beşik çatı, ı)  $\alpha = 15^\circ$  eğimli spoilerli beşik çatı

Şekil 2.7'nin devamı

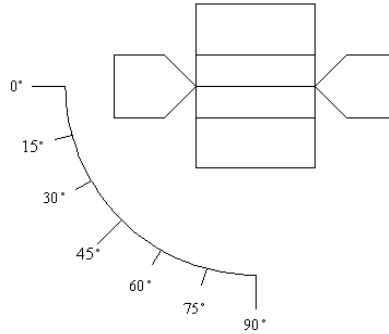


### 2.1.3. Rüzgar Açıları

Rüzgarın binalara açılı bir şekilde gelmesi durumunda, akış alanı farklılıklar göstermektedir. Genellikle rüzgar çatı sırtına dik geldiğinde, çatılar üzerinde daha fazla yük oluşmaktadır. Ortalama hız ve türbülans ölçümleri, Şekil 2.8’de görüldüğü gibi  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  lik rüzgar açıları için; ortalama ve çalkantı basınç ölçümleri de, Şekil 2.9’da verilen  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$ ’lik rüzgar açıları için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.8. Ortalama hız ve türbülans ölçümleri için rüzgar açıları



Şekil 2.9. Ortalama ve çalkantı basınç ölçümleri için rüzgar açıları

### 2.1.4. Ölçme Sistemleri

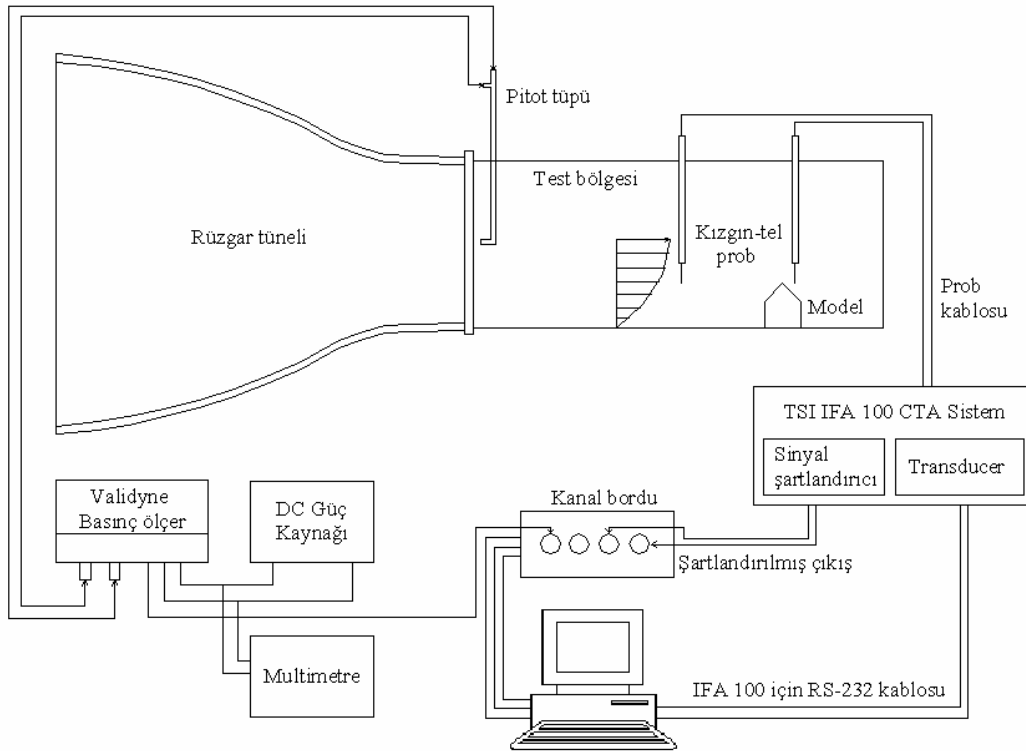
#### 2.1.4.1. Hız Ölçümü

Çatı modelleri etrafındaki akış alanında ortalama hız ve çalkantı hızı ölçümlerinde, TSI IFA-100 sabit sıcaklık kızgın tel anemometresi ile birlikte TSI 1211 Model kızgın tel

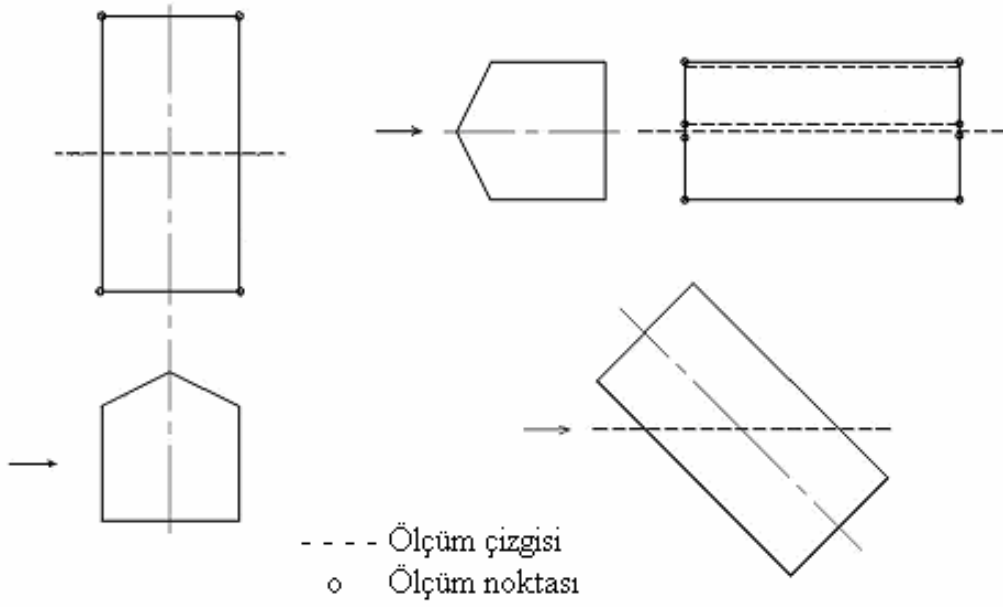
standart prob kullanılmıştır. Şekil 2.10'da görülen ölçme sistemi, sabit sıcaklık anemometresi, sinyal şartlandırıcı, kızgın tel prob tutucu ve kablosu, bağlantı kartı, A/D board ve bilgisayardan oluşmaktadır. Kızgın tel problemler 5m uzunluğundaki kablolarla anemometre sistemine bağlanmıştır. Kalibrasyon lülesinde kalibre edilen kızgın tel proba ait kalibrasyon eğrisi Ek 1'de sunulmuştur. Akışa dik olacak şekilde ölçüm ortamına yerleştirilen probun hareketi, 0.1 mm hassasiyetli kaydırıcı mekanizmayla sağlanmıştır. Rüzgar tüneline serbest akış hızının belirlenmesi için pitot tüpü kullanılmıştır.

Deneyler sırasında tüm sinyaller 300 Hz'de filtrelenmiş ve hız sinyalleri DAS20 veri kazanım sistemiyle kaydedilmiştir. Örnekleme oranı (Sampling rate) 1000 Hz ve ölçüm süresi 8 s olarak seçilmiştir. Anemometre çıkışı daima pozitif olup, akış yönünü göstermemektedir. Ters akış bölgelerinde akış hızının yönünün değişmesi, anemometrenin çıkışında önce azalan sonra artan ve tekrar azalan değerler şeklinde gerçekleşmektedir [125]. Bu bölgeler için uygulanan düzeltme ile ilgili ayrıntılar Ek 2'de sunulmuştur.

Ortalama hız ve çalkantı hızı ölçümleri, dört farklı çatı eğiminde ve üç farklı rüzgar açısında gerçekleştirilmiştir. Modeller üzerindeki ölçme bölgelerini gösteren ölçüm planı Şekil 2.11'de verilmiştir.

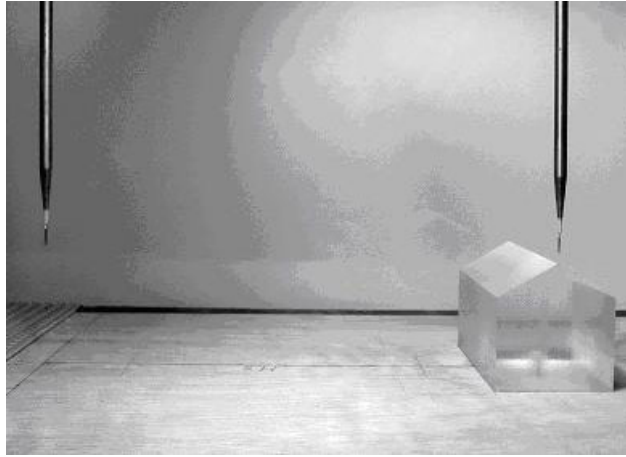


Şekil 2.10. Hız ölçme sistemi



Şekil 2.11. Çatı modelleri üzerinde hız ölçüm planı

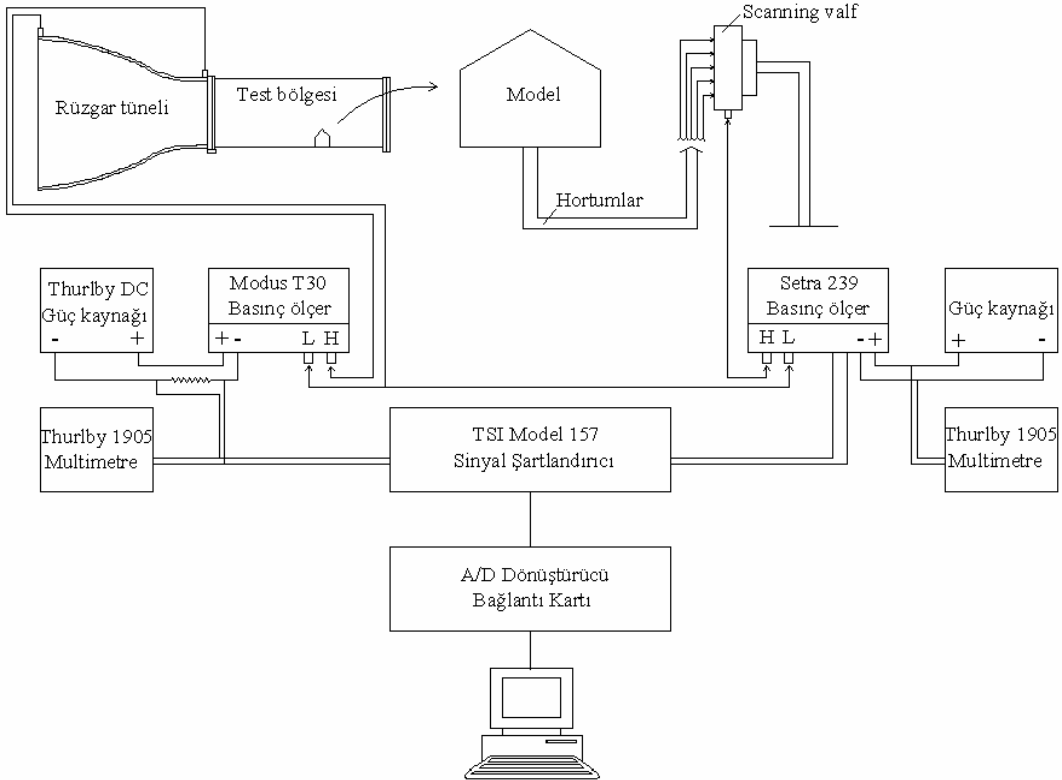
Bina çatı modelleri etrafındaki akışta hız alanının belirlenmesine yönelik ölçümlerin yanı sıra, referans sınır tabakadaki hız çalkantıları ile model üzerinde çatı etkileşimli hız çalkantıları arasındaki korelasyon üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Ölçümlerin aynı anda alındığı bu korelasyon için, referans sınır tabaka ve çatı üzerine yerleştirilmiş kızgın tel problemlerin konumları Resim 2.5’de görülmektedir.



Resim 2.5. Korelasyon için kullanılan kızgın tel problemlerin konumu

### 2.1.4.2. Basınç Ölçümü

Bina modellerinin yüzeyindeki ortalama ve çalkantı basınçlarının ölçümü, Şekil 2.12’de görülen sistemle gerçekleştirilmiştir. Ölçme sisteminde, TSI IFA-100 System Intelligent Flow Analyzer cihazının Sinyal Şartlandırıcı modülü, basınç algılayıcı (Pressure Transducer), A/D dönüştürücü, veri analizi yapan bir paket program ve bilgisayar bulunmaktadır. Basınç sinyalleri, Resim 2.6a’da görülen, Setra 239 Model Basınç Ölçer (Pressure Transducer) ile alınmıştır. Ölçüm aralığı  $\pm 7.5$  inchSS olan basınç ölçerin girişine 22-30 volt DC gerilim uygulandığında, çıkış gerilimi  $\pm 2.5$  volt DC olmaktadır. Tünel hızının belirlenmesinde 0-2 inchSS ölçüm aralığına sahip Modus T30 model basınç algılayıcı kullanılmıştır. 1000 Hz’lik örnekleme oranında ve 16 s’lik ölçüm süresinde alınan basınç sinyalleri, 300 Hz’de filtrelenerek, TSI IFA-100 ThermoPro paket programı ile kaydedilmiştir.



Şekil 2.12. Basınç ölçme sistemi



Bina modelleri üzerinde açılmış çok sayıda basınç prizinin basınç algılayıcısına bağlantısı, scanning valf ile sağlanmıştır. Bu çalışmada kullanılmak üzere, Resim 2.6b’de görülen biri 48 diğeri 36 kanallı olarak iki adet scanning valf tasarlanmıştır. KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü Merkez Atölyesinde imal edilen scanning valflerde, sızdırmazlık açısından üstünlüğü nedeniyle pirinç malzeme kullanılmıştır.



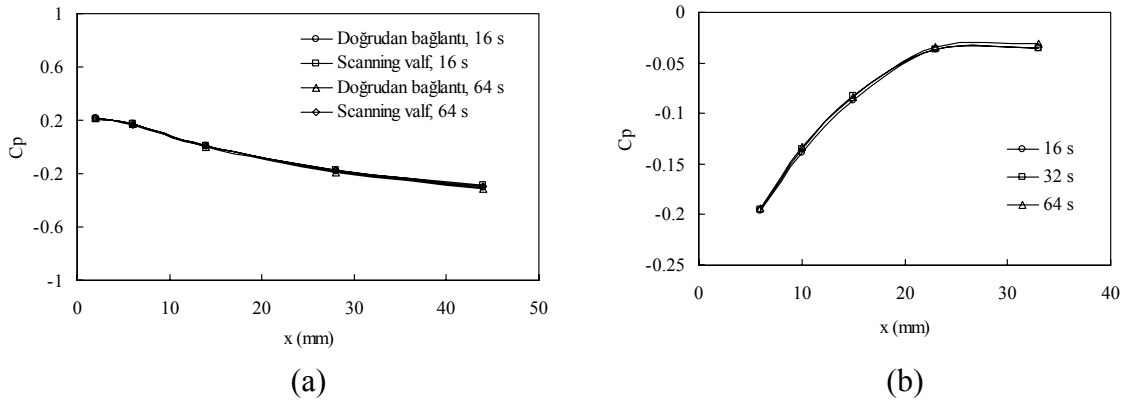
(a)



(b)

Resim 2.6. a) Setra 239 model basınç ölçer, b) Scanning valfler

Model yüzeyindeki basınç prizlerine takılmış çok sayıda hortum scanning valf kanallarına; scanning valften alınan tek çıkış hortumu ise, basınç algılayıcıya bağlanmıştır. Scanning valf üzerindeki döndürme mekanizmasının hareket ettirilmesiyle, girişteki kanallara bağlı basınç hortumlarının her birinin sırasıyla çıkışla eşleşmesi sağlanmıştır. Scanning valfler ölçümlerde kullanılmadan önce ölçüm hassasiyetleri test edilmiştir. Bu amaçla önce, scanning valf kullanılmadan model yüzeylerine bağlı basınç hortumları doğrudan basınç algılayıcısı ile ilişkilendirilerek ölçümler alınmıştır. Daha sonra, aynı ölçüm konumlarındaki basınç hortumları scanning valf üzerinden basınç algılayıcısına bağlanarak ölçmeler yapılmıştır. İki farklı bağlantı durumunda ölçülen basınçlar, iki farklı ölçüm süresi için basınç katsayısı formunda Şekil 2.13a’da verilmiştir. Scanning valf kullanımının ilave bir basınç kaybı oluşturmadığı görülmüştür. Şekil 2.13b, ölçüm süresinin basınç dağılımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Ölçüm süresinin arttırılmasının basınç değeri üzerinde etkili olmadığı anlaşıldığından, tüm deneyler boyunca ölçüm süresinin 16 s olarak alınması uygun bulunmuştur.



Şekil 2.13. Scanning valf kullanımının ve ölçüm süresinin basınç dağılımına etkisi  
a) Scanning valf etkisi, b) Ölçüm süresi etkisi

Deneyler sırasında yapılan ölçümlerle ilgili belirsizlik analizi, Ek 3’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Ortalama hız ve türbülans hızı ölçümlerindeki belirsizlikler sırasıyla,  $\pm \%2.07$  ve  $\pm \% 4$  olarak bulunmuştur. Ortalama ve çalkantı basıncı ölçümlerindeki belirsizlik ise, sırasıyla,  $\pm \%3.06$  ve  $\pm \% 4.6$  mertebelerindedir.

## 2.2. Sayısal Çalışma

### 2.2.1. Hareket Denklemleri

Herhangi bir akış probleminin sayısal çözümünde, akışkanlar mekaniğinin genel denklemleri olan Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri kullanılmaktadır. İkinci mertebeden kısmi türevli, lineer olmayan bu denklemlerle, uygun başlangıç ve sınır şartlarının kullanılmasıyla, akış alanının yaklaşık çözümleri elde edilebilmektedir.

Sıkıştırılmaz bir akışkanın zaman bağımlı hareketi, kartezyen koordinatlarda,

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F \quad (2.1)$$

atalet kuvvetleri      basınç kuvveti      sürtünme kuvveti      kütlelesel kuvvetler

şeklinde Navier-Stokes denklemleri ve

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

süreklilik denklemi ile ifade edilmektedir. Bu denklemlerde, hız ve basınç büyüklükleri zaman ortalamalı ve çalkantı terimleri cinsinden yazıldığında, zaman ortalamalı denklemler,

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] + F_i \quad (2.3)$$

şeklindeki Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri olarak elde edilmektedir. Bu denklemlerde yer alan çalkantı terimlerinin hesaplanmasına yönelik olarak çok sayıda türbülans modeli geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Realizable k- $\epsilon$  ve Standart k- $\omega$  türbülans modelleriyle çözümler gerçekleştirilmiştir.

## 2.2.2. Türbülans Modelleri

### 2.2.2.1. Realizable k- $\epsilon$ Model

Shih ve diğ. tarafından önerilen Realizable k- $\epsilon$  model, türbülanslı akışın fiziği ile ilgili normal gerilmeler üzerindeki belli matematiksel sınırlamaları aşmaya yönelik bir yaklaşım getirmektedir [126]. Bu yaklaşımda,  $\delta_{ij}$  kroneker delta olmak üzere, sıkıştırılmaz bir akış için Reynolds gerilmeleri,

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Türbülans viskozitesi

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.5)$$

ve normal gerilmeler

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (2.6)$$

olarak tanımlanmaktadır.  $k$  ve  $\varepsilon$  için modellenmiş transport denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.8)$$

şeklindedir. Bu denklemlerde,  $G_k$ , ortalama hız gradyenti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini;  $G_b$ , kaldırma kuvveti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini ifade etmektedir.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_2$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabitler olup,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  ise türbülans Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  sırasıyla,  $k$  ve  $\varepsilon$  için kaynak terimleridir.

#### 2.2.2.2. Standard k- $\omega$ Model

Kolmogorov tarafından önerilen bu türbülans modelinde,  $k$  türbülans kinetik enerjisi;  $\omega$  ise yutulmanın kinetik enerjiye oranını ( $\omega = \varepsilon / k$ ) ifade etmektedir [126]. Bu modelde türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.9)$$

olarak tanımlanmaktadır. Türbülans kinetik enerji ( $k$ ) ve özgül yutulma ( $\omega$ ) için transport denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + S_k \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega + S_\omega \quad (2.11)$$

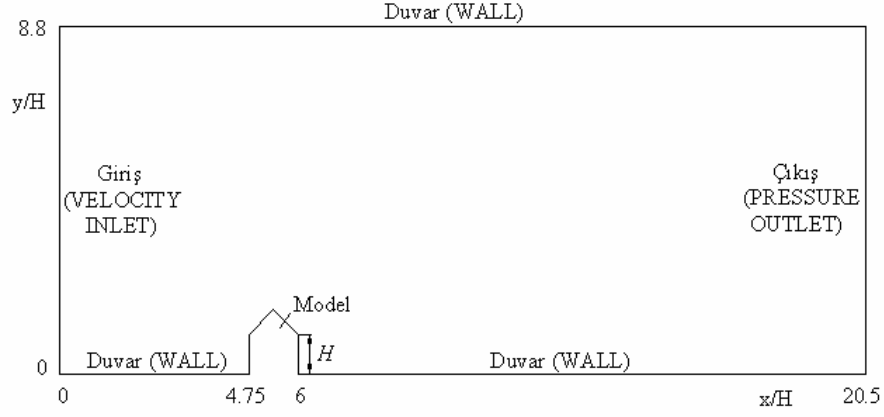
şeklindedir. Bu denklemlerde,  $G_k$ , ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerjisi üretimini;  $G_\omega$ ,  $\omega$  nın üretimini ifade etmektedir.  $\Gamma_k$  ve  $\Gamma_\omega$ ,  $k$  ve  $\omega$  için efektif difüzyivite;  $S_k$  ve  $S_\omega$  ise, kaynak terimleridir.

### 2.2.3. Çözüm Yöntemi

Binalar etrafındaki iki boyutlu akış alanının sayısal çözümleri, FLUENT 6.1.22 paket programı kullanılarak, Pentium 4 Model kişisel bir bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Geometri ve ağ oluşturma işlemleri için, FLUENT ile uyumlu çalışan diğer bir paket program GAMBIT 2.0 kullanılmıştır. Sayısal çözümlerde, Realizable k- $\epsilon$  türbülans modeli ve Standard k- $\omega$  türbülans modeli karşılaştırma amaçlı iki farklı model olarak uygulanmıştır. Duvar yaklaşımı olarak, genişletilmiş duvar ifadesi (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır. İteratif çözücü olarak SIMPLEC algoritması esas alınmıştır.

#### 2.2.3.1. Başlangıç ve Sınır Şartları

Sayısal çalışma, kullanılan bilgisayar kapasitesindeki yetersizlik nedeniyle, 2 boyutlu olarak ele alınmış ve sadece modele dik rüzgar açısında, farklı çatı eğimleri için çözümler elde edilmiştir. Akış alanı geometrisi ve sınır şartları, Şekil 2.14'de görülmektedir. Sınır şartları, GAMBIT programında verilen şekliyle, girişte VELOCITY INLET, çıkışta PRESSURE OUTLET ve duvarlarda WALL olarak tanımlanmıştır.

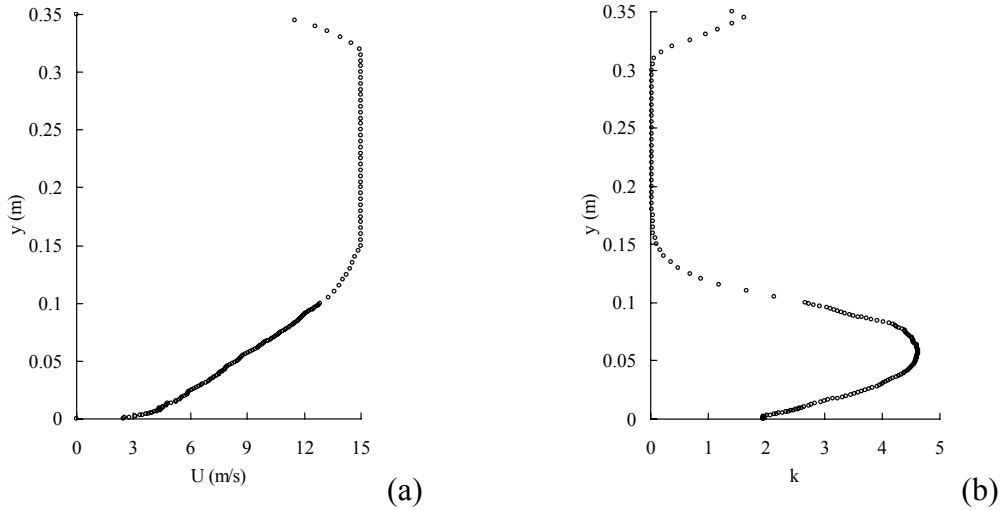


Şekil 2.14. Akış alanı geometrisi

Deneysel çalışmalarda ölçülmüş ortalama hız ve türbülans profilleri, hesap alanında giriş şartı olarak verilmiştir.  $K=0.41$ ,  $\delta = 0.15\text{ m}$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $l = K\delta$ , olmak üzere, türbülans kinetik enerji ( $k$ ), yutulma ( $\varepsilon$ ) ve özgül yutulma ( $\omega$ ) için giriş profilleri,

$$k = \frac{3}{2} (U_{avg} II)^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \cdot \frac{k^{3/2}}{l}, \quad \omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} l} \quad (2.12)$$

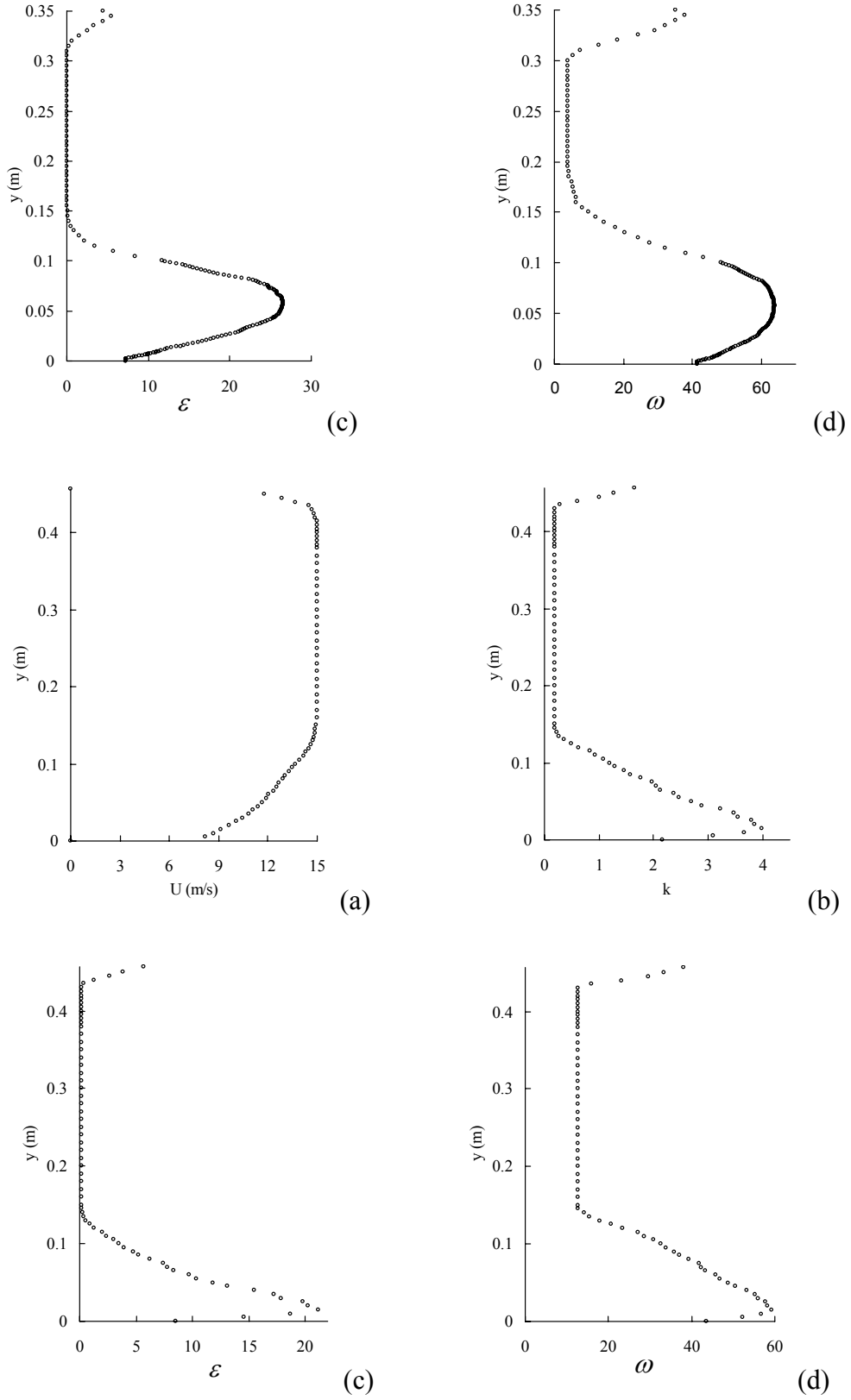
bağıntıları ile verilmiştir. Buna göre, kentsel ve açık kırsal arazi şartları için oluşturulan giriş profilleri sırasıyla, Şekil 2.15 a-d ve 2.16 a-d'de verilmiştir.



Şekil 2.15. Kentsel arazi şartları için oluşturulmuş giriş profilleri

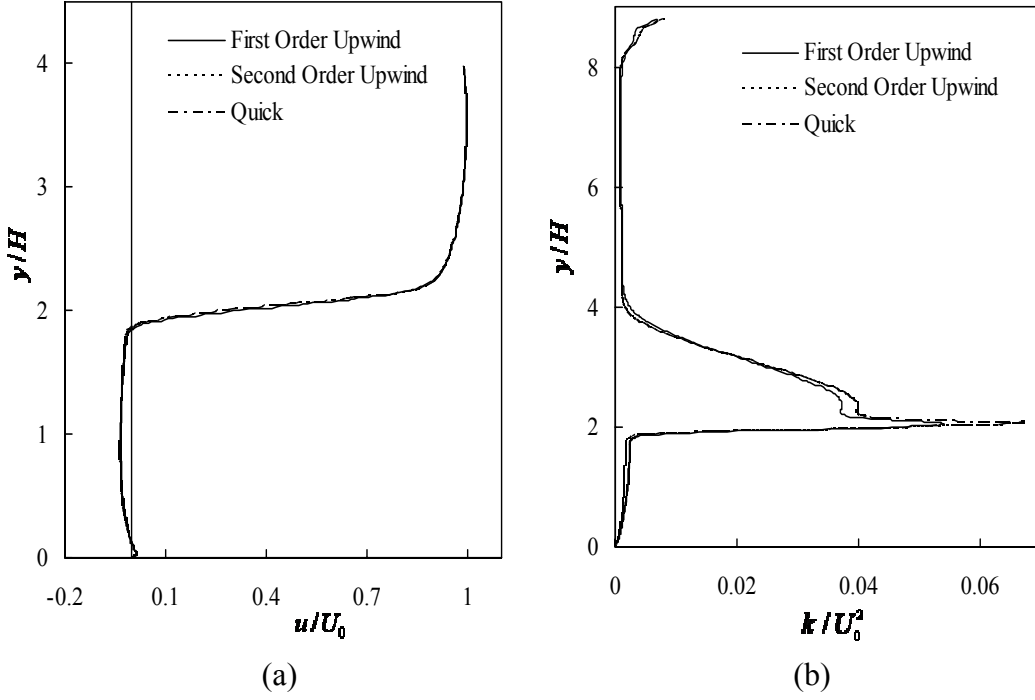
a) ortalama hız, b) türbülans kinetik enerji, c) yutulma, d) özgül yutulma

Şekil 2.15'in devamı



Şekil 2.16. Açık kırsal arazi şartları için oluşturulmuş giriş profilleri  
a) ortalama hız, b) türbülans kinetik enerjisi, c) yutulma, d) özgül yutulma

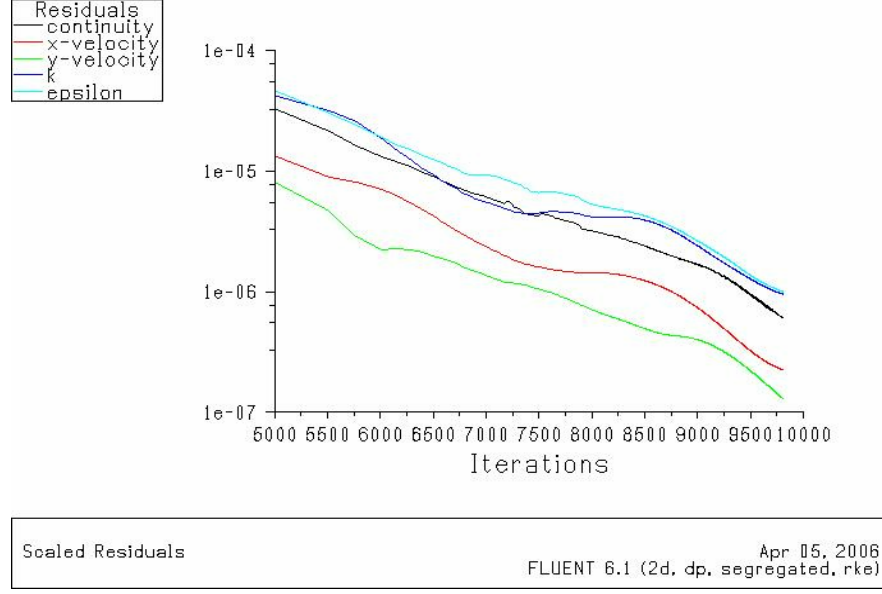
Değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişimine yönelik first order upwind, second order upwind ve Quick gibi yaklaşımların, çözüm üzerindeki etkisi Şekil 2.17'de verilmiştir. Bina modelinin hemen arkasındaki istasyon için hesaplanan ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profillerinden, bu yaklaşımların çözüm üzerinde etkili olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.17. Ağ noktaları arasındaki yaklaşımların çözüm üzerindeki etkisi  
a) ortalama hız, b) türbülans kinetik enerji

Normalize edilmemiş artıkların  $1 \cdot 10^{-6}$  dan küçük olma şartı, çözüm yakınsama kriteri olarak alınmıştır. Akış büyüklükleri ile ilgili artıkların çözümleme boyunca tipik değişimini veren Şekil 2.18'den, iterasyon sayısının yaklaşık 10000 değerinde yakınsamanın gerçekleştiği görülmektedir.



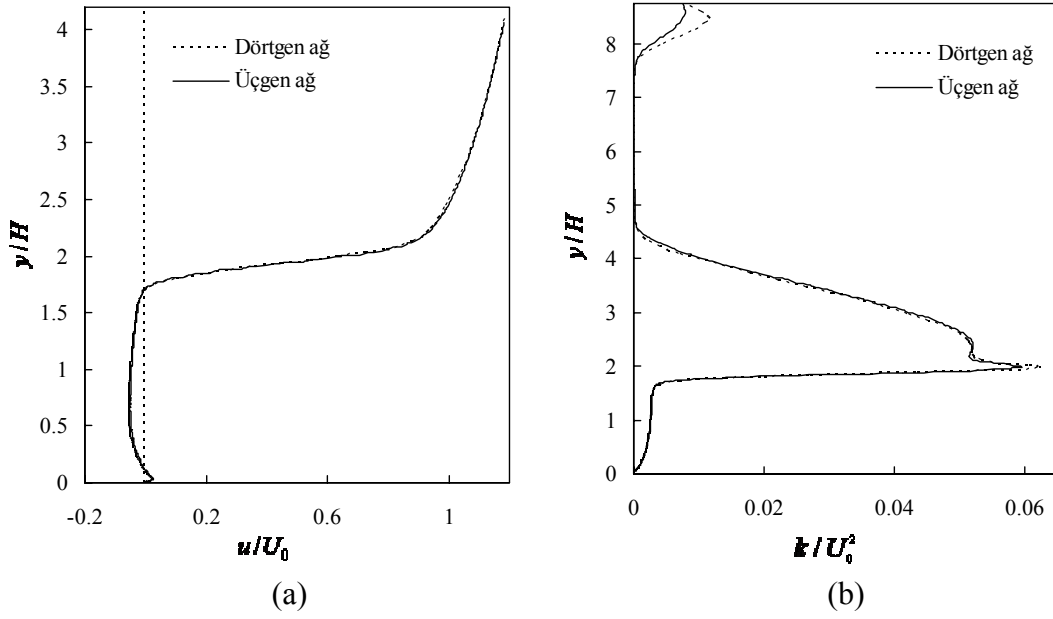


Şekil 2.18. Artıkların iterasyon sayısı ile değişimi

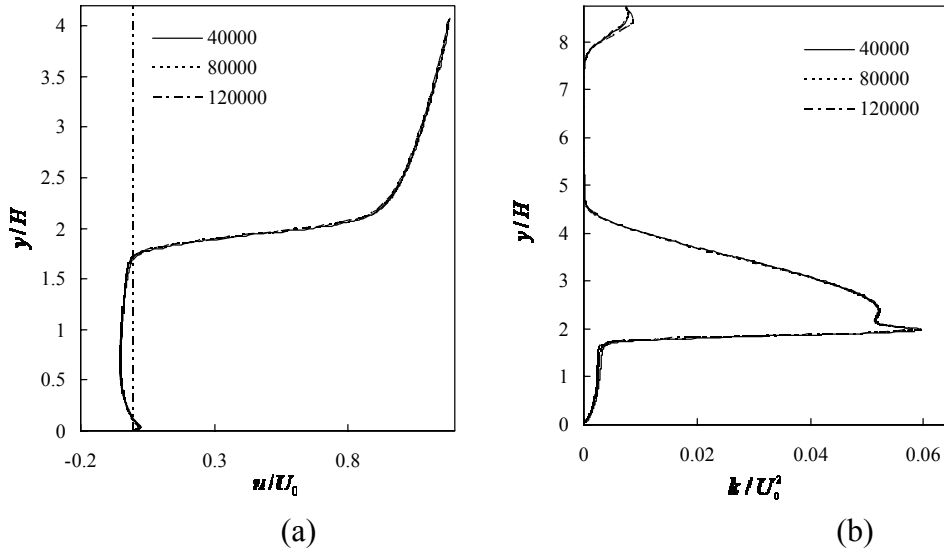
### 2.2.3.2. Ağ yapısı

FLUENT programında iki farklı ağ hücresi bulunmaktadır. Yapılandırılmış ağ olarak tanımlanan hücreler dörtgen, yapılandırılmamış olanlar ise üçgen şeklindedir. Bu iki ağ hücre tipi ile yapılan denemelerin sonuçları, Şekil 2.19’da verilmiştir. Dörtgen ve üçgen ağ tipleri ile yapılan çözümlerin sonuçları arasında belirgin bir farkın olmadığı görülmektedir.

Ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için, farklı sayıdaki ağ yapıları ile denemeler yapılmıştır. Realizable k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak, farklı ağ yoğunlukları için yapılan çözümlerin sonuçları, Şekil 2.20’de verilmiştir. Bina modeli arkasındaki ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profillerinin durumu, çözümlerin ağ hücre sayısından bağımsız olduğunu göstermektedir. Sayısal çalışmada çözüm yapılan geometrilerin tümünde yaklaşık 80000’lik ağ kullanılmıştır.

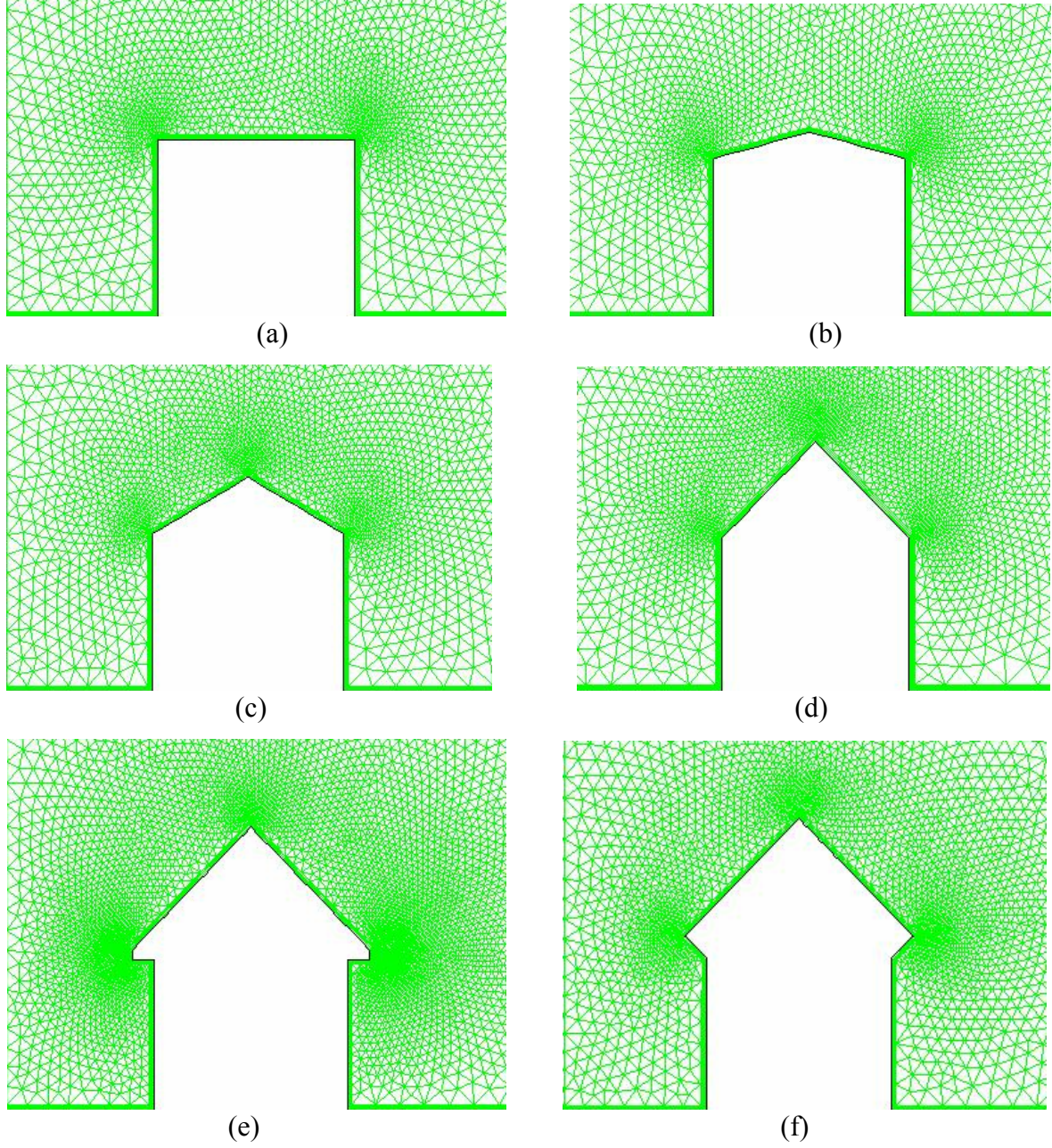


Şekil 2.19. Ağ tipinin çözüm üzerindeki etkisi a) ortalama hız, b) türbülans kinetik enerji



Şekil 2.20. Ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi a) ortalama hız, b) türbülans kinetik enerji

Dört farklı çatı eğimi ve iki farklı saçak tipi için tasarlanan ağ yapıları Şekil 2.21'de görülmektedir. Model yakınındaki bölgelerde ağ yoğunluğu artırılırken, geriye kalan bölgelerde daha seyrek bir ağ düzeni oluşturulmuştur. Katı duvarlar üzerine, önce küçük elemanlardan oluşan dörtgen tipli yapılandırılmış ağlar yerleştirilirken, akış alanının diğer bölgeleri üçgen tipli yapılandırılmamış ağlarla örülmüştür. Bu şekilde hibrid ağ düzeninde bir hesap alanı oluşturulmuştur.

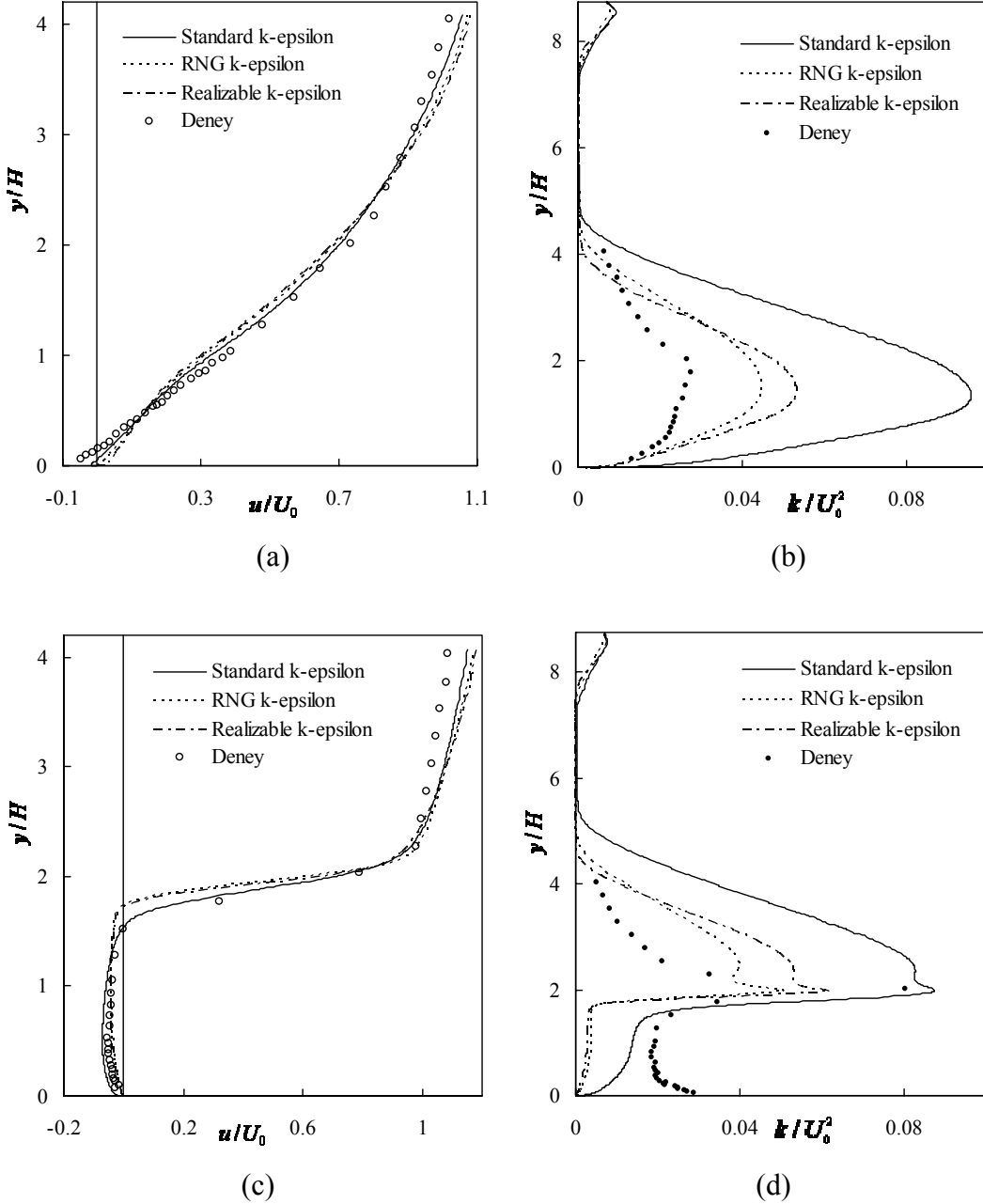


Şekil 2.21. Farklı çatı eğimleri ve farklı saçak tipleri için iki boyutlu ağ düzenleri  
 a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$ , c)  $\alpha = 30^\circ$ , d)  $\alpha = 45^\circ$ , e)  $\alpha = 45^\circ$  Normal saçak  
 f)  $\alpha = 45^\circ$  Yelkiran saçak

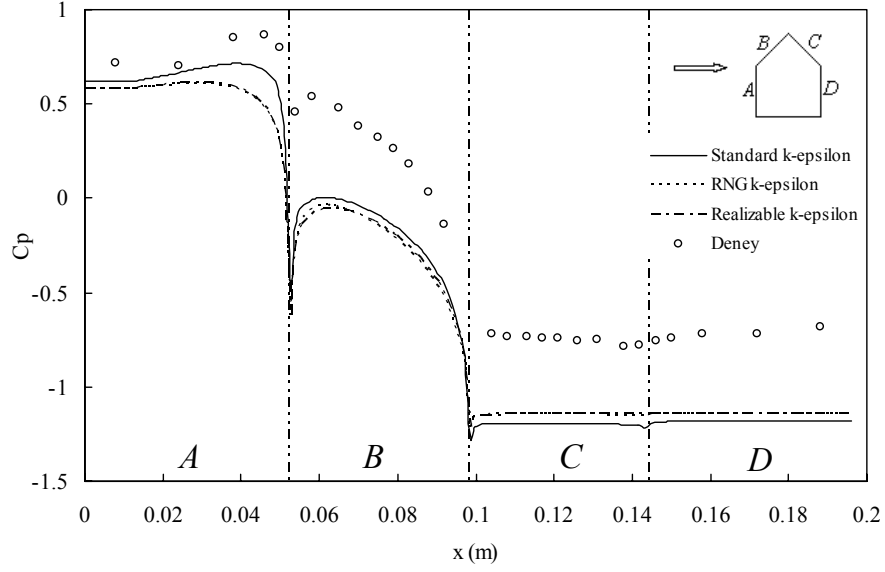
### 2.2.3.3. Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması

FLUENT paket programı, türbülanslı akışlar için çok sayıda türbülans modeli ve çözüm performansını etkileyen farklı yaklaşımlar içermektedir. Bu çalışma kapsamında,  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  türbülans modellerinin geliştirilmiş farklı tipleri ile çözümler yapılarak, çalışılan akış alanı için modellerin performansları denenmiştir.

k-ε türbülans modelinin farklı tipleri ile yapılan çözümler sonucunda, bina modelinin önünde ve arkasında yarım model yüksekliği mesafelerdeki istasyonlarda ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri, Şekil 2.22'de; 45° çatı eğimli bina modeli için hesaplanmış yüzey basınç dağılımları, Şekil 2.23'de verilmiştir.

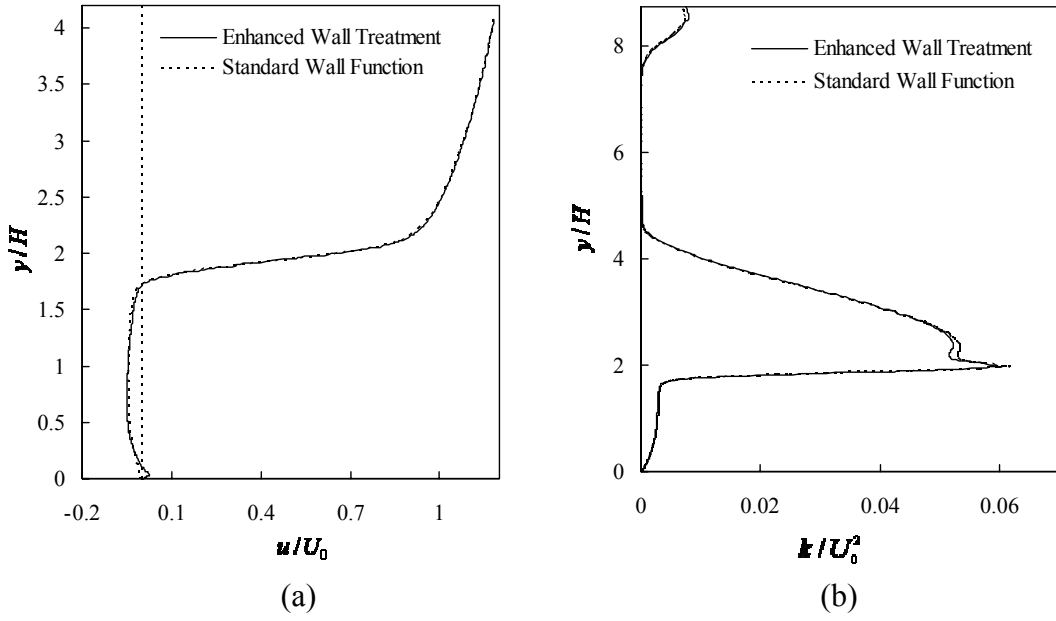


Şekil 2.22. Bina etrafında farklı türbülans modellerinde elde edilen ortalama hız ve türbülans profilleri a) model önünde ortalama hız, b) model önünde türbülans kinetik enerji, c) model arkasında ortalama hız, d) model arkasında türbülans kinetik enerji

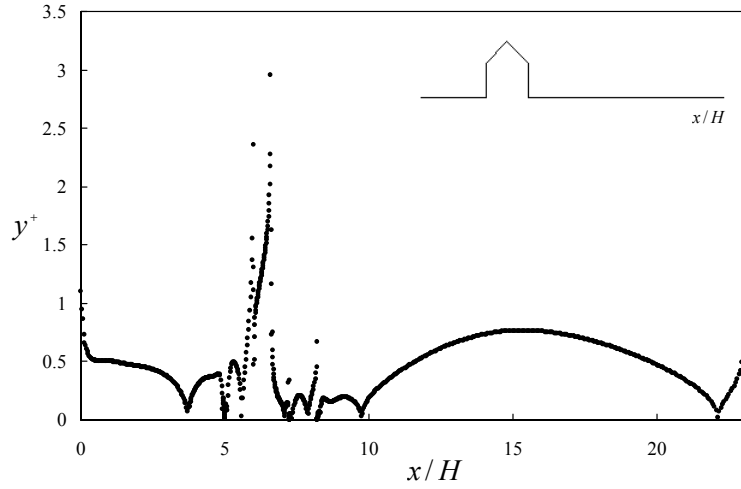


Şekil 2.23. k-ε türbülans modelinin farklı tipleri ile hesaplanmış yüzey basınç dağılımları

Duvar yakınındaki bölgelerde çözüm hassasiyetinin artırılmasına yönelik olarak farklı duvar yaklaşımları denenmiştir. Duvar yaklaşımları, laminer alt tabakanın kalınlığı ile ilgili olarak getirdikleri sınır değerlerle, duvar yakınındaki akışın laminer ya da türbülanslı olarak çözülmesi kabulüne dayanmaktadır. İki boyutlu ağ düzeninde, katı duvardan ilk ağ noktasına olan mesafe, model duvarlarında 0.1 mm; tünel duvarlarında ise, 1 mm olarak alınmıştır. Duvardan itibaren uzaklık, boyutsuz duvar uzunluğu ( $y^+$ ) olarak tanımlanmaktadır. Laminer alt tabaka kalınlığı, standart duvar ifadesinde (standart wall treatment)  $y^+ < 11.5$ ; genişletilmiş duvar ifadesinde (enhanced wall treatment)  $y^+ < 5$  olarak verilmektedir. Bu iki duvar yaklaşımının çözüm üzerindeki etkisi, Şekil 2.24’de verilmiştir. Bina modeli arkasındaki ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profillerinin, her iki duvar yaklaşımı için hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Sayısal çözümlemede tercih edilen genişletilmiş duvar ifadesi ile hesaplanan  $y^+$  nın değişimi Şekil 2.25’de verilmiştir. 80000’lik ağ hücresi ile yapılan çözümde katı duvarlar boyunca ilk ağ noktası için  $y^+ < 5$  durumunun sağlandığı görülmektedir.



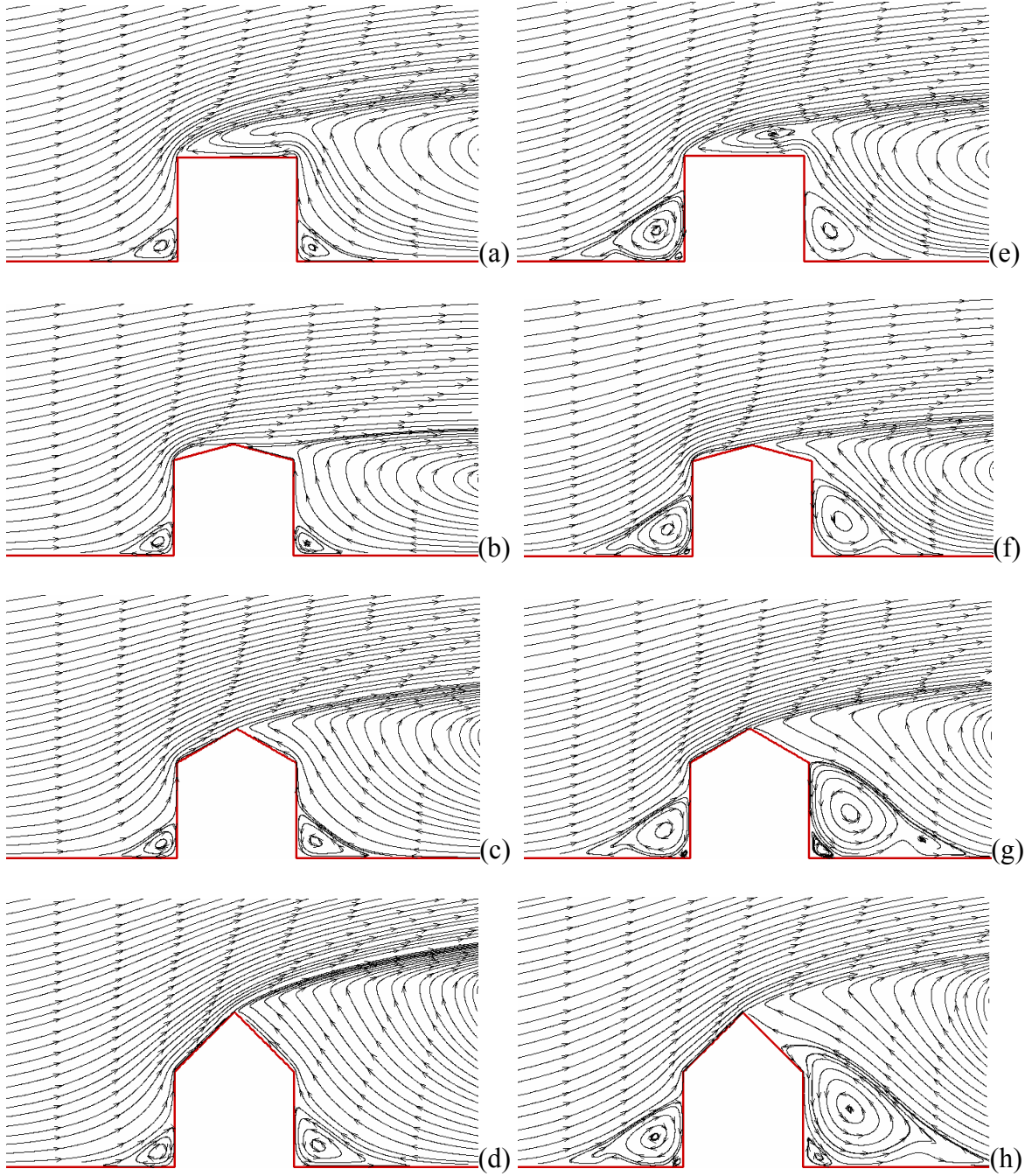
Şekil 2.24. Duvar yaklaşımlarının çözüm üzerindeki etkisi a) ortalama hız, b) türbülans kinetik enerji



Şekil 2.25. Katı duvarlar boyunca  $y^+$  nın değişimi

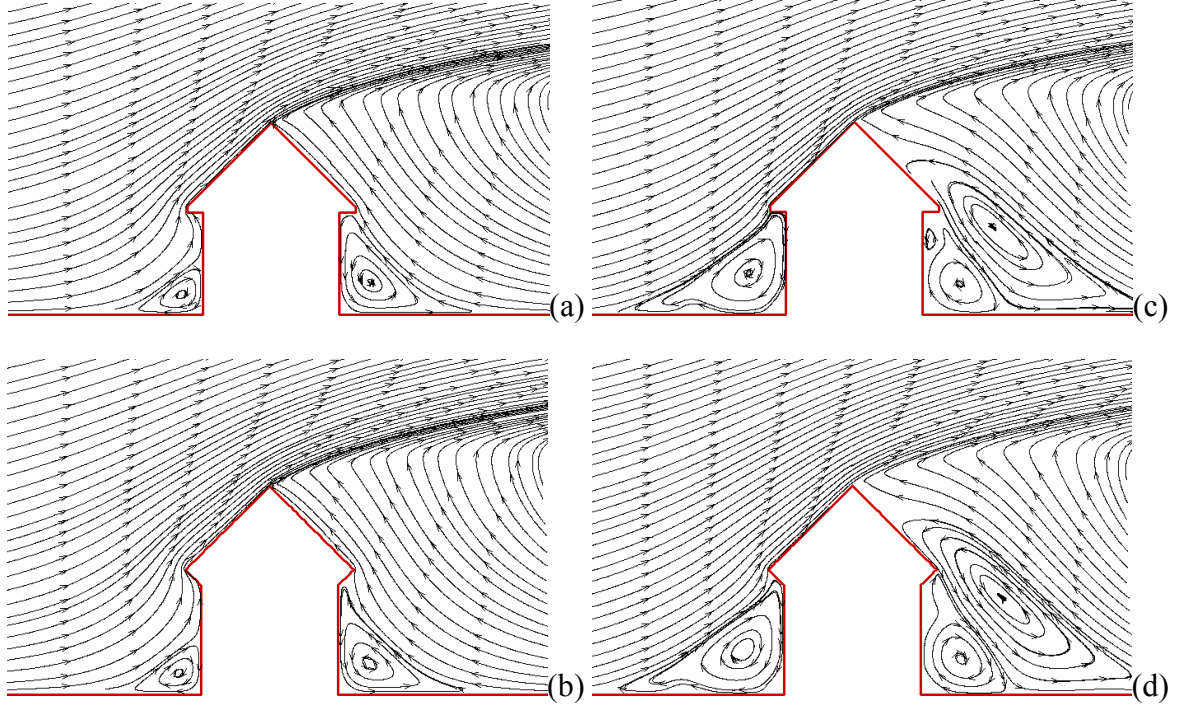
$k-\varepsilon$  türbülans modellerinin çözüm performansına yönelik farklı yaklaşımların değerlendirildiği denemeler,  $k-\omega$  türbülans modelleri için de tekrarlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Farklı çatı eğimlerinde ve iki farklı saçak tipindeki bina modelleri etrafındaki akışta, farklı türbülans modelleri ile hesaplanmış akış alanları akım çizgisi formunda karşılaştırmalı olarak Şekil 2.26 ve 2.27’de verilmektedir.





Şekil 2.26.  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli binalar etrafındaki akış alanları  
a-d) Realizable  $k-\epsilon$  türbülans modeli e-h) Standard  $k-\omega$  türbülans modeli

Şekil 2.26a-d ve Şekil 2.27a-b, Realizable  $k-\epsilon$ ; Şekil 2.26e-h ve Şekil 2.27c-d, Standard  $k-\omega$  türbülans modelleri ile ilgilidir. Çözüm alanının her iki model için hemen hemen aynı olduğu; ancak, Standard  $k-\omega$  türbülans modelinin, ters akış bölgelerini daha belirgin olarak hesapladığı görülmektedir. Ayrıca bu model,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli bina modellerinin arkasında, pek anlamlı olmayan, üç farklı ters akış bölgesi meydana getirmektedir.



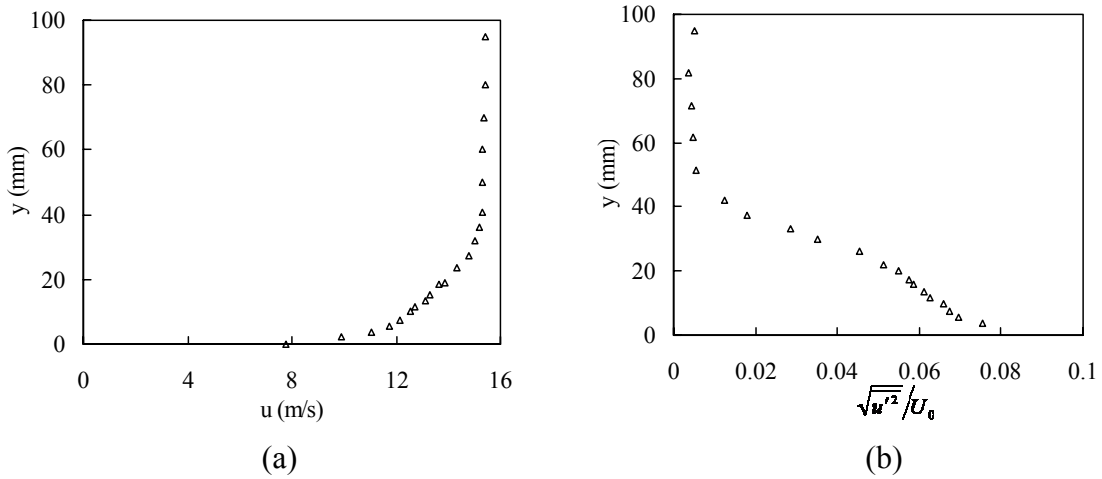
Şekil 2.27. Normal ve yelkiran saçak tipleri için akış alanları  
a-b) Realizable  $k-\varepsilon$  türbülans modeli c-d) Standard  $k-\omega$  türbülans modeli



### 3. BULGULAR

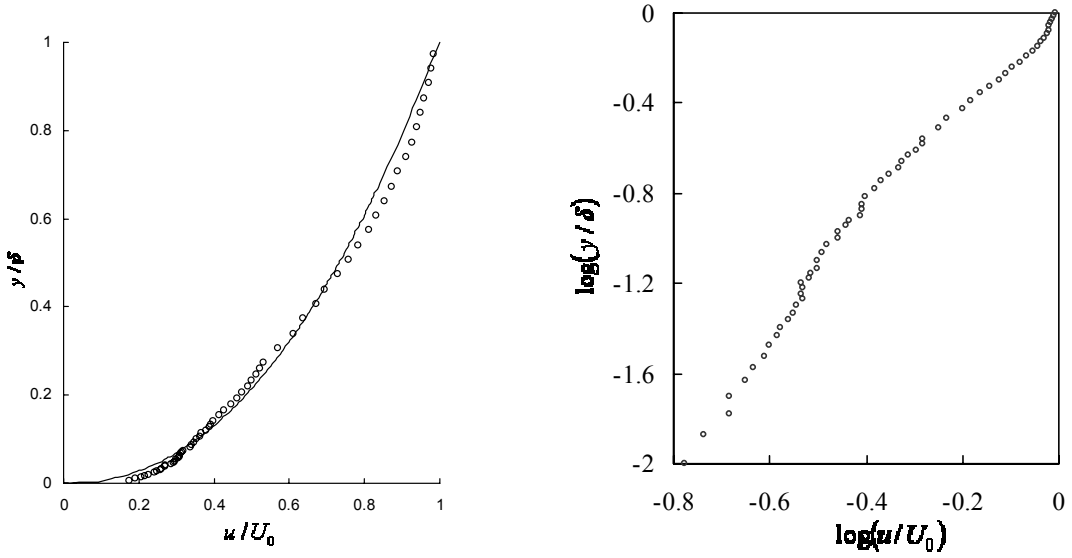
#### 3.1. Referans Sınır Tabaka Karakteristikleri

Bina modelleri etrafındaki akış alanında ortalama hız ve türbülans hız profillerinin belirlenmesi ile ilgili ölçümler, Von Karman Enstitüsü'ndeki L2B rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Atmosferik sınır tabaka akışının benzeşiminden önce, tünel duvarları boyunca doğal olarak gelişen sınır tabakanın mertebesi araştırılmıştır. Tünel çalışma bölgesi başlangıcından itibaren 1465 mm uzaklıkta doğal olarak gelişen sınır tabaka kalınlığı 45 mm olarak ölçülmüş olup, ortalama hız ve türbülans hız profilleri sırasıyla, Şekil 3.1a ve b'de verilmiştir.

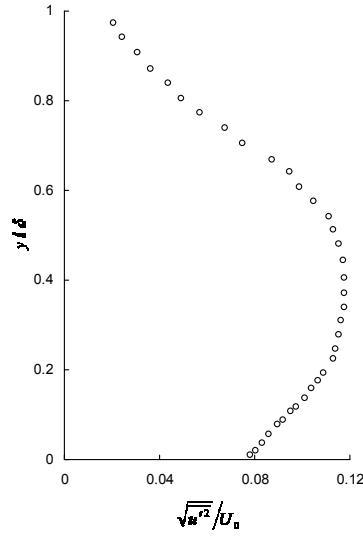


Şekil 3.1. Doğal olarak gelişmiş sınır tabaka hız profilleri a) ortalama, b) türbülans

Counihan [11] yöntemine göre modellenen atmosferik sınır tabaka akışında, tünel çalışma bölgesi başlangıcından itibaren 1465 mm de 150 mm yüksekliğinde sınır tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Serbest akış hızının 15 m/s olarak gerçekleştiği bu istasyonda ölçülen referans sınır tabaka ortalama hız ve türbülans hız profilleri sırasıyla, Şekil 3.2a, b ve Şekil 3.3'de verilmiştir. Referans sınır tabakada en büyük türbülans şiddeti % 12 civarındadır. Referans ortalama hız dağılımının  $\beta=0.4$ 'lük üs kanunu ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

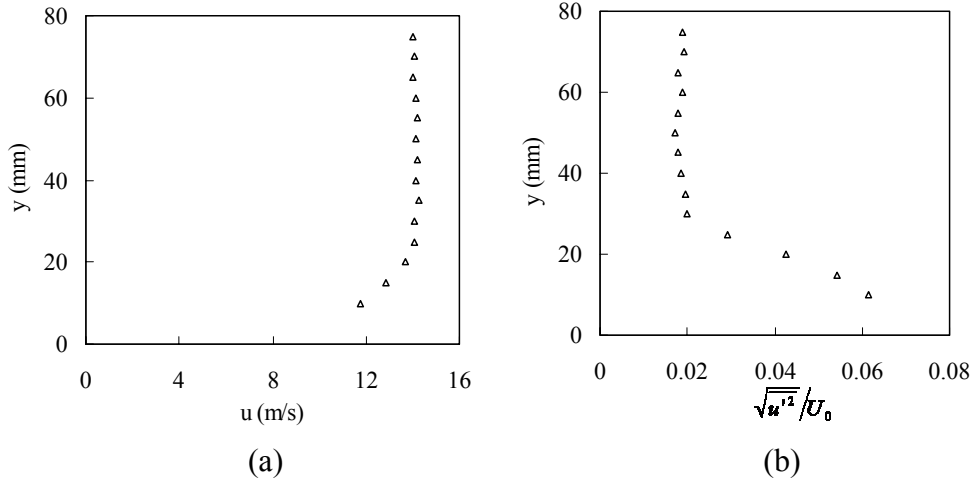


Şekil 3.2. Referans atmosferik sınır tabaka ortalama hız profili



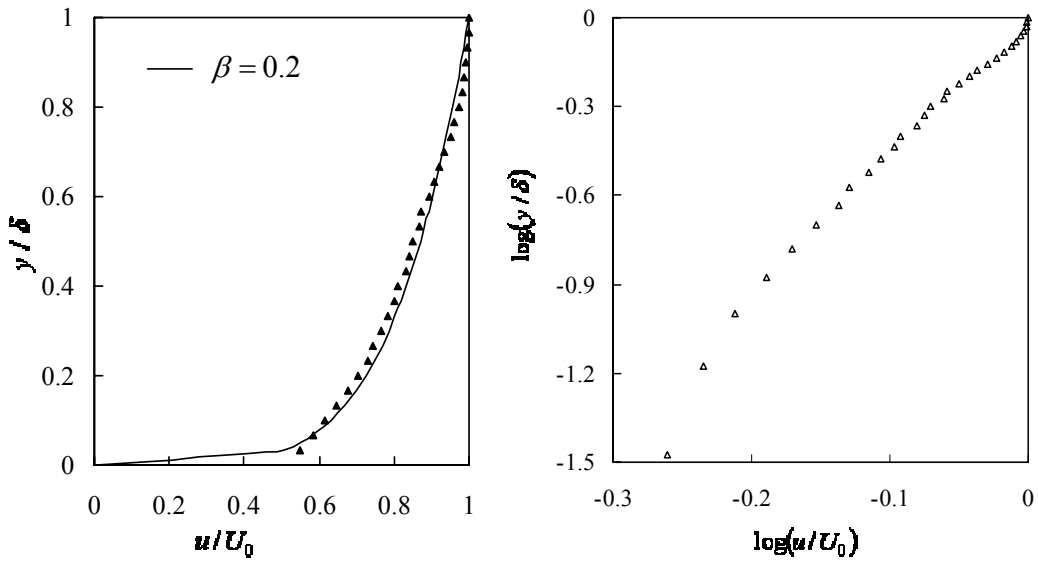
Şekil 3.3. Referans atmosferik sınır tabaka türbülans hız profili

Bina modelleri yüzeyindeki basınç ölçümleri, KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'nde bulunan rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Tünel duvarları boyunca gelişen sınır tabakanın mertebesi belirlenerek modeller etrafındaki akışta meydana getireceği etkiler araştırılmıştır. Tünel çalışma bölgesi başlangıcından itibaren 1760 mm uzaklıkta, doğal olarak gelişen sınır tabakanın kalınlığı 40 mm olarak ölçülmüş olup, ortalama hız ve türbülans hız profilleri Şekil 3.4a ve b'de verilmiştir.

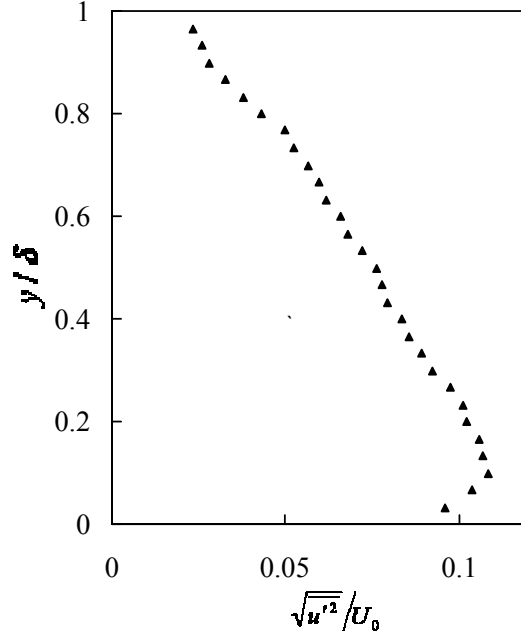


Şekil 3.4 . Doğal olarak gelişmiş sınır tabaka hız profilleri a) ortalama, b) türbülans

Bu tünel akışında da, Counihan'ın [11] yöntemi kullanılarak, tünel çalışma bölgesi başlangıcından itibaren 1760 mm uzaklıkta 150 mm yüksekliğinde atmosferik bir sınır tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Serbest akış hızının 15 m/s olarak gerçekleştiği sınır tabaka akışında referans ortalama hız ve türbülans hız profilleri, Şekil 3.5 ve 3.62'de verilmiştir. Referans sınır tabaka ortalama hız dağılımının  $\beta=0.2$ 'lik üs kanunu ile oldukça iyi bir uyum içinde olduğu ve türbülans şiddetinin duvar yakınında %12'ye kadar ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.5. Tünel akışında referans ortalama hız profili



Şekil 3.6. Tünel akışında referans türbülans hız profili

### 3.2. Akış Görüntülemesi

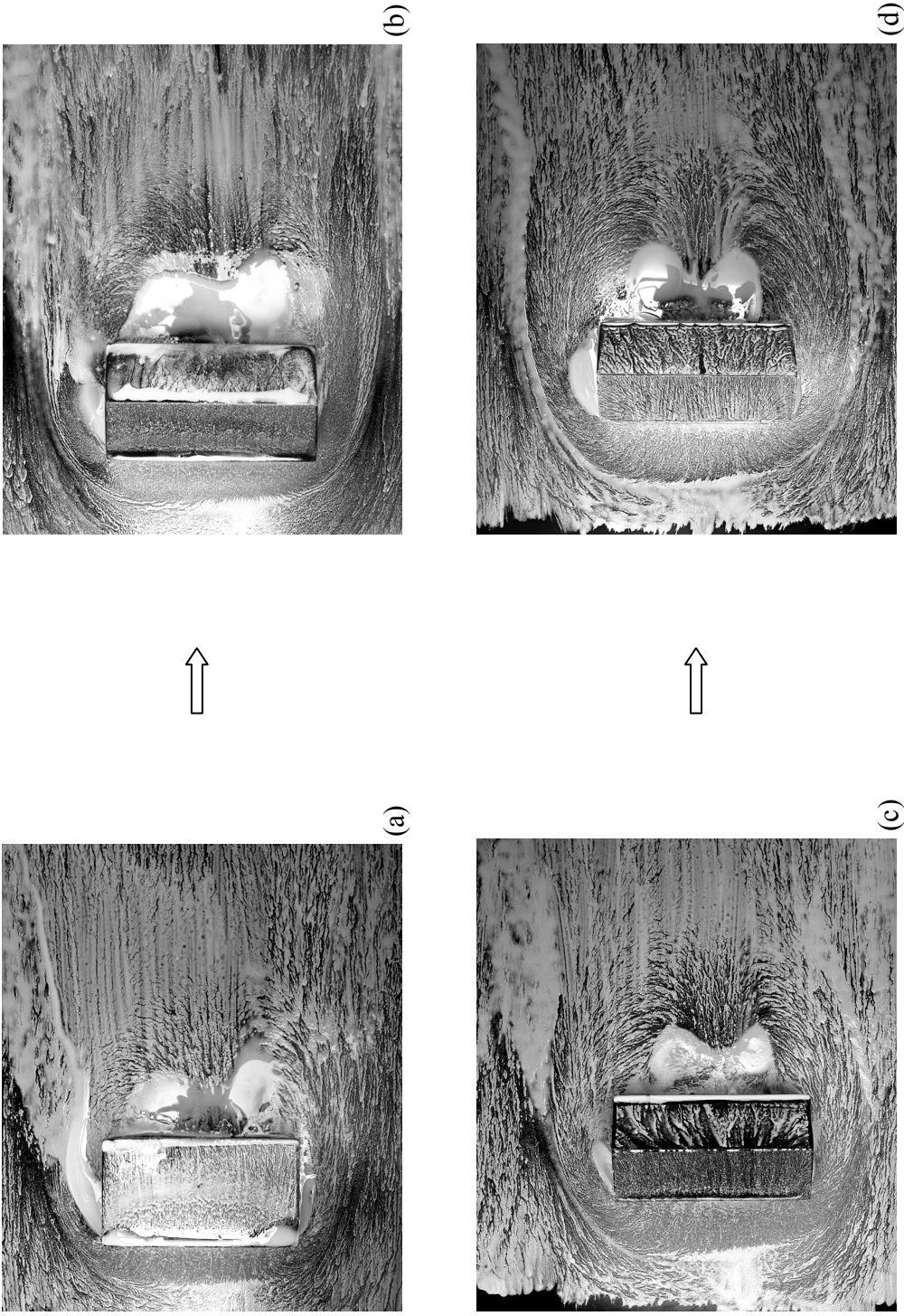
Binalar etrafındaki akış alanında hız, basınç ve türbülans ölçümlerinden önce, akış alanı hakkında ön bilgiler edinebilmek için yağ ve parafin buharı teknikleri kullanılarak akış görüntüleme çalışmaları yapılmıştır. Tünel çalışma bölgesi içine yerleştirilen beşik çatı tipinde ve farklı çatı eğimli modellerin, kendi etraflarında döndürülmesiyle sağlanan değişik rüzgar açılarında fotoğraflar çekilmiştir.

İki farklı rüzgar geliş açısında, düz, 15°, 30° ve 45° çatı eğimli modeller için 15 m/s serbest akış hızında yağ tekniği ile elde edilen yüzey akışı fotoğraflarında, yağ birikmesi sonucu açık renkli olarak gözükken yerler, akış ayrılması ile oluşan ters akış bölgelerini göstermektedir. Resim 3.1'de, 90° rüzgar açısındaki yüzey akış alanlarının fotoğrafları verilmektedir. Düz çatının rüzgar tarafındaki kenarından akışın ayrıldığı ve çatının ortasında tekrar tutunduğu, sonrasında arka taraftaki kenardan tekrar ayrıldığı görülmektedir. Çatı ön köşelerinde ise, ön ve yan kenarlardan ayrılan akışların etkileşimi ile yatay ve düşey doğrultuda dönen daha güçlü farklı ters akış bölgeleri meydana gelmektedir. Ayrıca, modelin yan yüzeylerinden ayrılan akış, modelin arkasında bir girdap çifti oluşturmaktadır (Resim 3.1a). 15° eğimli çatının yüzey akış alanı, Resim 3.1b'de verilmiştir. Çatı ön kenarından ayrılan akış tekrar çatı yüzeyine tutunmaktadır. Çatının arka

bölgesinde, çatı sırtından itibaren ayrılıp tekrar tutunmakta ve arka kenardan tekrar ayrılmaktadır. Resim 3.1c'de verilen  $30^\circ$  eğimli çatıda, ön kenarda küçük bir ters akış bölgesinden hemen sonra akışın tutunduğu, çatı sırtından tekrar ayrılarak tüm arka yüzey boyunca modelin arka tarafına uzanan bir ters akış bölgesinin oluştuğu görülmektedir.  $45^\circ$  eğimli çatıda, ön kenardaki ters akış bölgesi çok daha küçük olmakta, akış, ön yüzeyi takip ederek çatı sırtından ayrılıp modelin arkasına uzanan daha büyük bir girdap meydana getirmektedir (Resim 3.1d).

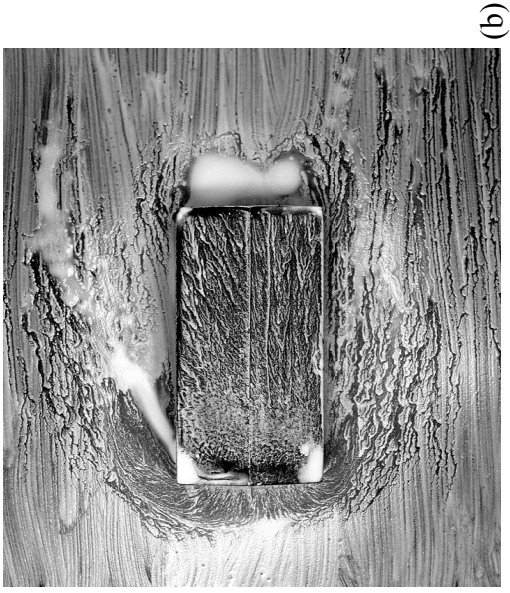
Resim 3.2,  $0^\circ$  rüzgar geliş açısında, aynı çatı eğimleri için yapılan yüzey akışı görüntüleri ile ilgilidir. Düz çatının ön kenarından ayrılan akış, çatı uzunluğunun yaklaşık % 0.22'si kadar bir uzaklıkta çatı üzerinde tekrar tutunmakta ve arka kenardan tekrar ayrılmaktadır. Çatı ön köşelerinde ise, ön ve yan kenarlardan ayrılan akışların etkileşimi ile yatay ve düşey doğrultuda dönen daha güçlü farklı ters akış bölgeleri oluşmaktadır (Resim 3.2a). Resim 3.2b'de verilen  $15^\circ$  eğimli çatıda, düz çatıdakine benzer bir yüzey akış alanının olduğu ve akışın çatı sırtından çatı yan kenarlarına doğru yönlendiği görülmektedir. Model arkasında yan kenarlardan ayrılan akışın oluşturduğu girdap çifti,  $90^\circ$  rüzgar geliş açısına göre daha küçük olmaktadır. Resim 3.2c ve d'de verilen  $30^\circ$  ve  $45^\circ$ 'lik çatılar yüzeyindeki akış alanı büyük ölçüde birbirine benzerdir. Çatı ön köşelerinde oluşan girdaplar, düz ve  $15^\circ$  eğimli çatı durumundaki köşe girdaplarından daha küçük olmaktadır.

$90^\circ$ 'lik rüzgar geliş açısında, düz,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli modeller etrafındaki akış alanının, parafin buharı tekniği kullanılarak çekilen fotoğrafları, Resim 3.3'de verilmiştir. Resim 3.3a'da görülen düz çatılı modele gelen akış, modelin ön kenarından ayrılırken, karışım tabakasının modelin arka kenarına doğru alçaldığı görülmektedir. Model üzerinde ters akışlar nedeniyle periyodik olarak oluşan ve kopan girdaplar, modelin arka tarafında akış boyunca yayılmaktadırlar.  $15^\circ$  çatı eğimli modelin ön kenarından ayrılan akışta karışım tabakası, rüzgar tarafındaki çatı yüzeyine daha yakın oluşmaktadır (Resim 3.3b). Resim 3.3c'de,  $30^\circ$  çatı eğimli modelin çatı sırtından ayrılan akış nedeniyle oluşan ve akış boyunca ilerleyen girdaplar açıkça görülmektedir. Bu girdapların hareketi, aşağı yukarı yönlerde periyodik salınımlar şeklindedir.  $45^\circ$  çatı eğimli modelin rüzgar tarafındaki yüzeyini takip eden akış, çatı sırtından itibaren ayrılmaktadır. Çatının arka tarafındaki karışım tabakası yükselmekte ve modelin arkasında daha büyük bir ters akış bölgesi oluşmaktadır. Ayrıca, modelin ön tarafında zemin yakınında bir girdabın meydana geldiği görülmektedir (Resim 3.3d).

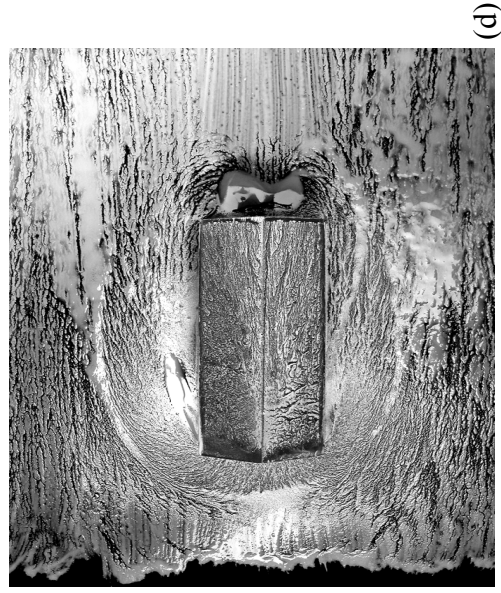


Resim 3.1.  $\theta = 90^\circ$  lık rüzgar geliş açısında yağ tekniği ile elde edilen yüzey akışı fotoğrafları

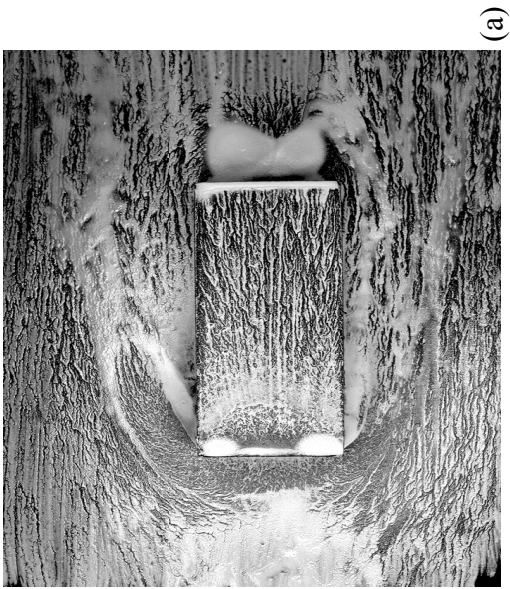
a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$ , c)  $\alpha = 30^\circ$ , d)  $\alpha = 45^\circ$



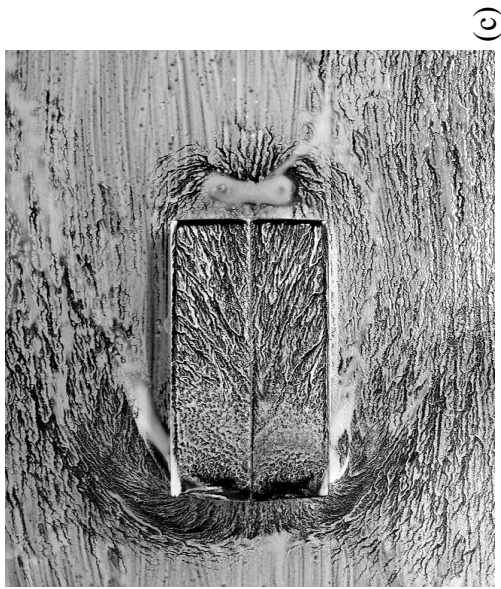
(b)



(d)



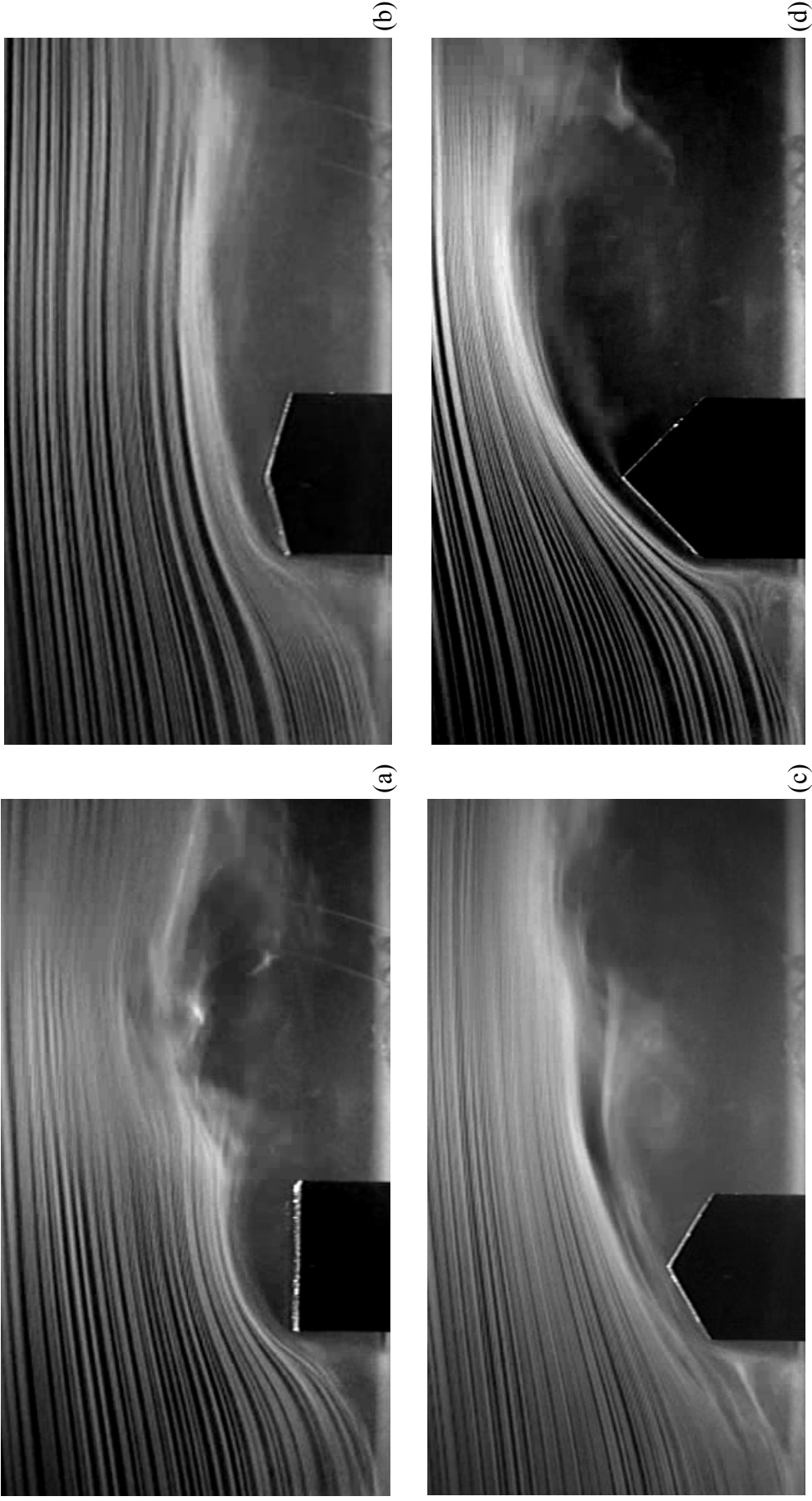
(a)



(c)

Resim 3.2.  $\theta = 0^\circ$  lik rüzgar geliş açısında yağ tekniği ile elde edilen yüzey akışı fotoğrafları

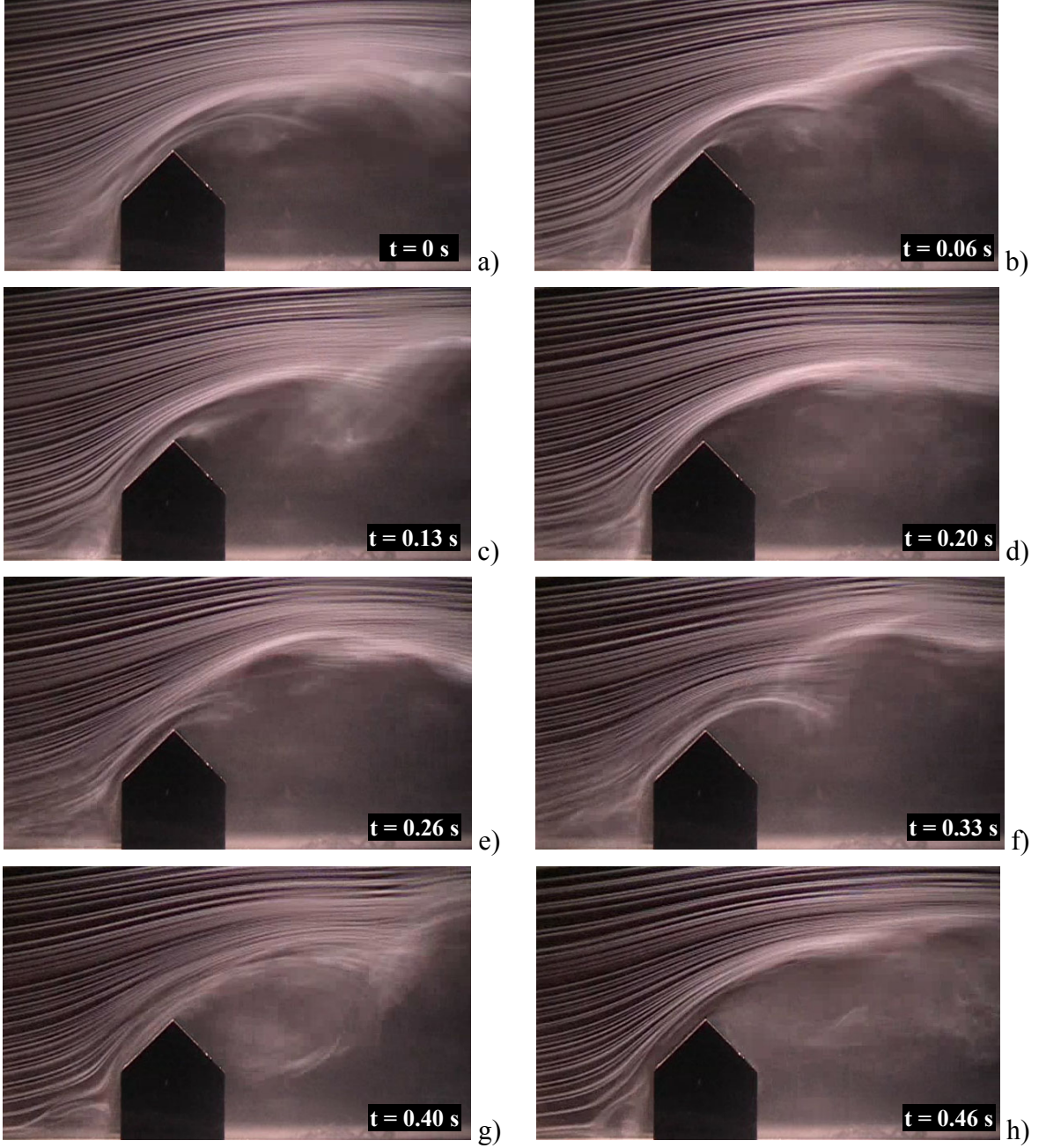
a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$ , c)  $\alpha = 30^\circ$ , d)  $\alpha = 45^\circ$



Resim 3.3.  $\theta = 90^\circ$  lik rüzgar geliş açısında değişik çatı eğimlerinde parafin buharı ile elde edilen akış görüntüleri  
 a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$ , c)  $\alpha = 30^\circ$ , d)  $\alpha = 45^\circ$



90°'lik rüzgar geliş açısında 45° çatı eğimli model etrafındaki akış alanının zamana bağlı görüntüleri, Resim 3.4'de verilmiştir. Video çekiminden elde edilen fotoğraflar, 0.06 ve 0.07 s aralıklarla alınmıştır. Periyodik bir yapısı olan akışın genel davranışı bu geometri için, 0.2 s'de bir tekrarlanmaktadır. Resim 3.4a, b, c ve d'deki 0-20 s zaman aralığındaki görüntüler sırasıyla, Resim 3.4e, f, g ve h'daki 26-46 s zaman aralığındaki görüntülerle çok büyük ölçüde eşleşmektedir.

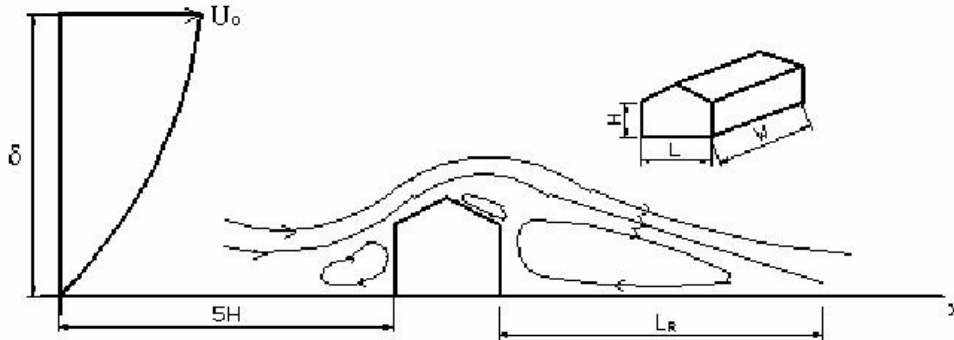


Resim 3.4.  $\theta = 90^\circ$  lik rüzgar geliş açısında 45° çatı eğimli model etrafındaki akış alanının zamana bağlı görüntüleri

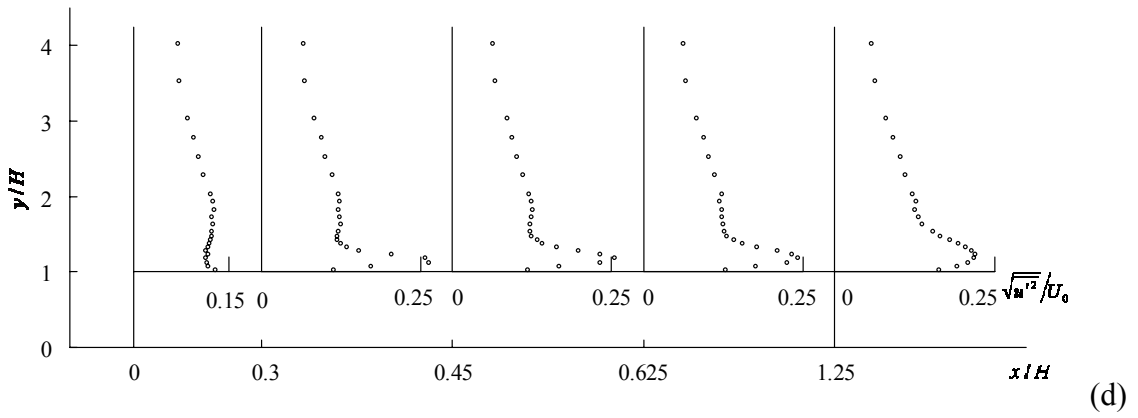
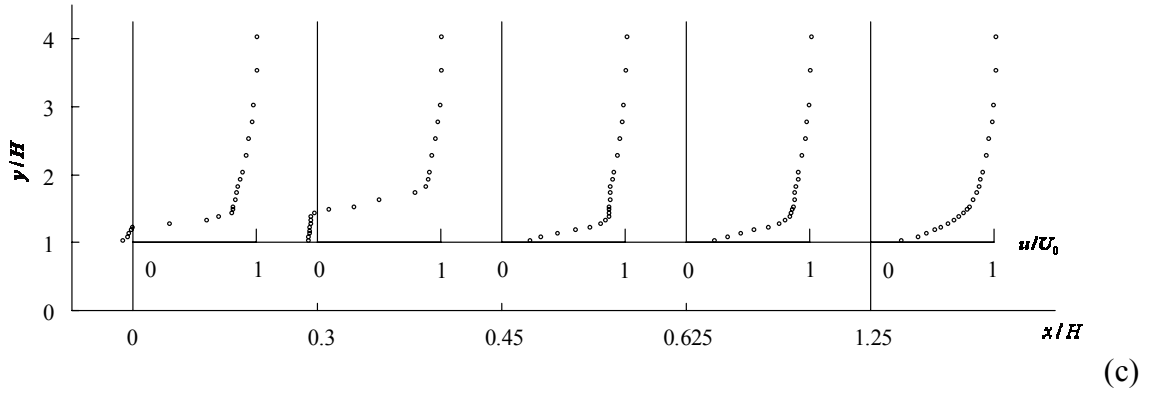
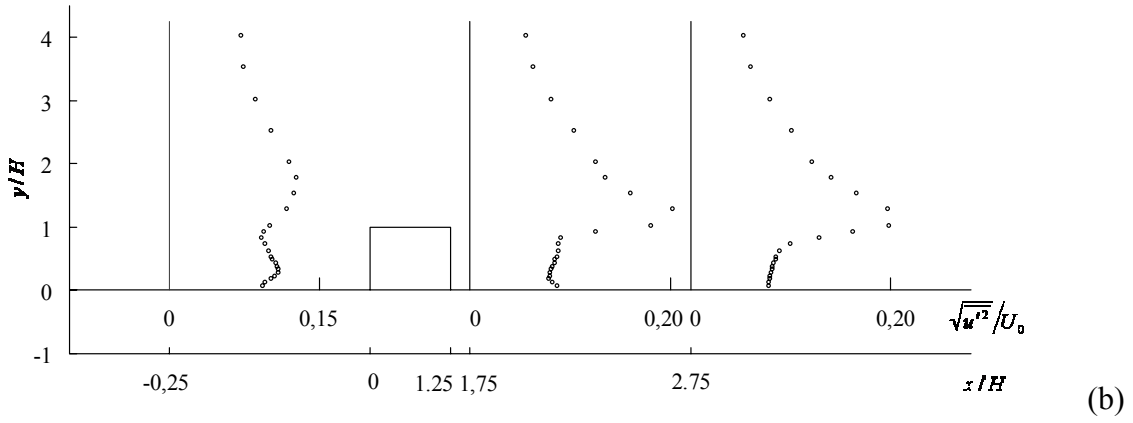
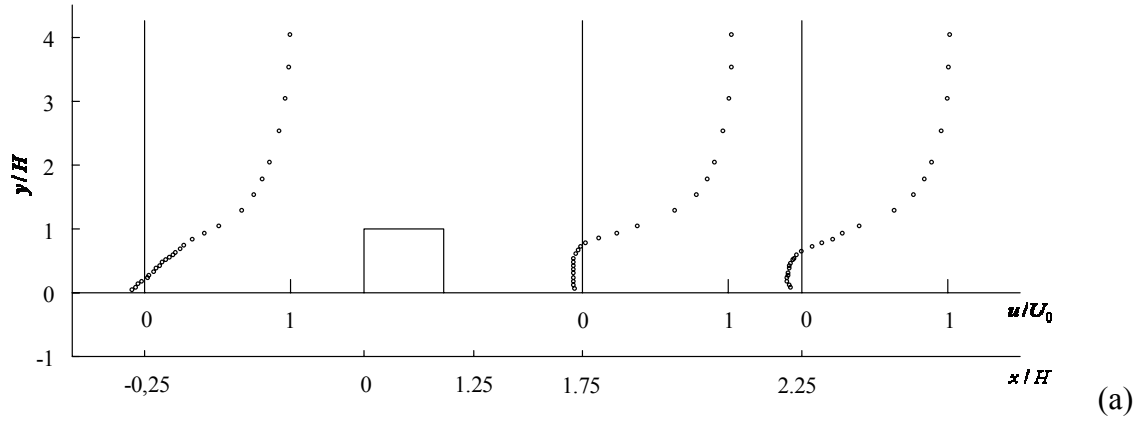
### 3.3. Modeller Etrafındaki Akış Alanında Hız Ölçümleri

Şekil 3.7’de tanımlanan akış alanı geometrisinde,  $\delta$  ve  $H$  sırasıyla, sınır tabaka kalınlığını ve karakteristik model yüksekliğini göstermektedir. Tünel orta eksenine yerleştirilmiş farklı çatı eğimlerdeki tüm modeller için karakteristik model yüksekliği 40 mm’de sabit tutulmuş ve referans sınır tabaka ile modeller arası mesafe  $5H$  olarak alınmıştır. Referans sınır tabakanın modelin varlığından etkilenmemesi için, bu mesafenin en az  $3H$  olması gerektiği ifade edilmektedir [94]. Model yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı  $3.82 \cdot 10^4$  ve  $\delta/H$  oranı 3.75 dir. Yatay ve dikey koordinatlar,  $x$  ve  $y$ , karakteristik model yüksekliği  $H$  ile boyutsuz yapılmış, modelin sol alt kenarı orijin olarak seçilmiştir. Hız profili ölçümleri  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  eğimli beşik çatılı modellerin orta eksen ve çatı kenarları boyunca  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ ’lik rüzgar açıları yapılmıştır.

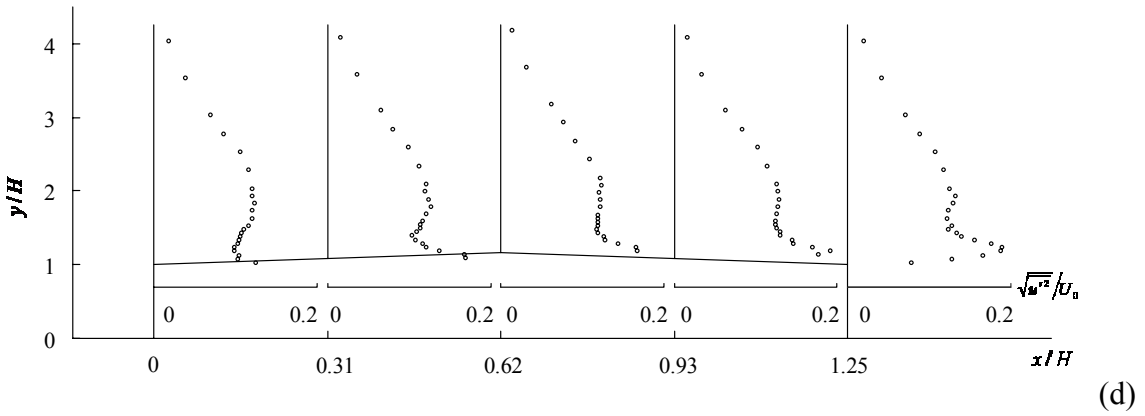
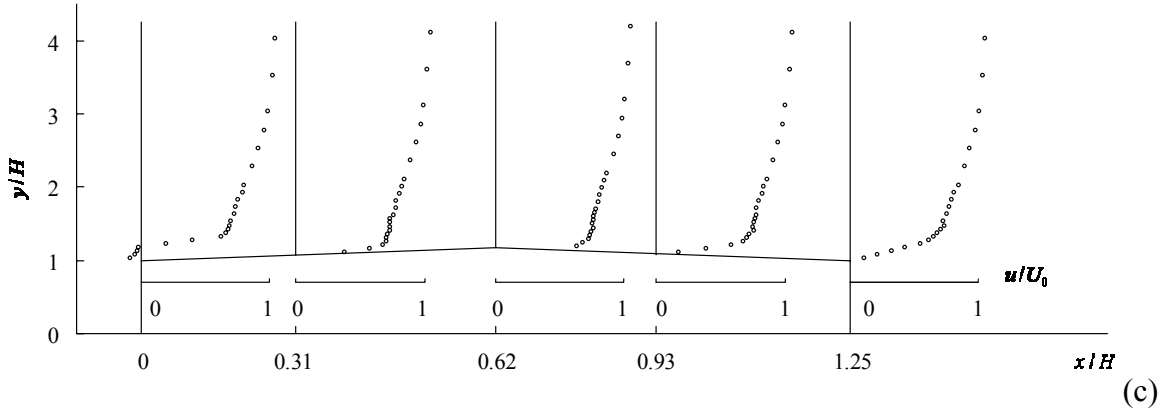
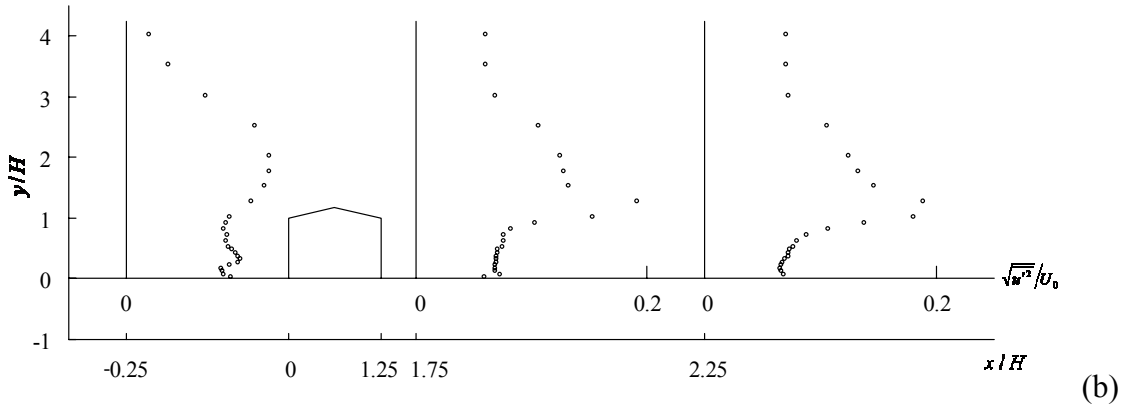
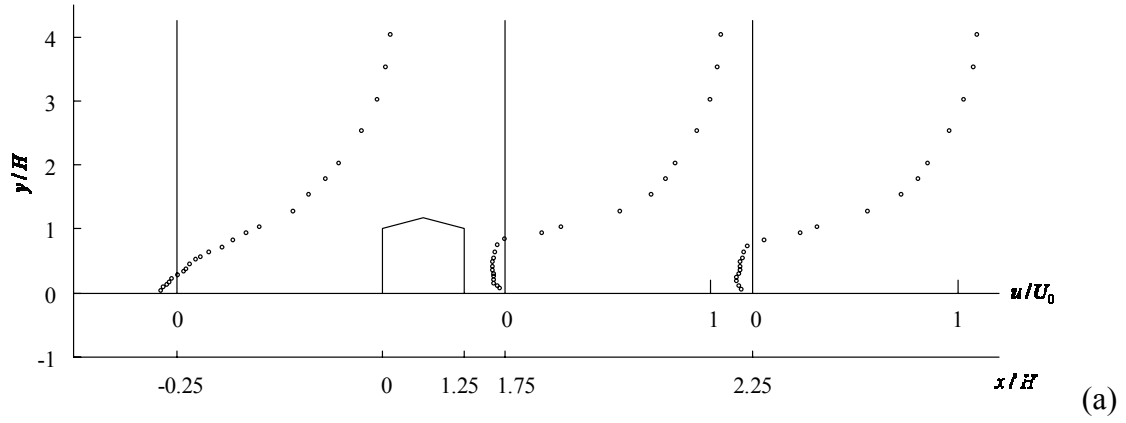
Şekil 3.8,  $90^\circ$  rüzgar açısında, düz çatılı model etrafında orta eksen boyunca değişik istasyonlarda ölçülen ortalama hız ve türbülans profillerini göstermektedir. Şekil 3.8a’da verilen ortalama hız profillerinden; modelin hemen önünde küçük bir ters akış bölgesinin, arka tarafta ise, model yüksekliği seviyesinde daha büyük bir ters akış bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Aynı istasyonlardaki türbülans profilleri incelendiğinde, türbülans şiddetinin model yüksekliği seviyesinde aldığı en büyük değerler, serbest akış ve ters akış bölgesi arasındaki kayma tabakasının varlığını desteklemektedir (Şekil 3.8b). Şekil 3.8c’deki çatı üzerindeki ortalama hız profillerinden, akışın çatı ön kenarından ayrılarak bir ters akış bölgesinin meydana geldiği ve yaklaşık  $0.45H$  civarında tekrar tutunduğu görülmektedir. Çatı yüzeyi yakınındaki türbülans şiddeti değerleri, referans sınır tabaka değerinin yaklaşık iki katına ulaşmaktadır (Şekil 3.8d).



Şekil 3.7. Akış alanı geometrisi



Şekil 3.8.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri



Şekil 3.9.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri

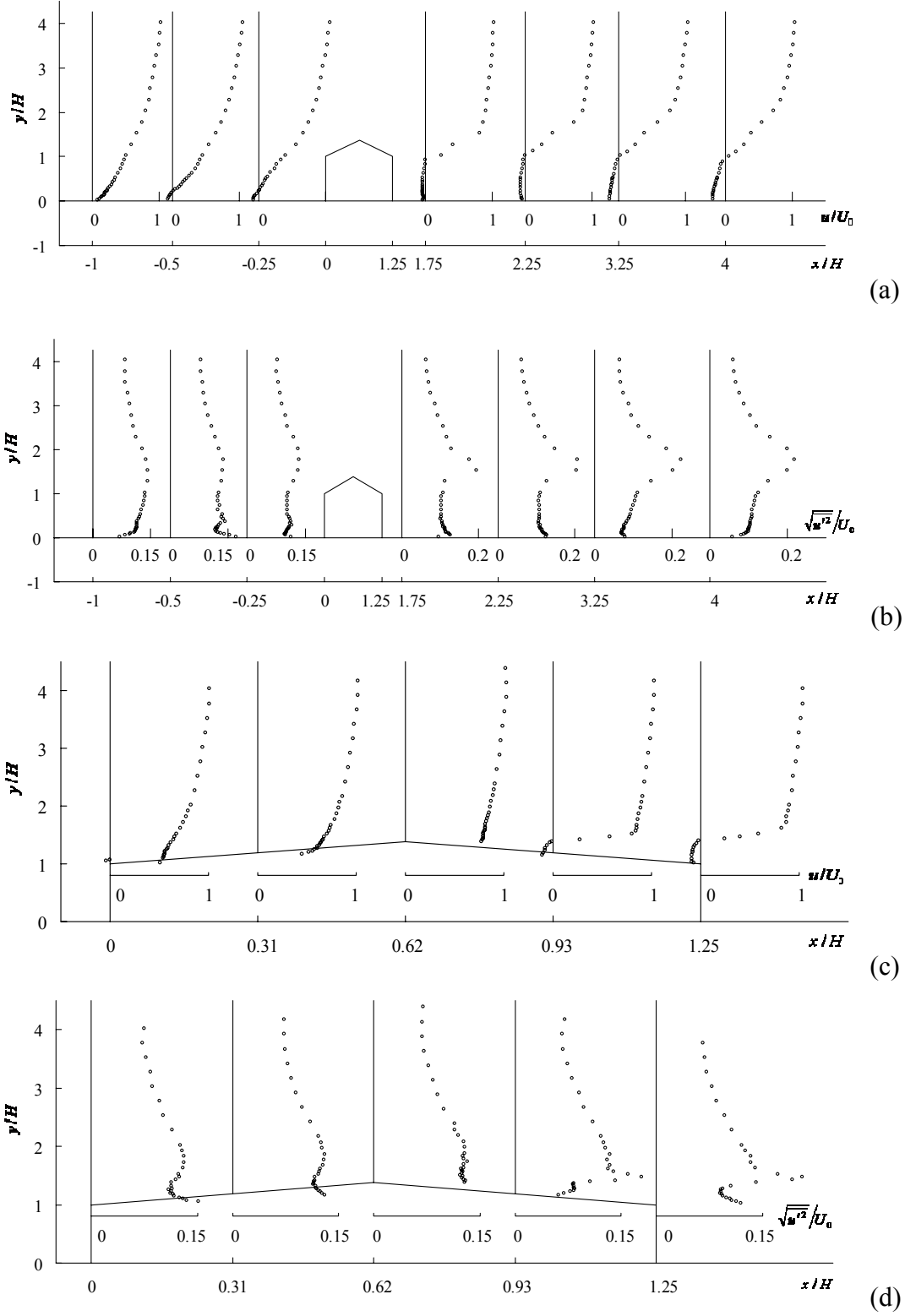
Şekil 3.9'da,  $90^\circ$  rüzgar açısında,  $15^\circ$  çatı eğimli model etrafında orta eksen boyunca değişik istasyonlarda ölçülen ortalama hız ve türbülans profilleri verilmiştir. Modelin ön ve arkasındaki akış alanı, düz çatılı modeldeki duruma benzer şekildedir (Şekil 3.9a ve b). Şekil 3.9c ve d'den, çatı ön kenarından ayrılan akışın oluşturduğu ters akış bölgesinin düz çatıya oranla daha küçük olduğu ve türbülans seviyelerinin çatının arka tarafına doğru gittikçe arttığı görülmektedir.

Şekil 3.10'da,  $90^\circ$  rüzgar açısında,  $30^\circ$  çatı eğimli model etrafında orta eksen boyunca değişik istasyonlarda ölçülen ortalama hız ve türbülans profilleri verilmektedir. Modelin ön ve arkasındaki akış alanı,  $15^\circ$  eğimli çatı modelindeki duruma benzer şekildedir (Şekil 3.10a). Çatının ön tarafında düşük olan türbülans şiddeti, çatının arka tarafında, serbest akış ve ters akış bölgesi arasındaki kayma tabakası boyunca en büyük değerlere erişmektedir (Şekil 3.10b). Şekil 3.10c'deki ortalama hız dağılımlarından, çatının rüzgar tarafındaki yüzeyi boyunca herhangi bir akış ayrılmasının olmadığı görülmektedir. Çatının arka bölgesinde ise, çatı sırtından hemen sonra akış ayrılmakta ve tekrar tutunmamaktadır Aynı bölgelerdeki türbülans şiddeti değerlerinde artışlar oluşmaktadır ( Şekil 3.10d).

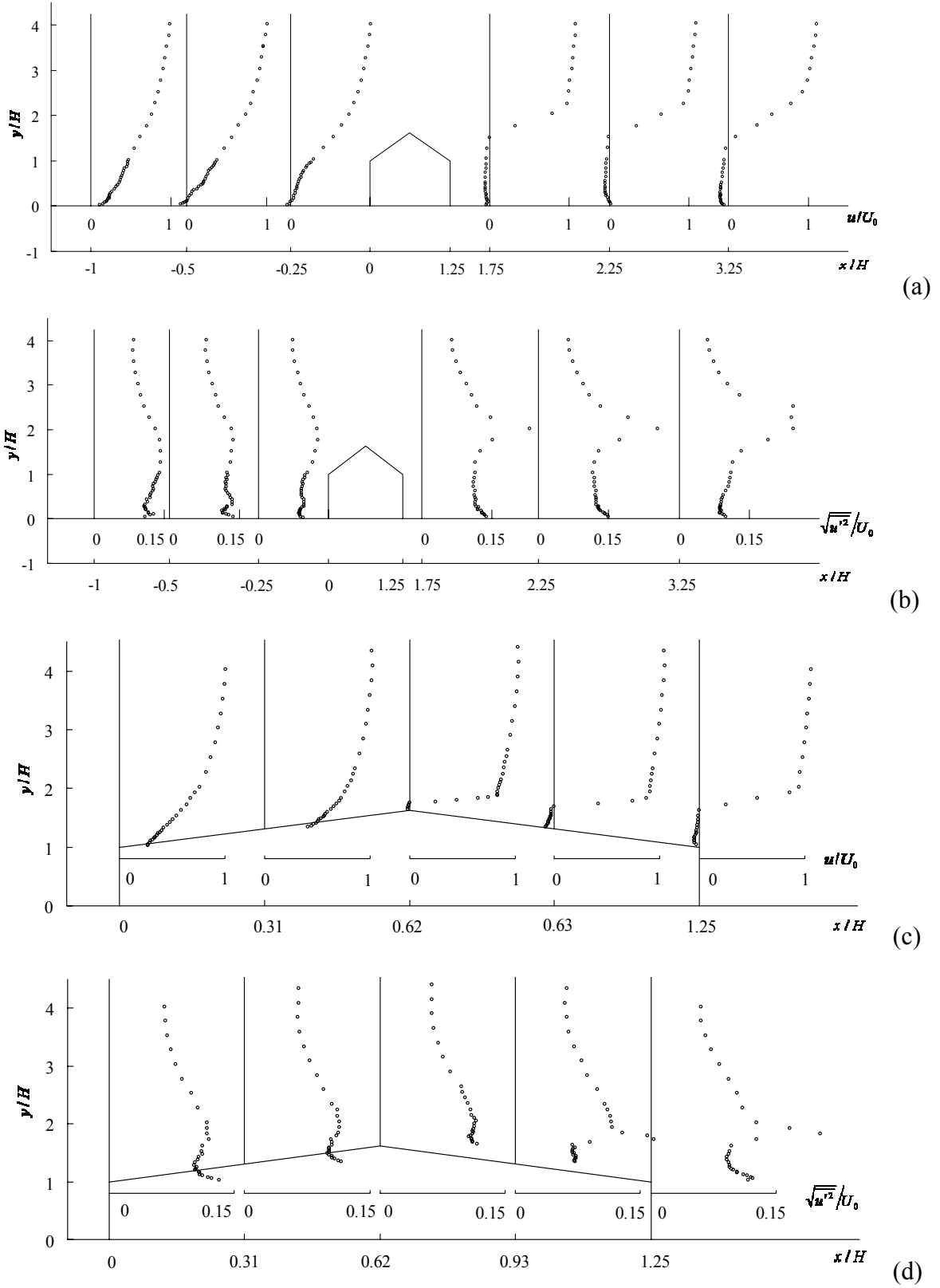
Şekil 3.11'de,  $90^\circ$  rüzgar açısında,  $45^\circ$  çatı eğimli model etrafında orta eksen boyunca değişik istasyonlarda ölçülen ortalama hız ve türbülans profilleri verilmektedir. Şekil 3.11a ve b'den, model arkasında diğer çatı eğimlerine göre daha büyük bir ters akış bölgesinin meydana geldiği, türbülans şiddetinin arttığı karışım bölgesinin daha yukarılarda olduğu görülmektedir. Çatının rüzgar tarafındaki bölgesinde akış ayrılması olmayıp, arka bölgesinde çatı sırtından itibaren ayrılma başlamaktadır (Şekil 3.11c). Çatının ön tarafında düşük olan türbülans şiddeti, çatının arka tarafında, serbest akış ve ters akış bölgesi arasındaki kayma tabakası boyunca en büyük değerlere erişmektedir (Şekil 3.11d).

$90^\circ$ lik rüzgar geliş açısında, düz,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli modellerin çatılarının köşelerinde ölçülen ortalama hız ve türbülans profilleri, Şekil 3.12 ve 3.15'de verilmiştir. Ortalama hız profilleri incelendiğinde; düz ve  $15^\circ$ lik çatı eğimlerinde rüzgar tarafındaki çatı köşelerinde ters akış bölgelerinin olduğu, arka taraftaki köşelerde ise bu bölgelerin olmadığı görülmektedir (Şekil 3.12a ve 3.13a).  $30^\circ$  ve  $45^\circ$ lik çatı eğimlerinde ise, ters akış bölgeleri çatının arka tarafındaki köşelerde meydana gelmektedir (Şekil 3.14a ve 3.15a). Şekil 3.12b ve 3.15b'de verilen türbülans hızı profilleri, çatı köşeleri yakınındaki ters akış bölgelerinde türbülans şiddetinin yüksek değerler aldığı göstermektedir. Ayrıca, çatı köşelerindeki ortalama ve türbülans hızı profillerinin, model orta eksenini boyunca çatı

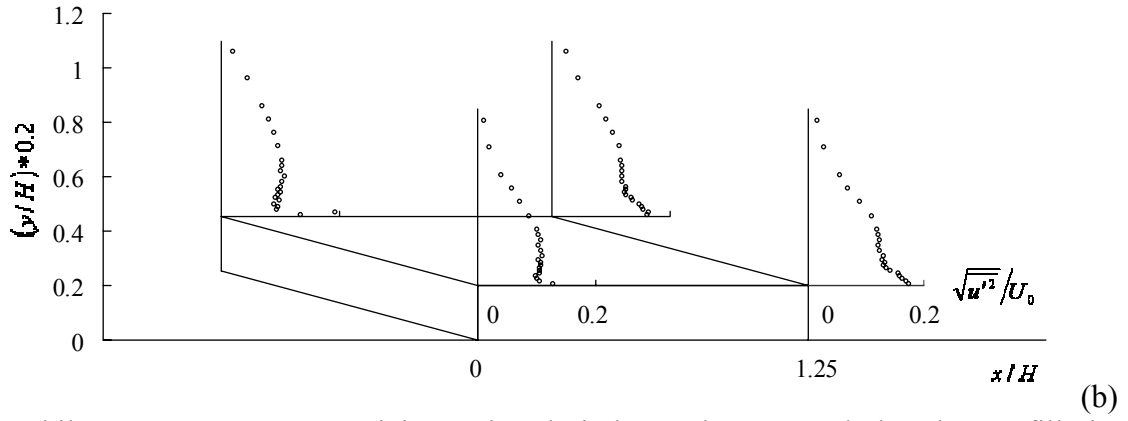
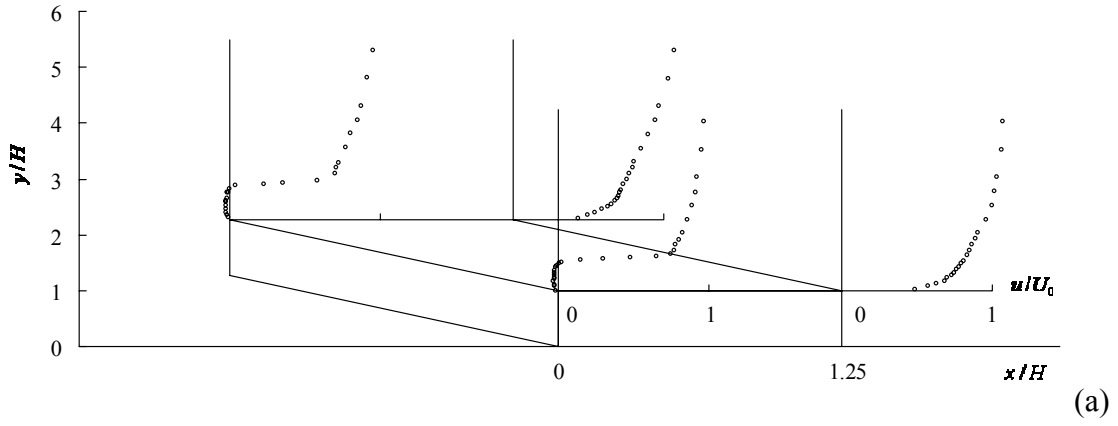
kenarlarında ölçülen ve Şekil 3.8c,d-3.11c,d’de verilmiş olan ortalama hız ve türbülans hızı profilleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir.



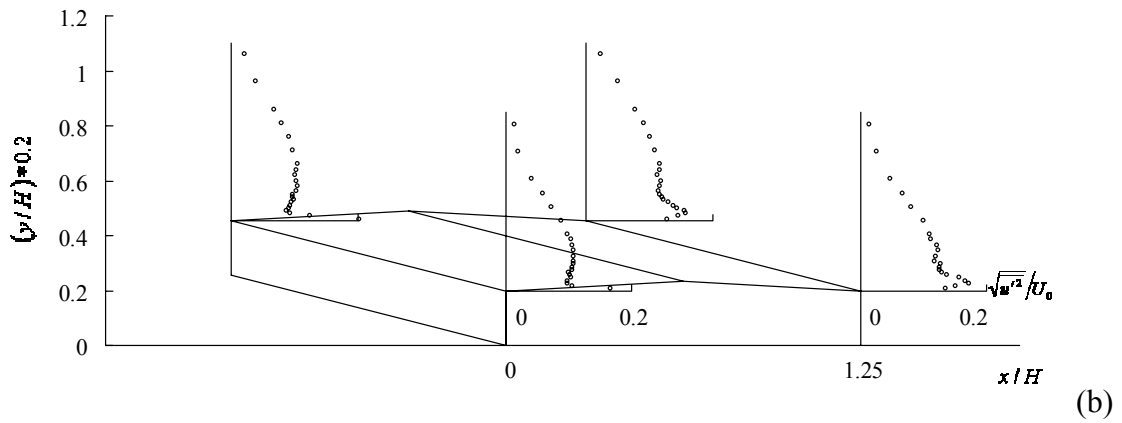
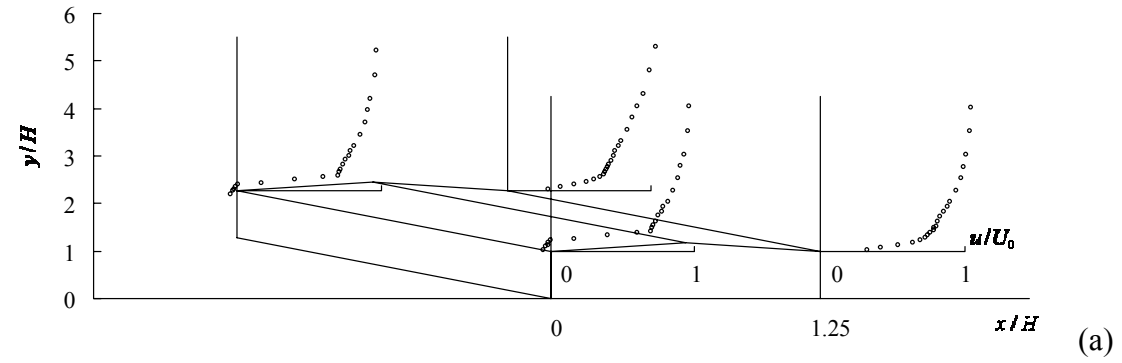
Şekil 3.10.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri



Şekil 3.11.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model etrafında orta eksen boyunca ortalama hız ve türbülans hızı profilleri

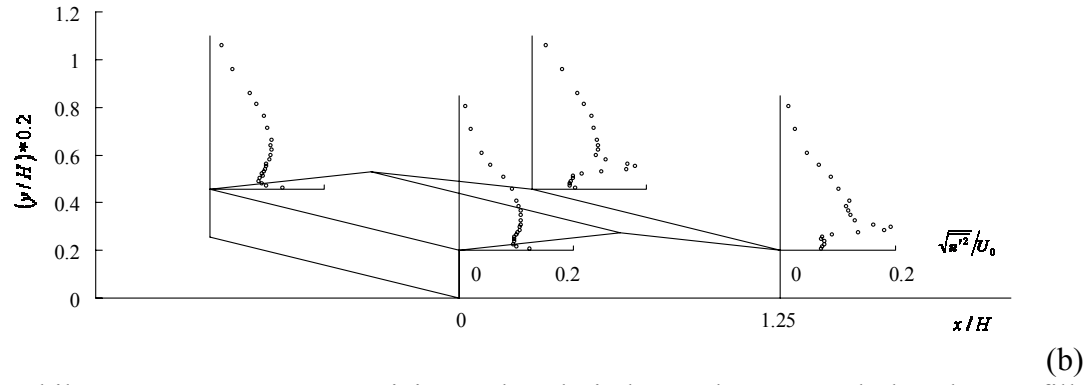
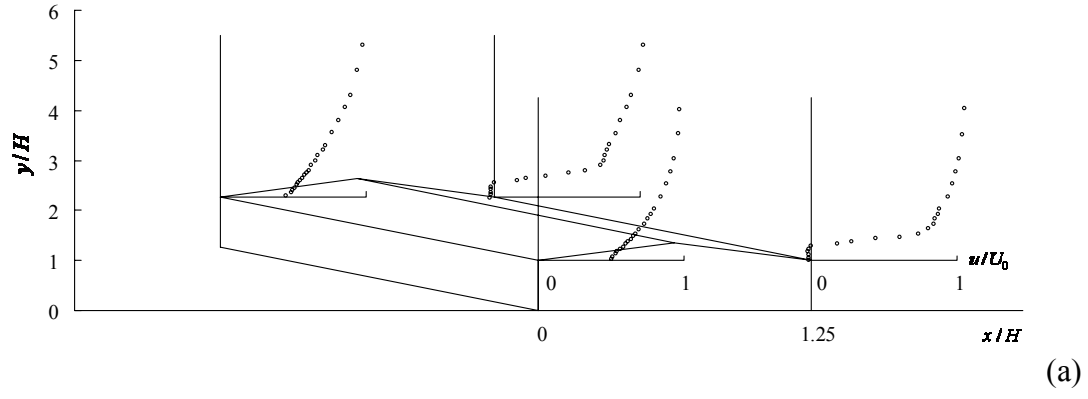


Şekil 3.12.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri

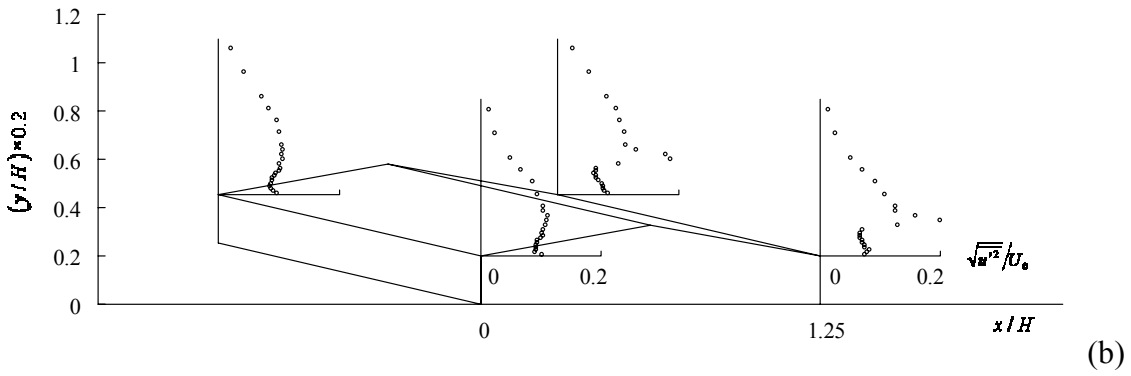
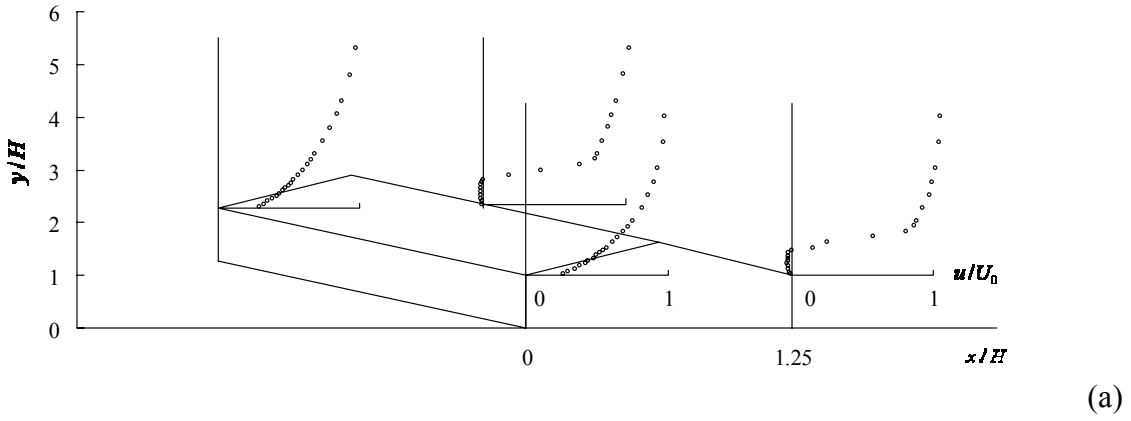


Şekil 3.13.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri





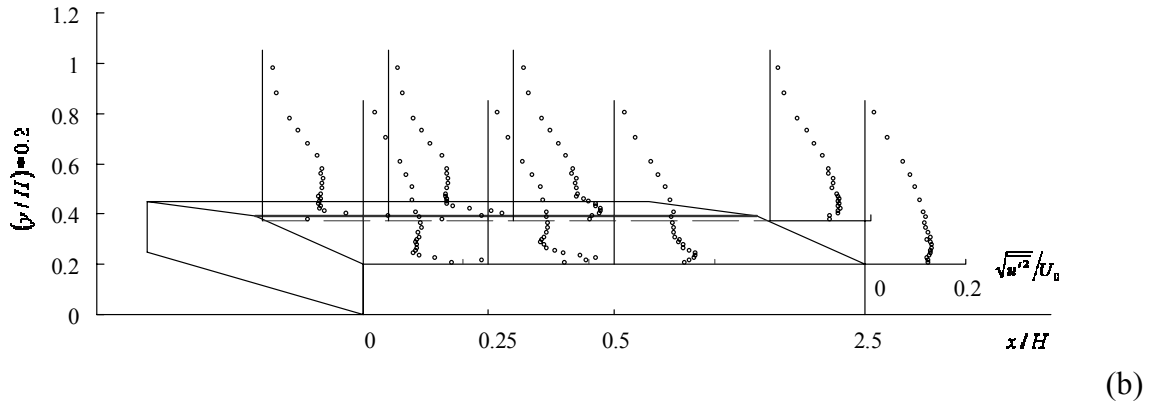
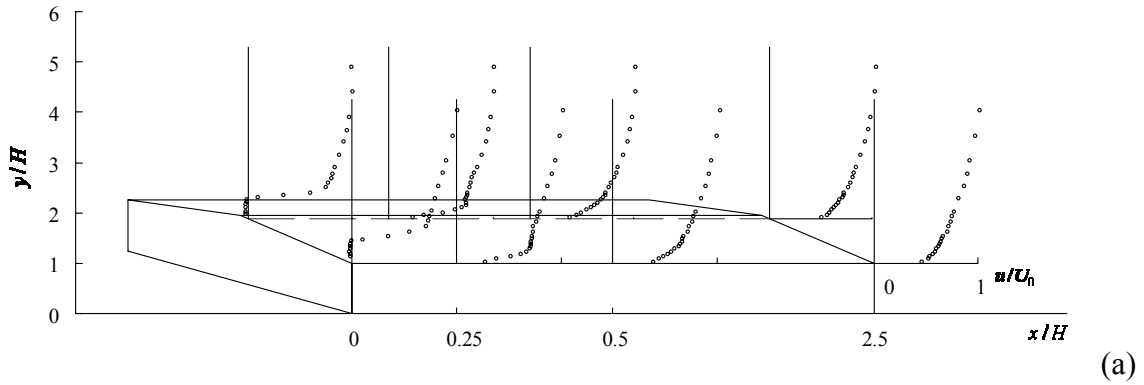
Şekil 3.14.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri



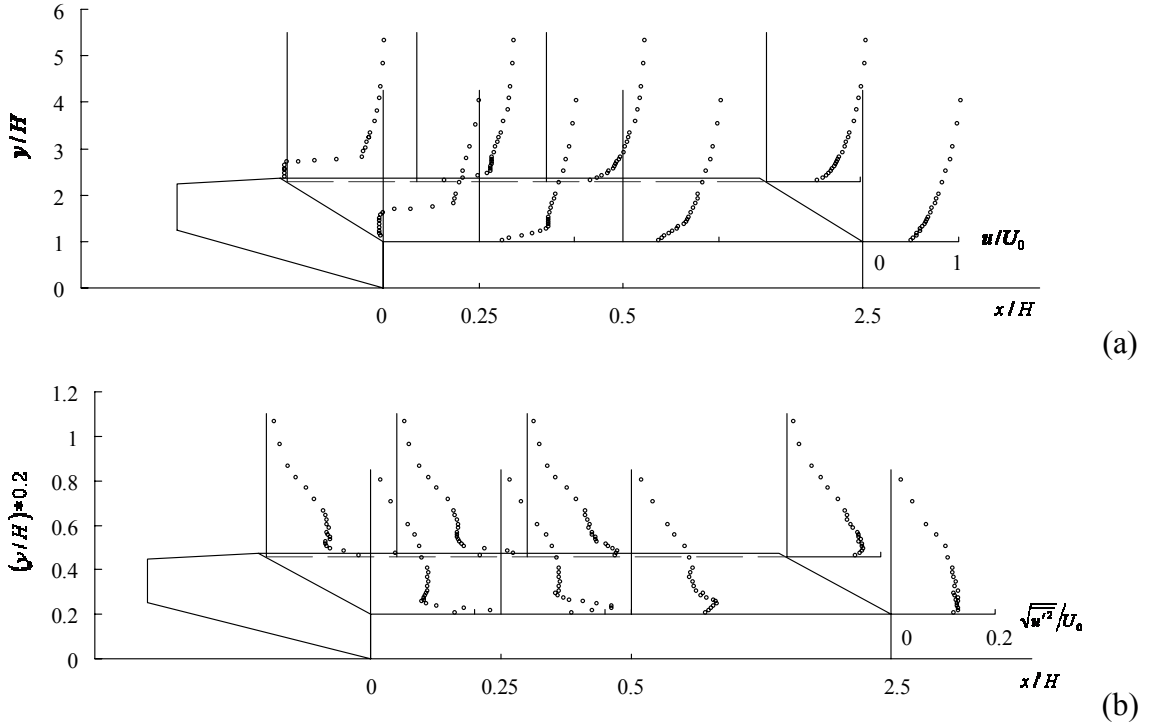
Şekil 3.15.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için çatı köşelerinde ortalama ve türbülans hız profilleri

45°'lik rüzgar geliş açısında, aynı çatı eğimleri için model orta eksenleri boyunca ölçülen ortalama hız ve türbülans hız profilleri, 90°'lik rüzgar geliş açısında yapılmış ölçümlerle benzerlik göstermektedir.

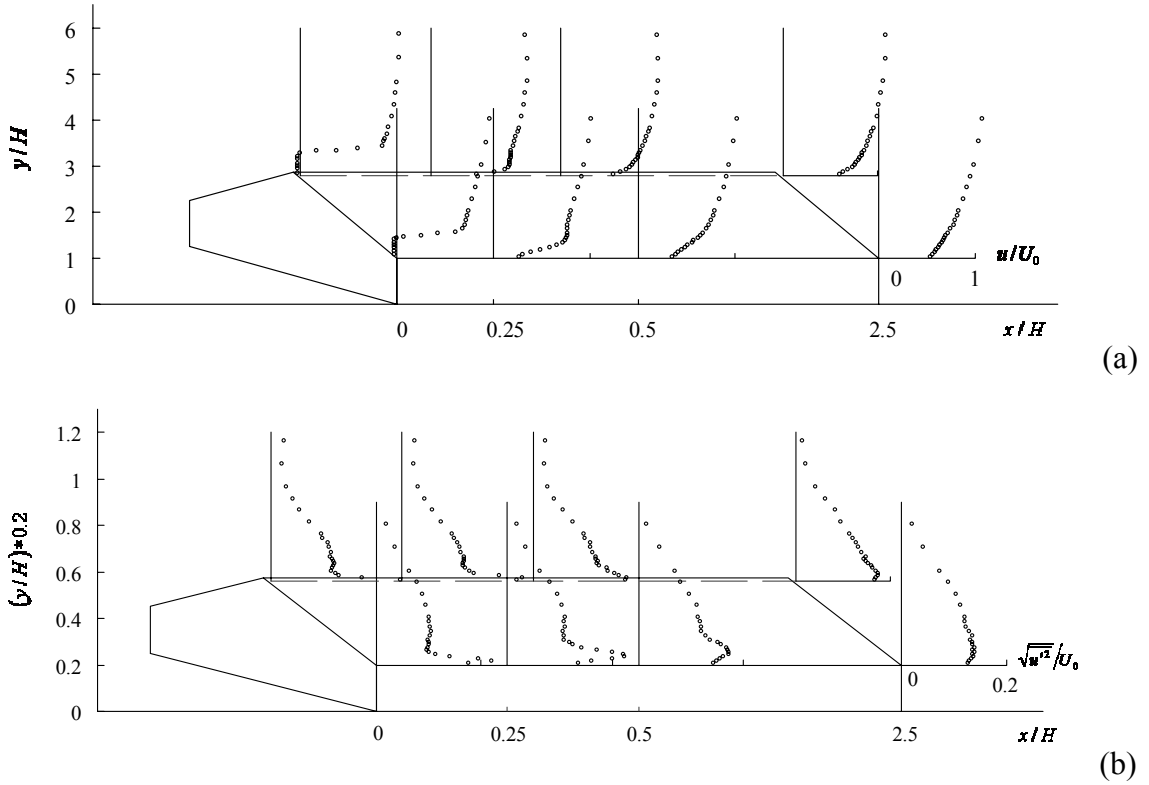
0° rüzgar geliş açısında, çatı sırtı ve çatı kenarları boyunca değişik istasyonlarda ölçülen ortalama ve türbülans hızları, 15°, 30° ve 45°'lik çatı eğimleri için sırasıyla, Şekil 3.16, 3.17 ve 3.18'de verilmektedir. Şekil 3.16a, 3.17a ve 3.18a'daki ortalama hız profillerinden, akışın çatının rüzgar tarafındaki yan kenarından ayrılarak küçük bir ters akış bölgesinin meydana geldiği ve yaklaşık 0.25H civarında bir uzaklıkta tekrar tutunduğu görülmektedir. Türbülans şiddeti çatı yan kenarından itibaren 0.25H civarında en büyük değerlerini almakta ve daha sonra çatının arka yan kenarına doğru azalmaktadır. Çatı sırtı boyunca türbülans şiddeti en büyük değerlerini çatı yüzeyi yakınında alırken, çatı kenarı boyunca en büyük değerler çatı yüzeyinden yaklaşık 0.2 H yükseklikte oluşmaktadır (Şekil 3.16b, 3.17b ve 3.18b). Bu bulgulardan, 0° lik rüzgar geliş açısında çatı üzerindeki akış alanının çatı eğiminden büyük ölçüde etkilenmediği görülmektedir.



Şekil 3.16.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için çatı sırt ve kenarları boyunca ortalama ve türbülans hız profilleri



Şekil 3.17.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için çatı sırt ve kenarları boyunca ortalama ve türbülans hız profilleri



Şekil 3.18.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için çatı sırt ve kenarları boyunca ortalama ve türbülans hız profilleri

### 3.4. İki Nokta Arasında Kros Korelasyon

Çalışmanın bu kısmında referans sınır tabakadaki hız çalkantıları ile çatı üzerindeki hız çalkantıları arasındaki korelasyon (ilişki) araştırılmıştır. Kızgın tel problemlerinin biri referans sınır tabakada model yüksekliği seviyesinde sabit tutulurken, diğeri model çatıları üzerinde değişik yatay istasyonlarda düşey doğrultuda hareket ettirilmiştir.

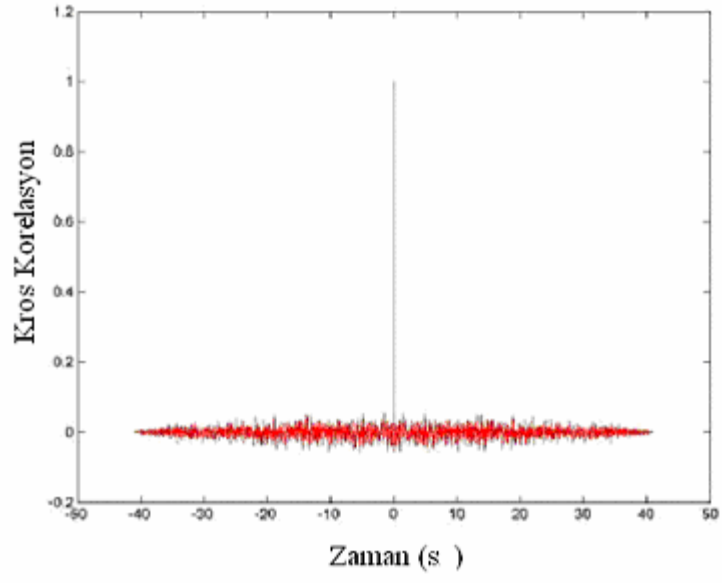
$X_1(t)$  ve  $X_2(t)$  şeklindeki iki sinyal grubu arasındaki lineer kros korelasyon,  $t_f$  veri toplama süresinin yarısını göstermek üzere, aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$R_{12}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{t_f} X_1(t)X_2(t+\tau)}{\left( \left[ \sum_{i=1}^{t_f} X_1(t)X_1(t) \right] \left[ \sum_{i=1}^{t_f} X_2(t)X_2(t) \right] \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.1)$$

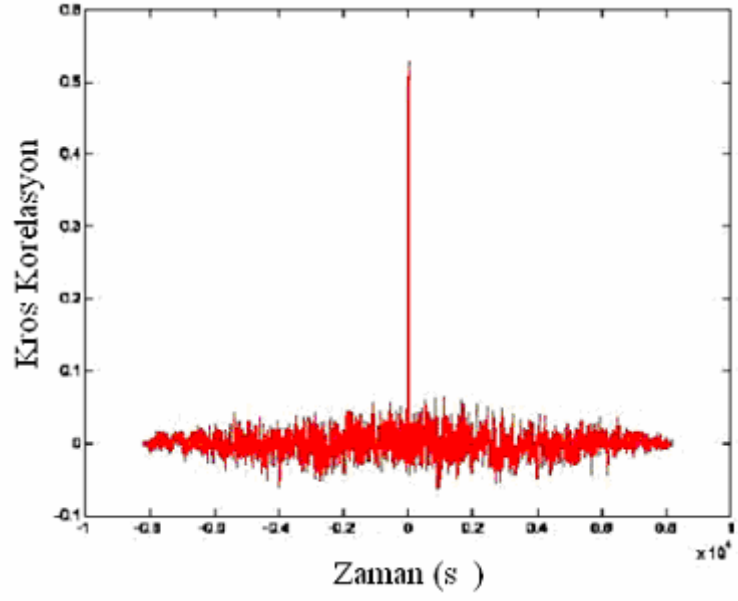
Korelasyon fonksiyonu  $-1 \leq R_{12} \leq +1$  aralığında sınırlanmakta olup negatif değerler ters ilişkiyi ifade etmektedir. Faz gecikmesi, korelasyon fonksiyonunun  $\tau = 0$  yerine  $\tau = \Delta t$  zaman sonra gerçekleşmesiyle oluşmaktadır. T periyodundaki bir sinyal için faz gecikmesi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T/2} \times \pi \quad (3.2)$$

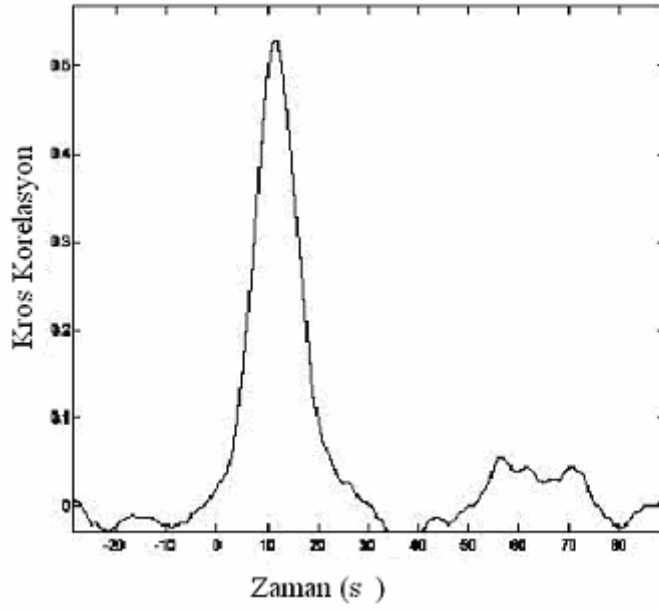
İki sinyal arasında  $0^\circ$  faz kaymasının olduğu durumda, korelasyon katsayısı 1 olmaktadır. Sıfır zaman gecikmesiyle oluşan ters korelasyon  $180^\circ$ 'lik faz kaymasına neden olmaktadır [127]. İki nokta arasındaki kros korelasyonun araştırılmasında, Ek'4 de verilen yazılım MATLAB programı ile kullanılmıştır. Hazırlanan yazılımın doğruluğunu test etmek için, önce tek bir veri grubu farklı iki nokta için tanımlanarak korelasyon katsayısı hesaplanmış ve Şekil 3.19'da görüldüğü gibi,  $\tau = 0$ 'da 1 olarak elde edilmiştir. Daha sonra referans sınır tabaka ve bina modeli üzerindeki iki noktada alınan iki veri grubu ile elde edilen korelasyon Şekil 3.20'de ve korelasyonun pik değeri daha belirgin olarak Şekil 3.21'de verilmiştir. Pik değer, faz farkı nedeniyle,  $\tau = 0$  yerine  $\tau = \Delta t$ 'de meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.19. Aynı hız sinyalleri için korelasyon değişimi



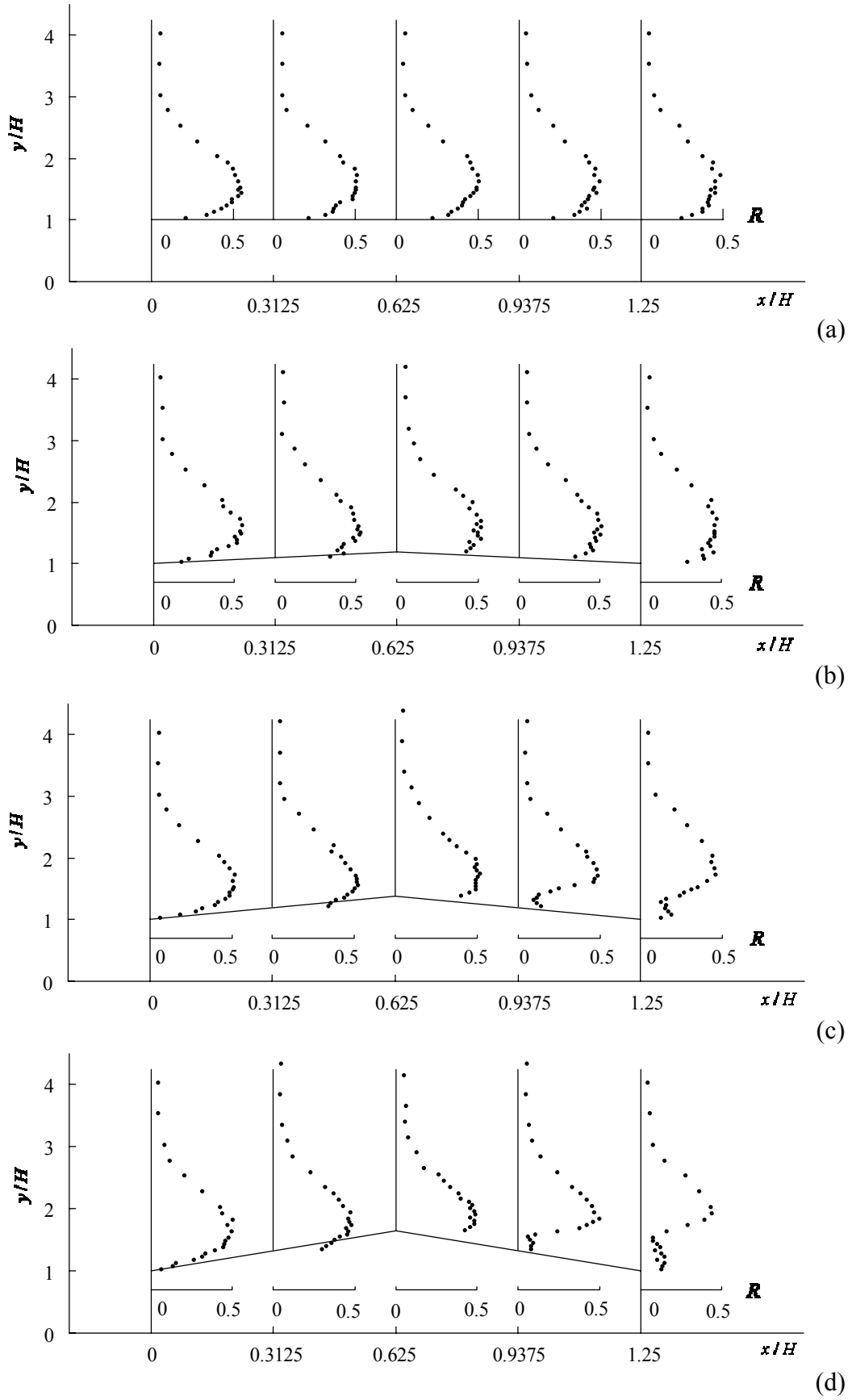
Şekil 3.20. Farklı hız sinyalleri için korelasyon değişimi



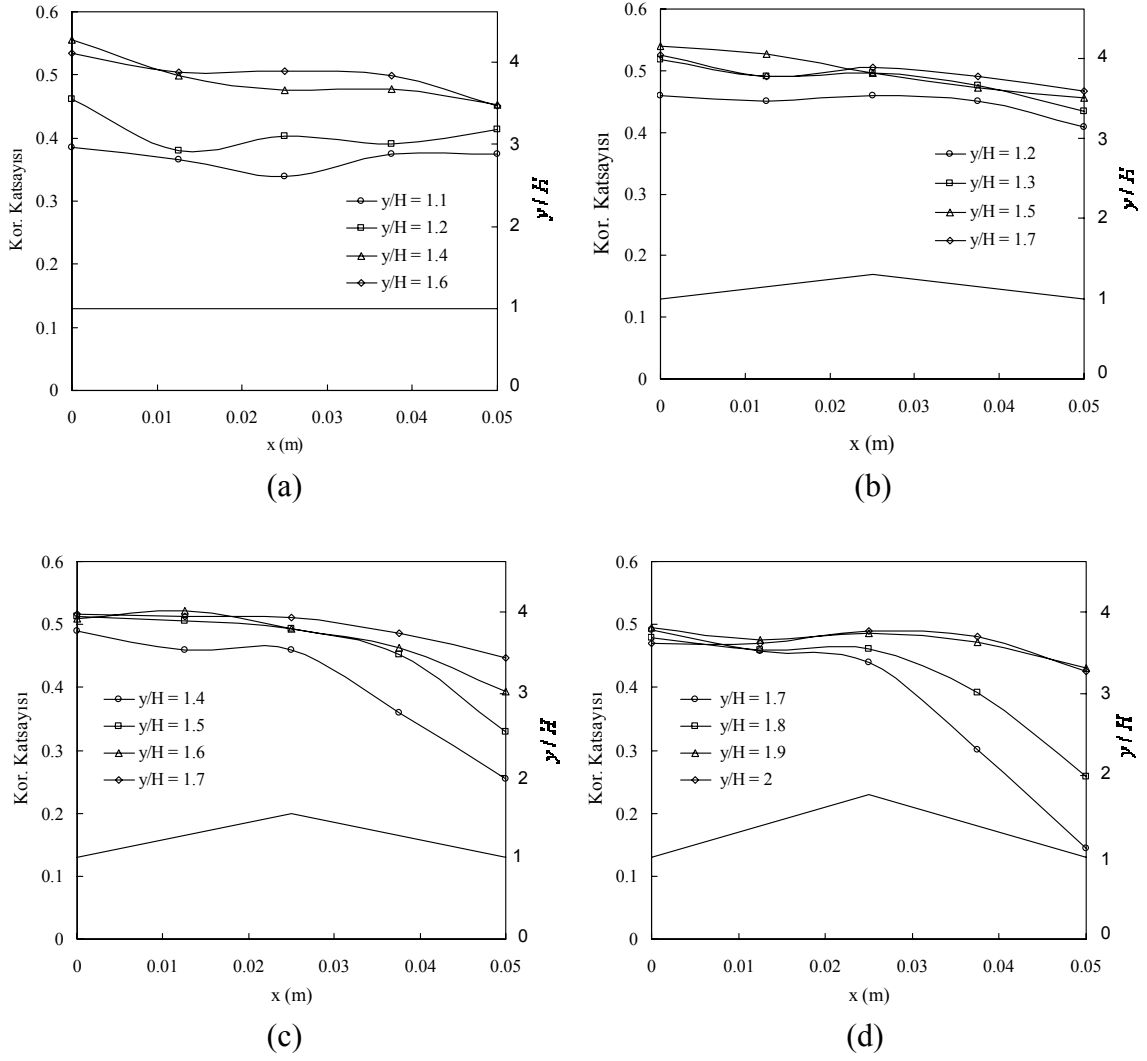
Şekil 3.21. Pik değeri gösteren korelasyon değişimi

Şekil 3.22 a-d,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli modellerin orta ekseninde çatı yüzeyi boyunca farklı  $x/H$  mesafeleri için, korelasyon katsayısının düşey doğrultudaki değişimlerini göstermektedir. Maksimum korelasyon katsayılarının, farklı çatı eğimlerine ve çatıların ön ve arka yüzeylerine göre,  $1.5 < y/H < 2$  aralığında oluştuğu görülmektedir. Çatı yüzeyine yakın bölgelerde korelasyon katsayısı daha düşük değerler alırken, sınır tabakanın daha üst bölgelerinde ise, sifıra doğru azalmaktadır

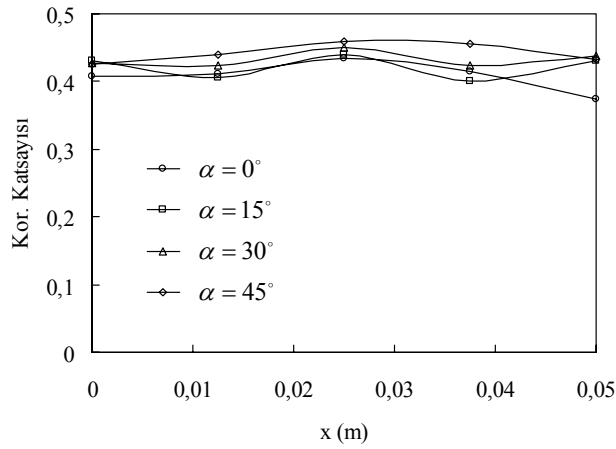
$0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli modelleri üzerinde farklı  $y/H$  yüksekliklerinde yatay doğrultudaki korelasyon katsayısı değişimleri, Şekil 3.23 a-d'de verilmiştir. Modellerin arka kenarları yakınında korelasyon katsayılarının ön kenardakilere göre daha düşük olduğu,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  eğimli çatılarda ise çatı sırtından itibaren azalmanın başladığı görülmektedir. Çalışılan modellerin çatıları yakınındaki akış alanlarında en büyük korelasyon katsayısı, düz çatılı modelin ön kenarında  $y/H=1.6$  yüksekliğinde,  $R=0.55$  olarak bulunmuştur. En düşük korelasyon katsayısı ise,  $45^\circ$  çatı eğimli modelin arka kenarında  $y/H=1.7$  yüksekliğinde,  $R=0.15$  değerindedir. Korelasyon katsayılarının çatı yüzeyine yakın bazı bölgelerde düşük değerleri alması, akış ayrılmasıyla oluşan ters akış bölgelerinin varlığı ile açıklanabilir. Çalışılan modellerin tümü için,  $y/H=2$  yüksekliğinde ölçülen korelasyon katsayılarının akış boyunca değişimi, Şekil 3.24'de verilmiştir. Bu yükseklikte korelasyon katsayılarının çatı yüzeyleri boyunca hemen hemen aynı seviyede kaldığı ve birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 3.22. Düşey yönde korelasyon katsayısı değişimleri  
 a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$ , c)  $\alpha = 30^\circ$ , d)  $\alpha = 45^\circ$



Şekil 3.23. Yatay yönde korelasyon katsayısı değişimleri  
a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 15^\circ$ , c)  $\alpha = 30^\circ$ , d)  $\alpha = 45^\circ$



Şekil 3.24.  $y/H=2$  de ölçülen korelasyon katsayılarının akış yönünde değişimi

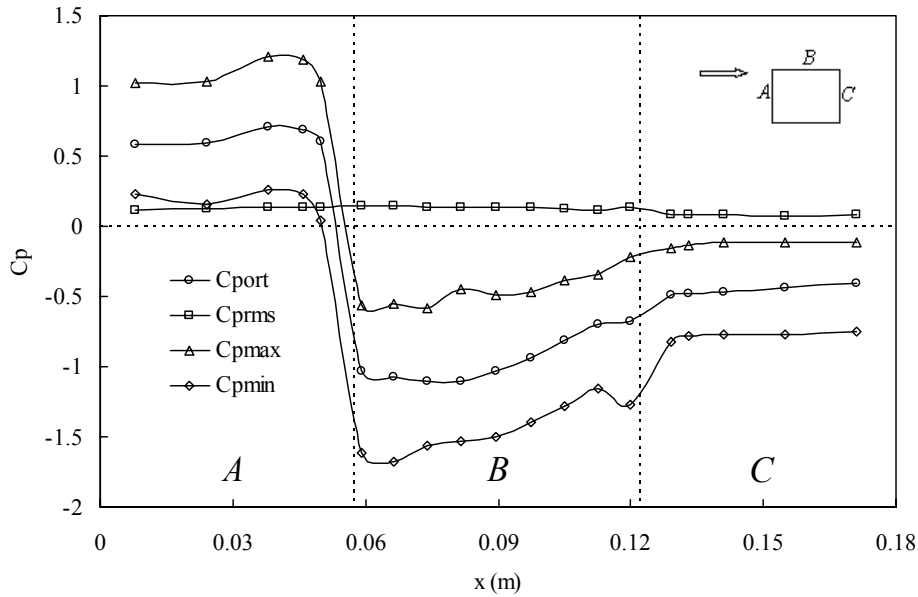


### 3.5. Model Yüzeylerinde Basınç Ölçümleri

#### 3.5.1. Saçaksız Modeller

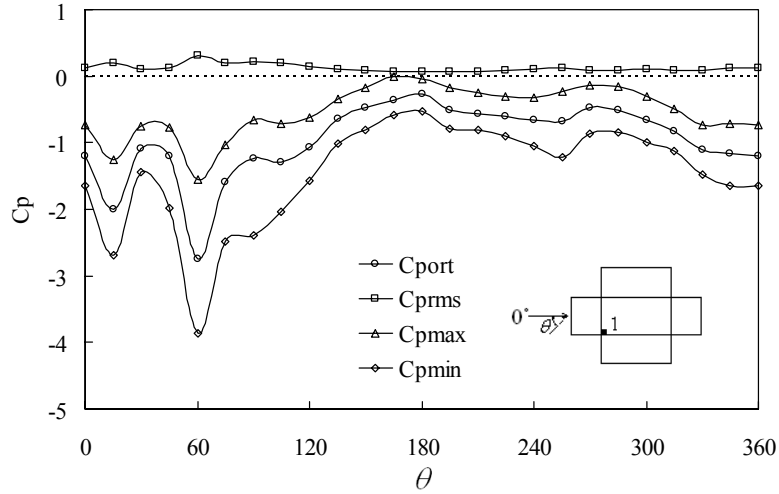
##### 3.5.1.1. Düz Çatılı Model

Şekil 3.25’de, düz çatılı bina modelinin orta eksen boyunca yüzey basınçlarının ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin değişimi görülmektedir. Rüzgara doğrudan maruz kalan model ön duvarında basınç dağılımı pozitif olmaktadır. Çatı ön kenarından itibaren akış ayrılması nedeniyle, çatı üzerinde ve arka duvarda negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.

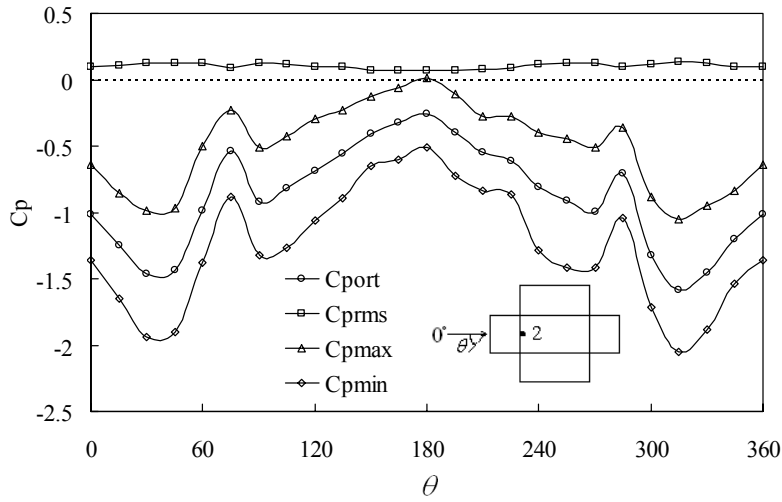


Şekil 3.25.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi

Şekil 3.26a ve b’de çatı köşesi ve çatı kenarı ortasında açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. Rüzgar tarafındaki ön çatı köşesi yakınında açılmış 1 numaralı basınç deliğinde  $15^\circ$  aralıklarla tüm rüzgar açılarındaki ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının  $-3.87$  değeriyle,  $60^\circ$ ’lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir. Kritik emme etkilerinin gerçekleştiği rüzgar açılarındaki rms değerlerinde de bir artış meydana gelmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayısı  $-2$  değeriyle  $45^\circ$  ve  $315^\circ$  lik rüzgar açılarındaki gerçekleşmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.26.  $\alpha = 0^\circ$  eğimli modelin çatı köşesi ve çatı ön orta kenarındaki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi, b) Çatı ön orta kenarı

Düz çatılı bina modelinin yüzeyleri üzerindeki ortalama ve minimum basınç dağılımları, rüzgar geliş açlarına göre eş basınç alanları şeklinde, Şekil 3.27-3.31'de verilmektedir.

$0^\circ$  rüzgar açısı için Şekil 3.27a ve b'de verilen ölçümlerin sonuçlarına göre, çatının tümü üzerindeki basınç alanı negatif olmaktadır. En kritik basınç katsayısı değerlerinin, rüzgar tarafındaki çatı ön köşesi yakınında, ortalama -1.22 ve minimum -1.65 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Hem ortalama hem de minimum basınç katsayılarının ölçüm yapılan tüm noktalarda negatif değerler alması, çatı üzerinde bir emme etkisinin olduğunu göstermektedir. Bu etki çatının arka kenarına doğru ilerledikçe azalmaktadır. Model yan

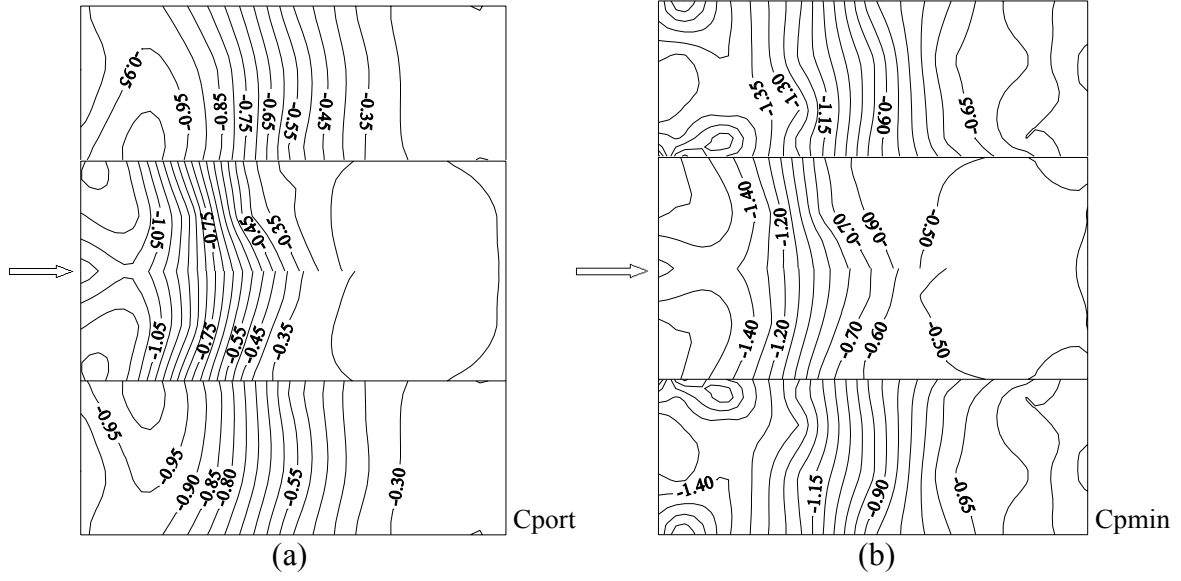
duvarları çatı üstündeki etkiye benzer şekilde, ön kenardan arka kenara doğru azalan bir emme etkisi altında kalmaktadırlar.

Şekil 3.28a ve b, 30°'lik rüzgar açısı için yapılan ölçümleri göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, çatının rüzgar tarafındaki ön köşesi yakınında sırasıyla -2.92 ve -3.96 olarak elde edilmiştir. Emme etkisinin en kritik olduğu bölgeler rüzgar tarafındaki çatı kenarı, çatı ön köşeleri ve saçak bölgesi olmaktadır. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha az riskli görülmektedir.

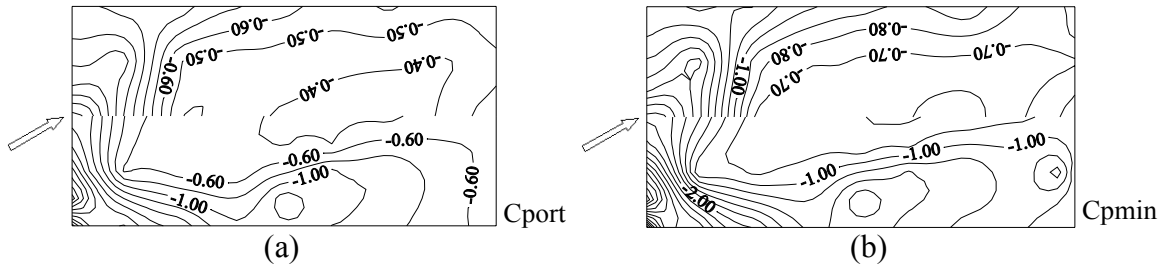
Şekil 3.29a ve b'de, 45° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımları verilmektedir. Çatı üzerindeki en kritik değerler, rüzgar tarafındaki çatı ön köşesi yakınında ortalama -3.73 ve minimum -5.16 olarak ölçülmüştür. Rüzgar tarafındaki ön beşik kısmı ve saçak bölgesi emme etkisinin en kritik olduğu bölgelerdir. Çatı arka yüzeyindeki emme ön yüzeye göre daha zayıf olmaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır. Bu durum, binanın arka duvarının emme etkisi altında kaldığını göstermektedir.

Şekil 3.30a ve b, 60° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımlarını göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları rüzgar tarafındaki çatı ön köşesi yakınında sırasıyla -2.90 ve -4.36 olarak ölçülmüştür. 30° rüzgar açısındaki duruma benzer şekilde, emme etkisi çatı ön kenarı, köşeleri ve saçak bölgesi için kritik olmaktadır. Çatı ön kısmındaki değerler arka kısma göre daha kritiktir.

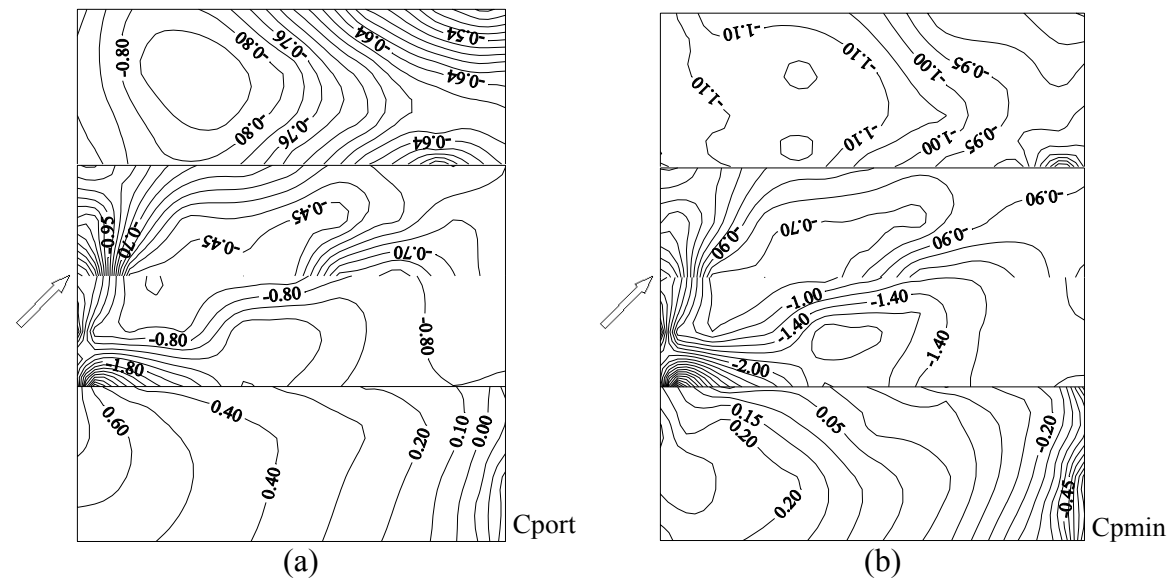
Şekil 3.31a ve b'de, 90° lik rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, rüzgar tarafındaki çatı ön köşeleri yakınında sırasıyla -1.25 ve -2.30 olarak gerçekleşmiştir. Rüzgar tarafındaki çatı ön ve yan kenarları boyunca emme etkisi çatı yüzeyinin arka bölümüne göre daha kritiktir. Bina ön duvarında rüzgarın itme etkisi nedeniyle pozitif basınç alanı oluşmaktadır. Ön duvar kenarından ayrılan akışın etkisi ve kenar kısımlardaki zayıf emme etkisi dışında ön duvar yüzeyi tamamen pozitif basınç katsayılarından oluşmaktadır. Bina arka duvarı ise çatı yüzeyi ile kıyaslandığında daha hafif olmakla birlikte, emme etkisi göstermektedir.



Şekil 3.27.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için model yüzelerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

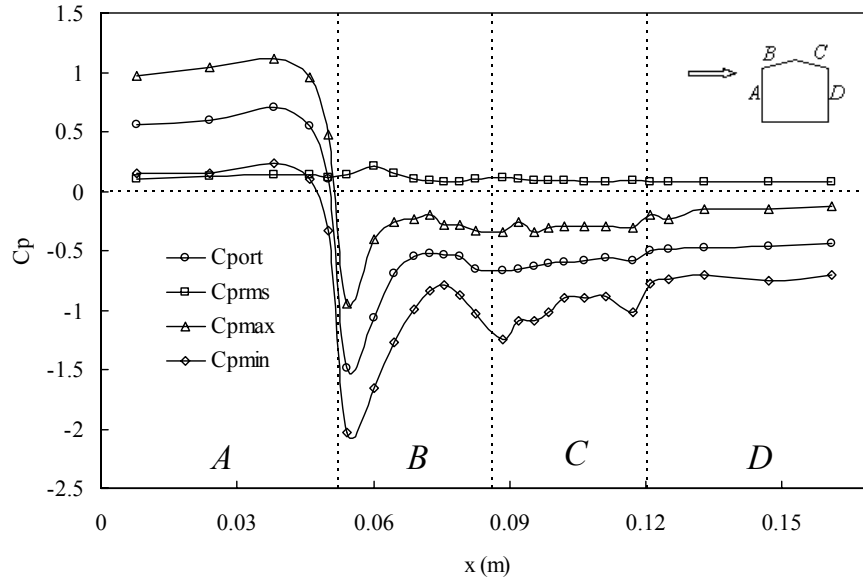


Şekil 3.28.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 30^\circ$  için çatı yüzeyindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



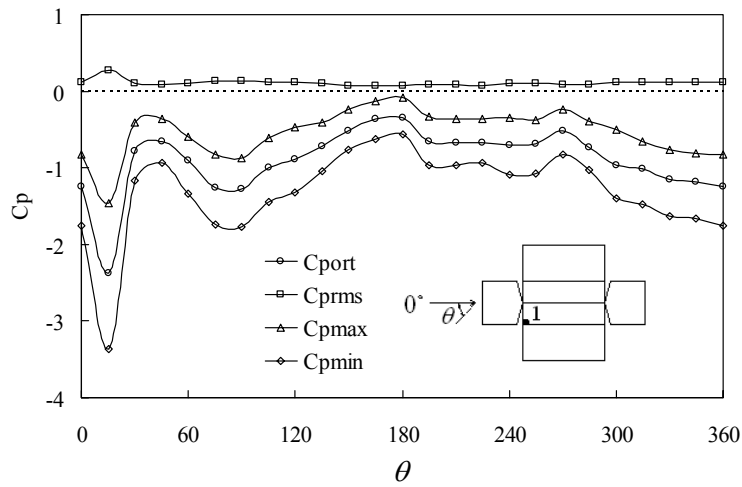
Şekil 3.29.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 45^\circ$  için model yüzelerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı





Şekil 3.32.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi

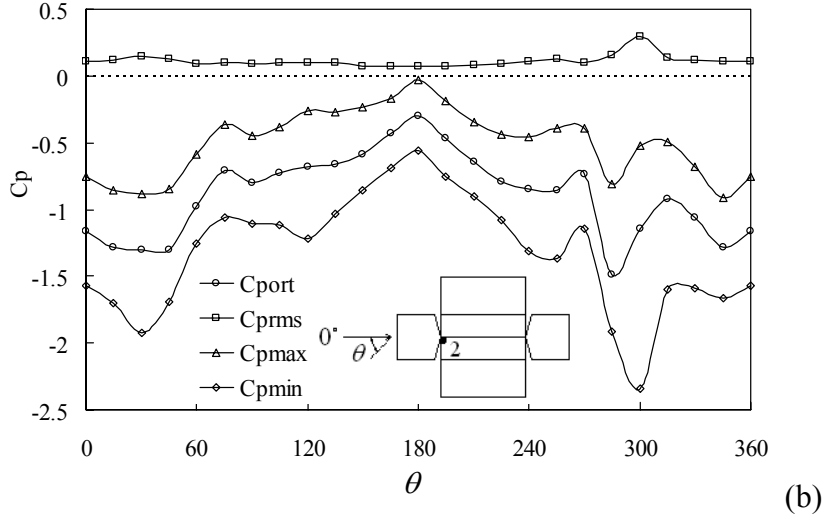
Şekil 3.33a ve b'de, çatı ve sırt köşelerinde açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. Rüzgar tarafındaki ön çatı köşesi yakınında açılmış 1 numaralı basınç deliğinde  $15^\circ$  aralıklarla tüm rüzgar açılarındaki ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının  $-3.36$  değeriyle,  $15^\circ$ lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayıları  $-1.92$  ve  $-2.34$  değerleriyle sırasıyla  $30^\circ$  ve  $300^\circ$ lik rüzgar açılarındaki gerçekleşmiştir.



(a)

Şekil 3.33.  $\alpha = 15^\circ$  eğimli modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi, b) Çatı sırtı köşesi

Şekil 3.33'ün devamı



15° eğimli beşik çatılı bina modelinin yüzeyleri üzerindeki ortalama ve minimum basınç dağılımları, rüzgar geliş açılarına göre eş basınç alanları şeklinde, Şekil 3.34-3.38'de verilmektedir.

0° rüzgar açısı için Şekil 3.34a ve b'de verilen ölçümlerin sonuçlarına göre, çatının tümü üzerindeki basınç alanı negatif olmaktadır. En kritik basınç katsayısı değerlerinin, rüzgar tarafındaki çatı köşeleri yakınında ortalama -1.28 ve minimum -1.75 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Hem ortalama hem de minimum basınç katsayılarının ölçüm yapılan tüm noktalarda negatif değerler alması, çatı üzerinde bir emme etkisinin olduğunu göstermektedir. Çatı ön kenarında kritik olan bu etki çatının arka kenarına doğru ilerledikçe azalmaktadır. Model yan duvarları çatı üstündeki etkiye benzer şekilde, ön kenardan arka kenara doğru azalan bir emme etkisi altında kalmaktadırlar.

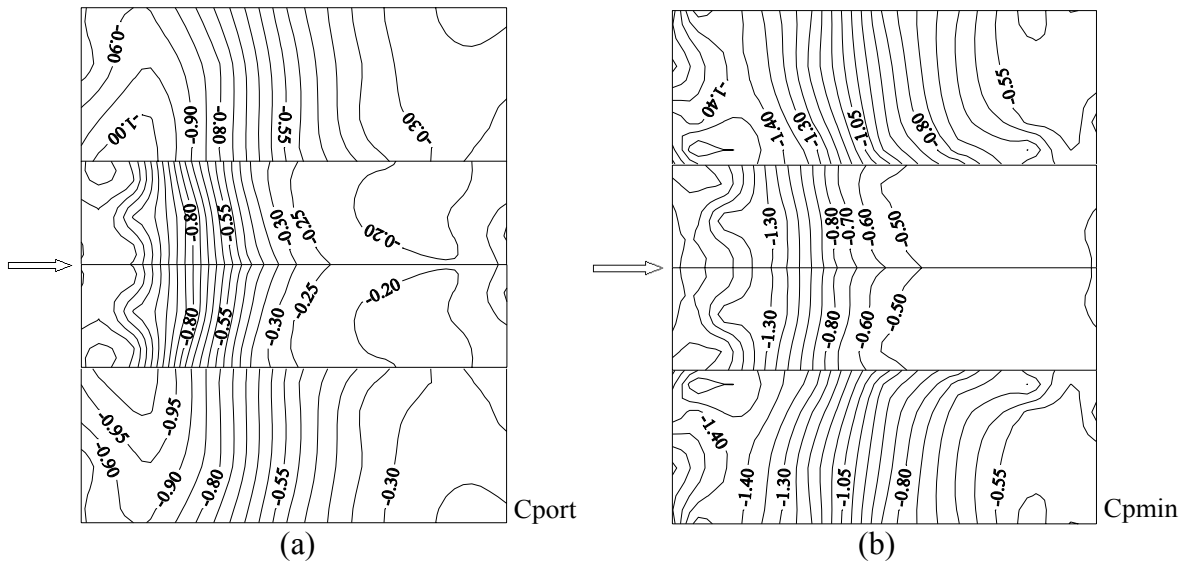
Şekil 3.35a ve b, 30°'lik rüzgar açısı için yapılan ölçümleri göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, çatının rüzgar tarafındaki ön köşesi yakınında sırasıyla -2.03 ve -3.35 olarak elde edilmiştir. Emme etkisinin en kritik olduğu bölgeler rüzgar tarafındaki beşik ve çatı sırtı bölgesi olmaktadır. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha az riskli görülmektedir.

Şekil 3.36a ve b'de, 45° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımları verilmektedir. Çatı üzerindeki en kritik değerler, rüzgar tarafındaki çatı ön sırt köşesi yakınında ortalama -1.51 ve minimum -3.06 olarak ölçülmüştür. Rüzgar tarafındaki ön beşik, sırt ve ön saçak bölgesi emme etkisinin en kritik olduğu bölgelerdir. Çatı arka yüzeyindeki emme ön yüzeye göre daha zayıf olmaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar

üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır. Bu durum, binanın arka duvarının emme etkisi altında kaldığını göstermektedir.

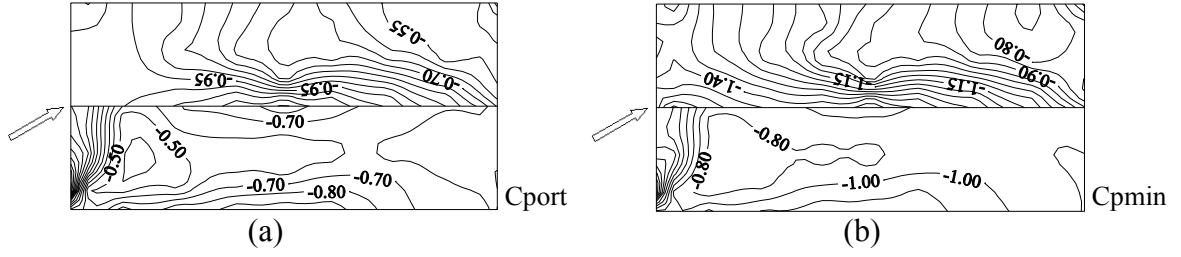
Şekil 3.37a ve b,  $60^\circ$  rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımlarını göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları rüzgar tarafındaki çatı sırt köşesi yakınında sırasıyla -2.06 ve -2.73 olarak ölçülmüştür. Emme etkisinin en kritik olduğu bölgeler çatı arka yüzeyinde rüzgar tarafındaki beşik ve sırt olmaktadır.

Şekil 3.38a ve b'de,  $90^\circ$ lik rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, rüzgar tarafındaki çatı köşeleri yakınında sırasıyla -1.46 ve -2.15 olarak gerçekleşmiştir. Rüzgar tarafındaki çatı ön ve yan kenarları boyunca emme etkisi çatı yüzeyinin arka bölümüne göre daha kritiktir. Bina ön duvarında rüzgarın itme etkisi nedeniyle pozitif basınç alanı oluşmaktadır. Ön duvar kenarından ayrılan akışın etkisi ve kenar kısımlardaki zayıf emme etkisi dışında ön duvar yüzeyi tamamen pozitif basınç katsayılarından oluşmaktadır. Bina arka duvarı ise çatı yüzeyi ile kıyaslandığında daha hafif olmakla birlikte emme etkisi göstermektedir.

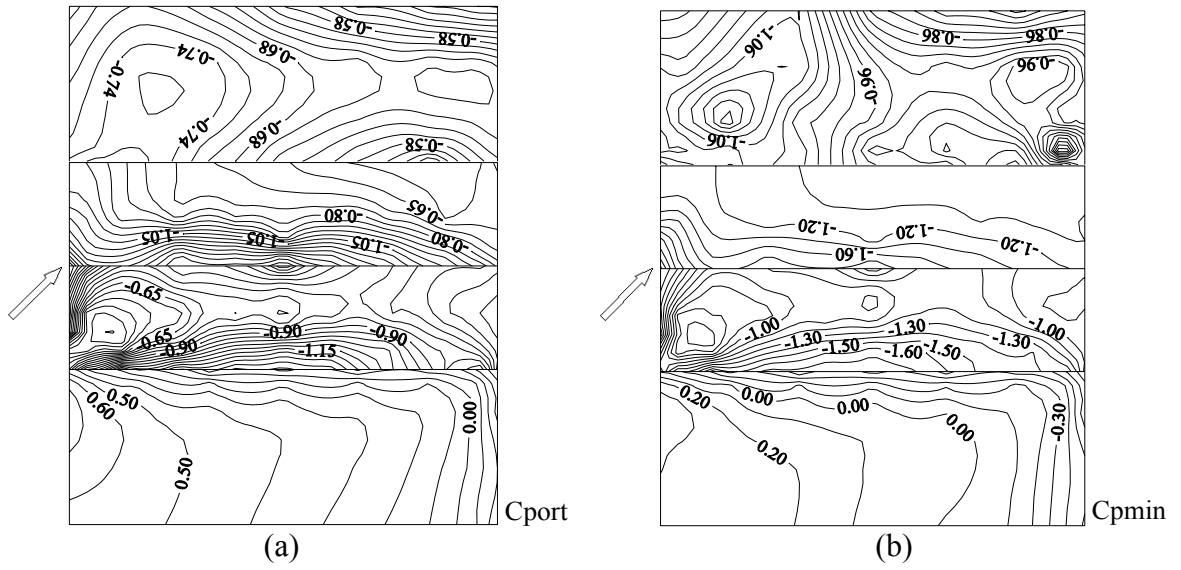


Şekil 3.34.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

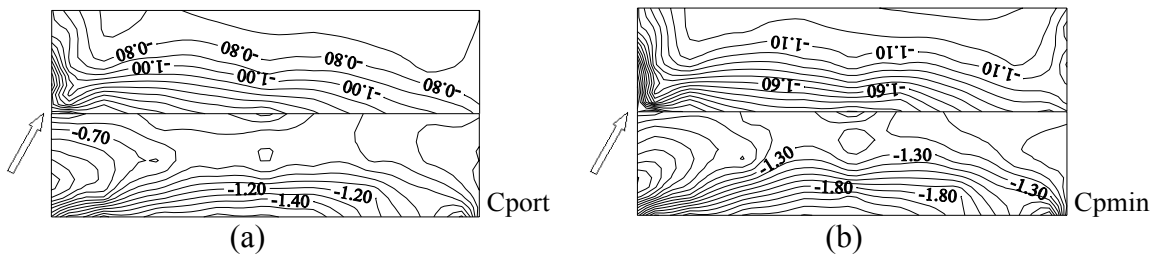




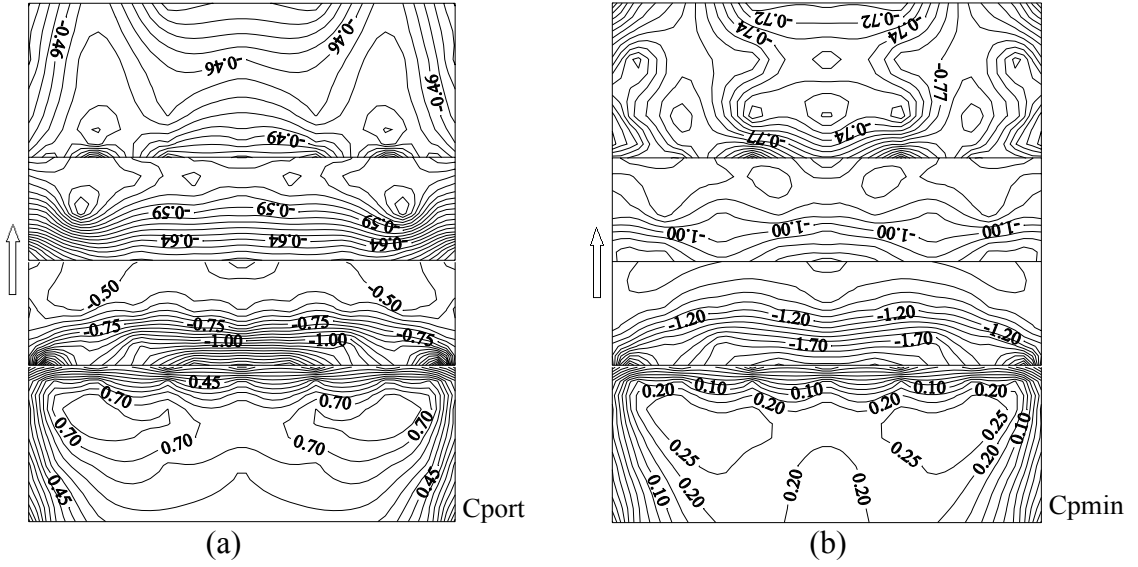
Şekil 3.35.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 30^\circ$  için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.36.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 45^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



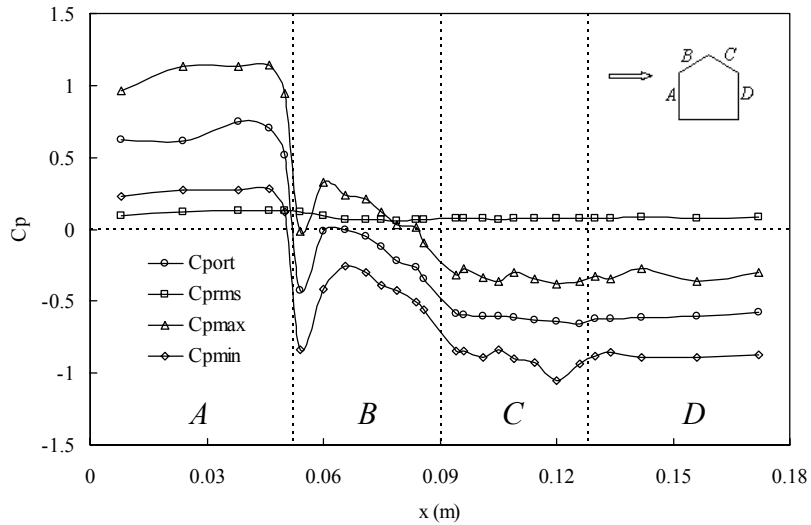
Şekil 3.37.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 60^\circ$  için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.38.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model yüzelerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

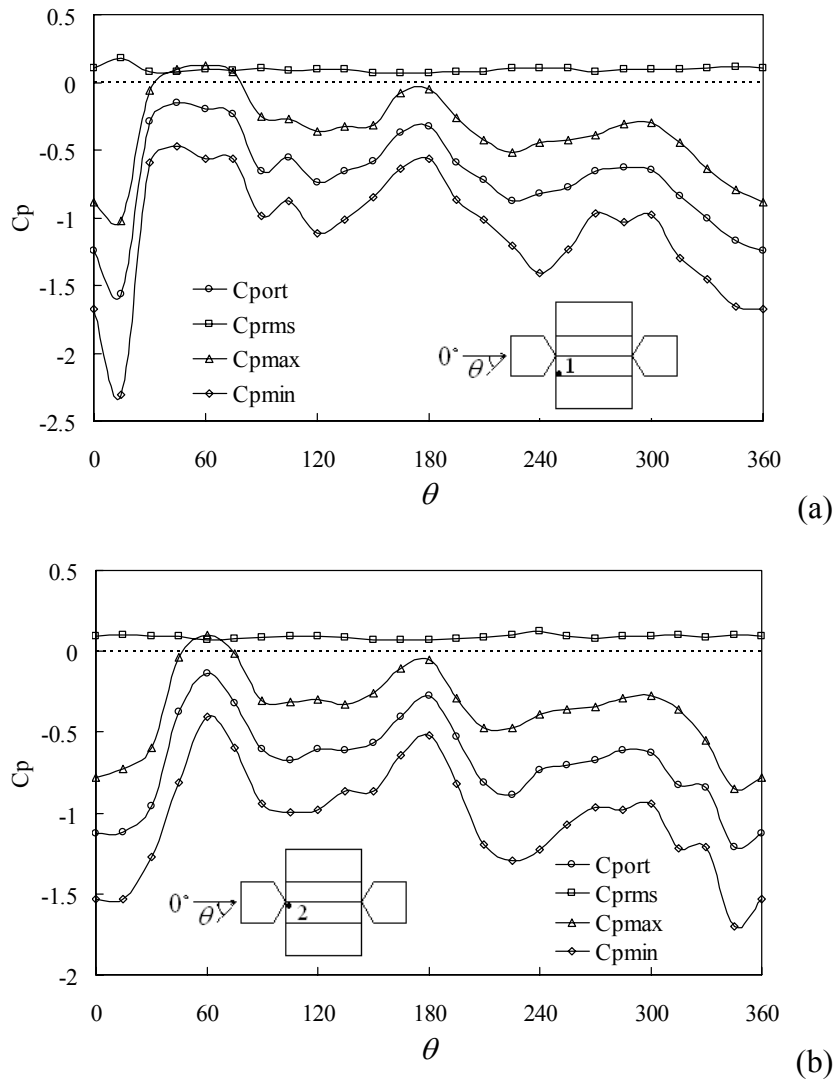
### 3.5.1.3. 30° Eğimli Beşik Çatılı Model

Şekil 3.39'da, 30° eğimli beşik çatılı bina modelinin orta eksenı boyunca yüzey basınçlarının ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin değişimi görülmektedir. Rüzgara doğrudan maruz kalan model ön duvarında basınç dağılımı pozitif olmaktadır. Çatı ön kenarından itibaren akış ayrılması nedeniyle, çatı ön kenarında ve çatı sırtından itibaren arka yüzeyde daha etkili olmak üzere çatı üzerinde ve arka duvarda negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.



Şekil 3.39.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi

Şekil 3.40a ve b'de, çatı ve sırt köşelerinde açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. Rüzgar tarafındaki ön çatı köşesi yakınında açılmış 1 numaralı basınç deliğinde  $15^\circ$  aralıklarla tüm rüzgar açılarındaki ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının  $-2.31$  değeriyle,  $15^\circ$ 'lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayıları  $-1.53$  ve  $-1.70$  değerleriyle sırasıyla  $15^\circ$  ve  $345^\circ$ 'lik rüzgar açılarındaki gerçekleşmiştir.



Şekil 3.40.  $\alpha = 30^\circ$  eğimli modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi, b) Çatı sırtı köşesi

30° eğimli beşik çatılı bina modelinin yüzeyleri üzerindeki ortalama ve minimum basınç dağılımları, rüzgar geliş açalarına göre eş basınç alanları şeklinde, Şekil 3.41-3.45’de verilmektedir.

0° rüzgar açısı için Şekil 3.41a ve b’de verilen ölçümlerin sonuçlarına göre, çatının tümü üzerindeki basınç alanı negatif olmaktadır. En kritik basınç katsayısı değerlerinin, rüzgar tarafındaki çatı köşeleri yakınında ortalama -1.24 ve minimum -1.71 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Hem ortalama hem de minimum basınç katsayılarının ölçüm yapılan tüm noktalarda negatif değerler alması, çatı üzerinde bir emme etkisinin olduğunu göstermektedir. Çatı ön kenarında beşik boyunca kritik olan bu etki çatının arka kenarına doğru ilerledikçe azalmaktadır. Model yan duvarları çatı üstündeki etkiye benzer şekilde, ön kenardan arka kenara doğru azalan bir emme etkisi altında kalmaktadırlar.

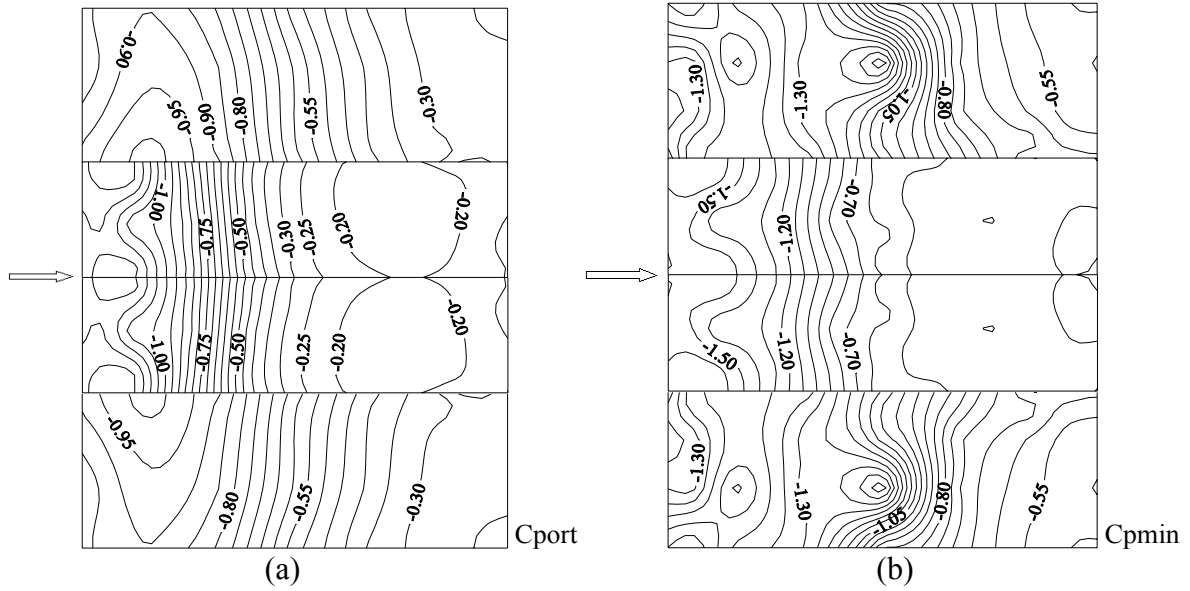
Şekil 3.42a ve b, 30° lik rüzgar açısı için yapılan ölçümleri göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, çatının rüzgar tarafındaki ön köşesi yakınında sırasıyla -1.04 ve -1.55 olarak elde edilmiştir. Emme etkisinin en kritik olduğu bölge rüzgar tarafındaki çatı sırtı bölgesi olmaktadır. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha riskli görülmektedir.

Şekil 3.43a ve b’de, 45° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımları verilmektedir. Çatı üzerindeki en kritik değerler, rüzgar tarafında olmayan çatı ön köşesi yakınında ortalama -1 ve minimum -1.79 olarak ölçülmüştür. Çatı arka yüzeyinde, çatı köşesi ve sırt köşesi emme etkisinin en kritik olduğu bölgelerdir. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır. Bu durum, binanın arka duvarının emme etkisi altında kaldığını göstermektedir.

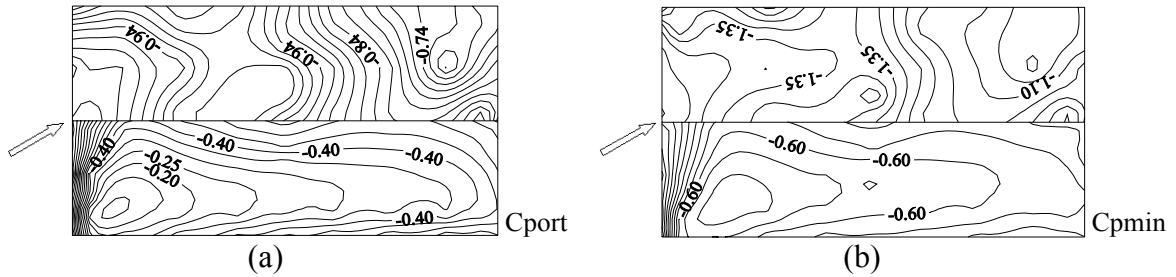
Şekil 3.44a ve b, 60° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımlarını göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları çatı arka köşeleri yakınında sırasıyla -0.82 ve -1.44 olarak oluşmuştur. Emme etkisinin en kritik olduğu bölge çatının rüzgara göre arka kısmındaki beşik bölgesi olmaktadır.

Şekil 3.45a ve b’de, 90° lik rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, rüzgar tarafındaki çatı köşeleri yakınında sırasıyla -0.79 ve -1.26 olarak gerçekleşmiştir. Rüzgar tarafında olmayan çatı yüzeyindeki emme etkisi çatı yüzeyinin ön bölümüne göre daha kritiktir. Çatı ön yüzeyindeki emme etkisinin kritik olmaması, bu yüzeyin rüzgara doğrudan maruz kalması nedeniyledir. Bina ön duvarında rüzgarın itme etkisi nedeniyle pozitif basınç alanı

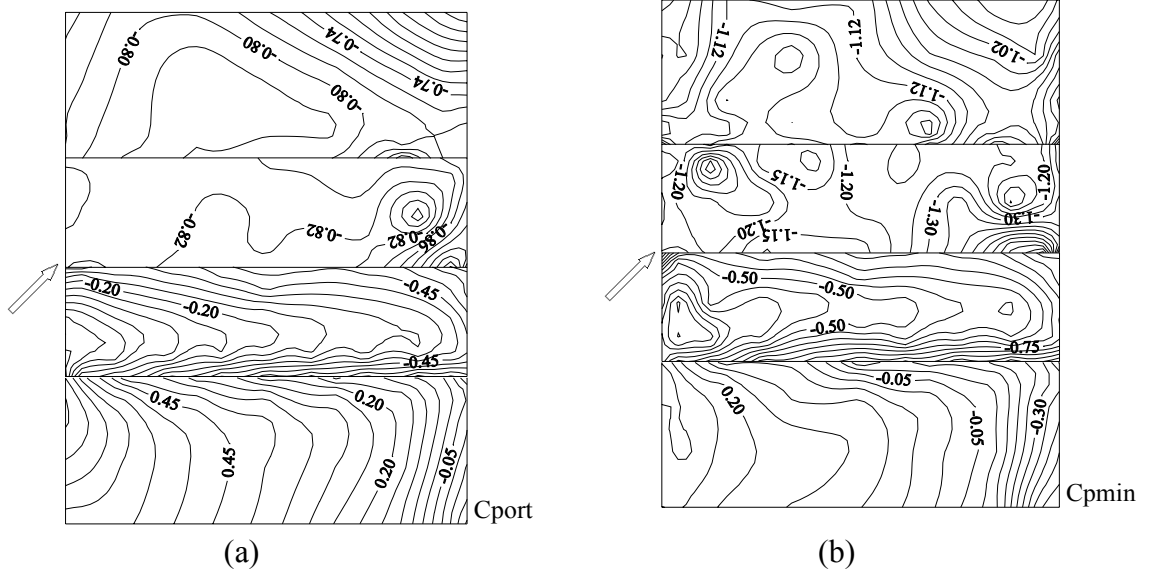
oluşmaktadır. Ön duvar kenarından ayrılan akışın etkisi ve kenar kısımlardaki zayıf emme etkisi dışında ön duvar yüzeyi tamamen pozitif basınç katsayılarından oluşmaktadır. Bina arka duvarı ise çatı yüzeyi ile kıyaslandığında daha hafif olmakla birlikte emme etkisi göstermektedir.



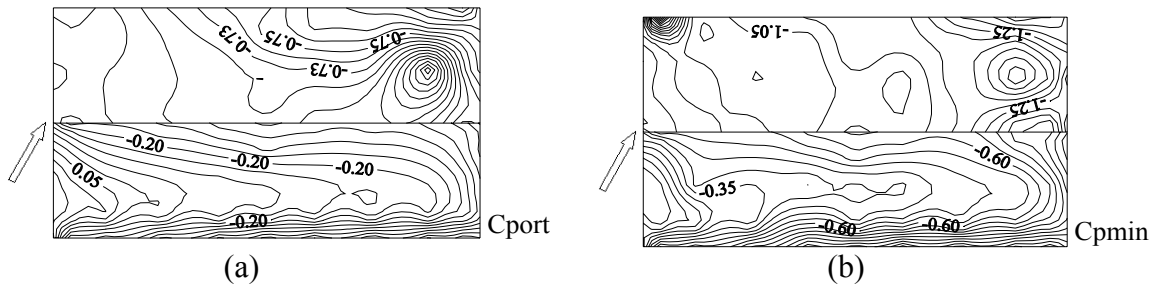
Şekil 3.41.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



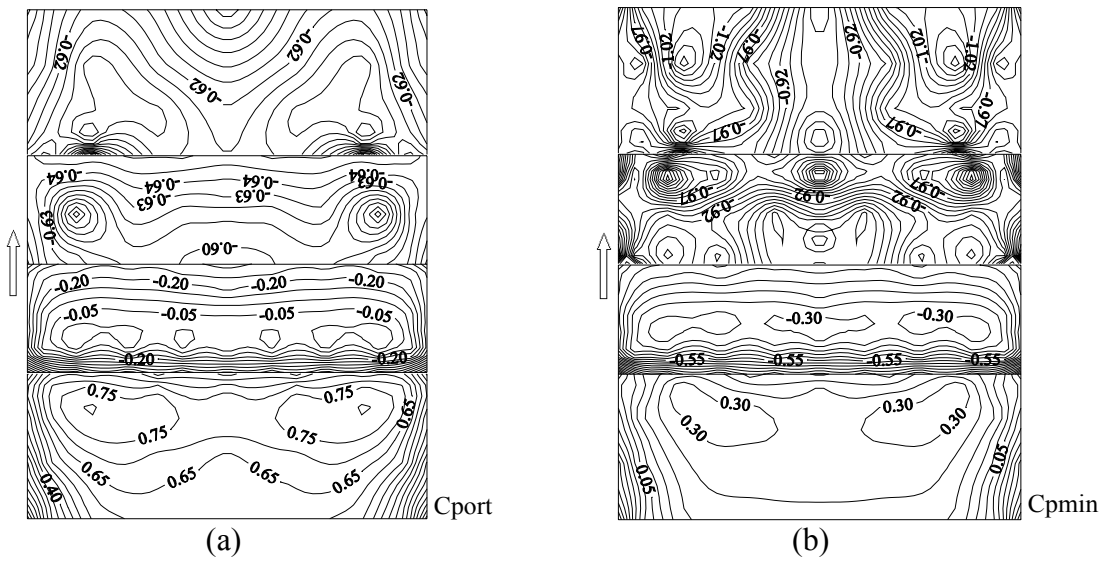
Şekil 3.42.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 30^\circ$  için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.43.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 45^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



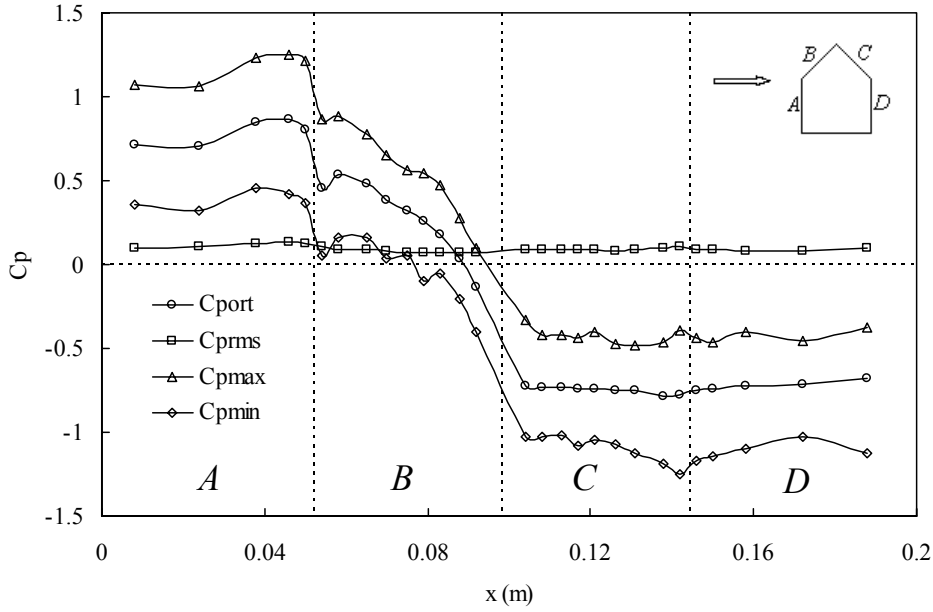
Şekil 3.44.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 60^\circ$  için çatı yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.45.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

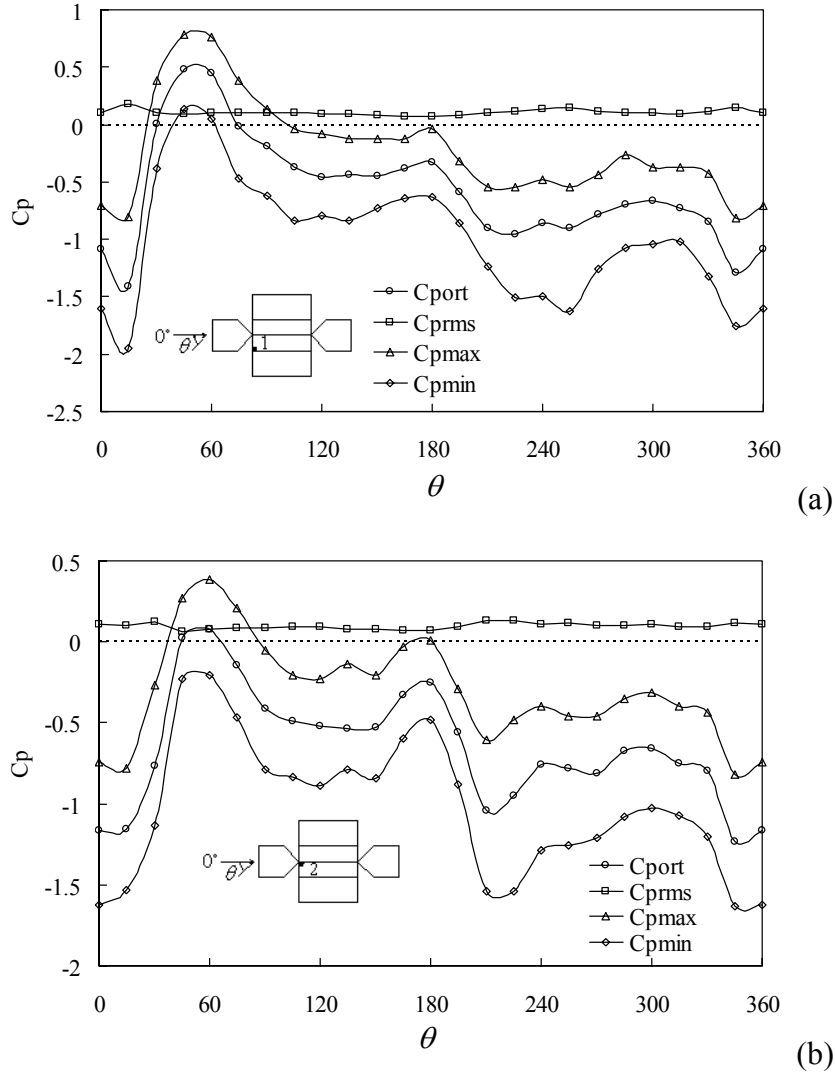
### 3.5.1.4. 45° Eğimli Beşik Çatılı Model

Şekil 3.46'da, 45° eğimli beşik çatılı bina modelinin orta eksenı boyunca yüzey basınçlarının ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin değişimi görülmektedir. Rüzgara doğrudan maruz kalan model ön duvarında ve çatı ön yüzeyinin büyük bölümünde basınç dağılımı pozitif olmaktadır. Çatı sırtından itibaren akış ayrılması nedeniyle, çatı arka yüzeyinde ve arka duvarda negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.



Şekil 3.46.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için orta eksen boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi

Şekil 3.47a ve b'de, çatı ve sırt köşelerinde açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. Rüzgar tarafındaki ön çatı köşesi yakınında açılmış 1 numaralı basınç deliğinde  $15^\circ$  aralıklarla tüm rüzgar açılarındaki ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının  $-1.95$  değeriyle,  $15^\circ$ lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayıları  $-1.62$  ve  $-1.54$  değerleriyle sırasıyla  $0^\circ$  ve  $225^\circ$ lik rüzgar açılarındaki gerçekleşmiştir.



Şekil 3.47.  $\alpha = 45^\circ$  eğimli modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) Çatı köşesi, b) Çatı sırtı köşesi

$45^\circ$  eğimli beşik çatılı bina modelinin yüzeyleri üzerindeki ortalama ve minimum basınç dağılımları, rüzgar geliş açlarına göre eş basınç alanları şeklinde, Şekil 3.48-3.54'de verilmektedir.

$0^\circ$  rüzgar açısı için Şekil 3.48a ve b'de verilen ölçümlerin sonuçlarına göre, çatının tümü üzerindeki basınç alanı negatif olmaktadır. En kritik basınç katsayısı değerlerinin, rüzgar tarafındaki çatı sırt köşeleri yakınında ortalama -1.25 ve minimum -1.68 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Hem ortalama hem de minimum basınç katsayılarının ölçüm yapılan tüm noktalarda negatif değerler alması, çatı üzerinde bir emme etkisinin olduğunu göstermektedir. Çatı ön kenarında beşik boyunca kritik olan bu etki çatının arka kenarına



doğru ilerledikçe azalmaktadır. Model yan duvarları çatı üstündeki etkiye benzer şekilde, ön kenardan arka kenara doğru azalan bir emme etkisi altında kalmaktadırlar.

Şekil 3.49a ve b, 15°lik rüzgar açısı için yapılan ölçümleri göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, çatının rüzgar tarafındaki ön köşesi yakınında sırasıyla -1.47 ve -2.03 olarak elde edilmiştir. Emme etkisinin en kritik olduğu bölgeler rüzgar tarafındaki ön beşik bölgesi ve çatı arka yüzey bölgesi olmaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerindeki emme etkisi bina arka duvarıyla kıyaslandığında daha hafif olmaktadır.

Şekil 3.50a ve b'de, 30° lik rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımları verilmektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, çatının rüzgar tarafındaki arka sırt köşesi yakınında sırasıyla -1.04 ve -1.62 olarak elde edilmiştir. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha riskli olmaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır. Bu durum, binanın arka duvarının emme etkisi altında kaldığını göstermektedir.

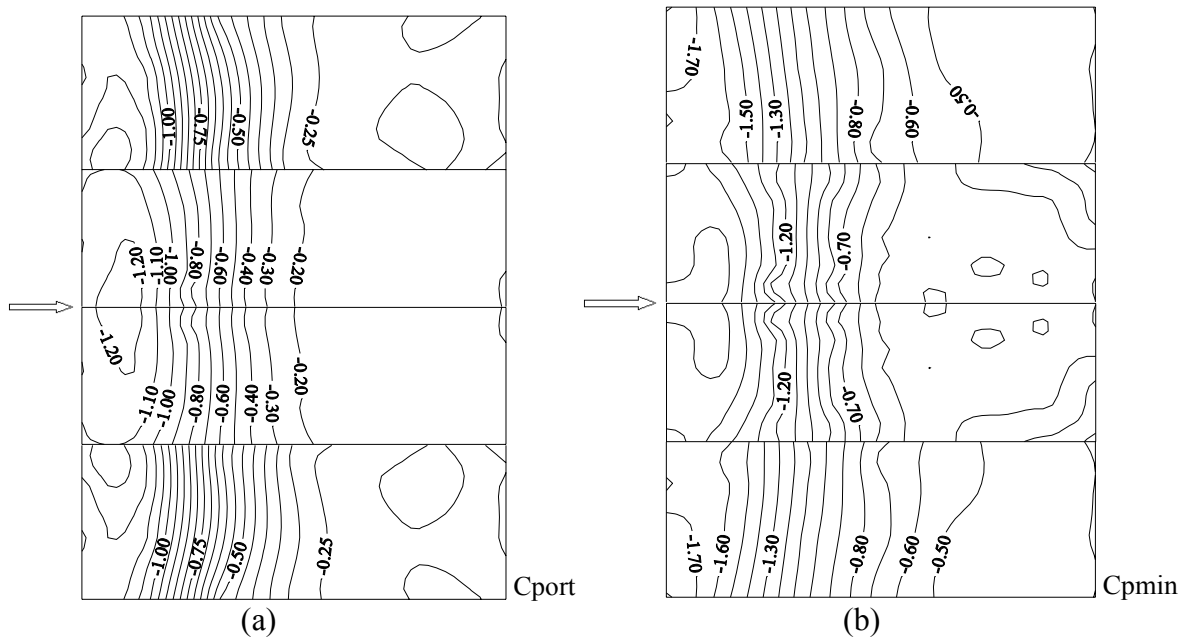
Şekil 3.51a ve b'de, 45° rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Çatı üzerindeki en kritik değerler, rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşesi yakınında ortalama -0.95 ve minimum -1.82 olarak ölçülmüştür. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha riskli olmakta, kritik değerler çatı köşesi ve sırt köşesi yakınında oluşmaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır.

Şekil 3.52a ve b, 60° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımlarını göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşesi yakınında ortalama -0.85 ve -1.52 olarak ölçülmüştür. Çatı ön yüzeyinde ölçülen basınç katsayıları sırt bölgesi hariç pozitif değerler almaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır.

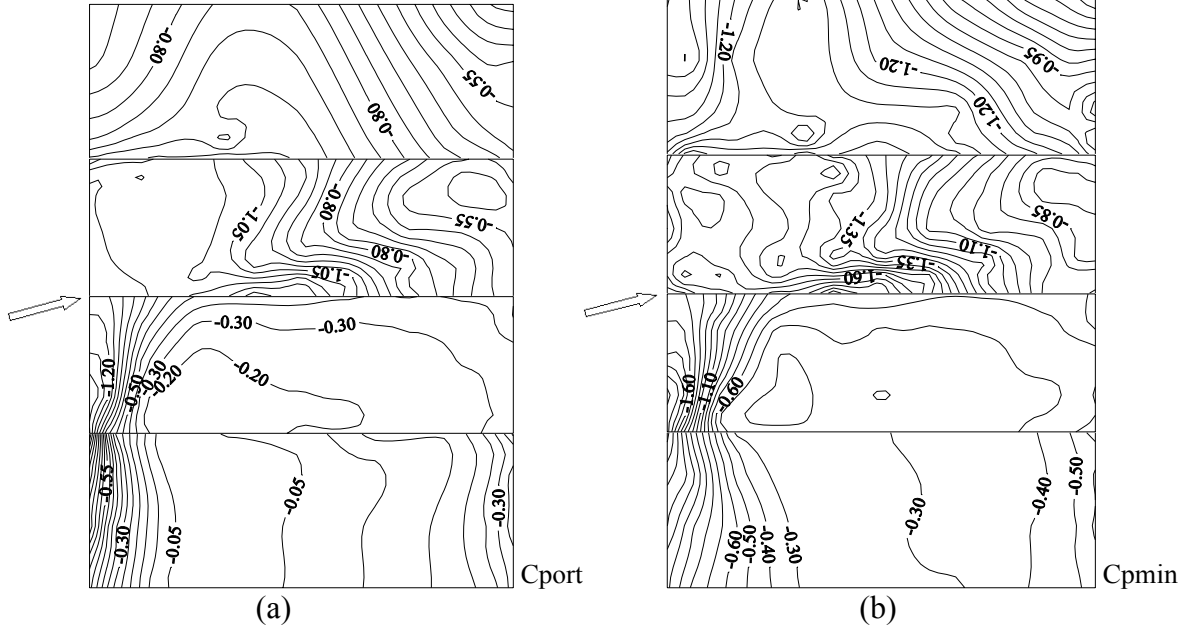
Şekil 3.53a ve b'de, 75° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımları verilmektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşesi yakınında ortalama -0.90 ve -1.95 olarak ölçülmüştür. Çatı ön yüzeyinde ölçülen basınç katsayıları sırt bölgesi hariç pozitif değerler almaktadır.

Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır.

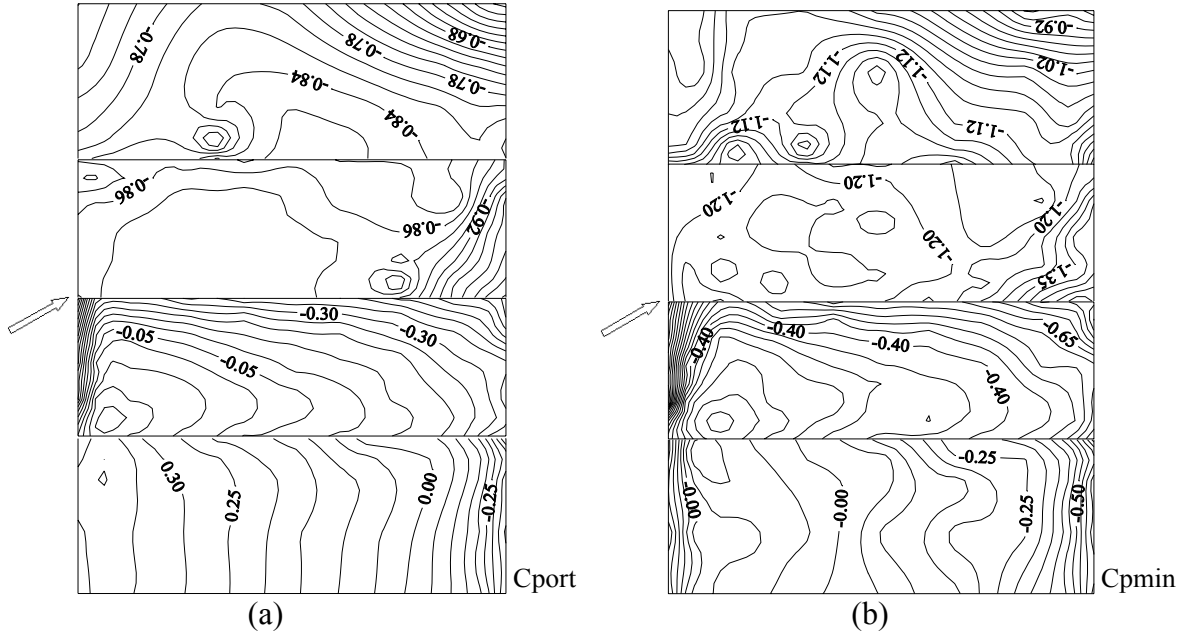
Şekil 3.54a ve b'de, 90°'lik rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, rüzgar tarafında olmayan çatı arka sırt köşeleri yakınında sırasıyla -0.82 ve -1.31 olarak gerçekleşmiştir. Bina ön duvarında ve çatı ön yüzeyinde rüzgarın itme etkisi nedeniyle pozitif basınç alanı oluşmaktadır. Bina arka duvarı ise çatı yüzeyi ile kıyaslandığında daha hafif olmakla birlikte emme etkisi göstermektedir.



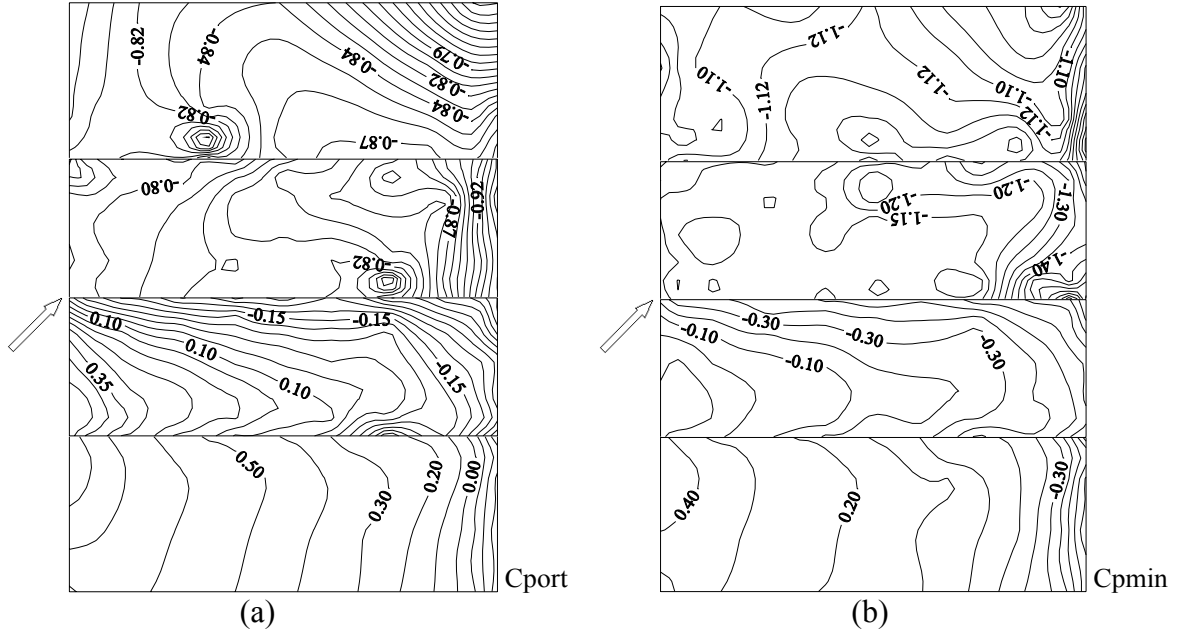
Şekil 3.48.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



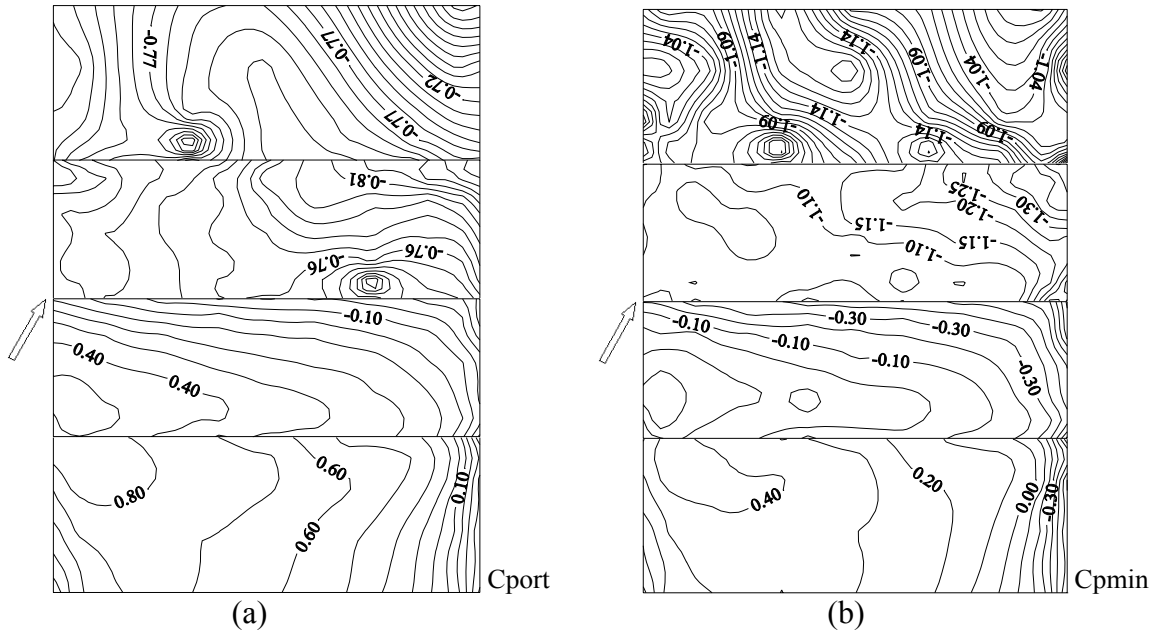
Şekil 3.49.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 15^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



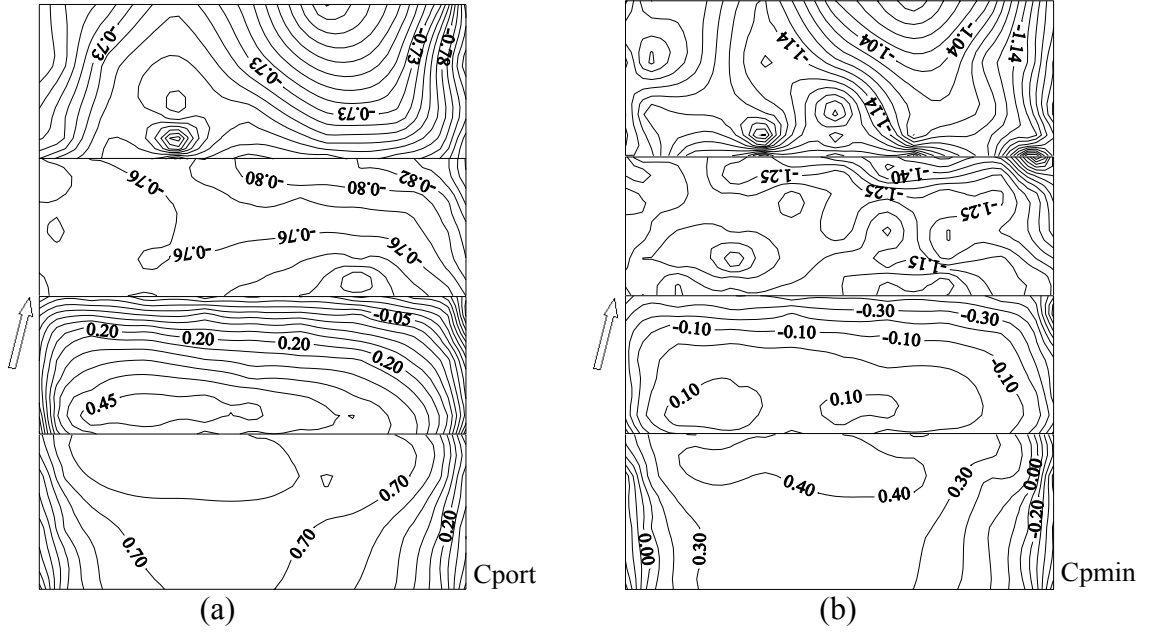
Şekil 3.50.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 30^\circ$  için model yüzeylerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



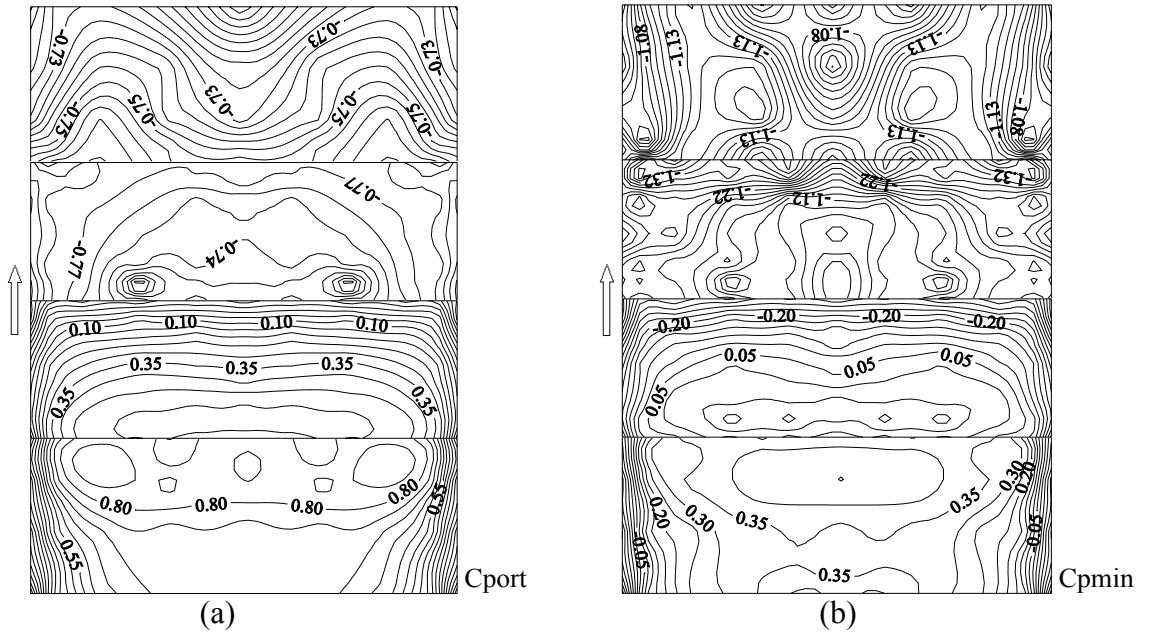
Şekil 3.51.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 45^\circ$  için model yüzelerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.52.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 60^\circ$  için model yüzelerindeki basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.53.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 75^\circ$  için model yüzelerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

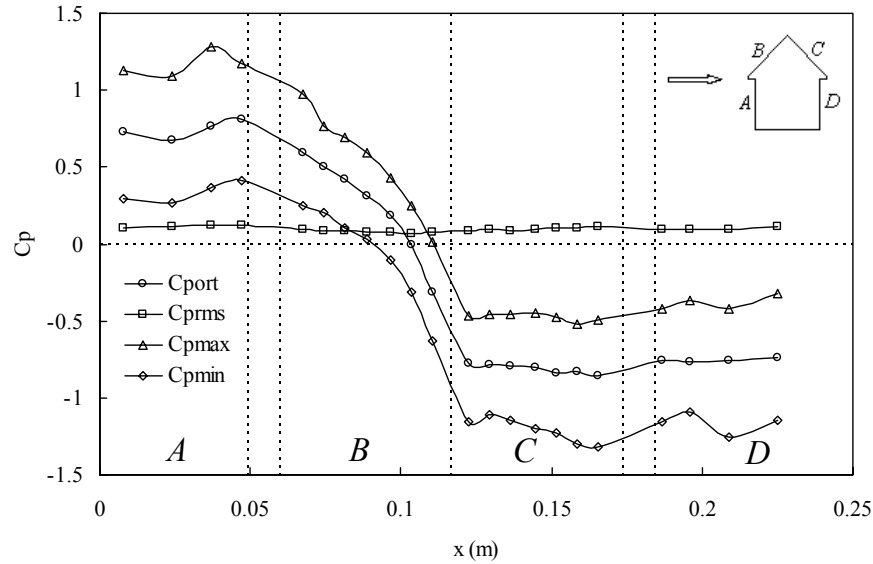


Şekil 3.54.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model yüzelerindeki eş basınç alanları  
a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

### 3.5.2. Saçaklı Modeller

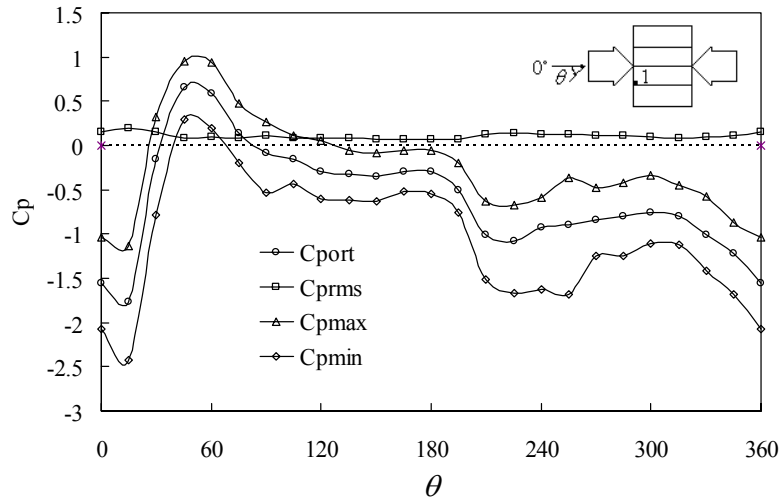
#### 3.5.2.1. 45° Eğimli Normal Saçaklı Beşik Çatılı Model

Şekil 3.55’de, 45° eğimli normal saçaklı beşik çatıya sahip bina modelinin orta eksenini boyunca yüzey basınçlarının ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin değişimi görülmektedir. Rüzgara doğrudan maruz kalan model ön duvarında ve çatı ön yüzeyinin büyük bölümünde basınç dağılımı pozitif olmaktadır. Çatı sırtından itibaren akış ayrılması nedeniyle, çatı arka yüzeyinde ve arka duvarda negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.

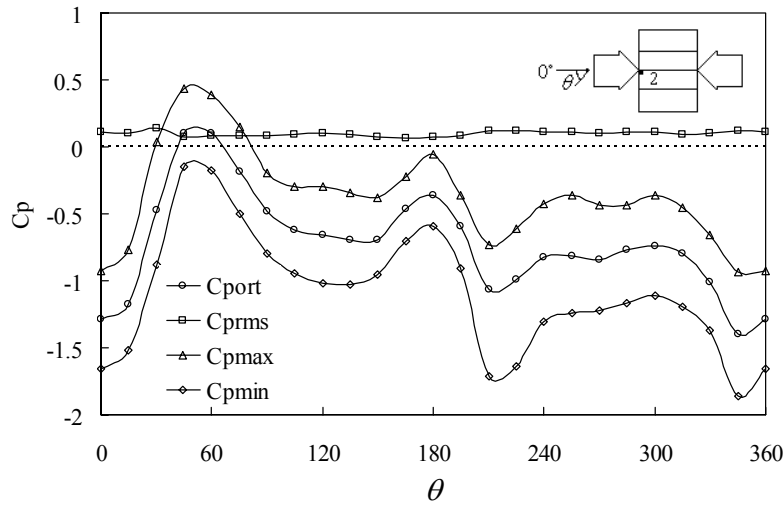


Şekil 3.55.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için normal saçaklı bina modelinin orta eksenini boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi

Şekil 3.56a ve b’de, çatı ve sırt köşelerinde açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. Rüzgar tarafındaki ön çatı köşesi yakınında açılmış 1 numaralı basınç deliğinde 15° aralıklarla tüm rüzgar açılarındaki ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının -2.42 değeriyle, 15°’lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayıları -1.65, -1.71 ve -1.86 değerleriyle sırasıyla 0°, 210° ve 345°’lik rüzgar açılarındaki gerçekleşmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.56.  $\alpha = 45^\circ$  eğimli normal saçaklı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri  
a) Çatı köşesi, b) Çatı sırt köşesi

$45^\circ$  eğimli normal saçaklı beşik çatıya sahip bina modelinin yüzeyleri üzerindeki ortalama ve minimum basınç dağılımları, rüzgar geliş açılarına göre eş basınç alanları şeklinde, Şekil 3.57-3.61'de verilmektedir.

$0^\circ$  rüzgar açısı için Şekil 3.57a ve b'de verilen ölçümlerin sonuçlarına göre, çatının tümü üzerindeki basınç alanı negatif olmaktadır. En kritik basınç katsayısı değerlerinin, rüzgar tarafındaki çatı köşeleri yakınında ortalama -1.65 ve minimum -2.08 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Hem ortalama hem de minimum basınç katsayılarının ölçüm yapılan tüm noktalarda negatif değerler alması, çatı üzerinde bir emme etkisinin olduğunu göstermektedir. Çatı ön kenarında beşik boyunca kritik olan bu etki çatının arka kenarına

doğru ilerledikçe azalmaktadır. Model yan duvarları çatı üstündeki etkiye benzer şekilde, ön kenardan arka kenara doğru azalan bir emme etkisi altında kalmaktadırlar.

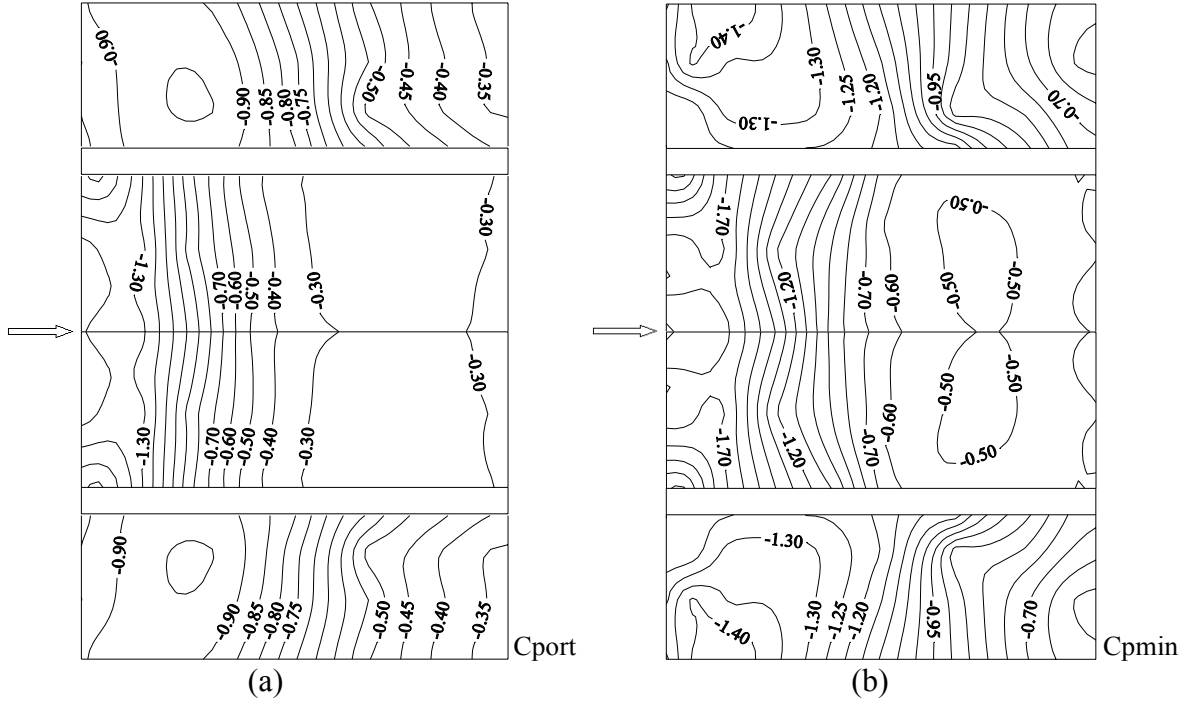
Şekil 3.58a ve b'de, 30°'lik rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımları verilmektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, çatının rüzgara göre arka bölgesindeki sırt köşesi yakınında sırasıyla -1.06 ve -1.72 olarak elde edilmiştir. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha riskli olmaktadır.

Şekil 3.59a ve b'de, 45° rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Çatı üzerindeki en kritik değerler, rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşesi yakınında ortalama -1.07 ve minimum -1.75 olarak ölçülmüştür. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha riskli olmakta, kritik değerler çatı köşesi ve sırt köşesi yakınında oluşmaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde negatif değerler almaktadır.

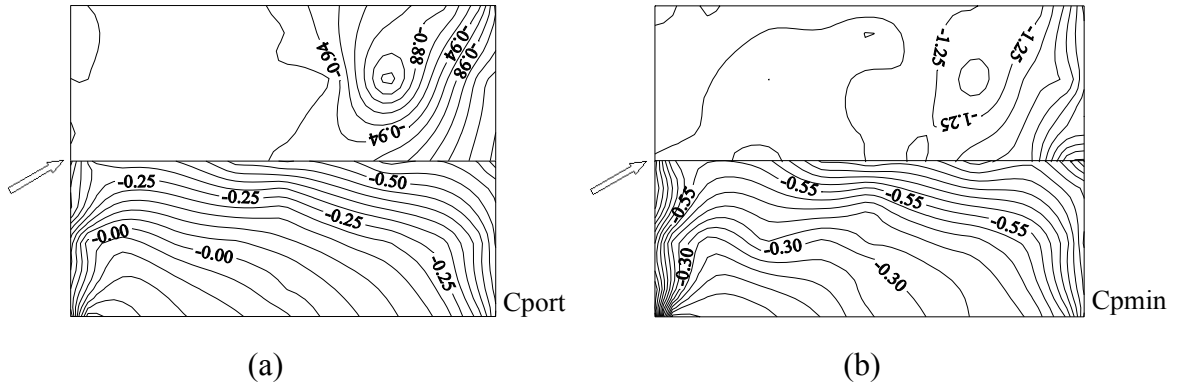
Şekil 3.60a ve b, 60° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımlarını göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşesi yakınında ortalama -0.93 ve -1.66 olarak ölçülmüştür. Çatı ön yüzeyinde ölçülen basınç katsayıları sırt bölgesi hariç pozitif değerler almaktadır. Çatı arka yüzeyinde ise negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.

Şekil 3.61a ve b'de, 90°'lik rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşeleri yakınında sırasıyla -0.86 ve -1.54 olarak gerçekleşmiştir. Bina ön duvarında ve çatı ön yüzeyinde rüzgarın itme etkisi nedeniyle pozitif basınç alanı oluşmaktadır. Bina arka duvarı ise çatı yüzeyi ile kıyaslandığında daha hafif olmakla birlikte emme etkisi göstermektedir.

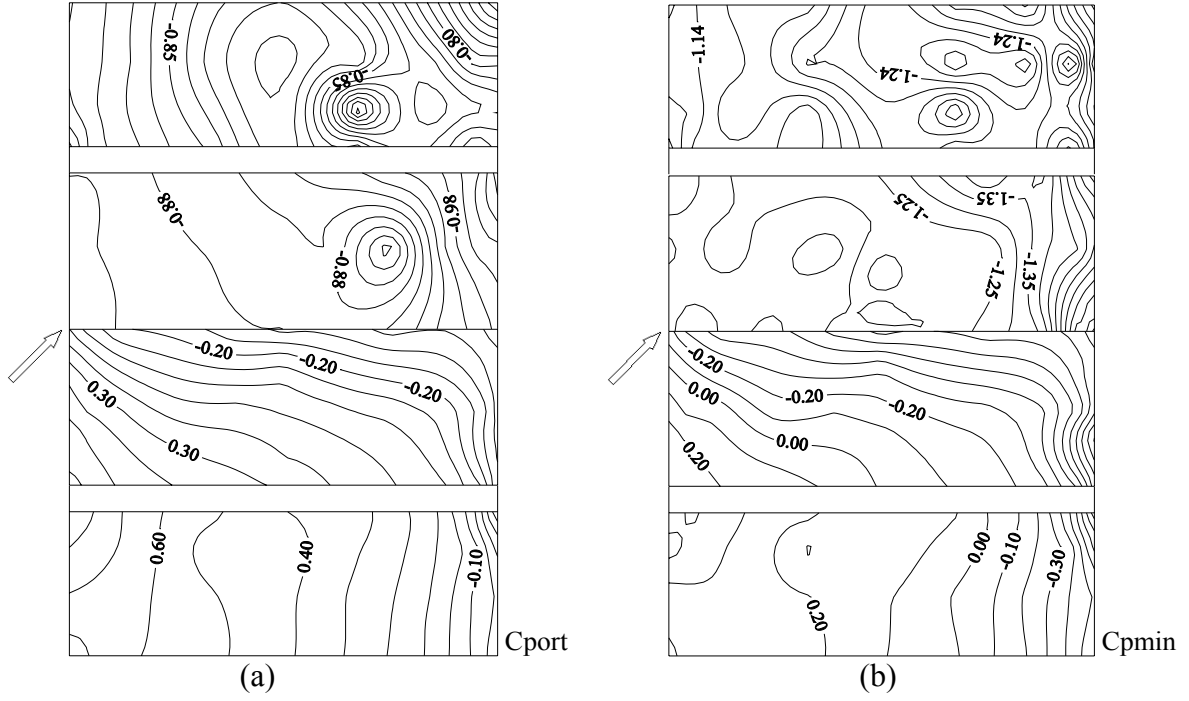




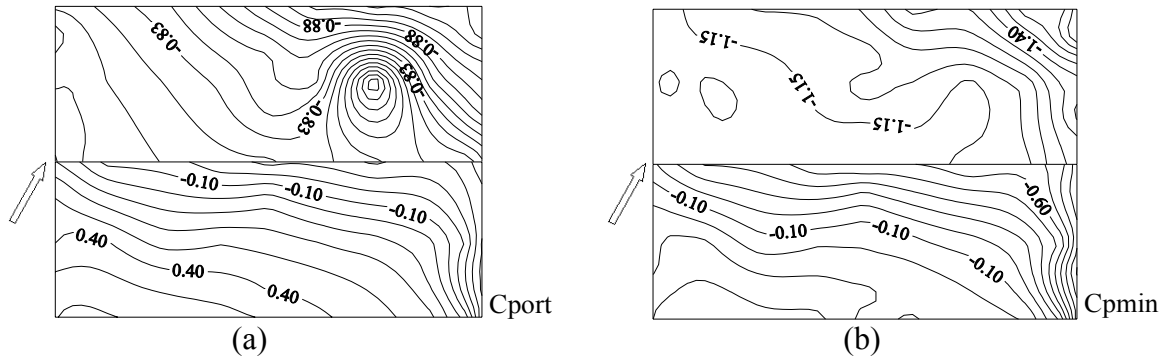
Şekil 3.57.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için normal saçaklı modelin yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



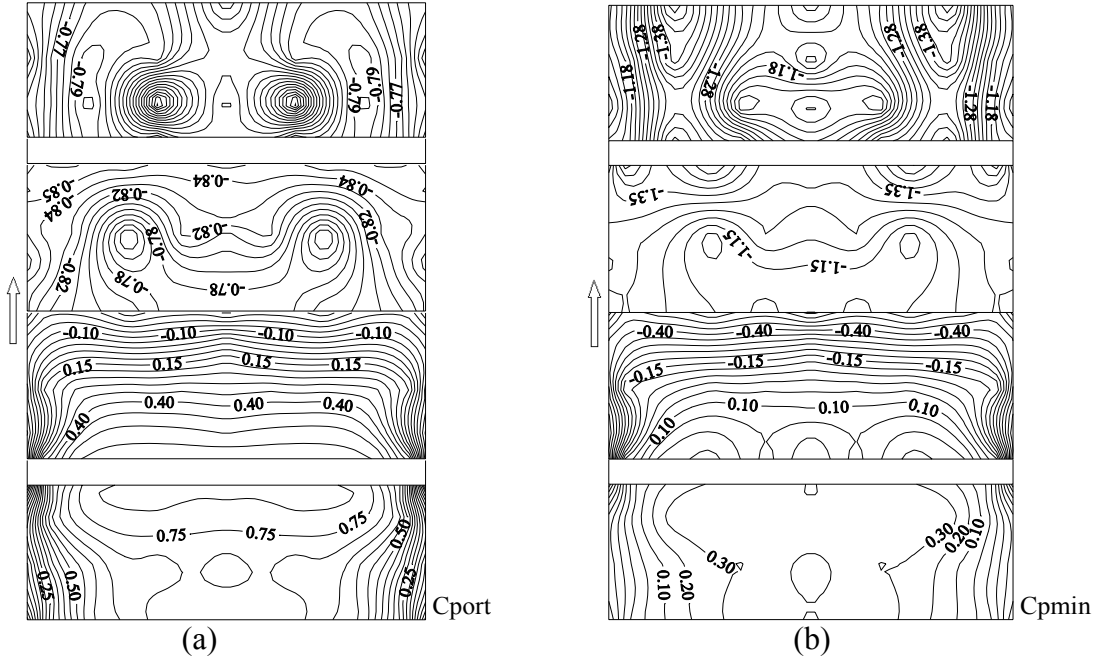
Şekil 3.58.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 30^\circ$  için normal saçaklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.59.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 45^\circ$  için normal saçaklı modelin yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



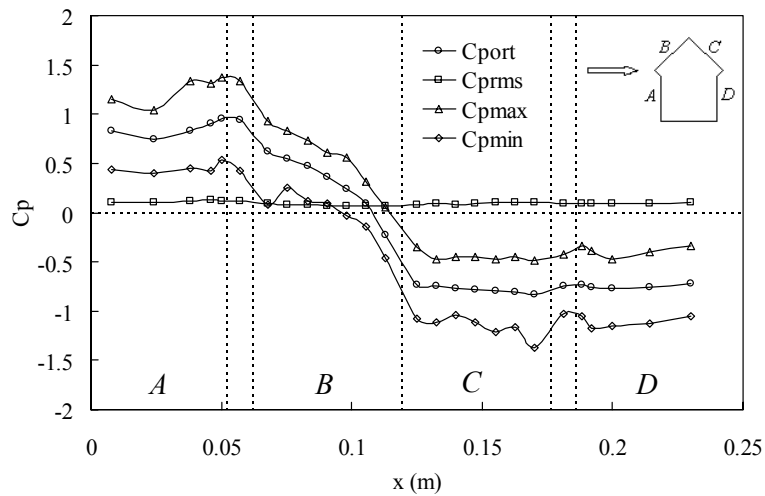
Şekil 3.60.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 60^\circ$  için normal saçaklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.61.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için normal saçaklı modelin yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

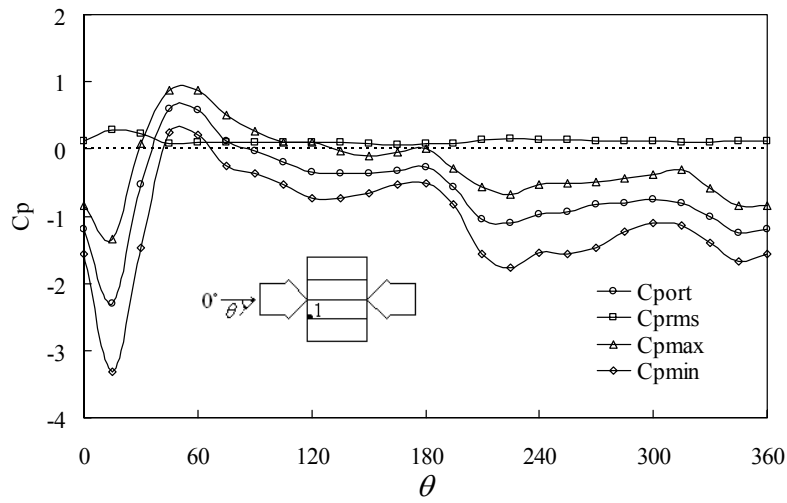
### 3.5.2.2. 45° Eğimli Yelkiran Saçaklı Beşik Çatılı Model

Şekil 3.62’de, 45° eğimli yelkesen saçaklı beşik çatıya sahip bina modelinin orta eksenini boyunca yüzey basınçlarının ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin değişimi görülmektedir. Rüzgara doğrudan maruz kalan model ön duvarında ve çatı ön yüzeyinin büyük bölümünde basınç dağılımı pozitif olmaktadır. Çatı sırtından itibaren akış ayrılması nedeniyle, çatı arka yüzeyinde ve arka duvarda negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.

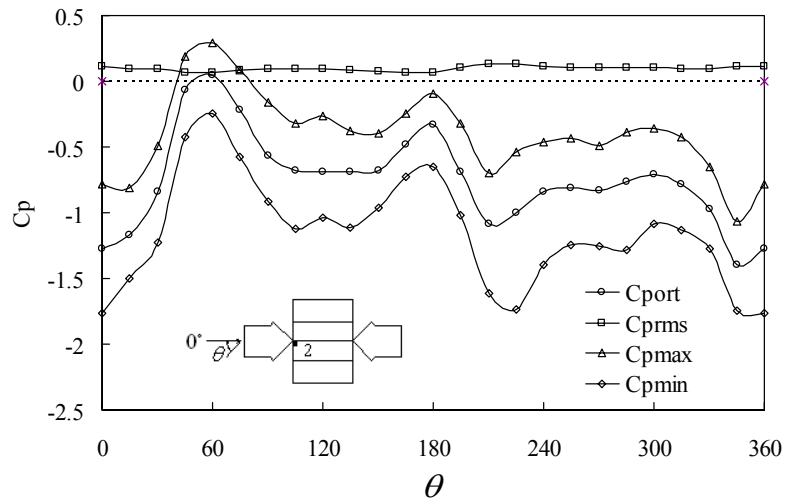


Şekil 3.62.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için yelkiran saçaklı bina modelinin orta eksenini boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi

Şekil 3.63a ve b’de, çatı ve sırt köşelerinde açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. Rüzgar tarafındaki ön çatı köşesi yakınında açılmış 1 numaralı basınç deliğinde  $15^\circ$  aralıklarla tüm rüzgar açılarında ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının  $-3.31$  değeriyle,  $15^\circ$  lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayıları  $-1.76$  ve  $-1.73$  değerleriyle sırasıyla  $0^\circ$  ve  $225^\circ$ ’lik rüzgar açılarında gerçekleşmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.63.  $\alpha = 45^\circ$  eğimli yelkiran saçaklı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri  
a) Çatı köşesi, b) Çatı sırt köşesi

45° eğimli yelkiran saçaklı beşik çatıya sahip bina modelinin yüzeyleri üzerindeki ortalama ve minimum basınç dağılımları, rüzgar geliş açılarına göre eş basınç alanları şeklinde, Şekil 3.64-3.68'de verilmektedir.

0° rüzgar açısı için Şekil 3.64a ve b'de verilen ölçümlerin sonuçlarına göre, çatının tümü üzerindeki basınç alanı negatif olmaktadır. En kritik basınç katsayısı değerlerinin, rüzgar tarafındaki çatı sırt köşeleri yakınında ortalama -1.37 ve minimum -1.92 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Hem ortalama hem de minimum basınç katsayılarının ölçüm yapılan tüm noktalarda negatif değerler alması, çatı üzerinde bir emme etkisinin olduğunu göstermektedir. Çatı ön kenarında beşik boyunca kritik olan bu etki çatının arka kenarına doğru ilerledikçe azalmaktadır. Saçak boyunca saçak altı ve saçak üstü basınç dağılımları benzerlik göstermektedir. Model yan duvarları çatı üstündeki etkiye benzer şekilde, ön kenardan arka kenara doğru azalan bir emme etkisi altında kalmaktadırlar.

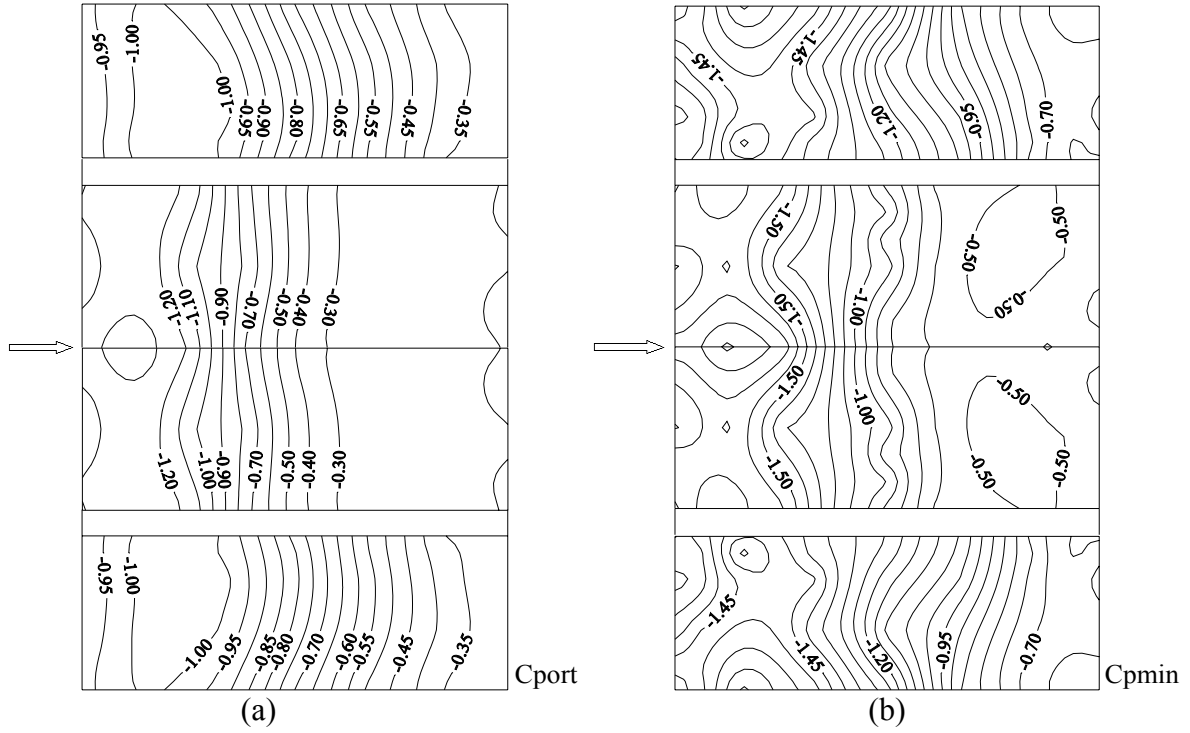
Şekil 3.65a ve b'de, 30°'lik rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımları verilmektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, çatının rüzgara göre arka bölgesindeki sırt köşesi yakınında sırasıyla -1.09 ve -1.67 olarak elde edilmiştir. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha riskli olmaktadır.

Şekil 3.66a ve b'de, 45° rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Çatı üzerindeki en kritik değerler, rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşesi yakınında ortalama -1.10 ve minimum -1.76 olarak ölçülmüştür. Çatı ön yüzeyinde ölçülen basınç katsayıları, sırt bölgesi dışında, pozitif değerler almaktadır. Çatının rüzgara göre arka bölgesi, kritik emme etkisi açısından daha riskli olmakta, kritik değerler çatı köşesi ve sırt köşesi yakınında oluşmaktadır. Rüzgar tarafındaki yan duvar üzerinde ölçülen basınç katsayıları yüzeyin büyük bölümünde pozitif değerler, arka taraftaki yan duvar üzerinde ise negatif değerler almaktadır.

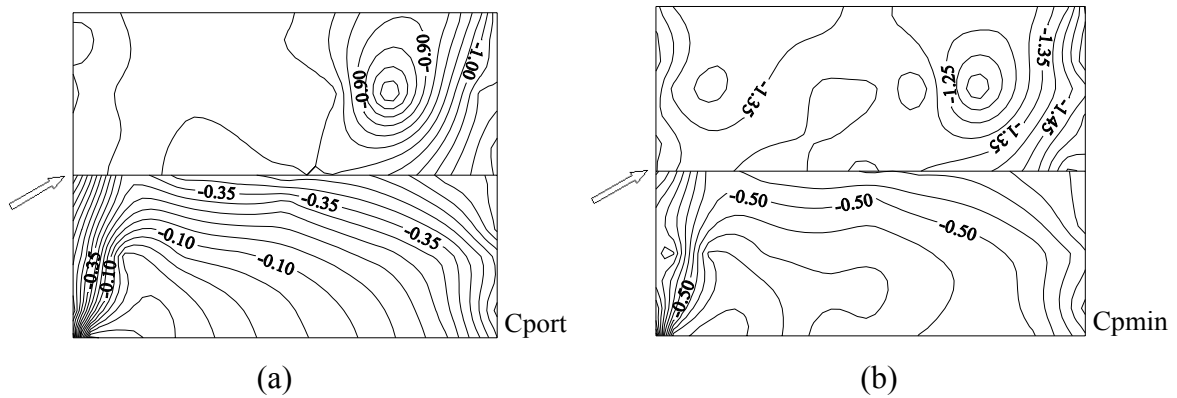
Şekil 3.67a ve b, 60° rüzgar açısı için ortalama ve minimum yerel basınç dağılımlarını göstermektedir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşesi yakınında ortalama -0.96 ve -1.66 olarak ölçülmüştür. Çatı ön yüzeyinde ölçülen basınç katsayıları sırt bölgesi hariç pozitif değerler almaktadır. Çatı arka yüzeyinde ise negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.

Şekil 3.68a ve b'de, 90°'lik rüzgar açısında yapılan ölçümler verilmiştir. Model üzerindeki en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, rüzgar tarafında olmayan çatı arka köşeleri yakınında sırasıyla -0.85 ve -1.50 olarak gerçekleşmiştir. Bina ön duvarında

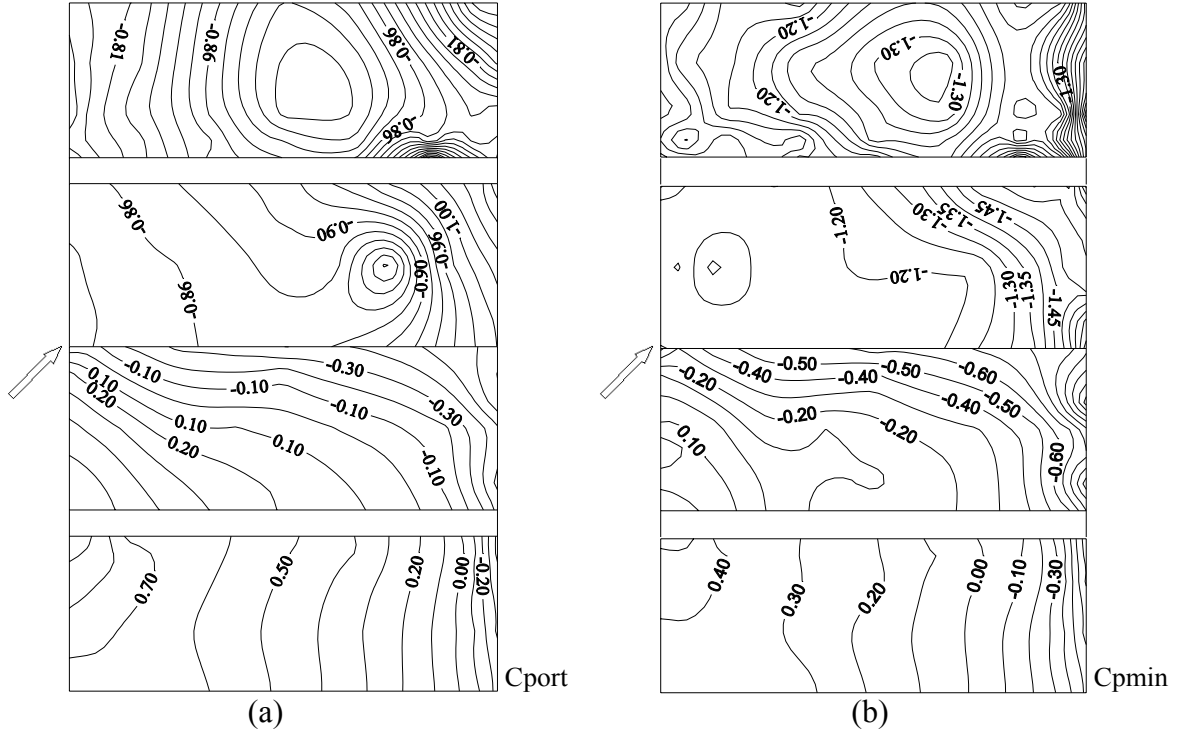
ve çatı ön yüzeyinde rüzgarın itme etkisi nedeniyle pozitif basınç alanı oluşmaktadır. Bina arka duvarı ise çatı yüzeyi ile kıyaslandığında daha hafif olmakla birlikte emme etkisi göstermektedir.



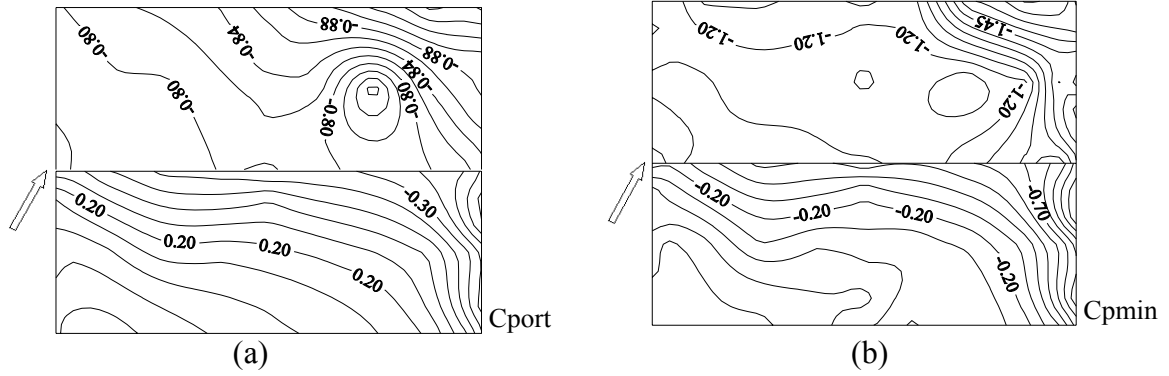
Şekil 3.64.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  için yelkırın saçaklı modelin yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



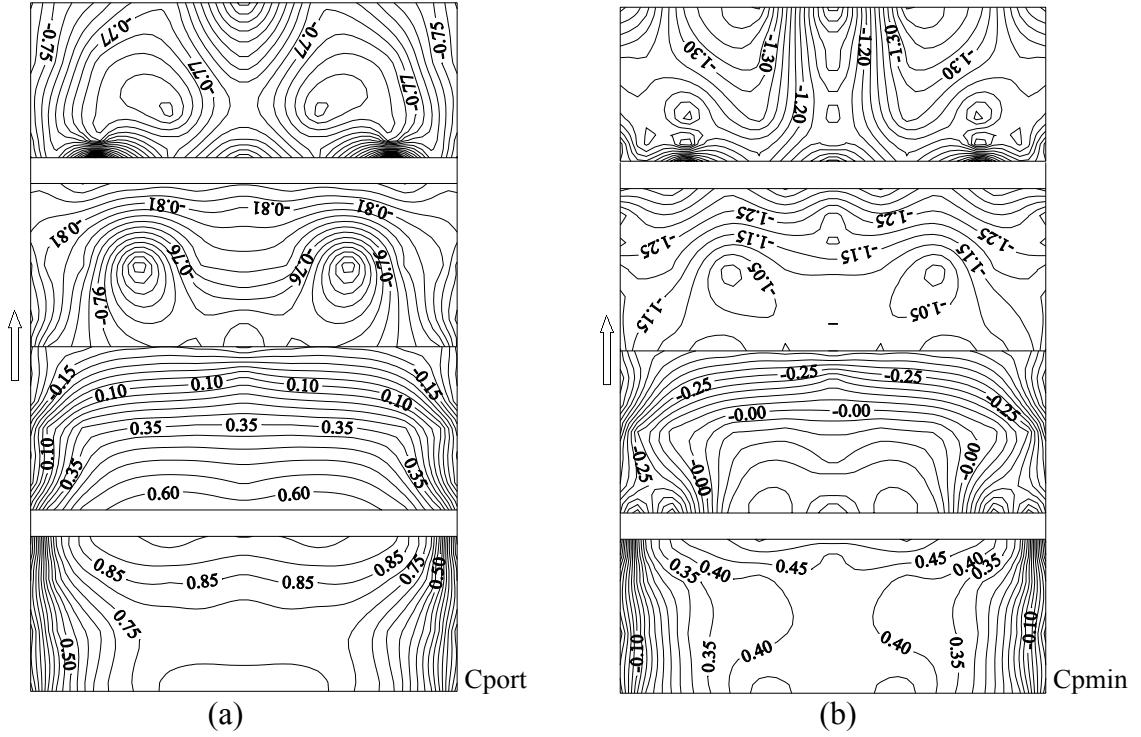
Şekil 3.65.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 30^\circ$  için yelkırın saçaklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.66.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 45^\circ$  için yelkiran saçaklı modelin yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



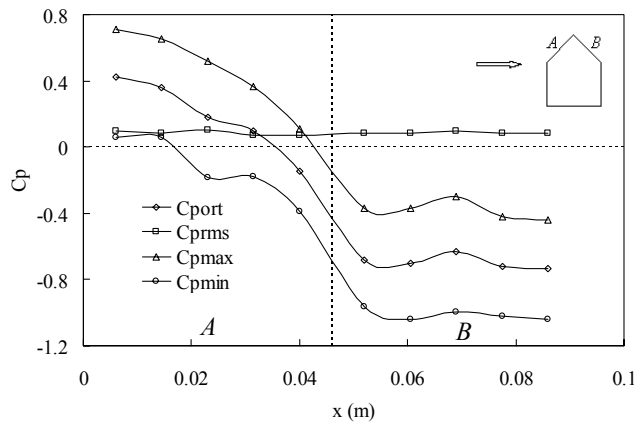
Şekil 3.67.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 60^\circ$  için yelkiran saçaklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı



Şekil 3.68.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için yelkiran saçaklı modelin yüzeylerindeki eş basınç alanları a) Ortalama basınç katsayısı b) Minimum basınç katsayısı

### 3.5.3. $45^\circ$ Eğimli Kıрма Çatılı Model

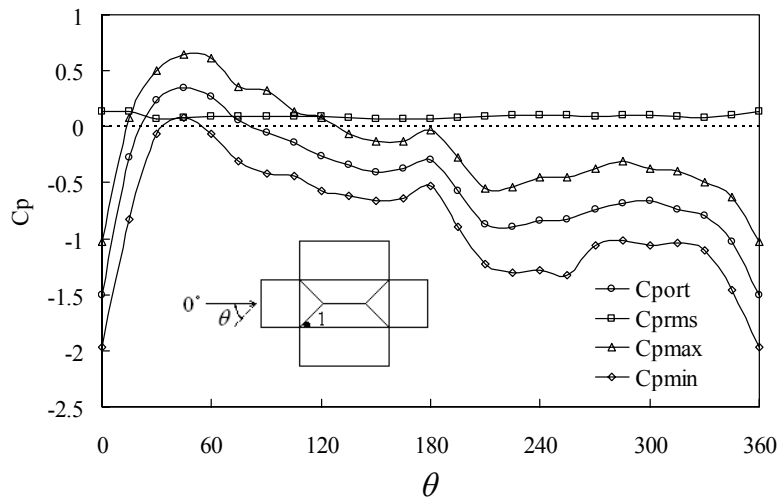
Şekil 3.69'da,  $45^\circ$  eğimli kırma çatıya sahip bina modelinin orta eksenini boyunca yüzey basınçlarının ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin değişimi görülmektedir. Rüzgara doğrudan maruz kalan çatı ön yüzeyinin büyük bölümünde basınç dağılımı pozitif olmaktadır. Çatı sırtından itibaren akış ayrılması nedeniyle, çatı arka yüzeyinde negatif bir basınç alanı oluşmaktadır.



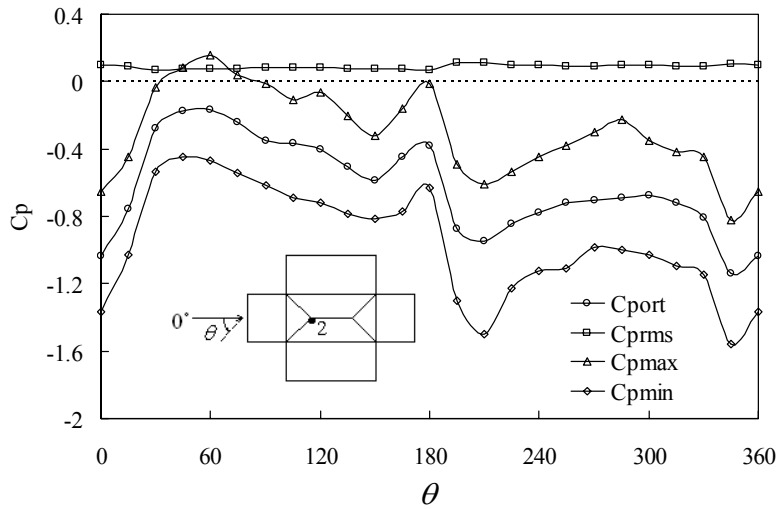
Şekil 3.69.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için kırma çatılı model orta eksenini boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimi



Şekil 3.70a ve b'de,  $45^\circ$  çatı eğimine sahip kırma çatılı bina modelinin çatı ve sırt köşelerinde açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. Rüzgar tarafındaki ön çatı köşesi yakınında açılmış 1 numaralı basınç deliğinde  $15^\circ$  aralıklarla tüm rüzgar açılarında ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının  $-1.97$  değeriyle,  $0^\circ$ lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayısı  $-1.6$  değeriyle  $345^\circ$ lik rüzgar açısında gerçekleşmiştir.



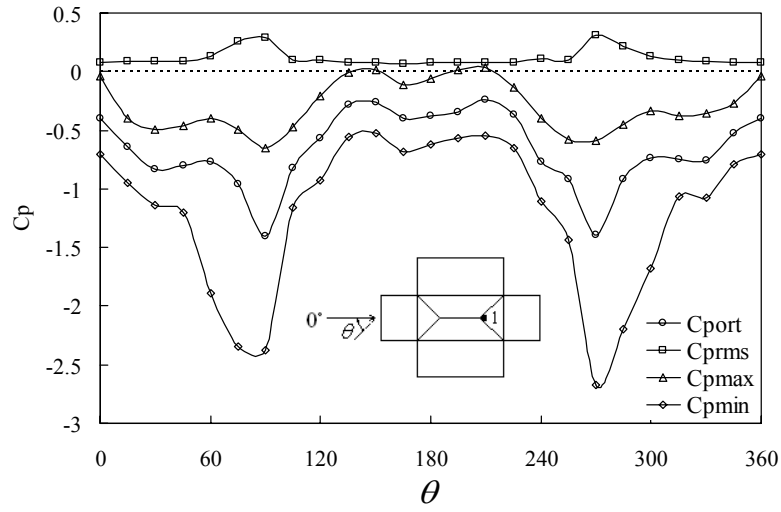
(a)



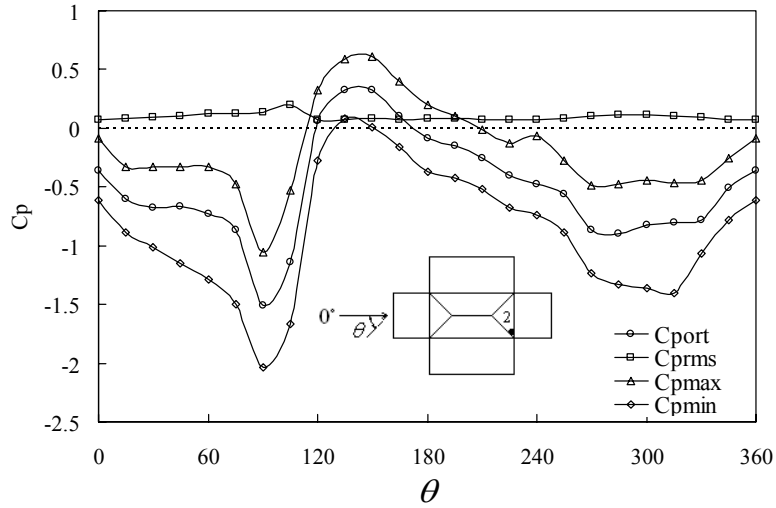
(b)

Şekil 3.70.  $\alpha = 45^\circ$  eğimli kırma çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri  
a) Çatı köşesi, b) Çatı sırtı köşesi

Şekil 3.71a ve b'de, aynı kırma çatılı bina modelinde çatının rüzgara göre arka tarafındaki yüzeyinde köşelerde ölçülen basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. 1 numaralı basınç deliğinde ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının -2.66 değeriyle,  $90^\circ$  ve  $270^\circ$  rüzgar açılarında olduğu görülmektedir. 2 numaralı basınç deliğinde ölçülen en kritik minimum basınç katsayısı ise,  $90^\circ$ 'lik rüzgar açısında -2 olarak gerçekleşmiştir.



(a)



(b)

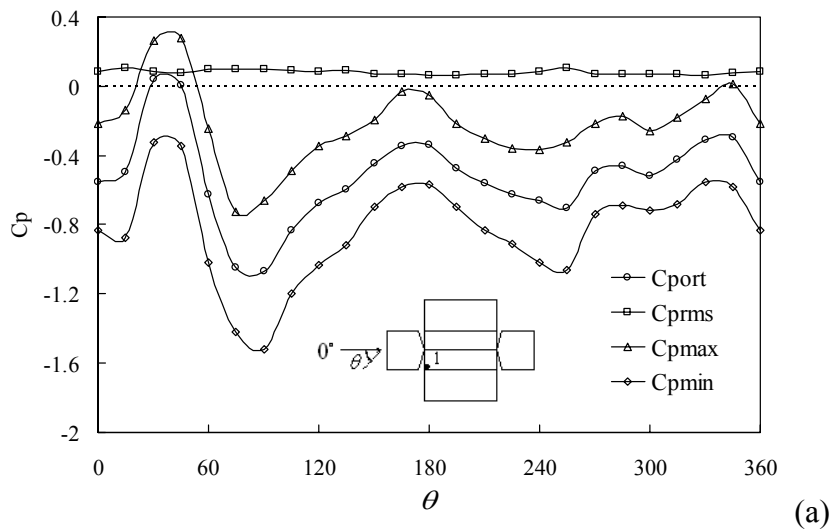
Şekil 3.71.  $\alpha = 45^\circ$  eğimli kırma çatılı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri  
a) Çatı köşesi, b) Çatı sırt köşesi

### 3.5.4. Spoilerli Model

Çatılar üzerindeki emme yükünü azaltmaya yönelik olarak düşünülen spoiler benzeri elemanlar, diğer çatı eğimlerine göre daha kritik olan  $15^\circ$  eğimli saçaksız beşik çatılı modelle birlikte denenmiştir. 10 mm genişliğinde ve 1 mm kalınlığındaki spoilerler, çatı ön ve arka kenarı ile çatı sırtının her iki tarafı boyunca yerleştirilmiştir. Yüzey basıncı ölçümleri,  $90^\circ$  lik rüzgar geliş açısında, çatı yüzeyi ve spoilerler arasındaki açıklığın 1, 3 ve 5 mm olduğu durumlarda yapılmıştır.

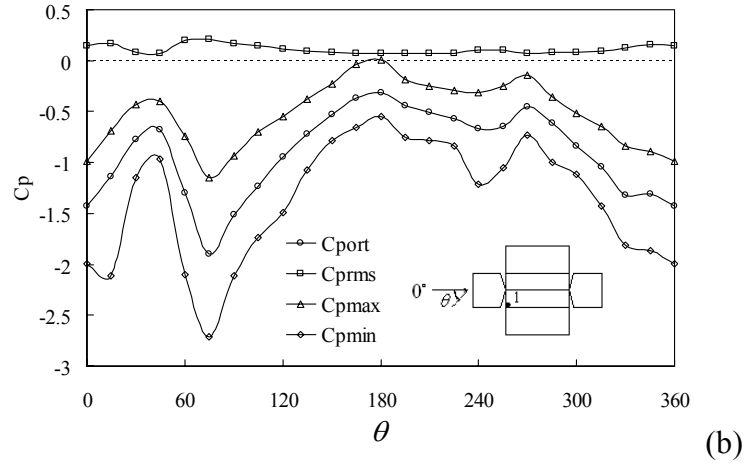
#### 3.5.4.1. 1 mm Spoiler Açıklıklı Model

Şekil 3.72a ve b'de, çatı köşelerinde açılmış 1 nolu basınç deliğinden ölçülen basıncın ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin rüzgar açısına göre değişimleri sırasıyla, 1 mm spoiler açıklıklı model ve normal model için verilmiştir. Spoilerli çatıda, tüm rüzgar açılarında ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının  $-1.52$  değeriyle,  $75^\circ$  ile  $90^\circ$  lik rüzgar açısı aralığında oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.72a). Spoilerin olmadığı normal çatıda, minimum basınç katsayısının en kritik değeri  $-2.71$  olarak  $75^\circ$  lik rüzgar açısında meydana gelmektedir (Şekil 3.72b). 1mm açıklıklı spoilerlerin çatı köşesindeki minimum pik basıncı yaklaşık %44 oranında azalttığı görülmektedir.

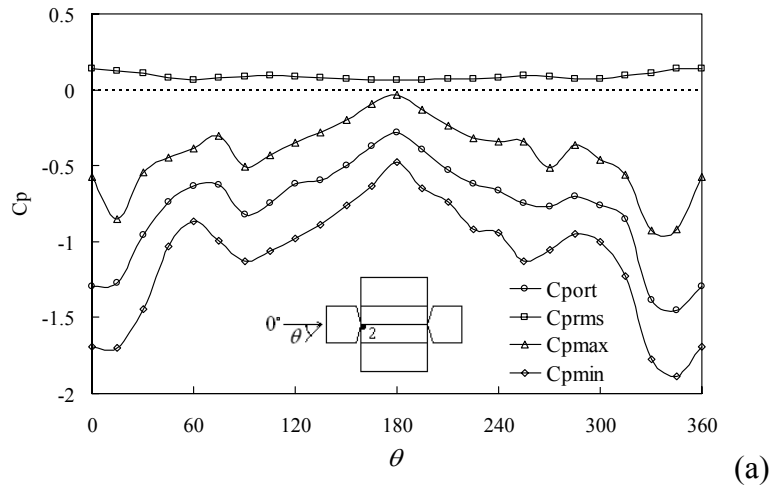


Şekil 3.72.  $\alpha = 15^\circ$  eğimli çatının köşesindeki yerel basıncın rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı

Şekil 3.72'nin devamı

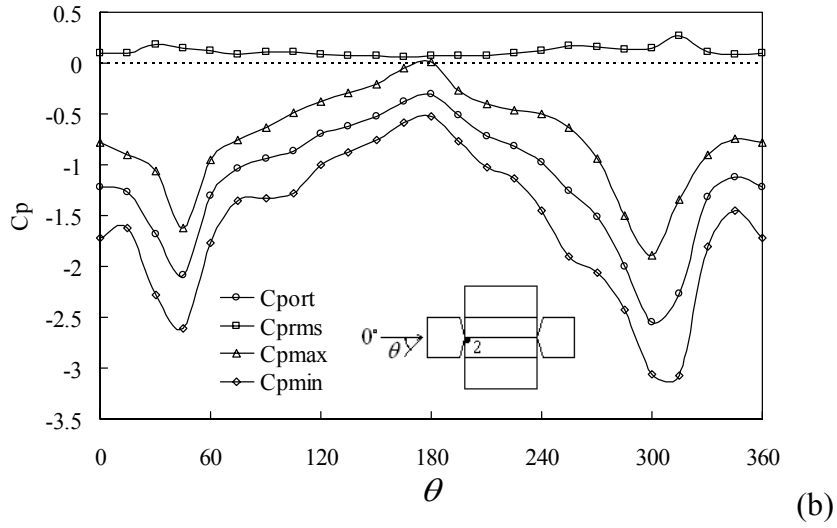


Şekil 3.73a ve b'de, çatı sırt köşelerinde açılmış 2 nolu basınç deliğinden ölçülen basıncın ortalama, rms, maksimum ve minimum değerlerinin rüzgar açısına göre değişimleri sırasıyla, 1 mm spoiler açıklıklı model ve normal model için verilmiştir. Spoilerli çatıda, tüm rüzgar açılarında ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayısının -1.9 değeriyle,  $345^\circ$ 'lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir (Şekil 3.73a). Spoilerin olmadığı normal çatıda, en kritik minimum basınç katsayıları -2.60 ve -3.07 olarak sırasıyla,  $45^\circ$  ve  $315^\circ$  lik rüzgar açılarında bulunmuştur (Şekil 3.73b). 1mm açıklıklı spoilerlerin çatı sırt köşesindeki minimum pik basıncı yaklaşık %38 oranında azalttığı görülmektedir.



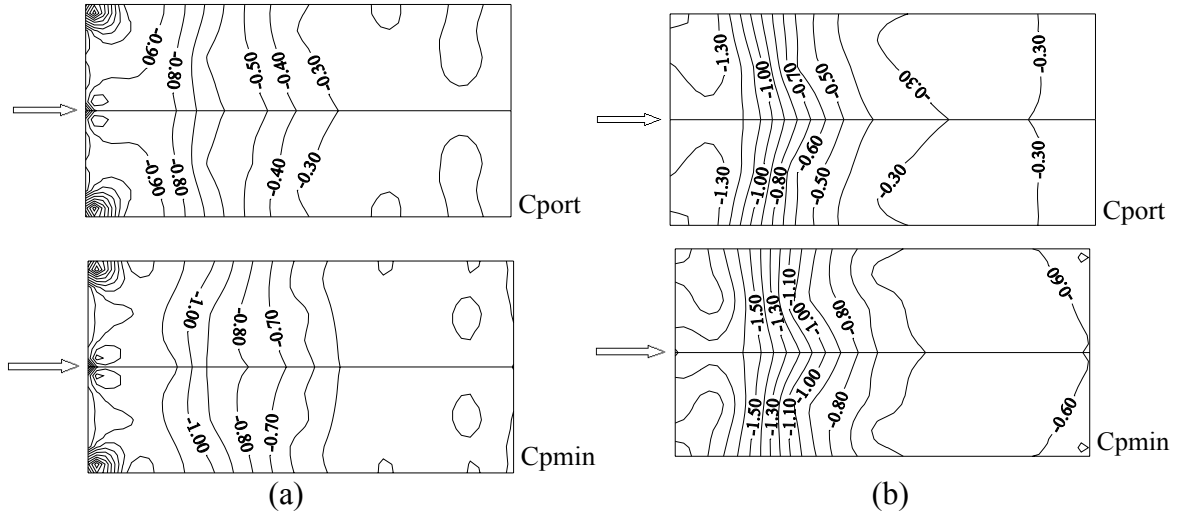
Şekil 3.73.  $\alpha = 15^\circ$  eğimli çatının sırt köşesindeki yerel basıncın rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı

Şekil 3.73'ün devamı

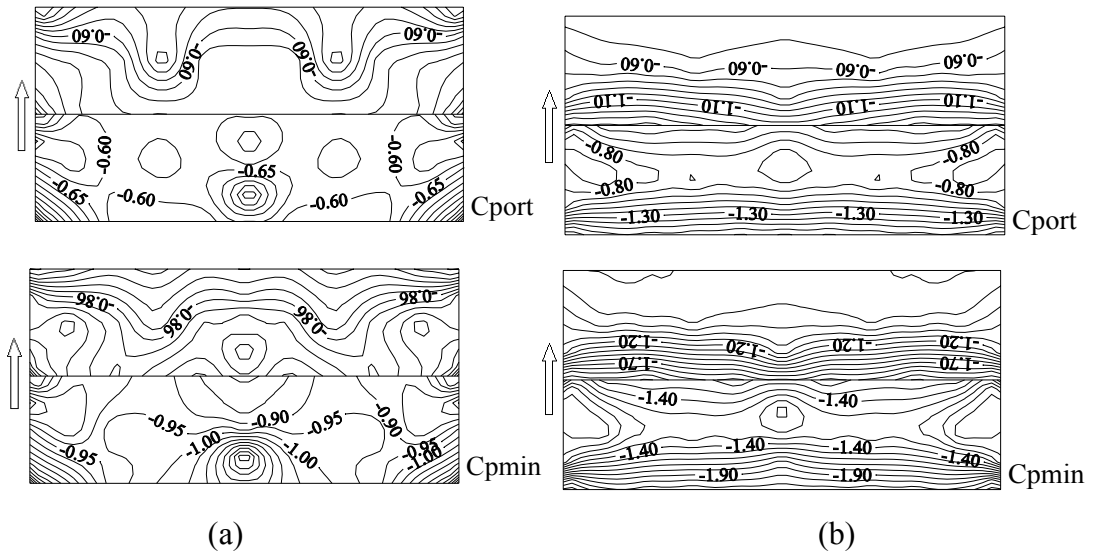


Şekil 3.74 ve 3.75, 1 mm açıklıklı spoilerli çatı ve normal çatının yüzeyleri üzerindeki yerel basınçların ortalama ve minimum değerlerini eş basınç alanları şeklinde, sırasıyla,  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  lik rüzgar geliş açılarına göre göstermektedir.  $0^\circ$  lik rüzgar geliş açısında; spoilerli durumda, çatı yüzeyinde ortalama basınçlar  $-0.90$  ve  $-0.30$ , minimum basınçlar  $-1.0$  ile  $-0.70$  aralığında değişmektedirler (Şekil 3.74a). Normal çatı durumunda, ortalama basınçlar  $-1.30$  ve  $-0.30$ , minimum basınçlar ise  $-1.50$  ile  $-0.80$  aralığında oluşmaktadır (Şekil 3.74b). Bu sonuçlardan, spoilerlerin binanın uzunlaması doğrultusunda ( $0^\circ$  lik açıda) gelen rüzgar durumunda, çatının rüzgar tarafındaki ön bölgesindeki emme yükünü yaklaşık %50 oranında azalttığı görülmektedir.

$90^\circ$  lik rüzgar geliş açısında; spoilerli durumda, ortalama basınçlar çatının rüzgar tarafındaki yüzeyinde  $-0.65$  ve arka yüzeyinde  $-0.60$ , minimum basınçlar ön yüzeyde  $-1.0$  ve arka yüzeyde  $-0.86$  değerlerindedir (Şekil 3.75a). Normal çatı durumunda, ortalama basınçlar ön yüzeyde  $-1.30$  ile  $-0.80$  ve arka yüzeyde  $-1.10$  ile  $-0.60$  aralıklarında, minimum basınçlar ise ön yüzeyde  $-1.90$  ile  $-1.40$  ve arka yüzeyde  $-1.70$  ile  $-1.20$  aralıklarında oluşmaktadır (Şekil 3.75b). Bu sonuçlar, spoilerlerin özellikle çatı ön ve arka kenarlarındaki emme yüklerini sırasıyla, %47 ve %49 oranlarında azalttığını; çatıların ön ve arka yüzeyleri boyunca düzgün sayılabilecek bir basınç alanı oluşturduğunu göstermektedir.



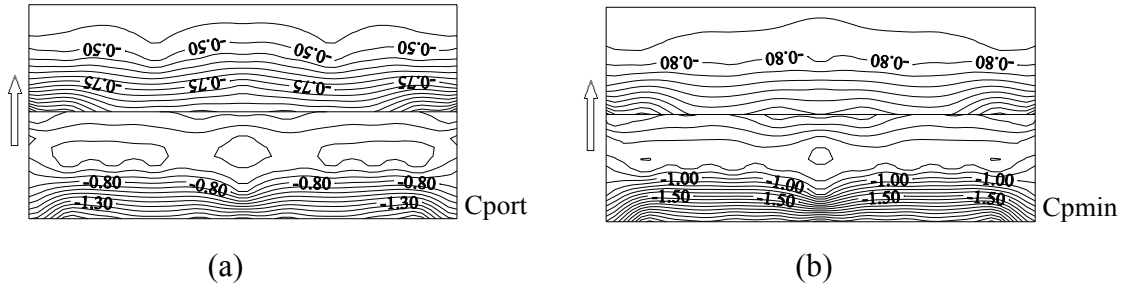
Şekil 3.74.  $\theta = 0^\circ$  rüzgar geliş açısında  $\alpha = 15^\circ$  eğimli çatının yüzeyindeki eş basınç alanları a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı



Şekil 3.75.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında  $\alpha = 15^\circ$  eğimli çatının yüzeyindeki eş basınç alanları a) 1 mm spoiler açıklıklı çatı, b) normal çatı

### 3.5.4.2. 3 mm Spoiler Açıklıklı Model

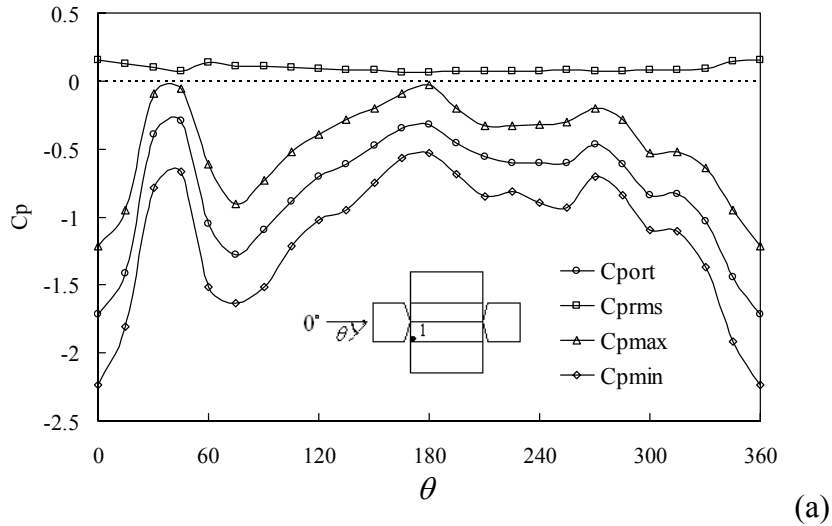
Şekil 3.76 a ve b'de, 3 mm açıklıklı spoilerli çatının yüzeyleri üzerindeki yerel basınçların ortalama ve minimum değerleri, 90°'lik rüzgar açısına göre eş basınç alanları şeklinde verilmiştir. Ortalama basınçlar, çatının rüzgar tarafındaki yüzeyinde -1.30 ile -0.8 ve arka yüzeyinde -0.75 ile -0.5 aralıklarında, minimum basınçlar ise ön yüzeyde -1.5 ile -1 ve arka yüzeyde -0.8 ile -0.85 aralıklarında oluşmaktadır.



Şekil 3.76.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için 3 mm spoiler açıklıklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama b) Minimum

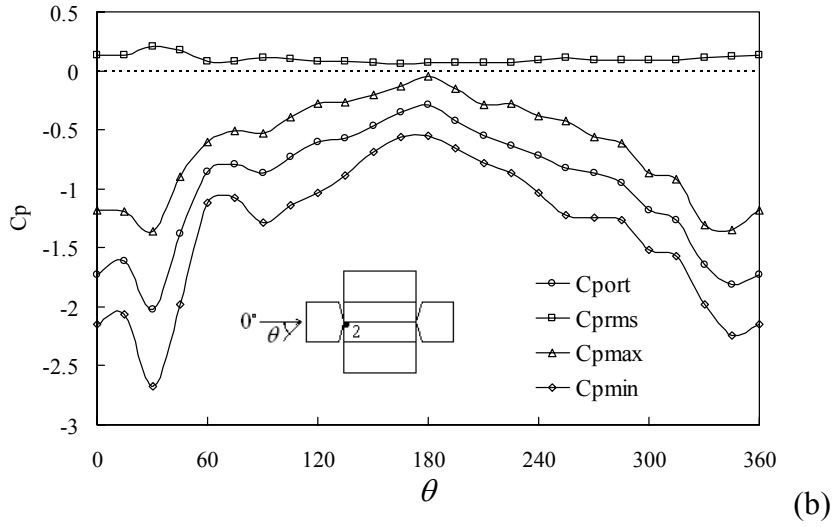
### 3.5.4.3. 5 mm Spoiler Açıklıklı Model

Şekil 3.77a ve b'de, 5 mm spoiler açıklıklı modelin çatı ve sırt köşelerinde açılmış basınç deliklerinden ölçülen ortalama, rms, maksimum ve minimum basınçların rüzgar açısına göre değişimleri verilmiştir. 1 numaralı basınç deliğinde  $15^\circ$  aralıklarla tüm rüzgar açıları ölçülmüş en kritik minimum basınç katsayıları  $-2.24$  ve  $-1.63$  değerleriyle,  $0^\circ$  ve  $75^\circ$ lik rüzgar açıları arasında bulunmuştur. 2 numaralı basınç deliğinde en kritik minimum basınç katsayısının  $-2.67$  değeriyle  $30^\circ$ lik rüzgar açısında olduğu görülmektedir.



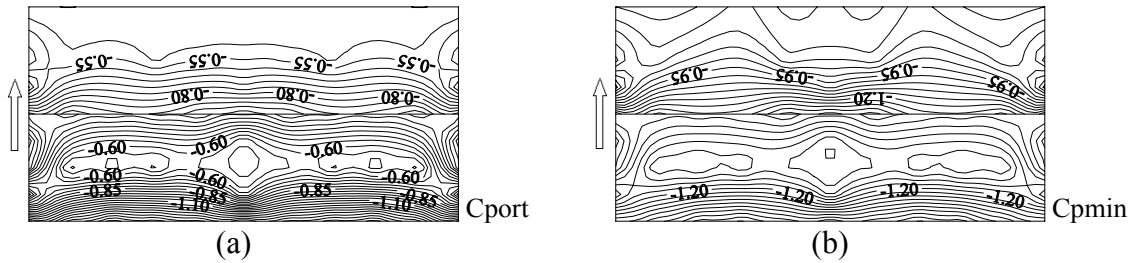
Şekil 3.77.  $\alpha = 15^\circ$  eğimli 5 mm spoiler açıklıklı modelin çatı ve sırt köşelerindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) çatı köşesi, b) çatı sırtı köşesi

Şekil 3.77'nin devamı



Şekil 3.76 a ve b'de, 3 mm açıklıklı spoilerli çatının yüzeyleri üzerindeki yerel basınçların ortalama ve minimum değerleri, 90° lik rüzgar açısına göre eş basınç alanları şeklinde verilmiştir. Ortalama basınçlar, çatının rüzgar tarafındaki yüzeyinde -1.30 ile -0.8 ve arka yüzeyinde -0.75 ile -0.5 aralıklarında, minimum basınçlar ise ön yüzeyde -1.5 ile -1 ve arka yüzeyde -0.8 ile -0.85 aralıklarında oluşmaktadır.

Şekil 3.78a ve b'de, 5 mm açıklıklı spoilerli çatının yüzeyleri üzerindeki yerel basınçların ortalama ve minimum değerleri, 90° lik rüzgar açısına göre eş basınç alanları şeklinde verilmiştir. Ortalama basınçlar, çatının rüzgar tarafındaki yüzeyinde -1.10 ile -0.6 ve arka yüzeyinde -0.8 ile -0.55 aralıklarında, minimum basınçlar ise ön yüzeyde -1.2 ve arka yüzeyde -0.95 değerlerinde oluşmaktadır.



Şekil 3.78. α = 15° ve θ = 90° için 5 mm spoiler açıklıklı modelin çatısı üzerindeki eş basınç alanları a) Ortalama b) Minimum



## 4. İRDELEME

Bu çalışmada, değişik tipte ve değişik çatı eğimlerindeki bina modelleri etrafındaki akış alanı, hız ve basıncın ortalama ve çalkantı değerlerinin ölçülmesi, akış gözlenmesi ve sayısal çözümle birlikte bütünlük oluşturacak şekilde kapsamlı araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, aşağıda verilen deneysel ve sayısal bölümler şeklinde irdelenmiştir.

### 4.1. Deneysel Sonuçlar

Rüzgar tüneline öncelikle atmosferik sınır tabaka benzeşimi için deneyler yapılmıştır.  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimlerindeki bina modelleri etrafındaki akış alanları hakkında ön bilgiye sahip olmak için yağ ve parafin buharı teknikleri kullanılarak akış görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çatı üzerinde yoğun olmak üzere bina modeli etrafında hız ve yüzeylerinde basınç ölçümleri yapılmıştır.

#### 4.1.1. Ortalama Hız ve Türbülans Ölçümleri

Düz çatı üzerindeki ortalama hız profillerinden, akışın ön kenardan ayrılarak bir ters akış bölgesinin meydana geldiği ve yaklaşık  $0.45H$  civarında tekrar tutunduğu görülmektedir (Şekil 3.8c).  $15^\circ$  eğimli çatıda, çatı ön kenarından ayrılan akışın oluşturduğu ters akış bölgesi düz çatıya oranla daha küçük olmakta ve türbülans seviyelerinin çatının arka tarafına doğru gittikçe arttığı görülmektedir (Şekil 3.9c,d).

$30^\circ$  ve  $45^\circ$  eğimli çatılar için Şekil 3.10c ve Şekil 3.11c'deki ortalama hız dağılımlarından, çatının rüzgar tarafındaki yüzeyi boyunca herhangi bir akış ayrılmasının olmadığı görülmektedir. Artan çatı eğimi akış ayrılmasını önlemektedir. Çatının arka bölgesinde ise, çatı sırtından hemen sonra akış ayrılmakta ve tekrar tutunmamaktadır.  $45^\circ$  eğimli çatının arka tarafında oluşan ters akış bölgesinin daha etkin olduğu ve modelin arkasına doğru uzandığı görülmektedir. Akış görüntüleme fotoğrafları bu sonuçlarla uyum içerisindedir. Modeller üzerindeki ters akış bölgesi yüksekliği, model yüksekliğinin yaklaşık 0.6 katına kadar ulaşmaktadır. Benzer bulgular Fackrell [40] tarafından da elde edilmiştir.

Ölçüm sonuçlarına göre, tüm çatı eğimleri için model ön ve arkasında ters akış bölgeleri bulunmuştur. Özellikle, model arkasında oluşan ters akış bölgeleri model yüksekliği seviyesine yaklaşmaktadır. Çatı eğimi arttıkça, model arkasındaki ters akış bölgesinin uzunluğu da artmaktadır. Türbülans profillerinin durumu, akışta bir karışım tabakasının meydana geldiğini göstermektedir. Serbest akış ve ters akış bölgelerini ayıran bu karışım tabakasında türbülans şiddetinde önemli artışlar olmaktadır. Modellerin varlığı ters akış bölgelerinin oluşmasına neden olurken, aynı zamanda sınır tabaka kalınlığını da arttırmaktadır. Sınır tabaka model üzerinde daha kalın olmaktadır.

90° rüzgar açısında, modeller etrafında ortalama akış yönünde ölçülen türbülans şiddeti, özellikle çatının arka kısmında serbest akış ile ters akış bölgesi arasındaki karışım tabakasında en büyük değerleri almaktadır. Akış alanındaki en büyük türbülans şiddeti, düz çatı üzerinde çatı ön kenarı yakınında 0.26 olarak ölçülmüştür. Çatı köşelerindeki ortalama ve türbülans hızı profilleri, model orta eksenini boyunca çatı kenarlarında elde edilen ortalama hız ve türbülans hızı profilleri ile uyumludur.

0° rüzgar açısı için farklı çatı eğimlerinde çatı sırtı boyunca akış yönünde alınan ölçümlerde, tüm çatı eğimleri için çatı saçakları yakınında küçük ölçekli ters akış bölgeleri görülmektedir. Türbülans profillerine bakıldığında çatı ön kenarından itibaren 0.3 H uzunluğunda yüzey yakınındaki türbülans değerlerinde dikkate değer bir artış vardır. Bu sonuçlar aynı şartlarda yapılan akış gözleme deneyleriyle benzerlik göstermektedir. 0°'lik rüzgar geliş açısında çatı üzerindeki akış alanının çatı eğiminden büyük ölçüde etkilenmediği görülmektedir.

#### 4.1.2. Korelasyon Ölçümleri

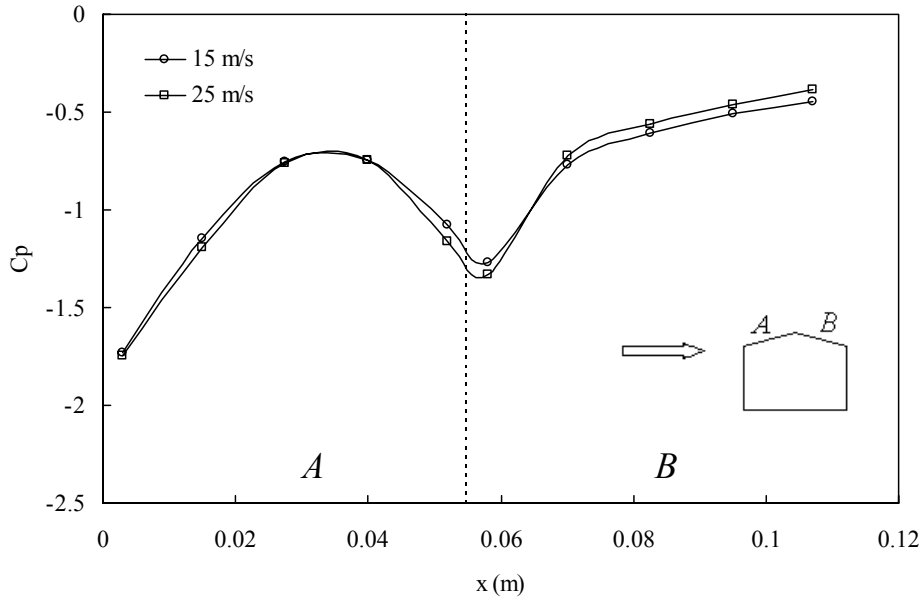
Referans sınır tabakadaki ve çatı üzerindeki hız çalkantıları arasındaki ilişkiyi araştırmaya yönelik olarak, 90° rüzgar açısında farklı çatı eğimleri için yapılan ölçümler sonucunda; çatıların arka kenarı yakınındaki korelasyon katsayılarının, ön kenardakilerden daha düşük olduğu görülmüştür. Tüm çatı eğimlerinde en büyük korelasyon katsayısı, 0.55 olarak düz çatının ön kenarında; en küçük korelasyon katsayısı 0.15 değeriyle, 45° eğimli çatının arka kenarında elde edilmiştir. 0° ve 15° eğimli çatılar için çatı üzerinde akış yönünde yaklaşık uniform olan korelasyon katsayısı değerleri, 30° ve 45° eğimli çatılarda çatı sırtından itibaren akış ayrılması nedeniyle azalmaktadır. Korelasyon katsayıları, ters

akış bölgeleri ile serbest akış bölgeleri arasındaki karışım bölgesi yakınında en büyük değerleri alırken, ters akış bölgeleri içinde en küçük değerlere inmektedir. Resim 3.3'deki akış görüntüleri ve Şekil 3.8-3.11'deki ortalama hız ve türbülans hız profillerinin davranışı, bu durumu desteklemektedir. Çatı yüzeylerinden itibaren yükseklikle artan korelasyon katsayıları,  $y/H \approx 2$  seviyesinde tüm çatı eğimleri için birbirine yakın değerler alarak, çatı yüzeyleri boyunca ortalama 0.43 mertebesinde kalmaktadır.

### 4.1.3. Basınç Ölçümleri

#### 4.1.3.1. Reynolds Sayısının Etkisi

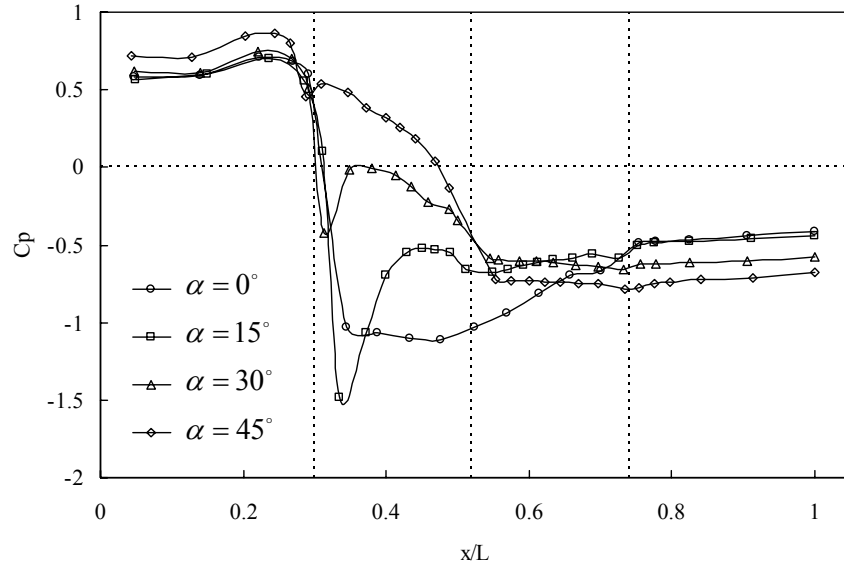
Akış alanı üzerinde Reynolds sayısının etkisinin belirlenmesi amacıyla, 15 m/s ve 25 m/s lik akış hızlarında deneyler yapılmıştır.  $15^\circ$  çatı eğimli modele dik doğrultuda gelen akışta çatı yüzeyinde ölçülen yerel ortalama basınçların orta eksen boyunca dağılımları Şekil 4.1'de verilmiştir. Her iki basınç dağılımının hemen hemen aynı olması, akış alanının Reynolds sayısından bağımsız olduğunu göstermektedir.



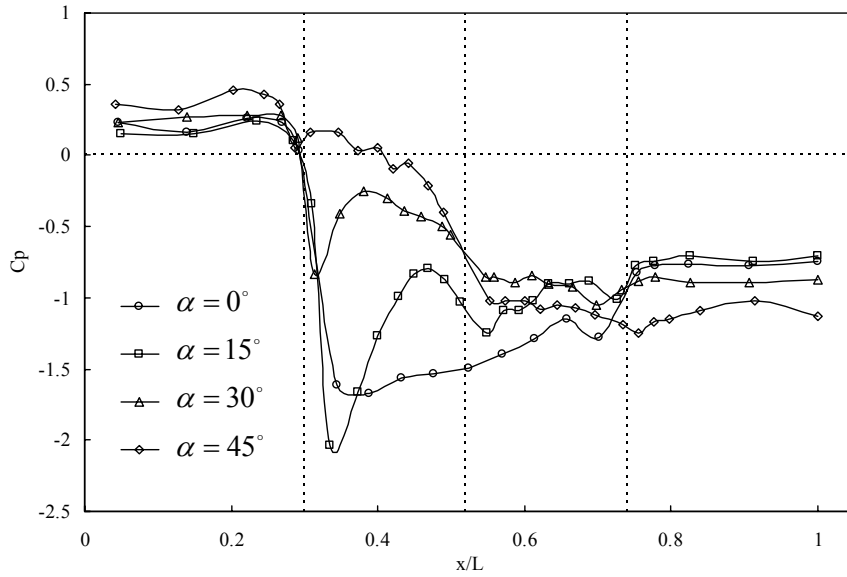
Şekil 4.1.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için orta eksen boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayılarının değişimi

#### 4.1.3.2. Çatı Eğiminin Etkisi

0°, 15°, 30° ve 45° eğimli beşik çatılara sahip bina modellerinin yüzeylerinde orta eksen boyunca akış yönündeki ölçülmüş basınç dağılımları ortalama ve minimum basınç katsayıları cinsinden Şekil 4.2 a ve b'de verilmiştir. Rüzgara doğrudan maruz kalan model ön duvarlarında bütün çatı eğimlerinde itme etkisi nedeniyle pozitif basınç alanı oluşmaktadır. Düz, 15° ve 30° eğimli çatıların ön kenarından itibaren basınç katsayılarının ortalama değerleri tüm çatı yüzeyi boyunca negatif olmaktadır (Şekil 4.2a). Çatının ön kenarının hemen yakınında, minimum değerler almakta ve sonra artarak bir maksimumdan itibaren tekrar azalmaktadır. Bu davranış ön kenardan ayrılan akış nedeniyle meydana gelen ters akış bölgeleri ile ilgilidir. Çatı eğiminin artmasıyla ters akış bölgeleri küçülmektedir. 45° eğimli çatının ön yüzeyi boyunca basınç katsayısında monoton bir azalma olup, bir ters akış bölgesi meydana gelmemektedir. Bu sonuçlar, akış görüntüleme çalışmasının sonuçları ile uyumludur. Düz çatının dışındaki çatılarda, akış çatı sırtından tekrar ayrılmakta ve basınç katsayısı çatı sırtından itibaren çatı arka yüzeyi ve bina modelinin arka duvarı boyunca hemen hemen aynı kalmaktadır. Düz çatıda ön kenardan ayrılan akış çatı yüzeyine tutunduktan sonra arka kenardan tekrar ayrılmaktadır. Şekil 4.2b'de verilen ve emme etkisinin büyüklüğünü gösteren çalkantı basınçlarının minimum değerleri, ortalama değerlerden % 30 daha düşük olmaktadır. Çatı kenarı yakınında oluşan bu minimum değerler, emme etkisinin yüksek olduğunu göstermektedir. Eaton ve diğ. [28], azalan çatı eğimlerinde emme yükünün arttığını ve yüksek kritik emmelerin rüzgar tarafındaki kenardan itibaren kısa bir mesafede etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bienkiewicz ve Sun [62], alçak bina çatıları üzerindeki kritik emme etkilerinin daima rüzgar tarafındaki ön çatı kenarı yakınında meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlardan, binanın uzunlamasına eksenine dik doğrultuda gelen rüzgar durumunda, en kritik emme etkisinin 15°'lik çatı eğiminde meydana geldiği görülmektedir.



(a)

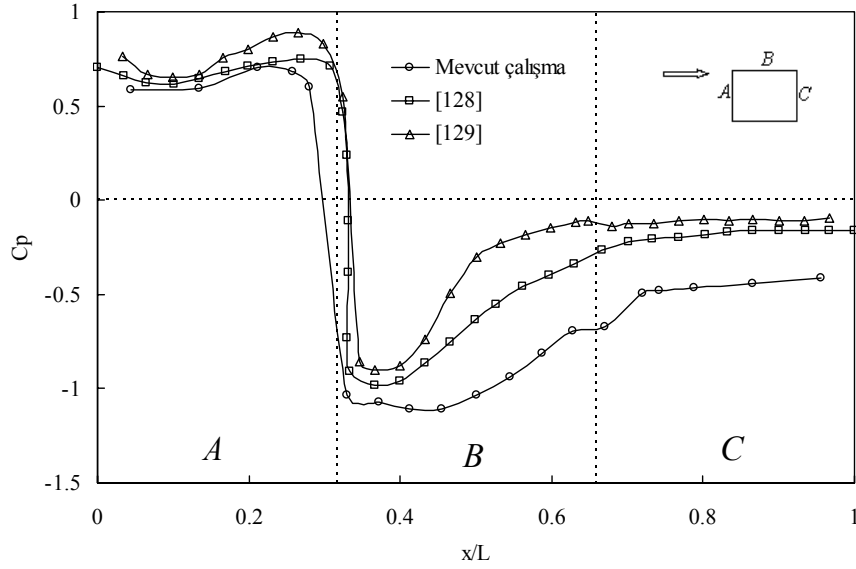


(b)

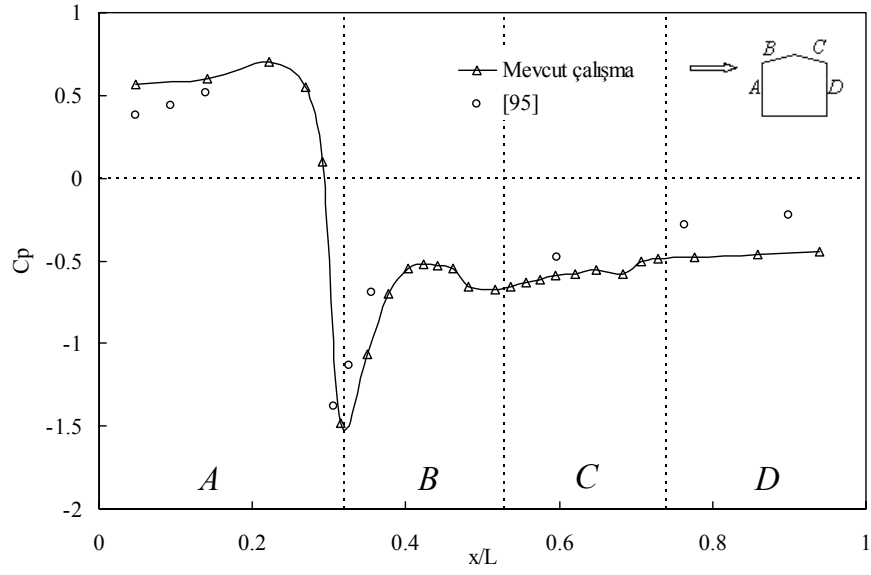
Şekil 4.2.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında farklı çatı eğimleri için model orta eksenleri boyunca akış yönünde basınç katsayısı değişimleri  
a) Ortalama b) Minimum

Şekil 4.3'de, düz çatılı modelin yüzeylerinde orta eksenini boyunca ölçülmüş ortalama basınç katsayısının değişimi, Mukarami [128] ve Castro [129]'nun ölçümleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Basınç dağılımlarındaki eğilimlerin büyük ölçüde benzer olduğu görülmektedir. Çatı ön kenarı yakınındaki minimum değerler hemen hemen aynı olup, çatı üstü ve model arka duvarında farklılıklar bulunmaktadır.  $15^\circ$  çatı eğimli modelde ölçülmüş ortalama basınç katsayısının orta eksen boyunca değişimi, Easom [95] tarafından

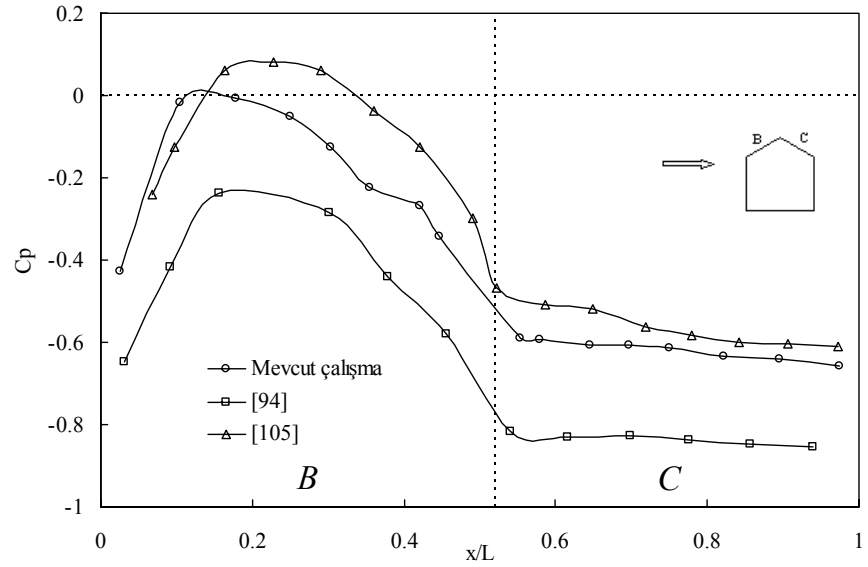
çatı eğimi  $10^\circ$  olan Silsoe binasında ölçülen gerçek-yapı sonuçları ile birlikte Şekil 4.4 de verilmiştir. Basınç dağılımındaki eğilimin çok büyük ölçüde benzer olduğu görülmektedir. Şekil 4.5,  $30^\circ$  eğimli çatı üstünde orta eksen boyunca ölçülen ortalama basınç dağılımını, Oliviera [94] nın  $27^\circ$  eğimli ve Parmentier [105]'in  $30^\circ$  eğimli çatı deneylerinin sonuçları ile birlikte göstermektedir. Basınç değişimi davranışları birbirine benzer olup, deney koşullarındaki farklılıklar nedeniyle değerlerin birbirine çok yakın olmadığı görülmektedir. Şekil 4.6'da,  $45^\circ$  eğimli çatı üstünde ölçülmüş ortalama basınç katsayılarının orta eksen boyunca değişimi, Parmentier [105]'in aynı eğimdeki ölçümleriyle birlikte verilmiştir. Basınç değişimindeki eğilimin büyük ölçüde benzer olduğu görülmektedir.



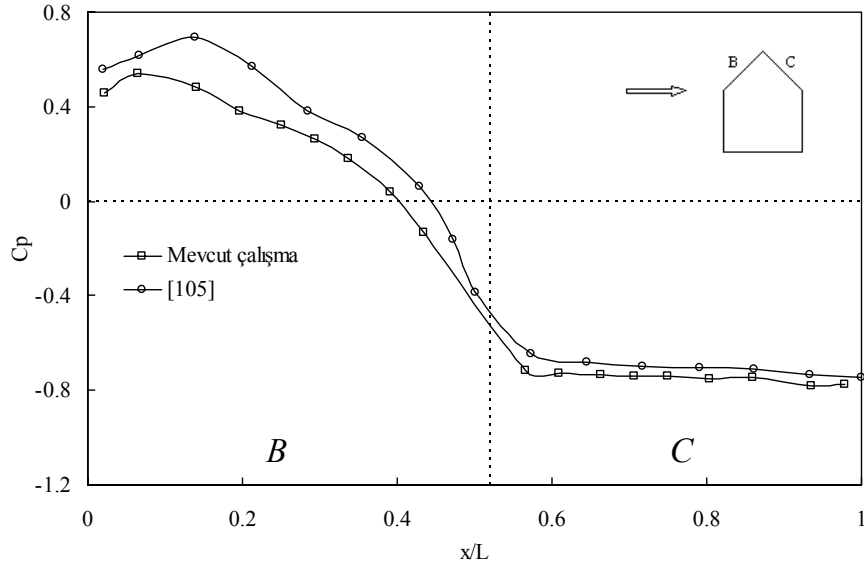
Şekil 4.3.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında düz çatılı bina modelinin orta eksenini boyuncaya akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri



Şekil 4.4.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında  $15^\circ$  eğimli beşik çatılı modelin orta eksenini boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri

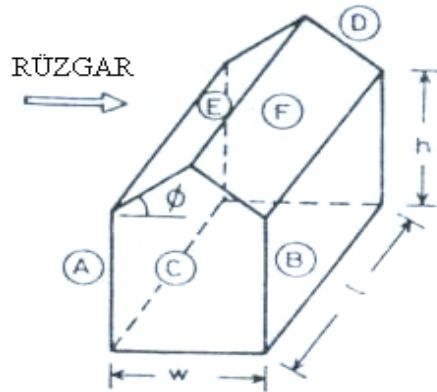


Şekil 4.5.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında  $30^\circ$  eğimli beşik çatılı modelin orta eksenini boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri



Şekil 4.6.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında  $45^\circ$  eğimli beşik çatılı modelin orta eksenini boyunca akış yönünde ortalama basınç katsayısı değişimleri

$30^\circ$  eğimli beşik çatılı bina modeli yüzeylerinde ölçülen ortalama basınç katsayılarının alan-ortalama değerleri, değişik ülkelerin standart ve bina kodlarında yer alan değerlerle birlikte Tablo 4.1'de verilmiştir. Ülkelerin coğrafi, iklim ve etkin rüzgar özelliklerinin farklılığı nedeniyle, bina kodlarındaki değerlerin birbirinden değişik olduğu görülmektedir. Bina yan duvarları ve çatının arka bölümü ile ilgili değerler genellikle birbirine yakın iken, çatının ön bölümündeki değerler negatif ve pozitif olarak farklılık göstermektedir. Sunulan çalışmanın sonuçlarının, ülke kodlarındaki değerlerin sınırları içinde olduğu söylenebilir.





Tablo 4.1. Mevcut çalışmanın ülke kodlarına göre karşılaştırması [116]

Ülke	A	B	C	D	E	F
Hindistan	0.7	-0.25	-0.60	-0.60	0.00	-0.40
Avustralya	0.80	-0.25	-0.60	-0.60	-0.20	-0.70
Kanada	0.70	-0.50	-0.70	-0.70	-0.56	-0.50
Çekoslovakya	0.80	-0.60	-0.60	-0.60	0.00	-0.40
Japonya	0.80	-0.40	-	-	0.15	-0.50
Yeni Zelanda	0.90	-0.50	-0.70	-0.70	-0.50	-0.70
Portekiz	0.80	-0.50	-0.70	-0.70	-0.10	-0.50
Romanya	0.80	-0.40	-0.40	-0.40	0.20	-0.40
İsveç	0.80	-0.40	-0.40	-0.40	0.20	-0.40
İngiltere	0.70	-0.25	-0.60	-0.60	0.20	-0.40
Uruguay	0.80	-0.40	-0.40	0.40	-0.20	-0.40
Rusya	0.80	-0.60	-0.60	-0.60	0.00	-0.40
Türkiye	0.80	-0.40	-	-	0.20	-0.40
Mevcut çalışma	0.60	-0.61	-	-	-0.17	-0.62

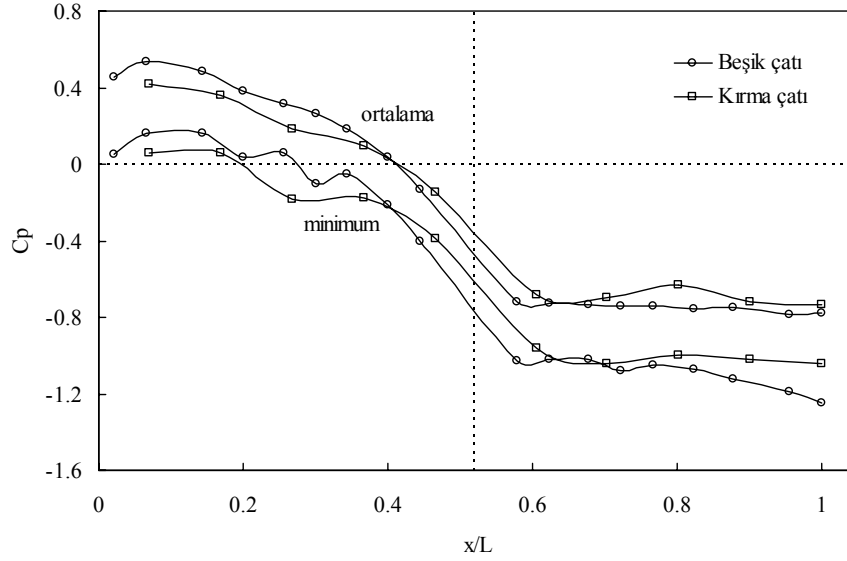
Farklı çatı eğimlerindeki binaların ön ve arka duvarları ile çatı yüzeyleri için, Türk Standartları Enstitüsü'nün TS 498 numaralı standartında verilen bağıntıya göre hesaplanan değerlerle, bu çalışmadan bulunan alan ortalamalı basınç katsayıları karşılaştırmalı olarak Tablo 4.2'de verilmiştir. TS 498 de, sadece çatı ön yüzeyindeki değerlerin çatı eğimi ile değiştiği, diğer yüzeylerdeki değerlerin aynı kaldığı görülmektedir. Sunulan çalışmanın sonuçları tümüyle çatı eğimine bağlı olmakta ve TS 498 den büyük farklılıklar göstermektedir.

Tablo 4.2. Farklı çatı eğimlerindeki bina modelleri yüzeylerinde alan-ortalama basınç katsayıları

Çatı eğimi	A		E		F		B	
	TS 498'e göre	Mevcut çalışma	TS 498'e göre	Mevcut çalışma	TS 498'e göre	Mevcut çalışma	TS 498'e göre	Mevcut çalışma
$\alpha = 0^\circ$	0.8	0.58	-0.4	-1.23	-0.4	-0.85	-0.4	-0.46
$\alpha = 15^\circ$	0.8	0.55	-0.09	-0.71	-0.4	-0.59	-0.4	-0.46
$\alpha = 30^\circ$	0.8	0.60	0.20	-0.17	-0.4	-0.62	-0.4	-0.61
$\alpha = 45^\circ$	0.8	0.66	0.45	0.22	-0.4	-0.76	-0.4	-0.73

#### 4.1.3.3. Çatı Tipinin Etkisi

Şekil 4.7’de, 45° eğimli beşik ve kırma çatılı bina modellerinin çatı yüzeyindeki basınç katsayılarının orta eksen boyunca değişimi verilmektedir. Kırma çatıda ölçülen basınçların beşik çatıya göre, ön yüzeyde daha düşük arka yüzeyde daha yüksek olduğu görülmektedir.



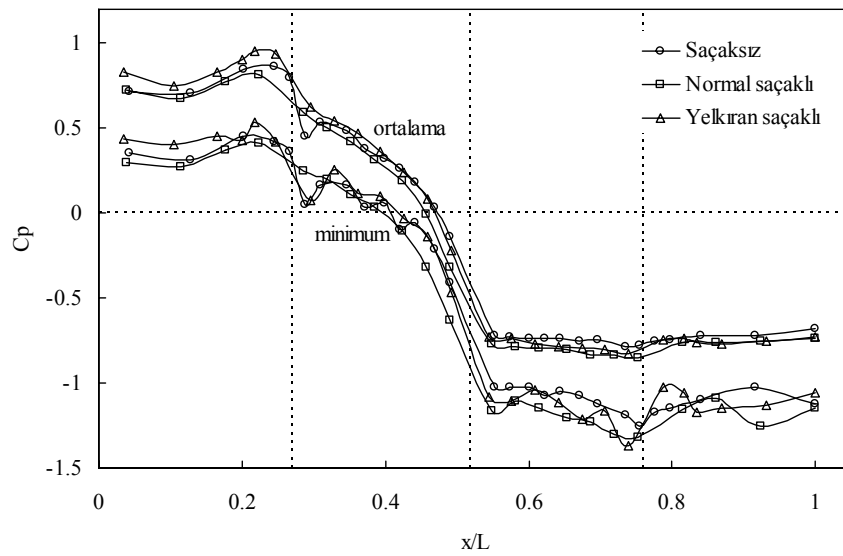
Şekil 4.7.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında 45° eğimli beşik ve kırma çatılı bina modellerinin orta eksenleri boyunca ortalama ve minimum basınç katsayısı değişimleri

Basınç çalkantılarının minimum değerleri, ortalama basınç dağılımındakine benzer şekilde, kırma çatıda daha düşüktür. Özellikle, kırma çatının arka kenarı yakınındaki emme yükü beşik çatıya göre yaklaşık %20 daha az olmaktadır. Xu ve Readon [85], beşik çatılar üzerindeki yerel pik basınçların benzer geometrideki kırma çatılara göre %50 daha büyük olduğunu ve kuvvetli rüzgarlarda kırma çatıların pek çok açıdan beşik çatılara göre daha güvenli olduğunu ifade etmişlerdir.

#### 4.1.3.4. Saçak Tipinin Etkisi

Şekil 4.8’de, 45° eğimli beşik çatılı bina modeli için, saçaksız, normal saçaklı ve yelkiran saçaklı çatı durumlarında ölçülen yüzey basınçlarının ortalama ve minimum değerlerinin orta eksen boyunca değişimi verilmiştir. Saçaklı ve saçaksız durumlardaki basınç dağılım davranışlarının aynı olduğu; yelkiran saçakın, modelin ön yüzünün çatıya

yakın bölgesinde hafif bir basınç artışı oluşturduğu görülmektedir. Minimum pik basınçların değişimine göre, saçaklı çatılar durumunda, çatı arka yüzeyi üzerindeki emme yükü biraz artmaktadır. Çatı ön kenarında ise, saçaksız ve yelkiran saçak durumlarında yüzey basıncının azaldığı görülmektedir. Yelkiran saçaklı modelde, minimum basınç değerleri, çatı arka kenarına doğru normal saçaklı ve saçaksız durumlara göre çalkantılı bir seyir izlemektedir. Bu durum, bina arkasındaki ters akış bölgesinin, saçak geometrisi nedeniyle çatı kenarına doğru yayılmasından ileri gelmektedir.

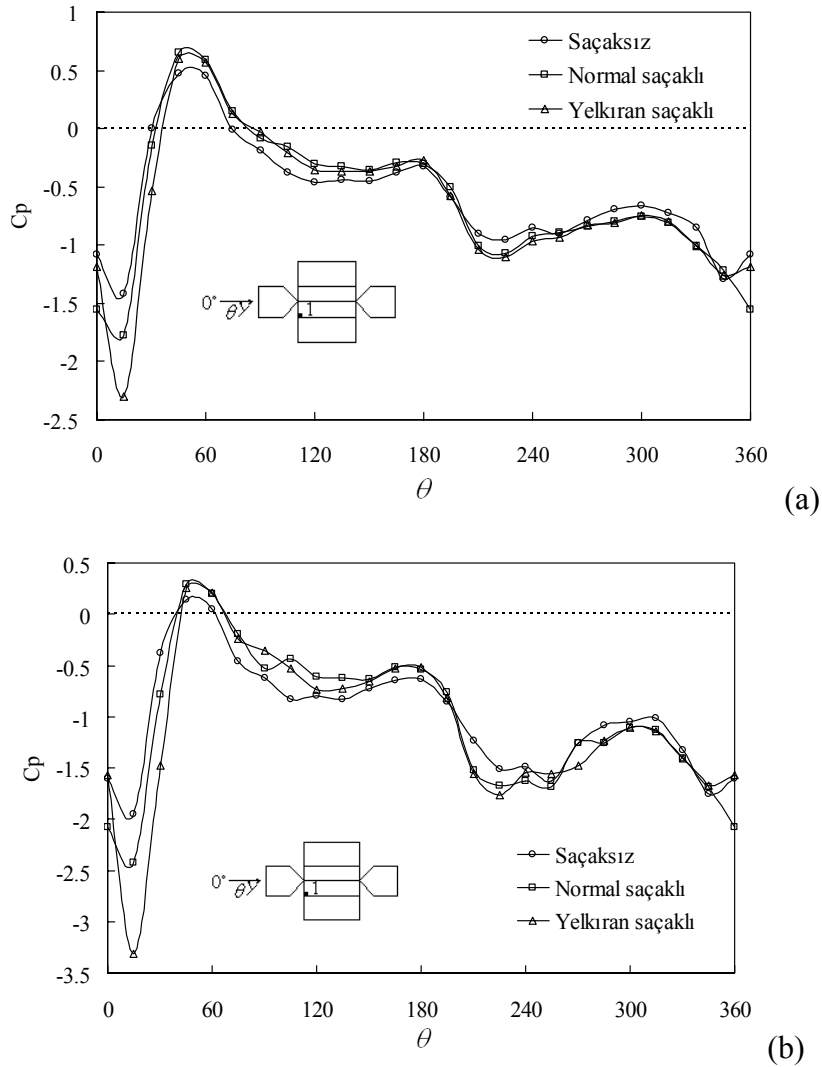


Şekil 4.8.  $\theta = 90^\circ$  rüzgar geliş açısında saçaksız, normal saçaklı ve yelkiran saçaklı  $45^\circ$  eğimli beşik çatılı modellerinin yüzeylerinde ölçülen ortalama ve minimum basıncın orta eksen boyunca değişimi

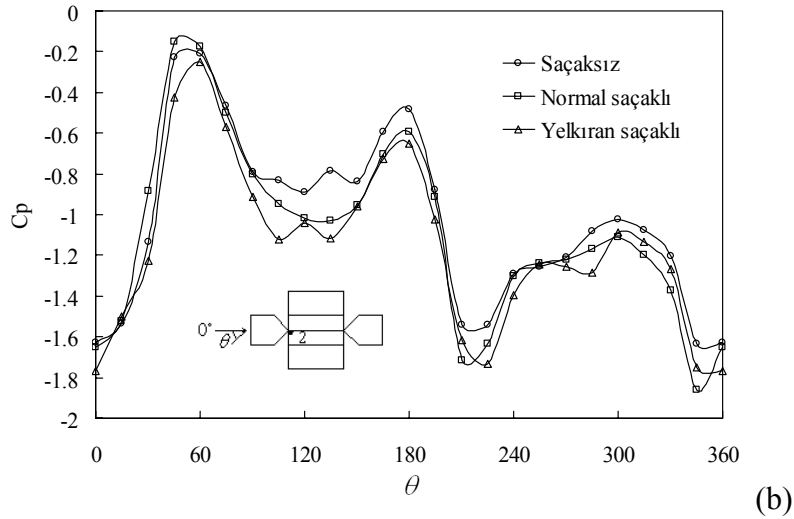
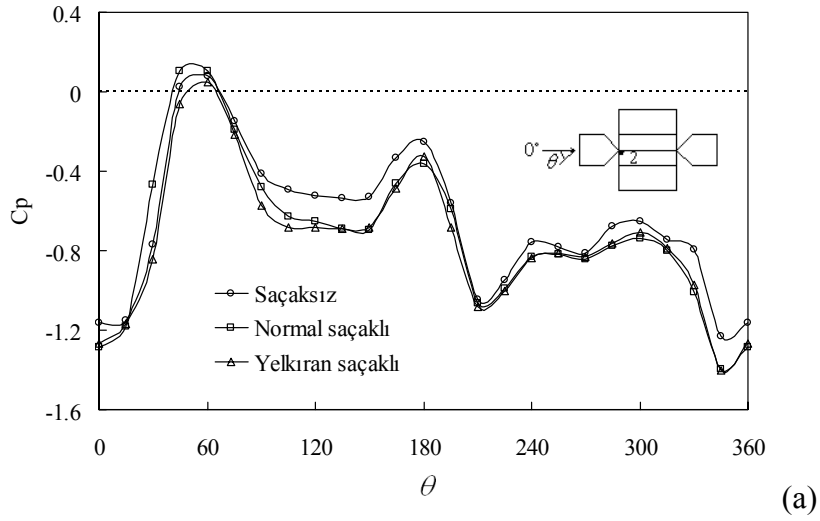
$45^\circ$  eğimli, saçaksız, düz saçaklı ve yelkiran saçaklı beşik çatılı bina modellerinin çatı köşesi ve çatı sırtı köşesindeki yerel basınçların rüzgar açısına göre değişimleri sırasıyla, Şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Üç saçak durumu, 1 numaralı çatı köşesinde ölçülen basınç dağılımlarının benzer ve en kritik rüzgar açısının  $15^\circ$  olduğu görülmektedir. Saçaklı durumda emme yükü artmakta ve yelkiran saçak normal saçağa göre % 30 civarında daha düşük bir basınç alanı oluşturmaktadır.  $45^\circ$  ve  $60^\circ$ lik rüzgar açılarında ise her saçak tipi için çatı köşesi üzerinde pozitif bir basınç alanı oluşmaktadır (Şekil 4.9a). Minimum basınçların, ortalama basınçlardan yaklaşık % 45 daha düşük olduğu,  $15^\circ$ lik rüzgar açısında özellikle yelkiran saçak köşesi üzerinde oldukça büyük bir emme yükünün meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.9b). Richardson ve diğ. [80], saçaklardaki küçük

mimari değişikliklerin rüzgar yükü dağılımı üzerinde önemli etkileri olduğunu ifade etmişlerdir.

Çatı sırt köşesindeki ortalama ve minimum basınçların rüzgar yönüne göre değişimleri Şekil 4.10a ve b'de verilmiştir. Kritik rüzgar açıların 0°, 210° ve 345°'ler olduğu, minimum basınçların ise, ortalama değerlerden yaklaşık % 30 daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan, çatı köşeleri çatı sırt köşelerine göre, emme yükü açısından daha kritik durumda olmaktadır. Çatı köşelerindeki akış ayrılmaları sonucu oluşan konik girdaplar nedeniyle, bu bölgelerdeki emme yükü daha fazla artmaktadır.



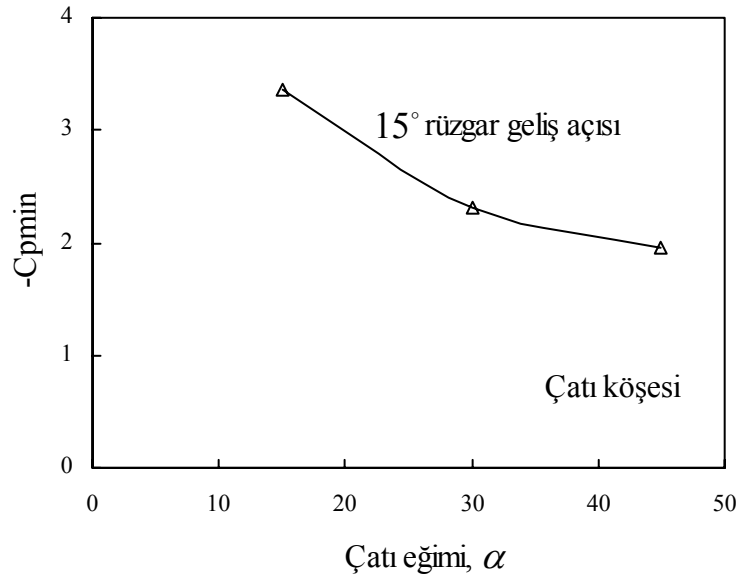
Şekil 4.9.  $\alpha = 45^\circ$  eğimli saçaksız, normal saçaklı ve yelkırır saçaklı beşik çatılı modellerin çatı köşesindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) ortalama b) minimum



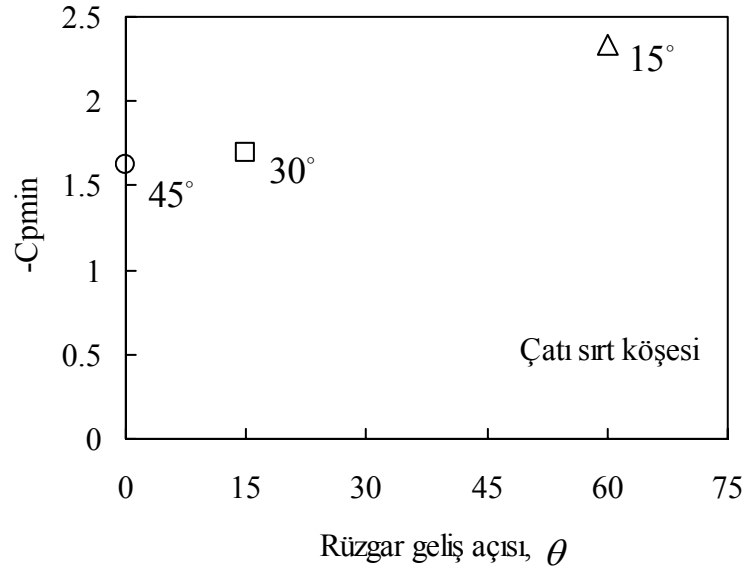
Şekil 4.10.  $\alpha = 45^\circ$  eğimli saçaksız, normal saçaklı ve yelkırın saçaklı beşik çatılı modellerin çatı sırt köşesindeki yerel basınçların rüzgar geliş açısına göre değişimleri a) ortalama b) minimum

#### 4.1.3.5. Rüzgar Açısının Etkisi

Çatılar üzerindeki eş basınç alanı dağılımlarından, çalışılan çatı eğimleri için, kritik rüzgar geliş açısı  $45^\circ$  olarak belirlenmiştir. Diğer rüzgar geliş açılara göre, bu açıda çatı yüzeyleri üzerindeki emme yükü daha fazla olmaktadır. Kanda ve Maruta [63], ortalama ve pik basınçların kritik negatif değerlerinin  $45^\circ$ lik rüzgar açısında çatı arka yüzeyinde oluştuğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 4.11.  $\theta = 15^\circ$  rüzgar geliş açısında çatı köşesindeki minimum pik basıncın çatı eğimine göre değişimi



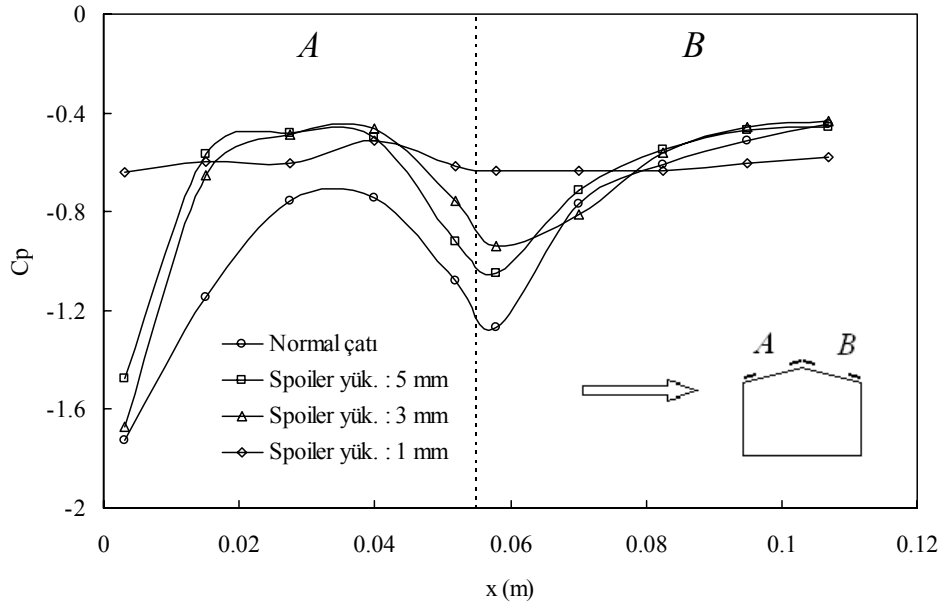
Şekil 4.12. Çatı eğimi ve rüzgar yönüne göre çatı sırt köşesindeki minimum pik basınçlar

Çatı köşelerinin  $15^\circ$ 'lik rüzgar geliş açılarında büyük emme yükü altında kaldıkları ve çatı eğiminin artmasıyla emme yükünün azaldığı belirlenmiştir. Şekil 4.11'den,  $45^\circ$  eğimli çatının köşesindeki minimum pik basıncın,  $15^\circ$  eğimli çatının köşesindeki pik basınçtan %40 daha düşük olduğu görülmektedir. Çatı sırt köşesindeki minimum pik basınçlar, rüzgar geliş açısı ve çatı eğimine göre farklılıklar göstermektedir. Şekil 4.12'den

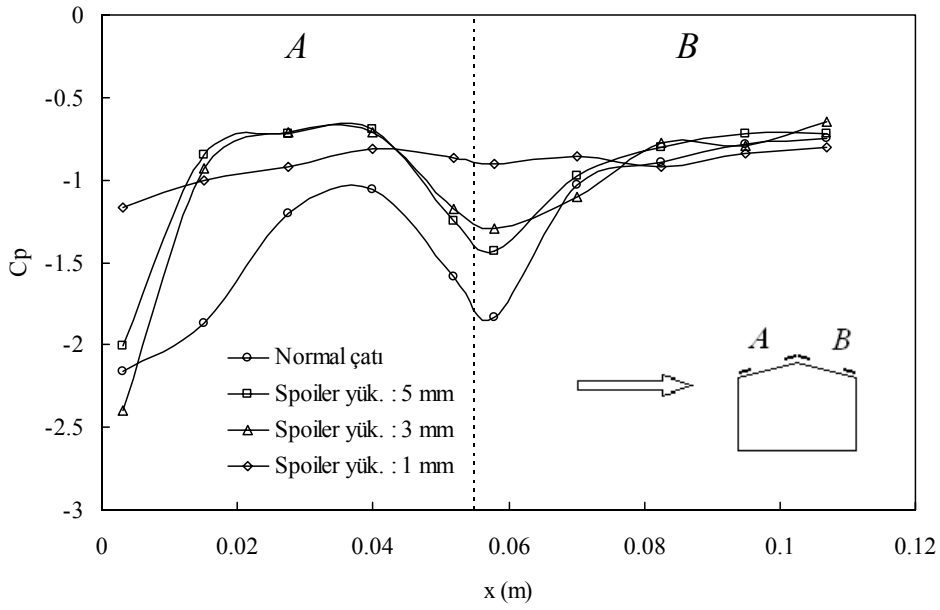
görülebileceği gibi, 15° eğimli çatının sırt köşesi için kritik rüzgar açısı 60° iken, 30° eğimli çatının sırt köşesine 15° açıyla gelen rüzgar en büyük emme etkisini oluşturmaktadır. 45° eğimli çatının sırt köşesinde ise, karşıdan gelen (0° açıyla) rüzgar en kritik etkiyi oluşturmaktadır.

#### 4.1.3.6. Spoiler Benzeri Elemanların Etkisi

Çatı üzerindeki emme yükünün azaltılmasına yönelik olarak tasarlanan spoiler benzeri elemanlar, emme yükü yönünden daha kritik olan 15° çatı eğimli modelde denenmiştir. 10 mm genişliğinde ve 1 mm kalınlığında spoiler benzeri elemanlar, çatı ön ve arka kenarları ile çatı sırtı boyunca, çatı yüzeyine paralel olarak yerleştirilmiştir. Spoiler ve çatı yüzeyi arasındaki 1, 3 ve 5 mm lik açıklıklarda, ortalama basınç ve çalkantı basıncının minimum değerlerinin çatı orta eksenini boyunca değişimleri sırasıyla, Şekil 4.13 a ve b’de verilmiştir. Çatı yüzeyinden 3 ve 5 mm lik açıklıklarda yerleştirilen spoiler elemanların sadece çatı sırtındaki emme yükünü % 25-30 arasındaki oranlarda azalttığı, çatı ön kenarında etkili olmadığı görülmektedir. 1 mm açıklıkta yerleştirilme durumunda ise, hem çatı ön kenarında hem de çatı sırtında emme yükünde % 50’ye varan azalmalar meydana gelmiştir. Çatı yüzeyi ve spoiler eleman arasındaki 1 mm’lik açıklık, model yüksekliğinin 1/65 dir. Bu orana göre, 4 m yüksekliğindeki gerçek alçak bir bina için, spoiler genişliği 60 cm ye ve çatı yüzeyi ile spoiler eleman arasındaki gerçek yapı açıklığı yaklaşık 6 cm’ye karşılık gelmektedir. Çatılar üzerindeki emme yüklerinin azaltılmasına yönelik olarak, çatı kenarlarına korkuluk gibi elemanlar yerleştirilmektedir. Sockel ve Taucher [39] tarafından yapılan bir çalışmada, bina yüksekliğinin %2’si kadar bir yükseklikteki korkulukların, çatılar üzerindeki emme yükünü % 50’ye varan oranlarda azalttığı ifade edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.13.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için farklı spoiler açıklıklarında orta eksen boyunca basınç katsayısı değişimi a) ortalama b) minimum



## 4.2. Sayısal Sonuçlar

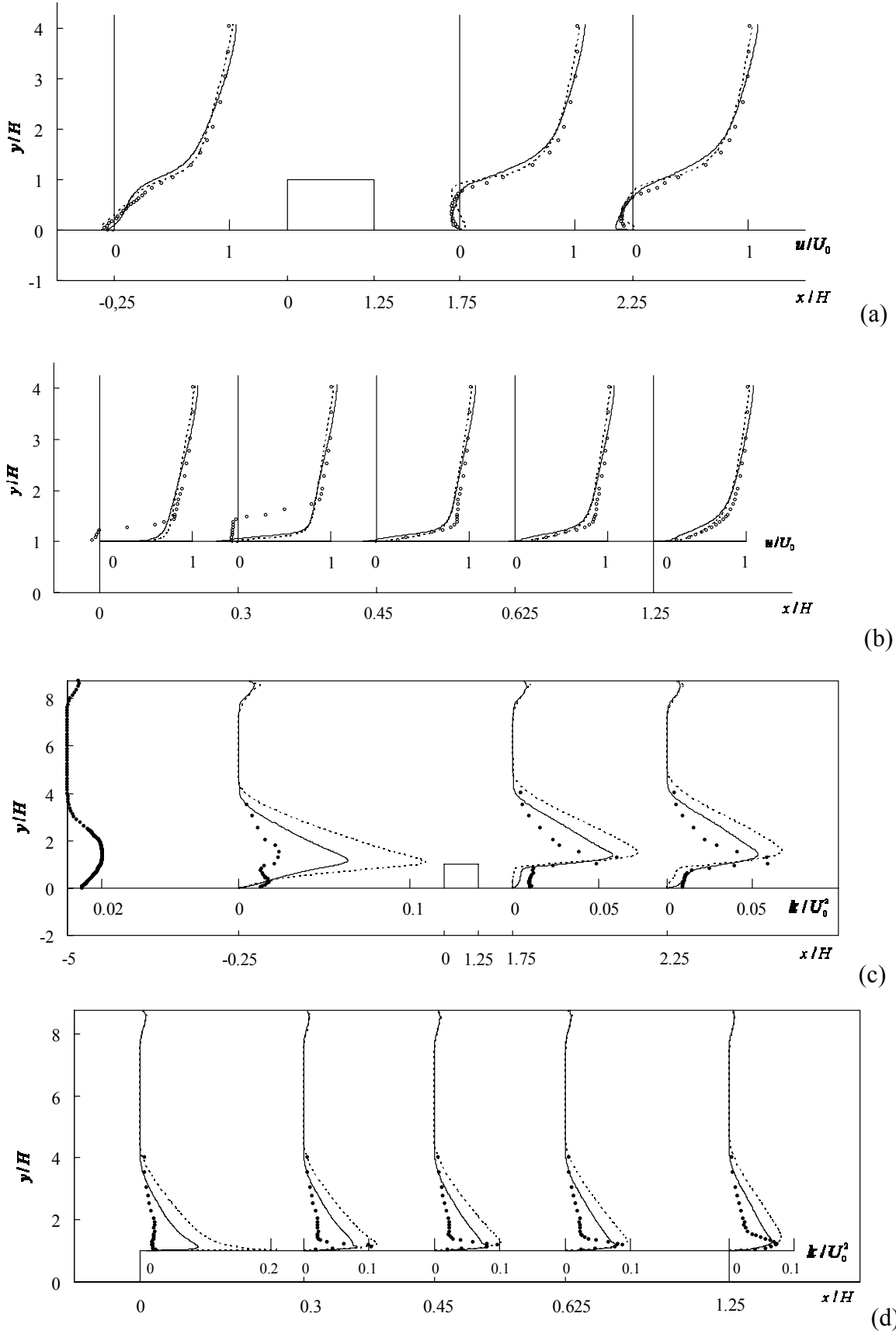
Farklı çatı eğimli bina modelleri etrafındaki iki boyutlu akış alanı, FLUENT paket programı kullanılarak, Realizable  $k-\epsilon$  ve Standard  $k-\omega$  türbülans modelleri ile sayısal olarak çözülmüş ve bu çalışmanın deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### 4.2.1. Hız Dağılımları

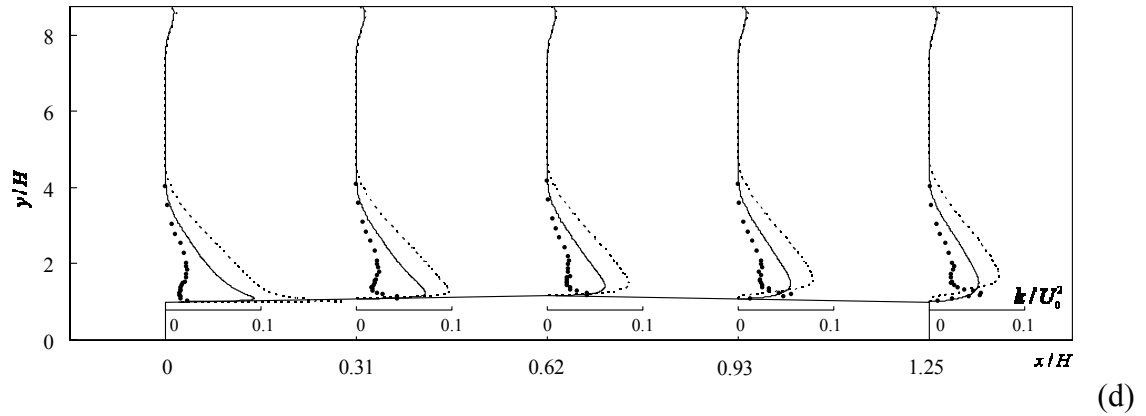
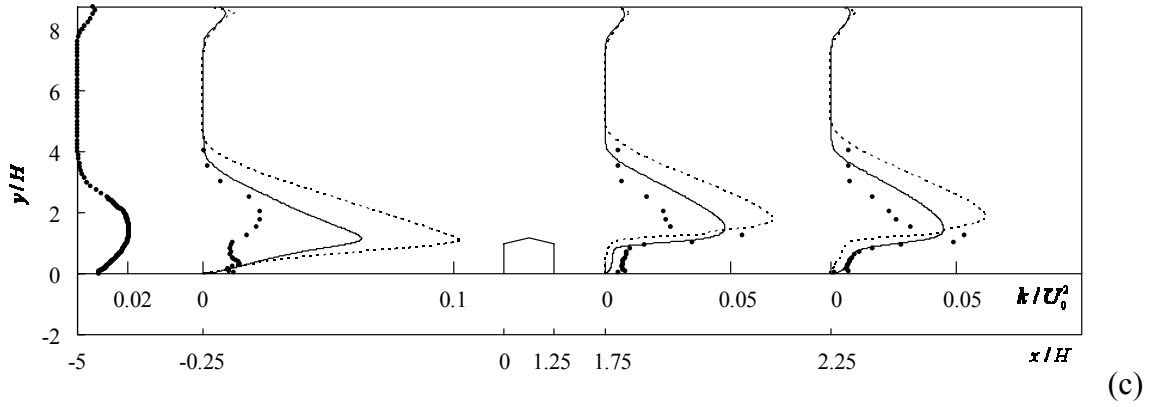
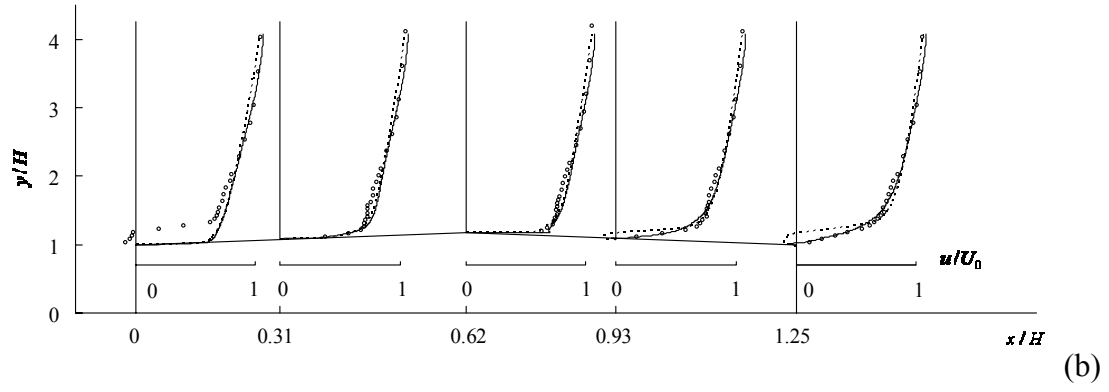
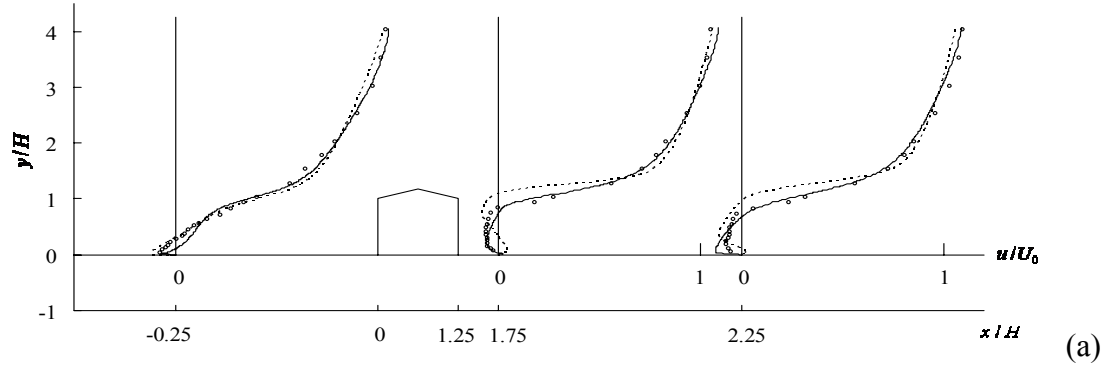
Şekil 4.14-4.17 de,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli bina modellerinin etrafında çeşitli istasyonlarda sayısal olarak elde edilen ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri, deneysel sonuçlarla birlikte verilmektedir. Her iki türbülans modeli ile hesaplanan ortalama hız profilleri serbest akış bölgelerinde deneylerle uyumlu iken, ters akış bölgelerinde farklılıklar göstermektedirler. Düz çatılı ile  $15^\circ$  çatı eğimli modellerin çatı ön kenarları yakınında oluşan ters akış bölgelerinin tahmin edilememesi dışında, çatı boyunca deneylerle iyi bir uyumun olduğu görülmektedir (Şekil 4.14a, b ve Şekil 4.15a, b). Türbülans kinetik enerji tahminleri, akış alanının hemen hemen her bölgesinde deneylerle benzer eğilimler göstermesine rağmen, karışım bölgesi civarlarında deneysel değerlerden oldukça büyüktürler (Şekil 4.14c, d ve Şekil 4.15c, d).

Şekil 4.16a, b ve 4.17a, b'de verilen,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  çatı eğimli bina modelleri için hesaplanmış ortalama hız dağılımların, deneylerle büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmektedir.  $30^\circ$ 'lik eğimde, model arkasındaki karışım bölgelerinde ve çatı ön kenarında deneysel değerlerden farklılık gösteren sayısal değerler, akış alanının genelinde deneylerle çakışmaktadırlar.  $45^\circ$ 'lik eğimde, daha iyi bir uyumun olduğu, sadece çatı sırt bölgesindeki tahminin deneylerden uzak olduğu görülmektedir. Her iki çatı eğimi için hesaplanan türbülans kinetik enerji profilleri, diğer çatı eğimlerinde olduğu gibi, deneysel değerlerden büyük farklılıklar göstermektedir (Şekil 4.16c, d ve Şekil 4.17c, d).

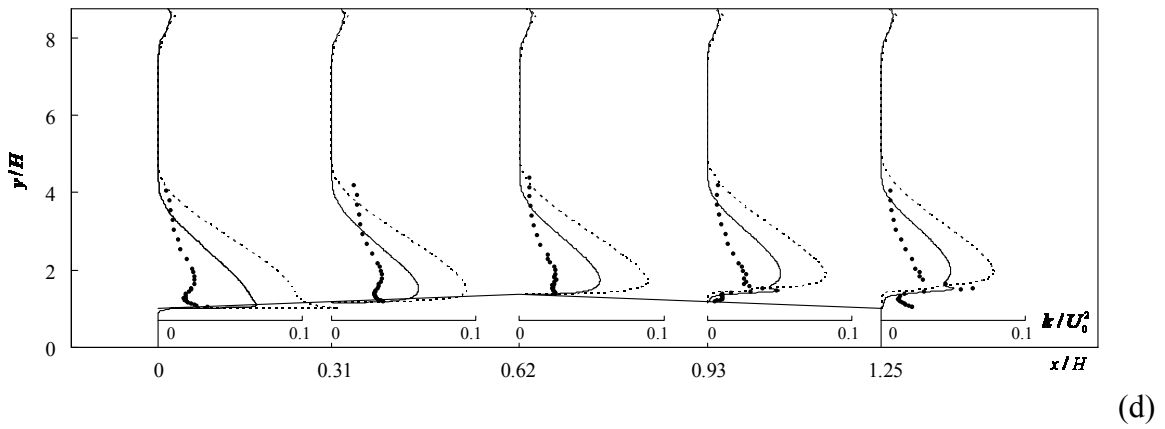
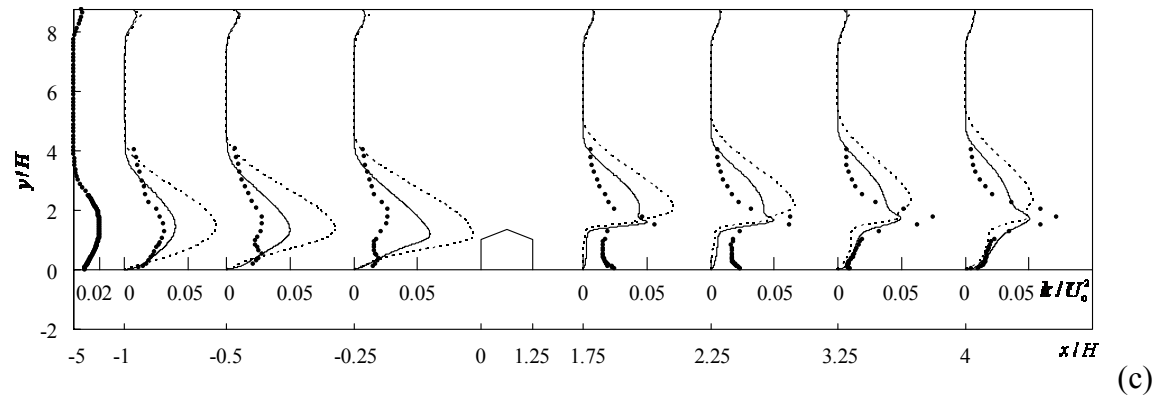
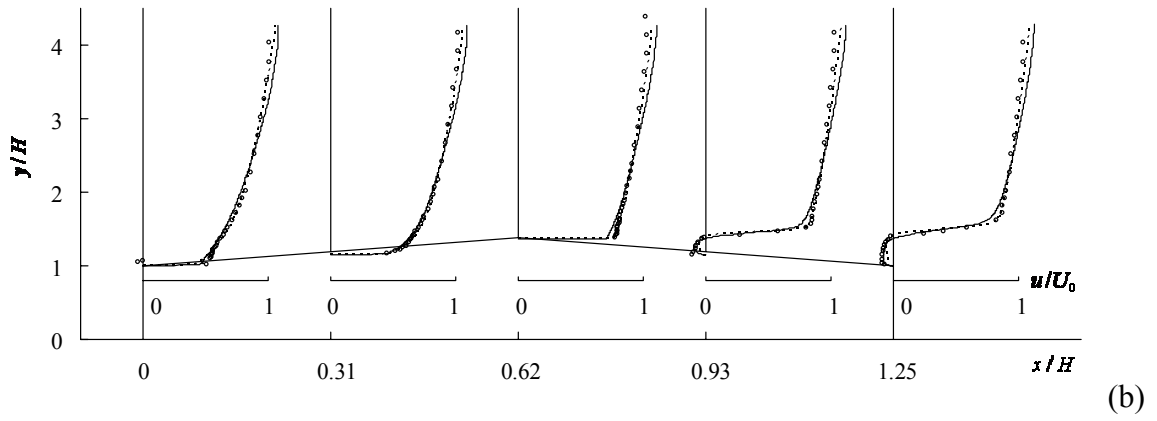
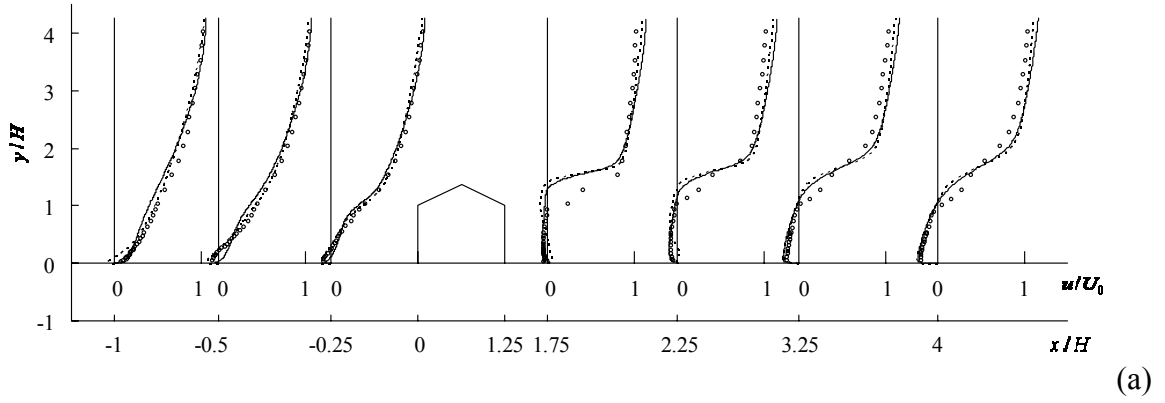
Bu sonuçlardan, kullanılan türbülans modellerinin ters akış bölgelerinde yeterli olmadıkları, türbülans kinetik enerji tahminlerinin ortalama hız tahminlerinden daha kötü olduğu görülmektedir. Bu durum, türbülans modellerinin yetersizliğinin yanı sıra, üç boyutlu olan akışın iki boyutlu olarak çözülmesinden de kaynaklanabilir. Hız dağılımları açısından, Realizable  $k-\epsilon$  türbülans modeli, Standard  $k-\omega$  modeline göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Oliveira ve Younis [94], Standart  $k-\epsilon$  ve Reynolds gerilme modelleri ile binalar etrafındaki sayısal çalışmasında, Reynolds gerilme modelinin ters akış bölgelerinde iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.



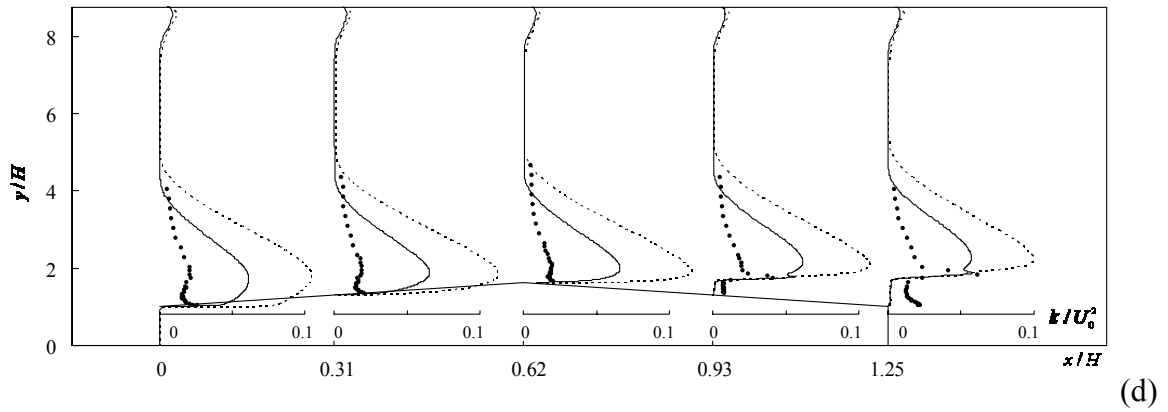
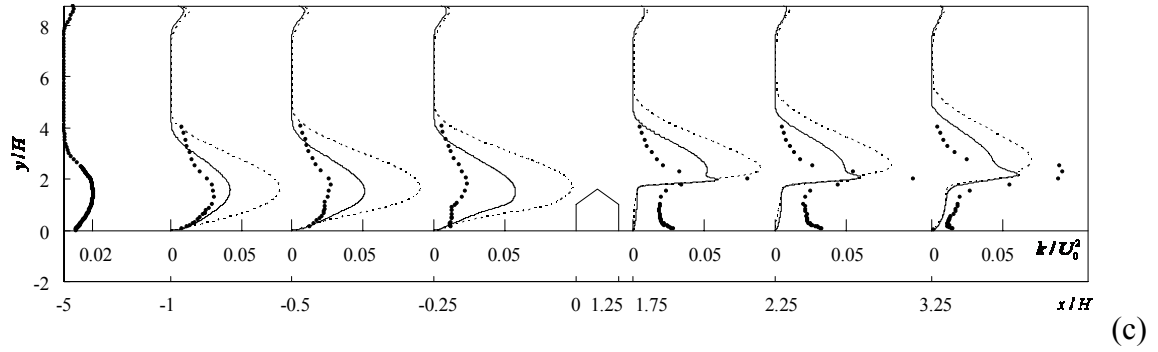
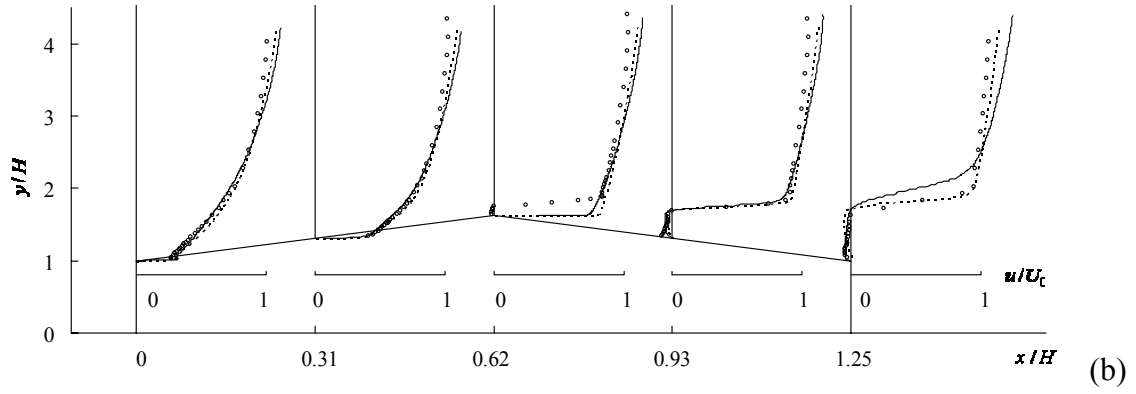
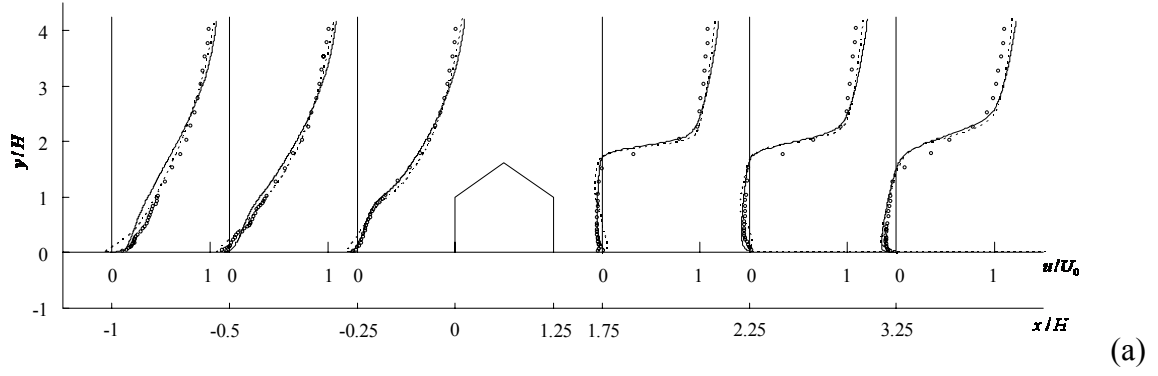
Şekil 4.14.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenli boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$  ---- Standard k- $\omega$



Şekil 4.15.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenı boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable  $k-\varepsilon$  ---- Standard  $k-\omega$



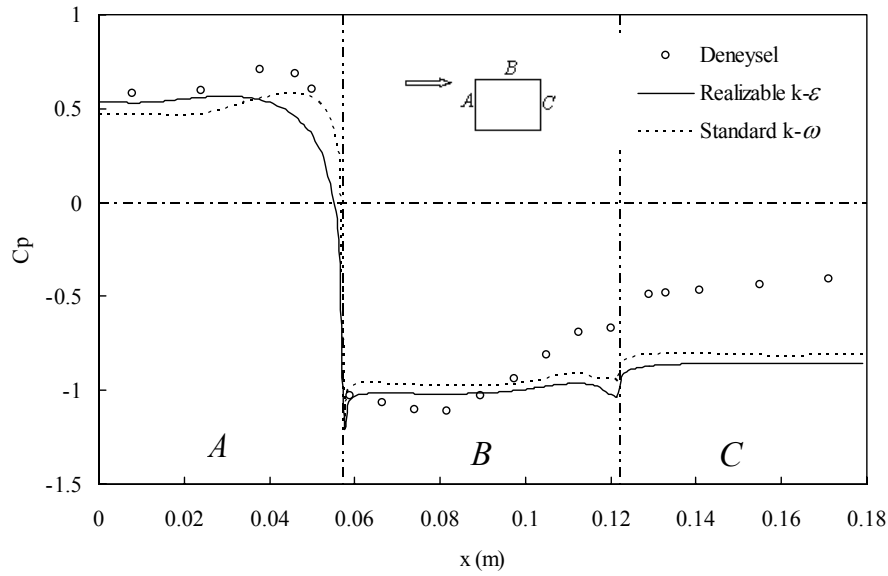
Şekil 4.16.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenı boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$  ---- Standard k- $\omega$



Şekil 4.17.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenı boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri o deneysel — Realizable  $k-\varepsilon$  ---- Standard  $k-\omega$

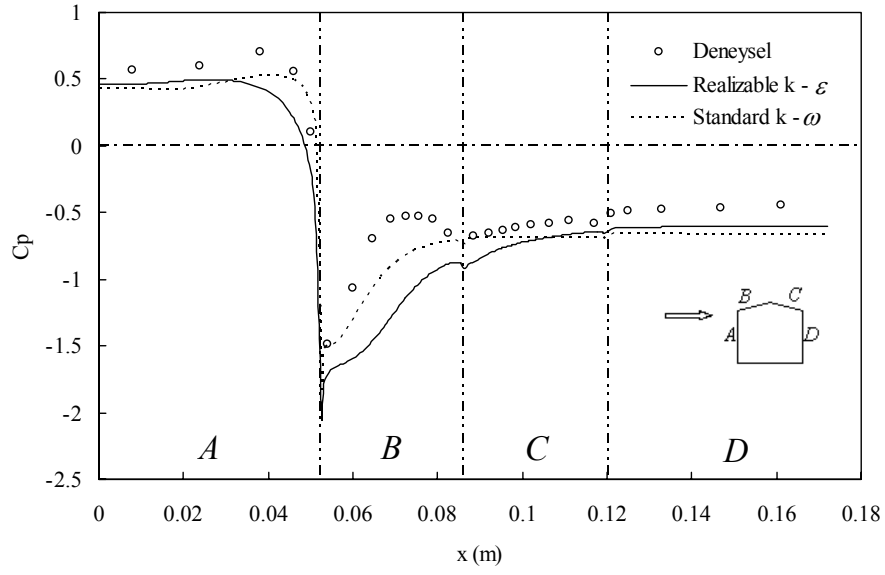
#### 4.2.2. Basınç Dağılımları

$0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  eğimli beşik çatılara sahip bina modellerinin yüzeylerinde hesaplanan ortalama basınçların orta eksen boyunca değişimleri, deneysel sonuçlarla birlikte, Şekil 4.18-4.23’de verilmiştir. Düz çatılı modelin ön duvarında Standard  $k-\omega$  türbülans modeliyle hesaplanan dağılımın, biraz farklı olmakla birlikte, deneylerle aynı eğilimde olduğu görülmektedir. Çatı ortasından itibaren sayısal sonuçlar, deneysel değerlerden uzaklaşmaktadır (Şekil 4.18).

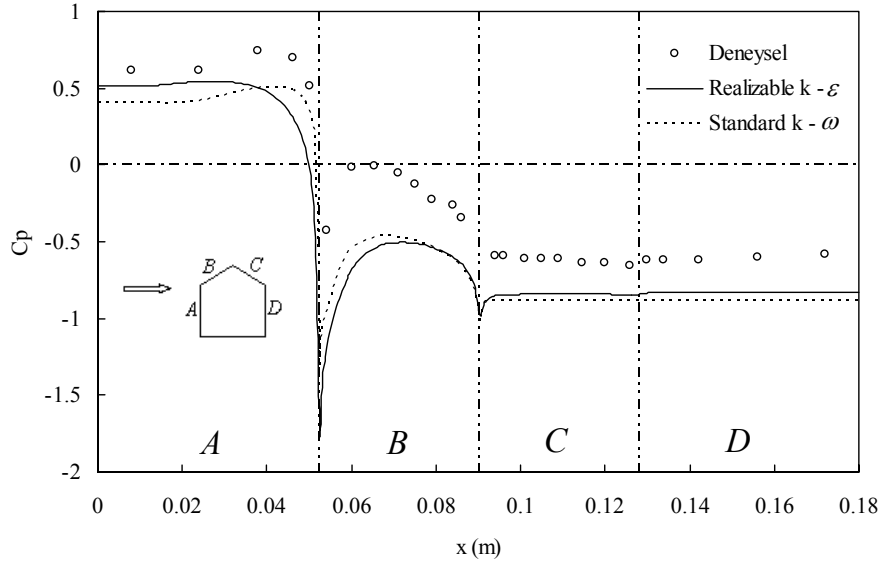


Şekil 4.18.  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenini boyunca ortalama basınç katsayısının değişimi o deneysel, — Realizable  $k-\epsilon$  model, ---- Standard  $k-\omega$  model

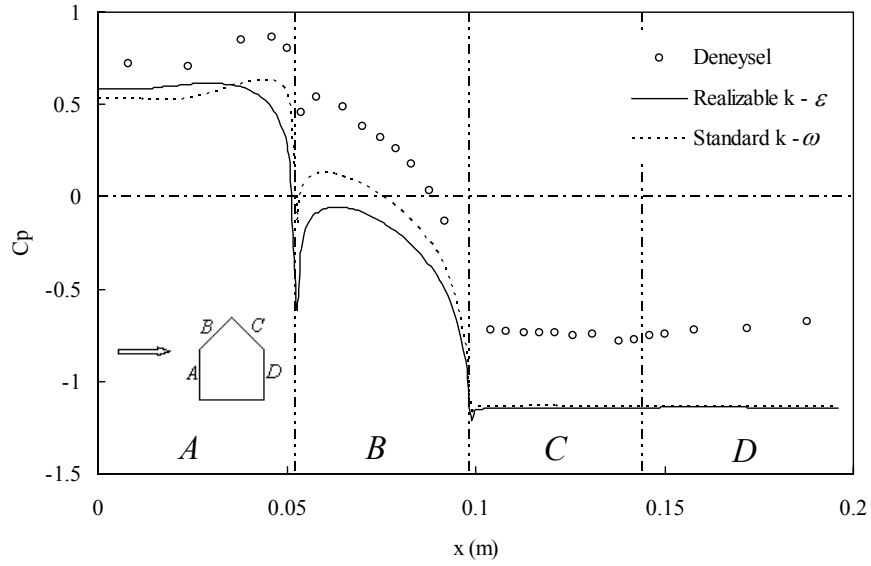
$15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$ ’lik çatı eğimleri için hesaplanan ve sırasıyla, Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21’de verilen yüzey basıncı dağılımlarının davranışları, deneysel değerlerle paralellik göstermektedirler. Ancak, her iki türbülans modeli ile tahmin edilen değerler, deneysel değerlerden farklı olup, çatılar üzerindeki emme yükünü aşırı büyük vermektedirler.  $15^\circ$ ’lik çatı eğiminde hesaplanan değerler, diğer eğimdekilere göre, deneylere biraz daha yakındırlar. Yüzey basınç dağılımları ile ilgili olarak, her iki türbülans modeli açısından bakıldığında; Standard  $k-\omega$  modelinin, Realizable  $k-\epsilon$  modelinden biraz daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.19.  $\alpha = 15^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenini boyunda ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel, — Realizable k- $\epsilon$  model  
---- Standard k- $\omega$  model



Şekil 4.20.  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenini boyunda ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel — Realizable k- $\epsilon$  model  
---- Standard k- $\omega$  model

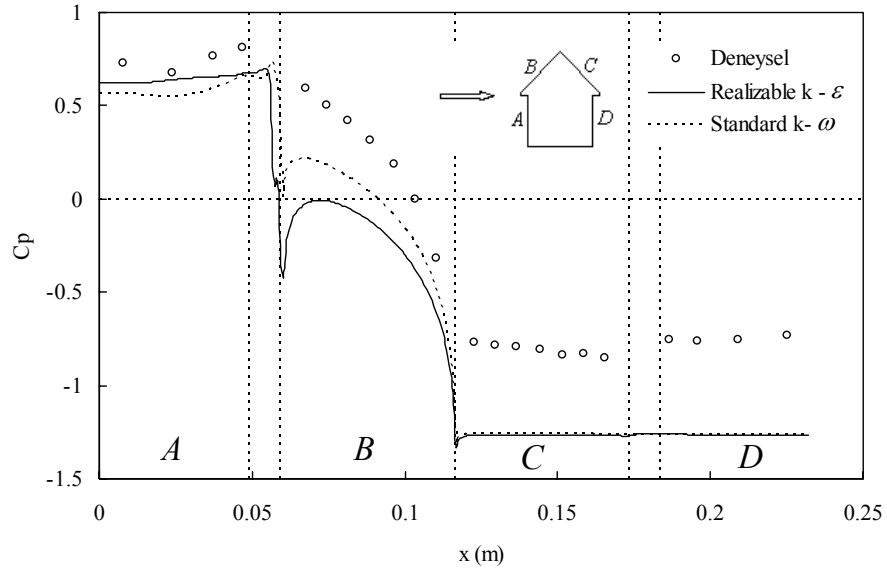


Şekil 4.21.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için model orta eksenini boyuna ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel, — Realizable k- $\epsilon$  model --- Standard k- $\omega$  model

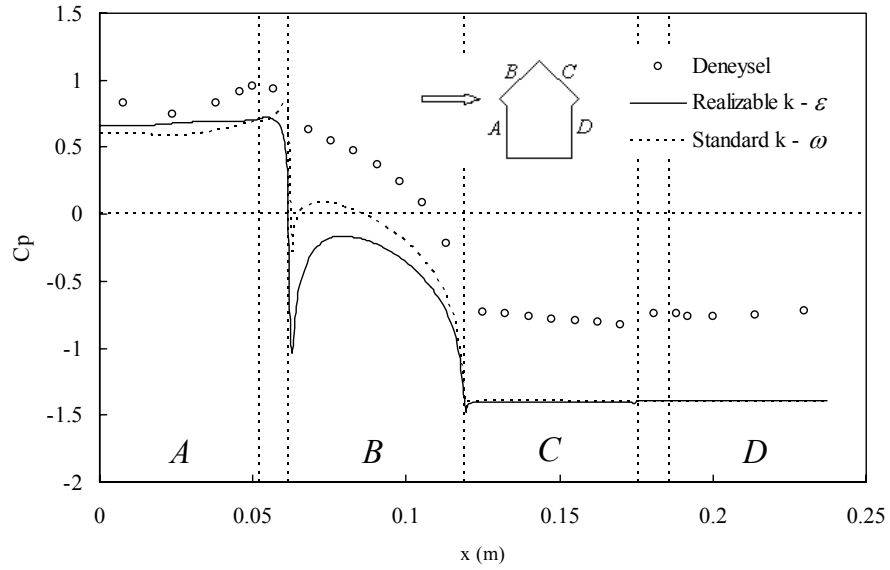
Normal saçaklı ve yelkırır saçaklı  $45^\circ$  eğimli beşik çatılı bina modellerinin yüzeylerinde hesaplanan ortalama basınç katsayılarının model orta eksenini boyuna değişimi, deneysel sonuçlarla birlikte sırasıyla, Şekil 4.22 ve 4.23'de verilmiştir. Sayısal sonuçların davranışı deneysel sonuçlara benzer olup, saçak etkisi nedeniyle çatı ön kenarı yakınında, saçaksız modele göre biraz daha yüksek basınçlar tahmin edilmiştir. Türbülans modellerinin, yelkırır saçaklı bina modeli için, çatının rüzgar tarafındaki yüzeyi için daha düşük değerler hesapladığı görülmektedir. Saçaklı bina çatılarına sahip modeller için de, Standard k- $\omega$  türbülans modeli ile, Realizable k- $\epsilon$  modelinden biraz daha iyi tahminler yapılabilmektedir.

Bina yüzeylerindeki basınç dağılımları açısından bakıldığında; Standard k- $\omega$  türbülans modelinin Realizable k- $\epsilon$  modelinden daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Oliveira ve Younis [94], çatı üzerindeki basınç dağılımının Reynolds gerilme modeli ile, Standart k- $\epsilon$  modeline göre % 15 oranında daha iyi tahminlerin elde edildiğini ifade etmişlerdir. k- $\epsilon$  türbülans modelinin türbülans kinetik enerjisi aşırı büyük hesaplaması nedeniyle, basınç çalkantılarını da aşırı büyük tahmin ettiği, Senthoooran ve diğ. [130] tarafından belirtilmiştir. Flowe ve Kumar [92], FLUENT paket programı ile düz çatılı bir bina etrafındaki akış alanının üç boyutlu sayısal çözümlemesinden, k- $\epsilon$  türbülans modelinin türbülans kinetik enerjisi büyük hesaplaması gibi eksiklikleri bulunduğunu açıklamışlardır.





Şekil 4.22.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için normal saçaklı bina modelinin orta ekseninde ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel — Realizable k- $\varepsilon$  model - - - Standard k- $\omega$  model



Şekil 4.23.  $\alpha = 45^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için yelkırık saçaklı bina modelinin orta ekseninde ortalama basınç katsayısı değişimleri o deneysel — Realizable k- $\varepsilon$  model - - - Standard k- $\omega$  model

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, çatı tipi, çatı eğimi ve rüzgar yönü gibi parametrelerin çatılar üzerinde oluşan rüzgar yükleri ile olan ilişkisi incelenmiştir. Rüzgar tüneline modellenen atmosferik sınır tabaka akışı içine yerleştirilen beşik ve kırma çatılı üç boyutlu bina modelleri etrafındaki akış alanlarında; akış görüntülemesi, ortalama hız ve türbülans hızı ölçümleri ile çatılarda yoğun olmak üzere modellerin yüzeylerinde ortalama ve çalkantı basıncı ölçümleri yapılmıştır.

Yağ ve buhar teknikleri kullanılarak yapılan akış görüntüleme çalışmaları ile binalar etrafındaki akış alanlarının bütünü hakkında ön bilgiler elde edilmiştir. Ortalama hız ve türbülans ölçümlerinden, binaları etrafındaki ve çatıları üzerindeki hız ve türbülans şiddeti dağılımları çıkarılmış ve ters akış bölgeleri belirlenmiştir. Referans sınır tabakadaki hız çalkantıları ile çatı üzerindeki hız çalkantıları arasındaki korelasyonun mertebesi araştırılmıştır. Rüzgar açısı, çatı tipi, çatı eğimi, saçak tipinin binalar üzerindeki rüzgar yükleri ile olan ilişkisi incelenmiştir. Çatılar üzerinde oluşan emme yükünü azaltmaya yönelik olarak, spoiler benzeri akış yönlendirici elemanların akış alanlarındaki etkileri araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Akış görüntüleme fotoğrafları, binalar etrafındaki akışın periyodik bir yapısı olduğunu ve genel davranışın incelenen geometri için 0.2 s de bir tekrarlandığını; çatı eğiminin artması ile, bina arkasındaki ters akış bölgelerinin genişlediğini göstermektedir.

2. Gelen rüzgarın binaların kenar ve köşelerinden ayrılması sonucunda, binaların önünde, yan duvarları boyunca, arkasında ve çatı yüzeylerinde ters akış bölgeleri meydana gelmektedir. Ters akış bölgeleri ile serbest akış bölgesini ayıran karışım tabakasında türbülans şiddetleri, % 25 civarında değerler almaktadırlar.

3. Atmosferik türbülans ile çatı etkileşimli türbülans arasındaki en büyük korelasyon katsayısı düz çatılı bina modelinin ön kenarı yakınında 0.55 olarak bulunmuştur. 0° ve 15° eğimli çatılar için çatı üzerinde akış yönünde yaklaşık uniform olan korelasyon katsayısı değerleri, 30° ve 45° eğimli çatılarda çatı sırtından itibaren akış ayrılması nedeniyle azalmaktadır. Çatı yüzeylerinden itibaren yükseklikle artan korelasyon katsayıları,  $y/H \approx 2$

seviyesinde tüm çatı eğimleri için birbirine yakın değerler alarak, çatı yüzeyleri boyunca ortalama 0.43 mertebesinde kalmaktadır.

4. Düz çatıda ön kenardan ayrılan akış, bina yüksekliğinin (H) yaklaşık 0.45 katı bir uzaklıkta çatı yüzeyine tekrar tutunmakta ve çatı arka kenarından tekrar ayrılmaktadır. 15° eğimli beşik çatıda, ön kenardan ayrılan akış 0.3H dan daha küçük bir uzaklıkta tutunmaktadır. 30° eğimli beşik çatının ön kenarında çok kısa bir mesafede ters akış bölgesi oluşurken, 45°'lik beşik çatının ön yüzeyinde akış ayrılması meydana gelmemektedir. Çatı arka yüzeyinde akış ayrılması, çatı sırtından itibaren 30° ve 45°'lik çatılarda görülmektedir.

5. Bütün çatı eğimlerinde bina ön duvarlarında pozitif basınç alanı oluşmaktadır. 45° eğimli çatının dışında, düz, 15° ve 30° eğimli çatıların ön kenarından itibaren basınç katsayılarının ortalama değerleri çatının ön yüzeyi boyunca negatif olmaktadır. Tüm çatı eğimlerinde, çatı arka yüzeyi ve bina arka duvarı boyunca basınç katsayısı negatif değerler almaktadır.

6. Binanın uzunlamasına eksenine dik doğrultuda gelen rüzgar durumunda (90°'lik geliş açısında), emme yükü yönünden en kritik çatı eğimi 15° olarak bulunmuştur. Binanın uzunlama eksenine paralel gelen rüzgar durumunda (0° lik geliş açısında), 90°'lik geliş açısına göre emme yükünün daha az olduğu ve çatı eğiminin etkili olmadığı görülmüştür.

7. Düz ve 15° eğimli çatılarda kritik ortalama ve minimum pik basınçlar rüzgar tarafındaki çatı köşeleri ve sırt köşelerinde görülürken, 30° ve 45° eğimli çatılarda ise kritik değerler rüzgara göre arka bölgedeki çatı köşeleri ve sırt köşelerinde oluşmaktadır.

8. Tüm çatı eğimleri için, binaya 45°'lik açıyla gelen rüzgar durumunda, çatı üzerindeki ortalama emme yükü daha fazla olmaktadır. Tüm modeller üzerinde ölçülen en kritik ortalama ve minimum basınç katsayıları, düz çatı üzerinde, rüzgar tarafındaki çatı ön köşesi yakınında, 45° rüzgar geliş açısında sırasıyla -3.73 ve -5.16 olarak elde edilmiştir. Çatılar üzerindeki yerel basınçların minimum pik değerleri, ortalama değerlerin yaklaşık % 30 altındadır.

9. Kıрма çatılar üzerindeki emme etkisi, beşik çatılara göre ortalama % 20 daha düşük olarak bulunmuştur. Çatı arka kenarında bu etki %25'lere kadar azalmaktadır.

10. Çatı köşeleri için en kritik rüzgar geliş açısı, 15° olarak bulunmuştur. Çatı köşelerindeki minimum pik basınçlar, ortalama basınçlardan yaklaşık %45 daha düşük olmaktadır. Çatı eğimi arttıkça, çatı köşelerindeki minimum pik basınçlar da azalmaktadır.

11. Çatı sırt köşeleri için kritik rüzgar geliş açıların,  $0^\circ$ ,  $210^\circ$  ve  $345^\circ$  olduğu belirlenmiştir. Bu bölgedeki minimum pik basınçlar, ortalama basınçlardan %30 civarında daha düşük olmaktadır. En büyük sırt minimum pik basınç,  $15^\circ$ 'lik çatı eğiminde  $60^\circ$  rüzgar geliş açısında oluşmaktadır.

12. Saçakların çatı köşesindeki emme yükünü arttırdığı; yelkiran saçağın normal saçağa göre %30, saçaksız duruma göre %70 daha düşük pik basınçlar oluşturduğu görülmüştür.

13. Akış yönlendirici olarak çatı kenarı ve sırtı boyunca yerleştirilen spoiler benzeri elemanların, çatı üzerindeki emme yükü açısından olumlu etkileri görülmüştür.  $15^\circ$  çatı eğimli model üzerinde 1 mm açıklıkla yerleştirilen spoilerler, hem çatı ön kenarında hem de çatı sırtındaki emme yükünü % 50 oranında azaltmaktadır. 4 m yüksekliğinde,  $15^\circ$  çatı eğimli gerçek bir bina için spoiler genişliği 60 cm'ye, açıklığı ise 6 cm'ye karşılık gelmektedir.

14. Sayısal çözümlerde kullanılan türbülans modellerinden Realizable k- $\epsilon$  modeli, hız alanlarının hesaplanmasında; Standard k- $\omega$  modeli ise, yüzey basınçlarının hesaplanmasında birbirlerine göre biraz daha iyi sonuçlar vermektedir.

## 6. ÖNERİLER

Bina modelleri etrafındaki akış alanının araştırılmasında, kurulan teoriler ve matematiksel modellerin geçerlilik kazanması ve geliştirilmesi, büyük ölçüde deneysel çalışmalara bağlı olmaktadır. Deneysel çalışmaların sonuçlarının doğruluğu da, gerçek problemin laboratuarda mümkün olduğunca iyi bir şekilde modellenebilmesinden ve kullanılan ölçüm yöntemlerinin hassasiyetinden etkilenmektedir. Ortalama hız ve türbülans ölçümlerinde Laser Doppler Anemometry ( LDA) ve Particle Image Velocimetry ( PIV) ölçüm yöntemlerinin kullanılması deneysel sonuçların hassasiyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Basınç ölçümlerinde, çatılar üzerindeki pik basınç mekanizmasını tam olarak ortaya koyarak girdap dinamiğinin anlaşılmasına yönelik çalışmalar, yapıların hasara uğramasını önleyici çalışmalara katkı sağlayacaktır. Hız ölçümlerinden önce değişik yöntemlerle yapılacak akış görüntüleme çalışmaları ile, akış alanı hakkında önemli bilgiler sağlanacaktır. Değişik geometrik yapıdaki binalar etrafındaki akış alanlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi de, konunun bütünleşmesi yönünden yararlı olacaktır.

Çevre kirliliği açısından, binalar ve sanayi bölgelerinden çıkan atık gazların, yerleşim merkezlerine yapabileceği etkiler göz önüne alınmalıdır. Bu amaçla, atık gazlarla yayılan parçacıkların konsantrasyonunun ve yerel rüzgar durumunun birlikte değerlendirilebileceği modelleme çalışmalarının yapılması yararlı olacaktır. Yerleşim ve sanayi merkezlerinin kurulmasında, çevre sağlığı göz önünde bulundurularak, mimari düzenlemelerin akışkanlar mekaniği ile bütünleşmesi sağlanmalıdır. Bu tip problemlerin sayısal çözümü amacıyla kullanılan paket programlarda, problemlerin üç boyutlu olarak ele alınması ve kullanılan türbülans modellerinin hassasiyetlerinin denenmesi sayısal rüzgar mühendisliği çalışmaları açısından büyük önem taşıyacaktır.

Bu tür çalışmalar, binalarla ilgili rüzgar standartları ve kodlarının, iklimsel koşullardaki değişimlere göre düzeltilmesine ve yenilenmesine de büyük katkılar sağlayacaktır. Özellikle, ülkemizde başka bir ülkenin standardını tercüme ederek kullanmak yerine, kendi coğrafi ve iklimsel koşullarına uygun bir standardın hazırlanması yönünde, ilgili kurum ve kuruluşlarla ortak bir çalışma içine girilmesi gerekmektedir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Aynsley, R.M., Melbourne, W. ve Vickery, B.J., *Architectural Aerodynamics*, Applied Science Publishers Ltd., London, 1977.
2. Counihan, J., Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880 - 1972, *Atmospheric Environment*, 9 (1975) 871-905.
3. Tennekes, H., The Logarithmic Wind Profile, *J. Atmos. Sci.*, 30 (1973) 234-238.
4. Tennekes, H., The Atmospheric Boundary Layer, *Physics Today*, 27 (1974) 52-63.
5. Panofsky, H.A., The Atmospheric Boundary Layer Below 150 Meters, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 6 (1974) 147-177.
6. Pasquill, F., Wind Structure in the Atmospheric Boundary Layer: Effect of Buildings on the Local Wind, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 269A (1971) 439-456.
7. Cermak, J.F., Laboratory Simulation of the Atmospheric Boundary Layer, *AIAA J.*, 9 (1971) 1746-1754.
8. Lloyd, A., The Generation of Shear Flow in a Wind Tunnel, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 93 (1967) 79-96.
9. Armit, J. ve Counihan, J., The Simulation of the Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel, *Atmos. Environ.*, 2 (1968) 49-71.
10. Arya, S.P.S. ve Plate, E., Modelling of the Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer, *J. Atmos. Sci.*, 26 (1969) 656-665.
11. Counihan, J., An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel, *Atmos. Environ.*, 3 (1969) 197-214.
12. Cockrell, J. ve Lee B.E., Methods and Consequence of Atmospheric Boundary Layer Simulation, AGARD Conference Proc., 48 (1970) 13.1-13.4.
13. Maull, D.J., The Wake Characteristics of a Bluff Body in a Shear Flow, AGARD Conference Proceedings, 48 (1970) 16.1-16.13.
14. Cermak, J.F. ve Arya, S.P.S., Problems of Atmospheric Shear Flows and their Laboratory Simulation, AGARD Conference Proc., 48 (1970) 12.1-12.16.
15. Counihan, J., Wind Tunnel Determination of the Roughness Length as a Function of the Fetch and the Roughness Density of Three-Dimensional Roughness Elements, *Atmos. Environ.*, 5 (1971) 637-642.

16. Sundaram, T.R., Ludwig, G.R. ve Skinner, G.T., Modelling of the Turbulence Structure of the Atmospheric Surface Layer, AIAA J., 10 (1972) 743-750.
17. Counihan, J., Simulation of an Adiabatic Urban Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atmos. Environ., 7 (1973) 673-689.
18. Cook, N.J., Wind-Tunnel Simulation of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier and Mixing Device Methods, J. Wind Eng. and Ind. Aero., 3 (1978) 157-176.
19. Schon, J.P. ve Mery, P., A Preliminary Study of the Simulation of Neutral Atmospheric Boundary Layer Using Air Injection in a Tunnel, Atmos. Environ., 5 (1971) 299-311.
20. Nagip, H.M., Morkovin, M.V., Yung, J.T. ve Tan-atichat, J., On Modelling of Atmospheric Surface Layers by the Counter Jet Technique, AIAA J., 14 (1976) 185-190.
21. Fang, C. ve Sill, B.L., Pressure Distribution on a Low-Rise Building Model Subjected to a Family of Boundary Layers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 56 (1995) 87-105.
22. Wittwer, A.R. ve Möller, S.V., Characteristics of the Low-Speed Wind Tunnel of the UNNE, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 84 (2000) 307-320.
23. Iyengar, A.K.S. ve Farell, C., Experimental Issues in Atmospheric Boundary Layer Simulations: Roughness Length and Integral Length Scale Determination, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (2001) 1059-1080.
24. De Bortoli, M.E., Natalini, B., Paluch, M.J. ve Natalini, M.B., Part-Depth Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Boundary Layer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90 (2002) 281-291.
25. Parker, S.T. ve Kinnersley, R.P., A Computational and Wind Tunnel Study of Particle Dry Deposition in Complex Topography, Atmos. Environ., 38 (2004) 3867-3878.
26. Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. ve Bradley, E.F., Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci., 28 (1971) 181-189.
27. Wyngaard, J.C. ve Cote, O.R., The Budgets of Turbulent Kinetic Energy and Temperature Variance in the Atmospheric Surface Layer, J. Atmos. Sci., 28 (1971) 190-201.
28. Eaton, K.J., Mayne, J.R., ve Cook, N.J., Wind Loads on Low-Rise Buildings-Effects of Roof Geometry, 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, 8-12 September 1975 London.

29. Hoxey, R.P. ve Moran, P., A Full Scale Study of Geometric Parameters that Influence Wind Loads on Low Rise Buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 13 (1983) 277-288.
30. Stathopoulos, T., Baskaran, A., ve Coh, P. A. Full Scale Measurements of Wind Pressures on Flat Roof Corners, Proceedings, Aerodynamics, 2. (1989).
31. Robertson, A.P., Effect of Eaves Detail on Wind Pressures over an Industrial Building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38 (1991) 325-333.
32. Levitan, M.L., Mehta, K.C., ve Vann, W.P., Field Measurements of Pressures on the Texas Tech Building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38 (1991) 227-234.
33. Sarkar, P.P., Zhao, Z.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 (1997) 597-606.
34. Peterka, J.A., Hosoya, N., Dodge, S., Cochran, L., ve Cermak, J.E., Area-Average Peak Pressures in a Gable Roof Vortex Region, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 77-78 (1998) 205-215.
35. Stathopoulos, T., Marathe, R., ve Wu, H., Mean Wind Pressures on Flat Roof Corners Affected by Parapets: Field and Wind Tunnel Studies, Engineering Structures, 21 (1999) 629-638.
36. Banks, D., Meroney, R.N., Sarkar, P.P., Zhao, Z., ve Wu, F., Flow Visualization of Conical Vortices on Flat Roofs with Simultaneous Surface Pressure Measurement, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 84 (2000) 65-85.
37. Wu, F., Sarkar, P.P., Mehta, K.C., ve Zhao, Z., Influence of Incident Wind Turbulence on Pressure Fluctuations Near Flat-Roof Corners, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (2001) 403-420.
38. Castro, I.P. ve Robins, A.G., The Flow around a Surface Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, J. Fluid Mech., 79 (1977) 307-335.
39. Sockel, H., ve Taucher, R., The Influence of a Parapet on Local Pressure Fluctuations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 8 (1981) 31-38.
40. Fackrell, J. E., Parameters characterising dispersion in the near wake of buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 16 (1984) 97-118.
41. Letchford, C.W., ve Ginger, J.D., Wind Loads on Planar Canopy Roofs – Part 1: Mean Pressure Distributions, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 45 (1992) 25-45.



42. Ginger, J.D. ve Letchford, C.W., Peak Wind Loads Under Delta Wing Vortices on Canopy Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992) 1739-1750.
43. Ginger, J.D., ve Letchford, C.W., Wind Loads on Planar Canopy Roofs, Part:2 Fluctuating Pressure Distributions and Correlations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 51 (1994) 353-370.
44. Ginger, J.D., ve Letchford, C.W., Pressure Factors for Edge Regions on Low Rise Buildings Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54-55 (1995) 337-344.
45. Richardson, G.M., ve Surry, D., Comparisons of Wind-Tunnel and Full-Scale Surface Pressure Measurements on Low-Rise Pitched-Roof Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38 (1991) 249-256.
46. Uematsu, Y. ve Isyumov, N. Wind Pressures Acting on Low-Rise Buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 82 (1999) 1-25.
47. Davenport, A.G. ve Surry, D.J., The Pressures on Low Rise Structures in Turbulent Wind, Canadian Structural Engineering Conference, Ottawa, (1974) 1-39.
48. Kumar, K.S., ve Stathopoulos, T., Power Spectra of Wind Pressures on Low Building Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76 (1998) 665-674.
49. Stathopoulos, T., Wind Loads on Low-Rise Buildings: A Review of the State of the Art, Engineering Structures, 21 (1984) 629-638.
50. Stathopoulos, T., Wind Loads on Low-Rise Buildings with Various-Sloped Roofs, Engineering Structures, 23 (1984) 813-824.
51. Stathopoulos, T., ve Mohammadian, A.R., Wind Loads on Low Buildings with Mono-Sloped Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 23 (1986) 81-97.
52. Kind, R.J., Worst Suctions Near Edges of Flat Rooftops on Low-Rise Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 25 (1986) 31-47.
53. Kind, R.J., Savage, M.G. ve Wardlaw, R.L., Prediction of Wind-Induced Failure of Loose Laid Roof Cladding Systems, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 29 (1988) 29-37.
54. Kind, R.J., Worst Suctions Near Edges of Flat Rooftops with Parapets, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 31 (1988) 251-264.
55. Cheung, J.C.K., ve Merbourn, W.H., Wind Loading on a Porous Roof, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 29 (1988) 19-28.

56. Savory, E., Toy, N., Dalley, S., ve Trussler, J., Wind Loading on a Portal Frame Agricultural Building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38 (1991) 335-345.
57. Cermak, J.E., Progress in Physical Modelling for Wind Engineering, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54 (1995) 439-455.
58. Saathoff, P.J. ve Melbourne, W. H., The Generation of Peak Pressures in Separated/Reattaching Flows, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 32 (1989)121-134.
59. Beste, F., ve Cermak, J.E., Correlation of Internal and Area-Averaged External Wind Pressures on Low-Rise Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71 (1997) 557-566.
60. Uematsu, Y., Yamada, M., ve Karasu, A., Design Wind Loads for Structural Frames of Flat Long-Span Roofs: Gust Loading Factor for a Structurally Integrated Type, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 66 (1997) 155-168.
61. Ginger, J.D., Reardon, G.F. ve Whitbread, B.J., Wind Load Effects and Equivalent Pressures on Low-Rise House Roofs, Engineering Structures, 22 (2000) 638-646.
62. Bienkiewicz, B., ve Sun, Y., Local Wind Loading on the Roof of a Low-Rise Building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 45 (1992) 11-24.
63. Kanda, M., ve Maruta, E., Characteristics of Fluctuating Wind Pressure on Long Low-Rise Buildings with Gable Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 50 (1993) 173-182.
64. Kawai, H., ve Nishimura, G., Characteristics of Fluctuating Suction and Conical Vortices on a Flat Roof in Oblique Flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 60 (1996) 211-225.
65. Case, P.C., ve Isyumov, N., Wind Loads on Low Buildings with 4:12 Gable Roofs in Open Country and Suburban Exposures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 77-78 (1998) 107-118.
66. Ham, H.J., ve Bienkiewicz, B., Wind Tunnel Simulation of TTU Flow and Building Roof Pressure, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 77-78 (1998) 119-133.
67. Blessmann, J., Wind Pressures on Roofs with Negative Pitch, Journal of Industrial Aerodynamics, 10 (1982) 213-230.
68. Stathopoulos, T., Wind Pressures on Low Buildings with Parapets, Journal of the Structural Division, ASCE, 108 (1982) 2723-2736.

- 69 Holmes, J.D., Wind Loads on Low Rise Buildings - A Review, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)- Division of Building Research. (1983).
- 70 Bachlin, W., Plate, E.J. ve Kamarga, A., Influence of the Ratio of Building Height to Boundary Layer Thickness and the Approach Flow Velocity Profile on the Roof Pressure Distribution of Cubical Buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 11 (1983) 63-74.
71. Kramer, C. ve Gerhardt, H.J., Wind Loads on Permeable Roofing Systems, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 13 (1983) 347-358.
72. Lythe, G., ve Surry, D., Wind Loading of Flat Roofs with and without Parapets, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 11 (1983) 75-94.
73. Stathopoulos, T., ve Baskaran, A., Turbulent Wind Loading of Roofs with Parapet Configurations, Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference, Montreal, (1987) 570-578.
74. Stathopoulos, T., ve Baskaran, A., Wind Pressures on Flat Roofs with Parapets, Journal of Structural Division, ASCE, 113 (1988) 2166-2180.
75. Baskaran, A., ve Stathopoulos, T., Roof Corner Wind Loads and Parapet Configurations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 29 (1988) 79-88.
76. Karem, A., ve Lu, P.C., Pressure Fluctuations on Flat Roofs with Parapets, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992) 1775-1786.
77. Stathopoulos, T., ve Luchian, H., Wind-Induced Forces on Eaves of Low Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 52 (1994) 249-261.
78. Robertson, A.P., Effect of Eaves Detail on Wind Pressures over an Industrial Building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38 (1991) 325-333.
79. Savory, E., Dalley, S., Toy, N. The Effects of Eaves Geometry, Model Scale and Approach Flow Conditions on Portal Frame Building Wind Loads, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 41-44 (1992) 1665-1676.
80. 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 (1997) 187-197.

81. Hoxey, R.P., Reynolds, A.M., Richardson, G.M., Robertson, A.P. ve Short, J.L., Observations of Reynolds Number Sensitivity in the Separated Flow Region on a Bluff Body, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 73 (1998) 231-249.
82. Davenport, A.G., Surry, D. ve Stathopoulos, T. Wind Loads on Low Rise Buildings: Final Report of Phase III. Engineering Science Research Report BLWTL-SS4, The University of Western Ontario, London, Canada, (1978).
83. Surry, D., ve Lin, J.X., The Effect of Surroundings and Roof Corner Geometric Modifications on Roof Pressures on Low-Rise Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 58 (1995) 113-138.
84. Meecham, D., Surry, D., ve Davenport, A.G., The Magnitude and Distribution of Wind-Induced Pressures on Hip and Gable Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38 (1991) 257-272.
85. Xu, Y.L., ve Reardon, G.F., Variations of Wind Pressure on Hip Roofs with Roof Pitch, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 73 (1998) 267-284.
86. Stathopoulos, T., ve Luchian, H.D., Wind Pressures on Buildings with Multi-Level Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36 (1990) 1299-1308.
87. Barnard, R.H., ve Driviere, J., Wind Velocities over Pitched Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 52 (1994) 345-358.
88. Stathopoulos, T., ve Zhou, Y.S., Numerical Evaluation of Wind Pressures on Flat Roofs with the  $k - \varepsilon$  Model, Building and Environment, 30/ 2 (1995) 267-276.
89. Kindangen, J., Krauss, G., ve Depecker, P., Effects of Roof Shapes on Wind-Induced Air Motion Inside Buildings, Building and Environment, 32, 1 (1996) 1-11.
90. Kawamoto, S., Improved Turbulence Models for Estimation of Wind Loading, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67/68 (1997) 589-599.
91. Lakehal, D., Application of the  $k - \varepsilon$  Model to Flow over a Building Placed in Different Roughness Sublayers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 73 (1998) 59-77.
92. Flowe, A.C., ve Kumar, A., Analysis of Velocity Fields and Dispersive Cavity Parameters as a Function of Building Width to Building Height Ratio Using a 3-D Computer Model for Squat Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 86 (2000) 87-122.

93. Ehrhard, J., ve Moussiopoulos, N., On a New Nonlinear Turbulence Model for Simulating Flows Around Building-Shaped Structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 88 (2000) 91-99.
94. Oliveira, P.J., ve Younis, B.A., On the Prediction of Turbulent Flows Around Full-Scale Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 86 (2000) 203-220.
95. Easom, G., Improved Turbulence Models for Computational Wind Engineering, PhD, School of Civil Engineering, The University of Nottingham, 2000.
96. Tutar, M., ve Oguz, G., Large Eddy Simulation of Wind Flow Around Paralel Buildings with Varying Configurations, Fluid Dynamics Research, 31 (2002) 289-315.
97. Lien, F.S., Yee, E. ve Cheng, Y., Simulation of Mean Flow and Turbulence over a 2D Building Array Using High-Resolution CFD and a Distributed Drag Force Approach, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92 (2004) 117-158.
98. Gao, Y., ve Chow, W.K., Numerical Studies on Air Flow Around a Cube, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93 (2005) 115-135.
99. <http://en.wikipedia.org>, Beaufort Scale of Wind. 10 Ocak 2006.
100. <http://www.stormfax.com>, Weather Services. 10 Ocak 2006.
101. Panofsky, H.A., ve Dutton, J.A., Atmospheric Turbulence - Models and Methods for Engineering Applications, John Wiley & Sons, New York, NY, 1984.
102. Van der Hoven, I., Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour, Journal of Meteorology, 14 (1957) 160-164.
103. Simiu, E., ve Scanlan, R.H., Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd Ed., John Wiley & Sons Inc., New York, NY, 1996.
104. Sachs, P., Wind Forces in Engineering, 2nd Ed., Pergamon Pres, Elmsford, NY, 1978.
105. Parmentier, B., Hoxey, R., Buchlin, J. M., and Corieri, P., The Assessment of Full-Scale Experimental Methods for Measuring Wind Effects on Low Rise Buildings, COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment, June 3-4, 2002, Nantes, France.
106. Baydar, E., Engel Etrafindaki Laminer ve Türbülanslı Akışların Sayısal ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991

107. Yüksel, A. N. Yapılar Üzerinde Rüzgar Tesirleri, MMLS Öğretimi Ders Notu, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, 1972.
108. Mehta, K.C., Levitan, M.L., Iverson, R.E., ve McDonald, J.R., Roof Corner Pressures Measured in the Field on a Low Building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992) 181-192.
109. Kumar, S., Simulation of Fluctuating Wind Pressures on Low Building Roofs, PhD, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 1997.
110. Minor, J.E., ve Mehta, K.C., Wind Damage Observations and Implications, Journal of the Structural Division, ASCE, November (1979) 2279-2291.
111. Holmes, J.D., Wind Loads on Low Rise Buildings- A Review, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) – Division of Building Research, 1983.
112. Cook, N.J., The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures. Part I: Background, Damage Survey, Wind Data and Structural Classification, Butterworths, London, UK, 1985.
113. Young, M.A., Effect of Open Fields on Low Building Wind Loads in a Suburban Environment, Masters of Engineering Science, The University of Western Ontario, London, Ontario, 1997.
114. Hosker, R.P., Flow Around Isolated Structures and Building Clusters: A Review, ASHRAE transactions, 91-2B (1985) 1671-1692.
115. Mehta, K.C., Wind Induced Damage Observations and Their Implications for Design Practice, Journal of Engineering Structures, ASCE, 6 (1984) 242-247.
116. Krishna, P., Wind Loads on Low Rise Buildings – A Review, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54/55 (1995) 383-396.
117. TS 498, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, T.S.E., Ankara, I. Baskı, Kasım 1987.
118. Sümerkan, M.R., Yapı Elemanları II, Ders Notu, KTÜ Yayın No: 14, Trabzon
119. Blackmore, P.A., Load Reduction on Flat Roofs – The Effect of Edge Profile, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 29 (1988) 89-98.
120. Savory, E., Dalley, S. ve Toy, N. The Effects of Eaves Geometry, Model Scale and Approach Flow Conditions on Portal Frame Building Wind Loads, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 41-44 (1992) 1665-1676.
121. Stathopoulos, T., Surry, D., ve Davenport, A.G., Effective Wind Loads on Flat Roofs, Journal of the Structural Division, ASCE, 107 (1981) 281-297.

122. Wiik, T., ve Hansen, E.W.M., The Assessment of Wind Loads on Roof Overhang of Low-Rise Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67-68 (1997) 687-696.
123. Sitheeq, M.M., Iyengar, A.K.S., ve Farell, C., Effect of Turbulence and its Scales on the Pressure Field on the Surface of a Three-Dimensional Square Prims, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71 (1997) 461-471.
124. Stathopoulos, T., Wind Effect on People, Proceeding of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, von Karman Institute, Rhode-Saint Genese, Belgium, May 5-7, 2004.
125. Atli, V., Subsonic flow over a two dimensional obstacle immersed in a turbulent boundary layer on a flat surface, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 31 (1988) 225-239.
126. Fluent 6.1. User's Guide Volume 2, February 2003, UK.
127. Karatekin, O., Aerodynamics of a planetary entry capsule at low speeds, Ph D. Dissertation, von Karman Institute, Aeronautics/Aerospace Department, 2002.
128. Murakami, S., Comparison of Various Turbulence Models Applied to a Bluff Body, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 46&47 (1993) 21-36.
129. Castro, I. P., Measurements in shear layers separating from surface mounted bluff bodies, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 7 (1981) 253-272.
130. Senthhooran, S., Lee, D., ve Parameswaran, S., A computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 92 (2004) 1131-1145.
131. Jorgensen, F.E., How to Measure Turbulence with Hot-wire Anemometers – A Practical Guide DANTEC Dynamics, Technical Note.
132. Fox, R.W., ve McDonald, A.T., Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley and Sons, Fourth Edition, NewYork.
133. Holman, J.P., Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill Book Company, NewYork.

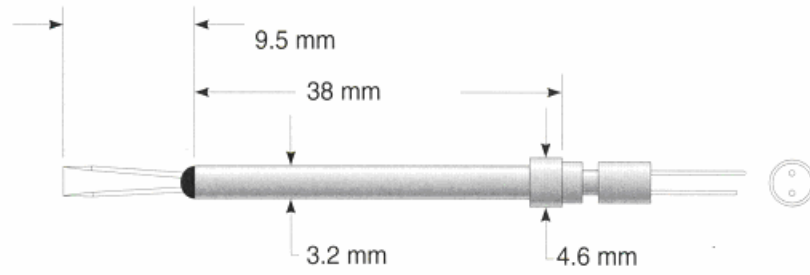
## 8. EKLER

### Ek 1 . Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu

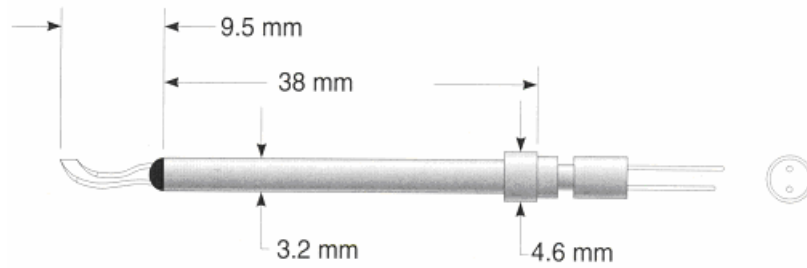
Bu çalışmada IFA100 sabit sıcaklık anemometresi ile kullanılan tek telli kızgın-tel problemlerin ve basınç ölçerlerin kalibrasyonları yapılmıştır.

#### Ek 1.1 . Kızgın Tel Problemlerin Kalibrasyonu

Ortalama hız ve türbülans ölçümlerinde kullanılan T.S.I. Model 1210 ve 1211 kızgın tel problemler Şekil E.1 de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil E.1. Kızgın tel problemler a) Model 1210, b) Model 1211

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



Ek 1'in devamı

Kızgın tel problemlerin kalibrasyonu, anemometrenin köprü çıkış gerilimi ile akış hızı arasındaki ilişki elde edilmektedir. Bunun için bilinen hızlarda anemometrede okunan gerilimler kaydedilmekte ve bu değerleri temsil eden bir denklem oluşturulmaktadır. Doğrusallaştırma olarak da ifade edilen bu işlem için King kanunu olarak bilinen

$$E^2 = A + BU^n \quad (E.1)$$

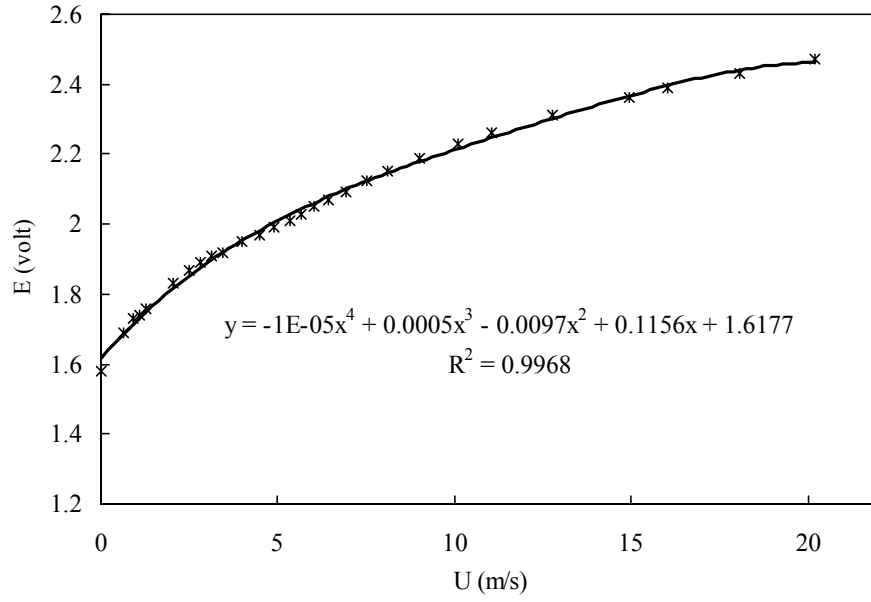
şeklindeki bağıntı kullanılmaktadır. Burada; E, köprü çıkış gerilimi; U, akış hızı; A, B ve n ise kalibrasyon sabitleridir. Hız ile gerilim arasındaki ilişkiyi ifade eden bir başka yaklaşım da polinom uydurulmasıdır. Bu durumda hız ile gerilim arasında dördüncü dereceden bir polinom elde edilmektedir. Polinom şeklindeki bağıntı, King kanunuyla elde edilen bağıntıdan daha doğru sonuçlar vermektedir [131].

Kalibrasyon işlemi, T.S.I. Model 1125 kalibrasyon cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon cihazı şartlandırma odasının çeşitli basınçları için elde edilen jet hızlarına karşılık gelen anemometre gerilim sinyalleri kaydedilmiştir. Daha sonra bu gerilim ve hız değerlerine göre aşağıdaki şekilde

$$U = A * E^4 + B * E^3 + C * E^2 + D * E + K \quad (E.2)$$

dördüncü dereceden bir polinom oluşturulmuştur. Burada A, B, C, D ve K kalibrasyon sabitleridir. Anemometre köprü çıkış gerilimi ve akış hızına göre çizilen Model 1211 kızgın tel proba ait kalibrasyon eğrisi Şekil E.2 de görülmektedir.

Ek 1'in devamı



Şekil E.2. T.S.I. Model 1211 kızgın tel proba ait kalibrasyon eğrisi

Kalibrasyon ile deney sırasındaki ortam şartları farklı olduğundan, özellikle sıcaklığa bağlı olarak akışkan yoğunluğundaki değişim nedeniyle aynı hız değerlerinde farklı gerilimler elde edilmektedir. Bu hatanın düzeltilmesi için, sensör çalışma sıcaklığı kalibrasyonda ve deneylerde aynı tutulmakta ve okunan gerilimler üzerinden düzeltme işlemi yapılmaktadır. Bu şekilde okunan gerilimin düzeltilmesi için,

$$E_{\text{corr}} = \sqrt{\frac{T_w - T_o}{T_w - T_a}} \cdot E_a \quad (\text{E.3})$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Burada,  $T_w$  ve  $T_o$ , sensör çalışma sıcaklığını ve kalibrasyon sırasındaki ortam sıcaklığını,  $T_a$  ve  $E_a$  ise deney sırasındaki ortam sıcaklığı ve okunan gerilimleri göstermektedir. Elde edilen düzeltilmiş gerilimlerden

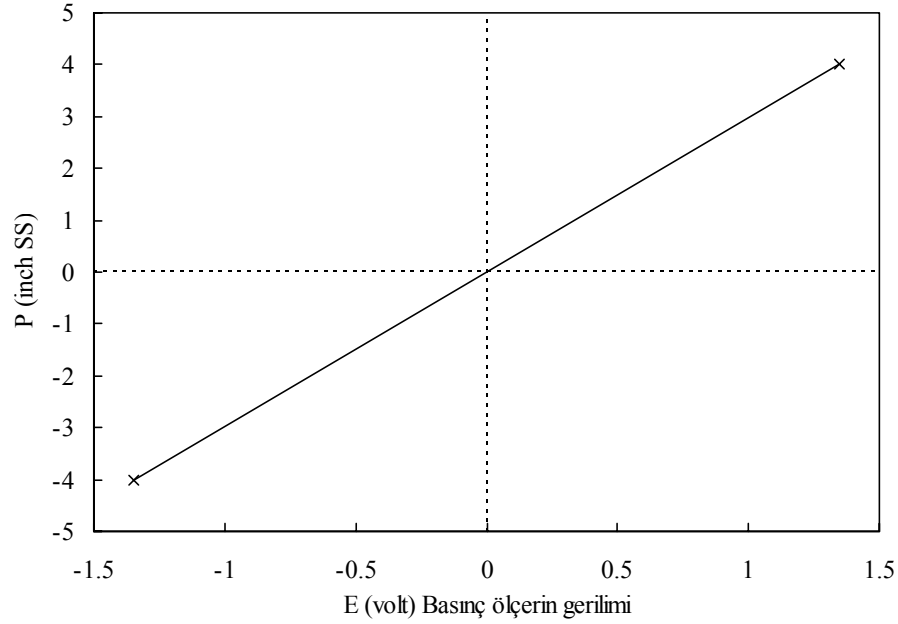
$$U = A * E_{\text{corr}}^4 + B * E_{\text{corr}}^3 + C * E_{\text{corr}}^2 + D * E_{\text{corr}} + K \quad (\text{E.4})$$

bağıntısıyla hızlar belirlenmektedir.

Ek 1'in devamı

### Ek 1.2. Basınç Ölçerlerin Kalibrasyonu

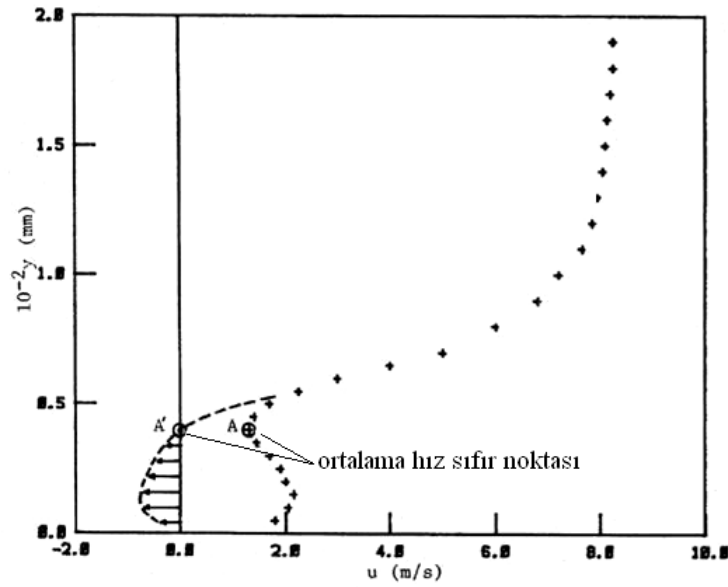
Deneylerde kullanılan Setra 239 model ve Modus T30 model basınç ölçerlerin kalibrasyonu için T.S.I. Model 1125 kalibrasyon cihazından yararlanılmıştır. Basınç ölçerlerin çıkışları doğrudan veri kazanım kartına bağlandığında ölçüm sinyallerinde gürültü oluşmaktadır. Bu nedenle basınç ölçerlerin çıkışları önce T.S.I. Model 157 sinyal şartlandırıcısına bağlanmış, daha sonra şartlandırılmış sinyaller bilgisayara aktarılmıştır. Deneyler süresince belirli aralıklarla tekrarlanan bu kalibrasyon işleminde ThermalPro paket programı kullanılmıştır. Kalibrasyon işleminde basınç ölçerlere, sınır basınç değerlerinde akış uygulanmış ve basınç ölçerlerden elde edilen gerilim sinyalleri paket program tarafından kaydedilmiştir. Daha sonra bu değerlere Şekil E.3 de görüldüğü gibi, program tarafından doğrusal formda bir eğri uydurulmuştur.



Şekil E.3. Setra 239 model basınç ölçerlerin kalibrasyon eğrisi

## Ek 2. Kızgın Tel ile Hız Ölçüm Prensibi

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



Şekil E.4. Ters akış bölgesinde anemometre hız çıkışı

Şekil E.4 de görülen ve Atlı [125] tarafından uygulanan yöntemde, ortalama hızın minimumdan geçtiği A noktası, ortalama hız sıfır noktasına karşılık gelmektedir. A noktası ve cidar arasındaki noktalarda, anemometrenin ortalama hız çıkışı da girdaplı bölgedeki ters akışı ifade etmektedir. Bu nedenle, bu noktalarındaki ortalama hız değerlerinin negatif olarak dikkate alınması ve hız profillerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Çalışmada, ters akış bölgelerinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen ortalama hız profilleri, bu yöntemle düzeltilmiştir.

### Ek 3. Belirsizlik Analizi

Deneysel büyüklüklerin ölçümü sırasında, deney düzeneğinden ve ölçüm sistemlerinden kaynaklanan çeşitli hatalar meydana gelebilmektedir. Bu hataların hangi düzeyde olduklarının belirlenmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yapılan çalışmanın geçerliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Bir büyüklüğün aynı cihazlarla, farklı düzeneklerde ölçülmesi sırasında ölçümlerde kalibrasyon, çevre şartları ve insan faktörleri nedeniyle farklar oluşmaktadır. Tekrarlanmış deneyler sonucunda, bu farkların belli bir aralıkta olması beklenmekte, bu deneysel belirsizlik olarak adlandırılmaktadır.

Hata ve belirsizlik kavramları arasında anlam farkı vardır. Belirsizlik, bir dizi deney için söz konusu olmakta ve verilen bir güven aralığı içerisinde ölçümün sahip olabileceği hatayı temsil etmektedir. Hata ise, tek bir gözleme dayanmakta ve gerçek ve düzeltilmiş değer arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Hata, tek bir gözlem için sabit bir değer almaktadır.

Deneysel çalışmalarda ortaya çıkan hatalar, araştırmacılar tarafından yapılan hatalar dışında temelde iki tiptedir. Bu hataların birincisi, tekrarlanan ölçümlerde aynı miktarda hataya sebep olan sistematik hatalar, ikincisi ise rasgele oluşan ve her bir ölçüm için farklı olmaları nedeniyle ortadan kaldırılamayan düzensiz hatalardır. Belirsizlik analizinin esası, deneysel sonuçlardaki muhtemel rasgele hataların belirlenmesine dayanmaktadır [132].

Bu çalışmada, hem ölçülen hem de hesaplanan parametrelere ait belirsizlik değerlerini elde etmek için Holman [133] tarafından önerilen hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre, A olarak tanımlanan herhangi bir sonuç değeri, kendisinin belirlenebilmesi için gerekli her bir değişkenin fonksiyonu cinsinden

$$A=A(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (E.5)$$

olarak ifade edilmektedir.  $x_i$  parametrelerindeki belirsizlik etkisini ortaya koymak için A özelliği üzerinden

$$\Delta A^2 = \frac{\partial A^2}{\partial x_1} \Delta x_1^2 + \frac{\partial A^2}{\partial x_2} \Delta x_2^2 + \dots + \frac{\partial A^2}{\partial x_n} \Delta x_n^2 \quad (E.6)$$

Ek 3'ün devamı

şeklinde matematiksel olarak ifade edilmektedir. Belirsizlik için türetilmiş ifadenin genel formu, ölçüm parametrelerinin fonksiyonu olarak

$$\delta_A = \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial x_1} \delta_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial x_2} \delta_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial A}{\partial x_n} \delta_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.7})$$

şeklinde belirlenmektedir. Bu bağıntıda yer alan  $\delta_i$ 'ler her bir bağımsız değişkene ait belirsizliği ifade etmektedir. A sonucuna ait toplam belirsizlik  $\delta_A/A$  şeklinde yüzdelik olarak ifade edilmektedir. Bu durumda eşitlik,

$$\frac{\delta_A}{A} = \left[ \left( \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x_1} \delta_1 \right)^2 + \left( \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x_2} \delta_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x_n} \delta_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.8})$$

halini almaktadır.  $u$ , yüzde olarak belirsizliği göstermek üzere,  $u_A = \delta_A / A$  ve  $u_i = \delta_i / x_i$  dönüşümü ile yüzde olarak toplam belirsizlik aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$u_A = \left[ \left( \frac{x_1}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x_1} \cdot u_1 \right)^2 + \left( \frac{x_2}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x_2} \cdot u_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x_n} \cdot u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.9})$$

Bu çalışma kapsamında hız ve basınç ölçümleri gerçekleştirilmiş, bu ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanan Re sayısı ve  $C_p$  basınç katsayısı gibi boyutsuz sayılar ve bunların bağlı olduğu bağımsız değişkenler için belirsizlik değerleri elde edilmiştir.

### Ek 3.1. Boyutsuz Sayıların Belirsizlik Değerleri

$Re = \frac{UH}{\nu}$  şeklinde tanımlanan Re sayısı için belirsizlik değeri  $u_{Re}$ , U, H ve  $\nu$  bağımsız değişkenleri cinsinden (E.9) eşitliği kullanılarak belirlenmektedir.

Ek 3'ün devamı

$$u_{\text{Re}} = \left[ \left( \frac{U}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial \text{Re}}{\partial U} u_U \right)^2 + \left( \frac{H}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial \text{Re}}{\partial H} u_H \right)^2 + \left( \frac{v}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial \text{Re}}{\partial v} u_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.10})$$

Buradaki her bir bağımsız değişkene ait türev değerleri olan,

$$\frac{\partial \text{Re}}{\partial U} = \frac{H}{v}, \quad \frac{\partial \text{Re}}{\partial H} = \frac{U}{v} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial \text{Re}}{\partial v} = (-1) \frac{UH}{v^2} \quad \text{ifadeleri}$$

(E.10) eşitliğinde yerine yazıldığında, Re sayısına ait toplam belirsizlik  $u_{\text{Re}}$ ,

$$u_{\text{Re}} = \left[ (u_U)^2 + (u_H)^2 + ((-1) \cdot u_v)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.11})$$

olarak bulunur.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho U^2} \text{ şeklinde tanımlanan basınç katsayısına ait belirsizlik, } \Delta P, \rho \text{ ve } U$$

bağımsız değişkenlerine bağlıdır. Basınç katsayısının bu değişkenlere göre türevleri olan,

$$\frac{\partial C_p}{\partial (\Delta P)} = \frac{1}{\frac{1}{2} \rho U^2}, \quad \frac{\partial C_p}{\partial \rho} = \frac{(-1) \Delta P}{\frac{1}{2} U^2} \cdot \rho^{-2} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial C_p}{\partial U} = \frac{(-2) \Delta P}{\frac{1}{2} \rho} U^{-3} \quad \text{ifadeleri}$$

(E.9) eşitliğinde yerlerine yazıldığında, basınç katsayısına ait belirsizlik  $u_{C_p}$ ,

$$u_{C_p} = \left[ (u_{\Delta P})^2 + ((-1) \cdot u_\rho)^2 + ((-2) \cdot u_U)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.12})$$

şeklinde elde edilir.

Kullanılan boyutsuz sayıların belirsizlik değerlerini bulabilmek için eşitliklerde bulunan her bir bağımsız değişkene ait belirsizliklerin hesaplanması gerekmektedir. Bu bağımsız değişkenlere ait belirsizlik değerlerinin bulunmasında, kullanılan ölçü aletlerine ait kullanım kılavuzlarında yer alan hata değerleri ve benzer çalışmalardaki [106], [127], [131], [132], [133], ilgili değişkenlere ait belirsizlik değerleri kullanılmıştır.

Ek 3'ün devamı

### Ek 3.2. Bağımsız Değişkenlere Ait Belirsizlik Değerleri

#### Ek 3.2.1. Hız Ölçümlerinde Oluşabilecek Belirsizlikler

Bu kısımda, A/D dönüştürücü kart ve bilgisayar programı kullanarak tek-telli standart bir prob ile sabit sıcaklık anemometresinden hız ölçümünde oluşabilecek toplam belirsizlik elde edilmiştir. Her bir hız değerindeki belirsizlik, ölçüm aletleri, kalibrasyon işlemi ve ölçüm sırasındaki deneysel şartlara göre oluşmaktadır ve genelde standart belirsizliktir [131]. Hız ölçümündeki toplam belirsizlik, aşağıda maddeler halinde yüzde olarak belirtilen ve hız ölçümünde etkili olan parametrelerin her birinin belirsizlik katkılarının toplamı ile oluşmaktadır. Bu belirsizlikler,

- 1- Gürültü, tekrarlanabilirlik ve frekans algılanmasında oluşan anemometreye ait belirsizlik ( $u_1 \cong \% 0.5$ ),
  - 2 - Kalibrasyon cihazından ve kalibrasyon işleminden oluşan belirsizlik ( $u_2 \cong \% 1$ ),
  - 3 - Lineerleştirme veya kalibrasyon eğrisi nedeniyle oluşan belirsizlik ( $u_3 \cong \% 0.4$ ),
  - 4 - 15 m/s'lik hızda,  $\partial U/\partial E = 36$  m/s/volt'luk değişim için 10 volt aralığında 12 bit'lik A/D dönüştürücü kartın çözünürlüğünden oluşan belirsizlik ( $u_4 \cong \% 0.34$ ),
  - 5 - Prob pozisyonundaki 1°'lik hata nedeniyle hızda oluşan belirsizlik ( $u_5 \cong \% 0.016$ ),
  - 6 - Prob çalışma sıcaklığında, 1°C 'lik sıcaklık değişimi nedeniyle hızda oluşan belirsizlik ( $u_6 \cong \% 1.5$ ),
  - 7 - Hava yoğunluğunda 1°C'lik sıcaklık değişimi nedeniyle hızda oluşan belirsizlik ( $u_7 \cong \% 0.4$ ),
  - 8 - Ortam basıncında 10kPa'lık değişim nedeniyle hızda oluşan belirsizlik ( $u_8 \cong \% 0.6$ ),
- şeklinde dir. Bu belirsizlik değerleri dikkate alınarak, ortalama hız ölçümünde oluşan toplam belirsizlik,

$$u_U = [u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_8^2]^{1/2} \cong \% 2.07 \text{ olarak elde edilmiştir.}$$

Türbülans hızında oluşan belirsizlik ise, % 4 mertebesinde dir [131].



Ek 3'ün devamı

### Ek 3.2.2. Model Boyutlarında Oluşan Belirsizlik;

Model yüksekliğinde 0.5 mm'lik hata nedeniyle 40 mm yüksekliğe sahip bina modelindeki belirsizlik,

$u_H \cong \% 0.7$  olarak belirlenmiştir.

### Ek 3.2.3. Havanın Kinematik Viskozitesinde Oluşan Belirsizlik

Havanın kinematik viskozitesi sıcaklığa bağlıdır ve aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$u_v = \frac{\delta v}{v} = \frac{T}{v} \cdot \frac{dv}{dT} \cdot \frac{\delta T}{T} \quad (\text{E.13})$$

Ortam sıcaklığında, 1°C'lik değişim durumunda 20°C deki havanın kinematik viskozitesinde oluşan sıcaklığa bağlı değişim,

$$\frac{dv}{dT} \approx \frac{\Delta v}{\Delta T} = \frac{v(20.5^\circ\text{C}) - v(19.5^\circ\text{C})}{(20.5 - 19.5)^\circ\text{C}} \quad (\text{E.14})$$

bağıntısı ile hesaplanmakta ve  $u_v \cong \% 0.6$  olmaktadır.

### Ek 3.2.4. Basınç Ölçümlerinde Oluşan Belirsizlik

Basınç ölçümlerinde oluşan toplam belirsizlik, aşağıda maddeler halinde belirtilen parametrelerin her birinin belirsizliklerinin toplamı ile oluşmaktadır. Bu belirsizlikler,

1 - Basınç ölçerden kaynaklanan toplam belirsizlik ( $u_1 \cong \% 1$ ),

2 - Basınç ölçerin kalibrasyon işleminden kaynaklanan belirsizlik ( $u_2 \cong \% 2.5$ ),

3 - Ortam sıcaklığındaki 2°C'lik değişim nedeniyle basınç ölçerde oluşan belirsizlik ( $u_3 \cong \% 0.1$ ),

4 - 15 mmSS basınçta ve  $\partial P/\partial E = 23$  mmSS/volt'luk değişim için 10 volt aralığındaki 12 bit'lik A/D dönüştürücü kartın çözünürlüğünden oluşan belirsizlik ( $u_4 \cong \% 0.4$ ),

Ek 3'ün devamı

5 - Basınç deliklerinin 0.5 mm hatalı yerleştirilmesi durumunda model yüzeyindeki basınç değişiminde oluşan belirsizlik ( $u_5 \cong \% 2.3$ ) şeklindedir. Bu belirsizlik değerleri dikkate alınarak, ortalama basınç ölçümünde oluşan toplam belirsizlik,

$$u_{\Delta P} = [u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2]^{1/2} \cong \% 3.6$$

olarak elde edilmiştir. Çalkantı basıncında oluşan belirsizlik ise, % 4.6 civarındadır [131].

### **Ek 3.2.5. Havanın yoğunluğunda oluşan belirsizlik**

$$\rho = \rho (P, T) \quad (E.15)$$

ifadesine göre, ortam basıncında ve ortam sıcaklığında sırası ile 100 Pa ve 1°C'lik hata nedeniyle hava yoğunluğunda oluşan belirsizlik,  $u_\rho \cong \% 0.36$  civarında olmaktadır.

Boyutsuz sayıların bağlı olduğu bağımlı değişkenlere (U, H, v,  $\Delta P$  ve  $\rho$ ) ait belirsizlik değerleri belirlendikten sonra, bu değerler C.7 ve C.8 denklemlerinde yerine yazılarak boyutsuz sayılara ait toplam belirsizlikler;

Reynolds sayısı için;  $u_{Re} \cong \% 2.26$ ,

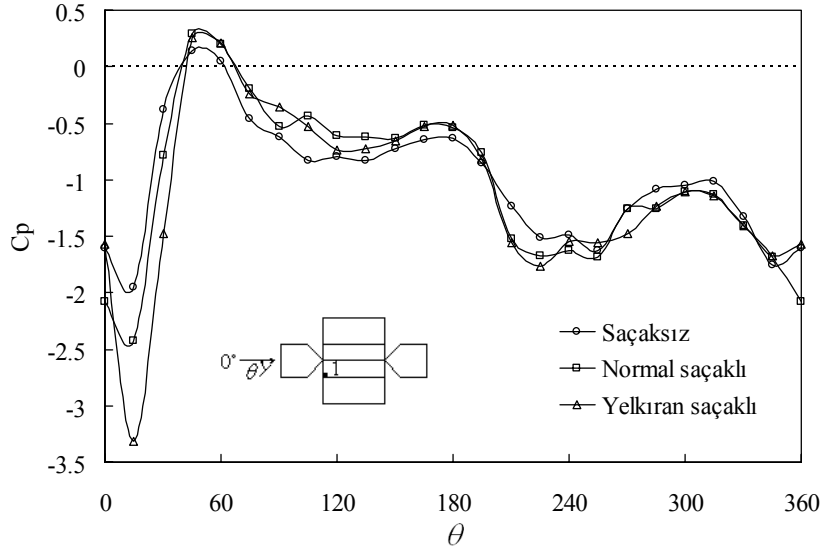
Basınç katsayısı için;  $u_{Cp} \cong \% 5.49$ ,

olarak bulunmuştur.

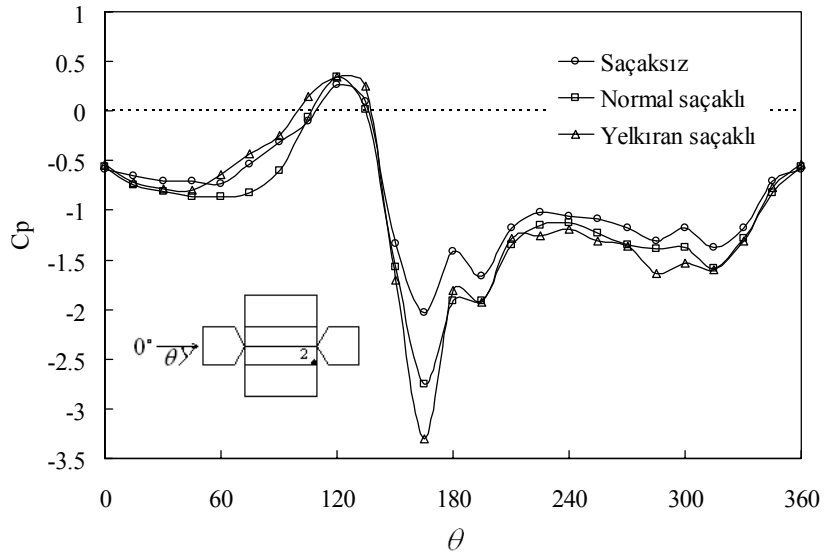
### **Ek 3.3. Ölçümlerin Tekrarlanabilirliği**

Sınır tabaka içerisine yerleştirilen modeller üzerindeki yüzey basınçlarının farklı rüzgar geliş açılarında ölçülmesi, modellerin kendi etraflarında döndürülmesiyle sağlanmıştır. Rüzgar tarafındaki ve arka taraftaki çatı köşelerinde, rüzgar açısına göre ölçülen basınçlar basınç katsayısı cinsinden Şekil E.5'de verilmektedir. Rüzgar açısının 0° den 360° ye kadar değiştirilmesiyle, 1 ve 2 numaralı basınç deliklerinden ölçülen basınçların aynı olduğu anlaşılmaktadır. Aynı basınç dağılımının iki farklı noktada elde edilmesi, yüzey basıncı ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini göstermektedir.

Ek 3'ün devamı



(a) 1 numaralı basınç deliği



(b) 2 numaralı basınç deliği

Şekil E.5. Basınç ölçümlerin tekrarlanabilirliği

#### Ek 4. Kros Korelasyon İçin MATLAB Yazılımı

```

for i=1:29
    if (i<10)
        file=(['ROOF',num2str(i),'.dat']);
        data=load(file);
        P=8.441.*(data(:,1).^4)-53.035.*(data(:,1).^3)+138.66.*(data(:,1).^2)-
171.27.*(data(:,1))+81.192;
        Q=17.521.*(data(:,2).^4)-126.04.*(data(:,2).^3)+353.36.*(data(:,2).^2)-
448.89.*(data(:,2))+215.11;
        PM=mean(P);
        QM=mean(Q);
        e=ones(8192,1);
        PC=P-e.*PM;
        QC=Q-e.*QM;
        N=8192;
        PP=PC;
        QQ=QC;
        CCr=0
    for j=1:N
        N2=N+1-j;
        jj=j-1;
        C0=0;
        C2=0;
        C3=0;
        for i=1:N2
            C0=C0+PP(i)*QQ(i+jj);
        if j==1
            C2=C2+PP(i)^2;
            C3=C3+QQ(i)^2;
            Cor2=(abs(C2/N2*C3/N2))^0.5;
        end
        end
        Cor(j)=C0/N2;
        CCr(j)=Cor(j)/Cor2;
        end
        figure
        grid on
        plot(CCr,'b-')
        xlabel ('Time (seconds)','FontSize',12)
        ylabel ('Cross Correlation','FontSize',12)

        final(i,1)=max(CCr)
    else
        file=(['ROOF',num2str(i),'.dat']);
        data=load(file);
        P=8.441.*(data(:,1).^4)-53.035.*(data(:,1).^3)+138.66.*(data(:,1).^2)-
171.27.*(data(:,1))+81.192;

```

Ek 4'ün devamı

```

Q=17.521.*(data(:,2).^4)-126.04.*(data(:,2).^3)+353.36.*(data(:,2).^2)-
448.89.*(data(:,2))+215.11;
PM=mean(P);
QM=mean(Q);
e=ones(8192,1);
PC=P-e.*PM;
QC=Q-e.*QM;
N=8192;
PP=PC;
QQ=QC;
CCr=0
for j=1:N
    N2=N+1-j;
    jj=j-1;
    C0=0;
    C2=0;
    C3=0;
    for i=1:N2
        C0=C0+PP(i)*QQ(i+jj);
    if j==1
        C2=C2+PP(i)^2;
        C3=C3+QQ(i)^2;
        Cor2=(abs(C2/N2*C3/N2))^0.5;
    end
    end
    Cor(j)=C0/N2;
    CCr(j)=Cor(j)/Cor2;
    end
figure
grid on
plot(CCr,'b-')
xlabel ('Time (seconds)','FontSize',12)
ylabel ('Cross Correlation','FontSize',12)
final(i,1)=max(CCr)

end
end

```

## ÖZGEÇMİŞ

Yücel ÖZMEN, 1976 yılında Trabzon'da doğdu. 1993 yılında Trabzon Teknik Lisesi Bilgisayar Bölümü'nden, 1997 yılında K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 1998 yılında aynı bölümde Termodinamik Ana Bilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2000 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamlayarak Yüksek Mühendis unvanını aldı. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. 2001 yılında "TÜBİTAK-Bilim Adamı Yetiştirme Grubu"ndan "Yurtiçi Doktora Bursu" kazandı. 2002 yılında Doktora yeterlilik sınavına girdi. 2002-2003 döneminde NATO'nun "Post Graduate Diploma Course" bursunu kazanarak, 1 yıl süreyle "von Karman Institute for Fluid Dynamics (VKI)" de araştırmacı olarak çalıştı. 2003 yılında bu enstitüden "Post Graduate Diploma" almaya hak kazandı. 2004 yılında "Black Sea Universities Network (BSUN)" den "International Summer School" bursu kazandı. 2005 yılında "European Atelier for Engineering and Computational Science (EUA4X)" den "Marie Curie Training Course" bursu kazandı. 2005 yılı güz döneminde Uzman kadrosuna atandı. Halen K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Ana Bilim Dalı'nda Uzman olarak çalışmakta olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.